

Università degli Studi di Napoli “Parthenope”



Dottorato di Ricerca in Scienze Geodetiche e Topografiche XIX Ciclo

Nuovi Sensori Digitali Aviotrasportati



Tesi di Dottorato dell'ing. Davide Emmolo

Tutor: prof. ing. Benedetto Villa

Coordinatore: prof. Raffaele Santamaria



Università degli Studi di Palermo
Dipartimento di Rappresentazione



Per questo lavoro di studio e di ricerca ho avuto il supporto di molte persone che desidero ringraziare

Si ringraziano:

la **Compagnia Generale Riprese Aeree** di Parma per avere fornito le scene ADS40
la **Menci Software** per avere messo gratuitamente a disposizione il loro software ZMap

il mio tutor di Dottorato, Prof. Ing. **Benedetto Villa** cui va tutta la mia stima

il dott. **Mauro Lo Brutto** per i preziosi consigli.

un ringraziamento particolare va ai miei colleghi e amici
Salvatore D'Amelio e **Piero Orlando**

Francesca per il supporto tecnico e morale e principalmente per la pazienza

Desidero inoltre ringraziare tutte le persone che non sono qui citate e che a vario titolo hanno contribuito allo sviluppo di questa Tesi di Dottorato.

DAVIDE EMMOLO

Introduzione	4
CAPITOLO 1	5
Lo sviluppo della fotogrammetria	5
1.1 Cos'è la fotogrammetria ?	5
1.2 La fotogrammetria analogica.....	5
1.3 L'impatto della rivoluzione elettronica: la nascita della fotogrammetria analitica.	8
1.4 Il passaggio dalla fotogrammetria analitica alla fotogrammetria digitale.....	10
1.4.1 Presa fotogrammetrica con camere analogiche e gestione dei dati su stazioni fotogrammetriche digitali.....	10
1.4.2 Presa fotogrammetrica diretta in forma digitale	12
1.5 Il futuro della fotogrammetria aerea.....	13
Bibliografia.....	14
CAPITOLO 2	15
Concetti di base sui sensori CCD	15
2.1 Introduzione.....	15
2.2 La nascita del CCD	16
2.3 CCD e sue caratteristiche.....	16
2.3.1 Generazione delle cariche	17
2.3.2 Raccolta e trasferimento delle cariche.....	19
2.3.3 Estrazione delle cariche.....	20
2.4 I filtri	20
2.5 Sensori CCD lineari	22
Bibliografia.....	25
CAPITOLO 3	26
Sensori Digitali Aviotrasportati.....	26
3.1 Classificazione dei sensori digitali aviotrasportati	26
3.2 Le tecnologie a confronto	27
3.3 Sensori digitali aviotrasportati presenti sul mercato	31
3.3.1 Sensori lineari a tre linee. LH System (Leica) ADS40. Primi cenni sul sensore.....	31
3.3.2 Sensori lineari a tre linee. Starlabo Corp. Serie StarImager. 34	
3.3.3 Sensori lineari a tre linee. Wehrli Ass. 3-DAS-1 Scanner....	37
3.3.4 Sensori iperpettrali. Il sensore ASI/HySpex	38
3.3.5 Camere a sensore matriciale di grande formato. Vexcel UltraCamD™ Digital Aerial Camera	39
3.3.6 Camere a sensore matriciale di grande formato. Z/I Imaging DMC.....	41
3.3.7 Camere a sensore matriciale di grande formato. DIMAC Systems	43
CAPITOLO 4	47
Il sensore Leica ADS40 – la storia e le fasi di sviluppo	47
4.1 Storia e sviluppo del sensore	47
4.2 I primi test di volo	49
4.3 Test su radiometria e <i>range</i> dinamico	52
4.4 Test sui dati di assetto e sul sensore IMU.....	55
4.5 Test sulla generazione di Modelli Digitali del Terreno (DEM) .	55
Bibliografia.....	56

CAPITOLO 5.....	57
Il sensore Leica ADS40 – principi progettuali.....	57
5.1 Introduzione.....	57
5.2 La testa del sensore SH40	58
5.3 Processamento del segnale CCD. Il modulo SPM.....	66
5.4 la memoria di massa MM40	67
5.5 L'unità di controllo CU40	68
5.6 il sistema di posizionamento e di assetto	68
5.7 Interfaccia per il pilota e l'operatore.....	71
5.8 I/O Box	71
5.9 FCMS – Il sistema di gestione del volo e del sensore	71
5.10 Data log.....	73
5.11 Il sensore ADS40 di seconda generazione.....	74
Bibliografia.....	78
CAPITOLO 6.....	80
Il Processo fotogrammetrico -dalla calibrazione del sensore alle ortofoto.....	80
6.1 Introduzione.....	80
6.2 Calibrazione del sensore ADS40	80
6.2.1 Calibrazione geometrica.....	81
6.2.2 Calibrazione radiometrica	86
6.3 La missione, il volo e la presa.....	88
6.4 Operazioni di pre-processing. Il software GPRO della Leica ...	89
6.5 Gestione dei dati GPS/IMU. Il software Applanix PosPac	92
6.6 Modelli Matematici per sensori lineari a tre linee (TLS). Trattazione Generale	96
6.6.1 Georeferenziazione diretta	96
6.6.2 Georeferenziazione indiretta	97
6.6.3 Triangolazione delle immagini ADS40. Il modello matematico.	97
6.7 Ricerca automatica dei punti di legame (Tie Points)	107
6.8 Estrazione automatica di Modelli Digitali del Terreno (DSM)	109
Bibliografia Calibrazione	109
Bibliografia Triangolazione.....	110
Bibliografia Modellistica	110
Bibliografia DEM.....	110
CAPITOLO 7.....	112
La ricerca sulle scene ADS40.....	112
7.1 I dati della ricerca.....	112
7.1.1 Il Blocco ADS40/01 – tre scene a livello 1.....	112
7.1.2 Blocco ADS40/01b – tre strisciate a Livello L0 e a Livello L1.....	118
7.3 SO CET SET - Import dei dati.....	121
7.4 Estrazione automatica di Modelli Digitali del Terreno	126
7.5 Test sulla accuratezza del Blocco ADS40/01	130
7.6 Funzioni Razionali - ENVI.....	137
7.7 Visione stereoscopica e vettorializzazione con Z-Map	139
7.8 Triangolazione e bundle adjustment – Influenza del numero dei GCP sulla triangolazione. Il principio di funzionamento di OriMa.	140

7.9 File di report di CAP-A	152
7.10 Il canale infrarosso – la calibrazione in radianza al sensore. Il calcolo dell'NDVI.	162
7.11 Un possibile uso del canale infrarosso. Una applicazione (cenni)	168
Bibliografia.....	168

Introduzione

Questa Tesi di Dottorato tratta degli aspetti teorici e applicativi legati alla diffusione dei moderni sensori digitali aviotrasportati. Nell'ultimo quinquennio sono stati fatti molti passi avanti in questo campo. La spinta tecnologica è stata alimentata da due fonti principali: da un lato la ricerca sulle piattaforme aero-spaziali, dall'altro le richieste tecnologiche di un mercato dei prodotti fotogrammetrici sempre più esigente.

L'evoluzione della fotogrammetria è stata segnata da alcuni passi storici fondamentali che possiamo identificare nella nascita della fotogrammetria analogica, nel passaggio dalla fotogrammetria analogica a quella analitica e nell'avvento dell'era digitale.

La fotogrammetria è stata "analogica" dagli inizi del secolo fino agli anni '70. In questo caso il termine riguarda sia la presa che la restituzione: la presa veniva effettuata con particolari camere a lastra o a pellicola e la restituzione veniva condotta su dispositivi opto-meccanici chiamati, appunto, restitutori analogici.

Il ponte di passaggio dalla fotogrammetria analogica a quella analitica è costituito dai cosiddetti restitutori semi-analitici ottenuti aggiungendo una componente elettronica di misura ai tradizionali restitutori analogici.

A metà degli anni '70 lo sviluppo dell'elettronica e dell'informatica interessa pesantemente anche la fotogrammetria: è la nascita della fotogrammetria analitica. Il supporto continua ad essere la tradizionale pellicola da sviluppare su carta o su negativo ma la misura e gli orientamenti sono gestiti da un calcolatore elettronico.

L'era digitale nasce con la diffusione dei sensori CCD e della Computer Grafica. Il CCD segna la nascita degli scanner fotogrammetrici, dispositivi a distorsione controllata capaci di convertire una fotografia in una tabella numerica in cui ad ogni cella è associato un numero digitale proporzionale alla quantità di luce incidente sul foto-rivelatore. Siamo già negli anni '90 e nascono le prime DPW acronimo di *Digital Photogrammetric Workstation*. Si tratta di veri e propri computer equipaggiati con un sistema di visione stereoscopica. E' interessante notare che la fotogrammetria digitale nasce molti anni prima della "acquisizione digitale" delle immagini. Questa affermazione è giustificata dal fatto che la presa continua ad essere analogica e la conversione A/D avviene in una fase posteriore. L'ultimo passo di questo processo è quello raccontato in questa Tesi: in una prima fase si diffondono i sensori digitali satellitari, poi vengono sviluppati sensori digitali da montare su aereo o elicottero. Siamo nel pieno dell'era digitale e la fotogrammetria si avvicina sempre di più ad un'altra disciplina di molto più giovane: il telerilevamento.

CAPITOLO 1

Lo sviluppo della fotogrammetria

1.1 Cos'è la fotogrammetria ?

La fotogrammetria è una tecnica di rilevamento fondata su acquisizioni fotografiche: è nata in Europa a metà del XIX secolo a seguito della invenzione della fotografia.

Il termine fotogrammetria deriva da tre parole greche:

- *φως* che in greco significa luce;
- *γραμμα* significa disegno;
- *μετρον* significa misura.

Si potrebbe definire questa disciplina come “la Scienza o l'Arte che consente di ottenere misure affidabili per mezzo di fotogrammi”.

Una definizione più moderna dovrebbe tenere conto del concetto di *interpretazione*: includere cioè la possibilità di identificare e riconoscere un oggetto su un fotogramma a partire dalla sua immagine fotografica. Nell'ultimo decennio la fotogrammetria si è spinta nel campo di una nuova disciplina: il telerilevamento. Nel telerilevamento l'immagine può essere acquisita non solo attraverso le tradizionali camere (che rappresentano ovviamente un sistema di telerilevamento) ma anche con speciali sensori. Questi sensori acquisiscono spesso in una banda dello spettro elettromagnetico più ampia rispetto allo spettro “visibile”, per questo motivo vengono chiamati sensori *multispettrali*. Le immagini telerilevate consentono, attraverso l'uso di particolari tecniche, di ottenere un insieme molto ampio di prodotti che va dalle carte tematiche ai modelli digitali di elevazione (DEM) e sono utilizzate per svariate applicazioni: agricoltura, gestione forestale, geografia, cartografia e geologia. Con l'introduzione del telerilevamento si potrebbe aggiungere che “la fotogrammetria è la Scienza (l'Arte) e la Tecnologia che consente di ottenere informazioni affidabili su un oggetto fisico e sull'ambiente circostante a partire da un processo di registrazione, di misura e di interpretazione di immagini che rappresentano l'energia radiante dell'oggetto stesso in una prefissata zona dello spettro elettromagnetico”.

1.2 La fotogrammetria analogica

Nei primi anni del 1900 l'industria chimica aveva già capito la portata della neonata fotografia sulle moderne società; questa spinta favorì la produzione di emulsioni pancromatiche e orto-cromatiche disposte su una lastra o su una pellicola. Nel 1892 F. Scholze sviluppò il principio della marca mobile che darà l'avvio alla restituzione stereofotogrammetrica. A cavallo tra i due secoli XVIII e XIX due membri dell'Istituto Geografico di Vienna, A. Von Hubl e E. Von Orel, svilupparono separatamente due strumenti decisivi per il futuro della restituzione fotogrammetrica: lo stereocomparatore e lo stereoautografo. Un altro modello di stereocomparatore venne sviluppato indipendentemente nel 1901 da C. Pulfrich a Jena. Tutti i moderni sistemi fotogrammetrici si basano sul principio della stereofotogrammetria e implementano un sistema di marca mobile.

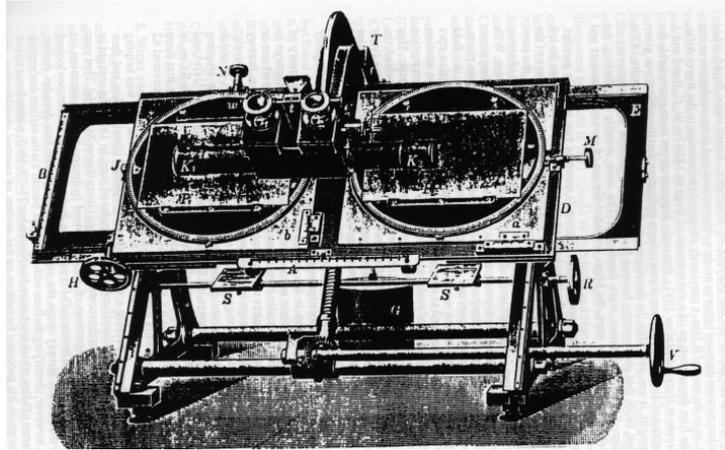


fig. 1.1 – Lo stereocomparatore del Dr. C. Pulfrick (1901)

L'aviazione civile nasce praticamente con l'introduzione dei primi dirigibili agli inizi del '900. Questi mezzi garantivano una considerevole capacità di carico e una accettabile autonomia di volo. Lo Zeppelin e il Parsifal aprirono nuovi orizzonti per le applicazioni di fotogrammetria aerea. Il primo vero volo a motore di un mezzo più pesante dell'aria che la storia possa ricordare, fu quello dei fratelli Wilbur e Orville Wright che il 17 dicembre 1903 dalle dune di Kitty Hawk (Virginia), dopo diversi tentativi, riuscirono a mettere in volo il Flyer 1.

Finita la Guerra, si costituirono le Aeronautiche: il 28 marzo 1923 nacque la Regia Aeronautica. Oltre che per uso bellico, le nuove macchine volanti furono impiegate a scopi commerciali per i voli postali, che affermarono l'importanza di questo nuovo mezzo.

La aviazione a motore nasce praticamente in America ma è in Europa che questa nuova possibilità viene associata alla fotogrammetria. Tra le due Guerre l'Europa necessitava di un sistema veloce per la redazione della nuova cartografia. Questo impulso diede una spinta decisiva allo sviluppo della fotogrammetria aerea su mezzi a motore. Nel 1921 Reinhard Hegershoff sviluppò in Germania il primo plotter analogico universale: l'Autocartograph. Questo strumento utilizzava il principio di osservazione di Porro-Koppe in cui il fotogramma è osservato attraverso un sistema di lenti aventi la stessa distorsione caratteristica della camera di presa adottata. Nel 1926 venne prodotto l'Aerocartograph, uno strumento più leggero e versatile che offriva maggiori possibilità di controllo e di auto-triangolazione. E' del '23 la produzione dello Stereoplanigraph della Zeiss, uno strumento basato sulla proiezione ottica diretta. L'invenzione dello strumento è da attribuire a Walter Bauersfeld ma molti dei miglioramenti dello strumento vennero condotti sotto la supervisione di Otto Von Gruber. Nel 1965, 40 anni dopo, erano operativi in tutto il mondo più di 250 di questi strumenti. Un discendente semplificato dello stereo-planigrafo di Zess fu il Multiplex: un piccolo plotter portatile utilizzabile con strisciate continue di fotogrammi nadirale sovrapposti. Questo strumento, costruito anche in Inghilterra e negli Stati Uniti, si diffuse moltissimo nel campo civile e militare divenendo il dispositivo fotogrammetrico più venduto di tutti i tempi.

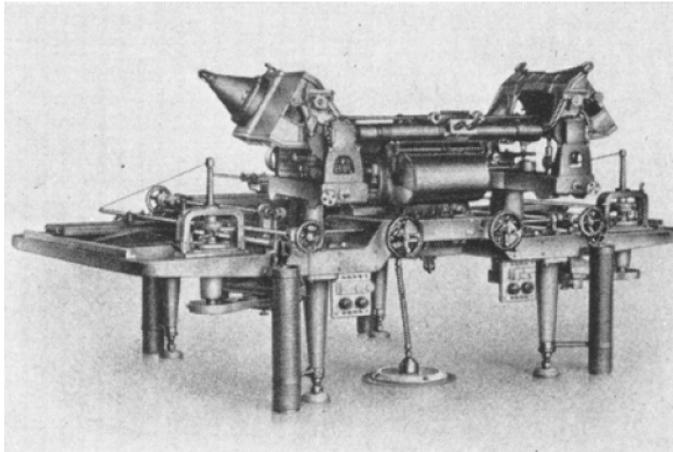


fig. 1.2 – L'Autocartograph

A partire dagli anni '20 un geniale inventore svizzero, Heinrich Wild, sviluppò alcuni modelli di una serie di strumenti chiamati Autograph. Nel 1968 il numero di questi strumenti in circolazione superava il migliaio.

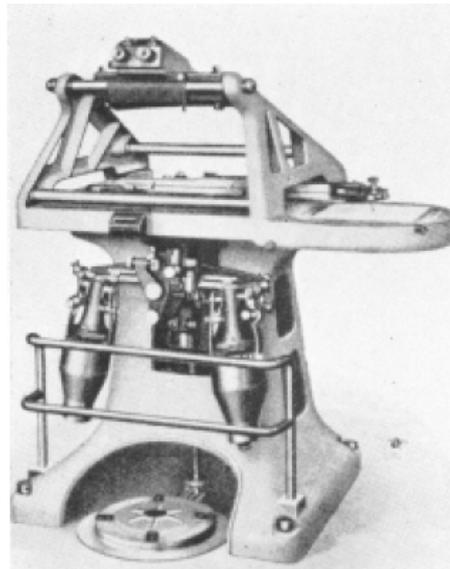


fig. 1.3 – Il Multiplex

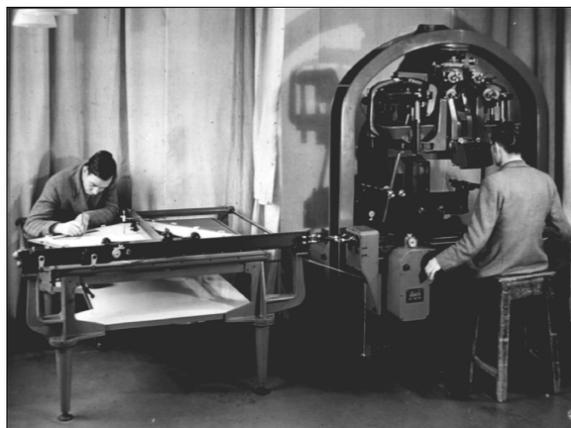


fig. 1.4 – l'Autograph Wild A5

Un'altra azienda svizzera, la Kern, sviluppò un restitutore a proiezione meccanica con sistema ottico stazionario chiamato PG-2. Nel 1938, a cavallo tra le due Guerre, si tenne a Roma il 5° Congresso Internazionale di Fotogrammetria. Lo spirito di cooperazione visto a Roma velocemente svanì a causa dell'inasprimento dei rapporti diplomatici tra le Nazioni che, a breve, avrebbe originato la Seconda Guerra Mondiale. Fu proprio la guerra a dare una ulteriore spinta tecnologica alla fotogrammetria tanto che la foto-interpretazione, metodologia praticamente dimenticata nel ventennio precedente, venne eletta al ruolo di arma tattica. Alla fine della guerra, la distruzione delle fabbriche costituì uno dei motivi principali della inattività nel campo degli strumenti ottico-meccanici per fotogrammetria. Dopo poco tempo, a pace fatta, le fabbriche in Europa e in particolare in Gran Bretagna ripresero la produzione ma l'epicentro degli sviluppi nella strumentazione fotogrammetrica si spostò in Nord America. Era alle porte lo sviluppo dei primi componenti elettronici che avrebbe rivoluzionato il sistema di misura dei restitutori e aperto le porte alla produzione di strumenti analitici.

1.3 L'impatto della rivoluzione elettronica: la nascita della fotogrammetria analitica.

La fotogrammetria analitica opera misurando direttamente sui fotogrammi la differente posizione delle immagini di uno stesso punto e, con sole operazioni di calcolo, determina la posizione spaziale del punto cioè le sue coordinate X, Y e Z. Questo approccio non è stato possibile prima dell'avvento dei primi calcolatori elettronici (anni '50) ma le basi teoriche e concettuali erano state gettate molto tempo prima. Nel 1759 J. H. Lambert pubblica la teoria della prospettiva "Frei Perspective": sono i principi della prospettiva inversa e dell'intersezione spaziale di raggi coniugati sui quali si basa la fotogrammetria. All'inizio del XX secolo S. Finsterwalder stabilisce i fondamenti della fotogrammetria analitica. Il padre di tutti i restitutori analitici è però uno strumento analogico: il primo stereo-comparatore della Zeiss di Jena progettato da Carl Pulfrich. Con questo strumento rivoluzionario, nato per applicazioni di fotogrammetria terrestre, era possibile condurre misure relativamente accurate delle coordinate immagine degli oggetti. Nel 1932 Otto Von Gruber sviluppò le equazioni di collinearità che costituiscono il legame tra coordinate immagine e coordinate oggetto e sono quindi alla base della fotogrammetria analitica. Von Gruber stesso non credeva però nell'approccio analitico al problema della restituzione e arrivò a dichiarare che questo era una vera e propria perdita di tempo di minore importanza per la disciplina. Ovviamente non poteva immaginare le capacità di calcolo raggiungibili con i futuri calcolatori. Negli anni a venire decine di studiosi definirono con accuratezza tutti i fondamenti teorici della fotogrammetria analitica. Molte furono le applicazioni di fotogrammetria analitica con misura analogica delle coordinate lastra e calcolo manuale delle coordinate oggetto. Mancava ancora un sistema efficace, che non fosse manuale, per la misura delle coordinate immagine sui fotogrammi e il calcolo automatico delle coordinate terreno. Risalgono alla fine degli anni '50 le prime applicazioni di fotogrammetria analitica assistita da un calcolatore: nel 1958 il finlandese-canadese U.V. Helava inventa il restitutore analitico costruito poi (nel '63) dalla OMI, (Ottico Meccanica

Italiana), fabbrica italiana fondata da Nistri e Parenti. Nel 1980 scaduto il brevetto Helava, ciascuna casa costruttrice produce la propria famiglia di restitutori analitici: la Zeiss costruisce i Planicomp, la Wild lo AC1 Aviolyt, e la Kern il DSR. Nella seconda metà degli anni '70 la Galileo introdusse sul mercato il famoso DS, acronimo di Digital Stereocartograph.



fig. 1.5 – Restitutori analitico Zeiss Planicomp P3



fig. 1.6 – Restitutore analitico Wild Aviolyt AC3



fig. 1.7 – Restitutore analitico Kern DSR

1.4 Il passaggio dalla fotogrammetria analitica alla fotogrammetria digitale

La storia della fotogrammetria cammina di pari passo con l'evoluzione dei sistemi elettronici di calcolo e di immagazzinamento dei dati. L'ultimo decennio ha assistito ad uno sviluppo esponenziale della potenza dei calcolatori elettronici e della *Computer Grafica*. Il maggiore problema della restituzione analitica consiste nel fatto che le immagini continuano ad essere gestite in forma analogica.

Nella fotogrammetria digitale si sono susseguite due diverse fasi:

- fase 1: presa fotogrammetrica con camere analogiche (metriche) e gestione informatica del dato tramite digitalizzazione attraverso scanner fotogrammetrici;
- fase 2: presa fotogrammetrica diretta in forma digitale con sensori CCD. Lo sviluppo di questa fase nel campo della fotogrammetria terrestre è stato ovviamente favorito dalla enorme diffusione delle camere digitali amatoriali e dalla conseguente produzione di camere digitali (metriche e semimetriche) per fotogrammetria (Rollei GmbH, etc...). Da circa un quinquennio, con la introduzione sul mercato dei sensori digitali aviotrasportati, la presa fotogrammetrica in formato digitale ha interessato anche la fotogrammetria aerea.

Le acquisizioni da piattaforma satellitare (Landsat, Spot, Ikonos e QuickBird, etc...), di molto antecedenti ai sensori digitali aviotrasportati, verranno trattati a parte.

1.4.1 Presa fotogrammetrica con camere analogiche e gestione dei dati su stazioni fotogrammetriche digitali

La nascita e lo sviluppo della *Computer Grafica* avvenuta a partire dagli anni '80 ha gettato le basi per la nascita della fotogrammetria digitale. In questa branca dell'informatica è possibile gestire e visualizzare fotogrammi sotto forma di immagini raster cioè sotto forma di matrici numeriche multilivello in cui il numero associato ad ogni cella, detta pixel, rappresenta l'intensità di colore con una prefissata risoluzione radiometrica. La nascita del CCD ha contribuito alla produzione di dispositivi di scansione necessari a convertire una fotografia tradizionale in una immagine raster. Gli scanner per applicazioni fotogrammetriche presentano caratteristiche tecniche, costruttive abbastanza diverse rispetto a quelli indirizzati all'utenza generalizzata che a seguire riassumiamo:

- sistema ottico a distorsione controllata (accuratezza geometrica intorno a 2 micron);
- elevata risoluzione geometrica (fino a 5000 dpi e oltre) ;
- elevata risoluzione radiometrica (fino a 16 bit per canale equivalenti a 65535 livelli di colore);
- area utile compatibile con il formato dei fotogrammi (23 cm x 23 cm) e/o con i rulli di pellicola negativa.

Queste caratteristiche rendono il prezzo di questi prodotti centinaia di volte più elevato di quello degli scanner della fascia desktop.



fig. 1.8 – Scanner fotogrammetrico con il supporto (a destra) per i rulli di pellicola negativa

Acquisito il dato in forma numerica tutte le fasi tradizionali della fotogrammetria analitica (inserimento dei dati della camera, orientamento interno, collimazione dei punti di legame, di appoggio e di controllo, triangolazione aerea) si ripetono nelle DPW (acronimo di *Digital Photogrammetric Workstation*) che sono epigone dei vecchi restitutori. In questi dispositivi è possibile gestire la visione stereoscopica attraverso una serie di sistemi brevettati (occhiali passivi e attivi, schermi polarizzati, doppio monitor etc...).

Un ulteriore passo avanti è stato fatto per la ricerca e la collimazione dei punti di legame con i processi di autocorrelazione. Nelle DPW sono implementati algoritmi di ricerca che consentono di determinare in modo automatico o semi-automatico un prefissato numero di punti di legame secondo un prefissato *pattern*. Questa procedura aumenta notevolmente la velocità di gestione dei dati fotogrammetrici poiché influenza la triangolazione aerea dei blocchi.



fig. 1.9 – Moderna *workstation* fotogrammetrica con doppio monitor e occhiali passivi

1.4.2 Presa fotogrammetrica diretta in forma digitale

La presa direttamente in digitale è stata attuata per prima nella fotogrammetria terrestre principalmente grazie alla enorme diffusione delle camere digitali amatoriali. Per ciò che riguarda le camere per fotogrammetria terrestre metriche e semimetriche il mercato è dominato dai prodotti della Rollei.



fig. 1.10 – Camera semimetrica (a sinistra) e metrica su dorso digitale (a destra)

I sistemi GPS/IMU in grado di fornire per ogni fotogramma i parametri dell'orientamento esterno hanno contribuito notevolmente allo sviluppo della fotogrammetria aerea, risultato conseguito in fotogrammetria terrestre già nel 1959 con il primo fototeodolite ad opera di Laussedat.



fig. 1.11 – Sistema IMU installato su una camera tradizionale Leica RC30

L'uso di sensori CCD è un fenomeno tecnologico che ha interessato il mondo della fotogrammetria aerea negli ultimi 5 ÷ 6 anni. In questo settore si distinguono sensori lineari *pushbroom* (termine anglosassone che indica la mancanza di organi in movimento) e camere *frame* assai più vicine concettualmente alle camere fotogrammetriche tradizionali. Tutti questi sensori sono sempre equipaggiati con sistemi GPS/IMU e piattaforme giro-stabilizzate. Per ciò che riguarda la geometria di presa e il conseguente flusso di gestione dei dati si evidenzia che:

- le prese con camere *frame* sono assimilabili a prospettive centrali. Il flusso di gestione dei dati è assolutamente simile a quello necessario per orientare fotogrammi acquisiti in forma tradizionale;
- le scene acquisite con sensori trilineari si dice che sono delle pseudo-proiezioni ortogonali. In questo caso i modelli matematici differiscono da quelli della fotogrammetria tradizionale. In queste applicazioni si usano solitamente le cosiddette equazioni di collinearità adattate ai sensori lineari.

Tutto questo lavoro di studio e di ricerca è dedicato a questo ultimo argomento per cui si rimanda ai capitoli successivi per un approfondimento.

Accenniamo al fatto che la presa in digitale è stata attuata qualche anno prima nei sensori montati su piattaforma satellitare. Questi sensori si classificano solitamente in sensori passivi e sensori attivi. I sensori passivi rilevano la frazione di radiazione solare incidente emessa da un corpo, i sensori attivi (ad esempio il SAR, Radar ad Apertura Sintetica) emettono un'onda elettromagnetica e misurano la radiazione di ritorno. I più vicini alle applicazioni fotogrammetriche sono i sensori passivi. I primi modelli di questi implementavano sensori analogici per cui il segnale analogico una volta acquisito veniva trasformato in forma digitale attraverso un convertitore A/D. La diffusione dei sensori CCD ha influenzato parimente anche le tecnologie satellitari per cui oggi si annoverano sensori trasportati da satellite (Ikonos e QuickBird) basati su tecnologia *pushbroom* così come quelli aviotrasportati.

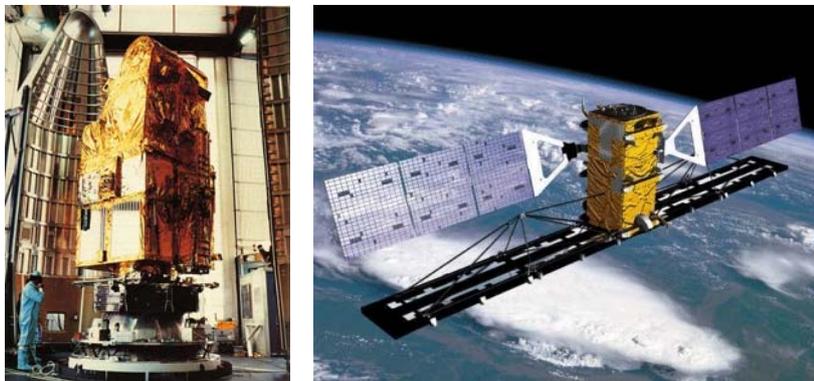


fig. 1.12 – Lo SPOT (1986) satellite Franco – Canadese (a sinistra) e il SAR (a destra)

1.5 Il futuro della fotogrammetria aerea

Al momento della stesura di questo paragrafo ricevo notizia che le Case produttrici di pellicole fotogrammetriche continueranno la produzione ancora per un paio di anni dopodichè si utilizzeranno soltanto sensori digitali. La CGR di Parma, partner in questa ricerca, utilizza una coppia di sensori digitali aviotrasportati nella maggior parte delle committenze. L'unico campo in cui i sensori digitali risultano inferiori alle camere tradizionali riguarda le applicazioni di cartografia a grandissima scala cioè tutte quelle rare applicazioni che richiedono dimensioni del pixel inferiori ai 15 cm. Da quanto detto il futuro della fotogrammetria aerea, con riferimento al prossimo decennio, appare chiaro. Volendo immaginare un

possibile scenario per la disciplina ci si aspetta il pieno raggiungimento di tutti i parametri di qualità da parte dei sensori digitali aviotrasportati. La risoluzione geometrica sarà sempre più elevata. E' una tendenza registrata anche in passato: si pensi, per esempio, al passaggio dalle vecchie piattaforme satellitari ai nuovi sensori ad alta risoluzione. Ma migliorerà anche la risoluzione spettrale: già oggi sono in fase di sviluppo sensori aviotrasportati iperspettrali capaci di elevate risoluzioni geometriche e contemporaneamente ed elevatissime risoluzioni spettrali.

Bibliografia

C. Monti – La fotogrammetria in Italia – Bollettino SIFET (1995) – N° 1 – pag. 25-57

G. Bezoari, C. Monti, A. Selvini - Breve storia della fotogrammetria – La fotogrammetria per l'architettura – pag. 9-23 – Liguori Ed.

D. Alspaugh – A brief history of photogrammetry – Manual of Photogrammetry – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing – pag. 1-14 – McGlone Ed.

CAPITOLO 2

Concetti di base sui sensori CCD

2.1 Introduzione

Il secolo in cui viviamo sarà ricordato come il primo dell'*Età del Silicio*. È il sesto elemento in ordine d'abbondanza nell'universo e il secondo, dopo l'ossigeno, nella crosta terrestre (27,7%) dove è presente sotto forma di silice e quarzo (biossido di silicio SiO_2) e soprattutto di silicati, minerali che entrano nella composizione di quasi tutte le rocce; come quarzo è anche presente in notevole quantità nelle sabbie, che sono la principale materia prima per la produzione del silicio. Il silicio è un materiale semiconduttore⁽¹⁾, vale a dire un elemento che gode parzialmente di proprietà di un buon conduttore elettrico come il rame e di un isolante elettrico come il vetro.



fig. 2.1 - Campione di silicio minerale

La struttura del silicio può essere controllata in vari modi, ad esempio tramite l'iniezione di atomi di elementi di natura diversa nella struttura cristallina, permettendo così la costruzione di componenti e circuiti elettronici. In poco più di trenta anni la tecnologia dei semiconduttori è stata alla base di una rivoluzione senza precedenti. Circuiti integrati e microprocessori di elevata complessità e potenza hanno reso possibile la costruzione di sistemi in grado di effettuare calcoli di estrema complessità.

⁽¹⁾ Semiconduttori

I semiconduttori sono elementi che hanno una resistività intermedia tra i conduttori e gli isolanti. La resistività elettrica, anche detta resistenza elettrica specifica, è un indice della difficoltà opposta da una porzione standard di materiale al passaggio della corrente elettrica:

$$\rho = \frac{RA}{l}$$

dove:

- **R** è la resistenza elettrica di un campione specifico di materiale misurata in ohm;
- **l** è la lunghezza in metri;
- **A** è l'area della sezione del campione in metri quadrati.

2.2 La nascita del CCD

Il CCD (*Charge-Coupled Device*, ossia dispositivo ad accoppiamento di carica) è nato presso i Bell Labs di Murray Hill, New Jersey, nei laboratori che avevano già assistito alla nascita del transistor. Verso la fine del 1969 Willard (Bill) Boyle e George Smith, due ricercatori impegnati nella ricerca di nuovi metodi d'acquisizione delle immagini tramite cristalli di silicio, durante la fase di sviluppo del PicturePhone trovarono quasi per caso il CCD.

Alla fine del 1969, presso i Bell Labs, la ricerca sulle memorie a bolle magnetiche era all'apice dello sviluppo. L'incontro tra Bill Boyle (direttore esecutivo della Divisione Semiconduttori) e George Smith (capo del Dipartimento responsabile dello sviluppo di una matrice a diodi di silicio per il PicturePhone) alimentò un fronte di ricerca che portò allo sviluppo di un nuovo dispositivo.



fig. 2.2 – Bill Boyle e George Smith, gli inventori del CCD

Fino ad allora era nota la possibilità di memorizzare cariche elettriche depositando un sottile strato metallico sulla superficie di un cristallo di silicio ma nuova fu l'idea, ereditata dalla tecnologia delle memorie a bolle magnetiche, di raggruppare i domini di accumulo delle cariche e di usare opportune differenze di potenziale elettrico per trasportare le cariche da un dominio all'altro. Da un breve colloquio tra i due ricercatori si dà il via alla fase di ricerca sul CCD. In meno di un paio d'ore i due ricercatori avevano ben chiari i concetti di base della nuova tecnologia e poche settimane dopo il primo CCD di dimensioni 6 x 6 era pronto per essere testato.

2.3 CCD e sue caratteristiche

Il CCD può essere definito come un rivelatore bidimensionale a stato solido e di tipo quantico. Il principio fisico su cui si basa tale dispositivo è l'effetto fotoelettrico⁽²⁾. La struttura di un sensore CCD può essere riassunta in una superficie di dimensioni massime 6 x 6 centimetri, il cui costituente fondamentale è il silicio, organizzata in una matrice di elementi, detti pixel, ciascuno costituito dall'elemento base di un CCD, il condensatore Metallo-Ossido-Semiconduttore (MOS – Metal Oxide Silicon). In figura 2.3 è raffigurato lo schema di un condensatore MOS.

(2) L'effetto fotoelettrico

Quando una superficie metallica viene colpita da radiazioni di frequenza abbastanza alta essa libera degli elettroni.

La spiegazione a questo fenomeno sta nel fatto che l'energia incidente delle radiazioni si trasforma in energia cinetica degli elettroni colpiti, che in conseguenza si muovono.

Non sempre però essi si staccano dalle proprie orbite, in quanto l'energia cinetica deve essere superiore alla forza che tiene legati gli elettroni all'atomo. Questo valore energetico prende il nome di soglia fotoelettrica, e dipende dal tipo di metallo che è stato preso in esame.

L'effetto fotoelettrico portò alla assegnazione del Premio Nobel per la Fisica ad A. Einstein nel 1921.

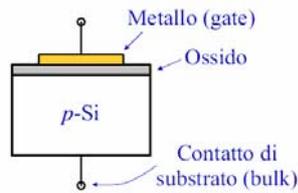


fig. 2.3 – Schema di un condensatore MOS

Il condensatore MOS è costituito da un substrato di silicio di spessore massimo pari a 100 micron, drogato⁽³⁾ di tipo p (quindi con cariche maggioritarie positive), su cui è depositato uno strato di biossido di silicio (SiO_2) dello spessore di 0.12 micron, che funge da isolante e su cui è posto un elettrodo di materiale conduttore (alluminio), che funge da anodo.

In virtù di tale particolare struttura, se si genera una differenza di potenziale tra l'anodo e il catodo, si crea, immediatamente sotto lo strato di ossido, una zona (detta di *svuotamento*) priva di cariche positive; esse infatti si spostano verso il basso del substrato per effetto della polarizzazione positiva a cui è sottoposto l'elettrodo di alluminio. Per contenere l'estensione laterale della zona di svuotamento si creano, immediatamente sotto l'ossido, due regioni, pesantemente drogate di tipo p, delle dimensioni di pochissimi micron, dette *canali di stop*. Gli elettroni delle coppie *buca - elettrone* rimasti liberi si sistemano nella zona immediatamente sotto l'ossido e rimangono in tale zona, costituendo il segnale. Ad essi però si sommano gli elettroni prodotti per agitazione termica, che costituiscono la cosiddetta corrente nera (*dark current*) che si può abbassare intervenendo sulla temperatura di lavoro del CCD.

Schematizzando, si possono individuare quattro momenti fondamentali nel funzionamento di un CCD:

1. la generazione delle cariche per effetto fotoelettrico;
2. la raccolta delle cariche tramite la creazione di una buca di potenziale;
3. il trasferimento delle cariche, variando i potenziali degli elettrodi in modo opportuno;
4. l'estrazione della carica mediante il circuito di uscita.



fig. 2.4 – Un sensore CCD matriciale

2.3.1 Generazione delle cariche

Quando il CCD è esposto alla radiazione il fotone incidente penetra nel substrato di silicio. Tale fotone può interagire con un atomo di silicio e

⁽³⁾ Drogaggio

Con il termine drogaggio si intende l'aggiunta al semiconduttore di piccole percentuali di atomi non facenti parte del semiconduttore stesso allo scopo di modificare le proprietà elettriche del materiale. Il drogaggio può essere di tipo n e di tipo p.

per effetto fotoelettrico generare dei foto-elettroni, il cui numero, in generale, dipende dall'energia del fotone. Ad energie non superiori a 5 eV, ovvero per lunghezze d'onda superiori a 2000 Å, si può affermare che per ogni singolo fotone incidente viene formata una sola coppia buca- elettrone, ovvero si ha un effetto fotoelettrico semplice.

Nel dominio invece dei raggi X o gamma, con energie da 7 - 8 eV fino a decine di MeV, si ha la produzione di più di una coppia (effetto fotoelettrico multiplo).

L'energia del fotone è data dalla legge di Planck:

$$E = hgf$$

dove:

- E è l'energia del quanto/fotone in Joule;
- $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Joule*sec è la costante di Planck;
- f è la frequenza della radiazione.

La lunghezza d'onda della radiazione è legata alla frequenza dalla velocità secondo la relazione:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

e operando la conversione della unità di energia da joule ad elettronvolt⁽⁴⁾

$$1 \text{ eV} = 1.60218992 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

si ha:

$$E_{\text{fotone}} [\text{eV}] = \frac{12424}{\lambda [\text{Å}]}$$

Il numero di coppie buca - elettrone è dato dalla

$$N_{e^-} = \frac{E_{\text{fotone}} [\text{eV}]}{3.65 [\text{eV} / e^-]}$$

dove 3.65 [eV/e⁻] è l'energia media effettiva necessaria per portare in conduzione un elettrone. E' necessario che il fotone abbia almeno 3.65 eV per produrre almeno una coppia buca - elettrone e non bastano 1.1 eV, necessari affinché l'elettrone passi dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Ciò è da ricondurre alla struttura del reticolo cristallino del silicio. Infatti l'energia rilasciata dal fotone nell'interazione con il silicio non contribuisce integralmente a far passare l'elettrone in banda di conduzione, ma una buona parte viene assorbita dal reticolo del silicio, che inizia ad oscillare attorno alle posizioni di equilibrio e ad emettere fononi⁽⁵⁾, i quanti dell'energia vibrazionale reticolare. Dunque per valori di energia fino a 5 eV si ha la formazione di una sola coppia, poiché il resto dell'energia è trasformata in fononi.

④ **elettronVolt [eV]**

E' un'unità di misura dell'energia, corrispondente all'energia cinetica acquistata da un elettrone che si muove in un campo elettrico uniforme sotto l'azione della differenza di potenziale di 1 Volt. Occorre precisare che l'elettronvolt è un'unità di misura molto piccola, adatta appunto a studi di fisica di particelle. L'unità di misura dell'energia adottata nel Sistema Internazionale (SI) è il joule (J). Un Joule corrispondente a $6,24 \times 10^{18}$ eV, cioè a 6,24 miliardi di miliardi di elettronvolt.

⑤ **Fononi**

Il fonone è un quanto di vibrazione in un reticolo cristallino rigido. I fononi sono delle quasi - particelle perché, pur non essendo delle vere e proprie particelle ne hanno molte proprietà e possono essere trattate matematicamente nello stesso modo. Come i fotoni sono quanti di onde elettromagnetiche, i fononi sono quanti di onde sonore che si propagano all'interno del solido.

2.3.2 Raccolta e trasferimento delle cariche

Una volta prodotte, le cariche nel substrato di silicio sono raccolte tramite la buca di potenziale nella zona di svuotamento, in cui si accumulano gli elettroni che costituiscono il segnale vero e proprio e dove sono mantenuti per tutto il tempo necessario prima di essere letti. Il meccanismo della creazione della carica avviene così:

- la luce, per un tempo di integrazione regolato dall'apposito elettrodo, cade sulla microlente;
- viene filtrata da un filtro;
- attraversa l'elettrodo trasparente;
- viene focalizzata sull'elemento fotosensibile;
- i fotoni della luce trasferiscono energia all'elemento fotosensibile, il quale libera degli elettroni che vengono spinti nel pozzo creato dalla carica positiva dell'elettrodo.

Il fatto che le strisce di silicio di tipo n siano completamente immerse nel silicio di tipo p impedisce che gli elettroni migrino spontaneamente dai pixel di un canale ai pixel dei canali adiacenti. Non ci si sofferma su questo problema, ma si accenna solo al fatto che comunque esistono dispositivi per drenare gli elettroni che fuoriescono, per eccesso di carica, dal loro pixel. Nel pixel la carica è proporzionale all'intensità della luce che è caduta sull'elemento fotosensibile e al tempo di integrazione. E' da notare che l'elemento fotosensibile risponde in maniera lineare all'energia che lo colpisce; cioè la carica prodotta è linearmente proporzionale all'energia della luce incidente. Questo fatto costituisce un altro punto di forza della tecnologia digitale rispetto alla ripresa su pellicola, dove invece la linearità tra energia incidente sulla pellicola e sensibilizzazione dei grani di alogenuro d'argento è lineare solo per un certo intervallo. In pratica ciò significa che un sensore è in grado di mantenere un miglior dettaglio anche quando l'energia su di esso incidente è molto bassa.

Ma la carica che si genera, cioè il numero di elettroni liberati, non è solo proporzionale all'intensità della luce, cioè al numero di fotoni incidenti, e al tempo di integrazione, ma anche alla superficie del fotodiodo. Se la superficie del pixel è piccola anche la zona di silicio p in cui si accumula la carica, che abbiamo chiamato pozzo, è piccola e quindi succede che il pozzo raggiunge la sua capienza massima e gli elettroni che eccedono questa capienza fuoriescono dal pozzo e vengono drenati via. Ciò significa in pratica che non si ha più dettaglio nelle zone luminose. Se, per evitare questo inconveniente, si accorciasse troppo il tempo di integrazione, i fotodiodi dei pixel che ricevono poca luce potrebbero non essere in grado di liberare elettroni e quindi risulterebbero tutti privi di carica, e si perderebbe il dettaglio nelle zone meno esposte.

E' chiaro quindi che pixel di dimensioni più piccole danno meno prestazioni di pixel di dimensioni maggiori. La capacità di un sensore di dare dettagli sia nelle zone scure che nelle zone chiare, è caratterizzata da quello che viene detto il *range* dinamico e da esso deriva in pratica il numero di livelli in cui può effettivamente essere graduata l'intensità della luce che colpisce il fotodiodo.

La fase successiva consiste nell'accoppiare le cariche e spostarle in modo opportuno tramite la variazione dell'estensione delle buche generate dagli elettrodi.

2.3.3 Estrazione delle cariche

L'ultimo passo da compiere per avere informazioni dal CCD è l'estrazione della carica mediante il circuito d'uscita. Infatti le cariche sono spostate in direzione parallela ai *canali di stop*, ed una riga per volta sono poste sul registro di lettura in cui scorrono, come detto, in direzione ortogonale rispetto a questi canali. Tramite l'opportuna variazione di tensioni ogni pixel del registro di lettura viene "scaricato" sul diodo d'uscita e da questo sul nodo d'uscita (rappresentato da una capacità C fittizia) e infine tramite il FET (Field Effect Transistor) al carico (Load). Da esso il segnale viene amplificato da un preamplificatore posto subito dopo il circuito d'uscita del CCD e subito dopo è convertito in ADU (Analogical Digital Unit) dal convertitore analogico digitale. Da questo momento il segnale non è più costituito da tensioni o correnti di tipo analogico ma da dati binari. Alla fine del processo l'impulso di reset azzerà il nodo d'uscita, che è pronto per ricevere il pixel successivo. Tutto il processo di lettura dei pixel avviene in genere in tempi dell'ordine dei microsecondi, mentre il cosiddetto "collo di bottiglia" è rappresentato dal sistema che converte la carica letta in ogni pixel in dato binario. In genere il tempo che intercorre tra l'inizio della lettura dei pixel e l'elaborazione finale del segnale in dati binari dipende dal numero dei pixel del CCD e dalla velocità del convertitore analogico digitale; valori tipici sono dell'ordine dei secondi. Dopo questa trasformazione i numeri vengono memorizzati in forma di matrice numerica su un hard disk o su una memoria di massa simile.

2.4 I filtri

Nella figura 2.5 è rappresentata, in maniera molto schematica e non nelle proporzioni reali, la sezione di tre pixel appartenenti a tre canali affiancati e in essa vengono evidenziate le seguenti parti:

- il corpo del cristallo di silicio p;
- la parte di silicio n, che costituisce l'elemento fotosensibile, detto anche fotodiode;
- un elettrodo trasparente che, caricato positivamente, crea nel silicio p un pozzo (linea al tratto) nel quale spinge e intrappola gli elettroni che si liberano dal silicio n.

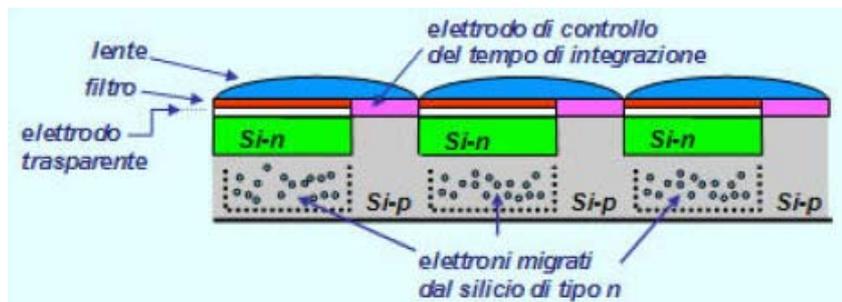


fig. 2.5 – Vista in sezione di tre condensatori MOS adiacenti

- gli elettroni rilasciati dal silicio di tipo n e intrappolati nel pozzo per effetto della carica positiva dell'elettrodo trasparente;
- un elettrodo che comanda il tempo di integrazione (in viola);
- il filtro che fa passare solo uno dei colori primari;
- una microlente (non sempre presente) che fa convergere la luce che cade su tutta la superficie del pixel sulla superficie del fotodiiodo.

Se sopra il fotodiiodo non fosse posto alcun filtro la risposta del fotodiiodo alla luce incidente sarebbe analoga a quella che viene data da una pellicola pancromatica in bianco e nero; in altre parole la carica di elettroni prodotta nel pozzo di un generico fotodiiodo sarebbe generata da tutta la banda spettrale della luce incidente sul fotodiiodo stesso. Quindi, una volta trasformate le cariche di elettroni in una matrice di numeri, questa matrice potrebbe dar luogo, con un passaggio dal digitale all'analogico, solo ad una immagine in scala di grigi.

Per acquisire una immagine digitale che possa dar luogo ad una visualizzazione equivalente ad una fotografia a colori, è necessario quindi separare la luce incidente nelle tre componenti primarie RGB (acronimo di *Red*, *Blu* e *Green* usando la terminologia anglosassone) e registrarne l'energia fotonica corrispondente con tre valori ad essa corrispondenti.

Per far sì che un fotodiiodo registri, ad esempio, solo la quantità di energia che corrisponde alla banda del blu della luce che su di esso incide, occorre stendere su di esso un filtro che faccia passare solo la banda del blu; ma in tal modo lo stesso fotodiiodo sarà insensibile alla parte della luce che corrisponde alle bande del verde e del rosso.

Per poter registrare una scena suddividendo la luce che da essa proviene nei tre colori primari occorre allora dedicare una parte dei pixel del CCD alla registrazione delle onde elettromagnetiche che corrispondono al colore primario rosso, una parte alle onde elettromagnetiche che corrispondono al colore primario verde e una parte alle onde elettromagnetiche che corrispondono al colore primario blu.

La disposizione più usata dei filtri sui fotoni è quella che segue lo schema di Bayer, il quale prevede che il 50% dei pixel riceva la luce verde, il 25% la luce rossa e il 25% la luce blu.

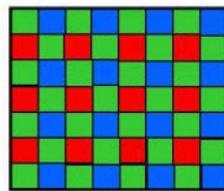


fig. 2.6 – Distribuzione dei filtri secondo lo schema di Bayer

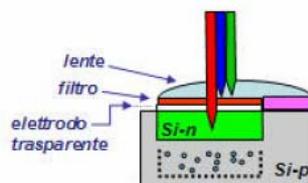


fig. 2.7 – Posizione del filtro nel pixel

Questa distribuzione in percentuali diverse dei filtri dei colori deriva dal fatto che l'occhio umano percepisce il verde come colore predominante per la definizione della nitidezza di un'immagine (è il motivo per il quale i campi da tennis sono verdi). Inoltre nelle camere fotografiche digitali terrestri con CCD di formato rettangolare che possono portare a inquadrature col lato lungo del CCD verticale o orizzontale, lo schema di Bayer produce lo stesso tipo di immagine indipendentemente dalla modalità di ripresa, sia essa orizzontale o verticale. In fase di post processing si dovranno derivare, applicando gli algoritmi del caso, per ogni pixel le due componenti di colore che non sono state registrate dal fotodiodo di quel pixel, in funzione dei valori dei due colori mancanti registrati dai pixel adiacenti. Questo processo di interpolazione può essere effettuato con algoritmi semplici o anche complessi.

Per i pixel coperti dal filtro verde, il valore del blu che gli compete può essere ricavato semplicemente facendo la media dei valori del blu registrati nei due pixel che stanno sopra e sotto di esso; e ugualmente può essere ricavato il valore del rosso facendo la media dei valori del rosso registrati nei due pixel che stanno a sinistra e a destra di esso. Per i pixel che sono coperti dal filtro rosso e dal filtro blu si procede invece diversamente. Consideriamo un pixel coperto dal filtro rosso: il valore del verde verrà ricavato come somma di $\frac{1}{4}$ di ciascun valore di verde registrato nei quattro pixel che stanno a sinistra, a destra, sopra e sotto; mentre il valore del blu verrà ricavato dai quattro pixel che stanno sulle due linee diagonali. Lo stesso avviene per il calcolo del valore verde e rosso dei pixel coperti dal filtro blu.

Questo è il modo più semplice di fare l'interpolazione ma si possono applicare processi di interpolazione più complessi prendendo in considerazione un maggior numero di pixel nell'intorno di quello per il quale si devono ricavare i due colori mancanti. L'uso dei filtri secondo lo schema di Bayer riduce l'effettiva risoluzione. In molti casi i fotodiodi impiegati nei sensori sono sensibili anche alla parte dello spettro delle onde elettromagnetiche dell'infrarosso vicino, da 0.7 a 0.8 μm (NIR). Se si vogliono effettuare riprese a colori ognuno dei tre filtri dovrà schermare oltre a due bande del visibile anche quella dell'IR. Se invece si vogliono effettuare riprese all'IR falso colore si sostituisce, nello schema di Bayer, il filtro B con un filtro che fa passare solo l'IR.

2.5 Sensori CCD lineari

I sensori CCD più comuni sono quelli bidimensionali (detti anche *matriciali*) adoperati in tutte le camere digitali amatoriali e professionali. Esiste però un'altra tipologia di sensori CCD che riveste un ruolo da protagonista in questo lavoro di Tesi: i sensori CCD lineari (detti anche *vettoriali*). Questo ruolo di prominenza è giustificato dal fatto che questo tipo di sensori viene utilizzato nelle camere digitali aviotrasportate che si basano sui cosiddetti *sensori a tre linee* (TLS) e a cui verrà dato ampio spazio nei capitoli a seguire.

I sensori lineari sono costituiti da un'unica riga di pixel; durante il tempo di integrazione il sensore acquisisce la carica e, al termine del tempo di integrazione, funziona da registro di scorrimento per far pervenire le cariche al convertitore A/D.

Quando il sensore lineare viene utilizzato da piattaforma satellitare o aerea (v. fig. 2.8), l'immagine viene formata dalla combinazione del moto del velivolo e dall'acquisizione dell'immagine registrata dal sensore lineare effettuata con una cadenza che è condizionata da tre fattori: la dimensione del pixel del sensore, la focale dell'obiettivo, la quota di volo e la velocità del mezzo.

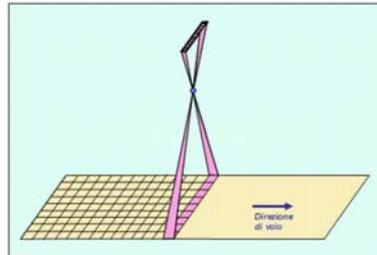


fig. 2.8 – Schema di presa con un sensore CCD lineare.



fig. 2.9 – CCD lineare (Fairchild Imaging)

Gli apparati di presa che si basano su questo principio vengono detti *pushbroom line scanner*. Con questo termine si intendono, in generale, tutti quei sensori che non presentano organi in movimento. Poiché la ripresa viene effettuata con continuità, linea dopo linea, il sensore lineare deve essere svuotato dalle cariche accumulate durante il tempo di integrazione, nell'intervallo di tempo che occorre all'aereo per percorrere una distanza che è data dalla proiezione del pixel al suolo divisa per la velocità V dell'aereo; a sua volta la proiezione del pixel al suolo è data dalla sua dimensione reale L moltiplicata per il rapporto tra l'altezza di volo H e la distanza focale f della camera da presa; quindi il tempo ΔT di svuotamento del sensore lineare deve essere inferiore a:

$$\Delta T < \left(\frac{L \cdot H}{f} \right) \cdot \frac{1}{V}$$

Esempio (*Leica ADS40 Digital Sensor*)

Ad esempio, nel caso di un sensore i cui pixel hanno una dimensione di $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$ e supponendo una quota di volo di 6000 m con una focale equivalente di 62.77 mm si ha che ogni striscia di terreno acquisita avrà una larghezza δS paria a:

$$\delta S = \frac{6000m}{0.06277m} \times 0.0000065m = 0.62m$$

Se immaginiamo che la velocità dell'aereo sia di 300 km/h, pari quindi a circa 83 m/s, si vede che l'aereo percorre lo spazio δS in un tempo

$$\Delta T = \frac{0.62m}{83 \frac{m}{s}} = 0.0075s$$

Questo significa che lo svuotamento del sensore lineare deve avvenire in meno di 8 millesimi di secondo. Se teniamo conto che i sensori lineari delle camere aeree arrivano anche a dimensioni di 14.400 pixel, si comprende come il tempo di svuotamento del sensore possa costituire un punto delicato per le camere da ripresa aeree che impiegano sensori lineari.

