

FOTOGRAFIA PANORAMICA, IMPLEMENTAZIONE ED INTEGRAZIONE DI TECNICHE FOTOGRAMMETRICHE SPEDITIVE LOW-COST PER LA DOCUMENTAZIONE TRIDIMENSIONALE DEL PATRIMONIO CULTURALE

E.d'Annibale^a, A.N.Tasseti^a, G.Fangi^a, E.S.Malinverni^a

^a DICEA, Dipartimento di Ingegneria, Civile, Edile e Architettura, Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica delle Marche, 60131 Ancona, Italia - (e.dannibale,n.tasseti, g.fangi, e.s.malinverni)@univpm.it

KEY WORDS: Fotografia panoramica, Fotogrammetria Sferica, *Structure From Motion*, *Image-based Modeling*

RIASSUNTO

Il lavoro proposto vuole ottimizzare una metodologia di documentazione dell'architettura che, a partire dalle fotografie panoramiche, si misura di volta in volta con gli strumenti e le tecnologie a disposizione per proporre una soluzione integrata, speditiva e *low-cost* di *Virtual Architecture*.

La tecnica sviluppata nasce in un contesto di ricerca più ampio che da anni studia la possibilità di usare le immagini panoramiche sferiche per il rilievo metrico dell'architettura (Fangi, 2007-2012). I dati a disposizione (panoramiche orientate), l'affidabilità raggiunta e metodi di *Image-based Modeling* (d'Annibale, 2009-2011) sono alla base della proposta di un tipo di ricostruzione 3D integrata ed estremamente flessibile: dal rilievo professionale del patrimonio culturale alla sua comunicazione nei musei virtuali.

La soluzione proposta si sviluppa tramite l'integrazione e implementazione di diverse tecniche (Fotogrammetria Sferica, *Structure From Motion*, *Image-based Modeling*) e si pone l'obiettivo di raggiungere alti livelli di precisione metrica del rilievo e resa fotorealistica dei modelli ricostruiti. L'intera procedura risulta essere accessibile grazie alla scelta di utilizzare strumenti *low-cost* e adattabile allo scopo finale.

Diversi sono i livelli di documentazione possibili all'interno dell'unico processo proposto: dalla navigazione virtuale di panorami sferici a complessi sistemi di simulazione e ricostruzione virtuale.

Tools VR permettono l'integrazione delle tecnologie e lo sviluppo di nuove soluzioni per la navigazione virtuale.

Affinate tecniche di *Image-based Modeling* permettono la costruzione di modelli con *texture* fotorealistiche ad alta risoluzione.

L'alta risoluzione delle fotografie panoramiche, lo sviluppo di *tools* per la creazione di affidabili algoritmi di orientamento dei panorami e restituzione fotogrammetrica garantiscono precisioni centimetriche e *texture* ad alta risoluzione.

Tecniche automatizzate sono oggetto di indagine, successiva implementazione ed integrazione tramite *tool* ad hoc che sfruttano tutte le potenzialità delle fotografie panoramiche.

Il *workflow* di lavoro permette diversi tipi di output che vanno dalla fedele restituzione di punti tramite fotogrammetria sferica a dense nuvole di punti ottenuti da restituzione automatizzata. I dati opportunamente trattati ed integrati possono fornire diversi livelli di analisi e ricostruzione virtuale che uniscono la precisione della fotogrammetria alla resa foto realistica delle superfici modellate.

E' stata infine testata una nuova soluzione di navigazione virtuale che all'interno dello stesso ambiente propone la possibilità di interagire contemporaneamente con i panorami sferici ad alta risoluzione orientati nello spazio e con il modello 3D ricostruito.

1. INTRODUZIONE

Oggi giorno diverse sono le tecniche di documentazione e rilievo dell'architettura più o meno dirette, efficaci ed accessibili in termini economici e di professionalità dell'utente.

Tra queste, di forte impatto e diffusione, troviamo la fotografia panoramica.

Il lavoro qui proposto nasce in un contesto di ricerca che da anni studia le fotografie panoramiche per dimostrare come queste, se utilizzate come punto di partenza per diverse tecniche (Fotogrammetria Sferica e *Structure From Motion*), diventano fonte *low-cost* e completa di informazione e rilievo dell'architettura.

L'integrazione di queste diverse fonti di restituzione permette di ottimizzare il modello in funzione dello scopo finale (pubblicazione GIS o su Google Earth, comunicazione "museale", rigoroso rilievo geometrico).

Tramite tecniche di modellazione e metodi propri dell'*Image based Modeling* si possono inoltre arricchire le ricostruzioni virtuali di alti contenuti fotorealistici (Fangi, d'Annibale, 2009) (Figura 1).

