

IL PAVIMENTO TESSULARE DI SAN MARCO A VENEZIA

LUIGI FREGONESE, CARLO MONTI

PIAZZA LEONARDO DA VINCI, 32 – 20133 MILANO, DIP. BEST - SITECH – 3DSURVEY GROUP

TEL. +39 022399 6513 FAX +39 022399 6550 – luigi.fregonese@polimi.it

TEL. +39 022399 6514 FAX +39 022399 6550 – carlo.monti@polimi.it

1. La conoscenza del Bene Culturale e la sua documentazione

L'avvicinamento conoscitivo e programmatico applicato ai metodi di rilievo e di restituzione dei Beni Culturali parte dalla definizione data dall'art. 29 del Codice dei Beni Culturali in cui si afferma che "La conservazione del patrimonio culturale è assicurata mediante una coerente, coordinata e programmata attività di studio, prevenzione, manutenzione e restauro". Nel contesto italiano ed internazionale, in un ambito di attività non saltuarie ed episodiche, ma programmate, assumono particolare rilevanza i temi della manutenzione e del rilievo, che sempre il Codice definisce come "il complesso delle attività e degli interventi destinati al controllo delle condizioni del bene culturale e al mantenimento dell'integrità, dell'efficienza funzionale e dell'identità del bene e delle sue parti". In questa definizione si considera l'attività di *rilievo* come una attività complessa che richiede un approccio globale nella definizione dei modelli di organizzazione, nelle strategie conoscitive e attuative. In un contesto necessariamente multidisciplinare il rilievo è disciplina caratterizzata da un doppio compito: da una parte quello analitico, finalizzato a definire la conoscenza del Bene Culturale dal punto di vista geometrico materiale, radiometrico, con analisi degli elementi di dissesto e di degrado atti a descrivere quadri diagnostici dello stato di funzionamento e di degrado o di rischio; dall'altra quello metodologico-sperimentale, il cui obiettivo è quello di definire le migliori strategie di intervento in merito alle strumentazioni utilizzabili, alle metodologie di applicazione ed alla ricerca delle forme migliori di rappresentazione, nonché, come ultimo aspetto, la sostenibilità economica funzione delle scelte sui metodi di rilievo e di rappresentazione del rilevato. La rappresentazione di superficie complesse, lo studio della forma e del colore del supporto tessulare in genere, comportano la creazione di modelli tridimensionali articolati sia per le metodologie utilizzate per la loro acquisizione, sia per la gestione delle informazioni metriche e le accuratezze che si vogliono ottenere. Il termine riprodurre che si utilizza nella creazione di modelli virtuali pone alcune questioni legate al significato stesso: produrre nuovamente un oggetto significa poter conoscerlo metricamente con una accuratezza definita a priori in base alle scale di rappresentazione scelte. Se tuttavia la finalità della conoscenza è quella di eseguire una copia dell'oggetto ad una scala reale, le precisioni richieste produrranno un modello del tutto simile alla realtà medesima. La riproduzione ex-novo pone in evidenza un altro aspetto: la conoscenza metrica deve essere accompagnata da una adeguata conoscenza delle informazioni di colore (corretta posizione spaziale delle informazioni radiometriche) per poter collocare gli elementi che definiscono il complesso di una superficie musiva pavimentale quale è il Pavimento musivo di San Marco. Ecco che la documentazione dei Beni Culturali attraverso l'acquisizione di dati digitali e la realizzazione di modelli 3D attualmente può contare su molteplici procedure e strumenti di rilievo che negli ultimi decenni si sono evoluti e sempre più specializzati per la raccolta di informazioni metriche con alti livelli di risoluzione, affidabilità e accuratezza. I dati raccolti possono essere archiviati, georeferenziati, gestiti ed interrogati in database numerici, che opportunamente elaborati, consentono di ottenere rappresentazioni 3D reali (digitalizzazione), realistiche (ricostruzione) e interattive dei manufatti. La letteratura degli ultimi anni riporta numerosissimi esempi in cui attraverso la generazione di modelli digitali 3D multirisoluzione è possibile restituire adeguatamente i contenuti geometrici, spaziali, radiometrici e multispettrali degli oggetti indagati per la loro conoscenza e conservazione. Basti

pensare a elementi e architetture complesse o progetti di rilievo dove devono essere registrati e restituiti elementi a piccola e grande scala: in questi casi solo una realizzazione tridimensionale del rilievo (Fassi et al, 2010), in cui si ha l'integrazione di varie metodologie, consente di cogliere le forme e le caratteristiche del manufatto e del contesto in cui si inserisce. Molti lavori documentati riportano questo, citandone soltanto alcuni (Remondino et al., 2009; Guidi et al., 2009; Tsirliganis et al, 2004,).

In questo contesto ci si è proposto di sperimentare e documentare sulle base delle esperienze già acquisite, nuove metodologie che contemperino al tempo la documentazione necessaria agli interventi grazie al rilevamento, ai costi degli stessi, trovando un compromesso soddisfacente fra le esigenze di raffinata e precisa rappresentazione, il tipo di rappresentazione, la scala, la visione fotografica (ortofoto), i modelli 3D, la valutazione dei costi in funzione della tecnologia adottata e della sua funzionalità per un risultato utile.

2. I problemi del pavimento

Le esigenze

Il pavimento tessulare della basilica richiede di contemperare due diverse e opposte esigenze:

- garantire l'accessibilità a fedeli e visitatori;
- conservare nell'insieme e nelle sue parti questo manto antico da tempo compromesso dall'uso, dalle variazioni di complanarità del sottosuolo e dall'umidità.

Le continue integrazioni e sostituzioni delle tessere degradate, tuttavia non molto estese, hanno consentito specie con i restauri ottocenteschi, che giungessero originali fino a noi le grandi lastre di marmo e la sopravvivenza del disegno complessivo.

I problemi

- Il consumo per l'elevata frequentazione;
- i sali dovuti alla frequenza di alte maree nel nartece;
- la varietà di sottosuoli con necessità di rimozione e restauro in laboratorio;
- il rilevante problema dell'acqua alta.

Alcune soluzioni

I temi del restauro e della gestione hanno evidenziato che:

- si deve camminare sul pavimento che altrimenti si solleva;
- la sua superficie non può essere coperta poiché deve traspirare;
- si deve evitare il consumo superficiale dei marmi;
- l'uso di tappeti tipo 3M favorisce ciò.

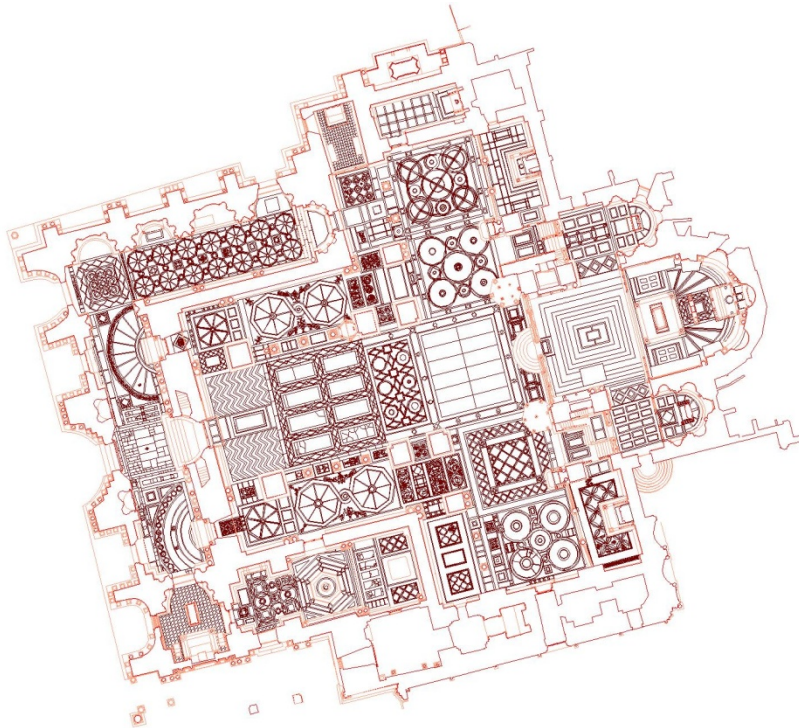
I rilievi di precisione consentono di:

- intervenire nei restauri con sicurezza;
- mantenere il modellato tridimensionale della superficie;
- testimoniare con precisione l'intervento anche sulla singola tessera.

La Basilica di San Marco rappresenta una risorsa culturale, sociale ed economica che deve essere preservata dai segni del tempo. I flussi turistici, la subsidenza, l'inquinamento, le maree obbligano ad un continuo aggiornamento delle tecniche e degli strumenti per la tutela della Basilica.

Nel corso del tempo si sono verificati movimenti e deformazioni che hanno lasciato segni profondi; in passato si era soliti intervenire con opere di consolidamento e restauro che arrivavano anche al rifacimento di parti della struttura originarie. Questo non servì a risolvere il problema, in quanto, i carichi e i cedimenti ai quali la basilica era soggetta hanno contribuito ad un lento ritorno alle precedenti condizioni di deformazione.

La pianta della Basilica



Figura, 1. Pianta della Basilica. Scala nominale 1:50

La situazione del pavimento in alcune immagini.