Per superare questo aspetto critico alcuni tipi di sensori trilineari che vengono impiegati nelle camere aeree sono dotati di particolari dispositivi. Un modo per velocizzare lo svuotamento dei sensori è quello di non far funzionare i tre sensori lineari che acquisiscono l'immagine come registri di scorrimento successivamente al tempo di integrazione, ma di trasferire, per ogni sensore, le cariche su due registri di scorrimento; le cariche dei pixel pari vengono trasferite in un registro di scorrimento e quelle dei pixel dispari in un altro registro di scorrimento; in tal modo il tempo di svuotamento del sensore si dimezza. Lo stesso vale ovviamente anche per i sensori lineari singoli, pancromatici o all'infrarosso.

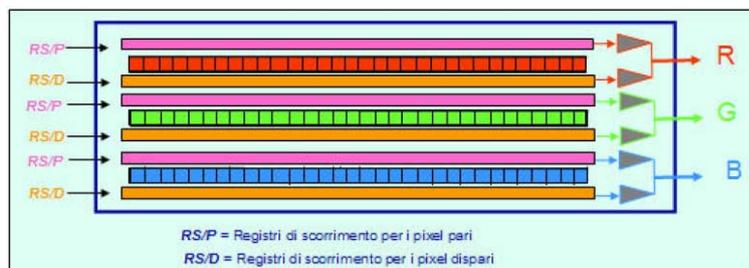


fig. 2.10 – Registri di scorrimento per i sensori CCD lineari

Alcuni sensori lineari sono dotati di sistemi di svuotamento ancora più sofisticati, e cioè non solo le cariche di ciascun sensore sono smistate su due registri, ma ogni registro si svuota per metà verso sinistra e per metà verso destra mediante un altro convertitore A/D; in tal modo il tempo di svuotamento di ogni sensore lineare si riduce ad un quarto rispetto a quello che si avrebbe se il sensore venisse utilizzato sia per l'accumulo delle cariche sia per la loro conversione in forma digitale.

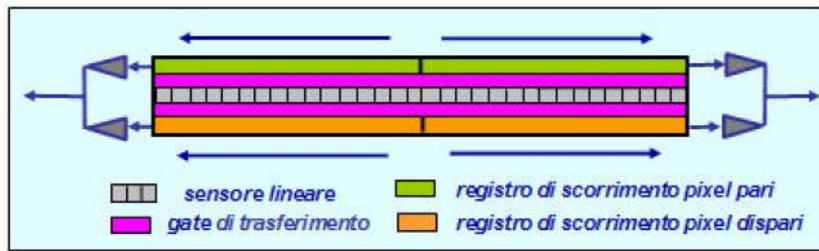


fig. 2.11 – Registri di scorrimento “bilaterali” per i sensori CCD lineari

Bibliografia

R. Galetto – Camere digitali per riprese aeree e terrestri – Bollettino SIFET - N° 4 – pag. 45-85.

CAPITOLO 3

Sensori Digitali Aviotrasportati

3.1 Classificazione dei sensori digitali aviotrasportati

Le principali tecnologie su cui si fondano le camere fotogrammetriche digitali aviotrasportate consistono nell'approccio "frame camera" implementato su molte camere (ad es. la UltraCAM di Vexcel) e la tecnologia a sensore lineare molto usata nel telerilevamento da satellite. Questo secondo tipo di camere appartiene alla classe dei sensori *pushbroom*.

I sensori *pushbroom* a loro volta possono essere classificati in:

- Scanner monocromatici;
- Scanner multispettrali;
- Scanner iperspettrali;
- Scanner a tre linee.

Nella presente trattazione verrà dato maggiore rilievo ai sensori a tre linee che sono gli unici *push-broom* usati per applicazioni di cartografia a grande scala. Una breve citazione verrà fatta sull'ASI, un particolare sensore iperspettrale ancora in fase di sperimentazione, basato su un singolo CCD lineare ma capace di elevata risoluzione geometrica ed elevatissima risoluzione spettrale (al massimo 256 bande). In questi casi più che di una camera digitale si parla di un vero e proprio spettrometro.



fig. 3.1 – La camera a sensore CCD lineare LH System ADS40

Le camere a sensore matriciale vengono solitamente classificate in:

- camere di piccolo formato. Queste camere generano immagini che vanno dal formato 1000 x 1000 a 2000 x 3000 pixel. Nella dizione usata commercialmente vanno da 1 a 6 Megapixel;
- camere di medio formato con dimensioni 4000 x 4000 = 16000 pixel;
- camere di grande formato aventi dimensioni 6000 x 6000 = 36 Megapixel o superiori.



fig. 3.2 – La camera a sensore CCD matriciale UltraCam della Vexcel

Verranno esaminati solo alcuni esempi di camere *frame* di grande formato, le uniche competitive rispetto ai sensori *pushbroom* a tre linee.

Il dibattito sulle due tecnologie è animato e tuttora in corso. Di seguito si cercherà di capire su quali fronti la tecnologia *pushbroom* è preferibile alla tecnologia delle *Frame Camera* evidenziando i vantaggi dei sensori matriciali su quelli lineari e viceversa.

3.2 Le tecnologie a confronto

Il primo grosso vantaggio dei sistemi matriciali su quelli lineari riguarda proprio la dimensione del pixel a terra (GSD): le camere a sensore matriciale sono, in genere, in grado di produrre immagini con risoluzione geometrica più elevata (fissata la quota relativa di volo per entrambi i sistemi). Nei sistemi a vettore lineare la dimensione del pixel è funzione della velocità del velivolo e del tempo di esposizione. Nei sistemi lineari è abbastanza difficoltoso scendere sotto la risoluzione geometrica di una quindicina di cm, condizione questa che limita le applicazioni del sensore nel campo della cartografia a grandissima scala.

Il flusso di lavoro per i dati acquisiti con le *Frame Camera* è già noto dall'utenza finale in quanto non differisce da quello usato per le tradizionali camere a pellicola.

Le *Frame Camera* offrono maggiori possibilità di ridondanza. Se la sovrapposizione longitudinale è fissata al 90% lo stesso oggetto può ricadere anche su 10 immagini consecutive. Se poi si suppone una sovrapposizione trasversale del 60%, ci sono punti che ricadono anche su 20 immagini.

Le camere *pushbroom* non presentano alcuna accuratezza fotogrammetrica interna. Una accettabile accuratezza geometrica può essere ottenuta soltanto attraverso un sistema di posizionamento inerziale GPS/IMU. La accuratezza geometrica è quindi limitata da quella dei dati del GPS differenziale. Questo valore è ancora più compromesso per un velivolo in movimento e si attesta su un valore di ± 15 cm per ogni immagine.

Le caratteristiche dei sensori *pushbroom* aviotrasportati a confronto con quelle dei sensori *pushbroom* satellitari ad alta risoluzione geometrica (Ikonos e Quickbird) possono essere brevemente riassunti nella seguente figura 3.3.

⁽¹⁾GSD è acronimo di *Ground Sample Distance*. Sta ad indicare la dimensione del pixel "a terra". In italiano il GSD viene identificato con la risoluzione geometrica.

ADS40	IKONOS e QUICKBIRD
dati su richiesta	orbita fissa (650 km)
operabilità in condizioni atmosferiche avverse	forte dipendenza dalle condizioni atmosferiche
risoluzione variabile con la quota di volo	risoluzione geometrica fissa
stereoscopia sempre possibile	stereoscopia su richiesta
	costo noto a priori per ogni scena

fig. 3.3 – Confronto tra sensori aviotrasportati a tre linee e sensori satellitari



fig. 3.4 – GSD a confronto. A sinistra immagine ADS40 con GSD=0.2 m a destra immagine Ikonos con GSD=1 m

Il confronto con le tradizionali camere a pellicola vede i sensori lineari in una posizione d'inferiorità solo per ciò che riguarda la risoluzione geometrica. Dal punto di vista della gestione del flusso di dati i sensori lineari a tre linee consentono (in caso di presa ottimale) senza punti di controllo (*Direct Georeferencing* senza GCP) di avere un prodotto ortofotografico di buona qualità e accuratezza già qualche ora dopo lo scaricamento dei dati.

E' ovviamente diversa la modalità con cui avviene la presa. I sensori lineari sono basati sul principio delle tre linee CCD di acquisizione: la presa delle scene è illustrata nella seguente figura 3.5.

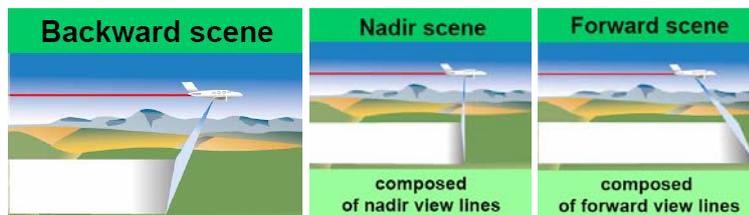


fig. 3.5 – Il principio dei sensori digitali a tre linee

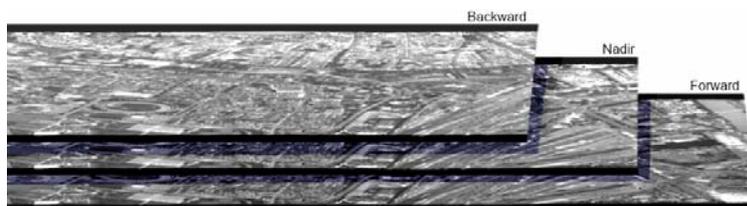
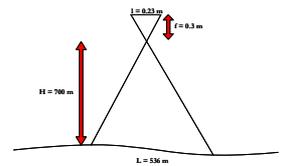


fig. 3.6 – Strisciate generate da un sensore a tre linee

Risoluzione geometrica ottenibile con le tradizionali camere a pellicola.



Esempio: si supponga di volere redigere il piano di volo per la produzione di ortofotocarte digitali a scala 1:500 di un centro urbano.

Le quantità note (e/o fissate) del problema sono:
 $I = \text{dim. del fotogramma} = 0.23 \text{ m} = 9.055 \text{ pollici}$
 $f = \text{distanza focale della camera} = 300 \text{ mm} = 0.3 \text{ m}$
 $H = \text{quota rel. di volo} = 700 \text{ m}$

L'abbracciamento corrispondente risulta pari a

$$L \approx 536 \text{ m}$$

Supponendo di utilizzare uno scanner fotogrammetrico con risoluzione di 2000 dpi si ha:

$$I = 9.055 \text{ pollici} \times 2000 \text{ pixel/pollice} = 18110 \text{ pixel}$$

$$\text{GSD} = 536 \text{ m} / 18110 \text{ pixel} \approx 0.03 \text{ m} = 3 \text{ cm.}$$

La dimensione sulla immagine del singolo pixel risulta pari a circa 12 micron, ben al di sopra della dimensione media dei grani di alogenuro di argento della pellicola.

Le tradizionali camere a pellicola sono invece basate sul principio della prospettiva centrale; i due sistemi di presa sono messi a confronto nella fig. 3.7.

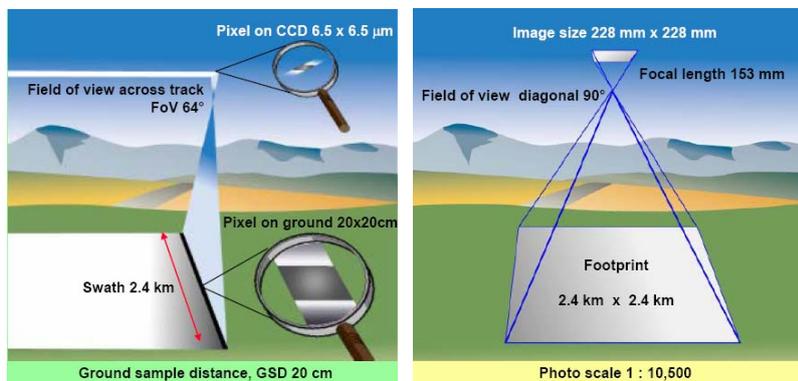


fig. 3.7 – Due sistemi di presa a confronto. Sensore digitale lineare a sinistra e camera fotogrammetrica tradizionale a destra

La modalità con cui avviene la presa influenza ovviamente le immagini acquisite dai due tipi di camere: le tradizionali camere a pellicola producono una strisciata di immagini che sono tutte riconducibili a delle prospettive centrali; per contro i sensori digitali a tre linee producono tre scene senza discontinuità fortemente influenzate dall'angolo di orientamento di ciascuna linea CCD.

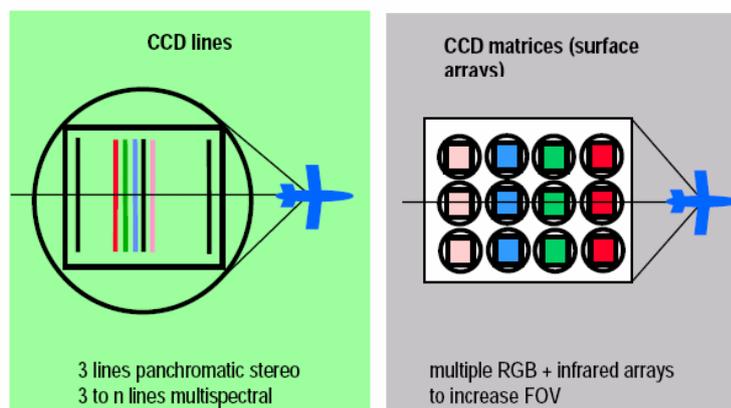


fig. 3.8 – Le alternative progettuali: CCD lineare o matriciale

Nella figura 3.8 a destra è evidenziato un sensore CCD *multiple area* (a linee multiple o matriciale), in questo caso sono utilizzate anche delle lenti per avere la stessa dimensione di pixel in campo multispettrale. Per contro, l'approccio del vettore CCD a tre linee rende possibile la realizzazione di un sensore di acquisizione pancromatica a colori e a falsi colori costituito da un solo sistema ottico e da un solo piano focale. La tecnologia *pus-broom* consente di ridurre ad un terzo il numero delle strisciate (a parità di GSD) rispetto alla tecnologia delle *frame camera*; la figura 3.9 mostra un confronto tra i due sistemi per un GSD=20 cm. Per quanto riguarda il sistema di compensazione del movimento del velivolo (FMC) la Leica, produttrice del sensore a tre linee ADS40, fa notare che il tempo di integrazione dei vettori CCD è sempre inferiore al tempo necessario ad acquisire il pixel a terra. Per contro i sistemi

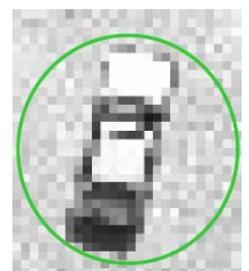
Risoluzione geometrica necessaria alla interpretazione di un oggetto

Si può assumere che il numero di pixel necessario alla interpretazione di un oggetto sia pari a 20.

$$\Delta(i) = 20 * GSD$$



Nell'esempio una immagine con GSD=0.20 m. Per interpretare la presenza di una automobile (L=5m) sono necessari una 20ina di pixel.



$$GSD = 0.2m * 21 = 4.2m$$

“Frame” presentano un lungo tempo d’integrazione vista la bidimensionalità del sensore.

Come si evince da quanto detto entrambi i sistemi presentano dei vantaggi e dei svantaggi. Sarà poi il committente finale a scegliere lo strumento più adeguato alle proprie esigenze.

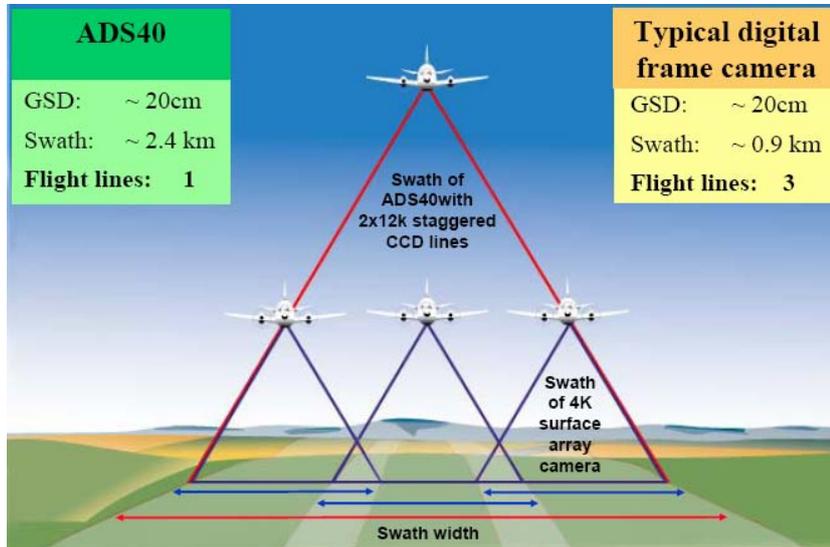


fig. 3.9 – Numero delle strisciate

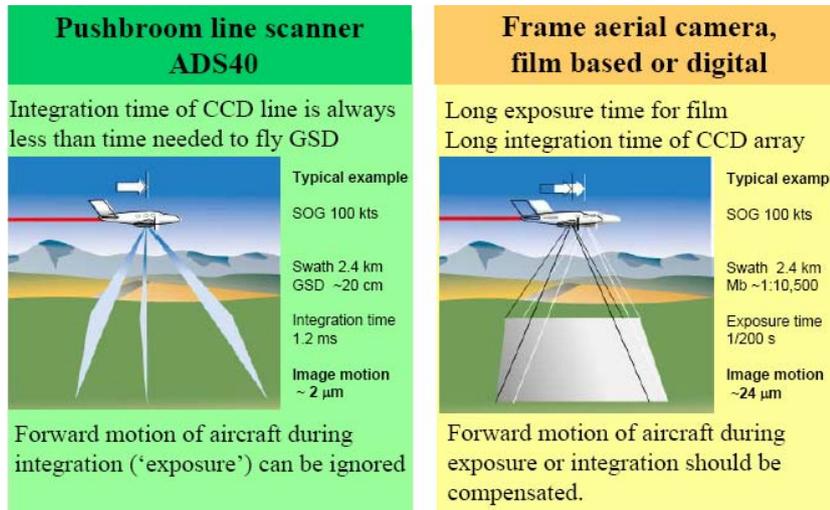
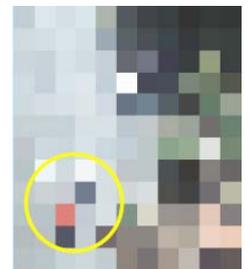


fig. 3.10 – Tempo di integrazione dei sensori CCD

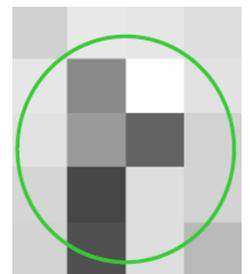
Risoluzione geometrica necessaria alla ricognizione di un oggetto

Si può assumere che il numero di pixel necessario alla ricognizione di un oggetto sia pari a tre.

$$\Delta(r) = 3 * GSD$$



Nell’esempio una immagine con GSD=1.6 m. Per individuare la presenza di una automobile (L=5m) sono necessari almeno tre pixel.



$$GSD = 1.6m * 3 = 4.8 m$$

3.3 Sensori digitali aviotrasportati presenti sul mercato

Vengono illustrate, di seguito, le caratteristiche tecniche dei più diffusi sensori digitali aviotrasportati presenti sul mercato.

3.3.1 Sensori lineari a tre linee. LH System (Leica) ADS40. Primi cenni sul sensore.

Se si fa eccezione per la produzione di stereoscopi la LH Systems e il marchio Leica che l'ha preceduta non sono mai stati attivi nel campo della interpretazione delle immagini.

Il sensore ADS40 presenta sul piano focale linee d'acquisizione multispettrale: può produrre precise informazioni geometriche sulla superficie terrestre ma anche dati sul canale dell'infrarosso vicino gestibili con tecniche proprie del telerilevamento. Questo sensore rende più sottile la demarcazione tra fotogrammetria e telerilevamento e accelera il declino della fotogrammetria "a pellicola".

Il dibattito sulle immagini da aereo rispetto a quelle da satellite è tuttora in corso. Le applicazioni ad alta risoluzione con una dimensione del pixel "a terra" (GSD) che va da un centimetro ad un decimetro è verosimile che rimangano ancora per qualche anno oggetto delle sole camere a pellicola. Tuttavia c'è una mole enorme d'informazioni multispettrali nell'intervallo di risoluzione tra queste immagini ad altissima risoluzione e quelle ad 1 metro o meno offerte dagli operatori satellitari. Entrambi i sensori, aviotrasportati e satellitari, hanno i loro vantaggi e sono state sviluppate molte applicazioni sulla fusione dei loro dati. I due tipi di dato possono essere considerati complementari piuttosto che competitivi.

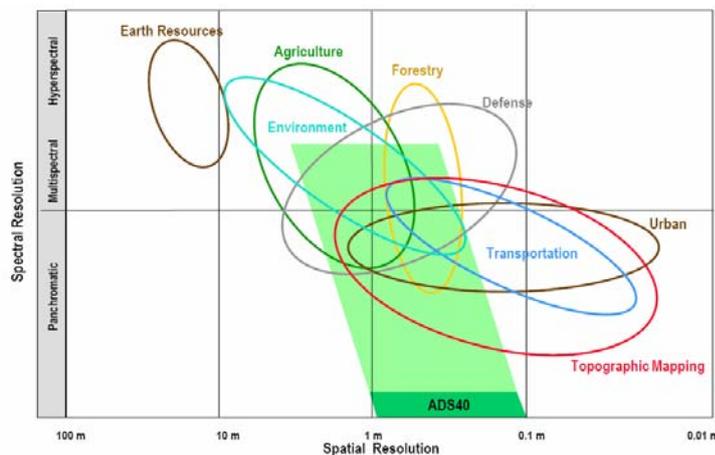


fig. 3.11 – Applicazioni possibili della ADS40

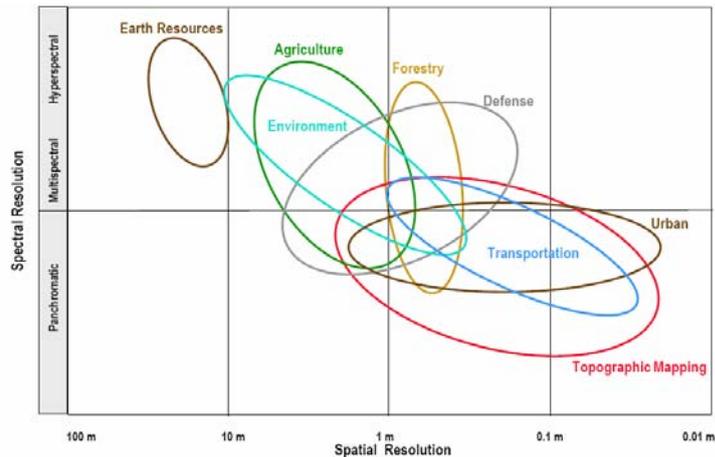


fig. 3.12 – Segmenti di applicazione in funzione della risoluzione geometrica e spettrale

Per potere avere un'opportunità d'impatto sul mercato della fotogrammetria abituato da decenni alle camere a pellicola ad alte prestazioni un sensore digitale aviotrasportato trilineari deve avere alcune caratteristiche: campo di vista ampio e ampie strisciate, alta risoluzione e accuratezza (sia geometrica che radiometrica), risposta radiometrica lineare, possibilità di produzione di immagini multispettrali, possibilità di visione stereoscopica. Un considerevole lavoro di ricerca condotto in Germania a partire dagli anni '70 ha dimostrato la possibilità di disporre tre linee pancromatiche sul piano focale con una linea addizionale multispettrale vicino al nadir (Albertz et al - 1996; Sandau and Bärwald - 1994; Sandau and Eckardt - 1996).

Nella precedente figura 3.7 il diagramma di sinistra suggerisce il metodo con cui il piano focale andrebbe popolato utilizzando il principio delle tre linee CCD: tre vettori pancromatici (in nero) restituiscono la geometria del terreno e la stereoscopia mentre le linee addizionali, la cui sensibilità è controllata da filtri, restituisce le informazioni multispettrali (RGB e NIR).



fig. 3.13 – Le offerte del mercato fotogrammetrico in funzione della risoluzione geometrica (GSD)

Nei capitoli successivi verrà data ampia trattazione su tutte le componenti tecnologiche del sensore. In questo capitolo ci si limita a evidenziare le differenze con gli altri sistemi disponibili.

Nel sensore ADS40 l'apertura del diagramma è sempre costante e posta paria a $f/4$, nelle camere *frame* è in genere variabile da $f/22$ a $f/4$. Per ottenere immagini digitali di buona qualità sotto tutte le condizioni di illuminazione la apertura è mantenuta costante essendo sufficiente allo scopo solo una variazione del tempo di integrazione delle linee CCD. Le

migliori immagini digitali si possono ottenere solo se le prestazioni delle ottiche sono perfettamente adattate alle linee CCD; questa condizione avviene, nel sensore ADS40, con una apertura f/4. Per quanto riguarda la compensazione dell'effetto di deriva, nel sensore ADS40 è possibile impostare la compensazione automatica attraverso il sistema di controllo di bordo Flight & Sensor Management System (FCMS).

Un'altra componente a favore dei sistemi digitali rispetto alle tradizionali camere a pellicola riguarda la curva caratteristica del supporto. Il CCD è un rivelatore perfettamente lineare (la linearità è di solito migliore dello 0.01%). In pratica ciò significa che il numero di elettroni generati in un pixel è direttamente proporzionale alla quantità di luce incidente. Ne derivano numerosi vantaggi rispetto alla fotografia tradizionale:

- la soglia minima di rivelazione è data dal rumore medio complessivo presente nell'immagine. Se il rumore è molto basso il CCD sarà in grado di rivelare dettagli estremamente deboli.
- Il CCD non soffre dell'effetto Schwarzschild e quindi manterrà la stessa sensibilità ed efficienza quantica indipendentemente dalla durata dell'esposizione.

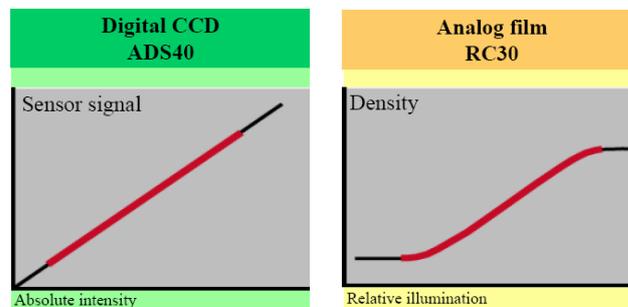


fig. 3.14 – Curve caratteristiche del CCD e della pellicola

Non tutti i fotoni incidenti sulla superficie di un pixel del CCD producono fotoelettroni. Il rapporto tra i fotoelettroni prodotti e i fotoni incidenti, mediamente, per secondo e per singolo pixel, è un numero inferiore all'unità ed esprime l'efficienza quantica del CCD. E' solitamente espresso in percentuale ed indica la sensibilità teorica di un CCD.

La reale sensibilità è inferiore, di poco o di tanto, in funzione della qualità della camera CCD. La sensibilità tipica di una camera CCD non professionale varia tra lo 0 e il 60%, in base alla lunghezza d'onda dei fotoni incidenti. Misurando l'efficienza quantica per ogni valore di lunghezza d'onda in cui dividiamo lo spettro della luce incidente, possiamo costruire la curva di sensibilità spettrale di ogni sensore.

La curva di sensibilità spettrale è uno dei dati importanti della patente di un sensore. Supponiamo di voler usare un CCD per acquisire un oggetto che emette radiazione luminosa nella banda del blu o del violetto: dobbiamo conoscerne la sensibilità in quella banda, ossia l'efficienza quantica relativa alla lunghezza d'onda del blu o del violetto. Un valore troppo basso della sensibilità spettrale ci costringerà ad effettuare lunghe esposizioni, tipiche della fotografia tradizionale, che impiega emulsioni di sensibilità equivalente non superiore al 4%, nel migliore dei casi.

Un buon CCD deve possedere una curva spettrale abbastanza efficiente per lunghezze d'onda comprese tra i 400 e i 700 nm, con valori limite di efficienza quantica non inferiori al 50% del valore di picco. I CCD che

hanno curve spettrali con picco a 530-550 nm danno generalmente ottimi risultati.

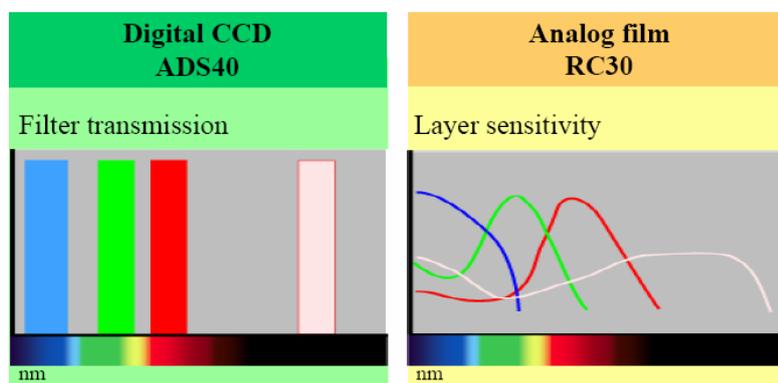


fig. 3.15 – Curve di sensibilità spettrale del CCD e della pellicola

Altro fattore importante è l'uniformità dell'efficienza quantica su tutta la superficie del sensore. Variazioni di sensibilità tra pixel e pixel, a parità di lunghezza d'onda, sono causa di rumore e riducono la qualità delle immagini. Nelle pellicole la sovrapposizione tra le varie curve spettrali (R,G,B e NIR) genera una contaminazione di colori nella immagine.

L'esperienza di ricerca a cui si riferisce questa Tesi di Dottorato è stata condotta su immagini ADS40 come illustrato nei capitoli successivi in cui verrà data ampia trattazione sia alla tecnologia della camera che alla storia del suo sviluppo.

3.3.2 Sensori lineari a tre linee. Starlabo Corp. Serie StarImager

StarImager è un sensore a tre linee (TLS) sviluppato dalla Starlabo Corporation di Tokio e dall'istituto di Fotogrammetria e Geodesia di Zurigo, l'ETH. StarImager va usualmente montato su elicottero: usando la terminologia anglosassone è un sensore *helicopter-borne*. Il principio su cui si basa il progetto della camera è abbastanza simile a quello già visto del sensore ADS40. Come tutti i sensori digitali StarImager è equipaggiato con un sistema GPS inerziale per ottenere direttamente i parametri dell'orientamento esterno delle tre linee Forward, Nadir e Backward. Il sensore viene alloggiato su una piattaforma di smorzamento delle vibrazioni in modo da ottenere immagini di elevata qualità.



fig. 3.16 – Starlabo Corp. StarImager

La camera acquisisce 10 canali simultaneamente: 9 pancromatici che si fondono in 3 immagini RGB e un canale NIR. Le immagini ottenute dal sensore possono essere considerate pseudo-ortogonali (la presa, analoga a quella della ADS40, non è assimilabile ad una prospettiva centrale) quindi ottimali per la produzione di ortofoto di alta qualità.

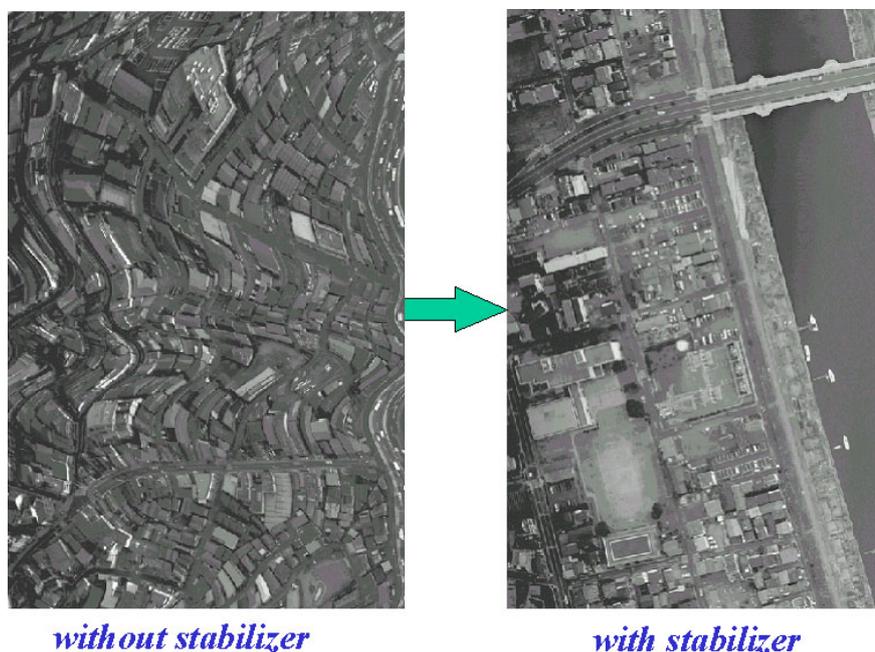


fig. 3.17 – Immagine StarImager con e senza stabilizzatore

I vantaggi ascrivibili a questo tipo di sensore sono molteplici. Ovviamente molti di questi sono condivisi con tutta la famiglia dei sensori a tre linee. Li riassumiamo brevemente:

- non è necessario il processo fotografico di sviluppo. Il digitale è un supporto stabile nel tempo;

- il *range* dinamico del CCD è superiore a quello della pellicola;
- la presenza del GPS inerziale consente il *direct georeferencing* cioè la possibilità di operare la triangolazione aerea senza GCP;
- la piattaforma di stabilizzazione consente di ottenere immagini di elevata qualità;
- la camera può essere montata su elicottero in posizione obliqua. Questa configurazione geometrica consente applicazioni particolari (*texture mapping* su muri ed edifici, fotogrammetria obliqua etc...);
- montando il sensore su elicottero è possibile mantenere bassa la quota relativa di volo con conseguente decremento del GSD. La camera consente quindi applicazioni cartografiche a grande e grandissima scala;
- la presa nadirale è pseudo - ortogonale;
- il sistema produce strisciate RGB continue con una sovrapposizione longitudinale del 100 %;
- la disponibilità di tre canali RGB aumenta le possibilità di interpretazione.

Diamo ora alcuni dei parametri di progetto:

- la distanza focale è di 90mm (SI290);
- i tre angoli stereoscopici sono approssimativamente di 16°, 23° e 39°;
- ogni tripletta CCD è costituita da 14400 rilevatori da 5 µm e acquisisce circa 500 linee al secondo;
- il sistema GPS acquisisce la posizione della antenna con una frequenza di campionamento di 5 Hz. Il GPS opera in modalità cinematica, viene quindi operata una acquisizione contemporanea da un ricevitore master posto su un punto noto. L'accuratezza del sistema è nell'ordine di qualche centimetro (2 ÷ 3 cm).
- Il sistema IMU posto sopra la testa del sensore acquisisce l'assetto della camera con una frequenza di 500 Hz.

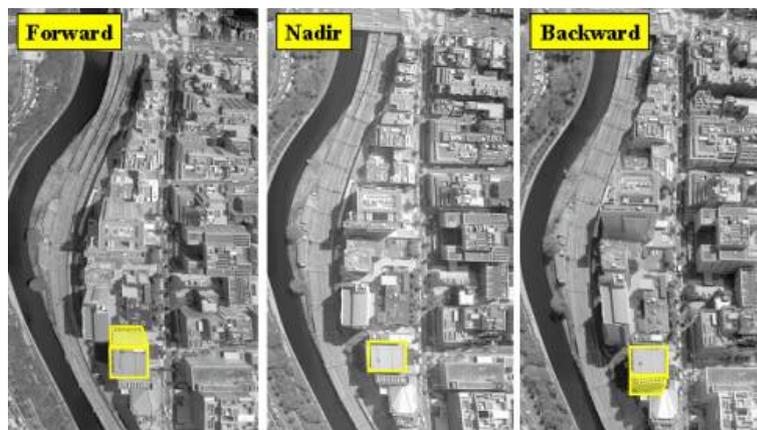


fig. 3.18 – Le tre scene F,B e N del sensore SI.
Sono ben visibili gli effetti prospettici sulle prese inclinate

Il sensore viene calibrato sia in laboratorio (dalla Starlabo) che sul campo in modo da ottenere la massima accuratezza possibile e potere operare la

misura tridimensionale sulle immagini. In laboratorio di calibrazione si conducono sia test geometrici (posizione dei pixel, distorsione, funzione di trasferimento MTF) che radiometrici (sensibilità, PRNU, rapporto segnale/rumore, test di linearità del CCD etc...).



Fig. 3.19 – Il laboratorio di calibrazione del sensore StarImager

Per ciò che riguarda il processamento dei dati va fatto notare che il modello matematico di riferimento è costituito sempre dalle equazioni di collinearità adattate ai sensori digitali a tre linee. I modelli di traiettoria da usare durante la triangolazione aerea sono tre:

- DGR – Direct Georeferencing Model;
- PPM – Piecewise Polynomial Model;
- LIM – Lagrange interpolation Model.

I prodotti digitali ottenibili dal sensore sono assolutamente analoghi a quelli ottenibili da altri sensori a tre linee. Dalle immagini grezze, aventi parallassi residue che non consentono la visione stereoscopica, si passa attraverso i dati di orientamento esterno (direttamente o aggiornati con un *bundle adjustment*) a due prodotti di accuratezza superiore. Si può generare una immagine rettificata su un piano medio a quota costante in cui vengono ridotte drasticamente le parallassi residue: queste immagini sono ottimali per la visione e la restituzione stereoscopica. Inoltre da queste immagini è possibile estrarre in modo semi-automatico un modello digitale di elevazione con cui operare il raddrizzamento differenziale (ortorettifica) delle scene grezze ottenendo un prodotto di maggiore accuratezze geometrica.

3.3.3 Sensori lineari a tre linee. Wehrli Ass. 3-DAS-1 Scanner

Questo sensore è stato presentato in occasione del Convegno Internazionale ISPRS che si è tenuto ad Istanbul nel 2004. La Wehrli Associates è una azienda abbastanza nota nel campo degli scanner fotogrammetrici per pellicole e diapositive. L'azienda ha realizzato una *joint venture* con la ditta ucraina GeoSystem per produrre questo nuovo sensore ed entrare così a far parte di questo nuovo mercato in espansione.

Per la fase di progettazione l'azienda si è avvalsa della consulenza scientifica del Prof. James Bethel della Purdue University.



fig. 3.20 – Lo scanner a tre linee Wehrli 3-DAS-1

Così come il sensore StarImager il 3-DAS-1 è equipaggiato con tre sensori trilineari Kodak: questa configurazione progettuale consente di acquisire immagini RGB davanti, dietro e in direzione nadirale.

Il prototipo esposto ad Istanbul era equipaggiato con *array* CCD da 8000 pixel ognuno di 9 μm di grandezza. Gli angoli stereoscopici sono di 26°, 16° e 42°. A differenza di tutti gli altri sensori a tre linee che utilizzano un solo sistema di lenti il sensore 3-DAS-1 utilizza tre diverse lenti, una per ogni vettore trilineare. Si tratta di lenti Rodenstock aventi una focale di 100 mm ed una apertura pari ad $f/4$. Il sensore va installato su supporto giroscopico stabilizzato ASP-1. Il prototipo visto ad Istanbul è stato progettato per operare insieme ad un sistema GPS/IMU della Applanix.

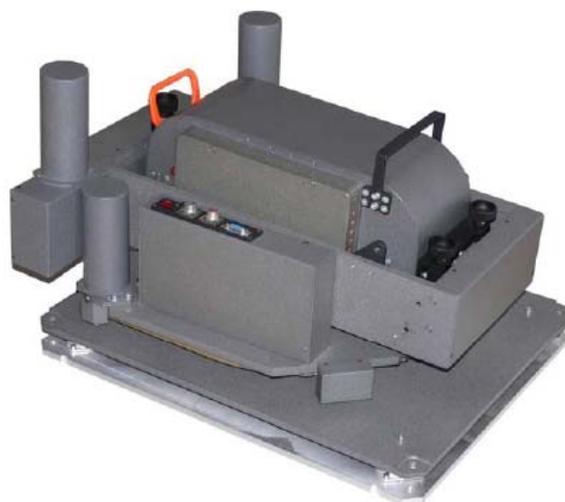


fig. 3.21 – Il sensore Wehrli Ass. 3-Das-1 installato sullo smorzatore ASP-1

3.3.4 Sensori iperpettrali. Il sensore ASI/HySpex

L'ASI (Airborne Spectral Imaging)/ Hypspx è uno spettrometro compatto basato su tecnologia *pushbroom* cioè senza organi in movimento. Il sensore è stato sviluppato da una società norvegese, la Norsk Elektro Optikk AS (NEO). Il sensore è stato fortemente voluto dai Ministeri della Difesa dei paesi Francia e Norvegia che hanno istituito un consorzio di sviluppo coinvolgendo anche l'Università di Marsiglia.

Sono state previste 4 diverse versioni del sensore le cui specifiche sono illustrate nella seguente figura 3.22.

Module	VNIR-640	VNIR-1600	SWIR	
Detector	Si CCD 640*480	Si CCD 1600*1200	InGaAs 320*256	CdHgTe 320*256
Spectral range	0.4-1 μ m	0.4-1 μ m	1-1.7 μ m	1-2.3 μ m
Spatial pixels	640	1600	320	320
FOV across track	18.4°	17°	14°	14°
Pixel FOV across track/along track	~0.5mrad/ 0.5mrad	~0.2mrad/ 0.4mrad	0.75mrad/ 0.75mrad	~0.75mrad/ 0.75mrad
Spectral sampling	5nm/10nm*	3.7nm	5nm	5nm
# spectral bands	128/64	160	160	256
Digitization	12bit	12bit	12bit	14bit
Frame rate to HD	500/850fps*	>120fps	>100fps	>100fps

*Binned mode

fig. 3.22 – Caratteristiche tecniche dello spettrometro pushbroom ASI

Come si vede dalla tabella il sensore presenta una risoluzione spettrale capace di ben 256 diverse bande. Il sensore ASI presenta al contempo anche una ottimale risoluzione geometrica. In Italia è operativo da anni il sensore iperspettrale MIVIS che presenta una elevata risoluzione spettrale ma una bassa risoluzione geometrica (volando a 2000 metri si ottengono scene con GSD= 3 metri). L'ASI ha un angolo di vista (FOV – Field Of View) minimo pari a 0.5 mrad: ipotizzando una quota relativa di volo di 1000 m ne risultano immagini con GSD pari a 50 cm. In funzione del tipo di spettrometro utilizzato si avranno strisciate larghe 640, 1600 o 320 pixel. Dal punto di vista della classificazione a cui si è fatto riferimento l'ASI è basato su 4 sensori matriciali ma la presa viene eseguita come nei sensori lineari attraverso il movimento del velivolo: da questo punto di vista è un ibrido. Il sensore può essere utilizzato anche in laboratorio per svariate applicazioni industriali.



fig. 3.23 – Lo spettrometro digitale HySpex

3.3.5 Camere a sensore matriciale di grande formato. Vexcel UltraCamD™ Digital Aerial Camera

La camera digitale aviotrasportata UltraCam D produce simultaneamente immagini digitali RGB e NIR aventi una dimensione di 11500 x 7500

pixel. La camera appartiene alla famiglia delle *frame camera* e quindi la acquisizione delle immagini si basa su un sensore CCD matriciale.



fig. 3.24 – La camera a CCD matriciale Vexel UltraCam

La figura 3.24 mostra il corpo principale della camera e l'unità di controllo e immagazzinamento UltraCam-D/SCU. L'unità è equipaggiata con 15 processori e 30 Hard Disk removibili in grado di immagazzinare una immagine in 0.75 secondi. La capacità complessiva del sistema di immagazzinamento è di circa 1 Tbyte. Il sistema integra un modulo di compensazione dell'effetto di trascinamento FMC (Forward Motion Compensation) che consente di raggiungere una risoluzione geometrica massima di 3 cm.

La UltraCam D restituisce immagini digitali di grande formato per mezzo di 4 coni ottici. Tra questi vi è un cono ottico (master cone) che punta su 4 sensori CCD matriciali disposti in un angolo del suo campo di vista. La disposizione dei 4 sensori CCD è rigida e nota a priori e il sistema è calibrato; condizioni queste che consentono di realizzare un sistema di acquisizione fotogrammetrica in cui è possibile realizzare un sistema di coordinate immagine (orientamento interno). I rimanenti tre coni producono 5 immagini aggiuntive e sono associati ognuno ad uno o due sensori CCD matriciali. Queste 5 sotto-immagini vanno a riempire i buchi generati dai 4 sensori CCD del cono principale. Le immagini aggiuntive sono integrate alla immagine principale attraverso un processo di interpolazione.

La UltraCam D introduce il concetto di immagine sinottica: i 4 sottosistemi ottici sono disposti linearmente lungo l'asse di volo, il velivolo (e quindi il sensore) ha una velocità media di 70 m/sec o ciò che è lo stesso 7 cm ogni millisecondo. Nell'intervallo di tempo di qualche millisecondo ogni cono è sottoposto a una piccola traslazione dovuta al movimento del vettore.

La disposizione lineare dei coni realizza una condizione geometrica assimilabile ad una singola prospettiva centrale. I quattro sistemi ottici descritti producono una immagine pancromatica. La camera è poi

equipaggiata con altri 4 coni ottici che acquisiscono l'immagine RGB e il canale infrarosso vicino (NIR).

3.3.6 Camere a sensore matriciale di grande formato. Z/I Imaging DMC.

La camera DMC (Digital Modular Camera) oggi rinominata DMCS (Digital Mapping Camera System) è stata oggetto di sviluppo per qualche anno alla Z/I Imaging. L'annuncio al pubblico dello sviluppo è stato dato nel 1999 e il primo prototipo è stato presentato al pubblico nel luglio del 2000 al congresso internazionale ISPRS di Amsterdam. La DMCS comprende due camere diverse integrate all'interno di un solo apparato installato su piattaforma giroscopica di smorzamento Zeiss T-AS. La prima di queste due camere è progettata per immagini pancromatiche, la seconda produce immagini a colori o falso colore. La camera pancromatica è a sua volta costituita da quattro diversi sistemi ottici disposti in una configurazione geometrica "a stella" nella testa del sensore. Dai quattro sistemi ottici si ottengono 4 diverse immagini aventi tutte la stessa esposizione. Queste 4 immagini, nella fase di *pre-processing*, sono poi ricondotte ad una sola immagine equivalente ad una prospettiva centrale. Ognuna delle 4 componenti ottiche è equipaggiata con un sensore CCD matriciale da 7000 x 4000 (28 Megapixel) originariamente prodotto dalla Philips a Eindhoven in Olanda; oggi i sensori matriciali per la DMCS vengono prodotti dalla canadese Dalsa. Ognuna delle quattro camere monta un sistema di lenti Zeiss con focale $f = 120$ mm. Queste 4 camere usate insieme producono una immagine rettangolare pancromatica di dimensioni 13500 pixel x 8000 pixel; i quattro sensori sono equivalenti ad un unico sensore da 108 Megapixel. La copertura angolare è pari a 74° (*cross track*) e 44° (*along track*).



fig. 3.25 – La camera a sensori CCD matriciali DMC della Z/I Imaging

Per la acquisizione e la generazione di immagini RGB e falso colore la Z/I Imaging ha implementato sulla DMC un altro sistema multi-camera. In questo caso però le camere sono disposte con gli assi ottici paralleli in modo da acquisire la stessa porzione di territorio. Ogni camera ha anteposto un filtro corrispondente alla banda spettrale che si vuole acquisire. La dimensione della matrice CCD usata in questa multi-camera è più ridotta (2000 x 3000 pixel = 6 megapixel) rispetto a quella usata sulle camere pancromatiche. La focale più corta ($f=25$ mm) aumenta l'angolo di campo e conseguentemente la copertura. Lo svantaggio, in questo caso,

è la notevole riduzione della risoluzione geometrica a terra; il GSD relativo alle immagini NIR/GB e R/GB è più grande rispetto al GSD delle scene pancromatiche, a parità di quota relativa di volo. L'immagine finale RGB o falso colore viene ottenuta nella fase, successiva alla presa, di pre-processing per co-registrazione dei 3 o 4 canali acquisiti sulle diverse bande. Le immagini RGB a bassa risoluzione possono essere fuse alle immagini pancromatiche ad alta risoluzione attraverso una operazione di *pan-sharpening*.



fig. 3.26 – Il principio della multi-camera su cui si basa la DMC

In figura 3.26 è mostrata la testa del sensore DMC: al centro sono visibili le 4 camere pancromatiche ad alta risoluzione, nella zona periferica le 4 camere per le acquisizioni a colori e falso colore.

<p align="center">Digital Camera Technical Data</p> <p align="center">Panchromatic image size 11,500 * 7,500 pixels Panchromatic physical pixel size 9 μm Panchromatic lens focal distance, standard 100 mm Angle-of-view from vertical, cross track (along track) 55° (37°) Color (multi-spectral capability) 4 channels -- RGB & NIR Color image size 4008 * 2672 pixels Color physical pixel size 9 μm Color lens system focal distance 28 mm Shutter speed options 1/1000 to 1/30 Forward-motion compensation (FMC) TDI controlled Maximum FMC-capability 50 pixels Smallest pixels on the ground at flying height of 300m 3cm Minimum inter-image interval 0.75 seconds Analog-to-digital conversion at 14 bits Radiometric resolution in each color channel 14 bit Physical dimensions of the camera unit 45cm x 45cm x 60 cm Weight <30 kg Power consumption at full performance 600 W</p> <p align="center">Controller and Data Storage Unit</p> <p align="center">In-flight storage capacity > 1 TB Capacity to collect in-flight uncompressed frames > 1850 Storage and computing configuration Parallel arrangement with multiple CPUs and disks Physical dimensions 55cmx40cmx65 cm Weight <35 kg</p> <p align="center">Some Operational Specification</p> <p align="center">Maximum data collection period at 70% forward overlap, at scale 1:10,000 (1:3,000)>6 hours (5hours) Post-processing of collected raw image streams < 12 hours (partly in-flight) Data transfer from aircraft to office: multiple options</p>
--

fig. 3.27 – caratteristiche tecniche della camera Vexcel UltraCam

3.3.7 Camere a sensore matriciale di grande formato. DIMAC Systems

La DiMac (Digital Modular Aerial Camera) è una camera di grande formato prodotta dalla DiMAC Systems e si basa su un sensore matriciale 7216 x 4212 pixel effettivi (~30 Megapixel).

La camera è costituita da tre elementi:

- Camera Module (CM);
- Camera Cylindrical Frame (CCF);
- IT Rack (ITR).

La DiMac come la DMC è una multicamera. La componetene CM è l'unità di acquisizione delle immagini. E' costituita da un modulo indipendente capace di acquisire una immagine a colori attraverso un sensore CCD. Il sensore accoppiato ad un filtro tipo Bayer è prodotto dalla Kodak e ha una superficie di 7216 x 4212 pixel effettivi. Ogni modulo monta un dorso digitale PhaseOne. Riguardo alla focale i vari moduli della camera si presentano molto flessibili: si possono installare lenti che vanno da $f = 55$ mm a $f = 120$ mm. La camera è dotata di

diaframma della Rollei capace di esposizioni che vanno da 1/125 a 1/500 sec con aperture da f/4 a f/16.

Il componente CCF, in fibra di carbonio, ospita da 1 a 4 moduli camera e il sistema inerziale GPS/IMU. Il CCF di 40 cm di diametro è alloggiabile sulle più diffuse piattaforme giro-stabilizzate di smorzamento. L'alloggiamento in fibra di carbonio può ospitare ogni sistema IMU presente sul mercato.



Fig. 3.28 – Le tre componenti della camera DiMAC

Il componente ITR costituisce l'interfaccia di controllo e di scaricamento dei dati. Inoltre l'ITR controlla le operazioni durante il volo. Il componente ITR è modulare ed è costituito da un computer centrale a cui si aggiunge un rack di controllo per ogni modulo camera. Il modulo ITR gestisce anche la componente FMC (Forward Motion Compensation) di compensazione dell'effetto di trascinamento.

Le immagini di due coni adiacenti possono essere fuse ottenendo una copertura a terra di 10500 x 7200 pixel (~75 Megapixel)

Bibliografia Sensori Digitali

R. Galetto – Camere digitali per riprese aeree e terrestri – Bollettino SIFET N° 4 -pag 45-85.

G. Petrie – Airborne Push-Broom Line Scanners: an alternative to Digital frame cameras. GeoInformatics, Vol. 8, No. 1 - pag 50-57.

G. Petrie – Airborne Digital Frame Cameras: the technology is really improving - GeoInformatics, Vol. 6, No. 7 - pag 18-27. 2003.

G. Petrie, S. Walker – Airborne Digital Imagers. An Overview. Invited Paper, ISPRS Commission I Symposium, Marne-la-Vallee, France. 2006.

G. Petrie - Further Advances in Airborne Digital Imaging. Several New Imagers Introduced at ASPRS". GeoInformatics, Vol. 9, No. 5 - pag 16-23. 2006.

Bibliografia ADS40

P. Fricker, F. Zuberbüler, R. Pacey – Airborne Digital Sensors: principles, design and use as esemplified by the LH System ADS40 – Leica Geosystems – 2001.

P. Fricker - Airborne Digital Sensors from Leica Geosystems - RSPSoc/RICS/ICES One Day Symposium Digital Aerial Sensors for Photogrammetry - University of Newcastle upon Tyne – 2004.

Bibliografia StarImager

K. Tsuno, A. Gruen, L. Zhang, S. Murai, R. Shibasaki - StarImager – a new airborne three line scanner for large scale applications. Atti del convegno internazionale ISPRS - Istanbul 2004.

M. Madani, Y. Wang , K. Tsuno, K. Morita - Stereo Measurement on Imagestation with Starimager - Airborne Three-line Scanner – Imagery. Atti del convegno internazionale ISPRS - Istanbul 2004. p.223.

Bibliografia 3-DAS-1

H. Wehrli, V. Gayda, G. Wehrli, J. Bethel - Introduction of the 3-DAS-1 digital aerial scanner. Atti del convegno internazionale ISPRS - Istanbul 2004.

Bibliografia ASI/HySpex

<http://www.neo.no/products/hyperspectral.html>

I. Baarstad, T. Løke, P. Kaspersen - ASI, a new Airborne Hyperspectral Imager - In: Proc. 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy-New Quality in Environmental Studies (B. Zagajewski and M. Sobczak, Eds.), Warsaw, Poland, 2005.

L.L.Randeberg, I.Baarstad, T.Løke, P.Kaspersen and L.O. Svaasand - Hyperspectral imaging of bruised Skin - Proceedings of SPIE BIOS 2006, in stampa.

Bibliografia UltraCam

F. Leberl – Frame Camera Versus “Push Brooming”-
<http://www.vexcel.com/products/photogram/ultracam/downloads.html>

F. Leberl, M. Gruber - UltraCam-D: Understanding Some Noteworthy Capabilities - Photogrammetric Week 2005, Stuttgart, Germany.

M. Kröpfl, E. Kruck, M. Gruber - Geometric Calibration of the Digital Large Format Aerial Camera UltraCamD - ISPRS 2004, Istanbul.

R. Perko, A. Klaus, M. Gruber - Quality Comparison of Digital and Film-based Images for Photogrammetric Purposes - ISPRS 2004, Istanbul.

F. Leberl and M. Gruber - Economical Large Format Aerial Digital Camera - GIM International, The worldwide Magazine for Geomatics, June 2003.

F. Leberl, M. Gruber, M. Ponticelli, S. Bernögger, R. Perko - The UltraCam Large Format Aerial Digital Camera System - Proceedings Of The American Society For Photogrammetry & Remote Sensing Anchorage, Alaska, 5-9 May, 2003.

Bibliografia DMC

L. Tang, C. Dörstel, K. Jacobsen, C. Heipke, A. Hinz - Geometric accuracy potential of the digital modular camera - IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000.

C. Dörstel - The Most Versatile Digital Large Format Camera in the Market - Photogrammetric Week 2005, Stuttgart, Germany.

W. Zeitler, C. Doerstel - Geometric calibration of the dmc: method and results - IntArchPhRS (34) Part 1 Com I, pp 324 – 333, Denver 2002.

C. Dörstel - DMC - Practical Experiences and Photogrammetric System Performance - Photogrammetric Week 2003, Wichmann, Heidelberg, pp. 59-65

Riferimenti DiMAC

<http://www.dimacsystems.com/>

CAPITOLO 4

Il sensore Leica ADS40 – la storia e le fasi di sviluppo

4.1 Storia e sviluppo del sensore

La ricerca condotta per lo sviluppo di questa tesi di Dottorato si basa esclusivamente su scene acquisite con il sensore ADS40 della LH Systems. Il sensore aviotrasportato ADS40 è stato presentato al pubblico in occasione del XIX congresso ISPRS tenutosi ad Amsterdam nel luglio del 2000. ADS rappresenta l'acronimo di *Aerial Digital Sensor*. Le due fasi di presentazione al pubblico e d'immissione sul mercato hanno fatto seguito ad una intensa attività di sviluppo e di test. Questo capitolo descrive la storia della nascita del sensore e i test condotti per valutarne le caratteristiche metriche, radiometriche e qualitative.

L'ADS40 è un sensore digitale trilineare ed è stato sviluppato dalla LH Systems⁽¹⁾ in collaborazione con il Centro Aerospaziale Tedesco⁽²⁾ (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR).

La presentazione di Amsterdam ha fatto seguito ad una fase di sperimentazione su modello ingegnerizzato (EM – Engineered Model). Il modello ingegnerizzato costituisce, nelle varie fasi di progettazione, la “pre-serie” di una macchina operativa commerciale.

Il primo test di volo con modello ingegnerizzato (EM) risale alla fine del 1998.