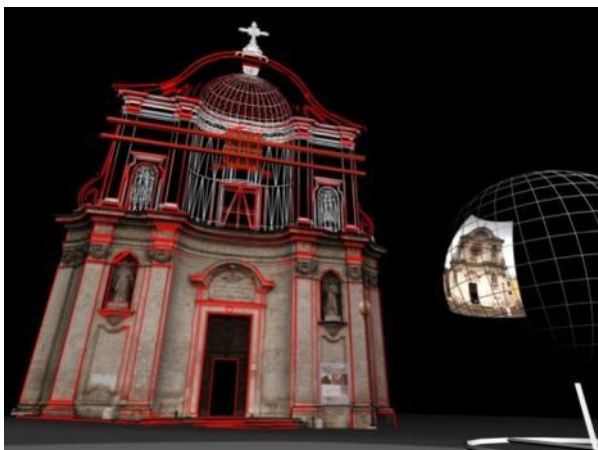


Figura 1: Modello *low-poly* con *texture* fotorealistiche da panorami sferici

La possibilità di partire dalle sole panoramiche ed abbinare diverse soluzioni di mercato (tour virtuali interattivi, restituzioni rigorose, riprese video ad alta risoluzione ecc) dà consistenza alla ricerca qui proposta.

Di seguito vengono presentate le diverse tecniche utilizzate evidenziandone gli aspetti che hanno portato alla loro scelta ed integrazione.

Fotografia panoramica

La fotografia panoramica permette, tramite una buona pratica fotografica e software di *stitching*, molteplici vantaggi: velocità di acquisizione, completezza della ripresa, elevata risoluzione, angolo di campo che può coprire fino a 360°, assenza di distorsione ed aberrazione cromatica [20] [24].

La possibilità di attribuire valenza geometrica alle fotografie panoramiche, tramite una strumentazione limitata fondamentalmente alla fotocamera e ad un pc di modeste prestazioni e ad un longimetro, ha guidato la ricerca nell'obiettivo di implementare mediante queste un processo di rilievo *stand-alone* che va oltre il più comune utilizzo di navigazione interattiva di tipo VR.

Sistemi VR

Software commerciali permettono la visualizzazione interattiva di fotografie panoramiche. La scelta di avere uno strumento "personalizzabile" ed interfacciabile con altre tecniche in aggiunta alla necessità di un controllo accurato dei parametri di navigazione ha guidato alla creazione di *tool* proprietari e flessibili per diversi scopi: dal tour virtuale alla gestione di dati fotogrammetrici [3].

Fotogrammetria sferica

La fotogrammetria sferica, testata in diversi anni di esperienze (Fangi, 2007-2012, [5], [6], [7], [9], [11], [12], [13], [14]), ha già dimostrato come le fotografie panoramiche possono essere una veloce e completa fonte di acquisizione dati per precise restituzioni geometriche.

I vantaggi della tecnica sono molteplici: l'economicità e velocità di acquisizione, la completezza della documentazione, la drastica riduzione dei tradizionali fotogrammi e modelli fotogrammetrici.

Per tutte queste caratteristiche la fotogrammetria sferica potrebbe essere lo strumento adatto per il Rilievo dei Beni Culturali che scompaiono a una velocità superiore a quella con cui si riescono documentare e necessitano quindi di un sistema di rilievo e catalogazione *low-cost* che abbia come specifiche:

- No teodoliti e stazioni totali
- No segnalizzazioni

- Costo inferiore ai 1000 euro
- Completezza della documentazione
- Rapidità di prese

Vantaggio non ultimo è quello di poterne usare i parametri di orientamento per posizionare nello spazio i panorami stessi da esplorare/navigare e, in fase di modellazione, da proiettare come *texture* ad alta risoluzione sul modello 3D [8].

Structure from Motion

Le tecniche fotogrammetriche di *Structure from Motion* [16] e restituzione automatizzata [15][18] sono ormai di ampia diffusione anche se ancora difficilmente controllabili e utilizzabili da un punto di vista metrico.

Punto di forza è il carattere *low-cost* e la possibilità di utilizzarle, a partire dalle stesse fotografie panoramiche, come valido aiuto alla modellazione di forme complesse (bassorilievi etc.) e spesso dispendiose per la fotogrammetria sferica.

Le acquisizioni panoramiche di partenza permettono inoltre di implementare i risultati utilizzando un numero inferiore di immagini ma con qualità geometrica e risoluzione superiore [1].

2. WORKFLOW DI LAVORO

Obiettivo del lavoro è quello di presentare una metodologia operativa che parte dall'acquisizione dati (fotografie panoramiche) per arrivare ad una soluzione integrata, speditiva e *low-cost* di *Virtual Architecture*.

Prioritaria è la ricerca di un metodo flessibile in funzione delle caratteristiche dell'oggetto da rilevare e degli scopi della ricostruzione 3D. Per flessibilità del metodo si intende la possibilità di essere adattato ad esperienze di rilievo differenti per scala e complessità dell'oggetto, linearità delle geometrie, distanza dall'oggetto, difficoltà operative di acquisizione in sito.

