

# MODELLI DIGITALI 3D PER IL SUPPORTO AL RESTAURO: RIASSEMBLAGGIO VIRTUALE E RICOSTRUZIONE DIGITALE

## DIGITAL 3D MODELS IN RESTORATION VIRTUAL REASSEMBLY AND DIGITAL RECONSTRUCTION

Marco Callieri, Matteo Dellepiane, Roberto Scopigno

### INTRODUZIONE

I modelli digitali tridimensionali sono rappresentazioni computerizzate della geometria della superficie di un oggetto reale. La superficie dell'oggetto è generalmente rappresentata da un insieme di entità geometriche (curve e superfici parametriche, oppure punti e poligoni, oppure elementi volumetrici). Queste rappresentazioni possono essere create con strumenti informatici, ricorrendo a strumenti di modellazione 3D oppure a tecnologie di ricostruzione semi-automatica, dette di *digitalizzazione o scansione 3D*. Nel primo caso l'operatore ricostruisce il modello digitale (ad esempio basandosi su fotografie) con una procedura "manuale", e la sua azione è assimilabile a quella del copista, in questo caso assistita dalla tecnologia di modellazione. Nel secondo caso si usa uno strumento di campionamento che permette di misurare le caratteristiche geometriche dell'oggetto reale e quindi di ottenere un modello digitale 3D estremamente accurato, con un processo che può essere considerato come una estensione del processo di riproduzione fotografico alla terza dimensione. Le tecnologie di scansione tridimensionale hanno raggiunto una notevole maturità, sia per quel che riguarda gli strumenti di misura e digitalizzazione, sia per i software utilizzati per l'elaborazione dei dati campionati in tre dimensioni e per la manipolazione dei modelli.

Queste tecnologie, nate in ambienti industriali per il controllo di qualità e la progettazione assistita, hanno trovato un largo impiego nel campo dei beni culturali, grazie alla loro capacità di fornire una rappresentazione digitale estremamente accurata ed ad alta risoluzione degli oggetti di interesse.

I modelli digitali si prestano ottimamente a svariate applicazioni nel campo dei beni culturali, dalla documentazione e conoscenza del bene alla condivisione dei dati, dal supporto alla diagnosi e documentazione del restauro alle applicazioni didattiche e di studio, ed infine offrono notevoli

potenzialità per le applicazioni orientate alla divulgazione ed alla fruizione virtuale.

In questo contesto, la partecipazione del CNR al progetto di restauro della Madonna di Pietranico non si è quindi limitato alla generazione di un modello digitale dell'opera, ottenuto mediante una campagna di scansione tridimensionale, a fini della documentazione dell'intervento. L'obiettivo è stato invece molto più ampio: sviluppare delle metodiche che permettano di supportare il lavoro del curatore e del restauratore nelle varie fasi del processo di analisi dello stato dell'opera e del restauro, mediante elaborazioni informatiche e visualizzazioni del clone digitale dell'opera. A tal fine, il modello digitale è stato il cardine su cui si sono sviluppati contributi allo studio delle ipotesi di collegamento dei vari frammenti, alla ricomposizione virtuale della statua ed al riassetto virtuale dei frammenti, ed infine alla definizione di ipotesi relative alla decorazione pittorica originale.

### INTRODUCTION

Three-dimensional digital models are computerized representations of the surface geometry of a real object. The surface is usually represented by a number of geometric "primitives" (as parametric curves and as surfaces or points and as polygons or volumetric elements). These representations can either be created on computers with 3D modeling tools, or by using semi-automatic devices, referred to as *3D digitalization* or *3D scanning*. In the first case, the operator "rebuilds" the digital model by hand, working, for example, from photographs. In the second case, a sampling device measures the geometric properties of an object to a high degree of precision. The resulting 3D model is extremely accurate, so this process, usually referred to as "3D scanning," is a kind of three-dimensional photography.

