

MISURA DELLA DEFORMAZIONE DI VEICOLI SOGGETTI A INCIDENTI STRADALI TRAMITE LA FOTOGRAMMETRIA

L. Mencì^a, T. Morandi^b, D. Vangi^b

^a *Menci Software Via F.lli Lumiere 19 - 52100 Arezzo, e-mail: info@menci.com*

^b *Università di Firenze, Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, via Santa Marta 3 - 50139 Firenze, e-mail: dario.vangi@unifi.it*

Sommario

La fotogrammetria può essere applicata al rilievo delle deformazioni dei veicoli soggetti ad incidente stradale, al fine di valutare l'energia cinetica dissipata in seguito all'urto e quindi ricostruire la dinamica dell'evento. In questo ambito, il vantaggio principale nell'utilizzare la fotogrammetria è che le misure possono essere eseguite successivamente a partire dalla documentazione fotografica, anche se il veicolo incidentato non è più disponibile. Nel presente lavoro viene descritta una metodologia basata sulle tecniche fotogrammetriche, che si è concretizzata nello sviluppo di un software commerciale, per il rilievo delle deformazioni dei veicoli incidentati. L'errore di misura ottenuto associato alle misure fotogrammetriche 3D sui veicoli è dell'ordine del centimetro. Da un confronto delle misure ricavabili tramite il software fotogrammetrico e le misure effettuate per mezzo della stazione totale, che risulta allo stato attuale una delle tecniche di riferimento per la misura delle deformazioni sui veicoli in termini di precisione, si è evidenziato che lo scarto massimo commesso è dell'ordine dei 2 cm, che comporta un variazione sulla stima dell'energia di deformazione del 4%, che scende al 2% se si prende in considerazione la velocità del veicolo al momento dell'impatto.

Abstract

Photogrammetry can be applied for measuring the deformation of vehicles subjected to road crash, aiming at the evaluation of kinetic energy dissipated to be used for accident reconstruction. The main advantage in utilizing photogrammetry lies on the possibility to get measurements from pictures even when the vehicle is no longer available. In the present work a methodology based on photogrammetry is described, resulting in the development of a commercial software tool fit to measure deformations of crashed vehicles. Total error obtained in 3D vehicle measurement is about 1 cm. Comparing the output of the photogrammetry procedure here presented to a Total Station (which is nowadays one of the reference techniques for vehicle crush measurement) a maximum difference of about 2 cm was obtained; from such error follows a relative difference in crush energy of about 4%, that lowers down to 2% when pre-impact speed estimation is considered.

Parole chiave: Fotogrammetria, Misura delle deformazioni, Urti, Ricostruzione incidenti stradali, Energia di deformazione.

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito della analisi degli incidenti stradali, al fine del miglioramento della sicurezza stradale o a fini giudiziari, la misura delle deformazioni residue nei veicoli è comunemente utilizzata per il calcolo

dell'energia cinetica dissipata nell'impatto tra veicoli e, quindi, per calcolare le velocità relative dei veicoli e per ricostruire l'evento. Tale calcolo, conoscendo le deformazioni del veicolo, può essere effettuato noti i coefficienti di rigidità o la curva forza-deformazione caratteristica del veicolo ottenibile da crash-test [1]. Con il valore di energia così ottenuto è possibile calcolare le velocità relative dei veicoli al momento dell'impatto e la variazioni di velocità subite dai singoli veicoli. Inoltre il valore dell'energia cinetica dissipata costituisce un importante parametro anche nell'analisi dell'urto attraverso la conservazione della quantità di moto.

Le principali metodologie utilizzate per la misura delle deformazioni del veicolo sono:

- manuale: misurazione diretta dello schiacciamento della struttura rispetto alla forma originale. La procedura di misura manuale è “standardizzata” dalla SAE [1] e prevede la misura manuale delle deformazioni utilizzando una linea di riferimento posta a distanza nota rispetto a due punti non deformati del veicolo.
- laser: la tecnologia laser offre oggi varie soluzioni nell'ambito della misurazione indiretta di distanze. L'apparato più completo per l'analisi delle deformazioni è sicuramente il laser scanner. Il laser scanner consente la ricostruzione 3d di una superficie, mediante un numero anche molto elevato di punti, con elevate precisioni anche a distanze significative. Attualmente, nonostante la riduzione dei prezzi continua, l'apparecchiatura laser scanner è ancora poco competitiva.
- Stazione totale: La stazione totale permette di acquisire le coordinate x,y,z dei punti di interesse dell'oggetto da modellare, questi devono poi essere rielaborati, per esempio importandoli in ambiente CAD. La precisione di questo metodo di misura, per rilevare un oggetto delle dimensioni di un veicolo, è nell'ordine del centimetro.
- fotogrammetrica (digitale) [2]: L'applicazione della fotogrammetria all'ambito del rilevamento di sinistri stradali e deformazione di veicoli costituisce una recente evoluzione dei software fotogrammetrici tipicamente utilizzati in altri ambiti (architettura, topografia, beni culturali, ecc.). Si basa sullo studio dell'immagine per l'estrapolazione delle informazioni di forma e posizione di oggetti. Con la diffusione delle immagini digitali e della computer graphics, software specifici hanno sostituito le precedenti attrezzature ottiche nell'individuazione di punti tridimensionali e nella loro rappresentazione. Tali sistemi hanno come vantaggi l'economicità e la praticità sul campo (a livello hardware è necessario una macchina fotografica appositamente calibrata e opzionalmente di un cavalletto con barra di scorrimento). Per contro le precisioni ottenute sono generalmente inferiori a quelle del laser scanner e si ha un raggio di azione più limitato.

