

DRONI PER LA MODELLAZIONE 3D E PER L'INDIVIDUAZIONE DEGLI AMMALORAMENTI NELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI*

Vincenzo Barrile, Antonino Fotia, Giovanni Leonardi, Rocco Palamara

Dipartimento DICEAM, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Feo di Vito, 89122, Reggio Calabria, Italia

vincenzo.barrile@unirc.it; ing.fotia@gmail.com; giovanni.leonardi@unirc.it; rocco.palamara@unirc.it

Abstract

The deteriorations of road infrastructure, that is, the loss of initial performance in the aftermath of vehicular traffic, both in the assessment of functional status and in natural agents (frost-thaw, earthquake, salty, etc.) has led to the need for development of non-destructive tests designed to provide useful elements without damaging the work. In view of this criticality, it is necessary to devise an effective pavement maintenance management system with respect to economic constraints with the aim of ensuring adequate standards. In this respect, this note deals with a system for the production of 3D models based on the acquisition of digital images, by means of an automatic flight drone, applied to the analysis of a road infrastructure located in the territory of the Province of Reggio Calabria. Later processing of images was carried out via commercial software, based on special Structure from Motion (SfM) techniques. The SfM is a significant advance in the field of both aerospace and terrain, with results, timing and quality, comparable to those obtainable through more traditional data acquisition methods.

KEY WORDS: *Drones, Road Pavement, Maintenance.*

1. Introduzione

Nel corso degli ultimi anni si sono resi disponibili degli algoritmi per la ricostruzione 3D attraverso immagini di cui si è fatto largo uso sia nel campo della Geomatica, per la restituzione di modelli DEM, che in ambito archeologico per la modellazione dei beni culturali [1], tuttavia nel campo delle infrastrutture, risulta essere un tema emergente, non ancora pienamente sviluppato [2, 3, 4]. La SfM è stata utilizzata con successo in una vasta gamma di applicazioni, per generazione di fotogrammetrie, rilievo e mappature topografiche, per attività di controllo, nonché per la valutazione dei danni a seguito di catastrofi [5, 6, 7, 8].

Diversi studi hanno evidenziato la precisione e l'efficienza di questa tecnica, mettendo in risalto pregi e difetti.

Lo studio qui condotto è finalizzato allo sviluppo di un approccio scientifico indirizzato alla modellazione 3D di un'opera infrastrutturale volta non solo alla ricostruzione geometrica, ma anche all'individuazione visiva degli ammaloramenti superficiali, nonché ad una analisi globale sullo stato di conservazione dell'opera.

Nell'individuazione delle cause di degrado bisogna tenere conto delle condizioni di esercizio e, naturalmente, dei materiali costituenti l'opera. In linea generale è possibile individuare alcune cause tipiche di degrado, riassunte brevemente nei seguenti punti principali: aggressività dell'ambiente, durabilità dei materiali, errori o carenze da

*Il documento nella sua interezza è frutto del lavoro congiunto dei quattro autori.

imputare alla realizzazione.

Le indagini non distruttive risultano quindi un ottimo strumento per la valutazione dello stato di conservazione delle opere e per la determinazione delle proprietà fisiche e meccaniche degli elementi strutturali che ne compongono l'opera, nonché per l'ottenimento di informazioni dettagliate sul rilievo geometrico delle strutture e sugli elementi presenti (segnaletica orizzontale e verticale guardrail, ... etc) [9].

Peraltro l'impiego del Laser Scanner è una tecnica ormai consolidata per la modellazione delle strutture e ha ormai raggiunto risultati interessanti e precisioni notevoli [10]. Attraverso tale tecnica, partendo da una sorgente laser, è possibile effettuare la scansione finalizzata al rilievo delle coordinate tridimensionali di un numero elevatissimo di punti (nuvola di punti), in modo automatico, consentendo la ricostruzione tridimensionale dell'oggetto o della superficie di interesse.

Recentemente, attraverso la SfM che ricalca quanto avviene per la fotogrammetria stereoscopica (dove la generazione della struttura 3D viene risolta e definita attraverso la sovrapposizione di immagini), la ricostruzione della scena, il posizionamento e l'orientamento della telecamera vengono risolti automaticamente dal software utilizzato per l'elaborazione, velocizzando i tempi di lavoro e abbattendone i costi [11, 12, 13, 15, 16].