3D scanning technologies have improved, both in terms of acquisition devices and for the software tools needed to process the relevant data and to handle the resulting 3D models.

These technologies were born in the field of quality control and assisted design in an industrial setting, but they have found a wide area of application in Cultural Heritage, since they can furnish very accurate, high-resolution models of objects.

3D models can be used in many different ways in the field of Cultural Heritage – for documentation and archiving, sharing information, offering assistance to monitoring and restoration, in the fields of education and specialized studies and for applications leading to making virtual models accessible for use.

In this context, the participation of CNR in the Madonna di Pietranico restoration project was not limited to the creation of the 3D models of the fragments and of the reconstructed statue for documentation purposes. The goal was more challenging - to analyze and develop new methods to assist the work of art historians and restorers in the various phases throughout the process of analysis of the condition of the statue and during the restoration work. The 3D model played a pivotal role in achieving these objectives and was often a key element in an individual phase. It was used to compare hypotheses for the reconstruction of the various fragments, to create a virtual re-composed statue from re-assembled fragments and even to analyze hypotheses on the original coloring.

### SCANSIONE ED ELABORAZIONE DATI

L'acquisizione semi-automatica delle caratteristiche di forma e colore di oggetti tridimensionali può essere realizzata con diversi strumenti di ripresa e metodologie di acquisizione, messi a punto grazie ad un'intensa attività di ricerca e sviluppo, sia accademico che industriale. Va sottolineato che ad oggi non esiste una singola metodologia applicabile a qualsiasi problema di acquisizione. La notevole varietà di forme, materiali e dimensioni che caratterizzano il settore dei Beni Culturali ha un immediato impatto nel variegato insieme di tecnologie e nella complessità della scelta tra queste di quella più adatta ad un concreto



caso di studio. Tale scelta è fortemente influenzata sia dalle caratteristiche fisiche dell'oggetto da acquisire (la dimensione, la complessità della sua superficie esterna, i possibili vincoli di accessibilità ed infine le proprietà di riflessione della luce della superficie dell'opera) che dalle caratteristiche del dato tridimensionale che si vuole ottenere (accuratezza e risoluzione) in funzione della prevista utilizzazione del modello digitale.

Nel caso specifico, tenendo in considerazione le dimensioni contenute dei frammenti dell'opera (ingombro massimo di circa 70 cm), del tipo di materiale costituente che fornisce buona risposta ottica (terracotta e gesso, allo stato grezzo o dipinti) e della risoluzione e precisione richiesta (sub-millimetrica) è stato prescelto uno strumento di scansione laser a triangolazione, lo scanner Konica Minolta Vivid 910. Questo strumento utilizza il principio della

triangolazione: una lama laser è proiettata dallo strumento sulla superficie dell'opera, per ogni intersezione di tale piano laser con la superficie il sistema rileva una catena di punti geometrici 3D, calcolati per triangolazione dalle informazioni note relative alla geometria di proiezione laser e di ripresa ottica<sup>1</sup>.

La scansione 3D dei vari frammenti è stata realizzata da un team di due persone del Laboratorio Visual Computing di CNR-ISTI, sotto la supervisione della restauratrice incaricata dalla soprintendenza, Elisabetta Sonnino.

I frammenti della statua sono stati acquisiti uno per uno. La dimensione dei frammenti è estremamente varia: si va dai grandi frammenti principali della base (30x60x50 cm), a pezzi di dimensioni medie, come la spalla (27x17x5 cm) e la testa (12x22x17 cm), fino a pezzi più piccoli come una porzione del

bracciolo del trono (7x12x3 cm). Il processo di scansione dei 19 frammenti principali e 5 frammenti minori ha richiesto due giorni di lavoro. Non è stato ritenuto utile effettuare la scansione dei numerosissimi frammenti di piccole dimensioni (meno di un centimetro cubo), in quanto di difficile acquisizione e processing e, soprattutto, molto difficili da inserire nella ricostruzione digitale e di impatto non significativo ai fini del riassetto virtuale.

