

Moderne tecnologie di rilievo per la ricostruzione degli incidenti stradali

P.I. Andrea Del Cesta, Ing. Francesco Del Cesta
Studio Ingegneristico Del Cesta

Sommario

Scopo del presente lavoro è verificare l'applicabilità delle moderne tecnologie di rilievo nell'ambito della ricostruzione dei sinistri stradali. Negli approcci classici le deformazioni ai veicoli sono identificate tramite ispezione visiva e/o tramite misure effettuate manualmente; le scene del sinistro sono riprodotte schematicamente, spesso solo al livello della carreggiata, in base a misurazioni effettuate con rotella metrica o, al meglio, con stazioni totali o tecniche di fotogrammetria piana. Tali metodologie consentono di acquisire un numero limitato di dati e con un considerevole impegno in termini di tempo. Al contrario, tecnologie moderne quali i laser scanner e le metodologie di computer vision: "structure from motion" (SfM) e "multi-view stereo" (MVS), permettono di ottenere in modo quasi automatico modelli tridimensionali completi di un soggetto di interesse. In questo studio, sono stati eseguiti numerosi test per verificare l'efficacia di queste tecnologie nella caratterizzazione delle sagome dei veicoli e nella ricostruzione delle scene dei sinistri. Le analisi effettuate hanno mostrato come le tecniche proposte possano incrementare notevolmente la qualità di una ricostruzione, soprattutto nei casi complessi, fornendo misurazioni complete ed affidabili, che possono essere vantaggiosamente integrate nei software specifici per la ricostruzione degli incidenti stradali.

I - Introduzione

La ricostruzione di un sinistro stradale è un procedimento rivolto all'individuazione della dinamica del sinistro, delle condotte di guida dei conducenti, delle possibilità di evitabilità, di eventuali responsabilità e/o di violazioni al codice della strada [1]. Il punto di partenza per lo studio della dinamica è la conoscenza della posizione reciproca dei mezzi al momento della collisione, la quale può essere dedotta dalla direzione principale delle deformazioni (PDODs) sui veicoli [1]. Le condotte di guida, l'evitabilità ed eventuali responsabilità richiedono spesso di ricostruire con accuratezza la scena del sinistro. Negli approcci classici, la PDODs è determinata approssimativamente tramite ispezione visiva o tramite alcune misurazioni per punti, usando rotelle metriche o distanziometri laser; le scene del sinistro sono ricostruite schematicamente, sulla base di misurazioni effettuate manualmente o, al meglio, con stazioni totali e/o tecniche di fotogrammetria piana/fotogrammetria 3D con singola coppia di immagini [2]. Tali metodologie consentono di acquisire un numero limitato di dati con un considerevole impegno in termini di

tempo, e non consentono di seguire procedure automatizzate.

Le moderne tecnologie di computer vision: "structure from motion" (SfM) [3] e "multi-view stereo" (MVS) [4], e/o la strumentazione laser scanner [5], consentono invece di ottenere nuvole di punti tridimensionali complete di un soggetto di interesse (entro certi limiti di applicazione, discussi in seguito) utilizzando procedure semi-automatiche, che surclassano gli approcci classici in termini di quantità di punti misurabili e in termini di velocità di acquisizione. In teoria, tali tecnologie possono essere utilizzate per produrre dettagliati modelli 3D di veicoli danneggiati, utilizzabili per una accurata identificazione della PDODs. Ogni dettaglio delle scene dei sinistri potrebbe essere rilevato; il piano viabile e gli elementi di interesse potrebbero essere ricostruiti in 3D ed utilizzati nei moderni sistemi di simulazione come dati di ingresso per una ricostruzione accurata.

Un'altra applicazione molto promettente potrebbe essere la mappatura di immagini al modello 3D rilevato, al fine di tradurre in informazioni metriche le informazioni di colore contenute in fotografie di interesse, anche nei casi in cui i

procedimenti fotogrammetrici non siano applicabili. In principio, utilizzando tecniche di SfM, può essere possibile mappare le immagini di un sinistro all'interno del modello 3D della scena (acquisito successivamente alle fotografie) e colorare il modello in base alle fotografie stesse, traducendo così le informazioni di colore in informazioni metriche (tracce di pneumatico, incisioni sull'asfalto, liquidi, etc.). Ovviamente, tale procedimento potrebbe essere applicato solo nei casi in cui la scena del sinistro (in termini di conformazione del piano viabile) non avesse subito variazioni significative fra la data del sinistro e la data del rilievo.

Scopo del lavoro

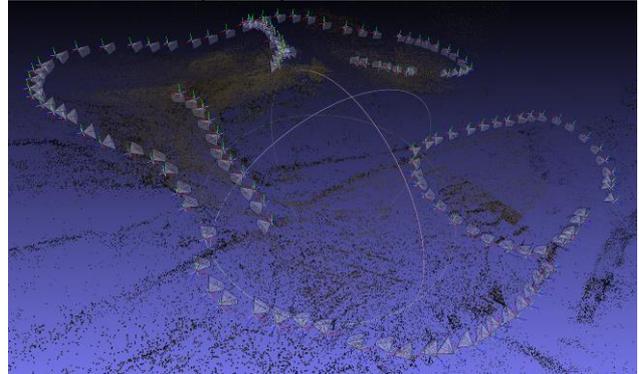
Il presente lavoro ha avuto l'obiettivo di verificare l'efficacia delle moderne tecnologie di rilievo nell'ambito della ricostruzione degli incidenti stradali. Sono stati effettuati numerosi test al fine per verificare la loro applicabilità per l'identificazione delle sagome dei veicoli e per la ricostruzione della scena di un sinistro. Inoltre, utilizzando algoritmi di mappatura del colore sui modelli tridimensionali, partendo da fotografie, è stata valutata la possibilità di ricavare informazioni sulla posizione di elementi visibili in una fotografia di una scena, ma non rilevati all'interno del modello 3D della scena stessa.

