

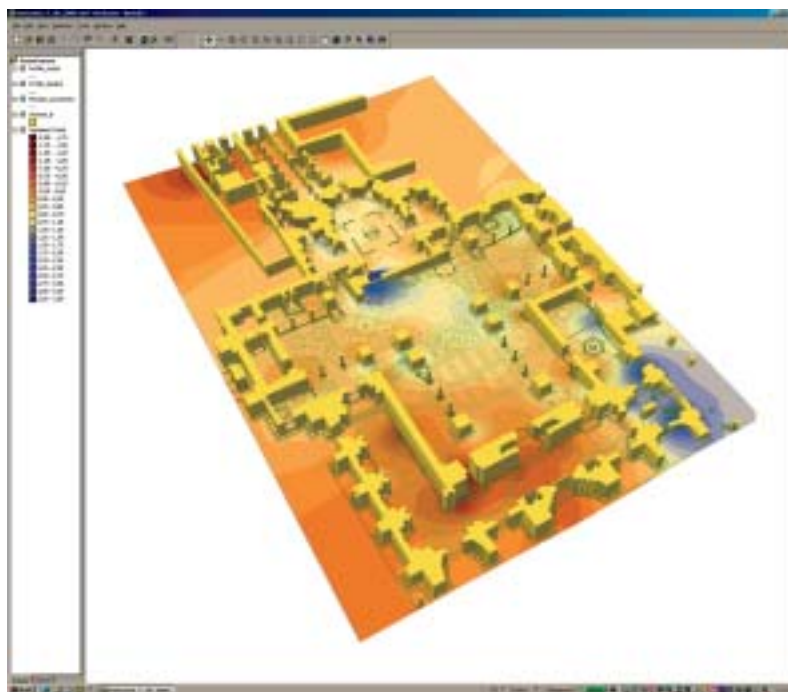
Carlo Monti
Raffaella Brumana
Luigi Fregonese
Cristiana Achille
Francesco Fassi
Federico Prandi
Giada Monti
Carlo Savi

Ortofoto digitale 3D a scala naturale del pavimento musivo della Basilica di San Marco a Venezia

Full-scale digitale 3D orthophotos of the mosaic floor in the St. Mark's Basilica in Venice

Il pavimento musivo della Basilica di San Marco si adagia sul sottofondo della chiesa marciana e risente delle anomalie del suo andamento originale e dei fenomeni di subsidenza differenziale: fino a quando non è stata riconosciuta al mosaico una valenza artistica pari a quella riconosciuta al dipinto o alla scultura, esso è sempre stato modificato nella sua conformazione e materialità. Nei restauri antichi l'ondularità del pavimento era eliminata e di conseguenza lo strato musivo veniva sollevato e rifatto, generalmente seguendo il disegno originario, ma spesso accadeva anche che fosse rinnovato secondo il gusto e le tecniche dell'epoca. Grandi maestri del Quattrocento e Cinquecento, come Paolo Uccello, Tintoretto, Veronese, Andrea del Castagno, Mantegna, Tiziano, chiamati a rifare parti di pavimento consumate o in cattivo stato, introdussero l'uso del cartone e sostituirono i sistemi tradizionali d'esecuzione delle opere musive. Soltanto dalla seconda metà dell'Ottocento, nella Basilica di San Marco, si è sviluppato il concetto di conservazione e nelle pratiche di restauro e di manutenzione si è cercato di individuare il metodo più adatto a rappresentare e mantenere la complessità del monumento in tutte le sue forme. La ricerca di un mezzo per descrivere con immediatezza il fenomeno dell'ondularità [Figura 1*] e al tempo ottenere l'immagine fotografica del mosaico,