Il tecnico spesso si trova a dover ricostruire un incidente stradale senza avere la possibilità di visionare direttamente i veicoli coinvolti e poter effettuare le misure necessarie, se non attraverso le fotografie. Con l'utilizzo ormai diffuso della fotografia digitale, anche da parte delle autorità preposte al rilievo dei sinistri stradali, le tecniche fotogrammetriche acquistano particolare rilevanza; infatti, anche da un archivio fotografico di un dato sinistro sarebbe possibile per il tecnico risalire, anche dopo molto tempo, alle deformazioni dei veicoli e alla possibilità di effettuare una stima accurata dell'energia cinetica dissipata in seguito al sinistro. Con le tecniche fotogrammetriche è possibile anche identificare la posizione nello spazio di eventuali tracce, come graffi sulla carrozzeria, spolverature dovute ad un urto con pedone, segni che dopo pochi giorni dall'evento non sono più riscontrabili.

Nel presente lavoro è stata sviluppata una tecnica fotogrammetrica specifica per il rilievo della superficie 3D dei veicoli per la valutazione della deformazione subita a seguito di incidenti stradali. La tecnica è stata implementata in un software [3] che, noto il tipo di veicolo (e quindi i coefficienti di rigidità della struttura) e dalle foto dello stesso, permette di misurare la deformazione del veicolo, e calcolare automaticamente l'energia cinetica dissipata nell'urto.

2. CENNI SULLA FOTOGRAMMETRIA

La fotogrammetria è l'insieme dei processi di utilizzazione delle prospettive fotografiche centrali nella formazione di cartografie topografiche e nella documentazione architettonica. È dunque la scienza per rilevare e misurare oggetti per mezzo di immagini

Tale materia si divide in due grandi branche: la fotogrammetria aerea e la fotogrammetria terrestre. Per la prima, detta anche fotogrammetria dei lontani, gli oggetti sono situati ad una distanza maggiore di 300 metri e per la seconda o fotogrammetria dei vicini (*close range*) gli oggetti interessati risultano ad una distanza inferiore a 300 metri circa.

Operare in questo settore significa eseguire indagini quantitative e qualitative sull'oggetto fotografato; i risultati delle misure fotogrammetriche possono essere numeri, disegni o immagini, tecnicamente dette coordinate, carte o ortofotoproiezioni. La fotogrammetria consente la ricostruzione degli oggetti e la determinazione di alcune loro caratteristiche senza richiedere il contatto fisico con gli stessi, consentendo la realizzazione di rappresentazioni grafiche in scala dell'oggetto esaminato.

Per qualsiasi operazione di misura o calcolo relativi ad una immagine digitale è necessario conoscere in maniera più o meno approssimata il rapporto di scala pixel-oggetto.

Questo risultato teoricamente si può ottenere mediante un calcolo basato sulla conoscenza dei sei parametri di orientamento assoluto della presa (coordinate x,y,z del centro del fotogramma e angoli di rotazione ω, ϕ, κ) oppure più frequentemente tramite la georeferenziazione dell'immagine digitale. Il termine georeferenziazione prende nome dal neologismo anglosassone Geo-Refer che significa riferire geometricamente. Tale operazione esprime la possibilità di stabilire una corrispondenza univoca tra i punti dell'oggetto rappresentato e quelli dell'immagine digitale, come si ha in una presa fotogrammetrica tradizionale in cui la legge di corrispondenza è data dalla trasformazione prospettica di tipo affine. Questo criterio viene utilizzato per il raddrizzamento prospettico e l'ortofoto.

Una imposizione rigorosa si ha solo per immagini non otticamente deformate di oggetti perfettamente piani, tuttavia aumentando il numero dei punti di appoggio in funzione della morfologia dell'oggetto e procedendo per porzioni limitate di immagini si possono raggiungere risultati metricamente accettabili anche per oggetti con sviluppo tridimensionale.

La presa fotografica di un oggetto costituisce una corrispondenza univoca tra l'oggetto stesso e la sua immagine sul fotogramma, ma se ad ogni punto dell'oggetto corrisponde un punto sul fotogramma non possiamo affermare la stessa corrispondenza nel caso contrario. E' evidente quindi che un solo fotogramma non è sufficiente a determinare geometricamente un oggetto nel suo insieme. Nel caso si operi con due fotogrammi la corrispondenza tra i punti determinati sull'oggetto e le coppie di punti sui fotogrammi diviene biunivoca, rendendo così possibili le misure dell'oggetto attraverso la sua rappresentazione fotografica. L'immagine tridimensionale virtuale ottenuta dall'osservazione binoculare di una coppia di immagini stereoscopiche prende generalmente il nome di modello stereoscopico o immagine plastica dello spazio interessato.