L'indice dell'articolo è il seguente. La Sezione II introduce le tecniche di "computer vision" e fornisce alcune indicazioni pratiche per il loro utilizzo. La Sezione III propone una breve presentazione dei laser scanner. Nella sezione IV sono descritti i test effettuati, mentre nella Sezione V ne sono discussi i risultati. Infine, la Sezione IV analizza alcuni aspetti legati all'applicabilità delle metodologie proposte in casi concreti.

II - Structure from Motion e Multi-View Stereo

Le moderne tecniche di "computer vision" consentono di ottenere nuvole di punti 3D da un insieme ordinato (i.e. sequenziale) o disordinato (i.e. casuale) di immagini, acquisite intorno a una scena di interesse [3]. Tramite gli algoritmi di "Structure from Motion" è possibile ricavare la posizione e la rotazione nello spazio (i cosiddetti parametri estrinseci) della camera per ogni immagine scattata, e di produrre una nuvola di punti "sparsa", cioè con un ridotto numero di punti (come mostrato in Fig.1). Le implementazioni più avanzate consentono di ricavare anche i parametri di calibrazioni interni della camera (coefficienti di distorsione e lunghezza focale).

Figura 1 Esempio di dato prodotto da un algoritmo SfM. Si notino in grigio le posizioni della camera nei vari punti in cui sono state acquisite le immagini e si noti la nuvola di punti sparsa.



Una volta determinate la posizione della camera per le varie immagini, gli algoritmi MVS consentono di produrre una nuvola di punti densa della scena, estendendo il concetto di stereoscopia a un insieme di $N > 2$ immagini (si veda la Fig.2).

Figura 2 Esempio di nuvola di punti densa ottenuta con un algoritmo MVS.



Principio di funzionamento

Le posizioni della camera nei punti in cui sono state acquisite le immagini sono ricavate in due fasi. Nella prima fase, viene identificato un insieme di punti di interesse (features) su ciascuna immagine e viene determinata una associazione preliminare fra le features delle varie immagini. Nell'insieme delle associazioni, viene migliorata iterativamente la collocazione di ogni gruppo costituito da tre o più features, fino ad ottenere la collocazione che garantisce la maggior coerenza fra le features nelle varie immagini. La maggior parte degli algoritmi di riconoscimento delle feature sono basati sull'algoritmo SIFT di Lowe [6]. Tale algoritmo è risultato vincente in quanto consente di identificare associazioni fra le features anche per immagini con diversa lunghezza focale, diversa orientazione e, entro ampi limiti, in presenza di distorsioni e cambi di luminosità.

La seconda fase, chiamata “bundle adjustment”, comporta il perfezionamento della collocazione (posizione e rotazione nello spazio) della camera in tutti i punti da cui sono state scattate le foto, nonché l’individuazione delle caratteristiche ottiche (quale la lunghezza focale) della camera utilizzata (o delle camere nel caso sia stato utilizzato più di un dispositivo) [7].

Il perfezionamento della posizione è effettuato con algoritmi che minimizzano l’errore, in termini di pixel di distanza, fra ciascuna feature “*F*” dell’immagine e la riproiezione, su quell’immagine, del punto tridimensionale associato alla feature “*F*”. Poiché vengono solitamente identificate migliaia di feature, l’errore è espresso come somma di quadrati di migliaia di funzioni non lineari, in cui sono inclusi i parametri di calibrazione interni della fotocamera (coefficienti di distorsione e lunghezza focale). L’ottimizzazione avviene quindi tramite algoritmi non lineari dei minimi-quadrati.

Il nome “bundle adjustment” (“regolazione del fascio”) rappresenta una descrizione suggestiva del procedimento di ottimizzazione: i fasci (“bundles”) luminosi, che da ciascun punto del modello tridimensionale convergono sul fuoco di ciascuna camera, vengono “spostati” fino ad ottenere la miglior configurazione in termini di errore. La teoria matematica del BA è stata introdotta per la prima volta negli anni ’50, all’interno degli studi sulla fotogrammetria. Tuttavia è diventata popolare solo negli ultimi anni grazie allo sviluppo delle GPU e delle CPU multi-core, che ha reso possibile eseguire i milioni di calcoli necessari in poco tempo. [8].

Cenni sulla precisione e sulla risoluzione

Gli algoritmi di BA richiedono una buona sovrapposizione delle immagini, intesa come quantità di elementi della scena visibili. Per contro, acquisire troppe immagini, alla ricerca di una sovrapposizione estrema, accresce il tempo di ricostruzione senza migliorare la qualità finale della nuvola di punti (e anzi a volte può peggiorarla). Gli algoritmi MVS sono infatti soggetti a un compromesso fra precisione e risoluzione [9]. Relativamente alla precisione, si può fare riferimento alla relazione che lega l’errore σ_Z sulla collocazione di un punto nello spazio tridimensionale con l’errore σ_D sulla disparità (cioè la differenza tra la posizione di uno stesso punto su due differenti immagini) nello spazio bidimensionale delle immagini [10]:

$$\sigma_Z = \frac{p \cdot Z^2}{f \cdot B} \sigma_d \quad (1)$$

Z è la distanza dalla camera dell’oggetto di interesse, B è la distanza fra le posizioni di scatto (detta “baseline”), p è la distanza fra i pixel del sensore della camera e f è la lunghezza focale (rispetto a un sensore di 35mm).

Dalla (1), emerge come la precisione dipenda prevalentemente da due fattori: il rapporto Z/f , che rappresenta il fattore di scala, e il rapporto B/Z , che rappresenta l’angolo tra le linee di riproiezione dei punti dello spazio sulle immagini. Angoli piccoli implicano più sovrapposizione tra le immagini, e quindi più risoluzione; per contro si ha un peggioramento della precisione. Per risolvere questa problematica, sono stati sviluppati algoritmi MVS volti a minimizzare l’errore di ricostruzione, quali ad esempio gli approcci multiple-baseline [10]. Tali algoritmi selezionano le coppie di immagini che garantiscono la miglior precisione, escludendo dalla ricostruzione le immagini con un basso rapporto B/Z .