The mosaic floor of the St. Mark's Basilica stands on the subfloor of the St. Marks's Square church and is affected by the irregularities of its original layout and differential subsidence: before the mosaic was attributed with a specific artistic value on par with the value attributed to paintings or sculptures, the mosaic was frequently modified in its configuration and its materials. In historic renovations, renovators removed the undulation of the floor and as a result, had to raise and re-piece the mosaic layer; they followed the original design most of the time, but it also happened that the pattern was changed around the suit the tastes and techniques of the time. The great masters of the 15th and 16th centuries, such as Paolo Uccello, Tintoretto, Veronese, Andrea del Castagno, Mantegna, and Titian were called to recreate worn or decaying portions of the floor, introducing the use of cardboard and replacing the traditional systems of executing mosaic works. Only after the second half of the 19th century did the concept of conservation and maintenance in the renovation works in St. Mark's Basilica rise to prominence. Restorers attempted to understand the best way to represent and maintain the complexity of the monument in all of its forms. Over the years, the search for a way to instantaneously describe the phenomenon of undulation [Figura 1*] and at the same time, obtain the photographic image of the mosaic, in view of its use on site, has led scientists to give preference to 3D models of representation that have been gradually improved to achieve the current realization of a digital 3D orthophoto at a 1:1 scale. After a series of tests on methods and digital cameras have demonstrated the practical nature of the method, the scientists surveyed a section of the floor, for now just 800 m² on a total of 2,600 m² of paved surface



1. Pianta prospettica della Basilica dove i colori indicano gli intervalli di quota interpolati su più di 1000 punti di livellazione geometrica. La zona evidenziata è quella restituita in ortofoto 3D
 A perspective view of the Basilica; the colours stand for the intervals of quota interpolated on more than 1000 points of geometric levelling. The area highlighted is rectified in 3D orthophotos

in vista di un utilizzo in cantiere, ha portato in questi anni a preferire modelli di rappresentazione tridimensionali che sono stati via via migliorati fino alla realizzazione attuale dell'Ortofoto Digitale 3D in scala 1:1. Dopo una serie di test su metodiche e camere digitali che hanno dimostrato la praticabilità del metodo si è proceduto al rilevamento di una porzione di pavimento, per ora 800 mq su un totale di 2600 mq di superficie pavimentale per un totale di 1700 prese preventivate, con restituzione dei primi 41mq, nella parte di accesso alla Camera del Tesoro, necessaria di restauro. L'Ortofoto Digitale 3D permette di documentare la disposizione e lo stato di conservazione d'ogni tassello del mosaico, e parallelamente fornisce informazioni sui livelli di quota di tutto il pavimento, direttamente estraibili dai restauratori e dai tecnici specializzati per la manutenzione.

Per ottenere questo è necessario elaborare l'ortofoto, applicando un raddrizzamento differenziale delle immagini fotogrammetriche realizzate (camera digitale Rollei DB44 Metric a 16 milioni di pixel, 1 pixel = 900 nm) e associando ad essa un modello tridimensionale del pavimento (DSM), che ne riproduce il reale andamento.