Analoga situazione è nella visione stereoscopica umana: il processo della percezione visiva si sviluppa a partire dall'occhio e si conclude nel cervello che recepisce gli stimoli sensoriali e li elabora per trasformarli in un'immagine della stessa realtà oggettiva osservata. Il campo visivo dei due occhi umani raccoglie due immagini con una piccola differenza. Questa piccola differenza tra le due immagini raccolte produce la visione stereoscopica del campo interessato e fornisce conseguentemente la percezione della sua profondità spaziale e del relativo rilievo. La camera da presa è l'elemento essenziale in un processo fotogrammetrico sia perché costituisce l'elemento fondamentale per l'acquisizione delle prese sia per la ricostruzione ottica del modello dell'oggetto. Le camere da presa fotogrammetrica (digitali e non), quando siano perfettamente noti gli elementi di orientamento interno, cioè i parametri geometrici-costruttivi, sono dette *camere metriche*. Le camere non metriche possono essere rese tali attraverso il procedimento di calibrazione, tramite il quale viene ricavato in modo rigoroso l'orientamento interno di una camera. Questo accentua evidentemente la loro predisposizione alla misura, in contrapposizione a tutte le altre camere da presa fotografica non metriche, che non possono garantire, durante il loro impiego, una costante riproduzione degli elementi di orientamento interno al variare delle condizioni di presa fotografica. Appare indispensabile, per assicurare l'affidabilità e la precisione richieste nei lavori di ripresa fotogrammetrica, sottoporre le camere metriche a periodici e sistematici controlli. La camera infatti per la sua pesantezza può danneggiarsi durante il trasporto; o essere soggetta a grandi variazioni di temperatura e di pressione che vadano a modificare i parametri di orientamento interno.

3. APPLICAZIONE DELLA FOTOGRAMMETRIA ALLA MISURA DELLE DEFORMAZIONI DEI VEICOLI

Il metodo classico per la misura delle deformazioni residue di un veicolo soggetto ad incidente stradale deriva dai primi lavori di Campbell [1] che ha individuato la correlazione tra entità della deformazione ed energia cinetica dissipata. Il metodo, definito nella sua procedura [1], prevede di dividere il profilo deformato del veicolo in alcune stazioni di misura e misurare lo schiacciamento, in direzione assiale nel caso di urto frontale e in direzione perpendicolare all'asse nel caso di urto laterale. Tali misure devono essere fatte all'altezza della parte più rigida del veicolo, nel caso di urto frontale generalmente all'altezza del paraurti. Questo metodo non può essere utilizzato nel caso in cui la deformazione non sia uniforme sul piano verticale o nel caso di deformazioni molto irregolari o estese. Un esempio è quando un veicolo si incunea sotto un mezzo pesante, infatti in questa situazione il cofano si deforma ma il telaio e il motore, che sono le parti più rigide, non vengono interessate dalla deformazione. Per questa configurazione infatti i coefficienti di rigidezza, ricavati per mezzo di crash test contro barriera rigida che provoca una deformazione uniforme sul piano verticale, non possono essere utilizzati. Il metodo non può essere applicato nei casi di mezzi pesanti e a due ruote, per la mancanza di dati di rigidezza relativi a tali mezzi.

Per il rilievo manuale dello schiacciamento del veicolo è opportuno stabilire una linea di base, riferita ad un punto indeformato del veicolo (per esempio i mozzi delle ruote posteriori nel caso di danno al frontale); la procedura più in uso, prevede di utilizzare quale base una barra, montata su due cavalletti, posizionata all'altezza alla quale si vuole fare le misure. Su tale barra, l'ampiezza della deformazione viene suddivisa in cinque parti uguali, individuando così sei stazioni di misura. In corrispondenza di ciascuna stazione si misura la distanza, parallelamente all'asse del veicolo, del profilo danneggiato dalla base. La stessa operazione deve essere effettuata su un veicolo identico non deformato, per identificare le distanze del profilo indeformato dalla base; lo schiacciamento viene quindi determinato su ciascuna stazione di misura come differenza tra le due distanze. Alternativamente, la distanza del profilo indeformato, e quindi la deformazione subita dai singoli punti, può essere ricavata se si dispone di un sagoma CAD in scala del veicolo.

L'energia cinetica dissipata, imputabile alle forze di contatto parallele alla direzione dell'asse, è data dalla (1), dove C_i sono le ampiezze dello schiacciamento, W è la larghezza della zona deformata e A e B sono i coefficienti di rigidezza [10,11], disponibili per vari veicoli o comunque tabellati per classi di veicoli.

$$E_{dn} = \frac{W}{k-1} \sum_1^{k-1} \left\{ \left[G + \frac{A}{2} (C_i^* + C_{i+1}^*) + \frac{B}{6} (C_i^{*2} + C_i^* C_{i+1}^* + C_{i+1}^{*2}) \right] \right\} \quad (1)$$

L'energia così calcolata presuppone che le profondità della deformazione siano misurate in direzione parallela all'asse del veicolo, poiché queste sono le condizioni delle prove di crash in cui vengono ricavate le curve $F(s)$ e quindi i coefficienti A e B . Nel caso in cui le forze di contatto siano orientate in direzioni differenti da quelle longitudinali o ortogonali all'asse del veicolo, per valutare l'energia di deformazione totale è possibile utilizzare dei fattori correttivi. Esistono diversi fattori correttivi che tengono conto dell'effettiva direzione di applicazione delle forze (PDOF) e della direzione principale delle deformazioni (PDOD).

$$E_d = E_{dx} (1 + \tan^2(PDOF)) \quad \text{Mc Henry} \quad [4,5,6] \quad (2)$$

$$E_d = E_{dx} (1 + m \tan(PDOF)) \quad \text{Mc Henry} \quad [7] \quad (3)$$

$$E_d = E_{dx} (1 / \cos(PDOF)) \quad \text{Fonda} \quad [8] \quad (4)$$

$$E_d = E_{dx} (1 + \tan(PDOF) \tan(PDOD)) \quad \text{Vangi} [9] \quad (5)$$

Effettuando il rilievo manualmente del profilo, con il metodo classico descritto, non è possibile avere nessun tipo di informazione sulla direzione principale delle forze e sulla direzione principale delle deformazioni; in questi casi per la stima di questi parametri il tecnico si può basare sulla sola osservazione del tipo di deformazione e se possibile sulla presunta posizione dei due veicoli al momento dell'urto osservando le tracce lasciate da questi prima e dopo l'impatto e la loro posizione di quiete.