La singola scansione restituisce il dato relativo alla porzione della superficie inquadrata dallo strumento di ripresa, che nel caso della tecnologia utilizzata ha una dimensione massima di cm 50x50. Per ottenere una campionatura completa di ciascun frammento è stato quindi necessario effettuare diverse scansioni da differenti punti di vista, fino a coprirne l'intera superficie con la ridondanza necessaria alle suc-

cessive fasi di elaborazione. Il numero di scansioni per ciascun frammento varia quindi in funzione della dimensione e della complessità geometrica dei frammenti. Si va da un minimo di 15 ad un massimo di 60 riprese singole (range map) per frammento, per un insieme totale di 580 scansioni e 6.5 GigaByte di dati rilevati. Si è mantenuto in scansione una risoluzione di ripresa (distanza fra singole coppie di punti rilevati) inferiore al mezzo millimetro: questo ha consentito di produrre dei modelli digitali ad alto dettaglio geometrico.

Contemporaneamente alla digitalizzazione della geometria, si è proceduto ad una acquisizione fotografica dettagliata di tutti i frammenti acquisiti, allo scopo di produrre modelli tridimensionali corredati del dato colore rappresentato ad alta risoluzione. Ciascun frammento è stato fotografato da diverse direzioni (coprendone nuovamente l'intera superficie). Una accurata disposizione delle luci, l'utilizzo di una tavola di calibrazione colore ed una light-tent (una "scatola" di tela bianca dentro cui viene posto l'oggetto da fotografare, illuminata dall'esterno, in modo da ottenere una ottimale diffusione della luce), hanno reso possibile ottenere una precisa resa cromatica. Questa acquisizione fotografica ha prodotto più di 500 fotografie.

Partendo dai dati grezzi raccolti durante i due giorni di scansione, sono stati poi generati i modelli tridimensionali dei vari frammenti. Mentre con la fotografia digitale o scansione 2D il prodotto finale (l'immag-

gine) è immediatamente ed automaticamente pronto, nel caso di una scansione 3D i dati grezzi prodotti dallo scanner devono essere elaborati per produrre un modello completo ed utilizzabile. Questa elaborazione è in genere più lunga della fase di acquisizione, richiede software specifico e l'intervento dell'utente.

La fase di elaborazione dei dati campionati comprende il necessario allineamento delle singole riprese, la eliminazione di zone non richieste (ad esempio la base di appoggio su cui è stato posizionato il frammento, anch'essa campionata dallo scanner), la ricostruzione di un unico modello come unione ed integrazione dalle singole riprese, una eventuale pulitura o completamento del modello risultante ed infine, ove richiesto, una ottimizzazione della rappresentazione digitale.

Il risultato è una superficie digitale composta da un enorme numero di triangoli, ognuno di questi estremamente piccolo (con le specifiche di ripresa definite in calce si ottengono da 3 a 6 triangoli per millimetro quadrato). Il prodotto di questa fase è il cosiddetto modello master, caratterizzato da un alto livello di complessità ma anche estremamente accurato. Operazioni automatiche di semplificazione della geometria permettono di ridurre il numero di triangoli mantenendo sotto controllo l'accuratezza geometrica della rappresentazione geometrica. I modelli finali dei frammenti sono descritti da un numero di triangoli che va da 1 a 5 milioni, a seconda della di-

mensione e complessità geometrica degli oggetti.

