

I Droni e la Computer Vision per la modellazione 3D e individuazione degli ammaloramenti nelle infrastrutture

Vincenzo Barrile ^(a), Vincenzo Gelsomino ^(a), Domenicantonio Lamari ^(b), Paolo Sensini ^(b)

^(a) Laboratorio di Geomatica, DICEAM, Università Mediterranea di Reggio Calabria, 89123 Feo di Vito, Reggio Cal.
vincenzo.barrile@unirc.it, ing.gelsomino@gmail.com

^(b) antonio.lamari@gmail.com, paolo.sensini@gmail.com

Riassunto

Negli anni si è visto come il degrado delle opere, ovvero la perdita delle prestazioni iniziali in seguito ad agenti esterni sia naturali (gelo-disgelo, sisma, salsedine, ecc.) che artificiali (ambito industriale, ambito urbano, ecc.), ha portato alla necessità dello sviluppo di prove non distruttive volte a fornire elementi utili alla interpretazione del potenziale deterioramento in atto senza danneggiare lo stato dell'opera. L'attento esame delle lesioni, del ripetersi dei lineamenti fessurativi in condizioni di sollecitazioni simili, indicano l'esistenza di principi che dominano la creazione di tali fenomeni. Non v'è dubbio che un'attenta analisi visiva stia alla base di una corretta valutazione delle condizioni dell'opera osservata.

La presente nota tratta di un sistema per la produzione di modelli 3D basato sull'acquisizione di immagini digitali, mediante APR con volo automatico, applicato a infrastrutture civili site nel territorio della Provincia di Reggio Calabria. La successiva elaborazione avviene tramite *software* commerciale, basato su appositi algoritmi della tecnica *Structure from Motion* (SfM). La SfM costituisce un considerevole progresso nel campo del rilievo sia aereo che terrestre con ottenimento di risultati, per tempi e qualità, comparabili a quelli ottenibili tramite metodologie di acquisizione dati più tradizionali.

Abstract

In the years the degradation of buildings, or rather the decline of their initial performances following external agents both natural (cold-thaw, earthquake, salt, etc.) and artificial (industrial field, urban setting, etc.), lead to a necessity of development of Non-Destructive Testing (NDT) intended to give useful information for an explanation of a potential deterioration without damaging the state of buildings. An accurate examination of damages, of the repeat of cracks in condition of similar stress, indicate the existence of principles that control the creation of these events. There is no doubt that a precise visual analysis is at the bottom of a correct evaluation of the building.

This paper deals with the creation of 3D models based on the capture of digital images, through autopilot flight UAV, for civil buildings situated on the area of Reggio Calabria. The following elaboration is done thanks to the use of commercial software, based on specific algorithms of the Structure from Motion (SfM) technique. SfM represents an important progress in the aerial and terrestrial survey field obtaining results, in terms of time and quality, comparable to those achievable through more traditional data capture methodologies.

Introduzione

Nel campo delle infrastrutture civili la ricostruzione 3D attraverso immagini risulta essere un tema emergente non ancora pienamente sviluppato in ambito commerciale. Nel corso degli ultimi anni si sono resi disponibili degli algoritmi 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. 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, per la valutazione dei danni a seguito di catastrofi nonché per la conservazione di prove per risoluzioni di controversie legali. Diversi studi hanno evidenziato la precisione e l'efficienza di questa tecnica mettendo in risalto pregi e difetti.

Verranno qui riportati alcuni studi condotti e finalizzati allo sviluppo di un approccio scientifico indirizzato alla modellazione 3D di opere infrastrutturali volti, non solo alla ricostruzione geometrica, ma anche all'individuazione visiva degli ammaloramenti presenti nonché ad una analisi globale sullo stato di conservazione dell'opera. L'impiego di tecnologie sempre più avanzate nella costruzione di grandi opere permette, non solo di meglio definirne la sagoma utile ma, anche, di adeguare le vecchie opere ai requisiti delle nuove e più stringenti normative in materia di sismicità e durabilità. Proprio in tema di durabilità le tecniche di diagnostica e di sorveglianza risultano di fondamentale importanza per la valutazione dello 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 imputare alla realizzazione.