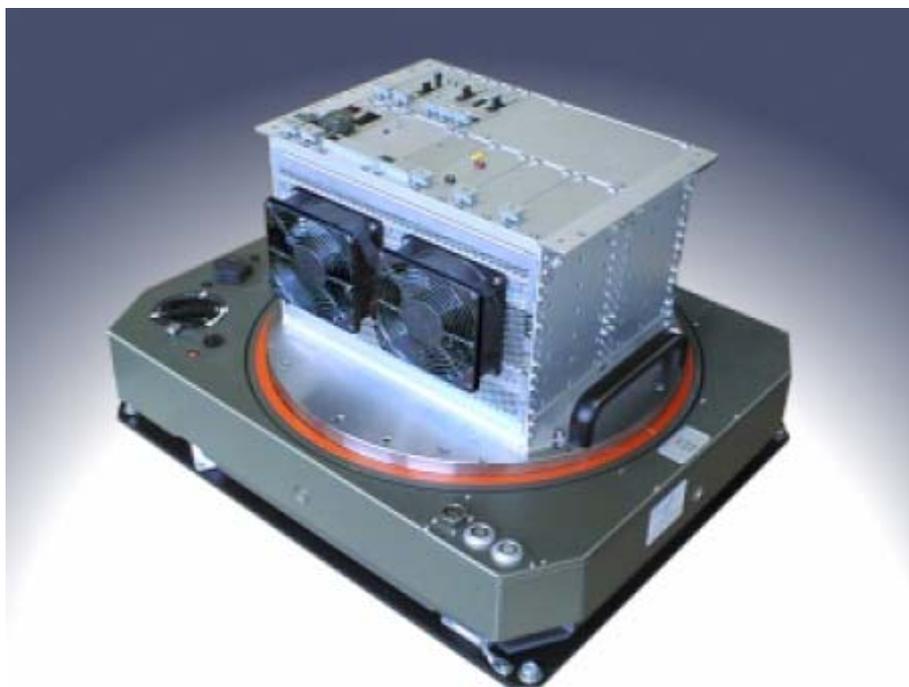


fig. 4.1 – Il modello ingegnerizzato (EM) del sensore ADS40

Dopo questo modello è stato definito un modello prototipo (PM – Prototype Model) perfezionato avente circa 20000 pixel per linea. Il



Nel 1997 GDE e Leica hanno costituito una nuova società al 50% ciascuno, la LH Systems (Leica - Helava Systems), per combinare i prodotti fotogrammetrici hardware della Leica (scanner, restitutori analitici, fotocamere aeree, ecc.) e il software di fotogrammetria digitale della GDE, SO CET SET.

La LH Systems ha ottenuto i diritti per la commercializzazione del SO CET SET, mentre l'attuale BAE SYSTEMS ha mantenuto quelli sullo sviluppo del prodotto.

modello prototipo è stato testato per la prima volta nel gennaio del 2000.



Fig. 4.2 –Il modello prototipo (PM) del sensore ADS40

Al modello prototipo ha fatto seguito il modello di serie (SM).

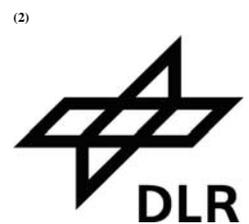


fig. 4.3 – Il modello della prima serie (SM) del sensore ADS40

La tabella seguente riassume alcune importanti caratteristiche dei tre modelli:

Parametri della camera	EM	PM	SM
Sensore	3 linee CCD (12000 pixel)	3 linee CCD (12000 pixel)	2 linee CCD da 2x12000 pixel (sensori pancromatici). 6 linee CCD da 12000 pixel (RGB + NIR)
Lunghezza focale	80 mm	47.3 mm	62.77 mm
Campo di vista (FOV)	52°	79°	64°
Angoli stereoscopici: Forward/Nadir, Backward/Nadir	17° - 25°	21° - 34°	14° - 28°
Range dinamico	12 bit	12 bit	12 bit
Quota di volo / GSD / abbracciamento	3000 m / 0.24 m / 2900 m	3000 m / 0.20 m / 4900 m	3000 m / 0.31 m / 3700 m
Memoria di massa	3 x 9 GByte	6 x 50 Gbyte	0.5 Tbyte

fig. 4.4 – Caratteristiche tecniche del sensore LH Systems ADS40



La Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) è l'agenzia spaziale Tedesca e si occupa delle ricerche nazionali nei settori dell'aviazione e del volo spaziale.

I programmi di ricerca includono complessi progetti nazionali e internazionali. Oltre ad occuparsi delle ricerche la DLR fornisce i membri che rappresentano il governo Tedesco nell'Agenzia Spaziale Europea e più in generale in sede internazionale per le faccende aerospaziali.

La DLR è coinvolta nello sviluppo del sistema di posizionamento europeo Galileo.

4.2 I primi test di volo

Lo scopo principale dei test di volo consiste nella verifica di tutte le principali funzionalità della ADS40 tra cui la camera, la piattaforma e il sistema di misura inerziale (IMU). In fase di sperimentazione del modello EM si è reso necessario un controllo del sistema nelle reali condizioni operative.

Gli obiettivi da conseguire durante i test di volo sono:

- test della camera;
- verifica dei parametri hardware scelti;
- test di sincronizzazione tra le immagini e il dato di assetto del sensore;
- test degli algoritmi di *pre-processing* e di correzione.

Lo sviluppo del modello ingegnerizzato del sensore è stato ultimato a metà del 1998 basandolo sul sensore WAAC⁽³⁾ (Wide Angle Airborne Camera) della DLR. Un anno dopo era già pronto il primo prototipo.

⁽³⁾WAAC



E' acronimo di Wide Angle Airborne Camera. E' stata sviluppata dal centro Aerospaziale tedesco (DLR). La progettazione è basata sul sensore WAOSS destinato a svolgere il ruolo di *payload* nella missione Marte96.

fig. 4.5 – Immagine pancromatica di Stromboli acquisita dal sensore WAAC

I primi test su modello ingegnerizzato sono stati condotti nel mese di novembre 1998. Il modello EM è stato alloggiato su un Cessna della compagnia aerea Rheinbraun.

Il sensore è stato alloggiato su piattaforma giro-stabilizzata PAV30 della LH Systems.



fig. 4.6 – La piattaforma giroscopica stabilizzata LH Systems PAV30

Questo dispositivo dotato di smorzatori meccanici consente di ottenere immagini di elevata qualità in cui gli effetti di trascinamento legato al moto del velivolo risultano compensati. Nella seguente figura 4.7 sono mostrati gli effetti della piattaforma sulle strisciate acquisite con una tradizionale camera a pellicola.

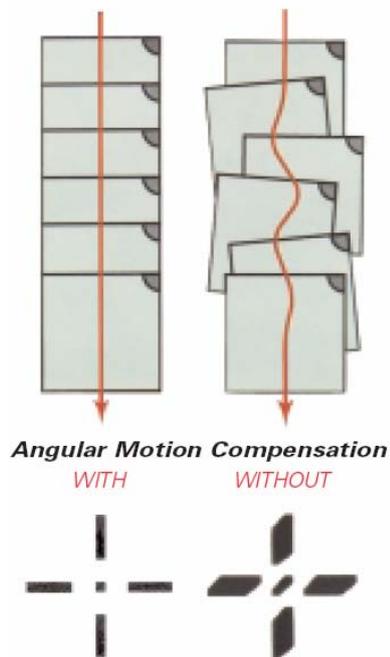


fig. 4.7 – Effetti della piattaforma PAV30 su una tradizionale *frame camera*

La figura seguente mostra invece una porzione della prima immagine acquisita dal modello EM dell'ADS40.

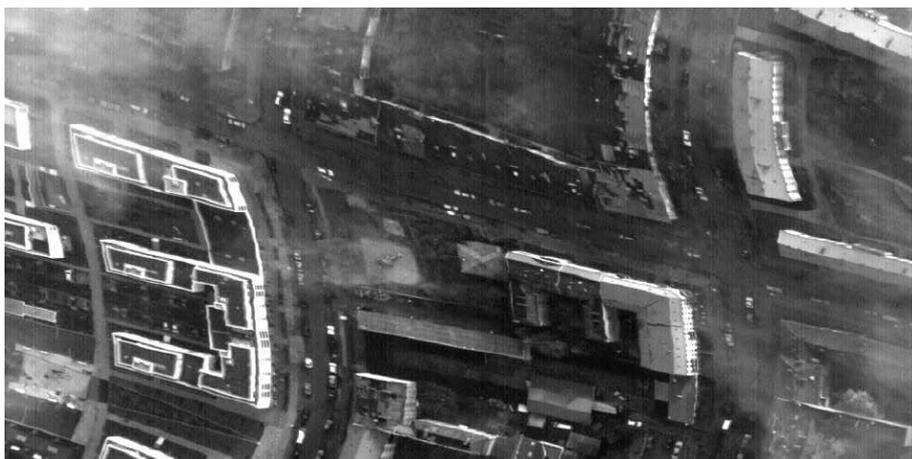


fig. 4.8 – La prima immagine acquisita dal modello EM della ADS40

Questo primo dato acquisito è sembrato subito incoraggiante evidenziando l'alto potenziale della camera in termini di risoluzione geometrica e radiometrica.

I successivi test di volo sono stati condotti tra il mese d'Aprile e il mese di Dicembre del 1999 su un Cessna T207A della Libera Università di Berlino. In questi successivi test di volo sono state adottate due diverse piattaforme giro-stabilizzate: la PAV11 e la PAV30, entrambe della LH Systems. Le misure degli angoli di assetto del velivolo sono state eseguite attraverso il sistema IMU Litton LR86 di proprietà della DLR.



fig. 4.9 – Il sistema di misura inerziale IMU LR86. In questa figura è montato su una Zeiss RMK Top 15

In questa fase sono stati determinati i bracci di leva dalla camera al sistema IMU e all'antenna GPS. Il sistema IMU Litton LR86 ha una frequenza interna di 90 Hz insufficiente per una completa rettifica delle immagini ADS40 in quanto la frequenza di acquisizione è di qualche centinaio di HZ cioè corrispondente ad un tempo di immagazzinamento dei CCD di qualche millisecondo. Le oscillazioni con frequenza maggiore di 90 Hz dovrebbero essere quindi soppresse dalla piattaforma stabilizzata e dai supporti anti-shock. Comunque sono stati ottenuti dati di buona qualità più che sufficienti in fase di prima sperimentazione per

una generale localizzazione del problema. I dati di assetto sono stati registrati continuamente durante tutto il volo e la sincronizzazione con le immagini acquisite è stata condotta attraverso una procedura di discretizzazione della traiettoria nota con il termine inglese “*triggering*”. I dati di posizione sono stati ottenuti attraverso un posizionamento GPS differenziale con correzione in tempo reale fornita da una stazione master sita a Berlino (Landesvermessungsamt Berlin).

L’area su cui sono stati condotti i primi test interessa una zona a sud di Berlino su cui ricade l’aeroporto berlinese Schoenefeld. L’area si è dimostrata ideale per una valutazione dell’accuratezza geometrica del sensore anche per la presenza delle lunghe e diritte taxiway dell’aeroporto. Su quest’area sono stati segnalizzati e rilevati 15 Ground Control Point (GCP).

Ultimata la fase d’acquisizione delle immagini è stata condotta la fase di pre-processing dei dati. Tutti i dati acquisiti sono stati estratti dalla memoria di massa e convertiti in un formato usuale. Questa parte del processo è chiamata “generazione del livello 0” che rappresenta il dato grezzo. Il sensore CCD trilineare da 12000 pixel del modello EM ha prodotto un file di 1.5 Gbyte. La versione commerciale della ADS40 sfrutta una particolare libreria di Socet Set in grado di gestire immagini di dimensioni superiori a 2 Gbyte. La procedura di generazione del dato grezzo (Livello 0) rappresenta la prima fase in cui si possono evidenziare errori sistematici dovuti alle elettroniche.

L’analisi dei dati d’assetto è stata condotta utilizzando il software della Applanix PosProc che fa parte della suite PosPac di Applanix.

4.3 Test su radiometria e *range* dinamico

Uno dei parametri fondamentali su cui sono stati focalizzati i primi test riguarda la radiometria del sensore Leica ADS40. Questi test sono serviti a provare la capacità dell’ADS40 a generare immagini aventi una risoluzione radiometrica di 12 bit. Uno dei principali vantaggi dei sensori digitali rispetto alle tradizionali camere a pellicola consiste nella maggiore dinamica radiometrica che si traduce in un elevato intervallo di variabilità della scala di grigi delle immagini. La variabilità dinamica della immagine è descritta dalla risoluzione radiometrica ed è limitata da varie fonti di rumore. Sia il *range* dinamico che il rumore sono stati studiati nelle fasi preliminari di test. La figura seguente mostra l’istogramma di frequenza di un’immagine acquisita dal modello EM. Come si vede il range dinamico varia da 141 a 2753 diversi livelli di grigio. Per rappresentare questa variabilità dinamica è necessaria una codifica a 12 bit.

Il rumore può essere di due tipi: statico e dinamico. Il rumore dinamico è tipicamente dipendente dal fattore tempo. Durante i test sono stati disposti un certo numero di target omogenei e riflettenti per studiare il rumore dinamico. Successivamente sono stati confrontati i valori di Digital Number misurati dal sensore sui vari target. La figura 4.10 mostra i risultati ottenuti dal confronto. Come si vede i pixel acquisiti dal sensore si distribuiscono con un andamento praticamente Gaussiano con una deviazione pari a circa un paio di pixel.

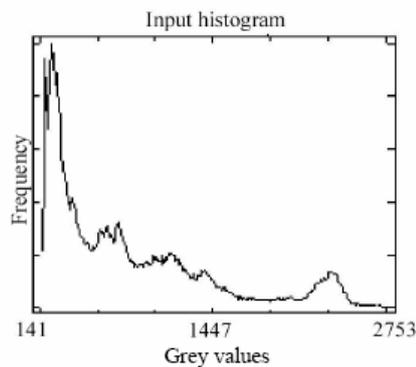


fig. 4.10 – Variabilità radiometrica del sensore ADS40

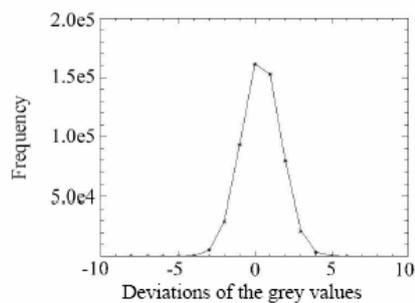


fig. 4.11 – Variabilità radiometrica del sensore ADS40

L'origine del rumore dinamico è da far risalire al rumore fotonico dei sensori CCD.

E' possibile definire un parametro, indipendente dal tempo, chiamato "di non uniformità della risposta del pixel" (PRNU – Pixel Response Non Uniformity) che descrive l'output digitale di un sensore CCD per una quantità costante di radianza incidente. La ADS40 compensa l'effetto PRNU (Photo Response Non Uniformity) in tempo reale attraverso una Look Up Table (LUT). La figura 4.12 mostra l'effetto PRNU: come si vede il valore di grigio associato allo stesso pixel su target omogeneo acquisito su diverse linee di scansione è diverso. Tutti i pixel vengono corretti sul valore medio e lo scarto quadratico medio (in questo caso dell'ordine di un livello di grigio) materializza il PRNU.

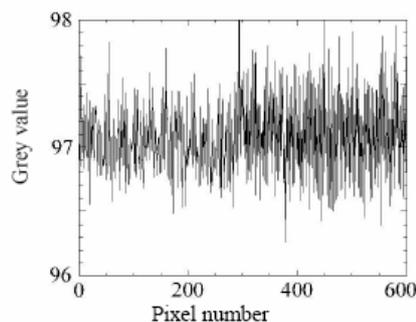


fig. 4.12 – effetto PRNU

Torneremo a parlare dell'effetto PRNU quando ci occuperemo della calibrazione in radianza del sensore.

Le immagini grezze acquisite dal modello EM presentano tutte delle oscillazioni. Anche se queste oscillazioni vengono acquisite correttamente dal sistema IMU la qualità dell'immagine rettificata diminuisce sempre a causa del ricampionamento.

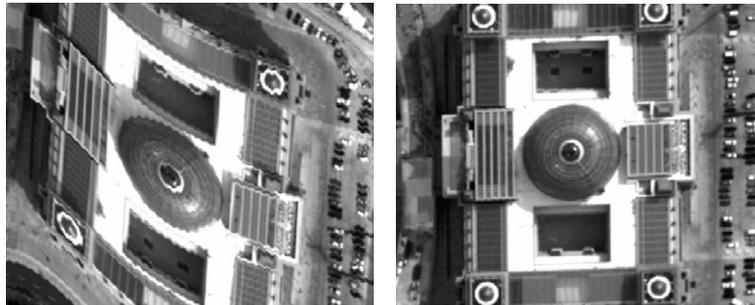


fig. 4.13 – Immagine grezza (livello 0) e corrispondente immagine rettificata (livello 1)

L'ampiezza di queste oscillazioni è dell'ordine dei 2 pixel nella direzione parallela al sensore e con un periodo di circa 15 linee di scansione cui corrisponde un intervallo di tempo di circa 50 ms. Queste oscillazioni sono originate dalla frequenza di rivoluzione del motore del Cessna che è di circa 20 Hz. Nella prima fase di sperimentazione è stata adottata una piattaforma di smorzamento non idonea a sopprimere vibrazioni aventi questa frequenza. La seguente figura 4.14 mostra lo spettro di potenza delle oscillazioni del sensore EM: come si nota c'è un picco in corrispondenza della frequenza di rivoluzione del motore del velivolo.

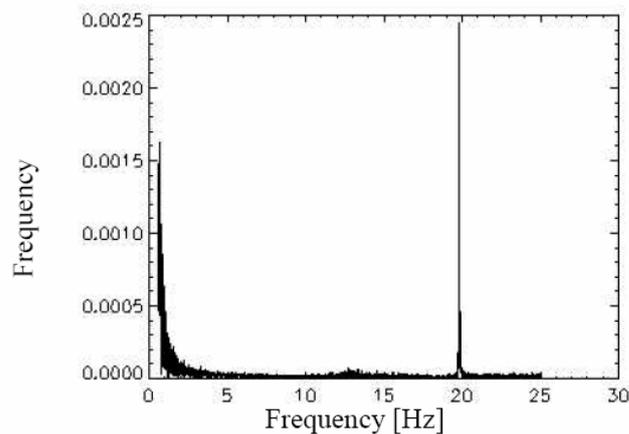


fig. 4.14 – Spettro di potenza delle oscillazioni del modello EM

In seguito alla prima fase di test accennata, sia la camera EM che il sistema IMU sono stati alloggiati su un agitatore meccanico a frequenza variabile. Il dispositivo genera oscillazioni con una frequenza variabile da 1 a 100 Hz. Le oscillazioni generate sono state registrate in tempo reale dal sistema IMU. La figura 4.15 seguente mostra i risultati di questi test:

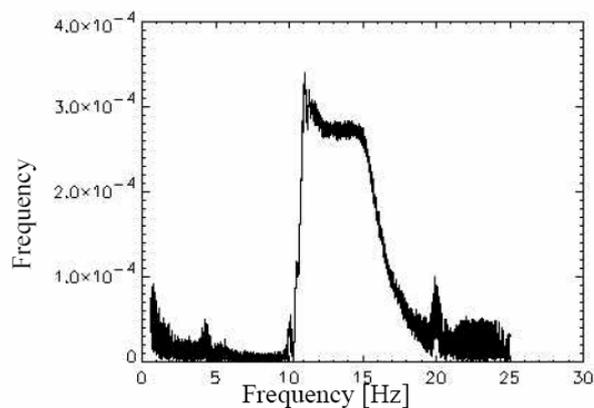


fig. 4.15 – Spettro di potenza delle oscillazioni del modello EM montato su un agitatore meccanico

Per oscillazioni con una frequenza compresa tra i 10 e i 15 Hz la piattaforma è praticamente inefficace. Gli smorzatori funzionano bene per frequenze inferiori ai 15 Hz. La cosa interessante di questo grafico consiste nel picco di frequenza di risonanza sui 20 Hz che convalida i test di volo effettuati. Per i test futuri si è deciso di aumentare il peso della piattaforma in modo da avere un più efficace smorzamento delle vibrazioni fino a quando non si è resa disponibile una piattaforma appositamente studiata per la camera.

4.4 Test sui dati di assetto e sul sensore IMU

Per valutare la qualità dei dati d'assetto è stata operata una rettifica delle immagini su un piano di riferimento adottando un DEM grezzo. Dopo avere processato i dati IMU, il modo migliore per valutarne la bontà consiste nel proiettare tutti i pixel della immagine grezza su un piano di riferimento. Questo metodo consente di individuare eventuali problemi di sincronizzazione tra l'acquisizione dell'immagine e il sistema inerziale. In questa fase dei test l'esatta restituzione fotogrammetrica non rientrava tra gli obiettivi degli sviluppatori. Ciononostante le possibilità di restituzione stereoscopica del modello EM si sono dimostrate incoraggianti: con un basso numero di GCP e adottando semplici algoritmi si è ottenuto uno SQM di circa un pixel nelle due direzioni x e y e di circa tre pixel nella direzione z.

4.5 Test sulla generazione di Modelli Digitali del Terreno (DEM)

L'ultimo test condotto ha riguardato la generazione automatica di un modello DTM, fase in cui sono stati evidenziati solo pochi errori. Sono stati realizzati due DSM indipendenti, uno con traccia Nord – Sud e uno con traccia Sud – Nord.

L'algoritmo di matching ha dimostrato di funzionare bene dato che il 90% dei pixel candidati è stato individuato e che ha operato con immagini a 12 bit. Da questi test si è evidenziato uno scarto medio sulle elevazioni di circa 1,5 pixel dovuto a tutta una serie di fattori

(errori nella misura dell'assetto, errori di riconoscimento automatico dei pixel etc..).

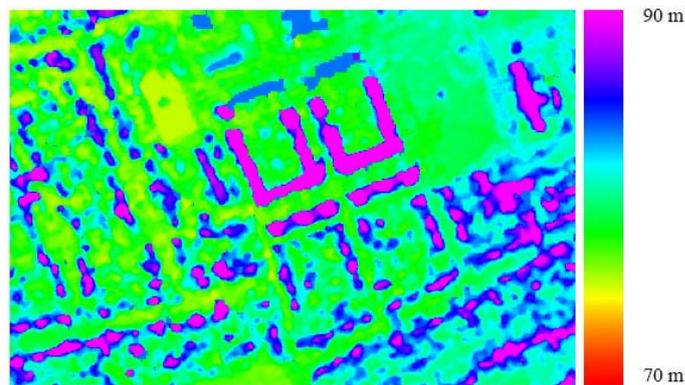


fig. 4.16 – Il primo DEM generato automaticamente da una delle tre coppie stereoscopiche acquisite dal modello EM

Bibliografia

A. Börner, W. Kirchhofer, B. Michalevich, R. Reulke, M. Scheele, K. Scheibe, U. Tempelmann - Test results obtained with the lh systems ads40 airborne digital sensor - IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000.

P. Fricker - ADS40 Progress in digital aerial data collection - 'Photogrammetric Week '01' - Wichmann Verlag, Heidelberg, 2001.

CAPITOLO 5

Il sensore Leica ADS40 – principi progettuali

5.1 Introduzione

In questo capitolo sono descritte tutte le componenti essenziali dello scanner trilineare ADS40: ottiche, filtri, tipo di CCD e configurazione, elettroniche, computer, gestione del volo e software di controllo del sensore, memoria di massa, sistemi di misura della posizione e dell'assetto del velivolo.

Le componenti essenziali in cui può essere suddiviso il sensore LH System ADS40 sono:

- **SH40** (Sensor Head 40) – testa del sensore in cui sono alloggiati ottiche e linee CCD;
- **MM40** (Mass Memory 40) - memoria di massa in cui vengono immagazzinati i dati;
- **OI40** (Operator Interface 40) – Interfaccia Operatore;
- **I/O BOX** – Interfaccia di gestione delle connessioni esterne;
- **CU40** (Control Unit 40) – Unità di Controllo;
- **PAV30** – piattaforma giro-stabilizzata (integrata nella testa SH40);
- **POS** – Il computer che gestisce posizione e assetto del sensore (integrato nella Unità di controllo CU40);
- **DO64** (Digital Optics 64) – la componente ottica del sensore (integrata nella testa SH40);
- **IMU** (Inertial Measurement Unit) – il sistema inerziale (integrato nella testa SH40);
- **GPS** (Global Positioning System) – il sistema di posizionamento (integrato nella Unità di controllo CU40);
- **FCMS** (Flight Control Management System) – Il computer di bordo per il controllo del volo;
- **SPM** (Signal Processing Module) – Il modulo di processamento dei segnali elettronici (integrato nella testa SH40);

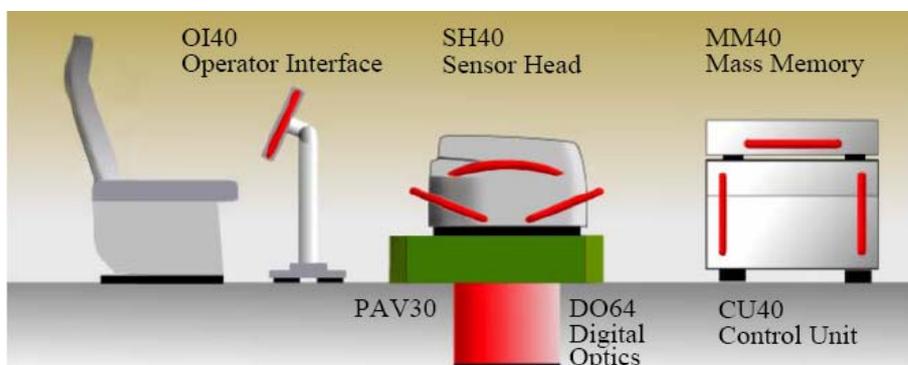


fig. 5.1 – Le varie componenti del sensore

La testa SH40 rappresenta sicuramente la parte principale del sensore. In essa sono contenuti:

- il piano focale con le linee CCD e i filtri;
- la lente telecentrica;
- la videocamera di controllo "a terra";
- il sistema IMU;
- il sistema di raffreddamento;
- le varie componenti elettroniche.

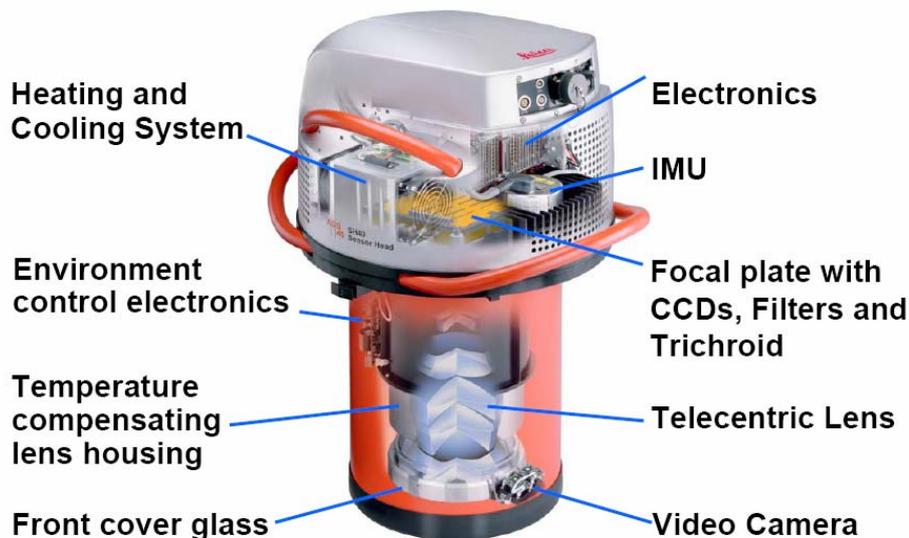


fig. 5.2 – La testa del sensore SH40

5.2 La testa del sensore SH40

Le innovative ottiche della ADS40 sono progettate per applicazioni di fotogrammetria ad alta risoluzione e per applicazioni di telerilevamento. Il sistema di lenti è del tutto simile, nelle dimensioni esterne, nel peso, nella risoluzione e nell'efficienza luminosa alle lenti della camera a pellicola LH Systems RC30. Tuttavia il progetto dei due sistemi ottici differisce parecchio dal punto di vista delle modalità di registrazione. Nella camere a pellicola la minimizzazione delle distorsioni è un obiettivo di primario interesse, invece nelle lenti della camera digitale il requisito più importante è costituito dalla telecentricità della lente in direzione del piano focale dove si forma l'immagine. Questa specifica torna utile in generale per ogni camera digitale ma rappresenta un fattore assolutamente critico per la ADS40 indispensabile per la registrazione della stretta banda multispettrale.

Il piano focale è costituito da quattro alloggiamenti CCD: due di questi contengono le linee CCD singole e due alloggiano le linee triple. Lo sviluppo della tecnologia di funzionamento del piano focale prevede la valutazione della accuratezza dell'allineamento dei CCD, il controllo della temperatura dei sensori CCD e l'interfacciamento tra la componente ottica, i filtri e l'ambiente di gestione. La figura 5.3 mostra la soluzione generale per la struttura del piano focale.

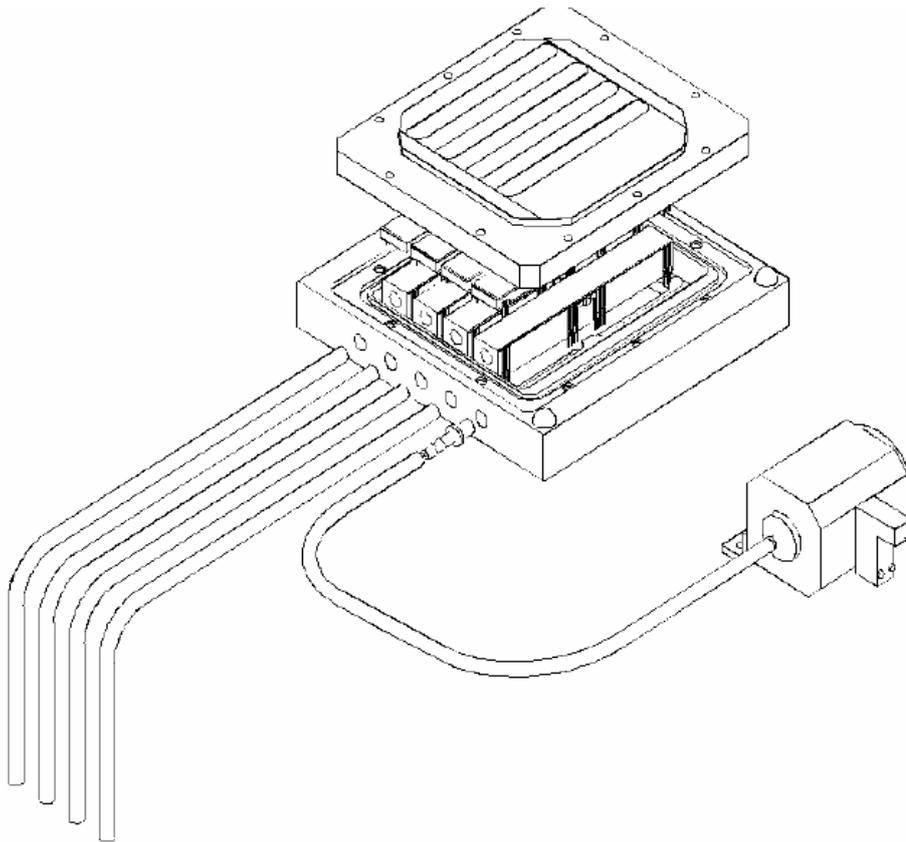


fig. 5.3 – Soluzione progettuale adottata per il piano focale

Tutti i sensori CCD vanno installati con una incertezza di qualche micrometro. Per raggiungere un range dinamico di 12 bit con una risoluzione radiometrica di 8 bit è stato introdotto un sistema di stabilizzazione della temperatura. Inoltre il piano focale è stato equipaggiato con un sistema di ventilazione e aerazione per impedire la condensa di vapore acqueo sulla superficie di vetro dei moduli CCD e per evitare eventuali deformazioni del piano focale.

Ogni CCD ha il proprio inserto la cui altezza è compatibile con la tolleranza esistente tra la superficie di silicone e l'alloggiamento della parte inferiore del vettore CCD.

L'accuratezza di costruzione di ogni inserto supera il micron. La ceramica con cui sono realizzati questi supporti consente una efficiente dissipazione del calore: ogni inserto è costruito in modo tale da presentare un grosso buco in cui vengono inseriti i tubi necessari alla fuoriuscita del calore. Il sistema di dissipazione del calore comincia a funzionare attraverso delle valvole che diventano operative a sensore acceso.

Il piano focale del sensore ADS40 ospita una serie di vettori CCD la cui configurazione è variabile in funzione delle richieste del cliente. Un esempio di una di queste configurazioni (standard) possibili è illustrato in fig. 5.5. La configurazione delle linee CCD in figura è costituita da:

- una coppia di vettori CCD pancromatici da 12000 pixel orientati davanti (Forward) sfalsati di mezzo pixel. La soluzione

progettuale dei CCD sfalsati consente di ottenere immagini senza l'effetto di *aliasing*⁽¹⁾.

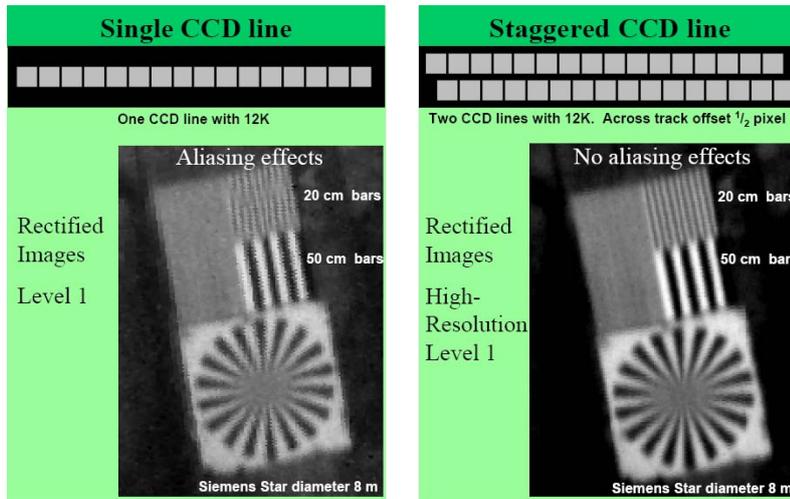


fig. 5.4 – Effetto di *aliasing*. Nella immagine di destra acquisita con un doppio vettore CCD l'effetto è assente

- una coppia di vettori CCD pancromatici da 12000 pixel orientati in modo nadirale (Nadir) sfalsati di mezzo pixel e accoppiati ad un vettore CCD da 12000 pixel che acquisisce sulla banda dell'infrarosso vicino;
- una coppia di vettori CCD pancromatici da 12000 pixel orientati dietro (Backward) sfalsati di mezzo pixel;
- tre vettori RGB multispettrali da 12000 pixel orientati in modo nadirale.

Riassumendo, questa configurazione prevede tre canali pancromatici ognuno dei quali formato da una coppia CCD *sfalsata* da 12000 pixel e 4 canali multispettrali formati da 4 vettori CCD *singoli*.

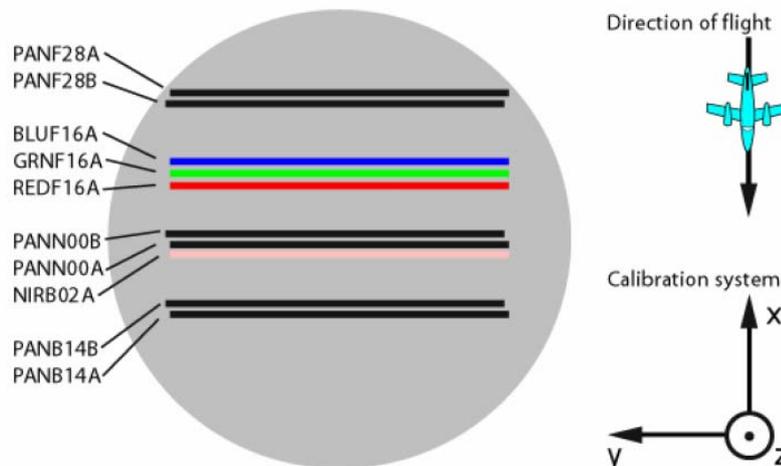


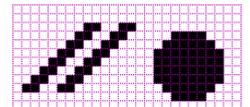
fig. 5.5 – Configurazione standard per la disposizione dei vettori CCD sul piano focale

① L'effetto di *Aliasing*

Probabilmente è capitato a tutti di vedere un'immagine digitale, che ai bordi fra un colore e l'altro, ha una scalettatura, particolarmente visibile nelle linee curve od oblique. Questa scalettatura è l'aliasing.

Il fenomeno dell'aliasing è dovuto al fatto che una immagine in formato raster (ovvero digitale non vettoriale) viene rappresentata da una griglia di pixel, che, essendo quadrati, riescono a rappresentare le linee oblique (o le curve) solo creando un effetto spezzettato.

Ovviamente maggiore è la risoluzione (quindi maggiore è il numero di pixel per unità di lunghezza) più piccoli sono i quadretti e di conseguenza meno visibile è la scalettatura.



Da quanto detto sopra è facile capire cosa sia l'anti-aliasing: E' la tecnica utilizzata per ridurre visivamente al minimo l'effetto della calettatura.

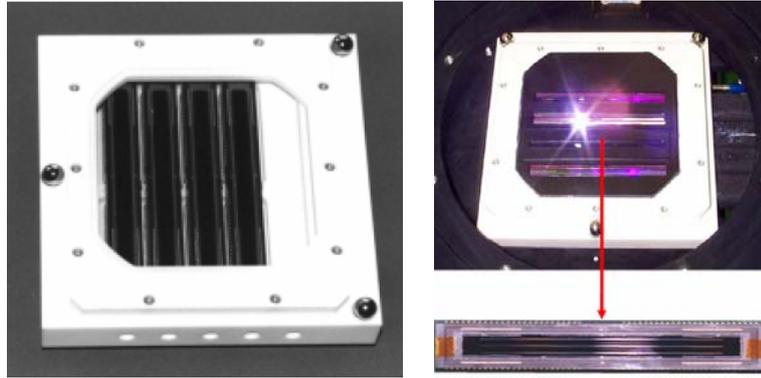


fig. 5.6 – Il piano focale del sensore ADS40 e una tripletta CCD

Oltre alla configurazione standard sono previste altre configurazioni a richiesta del cliente. La prima di queste (fig. 5.7) presenta la tripletta RGB in posizione nadirale: questa disposizione dei tre vettori CCD consente di ottenere ortofoto a colori prive degli effetti di inclinazione degli edifici. La seconda variante di configurazione (fig. 5.8) presenta la tripletta RG-NIR in posizione nadirale: questa configurazione consente di ottenere delle ortofoto falso-colore prive degli effetti d'inclinazione degli edifici. L'ultima configurazione (fig. 5.9) CCD alternativa alla standard presenta la tripletta RGB in posizione nadirale e la tripletta RG-NIR orientata in posizione *Forward*. In ogni linea CCD la dimensione del pixel è di $6.5 \mu\text{m}$. Ciascun vettore CCD presenta quindi una lunghezza di circa 8 cm. I vettori CCD sono disposti in modo tale da generare un angolo di vista trasversale (FoV) di 64° . Gli angoli stereoscopici d'osservazione (longitudinale) secondo cui sono disposte le linee CCD sono di 14.2° e 28.4° . La asimmetria della disposizione delle linee CCD apporta alcuni sostanziali benefici:

- la possibilità di potere scegliere tre diverse configurazioni di visione stereoscopica (Forward/Nadir – 28.4° , Backward/Nadir – 14.2° , Forward/Backward - 42.6°);
- la disposizione asimmetrica evita singolarità nelle formule matematiche usate nel processo di triangolazione aerea.

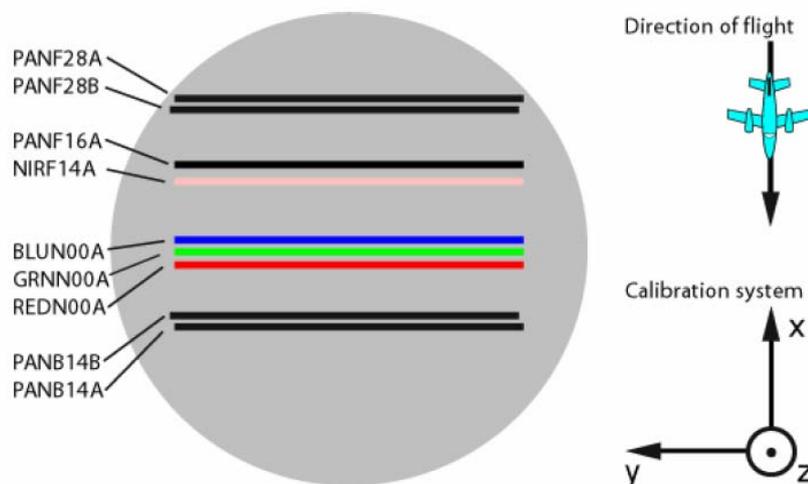


fig. 5.7 – Prima configurazione delle linee CCD alternativa alla standard

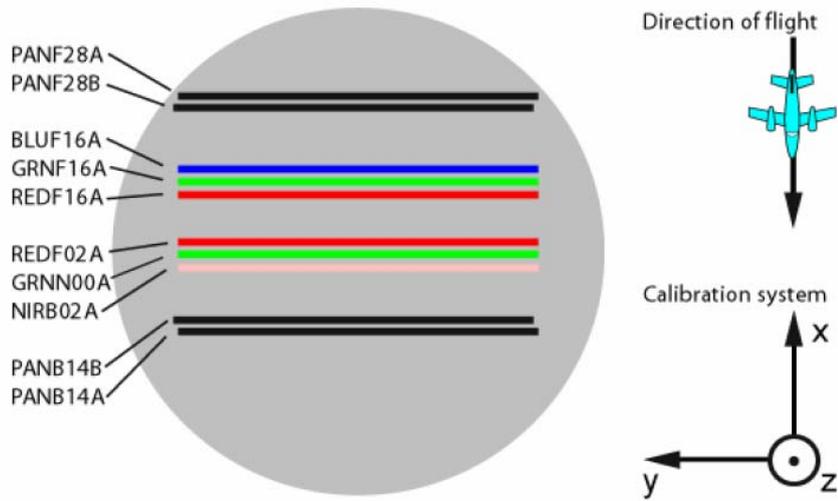


fig. 5.8 – Seconda configurazione delle linee CCD alternativa alla standard

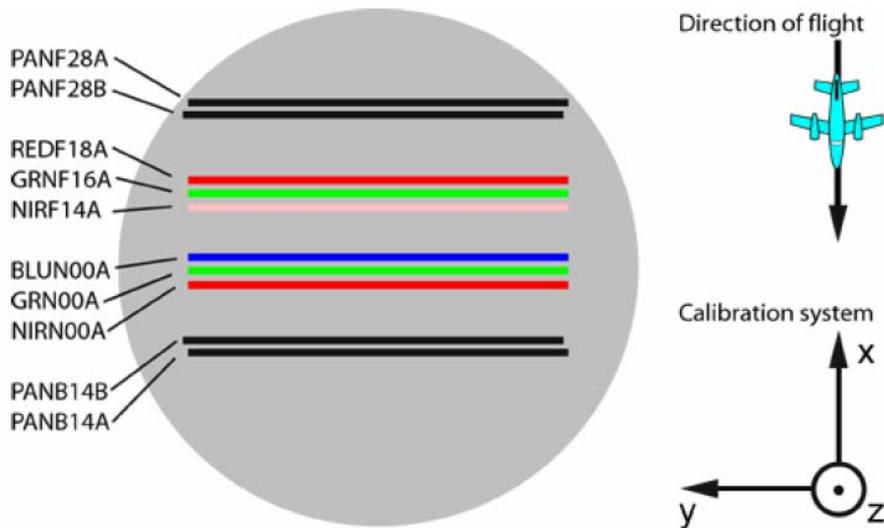


fig. 5.9 – Terza configurazione delle linee CCD alternativa alla standard

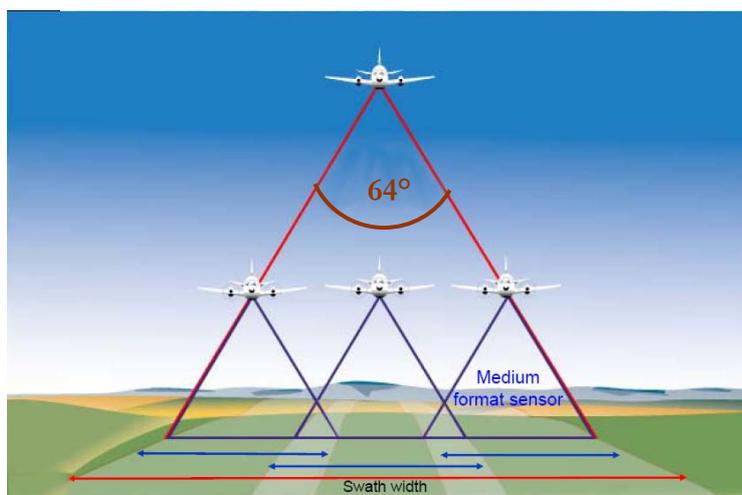


fig. 5.10 – Angolo di vista trasversale e abbracciamento del sensore ADS40

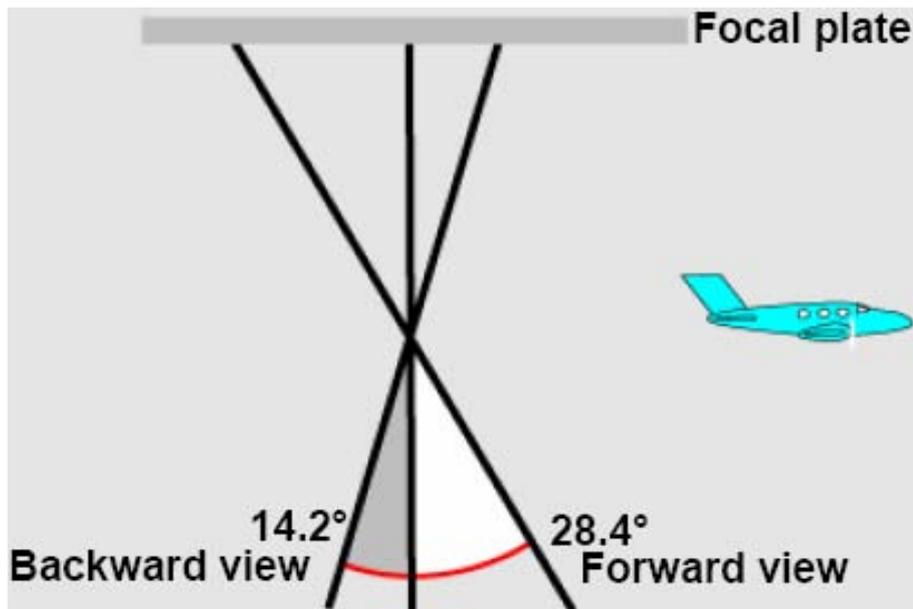


fig. 5.11 – Angoli stereoscopici longitudinali

La lunghezza focale equivalente della camera ADS40 è pari a 62.77 mm. Un sensore come ADS40 ad elevate prestazioni necessita di un sistema ottico analogamente potente. Il sistema di lenti di cui è dotato ha il compito di raccogliere e trasferire le informazioni geometriche e radiometriche dalla superficie terrestre al sensore. La componente ottica del sensore ADS40 è chiamata DO64 acronimo di Digital Optics. La parte principale di questa componente è rappresentata dalla lente telecentrica. Per potere andare incontro alle stringenti specifiche tecniche di una missione di volo la DO64 deve rispondere ad una serie di pre-requisiti:

- campo di vista trasversale ampio (FOV);
- elevata risoluzione geometrica sia in direzione longitudinale che trasversale;
- comportamento telecentrico;
- ampio sviluppo del focus;
- lente veloce (apertura F/4);
- elevata velocità di trasmissione dell'informazione;
- distribuzione omogenea della irradianza;
- effetto *crosstalk*⁽²⁾ tra i pixel minimizzato;
- canali pancromatici;
- stretti canali spettrali dal blu (400nm) all'infrarosso(900 nm);
- insensibilità alle variazioni di temperatura e pressione;
- veloce operatività in volo;
- rigida ma dal peso ottimizzato.

⁽²⁾ L'effetto Crosstalk

Interferenza elettromagnetica che si può generare tra due cavi vicini di un circuito o di un apparato elettronico. La causa è il campo elettromagnetico tempo-variabile che si genera attorno a un cavo in cui passa corrente non costante (segnale). Questo campo magnetico variabile può indurre, in un cavo vicino, una differenza di potenziale e quindi una corrente indotta spuria.

Questo fenomeno è particolarmente indesiderato nel campo delle comunicazioni quando si usano cavi elettrici per trasportare dati o segnali (voce, video etc). Se i cavi non sono opportunamente schermati, si possono generare dei disturbi sui livelli di tensione che possono generare errori nell'apparato ricevente, con conseguente perdita di dati, o peggioramento della comunicazione.

Un altro campo in cui questo effetto ha rilevanza e' nella progettazione e fabbricazione dei circuiti integrati in tecnologie submicrometriche (es 65 nm). A causa della grande densità di componenti elettronici, che si raggiunge in questi dispositivi, e alle distanze ridottissime, gli effetti di crosstalk sono da tenere in attenta considerazione durante la progettazione.

Pixel Crosstalk (Diffusione di Carica)

E' il fenomeno per il quale cariche che vengono generate in un pixel tendono a diffondersi nei pixel adiacenti. Questo fenomeno si verifica soprattutto nella fotografia all'infrarosso, i cui fotoni sono dotati di energia più elevata e penetrano più profondamente nella cella in silicio. A quelle profondità la carica risulta meno influenzata dal campo elettrico dei gate e tende a sfuggire al suo controllo, diffondendosi nei pixel più vicini. Se il valore di Pixel Crosstalk è elevato, si ottengono immagini poco definite.

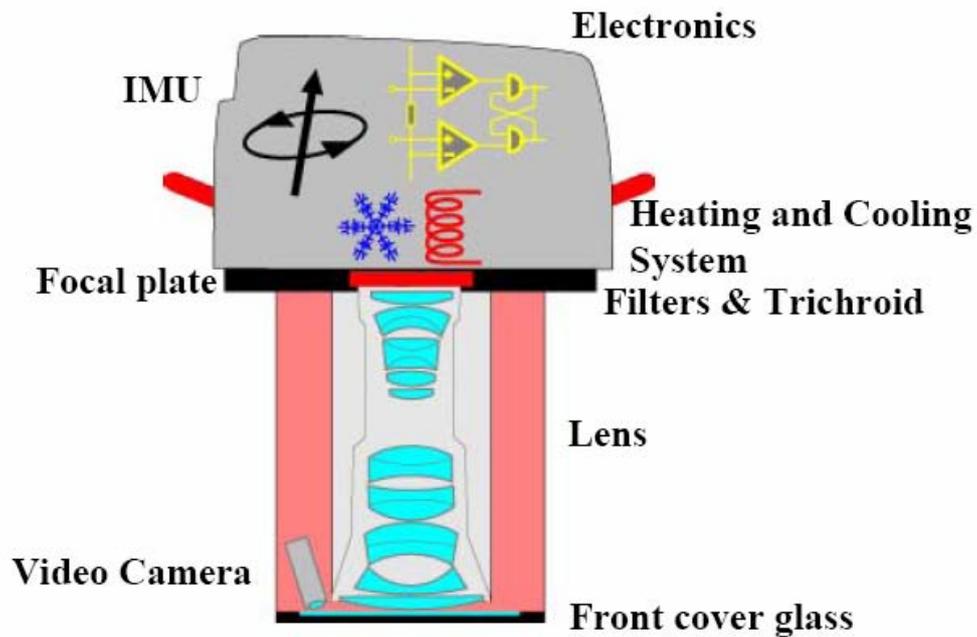


fig. 5.12 – Schema della testa SH40 che evidenzia in sezione la lente telecentrica

La forma geometrica di questa lente è assimilabile ad un solido di rotazione ottenuto dalla rotazione di una spezzata attorno all'asse ottico della camera.

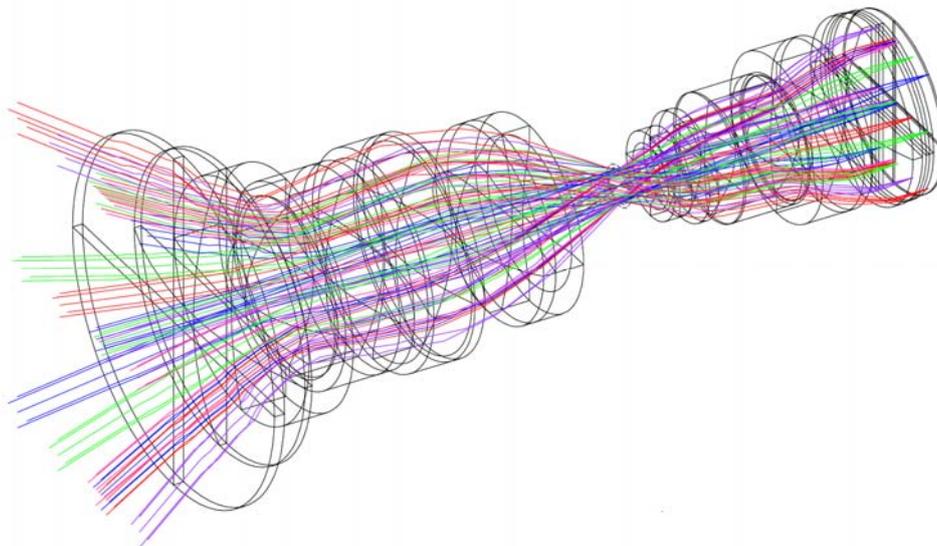


fig. 5.13 – Il solido di rotazione alla base della lente telecentrica

Il complesso sistema di lenti adottato consente ai raggi ottici provenienti da tutte le direzioni di colpire il piano focale perpendicolarmente. Nelle camere fotogrammetriche tradizionali solo i raggi sovrapposti all'asse ottico colpiscono il piano focale perpendicolarmente (fig. 5.14).

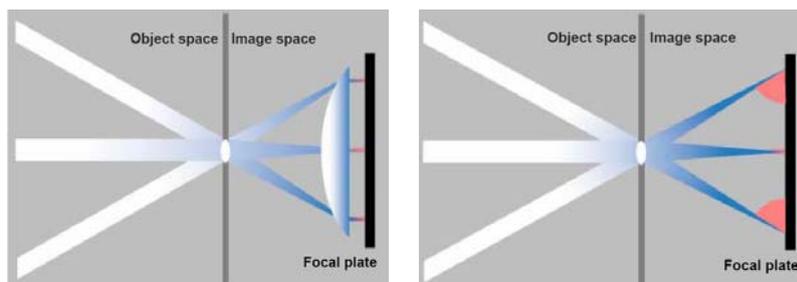


fig. 5.14 – Il comportamento ottico della lente telecentrica a confronto con quello del sistema di lenti di una camera tradizionale.

Un altro vantaggio del sistema telecentrico riguarda i filtri di interferenza: il sistema ottico del sensore ADS40 è equipaggiato con filtri di interferenza che rendono la trasmissione dei colori costante lungo tutto lo sviluppo del campo di vista (FoV), cosa che non succede nei sistemi ottici delle camere a pellicola. Questa caratteristica rende il sistema ottico adatto per applicazioni di telerilevamento in cui avviene una misura della radianza (sistemi passivi) emessa dal corpo rilevato.

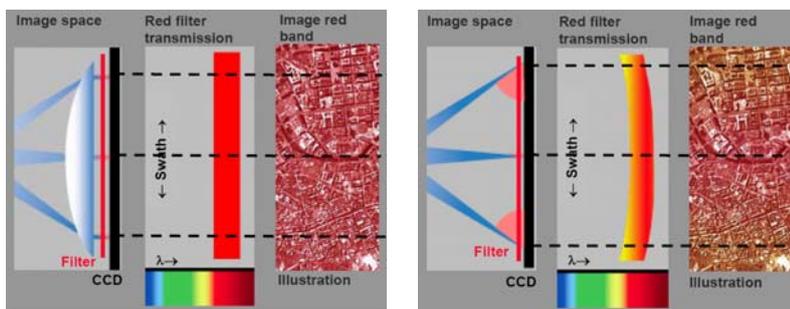


fig. 5.15 – Il comportamento della lente telecentrica riguardo ai filtri di trasmissione del colore

Un riferimento particolare va fatto nei riguardi di un particolare tipo di filtro: il tricroide. Questo filtro particolare divide il raggio luminoso nelle sue componenti RGB e consente di ottenere immagini RGB perfettamente co-registrate. In pratica il filtro tricroide compensa il fatto che le linee CCD RGB sono sfasate di 2.2 mm e non sovrapposte.