Esperienze precedenti hanno permesso di testare potenzialità, limiti ed integrazione delle principali tecnologie di restituzione coinvolte: Fotogrammetria Sferica e *Structure from Motion*.

Di seguito sono presentati due casi studio per evidenziarne i diversi esempi di restituzione: primitive geometriche nello spazio tramite Fotogrammetria Sferica (Figura 2) e nuvola di

punti automatizzata per un dettaglio architettonico difficilmente restituibile un approccio di tipo fotogrammetrico (Figura 3).

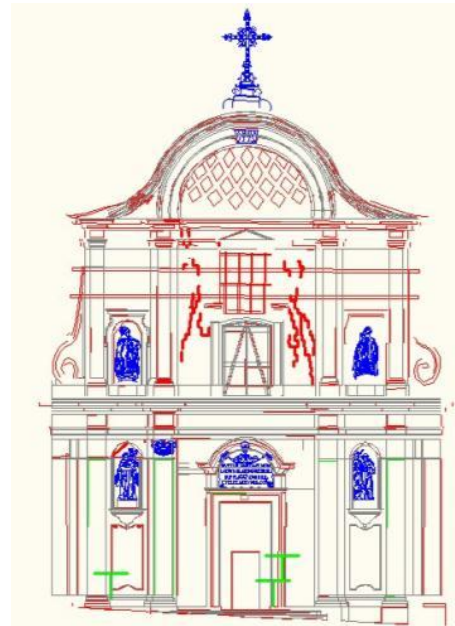


Figura 2: Prospetto, Chiesa Anime Sante, L'Aquila. Set di panorami e restituzione manuale tramite Fotogrammetria Sferica (restituzione di L. Piermattei)

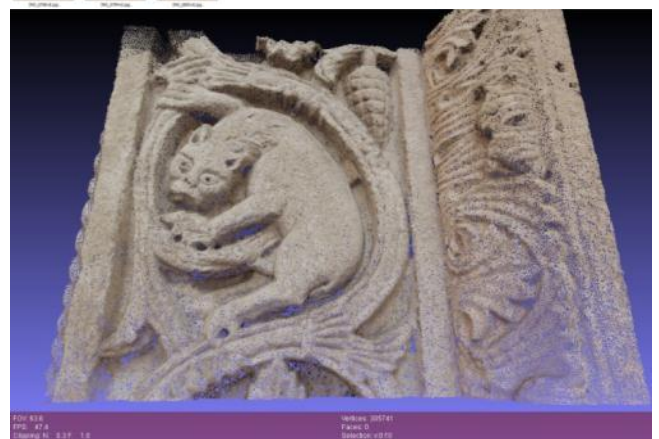


Figura 3 Bassorilievo, Portale di Santa Maria della Piazza, Ancona. Set di foto e restituzione automatica di punti 3D

Obiettivo della ricerca qui proposta è quello di unire il rigore geometrico della Fotogrammetria Sferica alla possibilità di automatizzare alcuni *step* di restituzione oltre che ampliare lo spettro delle geometrie rilevabili.

Non secondario è il tentativo di reale integrazione delle tecniche di ricostruzione automatizzata in un processo di rigorosa ricostruzione geometrica.

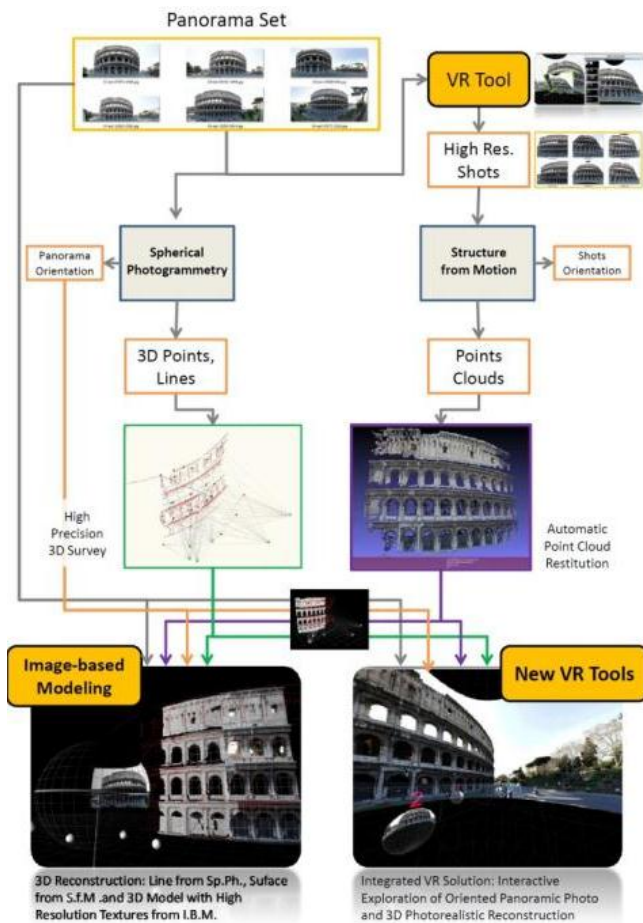


Figura 4: Workflow di lavoro

In Figura 4, è presentato il *workflow* di lavoro sviluppato che, a partire dalle stesse fotografie panoramiche, integra le diverse tecniche complementari di restituzione 3D in una soluzione di *Image-based Modeling* e di successiva navigazione interattiva del modello e dei relativi panorami orientati nello spazio.