Figura, 2. Lo stato del mosaico da “tera”



Figura, 3. Il mosaico da “tera” restaurato

Nel caso del pavimento tessulare si sono verificate variazioni altimetriche che hanno determinato un andamento fortemente ondulatorio, con dislivelli anche di diversi centimetri. Fino alla fine dell’ottocento, esso non era riconosciuto come un bene artistico da preservare, per questo ha subito diverse modifiche nei materiali e nella sua conformazione, nel tentativo di ripristinare il suo andamento regolare.

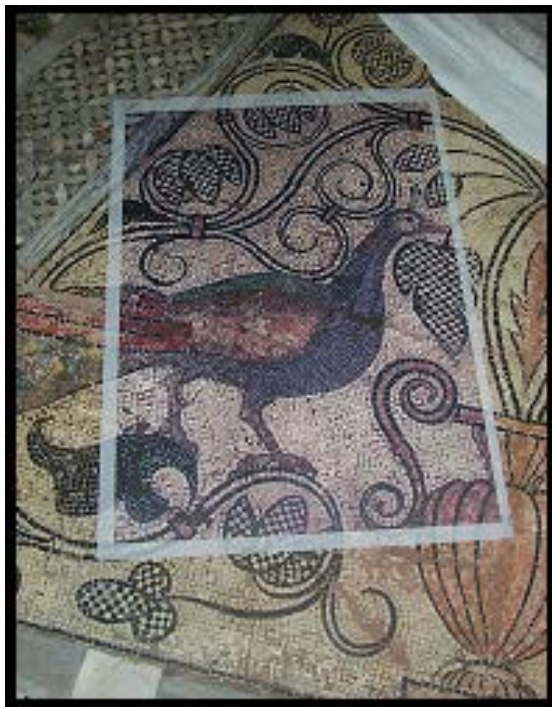
Soltanto dopo una conoscenza più approfondita del comportamento della Basilica ci si è reso conto che la sua conformazione irregolare è una caratteristica indispensabile che va preservata. Per salvaguardare la conservazione del pavimento, si è pensato a un tipo di rappresentazione con un elevato grado di dettaglio, che potesse documentare la disposizione e lo stato di ogni tassella del mosaico, unitamente alle diverse quote della pavimentazione. Il risultato che si voleva raggiungere è stata la realizzazione di un ortofoto 3D in scala 1:1 dell’intero pavimento.

3. Le prime sperimentazioni (2002)

Prima di produrre l’ortofoto dell’intero pavimento è stata necessaria una fase sperimentale per valutarne la fattibilità, durante la quale è stato costruito un Digital Surface Model (DSM) in duplice modalità: per via fotogrammetrica e per via laser scanner, sulla stessa porzione di pavimento. La principale differenza tra i due metodi sta nel fatto che con il rilievo fotogrammetrico il DSM viene ottenuto per autocorrelazione d’immagine, mentre con il laser scanner esso dipende dalla nuvola dei punti rilevata con l’apparecchiatura laser.

Inizialmente è stata testata l’area dei pavoni nella navata destra. Le operazioni di presa sono state effettuate con una macchina metrica Rollei D7 (sensore CCD con Chip da 2/3” per 2552 x 1920 pixels, con profondità pari a 30 bit e lunghezza focale fissa di 27mm) dove era previsto un ricoprimento dei fotogrammi del 60% longitudinalmente e del 20% trasversalmente, con risoluzione a terra del pixel di 1 mm. Il laser scanner utilizzato, invece, è stato il Callidus con il quale sono state effettuate sei scansioni, per un totale di 1.500.000 punti. I software usati sono stati Spider Alias Wave Front per la gestione delle nuvole di punti, ArcInfo 8.0.2 e ArcGIS 8.1 per il calcolo e la visualizzazione del DSM, APEX PCI 7.0 per la produzione dell’ortofoto. In seguito le ortofoto ottenute dai due diversi metodi furono

stampate su indeformabile trasparente e confrontate con la realtà. Quella ricavata da DSM per autocorrelazione d'immagine era perfetta, quella da laser presentava qualche incertezza.



Figura, 4. Restituzione dell'ortofoto su poliestere indeformabile e sovrapposizione sul pavimento: perfetta sovrapposizione

Dopo aver eseguito questa prima sperimentazione, verificandone la fattibilità tecnica, sono state introdotte delle modifiche rivolte al miglioramento del rilievo. Per prima cosa si è pensato di ridurre la dimensione del pixel a terra da 1mm a 0.5mm, mediante l'utilizzo di una diversa camera con una più alta risoluzione e una maggior dimensione del sensore. Si trattava della camera Rollei DB44 Metric a 16 milioni di pixel che si era resa disponibile come prototipo. La riduzione della dimensione del pixel a terra a 0.5mm fu legata all'alta precisione che richiedeva la restituzione in scala 1:1, per avere una precisa resa delle tessere del pavimento.



Figura, 5. Camera Rollei DB44 Metric Figura, 6. Ortofoto digitale 3D della zona sperimentale del pavimento della Basilica di San Marco

In seguito alla scelta di utilizzare una diversa macchina, è stata necessaria la sua sperimentazione su un'ulteriore parte del pavimento. L'area situata nel braccio destro del transetto, di fronte alla Camera del Tesoro, era stata considerata significativa come zona per accertare la fattibilità del rilievo.

Si trattava di un'area molto degradata, con rigonfiamenti e rotture della superficie causati dalle tensioni che si sono verificate per l'utilizzo, all'interno della malta di allettamento, di un cemento che ha reagito chimicamente con i sali marini.

In questa area, di circa 40mq, le operazioni di rilievo sono state effettuate utilizzando, come già accennato, la camera Rollei DB44 Metric (sensore CCD-Chip con 4080 x 4076 pixel e dimensioni 36.72 x 36.684mm, profondità di colore fino a 48 bit, 32 MB per immagine), con metodologia di presa nadirale, tipica della fotogrammetria aerea per la realizzazione di rilievi cartografici. La macchina fotografica è stata montata su un carrello cercando di mantenere la posizione del sensore parallela al piano del mosaico, ad una distanza di presa di circa 2.30m consentendo un ricoprimento a terra per ogni fotogramma di circa 4 mq. Sono state effettuate un totale di 27 prese suddivise in tre strisciate, ciascun fotogramma prevedeva una sovrapposizione longitudinale del 60 % e una sovrapposizione trasversale del 20 %.

In relazione al ricoprimento a terra ed alla sovrapposizione dei singoli fotogrammi sono stati programmati i punti d'appoggio; essi sono stati rilevati topograficamente con stazione totale motorizzata TCRM1103 e TCRA1103 e con livello digitale Leica DNA03 ad alta precisione (0.3mm/km in doppia lettura), per limitare l'errore di posizione ad un paio di millimetri e in quota al di sotto del mezzo millimetro. I punti di appoggio, in totale 70, sono stati utilizzati tutti per il calcolo dell'orientamento delle prese attraverso la triangolazione aerea per stelle proiettive; oltre ad essi sono stati rilevati topograficamente anche altri punti come controllo, per verificare l'attendibilità del modello.

In questa fase l'ortofoto ed il modello 3D sono stati realizzati mediante l'utilizzo del software APEX PCI 7.0, nel quale i fotogrammi sono stati introdotti nel formato TIF senza compressione per avere la massima risoluzione alla scala 1:1. I software utilizzati devono, quindi, operare con un'entità di dati considerevole; è per questo che per visualizzare tutte le immagini contemporaneamente ricorrono alla cosiddetta "piramide d'immagine" con otto livelli di risoluzione in base al grado di zoom.

Il programma ha permesso di costruire il DSM su una maglia di nodi molto fitta di 15mm x 15mm; esso misura le quote dei punti sulle immagini orientate e determina per interpolazione le quote degli spazi tra nodo e nodo, così da ottenere una superficie coerente con la realtà. La riuscita di un modello il più possibile reale è legata alla concentrazione dei nodi; si deve, però, trovare un compromesso tra passo della griglia e tempo di calcolo, infatti più la maglia dei nodi è fitta più alto è il tempo di calcolo.