Una volta garantita una sovrapposizione tale da permettere la riuscita del processo di “bundle adjustment”, ridurre ulteriormente la distanza tra le posizioni di scatto non comporta quindi benefici in termini di risoluzione.

Detto questo, “baseline” piccole sono comunque preferibili a “baseline” troppo elevate, poiché gli algoritmi MVS possono escludere le coppie di immagini che portano ad errori elevato, mentre gli algoritmi di “bundle adjustment” falliscono facilmente se le posizioni di scatto sono troppo distanti fra loro.

Requisiti per il soggetto di scatto

Oggetti trasparenti, uniformi, riflettenti o lucidi sono difficilmente individuabili con le tecniche di “computer vision”, poiché solitamente non presentano un numero sufficiente di features. Questi tipi di materiali, andrebbero fotografati con condizioni di cielo nuvoloso, oppure andrebbero cosparsi di talco o polvere. Sarebbe preferibile non riprendere nelle immagini oggetti in movimento, in quanto possono introdurre errori nel processo di “bundle adjustment”. Anche ombre variabili possono avere effetti negativi, ma il loro peso è mitigato dalla robustezza dei descrittori SIFT alle variazioni di luminosità. Oggetti completamente piani sono praticamente impossibili da identificare. Infine, gli algoritmi MVS possono ricostruire solo le geometrie visibili in almeno due camere.

Caratteristiche della fotocamera e delle foto

E’ preferibile scattare fotografie con un’unica camera a focale fissa, possibilmente reflex (SLR) data la miglior qualità delle immagini pro-

dotte e la configurabilità dei parametri di scatto. L'Apertura deve essere abbastanza piccola ($f > 11$) da garantire profondità di campo elevata; per contro, il tempo di scatto deve essere breve (< 215 per una lunghezza focale di 50mm) al fine di evitare mossi. Infine, il valore di ISO deve essere impostato al minimo richiesto per garantire sufficiente luminosità, evitando così di introdurre inutilmente rumore (sebbene le moderne camere SLR permettano di usare ISO fino a 3200 senza introdurre rumore apprezzabile). L'individuazione di un elevato numero di feature e un basso errore di misura richiedono immagini di risoluzione relativamente elevata (5 MPix o più), in formato TIFF non compresso o al più in formato JPG con bassa compressione.

Gli algoritmi di "bundle adjustment" assumono che il centro dell'immagine coincida con il centro del sensore (come in effetti dovrebbe essere). Di conseguenza, le immagini non devono essere ritagliate o trasformate geometricamente in quanto si introdurrebbe un disallineamento fra il centro dell'immagine e l'originale posizione del centro del sensore, che può portare a significativi errori di ricostruzione. Molti algoritmi SfM utilizzano i dati EXIF delle immagini per definire i parametri di ottimizzazione iniziali. Se i dati EXIF non sono disponibili, vengono scelti parametri di default, che tuttavia possono portare al fallimento della procedura, se troppo lontani dai parametri effettivi della camera utilizzata. E' quindi preferibile utilizzare immagini comprensive dei dati EXIF. Infine, le distorsioni delle lenti sono solitamente descritte con il modello di Brown, non adatto a lenti grandangolari o fish-eye. E' quindi consigliabile utilizzare lenti con lunghezza focale fissa e superiore a 20mm.

Regole di scatto

Al fine di garantire la buona riuscita del processo di ricostruzione è necessario pianificare con attenzione la sessione di scatto.

Deve essere assicurata una sovrapposizione minima del 20-30% fra le immagini ed il soggetto di interesse dovrebbe occupare la maggior parte dello spazio del frame (non è comunque necessario riprendere l'intero oggetto in ogni frame, in quanto gli algoritmi sono in grado di ricostruire l'oggetto intero dalle sue parti).

L'illuminazione deve essere sufficiente per mantenere bassi il tempo di scatto e l'apertura, e possibilmente non deve introdurre riflessi o contrasti che possano portare a una gamma dinamica eccessiva. Effettuare scatti da differenti punti di vista e con differenti orientazioni aumenta le possibilità di successo. Le fotografie

non vanno scattate muovendosi in linea retta verso il soggetto (effetto zoom) poiché i descrittori SIFT sono invarianti rispetto al cambiamento di scala, e quindi le immagini conterebbero tutte come una sola. Se utile, le immagini possono essere scattate da altezze differenti.

Soggetti isolati possono essere efficacemente rilevati con una panoramica a 360° intorno all'oggetto stesso, come illustrato in Fig. 3. Soggetti in piano, quali le facciate dei palazzi, possono essere rilevate scattando lungo linee parallele alle facciate (si veda la Fig.3, in basso). Gli spazi aperti possono essere rilevati mescolando panoramiche in cerchio e fotografie sparse (si veda la Fig. 4).

Figura 3 Strategia di scatto per un oggetto isolato (in basso) e per una facciata (in alto).

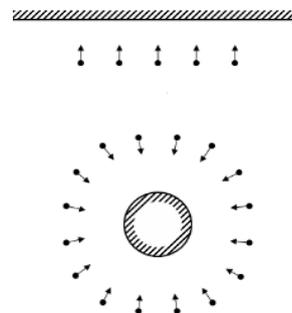


Figura 4 Esempio di rilevamento di uno spazio aperto. Le posizioni della camera sono raffigurate in blu.



Software

Esistono numerosi software, sia commerciali che gratuiti, per la produzione automatica di modelli 3D partendo da un insieme di immagini. VisualSfM [11], sviluppato dall'Università di Washington e Google Inc., è un'ottima soluzione per il "bundle adjustment" applicato a immagini casuali, ed è integrabile con il tool PMVS+CMVS[12] per la produzione del modello 3D denso. Altre soluzioni per il "bundle adjustment" sono: Arc3D, Autodesk 123D Catch e SfM Toolkit. SURE [13], sviluppato dallo "Institut für Photogrammetrie" dell'Università di Stuttgart,

implementa un ottimo algoritmo MVS. Soluzioni complete sono rappresentate da Photomodeler Scanner di Eos System Inc. (\$2495.00), 3D Flow Zephyr Pro (€2200.00) e Agisoft PhotoScan (standard \$149.00, pro \$3499.00).