Come esempio viene riportata l'esperienza di rilievo del Colosseo di Roma Capitale. La fase di acquisizione è veloce, *low-cost* e di tipo prettamente fotografico: poche ore di lavoro in sito (Marzo, 2012), con una macchina fotografica Canon EOS 60D ed una testa panoramica.

Consiste in una serie di prese panoramiche orientabili tra loro in modo da coprire l'oggetto in

tutte le sue zone di occlusione da almeno due panorami diversi (Figura 5).



Figura 5 Strumento di acquisizione e fotografie panoramiche

In particolare vengono acquisiti 11 panorami: 6 parziali per coprire parte dell'esterno del Colosseo e 5 completi per l'interno, secondo lo schema di acquisizione in Figura 6.

La sperimentazione aveva inoltre come particolare obiettivo il tentativo di chiudere, con un'unica acquisizione di 5 panorami scattati dal livello dell'arena centrale, l'intero perimetro del Colosseo di circa 527 m, con assi che misurano 187,5m e 156,5m

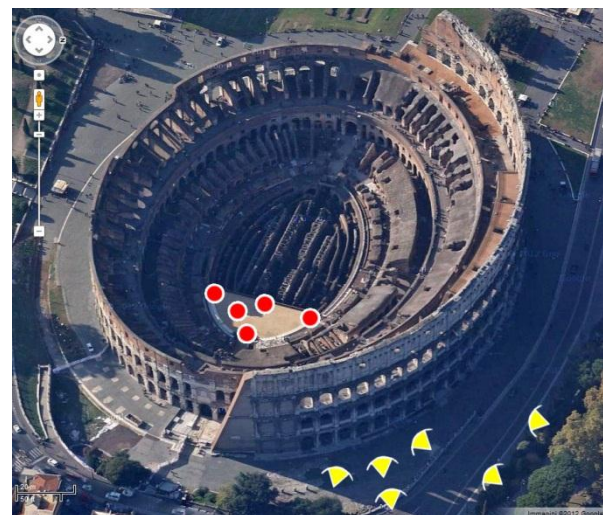


Figura 6: Schema di acquisizione interna (in rosso) ed esterna (in giallo)

Si procede impiegando le stesse fotografie panoramiche con proiezione equirettangolare (o

sferica) come punto di partenza per le diverse fasi del *workflow* di ricerca, qui di seguito descritte:

2.1 Navigazione virtuale di tipo VR

Un *tool* proprietario [3] permette una prima visualizzazione interattiva dei panorami (Figura 7) e nello stesso tempo prevede la possibilità di salvare proiezioni piane rettilinee ad alta risoluzione della scena (Figura 8, Figura 9), da utilizzare nel successivo processo di *Structure from Motion*.

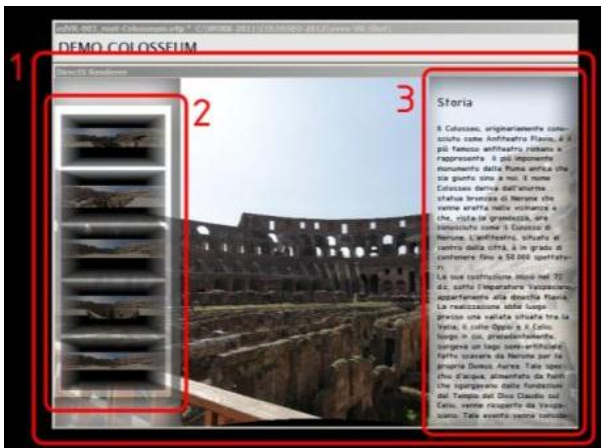


Figura 7: VR *tool* per la navigazione dei panorami acquisiti. Interfaccia grafica (1), pulsanti di scelta rapida con anteprima dei panorami (2), informazioni aggiuntive (3)



Figura 8: Acquisizione di proiezioni piane rettilinee ad alta risoluzione

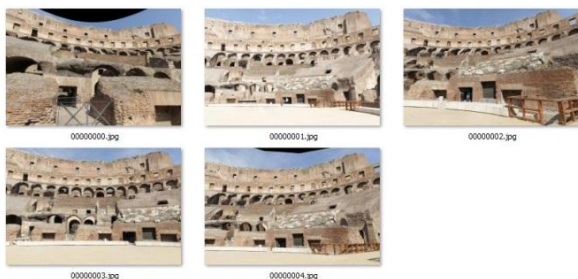


Figura 9: 5 Proiezioni rettilinee della stessa porzione interna, acquisite dalle 5 panoramiche interne tramite VR *tool*

L'acquisizione non si limita alla risoluzione dello schermo ma può essere aumentata fino ad una risoluzione massima testata di 8192x8192 e quindi circa 64 MP.

