

Dalle immagini dell'oggetto alla replica fisica in modalità automatica

Luigi Barazzetti, Marco Scaioni

Politecnico di Milano, Dip. B.E.S.T., P.za Leonardo da Vinci 32, Milano, <luigi.barazzetti, marco.scaioni>@polimi.it

Riassunto

In questo articolo viene illustrata una metodologia automatica per la creazione di repliche 3D di oggetti a partire da un blocco di immagini digitali riprese con una camera calibrata. Gli oggetti considerati sono definibili come “free-form”, ovvero tali da essere modellati tramite nuvole di punti che non richiedono la restituzione manuale di breaklines per la loro definizione. Il software ATiPE, sviluppato dagli autori, permette di orientare in modo completamente automatico il blocco di immagini senza ricorrere all'uso di target. Successivamente mediante l'algoritmo di matching multi-immagine PMVS è possibile ricostruire la superficie. Il modello digitale così creato può essere utilizzato per la produzione di una copia fisica dell'oggetto tramite una stampante 3D.

Abstract

This paper presents an automated methodology for the creation of physical replicas of real objects using a block of digital images captured by a calibrated camera. We focus here on “free-form” objects, namely those that can be adequately modelled with point clouds only, without interactive measurement of breaklines. ATiPE, which was developed by our own, allows the automatic target-less orientation of the image block. Then the surface reconstruction is carried out by applying the multi-image matching algorithm PMVS. The final digital model can be utilised to create a material replica of the object by using a 3D printer.

1. Introduzione

Il rilievo di un oggetto generalmente richiede l'uso congiunto di differenti strumentazioni (camere digitali, laser scanner terrestri, stazioni totali) e tecniche (fotogrammetria, topografia, ...). Nelle tradizionali applicazioni di fotogrammetria il modello finale deve ben rappresentare l'oggetto originale ed è quindi necessaria una ricostruzione accurata, completa e dettagliata. La letteratura fotogrammetrica è ricca di casi reali in cui oggetti molto complessi sono stati correttamente rilevati (si veda [1] tra i numerosi esempi facilmente reperibili).

E' quindi assodato come un rilievo fotogrammetrico di oggetti molto complessi richiede l'intervento di un operatore esperto. Ciò trova un'ulteriore conferma nell'assenza di software fotogrammetrici commerciali in grado di eseguire le operazioni necessarie al completamento del rilievo in modalità automatica, come invece è possibile fare nelle applicazioni di fotogrammetria aerea, almeno per quanto riguarda l'orientamento delle immagini e la creazione di DTM.

In questi ultimi anni il settore della *visione artificiale* (o CV - *Computer Vision*) ha sviluppato una serie di metodologie e procedure alternative, il cui scopo è la modellazione digitale di oggetti. Tuttavia, mentre in fotogrammetria l'attenzione viene posta soprattutto sull'*accuratezza* geometrica del prodotto finale, nella CV l'obiettivo primario è l'*automazione* della procedura. Allo stato attuale è stato dimostrato come sia possibile ricostruire intere città [2] in tempi relativamente brevi (qualche ora) senza alcuna misura manuale. Da un punto di vista fotogrammetrico però tali prodotti non sono tali da soddisfare i requisiti minimi di un tipico progetto cartografico, sia in termini di accuratezza che di completezza.

In questo lavoro viene presentata una procedura alternativa che consente di ricostruire oggetti ripresi mediante camere calibrate, offrendo modelli accurati in modalità automatica. Per il momento si è deciso di operare con una camera precalibrata, senza dunque ricorrere alla *autocalibrazione* della stessa nel corso della triangolazione fotogrammetrica utilizzata per l'orientamento dei blocchi che riprendono gli oggetti da rilevare. Questa scelta permette una maggiore libertà nella geometria del blocco, in quanto per eseguire correttamente la calibrazione è necessaria una configurazione particolare. Gli esempi qui considerati sono essenzialmente basso-rilievi, decorazioni o simili, tali da essere ben modellati tramite *nuvole di punti* che saranno poi interpolate per la formazione di *modelli poligonali* [3]. Questa categoria di oggetti è denominata in letteratura "free-form", in quanto essi non richiedono l'estrazione di breaklines per migliorare la definizione del modello (operazione che ad oggi è ancora eseguita in modo manuale, salvo ricorrere all'integrazione di dati laser scanning, come proposto da [4]). Per rilievi più complessi, ad esempio siti archeologici o edifici, le misure interattive sono ancora la miglior soluzione oggi disponibile.