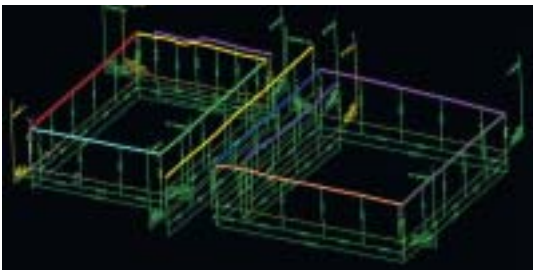
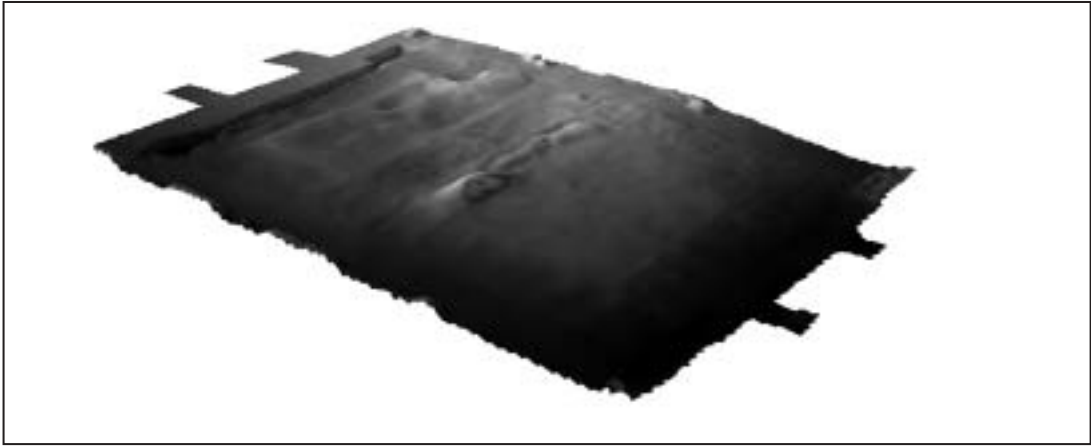
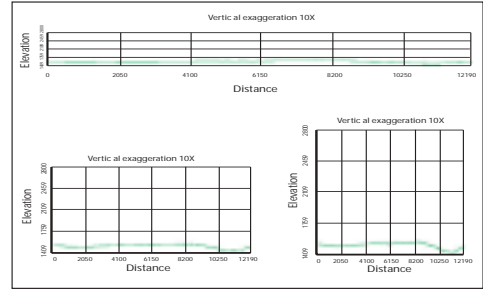
using an estimated total of 1700 images, with rectification of the first 41 m² in the section at the entrance to the Chamber of the Treasure, necessitating renovation. The 3D orthophoto can help document the arrangement and the state of repair of every mosaic tile while also providing information on the quota level of the entire floor, that renovators and specialized maintenance technologists can extrapolate directly.

To obtain this information, the orthophoto must be processed by applying a differential rectification of the photogrammetric images realized (Rollei DB44 Metric digital camera of 16 million pixels, 1 pixel = 900 nm) and associating it with a 3D model of the floor (DSM) that replicates its actual lay out.

In the survey project, in view of the camera adopted (which features an actual dimension sensor equal to 36.720 mm x 36.684 mm) and the precision that the survey much achieve, the dimension of the pixel is established on the ground equal to 0.5 mm, to enable a precise reading of the mosaic tiles. The image-taking system is similar to the one used in aerial photogrammetry for executing cartographic surveys. The camera sensor is kept parallel to the surface of the mosaic: the photo camera is

2. Modello tridimensionale del pavimento (DSM) ottenuto con l'applicazione del software APEX e sul quale viene elaborata l'ortofoto. Le informazioni altimetriche possono essere facilmente estratte per la realizzazione di dime, con le quali è possibile confrontare la validità del modello rispetto alle quote reali della superficie musiva

3D model of the floor (DSM) obtained with application of the APEX software and on which the orthophoto is processed. The altimetric information can be easily extracted for making templates, with which it is possible to compare the validity of the model with respect to the actual quotes of the mosaic surface



Nel progetto di rilievo, considerando le caratteristiche tecniche della camera adottata che dispone di un sensore di dimensioni effettive pari a 36,720 mm x 36,684 mm e la precisione che il rilievo deve raggiungere, è stata fissata la dimensione del pixel a terra pari a 0,5 mm, per consentire una precisa lettura delle tessere musive. Il sistema di presa è analogo a quello della fotogrammetria aerea per la realizzazione di rilievi cartografici. Il sensore della camera è mantenuto parallelo rispetto al piano del mosaico: la macchina fotografica è montata su un carrello con una

mounted on a trolley with a nadir distance of the shot from the floor of 2.36 meters, making it possible to cover 2.1 x 2.1 m² for every photograph as a general rule. For the area already rectified, there are a total of 27 images, grouped into three proofs. Based on the coverage of every photographic shot and their overlapping, the distribution is arranged on the supporting points on the ground, as surveyed topographically with a totally motorized station and with a digital level to limit the measuring error of the quota of points less than one millimetre. In all, there were 70 support points, nine for