La tecnica fotogrammetrica consente di valutare, anche a posteriori, la direzione principale delle deformazioni. Infatti, una volta effettuata la sovrapposizione dei due profili, deformato e non deformato, è possibile, collegare i punti omologhi prima e dopo la deformazione ed individuarne così la direzione di spostamento che hanno subito durante l'urto. Ciò permette di minimizzare l'errore nel calcolo dell'energia di deformazione, utilizzando il fattore correttivo (5).

Ulteriore vantaggio del metodo fotogrammetrico rispetto alla misura manuale risiede nell'elevato numero di punti con cui si può ricostruire il profilo deformato del veicolo e che si può ottenere una ricostruzione 3D dell'intero volume deformato. Ciò apre la strada a nuove e più accurate metodologie di calcolo per la valutazione dell'energia di deformazione.

4. SOFTWARE APPLICATIVO

L'applicazione della fotogrammetria per la misura delle deformazioni dei veicoli e la valutazione dell'energia cinetica dissipata nell'urto è stata oggetto di una recente evoluzione del software PoliceMap (Menci Software), che viene commercializzato con il nome di *Deformation* (Menci Software-Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali). PoliceMap si basa su una fase di rilevamento della scena del sinistro tramite una serie di fotografie eseguite con macchina fotografica digitale appositamente calibrata, per effettuare la restituzione planimetrica in 3D della scena, ed in particolare della posizione statica assunta dai veicoli, della posizione e dimensione di eventuali tracce a terra e posizione di oggetti che possono aiutare i tecnici nel risalire alle cause che hanno causato il sinistro. Applicando gli stessi principi è nato *Deformation* che si basa su una fase di rilevamento del veicolo deformato e di quello indeformato tramite una serie di fotografie.

Tali fotografie vengono importate ed analizzate all'interno del software. La calibrazione della macchina fotografica consente di conoscere le distorsioni dell'immagine dovute all'ottica e al sensore. Utilizzando tali informazioni il software è in grado di correggere gli errori dovuti a tale distorsione. In ogni fotografia deve apparire un elemento di riferimento pre-calibrato, chiamato *dima* (figura 1), che fornisce quattro punti di controllo, a distanza nota tra di loro. Collimando tali punti su ogni immagine, il software è in grado di "orientare il fotogramma", cioè stabilire la posizione spaziale del centro di presa della camera, rispetto al piano passante per i quattro bersagli della dima. Una volta che il fotogramma è orientato si può determinare la posizione planimetrica dei punti visibili e giacenti in un certo intorno del piano della dima. Per avere la possibilità di eseguire un rilievo a tre dimensioni è necessario eseguire una seconda foto della scena, effettuando uno spostamento, del punto di ripresa, in direzione orizzontale rispetto al piano della dima, di circa 30 cm. E' così possibile rilevare, grazie al principio dell'intersezione in avanti, l'elevazione di un qualsiasi punto (del veicolo) rispetto al piano della dima, tramite la collimazione del punto sulle due fotografie. Tale operazione di collimazione viene effettuata in automatico dal software.

Per effettuare le misure di deformazione del veicolo è necessario effettuare la sovrapposizione del veicolo deformato e di quello indeformato, si deve cioè riportare il sistema di riferimento individuato con l'orientamento delle foto eseguite attorno al veicolo non deformato ed allinearsi con quello delle foto eseguite intorno al veicolo deformato, per mezzo di una rotazione e di una traslazione. Per fare questo è necessario individuare nei due veicoli alcuni punti appartenenti alla zona non deformata, che verranno sovrapposti. La precisione della sovrapposizione dei profili dipende dal numero di punti non deformati che vengono individuati, da quanto sono distribuiti uniformemente e da quanto è precisa la loro collimazione. Una volta eseguito l'allineamento e' possibile passare alla fase dell'individuazione dei profili attorno al veicolo. E' possibile stabilire una quota di riferimento e procedere al rilievo di un profilo attorno al veicolo visibile in foto. In questa fase la precisione del profilo dipende dalla precisione con la quale si collima ogni punto in quota, ovvero dalla capacità di associare ad ogni punto

rilevato l'esatta stima dell'elevazione rispetto al piano della dima. In *Deformation* esiste un meccanismo automatico di ricerca della quota corretta. All'utente è richiesto il raffinamento e la verifica della quota proposta, prima di confermarla.