Il primo punto va investigato nelle condizioni in cui la struttura compie la sua funzione, non soltanto, quindi, l'atmosfera, il clima o le acque (meteoriche, corsi d'acqua) ma il microambiente con cui la struttura interagisce (vibrazioni, azioni di disgregazioni meccanica provocata dal gelo e disgelo, aggressione chimica dovuta a solfati, cloruri, olii, ecc.). Il secondo punto è da individuare nelle deficienze tecnologiche dei materiali impiegati o nella loro errata individuazione in funzione dell'utilizzo. Al terzo punto va osservata la non corretta combinazione dei materiali ed una non sufficiente attenzione in fase di costruzione. L'impiego, quindi, delle indagini non distruttive per la valutazione dello stato di conservazione delle opere sono un valevole strumento sia per la determinazione delle proprietà fisiche e meccaniche degli elementi strutturali che ne compongono l'opera, sia per l'ottenimento di informazioni dettagliate sul rilievo geometrico di strutture.

Una tecnica ormai consolidata per la modellazione delle strutture consiste, per l'acquisizione del dato grezzo da processare in un secondo momento, nell'impiego del Laser Scanner, che ha ormai raggiunto risultati interessanti e precisioni notevoli. 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, con 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.

Oggetto dello studio

Per la presente nota sono state acquisite tre distinte opere per natura e complessità. In primo luogo è stato rilevato un ponte in c.a. sito in località San Gregorio nella città di Reggio Calabria, costituito da tre campate in conglomerato cementizio armato ognuna delle quali è composta da cinque travi longitudinali di lunghezza pari a 13,75 m con sezione di 0,40 m x 0,70 m posti ad interasse di 1,40 m e collegate tra loro da traversi aventi sezione di dimensioni pari a 0,15 m x 0,30 m posti ad interasse di 2,75 m (Figure 1 e 2). Il manufatto presenta diverse problematiche sia per quanto concerne le armature metalliche, in avanzato stato di ossidazione, sia per quanto riguarda il calcestruzzo, caratterizzato da importanti e diffuse zone interessate dal distacco del copriferro. Risulta, pertanto, evidente la necessità di interventi mirati al ripristino ed al consolidamento di tutti gli elementi strutturali del ponte (travi, traversi e soletta), che non possono prescindere dalla conoscenza della geometria dei vari elementi strutturali e dalla determinazione della posizione, del numero e della sezione delle armature metalliche presenti.



Figura 1 - Inquadramento della prima opera rilevata



Figura 2 - Particolare del ponte di San Gregorio

Sempre in località San Gregorio, nella città di Reggio Calabria, è stata rilevata una galleria stradale di forma scatolare (Figure 3 e 4) avente una lunghezza di 100 m e larghezza pari a 11,80 m, le spalle hanno una larghezza di 1,30 m ed un'altezza di 5,50 m, lo spessore del soletto è di 1,30 m. L'opera non è stata ancora completata e sono presenti segni di efflorescenza, macchie di umidità, dovuti ad una cattiva o inesistente impermeabilizzazione.



Figura 3 - Inquadramento della seconda opera rilevata



Figura 4 - Particolare dell'entrata della galleria

La terza opera rilevata è un ponte sito al km 517,20 della SS 18 nel Comune di Villa San Giovanni in provincia di Reggio Calabria (Figura 5 e 6). L'opera è stata scelta vista la sua particolare fattura, infatti essa è costituita da una struttura originaria 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, da far risalire ad una non corretta esecuzione dell'opera.



Figura 5 - Inquadramento del ponte sito in Villa San Giovanni



Figura 6 - Particolare del ponte di Villa San Giovanni

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 oltre 8 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 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.

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 un algoritmo implementato da D. Lowe nel 2004 definito SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*), 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, ecc. 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 Phantom 2 della DJI equipaggiato con una fotocamera digitale GoPro HERO3+ Silver Edition 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, impostati mediante l'inserimento di *waypoints* con coordinate note ottenute da rilievi a terra con *rover* GNSS in modalità cinematica RTK realizzati in fasi precedenti (utili anche in fase di elaborazione per la scalatura del modello). 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 (Figura 7).