2. Oggetto dello studio

Per la presente nota è stato rilevato un ponte in c.a. sito al km 517,20 della SS 18 nel Comune di Villa San Giovanni in provincia di Reggio Calabria (vedi Figg. 1a, 1, b, 2). L'opera scelta è costituita da una struttura in muratura, composta da tre campate con luce 6,60 m e due pile larghe 1,50 m con una lunghezza e una larghezza rispettivamente di 27 m e di 6,30 m.

A tale struttura, a seguito di adeguamento e ampliamento della sezione stradale, ne è stata affiancata una nuova in c.a., sempre a tre campate, con luci di 7,20 m, larghezza pari a 4,20 m e, anch'essa, lunghezza di 27 m. Sono riscontrabili in maniera diffusa, per quanto riguarda l'opera in muratura, elementi mancanti o rotti, tracce di efflorescenza e un degrado generale dovuto al tempo e ad una scarsa manutenzione.

La parte in c.a. presenta tratti affetti da dilavamento del calcestruzzo, efflorescenze, espulsione del copriferro, riprese di getto, ammaloramenti, questi imputabili ad una non corretta esecuzione dell'opera. La pavimentazione stradale presenta invece uno stato di usura accentuato, con fessurazioni longitudinali, ondulazioni e buche.



Fig. 1a - Inquadramento del ponte sito in Villa San Giovanni
(fonte: propria elaborazione)



Fig. 1b - Inquadramento del ponte sito in Villa San Giovanni
(fonte: propria elaborazione)



Fig. 2 - Particolare del ponte di Villa San Giovanni
(fonte: propria elaborazione)

3. Gli Aeromobili a Pilotaggio Remoto

Ormai nell'accezione comune si associano al termine APR i velivoli multi-pala che più comunemente sono reperibili sul mercato, anche se, a rigore, il termine si estende a qualunque mezzo capace di spostarsi con un elevato livello di autonomia nel controllo del proprio comportamento in relazione alle situazioni ambientali in cui si muove. Questa tipologia di droni esiste ormai da parecchi anni sul mercato ma, al momento, le novità che li portano alla ribalta sono:

- il crollo dei prezzi e la grande varietà di modelli disponibili;
- la loro maggiore affidabilità e versatilità;
- la loro conseguente diffusione decisamente più capillare.

Attualmente, infatti, un APR in grado di effettuare rilievi fotografici utili per gli obiettivi di ricostruzione analizzati nel presente articolo, ha costi anche inferiori al migliaio di euro, risultando così fruibile da un sempre maggiore numero di professionisti.

Il loro basso costo impatta anche sul costo di rilievo, che diviene decisamente più economico rispetto a quelli legati all'utilizzo di strumenti di ingegneria più tradizionali, ed è auspicabile che la cultura inerente detti velivoli divenga sempre più parte della formazione universitaria, come già lo sono gli altri strumenti.

Tuttavia è importante sottolineare come i droni non siano dei semplici aeromodelli, e richiedono una preparazione all'uso e alla loro manutenzione professionale. Inoltre, il loro utilizzo è regolato in modo stringente in gran parte del mondo occidentale, e ogni rilievo deve essere fatto nel rispetto delle norme vigenti, come nel caso italiano, con il regolamento emesso da ENAC e recentemente aggiornato. L'imperizia e la negligenza possono portare a operare in modo pericoloso per sé e per gli altri, rischiando anche di incorrere in reati sia di tipo amministrativo che di tipo penale.

4. Rilievo e ricostruzione delle opere attraverso SfM

Il principio sul quale si fonda la SfM ricorda quanto accade per la fotogrammetria stereoscopica digitale, in quanto, la generazione del 3D avviene per sovrapposizione di immagini. Sia il posizionamento che l'orientamento della camera viene, in maniera automatica, risolto dal software impiegato, mediante particolari algoritmi, e la ricostruzione del modello avviene per mezzo di nuvola di punti. Poiché punti notevoli (*tie points*) e target vengono individuati dal software in maniera del tutto automatica, occorre avere cura che gli scatti vengano effettuati in modo tale da garantire un elevato grado di sovrapposizione e quindi un'adeguata qualità del modello.

Il flusso di lavoro per l'ottenimento di una nuvola di punti e del relativo modello risulta essere molto semplice.