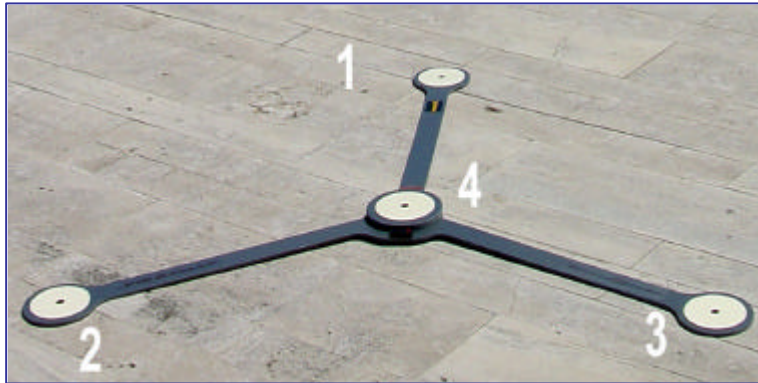


Figura 1:Dima

Tramite questa tecnica si possono rilevare i profili sia in ambiente CAD che sotto forma di file di testo, dove sono riportate le tre coordinate di tutti i punti rilevati. Tale file viene elaborato all'interno del secondo modulo del software per il calcolo dell'energia cinetica dissipata durante l'urto.

Di seguito si riportano brevemente i passi per l'elaborazione delle immagini e l'acquisizione dei profili. Una volta effettuate le riprese della parte deformata del veicolo e della stessa parte del medesimo veicolo non deformata, il software *Deformation* prevede le seguenti fasi operative:

- 1- Collimazione dei bersagli della dima posta vicino al veicolo deformato, per tutte le coppie di fotografie che ritraggono la parte danneggiata (figura 2). La stessa operazione deve essere ripetuta per le coppie di fotografie che ritraggono il veicolo danneggiato (figura 3). Possono essere eseguite quante fotografie sono necessarie a descrivere il danno, ma la dima deve essere sempre visibile e non può essere spostata durante tale fase. Se il danno è molto esteso è possibile spostare la dima, ma per fare questo è necessario segnalare un punto sul piano della dima che sia visibile nelle due coppie di foto successive per permettere il collegamento tra le due coppie. Generalmente sono sufficienti due coppie di riprese per il veicolo deformato e due per quello indeformato.

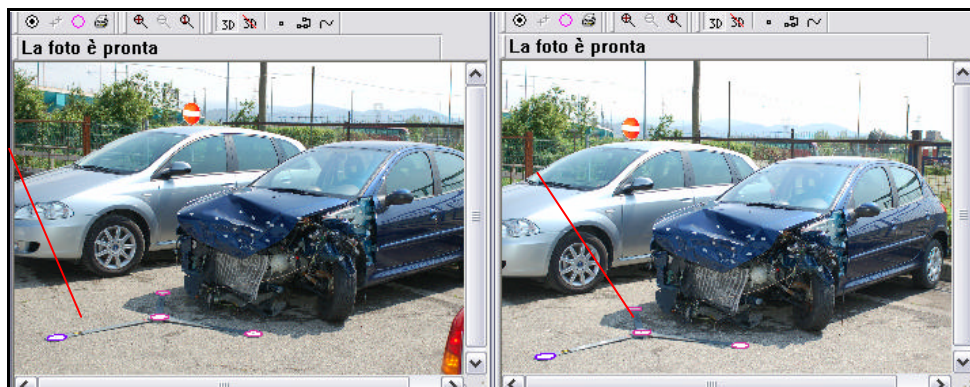


Figura 2:Coppia di fotografie del veicolo danneggiato

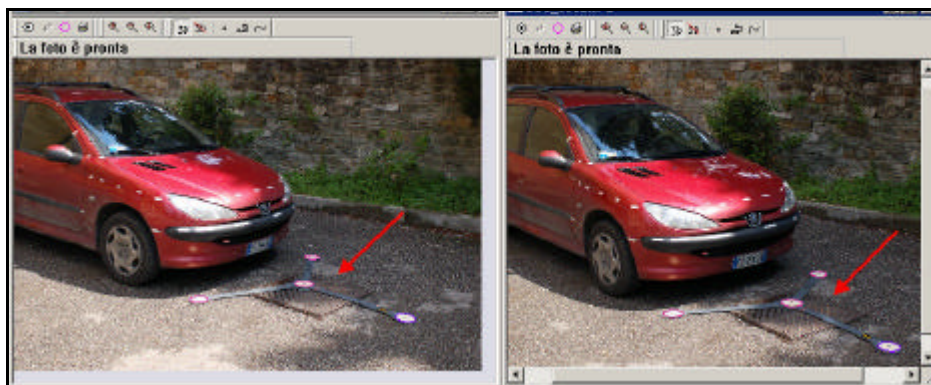


Figura 3:Coppia di fotografie del veicolo non danneggiato

- 2- Individuazione dei punti omologhi 3D in zone non deformate, questi non devono essere inferiori a due, meglio se 5 o 6, e per diminuire al massimo l'errore di sovrapposizione dei due veicoli è preferibile che siano distribuiti il più uniformemente possibile nella parte indeformata del veicolo. Una volta individuati i punti omologhi il software automaticamente effettua la sovrapposizione virtuale dei due modelli del veicolo.