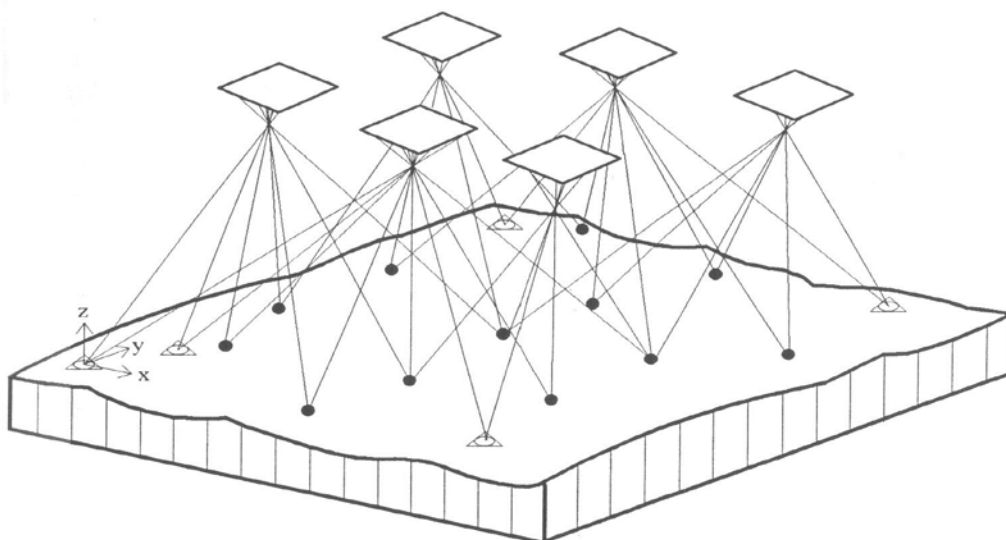
Dopo la realizzazione del DSM, attraverso il programma ArcGIS si è potuto visualizzare l'ortofoto e il DSM, ma anche ricavare e gestire dati numerici, dai quali sono state ricavate sezioni del modello tridimensionale. Il programma APEX, infatti, non è in grado di produrre, direttamente dal DSM, file dxf e dwg che rappresentino l'andamento del pavimento musivo.

L'importanza che questa tipologia di rilievo ha assunto per il restauro della Basilica, dopo averne accertata la fattibilità, ha spinto la redazione dell'ortofoto all'intero pavimento.

4. L'ortofoto digitale delle superficie complesse

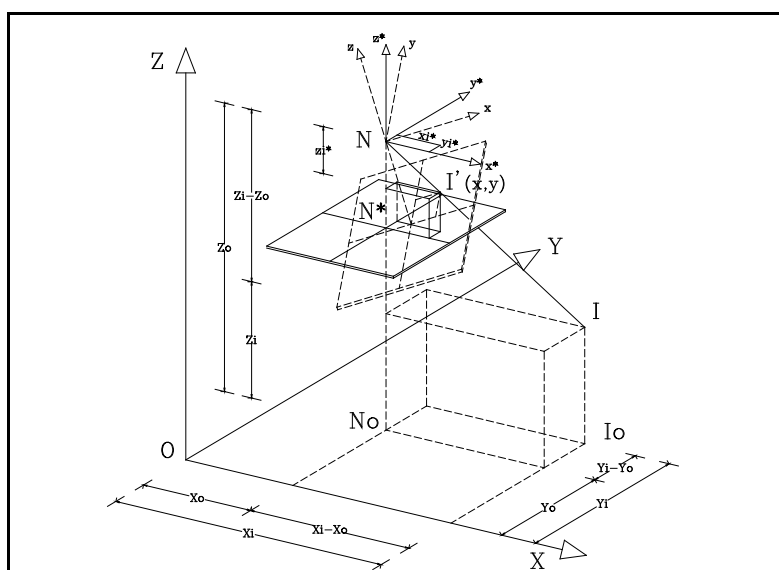
La metodologia impiegata per la realizzazione dell'ortofoto, ritenuta la più idonea forma di rappresentazione avendo sia la qualità semantica, sia quella quantitativa, è dunque quella classica fotogrammetrica, che sinteticamente determina una corrispondenza univoca tra i punti che appartengono alle immagini, elemento base del processo fotogrammetrico, e i corrispondenti punti dell'oggetto reale. Per fare questo si ricorre alla creazione di un modello

virtuale con l'applicazione di relazioni geometriche, dal quale ottenere successive rappresentazioni con differenti caratteristiche in base ai diversi utilizzi per i quali si effettua il rilievo.



Figura, 7. L'entità elementare costituita nel blocco è il singolo fotogramma e i punti omologhi appartenenti a più fotogrammi

Per creare un modello fotogrammetrico dell'oggetto che si vuole rappresentare, si deve poter ricostruire la geometria di presa di ogni fotogramma; matematicamente significa determinare il valore di sei incognite che equivalgono alla posizione nello spazio della camera nel momento di presa: le tre coordinate del centro di proiezione X_0, Y_0, Z_0 e i tre angoli di rotazione φ, ω, κ dell'asse ottico, rispettivamente attorno agli assi x, y e z della presa. Questi sei valori vengono chiamati "parametri dell'orientamento esterno". È necessario conoscere anche altri tre valori chiamati "parametri dell'orientamento interno" che si riferiscono alle caratteristiche del mezzo fotografico: la distanza principale c , e le coordinate x_0, y_0 del punto principale nel sistema di riferimento immagine, cui si aggiunge la conoscenza della curva di distorsione dell'obiettivo impiegato. I parametri dell'orientamento interno possono essere conosciuti usando una camera con certificato di calibrazione e in questo modo il problema fotogrammetrico risulta semplificato, oppure possono essere anch'essi incogniti.



Figura, 8. Schema della presa fotogrammetrica

In questo caso i parametri incogniti dell'orientamento interno andranno a sommarsi ai sei dell'orientamento esterno e andranno tutti determinati.

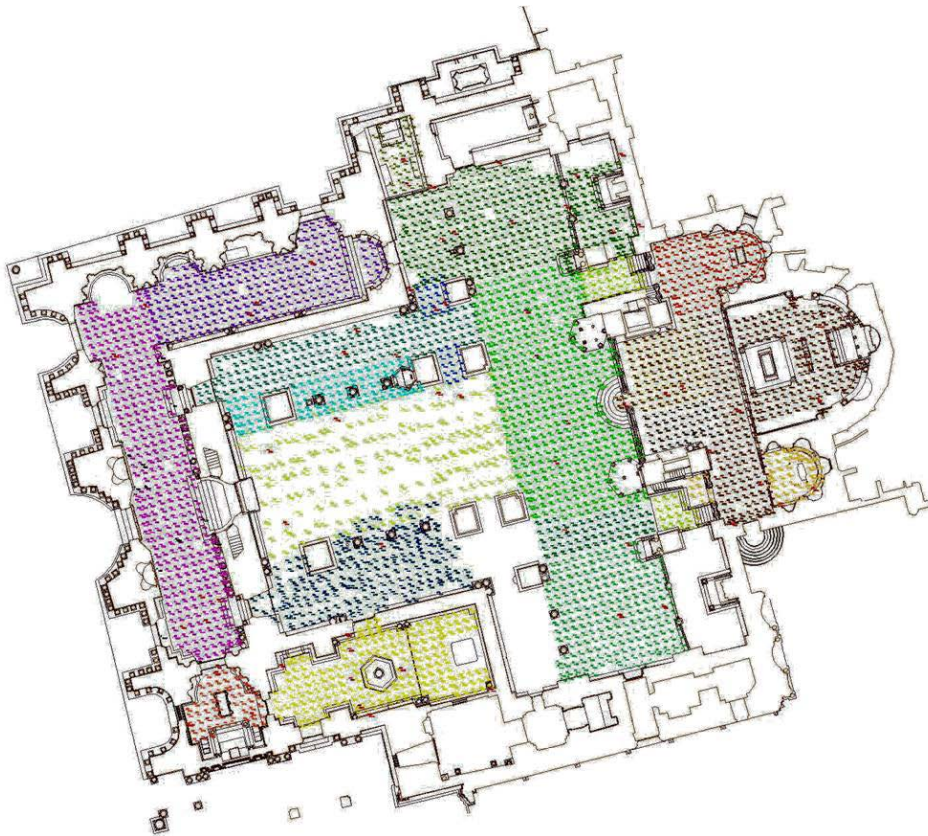
Le equazioni che regolano il passaggio dallo spazio oggetto a 3D allo spazio immagine a 2D sono definite equazioni di collinearità, ossia determinano l'allineamento dei punti oggetto I, del punto immagine I' e del centro di proiezione N.

$$x_i = -c \cdot \frac{[r_{11} \cdot (X_i - X_o) + r_{12} \cdot (Y_i - Y_o) + r_{13} \cdot (Z_i - Z_o)]}{[r_{31} \cdot (X_i - X_o) + r_{32} \cdot (Y_i - Y_o) + r_{33} \cdot (Z_i - Z_o)]}$$

$$y_i = -c \cdot \frac{[r_{21} \cdot (X_i - X_o) + r_{22} \cdot (Y_i - Y_o) + r_{23} \cdot (Z_i - Z_o)]}{[r_{31} \cdot (X_i - X_o) + r_{32} \cdot (Y_i - Y_o) + r_{33} \cdot (Z_i - Z_o)]}$$