Attraverso l'algoritmo SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) [17], vengono individuati ed estratti i punti notevoli presenti negli scatti fotografici per mezzo di operatori di interesse che, all'interno di particolari zone della scena inquadrata, identificano i punti con uguali caratteristiche di illuminazione, colore, rotazione, etc...

Una volta individuati i punti omologhi, questi vengono accoppiati attraverso l'operazione di matching, utilizzando il concetto di distanza euclidea. Individuato un punto nella prima scena avente determinate caratteristiche (luminosità, colore, ecc.), l'omologo nella scena successiva risulta essere quello che maggiormente si avvicina a quello in esame. La fase successiva prevede la generazione del modello 3D, determinando i parametri di orientamento interno della camera utilizzata per le riprese.

Il bundle adjustment ha il compito di limitare gli errori in fase di ricostruzione. Ultima fase è la generazione del modello attraverso una nuvola densa. Qui vengono utilizzati gli algoritmi di dense image matching. Vengono distinti in due tipi, algoritmi di *area based matching* (AMB), che lavorano sul confronto statistico dell'intensità di grigio presente nelle varie foto e che non prevedono l'estrazione delle feature trattando, appunto, l'intensità del grigio; e algoritmi di *feature based matching* (FBM) che prima ricercano le feature comuni e successivamente eseguono l'estrazione. La combinazione di entrambi garantisce risultati ottimali, ma allunga notevolmente i tempi di elaborazione. Per l'acquisizione delle foto da utilizzare nella ricostruzione 3D è stato impiegato il drone Mavic Pro della DJI equipaggiato con una fotocamera stabilizzata 4k con sensore da 12 Mpx che, grazie alle sue caratteristiche tecniche e alla maneggevolezza nell'impiego, ben si presta ad usi di questo tipo.

I voli per i diversi rilievi sono stati impostati in modalità automatica, grazie alla redazione di piani di volo a 20, 25 e 30 m, con camera ortogonale e inclinata a 70°.

La possibilità del controllo in tempo reale del drone attraverso una ground station ha permesso di avere riprese dettagliate e precise delle opere indagate, monitorando la posizione, la quota e lo stato del dispositivo (Vedi Figg. 3a, 3b).



Fig. 3a - Screen dello schermo della ground station con piano di volo (fonte: propria elaborazione)



Fig. 3b - Screen dello schermo della ground station con piano di volo
(fonte: propria elaborazione)

N° Foto	322	N° Facce	22042863
N° Punti Nuvola Rada	2218887	N° Vertici	11022176
N° Punti Nuvola Densa	100768566	Tempo rilievo	1,00 h
Tempo elaborazione	27,80 h		

Tab. 1 - Riepilogo caso studio ponte di Villa San Giovanni
(fonte: propria elaborazione)

In relazione alle caratteristiche superficiali della pavimentazione è facile osservare come l'esplorazione del modello 3D restituito (previa applicazione di un filtro colore per meglio evidenziare le variazioni cromatiche) permette, anche attraverso la semplice analisi visiva, di individuare le macro lesioni e l'assenza di segnaletica orizzontale e verticale, a secondo della qualità della camera installata e quindi alla sua risoluzione (vedi Fig. 6).



Fig. 6 - Cambio cromatico per far risaltare le difettosità all'analisi visiva
(fonte: propria elaborazione)



Fig. 4 - Texture del ponte di Villa San Giovanni rilievo da drone
(fonte: propria elaborazione)



Fig. 5 - Texture del ponte di Villa San Giovanni rilievo da drone
(fonte: propria elaborazione)

Per un'individuazione degli ammaloramenti superficiali il modello 3D puo' essere filtrato e segmentato, attraverso l'utilizzo di un semplice algoritmo automatico di fotointerpretazione, (utilizzando dei filtri colore che permettono di segmentare pixel per pixel l'immagine in funzione delle variazioni cromatiche presenti nell'immagine) che permette di evidenziare zone dell'asfalto con colorazioni differenti (difettosità macro o buche) e quindi segmentare la zona (vedi Fig. 7).