Ulteriore vantaggio è l'assenza di distorsione anche per scatti con focale con ampio angolo di campo.

2.2 Restituzione di primitive geometriche 3D tramite Fotogrammetria Sferica

Utilizzando i *tool* proprietari (Fangi, 2007, 2008, 2009, 2011), l'oggetto viene ricostruito per fasi:

- Formazione del modello fotogrammetrico, unendo una coppia arbitraria di panorami, mediante la condizione di complanarità applicata ad almeno 4 punti di passaggio.
- Orientamento assoluto del modello con una rototraslazione con variazione di scala
- Concatenamento del modello con i modelli successivi
- Compensazione di blocco a fasci proiettivi.
- Ricomposizione dell'oggetto per intersezione di rette proiettive omologhe di panorami orientati (Figura 10).

Viene del tutto saltata la fase dell'orientamento interno, per la natura stessa del panorama.

Per definire la scala del modello è sufficiente rilevare in sito un' unica misura lineare, mediante la quale si può fissare il sistema di riferimento oggetto per l'orientamento assoluto.

Le precisioni raggiunte sono dell'ordine del centimetro (Tabella 1).

Tabella 1: Fase di orientamento, controllo accuratezza

σ_{zero}	=	.0011116 rad	in gradi	.0708	
medie degli sqm					
sqmx=	.02559	sqmy=	.02632	sqmz=	.02317
medie RMS sqm					
sqmx2=	.03377	sqmy2=	.03333	sqmz2=	.03181

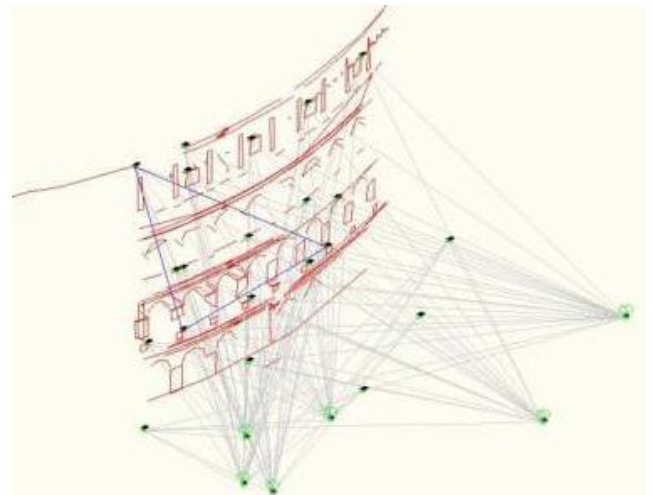


Figura 10 Rete d'appoggio e restituzione fotogrammetrica

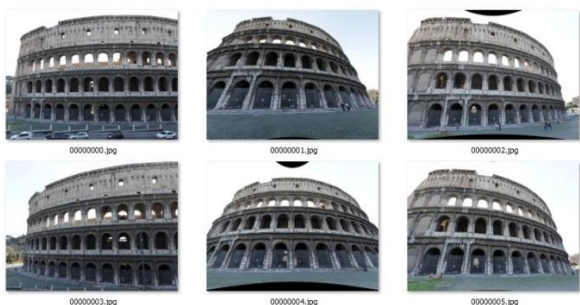
2.3 Restituzione di punti 3D tramite tecniche di Structure from Motion (SFM)

Le proiezioni rettilinee estratte dai panorami sono prive di deformazioni di lastra e vengono elaborate da *toolkit open source* basati su Bundler [15][18] e PMVS2 [16] (Figura 11).

In particolare vengono estratte 6 immagini per il rilievo di una porzione dell'esterno del Colosseo (risoluzione 5120x3840) e 35 per l'interno (risoluzione 4320x2880).

Le nuvole di punti restituite in automatico sono dense ma di scala non nota.

Con una trasformazione di similitudine la nuvola può essere adattata al modello ottenuto per fotogrammetria che può essere costituito da una esigua quantità di punti, opportunamente distribuiti.