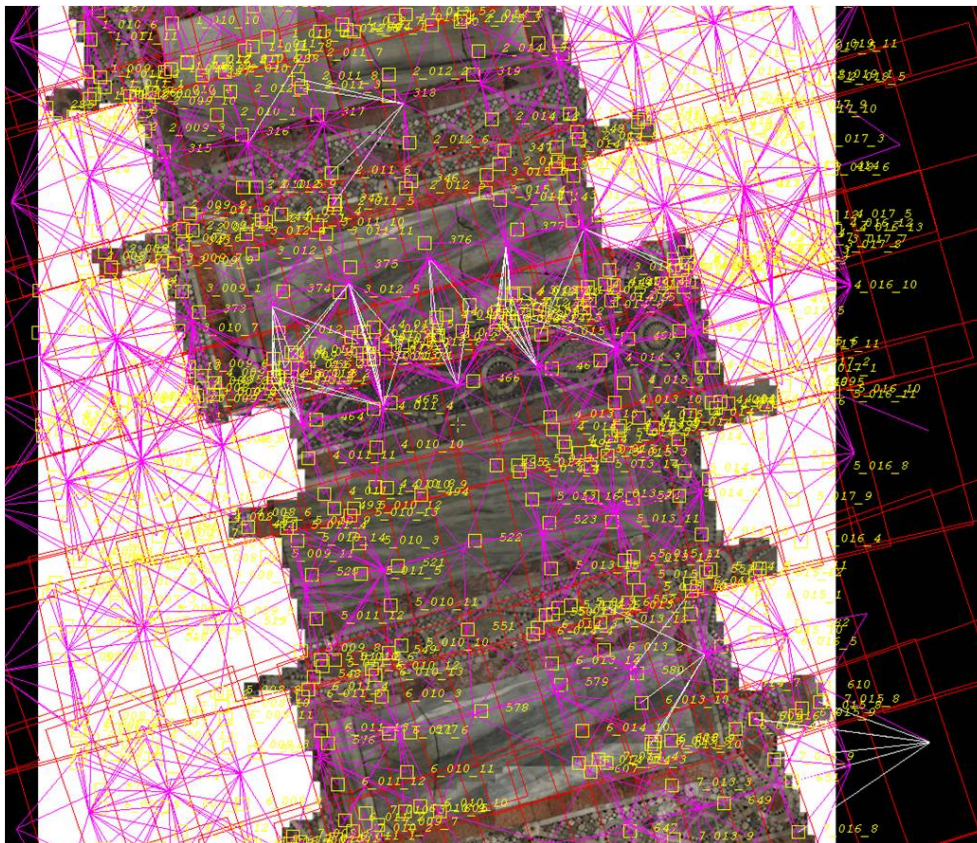
In fotogrammetria si trattano dunque tre tipi di grandezze: le coordinate 3D (X, Y, Z) dell'oggetto, le coordinate (x,y) dell'immagine e i valori dei parametri di orientamento. Il processo fotogrammetrico consiste dunque nell'utilizzare questi parametri per trasformare gli spazi immagine 2D nello spazio oggetto 3D e quindi dar luogo alla restituzione dell'oggetto rilevato.

Per poter ottenere i dati dell'Orientamento Esterno dei fotogrammi, occorre eseguire un processo di orientamento fotogrammetrico classico che prende il nome di Triangolazione Aerea (TA) a stelle proiettive (**Figura, 7**), dove si uniscono in blocco tutti i fotogrammi adiacenti, ed il calcolo dell'orientamento avviene in modo simultaneo per l'intero blocco. Sono necessari per poter realizzare tale metodo una serie di punti di appoggio ben distribuiti all'interno del blocco fotogrammetrico di cui sono note le coordinate nello spazio oggetto, rilevate topograficamente; tali punti convenzionalmente vengono chiamati Ground Control Point (GCP).



Figura, 9. Distribuzione dei GCP per l'orientamento dei fotogrammi

A questi punti vengono aggiunti in modo automatico mediante i software fotogrammetrici (nel caso specifico Socet Set 5.2.0. della Bae System) altri punti definiti di passaggio (Tie Point – TP) che irrigidiscono e aumentano le osservazioni che incrementano la ridondanza del sistema che si viene a creare e che si va a compensare. Complessivamente per orientare tutte le immagini del pavimento di San Marco (oltre 2000 prese) sono stati rilevati circa 3800 punti GCP (*Figura, 9*)



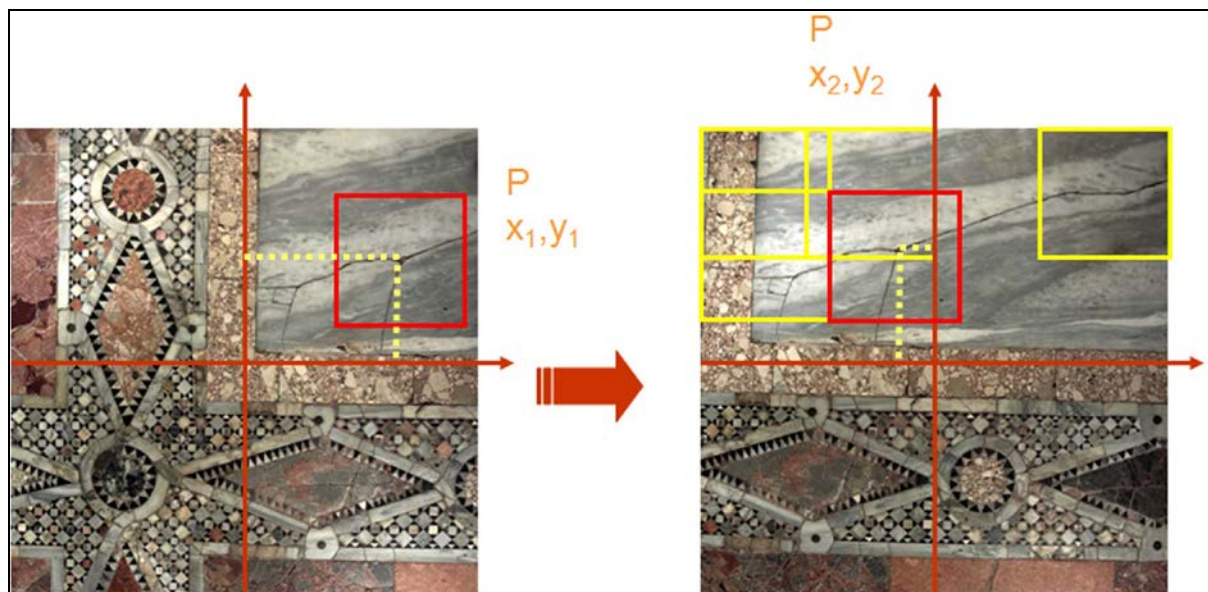
Figura, 10. Dettaglio di una TA eseguita in un blocco, con indicati i legami tra i centri di presa e i punti a terra GCP e TP

Nella successiva fase, a TA avvenuta (*Figura, 10*), ed esaminati i residui in orientamento sui punti GCP e TP, si passa alla successiva fase di generazione del DSM in modo automatico per via fotogrammetrica.

La generazione del DSM avviene secondo una ricerca automatica di punti omologhi sulle immagini digitali adiacenti, appartenenti alla stessa strisciata.

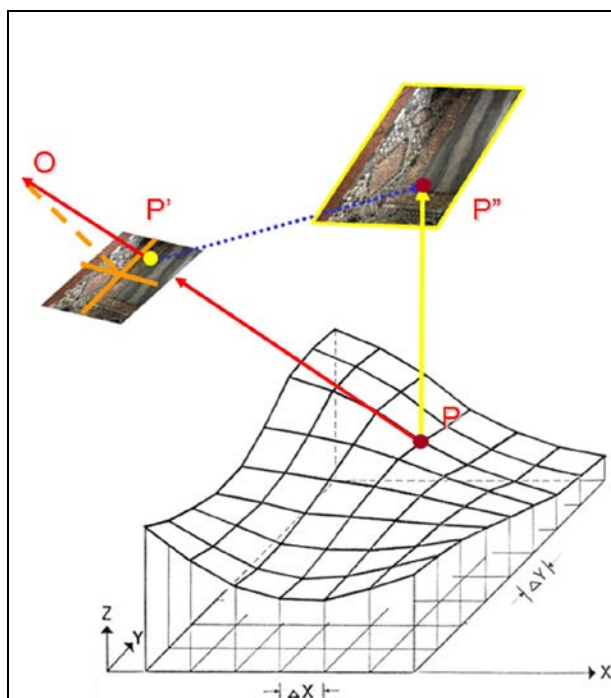
Nel metodo a correlazione d'immagine (*Figura, 11*) si tratta di scegliere su una immagine di riferimento una finestra centrata sull'incrocio della maglia del grigliato del DSM così come proiettata dal modello approssimato del pavimento (in genere piano). Successivamente si cerca sull'immagine, o sulle immagini, che si sovrappongono a quella di riferimento, la finestra che massimizza la correlazione dei toni di colore o che minimizza il quadrato degli scarti nel senso del matching (ottimizzazione della posizione ai minimi quadrati). Definite le coppie (o la serie) di punti omologhi, noto l'orientamento esterno dei fotogrammi, l'intersezione dei raggi omologhi determina il punto sul pavimento. Il grigliato del DSM può essere più o meno fitto: nel caso dell'intera superficie tessulare di San Marco si è optato, dopo ulteriori prove, per un grigliato di 10mm di lato, ovvero 10000 punti (i nodi del grigliato) per metro quadro. Ad esempio il DSM del narcece nord, realizzato con un blocco di 120 fotogrammi per circa 150mq di

superficie, comporta 15 milioni di punti. E' ovvio come vi siano problemi e soprattutto tempi lunghi di elaborazione dei dati, ma i risultati sono ottimi: l'incertezza media del DSM riferita ai GCP è contenuta in 1mm.