Il metodo sviluppato si basa su una nuova versione del software ATiPE, opportunamente modificata per interagire in modo remoto con i software PhotoModeler Scanner e PMVS [5]. ATiPE è stato appositamente creato per svolgere quelle operazioni che nessun software fotogrammetrico è attualmente in grado di eseguire, ovvero la misura automatica dei punti di legame per blocchi di immagini terrestri senza utilizzare target o altri tipi di riferimento sull'oggetto [6].

L'uso congiunto della nuova versione di ATiPE, PhotoModeler Scanner e PMVS permette di ottenere una nuvola di punti dalle immagini, che una volta interpolata completa il rilievo dell'oggetto offrendo la possibilità di creare una replica dello stesso mediante una stampante 3D.

2. Il metodo proposto

Per maggiori dettagli relativi alla procedura di determinazione dei punti di legame di un blocco terrestre con ATiPE si rimanda a [7], dove è presentata la versione più aggiornata e completa. In questo articolo si intende descrivere il completamento del lavoro di ricostruzione del modello 3D tramite PhotoModeler Scanner e PMVS, secondo le fasi sinteticamente mostrate in figura 1. Si fa inoltre notare come sia possibile impiegare anche una comune camera digitale amatoriale compatta dal costo di poche centinaia di euro; ovviamente, l'impiego di un sensore di qualità superiore equipaggiato con un'ottica di lunghezza focale adatta alle dimensioni dell'oggetto consente di ottenere risultati migliori.

Per risolvere i problemi legati alla distorsione geometrica delle immagini, l'elaborazione non avviene usando le immagini originali ma quelle da cui è già stata rimossa la distorsione grazie alla conoscenza dei parametri di calibrazione della camera; le coordinate immagine vengono quindi ricalcolate rispetto al punto principale (quindi $x_p = y_p = 0$).

PhotoModeler Scanner può comunicare con altri software tramite connessione DDE. In particolare, l'uso di tale software all'interno della procedura sviluppata prevede la ricezione dei punti di legame estratti con ATiPE, la rimozione della distorsione dalle immagini e il calcolo della triangolazione fotogrammetrica del blocco (*bundle adjustment*). Sebbene la versione "Scanner" di PhotoModeler permetta l'estrazione di nuvole di punti da immagini, per il completamento del lavoro viene usato PMVS che, grazie alla sua procedura di matching denso multi-immagine, risulta nettamente più efficace nel caso di elaborazioni automatiche ove sono frequenti outliers dovuti ad oclusioni e a tessiture ripetitive.

PhotoModeler fornisce in uscita tutti i parametri di orientamento calcolati, che possono essere esportati automaticamente tramite l'interfaccia DDE. Questi sono costituiti dalla *costante della camera* c , dalla matrice di rotazione \mathbf{R}_i e dalle coordinate del centro di presa (X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}) di ciascuna immagine orientata, definiti secondo il classico modello fotogrammetrico della *collinearità* [8]. Il formato di input per PMVS è invece costituito dal modello *pinhole camera* della CV, che esprime la trasformazione tra *punto oggetto* $\mathbf{X} = [X, Y, Z, 1]^T$ ed il corrispondente *punto immagine* $\mathbf{u} = [u, v, 1]^T$ in coordinate omogenee mediante la *geometria proiettiva*:

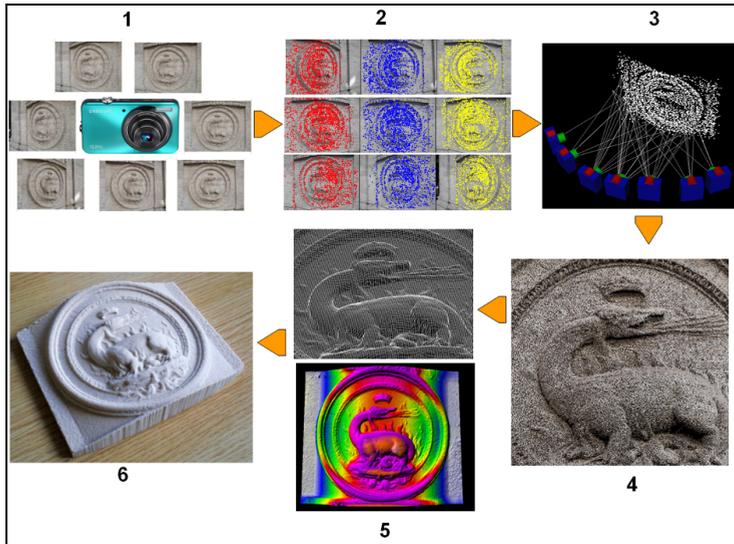


Figura 1 – La metodologia per la ricostruzione degli oggetti da immagini: (1) acquisizione delle immagini con una camera calibrata; (2) determinazione dei punti di legame (ATiPE); (3) rimozione della distorsione e orientamento (PhotoModeler Scanner); (4) creazione della nuvola di punti (PMVS); (5) interpolazione della nuvola di punti; (6) stampa della copia 3D.

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P}\mathbf{X} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

dove \mathbf{P} è la *matrice di proiezione* di dimensione 3×4 , che deve essere ricavata a partire dai parametri di orientamento esterno. Una differenza rilevante tra le due formulazioni riguarda i *sistemi di coordinate* impiegati per rappresentare le coordinate immagine: in (1) è generalmente utilizzato il sistema di coordinate *pixel*, mentre nelle equazioni di collinearità vengono usualmente impiegate le *coordinate fotogramma*. Se p è il lato di un pixel (in unità metriche), la trasformazione tra i due sistemi di coordinate avviene mediante la seguente relazione:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/p & 0 & w/2p \\ 0 & -1/p & h/2p \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{D}\mathbf{x} \quad (2)$$

dove w e h sono la base e l'altezza del sensore in unità metriche. In [9] è proposta la seguente relazione per calcolare la *matrice di proiezione* \mathbf{P} :

$$\mathbf{P} = \mathbf{D} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/c \end{bmatrix} \mathbf{R} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

La nuvola di punti estraibile con PMVS normalmente non necessita di editing manuale per la correzione di eventuali false corrispondenze trovate durante l'estrazione dei punti immagine. Infatti, l'uso congiunto di più immagini permette di rimuovere eventuali valori anomali tramite la ridondanza di informazioni. Tale operazione non sarebbe stata possibile tramite PhotoModeler Scanner, in quanto questo attualmente (ver. 6) implementa un algoritmo di correlazione basato sulla singola coppia di immagini, per la quale le false corrispondenze lungo la retta epipolare soddisfano comunque le equazioni di collinearità.

La nuvola di punti può essere interpolata tramite una sua rappresentazione 2.5D, mentre per oggetti 3D più complessi viene utilizzato un *modello poligonale*. In questo ultimo caso, PMVS oltre a fornire le coordinate 3D dei punti, fornisce anche le normali alla superficie. A partire da questi dati la superficie può essere ricostruita con l'*interpolazione di Poisson* proposta da [10].

Per la stampa 3D della replica è consigliata la creazione di una base oppure l'ispessimento della superficie esterna per irrobustire il modello digitale. Infine è necessario selezionare l'area di stampa e la scala della replica. La stampante impiegata è una Spectrum Z510 Full Colour System, con una risoluzione nominale di 600×540 dpi ed una massima dimensione dell'oggetto pari a 254×356×203 mm, in grado di realizzare modelli combinando polvere di gesso e un collante che vengono progressivamente applicati mediante una serie di strati orizzontali.