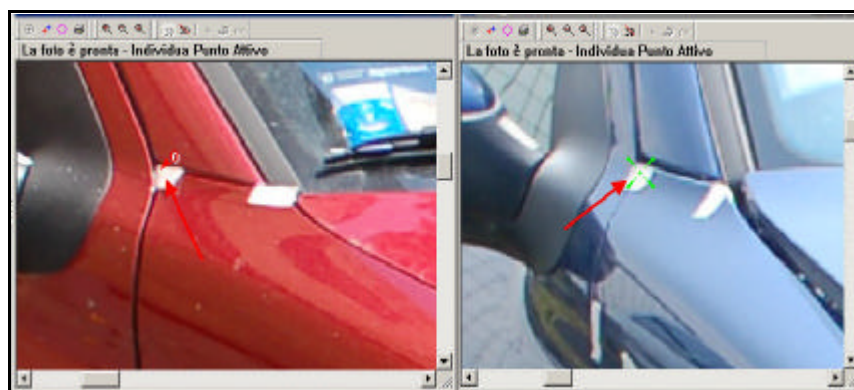


Figura 4:Individuazione di punti omologhi non deformati

- 3- Effettuata la sovrapposizione dei modelli è possibile passare al rilievo dei profili individuando i punti direttamente sulle fotografie.

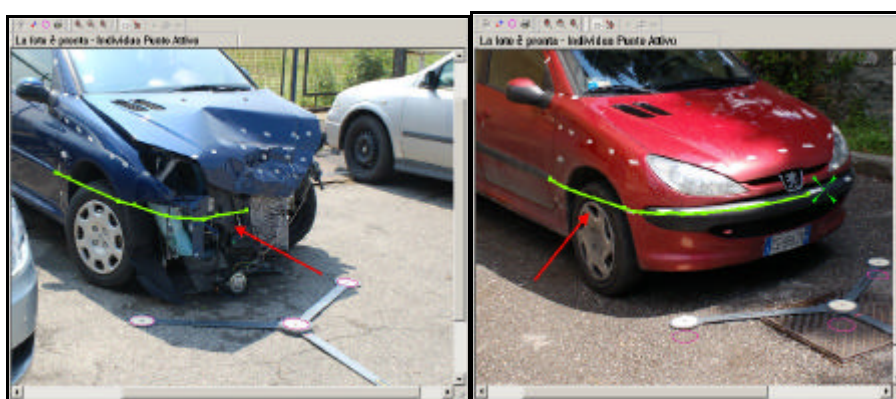


Figura 5:Individuazione di punti omologhi non deformati

- 4- Tutti i punti selezionati sulle fotografie vengono riportati automaticamente in ambiente CAD, come mostrato nella figura 6.

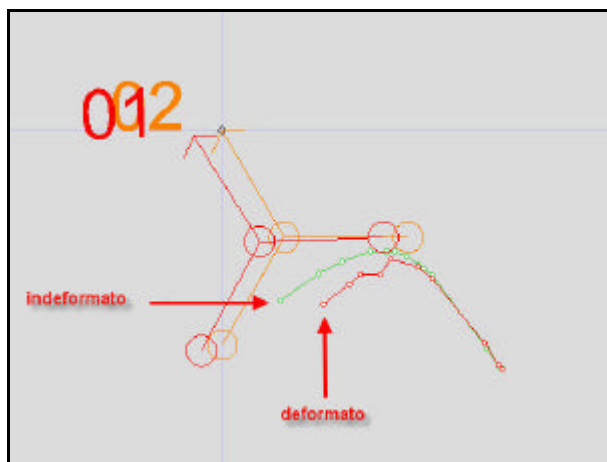


Figura 6: Profilo deformato e non deformato in ambiente CAD

5. VALIDAZIONE E CONFRONTO CON RILIEVO EFFETTUATO PER MEZZO DELLA STAZIONE TOTALE

Il software sviluppato, essendo orientato alla misura delle deformazioni dei veicoli, che non richiedono risoluzioni spinte al di sotto del centimetro, è stato progettato in modo da avere la risoluzione di 1 cm sulla rappresentazione del risultato. Per valutare la precisione che si può ottenere utilizzando il software, sono stati effettuati preliminarmente una serie di test, rilevando le dimensioni di un cartoncino di formato A3, posizionato in orizzontale sia in verticale rispetto al piano della dima e a diverse distanze da questa; l'errore massimo riscontrato è stato inferiore alla risoluzione dello strumento (last digit 1 cm) sulle misure dei lati come sulle misure delle diagonali. Generalmente gli errori che vengono commessi dipendono dalle condizioni di ripresa e dalle successive operazioni di orientamento e collimazione.

Durante la fase di sperimentazione e verifica del software, è stato scelto di effettuare un confronto tra la tecnica fotogrammetrica e la stazione totale perché questa ultima rappresenta attualmente, assieme al laser scanner, la tecnica di rilievo più precisa utilizzabile per questi scopi.

Per valutare la precisione che si può ottenere effettuando i rilievi per mezzo della fotogrammetria, sono state effettuate alcune prove di crash presso la pista dell'Università di Firenze; le prove sono state svolte su due tipi di auto, Fiat Uno e Fiat Panda, in urti contro barriera rigida inamovibile con configurazione: a) al 100% di offset b) al 40 % di offset e c) con barriera inclinata di 45° rispetto al moto del veicolo (vedi figura 8). Sono stati effettuati i rilievi dei veicoli prima e dopo la prova, sia utilizzando il software Deformation sia per mezzo della stazione totale.