3.
Ortofoto 3D del pavimento di fronte all'ingresso del Tesoro
3D orthophoto of the floor in front of the entrance to the Treasure



4.
Ortofoto Digitale 3D di una porzione di pavimento musivo della Basilica
Detail of a Digital 3D orthophoto of the mosaic floor



distanza di presa nadirale dal pavimento di 2,36 m, consentendo un ricoprimento a terra per ogni fotogramma di 2,10 x 2,10 mq, questo in generale. Per l'area già restituita si ha un totale di 27 prese, suddivise in tre strisciate.

In base al ricoprimento di ogni presa fotografica e alla sovrapposizione tra queste si è programmata la distribuzione a terra dei punti d'appoggio, rilevati topograficamente con stazione totale motorizzata e con livello digitale per contenere l'errore di misurazione della quota dei punti al di sotto del millimetro. In totale i punti di appoggio sono stati 70, nove per ogni immagine e distribuiti regolarmente con passo 85 cm x 75 cm sull'area di rilievo. Tutti sono stati utilizzati nel calcolo per l'orientamento delle prese attraverso la triangolazione aerea per stelle proiettive, ottenendo così un modello iperdeterminato e controllabile. Per la realizzazione dell'ortofoto [Figure 3 e 4¹] e del modello tridimensionale si è utilizzato il software APEX PCI 7.0 e successivamente per la loro visualizzazione e per la gestione delle informazioni contenute nel DSM, il pacchetto ArcGIS 8.2 e ArcInfo 8.2 (ESRI). Le ventisette prese sono state poi importate nel programma APEX

every image, and were distributed uniformly with a 85 cm x 75 cm frequency on the survey area. All have been used in the calculation for the orientation of the images through aerial triangulation by projective stars, obtaining a hyper specific and controllable model.

APEX PCI 7.0 software was used to construct the orthophoto and the 3D model [Figures 3 e 4¹]. Subsequently, to view them and to manage the information contained in the DSM, ArcGIS 8.2 and ArcInfo 8.2 (ESRI) suites were used. The twenty-seven images were then imported into the APEX programme in the tiff format without applying any compression algorithm that might cause resolution loss and thus the quantity and quality information of the images. The amount of data that the software must manage is thus very large since every image is an average of 48.7 MB for a total of 1.25 GB of information. The programmes used for viewing all the images concurrently use the *image pyramid* with eight descending levels of resolution, used according to the degree of zoom activated. Creation of the DSM was optimised on a very dense mesh (15 mm x 15 mm, the more points

5.

Particolare di una Ortofoto 3D stampata alla scala 1:1 su supporto inestensibile confrontata direttamente con la superficie musiva. Oltre alla corrispondenza geometrica si riscontra un'ottima corrispondenza radiometrica, importante almeno quanto la prima per le operazioni di restauro

Detail of a 3D orthophoto printed at a 1:1 scale on a non-extensible support, compared directly with the mosaic surface. In addition to the geometric correspondence, we found an excellent radiometric correspondence, at least as important and the former before the renovation procedures



nel formato tiff senza applicare nessun algoritmo di compressione che porterebbe alla perdita di risoluzione e quindi di informazioni quantitative e qualitative delle immagini. La mole dei dati che il software deve gestire è di conseguenza molto consistente poiché ogni immagine è in media di 48,7 MB, per un totale di 1,25 GB di informazioni. I programmi utilizzati per visualizzare tutte le immagini contemporaneamente ricorrono alla cosiddetta *piramide d'immagine*, con otto livelli di risoluzione via via decrescenti, utilizzate secondo il grado di zoom attivato.