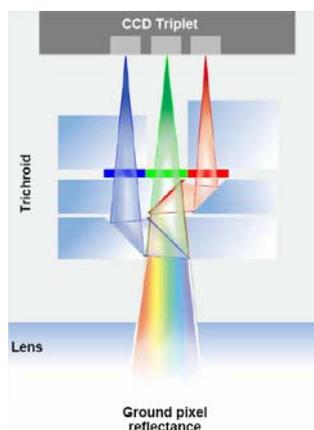


fig. 5.16 – il filtro tricroide

5.3 Processamento del segnale CCD. Il modulo SPM

Le componenti elettroniche del piano focale sono alloggiati sul retro di quest'ultimo. Gli amplificatori di segnale sono alloggiati sul retro delle ceramiche di dissipazione principali del piano focale. Una buona progettazione di questi componenti è essenziale per ottenere un buon rapporto segnale/rumore. La prima amplificazione è utile per avere la migliore impedenza per il segnale CCD. Il modulo SPM (*Signal Processing Module*) rappresenta la principale componente di processamento dei segnali ed è alloggiato nella SH40.



fig. 5.17 – Il modulo SPM

La parte elettronica del piano focale contiene le linee CCD con l'hardware elettronico minimo necessario a rendere operativi i CCD. Il processamento del segnale CCD è concentrato in una unità a parte. Ogni CCD da 24000 pixel costituito da due sensori sfalsati da 12000 pixel è processato come due sensori indipendenti da 12000 pixel. Ognuna delle coppie 12k può essere usata indipendentemente per differenti colori e, sicuramente, anche l'uso di una sola linea da 12k è possibile. Questo *concept* modulare della ADS40 consente teoricamente varianti di prodotto a partire dal singolo CCD 12k fino alla configurazione 3 x 24k (pan) + 6 x 12k (colore). Questo richiede una grande flessibilità di processamento del segnale implementata su una complessa architettura elettronica stampata sulla scheda dei circuiti. Ogni scheda include tutte le funzioni necessarie per il processamento del segnale analogico di un CCD (ASP): gestione degli input, doppio campionamento correlato, correzione analogica e digitale degli offset, conversione A/D a 14 bit che fornisce un *range* dinamico del segnale almeno a 12 bit, correzione della non-uniformità del segnale nero (DSNU) e della non uniformità della risposta fotografica (PRNU).

Ogni canale CCD è assegnato ad un processore analogico di segnale (ASP) il quale è responsabile di tutta la catena di processamento del segnale grezzo.

Il processore ASP gestisce:

- la doppia acquisizione correlata dovuta alle due stringhe pancromatiche sfalsate trasformando un segnale doppio correlato in uno singolo;
- la correzione DSNU (Dark Signal Non Uniformità). Tutti i sensori CCD hanno la proprietà di produrre e accumulare spontaneamente elettroni, anche quando la loro superficie è schermata dalla luce incidente. A riposo il sensore continua a produrre elettroni fino a saturare completamente i livelli di capacità dei pixel. E' pertanto logico azzerare le cariche prodotte spontaneamente dal sensore prima di iniziare una nuova esposizione. Ma la produzione spontanea di elettroni continua anche durante l'esposizione. Ciò significa che nei pixel si accumuleranno sia fotoelettroni prodotti dalla luce incidente sia elettroni prodotti spontaneamente. E' impossibile distinguere gli uni dagli altri. Fortunatamente, però, gli elettroni prodotti spontaneamente hanno caratteristiche tali da permettere di eliminare quasi interamente il loro effetto negativo. Il fenomeno della Dark Current è perfettamente riproducibile. In identiche condizioni di temperatura e di durata di una esposizione, un dato sensore genera sempre lo stesso numero di elettroni a meno di un fattore di dispersione statistica (Rumore Termico), variabile a seconda del tipo di sensore impiegato. La quantità di cariche elettriche generate è quasi proporzionale al tempo di integrazione. La Dark Current prodotta dipende fortemente dalla temperatura del sensore: la sua intensità diminuisce in genere di un fattore 2 per ogni 6°C in meno di temperatura del sensore. Per questa ragione essa viene anche chiamata Corrente Termica (Thermal Current) e le cariche prodotte si chiamano Cariche Termiche (Thermal Charges).
- La correzione PRNU (*Photo Response Non Uniformity*). (Vedi Cap. 2 e 6);
- la conversione analogico/digitale A/D a 12 bit.

Il processore SPM è dotato di un'interfaccia a fibre ottiche con cui è collegato al modulo SPM.

5.4 la memoria di massa MM40

La memoria di massa immagazzina tutti i dati della missione: le immagini, l'orientamento e i dati ausiliari acquisiti durante il volo. Il sistema è basato su un disco rigido ed è in grado di operare nelle più varie condizioni ambientali che si manifestano nelle applicazioni aeree. La periferica consente missioni di volo con più di 4 ore di tempo di registrazione e supporta un tempo di trasferimento abbastanza sostenuto di 40-50 MB/sec. Per raggiungere prestazioni ottimali durante le operazioni di lettura e scrittura è stato implementato un file system proprietario. Tuttavia, l'accesso trasparente ai dati è garantito da varie utility. I vari Hard Disk che costituiscono la MM40 sono alloggiati all'interno di una valigetta pressurizzata e a temperatura controllata dotata di un sistema di smorzamento delle vibrazioni. Il sistema valigetta/hard disk al completo pesa circa 20 kg assicurando quindi la portabilità dei dati.

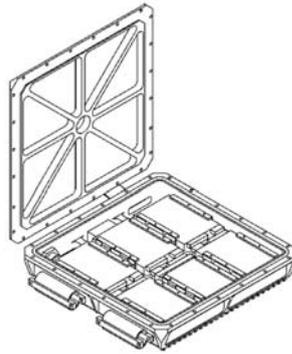


fig. 5.18 – La memoria di massa MM40



fig. 5.19 – La memoria di massa MM40 sovrapposta al modulo CU40

5.5 L'unità di controllo CU40

Il componente principale del computer della camera è il canale ad alta velocità per i dati, progettato per comprimere le immagini provenienti dalla testa della camera in tempo reale. La compressione supporta una velocità di trasferimento sostenuta di 40 MB/sec e fornisce le immagini in due formati: JPEG e lossless (senza perdite). Il retro del *data channel* è costruito per mezzo di una interfaccia di registrazione che smista e memorizza dati da differenti sorgenti e formati. Le prestazioni di picco della interfaccia di registrazione raggiungono una velocità di alcune centinaia di MB/sec e supporta una gestione flessibile dei dati durante la memorizzazione sulla memoria di massa. In aggiunta al canale dati, il computer della camera contiene la piattaforma hardware per il controllo del volo e del sensore e presenta varie interfacce per lo scambio dei dati e le comunicazioni.

5.6 il sistema di posizionamento e di assetto

Per ricostruire immagini ad alta risoluzione da scanner lineari è necessario determinare i dati di orientamento di ogni linea acquisita. Questa condizione può essere realizzata facendo uso solamente di tecniche di

autocorrelazione di immagini così come previsto dai moderni software di triangolazione aerea. Ma gli oneri computazionali richiesti per questo metodo indiretto sono così grandi che le osservazioni dirette provenienti da sistemi di misura della posizione e dell'orientamento sono visti come il giusto mezzo per ridurre il tempo di elaborazione: il metodo indiretto richiede molto tempo mentre il metodo diretto è un metodo intensivo. La misura di assetto e posizione viene fornita da un sistema POS che è stato specificatamente progettato dalla Applanix Corporation per sopperire ai particolari requisiti della ADS40.

I vantaggi sono:

- il tempo di elaborazione dei dati necessario alla rettifica delle linee acquisite si riduce notevolmente;
- il rapporto prezzo/prestazioni di un sensore IMU di media fascia è probabile che migliori nel tempo.

La stretta integrazione con il piano focale del sensore digitale lineare costituisce un grande potenziale per ulteriori riduzioni delle operazioni di terra.

Il sistema comprende 4 componenti principali: una unità di misura inerziale (IMU), un POS computer system, un ricevitore GPS ad alte prestazioni a doppia frequenza e un software per il post-processing.

I dati di assetto angolare e di velocità incrementale provenienti dal sistema IMU vengono integrati in un navigatore *strapdown* per produrre i sei gradi di libertà della camera. I dati di posizione e velocità forniti dal GPS vengono poi usati per osservare e correggere gli errori a bassa frequenza della navigazione. Il risultato finale consiste nel dato di posizione e orientamento ad alta frequenza e in banda larga.

Il sistema IMU è montato dentro la testa della camera. A differenza delle camere a pellicola, la ADS40 è stata progettata per montare il sistema IMU direttamente sul piano focale. Questa condizione elimina il problema dei movimenti relativi tra la camera e il sensore IMU che talvolta si presentano quando il sensore IMU è montato esternamente alla camera.

Il POS computer system e il ricevitore GPS sono integrati nel computer della camera. I dati acquisiti dal sensore IMU sono trasmessi al computer POS attraverso un collegamento a fibra ottica. Gli altri ingressi includono la correzione differenziale RTCM 104 e l'*encoder* input per la piattaforma stabilizzata.

Il sistema POS della ADS40 genera in tempo reale e in post-processing dati di posizione e orientamento. La soluzione in tempo reale è usata per la gestione del volo e per il controllo del supporto stabilizzato. Il sistema POS che fornisce sia la posizione che l'orientamento ha la capacità di controllare in modo automatico l'imbarcata della piattaforma stabilizzata in modo da correggere la deriva. La soluzione in post-processing è generata usando il software POSpac della Applanix il quale processa le misure GPS sulla fase portante e i dati grezzi IMU attraverso un filtro di Kalman in modo da produrre la migliore traiettoria stimata più uniforme (SBET). La soluzione SBET è poi applicata alle immagini in modo da costruire una sequenza di linee rettificata per ogni asse delle strisciate. Le immagini rettificate vengono poi sottoposte a triangolazione aerea usando sia la SBET determinata sia la ricerca automatica di punti di

legame. Il risultato finale è costruito da un blocco fotogrammetrico georiferito. L'assetto e la posizione della ADS40 sono molto importanti e determinano parzialmente le prestazioni di tutto il sistema. Queste informazioni vengono fornite dall'Applanix Position and Orientation System (POS) progettato specificatamente per incontrare i requisiti della ADS40. L'unità di misura inerziale (IMU) del POS è collocata nella testa della camera e rileva i movimenti del piano focale. Le parti elettroniche sono collocate nel computer della camera e sono invisibili all'utente finale a causa del loro elevato grado di integrazione. I dati generati dal sistema POS sono immagazzinati come parti dei dati della missione sulla memoria di massa del sistema e possono essere recuperati per il post-processing dopo il volo senza alcuna informazione aggiuntiva. Per la gestione del volo e per finalità di navigazione i dati del sistema POS vengono forniti in tempo reale al modulo di navigazione.

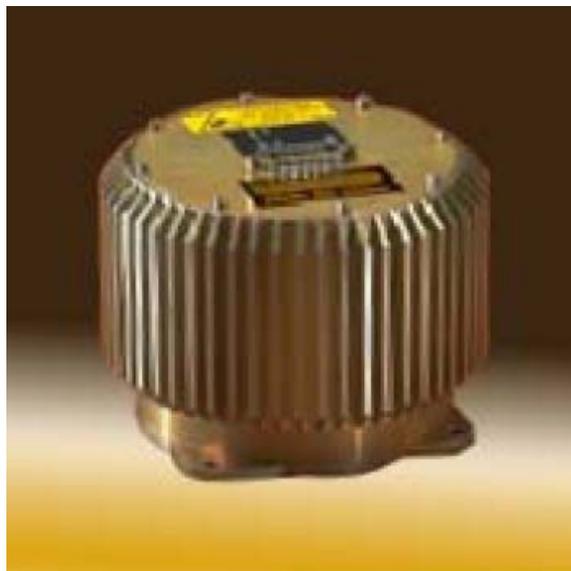


fig. 5.20 – Il sistema POS della Applanix

Riguardo al sistema integrato GPS/IMU è necessario notare che sia l'acquisizione GPS che quella di assetto non è continua bensì discretizzata in punti. In particolare il GPS in modalità differenziale acquisisce informazioni sulla posizione con un frequenza di 2 Hz (un campionamento ogni mezzo secondo); invece il sistema IMU lavora con una frequenza di esercizio di 200 Hz (200 campionamenti al secondo). Per questo motivo la traiettoria data dal sistema IMU viene corretta con i valori GPS; la traiettoria ottenuta da questa operazione di post-processing viene successivamente interpolata a 800 Hz (un campionamento ogni 1.2 msec).

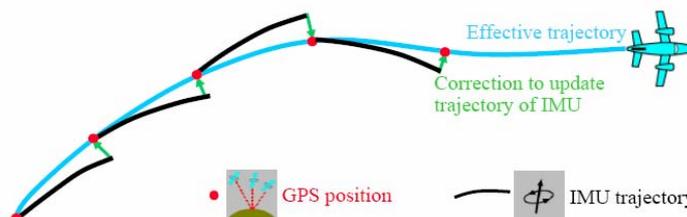


fig. 5.21 – Traiettoria IMU (nero) , punti GPS (rosso) e traiettoria corretta (azzurro)

5.7 Interfaccia per il pilota e l'operatore

Durante la missione di volo è importante avere una facile interfaccia in grado di gestire complessi progetti. Questa situazione diventa ancora più importante vista la complessità e le prestazioni del sistema. La ADS40 rappresenta una pietra miliare nel mondo dei sensori digitali e presenta quindi un sistema innovativo di interfaccia caratterizzato da un terminale *touch screen* ad alta risoluzione. Allo stesso modo l'interfaccia per il pilota è indipendente dalla interfaccia dell'operatore e presenta tutti i requisiti per essere installata sulla carlinga di un aereo.



fig. 5.22 – L'interfaccia operatore OI40

5.8 I/O Box

La I/O Box supporta un interfacciamento flessibile con periferiche esterne. E' basata su un *concept* modulare e consente alla ADS40 di essere aggiornata nel prossimo futuro ad un sistema di controllo multi-sensore. Per questo motivo sarà possibile operare con la ADS40 insieme con altri sistemi ad alte prestazioni come ad es. la RC30 o il PAV30, o qualsiasi altro tipo di sensori come spettrometri e laser scanner.

5.9 FCMS – Il sistema di gestione del volo e del sensore

Il migliore, potente ed avanzato hardware per sensori digitali aviotrasportati non si può usare senza un cuore che controlli, coordini e gestisca i singoli sottosistemi e che fornisca una GUI (Graphical User Interface) per consentire un facile uso del sensore. I rilevamenti aerei rappresentano ancora una fase impegnativa per piloti ed operatori. L'obiettivo principale consiste nel realizzare un rilievo aereo con il minor tempo di volo possibile e i migliori risultati possibili. Questa complessa situazione viene gestita dal FCMS (Flight and Sensor Control Management System). Il FCMS può essere logicamente diviso in 5 parti separate ognuna delle quali provvede a fornire funzionalità individuali. Il modulo di gestione del volo è il cuore del FCMS e coordina il sistema di navigazione, il controllo del sensore e il data log

del volo e degli errori. Attraverso un display grafico touch screen l'operatore interagisce con il sistema di gestione del volo. Il progetto della GUI è indirizzato a una facile operatività attraverso una rappresentazione a video altamente riconoscibile. Quindi il layout generale è grafico, i menù vengono selezionati attraverso la barra dei bottoni con icone e testi. Un sistema di help in due parti che include il manuale dell'utente aiuta l'operatore a familiarizzare con il sistema e a trovare la via per tornare indietro quando ci si perde.



fig. 5.23 – Il software del sistema FCMS

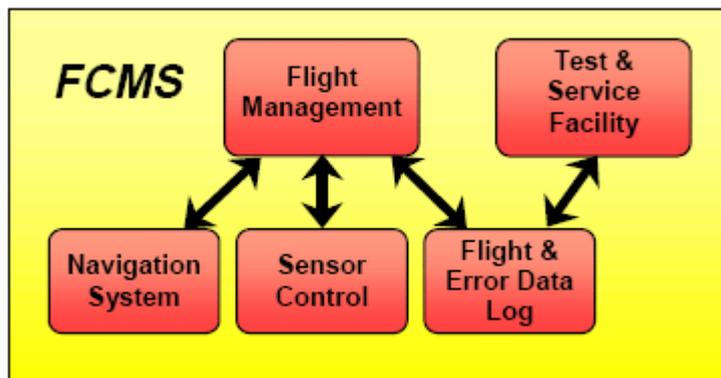


fig. 5.24 – Le componenti del sistema FCMS

Il sistema di navigazione è progettato per ridurre il tempo di volo e ottimizzare il lavoro di scambio tra il pilota e l'operatore. Il pilota può concentrarsi totalmente sulla navigazione e sulla guida del velivolo mentre l'operatore si occupa solo del sensore e del sistema di acquisizione delle immagini. Il sistema di navigazione è basato sui piani di volo della LH Systems ASCOT prodotti per le camere a pellicola e supportati dai sistemi di misura della posizione e dell'assetto. Il sistema di navigazione svolge i seguenti compiti:

- guida sull'area della missione;
- accostamento alle linee di volo di progetto;
- guida di alta precisione rispetto alle strisciate.

L'orientamento viene migliorato attraverso l'implementazione di una mappa mobile a video, basata su una immagine raster. I movimenti rispetto alle linee di volo di progetto sono visualizzati e azioni correttive sono fornite al pilota.

Indipendentemente dal display dell'operatore il pilota può scegliere la configurazione del suo video e la sua rappresentazione dello schermo. Il pilota e l'operatore non hanno più lo stesso display. Agendo da cliente il pilota può veramente controllare il completo sistema del sensore dalla propria interfaccia nei casi di missioni condotta da una sola persona.

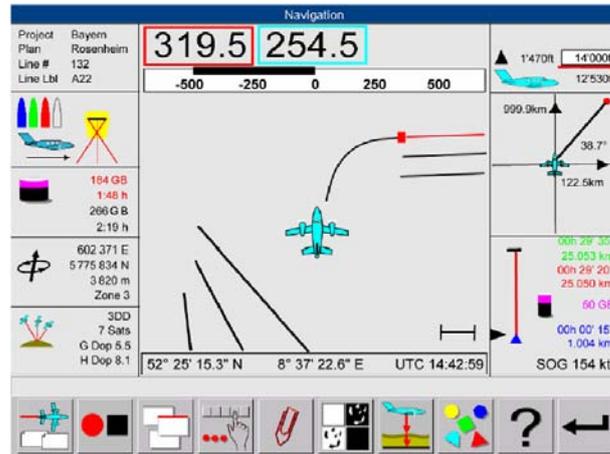


fig. 5.25 – Il sistema di navigazione

Il modulo di controllo del sensore è interfacciato con l'hardware di acquisizione delle immagini. I parametri assegnati dall'operatore o definiti dal progetto di volo sono trasferiti all'hardware e vengono lette le informazioni sullo stato.

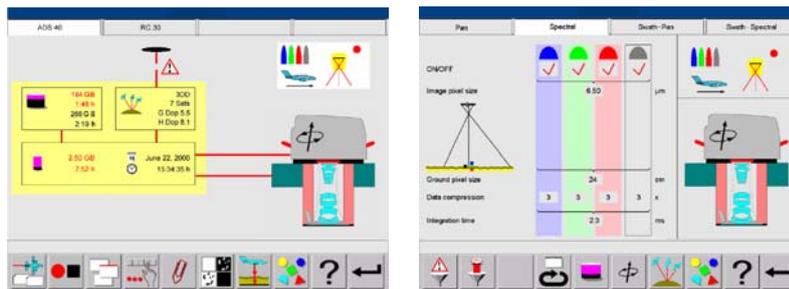


fig. 5.26 – interfaccia di controllo

5.10 Data log

Durante il volo è immagazzinato un vasto range di dati differenti per consentire precise valutazioni. Dopo il volo possono essere recuperati:

- la linea di volo;
- punto di partenza e di fine sequenza delle immagini;
- parametri individuali del sensore;

Registrazioni aggiuntive nel data log consentono di esercitare la manutenzione e l'analisi degli errori, una caratteristica che ottimizza la gestione della ADS40.

La seguente figura riassume le caratteristiche tecniche del sensore.

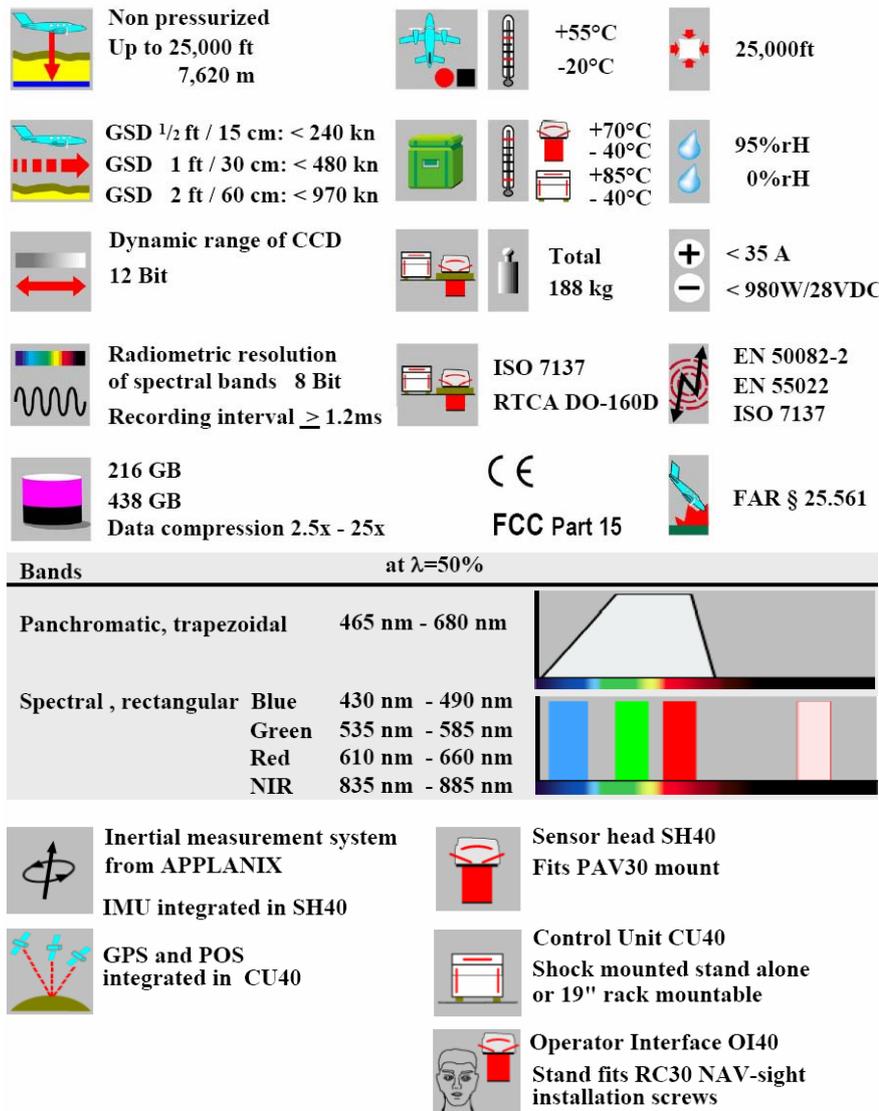


fig. 5.27 - Caratteristiche tecniche del sensore LH System ADS40

5.11 Il sensore ADS40 di seconda generazione

Ad ottobre 2006 Leica ha annunciato la seconda generazione dei sensori ADS40. La nuova ADS40 consentirà di avere 5 bande perfettamente co-registrate senza fare ricorso al *pan-sharpening*.

Questa possibilità è assicurata da un nuovo sistema ottico brevettato Leica: il tetracroide. Questa seconda generazione è caratterizzata da due nuove testate: la SH51 e la SH52. Queste due nuove testate sono più piccole e sono così costituite:

- La SH51 è equipaggiata con un tetracroide ed è indirizzata ad una efficiente produzione di ortofoto (Fig. 5.31a);
- La SH52 è equipaggiata con 2 filtri tetracroidici e rappresenta la testata universale adeguata a tutte le applicazioni. (Fig. 5.31b). La

SH52 aggiunge alle capacità della SH51 la possibilità della acquisizione stereoscopica e le immagini RGB e NIR.

Il sensore integra un nuovo sistema di posizionamento inerziale: il Leica IPAS10.



fig. 5.28 – Le due nuove testate SH51 ed SH52

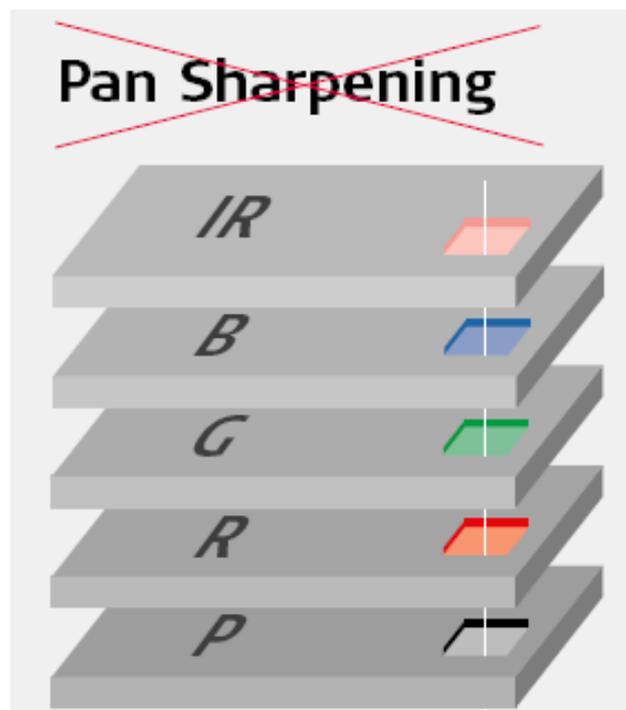


fig. 5. 29 - Le 5 bande co-registrate del sensore SH52

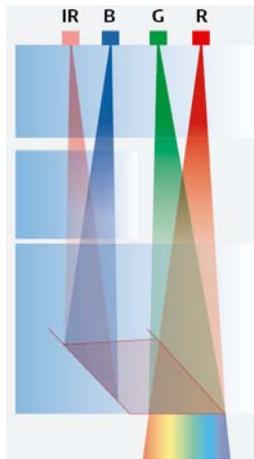
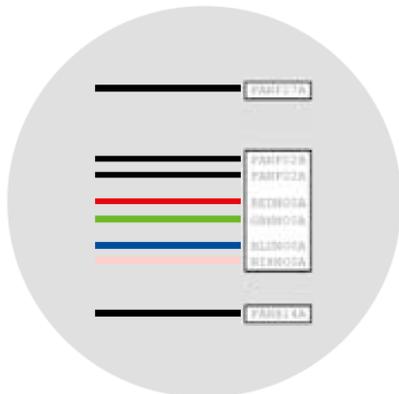


fig. 5.30 - Schema del filtro ottico tetracroide

Focal Plate of SH51



Focal Plate of SH52

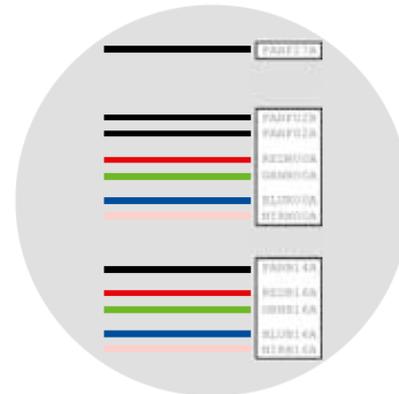


fig. 5.31 - Il piano focale delle testate SH51 (a) e SH52 (b)

La testata SH52 consente la acquisizione contemporanea di 12 canali aventi tutti la stessa risoluzione geometrica come mostrato in figura 4.31.

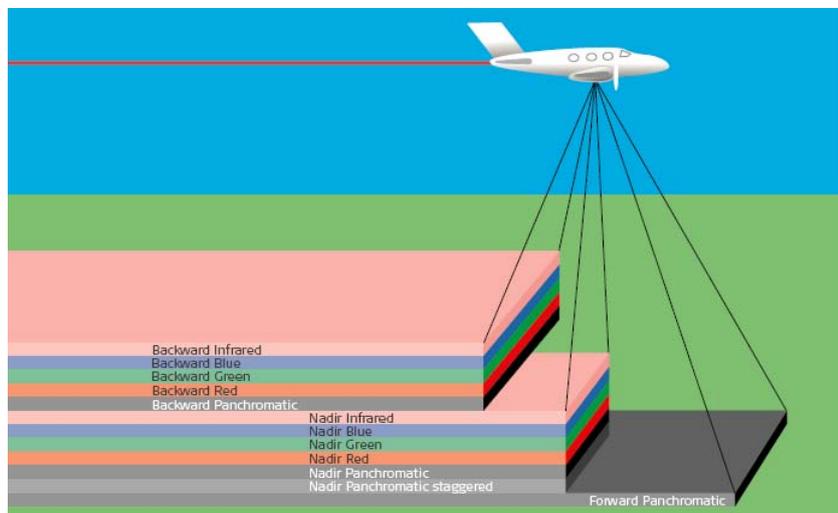


fig. 5.32 - Le bande acquisite dalla SH52

Elenchiamo nella seguente tabella le caratteristiche tecniche fondamentali delle due nuove testate.

Range Dinamico	12 bit
Risoluzione spettrale e filtri	Pan, RGB e NIR
FoV (Across Track)	64°
Apertura	f/4
Velocità del CCD	120 linee / minuto
Dimensione Pixel	6.5 μm
Lunghezza Array CCD	12000 pixel
Array CCD (SH51)	Un solo filtro quadricroide \rightarrow 8 array CCD: 2 linee pan singole, un paio di linee pan sfalsate di mezzo pixel, 4 linee multispettrale RGBN
Array CCD (SH52)	Due filtri quadricroide \rightarrow 12 array CCD: 2 linee pan singole, un paio di linee pan sfalsate di mezzo pixel, 8 linee multispettrali 2R 2G 2B 2NIR
Peso	65 Kg
Diametro	39 cm
Altezza	79 cm
Smorzatore giro-stabilizzato	Leica PAV30
Unità di controllo	CU40 (43 Kg)
Memoria di massa	MM40 (removibile e portatile)
Capacità memoria di massa	0.9 TeraByte (14 ore di acquisizione con 7 bande 3 pan e 4 multispettrali)
Interfaccia operatore	OI40
Sistema IMU	IPAS10

fig. 5.33 – Principali caratteristiche tecniche del sensore ADS40 di seconda generazione



fig. 5.34 – Vista del sistema ottico della testata del sensore SH52

Quality of external orientation										
Mission Type	Mission Parameters				Quality @ 20 cm GSD		Quality @ 30 cm GSD		Quality @ 40 cm GSD	
	GPS data used for trajectory calculation	GPS Ground Reference Station	Aero-triangulation & Bundle Adjustment	Ground Control (GCP's) available	Relative Orientation	Absolute Orientation (cm)	Relative Orientation	Absolute Orientation (cm)	Relative Orientation	Absolute Orientation (cm)
1	navigation solution from code only	no	no	no	10 pixels ~60 µm	>100	10 pixels ~60 µm	>100	10 pixels ~60 µm	>100
2			yes	no	1 pixel ~6 µm	>100	1 pixel ~6 µm	>100	1 pixel ~6 µm	>100
3			yes	yes	0.5 pixels ~3 µm	< 50	0.5 pixels ~3 µm	< 50	0.5 pixels ~3 µm	< 50
4	phase differential	yes	no	no	5 pixels ~30 µm	< 100	5 pixels ~30 µm	< 100	5 pixels ~30 µm	< 100
5			yes	no	0.5 pixels ~3 µm	< 50	0.5 pixels ~3 µm	< 50	0.5 pixels ~3 µm	< 50
6			yes	yes	0.5 pixels ~3 µm	< 10	0.5 pixels ~3 µm	< 15	0.5 pixels ~3 µm	< 20

fig 5.35 – Accuratezza dichiarata (Leica) del sistema GPS/IMU

Mapping Accuracies			
Average GSD with ADS40	Map Scale	Map standard	
		x-y accuracy RMSE	contour interval
5– 10 cm	1:500	0.125 m	0.25 m
10– 15 cm	1:1000	0.25 m	0.5 m
15– 20 cm	1:1500	0.40 m	0.75 m
20– 30 cm	1:2000	0.50 m	1 m
25– 35 cm	1:2500	0.60 m	1.25 m
30– 50 cm	1:5000	1.25 m	2.5 m
40– 60 cm	1:10000	2.50 m	5 m
50– 70 cm	1:20000	5.00 m	10 m
50– 80 cm	1:25000	6.25 m	12.5 m
50– 100 cm	1:50000	12.5 m	20 m
50– 100 cm	1:100000	25 m	50 m

fig. 5.36 – Accuratezza dichiarata (Leica) in funzione del GSD

Bibliografia

Albertz, J., Ebner, H., Neukum, G., 1996. The HRSC/WAOSS camera experiment on the Mars96 mission – A photogrammetric and cartographic view of the project. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31, Part B4, Vienna, Austria, pp. 58-63.

Sandau, R., Bärwald, W., 1994. A three-line wide-angle CCD stereo camera for Mars-94 mission - International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30, Part B1, Como, Italy, pp. 82-86.

Sandau, R., Eckardt, A., 1996. The stereo camera family WAOSS/WAAC for spaceborne/airborne applications - International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31, Part B1, Vienna, Austria, pp. 170-175.

P. Fricker, F. Zuberbüler, R. Pacey – Airborne Digital Sensors: principles, design and use as exemplified by the LH System ADS40 – Leica Geosystems – 2001

R. Sandau, B Braunecker, H. Driescher, A. Eckardt, S Hilbert, J. Hutton, W. Kirchhofer, E Lithopoulos, R. Reulke, S. Wicki – Design principles of the LH System ADS40 airborne digital sensor – IASPRS Vol. XXIII – Amsterdam – 2000

CAPITOLO 6

Il Processo fotogrammetrico -dalla calibrazione del sensore alle ortofoto

6.1 Introduzione

In questo capitolo verranno esaminati i diversi passi che portano dalla calibrazione (in laboratorio) del sensore, che viene eseguita una sola volta prima della commercializzazione, alla produzione di elaborati come ortofoto, DEM, etc. Non va confusa la calibrazione in laboratorio con la calibrazione in radianza eseguita, in genere, da tutti quegli utenti che vogliono leggere sul canale NIR valori energetici e non Digital Numbers. E' possibile distinguere le seguenti fasi:

- calibrazione del sensore;
- presa;
- download dei dati e operazioni di pre-processing: il livello 0, il geocoding dei dati, GPRO, PosPac , livello 1 e il livello 2;
- triangolazione delle scene ADS40: il modello matematico;
- generazione automatica di modelli digitali del terreno;
- produzione di ortofoto;
- applicazioni con il canale infrarosso NIR.

Ciascun passo di questa catena operativa sarà discusso in dettaglio.

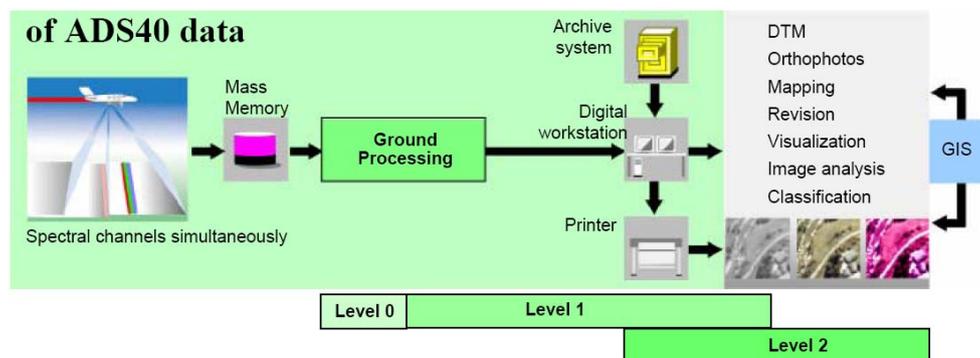


fig. 6.1 – Il *data flow* per le scene ADS40

6.2 Calibrazione del sensore ADS40

Il processo di calibrazione del sensore ADS40 viene condotto presso l'Istituto di Tecnologia dei Sensori Spaziali della DLR ed è stato sviluppato a partire da quello usato per i sensori spaziali aggiungendo lo spettro infrarosso. La seguente figura 6.2 illustra lo schema ottico della struttura di calibrazione del sensore.

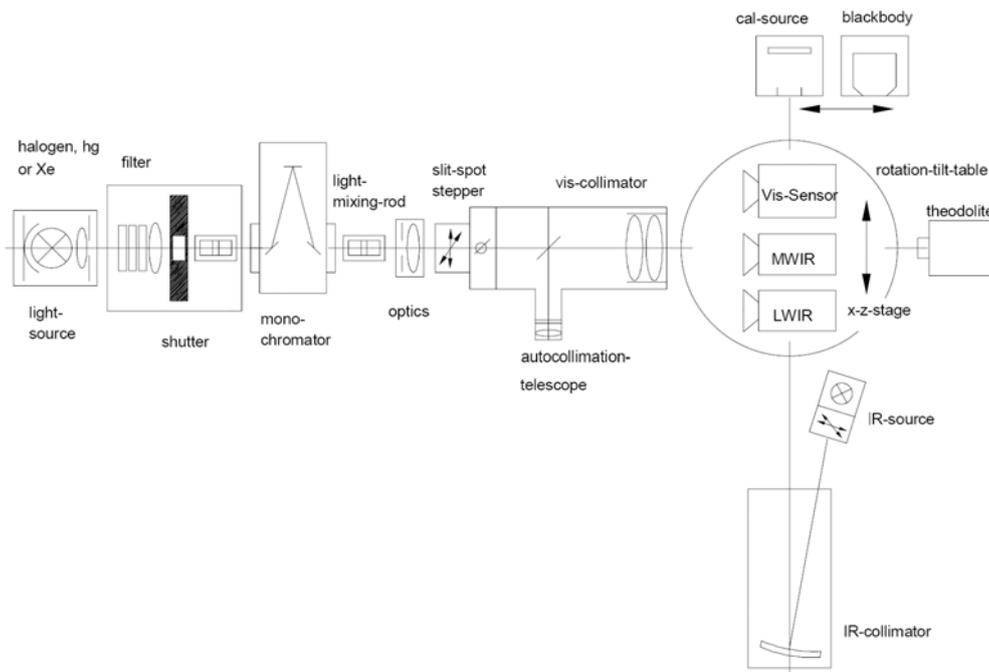


fig. 6.2 – Schema ottico del dispositivo di calibrazione del sensore ADS40

6.2.1 Calibrazione geometrica

I motivi per cui si opera la calibrazione di un sensore digitale sono principalmente due:

- effettuare una precisa misura dell'orientamento interno di ogni pixel attivo per la determinazione delle coordinate immagine;
- misura della funzione MTF (Modulation Transfer Function) per ogni pixel del sensore.

Il primo dei due obiettivi viene raggiunto attraverso la illuminazione singola del CCD attraverso un piccolissimo foro in asse con il collimatore del dispositivo di calibrazione. L'angolo di orientamento del pixel illuminato rispetto all'asse ottico del collimatore è materializzato da due angoli: α e β ; α è l'angolo orizzontale formato dalla proiezione della normale al pixel con l'asse ottico del collimatore, β è l'angolo verticale formato dalla proiezione della normale al pixel con la normale al pixel.

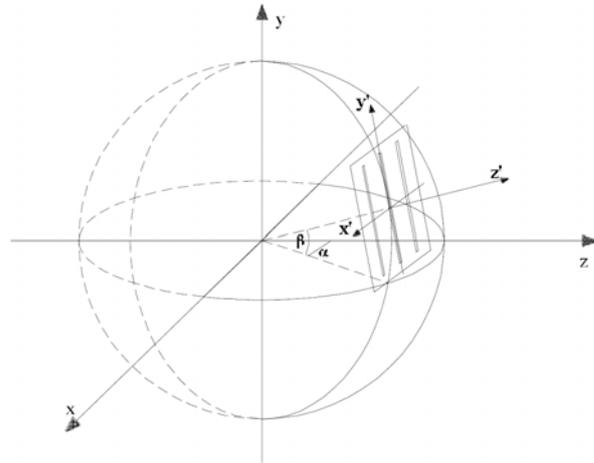


fig. 6.3 – I due angoli misurati durante la fase di calibrazione

Per il passaggio dal sistema di coordinate spaziali fisse (x,y,z) del collimatore alle coordinate immagine (x',y',z') si possono adoperare le seguenti relazioni (Ohlof e Kornus, 1994):

- $x' = f^* \tan(\alpha) / \cos(\beta)$
- $y' = f^* \tan(\beta)$
- $z' = z$

Le figure 6.4 e 6.5 mostrano un esempio di calibrazione della linea CCD nadirale del modello EM (Engineering Model).

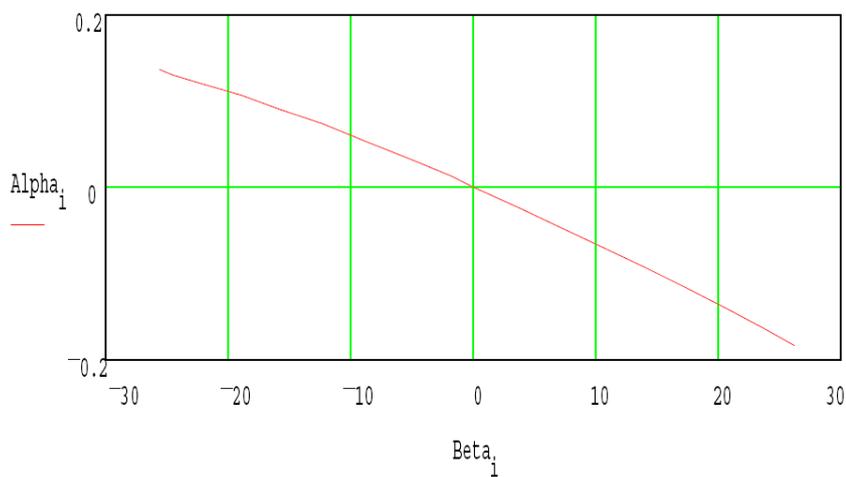


fig. 6.4 – Misura di α e β in gradi sessadecimali (Deg) prima della trasformazione di coordinate

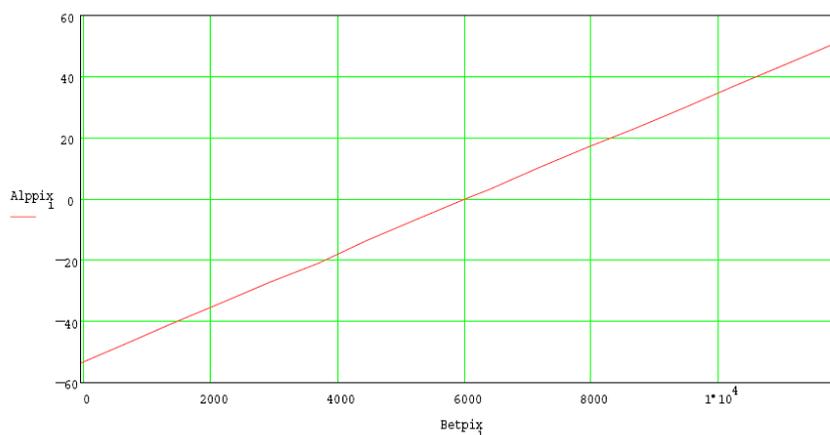


fig. 6.5 – Misura delle coordinate immagine in pixel dopo la trasformazione

La risoluzione spaziale entra in gioco quando ci si propone di visualizzare piccoli dettagli dell'immagine. Essa dipende principalmente dall'obiettivo di cui sarà dotata la camera, dal numero di pixel del sensore matriciale e dal rumore (comprendente sia il rumore termico che quello dovuto ai difetti costruttivi), comunque un elevato numero di pixel del sensore permette di raggiungere un maggiore dettaglio dell'immagine.

Il dato tecnico che rappresenta numericamente la risoluzione spaziale di una camera digitale, è la Modulation Transfer Function (MTF). La MTF indica la relazione tra la risoluzione ottica e il contrasto. Una camera ad alta risoluzione spaziale sarà necessariamente lenta, quindi alta risoluzione spaziale e alta velocità di cattura delle immagini si contrappongono. La PSF (Point Spread Function – Funzione di allargamento del Punto) è la funzione che descrive i fotoni ricevuti sul piano focale.

Il secondo obiettivo viene raggiunto attraverso la misura della funzione PSF dalla quale si può calcolare la citata MTF attraverso una trasformata di Fourier. Poiché la PSF è una funzione bidimensionale viene misurata solo nelle due direzioni principali cioè in direzione dell'asse di volo e in direzione perpendicolare cioè parallela alla linea CCD. A partire da queste misurazioni può essere calcolata la MTF per un numero arbitrario di punti ed utilizzata come input per le operazioni di post-processing. La figure 5.5, 5.6 e 5.7 mostrano un esempio ($\Gamma = +10^\circ$) di tripletta PSF/MTF ricavata durante la calibrazione del modello ingegnerizzato.

La curva MTF caratterizza le prestazioni ottiche di una camera digitale che sono influenzate principalmente dalla dimensione del pixel e dalla parte ottica del sistema (lente telecentrica).

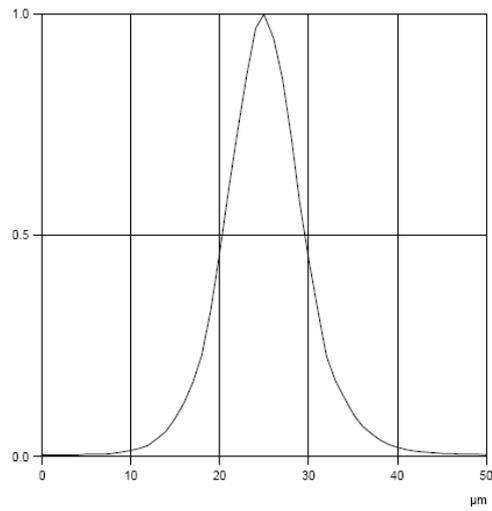


fig. 6.6 – PSF *along track* ($\Gamma=10^\circ$)

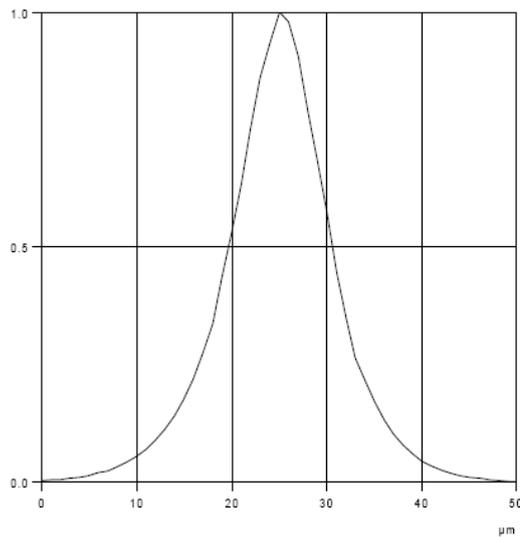


fig. 6.7 – PSF *cross track* ($\Gamma=10^\circ$)

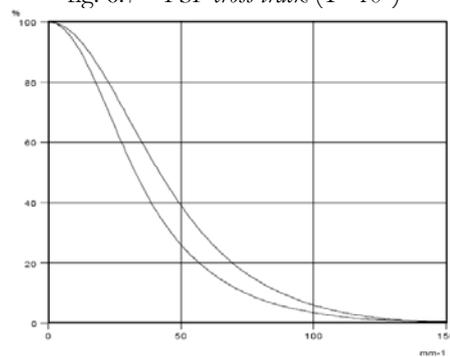


fig. 6.8 – Modulation Transfer Function

Dai test condotti alla DLR sembra risultare che la risoluzione in direzione del volo sia migliore di quella parallela alla linea CCD.

I dati relativi alla calibrazione geometrica del sensore che costituiscono l'orientamento interno del sensore sono racchiusi in un file ASCII con



fig. 6.9 – le coordinate dei singoli CCD estratte dal file di calibrazione

Esempio

Scegliamo un file di calibrazione del vettore CCD verde (la camera è la ADS40 della CGR di Parma che ha condotto le acquisizioni sull'area di Palermo oggetto di questo lavoro di ricerca). Risulta che la differenza tra X_{max} e X_{min} è uguale a 0.0120 mm, considerato che la dimensione di un singolo sensore CCD è di circa 0.0065 mm lo spostamento massimo tra il CCD più a sinistra e quello più a destra è notevole in quanto equivale all'incirca alla larghezza di due sensori CCD. La differenza tra Y_{max} e Y_{min} è uguale a 78.41356 mm, grandezza che rappresenta la lunghezza dell'intero vettore CCD. La dimensione media del singolo sensore CCD è di 0.0065 mm o ciò che è lo stesso 6.5 μm . Il CCD più grande è largo 6.8 μm contro i 6.2 del più stretto.

6.2.2 Calibrazione radiometrica

Se l'intero campo di vista (FoV) della linea CCD viene illuminato in modo omogeneo si dovrebbe ottenere una risposta in termini di segnale analogo a quella mostrata nella seguente fig. 6.10.

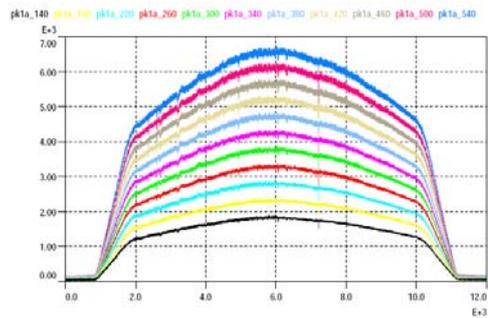


fig. 6.10 – Segnale sul FoV non corretto

La forma della figura riflette l'intensità luminosa lungo il campo di vista (FoV). La grande variabilità mostrata nelle curve è da attribuire al fattore PRNU della linea di pixel. Il segnale va quindi corretto poiché è auspicabile avere un segnale costante cioè una illuminazione costante lungo tutto il FoV. La correzione viene condotta in modo molto semplice per semplice sottrazione del rumore. Per potere operare la correzione è sempre necessario determinare i valori per la correzione radiometrica in un processo di calibrazione condotto a parte.

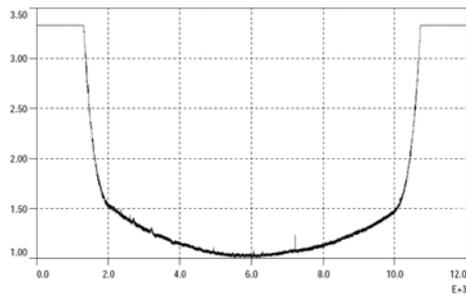


fig. 6.11 – Correzione PRNU

Dopo questa correzione il segnale dovrebbe essere esente sia dell'effetto PRNU che dell'ombreggiamento ai bordi.

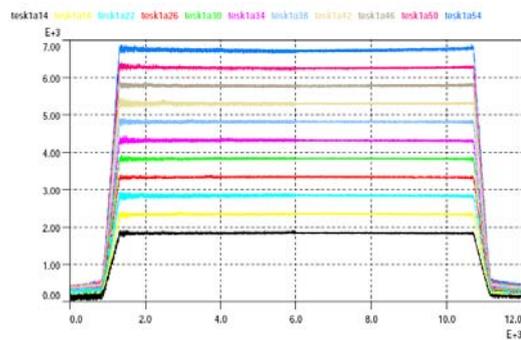


fig. 6.12 – Segnale corretto uniforme

6.3 La missione, il volo e la presa

Come nelle missioni condotte con camere tradizionali a pellicola viene redatto un piano di volo. La quota relativa di volo viene dedotta a partire dalla dimensione desiderata del pixel “a terra” (GSD). Si tenga conto che il GSD aumenta all’incirca di 10 cm ogni 1000 metri di quota. Quindi con una quota media di volo di 6000 metri si avranno scene ADS40 con GSD (Ground sample Distance) di circa 60 cm.

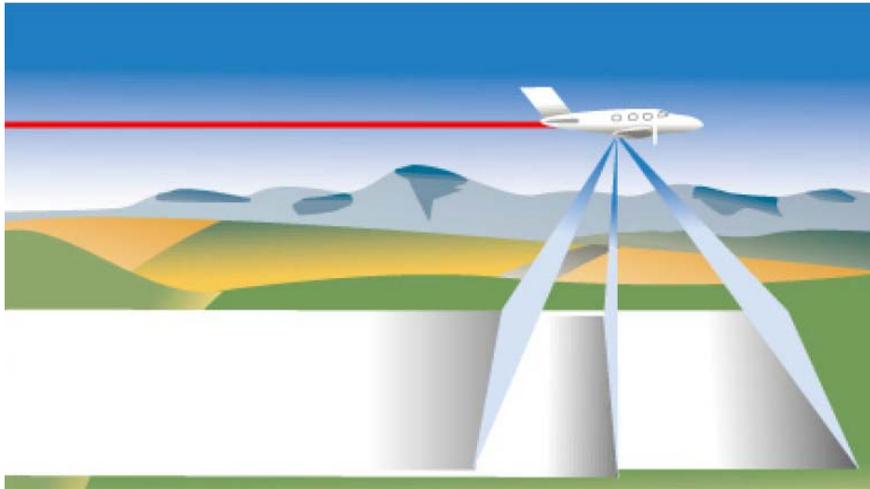


fig. 6.13 – La presa per i sensori *pushbroom* a tre linee

La presa avviene contemporaneamente per tutte le linee CCD (davanti, nadir e dietro) ed è assistita da un sistema integrato GPS/INS. Nello stesso istante vengono acquisite dalle tre linee CCD zone diverse o ciò che è lo stesso in istanti diversi viene rilevata la stessa zona. La strisciata è continua e la sovrapposizione longitudinale tra le tre strisciate acquisite dalle tre linee è del 99 %. Le scene grezze presentano però forti deformazioni dovute principalmente al movimento del velivolo che andranno corrette attraverso i dati GPS/INS. Le scene ADS40 non corrette vengono chiamate scene a “livello 0”.

Il ricevitore GPS in modalità differenziale garantisce la accuratezza di posizionamento del sensore con una accuratezza nell’ordine del decimetro. Il sistema IMU calcola con una frequenza prestabilita (200 Hz – 200 letture al secondo) i tre angoli di assetto del velivolo: rollio, beccheggio e imbardata.

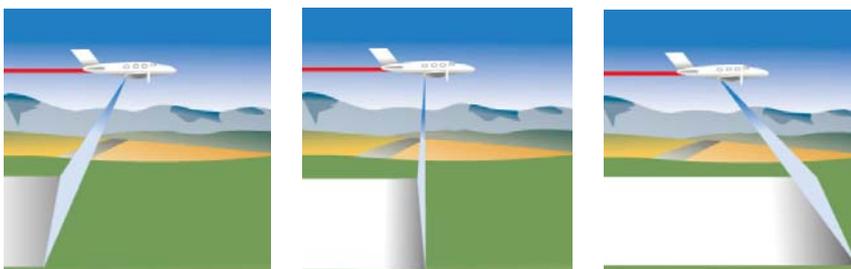


fig. 6.14 – Acquisizione delle scene backward, nadir e forward

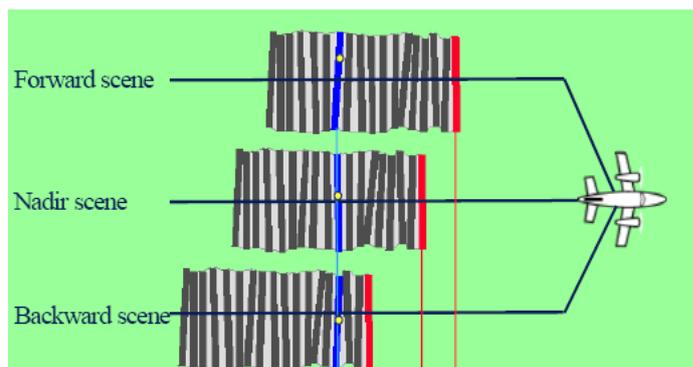


fig. 6.15 – La stessa zona in istanti diversi (in blu) o zone diverse nello stesso istante (in rosso)

I dati GPS uniti ai dati di assetto vengono memorizzati in un file di testo che rappresenta la posizione assoluta al momento della acquisizione del corpo rigido costituito dalla generica linea CCD: la acquisizione non è continua ma discretizzata.

6.4 Operazioni di pre-processing. Il software GPRO della Leica

Una volta a terra, ultimata la fase relativa alla presa, è possibile collegare la memoria di massa MM40 che è pesante ma portatile ad una workstation per scaricare i dati e condurre le operazioni di pre-processing. La Leica ha sviluppato a tal proposito una applicazione dedicata: il software *GPRO – ADS40 Ground Processing Software*.

Il collegamento tra la workstation e la memoria di massa MM40 avviene attraverso un controller SCSI: l'adattatore DA45 (Download Adapter). Sia la memoria MM40 che l'adattatore DA45 necessitano di essere alimentati con il dispositivo PS45 (Power Supply).



fig. 6.16 – L'adattatore DA45 e l'alimentatore PS45

Il software GPRO ha una struttura molto semplice: contiene 5 MENU' e 4 TAB. Riassumiamo brevemente le operazioni che è possibile condurre con GPRO:

- download delle scene ADS40 e dei dati di assetto e posizione;
- configurare il formato di download e l'algoritmo di compressione (il più comune è il TIFF TILED);
- assegnare una particolare struttura ai nomi dei file;

- configurare i collegamenti con altre applicazioni esterne come il software di triangolazione ORIMA o il software di gestione dei dati di assetto e posizione Applanix PosPac;
- configurare i collegamenti con altre applicazioni interne deputate a particolari operazioni. Il *downloader MMControl.exe* gestisce lo scaricamento di immagini e dati GPS/INS. L'eseguibile *ADSCom.exe* consente di georiferire le immagini grezze usando i dati GPS/INS. *ADSRectify.exe* gestisce la rettifica geometrica e radiometrica delle immagini. *ADSMinify.exe* è deputato alla costruzione dei *layer* piramidali. *ADS ApmDriver.exe* è il tool per l'autocorrelazione delle immagini e *ADSImageSlicer.exe* consente di tagliare le immagini L1 in parti più agevoli da gestire.
- Configurare il percorso per il progetto e per i files *.cam di calibrazione.