III – Introduzione ai laser scanner

I laser scanner rappresentano l'evoluzione delle stazioni totali motorizzate, in quanto capaci di scansionare oggetti di interesse in modo completamente automatico, producendo nuvole di punti in scala di grigio o a colori. La scansione è di tipo ottico, con milioni di punti rilevati ogni secondo. La maggior parte dei laser scanner disponibili lavorano in posizione fissa (laser scanner statici), sebbene esistano modelli che funzionano in movimento (e.g. per scansioni da aeroplano). A seconda del principio di funzionamento, i laser scanner possono essere distinti in: a triangolazione, a tempo-di-volo, a luce strutturata, a ritardo di fase. Nel presente lavoro è stato utilizzato un laser scanner FARO Focus 3D S120. Una soluzione con costo relativamente ridotto (circa €30000.00) basata sul tempo di volo: la distanza fra il laser scanner e ogni punto misurato è calcolata misurando il tempo che intercorre fra l'emissione del fascio laser e il ritorno del segnale riflesso. Il FARO S120 misura fino a 1 milione di punti/s, a una massima distanza di circa 120 metri, e può anche acquisire le informazioni di colore.

Cenni sulla precisione

I laser scanner risentono sia dell'assorbimento dell'impulso laser da parte della superficie di misura, sia di eventuali fenomeni di diffrazione. Le superfici nere sono difficilmente misurabili, perché assorbono la maggior parte della luce incidente. Superfici chiare danno risultati più completi. Per contro, materiali catarifrangenti possono portare ad errori di misura dovuti alla forte diffrazione del raggio laser, come mostrato in Fig. 5. Un'altra problematica è legata all'impossibilità di selezionare i punti di rilievo, che può portare, ad esempio, a non individuare correttamente l'angolare di una parete (si veda la Fig. 6). Dal punto di vista della ricostruzione dei sinistri stradali questa limitazione può essere significativa nel caso in cui si vogliano identificare segni di rilievo sul piano stradale. In tal caso bisogna verificare che la risoluzione nei pressi delle tracce sia sufficiente. Uno studio molto esaustivo sull'accuratezza dei laser scanner è presentato in [14].

Figura 5 Rilievo laser scanner di segnaletica stradale. Si noti come la superficie riflettente risulti separata dal palo di sostegno.

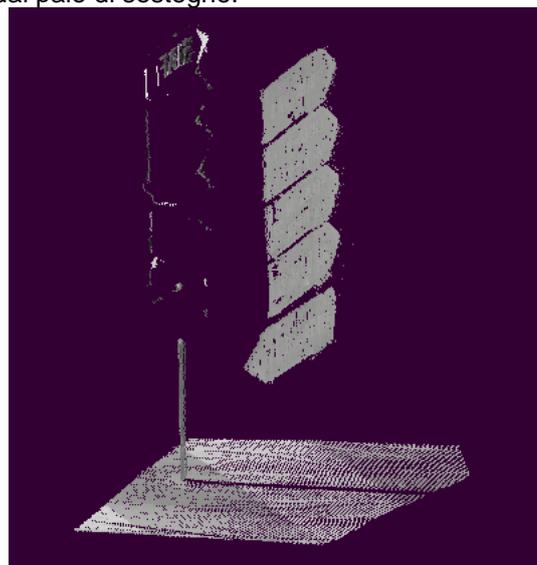
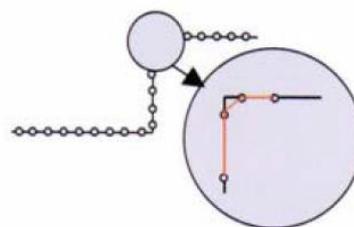


Figura 6 Esempio di errata individuazione di un vertice per un rilievo con laser scanner.



Rilievi multi-stazione

Un dispositivo laser è in grado di rilevare solo gli oggetti "visibili" dal centro di emissione del raggio. Inoltre, la distanza di misura nominale (circa 120m per il FARO Focus 3D 120S) è raggiungibile solo per inclinazioni prossime agli 0° rispetto all'asse del punto di emissione. Per angoli di incidenza di circa 60°, la distanza di misura è ridotta a circa 15m. Di conseguenza è spesso necessario ricorrere a rilievi multi-stazione per la documentazione delle scene dei sinistri. Le differenti scansioni vengono composte automaticamente utilizzando appositi software (e.g. FARO Scene 5.2), ma un accurato posizionamento richiede l'utilizzo di speciali "target" da collocare nella scena di interesse prima del rilievo (si veda la Fig. 10 più avanti). Nel caso di rilievi con numero di stazioni molto elevato (e.g. > 50) risulta indispensabile tenere traccia della posizione dello scanner durante le varie acquisizioni, tramite l'utilizzo di una stazione totale.

IV – Preparazione delle misure

Sono state effettuate numerose misurazioni per verificare l'accuratezza delle nuvole di punti

prodotte dagli algoritmi di computer vision, rispetto alle nuvole prodotte dal laser scanner.

Rilievo di una scena

Sono state rilevate due differenti ambientazioni: una porzione di una pista da motocross e una porzione (di 24m x 16m) di un parcheggio.

Relativamente al parcheggio, sono state eseguite due sessioni di misura:

- Sessione 1: rilievo con stazione totale Leica TPS 1200+; rilievo con laser scanner FARO Focus S120; rilievo fotografico con Canon EOS 6D (focale 24m)
- Sessione 2: rilievo fotografico con camera Panasonic Lumix e rilievo laser scanner di una porzione del parcheggio con elementi da ricollocare tramite mappatura del colore.