Sui veicoli utilizzati per le prove sono stati posizionati numerosi marker per acquisire i medesimi punti prima e dopo la deformazione con entrambe le tecniche di misura. Ciò ha permesso anche di misurare, al variare del tipo di urto, la direzione di deformazione (PDOD) di numerosi punti sia nella zona di danno diretto sia in quella di danno indotto. I profili ottenuti per mezzo delle due diverse tecniche sono stati importati in ambiente CAD e confrontati. L'errore massimo riscontrato tra i profili acquisiti con le diverse tecniche di misura è dell'ordine dei due centimetri; nelle figure 9 e 10 sono riportati e messi a confronto i profili ottenuti per mezzo delle due diverse tecniche, relativamente al veicolo Fiat Uno, indeformato e deformato a seguito della prova contro barriera inclinata a 45°.



Figura 7: Prove per la validazione delle misure effettuate

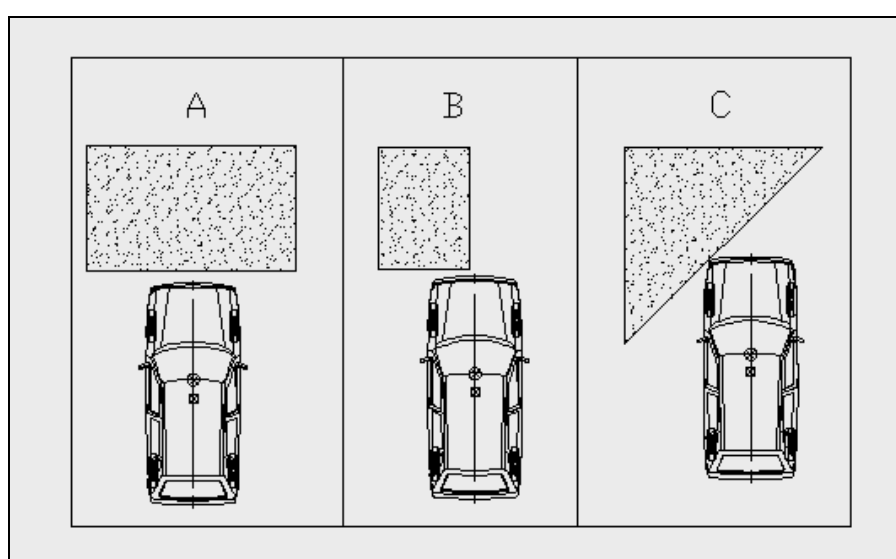


Figura 8: Schematizzazione Crash test al 100%, 40% e inclinato a 45°, contro barriera inamovibile

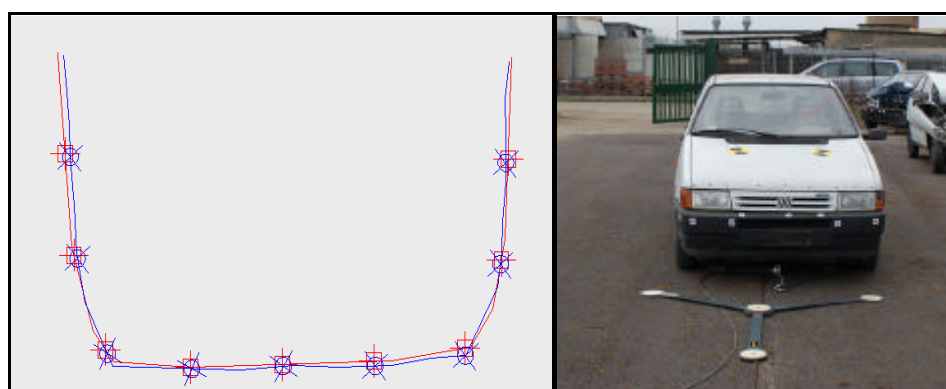


Figura 9: Confronto profilo non deformato acquisito tramite fotogrammetria (rosso) e utilizzando la stazione totale (blu)



Figura 10: Confronto profilo deformato acquisito tramite fotogrammetria (rosso) e utilizzando la stazione totale (blu)

Per valutare come l'errore commesso nella misura delle deformazione influenza la stima dell'energia di deformazione e quindi la velocità relativa di impatto tra i veicoli (che è il dato che in fine interessa nella ricostruzione dell'incidente stradale), sono state effettuate una serie di simulazioni numeriche. Sono stati generati n profili deformati, generando in modo random 6 misure C_i di profondità del danno e se ne è calcolata l'energia di deformazione con la (1), utilizzando i coefficienti di rigidità di un veicolo appartenente alla fascia media di rigidità. Ciascun profilo di deformazione è stato poi modificato aggiungendo a ciascun valore C_i una variabile distribuita secondo Gauss nell'intervallo ± 2 cm, che rappresenta lo scarto massimo osservato tra le misure del profilo individuato con la stazione totale e con la fotogrammetria, calcolandone nuovamente l'energia di deformazione e lo scarto con il valore originario. Per ogni profilo ciò è stato effettuato m volte, registrando ogni volta il valore di scarto massimo dell'energia. In figura 11 è riportato l'istogramma dei valori percentuali di scarto tra le energie cinetiche dissipate. Il valore della moda dello scarto percentuale è dell'ordine del 4%. Tale percentuale scende al 2% se si considera il calcolo della velocità relativa tra i veicoli al momento dell'impatto a partire dall'energia di deformazione, visto il legame di tipo quadratico tra velocità ed energia (figura 12).