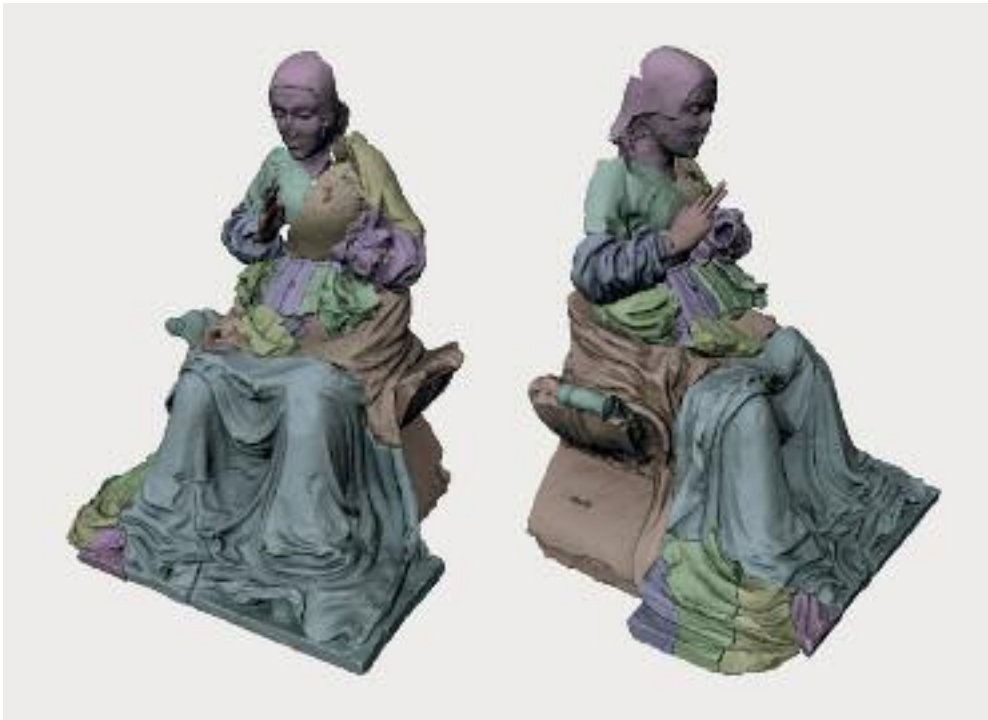
Una volta ottenuti i modelli dei vari frammenti, si è proceduto al *mapping* del colore, un processo software composto da due fasi. Per prima cosa le fotografie vengono *registered* rispetto al modello tridimensionale, ossia viene individuata la posizione da cui la foto è stata ripresa e le caratteristiche prospettiche (focale, distorsione) della macchina fotografica. Questo processo richiede l'intervento dell'utente e consente di stabilire una relazione fra alcuni punti della superficie del modello ed i corrispondenti pixel delle foto. Una volta che le immagini sono state allineate, il colore delle foto viene proiettato sulla superficie. In questo modo il modello tridimensionale viene ad avere un aspetto estremamente fedele all'originale anche per quello che riguarda la resa cromatica.

Il risultato dell'operazione di scansione è stato quindi un set di modelli tridimensionali con colore di ciascuno dei frammenti acquisiti.

#### D SCANNING AND DATA-PROCESSING

Semi-automatic electronic acquisition of the shape and color of three-dimensional objects can be achieved through a variety of recording instruments and acquisition methods. These have been developed through intensive research, both academic and industrial. It should be noted that to date there is no single method suitable for every form of acquisition. The great variety of shapes, sizes and materials that characterize the cultural heritage field have a significant impact on the choice of which technology would be most suitable for a given case study. This choice is greatly influenced both by the physical characteristics of the object to be scanned, including the size, the complexity of its outer surface, the possible constraints on access and even by the light-reflecting properties of the surface of the object itself. It is also influenced by the characteristics of the three-dimensional data required, in terms of accuracy and resolution, which depend on the intended use for the digital model.