Nella prima sessione, è stato effettuato un rilievo metrico con stazione totale, volto a verificare la validità del rilievo effettuato con laser scanner (che è risultato accurato con precisione inferiore al cm). Nella seconda sessione, è stato effettuato un nuovo rilievo al fine di provare, in via preliminare, le possibilità ottenere informazioni metriche tramite la rimappatura del colore da un fotografia sul modello tridimensionale.

La pista di motocross è stata scansionata utilizzando il laser scanner FARO Focus S120 e una Canon EOS 6D con lenti EF 24-70mm f/4L IS USM (utilizzando la focale 24mm).

Rilievo dei veicoli

I rilievi fotografici dei veicoli sono stati eseguiti effettuando panoramiche a 360° intorno ai mezzi (si veda la Fig. 7).

Figura 7 In blu sono raffigurate le varie posizioni della camera per il rilievo della Toyota Yaris con la Canon EOS 6D.



Le fotografie sono state scattate ad una altezza fissa dal suolo e alcuni dettagli dei veicoli sono stati ripresi con fotografie aggiuntive.

Sono stati rilevati due veicoli: un'autovettura Toyota Yaris e un motociclo BMW F800 GS, utilizzando macchine fotografiche di qualità differente, in modo di verificare l'incidenza della sagoma del veicolo e della tipologia di fotocamera sulla qualità del risultato (si veda la Tabella 1).

Tabella 1 Dati delle fotocamere utilizzate.

Mo dello	Lenti	Sensore LxH [mm]	Risoluzione LxH [px]	Pixel Pitch [µm]
Canon EOS 6D	EF 50mm f/1.4 USM	35.78 x 23.85	5472x3648	6.54
Nikon 1 J1	VR 10-30mm f/3.5-5.6	13.2 x 8.8	3872 x 2592	3.4
Panasonic Lumix DMC-LS80	f/5.5	8.12 x 6.09	3264 x 2448	2.48
Apple iSight for iPhone 5	4mm f/2.2	4.89 x 3.67	3264*2448	1.5

La distanza di ogni fotocamera dai veicoli è stata scelta in modo da contenere l'intera altezza dei mezzi all'interno del frame (si veda la Fig. 8).

Figura 8 Una immagine per il rilievo fotografico della Toyota Yaris.



La distanza ottima fra le posizioni di scatto è stata poi scelta in base alla eq. (1) e tenendo conto di tutte le considerazioni esposte in precedenza (si veda la Fig. 9). I dati relativi alle varie sessioni di scatto sono riportati in Tabella 2. Per ogni veicolo, è stato acquisito un rilievo metrico di riferimento con il laser FARO Focus 3D X120.

Figura 9 Esempio di sovrapposizione tra due scatti in successione per l'autoveicolo Toyota Yaris.



Tabella 2 Dati relativi alle sessioni di scatto.

Camera	Veicolo	Distanza dal veicolo [m]	Baseline [m]	Numero di foto
Canon Eos 6D	BMW	2	0.6	93
	Yaris	3	0.5	87
Nikon 1	Yaris	2	0.8	84
Panasonic Lumix	BMW	1.5	0.7	62
	Yaris	2	0.7	58
iPhone	Yaris	1.5	0.7	63

In Fig. 10 è mostrato il set-up per il rilievo del motociclo BMW. Si noti la presenza di due stecche metriche, utilizzate per la messa in scala del modello ottenuto con gli algoritmi di computer vision, e di tre sfere bianche montate su treppiedi, utilizzate per la composizione dei vari rilievi effettuati con il laser scanner.

Figura 10 Set-up per le misure relative al motociclo BMW.



V – Precisione delle misure.

Come introdotto nel paragrafo precedente, la precisione delle nuvole di punti prodotte con i rilievi fotografici è stata valutata utilizzando come riferimento la nuvola prodotta dal laser scanner. Le immagini sono state processate utilizzando il software Agisoft Photoscan, selezionato dopo numerosi test fra i vari programmi disponibili, in virtù della qualità dei risultati prodotti, della semplicità di utilizzo, della configurabilità e del

costo di acquisto. La messa in scala dei modelli ottenuti con Photoscan e il loro allineamento alle nuvole prodotte dal laser scanner sono stati effettuati tramite il software gratuito Cloud Compare (<http://www.danielgm.net/cc/>).

Il software include un plug-in per il calcolo della distanza punto-per-punto fra due nuvole, che è stato utilizzato per verificare l'affidabilità delle nuvole prodotte con il software Photoscan.

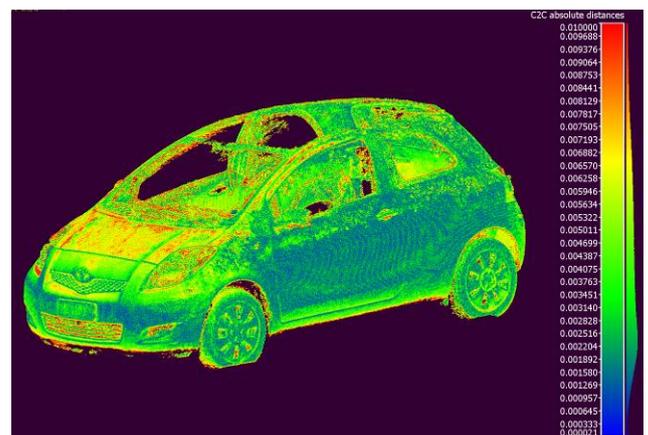
Veicoli

Le nuvole di punti derivanti dai rilievi fotografici con camere di alta qualità sono risultate precise (per gli scopi di una ricostruzione) ed estremamente dense. Come illustrato in Tabella 3 per la nuvola della Toyota Yaris ottenuta dalla fotocamera Canon, oltre il 90% dei punti distano meno di 1cm dalla nuvola ottenuta con il laser scanner. Una rappresentazione grafica della distanza tra le due nuvole è riportata in Fig. 11.

Tabella 3 Precisione delle nuvole ottenute dai rilievi fotografici per il veicolo Toyota Yaris.