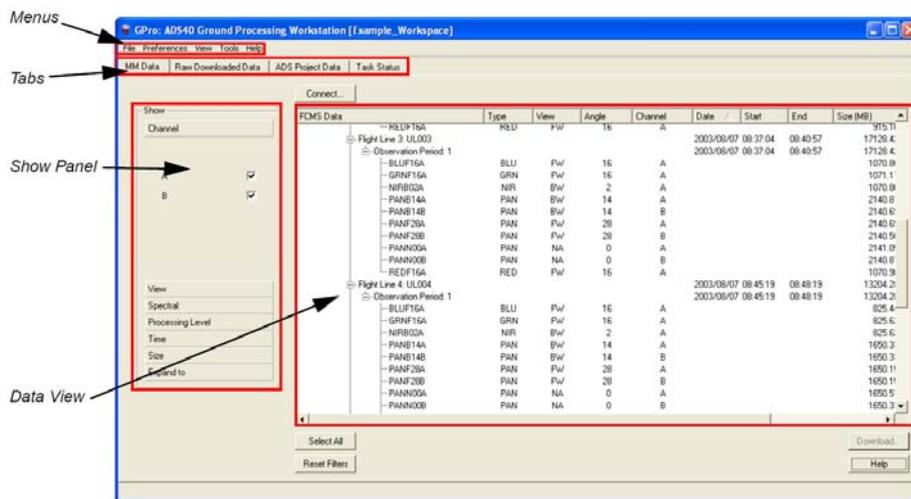


Fig. 6.17 – L'interfaccia principale di GPRO

Il tipico flusso di lavoro del software GPRO è il seguente:

- scaricamento delle immagini grezze dalla memoria di massa MM40;
- scaricamento dei dati GPS/IMU grezzi dalla memoria di massa MM40;
- processing dei dati GPS/IMU con il software della Applanix PosPac;
- creazione di un progetto di GPRO con la aggiunta delle immagini grezze e dei dati GPS/IMU processati;
- rettificazione delle immagini su un piano e creazione del livello 1 on cui, a meno di piccoli residui di parallasse, è possibile operare la visione stereoscopica delle immagini;
- triangolazione aerea con il software esterno ORIMA;
- generazione del DTM con la suite esterna LPS;
- ortorettifica con LPS e creazione delle immagini a livello 2.

Level 0 - Raw data consisting of : Geometric raw images (TIFF and other formats) and processed orientation data	Level 1- Rectified data consisting of : Fully corrected stereo- viewable panchromatic images and fully corrected multispectral images	Level 2 - Geo-coded data consisting of: Panchromatic and multispectral orthophotos
---	---	--

fig. 6.18 – I tre livelli possibili per le scene ADS40

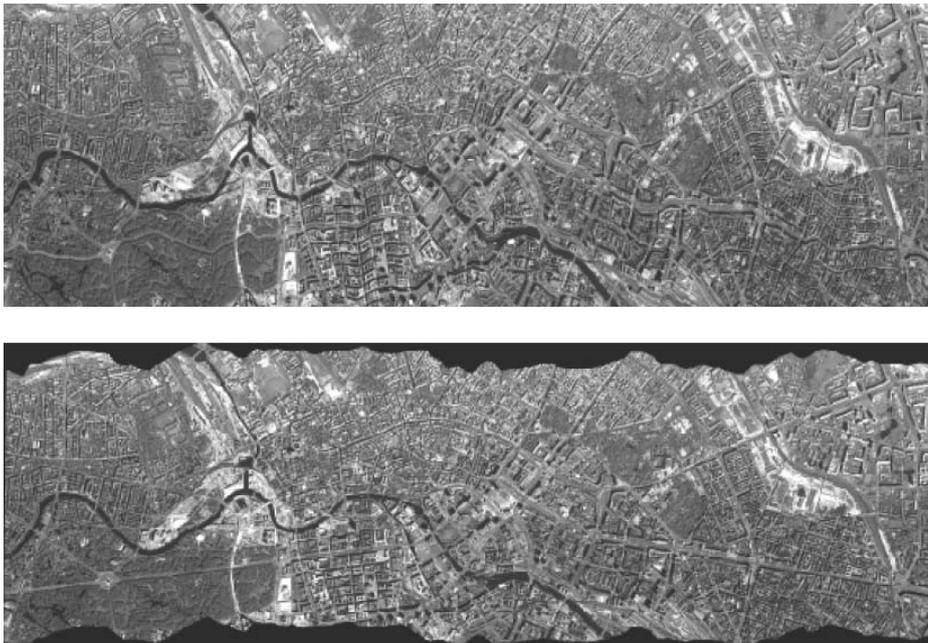


fig. 6.19 – Scena ADS40 a livello “0” (sopra) e corrispondente scena a livello 1

In GPRO è possibile ottenere vari prodotti. Ognuno di questi prodotti corrisponde ad un diverso livello di processamento. Le immagini a livello 0 sono georiferite direttamente con i dati GPS/INS acquisiti durante il volo. Queste immagini contengono distorsioni dovute al movimento del velivolo e non sono adatte alla visione stereoscopica. In aggiunta, un potenziale disallineamento del sistema IMU ed eventuali errori di calibrazione possono ancora di più inficiare la accuratezza geometrica di questo prodotto. Le immagini a livello 0 non sono adatte come prodotto finale richiedendo operazioni di processamento aggiuntive, tuttavia sono estremamente adatte per le operazioni di backup dei dati poiché il passaggio da livello 0 a livello 1 è una operazione abbastanza speditiva ma irreversibile. I prodotti finali sono di due tipi: le scene a livello 1 e quelle a livello 2. Le scene a livello 1 sono corrette dagli effetti di movimento del velivolo e ruotate per ottenere la possibilità di una visione stereoscopica ottimale. Di solito viene condotta su queste una triangolazione aerea per aumentarne la accuratezza geometrica. Le scene a livello 2 sono immagini ortorettificate prive degli effetti di elevazione e orientate secondo un prefissato Datum e un prefissato sistema di proiezione. A livello 2 è possibile ottenere ortofoto a colori. La creazione del livello 2 richiede l'uso di un modello digitale di elevazione (DTM) che può essere estratto da una coppia di immagini a livello 1 oppure generato a partire da altre fonti (cartografia, etc...).

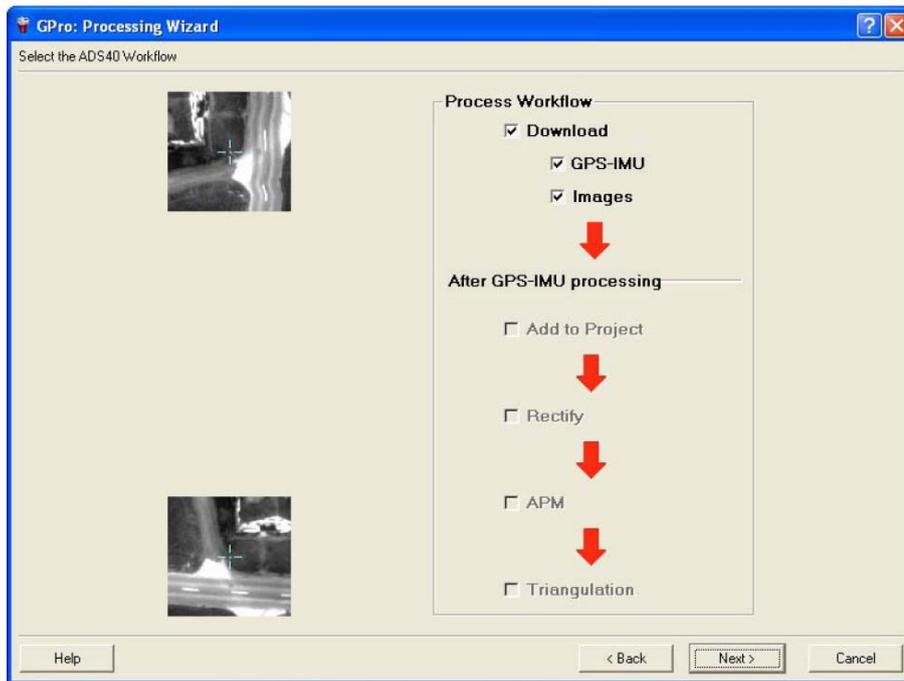


fig. 6.20 – Il *workflow* di GPRO

In GPRO sono presenti anche una coppia di utility abbastanza utili:

1. CCD Correction Curve Editor;
2. ADS Orientation Plot;

Il tool CCD è utile per operare lo stretching delle immagini a 16 bit e ottenere una scena normalizzata. Il tool permette di intervenire manualmente sulla curva di correzione dei livelli della immagine.

Il tool ADS Orientation Plot è utile per valutare l'andamento della missione di volo attraverso una rappresentazione grafica dei parametri dell'orientamento esterno. I parametri dell'orientamento esterno x , y , z , ω , ϕ e κ sono racchiusi nei file con estensione *.odf (Orientation Data Files). I file *.odf con estensione aggiuntiva *.adj (adjusted) sono già stati processati in PosPac. Il tool ADS Orientation Plot consente di stampare sia i file di orientamento esterno non corretti che quelli corretti. Il programma fornisce anche vari parametri statistici (minimo, massimo e deviazione standard) sui parametri dell'orientamento esterno.

6.5 Gestione dei dati GPS/IMU. Il software Applanix PosPac

PosPac è una suite di software che congiuntamente consentono di computare i più accurati dati di assetto e posizione a partire dai dati acquisiti dal sistema POS (Position and Orientation System) della Applanix integrato nel sensore ADS40.

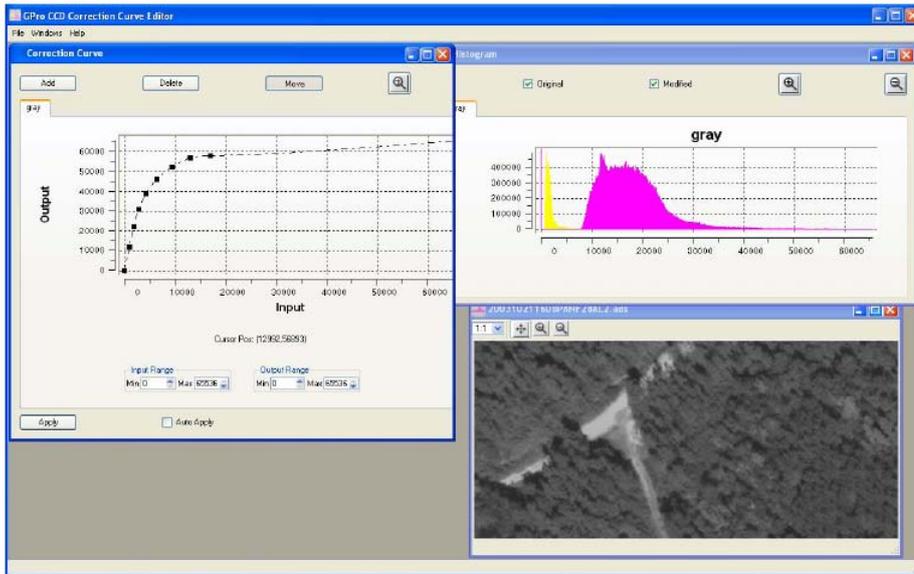


fig. 6.21 - CCD correction Curve Editor

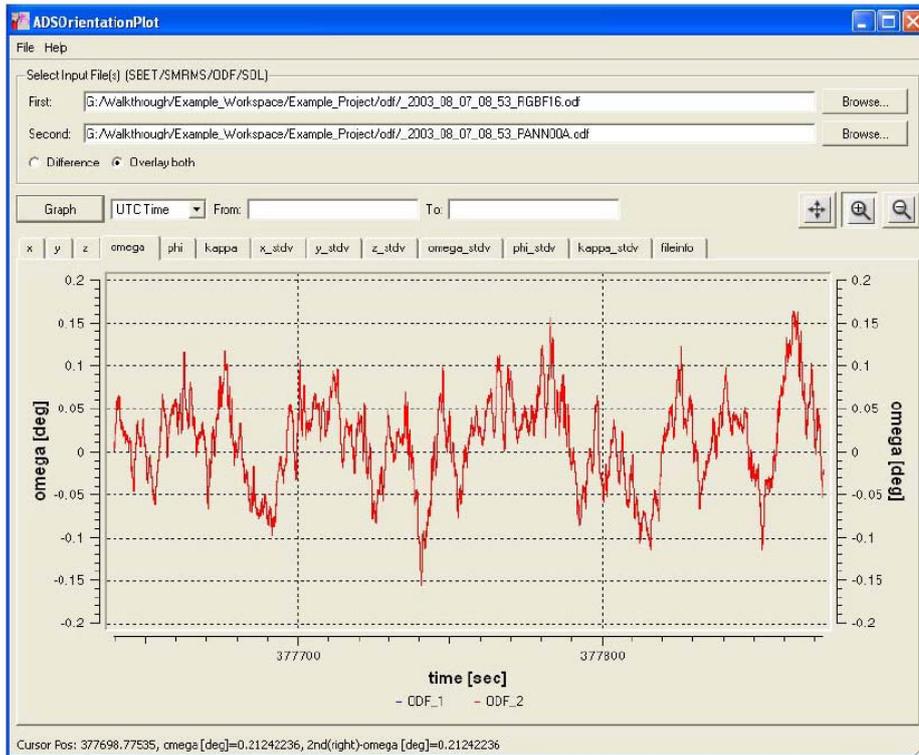


fig. 6.22 - ADS Orientation Plot

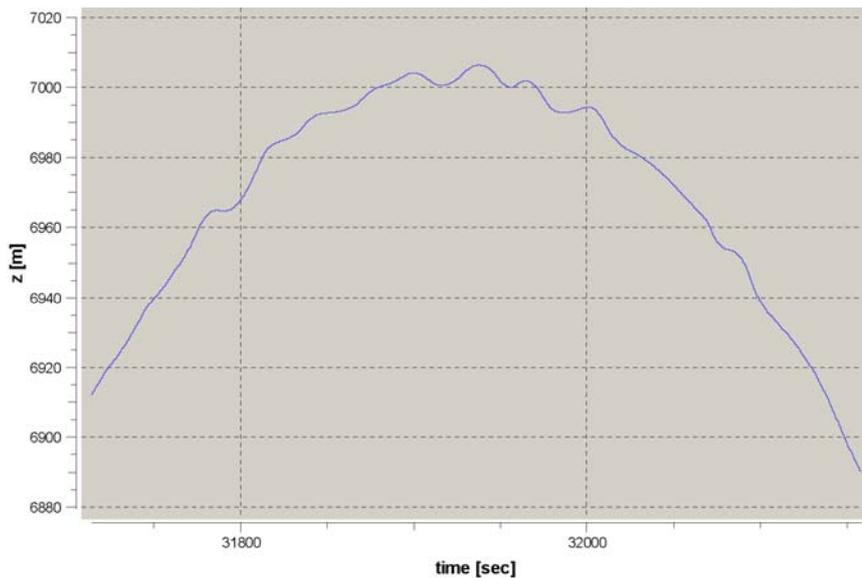


fig. 6.23 – Il tipico andamento della quota di volo durante la missione

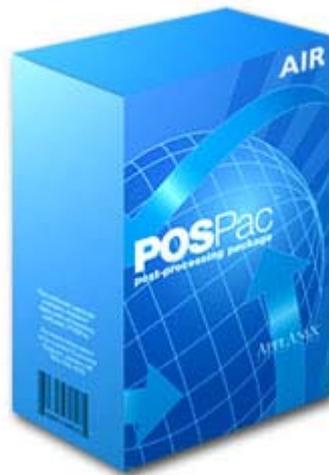


fig. 6.24 – il software POSPac per la gestione dei dati GPS/IMU

I passi fondamentali necessari a trasformare una scena ADS40 in una immagine ortorettificata sono sette:

1. scaricamento delle immagini dalla memoria di massa MM40;
2. scaricamento dei dati POS dalla memoria di massa mm40;
3. processamento dei dati GPS/INS;
4. creazione delle immagini a livello 0;
5. creazione delle immagini a livello 1 utilizzabili per la visione stereoscopica;
6. acquisizione dei punti di controllo (GCP) e triangolazione;
7. produzione delle immagini a livello 2 (ortofoto).

I dati GPS e IMU acquisiti durante la missione di volo vengono registrati sulla memoria di massa MM40. Per potere ottenere una informazione accurata sulla posizione e l'assetto di ogni linea CCD, questi due insiemi

di dati vanno post-processati in modo da tenere conto anche dei dati GPS acquisiti da una eventuale stazione fissa su un punto noto (GPS differenziale). Poiché differenti linee CCD possono essere settate per acquisire dati con una differente frequenza di campionamento, i dati GPS/IMU vengono post-processati separatamente: si avrà quindi un file per ogni vettore CCD operativo. Alla fine di questo processo si avranno un numero di file esattamente uguali al numero delle linee CCD ognuno dei quali conterrà i 6 dati di posizione e di assetto di ogni linea CCD corrispondente.

Come è noto i dati GPS sono riferiti al sistema geocentrico WGS84 (World Geodetic System 1984). Il sistema GPS restituisce quindi la posizione dell'antenna nel sistema di riferimento GPS84. Il sistema IMU invece registra le variazioni di posizione e di assetto del sensore ADS. Il sistema IMU è collegato rigidamente al piano focale e al sistema di lenti del sensore. L'elevata frequenza di campionamento del sistema IMU viene usata per verificare i dati GPS e per determinare la traiettoria del velivolo tra due acquisizioni GPS contigue. La frequenza tipica di acquisizione delle immagini è di circa 800 linee al secondo. La frequenza di campionamento del sistema GPS è di sole due acquisizioni al secondo (2 Hz). La frequenza del sistema IMU è di 200 Hz cioè di 200 acquisizioni al secondo. I dati IMU, così numerosi, sono utili proprio per determinare la posizione e l'assetto dell'aereo tra due campionamenti GPS successivi. Il sistema IMU misura assetto e posizione in un sistema di riferimento relativo; così facendo il sistema è in grado di fornire informazioni accurate solo su un brevissimo intervallo di tempo. Sui lunghi intervalli di tempo la misurazione si scosta parecchio dai valori reali di assetto e posizione; queste informazioni vanno corrette e georeferenziate in un sistema di riferimento cartografico attraverso i dati GPS. Nella fase di post-processing bisogna tenere conto della deviazione dalla verticale (il sistema IMU acquisisce variazioni di assetto e posizione con riferimento alla verticale cioè alla direzione del filo a piombo, invece il sistema GPS si riferisce alla normale all'ellissoide WGS84) e del disallineamento dei dati GPS (relativi al centro dell'antenna) e quelli IMU riferiti ad un sistema locale giacente sul piano focale. Queste correzioni sono state previste nel modello matematico che governa la geometria di presa del sensore e quindi si possono apportare anche in fase di triangolazione.

La coordinazione dei tempi tra il sistema IMU, il sistema GPS e l'acquisizione delle immagini è regolata da un sistema di orologi sincronizzati: questo accorgimento consente di avere una precisa registrazione di ogni evento acquisito. La frequenza di acquisizione del sistema IMU è di 200 Hz che è inferiore alla frequenza massima di rilievo delle linee CCD di 800 Hz (una linea ogni 1.2 millisecondi); i dati GPS/INS andranno poi ricampionati sulla frequenza dei CCD. Il primo passo delle operazioni di post-processing dei dati GPS/IMU riguarda il calcolo della traiettoria corretta; questi dati di traiettoria uniti ai dati di calibrazione consentono di ottenere le coordinate in un sistema di riferimento assoluto di ogni pixel. Dopo queste operazioni è possibile passare alla rettifica delle immagini ADS40 che può essere condotta su un piano medio (*fast rectification*) oppure attraverso un DSM (*precise rectification*).

6.6 Modelli Matematici per sensori lineari a tre linee (TLS). Trattazione Generale

Lo scopo della georeferenziazione delle scene ADS40 è quello di stabilire una relazione tra il sistema di riferimento della immagine e quello “a terra” in conformità con la geometria del sensore e a tutti gli altri dati disponibili. Il sistema di riferimento è centrato nel centro prospettico della lente con l'asse x tangente alla traiettoria di volo, l'asse z parallelo all'asse ottico e orientato in direzione di volo e l'asse y in direzione della linea CCD a completare un sistema destrogiro. Per ogni punto rilevato sussiste una relazione tra le coordinate immagine (x, y, -f) e le coordinate terreno (X, Y, Z):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} + kR(\omega_C, \varphi_C, \kappa_C) \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}$$

In questa relazione X_C , Y_C e Z_C rappresentano le coordinate del centro ottico della lente nel sistema terreno, f è la lunghezza focale equivalente del sistema di lenti, k è il fattore di scala e $R(\omega_C, \varphi_C, \kappa_C)$ è la matrice di rotazione dal sistema di riferimento immagine al sistema di riferimento terreno; $(\omega_C, \varphi_C, \kappa_C)$ sono gli angoli di assetto.

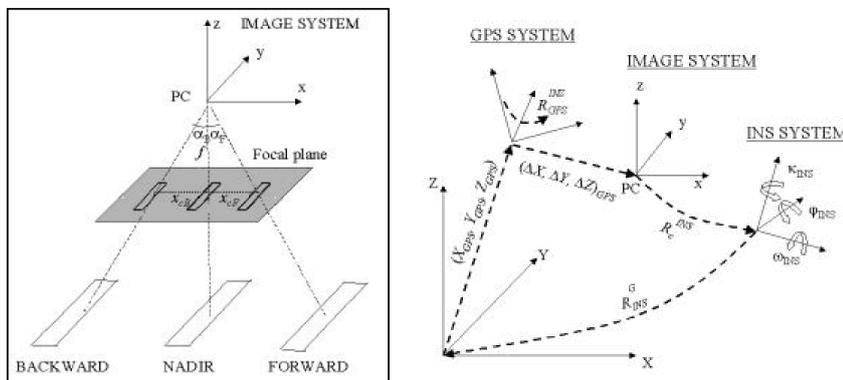


fig. 6.25 – I sistemi di riferimento del modello matematico generale

6.6.1 Georeferenziazione diretta

I sistemi GPS/IMU consentono di ottenere i parametri dell'orientamento esterno di ogni linea CCD con accuratezza centimetrica per ciò che riguarda la posizione e nell'ordine di qualche secondo sessagesimale per ciò che riguarda l'assetto. I dati GPS/INS consentono, attraverso una intersezione in avanti basata sulla roto-traslazione precedente, di calcolare le coordinate terreno. Ma le coordinate GPS/INS non si riferiscono mai al centro di presa della camera: le coordinate fornite dal GPS si riferiscono, ovviamente, al centro della antenna e i dati di assetto forniti dal sistema IMU si riferiscono a un sistema di riferimento locale centrato sul sensore inerziale. Questi due sistemi sono traslati e ruotati rispetto al

sistema di riferimento immagine quindi la relazione precedente va estesa per tenere conto di questa condizione geometrica.

6.6.2 Georeferenziazione indiretta

Uno dei principali problemi della georeferenziazione diretta consiste nella frequente impossibilità di conoscere i valori di scostamento dei due sistemi di riferimento GPS e IMU rispetto al sistema immagine. Questi valori possono essere stimati attraverso una calibrazione in post-processing ma la accuratezza dei sistemi inerziali non è sufficiente per applicazioni ad altissima risoluzione. Per potere calcolare i valori corretti dell'orientamento esterno per ogni linea CCD a partire dalle osservazioni GPS/INS sono stati proposti vari approcci. Chen (2001) suggerisce di modellare l'orientamento esterno attraverso funzioni polinomiali di Lagrange del terzo ordine.

Gruen et al (2002) suggeriscono di utilizzare due tipi di funzioni di trasformazione in funzione dei vari casi di studio: le già citate polinomiali di Lagrange e le polinomiali "a tratti" (piecewise polynomials). Un approccio differente viene utilizzato invece per la triangolazione delle scene ADS40 (Hinsken et al, 2002). In questo caso i parametri dell'orientamento esterno nel generico istante di acquisizione vengono interpolati a partire da quelli di due punti vicini in cui è avvenuta la misura.

6.6.3 Triangolazione delle immagini ADS40. Il modello matematico.

L'Aerial Digital Sensor della LH Systems ADS40 è uno scanner multilinea appartenente alla classe di sensori *pushbroom* quindi richiede modelli matematici più complessi delle tradizionali equazioni di collinearità che si usano per la triangolazione aerea classica. In questo caso assume particolare importanza l'adozione di dati GPS e inerziali, dati di grande precisione che stanno alla base del processo di triangolazione.

Il software ORIMA (**O**RIentation **M**ANagment) gestisce tutti i problemi legati alla triangolazione delle immagini acquisite con la ADS40. La ADS40 è una camera pushbroom e quindi il software deve implementare un modello di sensore differente rispetto al tradizionale modello utilizzato per le *frame camera*. Ne deriva che l'intero flusso di lavoro necessario per operare la triangolazione delle immagini ADS40 è abbastanza differente da quello necessario per la fotogrammetria tradizionale.

La ADS40 è equipaggiata con un sensore GPS/IMU. Questo sistema è usato per registrare il movimento del sensore durante il volo. Le specifiche tecniche di questo sistema sono tali da assicurare precisioni adeguate per certi tipi di prodotti ma non sono idonee per applicazioni di cartografia a grande scala che richiedono elevata precisione. Per ottenere la precisione più elevata possibile è richiesto un processo di triangolazione. La triangolazione è inoltre utilizzata per calibrare alcuni parametri del sistema e se usata in combinazione con i GCP consente un ottimale orientamento esterno.

I dati GPS/IMU vengono processati in modo tale da ottenere 6 parametri di orientamento per ogni vettore CCD in un sistema cartesiano locale. Il modulo *CORE* della *workstation* di fotogrammetria digitale Socet Set consente di operare la trasformazione dal sistema locale di coordinate al sistema cartografico finale. Per essere sicuri che l'algoritmo di ricerca automatica dei punti di legame di Socet Set funzioni correttamente le immagini ADS40 vanno rettificate dal livello 0 al livello 1. Questo orientamento è basato sui valori di post-processing dei dati di posizione e assetto ricavati dal sensore GPS/IMU. Le distorsioni presenti sulle immagini a livello 0 sono causate dal movimento del sensore e vengono rimosse nelle immagini rettificate a livello 1 che possono essere osservate stereoscopicamente. Il modello del sensore della ADS40 implementato in Socet Set è progettato in modo che la trasformazione tra livello 0 e livello 1 avvenga in tempo reale.

Dopo che i parametri di orientamento sono stati calcolati attraverso il *bundle adjustment* l'utente può procedere all'estrazione dei dati dalle immagini a livello 1. Questa procedura può includere l'estrazione di DSM, la produzione di ortofoto, estrazione di temi particolari etc ...

In via opzionale l'utente può estrarre una ortofoto direttamente dal livello 0 grezzo. Le immagini ortorettificate ad elevata precisione geometrica sono identificate come livello 2.

Per potere operare la triangolazione aerea uno scanner *pushbroom* deve avere tre vettori CCD sul piano focale. Queste barrette CCD sono montate in modo tale che una guardi avanti, una dietro e l'ultima sia in posizione nadirale. La distanza tra il sensore anteriore e quello nadirale e la distanza tra quello posteriore e quello nadirale è necessario che sia diversa. Gli angoli di osservazione anteriore e posteriore risultano essere quindi diversi. La scansione ottenuta da ogni linea di scansione viene chiamata scena. Una scena acquisita da una linea di scansione è abbastanza simile ad una immagine acquisita da una *frame camera*. Una scena differisce da una immagine ottenuta da una *frame camera* solo per il fatto che è rilevata in maniera continua.

Per misurare i punti omologhi in più scene è necessario individuare la stessa riga e la stessa colonna. Il processo di ricerca dei punti omologhi è abbastanza simile a quello utilizzato nelle tradizionali applicazioni fotogrammetriche. Il processo di ricerca va implementato sulle scene a livello 1.

I dati GPS e IMU sono acquisiti a frequenza elevata durante la presa delle immagini. Durante il processo di triangolazione è necessario aggiornare questo set continuo di dati attraverso un *bundle adjustment* ai minimi quadrati. In questo caso è necessario utilizzare dei punti fissi ad intervalli costanti chiamati *orientation fixes*. Gli *orientation fixes* sono caratterizzati da:

- orientamento fisso che corrisponde all'orientamento del sensore ad un certo istante di tempo;
- le migliori condizioni geometriche si ottengono quando la distanza tra due OF successivi equivale alla base corta del sensore;
- l'intervallo di tempo tra due punti fissi successivi dipende dalla qualità del sistema giroscopico;

- i 6 parametri di orientamento per ogni punto fisso vengono aggiornati dal processo di triangolazione, ogni punto fisso è identificato da un unico istante di tempo;
- una singola immagine è caratterizzata da molti OF.

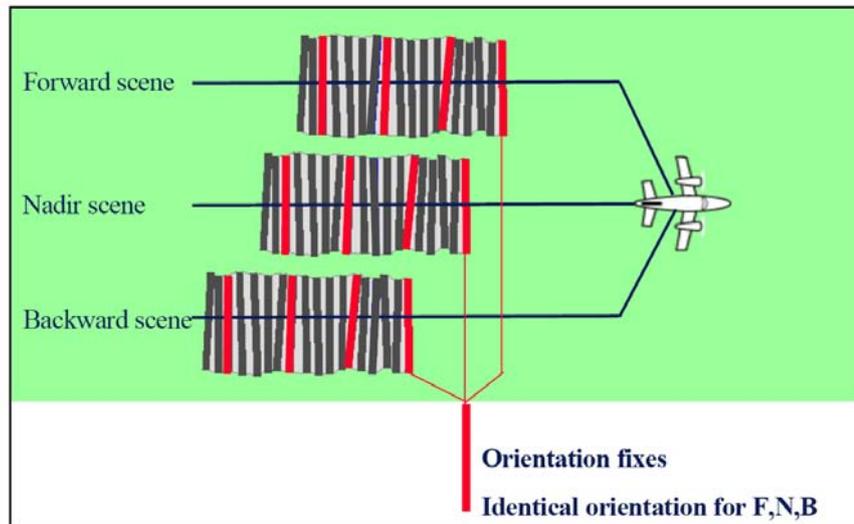


fig. 6.26 – Orientation Fixes

Il modello matematico descrive la trasformazione di un punto dal SR terreno al sistema di riferimento degli OF.

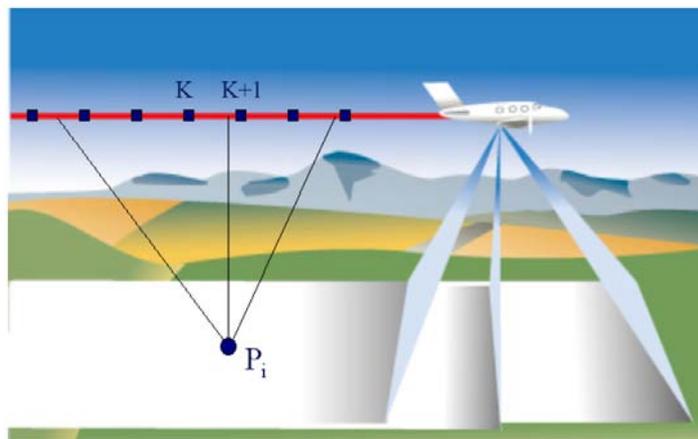


fig. 6.27 – Orientation Fixes adiacenti

Questa trasformazione (*ground to sensor transformation*) è caratterizzata dalle seguenti caratteristiche:

- i punti possono essere misurati in ogni posizione;
- ogni punto proiettato cade tra due OF;
- la trasformazione terreno – sensore è espressa come funzione di due OF vicini.

Le coordinate immagini sono espresse in funzione dei punti terreno (Pi) e dei parametri di orientamento di due OF successivi (k) e (k+1). Il modello matematico è descritto in dettaglio da Muller (1991).

$$x_{ij} = F_{ij}(X_i, Y_i, Z_i, X_k, Y_k, Z_k, \omega_k, \varphi_k, \kappa_k, \\ X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}, \omega_{k+1}, \varphi_{k+1}, \kappa_{k+1})$$

$$y_{ij} = G_{ij}(X_i, Y_i, Z_i, X_k, Y_k, Z_k, \omega_k, \varphi_k, \kappa_k, \\ X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}, \omega_{k+1}, \varphi_{k+1}, \kappa_{k+1})$$

I sei parametri di orientamento (X_j, κ_j) sono calcolati a partire dagli OF più vicini più un termine di correzione ($\delta X_j, \delta \kappa_j$) derivato dalle acquisizioni GPS/IMU. I coefficienti di interpolazione (c_j) sono espressi in funzione della differenza di tempo tra due punti OF vicini. La base di questo modello è da ricondurre a Otto Hofmann (1982).

$$X_j = c_j X_k + (1 - c_j) X_{k+1} - \delta X_j$$

$$\dots$$

$$\kappa_j = c_j \kappa_k + (1 - c_j) \kappa_{k+1} - \delta \kappa_j$$

$$c_j = \frac{t_{k+1} - t_j}{t_{k+1} - t_k}$$

$$\delta X_j = c_j X_k^{GPS} + (1 - c_j) X_{k+1}^{GPS} - X_j^{GPS}$$

$$\dots$$

$$\delta \kappa_j = c_j \kappa_k^{IMU} + (1 - c_j) \kappa_{k+1}^{IMU} - \kappa_j^{IMU}$$

Infine i parametri di orientamento (X_j, κ_j) vengono immessi nelle ben note equazioni di collinearità per trasformare le coordinate dei pixel dal sistema del terreno al sistema del sensore.

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ -f \end{bmatrix} = \lambda_{ij} \mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa)_j \begin{bmatrix} X_i - X_j \\ Y_i - Y_j \\ Z_i - Z_j \end{bmatrix}$$

Dividendo le equazioni (1) e (2) con le (3) nella relazione di sopra il fattore di scala va via, ne risulta:

$$x_{ij} = -f \frac{r_{11_j}(X_i - X_j) + r_{12_j}(Y_i - Y_j) + r_{13_j}(Z_i - Z_j)}{r_{31_j}(X_i - X_j) + r_{32_j}(Y_i - Y_j) + r_{33_j}(Z_i - Z_j)}$$

$$y_{ij} = -f \frac{r_{21_j}(X_i - X_j) + r_{22_j}(Y_i - Y_j) + r_{23_j}(Z_i - Z_j)}{r_{31_j}(X_i - X_j) + r_{32_j}(Y_i - Y_j) + r_{33_j}(Z_i - Z_j)}$$

che rappresentano le equazioni di collinearità per i sensori “frame”.
 Il modello matematico adottato è molto flessibile. Nelle aree che presentano un basso numero di punti di legame (laghi, foreste,...) i parametri di orientamento vengono calcolati principalmente o esclusivamente a partire dai dati GPS/IMU. Se invece i dati GPS/INS sono indisponibili i parametri di orientamento vengono calcolati a partire solo dai punti di legame. In quest’ultimo caso la scelta dell’intervallo tra gli OF e la distribuzione dei punti di legame va fatta con molta cura in modo da determinare tutte le singularità del modello così come descritto nella trattazione di Muller. La seguente figura mostra la relazione tra gli OF, i parametri d’orientamento e i dati GPS/IMU.

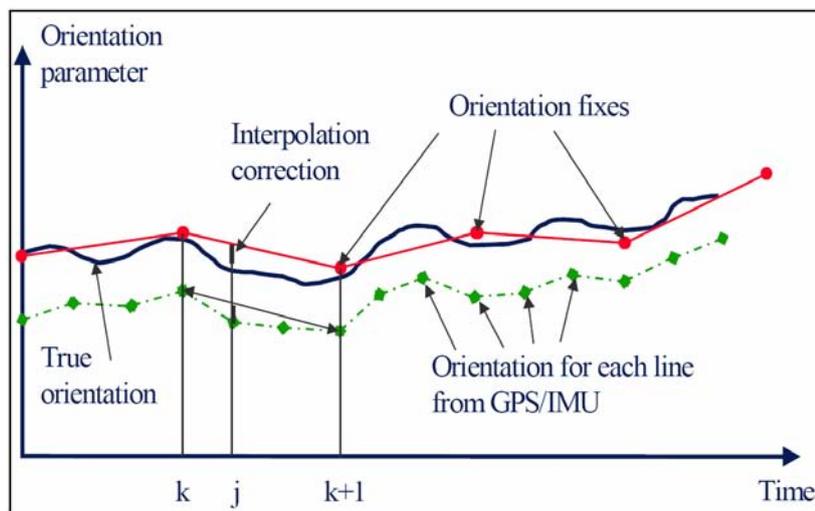


fig. 6.28 – Parametri di orientamento prima della triangolazione

Tipicamente i sensori GPS/IMU presentano uno sfalsamento sistematico rispetto alla testata del sensore. Questo sfalsamento sistematico viene calcolato e compensato attraverso parametri addizionali durante il processo di auto-calibrazione della triangolazione. Dopo il *bundle adjustment* l’orientamento del GPS/IMU viene aggiornato attraverso una interpolazione a tratti a partire dagli OF.

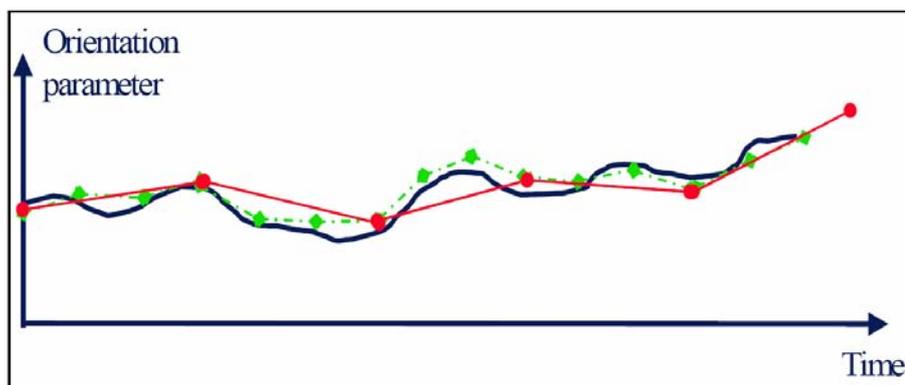


fig. 6.29 – Parametri di orientamento dopo la triangolazione

La distanza tra gli OF ha una grande influenza sulla determinabilità di tutti i parametri, quindi va fissata con cura.
 La seguente fig. 6.30 mostra un caso in cui gli OF sono stati scelti troppo distanti tra loro.

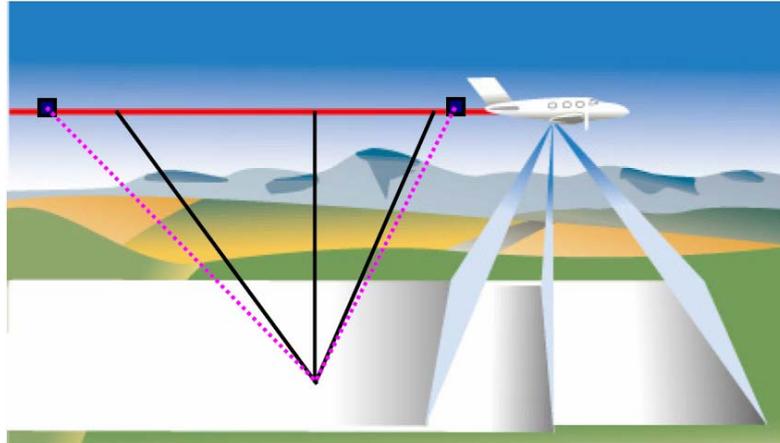


fig. 6.30 – Orientation Fixes distanti

Il sensore a vettori CCD sfalsati consente un miglioramento della risoluzione geometrica ma è necessaria l'adozione di speciali algoritmi di correzione. Le linee viola indicano l'effetto dei raggi proiettivi nella correzione. Sebbene il punto sia osservato in tre scene l'effetto geometrico è ridotto a due soli raggi proiettivi. Se gli OF fossero ancora più lontani l'effetto delle tre osservazioni potrebbe avvicinarsi ad una condizione con un solo raggio proiettivo. Questo è dovuto al modello matematico: se gli OF sono troppo distanziati la triangolazione in bundle diventa singolare.

La fig. 6.31 mostra un caso in cui gli OF sono stati posti ad una distanza media. In questo caso due osservazioni (nadir e dietro) cadono in un intervallo tra gli OF. La geometria di questa configurazione non è proprio paragonabile con una a tre raggi. Il peso delle linee viola dovrebbe indicare l'influenza di ogni raggio sulla determinazione del punto.

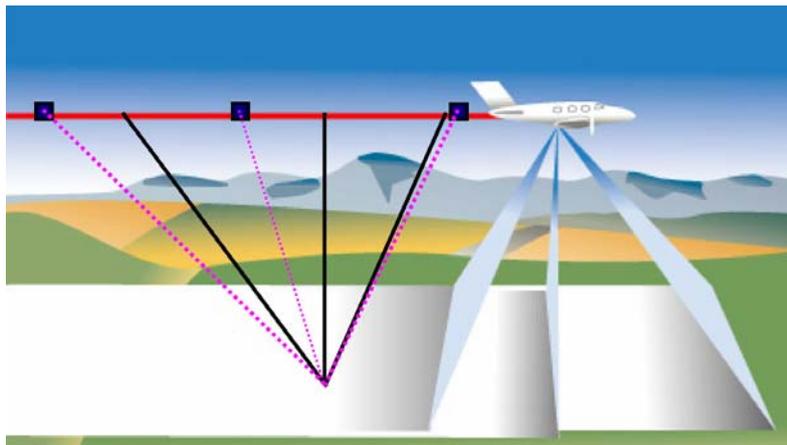


fig. 6.31 – Orientation Fixes a media distanza

La fig. 6.32 mostra un caso in cui gli OF sono stati posti ad una distanza pari alla base corta. Questa configurazione porta ad una soluzione veramente stabile. Ogni osservazione cade all'interno di una coppia separata di OF. Questa configurazione corrisponde ad una geometria proiettiva a tre raggi.

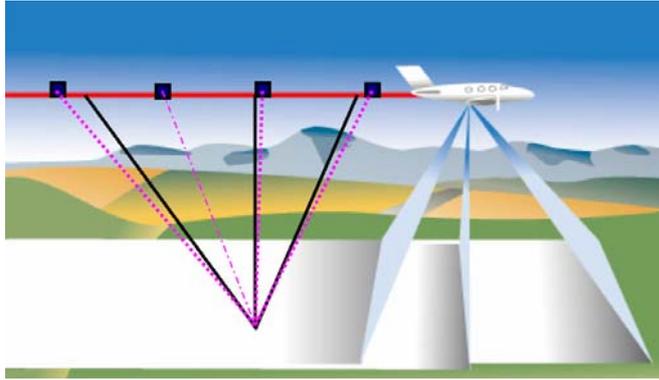


fig. 6.32 – Orientation Fixes posti ad una distanza pari alla base corta

Questo esempio mostra un caso in cui gli OF sono stati posti ad una distanza breve, inferiore alla base corta. Il modello matematico gestisce questa configurazione a condizione che siano misurati un numero sufficiente di punti di legame.

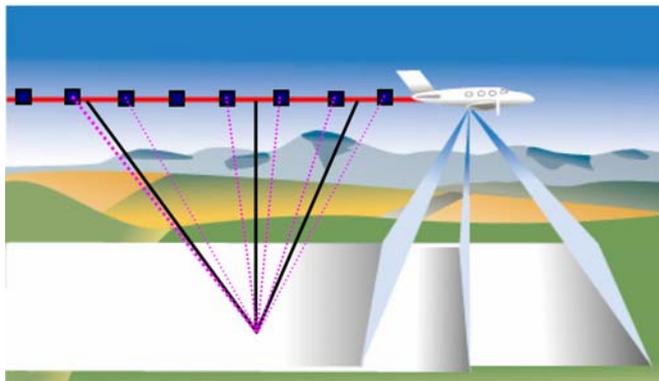


fig. 6.32 – Orientation Fixes

La distribuzione dei punti di legame dipende dall'intervallo tra gli OF. Si è visto che questa distanza non dovrebbe superare la base corta. Questo intervallo dipende pure dalla qualità del sistema giroscopico adottato. Nel caso della ADS40 le specifiche indicano un sistema giroscopico in grado di assicurare una elevata precisione per un intervallo minimo di 8 secondi. La distribuzione dei punti di legame è assolutamente simile a quella della triangolazione tradizionale.

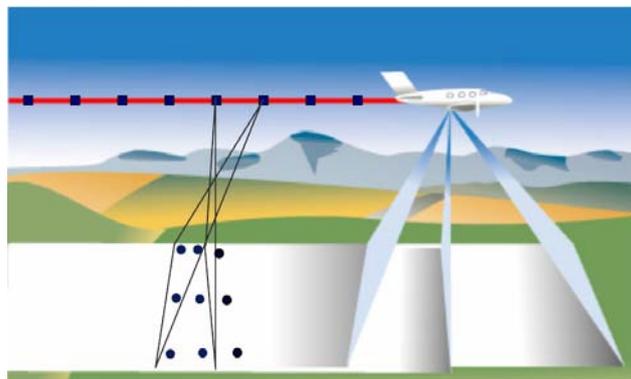


fig. 6.33 – Distribuzione dei punti di legame

Per determinare il numero minimo di punti di legame è possibile fare un bilancio tra le osservazioni e le incognite.

Consideriamo uno scenario in cui la distanza tra gli OF eguagli la base corta.:

- 4 OF * 6 parametri = 24 incognite;
- 8 TP * 3 coordinate = 24 incognite;
- 8 TP in 3 scene * 2 coordinate = 48 osservazioni (quantità note).

Questo semplice calcolo non tiene conto delle osservazioni GPS/IMU e della necessaria definizione del Datum ma mostra abbastanza bene che la domanda è assolutamente simile alle “frame” camera.

I GCP possono essere limitati al minimo indispensabile per definire il Datum. Ogni strisciata è veramente stabile grazie alla presenza delle acquisizioni GPS/INS. I GCP vanno presi sugli spigoli del blocco in modo assolutamente simile a quello di fotogrammetria tradizionale assistita dal GPS. Le funzioni di trasformazione di ORIMA trasformano le coordinate dei punti di controllo dal sistema cartografico di acquisizione al sistema locale cartesiano scelto.

Per utilizzare i valori di orientamento derivati dalle osservazioni GPS/IMU senza triangolazione deve essere nota la trasformazione di coordinate dal sistema di riferimento del GPS/IMU al sistema fotogrammetrico. Ovviamente gli assi del sistema giroscopico non possono essere perfettamente allineati agli assi del sistema fotogrammetrico. Il disallineamento restante è determinato dal *bundle adjustment*.

Il disallineamento è modellizzato dalla seguente equazione:

$$\mathbf{R}_{IMU_k} = \mathbf{R}_{Misalign} \mathbf{R}_{OriFix_k}$$

ogni matrice di rotazione può essere descritta da 4 parametri algebrici:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} d \\ a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad \text{with: } d^2 + a^2 + b^2 + c^2 = 1$$

Sono usate due matrici ortogonali 4x4:

$$\mathbf{P}_u = \begin{bmatrix} d & a & b & c \\ -a & d & c & -b \\ -b & -c & d & a \\ -c & b & -a & d \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q}_u = \begin{bmatrix} d & -a & -b & -c \\ a & d & c & -b \\ b & -c & d & a \\ c & b & -a & d \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_u^T \mathbf{P}_u = \mathbf{Q}_u^T \mathbf{Q}_u = \mathbf{I}$$

$$\mathbf{P}_u \mathbf{Q}_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & & \\ 0 & \mathbf{R} & & \\ 0 & & & \end{bmatrix}$$

con

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} d^2 + a^2 - b^2 - c^2 & 2(ab + cd) & 2(ac - bd) \\ 2(ab - cd) & d^2 - a^2 + b^2 - c^2 & 2(bc + ad) \\ 2(ac + bd) & 2(bc - ad) & d^2 - a^2 - b^2 + c^2 \end{bmatrix}$$

Dalla relazione precedente il disallineamento può essere riscritto come:

$$\mathbf{u}_{IMU_k} = \mathbf{Q}_{Misalign} \mathbf{u}_{OriFix_k}$$

i 4 parametri di rotazione (a, b, c, d) non sono tra loro indipendenti. Con il processo di *adjustment* vengono stimati solo 3 parametri di rotazione linearmente indipendenti. Dopo questo processo i parametri di rotazione vengono aggiornati ai convenzionali angoli (ω, φ, κ) Per maggiori informazioni sui parametri algebrici di rotazione ci si può riferire a Pope (1970) e Hinsken (1990).

Di solito lo sfalsamento tra il centro dell'antenna GPS e il centro di proiezione è rilevato con sufficiente accuratezza. Attraverso il post-processing GPS/IMU le coordinate dell'antenna GPS vengono ridotte al centro di proiezione. D'altro canto è possibile stimare il vettore di sfalsamento attraverso il *bundle adjustment*. Questo sfalsamento è computato per ogni OF dal seguente modello matematico:

$$\begin{bmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{bmatrix}_k^{Ground} = \begin{bmatrix} X_{OriFix} \\ Y_{OriFix} \\ Z_{OriFix} \end{bmatrix}_k^{Ground} + \mathbf{R}_{Sensor OriFix_k}^{Ground} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{Offset}^{Sensor}$$

Per risolvere la dipendenza lineare tra l'offset e i parametri degli OF, il blocco deve avere strisciate con diversi angoli kappa, preferibilmente con differenze di 180°. La dipendenza lineare sull'asse z viene risolta difficilmente. Per tenere conto di una potenziale differenza di Datum tra gli OF stimati e quelli basati sul GPS, può essere utilizzato un set addizionale di parametri di trasformazione

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_k^{GPS} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_0^{GPS} + \lambda \cdot \mathbf{R}_{Ground}^{GPS} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_k^{Ground}$$

Il modello del sensore della ADS40 è stato implementato all'interno di ORIMA. Quando le scene della ADS40 sono inserite in un progetto ORIMA il tipo di sensore viene automaticamente identificato. La misura dei punti di legame viene condotta allo stesso modo dei sensori frame. L'utente può lanciare il modulo APM di Socet Set per la misura automatica dei punti di legame in modo tale da ottenere i TP necessari per il calcolo degli OF. Il processo APM richiede di definire un pattern per stabilire la distribuzione di punti di legame sulla scena. E' possibile definire anche la frequenza di ripetizione che viene calcolata in base alla lunghezza della base corta e al tipo di sistema giroscopico. E' necessario definire il pattern dei punti di legame solo per la immagine nadirale. La misura manuale di TP e GCP è possibile allo stesso modo dei sensori frame.

Il numero richiesto e la dislocazione degli OF sono calcolati automaticamente prima di lanciare il bundle adjustment. Tutte le funzioni del tool CAP-A sono disponibili nei progetti ADS40. Questo programma include la determinazione automatica di eventuali errori grossolani, stima delle componenti di varianza per i dati GPS e IMU, calcolo delle ellissi di confidenza, autocalibrazione. L'interfaccia grafica di ORIMA non è stata cambiata con l'introduzione della compatibilità con ADS40. La analisi degli errori dopo la triangolazione è condotta nello stesso modo delle frame camera. La analisi è condotta in modo altamente interattivo. I punti identificati come errori possono essere rimisurati manualmente. Alla fine di questo processo sono noti i parametri d'orientamento di ogni linea CCD delle immagini e queste sono pronte per la visione stereoscopica, l'estrazione di DEM etc.

6.7 Ricerca automatica dei punti di legame (Tie Points)

I metodi per la ricerca automatica dei punti di legame possono essere raggruppati in tre classi:

- metodi di ricerca basati sull'area (*area based matching*);
- metodi di ricerca basati sulle caratteristiche (*feature based matching*);
- metodi di ricerca basati sulle relazioni (*relation based matching*).

I metodi basati sull'area sono anche chiamati metodi basati sul segnale. Questo metodo determina la corrispondenza tra due stesse aree ricadenti su due immagini sovrapposte in base alla similitudine tra i loro livelli di grigio.

I metodi *area based* utilizzano una matrice di correlazione. Questa finestra viene costruita nell'intorno di ogni pixel. Una matrice di correlazione può essere rappresentata da una finestra mobile avente lo stesso numero, sempre dispari, di pixel su righe e colonne (3 x 3, 5 x 5, 7 x 7 pixel, ecc...). Le matrici in realtà sono sempre due: una fissa su una zona della prima immagine (reference window) e l'altra mobile (template window) che valuta la similarità della zona investigata con la prima.

Il calcolo della correlazione tra le due matrici può essere condotto attraverso due diversi parametri: un indice di correlazione incrociata (cross-correlation index) e uno ai minimi quadrati. Molti degli algoritmi implementati sulle workstation di fotogrammetria prevedono la stima della correlazione attraverso entrambi i parametri. Molti di questi metodi prevedono la normalizzazione della matrice di ricerca dei candidati e di quella fissa per cui non è necessario un bilanciamento del contrasto e della luminosità prima di eseguire l'algoritmo.

I metodi fondati sulla correlazione incrociata sono più robusti perché richiedono una configurazione iniziale meno accurata; per contro la loro precisione è dell'ordine del pixel. I metodi fondati sulla correlazione ai minimi quadrati possono raggiungere precisioni nell'ordine del decimo di pixel ma richiedono una posizione iniziale "a priori" della matrice mobile con errore massimo di un paio di pixel. Nella pratica entrambi i metodi sono implementati sulle DPW (Digital Photogrammetric Workstation) e alla ricerca con correlazione incrociata si fa seguire la più precisa ricerca con correlazione ai minimi quadrati.

La correlazione incrociata calcola il coefficiente di correlazione tra i valori di livelli di grigio contenuti all'interno delle due matrici:

$$aap = \frac{\sum_{i,j} [g_1(c_1, r_1) - \bar{g}_1][g_2(c_2, r_2) - \bar{g}_2]}{\sqrt{\sum_{i,j} [g_1(c_1, r_1) - \bar{g}_1]^2 \sum_{i,j} [g_2(c_2, r_2) - \bar{g}_2]^2}}$$

with

$$\bar{g}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} g_1(c_1, r_1) \quad \bar{g}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} g_2(c_2, r_2)$$

In cui:

- ρ = the correlation coefficient
- $g(c,r)$ = the gray value of the pixel (c,r)
- c_1,r_1 = the pixel coordinates on the left image
- c_2,r_2 = the pixel coordinates on the right image
- n = the total number of pixels in the window
- i, j = pixel index into the correlation window

Quando si usa il metodo con il calcolo della correlazione incrociata è necessario che le due matrici presentino una buona posizione iniziale; questa condizione può essere realizzata se sono stati determinati a priori i parametri dell'orientamento esterno. Il metodo non funziona se il contrasto della zona che ricade all'interno delle due matrici è basso.

Il metodo di correlazione ai minimi quadrati usa il principio dei minimi quadrati per determinare la condizione sotto la quale la similarità tra le due matrici è massima. Il metodo può essere usato quando all'interno delle due matrici cadono zone che presentano differenze geometriche e radiometriche dovute, in genere, al diverso angolo di vista della camera. Il metodo di correlazione ai minimi quadrati è un metodo iterativo: i parametri calcolati nella prima iterazione vengono passati alla seconda e così via fino a quando non si raggiunge la soluzione ottimale. La ricerca basata su questo metodo è molto precisa (0.1 pixel) ma il metodo è molto sensibile alla posizione iniziale. Il metodo richiede la conoscenza a priori delle coordinate della matrice di ricerca con una accuratezza di 2 pixel o più. Quando la matrice di ricerca identifica la posizione della matrice fissa vengono calcolati una serie di parametri radiometrici (livelli di grigio) e geometrici (posizione, dimensione, forma...). Ad esempio se si suppone che il passaggio dal sistema di riferimento della matrice fissa a quello della matrice mobile possa essere rappresentato da una trasformazione affine si ha:

$$g_2(c_2, r_2) = h_0 + h_1 g_1(c_1, r_1)$$

$$c_2 = a_0 + a_1 c_1 + a_2 r_1$$

$$r_2 = b_0 + b_1 c_1 + b_2 r_1$$

Dove

c_1,r_1 = the pixel coordinate in the reference window

c_2,r_2 = the pixel coordinate in the search window

$g_1(c_1,r_1)$ = the gray value of pixel (c₁,r₁)

$g_2(c_2,r_2)$ = the gray value of pixel (c₂,r₂)

h_0, h_1 = linear gray value transformation parameters

a_0, a_1, a_2 = affine geometric transformation parameters

b_0, b_1, b_2 = affine geometric transformation parameters

L'errore per ogni pixel è dato dalla seguente relazione

$$v = (a_1 + a_2c_1 + a_3r_1)g_c + (b_1 + b_2c_1 + b_3r_1)g_r - h_1 - h_2g_1(c_1, r_1) + \Delta g$$

with $\Delta g = g_2(c_2, r_2) - g_1(c_1, r_1)$

dove

g_c e g_r rappresentano i gradienti di $g_2(c_2, r_2)$.

La maggior parte dei software implementa questi due metodi di autocorrelazione, per completezza si citano i principi su cui si basano gli altri metodi esistenti.

Il metodo *feature-based* determina la corrispondenza tra le caratteristiche di due immagini. Molte delle tecniche *feature-based* si basano sulla caratteristica “punto” piuttosto che su altre primitive come linee e oggetti complessi. Il metodo è molto performante sulle zone poco contrastate. Prima di eseguire l'algoritmo occorre estrarre le primitive dalle due immagini. Per fare ciò esistono operatori ben noti come l'operatore di Moravec e quello di Förstner. Una volta estratte le primitive geometriche gli attributi di queste sono messi a confronto. La coppia di punti identificata come quella avente le caratteristiche più simili è identificata come coppia di punti omologhi.

Il metodo *relation-based* è anche chiamato metodo di ricerca “strutturale”. Questo metodo si fonda sulla comparazione tra gli attributi delle primitive estratte e tra le relazioni tra queste. Questo metodo trova automaticamente la posizione della matrice mobile senza alcuna informazione “a priori” sulla posizione. Per contro il metodo è molto oneroso dal punto di vista dei tempi di calcolo. Questo metodo può essere applicato anche per la ricerca automatica dei punti di controllo nota che sia la posizione di questi su almeno una delle immagini.