Figura, 11. Matching delle immagini per la ricerca dei punti omologhi per la generazione del DSM

Per generare un'ortofotografia e correggere così, sull'immagine originale l'effetto del rilievo dell'oggetto, per il pavimento tessulare di San Marco (pixel dell'immagine 9 micron) una volta definita la dimensione in uscita dell'immagine finale pari a 0.5mm, si passa alla definizione di una matrice-immagine nel piano XY del sistema di coordinate oggetto, seguita poi dalla trasformazione del centro di ciascun pixel di questa immagine (ancora inesistente) nel sistema di coordinate dell'immagine originale.



Figura, 12. Schema di generazione dell'ortofoto

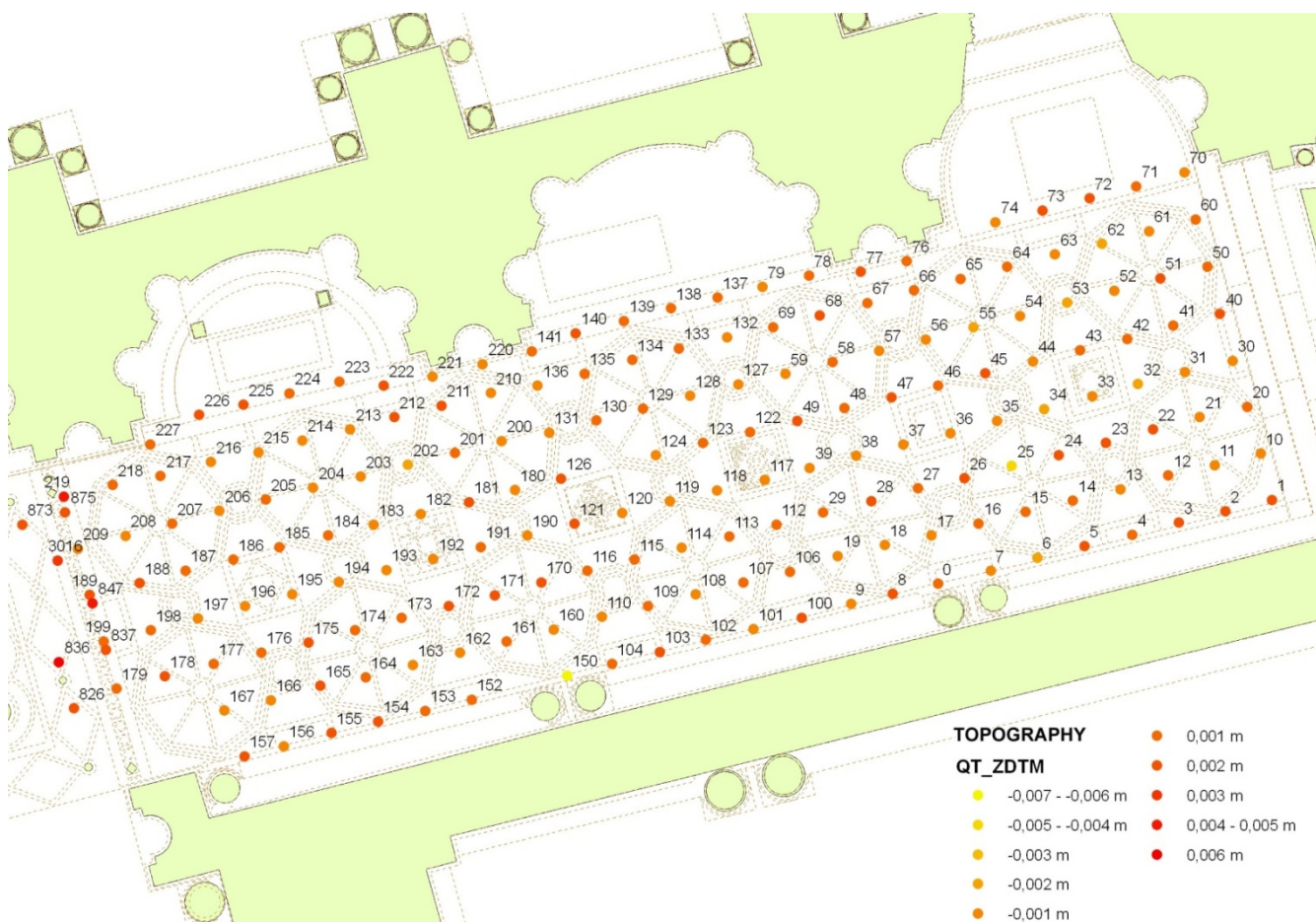
Per questa trasformazione è necessario conoscere anche le quote dei punti del grigliato. Essi si ricavano dal DSM generato al passo precedente. Noti gli orientamenti interno ed esterno dell'immagine digitale originale si possono

trasformare i centri dei pixel, dal sistema terreno a quello dell'immagine digitale originale, applicando le equazioni di collinearità. Si ha così la localizzazione, corretta dalla distorsione prospettica, del pixel immagine. In questa fase si applicano anche le correzioni relative agli errori sistematici, quali, ad esempio, la distorsione dell'obiettivo. Il colore dei pixel dell'ortofoto può essere ottenuto associando il valore di colore del pixel più vicino sull'immagine di riferimento oppure, più comunemente, viene ottenuto per ricampionamento dell'immagine originale, con una trasformazione bilineare; infine, se si vuole evitare una riduzione del dettaglio dell'immagine originale, con un'interpolazione di ordine superiore.

In particolare a partire dal punto P della superficie DSM (*Figura, 12*) attraverso la collinearità con il centro dell'immagine si ricerca il colore del punto P' sul piano dell'immagine corrispondente e questo colore viene associato al pixel nell'ortofoto nella posizione corretta nel punto P''.

5. La costruzione dell'ortofoto alla scala 1:1 di tutto il pavimento e precisioni (2007)

La costruzione dell'ortofoto (2004-2006) è iniziata dal nartece nord preso come campione sperimentale per la verifica delle precisioni provenienti dalla fotogrammetria digitale a correlazione d'immagine, il controllo topografico e dall'impiego del nuovo Laser Leica SH3000. I test di precisione sono esemplificati nelle *Figure, 13,14*.

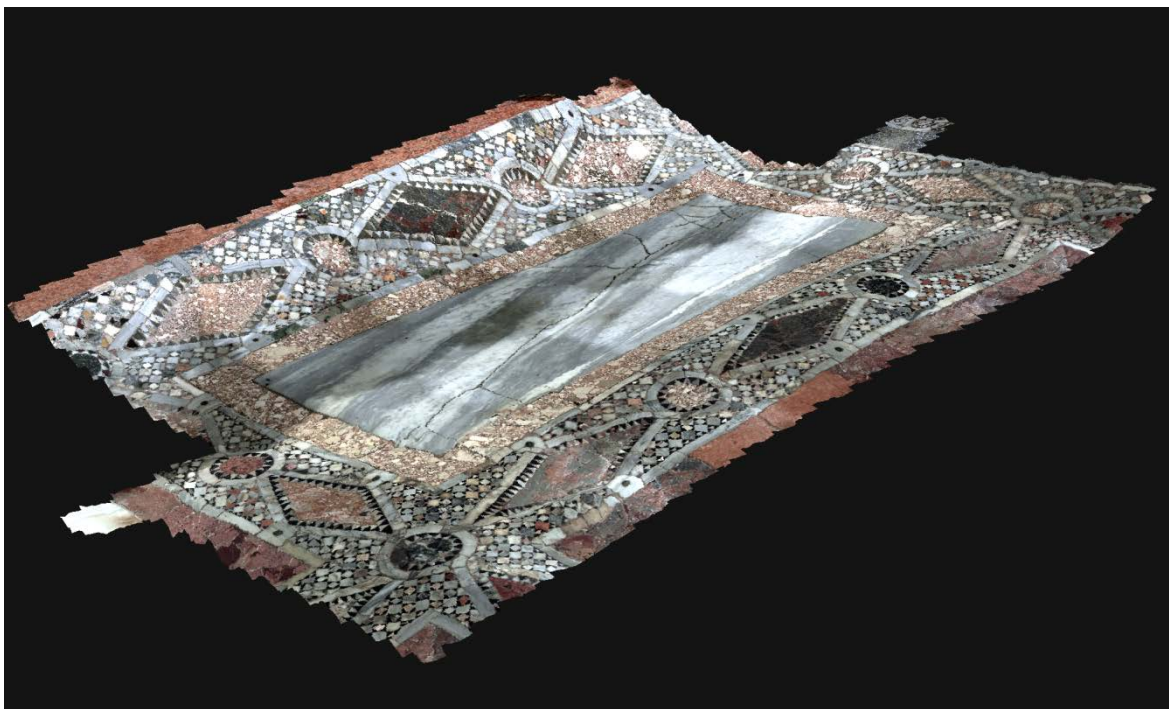


Figura, 13. Differenza fra punti topografici (Control Points) e DTM da Triangolazione Aerea nel nartece nord