In this case, taking into account the small size of the fragments of the piece, (the maximum diameter was 70cm,) the type of material - partially painted terracotta and plaster with good optical properties and the resolution and precision of less than one millimeter required, triangulation laser scanning using the Konica Minolta Vivid 910 was chosen. This device uses the principle of triangulation. A laser is pro-





jected from the instrument onto the surface and, using a camera, for each intersection of the plane of the laser with the surface, the system records a series of three-dimensional geometric points. Three-dimensional coordinates are calculated using known information about the relative position and angle between the camera and laser emitter<sup>1</sup>.

3D scanning of the various fragments was carried out by a team of two people from the Visual Computing Lab ISTI-CNR, under the supervision of Elisabetta Sonnino, the appointed restorer. The fragments of the statue were studied individually. The size of the fragments varied greatly, ranging from large fragments of the main base (30 x 60 x 50cm) to pieces of average size, such as the shoulder (27 x 17 x 5cm) and head (12 x 22 x 17cm), down to smaller pieces, such as a portion of the armrest of the throne (7 x 12 x 3cm.) The scanning process of the 19 major and 5 minor fragments took two days. It was not considered useful to scan a large number of very small fragments of less than one cubic centimeter because of the difficulty in acquiring and processing the relevant data. It would also have been difficult to position them accurately in the digital reconstruction and would not have had a significant impact on the virtual reassembly.

A single scan provides data on the portion of the surface in the frame of the recording device. In the case of the technology used a maximum area of 50 x 50cm could be covered in a single scan. To obtain a complete sample of each fragment it was therefore

necessary to perform multiple scans from different angles, to ensure that the entire surface was covered well-enough to facilitate the subsequent processing. The number of scans for each fragment varied depending on the size and geometric complexity of the fragments. It ranged from a minimum of 15 to a maximum of 60 scans (the “range map”) for each fragment; a total of 580 scans were performed and 6.5 gigabytes of data were collected. The scanning resolution, meaning the distance between each pair of points recorded, was kept at less than half a millimeter, permitting highly-detailed digital models to be produced.

In parallel with recording the exact shape digitally, a detailed series of photographs were taken for each fragment studied, in order to produce three-dimensional models with high-resolution color information. Each piece was photographed from different angles, covering its entire surface. A color calibration table was used, lights were positioned with great precision and a light-tent was also used. The light-tent is a “box” of white cloth in which the object to be photographed is placed and which is lit from the outside to give optimal light diffusion. All this made it possible to accurately record color variation with the support of more than 500 photographs. From the raw data collected during two days of scanning, the three-dimensional models of the various fragments were generated. In digital photography the final 2D product (the image) is immediately available automatically, whereas in the case of a

3D scan, the raw data recorded by the scanner must be processed to produce a complete model. This processing typically takes longer than the acquisition phase and requires specific software and some user interaction.

The elaboration phase using the sampled data necessarily includes the alignment of individual views, the elimination of redundant areas, (the base on which the fragments were placed, for example, which was also partially sampled by the scanner,) the reconstruction of a single unified model integrating the individual readings, any cleaning or necessary completion of the resulting model and, finally, where necessary, optimization of the digital model.

The result is a digital surface consisting of an enormous number of extremely small triangles - with the given specifications, from 3 to 6 triangles define each square millimeter. The product of this phase is the so-called “master model,” which is extremely accurate, but also very complex. Automatic simplification operations can reduce the number of triangles without losing geometric detail. The final models of the fragments were described by a number of triangles ranging from 1 to 5 million, depending on the size and complexity of the objects.

Once 3D models of the fragments had been obtained, the next step was “color-mapping”, a two-phase software process. In this process, first, the pictures are recorded according to the three-dimensional model. This corresponds to an estimate of where each photograph was taken from and the



characteristics of its perspective, including focus and possible distortion from the camera. This process requires user intervention and permits the relationship between some points on the surface of the model and the corresponding pixels in the relevant photograph to be established. Once all the images have been aligned, then color from the images is projected onto the surface. In this way, the three-dimensional model also faithfully represents the visual appearance of each surface. The end result of scanning was a set of three-dimensional color models showing each of the selected fragments.