N	Yaw	Pitch	FOV (35mm eq)	Aspect Ratio
0	0,286	0,083	17,753	0,75
1	0,235	0,078	22,450	0,75
2	0,466	0,074	15,513	0,75
3	0,285	0,059	25,470	0,75
4	0,231	0,028	35,455	0,75
5	0,280	0,027	34,342	0,75

Figura 11: 6 scatti ad alta risoluzione e relative informazioni

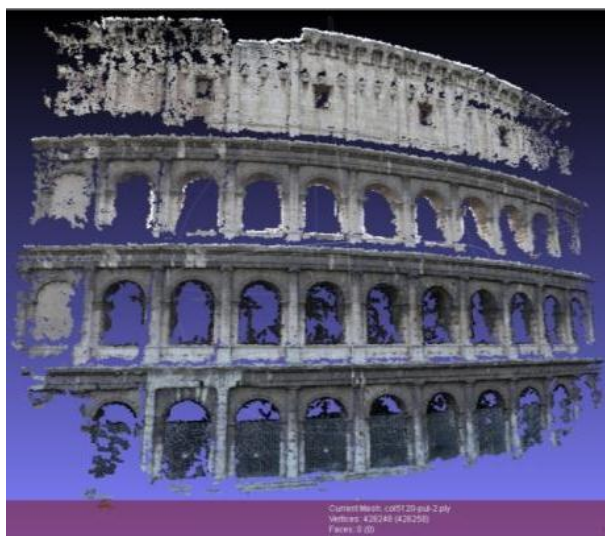


Figura 12: Restituzione automatica di punti 3D tramite SFM

In modo analogo si è proceduto all'estrazione automatica di punti interni, relativi all'intero perimetro del Colosseo.

I risultati mostrano una restituzione automatica completa anche per oggetti a distanze notevoli (Figura 13, Figura 14).

La tecnica della formazione dei panorami consente di collegare fra loro panorami non intervisibili alla sola condizione che abbiano in comune almeno 4 punti di passaggio o collegamento. Questo rende ad esempio possibile collegare abbastanza agevolmente la serie dei panorami esterni alla serie di quelli interni.

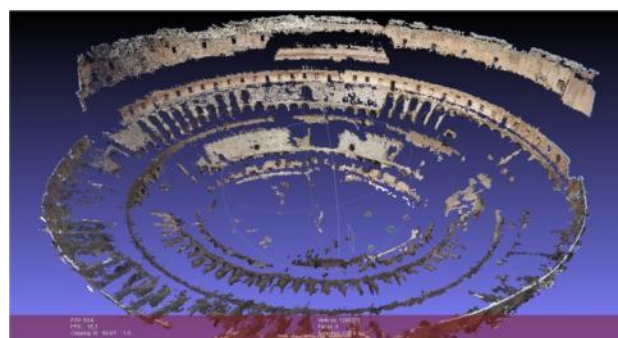


Figura 13 Restituzione automatica di punti 3D tramite SFM

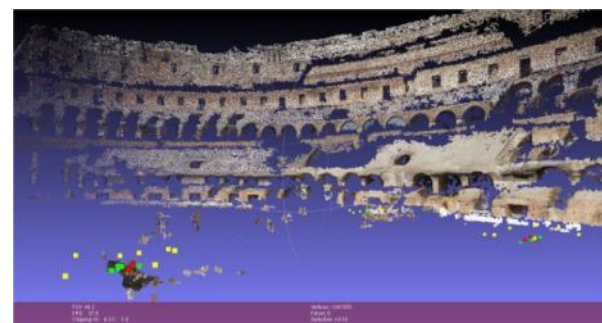


Figura 14 Restituzione automatica di punti 3D tramite SFM. In verde e in rosso i punti di acquisizione calcolati

2.4 Ricostruzione 3D

Noti i parametri di orientamento dei panorami, a partire dalle primitive di restituzione fotogrammetrica e con l'aiuto della nuvola di punti, l'oggetto può essere ricostruito tramite tecniche di *Image-based Modeling*.

L'obiettivo è quello di creare superfici con *texture* foto realistiche, ottenute dagli stessi panorami ad alta risoluzione orientati nello spazio 3D.

In Figura 15 e Figura 16 sono evidenti tutti gli elementi utili alla costruzione di un modello fotorealistico: in rosso le geometrie di restituzione fotogrammetrica, la *mesh* ottimizzata a partire

dalla nuvola di punti 3D da SFM, le superfici con *texture* fotorealistica ottenute per proiezione sferica dei panorami orientati.