6.8 Estrazione automatica di Modelli Digitali del Terreno (DSM)

Molti degli algoritmi esistenti per la ricerca dei punti omologhi su immagini stereoscopiche sono stati studiati per le camere *Frame*. Per le scene ADS40 è stato seguito l'approccio multi-immagine; in questo modo è possibile raggiungere una maggiore precisione grazie alla intersezione di più di due raggi omologhi. Per la estrazione di DSM vengono utilizzate sempre immagini rettificate a livello 1 per le quali le curve epipolari possono essere approssimate a delle linee. E' stato osservato che generalmente queste immagini presentano piccole differenze di scala e di rotazione in particolare nei layer piramidali più alti.

Bibliografia Calibrazione

R. Schuster, B. Braunecker - Calibration of the LH Systems ADS40 airborne digital sensor - IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam – 2000

ADS40 calibration certificate sample

www.ifp.uni-stuttgart.de/lehre/vorlesungen/BuM/ADS40-Leica.pdf

U. Tempelmann, L. Hinsken, U. Recke - ADS40 Calibration & Verification Process - Proceedings on Optical 3-D Measurement Techniques VI, Zürich, Switzerland, pp. 48-54, also published in Proceedings International Workshop on Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation 22.-23. September 2003, Castelldefels, Spain, digitally on CD-Rom

Bibliografia Triangolazione

S. Alhamlan, J. P. Mills, A. S. Walker, T. Saks - The influence of ground control points in the triangulation of leica ads40 data - International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol 34, Part B1.

L. Hinsken, S. Miller, U. Tempelmann, , R. Uebbing, S. Walker - Triangulation of LH Systems' ads40 imagery using orima GPS/IMU - IAPRS, Vol. XXXIV, Part 3A, Graz, Austria, 7 pages, digitally on CD-Rom.

U. Tempelmann, A. Börner, B. Chaplin, L. Hinsken, B. Mykhalevych, S. Miller, U. Recke, R. Reulke, R. Uebbing - Photogrammetric software for the LH Systems ADS40 airborne digital sensor - Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 33, Part B2, pp. 552-559, Amsterdam, The Netherlands.

S. Kocaman - Investigations on the triangulation accuracy of starimager imagery - ASPRS annual convention, Baltimore 2005, on CD

Bibliografia Modellistica

A. Gruen, L. Zhang - Sensor Modeling for Aerial Triangulation with Three-Line-Scanner (TLS) Imagery - Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation (PFG), (2/2003), pp. 85-98.

D. Poli - General model for airborne and spaceborne linear array sensors - Proceedings of ISPRS Commission I Symposium "Integrating Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale". Denver, CO (USA), 10-15 November 2002. Volume 34, Part B1, pp177-182.

D. Poli - Direct georeferencing of multi-line images with a general sensor model - ISPRS Workshop 'High Resolution Mapping from Space 2001'. Hanover, Germany, 19-21 September 2001. Proceedings on CD.

Bibliografia DEM

M. Pateraki, E. Baltsavias, U. Recke - Experiences on automatic image matching for dsm generation with ADS40 pushbroom sensor data – Atti del convegno internazionale ISPRS 2004, Istanbul.

B. Madhavan, K. Tachibana, T. Sasagawa, H. Okada, Y. Shimosuma - automatic extraction of shadow regions in high-resolution ADS40 images

- by robust approach of feature spaces analysis - International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, 35 (Part B3): 808-810.

CAPITOLO 7

La ricerca sulle scene ADS40

Questo capitolo descrive la ricerca condotta su scene ADS40 oggetto di questa tesi di Dottorato. A seguire verranno descritti i dati di partenza, il file system dei dati, la triangolazione delle immagini, i diversi software per il trattamento e i risultati ottenuti.

7.1 I dati della ricerca

Questa tesi di Dottorato trae spunto da una collaborazione con la Compagnia Generale Riprese Aeree di Parma che ha messo a disposizione un insieme di dati ADS40 riguardanti:

- (Blocco ADS40/01) - tre piccole strisciate L1 (PanF, Green Nadir, PanB, RGB e NIR) riguardanti l'area urbana del comune di Palermo;
- (Blocco ADS40/02) - tre piccole strisciate L1 (PanF, Green Nadir, PanB, RGB) riguardanti l'area collinare intorno alla Villa del Casale di Piazza Armerina (EN);
- (Blocco ADS40/01bis) - tre lunghe strisciate L0 e L1 (PanF, Green Nadir, PanB, RGB e NIR) ricoprenti il territorio del Comune di Palermo e di alcuni centri urbani vicini.

La ricerca è stata condotta solo sulle scene acquisite su Palermo e in massima parte sul Blocco 01 bis che rappresenta l'insieme più completo di dati vista la presenza del livello L0 e del Livello 1 senza tagli.

7.1.1 Il Blocco ADS40/01 – tre scene a livello 1

Le immagini L1 del blocco ADS40/01 sono tutte in formato *.tif e sono corredate dei seguenti file:

- *.sup – Support File di Socet Set. E' il file che contiene tutte le informazioni legate all'insieme dei diversi file che costituiscono una immagine ADS40. Nel file *.sup sono contenuti i percorsi delle immagini piramidali e del livello 0, dei file *.odf e *.odf.adj e del file di calibrazione *.cam. Inoltre il file *.sup contiene le informazioni legate al Datum e al sistema di proiezione nativo (UTM WGS84).
- *.odf – Orientation Data File. E' il file che contiene i 6 parametri di orientamento esterno per ogni linea di acquisizione. E' ottenuto a partire dai dati del sistema GPS/IMU.
- *.odf.adj – Orientation Data File Adjusted – E' un file *.odf che viene aggiornato dopo il *bundle adjustment* con ORIMA.
- *.cam – E' il file di calibrazione che contiene, per ogni canale, le coordinate di ognuno dei 12000 pixel che costituiscono l'array.

Si è detto che le immagini del Blocco 01 bis sono tre scene a livello 1. Per queste tre scene la CGR aveva già condotto, a Parma, una triangolazione aerea da cui la presenza del file *.odf.adj.

Il bundle adjustment è stato condotto sulle strisciate intere (Blocco ADS40/01bis) con tre punti di appoggio (GCP_{XYZ} in planimetria e quota) e precisamente con tre punti della rete IGM95 che ricadono nell'area ricoperta dalle scene L0. Talvolta non sono necessari dei punti di appoggio; infatti la accuratezza delle immagini ADS40 è già abbastanza buona dopo il *Direct Georeferencing*. A triangolazione avvenuta le lunghe scene del blocco ADS40/01bis sono state ritagliate sull'aerea del Comune di Palermo generando così il primo blocco di dati. I dati riassuntivi della triangolazione aerea condotta sono illustrati nella seguente tabella:

Control Points (GCP)	
RMS _X	0.066
RMS _Y	0.573
RMS _Z	0.079
Antenna Center	
RMS _X	0.075
RMS _Y	0.010
RMS _Z	0.155
Variance Comp.	
X	0.938
Y	0.655
Z	0.820
Omega	0.925
Phi	1.142
Kappa	0.827

fig. 7.1 – RMS sui tre GCP della triangolazione CGR

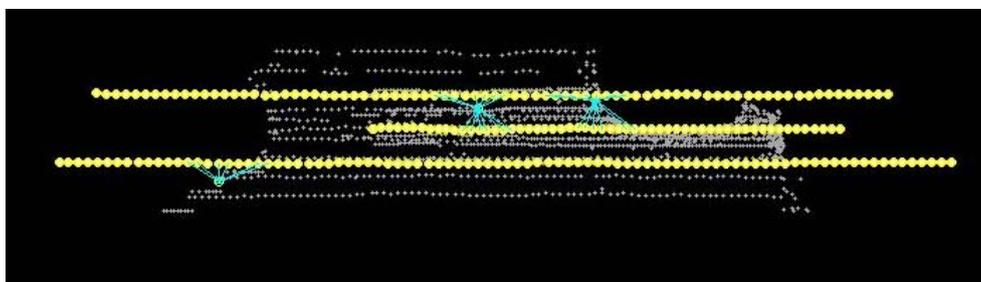


fig. 7.2 – Le tre strisciate del Blocco ADS40/01 bis nella tipica visualizzazione del software OriIma. I punti gialli identificano gli OF.

La triangolazione aerea sulle immagini L0 grezze va a creare 4 file .odf.adj, uno per ogni canale:

- 10300848GRNN00A.odf.adj (verde nadirale);
- 10300848PANB14A.odf.adj (pancromatica backward);
- 10300848PANF28A.odf.adj (pancromatica forward);
- 10300848RGBN00.odf.adj (RGB).

In questo discorso non sono coinvolte le scene infrarosse per le quali è stato fatto un *subset* differente in più immagini come illustrato nella figura 7.6.

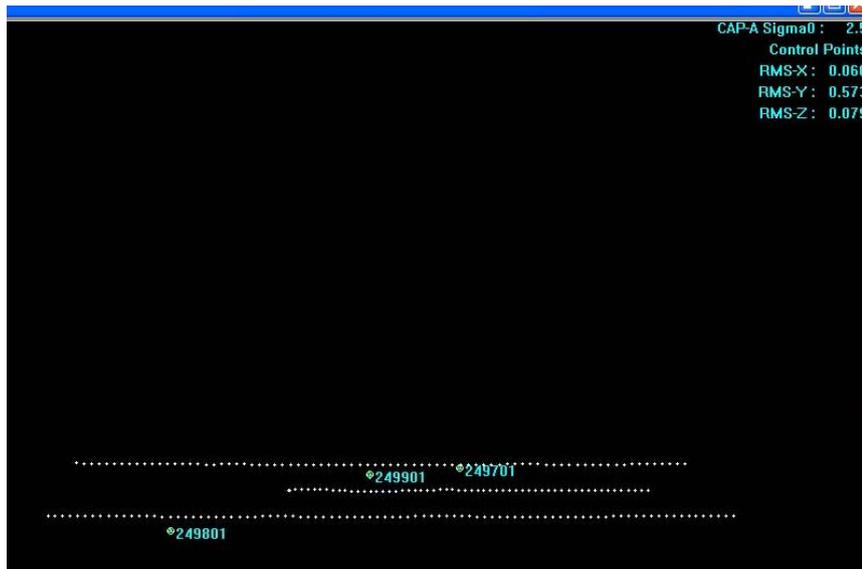


fig. 7.3 – I tre punti IGM95 utilizzati per la triangolazione aerea

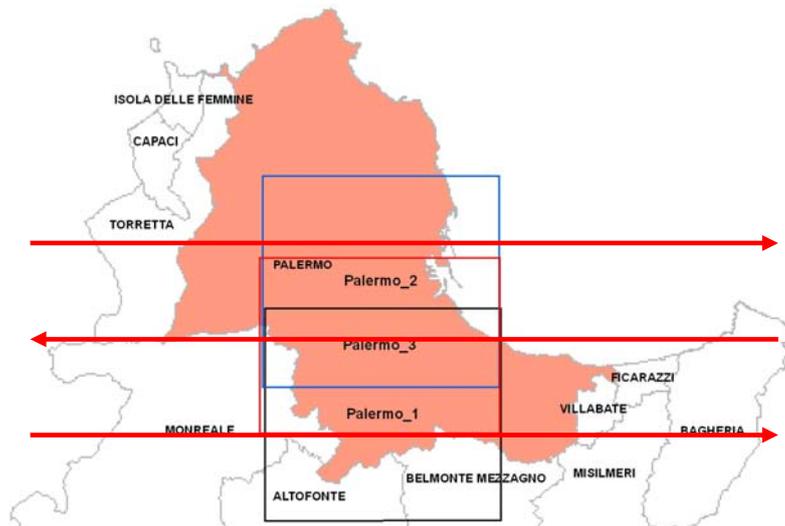


fig. 7.4 – la copertura RGB del Blocco ADS40/01 e le direzioni di volo

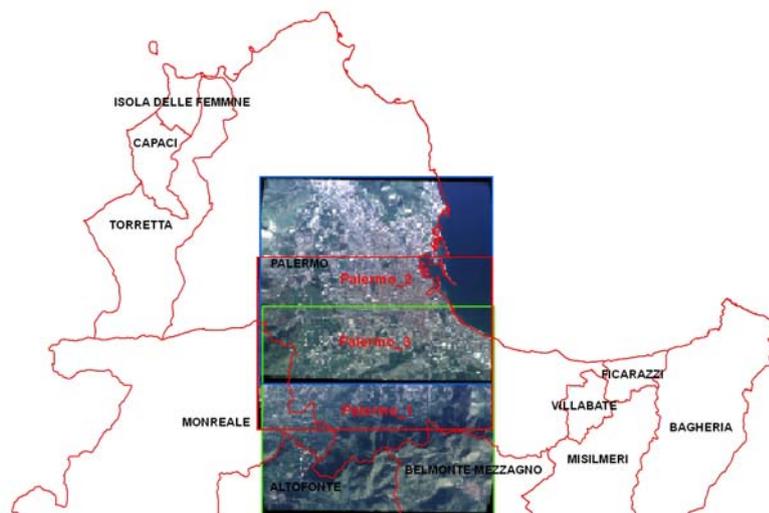


fig. 7.5– Le tre scene RGB del blocco ADS40/01

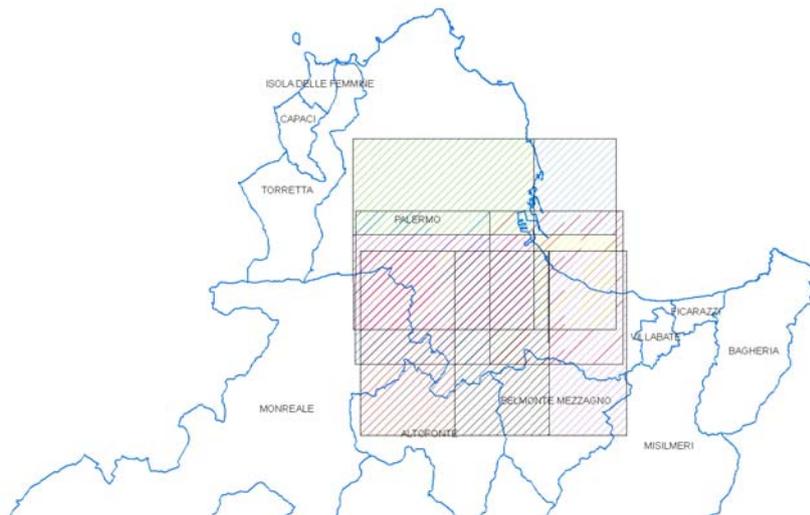


fig. 7.6 – la copertura IR del Blocco ADS40/01

Con questo insieme di dati è possibile condurre le seguenti operazioni:

- visione stereoscopica e restituzione vettoriale tridimensionale;
- generazione automatica di modelli digitali di superficie (DSM);
- produzione di ortofoto (Livello 2);
- uso del canale infrarosso (NDVI, studi sulla vegetazione, estrazione edifici, etc...).

Con il solo Blocco Ads40/01 non è invece possibile operare la triangolazione aerea per la quale è richiesta la presenza del livello 0 e del livello 1 privi di tagli.

Le tre strisciate corte del blocco (Blocco ADS40/01) su Palermo (Palermo_1, Palermo_2, Palermo_3) sono tutte a livello 1 e sono state distribuite al Dipartimento di Rappresentazione della Università di Palermo con il *file system* tipico dei progetti SOCET SET. Analizziamo brevemente la struttura di queste cartelle.

Ad esempio, la cartella Palermo_1 contiene:

- il file Palermo.info. E' il file xml, comune alle tre strisciate, generato da Socet Set contenente le informazioni relative al progetto.
- il file Palermo.prj. E' il file di progetto (.prj) di Socet Set, comune alle tre strisciate. In esso sono contenute tutte le informazioni sul progetto (directory principale del progetto), il Datum il sistema di proiezione con cui il progetto è stato generato: tipo di ellissoide (nel caso in esame WGS84), parametri geometrici dell'ellissoide (semiasse maggiore e schiacciamento o eccentricità), rappresentazione cartografica (UTM), false origini, etc...

```

<?xml version="1.0"?>
<ADS_PROJECT>

<SS_PROJECT_FILE>Z:\SICI_UNIPA\projects\PALERMO.prj</SS_PROJECT_
FILE>
  <DESCRIPTION/>
  <ANCHOR_POINT lat="0.664974725915" lon="0.232409740043"
hgt="0" abs_time="0"/>
</ADS_PROJECT>

```

fig. 7.7 – Il file *.info

```

PROJECT_FILE f
DATA_PATH Z:\SICI_UNIPA\projects\PALERMO
COORD_SYS 6
XY_UNITS 1
Z_UNITS 1
MINIMUM_X_OR_LAT 0.000000000000000e+000
MINIMUM_Y_OR_LON 0.000000000000000e+000
MINIMUM_Z 4.000000000000000e+001
MAXIMUM_X_OR_LAT 0.000000000000000e+000
MAXIMUM_Y_OR_LON 0.000000000000000e+000
MAXIMUM_Z 1.200000000000000e+002
GP_ORIGIN_Y 0.000000000000000e+000
GP_ORIGIN_X 0.000000000000000e+000
GP_ORIGIN_Z 0.000000000000000e+000
GP_SCALE_Y 1.000000000000000e+000
GP_SCALE_X 1.000000000000000e+000
GP_SCALE_Z 1.000000000000000e+000
ELLIPSOID WGS_84
VERTICAL_REFERENCE 1
A_EARTH 6.378137000000000e+006
E_EARTH 8.18191912695304e-002
ELLIPSOID_CENTER 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
0.000000000000000e+000
PROJECTION_TYPE UTM_PROJECTION
ZONE 33
FALSE_NORTHING_POS 0.000000000000000e+000
FALSE_NORTHING_NEG 0.000000000000000e+000
FALSE_EASTING_POS 5.000000000000000e+005
FALSE_EASTING_NEG 5.000000000000000e+005
GRID_NAME UTM_33N
IMAGE_LOCATION PA_L1

```

fig. 7.8 – Il file *.prj

- i file *.sup (support file, formato proprietario di Socet Set). Di questi file ne troviamo uno per ogni canale ADS40, quindi 4 file: uno per la scena forward, uno per la nadirale, uno per la scena backward e uno per la RGB. La camera ADS40 in dotazione alla GCR di Parma presenta alcune particolarità per ciò che riguarda la disposizione delle linee CCD sul piano focale. Per quanto riguarda le viste backward e forward, la camera CGR è dotata delle usuali doppie barrette pancromatiche sfalsate; le quattro bande Red, Green, Blue e Near-InfraRed sono invece acquisite in posizione rigorosamente nadirale; la conseguenza positiva di tale impostazione è che l'unica immagine a colori, che viene usata anche per la produzione di ortofoto, è esente da effetti prospettici nella direzione di volo; per contro non viene acquisita la terza immagine pancromatica, al posto della quale si usa la componente verde. Nelle scene messe a disposizione per questo studio non è presente il canale infrarosso. Il canale infrarosso è stato reso disponibile a parte come ortofoto. Se ne discuterà in seguito nel paragrafo riguardante le applicazioni di foto-interpretazione.

Ciascun file *.sup contiene tutte le informazioni sulla immagine ADS40: il percorso dei file *.ads, ads_2, ads_4, etc con l'indicazione del numero di righe e colonne di ciascun layer piramidale generato, i dati per la calibrazione radiometrica delle immagini, quota relativa di volo massima e minima, quota media del terreno, tipo di vista (Forward, Nadir o Backward), GSD del livello 0 (nel caso in esame 0.706 metri), i percorsi dei file *.odf e *.odf.adj di cui si è già discusso, il percorso del file di calibrazione geometrica *.cam, il percorso del file *.sup della immagine corrispondente a livello 0, etc...

- il file *.cam. E' il file con i dati della calibrazione radiometrica ottenuti in laboratorio. Di questo file si è già discusso in precedenza. Si ricorda che il file *.cam contiene le coordinate x e y di ogni rivelatore CCD in un prefissato sistema di riferimento.
- Il file *.odf (orientation data file). Anche di questo file è stata data una trattazion. Il file contiene i 6 parametri dell'orientamento esterno (3 di assetto e 3 di posizione) per ogni linea di scansione. Questo file è interpolato a partire dalla soluzione in tempo reale attraverso le operazioni di post-processing condotte sul software PosPac di Applanix.
- Il file *.adj (orientation file adjusted). E' analogo al precedente e dal precedente è originato a seguito della triangolazione.

La cartella IMG contiene:

- 4 immagini in formato *.tif (una per ogni scena). Ovviamente la più pesante è la immagine RGB che, rispetto ad una scena pancromatica, presenta il triplo dei canali. Inoltre sono presenti delle immagini con estensione *.tif_n (con n=2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512 e 1024) che rappresentano i vari layer piramidali della immagine.

```

ADS_CALIBRATION_FILE 1
CALIBRATION_SOURCE "ORIMA Calibration by Muzaffer Adigüzel"
CAMERA_NAME "30031"
SENSOR_LINE "PANF28A"
CALIBRATION_DATE "Mon Dec 12 11:21:04 2005"
FOCAL_LENGTH_MM 62.7000000000
NUM_PIXELS 12000
PIXEL_SIZE 0.0065000000
PAV_Z_OFFSET 0.111
RADIOMETRIC_GAIN 1.0000000000
IRRADIANCE_GAIN 1.0000000000
LEFTSIDE_GAIN 1
START_XY
35.0520474372 39.3341001347
35.0523334706 39.3278642619
35.0526405038 39.3216243892
35.0529345372 39.3153865164
35.0532395705 39.3091266440
35.0535246040 39.3028897713
.....

```

fig. 7.9 – Il file *.cam relativo alla linea CCD pancromatica *forward*

- Dei file ASCII con estensione *.ads_n (con n=2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512 e 1024) che contengono le informazioni sul numero di linee e colonne dei vari layer piramidali.

ADS_HEADER	1
BANDS	3
DEPTH	2
BITS	16
LINES	6980
SAMPLES	6922
TILE_Y	128
TILE_X	128
HARDWARE_COMPRESSED	0
LINES_PER_BLOCK	6980
SAMPLES_PER_BLOCK	6922
BLOCK_DATA	0 0 Palermo_10300848RGBN00L1_0_0.tif_2

fig. 7.10 – Il file *.ads_2 relativo al secondo layer piramidale della scena RGB della strisciata Palermo_1

7.1.2 Blocco ADS40/01b – tre strisciate a Livello L0 e a Livello L1

Dopo una prima fase di studio sui subset a L1, la collaborazione scientifica con la Compagnia Generale Riprese Aeree che ha alimentato questa Tesi di Dottorato ha portato alla richiesta delle strisciate intere a livello L0. Queste scene fanno parte di una missione che la CGR ha condotto in tutta la Sicilia nel corso della quale sono state acquisite strisciate ADS40 per una lunghezza di circa 7400 Km. Il blocco ADS40/1b è stato acquisito il 10 ottobre 2005 ed è costituito da due strisciate abbastanza lunghe (63.9 Km e 71.4 Km) e da una piccola strisciata a Nord più corta (36 Km) facenti parte del blocco B nella denominazione della CGR.

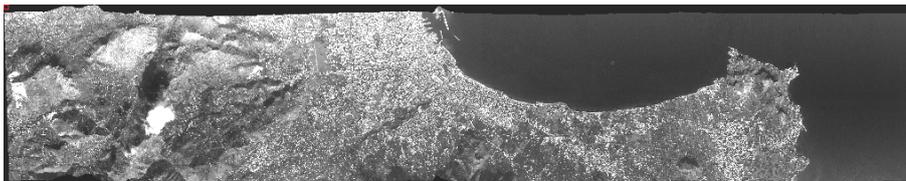


fig. 7.11 – la scena Green Nadir 10311001 a livello L1

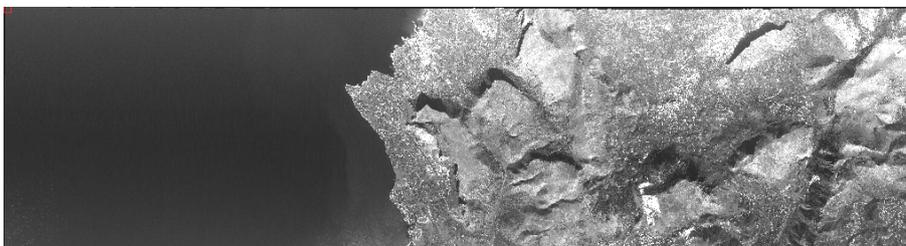


fig. 7.12 – la scena Green Nadir 10300947_00 a livello L1

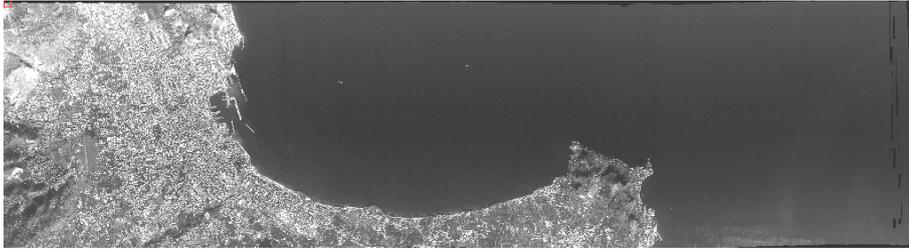


fig. 7.13 – La scena Green Nadir 10300947_01 a livello L1



fig. 7.14 – La scena Green Nadir 10300848_00 a livello L1

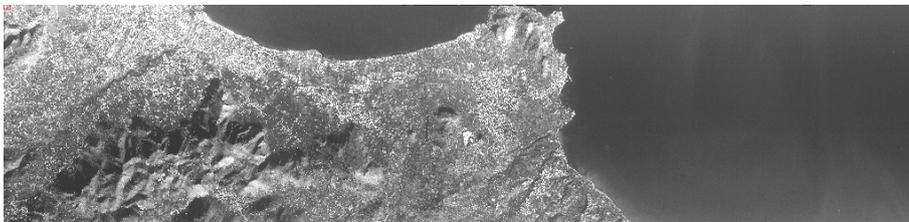


fig. 7.15 – La scena Green Nadir 10300848_01 a livello L1

Di queste immagini è disponibile tutto il set completo di dati:

- livello 0 e livello1 (da cui è possibile derivare il livello 2);
- Immagini pancromatiche;
- Immagini RGB;
- Immagini IR.

La dimensione del GSD delle immagini a livello L0 varia tra 55 cm e 68 cm in funzione di una più bassa (5500 m) o più alta (~ 7000 m) quota relativa di volo adottata dal velivolo durante la missione. Il peso informatico di ciascuna strisciata in formato grezzo si aggira attorno ai 15 Gbyte. Con questo tipo di prodotto è possibile condurre tutte le operazioni precedentemente descritte per il livello 1 con l'aggiunta del *bundle adjustment* e della generazione del livello 1 vera e propria.

```

support_file d
IMAGE_ID "Palermo_10300848PANF28AL"
IMAGE_FILE_NAME 1
"Z:\SICI_UNIPA\projects\PALERMO\img\Palermo_10300848PANF28AL1.ads"
LINES 13886
SAMPLES 13849
IMAGE_FILE_NAME 2
"Z:\SICI_UNIPA\projects\PALERMO\img\Palermo_10300848PANF28AL1.ads_
2"
LINES 6942
SAMPLES 6924
.
.
.
RECTIFICATION_TERMS
0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
1.000000000000000e+000
0.000000000000000e+000 1.000000000000000e+000
0.000000000000000e+000
GRND_BIAS 0.000000000000000e+000 0.000000000000000e+000
0.000000000000000e+000
BIAS 0.000000 GAIN 1.000000
GROUND_ZERO -2.76249725913023e+003 2.44984008911046e+003
7.99999150821313e+001
LOAD_PT -2.76249725913023e+003 2.44984008911046e+003
7.99999150821313e+001
COORD_SYSTEM 0
UNITS 1
USE_FAST_MATH 0
MAX_AND_MIN_ELEVATION 0.0 1000.0
IMAGE_MOTION 0
INITIALIZED 2
STATUS 0
PHOTO_DATE "Tue Jan 24 11:16:07 2006"
QUALITY 53
SENSOR_TYPE ADS
IMAGE_LEVEL 1
MEAN_TERRAIN_HEIGHT 80.00000
ANCHOR_LATITUDE 0.664974725900
ANCHOR_LONGITUDE 0.232409740000
LINE_STAGGERED FALSE
VIEW_OF_LINE FORWARD
RADIOMETRIC_PROPERTY PANCHROMATIC
IMAGE_DATE Thu Jan 26 10:18:03 2006
NUMBER_SCAN_LINES 211320
SENSOR_ROTATION FALSE
CORRECTION NO_CORRECTION
LEVEL_0_GSD 0.70599392
ORIGINAL_ORIENTATION
Z:\SICI_UNIPA\projects\PALERMO\odf\10300848PANF28A.odf
ADJUSTED_ORIENTATION
Z:\SICI_UNIPA\projects\PALERMO\odf\10300848PANF28A.odf.adj
ORIGINAL_CALIBRATION
Z:\SICI_UNIPA\projects\PALERMO\cam\ADS40_30031\v002\PANF28A.cam
LEVEL_0_NAME
Z:\SICI_UNIPA\projects\PALERMO\10300848PANF28AL0.sup
RECT_SCALE 1.41644279
RECT_ROTATION 0.00008026
RECT_XOFFSET -3410.00000000
RECT_YOFFSET -10910.00000000
RECT_HEIGHT 80.00000000
FOOTPRINT_LL_SAMPLE 0.00000000
FOOTPRINT_LL_LINE 0.00000000
FOOTPRINT_UR_SAMPLE 0.00000000
FOOTPRINT_UR_LINE 0.00000000
LOCAL_ORIGIN 4.89045471695461e+006 1.15750535230435e+006
3.91420614128836e+006
BASIS -2.30323142208175e-001 9.73114202015032e-001
4.81841196589120e-017 -6.00449651456724e-001 -1.42118417524832e-
001 7.86932380491320e-001 7.65775075481601e-001 1.81248738580120e-
001 6.17039243917487e-001

```

fig. 7.16 – Il file *.sup relativo alla immagine pancromatica Forward della prima strisciata Palermo_1

Di seguito si riportano le informazioni date dal tool *Image Info* di Socet Set per una di queste immagini (canale verde nadirale, livello L0, blocco CGR B, strisciata 10300848).

Le scritte in grassetto sono state aggiunte dal sottoscritto per descrivere le stringhe più importanti.

Image Path: Y:\SICL_UNIPA\images (**percorso dei *.tif**)
Image Format: ADS
Image Bits/Pixel: 16 (**risoluzione radiometrica**)
Number of Lines: 105616 (**lunghezza in pixel della strisciata**)
Number of Samples: 12000 (**larghezza dell'array CCD**)
Number of Bands: 1
Minification Level: 1:1
Support File: 10300848GRNN00AL0.sup (**nome del support file**)
Project: Palermo (**nome del progetto Socet Set**)
Image ID: 10300848GRNN00AL0.sup (**Image Id**)
1:1 Lines: 105616
1:1 Samples: 12000
1:1 pixel file: Y:\SICL_UNIPA\images\10300848GRNN00A.ads
Project Coord Sys: UTM_33N (**sistema di proiezione**)
Datum: WGS_84 (**Datum**)
Units: Meters
1:1 GSD: 0.683969 (**Risoluzione Geometrica**)
Footprint Vertex 1 : (X/Lon) 314463.83, (Y/Lat) 4220553.49
Footprint Vertex 2 : (X/Lon) 385632.25, (Y/Lat) 4219300.03
Footprint Vertex 3 : (X/Lon) 385588.75, (Y/Lat) 4210658.21
Footprint Vertex 4 : (X/Lon) 314208.95, (Y/Lat) 4211940.46
Seed Ground Pt: 350234.25 4215538.73 0.94
Image Load Pt: 350234.25 4215538.73 0.94
Photo date: Tue Jan 24 11:14:48 2006
Sensor Type: ADS40 (**modello del sensore**)
Original Orientation File: 10300848GRNN00A.odf (**Orient. Data File**)
Adjusted Orientation File: 10300848GRNN00A.odf.adj (**Orientation data File Adjusted**)
Original Calibration File: GRNN00A.cam (**file di calibrazione**)
Image Level: 0
Anchor Latitude: 0.66497473
Anchor Longitude: 0.23240974
Rectification Scale: 0
Rectification Rotation: 0
Rectification X Offset: 0
Rectification Y Offset: 0
Rectification height: 0

7.3 SOCET SET - Import dei dati

Nel corso del presente lavoro di ricerca sono stati utilizzati e messi a confronto tutti i software in grado di gestire le scene ADS40. Il set di dati precedentemente descritto presenta il tipico file system dei progetti SOCET SET e proprio con questa potente suite fotogrammetrica sono stati condotti i primi test.

SOCET SET necessita di una cartella \data all'interno della quale custodire i file di progetto *.prj.

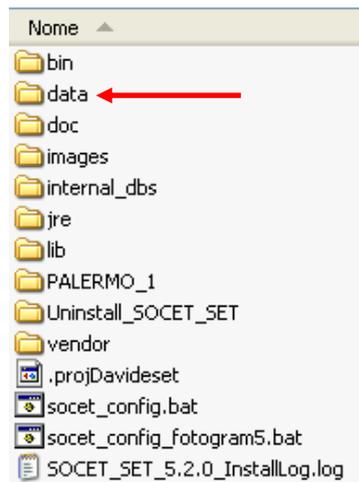


fig. 7.17 – La struttura delle cartelle di SOCET SET

Il primo passo da seguire (STEP 1) consiste nel creare un nuovo progetto ADS40 (ADS40_PRJ_1.prj).

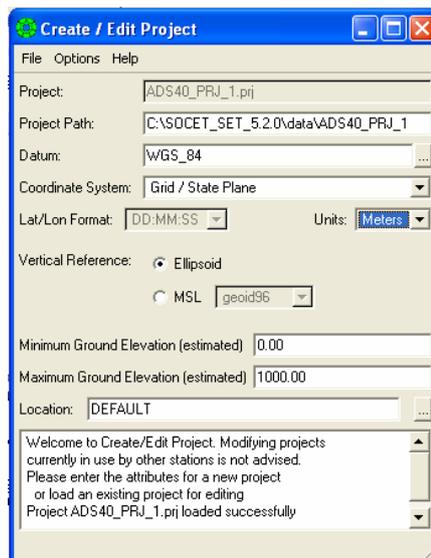


fig. 7.18 – La GUI per creare un nuovo progetto SOCET SET

In questa fase occorre imporre la cartella \data come percorso del file di progetto, scegliere un nome per il file di progetto, scegliere il Datum (WGS84) e un sistema di rappresentazione cartografica (UTM 33N), il tipo di quote (ellissoidiche), la quota massima e minima stimata. A seguito di queste operazioni SOCET crea un file ASCII con estensione *.prj che si riporta di seguito:

```

PROJECT_FILE g
DATA_PATH C:\SOCET_SET_5.2.0\data\ADS40_PRJ_1
COORD_SYS 6
XY_UNITS 1
Z_UNITS 1
MINIMUM_X_OR_LAT 0.00000000000000e+000
MINIMUM_Y_OR_LON 0.00000000000000e+000
MINIMUM_Z 0.00000000000000e+000
MAXIMUM_X_OR_LAT 0.00000000000000e+000
MAXIMUM_Y_OR_LON 0.00000000000000e+000
MAXIMUM_Z 1.00000000000000e+003
GP_ORIGIN_Y 0.00000000000000e+000
GP_ORIGIN_X 0.00000000000000e+000
GP_ORIGIN_Z 0.00000000000000e+000
GP_SCALE_Y 1.00000000000000e+000
GP_SCALE_X 1.00000000000000e+000
GP_SCALE_Z 1.00000000000000e+000
ELLIPSOID WGS_84
VERTICAL_REFERENCE 1
A_EARTH 6.37813700000000e+006
E_EARTH 8.18191908426521e-002
ELLIPSOID_CENTER 0.00000000000000e+000 0.00000000000000e+000
0.00000000000000e+000
DATUM_ROTATION 0.00000000000000e+000 0.00000000000000e+000
0.00000000000000e+000
DATUM_SCALE 1.00000000000000e+000
DATUM_USE_APPROXIMATE 0
PROJECTION_TYPE UTM_PROJECTION
ZONE 33
FALSE_NORTHING_POS 0.00000000000000e+000
FALSE_NORTHING_NEG 0.00000000000000e+000
FALSE_EASTING_POS 5.00000000000000e+005
FALSE_EASTING_NEG 5.00000000000000e+005
GRID_NAME UTM_33N
IMAGE_LOCATION DEFAULT
GEOID geoid96

```

fig. 7.19 – Il file di progetto ADS40_PRJ_1 creato per l'import delle scene ADS40

Questo file è identico in tutto a quello creato dalla CGR (Fig. 6.7) per la distribuzione delle scene ADS40. Cambiano solo i percorsi delle directory di lavoro. Fatta questa operazione SOCET riconosce il progetto creato come disponibile per l'import.



fig. 7.20 – La GUI per l'import dei progetti

A questo punto è necessario importare le immagini. SOCET provvede ad una apposita interfaccia grafica per l'importazione delle scene ADS40.

L'operazione di import si porta a termine indicando al software i *support file* (*.sup) delle scene che si desidera aggiungere al progetto, per cui prima di utilizzare la GUI per l'import dei dati occorre andare a modificare tutti i percorsi dei file *.sup che riguardano i file *.ads_n (file di info dei layer piramidali), i file *.odf e *.adj (file GPS/INS prima e dopo la triangolazione) e il file di calibrazione *.cam. In Fig. 6.11 gli elementi modificati nel file *.sup del canale verde nadirale della scena Palermo_1.

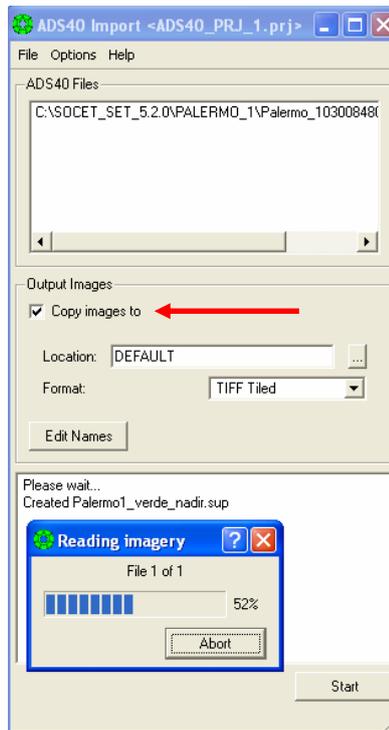


fig. 7.21 – L'import delle immagini

Una volta importate le immagini le si ritrova in copia (se si spunta il flag indicato dalla freccia rossa) nella cartella \images di SOCET SET. Riassumendo avremo:

- il file di progetto *.prj nella cartella \data;
- i support file *.sup nella cartella \data\NOME_PROGETTO;
- i file di calibrazione *.cam nella cartella \data\NOME_PROGETTO\ADS40_30031;
- le immagini in formato *.tif nella cartella C:\SOCET_SET_5.2.0\images;
- I file di orientamento *.odf e *.odf.adj nella cartella C:\SOCET_SET_5.2.0\images;

Una volta conclusa la fase di import le immagini sono rese disponibili nel *loader* di SOCET SET in cui è presente anche lo STEREO MODEL MANAGER che consente di creare le coppie da utilizzare per la visione stereoscopica (Fig. 7.22).

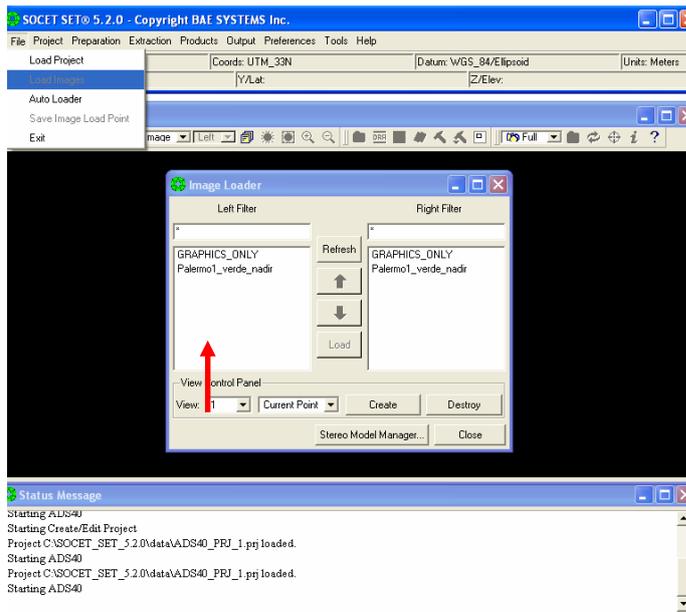


fig. 7.22 – Caricamento\ delle immagini

Vista la risoluzione radiometrica delle immagini (12 bit) per una visione distinta occorre dapprima operare uno stiramento dell'istogramma di frequenza.

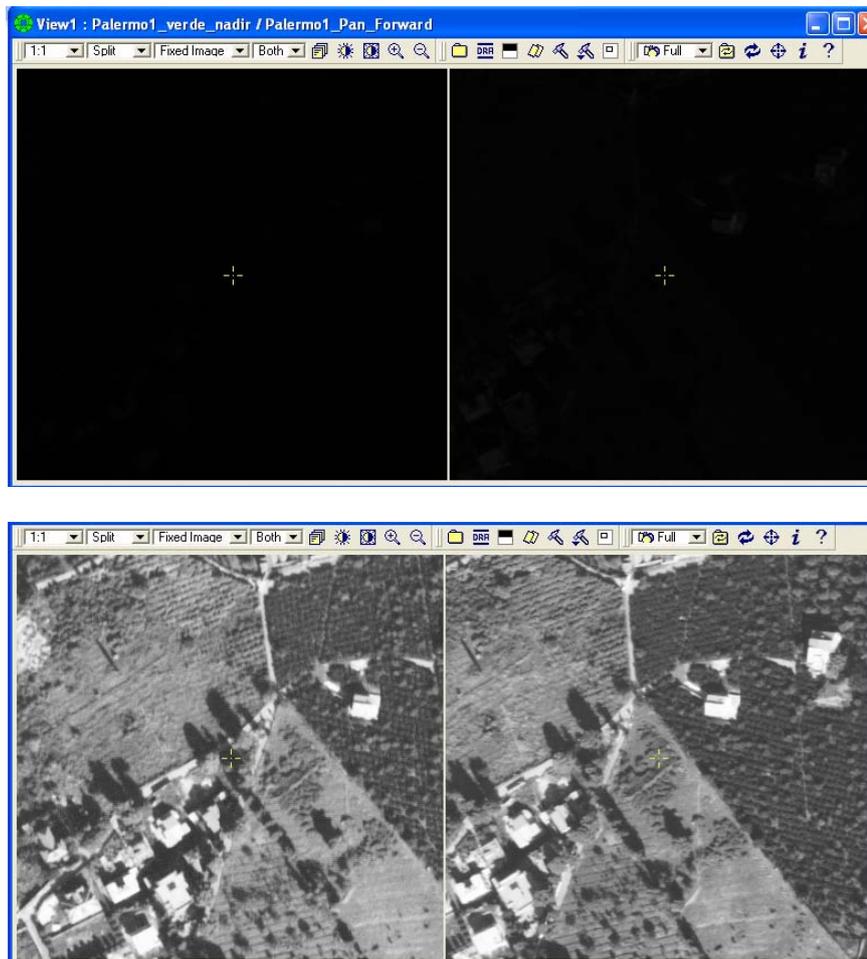


fig. 7.23 – Coppia stereoscopica prima e dopo l'equalizzazione dell'istogramma

7.4 Estrazione automatica di Modelli Digitali del Terreno

SOCET SET implementa un modulo di estrazione automatica di Modelli Digitali del Terreno (DTM). Il modulo che compie questa operazione si chiama *Automatic Terrain Extraction (ATE)* e può essere utilizzato solo quando sono disponibili coppie stereoscopiche orientate.

I metodi per calcolare le quote a partire da una coppia stereoscopica sono essenzialmente due:

- il metodo ATE adattivo;
- il metodo ATE non adattivo.

Il modulo ATE adattivo utilizza un motore inferenziale per generare una strategia di correlazione delle immagini che si adatta alla conformazione del terreno invece il modulo ATE non adattivo richiede una strategia di ricerca specifica richiesta dall'utente. Se non ci sono particolari ragioni per utilizzare una specifica strategia di ricerca bisogna usare il metodo ATE adattivo.

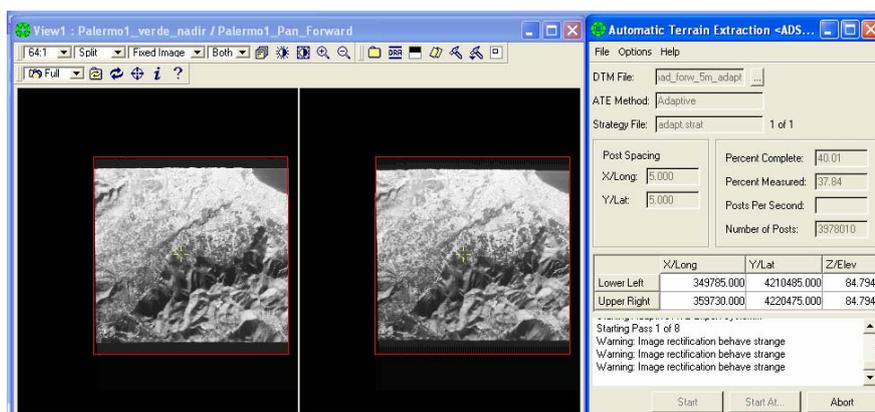


fig. 7.24 – Il modulo ATE di estrazione di DSM

Il modulo ATE non adattivo utilizza un particolare algoritmo di correlazione per estrarre le quote da una coppia stereoscopica. Il modello presenta una grande variabilità di parametri utili a migliorare la qualità del DTM ottenuto. Una data combinazione di questi parametri viene chiamata strategia; SOCET SET mette a disposizione una dozzina di strategie diverse.

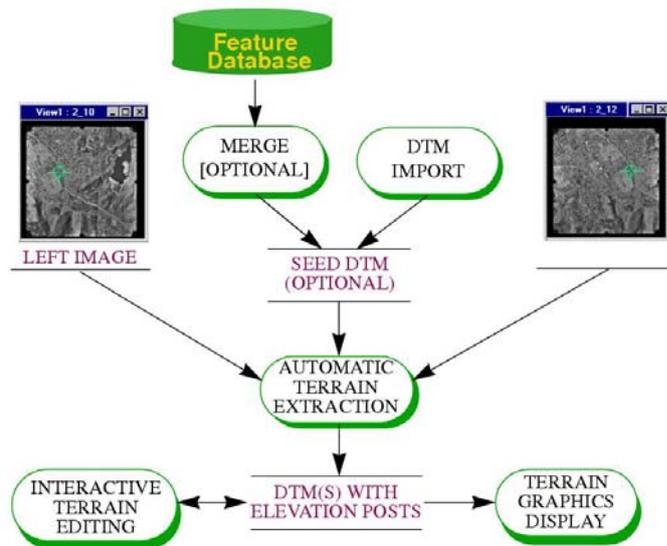


fig. 7.25 – I passi necessari prima di eseguire il modulo ATE

Il modulo ATE non dovrebbe essere utilizzato nel caso di immagini a grande scala di zone urbane perché inevitabilmente cercherebbe di modellare anche gli edifici in quanto il modulo non fa distinzione tra terreno e tetti degli edifici.

Per ciò che riguarda la precisione del modulo si può aggiungere che quando l'estrazione è completa la accuratezza del DTM estratto viene misurata in termini di errore circolare con probabilità al 90 % e di errore lineare sulla quota Z. Prima di convertire il DTM in altri formati di scambio bisogna assicurarsi che i valori di CE/LE siano accettabili.

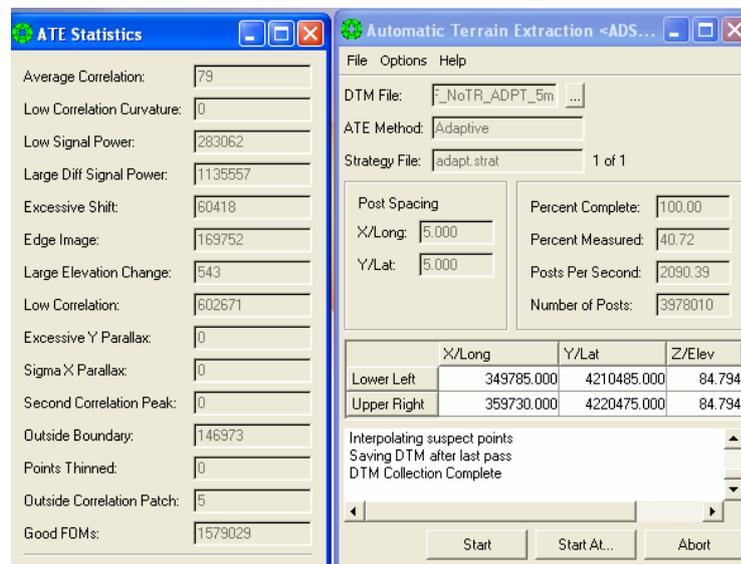


fig. 7.26 – Il modulo ATE in funzione

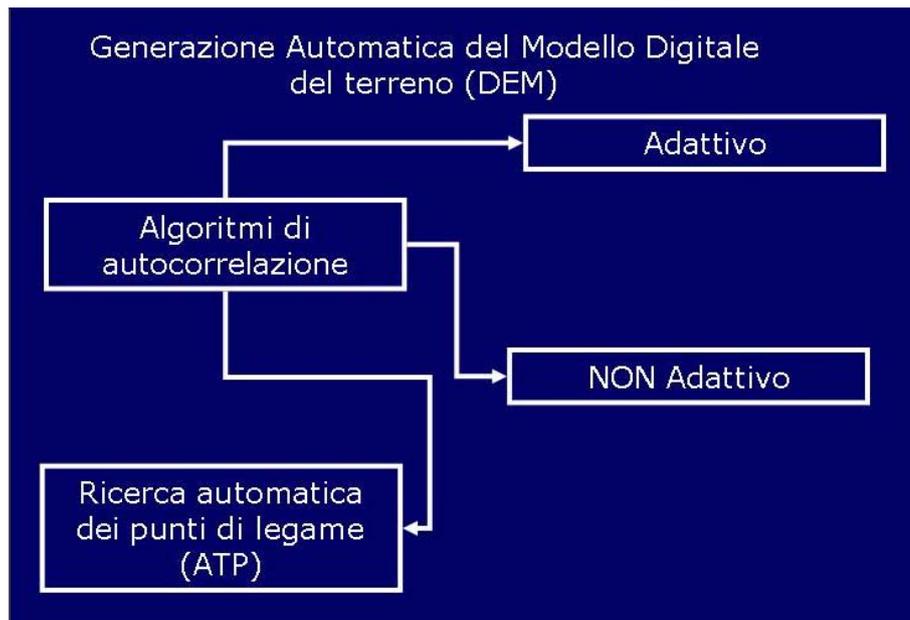


fig. 7.27 – Schema di riferimento per il modulo ATE

Dalle esperienze fatte su immagini a livello L0 ci si è fatta l'idea che la buona riuscita del modello digitale di superficie è assai variabile in funzione di una serie abbastanza ampia di variabili:

- andamento del terreno con particolare riferimento alla differenza tra zone edificate e zone non edificate. Da questo punto vista qualche problema agli algoritmi di correlazione è apportato dagli alberi ad alto fusto;
- scelta del modello stereoscopico. Per ogni scena è possibile scegliere tre modelli stereoscopici e precisamente il modello Forward/Nadir, il modello Forward/Backward e il modello Nadir/Backward. Se poi, come sempre avviene c'è pure un certo ricoprimento trasversale, allora i modelli crescono in modo esponenziale aumentando nelle zone di sovrapposizione le permutazioni possibili tra le singole bande. Per le tre scene in esame (9 immagini) i modelli stereoscopici possibili sono 27. La Leica sostiene che il modello stereoscopico più favorevole sia costituito dalla coppia nadir/Backward e dai test condotti in questo lavoro si può affermare che nella maggior parte dei casi questa affermazione risulta essere vera.
- Scelta dell'algoritmo di correlazione.

A seguito di molte prove condotte ci si è fatta l'idea che il modello *black box* in cui l'utente inserisce i dati di input (il modello stereoscopico orientato) e tira fuori un buon dato di output (un DSM senza buche e/o picchi) non è applicabile. I DSM ottenuti dalle coppie ADS40 necessitano quasi sempre di un intervento manuale "a valle" del processo di auto-correlazione necessario a correggere tutte quelle zone dove l'algoritmo di *matching* scelto non funziona. Nella figura a seguire uno dei DSM generati per auto-correlazione da un modello stereoscopico ADS40.

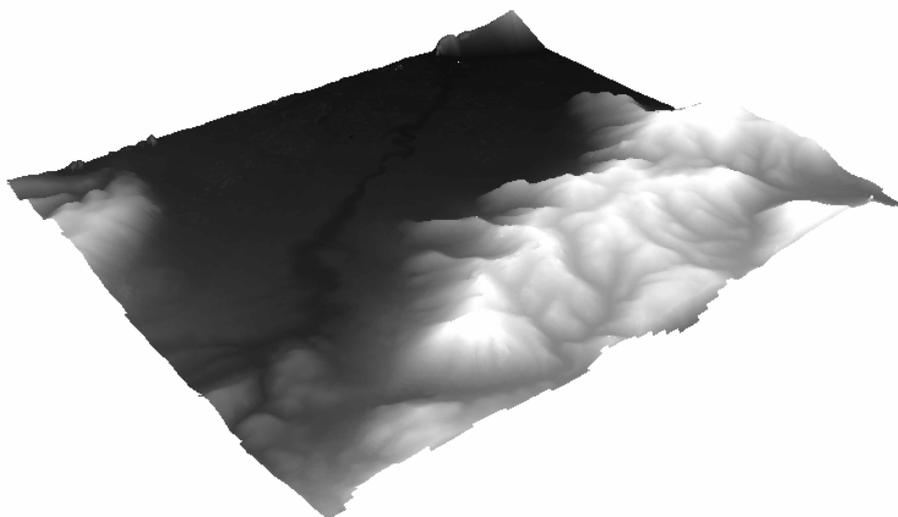


fig. 7.28 – DSM ottenuto con la coppia GreenN/PanB del Blocco Ads40/01 (subset)



fig. 7.29 – DSM ottenuto con la coppia GreenN/PanB (particolare)

Abbiamo detto che le immagini ADS40 grezze del blocco ADS40/01 presentano una risoluzione geometrica di 60 cm circa. Il DSM in figura 7.28 e 7.29 è stato generato anch'esso con un GSD di 60 cm. Come si vede nella seconda figura sono abbastanza visibili i limiti degli edifici pur essendo la risoluzione delle immagini abbastanza modesta. Questa considerazione ci fa capire che qualora si disponesse di scene ADS40 acquisite con una quota di volo piccola di $1500 \div 2000$ m (per far questo la Compagnia Aerea è costretta a cambiare velivolo e passare dal Jet utilizzato ad alta quota ad un velivolo più idoneo al volo a basse velocità) e quindi con relativo GSD di $15 \div 20$ cm (risoluzione massima ottenibile con il sensore ADS40) si potrebbe pensare di sostituire il sensore ADS40 ai laser scanner da aereo (LIDAR). Ovviamente il DSM così generato avrebbe bisogno di una dura fase di editing ma se si pensa che anche le nuvole Lidar sono abbastanza “rumorose” si può affermare che se quando ci si spinge al limite di risoluzione geometrica il sensore ADS40 diventa competitivo rispetto a certe applicazioni del LIDAR. Ovviamente il dibattito scientifico sulla vicenda è in corso.

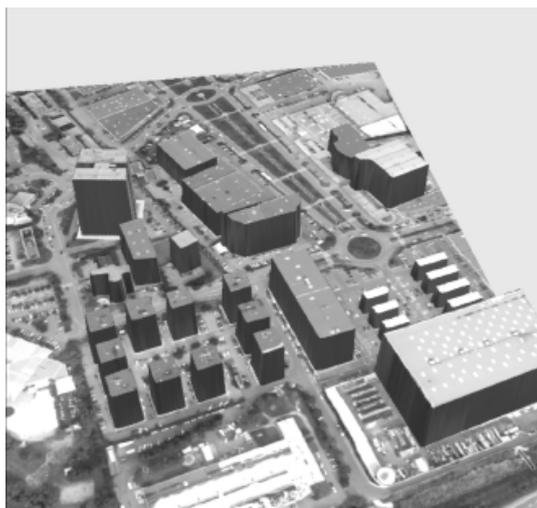


Fig. 7.30 – esempio di 3D City Models

La possibilità a cui si è accennato può rendere ancora più appetibile il sensore per tutte quelle applicazioni in cui sono coinvolti i modelli 3D delle città (con terminologia anglosassone 3DCM acronimo di 3D City Models).

7.5 Test sulla accuratezza del Blocco ADS40/01

Sulle immagini del blocco ADS40/01 non è possibile condurre una seconda triangolazione aerea. Il motivo principale per questa mancata applicazione è che non si dispone delle “corrispondenti” immagini a livello 0. Si dispone delle immagini a livello L0 e al livello1 delle strisciate intere e solo su quelle è possibile operare il *bundle adjustment*.

Come si è visto i valori di SQM sulle tre componenti X, Y e Z ottenuti dopo la prima triangolazione aerea sono mediamente inferiori al pixel (~60 cm). Ma questi valori riguardano solo i tre GCP IGM95 collimati. Poiché i Check Point (CP) non entrano nel computo dei parametri del modello matematico è possibile collimare un certo numero di CP e verificare lo SQM su questi punti.

Questo test sulle scene ADS40 a livello L1 è stato condotto all'interno della workstation fotogrammetrica Leica Photogrammetry Suite. Così come in tutti i software di fotogrammetria il primo passo da seguire consiste nel creare un nuovo progetto in cui vengono specificati:

- la directory in cui il progetto viene immagazzinato;
- il tipo di sensore (in questo caso “Mixed Sensor”);
- il Datum e la rappresentazione cartografica (WGS84 - UTM33N);
- il tipo di quote (ellissoidiche).