#### DOCUMENTAZIONE DELL'INTERVENTO DI RESTAURO

I modelli digitali tridimensionali, in quanto rappresentazione generata da un insieme di misure effettuate sull'oggetto, rappresentano uno strumento ideale di documentazione dello stato del reperto. In particolare, sia la forma che il colore dei vari frammenti hanno subito modifiche anche sostanziali durante il restauro (rimozione di parti introdotte nel passato restauro e di integrazione del colore). I modelli digitali prodotti in questo progetto sono quindi una documentazione estremamente dettagliata dello stato della statua al momento dell'inizio del restauro.

L'analisi dei modelli digitali non è solo di tipo visuale, in quanto ad esempio è possibile effettuare misurazioni in maniera molto semplice, utilizzando strumenti soft-

ware sviluppati da CNR-ISTI, disponibili gratuitamente<sup>2</sup>.

Altrettanto semplice è la produzione di immagini ortografiche a scala nota e sezioni, che possono integrare o sostituire i disegni tecnici ottenuti con metodologie di rilievo classico. Sfruttando questa possibilità, i modelli tridimensionali dei frammenti sono stati utilizzati come fonte di misure per la realizzazione di alcuni pezzi sostitutivi da parte di un artista della terracotta. Questa operazione ha riguardato la mano sinistra della statua (basata su quella destra) ed il bracciolo sinistro del trono (anche in questo caso, basato su quello destro). Sia nel caso della mano che del bracciolo, sono state realizzate immagini ortografiche misurabili da diverse angolazioni e diverse sezioni lungo i tre assi dei frammenti acquisiti, in modo da fornire all'artista una precisa idea della geometria della parte originale.

Le tecniche di visualizzazione fotorealistica, applicate ai modelli tridimensionali, permettono di produrre immagini e clip video in animazione computerizzata in maniera più veloce e flessibile rispetto ad una ripresa fotografica. Già nell'originale pianificazione, parte della documentazione del restauro doveva confluire nella creazione di un video a carattere divulgativo; pertanto, sono stati realizzati tre spezzoni video in animazione computerizzata, al fine di integrare le riprese video dal vero effettuate durante il recupero ed il restauro della statua.