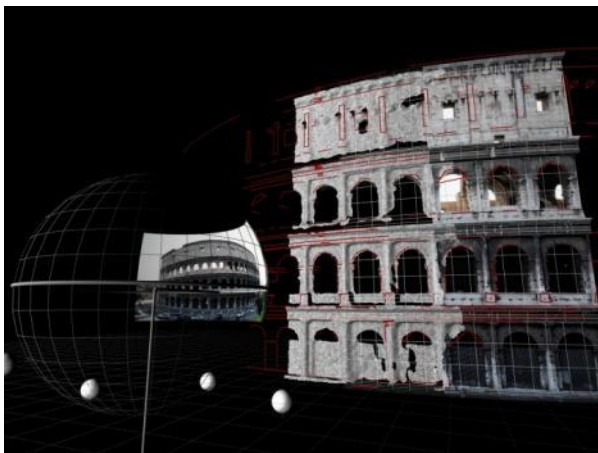


Figura 15: Fasi di costruzione delle superfici foto realistiche

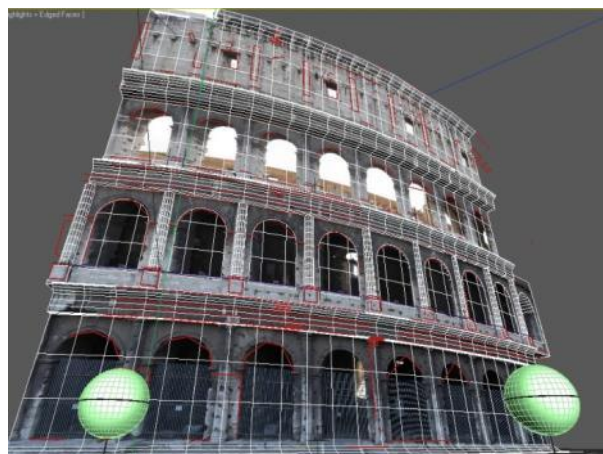


Figura 16: Modellazione assistita da proiezione texture

La coesistenza di più sistemi di restituzione in unico ambiente di modellazione permette una valutazione riguardo la coerenza dei risultati ottenuti.

2.5 Esplorazione interattiva

Tramite un'interfaccia grafica personalizzata (Figura 17), un *tool* proprietario permette la visualizzazione interattiva del modello ricostruito e dei panorami ad alta risoluzione orientati nello spazio grazie alla Fotogrammetria Sferica (d'Annibale, tesi di dottorato).

Questa soluzione di esplorazione interattiva di arricchisce la classica navigazione di tipo VR dei panorami alternandola con una navigazione, libera nello spazio, dello stesso oggetto ricostruito.

Per una migliore comprensione dell'architettura questa soluzione di esplorazione interattiva può

essere associata ad un sistema di informazioni e integrata con diverse modalità di interazione [3].

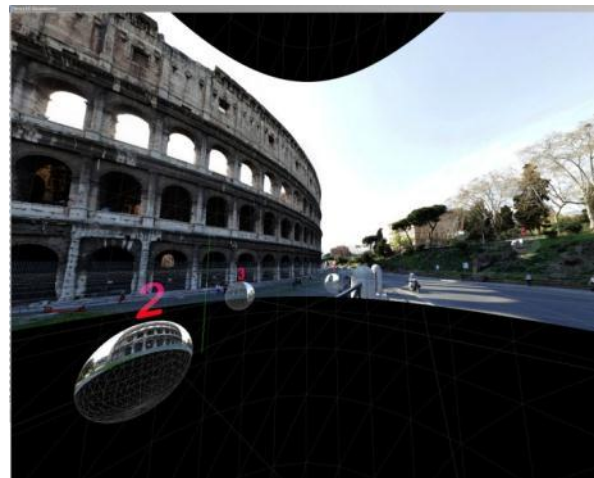


Figura 17: Esplorazione interattiva di un panorama nello spazio 3D in cui sono presenti gli altri panorami orientati e il modello 3D

CONCLUSIONI

Il metodo presentato basato sulle fotografie panoramiche e tecniche di tipo fotogrammetrico si dimostra completo, flessibile e capace di garantire: alta risoluzione e qualità della documentazione fotografica, acquisizione veloce e *low-cost*, precisione geometrica della restituzione fotogrammetrica, speditezza e automatismi della SFM. Gestendo ogni fase del processo, il lavoro può essere ottimizzato in relazione agli strumenti a disposizione, ai tempi del rilievo, ai costi della missione ed alle caratteristiche dell'elaborato.

L'uso di *tool* proprietari permette ulteriori personalizzazioni del *workflow* presentato. Come esempio viene portato lo studio di soluzioni complesse di visualizzazione interattiva degli scenari virtuali ricostruiti (Figura 18).