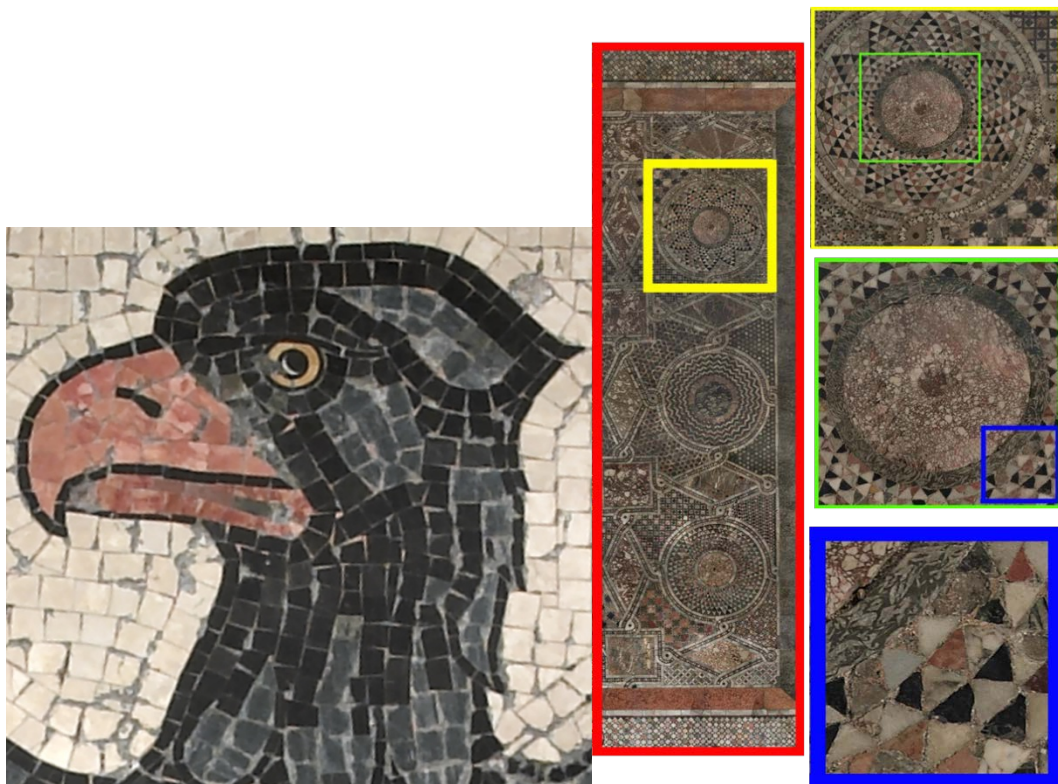
Figura, 14. Differenza fra punti topografici (Control points) e Dtm da nuvole laser scanner nel nartecce nord

Come si vede dalle due figure il risultato sulle precisioni ottenute fotogrammetricamente sono superiori a quelle ottenute col Laser Scanner: ciò è dovuto sia alla visuale radente del laser, sia alla riflettanza diversa del pavimento tessulare per colore e materiale.



Figura, 15. Estrazione di un particolare in 3d dell'ortofoto con effetto 3D esaltato

Nelle figure che seguono si possono vedere alcuni particolari dell'ortofoto del pavimento. Si sottolinea che dopo le



Figura, 16. Ortofoto di un emblema a sinistra. A destra un blocco e un particolare al salire della scaladi rappresentazione

esperienze iniziali la camera utilizzata per l'ortofoto della maggior parte del pavimento è stata la nuova RolleiMetric 6008 formato sensore PhaseONE P45 (49mmx36mm) da 39 mpx (2007-2008).



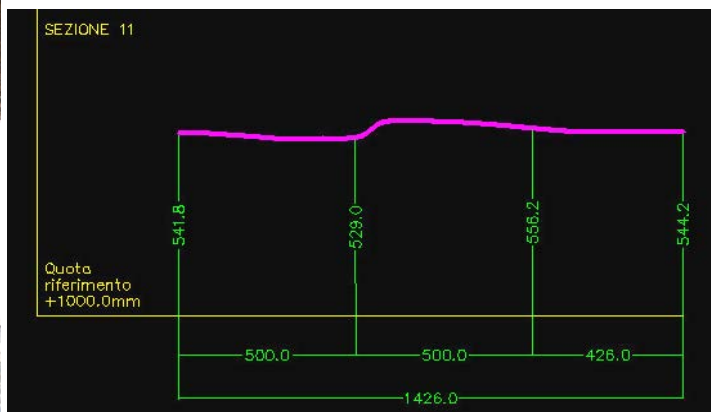
Figura, 17. Ortofoto di un emblema con visualizzati 4 dei 3800 GCP (adesivi di 1cm x 1cm con bersaglio)



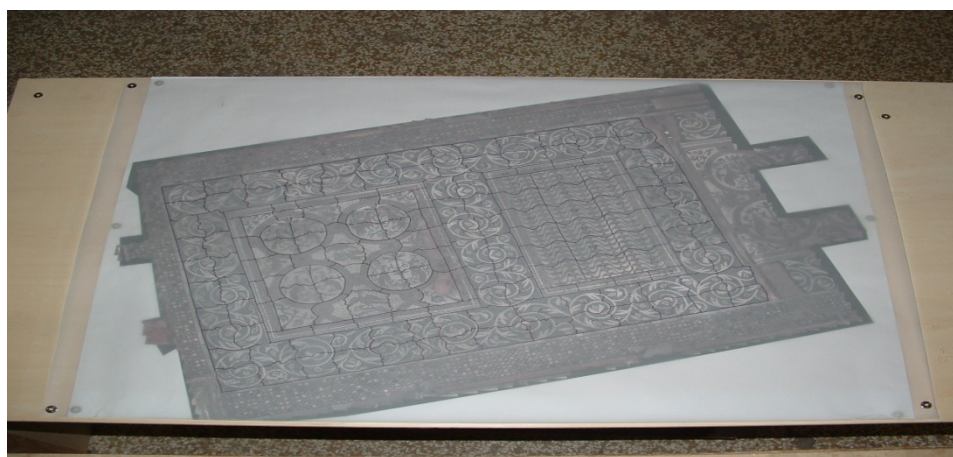
Figura, 18. Esempi di particolari di DTM e relative Ortofoto

Il prosieguo dell'ortofoto a tutta la Basilica si è concluso nella primavera del 2009. Si sono poi, nei mesi successivi, equalizzati i colori di tutti i fotogrammi in modo da rendere omogenea l'intera superficie musiva. Una prima applicazione della nuova ortofoto è stata sperimentata sulla parte del transetto destro davanti all'ingresso del tesoro.

La zona è quella visualizzata nella *Figura, 6*, la prima ad essere restaurata sulla base dell'ortofoto. Qui sono stati prodotti profili altimetrici del pavimento ricavati dall'ortofoto 3D e costruzione automatica delle DIME per una verifica sul campo delle medesime (*Figura, 19*). Nella *Figura, 20* è l'ortofoto realizzata e nelle *Figure, 21, 22, 23, 24, 25* le successive fasi di stacco, restauro e posa in opera del mosaico musivo.



Figura, 19. Verifica sul campo della corrispondenza fra dime e realtà, nell'area test



Figura, 20. Ortofoto della zona del transetto destro da restaurare con marcate e numerate le divisioni delle zone che verranno sottoposte a "strappo"



Figura, 21. Particolare delle zone da "strappare" ricoperte da un manto di fissaggio (costituito da tela incollata sopra la superficie musiva) e con evidenziate le linee di taglio delle porzioni di mosaico che verranno staccate per il restauro e successivamente ricomposte e riposizionate sul sottofondo da risanare



Figura, 22. Strappo e ribaltamento del mosaico e del sottofondo su cui poggia su tavoletta di supporto



Figura, 23. Ricostruzione in laboratorio di una delle porzioni staccate direttamente sull'ortofoto stampata su tela, al negativo, con tessere recuperate o, se troppo consumate, nuove