3. Risultati e conclusioni

Il metodo è stato testato su numerosi oggetti, ripresi con camere digitali professionali e low-cost. Alcuni risultati sono riportati nelle figure 2 e 3, dove sono mostrati gli oggetti analizzati, il numero di immagini impiegate, la loro risoluzione geometrica e il modello 3D ottenuto. E' da sottolineare come l'accuratezza del risultato sia garantita dall'uso di (i) camere pre-calibrate mediante la procedura fotogrammetrica classica e (ii) l'uso di algoritmi di orientamento a partire dalle equazioni di collinearità, risolte tramite una rigorosa soluzione ai minimi quadrati. Le strategie di orientamento sviluppate in CV (basate sulla geometria proiettiva) non offrono invece alcuna garanzia relativa all'accuratezza del risultato finale.

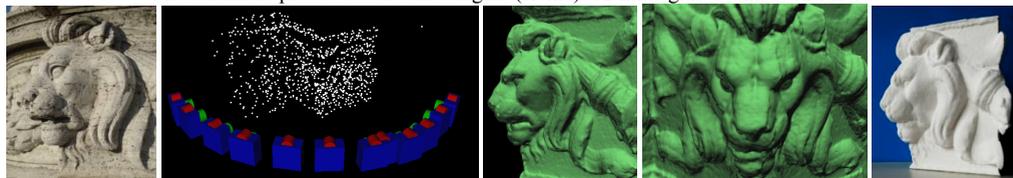
Gli oggetti proposti possono essere digitalmente ricostruiti in un tempo variabile di circa 2-3 ore. La fase più onerosa è l'estrazione della nuvola con PMVS, mentre le rimanenti (estrazione punti di legame con ATiPE e interpolazione della nuvola) richiedono solo pochi minuti.

La stampa del prototipo è stata condotta usando polvere di gesso ed un collante, che consente di ottenere risultati abbastanza dettagliati grazie alla finezza della polvere stessa. Al termine della stampa, che impiega mediamente 5-6 ore per un oggetto caratterizzato da una dimensione massima di circa 15 cm, il composto viene resinato per migliorarne la robustezza. Inoltre, le repliche fisiche possono essere anche stampate a colori.

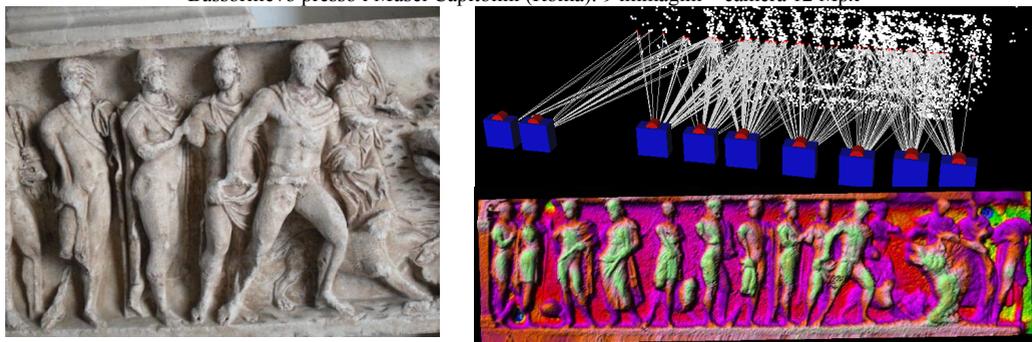
La metodologia descritta in questo articolo costituisce un punto di incontro tra fotogrammetria e Computer Vision, dimostrando come unendo i vantaggi di entrambe queste discipline sia possibile automatizzare la procedura di modellazione 3D ottenendo comunque una ricostruzione accurata e dettagliata. Il metodo è per ora utilizzabile per la formazione di modelli 3D di oggetti del tipo "free-form", mentre oggetti che richiedono la definizione di breaklines (edifici architettonici, siti archeologici) e tali da non essere ben rappresentabili con le sole nuvole di punti non sono per ora trattati. Questi saranno considerati negli sviluppi futuri del metodo proposto.