Camera	Canon 6D	Nikon1	Panasonic Lumix	iPhone
Distanza media dalla nuvola laser scanner	0.7cm	0.8cm	1cm	1.3cm
Punti con errore inferiore a 1cm	91,7%	82,8%	81,55%	68,83%
Punti errati	0,03%	0,65%	1,2%	5,70%
Punti rumorosi	5,02%	5,67%	8,53%	9,18%
Punti Totali	4329846	1327078	1287786	652860

Figura 11 Distanza tra la nuvola ottenuta con la Canon e la nuvola di riferimento (colori più caldi indicano distanze maggiori). Immagine tratta da Cloud-Compare.



In Fig. 12 è raffigurata la nuvola di punti della Toyota derivante dal rilievo fotografico eseguito con la Canon.

Figura 12 Nuvola di punti della Toyota ottenuta dal rilievo con la camera Canon. Si noti come le parti trasparenti non siano state rilevate, così come il tetto, in quanto parallelo all'asse della camera.



Dalla Tabella 3 notiamo chiaramente come la precisione delle nuvole si riduca con la qualità della camera. Inoltre camere di qualità inferiore comportano più rumore e più punti errati, cioè punti collocati a distanze rilevanti dalla superficie del mezzo. Si noti infine come la densità delle nuvole decresca con la diminuzione della qualità della camera.

In Tabella 4 sono riportati i risultati ottenuti per il motociclo BMW.

Tabella 4 Precisione delle nuvole ottenute dai rilievi fotografici per il motociclo BMW.

Camera	Canon 6D	Nikon1	Panasonic Lumix	iPhone
Distanza media dalla nuvola laser scanner	0.7cm		0.8cm	
Punti con errore inferiore a 1cm	86,2%		85,8%	
Punti errati	0,04%		3,06%	
Punti rumorosi	2,08%		9,54%	
Punti totali	1930886		217716	

Come osservabile in Fig. 13, la nuvola di punti del motociclo ottenuta con la camera Canon risulta significativamente migliore della nuvola ottenuta con la Panasonic Lumix, sia in termini di densità di punti, che in termini di rumorosità e di quantità di dettagli rilevati.

Figura 13 In alto il modello della BMW ottenuto con la camera Canon, in basso quello ottenuto dalla fotocamera Panasonic Lumix.



Scena

Per il parcheggio la nuvola di punti ottenuta con le tecniche di "computer vision" è risultata significativamente più rada di quelle ottenute per i veicoli. Tale peggioramento è dovuto a due fattori: l'asfalto rappresenta un materiale non ideale per il riconoscimento delle feature e il piano viabile risulta molto inclinato rispetto all'asse della fotocamera. Comunque sia, le zone con contrasto elevato sono state ben individuate (si veda la Fig. 14). La sovrapposizione fra il modello laser scanner e la nuvola ottenuta tramite CV è mostrata in Fig. 15. Si noti come i dati fotogrammetrici siano affidabili.

Figura 14 Nuvola di punti del parcheggio ottenuta dalle tecniche di CV (in grigio le posizioni di scatto). L'immagine è tratta dal software Meshlab.

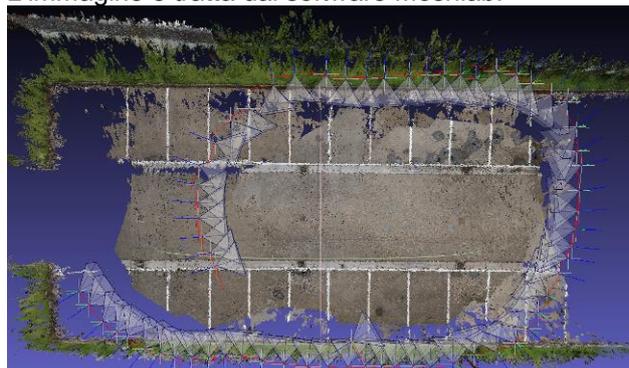
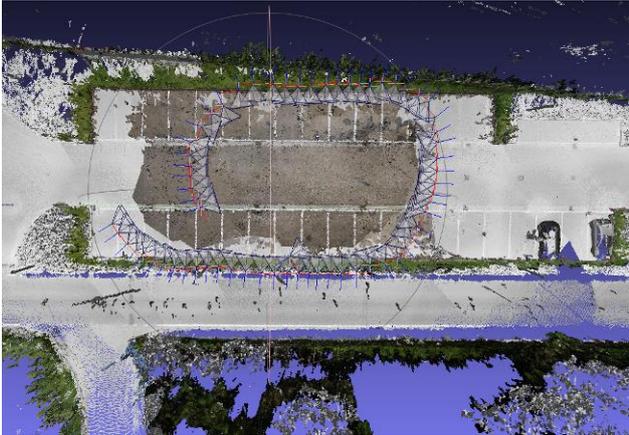


Figura 15 Modello del parcheggio ottenuto con le tecniche di CV sovrappreso al modello laser scanner (in grigio). Immagine tratta dal software MeshLab.

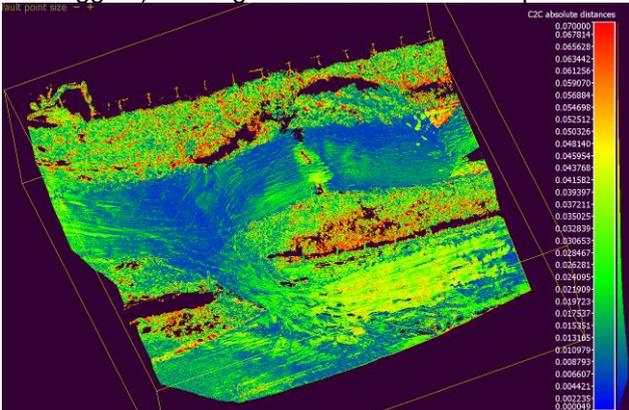


La nuvola di punti relativa al rilievo fotografico della pista di motocross è più densa e completa (13 895 741 punti), come visibile in Fig. 16. Tale risultato è dovuto al profilo irregolare della superficie in terra e alla variabilità della geometria del percorso. Più del 90% dei punti distano dalla nuvola laser scanner meno di 7cm a fronte di un'area scansionata di 35m x 22m (si veda la Fig. 17). L'errore medio è di 2cm.