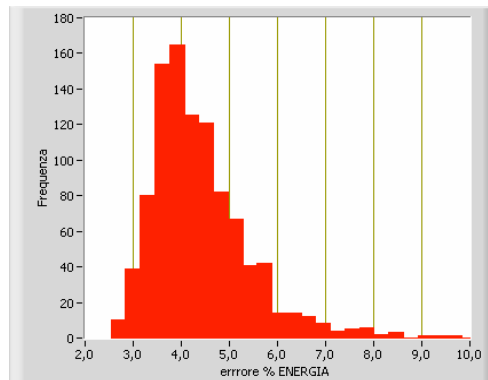


Figura 11: Analisi dei risultati delle simulazioni effettuate errore % nella stima dell'energia di deformazione

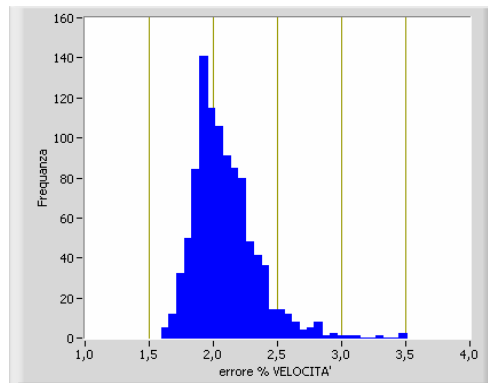


Figura 12: Analisi dei risultati delle simulazioni effettuate errore % nella stima della velocità d'impatto

6. CONCLUSIONI

E' stata sviluppata una applicazione delle tecniche fotogrammetriche per la misura dei profili danneggiati dei veicoli a seguito di incidenti stradali. Tale misura si rende necessaria per il calcolo delle energie cinetiche dissipate nell'urto e per il conseguente calcolo delle velocità relative tra i veicoli al momento dell'impatto.

I vantaggi principali nell'uso della fotogrammetria per la misura delle deformazioni risiede nel fatto che le informazioni possono essere recuperate dalle fotografie digitali, disponibili anche dopo molto tempo dal sinistro ed in assenza dei veicoli. Ciò risulta ancora più efficace se si considera che ormai tutti i corpi di Polizia si avvalgono della fotografia digitale per i rilievi dei sinistri stradali. La misura viene inoltre resa "oggettiva", ovvero indipendente dalle modalità di misura, come tipicamente avvengono con le tecniche manuali.

La tecnica sviluppata consente di acquisire il profilo deformato e non deformato dei veicoli in modo rapido ed efficiente, attraverso il software *Deformation* appositamente messo a punto e validato. La procedura di misura richiede una macchina digitale calibrata e una ditta che deve essere presente nelle fotografie.

Per la validazione del metodo di misura, sono stati effettuati preliminarmente una serie di test, rilevando le dimensioni di un cartoncino di formato A3, posizionato sia sul piano della ditta sia in posizione verticale e a diverse distanze dalla ditta; l'errore massimo riscontrato è stato inferiore alla risoluzione dello strumento (last digit 1 cm) sulle misure dei lati come sulle misure delle diagonali.

Le precisioni che si possono ottenere nell'acquisizione dei profili, utilizzando tecniche fotogrammetriche, sono dipendenti dalla qualità della calibrazione della camera, dalle condizioni di ripresa e dalle successive operazioni di orientamento e collimazione, ma in genere si commettono errori planimetrici dell'ordine di un centimetro.

Dal confronto con le misure di deformazione effettuate con la stazione totale è emerso che le variazioni tra le due tecniche sono dell'ordine di 2 cm, Questo comporta un errore del 4% sulla stima dell'energia di deformazione e del 2% quando viene calcolata la velocità prima dell'urto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] K.E. Campbell, "Energy basis for collision severity", *Environmental Activities Staff, General Motors Corp*, SAE paper 740565, 1974.
- [2] R. Galetto, "Lezioni di topografia e fotogrammetria", Capitolo 8 da pag. 221 a 388.
- [3] Software "*Deformation*", Realizzato dal Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali dell'Università degli Studi di Firenze e da Menci Software.
- [4] Crash 3 User's Guide and Technical Manual, Pub. No. DOT HS 805732, NHTSA, Washington D.C., 1981.
- [5] Smith, R.A., "Noga, J.T., Accuracy and sensitivity of CRASH", U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety, SAE paper 821169, 1982.

- [6] Woolley, R.L., Warner, C.Y., Tagg, M.D. Inaccuracies in the CRASH3 program. Collision Safety Engineering, SAE paper 850255, 1985.
- [7] McHenry, B.G. “*The algorithm of CRASH, McHenry software*”, Inc., 2001
- [8] Fonda, A.G. “*Principles of crush energy determination*”, Fonda Engineering Associate, SAE paper 1999-01-0106, 1999.
- [9] Dario Vangi “*Crash energy evaluation in vehicle to vehicle oblique impact*” Di prossima pubblicazione su International journal of impact engineering
- [10] Nystrom, G.A., Kost, G., Werner, S.M. “*Stiffness parameters for vehicle collision analysis*”, Failure Analysis Associates, Inc., SAE paper 910119, 1991
- [11] Neptune, J.A., Blair, G.Y., Flynn, J.E. “*A method for quantifying vehicle crush stiffness coefficients*”, Blair, Church & Flynn Consulting Engineers, SAE paper 920607, 1992