Appare inoltre evidente come nel settore della fotogrammetria terrestre le tecniche di Computer Vision debbano essere studiate, analizzate e validate attentamente, ma soprattutto adattate in modo tale da poter garantire l'*accuratezza* ottenibile tramite le tradizionali misure fotogrammetriche manuali. Va inoltre sottolineato come lo sviluppo tecnologico di questa disciplina stia crescendo fortemente, in particolare se comparato con i più lenti progressi nel settore della fotogrammetria terrestre.

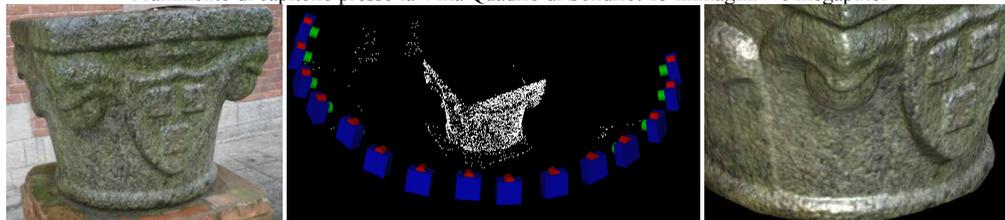
Decorazione presso Castel Sant'Angelo (Roma): 12 immagini – camera 12 MPx



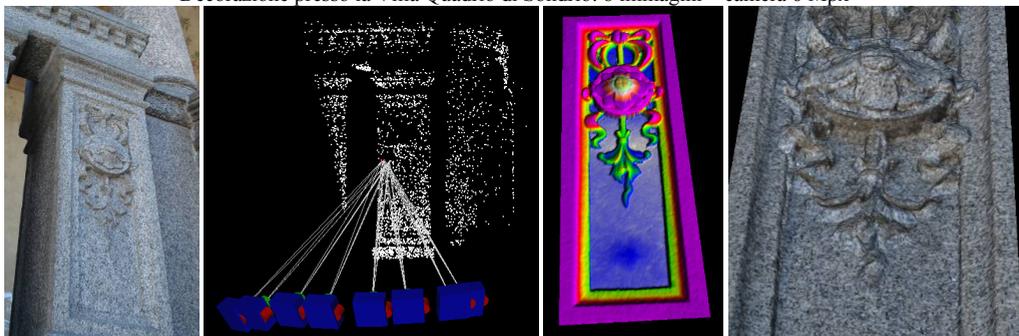
Bassorilievo presso i Musei Capitolini (Roma): 9 immagini – camera 12 Mpx



Frammento di capitello presso la Villa Quadrio di Sondrio: 15 immagini – 6 megapixel



Decorazione presso la Villa Quadrio di Sondrio: 8 immagini – camera 6 Mpx



Decorazione presso la Chiesa di San Luigi dei Francesi a Roma: 7 immagini – camera 12 Mpx

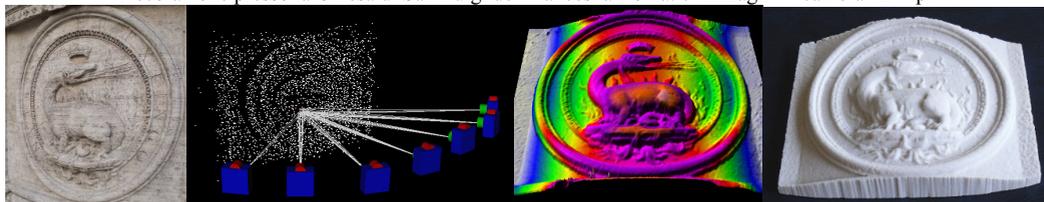
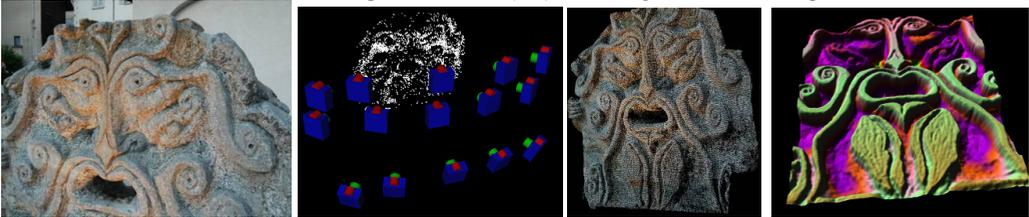