Figura 18: Sistema VR per spazi immersivi di navigazione virtuale

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. d'Annibale, Image Based Modeling from Spherical Photogrammetry and Structure For Motion. The case of the Treasury, Nabatean Architecture in Petra, *in the proceedings of XXIIIrd International CIPA Symposium, Prague (Czech Republic,) Sep. 2011* – ISBN: 978-80-01-04856
- [2] Barazzetti L., Fangi G., Remondino F., Scaioni M., 2010. Automation in Multi-Image Spherical Photogrammetry for 3D Architectural Reconstructions - The 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST , A. Artusi, M. Joly-Parvex, G. Lucet, A. Ribes, and D. Pitzalis (Editors) ISBN 9783905674293
- [3] E.d'Annibale (2010) – New VR system for navigation and documentation of Cultural Heritage – C.I.P.A. Workshop, Petra 4-8 November 2010.
- [4] E.d'Annibale, S.Massa, G.Fangi (2010) - Photomodeling and point clouds from spherical panorama - Nabatean Architecture in Petra, Jordan - C.I.P.A. Workshop, Petra 4-8 November 2010.
- [5] Fangi G., 2010. La Fotogrammetria sferica. Una nuova tecnica per il rilievo dei vicini – *Archeomatica*, anno 1, n.2 Giugno 2010 ISSN 2037 – 2485 PG.6-10
- [6] Fangi G., 2010. Multiscale Multiresolution Spherical Photogrammetry With Long Focal Lenses For Architectural Surveys –ISPRS mid-term symposium New Castle, June 2010 ISSN 1682-1777
- [7] Fangi G., 2010. Multi-scale Mult-resolution Spherical Photogrammetry With Long Focal Lenses For Architectural Surveys –ISPRS mid-term symposium NewCastle, June 2010 ISBN-10: 190444587X ISBN-13: 978-1904445876
- [8] E.d'Annibale, G.Fangi (2009) – Interactive modelling by projection of oriented spherical panorama – 3D-Arc'2009, 3D Virtual Reconstruction and Visualisation of complex Architectures – Trento 25-29. February 2009- ISPRS Archives - Vol XXXVIII-5/W1 : 1682-1777 on cd.
- [9] Fangi G., 2009. Further Developments of the Spherical Photogrammetry for Cultural Heritage – XXII Cipa Symposium, Kyoto, 11-15 Ottobre 2009 2009, ISSN 0256-1840
- [10] Fangi G., Schiavoni A., 2009. Una esperienza di Mobile Mapping con la fotogrammetria sferica – Attidella 13° Conferenza nazionale Asita – 1-4 Dicembre 2009, Bari ISBN: 9788890313226
- [11] Fangi G., 2007. La Fotogrammetria sferica dei mosaici di scena per il rilievo architettonico – bollettino SIFET n. 3 2007 pg 23-42, ISSN: 1721-971X
- [12] Fangi G., 2007. The Multi-image spherical Panoramas as a tool for Architectural Survey- XXI International CIPA Symposium, 1-6 October 2007, Atene, ISPRS International Archive – vol XXXVI-5/C53 – ISSN 1682-1750 – CIPA Archives vol. XXI-2007 ISSN 0256-1840 - pg.311-316
- [13] Fangi G., 2007. Una nuova fotogrammetria architettonica con i panorami sferici multimmagine – Convegno Sifet, Arezzo, 27-29 Giugno 2007, ISSN: 1682-1777 - ISBN 88-901939 -4-8
- [14] Fangi G., 2007. Una nuova fotogrammetria architettonica con i panorami sferici multimmagine – Convegno Sifet, Arezzo, 27-29 Giugno 2007, ISSN: 1682-1777 - ISBN 88-901939 -4-8
- [15] N. Snavely, S. M. Seitz, R. Szeliski. Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision*, 2007.
- [16] Y. Furukawa (Department of Computer Science and Beckman Institute University of Illinois at Urbana-Champaign, USA) and J. Ponce (Département d'Informatique Ecole Normale Supérieure, Paris, France) - Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis – *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2009 - *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2007.
- [17] Fangi G., 2006. Investigation On The Suitability Of The Spherical Panoramas By Realviz Stitcher For Metric Purposes, *ISPRS Archive vol. XXXVI Part 5, Dresden 25-27 September 2006* ISSN 1682-1750
- [18] Noah Snavely, Steven M. Seitz, Richard Szeliski. Photo Tourism: Exploring image collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2006)*, 2006
- [19] Benosman R., Kang S.B. , 2001. *Panoramic Vision Sensors Theory and Application* – Springer New York
- [20] Shum H.Y., Szeliski, 2001. Construction of Panoramic Image Mosaics with Global and Local Alignment – in *Panoramic Vision Sensors Theory and Application* – Springer New York
- [21] Fangi G. Gagliardini G, Malinverni E.S., 2001. Photointerpretation And Small Scale Stereoplotting With Digitally Rectified Photographs With Geometrical Constraints – *Proceedings Cipa Symposium 2001, Potsdam, 1-4 sett., pp 160-167*
- [22] Fangi G., Gagliardini G., Malinverni E.S., 2001. Photointerpretation And Small Scale Stereoplotting With Digitally Rectified Photographs With Geometrical Constraints – *Proceedings Cipa Symposium 2001, Potsdam, 1-4 sett., pp 160-167*
- [23] Lowe D.G., 1997. Distinctive image feature from scale invariant keypoints, *International Journal of computer Vision*, Vol.60, n.2
- [24] Szeliski R., Shum H., 1977. Creating full view panoramic image mosaics and environment maps. In *Proc. of SIGGRAPH*, pages 251-258