used, the truer the three dimensional model created) starting with the topographical points and photographic images of the block oriented by autocorrelation of the image on the point model, for a total of more than 182.000 points quota. The degree of surface smoothing can be established as well as any introduction of the breakline that might still respect the real conformation of the floor in the presence of full blown fractures, as in the case in question. A one millimetre maximum error exists among the topographic quotas of the support points and the

La creazione del DSM è stata ottimizzata su una maglia (15 mm x 15 mm) molto fitta (maggiore è il numero di punti e più veritiero sarà il modello tridimensionale creato) a partire dai punti topografici e dalle immagini fotografiche del blocco orientate per autocorrelazione d'immagine sui punti modello, per un totale di poco più di 182.000 punti quota.

È possibile stabilire anche il grado di *lisciamento* (smoothing) della superficie e l'eventuale inserimento di breakline che potrebbero ancora di più rispettare la reale conformazione del pavimento in presenza di vere e proprie fratture, come nel caso in questione.

L'errore massimo tra le quote topografiche dei punti d'appoggio e quelle dei punti misurati sul modello dopo la triangolazione e dopo la creazione del DSM, è contenuto nel millimetro.

Una volta realizzato, è stato possibile estrarre dal DSM in ambiente ArcGIS e ArcInfo tutte le informazioni che riguardano l'andamento altimetrico estraendo profili [Figure 2 e 5⁴] lungo le sezioni più significative e ricavando dime che sono state confrontate direttamente in cantiere con la superficie del pavimento per verificare la correttezza del modello. Il restauro e la manutenzione del mosaico secondo le metodologie tradizionali prevede l'individuazione, la temporanea rimozione e il riposizionamento (o la puntuale sostituzione) delle parti danneggiate, rispettando i connotati altimetricamente irregolari tipici del pavimento. In passato si ricorreva ai calchi, sui quali rimaneva impressa la disposizione delle tessere e su cui veniva riportato il colore di ognuna di esse; ora, con l'ortofoto 3D si raggiunge il medesimo risultato con un dispendio di energie sempre alto, ma con l'enorme vantaggio della tridimensionalità dell'immagine e della sua georeferenziazione che è la base per la costruzione di un Sistema Informativo che relazioni documenti storici (rilievi, disegni, mappe...) con rilievi moderni e permetta confronti fra nuovo e vecchio utilizzando trasformazioni globali o anche tecniche di warping e morphing. L'ortofoto, elaborata sulla base delle informazioni altimetriche raccolte e rappresentate dal DSM con impostata un'alta definizione dell'immagine, rende possibile la chiara lettura delle tessere, delle loro caratteristiche dimensionali, delle loro caratteristiche radiometriche e petrografiche, e dello stato di conservazione di ognuna di esse.

quotas of the points measured on the model after triangulation after creating the DSM.

Once constructed, all the information that involve the altimetric trend can be extracted from the DSM in an ArcGIS and ArcInfo environment by extracting profiles [Figures 2 e 5⁴] along the most significant sections and drawing templates that have been compared directly in the site with the surface of the floor to verify the correctness of the model.

Renovation and maintenance of the mosaic using the traditional methodologies entails identification, temporary removal and repositioning (or a point by point substitution) of the damaged parts, respecting the altimetrically characteristic traits of the floor.

In the past, scientists manually traced the tiles in the floor so that their placement on the floor remained impressed on paper and then filled in each with colour; today, the 3D orthophoto can help us reach the same result, with the same efforts and work, but with the enormous advantage of the three dimensionality of the image and its georeferencing that is then the basis for constructing an information system that relates historic documents (surveys, drawings and maps...) with modern surveys and allows comparisons between the new and the old, by using global transformation or even warping and morphing.

The orthophoto, created based on the altimetric information gathered and represented by the high definition image of the DSM set, makes possible the clear reading of the tiles, their dimensional characteristics, the radiometric and petrographic characteristics and the state of repair .