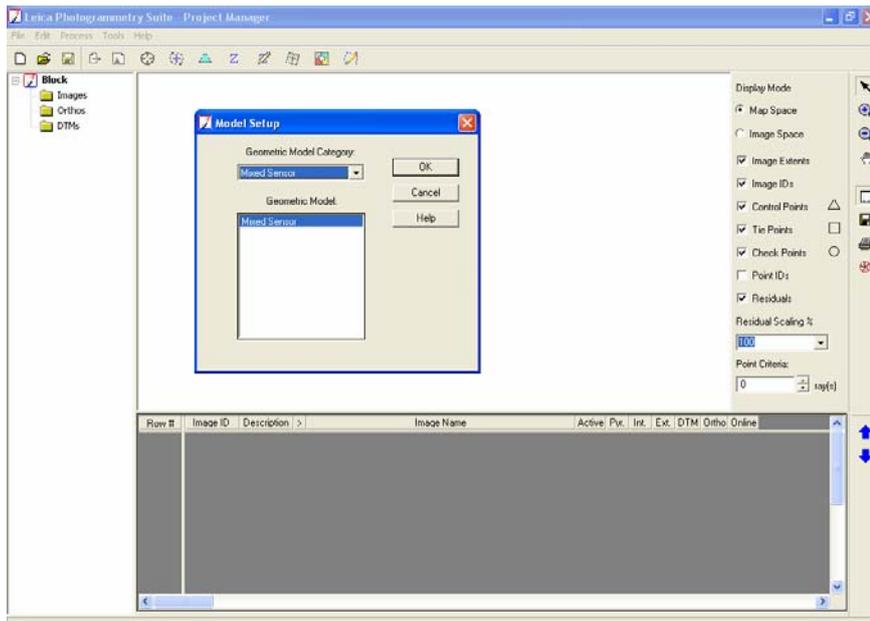


fig. 7.31 – La suite fotogrammetrica della Leica

Una volta creato il progetto occorre importare le scene ADS40 all'interno di quest'ultimo. I vari support file (*.sup) con i percorsi corretti sono riconosciuti da LPS e le relative immagini vengono importate all'interno del progetto creato. In questa prima fase sono state importate solo 3 immagini della scena palermo_1 (green nadir, pancromatica forward e pancromatica backward), la rimanente immagine RGB verrà importata a seguire quando sarà necessaria la generazione di ortofoto.

LPS va a leggere i vari file *.ads_n (per n=2,4,8,...) , di conseguenza, le scene importate presentano già computati i vari layer piramidali (freccia rossa in Fig.6.32). Inoltre LPS legge sia il file di calibrazione *.cam che i due file GPS/INS *.odf con il risultato che sia l'orientamento interno che l'orientamento esterno risultano calcolati (freccia gialla). Nello spazio cartografico le scene sono visualizzate con la rotazione imposta dall'orientamento esterno (freccia nera).

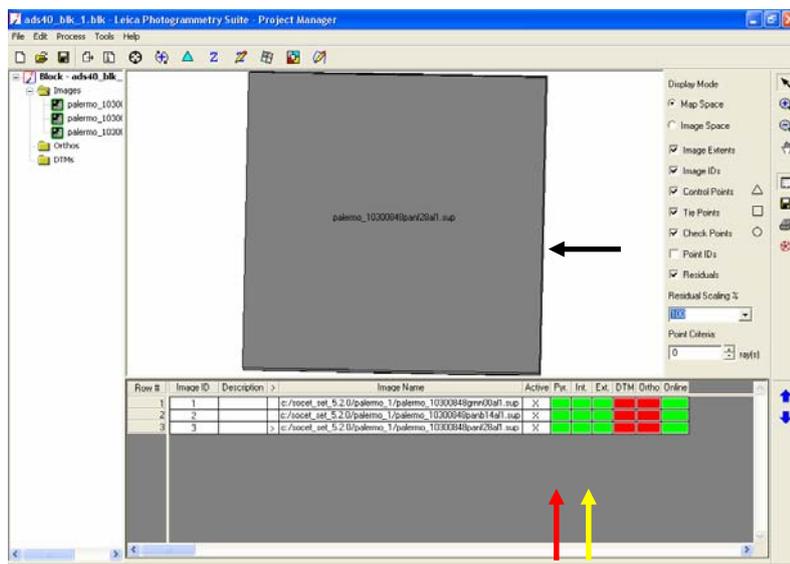


fig. 7.32 – Lo spazio cartografico di LPS

Il passo successivo all'importazione delle immagini riguarda la ricerca dei punti di legame che come è noto può essere manuale o automatizzata. L'algoritmo di ricerca dei punti omologhi è molto performante per cui è consigliabile utilizzare il modulo di ricerca automatica quando non ci siano particolari esigenze da parte dell'utente. Prima di avviare il modulo *Automatic Tie Process* è utile configurare i vari parametri che lo caratterizzano in particolare la strategia di ricerca e la distribuzione.

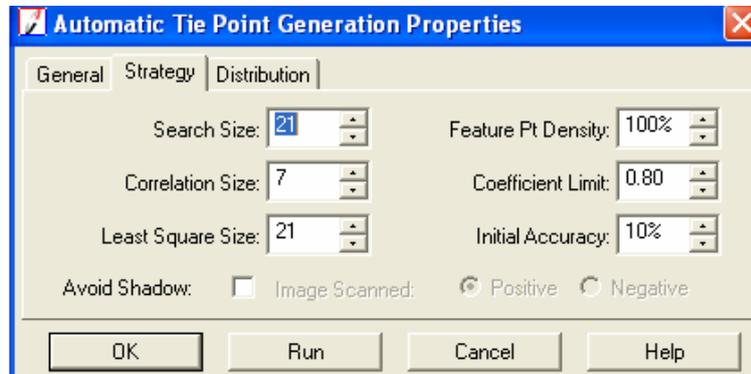


fig. 7.33 – Configurazione della strategia di ricerca

All'interno del tab “Strategia di ricerca” è possibile stabilire alcune grandezze:

- *Search Size*: la dimensione in pixel della matrice di ricerca. Il valore di default è 21 che corrisponde ad una matrice mobile di 21 x 21 pixel. Per le aree pianeggianti questo valore dovrebbe essere diminuito. Viceversa per aree con zone ripide e scoscese potrebbe essere aumentato. Aumentare la dimensione del lato della matrice di ricerca comporta un aumento del tempo di calcolo e della possibilità che vengano generati punti errati. Viceversa un lato più corto genera un numero minore di punti. Questo valore è correlato alla paralasse della immagine. LPS usa la struttura piramidale delle immagini per operare la ricerca cosicché la dimensione usata di volta in volta può essere notevolmente ridotta.
- *Correlation Size*: è la dimensione in pixel della matrice di coerenza incrociata (Cross-correlation). Il valore di default è 7x7. Valori più grandi possono generare un indice di correlazione più basso dovuto alle differenze di geometria delle due zone che ricadono all'interno delle due matrici di correlazione e di conseguenza saranno minori i punti che superano il test di correlazione. Valori più bassi fanno aumentare l'indice di correlazione ma si corre il rischio di avere un numero insufficiente di dati e quindi l'insorgere di punti errati.
- *Least Square Size*: rappresenta la dimensione in pixel del lato della matrice per il test dei minimi quadrati. La dimensione di default è 21x21. Questa andrebbe aumentata nelle zone pianeggianti e diminuita in quelle scoscese.
- *Feature Pt Density*: rappresenta la densità percentuale dei punti rispetto al pattern di ricerca interno al software.

- *Coefficient Limit*: mostra l'indice di correlazione ammesso nella correlazione incrociata. Il valore di default è 0.8. Un valore più grande porta ad un numero minore di punti accettati ma con meno errori. Per contro ad un valore minore di 0.8 consegue un numero maggiore di punti correlati ma potenzialmente con maggiori errori.
- *Initial Accuracy*: mostra la accuratezza relativa dei valori iniziali del processo di ricerca automatica.
- *Avoid Shadow*. Questa opzione non dovrebbe essere usata a meno che non si abbiano immagini con molte zone d'ombra. Se l'opzione viene spuntata la ricerca non viene eseguita nelle zone d'ombra (ad es. quelle generate dagli edifici e dalle montagne a causa della posizione solare al momento della acquisizione). Le immagini ADS40 sono spesso caratterizzate da pesanti ombreggiature dovute essenzialmente alla geometria di presa del sensore a tre linee per cui è consigliabile far uso di questa opzione.

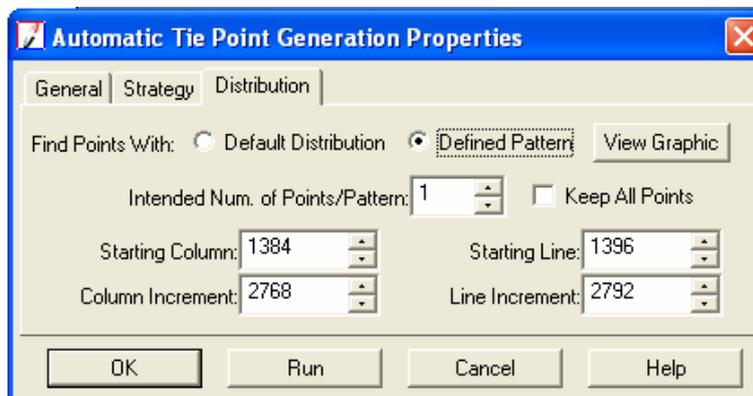


fig. 7.34 – Distribuzione di ricerca

All'interno del tab “ Distribuzione” troviamo altri parametri:

- *Find Points With*. Si possono settare due diverse configurazioni: la distribuzione di default e un pattern geometrico prestabilito. Ne primo caso i punti sono distribuiti a caso nel blocco di immagini. I punti di legame vengono acquisiti all'interno di intervalli in cui ciascuna immagine viene suddivisa (10%, 30%, 50%, 70% e 90 % in entrambe le direzioni). Questa soluzione è la migliore nel caso di fotogrammi aerei tradizionali.
- In alternativa può essere scelta una distribuzione geometrica dei punti tra una serie di pattern disponibili o configurati dall'utente. In questa condizione l'utente può scegliere l'esatta configurazione di output attesa per il punti di legame.
- *Intended Number of Points / Image (Pattern)*: è il numero di punti di legame attesi per ogni immagine. Di default è fissato a 25.

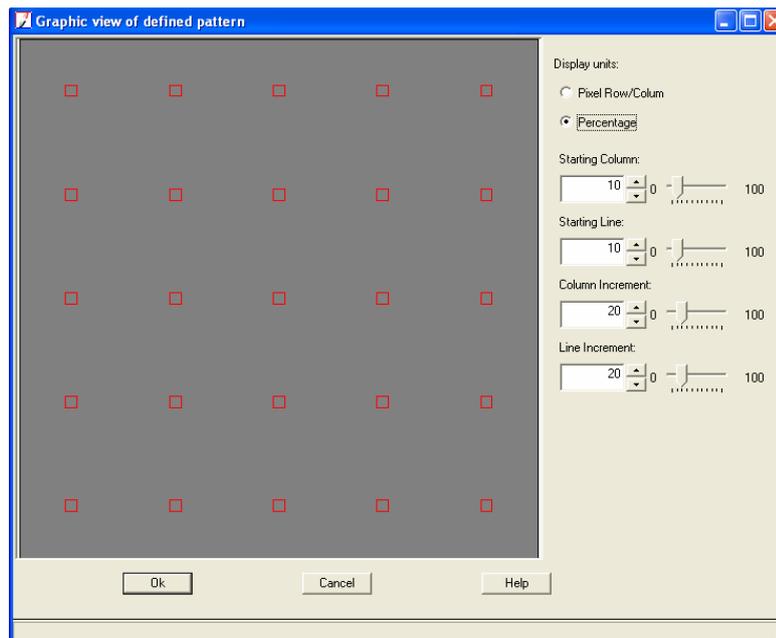


fig. 7.35 – Pattern geometrico di ricerca dei punti di legame

Per la scena Palermo_1 è stata utilizzata l'opzione *shadow* e il pattern random di ricerca. Si riporta nella seguente Fig. 6.36 il report dell'operazione.

Editor: , Dir:

File Edit View Find Help

The Autotie Summary Report

ImgID	ImgName	Numof IntendedPts	Numof PtsFound	Numof Patterns	Point SuccessRate	Pattern SuccessRate
1	palermo_10300848grnn00a11	25	25	29	100.00%	64.00%
2	palermo_10300848panb14a11	25	25	33	100.00%	68.00%
3	palermo_10300848panf28a11	25	25	25	100.00%	48.00%
Average Point Success Rate:		100.00%				
Average Pattern Success Rate:		60.00%				
Total unique tie points found:		33				

fig. 7.36 – Report del modulo *Auto Tie Point Process*

Il report precedente mostra:

- il numero sequenziale della riga;
- l'ID della immagine;
- il numero di punti attesi per ogni immagine fissato precedentemente a 25;
- il numero dei punti trovati dal software;
- il numero di pattern;
- *Point Success Rate %*: questo valore rappresenta la percentuale del numero totale di punti di legame identificati divisa per il numero atteso di punti. E' un parametro di successo della procedura. Nel caso delle tre immagini della scena Palermo_1 è risultato pari a 1.

In figura 7.37 la disposizione dei punti di legame trovati illustrata nello spazio immagine.



fig. 7.37– Punti di legame

Una volta collimati i punti di legame, manualmente e/o automaticamente, bisogna collimare manualmente i CP dopodichè è possibile operare la triangolazione aerea.

Prima di questa fase è stata condotta una veloce campagna di rilievo GPS su punti fotografici molto ben visibili sulle immagini. La campagna di rilievo ha consentito la acquisizione delle coordinate di 15 punti con GPS in modalità relativa statico/rapida (stazionamenti di 20 minuti circa). Il tempo di stazionamento fissato è più che sufficiente vista la risoluzione relativamente bassa delle scene a disposizione. Questi punti insieme ad altri acquisiti lungo tutta la strisciata integra sono stati nuovamente utilizzati per operare la triangolazione aerea del blocco ADS40/bis per capire l'influenza dei GCP sulla triangolazione. Di questo si discuterà più avanti.

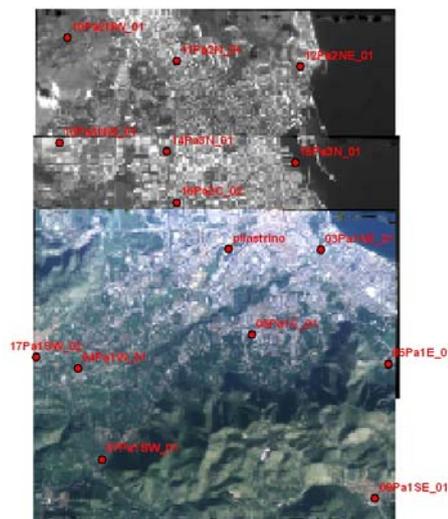


fig. 7.38– CP rilevati con GPS relativo ($\Delta T=20$ minuti)

Poichè manca il livello L0 “corrispondente” sia le coordinate dei punti che sono etichettati come Check Point (CP) sia quelle dei punti che sono etichettati come Ground Control Point (GCP) non entrano come termini noti nel modello matematico e, praticamente, sono utilizzati tutti come punti di controllo (non di appoggio) nella georeferenziazione.

Dei 15 punti GPs acquisiti solo 10 sono stati utilizzati per il controllo, si riportano a seguire i risultati ottenuti.

Control and check point residuals: meters meter				
type	pid	residual_x	residual_y	residual_z
chk	11	-0.40515239	0.15008683	0.00425829
chk	19	-0.40521446	-1.12758780	-0.69948807
chk	21	0.18028604	-0.20912429	-1.13971060
chk	22	-0.52600152	-0.02878398	2.43639017
chk	23	-0.14305474	-1.19036533	0.81471217
chk	24	-0.38626116	0.09136641	0.02702833
chk	25	-0.16976518	-1.02928533	-0.11989602
chk	26	-0.09332490	0.04531085	0.03762589
chk	27	-1.21561119	0.07454754	0.26062518
chk	29	0.08357019	1.20254406	-0.49835074

fig. 7.39– scarti sui CP

I valori di SQM sui CP sono:

- GroundX:0.48 m
- GroundY: 0.73 m pixel
- GroundZ:0.93 m

Come si vede si è ripetuto un comportamento tipico che spesso si presenta quando si usano algoritmi di correzione su immagini raster: lo scarto quadratico medio sui punti di controllo risulta sempre un più elevato rispetto a quello sui GCP. I valori ottenuti sono comunque inferiori al pixel e rendono giustizia alle potenzialità del sensore.

Da questi risultati uniti a quelli della triangolazione aerea si potrebbe concludere che la potenzialità più grande di questo sensore non è la acquisizione diretta in digitale bensì la velocità con cui si ottengono DSM e ortofoto. Fatto il volo occorre un certo intervallo di tempo per scaricare i dati, intervallo che è funzione della lunghezza delle strisciate acquisite. Ad esempio il tempo di download con interfaccia SCSI delle tre strisciate del blocco ADS40/01b è inferiore ad un’ora. Assai più sostanzioso è il tempo necessario alla conversione da livello L0 a livello L1. Per far questo Leica ha creato un sistema brevettato chiamato Condor che consiste in una *workstation* multiprocessore dedicata. Per convertire da livello L0 a livello L1 i 1100 Km delle 17 strisciate del lotto B Condor ha impiegato circa 18 ore. Altre 6 ore circa le ha consumate l’algoritmo APM di ricerca automatica dei punti e le ultime 6 ore il processo di triangolazione aerea necessario per aggiornare i dati di orientamento esterno. Aggiungiamo il tempo macchina necessario alla generazione del DSM e della ortofoto e il tempo operatore necessario (talvolta) all’editing di questo ultimo che possiamo stimare come un intervallo inferiore alle 24 ore (due giornate di lavoro per operatore). Si intuisce come sia possibile, anche attraverso il *direct georeferencing* che non richiede l’uso di

GCP, ottenere prodotti fotogrammetrici di elevata accuratezza geometrica in meno di una settimana dalla presa senza uscire dal laboratorio.

7.6 Funzioni Razionali - ENVI

Le Funzioni Polinomiali Razionali (RFM) consentono di modellare la relazione tra coordinate immagine e coordinate terreno senza tenere conto della geometria di presa del sensore.

Per questo motivo le RFM possono essere usate per una grande varietà di sensori (IKONOS, QuickBird, ADS40, ...).

Le RFM sono definite come rapporto tra funzioni polinomiali e sono caratterizzate dall'ordine delle funzioni costituenti il rapporto e dai coefficienti di queste (RPC).

Funzioni Polinomiali Razionali e RPC

$$x_{ij} = \frac{P_i^1(\varphi, \lambda, H)_j}{P_i^2(\varphi, \lambda, H)_j}$$

$$y_{ij} = \frac{P_i^3(\varphi, \lambda, H)_j}{P_i^4(\varphi, \lambda, H)_j}$$

x_{ij} e y_{ij} sono le coordinate immagine
 P_n^m sono le RF
 φ λ e H sono le coordinate oggetto

Gli RPC sono i coefficienti delle equazioni P_n^m

RPC

}

Rational Polynomial Coefficients

Rapid Positioning Capability

fig. 7.40- Struttura delle funzioni polinomiali razionali

Nell'arco di tempo impiegato per sviluppare questo lavoro di tesi è stata pubblicata la versione 4.3 del software di *image processing* ENVI prodotto dalla software house IIT-Visual Information Solutions. Questa versione implementa la possibilità di importare le immagini ADS40 e di computare gli RPC (coefficienti delle funzioni razionali) a partire dai file *.odf di orientamento. Per far questo è sufficiente creare una cartella in cui siano contenuti:

- il raster in formato *.tif;
- il support file *.sup;
- il file *.odf o *.odf.adj;
- il file di calibrazione *.cam;
- il file di header *.ads.

Se si crea una cartella senza uno di questi file ENVI apre l'immagine come una semplice matrice di punti raster cioè senza orientamenti.

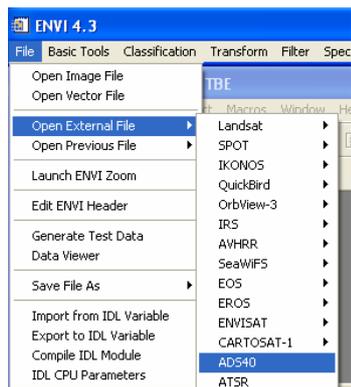


fig. 7.41 – Envi offre la possibilità di importare le immagini ADS40

Dopo aver disposto i vari file secondo la semplice struttura richiesta si possono importare le immagini ADS40 all'interno di una finestra di ENVI: se tutti i file necessari sono presenti il software computa i coefficienti delle funzioni razionali di trasformazione (RPC) e visualizza la scritta "RPC" nella stringa di proiezione. Praticamente Envi calcola automaticamente gli RPC e gestisce la scena ADS40 come immagine georiferita.

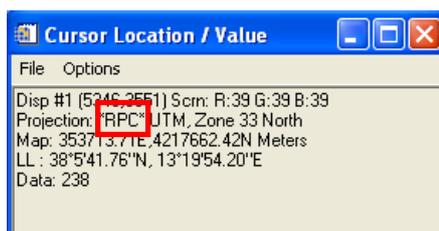


fig. 7.42 – La stringa di proiezione con gli RPC



fig. 7.43 – Il modello Black Box per le funzioni razionali

Il modello delle funzioni razionali può essere utilizzato con DSM o senza DSM oppure con l'adozione di punti di appoggio GCP o senza GCP. La applicazione che conduce alla migliore accuratezza è ovviamente quella in cui si considerano sia il DSM che un buon numero di GCP. Dai test condotti si è rilevato che il modello funziona, così come quando è applicato ad altri sensori *push-broom* (IKONOS II e QuickBird), soltanto se si collimano un elevato numero di punti. I risultati con i 15 GCP della prima campagna GPS sono stati poco soddisfacenti. E' inevitabile giudicare questo modello molto meno performante rispetto al modello matematico rigoroso poiché annulla una delle caratteristiche di base di questo sensore cioè la possibilità di ottenere ortofoto aventi una buona accuratezza geometrica in poco tempo e senza GCP.

7.7 Visione stereoscopica e vettorializzazione con Z-Map

La visione stereoscopica delle immagini ADS40 a livello 1 è stata condotta sul software Z-Map della Menci Software (<http://www.menci.com/>). La Menci Software ha messo a disposizione del dipartimento il software Z-Map corredato di trackball per la messa in quota del modello stereoscopico. Z-Map è un software in continua fase di sviluppo, al momento della stesura di questa tesi una delle caratteristiche dell'applicazione è data dalla visualizzazione stereoscopica del modello e dalla vettorializzazione in ambiente CAD abbastanza simile ad AUTOCAD e quindi molto amichevole per l'utente.

Per quanto riguarda la visione stereoscopica dei modelli, Z-Map consente la cosiddetta visione trinoculare. Come si è visto i programmi di fotogrammetria gestiscono i dati attraverso progetti. I progetti contengono tutti i dati necessari alle operazioni fotogrammetriche tipiche: le immagini raster, i GCP, i DSM e tutti gli altri dati necessari. Nella fase di visione stereoscopica delle immagini l'operatore stabilisce manualmente quali fotogrammi proiettare verso l'occhio destro e verso l'occhio sinistro. Il software mostra quali immagini sono presenti e l'operatore sceglie manualmente quali di queste veicolare ai due occhi. Durante la visione stereoscopica di aree urbane molti punti non sono visibili in stereoscopia. Poiché il sensore ADS40 acquisisce tre linee pancromatiche con angoli di vista diversi si può assumere che si possono osservare in stereoscopia un numero maggiore di punti rispetto alla restituzione tradizionale. Z-Map consente di avere subito a disposizione per la visione stereoscopica i tre modelli tipici delle scene ADS40 e cioè:

- modello 1: Forward / Nadir;
- Modello 2: Forward/ Backward;
- Modello 3: Nadir/ Backward.

La scelta della strisciata su cui si lavora non viene gestita dall'operatore ma viene operata direttamente da Z-Map in funzione della posizione del cursore.

Un'altra utile possibilità consentita da Z-Map è legata alla acquisizione con sensore a tre linee. Le tre immagini ADS40 (F,B e N) hanno una sovrapposizione longitudinale che è praticamente del 100 %. Questo significa che si può collimare ogni punto su tre fotogrammi. Il bilancio è quindi di sei equazioni contro tre incognite. La ridondanza consente di

stimare ai minimi quadrati la precisione della collimazione e quindi se vi sono errori grossolani.

7.8 Triangolazione e bundle adjustment – Influenza del numero dei GCP sulla triangolazione. Il principio di funzionamento di OriMa.

ORIMA è acronimo di Orientation Images ed è un potente software modulare basato su piattaforma Windows utilizzabile per tutti gli scopi della fotogrammetria digitale area. ORIMA consente di operare tutte le tradizionali operazioni di orientamento (interno o analitico, relativo e assoluto) ma è principalmente un sofisticato software di triangolazione. Con ORIMA è possibile gestire tutti gli aspetti legati all'orientamento di un singolo blocco o di intere strisciate multi-immagine (block triangulation).

Con ORIMA è possibile:

- misurare coordinate immagine e coordinate modello;
- calcolare i parametri di orientamento;
- individuare statisticamente errori grossolani dell'algoritmo di autocorrelazione (blunders);
- calcolare i parametri di qualità dell'orientamento.

La maggior parte delle operazioni condotte su ORIMA può essere rappresentata in forma di grafici. Così facendo è possibile una migliore interpretazione dei risultati in particolar modo quando si utilizzano modelli matematici complessi. Una alternativa alla analisi grafica dei risultati consiste nella consultazione dei report di output del software che sono forniti in formato di file di testo ASCII.

ORIMA è commercializzato in due insiemi di versioni. Le versioni analitiche usate sui restitutori e le versioni digitali da installare su una stazione di fotogrammetria digitale.

Le versioni per dispositivi analitici sono:

- ORIMA-S (S sta per Standard) è la standard
- ORIMA-B (B sta per Basic) è una versione ridotta di ORIMA-S è la suite di base necessaria per l'orientamento di modelli singoli.
- ORIMA-T (T sta per Triangulation Measurements) è il pacchetto successore di AETRI, il vecchio software della Leica per le misure di triangolazione in ambiente DOS;
- ORIMA-TB (T sta per Triangulation Measurements e B per Basic Bundle Adjustment) incorpora lo strumento CAP-A per il bundle adjustment;
- ORIMA-TE/GPS (T sta per Triangulation Measurements e E per Extended Bundle Adjustment) è la versione che offre il supporto GPS/IMU.

Lo sviluppo modulare fa sì che ORIMA-S includa tutte le funzionalità di ORIMA-B, la versione T tutte quelle della S, la versione TB tutte quelle della T e così via dicendo.

Discorso a parte va fatto per le versioni digitali una delle quali è stata usata in questa tesi (ORIMA DP-M). ORIMA-DP-S è molto simile alla versione S in quanto consente la gestione del modello attraverso misure

manuali. ORIMA-DP-T è simile a ORIMA-T in quanto consente di operare le misure di triangolazione su una Digital Photogrammetric Workstation (DPW). La versione ORIMA-DP-ADS supporta le misure per la triangolazione e il bundle adjustment solo per le scene del sensore Leica ADS40. Questa versione non supporta immagini acquisite da sensori frame. La versione più sofisticata è DP-M dove M sta per Multisensor Triangulation: questa versione supporta sia i sensori pushbroom che quelli frame.

ORIMA è basato su varie finestre e ne può visualizzare contemporaneamente più di 5. In queste finestre è possibile osservare la distribuzione di quelli che ORIMA chiama image points e terrain points (punti immagine e punti terreno). Particolare importanza hanno i Terrain Points che sono i punti misurati nella triangolazione (noi li chiameremo omologhi) e che il software visualizza su tre viste diverse (Est-Nord, Est-Quota e Nord-Quota). Queste tre viste vengono chiamate “ground views”.

La filosofia concettuale di ORIMA è analoga a quella di molti applicativi CAD e si basa sul concetto di finestra attiva: tutte le misure su ORIMA si riferiscono alla finestra attiva.

Prima di qualsiasi operazione bisogna attivare i punti su cui questa operazione va condotta. Solo dopo che un punto è stato attivato è possibile processarlo, le operazioni tipiche sono la misura, la rimisura, la disattivazione e la eliminazione. In ORIMA un ruolo fondamentale è assegnato all'uso del mouse. Al mouse sono infatti assegnate le funzioni che, nei restitutori analitici, sono assegnate ai pedali. Il mouse opera in tre diverse modalità:

- modalità modifica (*editing mode*);
- modalità misura (*measuring mode*);
- modalità interattiva (*interactive mode*).

In modalità *editing* il mouse viene utilizzato per gestire i dati di input a tutti i moduli. In modalità *measuring* il mouse assume la forma del cursore di estrazione. In modalità interattiva il mouse passa automaticamente dalla modalità di modifica a quella di misura. In modalità misura ai tre pulsanti del mouse sono assegnate diverse funzioni:

- Il pulsante destro blocca le immagini, misura le coordinate e gestisce il passaggio alle immagini successive. Corrisponde al pedale sinistro dei restitutori.
- Il pulsante sinistro sblocca le immagini e consente di saltare al punto successivo. Corrisponde al pedale destro dei restitutori.
- Il pulsante centrale lancia il modulo APM di correlazione usando la strategia di ricerca standard.

Le operazioni che è possibile condurre sul singolo punto sono:

- Misura - Nelle DPW continua ad esistere la marca mobile. La misura di un punto viene condotta facendo coincidere la marca mobile con la posizione del punto sull'immagine. Dopodichè bisogna agire sul pedale destro (nella versione digitale sul pulsante

sinistro del mouse) per far registrare ad ORIMA la posizione della marca mobile;

- Modifica – A ciascun punto è ovviamente assegnato un ID. In modalità modifica è possibile cambiare l'ID del punto, eliminare (kill) il punto, cambiare la deviazione standard dei GCP punto e disattivarli (disregard).

Prima di avviare la creazione di un nuovo progetto in ORIMA occorre definire i parametri della camera (o del sensore) nel modulo CAMEDIT. Questo strumento permette di definire il tipo di camera che si sta utilizzando. Nel caso delle tradizionali camere a pellicola viene definita la focale, la posizione delle marche fiduciali e le curve di distorsione. Nel caso di sensori *pushbroom* l'orientamento interno è definito intrinsecamente dal file *.cam che definisce la posizione dei singoli rilevatori CCD. In ORIMA occorre definire un altro file *.cam (da non confondere col primo, purtroppo l'estensione è la stessa) che contiene principalmente i dati relativi alla distanza focale calibrata e all'intervallo di tempo tra due *orientation fixes* (OF) successivi.

Questa è la schermata principale di CAMEDIT quando viene selezionato il formato ASD40. La triangolazione delle immagini ADS40 è basata sugli OF. L'intervallo di tempo tra due OF successivi è un parametro dipendente dalla qualità del sistema giroscopico utilizzato nel sensore IMU. Per il sensore ADS40 questo intervallo è stato inizialmente fissato ad 8 secondi. Questo valore è suscettibile di cambiamento con i modelli successivi e l'evoluzione dei sensori inerziali.

Alla fine del processo CAMEDIT genera un file ASCII facilmente intelligibile dall'utente finale.

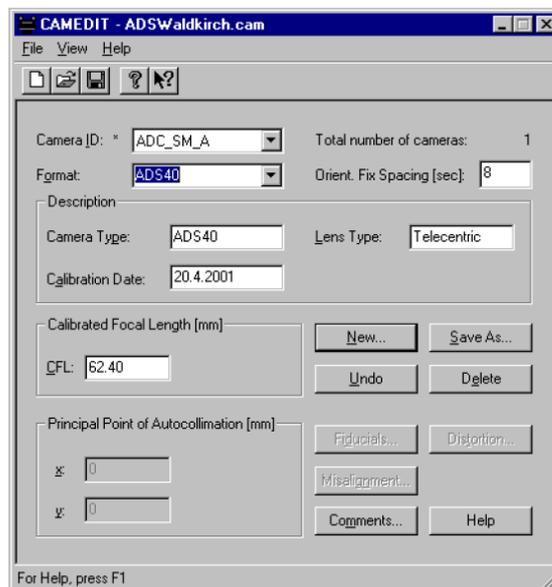


fig. 7.44 – L'interfaccia dl *tool* Camedit di OriMa

Una volta creato il progetto ORIMA ed importate al suo interno le immagini occorre definire i punti GCP che si intende andare a collimare nella successiva fase dell'orientamento esterno. ORIMA gestisce i GCP attraverso una finestra e genera un file ASCII avente estensione *.dat.

Il file *.dat immagazzina per ogni punto una stringa contenente:

- l'ID del punto [1];
- le coordinate Est, Nord e Quota [2];
- un codice di identificazione (Point Type Identification) [3];
- le deviazioni standard sulle tre coordinate [4].

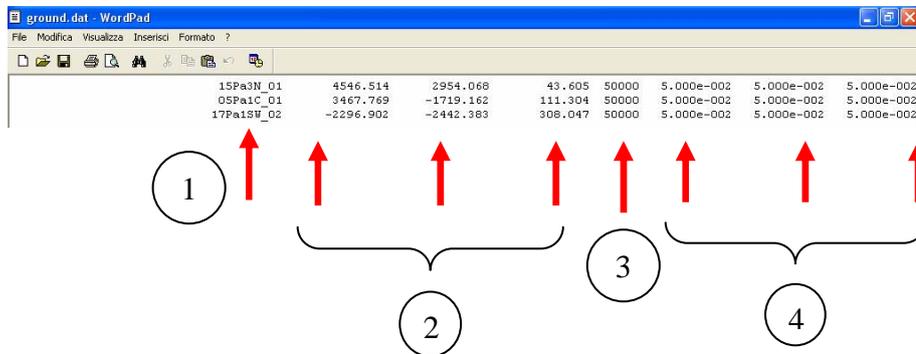


fig. 7.44 – Il file ground.dat contenente i punti di controllo

ORIMA consente di gestire vari tipi di punti di controllo:

- punti noti solo in quota (Height Control Point) in cui $E=0$, $N=0$ e $Z>0$;
- punti planimetrici (Planimetric Control Point) in cui $E>0$, $N>0$ e $Z=0$;
- punti plano-altimetrici (Full Control Point) in cui $E>0$, $N>0$ e $Z>0$.

Nel caso in studio ORIMA è stato utilizzato per la triangolazione delle tre lunghe strisciate del Blocco ADS40/01bis. Il primo passo è stato quello di definire un file *.cam per il sensore ADS40 usato per le acquisizioni delle tre strisciate. I *support file* delle tre strisciate sono stati importati all'interno della DPW Leica Photogrammetry Suite.

Il flusso di lavoro necessario per portare a termine una triangolazione di scene ADS40 è molto simile a quello utilizzato nel caso di camere frame con supporto APM. Come già detto la camera ADS40 è equipaggiata con un sensore GPS/IMU quindi per ogni scena sono disponibili i dati di orientamento.

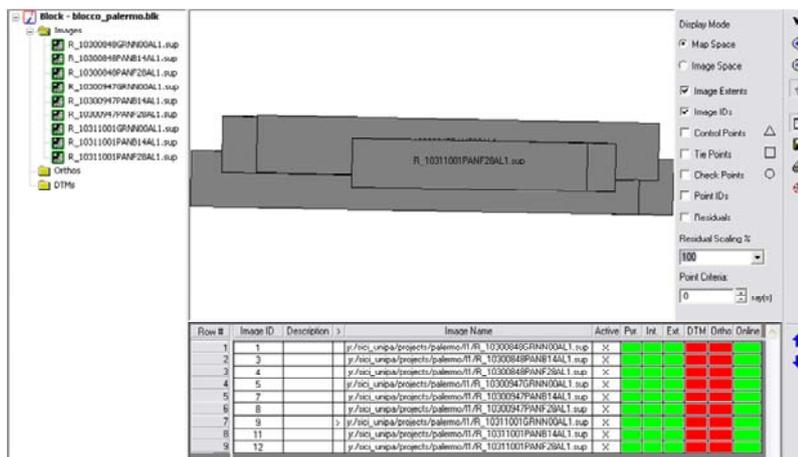


fig. 7.45 – Le scene del Blocco ADS40/01bis in LPS

Dopo l'import in LPS è possibile saltare una serie di operazioni (fig. 7.45):

- l'orientamento interno non si fa perché è definito dal file di calibrazione;
- l'orientamento esterno è già calcolato in base al file *.odf di orientamento;
- spesso le immagini vengono fornite con i layer piramidali già calcolati.

A questo punto è possibile lanciare ORIMA, programma ospitato dal programma ospite LPS. ORIMA riconosce il progetto di LPS in formato *.blk e chiede di definire l'ID dell'utente, il tipo di camera e i percorsi dei file dove verranno immagazzinati i GCP e le altre informazioni del progetto.

Fatte queste operazioni di base ORIMA lancia due finestre: una di LPS per la visualizzazione e la collimazione dei punti e la finestra principale di ORIMA in cui è possibile scegliere su quale vista (finestra attiva) operare.

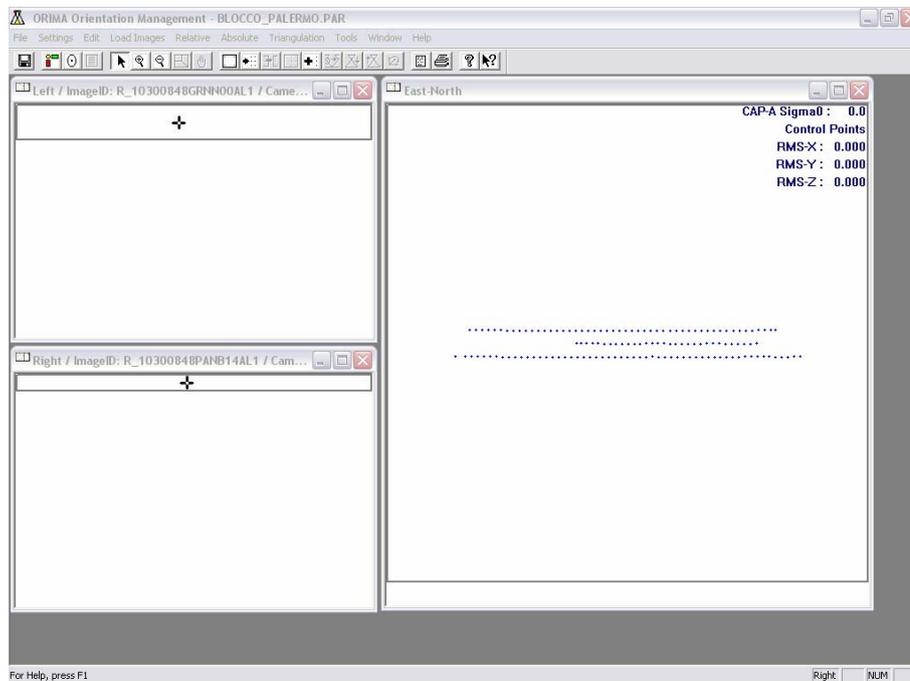


fig. 7.46 – La finestra principale di OriMa con la visualizzazione dei centri-antenna

Una volta importate le immagini all'interno di ORIMA è necessario inserire gli ID, le coordinate e le deviazioni standard dei punti di controllo. Nel caso in esame sono stati inseriti 13 GCP plano-altimetrici per valutare l'influenza del numero di GCP sulla triangolazione. Ancor prima della collimazione ORIMA li visualizza nella corretta posizione nella *ground view*.

Dopo la definizione delle coordinate plano-altimetriche dei GCP occorre operare la collimazione (misura) di questi punti. Per collimare i GCP bisogna prima selezionarli, operazione che rientra pienamente nella filosofia operativa di ORIMA. Dopo aver selezionato i punti bisogna passare dalla modalità di editing alla modalità misura: il cursore di puntamento si trasforma in cursore di estrazione. Così facendo ORIMA

registra le coordinate immagine dei GCP che compaiono nelle equazioni di collinearità (modificate per sensori *pushbroom*).

A questo punto è possibile lanciare il modulo APM (Automatic Points Matching) di ricerca automatica dei punti Terrain. Il modulo APM richiede la definizione di un pattern e di una strategia di ricerca. In OriMa sono presenti sia un pattern che una strategia adattati al sensore Leica ADS40.

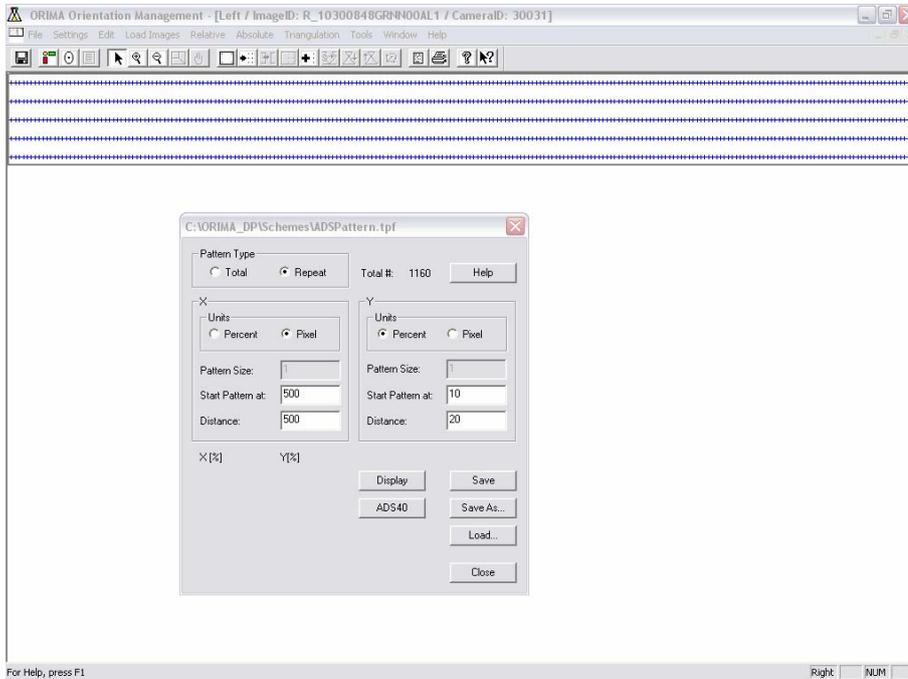


fig. 7.47 – Pattern di ricerca per ADS40 presente nel modulo APM di OriMa

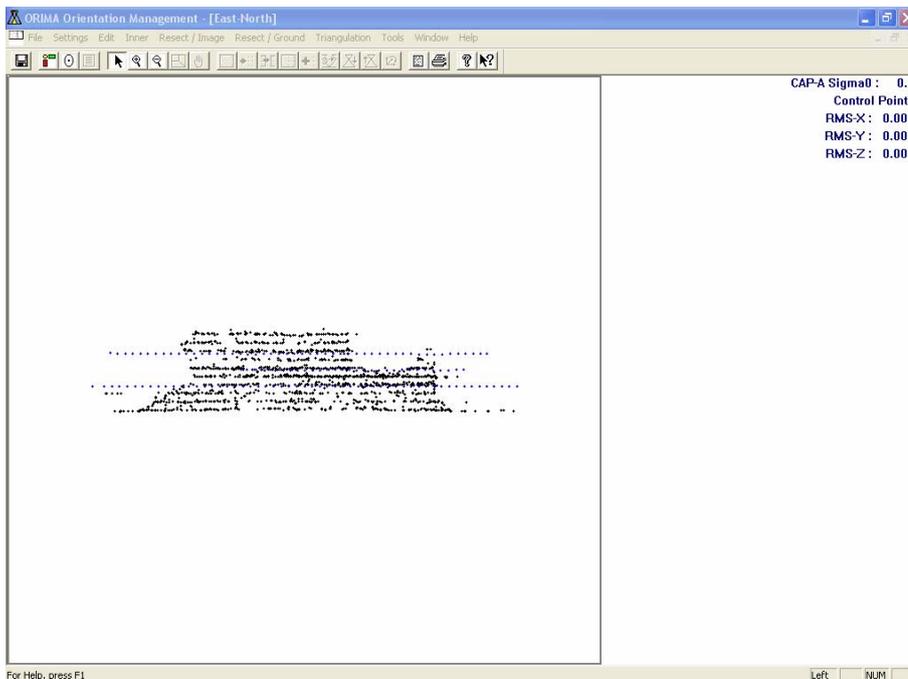


fig. 7.48 – I punti di legame individuati automaticamente

Tra i punti di legame individuati automaticamente dal modulo APM ci saranno sicuramente dei punti in cui l'algoritmo di auto-correlazione non funziona bene (*blunders*). Questi punti vanno ovviamente eliminati e OriMa ha una serie di strumenti visuali e statistici per poterlo fare.

Per valutare la accuratezza geometrica intrinseca delle immagini si è scelto di lasciare fissi 4 punti di controllo (Check Points) ben distribuiti sulle tre scene ADS40 e variare il numero di punti di appoggio (GCP) da 0 a 9. OriMa non distingue con diverse etichette i punti di controllo (CP) da quelli di appoggio (GCP); la distinzione viene operata assegnando ai primi una deviazione standard "a priori elevata". In pratica bisogna assegnare una deviazione standard "a priori" che produca una ridondanza locale il più possibile vicina alla unità.

STEP 1: 4 Check Points (CP) e nessun punto di appoggio (Direct Georeferencing)

Questa applicazione è possibile quando le scene ADS40 sono accompagnate da acquisizioni GPS/IMU molto stabili con modesti effetti dovuti alla deriva del velivolo. Nel caso in esame non sono stati ottenuti risultati soddisfacenti.

I parametri principali da assegnare prima di lanciare il motore di triangolazione sono quattro:

- lo scarto quadratico medio a priori Σ_0 . E' espresso in micron che equivalente ad esprimerlo in pixel. In questo caso si è fissato questo valore a 6 micron che corrispondono all'incirca alla dimensione reale di un pixel del sensore.
- le componenti di varianza del GPS. Nel caso di triangolazione assistita da acquisizioni GPS/IMU bisogna valutare accuratamente il peso da assegnare alle coordinate dei centri antenna. Nel caso in esame abbiamo fissato pari ad 1 le tre componenti di varianza GPS.
- Scegliere se i punti GCP definiscono o no il Datum di output. In questo caso, non essendoci GCP, non è stata attivata questa opzione.
- Scegliere se attivare il test di eliminazione automatica dei blunders. In questo caso il test è stato disabilitato e i blunders sono stati eliminati manualmente.

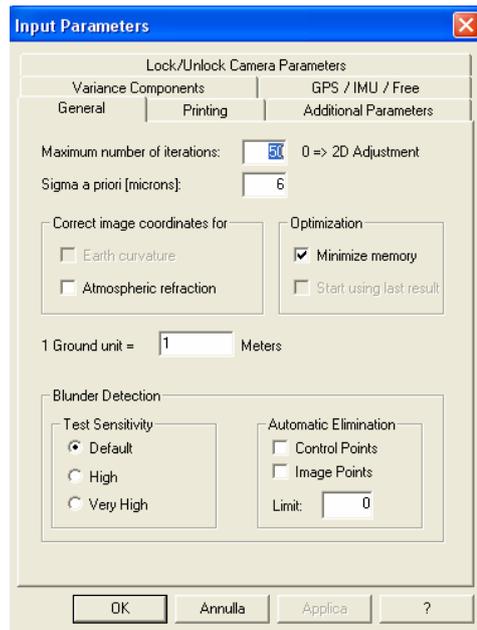


fig. 7.49 – Il modulo CAP-A di triangolazione presente all'interno di OriMa

Dopo avere eliminato manualmente i blunders legati ad errori commessi dall'algoritmo di auto-correlazione e avere collimato i 4 punti di controllo è stato lanciato il modulo di triangolazione CAP-A.

Riportiamo di seguito i residui in metri che, come è evidente, sono assolutamente incompatibili con la accuratezza richiesta al sistema.

Point ID	Control points					
	Coordinates	SD.Post	SD.Prio	Resid.	Test Redun	Int.Rel.
F 05Pa1C_01	X	3485.5480	1.6401	10.0000	17.7790	0.1 1.00 148.23
	Y	-1733.7519	1.7103	10.0000	-14.5899	-0.1 1.00 148.24
	Z	89.3546	3.9774	10.0000	-21.9494	-0.1 0.99 149.05
F 13Pa3NW_01	X	-1789.2427	1.6789	10.0000	-13.5827	-0.1 1.00 148.24
	Y	3379.7579	2.2812	10.0000	7.6719	0.1 1.00 148.39
	Z	89.3279	3.6614	10.0000	-40.2751	-0.3 0.99 148.90
F 14Pa3N_01	X	1100.0949	1.7104	10.0000	-8.8441	-0.1 1.00 148.24
	Y	3209.8325	2.1125	10.0000	9.7935	0.1 1.00 148.34
	Z	54.4139	3.7871	10.0000	-36.0561	-0.2 0.99 148.96
F 15Pa3N_01	X	4546.7215	1.7579	10.0000	0.2075	0.0 1.00 148.26
	Y	2966.3456	2.2802	10.0000	12.2776	0.1 1.00 148.39
	Z	10.5764	4.0830	10.0000	-33.0286	-0.2 0.99 149.11

Il valore di ridondanza locale vicino all'unità ci assicura che i punti non partecipano alla definizione del Datum e al risultato finale della triangolazione. Sono quindi dei Check Points. La deviazione standard a priori assegnata a questi punti è pari a 10 metri.

Come si vede dalla seguente figura 7.50 su tre dei quattro punti c'è un certo effetto sistematico dovuto alla mancanza del file *.odf.adj. In questa figura i vettori che rappresentano i residui sono moltiplicati per un fattore di esagerazione pari a 200.

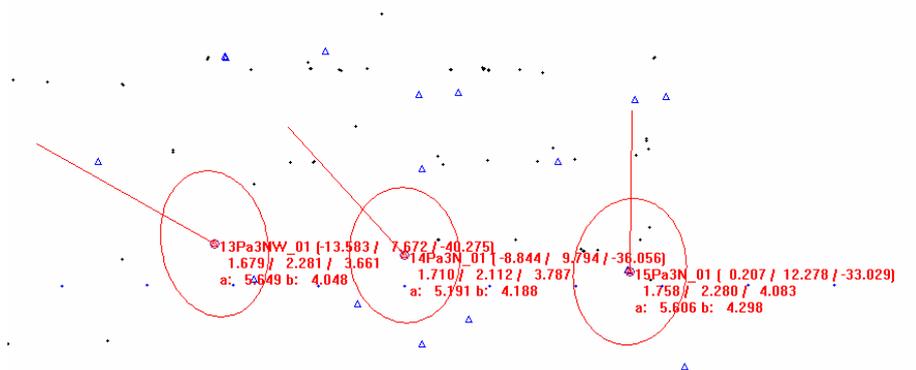


fig. 7.50 – Residui sui Check Points (senza il file *.odf.adj)

STEP 2: 4 Check Points (CP) e un solo punto di appoggio (GCP)

Lasciamo inalterati i 4 punti di controllo e aggiungiamo un solo punto di appoggio. In questo caso scegliamo di configurare come segue il motore di triangolazione CAP-A:

- Sigma0 “a priori” = 6 micron;
- componenti di varianza GPS pari a 10 per le tre direzioni. Assegnare una elevata varianza equivale ad assegnare un basso peso alle coordinate del sistema GPS/IMU e un peso elevato ai punti di appoggio.
- L’unico GCP, in posizione centrale rispetto alle tre strisciate, definisce il Datum e interviene nel modello matematico;
- la deviazione standard a priori dell’unico punto è stata fissata pari a 0.05.

In questo caso si rileva che la triangolazione converge alla 19^{ma} iterazione. I valori dello scarto quadratico medio pesato sulle coordinate dei centri antenna sono accettabili:

RMS values of weighted residuals of X,Y and Z GPS coordinates

Profile ID.	30031	0.0014	0.0014
	0.0046		

Lo stesso dicasi per i tre angoli di assetto:

RMS values of weighted residuals of Omega, Phi and Kappa attitude observations

Group ID.	30031	0.0086	0.0080
	0.0083		

Lo scarto quadratico medio “a posteriori” risulta pari a 9 micron cioè pari alla dimensione di un pixel e mezzo circa.

Riportiamo di seguito la tabella relativa ai residui.

Il quarto punto è l’unico GCP collimato: si evince anche dal fatto che è l’unico punto ad avere una deviazione standard a priori pari a 0.05. Per questo punto si hanno scarti praticamente nulli. La ridondanza locale è pari a zero poiché il punto partecipa “totalmente” nel bundle adjustment.

Sul punto di appoggio la deviazione standard a posteriori è molto vicina a quella a priori.

Gli scarti sui punti di controllo (CP) si vanno ridimensionando pur mantenendosi ancora molto elevati.

Control points Point ID	Coordinates	SD.Post	SD.Prio	Resid.	Test	Redun	Int.ReLi.
F 05Pa1C_01	X 3481.8118	3.3734	10.0000	14.0428	0.4	0.88	43.91
	Y -1713.7436	5.3089	10.0000	5.4184	0.2	0.69	49.36
	Z 120.8942	3.9393	10.0000	9.5902	0.3	0.83	45.08
F 13Pa3NW_01	X -1779.1107	4.8115	10.0000	-3.4507	-0.1	0.75	47.52
	Y 3366.0049	2.6217	10.0000	-6.0811	-0.2	0.93	42.73
	Z 128.0886	2.7397	10.0000	-1.5144	0.0	0.92	42.89
F 14Pa3N_01	X 1106.3047	0.8251	10.0000	-2.6343	-0.1	0.99	41.26
	Y 3200.9351	2.1857	10.0000	0.8961	0.0	0.95	42.21
	Z 90.3729	1.6728	10.0000	-0.0971	0.0	0.97	41.74
F 15Pa3N_01	X 4538.8397	4.7400	10.0000	-7.6743	-0.2	0.76	47.28
	Y 2961.7125	2.1517	10.0000	7.6445	0.2	0.95	42.18
	Z 52.0886	2.8153	10.0000	8.4836	0.2	0.91	43.00
F 16Pa2C_02	X 1387.7610	0.0479	0.0500	0.0000	0.0	0.00	20.55
	Y 1826.7198	0.0479	0.0500	-0.0002	-0.1	0.00	20.55
	Z 101.1056	0.0479	0.0500	-0.0004	-0.2	0.00	20.55

STEP 3: 4 Check Points (CP) e 4 punti di appoggio (GCP)

Parametri:

- componenti di varianza gps =10;
- deviazione standard a priori GCP = 5 cm;
- deviazione Standard a priori CP = 10 m;
- opzione Datum attivata;

Control points Point ID	Coordinates	SD.Post	SD.Prio	Resid.	Test	Redun	Int.ReLi.
F 03Pa1NE_01	X 5273.6878	0.0453	0.0500	-0.0042	-0.6	0.00	4.96
	Y 616.5413	0.0453	0.0500	0.0033	0.4	0.00	4.98
	Z 49.6299	0.0453	0.0500	-0.0001	0.0	0.00	12.42
F 05Pa1C_01	X 3474.3945	1.2585	10.0000	6.6255	0.2	0.98	39.27
	Y -1716.4676	0.9483	10.0000	2.6944	0.1	0.99	39.10
	Z 121.2108	2.9668	10.0000	9.9068	0.3	0.89	41.15
F 09Pa1SE_01	X 6855.8353	0.0453	0.0500	0.0043	1.5	0.00	12.83 *
	Y -6100.4068	0.0453	0.0500	0.0002	0.1	0.00	12.06
	Z 365.6647	0.0453	0.0500	0.0007	0.4	0.00	19.44
F 11Pa2N_01	X 1331.2994	0.0453	0.0500	-0.0016	-0.3	0.00	6.57
	Y 5655.3496	0.0453	0.0500	-0.0004	-0.1	0.00	6.69
	Z 83.3452	0.0453	0.0500	-0.0008	-0.3	0.00	11.67
F 13Pa3NW_01	X -1774.2935	1.7614	10.0000	1.3665	0.0	0.96	39.64
	Y 3369.4335	1.5373	10.0000	-2.6525	-0.1	0.97	39.46
	Z 127.0569	3.1323	10.0000	-2.5461	-0.1	0.88	41.44
F 14Pa3N_01	X 1108.2070	0.7718	10.0000	-0.7320	0.0	0.99	39.03
	Y 3200.3718	0.9802	10.0000	0.3328	0.0	0.99	39.11
	Z 89.0022	1.8896	10.0000	-1.4678	0.0	0.96	39.76
F 15Pa3N_01	X 4541.4177	1.0708	10.0000	-5.0963	-0.1	0.99	39.16
	Y 2953.9486	1.0636	10.0000	-0.1194	0.0	0.99	39.16
	Z 48.9972	2.4832	10.0000	5.3922	0.1	0.92	40.43
F 16Pa2C_02	X 1387.7624	0.0453	0.0500	0.0014	0.2	0.00	4.23
	Y 1826.7170	0.0453	0.0500	-0.0030	-0.3	0.00	3.97
	Z 101.1060	0.0453	0.0500	0.0000	0.0	0.00	9.83

STEP 4: 4 Check Points (CP) e 9 punti di appoggio (GCP)

Parametri:

- componenti di varianza gps =10;
- deviazione standard a priori GCP = 5 cm;
- deviazione Standard a priori CP = 10 m;
- opzione Datum attivata;

Control points

Point ID		Coordinates	SD.Post	SD.Prio	Resid.	Test	Redun	Int.Rel.
F 03Pa1NE_01	X	5273.6180	0.2827	0.0500	-0.0740	-0.3	0.04	5.94
	Y	616.4866	0.2823	0.0500	-0.0514	-0.2	0.05	5.81
	Z	49.5904	0.2879	0.0500	-0.0396	-0.4	0.01	14.11
F 04Pa1W_01	X	-1170.8206	0.2828	0.0500	0.1154	0.5	0.04	6.02
	Y	-2713.0010	0.2805	0.0500	0.0040	0.0	0.06	5.14
	Z	216.0627	0.2878	0.0500	0.0577	0.5	0.01	13.30
F 05Pa1C_01	X	3468.9367	1.3330	10.0000	1.1677	0.0	1.00	248.27
	Y	-1718.0962	1.1969	10.0000	1.0658	0.0	1.00	248.25
	Z	113.6440	3.5876	10.0000	2.3400	0.0	1.00	248.68
F 07Pa1SW_01	X	-479.7354	0.2863	0.0500	0.2576	1.5	0.02	9.01 *
	Y	-5169.0367	0.2849	0.0500	0.0653	0.3	0.03	7.39
	Z	314.7933	0.2881	0.0500	-0.0707	-0.7	0.01	15.29
F 09Pa1SE_01	X	6855.9329	0.2880	0.0500	0.1019	1.0	0.01	14.54
	Y	-6100.5795	0.2872	0.0500	-0.1725	-1.2	0.01	10.93 *
	Z	365.7719	0.2884	0.0500	0.1079	1.4	0.00	19.39 *
F 10Pa2NW_01	X	-1621.5204	0.2874	0.0500	-0.0474	-0.4	0.01	11.65
	Y	6237.1380	0.2857	0.0500	0.2110	1.1	0.02	8.15 *
	Z	296.9958	0.2877	0.0500	0.1228	1.0	0.01	12.88 *
F 11Pa2N_01	X	1331.2856	0.2850	0.0500	-0.0154	-0.1	0.03	7.45
	Y	5655.4611	0.2831	0.0500	0.1111	0.4	0.04	6.19
	Z	83.3883	0.2874	0.0500	0.0423	0.3	0.01	11.58
F 12Pa2NE_01	X	4632.5031	0.2863	0.0500	-0.2269	-1.3	0.02	9.10 *
	Y	5569.6806	0.2845	0.0500	-0.2484	-1.1	0.03	7.03 *
	Z	57.9179	0.2877	0.0500	-0.1341	-1.1	0.01	12.88 *
F 13Pa3NW_01	X	-1783.0649	1.2780	10.0000	-7.4049	0.0	1.00	248.26
	Y	3379.6468	1.3668	10.0000	7.5608	0.0	1.00	248.27
	Z	111.2740	2.6884	10.0000	-18.3290	-0.1	1.00	248.47
F 14Pa3N_01	X	1107.6467	0.9604	10.0000	-1.2923	0.0	1.00	248.24
	Y	3203.0930	1.2093	10.0000	3.0540	0.0	1.00	248.26
	Z	85.5310	2.3484	10.0000	-4.9390	0.0	1.00	248.41
F 15Pa3N_01	X	4544.9618	1.2147	10.0000	-1.5522	0.0	1.00	248.26
	Y	2955.9855	1.2441	10.0000	1.9175	0.0	1.00	248.26
	Z	42.1069	3.0369	10.0000	-1.4981	0.0	1.00	248.54
F 16Pa2C_02	X	1387.5068	0.2785	0.0500	-0.2542	-0.8	0.07	4.64
	Y	1826.8462	0.2778	0.0500	0.1262	0.4	0.08	4.50
	Z	101.0218	0.2874	0.0500	-0.0842	-0.6	0.01	11.65
F 17Pa1SW_02	X	-2296.7587	0.2817	0.0500	0.1433	0.5	0.05	5.56
	Y	-2442.4276	0.2809	0.0500	-0.0456	-0.2	0.06	5.26
	Z	308.0455	0.2875	0.0500	-0.0015	0.0	0.01	12.14

Tolto un punto i residui sui CP più grandi sono nell'ordine di un paio di metri cioè di 3 pixel.