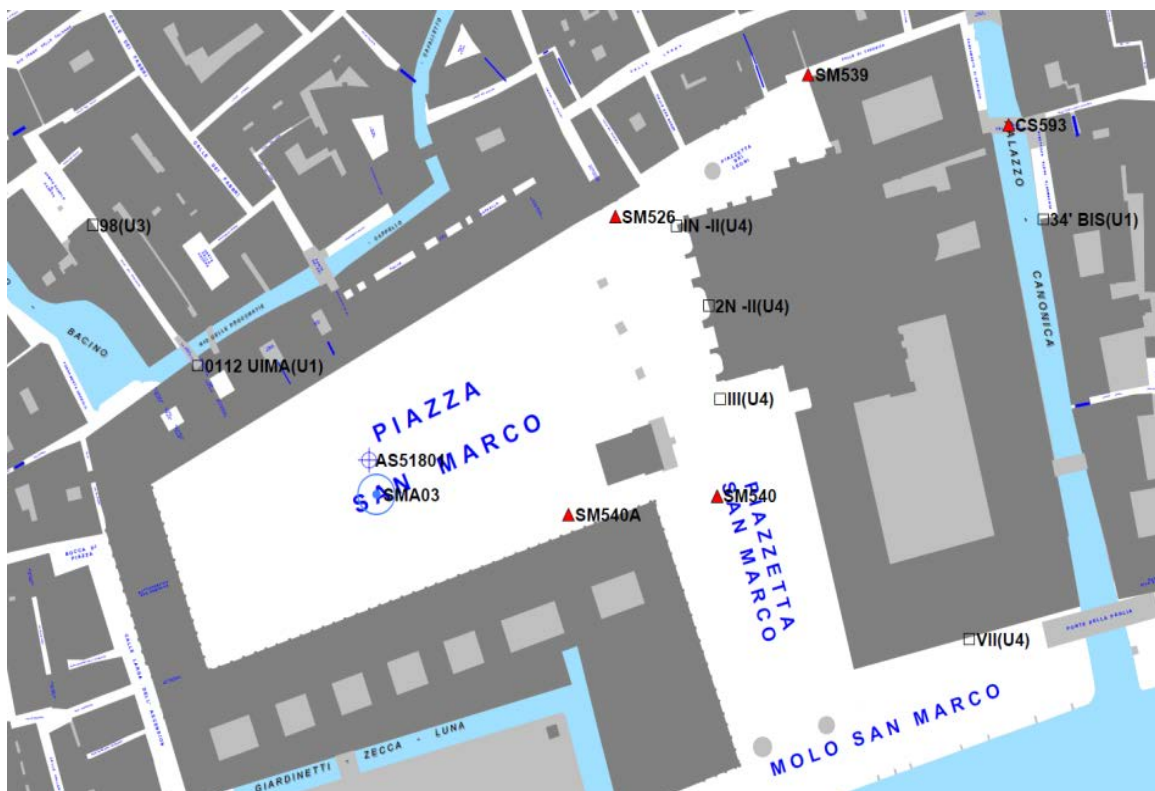


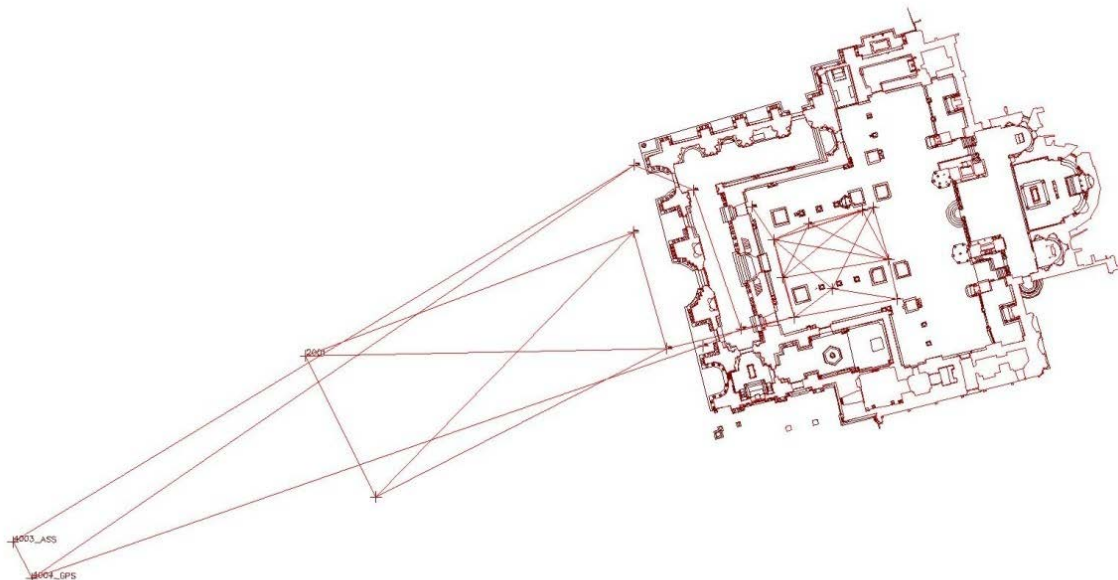
Figura, 24. Particolare della ricostruzione



Figura, 25. A sinistra il mosaico già restaurato posizionato sul nuovo sottofondo; al centro, la zona con il mosaico staccato e il sottofondo da ricostruire, a destra, il mosaico ancora da strappare

Tutta l'Ortofoto e il DTM che l'accompagna sono georeferiti nel sistema cartografico nazionale (*Figura, 26*).





Figura, 26. I riferimenti altimetrici sono riferiti al mareografo di Genova e, in ambito comunale, al mareografo di Venezia (punta Salute). Dati capisaldi forniti da INSULA S.P.A. Collegamento della pianta della basilica, delle sezioni, delle piante dei sottotetti e dei punti d' appoggio dell'ortofoto al sistema nazionale IGM 95, ora ERTF 2000 – RDN



Figura, 27. La modellazione del pavimento entro gli alzati architettonici (2007-2009)



Figura, 28. La modellazione del pavimento entro gli alzati architettonici, rilevati con Laser SH3000 Leica e testurizzato in 3D con le immagini (2007-2009). Particolare del transetto nord

6. La valorizzazione del pavimento tessulare attraverso la consultazione dell'ortofoto definitiva

Alla conclusione delle fasi di acquisizione, di elaborazione e di rifinitura dell'ortofoto complessiva del pavimento, data la grande mole di dati prodotti in termini di gigabyte di immagini (circa 130 GB) si è dovuto affrontare l'aspetto della sua visualizzazione in modo semplice con sistemi di consultazione che ne valorizzassero il potenziale.

La prima fase ha visto la creazione di un mosaico unico delle ortofoto prodotte di tutto il pavimento. In particolare questo era stato suddiviso in zone omogenee per parti per poter produrre le singole ortofoto, ad esempio un blocco relativo alla navata centrale, due blocchi relativi alle navate laterali, tre blocchi relativi al transetto, etc.

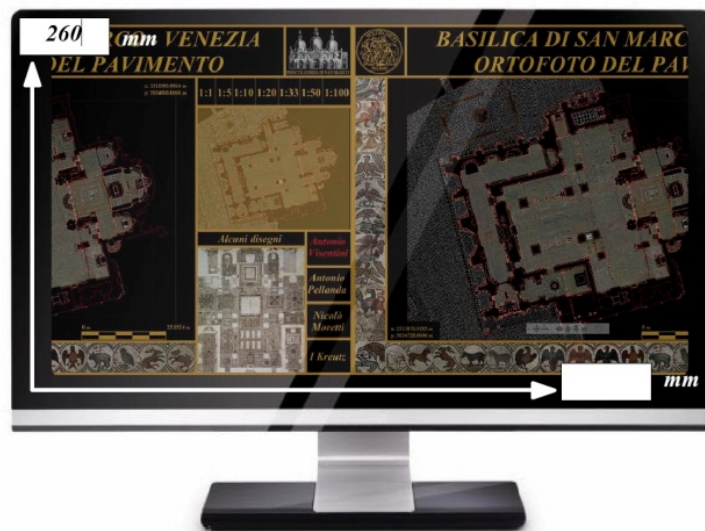
Il prodotto completo della ortofoto formato TIF, comprensiva delle aree esterne alla Basilica, per la riproduzione del pavimento esterno, è stato elaborato per poter essere visto in una riproduzione piramidale trasparente per l'utilizzatore mediante le tecniche di compressione e visualizzazione del software Zoomify™.

In particolare l'immagine complessiva è stata scomposta in piccole immagini in formato JPG dalle dimensioni ridotte (256x256 pixel) che vengono progressivamente gestite per essere visualizzate in real-time: complessivamente sono state elaborate 652291 immagini in formato JPG che portano ad una occupazione di memoria ottimizzata di 4,7 Gb tali da permettere la diffusione in DVD del dato. A valle della gestione del file è stata implementata una interfaccia di consultazione che permette la visualizzazione dell'ortofoto, anche attraverso la lettura comparata dei rilievi precedenti del pavimento tessulare che oggi sono conservati presso l'Archivio Storico della Procuratoria di San Marco.



Figura, 29. Ortofoto generale completa

Per la visualizzazione dell'ortofoto nella scala corretta è necessario inserire altezza e/o larghezza dello schermo:



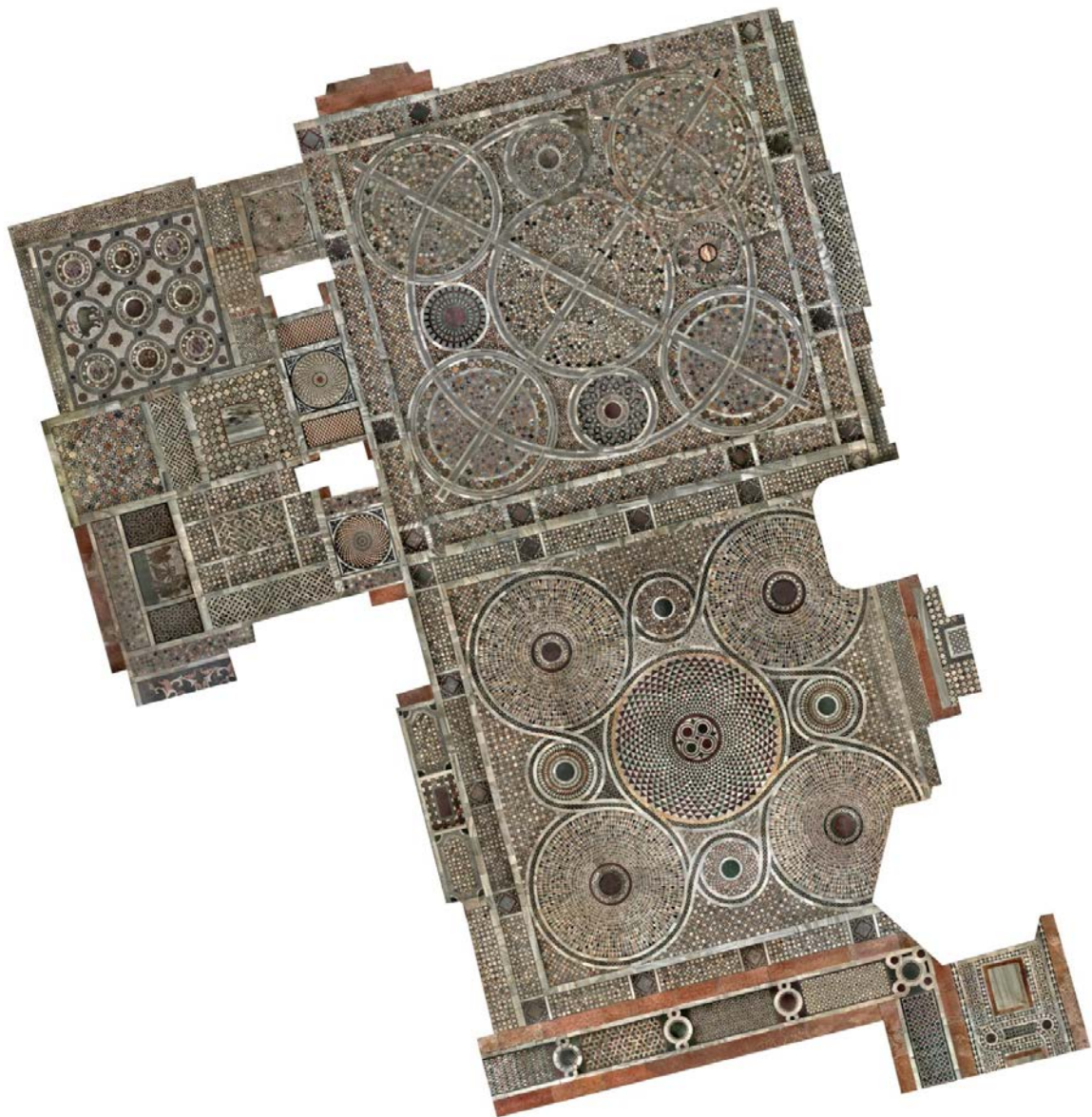
Esci

Avanti

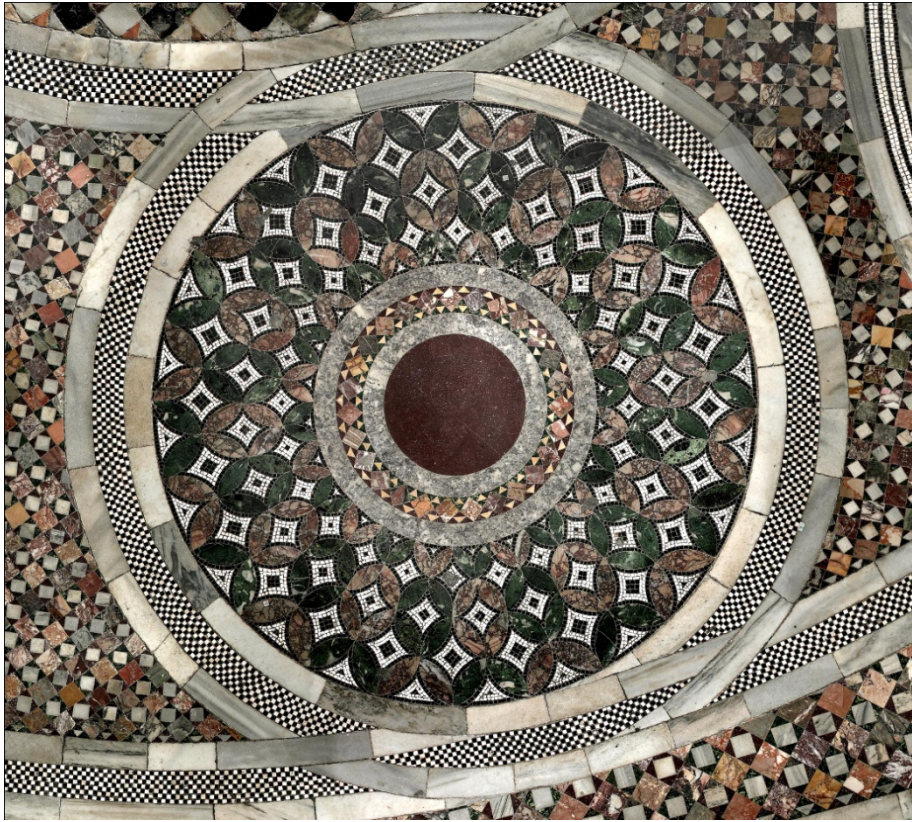
Figura, 30. Schermata iniziale del software di navigazione - calibrazione del monitor



Figura, 31. Navigazione dell'ortofoto in funzione di scale prefissate (a destra) o in modalità continua



Figura, 32. Particolare del pavimento tessulare in corrispondenza del transetto nord - zona messe



Figura, 33. Particolare del pavimento



Figura, 34. Particolare del pavimento

Bibliografia

- [1] N. Tsirliganis et al. (2004) Archiving Cultural Objects in the 21st Century, *Journal of Cultural Heritage*, Elsevier edition, pp.379-384.
- [2] F. Fassi, C. Achille, L. Fregonese, C. Monti (2010) Multiple data source for survey and modelling of very complex architecture, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.
- [3] F. Remondino, A. Rizzi (2009), Reality-based 3D documentation of world heritage sites: methodologies, problems and examples, *22nd CIPA Symposium*, Kyoto, Japan.
- [4] G. Guidi, M. Russo, J.A. Beraldin (2010), *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, ed. McGraw-Hill, Milano.
- [5] T. Voegtli, S. Wakaluk (2009), Effects on the measurements of the terrestrial laser scanner HDS 6000 (Leica) caused by different object materials, *ISPRS Congress Laserscanning09*, Paris, France.
- [6] F. Fassi (2007), 3D Modeling Of Complex Architecture Integrating Different Techniques – A Critical Overview, *3D-ARCH 2007 Proceedings: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, ETH Zurich.
- [7] F. Remondino, S. El-Hakim (2006) Image-based 3D Modelling: A Review, *The Photogrammetric Record*, Volume 21, Number 115, September, pp. 269-291(23), Blackwell Publishing.
- [8] G. Bezoari, C. Monti, A. Selvini (1984) *Fondamenti di rilevamento generale*, Vol. I, II, Hoepli, Milano.
- [9] K. Kraus K. (1997) *Photogrammetry - Advanced Methods and Applications*, Vol II, Dummler editore, Bonn.
- [10] C. Monti (2001) Il rilevamento dei grandi monumenti, in *I nuovi metodi di indagine e comunicazione della storia dell'Architettura*, collana Architettura strumenti e opere, Sinai Edizioni, Milano.
- [11] C. Monti (2005) Georeferenziazione e modellazione 3D delle architetture, in *Il dominio dello spazio: scienze, tecniche, rappresentazioni*, Regione Piemonte – CSI, Centro Congressi Lingotto, Atti Convegno, Anno XXV n. 6, Torino.
- [12] R. Brumana, L. Fregonese, C. Monti, C.C. Monti, G. Monti, E. Vio (2006) Complex analyses of surface, modelling and comparison of the 3D orthophoto to real scale whit historical cartography:osaic surface of Basilica of San Marco in Venice, *International web journal "e_Perimetron"*.
- [13] L. Fregonese, C. Monti, C.C. Monti, G. Monti, S. Morandi, L. Taffurelli, E. Vio (2006) Il pavimento della Basilica di San Marco. La realizzazione dell'ortofoto 3D in digitale alla scala reale 1:1, Articolo per il *XXII Convegno scienza e beni culturali 2006 pavimentazioni storiche: uso e conservazione*, Bressanone.
- [14] R. Brumana, L. Fregonese, C. Monti, E. Vio, C.C. Monti, G. Monti, L. Taffurelli (2007) Ortofoto 3D digitale alla scala 1:1 dell'intero pavimento musivo della Basilica di San Marco a Venezia. Uso dell'ortofoto per la manutenzione e i restauri, in *Actas del V Congreso Internacional Restaurar la memoria – Patrimonio & Territorio AR&PA 2006*, Vol. II, Junta de Castilla y Leon, ISBN 978-84-9718-512-7, pp. 1135-1155.
- [15] C. Monti (2008) Il pavimento musivo della basilica di S. Marco a Venezia, pagg. 245-278, in *Il cantiere della conoscenza*, Arte Tipografica Editrice, Napoli.

Ringraziamenti

Si ringraziano tutti i collaboratori che hanno largamente contribuito al rilievo del pavimento musivo (Monti G., Taffurelli L., Morandi S.), le successive elaborazioni dell'ortofoto (Monti C.C., Fassi F., Prandi F., Achille C.) e l'equalizzazione del colore con la produzione del DVD (Parri S.).