Figura 16 Nuvola di punti 3D ottenuta dal rilievo fotografico della pista di motocross.



Figura 17 Distanza fra la nuvola di punti della pista ottenuta con il rilievo fotografico e la nuvola ottenuta con il laser scanner (colori più caldi indicano distanze maggiori). Immagine tratta da CloudCompare



Mappatura del Colore

Durante l'attività di ricostruzione, spesso non si dispone di informazioni metriche relative alla collocazione di tracce sul piano viabile che risultano invece visibili nei rilievi fotografici. In principio, utilizzando tecniche di SfM, è possibile (a) mappare le fotografie di un sinistro all'interno del modello 3D della scena (acquisito successivamente alle fotografie) e (b) colorare il modello in base alle fotografie stesse, traducendo così le informazioni di colore in informazioni metriche (tracce di pneumatico, incisioni sull'asfalto, liquidi, etc.). Con il presente studio, si è voluta effettuare una prova di fattibilità della procedura, utilizzando il software open-source MeshLab [15]. Il software è rivolto all'elaborazione di nuvole di punti e mesh ed è sviluppato dal Dipartimento di Computer Vision del CNR di Pisa. Inizialmente è stata effettuata una operazione di "bundle adjustment" fra i due set di immagini acquisiti nelle due sessioni di rilievo del parcheggio (cioè le immagini "con" e le immagini "senza" gli elementi da rimappare, come mostrato in Fig. 18). Non tutte le immagini sono risultate correttamente collocate in seguito alla procedura di "bundle adjustment", perché alcune non presentavano abbastanza feature. Tuttavia, ne sono state posizionate un numero sufficiente per la procedura di ricolorazione.

Figura 18 Parcheggio senza (in alto) e con (in basso) gli elementi da rimappare.



Successivamente sono stati importati in MeshLab ai fini dell'elaborazione: le posizioni delle camere, le immagini (corrette dalle distorsioni) e i rilievi laser scanner del parcheggio. In MeshLab, le immagini sono state allineate al mo-

dello 3D, ottenendo la possibilità di osservare la nuvola “attraverso” le immagini (si veda la Fig. 19).

Figura 19 Scena vista attraverso la camera. Il modello 3D è rappresentato in scala di grigi. Immagine tratta dal software MeshLab.



Dopo un primo allineamento di massima, la posizione delle immagini rispetto al modello 3D è stata ottimizzata con il “mutual information plugin” [16] di MeshLab. Questo algoritmo identifica per ogni immagine una funzione statistica S che descrive la qualità del posizionamento (in accordo a numerosi parametri) e ottimizza la collocazione dell’immagine rispetto al modello cercando il valore massimo per la funzione S . MeshLab dispone anche di un plugin più generale [17], che estende la procedura a tutte le immagini in contemporanea, la cui funzionalità sarà verificata in lavori futuri.

Figura 20 Modello 3D colorato dalla Fig. 18 (bassa).

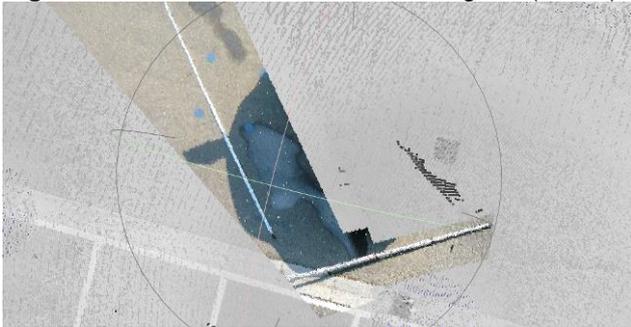
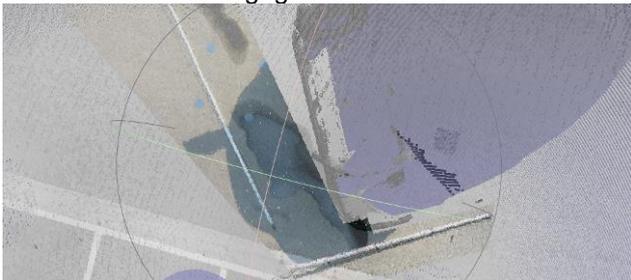


Figura 21 Sovrapposizione tra la nuvola ricolorata e la nuvola in scala di grigi delle tracce.



Concluso l’allineamento, le informazioni RGB delle immagini sono state utilizzate per ricolora-

re il modello laser scanner in scala di grigi. In Fig. 20, è visibile il risultato della colorazione del modello con parte della Fig. 18 (bassa). Mentre in Fig. 21 è mostrato il confronto tra la nuvola ricolorata e la nuvola in scala di grigi delle tracce. Si noti come le tracce derivanti dalla ricolorazione siano ben sovrapposte alla posizione reale delle tracce, acquisita con il laser scanner. Questa prima analisi ha quindi verificato la fattibilità della ricolorazione. Considerazioni relative all’affidabilità della procedura e ai limiti di applicazione saranno indirizzati in lavori futuri.