Figura 2 – Alcuni oggetti ricostruiti tramite la metodologia proposta. Per alcuni è stata anche stampata una copia fisica in gesso resinato.

Bocca della verità presso Malesco (VB): 15 immagini – camera 10 Mpx



Decorazione presso Palazzo Barberini (Roma): 10 immagini – camera 12 Mpx



Figura 3 – Esempi di oggetti ricostruiti tramite la metodologia proposta.

Per concludere un’osservazione “storica”. In [11] si proponeva un metodo per la riproduzione di copie fisiche in marmo di statue attraverso il sistema fotogrammetrico digitale Induscan (Zeiss). Tralasciando qui il problema della realizzazione della copia fisica, per la quale oggi la tecnologia ha fatto grossi avanzamenti, si fa notare come il progresso in campo fotogrammetrico permetta di ottenere oggi risultati analoghi con un livello di automazione superiore e con costi per la strumentazione ed il calcolo (HD e SW) di almeno due ordini di grandezza inferiori.

Ringraziamenti

Si ringrazia il Laboratorio Prototipi presso il Campus Point del Polo Regionale di Lecco (Politecnico di Milano) per la realizzazione delle copie fisiche.

Bibliografia

- [1] Guidi, G., Remondino, F., Russo, M., Menna, F., Rizzi, A. Ercoli, S., 2009. A multi-resolution methodology for the 3D modelling of large and complex archaeological areas. *Int. J. of Architectural Computing*, Vol. 7(1): 40-55.
- [2] Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2010. Towards Internet-scale Multi-view Stereo. In: Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR-’10), San Francisco, (CA-USA).
- [3] Guidi, G., Russo, M., Beraldin, J.-A., 2010. *Acquisizione 3-D e modellazione poligonale*. McGraw-Hill, Milano.
- [4] Nex, F. Rinaudo, F., 2009. New Integration Approach of Photogrammetric and Lidar Techniques for Architectural Surveys. *IAPRSSIS*, Vol. 38, Part 3/W8: 12-17.
- [5] Furukawa, Y., Ponce, J., 2007. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. In: Proc. of IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR-’07), 8 pp..
- [6] Barazzetti, L., Scaioni, M., 2009. Automatic orientation of image sequences for 3D object reconstruction: first results of a method integrating photogrammetric and computer vision techniques. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38, Part 5/W1, 8 pp., su CD-ROM.
- [7] Barazzetti, L., Remondino, F., Scaioni, M., 2010. Extraction of accurate tie points for automated pose estimation of close-range blocks. *IAPRSSIS*, Vol. 38, Part 3A, 6 pp..
- [8] Kraus, K., 2008. *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*. Walter de Gruyter, Berlino.
- [9] Barazzetti, L., 2010. A trip to Rome: physical replicas of historical objects created in a fully automated from photos. Proc. of HCIToCH 2010, 7-8 Settembre, Brescello.
- [10] Kazhdan, M., Bolitho, M., Hoppe, H., 2006. Poisson Surface Reconstruction. In Proc. of Symp. on Geometry Processing, Cagliari: 61-70.
- [11] Kludas, T., Pfeil, J.U., Scaioni, M., Vassena, G., 1996. Automatic DEM Generation using Digital System InduSCAN: an Application to the Artworks of Milano Cathedral Finalized to Realize Physical Marble Copies. *IAPRSSIS* Vol. 31, Part B5/V: 581-586.