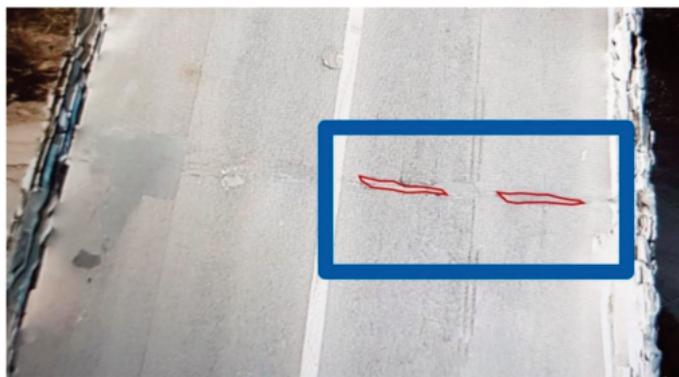


Fig. 7 - Individuazione delle difettosità (buche) su una porzione limitata del modello attraverso segmentazione con filtro colore
(fonte: propria elaborazione)

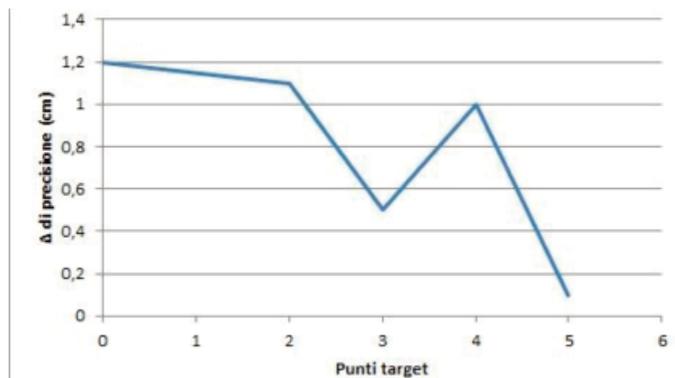


Fig. 9 - Variazione di precisione rispetto al rilievo topografico tradizionale
(fonte: propria elaborazione)

5. Confronto con TLS

Per verificare in termini di precisione metrica e visibilità cromatica quanto ottenuto dalla combinazione di APR e PhotoScan, l'utilizzo della più collaudata tecnica laser scanning ha permesso di ricostruire per altra via un modello 3D del ponte di Villa San Giovanni mediante nuvola di punti, ed effettuare un confronto in termini di precisione, tempi e costi di modellazione fra le due metodologie *image based* e *range based*.

Per la scansione dell'opera è stato utilizzato un laser scanner terrestre Riegl LMS-Z420i. Il rilievo si è strutturato con la scelta delle posizioni dello strumento, il suo set-up, la sua calibrazione. Segue l'acquisizione dei dati e la fase di elaborazione dei dati con la registrazione delle nuvole di punti, la filtrazione, la pulizia dei dati, la modellazione e la creazione della mesh tridimensionale (vedi Fig. 8).



Fig. 8 - Modello 3D restituito da Laser scanner
(fonte: propria elaborazione)

La valutazione delle precisioni delle due metodologie di rilievo utilizzate nella presente nota si è basata sul rilievo di target (collocati sia sulle facciate del ponte sia sul manto stradale) e sulla variazione della precisione dei risultati ottenuti rispetto ad un rilievo topografico tradizionale con stazione totale automatizzata di alta precisione, Leica TCRA 1201 (vedi Fig. 9).

6. Conclusioni

Nel presente lavoro il rilievo con APR e l'approccio SfM sono stati utilizzati per il rilievo di un'opera d'arte sita in provincia di Reggio Calabria. L'approccio SfM ha i suoi punti di forza nella rapidità, nel basso costo e nella procedura altamente automatizzata per la produzione di modelli 3D. I tempi di elaborazione risultano notevolmente influenzati dalla potenza di calcolo a disposizione. Con riferimento all'approccio SfM, va evidenziato che, con opportuni accorgimenti in fase di rilievo (scelta del tipo di fotocamera, numero e posizione degli scatti, luminosità e contrasto) la nuvola di punti e, di conseguenza, il modello che ne deriva, risultano avere una precisione del tutto paragonabile a quanto ottenibile attraverso il rilievo TLS, ottenendo, nei casi in esame, errori massimi nell'ordine di ± 3 cm rispetto al dato reale.

Nella generazione delle nuvole di punti è stata riscontrata una sovrabbondanza di informazioni che, in alcuni casi, si è tradotta nella produzione di "rumore" all'interno della generazione del modello. Ancora, la tecnologia SfM/APR può essere utilizzata con successo per una prima valutazione visiva delle condizioni della pavimentazione stradale, permettendo di individuare sia la presenza di macroammaloramenti, che fornendo informazioni sulla presenza di segnaletica orizzontale e verticale.