VI – Applicazioni a casi reali

Saranno discussi alcuni aspetti pratici per l’utilizzo quotidiano delle procedure descritte. Un rilievo con laser scanner richiede, per ogni punto stazione, dai 3 ai 6 minuti nel caso di scansione in scala di grigi e dai 5 ai 10 minuti per una a colori. Nella maggior parte dei casi sono richieste stazioni multiple e per rilievi molto ampi è obbligatorio l’utilizzo di una stazione totale che tenga traccia della posizione dello scanner durante il percorso (questa operazione richiede un tempo di set-up di circa 20 minuti); in caso contrario, l’allineamento delle scansioni in post-elaborazione rischia di fallire. I rilievi fotografici sono più rapidi in termini di tempo di acquisizione: un veicolo può essere rilevato in 5-6 minuti e una scena di 50m x 50m può essere ripresa in 15-20 minuti. Per contro, si ha una fase di post-elaborazione più lunga. Il “bundle adjustment” e la “MVS” sono procedure automatiche ma richiedono fra i 30-60 minuti e i 30-240minuti, rispettivamente (a seconda del numero e della risoluzione delle foto). Inoltre è necessario scalare ed orientare correttamente il modello 3D dopo la sua costruzione (operazione da eseguire manualmente che può richiedere fino a 20 minuti).

Dai test effettuati, l’utilizzo del laser scanner è preferibile per i rilievi degli spazi aperti, anche se i rilievi fotografici possono risultare un valido complemento per la documentazione della scena (una volta allineate al modello 3D).

Per quanto concerne il rilievo dei veicoli, sebbene i laser scanner siano più precisi, le tecniche di CV possono a volte risultare preferibili. Il rilievo fotografico è infatti più semplice e rapido da eseguire e permette di ottenere buoni risultati anche quando il mezzo è difficilmente accessibile o parzialmente ostruito.

Rilevare un veicolo con un laser scanner richiede almeno 4 stazioni (una per ogni vertice). Inoltre, rilevare motocicli naked o veicoli simili può richiedere scansioni aggiuntive, in quanto i

telai e le piccole componenti richiedono di collocare lo scanner molto vicino all'oggetto.

Integrazione con il software PC-Crash

PC-Crash è un software per la ricostruzione dei sinistri stradali sviluppato dalla ditta DSD (www.dsd.at). Dalla versione 10.0, PC-Crash permette di importare nuvole di punti di scene e veicoli. Importare una scena in 3D consente di analizzare in dettaglio i punti di vista dei conducenti e di produrre superfici stradali complete e fedeli all'effettivo stato dei luoghi. Le nuvole dei veicoli consentono invece di identificare con precisione la configurazione d'urto (si veda la Fig. 21). Infine, utilizzando il modulo per il calcolo dei valori EBS/EES [18] di PC-Crash, l'energia di deformazione può essere calcolata con procedure semi-automatiche.

Figura 22 Modalità di collisione tra due veicoli. Immagine tratta da PC-Crash per nuvole di punti acquisite con il FARO Focus S120.



VII - Conclusioni

I test effettuati hanno mostrato come i laser scanner e le moderne tecnologie di "computer vision" consentano di ottenere informazioni complete ed affidabili sulla scena di un sinistro e sulle deformazioni ai veicoli coinvolti. Per il rilievo degli spazi aperti, i laser scanner si sono rivelati più performanti delle tecniche di CV, che forniscono i risultati migliori per applicazioni a corta distanza. Comunque sia, i rilievi con laser scanner possono essere vantaggiosamente integrati con i rilievi fotografici al fine di ottenere descrizioni estremamente complete del soggetto di interesse. Infine, i modelli ottenuti possono essere sfruttati all'interno di software per la ricostruzione di sinistri stradali, come PC-Crash, al fine di analizzare con maggiore accuratezza la dinamica di un sinistro.

Bibliografia

1. Vangi D., Ricostruzione della dinamica degli incidenti stradali, Firenze University Press (2008), ISBN 978-88-8453-783-6.

2. Burg H., Moser A., Handbook of Accident Reconstruction, Editors Heinz Burg, Andreas Moser, 2013, ASIN B00B2NN3VM
3. Snavely N., Seitz S. M., Szeliski R., Modeling the World from Internet Photo Collections, International Journal of Computer Vision, 2007, DOI 10.1007/s11263-007-0107-3
4. Hartley R., Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, 2003, ISBN 978-0-511-18618-9.
5. Al-kheder S., Al-shawabkeh Y., Haala N., Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser scanning and digital photogrammetry, Journal of Archaeological Science 36 (2009) 537-546
6. Lowe D. G., Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, International Journal of Computer Vision, 2004
7. Triggs B., McLauchlan P. F., Hartley R.I., Fitzgibbon A. W., Bundle Adjustment - A Modern Synthesis, Vision Algorithms'99
8. Wu C., Agarwal S., Curless, B., Seitz M. S., Multicore Bundle Adjustment, CVPR 2011
9. Okutomi M., Kanade T., A Multiple-Baseline Stereo, IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence, 1993
10. Wenzel K., Rothermel M., Fritsch D., Haala N., Image acquisition and model selection for multi-view stereo, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2013
11. Wu C., Towards Linear-time Incremental Structure from Motion
12. Furukawa Y., Ponce J., Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis
13. Wenzel K., Rothermel M., Fritsch D., Haala N., SURE: photogrammetric surface reconstruction from imagery
14. Boehler W., Bordas Vicent M., Marbs A., Investigating laser scanner accuracy
15. Cignoni P., Callieri M., Corsini M., Dellepiane M., Ganovelli F., Ranzuglia G., MeshLab: an OpenSource-Mesh Processing Tool, Eurographics Italian Chapter Conference, July 2008
16. Corsini M., Dellepiane M., Ponchio F., Scopigno R., Image to Geometry Registration: a Mutual Information Method exploiting Illumination related Geometric Properties, Computer Graphics Forum, vol. 28 (7), 2009
17. Dellepiane M., Cavarretta E., Cignoni P., Scopigno R., Assisted Multi-view Stereo reconstruction 3DTV-Conference, 2013 International Conference on, page 318 - 325 - July 2013
18. PC-Crash Operating and Technical Manual

Contatti

P.I. Andrea Del Cesta, Ing. Francesco Del Cesta
Via F. Turati, 35/P
56017, San Giuliano Terme (PI), Italia
www.studiodelcesta.com

e-mails:

andreadelcesta@studiodelcesta.com

francesco@studiodelcesta.com

tel: +39 050 81 04 50

fax +39 050 81 27 00