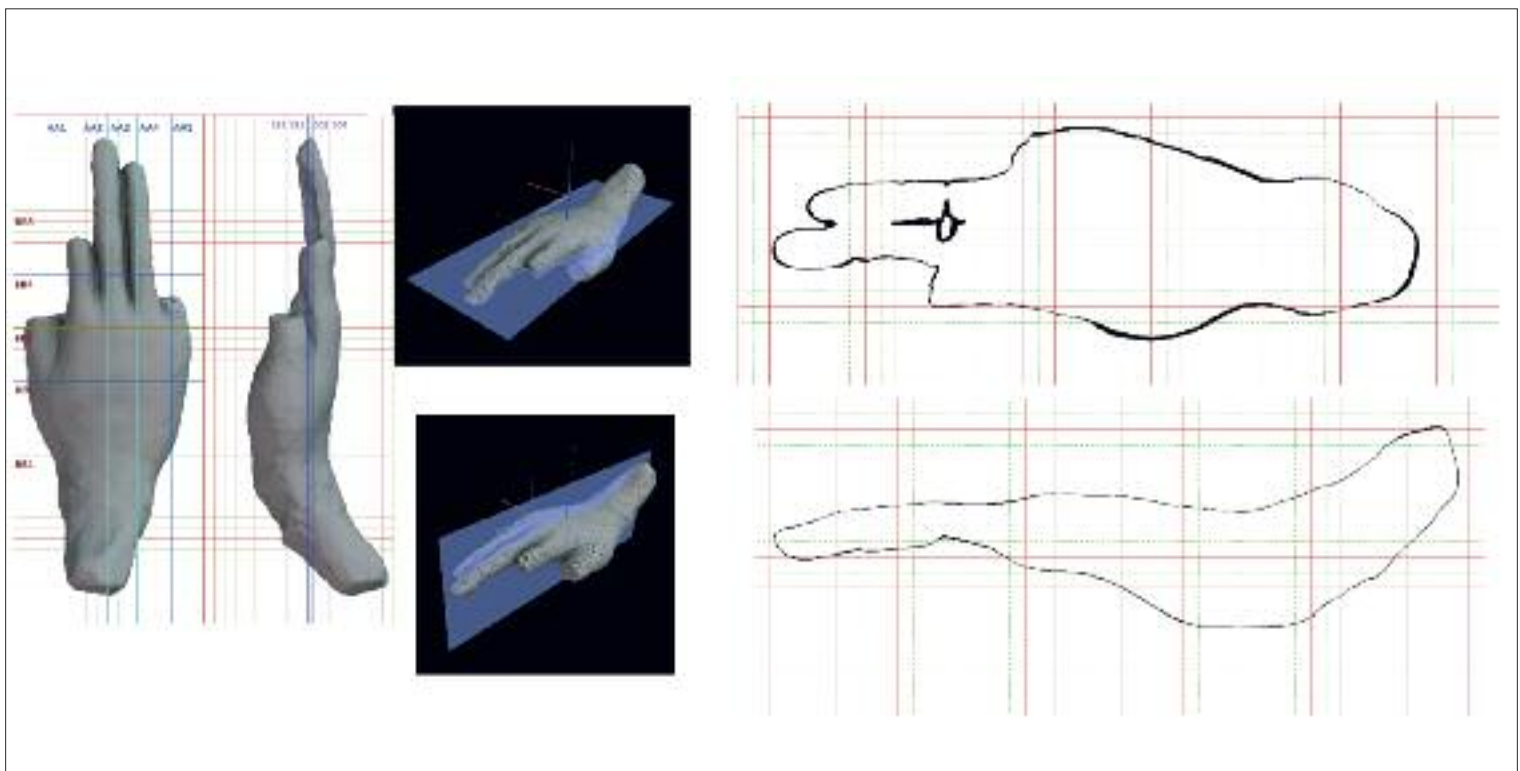
Le tre sequenze sono realizzate utilizzando i modelli tridimensionali colorati dei frammenti; nei video è possibile osservare sia i dettagli dei frammenti che come i vari frammenti si combinino a formare l'intera statua. Le potenzialità della animazione digitale ci permettono di mostrare i vari pezzi ed il loro assemblaggio senza dover ricorrere a complicate riprese video ed alla realizzazione di strutture di sostegno.