Questa nota vuole dunque presentare una metodologia economica e speditiva per avere informazioni immediate e a basso costo sullo stato generale della pavimentazione e sulla presenza di elementi stradali (segnaletica orizzontale e verticale, guardrail, etc...).

Ovviamente l'utilizzo di macchine attrezzate permetterebbe di avere una precisa, dettagliata e metricamente certa valutazione sia dello stato funzionale dello stato di efficienza della segnaletica soprattutto orizzontale, con costi e tempi di acquisizione e restituzione maggiori.

Bibliografia

- [1] Bae H., Golparvar-Fard M., White J., *High-precision vision-based mobile augmented reality system for context-aware architectural, engineering, construction and facility management (AEC/FM) applications*. In: Visual. Eng., vol. 1 (1), pp. 1-13, 2013
- [2] Barrile V., Critelli M., Lamari D., Meduri G.M., Pucinotti R., Ricciardi A., *Applicazione di Sistemi di Scansione 3D e Fotogrammetrici al caso di un Ponte in C.A.*. In: Atti 16° Convegno Aipnd, Milano, 21-23 Ottobre, 2015
- [3] Barrile V., Lamari D., Gelsomino V., Sensini P., *Modellazione 3D tramite Droni per Monitoraggi e Controlli*. In: 61° Convegno Nazionale Sifet, 8 - 10 Giugno, Lecce, 2016
- [4] Barrile V., Lamari D., Gelsomino V., Sensini P., *I Droni e la Computer Vision per la modellazione 3D e individuazione degli ammaloramenti nelle infrastrutture*, Asita, 2016
- [5] Bhatla A., Choe S., Fierro O., Leite F., *Evaluation of accuracy of as-built 3D modeling from photos taken by handheld digital cameras*. In: Autom. Construct., vol. 28, pp. 116 -127, 2012
- [6] Dai F., Dong S., Kamat V., Lu M., *Photogrammetry assisted measurement of interstory drift for rapid post-disaster building damage reconnaissance*. In: J. Nondestr. Eval., vol. 30 (3), pp. 201 - 212, 2011
- [7] Dai F., Feng Y., Hough R., *Photogrammetric error sources and impacts on modeling and surveying in construction engineering applications*. In: Visual. Eng., vol. 2 (1), 2014
- [8] Dai F., Lu M., *Assessing the accuracy of applying photogrammetry to take geometric measurements on building products*. In: J. Construct. Eng. Manage., vol. 136 (2), pp. 242 - 250, 2010
- [9] Dai F., Rashidi A., Brilakis I., Vela P., *Comparison of image-based and time-of-flight-based technologies for three-dimensional reconstruction of infrastructure*. In: J. Construct. Eng. Manage., vol. 139 (1), pp. 69 - 79, 2013
- [10] Golparvar-Fard M., Bohn J., Teizer J., Savarese S., Peña-Mora F., *Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques*. In: Autom. Construct., vol. 20 (8), pp. 1143 - 1155, 2011
- [11] Klein L., Li N., Becerik-Gerber B., *Image-based verification of as-built documentation of operational buildings*. In: Autom. Construct., vol. 21, pp. 161 - 171, 2012
- [12] Koch C., German Paal S., Rashidi A., Konig M., Brilakis I., *Achievements and challenges in machine visionbased inspection of large concrete structures*. In: Advan. Struct. Eng., vol. 17 (3), pp. 303 - 318, 2014
- [13] Luhmann T., Tecklenburg W., *Hybrid photogrammetric and geodetic surveillance of historical buildings for an urban tunnel construction*. In: International Workshop on Recreating the Past Visualization and Animation of Cultural Heritage, 2001
- [14] Malhotra V.M., Carino N.J., *CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, CRC Press, 1991
- [15] McCoy A., Golparvar-Fard M., Rigby E., *Reducing barriers to remote project planning: comparison of low-tech site capture approaches and image-based 3D reconstruction*. In: J. Architect. Eng., vol. 20 (1), 2014
- [16] Zhu Z., Brilakis I., *Comparison of optical sensor-based spatial data collection techniques for civil infrastructure modeling*. In: J. Comput. Civil Eng., vol. 23 (3), pp. 170 - 177, 2009
- [17] Lowe D., *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*. In: International Journal of Computer Vision, vol. 60 (2), pp. 91-110, 2004