Figura 7 – Screen dello schermo della ground station con piano di volo

Sono stati effettuati un numero di scatti congrui alla generazione del modello integrando, ove si sia reso necessario, agli scatti eseguiti dal drone ulteriori scatti con presa da terra. Nelle tabelle vengono riportati i dati relativi ai vari modelli 3D delle opere rilevate (Tabelle 1, 2 e 3).

Per le operazioni di ricostruzione è stato utilizzato il software Agisoft PhotoScan, *software* commerciale a basso costo prodotto dalla Agisoft LLC di San Pietroburgo (Russia) che permette la generazione di nuvole dense, di *mesh* e di *texture* di alta qualità. Il flusso di lavoro è completamente automatico sia per quanto riguarda l'orientamento delle immagini sia per la generazione e ricostruzione del modello. Il modello generato può essere esportato per essere gestito ed eventualmente trattato con *software* esterni dedicati al controllo strutturale (Figure 8, 9 e 10). Tutti i processi possono essere eseguiti con vari livelli di precisione e diversi parametri possono essere impostati al fine di migliorare il risultato finale. Per il lavoro in esame è stata utilizzata come macchina di calcolo una *workstation* HP Z800 con CPU 2 x Xeon Hexa Core X5650, memoria ram da 64 GB, 128GB SSD Hard Disk aggiuntivo da 2 TB, equipaggiata con due schede video NVIDIA Quadro FX 4800 con 1,5 GB di RAM ciascuna e con sistema operativo Windows 7 Professional a 64 bit.



Figura 8 - Nuvola di punti e mesh rielaborata del ponte di San Gregorio

N° Foto	N° Punti Nuvola Rada	N° Punti Nuvola Densa	N° Facce	N° Vertici	Tempo rilievo	Tempo elaborazione
252	1648473	117147723	1500000	834972	0,70 h	14,39 h

Tabella 1 - Riepilogo caso studio ponte di San Gregorio

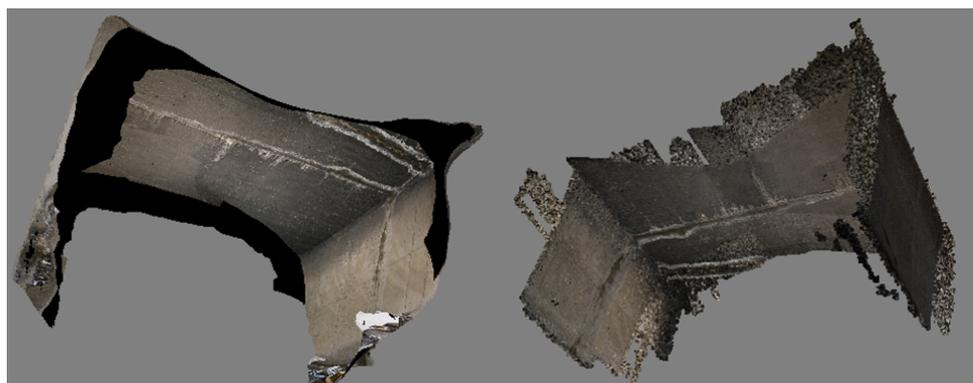


Figura 9 - Texture della galleria di San Gregorio con ammaloramenti evidenziati

N° Foto	N° Punti Nuvola Rada	N° Punti Nuvola Densa	N° Facce	N° Vertici	Tempo rilievo	Tempo elaborazione
44	201123	24814468	90000	45453	0,16 h	2,87 h

Tabella 2 - Riepilogo caso studio galleria di San Gregorio



Figura 10 - Texture del ponte di Villa San Giovanni

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

Tabella 3 - Riepilogo caso studio ponte di Villa San Giovanni

Confronto con TLS

Per verificare quanto ottenuto dalla combinazione di APR e PhotoScan, l'utilizzo della 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 (Figura 11).

La valutazione delle precisioni si è basata sul rilievo di 5 *target* collocati sulle facciate del ponte e sul confronto dei risultati ottenuti rispetto ad un rilievo topografico tradizionale con stazione totale automatizzata di alta precisione Leica TCRA 1201 (Figura 12).