STEP 5: 13 GCP e nessun CP

Parametri:

- componenti di varianza gps =10;
- deviazione standard a priori GCP = 5 cm;
- deviazione Standard a priori CP = 10 m;
- opzione Datum attivata;

Control points

Point ID	Coordinates	SD.Post	SD.Prio	Resid.	Test	Redun	Int.Rel.	
F 03Pa1NE_01	X	5273.6428	0.2940	0.0500	-0.0492	-0.2	0.06	5.42
	Y	616.3805	0.2923	0.0500	-0.1575	-0.5	0.07	4.98
	Z	49.5809	0.3012	0.0500	-0.0491	-0.4	0.01	12.51
F 04Pa1W_01	X	-1170.7833	0.2963	0.0500	0.1527	0.6	0.04	6.28
	Y	-2713.0095	0.2934	0.0500	-0.0045	0.0	0.06	5.26
	Z	216.0747	0.3014	0.0500	0.0697	0.6	0.01	13.54
F 05Pa1C_01	X	3467.8405	0.2954	0.0500	0.0715	0.2	0.05	5.91
	Y	-1719.1778	0.2927	0.0500	-0.0158	0.0	0.07	5.07
	Z	111.3279	0.3017	0.0500	0.0239	0.2	0.01	14.99
F 07Pa1SW_01	X	-479.7466	0.2998	0.0500	0.2464	1.4	0.02	9.29 *
	Y	-5169.0300	0.2983	0.0500	0.0720	0.3	0.03	7.55
	Z	314.7866	0.3018	0.0500	-0.0774	-0.7	0.01	15.50
F 09Pa1SE_01	X	6855.9243	0.3014	0.0500	0.0933	0.7	0.01	13.40
	Y	-6100.5728	0.3006	0.0500	-0.1658	-1.1	0.01	10.75 *
	Z	365.7694	0.3021	0.0500	0.1054	1.2	0.00	19.20 *
F 10Pa2NW_01	X	-1621.3812	0.3000	0.0500	0.0918	0.5	0.02	9.47
	Y	6237.0495	0.2980	0.0500	0.1225	0.5	0.03	7.29
	Z	297.0178	0.3011	0.0500	0.1448	1.0	0.01	12.11 *
F 11Pa2H_01	X	1331.2843	0.2978	0.0500	-0.0167	-0.1	0.03	7.19
	Y	5655.4271	0.2961	0.0500	0.0771	0.3	0.04	6.22
	Z	83.3795	0.3010	0.0500	0.0335	0.2	0.01	11.70
F 12Pa2NE_01	X	4632.5401	0.2994	0.0500	-0.1899	-1.0	0.02	8.62
	Y	5569.6597	0.2973	0.0500	-0.2693	-1.1	0.04	6.83 *
	Z	57.9235	0.3013	0.0500	-0.1285	-1.0	0.01	12.83
F 13Pa3NW_01	X	-1775.9423	0.2949	0.0500	-0.2823	-1.0	0.05	5.72
	Y	3372.1879	0.2918	0.0500	0.1019	0.3	0.07	4.86
	Z	129.4469	0.2998	0.0500	-0.1561	-0.8	0.02	9.15
F 14Pa3H_01	X	1108.8418	0.2894	0.0500	-0.0972	-0.3	0.09	4.41
	Y	3200.1644	0.2886	0.0500	0.1254	0.3	0.09	4.30
	Z	90.4659	0.2988	0.0500	-0.0041	0.0	0.03	8.01
F 15Pa3H_01	X	4546.4175	0.2931	0.0500	-0.0965	-0.3	0.06	5.18
	Y	2954.1552	0.2911	0.0500	0.0872	0.2	0.08	4.72
	Z	43.6139	0.3006	0.0500	0.0089	0.1	0.01	10.70
F 16Pa2C_02	X	1387.6185	0.2874	0.0500	-0.1425	-0.3	0.10	4.13
	Y	1826.7642	0.2869	0.0500	0.0442	0.1	0.10	4.06
	Z	101.1012	0.2999	0.0500	-0.0048	0.0	0.02	9.42
F 17Pa1SW_02	X	-2296.6833	0.2946	0.0500	0.2187	0.7	0.05	5.62
	Y	-2442.3994	0.2937	0.0500	-0.0174	-0.1	0.06	5.33
	Z	308.0809	0.3011	0.0500	0.0339	0.2	0.01	12.17

La deviazione standard a posteriori mostra con quale accuratezza il punto può essere determinato per triangolazione fotogrammetrica. In questo caso risulta nell'ordine dei 30 cm. Questo valore, superiore alla deviazione standard a priori, mostra che le collimazioni dei punti hanno influito sul *bundle adjustment*. Ma mostra anche che i pesi non sono stati assegnati correttamente. Basta aumentare lo scarto quadratico medio a priori σ_0 per riportare le due colonne all'uguaglianza.

I valori dei residui sui CP rimangono alti a causa del sistematismo a cui si è fatto cenno e che è stato corretto dal *bundle adjustment*.

Si stima complessivamente che già tre punti potrebbero risultare sufficienti per una corretta triangolazione. Per assurdo se si avessero buone scene di partenza si potrebbe optare per la triangolazione senza punti di appoggio assistita dai dati GPS/IMU. In questo caso è sempre buona abitudine collimare una serie di punti di controllo per verificare la geometria del blocco. Il giusto numero di punti da collimare si mantiene sempre al di sotto della decina ed è variabile da caso a caso essendo la triangolazione fortemente influenzata dalla acquisizione iniziale e dalla morfologia delle superfici rilevate.

7.9 File di report di CAP-A

Si analizza di seguito la struttura di un tipico file di report generato da CAP-A.

In Courier New 8 saranno riportate le stringhe del report e in Garamond 12 le descrizioni e i commenti.

```
*** CAP Combined Adjustment Program *** Rel. 7.50 (C) L. Hinsken  
1988-2006
```

indicazioni sulla Release, sull'Autore, sul Copyright

```
Start of execution : 2007- 1- 6 17: 6:35
```

data e ora dell'esecuzione di CAP-A

```
Job          control          parameters          from          file:  
C:\050107_ADS40_TRIANGULATION\050107_tria\cap.prj
```

questo file contiene una serie di nomi di file di input, output ed alcuni parametri numerici.

```
Printout file:C:\050107_ADS40_TRIANGULATION\050107_tria\printout.0
```

è il file di report generale che stiamo analizzando

```
File with ADC images file list:  
C:\050107_ADS40_TRIANGULATION\050107_tria\adcimages.lst
```

questo file contiene i file *.mea contenenti le misure di GCP eseguite nelle varie immagini

```
File with object coordinates:  
C:\050107_ADS40_TRIANGULATION\050107_tria\object.cap
```

Il file object.cap contiene tutti le coordinate oggetto dei punti del progetto: sia dei GCP che dei Terrain Points.

```
File with accuracy table:  
C:\050107_ADS40_TRIANGULATION\050107_tria\accuracy.tab
```

Il file accuracy.tab contiene la tabella delle accuratze in funzione della deviazione standard. OriMa gestisce i punti in funzione della loro deviazione standard e li classifica in punti liberi, fissi e vincolati.

```
File with additional observations:  
C:\050107_ADS40_TRIANGULATION\050107_tria\addition.cap
```

Le osservazioni fotogrammetriche sono le coordinate immagine. Questo file contiene informazioni addizionali che non rientrano nella anzidetta categoria.

```
File with camera parameters:  
C:\050107_ADS40_TRIANGULATION\050107_tria\camera.cap
```

Il file camera.cap contiene i dati della camera.

Maximum number of iterations: 50

Massimo numero di iterazioni fissato per CAP-A. Se il progetto è ben strutturato la triangolazione converge con un numero minore di 50 iterazioni.

Sigma0 a priori: 0.0030

La Sigma0 è un parametro particolarmente importante in quanto riflette tutti gli errori rimanenti nelle osservazioni. Nei sistemi digitali è influenzata da una abbondante serie di fattori (dimensione del pixel, qualità della pellicola, qualità dello scanner, qualità dei punti di controllo, tipo di superficie rilevata, algoritmo di auto-correlazione, qualità della camera, capacità di compensazione di effetti sistematici...). Sigma0 riflette essenzialmente gli errori presenti nelle coordinate immagine. Per potere effettuare una significativa interpretazione di Sigma0 è necessario che la maggior parte delle coordinate immagine abbiano peso pari ad 1. Il valore indicato dalla stringa in esame è la Sigma0 “a priori” cioè quella che si attende a triangolazione avvenuta. Il valore è espresso in micron. Se si considera che il sensore ADS40 ha una dimensione del pixel di 6.5 micron si intuisce che la Sigma0 “a priori” è stata fissata a circa mezzo pixel.

Blunder elimination limit: 0

Quando in CAP-A è attivata la eliminazione automatica degli errori grossolani (blunders) bisogna scegliere la sensibilità con cui questi verranno soppressi. Il valore 0 è il più restrittivo. La sensibilità nella individuazione di blunders è fortemente influenzata da Sigma0. Al crescere di Sigma0 decresce questa sensibilità.

Probability of error type I: 5.0 %

L'individuazione automatica dei blunders viene operata attraverso un confronto tra due valori: un valore di test calcolato e un valore di soglia fissato da una funzione di distribuzione. CAP-A adotta un blunder test che ha bisogno di una funzione τ per calcolare il valore di soglia. In sintesi questo valore di soglia dipende da due parametri: la ridondanza totale e la probabilità di errore tipo 1 (indicata in questa stringa). Questo secondo parametro indica la probabilità che il punto identificato non sia un punto errato. La sensibilità del test cresce al crescere di questo parametro. Aumentare questo parametro equivale a considerare il rischio di considerare come blunders punti che non sono errati.

Units for angles: (gon)

Sistema di misura dei tre angoli di assetto. In questo caso sono stati scelti gli angoli nel sistema centesimale ma è possibile scegliere il sistema analitico (radianti).

Scale ground units to meter: 1.0000

Fattore di scala tra le unità terreno e i metri. Nel caso in esame le coordinate dei GCP sono state fornite direttamente in metri quindi il fattore di scala è ovviamente pari ad 1.

Output file for adjusted object:
c:\050107_ads40 TRIANGULATION\050107_tria\adjobj.0

E' il file che contiene le coordinate dei punti che hanno subito variazioni a seguito della triangolazione.

Output file for orientation par.:
C:\050107_ADS40_TRIANGULATION\050107_tria\adjext.0

E' il file dei parametri dell'orientamento esterno. Contiene le coordinate dei centri di proiezione e i relativi angoli di assetto.

Output file for camera parameters:
C:\050107_ADS40_TRIANGULATION\050107_tria\adjcam.0

E' il file che contiene i parametri della camera dopo la triangolazione.

Codes	Standard Deviation
0	0.0030
1	0.0150
2	0.0500
3	0.1000
4	0.2000
5	0.5000
6	1.0000
7	5.0000
8	10.0000
9	99.9900

L'area del report già discussa è la "protocol area".

A valle di questa troviamo la lista dei codici. Questa tabella mostra i codici che si possono assegnare ai punti immagine e la relativa deviazione standard a priori espressa in mm.

Number of Control Points	:	10
Number of Terrain Points	:	333
Number of Images	:	137
Number of Cameras	:	1
Number of GPS Profiles	:	1
Number of IMU Groups	:	1
Number of Add. Observations	:	858

Dopo che CAP-A ha letto tutti i file di input genera un piccolo riassunto. I punti di tipo Full, Planimetric e High sono considerati tutti insieme come Control Points. Questi punti vengono usati per definire il Datum da adottare per la triangolazione. Il numero di punti di legame è calcolato a partire dal numero di osservazioni sulle immagini. Ogni punto di legame ricade su almeno due immagini.

Connections between Points - Images - Geod.Obs.

```

Point ID : 03Pa1NE_01
Image ID : 195382290.18060
Image ID : 195382298.18170
Image ID : 195382306.17870
Image ID : 195382266.18130
Image ID : 195382274.18250
Image ID : 195385906.54670
Image ID : 195385914.54600
Image ID : 195385922.54520
Image ID : 195385882.54480
Image ID : 195385890.54410
Image ID : 195472987.86550
Image ID : 195472995.86500
Image ID : 195473003.86460
Image ID : 195473011.86410
Image ID : 195472971.86640
Image ID : 195472979.86590
# Images : 16
Geod Obs : 0

```

A seguire di questa stringa CAP-A genera la lista di punti. Questa lista consente di visualizzare la frequenza di osservazione di un punto e su quali e su quante immagini ricade. Nel caso del sensore ADS40 l'Image ID si riferisce agli orientation fixes (OF). Un singolo punto contribuisce a molti OF: questa condizione è dovuta al fatto che ogni singolo punto ricade su scene multiple che condividono gli stessi OF. In questo caso la lista non mostra su quale scena il punto è stato misurato.

```

GPS Profile ID: 30031
# Image ID
1 195382114.18460
2 195382122.18150
3 195382130.17850
4 195382138.17960
5 195382146.18080
...
...
...

```

Un profilo GPS rappresenta un insieme di centri antenna raggruppati insieme per calcolare un singolo set di parametri di deriva. I profili GPS sono necessari solo quando vengono usati i parametri di deriva. Per ottenere i migliori risultati da una triangolazione supportata dal GPS è necessario utilizzare un giusto numero di profili GPS. Utilizzando troppi profili si potrebbe ottenere una indesiderabile perdita di accuratezza perchè utilizzando troppi parametri di deriva si indebolisce la geometria del blocco. Introducendone pochi si ottengono errori sistematici nel blocco o punti del tipo pseudo-blunders. Il modo migliore per determinare il numero corretto di profili è analizzare graficamente gli effetti dei parametri di deriva utilizzando gli strumenti messi a disposizione da OriMa. Dopo la lista dei punti troveremo la lista dei profili GPS solo se la triangolazione è supportata da osservazioni GPS. I progetti ADS40 presentano sempre dati GPS, quindi troveremo sempre questa colonna. Inoltre gli OF sono sempre identificati dalla variabile tempo.

```

Statistics
Overhead storage      : 15366
Nonzeros before Factor. : 38109
Nonzeros after Factor.  : 81141

Total number of parameters : 1867

```

```

Total number of observations :    2284
Total redundancy             :    417

```

CAP-A alloca la memoria in modo da operare i calcoli dinamicamente. La parte superiore della lista mostra la quantità di memoria che è stata usata. La prima riga rappresenta la quantità di memoria che è richiesta da CAP-A per immagazzinare informazioni aggiuntive sul sistema di equazioni normali. La seconda riga rappresenta il numero di elementi diversi da zero prima del processo di fattorizzazione. Durante la fattorizzazione il numero di elementi diversi da zero cresce in funzione del cosiddetto effetto “tappabuchi”. L’effetto è prodotto da elementi che erano pari a zero prima della fattorizzazione e sono diventati diversi da zero dopo la fattorizzazione.

La quarta riga indica il numero totale di parametri che viene così calcolato: ogni punto contribuisce con tre parametri, ogni immagine con 6 parametri e ogni camera con 6/21 parametri, ogni profilo GPS con 6 parametri. La dimensione del sistema normale equivale al numero di parametri.

La quinta riga rappresenta il numero di osservazioni: i punti di controllo Full contribuiscono con 3 osservazioni, ogni punto immagine con due osservazioni, ogni parametro addizionale con una osservazione. Infine ogni osservazione geodetica contribuisce con una osservazione. La differenza tra il numero totale di osservazioni e il numero di parametri è chiamata ridondanza totale. Ad un valore più elevato di ridondanza totale corrispondono risultati più affidabili. Un elevato valore di ridondanza totale implica un elevato auto-controllo.

***** 5. Iteration *****

RMS values of weighted residuals of X and Y image coordinates of ADS

La lista dei valori RMS (Scarti Quadratici Medi) diventa molto importante quando il processo di triangolazione non converge. Questo può succedere in caso di presenza di blunders veramente grandi. Se i dati di input di CAP-A sono corretti la triangolazione converge velocemente e i valori di RMS diventano piccoli. In queste colonne gli RMS sono dati in mm.

RMS values of weighted residuals of X,Y and Z GPS coordinates

```

Profile ID.    30031
0.0008        0.0009        0.0028

```

RMS values of weighted residuals of Omega, Phi and Kappa attitude observations

```

Group ID.     30031
0.0095        0.0100        0.0091

```

```

Additional observations:    0.0061

```

```

Sigma0:                0.0118
Changes of parameters:  0.0150

```

Sotto la lista degli RMS vengono forniti i valori di Sigma0 e di cambio dei parametri. In questa riga Sigma0 è dato in mm. Nel caso di progetti ADS40 compare anche la colonna dei tempi degli Orientation Fixes.

***** 5. Iteration *****

RMS values of weighted residuals of X and Y image coordinates of ADS

Scene ID	Time		
R_10300848GFNN00AL1	195382114.18460	0.0000	0.0001
R_10300848GFNN00AL1	195382122.18150	0.0000	0.0003
R_10300848GFNN00AL1	195382130.17850	0.0000	0.0001
R_10300848GFNN00AL1	195382146.18080	0.0000	0.0003
R_10300848GFNN00AL1	195382170.18010	0.0000	0.0000
R_10300848GFNN00AL1	195382178.18120	0.0000	0.0015
R_10300848GFNN00AL1	195382186.18240	0.0000	0.0015
R_10300848GFNN00AL1	195382194.17930	0.0000	0.0017
R_10300848GFNN00AL1	195382202.18050	0.0000	0.0014
R_10300848GFNN00AL1	195382210.18160	0.0000	0.0022
R_10300848GFNN00AL1	195382218.17860	0.0001	0.0047
R_10300848GFNN00AL1	195382226.17970	0.0000	0.0014
R_10300848GFNN00AL1	195382234.18090	0.0016	0.0030
R_10300848GFNN00AL1	195382242.18200	0.0006	0.0006
R_10300848GFNN00AL1	195382250.17900	0.0000	0.0019

RMS values of weighted residuals of X,Y and Z GPS coordinates

Profile ID. 30031
 0.0008 0.0009 0.0028

In caso di triangolazione supportata da GPS questa riga mostra lo scarto quadratico medio sulla posizione pesata dei centri antenna per ogni camera.

RMS values of weighted residuals of Omega, Phi and Kappa attitude observations

Group ID. 30031
 0.0095 0.0100 0.0091

In caso di triangolazione supportata da GPS/IMU questa riga mostra lo scarto quadratico medio pesato del valore dei tre angoli di assetto.

Modified image points:

Image ID.	Point ID.	Residuals		Redundancy		
		X	Y	X	Y	
2609320	26093190 2	-7.655	-0.149	0.97	1.00	Eli.
2609320	28093010 6	0.039	0.045	0.53	0.13	Eli.
2609321	26093220 2	0.202	0.023	0.84	0.99	Ins.

Se è selezionata l'opzione di eliminazione automatica dei blunders compaiono le 7 colonne di cui sopra. La lista mostra tutti quei punti identificati come blunder e , di conseguenza, disattivati o eliminati. Il listato mostra i residui per ogni punto in [mm] e la ridondanza locale di ogni punto. Una ridondanza locale vicino a 1 corrisponde ad una influenza del punto sui parametri. Se il peso per le coordinate dei centri antenna è stato stimato correttamente allora la deviazione standard a posteriori dovrebbe risultare vicina a quella a priori.

Per ogni immagine CAP-A fornisce la lista di tutti i punti introdotti nella triangolazione. Le coordinate disposte sotto la colonna Observations sono le misure originali elencate senza correzione. Queste coordinate sono elencate in mm mentre i relativi residui sono elencati in micron. Le colonne Testvalues Redundancy e Reliability sono tutte influenzate dagli stessi parametri. Tutte quante riflettono la stabilità della geometria del blocco. le variabili che influenzano queste tre grandezze sono la sovrapposizione longitudinale e trasversale, la quota relativa di volo e la scala del fotogramma.

```

RDS Scene ID.  R_10300848GRNN00RL1
Time:          195382114.18460

Point ID      Observations  Residuals  Testvalues  Redundancy  Reliability
              (*1000)
              X      Y      X      Y      X      Y      X      Y      X      Y
852           1.0580  39.0982  0.00  0.14  0.0  0.0  0.00  0.01  4967.  428.
Number of points: 1
              RMS:    0.00  0.14

```

```

RDS Scene ID.  R_10300848GRNN00RL1
Time:          195382122.18150

Point ID      Observations  Residuals  Testvalues  Redundancy  Reliability
              (*1000)
              X      Y      X      Y      X      Y      X      Y      X      Y
850           1.0590  37.9508  0.00  0.26  0.0  0.0  0.00  0.01  4967.  441.
Number of points: 1
              RMS:    0.00  0.26

```

```

RDS Scene ID.  R_10300848GRNN00RL1
Time:          195382130.17850

Point ID      Observations  Residuals  Testvalues  Redundancy  Reliability
              (*1000)
              X      Y      X      Y      X      Y      X      Y      X      Y
849           1.0594  37.1771  0.00  0.13  0.0  0.0  0.00  0.04  4967.  264.
Number of points: 1
              RMS:    0.00  0.13

```

```

RDS Scene ID.  R_10300848GRNN00RL1
Time:          195382146.18080

Point ID      Observations  Residuals  Testvalues  Redundancy  Reliability
              (*1000)
              X      Y      X      Y      X      Y      X      Y      X      Y
846           1.0580  39.0993  0.00 -0.06  0.0  0.0  0.00  0.24  4606.  102.
845           1.0580  39.0968 -0.01  0.35  0.0  0.0  0.00  0.24  4640.  102.
Number of points: 2
              RMS:    0.01  0.25

```

Le due sovrapposizioni consentono di valutare il numero di osservazioni per ogni punto. Se si aggiungono la quota di volo e la scala è possibile determinare gli angoli di intersezione tra i raggi omologhi di un particolare punto. Inoltre è possibile considerare un peso per ogni punto immagine. Questo peso è definito attraverso una tabella di codici a cui si è già fatto riferimento in precedenza. Il peso insieme agli angoli tra i raggi omologhi e al numero di raggi contribuiscono al calcolo di questi parametri che sono i dati principali per la individuazione di punti errati. I valori del test (testvalues) sono da considerare quando viene operata l'eliminazione automatica degli errori. Sono valori normalizzati e se per un punto il valore di test risulta <-1 o >1 allora il punto è un blunder. In questo caso la linea del report è segnata con un * e il punto compare alla fine del file di output nell'elenco dei punti errati. Il segno del valore di test corrisponde sempre al segno del relativo residuo. Il numero di osservazioni favorisce l'individuazione di punti errati in quanto un punto maggiormente osservato è suscettibile di maggiore controllo e quindi è più facilmente individuabile e classificabile come errato.

La ridondanza locale mostra l'influenza delle osservazioni sui parametri. Se, ad esempio, è stata selezionata l'opzione di eliminazione automatica dei punti errati e un punto viene identificato come blunder allora gli viene assegnata una ridondanza locale pari ad 1 che equivale a dire che il punto è ininfluenza sui risultati. Si dice che è completamente ridonante.

L'ultima colonna mostra un parametro di attendibilità. Questa colonna espressa in micron e rappresenta un valore di soglia. Il valore assoluto del modulo dei residui deve superare la affidabilità interna prima che l'algoritmo di ricerca dei blunder identifichi il punto come tale. In questo caso il valore di reliability va ad ∞ e il punto è etichettato come "eliminato".

Adjusted standard deviation for transformation parameters

Parameter set	Shift			Rotation (gon)			Scale
	X	Y	Z	X	Y	Z	
30031	2.5218	2.5757	1.8528	0.0208	0.0136	0.0162	0.0002886

Adjusted GPS observations

Parameter set 30031

Antenna centers

Ima./Prof. ID		Observations	SD.Post	SD.Prio	Resid.	Test	Redun	Reliab
195382114.18460 30031	X	33349.216	0.619	0.157	0.000	0.0	0.10	8.22
	Y	-2726.510	0.787	0.200	-0.004	0.0	0.10	10.47
	Z	6912.118	1.307	0.332	0.007	0.0	0.10	17.38
195382122.18150 30031	X	32077.367	0.654	0.166	0.000	0.0	0.10	8.69
	Y	-2736.070	0.803	0.204	0.002	0.0	0.10	10.68
	Z	6918.739	1.323	0.336	-0.003	0.0	0.10	17.59
195382130.17850 30031	X	30807.319	0.654	0.166	0.000	0.0	0.10	8.69
	Y	-2751.228	0.803	0.204	-0.001	0.0	0.10	10.68
	Z	6923.952	1.322	0.336	0.000	0.0	0.10	17.59

Per ogni profilo GPS è elencata una lista di tutti i centri antenna inseriti nella triangolazione. L'ID che identifica univocamente ciascun profilo GPS è un carattere alfa-numerico. Per contro l'ID delle immagini è usato per determinare la corrispondenza tra centri di proiezione e centri antenna. Cerchiamo di capire anche qui il significato delle grandezze definite nelle colonne.

Nella colonna "Osservazioni" sono elencati i valori originali delle coordinate dei centri antenna. Non sono quindi corretti né dall'effetto di deriva né dallo sfalsamento (offset) del centro antenna rispetto al centro di proiezione (nel caso ADS40 fittizio) della camera. Queste coordinate sono date nello stesso sistema di misura dei punti GCP, in questo caso metri.

La deviazione standard a posteriori è calcolata durante il processo di triangolazione. E' espressa in metri e dovrebbe essere vicina alla deviazione standard a priori quando il peso assegnato ai centri antenna viene stimato correttamente.

La deviazione standard a priori riflette l'accuratezza del posizionamento GPS riferito ai centri antenna.

I residui corrispondono alla presenza di errori casuali rimanenti. Devono essere piccoli e non mostrare tendenze sistematiche.

Variance components for GPS observations

X: 9.99 Increase the standard deviation a priori
Y: 9.99 Increase the standard deviation a priori
Z: 9.99 Increase the standard deviation a priori

Scale GPS

X: 10.00
Y: 10.00
Z: 10.00

Questa lista mostra le componenti di varianza per le osservazioni GPS. Se ad un certo tipo di osservazioni è stato assegnato il giusto peso rispetto agli altri tipi allora le corrispondenti componenti di varianza dovrebbero risultare prossime ad 1. Inizialmente, per capire l'influenza del supporto GPS/IMU, è stato assegnato un piccolo peso alle posizioni dei centri antenna che corrisponde ad elevate componenti di varianza.

Adjusted misalignment parameters in [rad]

Group ID.	X-Axis	S.Dev.	Y-Axis	S.Dev.	Z-Axis	S.Dev.
30031	0.0029362	0.0002053	0.0019951	0.0001725	0.0032653	0.0003865

Questi dati rappresentano i parametri di “non allineamento” della camera e possono essere introdotti direttamente nello strumento CamEdit di gestione dei camera file.

Adjusted misalignment parameters in [rad]						
Group ID.	X-Axis	S.Dev.	Y-Axis	S.Dev.	Z-Axis	S.Dev.
30031	0.0029362	0.0002053	0.0019951	0.0001725	0.0032653	0.0003865
Adjusted attitude observations						
Group ID. 30031						
Angles						
Ima./GroupID	Observations	SD.Post	SD.Prio	Resid.	Test Redun	Reliab
195382114.18460 30031	O	0.2025	0.0592	0.0155	-0.0072	-0.1 0.07 1.01
	P	-0.7832	0.0797	0.0141	-0.0001	0.0 0.10 0.74
	K	-199.1767	0.1680	0.0406	0.0010	0.0 0.10 2.13
195382122.18150 30031	O	0.1816	0.0747	0.0156	0.0034	0.0 0.10 0.82
	P	-0.7384	0.0801	0.0142	-0.0021	0.0 0.10 0.74
	K	-198.9995	0.1528	0.0409	-0.0103	0.0 0.10 2.11
195382130.17850 30031	O	0.1993	0.0543	0.0157	-0.0005	0.0 0.23 0.54
	P	-0.7618	0.0800	0.0144	-0.0029	0.0 0.10 0.75
	K	-198.7683	0.1385	0.0412	-0.0140	0.0 0.27 1.31
195382138.17960 30031	O	0.1790	0.0533	0.0157	0.0199	0.1 0.26 0.51
	P	-0.7507	0.0787	0.0145	0.0043	0.1 0.10 0.76
	K	-199.4545	0.1705	0.0414	0.0147	0.1 0.10 2.17
195382146.18080 30031	O	0.1411	0.0625	0.0158	-0.0069	-0.1 0.10 0.83
	P	-0.7873	0.0766	0.0145	-0.0005	0.0 0.10 0.76
	K	199.6179	0.1780	0.0418	0.0049	0.0 0.10 2.19

Per ogni camera viene elencata una lista degli angoli IMU introdotti nella triangolazione. La camera è identificata dal un ID alfanumerico. L'ID delle immagini è utilizzato per stabilire una corrispondenza tra l'orientamento della immagine e le osservazioni IMU.

RMS-O: 0.0472
RMS-P: 0.0474
RMS-K: 0.1157

Alla fine del listato viene riassunto lo scarto quadratico medio complessivo sui tre angoli di assetto.

Variance components for attitude observations

O: 18.40 Increase the standard deviation a priori
P: 9.99 Increase the standard deviation a priori
K: 16.37 Increase the standard deviation a priori

La tabella rappresenta le componenti di varianza sui dati di assetto. Nel caso in esame bisogna reiterare la triangolazione aumentando la Sigma0 a priori.

Control points

Point ID	Coordinates	SD.Post	SD.Prio	Resid.	Test Redun	Int.Reli.
F 03Pa1NE_01 M	X	5273.3912	0.3647	0.1000	-0.3008	-0.5 0.14 4.37
	Y	616.3531	0.3583	0.1000	-0.1849	-0.3 0.17 3.97
	Z	49.5016	0.3884	0.1000	-0.1284	-0.5 0.03 9.75
F 04Pa1W_01	X	-1170.9710	0.3748	0.1000	-0.0350	-0.1 0.10 5.35
	Y	-2713.0753	0.3741	0.1000	-0.0703	-0.1 0.10 5.26
	Z	216.1599	0.3903	0.1000	0.1549	0.7 0.02 11.86
F 05Pa1C_01	X	3468.1037	0.3615	0.1000	0.3347	0.5 0.16 4.15
	Y	-1719.3622	0.3622	0.1000	-0.2002	-0.3 0.16 4.20
	Z	111.4010	0.3904	0.1000	0.0970	0.4 0.02 12.03
F 07Pa1SW_01	X	-479.6568	0.3812	0.1000	0.3362	0.8 0.06 6.51
	Y	-5169.0804	0.3746	0.1000	0.0216	0.0 0.10 5.32
	Z	314.7972	0.3894	0.1000	-0.0668	-0.3 0.02 10.68

F 09Pa1SE_01	X	6855.9092	0.3930	0.1000	0.0782	0.6	0.01	22.30
	Y	-6100.5276	0.3889	0.1000	-0.1206	-0.4	0.03	10.20
	Z	365.7439	0.3924	0.1000	0.0799	0.5	0.01	17.92
F 11Pa2N_01	X	1331.2652	0.3836	0.1000	-0.0358	-0.1	0.05	7.23
	Y	5655.7165	0.3769	0.1000	0.3665	0.8	0.09	5.66
	Z	83.5396	0.3905	0.1000	0.1936	0.9	0.02	12.23

Maximum changes at control points:

X: -0.4306 at Point ID.: 12Pa2NE_01
 Y: -0.4850 at Point ID.: 12Pa2NE_01
 Z: -0.2518 at Point ID.: 12Pa2NE_01

RMS of changes at control points:

X: 0.2538
 Y: 0.2579
 Z: 0.1284

Questa parte del *report* è una delle più importanti. La colonna coordinate mostra le coordinate assegnati ai punti di controllo dopo la triangolazione. Il cambiamento rispetto alle coordinate assegnate è mostrato dai residui.

La deviazione standard a posteriori è presentata nella stessa unità di misura delle coordinate dei punti di controllo. Questo parametro mostra la accuratezza con cui può essere determinato un punto attraverso una triangolazione fotogrammetrica. Se per un punto la deviazione standard a posteriori è più piccola di quella a priori allora questo punto non lavora come punto di controllo. La deviazione standard a posteriore risulta assai vicina a quella a priori quando il peso viene assegnato correttamente a tutte le osservazioni.

La deviazione standard a priori è un valore di input. E' elencata nella stessa unità di misura dei punti di controllo ed è elencata qui perchè così facendo è facile riconoscere un punto di appoggio (GCP) da un punto di controllo (CP). La deviazione standard a priori può quindi essere usata per bloccare il punto di controllo. Questo significa che è possibile rendere la triangolazione ininfluente per il punto che, di conseguenza, non subirà cambiamenti e presenterà residuo pari a zero. D'altro canto questa condizione inibisce la possibilità di ogni controllo sul punto se questo è identificato come errato.

La colonna residui mostra di quanto le coordinate sono state cambiate dalla triangolazione.

Alla fine del listato vengono mostrati i punti che hanno subito i cambiamenti più sostanziali.

Il movimento medio di tutti i punti di controllo è rappresentato dai valori degli scarti quadratici RMS medi.

X-max.: 14.6562 at Point ID.: 846
 Y-max.: 37.9265 at Point ID.: 727
 Z-max.: 62.7644 at Point ID.: 1647

A seguire alla lista dei punti di controllo troviamo la lista dei punti di legame che OriMa chiama Terrain Points. Per ogni punto sono elencate le coordinate corrette dalla triangolazione, la deviazione standard a posteriori e la affidabilità esterna.

Parameters of exterior orientation

Image ID. 195382114.18460 Camera ID. 30031
 Strip No. 999
 Scale 1: 107098.

Proj. Center	St.Dev.	Ext.Reliable	Correlation coefficients					
			c	x0	y0	a1	a2	a3
XO 33327.21856	9.09907	0.218	XO 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
YO -2796.21254	7.90493	0.243	YO 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZO 6893.31591	6.79719	0.755	ZO 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Rot. Angles (gon)	St.Dev. (gon)							
Omega 0.38100	0.05461	P1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Phi 399.34548	0.07744	P2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Kappa 200.61831	0.16970	P3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Rotation order: Omega, Phi, Kappa

Image ID. 195382122.18150 Camera ID. 30031
 Strip No. 999
 Scale 1: 107216.

Proj. Center	St.Dev.	Ext.Reliable	Correlation coefficients					
			c	x0	y0	a1	a2	a3
XO 32055.83925	8.74059	0.207	XO 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
YO -2802.91141	7.59237	0.095	YO 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZO 6900.75852	6.53968	0.435	ZO 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Rot. Angles (gon)	St.Dev. (gon)							
Omega 0.37026	0.07114	P1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Phi 399.38900	0.07787	P2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Kappa 200.82408	0.15420	P3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Rotation order: Omega, Phi, Kappa

Questa parte del report rappresenta i parametri dell'orientamento esterno. Alla fine troviamo il modello multi-parametrico della camera e la lista dei punti eliminati.

7.10 Il canale infrarosso – la calibrazione in radianza al sensore. Il calcolo dell'NDVI.

Il più semplice modello radiometrico che può essere utilizzato per i sensori CCD è il modello lineare. In questo modello i valori di Digital Number (o che dir si voglia livello di grigio) dipendono dal fattore di calibrazione C_1 e dall'offset C_0 .

$$L = C_1 DN + C_0$$

dove L è la radianza spettrale.

Per la ADS40 il valore di offset C_0 è corretto in laboratorio durante la fase di registrazione del sensore e quindi può essere considerato pari a zero. Poiché la dipendenza dal tempo di integrazione del sensore è lineare è possibile definire un coefficiente di calibrazione specifica c_1 come segue

$$c_1 \equiv C_1 t$$

$$L = \frac{c_1 DN}{t}$$

Il fattore di calibrazione specifica è una costante del sensore avente dimensioni $[W s m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1} DN^{-1}]$ ed è fornito nel file di calibrazione del sensore ADS40.

```

ADS_CALIBRATION_FILE 1
CALIBRATION_SOURCE "ORIMA Calibration by Muzaffer
Adigüzel"
CAMERA_NAME "30031"
SENSOR_LINE "GrnN00A"
CALIBRATION_DATE "Mon Dec 12 11:21:04 2005"
FOCAL_LENGTH_MM 62.7000000000
NUM_PIXELS 12000
PIXEL_SIZE 0.0065000000
PAV_Z_OFFSET 0.111
RADIOMETRIC_GAIN 1.0000000000z ← c1
IRRADIANCE_GAIN 1.0000000000
LEFTSIDE_GAIN 1

```

Correzione DSNU (Dark Signal Non Uniformity)

La modalità di costruzione dei sensori CCD implica una condizione tipica di funzionamento anomalo. Infatti i sensori CCD producono un segnale anche se non sono colpiti da alcuna luce incidente. Questo piccolo segnale dipende dalla temperatura, dal tempo di integrazione e dall'estensione delle zone adiacenti alla superficie del rilevatore. La dipendenza dalla temperatura è eliminata operativamente da una ventola Peltier termocollata che mantiene il piano focale costantemente a 20°. La dipendenza dal tempo di integrazione viene rimossa attraverso un ciclo di controllo che è alimentato da un segnale prodotto da alcuni pixel oscurati artificialmente e posti alla fine del vettore CCD. La dipendenza dalla geometria del pixel è eliminata attraverso una misurazione precisa dello sfalsamento di ciascun pixel. Il valore di segnale corrispondente allo sfalsamento viene sottratto dal segnale.

Correzione PRNU (Photo Response Non Uniformity)

Anche in questo caso al processo di produzione dei CCD corrisponde una anomalia: la diversa manifattura implica che l'amplificazione del segnale vari da pixel a pixel. Una seconda condizione è legata al diverso comportamento della lente man mano che ci si avvicina ai bordi. La somma di questi due fattori conduce ad una risposta non uniforme lungo il vettore CCD. Per risolvere il problema viene calcolato un fattore di correzione per ogni pixel. Questo fattore è pari al rapporto tra il valore massimo di segnale acquisito dalla linea CCD e il valore di segnale del pixel stesso. I valori di correzione vengono scaricati permanentemente nella testata del sensore e applicati a valle della correzione DSNU. Quando la linea CCD viene investita da una illuminazione uniforme genera un segnale costante solo se è stata operata la correzione PRNU.

I valori DSNU e PRNU vengono utilizzati per calcolare il coefficiente di calibrazione specifica c_1 .

Per potere calcolare la quantità di luce che incide la linea CCD durante la calibrazione radiometrica è necessario conoscere la funzione $R(\lambda)$ del sensore.

Il sensore ADS40 è equipaggiato con 4 bande spettrali non sovrapposte centrate nelle regioni del blu, verde, rosso e con tre sensori pancromatici.

Band	Lower Wavelength FWHM [nm]	Upper Wavelength FWHM [nm]	Bandwidth FWHM [nm]
Blue	430	490	60
Green	535	585	50
Red	610	660	50
NIR1 (Option)	705	755	50
NIR2	835	885	50
Panchromatic	465	680	215

fig. 7.51 - Canali spettrali del sensore ADS40

La sensibilità spettrale del sensore è influenzata da varie parti del sensore. C'è un limite di lunghezza d'onda di 400 nm al di sotto del quale non è possibile scendere ed è originato dalla lente. Il filtro dicroico separa le diverse parti dello spettro elettromagnetico per le tre bande RGB. Si riporta di seguito la forma tipica della funzione di trasmissività spettrale legata al funzionamento dei filtri di interferenza.

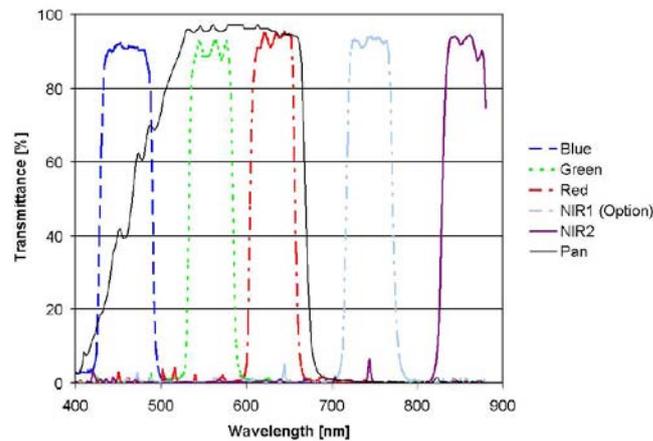


fig. 7.52 - Trasmissività spettrale dei filtri della ADS40

A partire da questi dati può essere calcolata la funzione di risposta spettrale del sensore.

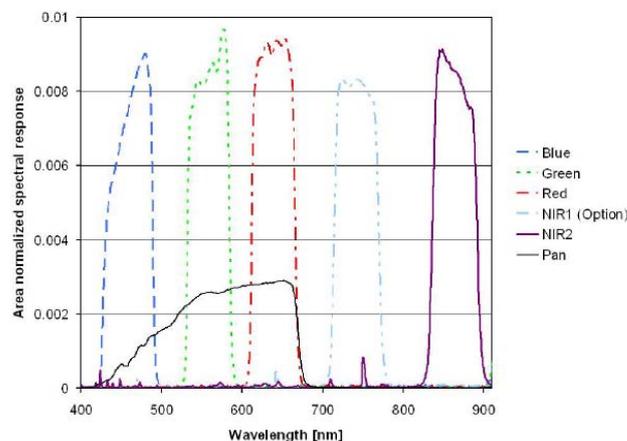


fig. 7.53 - Curve di risposta spettrale per le varie bande

L'equazione

$$c_1 \equiv C_1 t$$

definisce il coefficiente di calibrazione specifica che è una costante del sensore ed è rappresentato dalla stringa **RADIOMETRIC_GAIN** presente nel file *.cam fornito con le immagini.

Per avere una variabilità di 16 bit (interi senza segno) cioè da 0 a 65535 le immagini vengono modificate (in fase di rettifica a livello 1) attraverso il software GPro con un fattore pari a 50. Definiamo il Digital Number Calibrato CDN il rapporto tra il DN e il fattore 50.

$$CDN = DN * 50 c_1 / t$$

Così facendo la radianza al sensore può essere calcolata attraverso la seguente relazione semplicemente dividendo per il fattore 50 il Digital Number Calibrato che si legge nelle immagini a livello 1.

$$L = CDN / 50$$

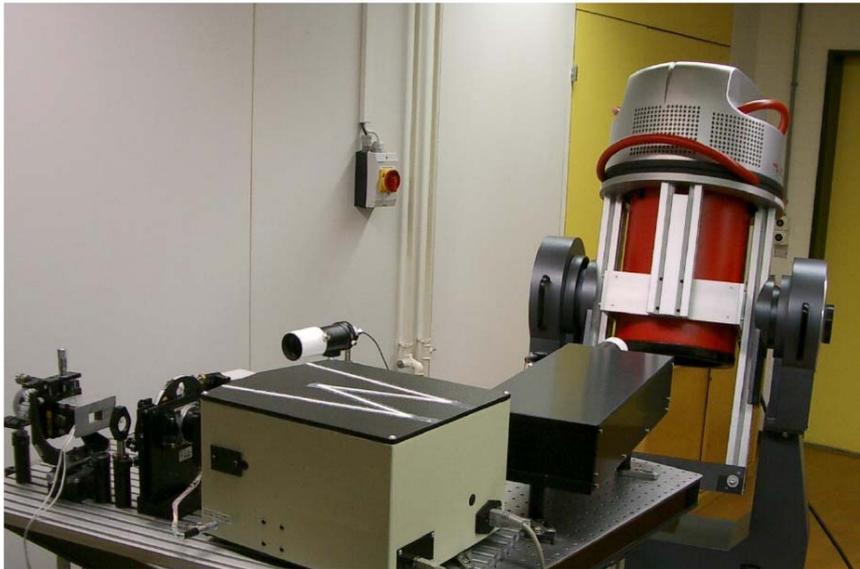


fig. 7.54 - Calibrazione spettrale e misura della funzione di trasferimento MTF ai laboratori Leica

Nel corso di questo lavoro è stata operata la calibrazione in radianza al sensore dei due canali del rosso e dell'infrarosso. Come si è visto l'operazione si porta a termine abbastanza facilmente dividendo il DN di ogni pixel per il fattore correttivo 50 applicato durante la rettifica a livello 1.

Con le immagini calibrate in radianza al sensore è possibile calcolare gli indici di vegetazione. L'indice di vegetazione più famoso è l'NDVI che si ottiene da una differenza normalizzata eseguita tra i canali Rosso e NIR.

La fig. 7.55 mostra l'indice di vegetazione NDVI in corrispondenza della cittadella universitaria palermitana (Parco D'Orleans). Come si vede varia tra -1 (pixel non vegetato) e 1 (pixel vegetato).



fig. 7.55 - La sfera di calibrazione del sensore ADS40

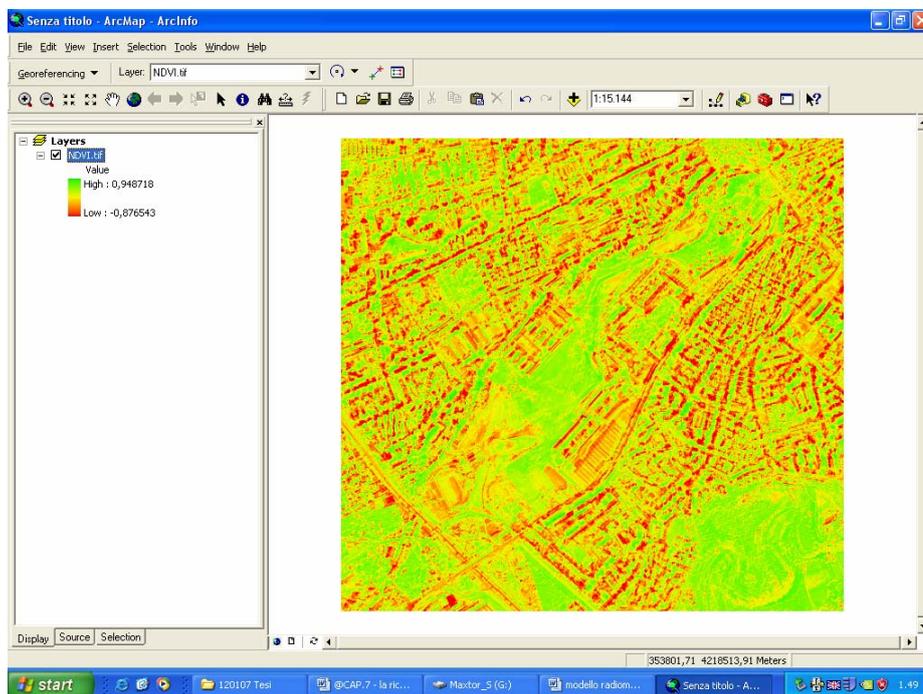


fig. 7.56 – Carta tematica dell'NDVI di Parco D'Orleans (Cittadella Universitaria di Palermo)

Con i canali Rosso e Infrarosso è possibile calcolare molti indici di vegetazione presenti in letteratura (ad es. il SAVI o l'PMSAVI che richiedono il calcolo della *soil line*).

Si è già accennato altrove che la risposta lineare del CCD aumenta notevolmente le capacità di foto-interpretazione.

Il canale IR delle scene ADS40 avvicina il sensore alle applicazioni tipiche del *remote sensing*. Ancora molta strada bisogna percorrere in questa direzione: una sola banda nell'infrarosso vicino consente di fare studi solo sui pixel di vegetazione. Una migliore risoluzione radiometrica potrebbe aumentare esponenzialmente il numero di applicazioni ma, come detto nel capitolo 3, per questo tipo di applicazioni ci sono i sensori iperspettrali che nell'ultimo periodo hanno fatto grossi passi avanti specialmente riguardo alla risoluzione geometrica che solitamente è compromessa dall'elevata risoluzione radiometrica.

Nel momento della ultima stesura di questa tesi è in fase di sviluppo uno studio sulla classificazione avanzata ad oggetti delle immagini ADS40 di questo tipo di cui si dà un cenno nel prossimo paragrafo.

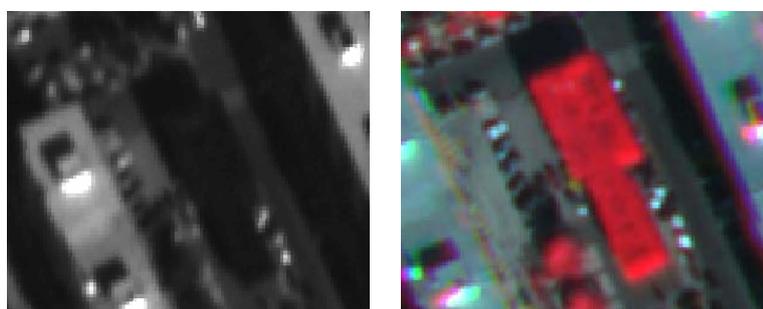


fig. 7.57 – Confronto tra una immagine pancromatica e una “falso colore”. A destra in rosso la vegetazione difficilmente individuabile a sinistra nella immagine pancromatica.



fig. 7.58 – Segmentazione dinamica di una immagine falso colore ADS40

7.11 Un possibile uso del canale infrarosso. Una applicazione (cenni)

Il sensore ADS40 acquisisce come è stato accennato un canale nell'infrarosso vicino con una lunghezza d'onda tra 835 e 885 nm acquisito in posizione Forward.

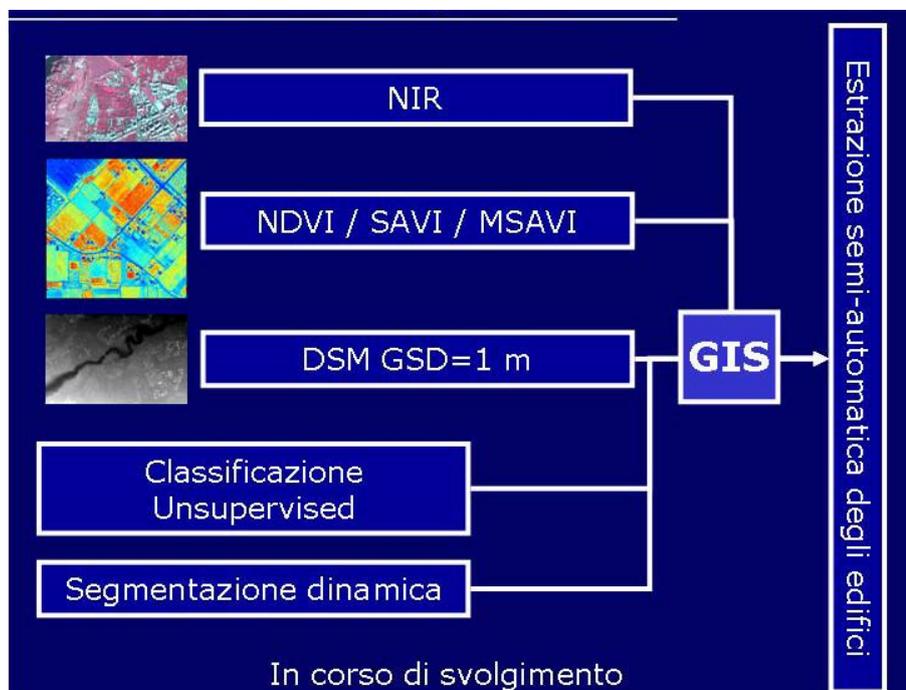


Fig. 7.57 – Una applicazione con il canale IR. L'estrazione semiautomatica degli edifici.

Dai due canali Rosso e Infrarosso è facile trovare l'indice normalizzato di vegetazione NDVI come mostrato. Questa nuova immagine unita al DSM e ad altre immagini ottenute per classificazione e/o segmentazione dinamica (fig. 7.58) costituisce un sistema multibanda di indagine. Si potrebbe implementare ad esempio un approccio di tipo probabilistico: se un pixel si trova ad avere basso NDVI, quota sul DSM in un certo intervallo ed elevata probabilità di appartenenza alla classe "edificato", allora è abbastanza probabile che si tratti di un edificio. Con questa logica si potrebbe implementare una procedura assistita in ambiente GIS per l'estrazione semi-automatica di strade ed edifici.

Bibliografia

V. Casella, M. Franzini, L. Menci, F. Ceccaroni – Gestione delle strisciate della camera digitale nella stazione digitale MENCISOFTWARE ZMap – GeoMedia – Speciale Archeomatica 2006 – pag. 42-45

S. Alhamlan, J. P. Mills, A. S. Walker, T. Saks – The influence of ground control points in the triangulation of Leica ADS40 data – atti del convegno internazionale ISPRS 2004, Istanbul.

T. Chen, R. Shibasaki , Koichi Tsuno - Orientation strategies of airborne three-line scanner starimager's imagery with minimum ground control - atti del convegno internazionale ISPRS 2004, Istanbul.

M. Pateraki, E. Baltsavias - Analysis of a DSM generation algorithm for the ADS40 airborne pushbroom sensor - Gruen A., Kahmen H. (Eds.), Proc. Conf. "Optical 3-D Measurement Techniques VI", ETH Zurich, Switzerland, 22-25 September, Vol. I, pp. 83-91 (and on CD-ROM).

M. Pateraki, E. Baltsavias – Adaptive Multi-Image Matching Algorithm for the Airborne Digital sensor ADS40 - Asian Conference on GIS, GPS, Aerial Photography and Remote Sensing "Mapasia 2002", Bangkok, Thailand, 7-9 August (on CD-ROM).

M. Pateraki, E. Baltsavias – Analysis and Performance of the Adaptive Multi-image matching Algorithm for Airborne Digital Sensor ADS40 - Proc. ASPRS Annual Conference 2003, Anchorage, AK, USA, 5-9 Mai (on CD-ROM).

B. Madhavan, K. Tachibana, T. Sasagawa, H. Okada, Y. Shimosuma - Automatic extraction of shadow regions in high-resolution ADS40 images - By Robust Approach of Feature Spaces Analysis - atti del convegno internazionale ISPRS 2004, Istanbul.

S. O. Elberink - 3D Reconstruction of Building Edges Experiences with LH-Systems' ADS40 Three-Line Scanner Data - <http://www.lr.tudelft.nl/live/binaries/2faaf567-465a-48c7-b204-4944195b6b6c/doc/Sander%20OE%20artikelGIM.pdf>