Figura 11 - Texture del ponte di Villa San Giovanni da TLS

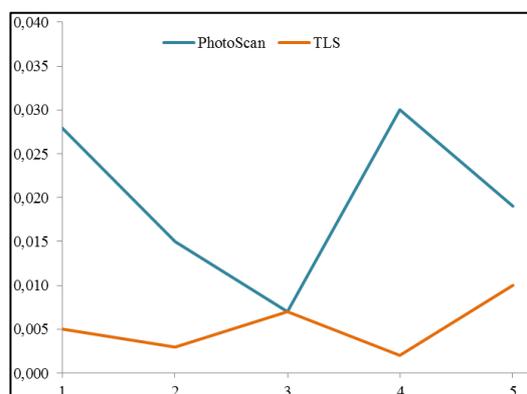


Figura 12 - Confronto degli errori (cm) nei due sistemi

Conclusioni

Nel presente lavoro il rilievo con APR e l'approccio SfM sono stati utilizzati per il rilievo di tre opere d'arte maggiori site 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 può essere utilizzata, oltre che per la modellazione, anche per una prima valutazione visiva del degrado strutturale per le opere non direttamente e facilmente raggiungibili attraverso l'impiego di APR.

Bibliografia

- Bae H, Golparvar-Fard M, White J. (2013), "High-precision vision-based mobile augmented reality system for context-aware architectural, engineering, construction and facility management (AEC/FM) applications", *Visual. Eng.* 1 (1) 1–13
- Barrile V, Critelli M, Lamari D, Meduri G.M, Pucinotti R, Ricciardi A. (2015), "Applicazione di Sistemi di Scansione 3D e Fotogrammetrici al caso di un Ponte in C.A.", *Atti 16° Convegno Aipnd Milano* 21-23 Ottobre 2015
- Barrile V, Lamari D, Gelsomino V, Sensini P. (2016), "Modellazione 3D tramite Droni per Monitoraggi e Controlli", *61° Convegno Nazionale Sifet*, 8-10 Giugno 2016, Lecce
- Bhatla A, Choe S, Fierro O, Leite F. (2012), "Evaluation of accuracy of as-built 3D modeling from photos taken by handheld digital cameras", *Autom. Construct.* 28 116–127
- Dai F, Dong S, Kamat V, Lu M. (2011), "Photogrammetry assisted measurement of interstory drift for rapid post-disaster building damage reconnaissance", *J. Nondestr. Eval.* 30 (3) 201–212
- Dai F, Feng Y, Hough R. (2014), "Photogrammetric error sources and impacts on modeling and surveying in construction engineering applications", *Visual. Eng.* 2 (1)
- Dai F, Lu M. (2010), "Assessing the accuracy of applying photogrammetry to take geometric measurements on building products", *J. Construct. Eng. Manage.* 136 (2) 242–250
- Dai F, Rashidi A, Brilakis I, Vela P. (2013), "Comparison of image-based and time-of-flight-based technologies for three-dimensional reconstruction of infrastructure", *J. Construct. Eng. Manage.* 139 (1) 69–79
- Golparvar-Fard M, Bohn J, Teizer J, Savarese S, Peña-Mora F. (2011), "Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques", *Autom. Construct.* 20 (8) 1143–1155
- Klein L, Li N, Becerik-Gerber B. (2012), "Image-based verification of as-built documentation of operational buildings", *Autom. Construct.* 21 161–171
- Koch C, German Paal S, Rashidi A, Konig M, Brilakis I. (2014), "Achievements and challenges in machine vision-based inspection of large concrete structures", *Advan. Struct. Eng.* 17 (3) 303–318
- Luhmann T, Tecklenburg W. (2001), "Hybrid photogrammetric and geodetic surveillance of historical buildings for an urban tunnel construction", *International Workshop on Recreating the Past Visualization and Animation of Cultural Heritage*
- Malhotra V.M, Carino N.J. (1991), "CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete", CRC Press
- McCoy A, Golparvar-Fard M, Rigby E. (2014), "Reducing barriers to remote project planning: comparison of low-tech site capture approaches and image-based 3D reconstruction", *J. Architect. Eng.* 20 (1)
- Nahangi M, Haas C.T. (2014), "Automated 3D compliance checking in pipe spool fabrication", *Adv. Eng. Inform.* 28 (4) 360–369
- Zhu Z, Brilakis I. (2009), "Comparison of optical sensor-based spatial data collection techniques for civil infrastructure modeling", *J. Comput. Civil Eng.* 23 (3) 170–177