#### DOCUMENTATION OF RESTORATION

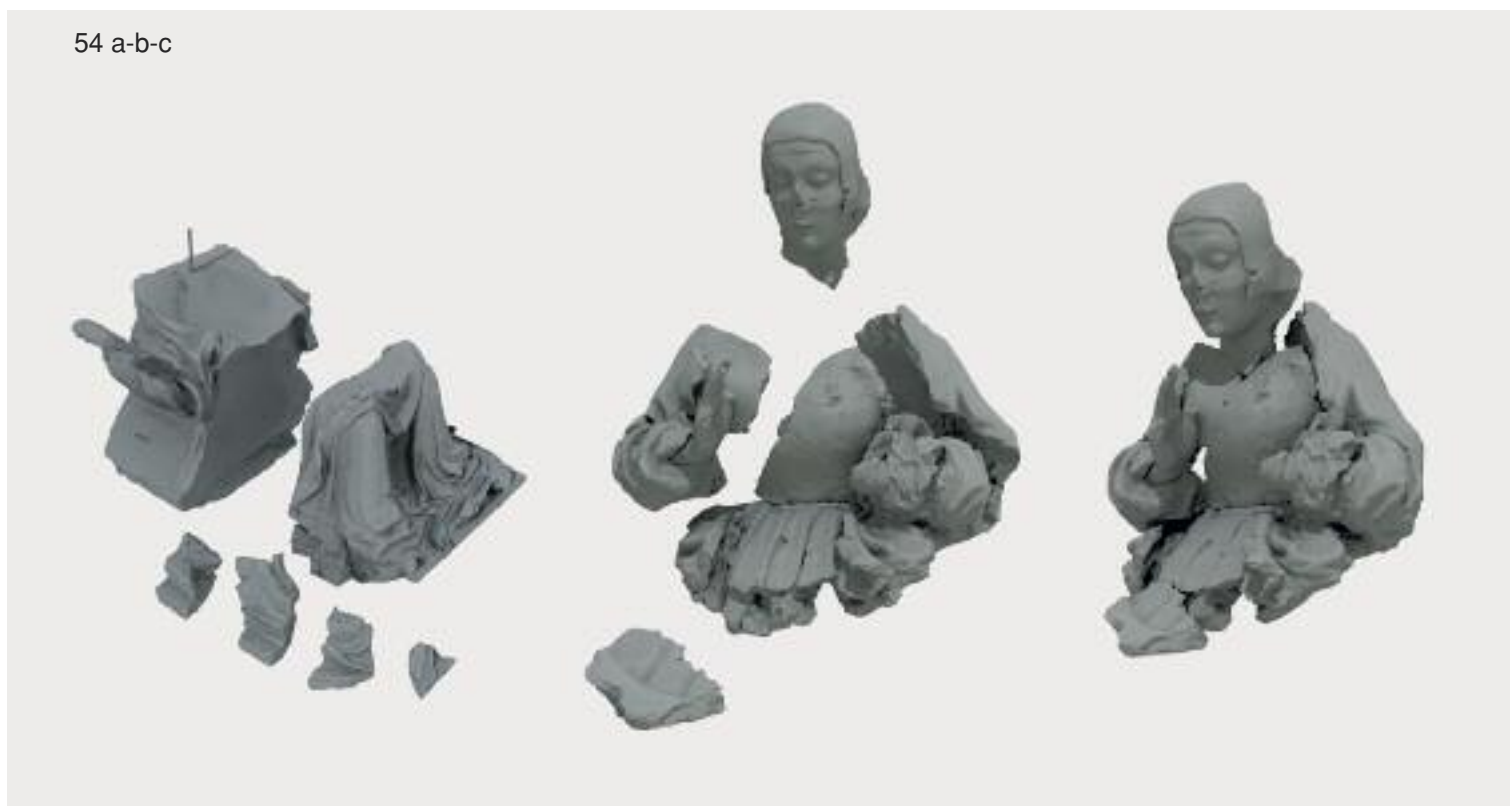
The three-dimensional digital models, generated from a set of measurements of the object, are ideal to record the condition of the statue. In particular, both the shape and the color of the various fragments underwent significant changes during restoration. Elements which had been introduced in the past during previous restoration work were removed and the color was reapplied where necessary. The digital models produced in this project are, therefore, a highly-detailed record of the condition of the statue at the beginning of the restoration work

The potential use of digital models is not simply related to visualization, since measurements can be taken very easily using freely-available software tools<sup>2</sup>.

Production of orthographic views to a given scale or for a selection of sections is equally simple, which may supplement or replace



54 a-b-c



the technical drawings made using traditional methods. Building on that, in this case, the three-dimensional models of the fragments were used as a source of measurements for the creation of some replacements in terracotta by a sculptor. This was done for the left hand of the statue (based on the right) and the left armrest of the throne (again based on the right). Both in the case of the hand and of the armrest, orthographic images were taken from different angles and different sections along the three axes of the fragments were obtained, giving the artist a clear idea of the shape of the original part.

Photographically-realistic visualization techniques, applied to three-dimensional models, permit images and computer-animated video clips to be produced quickly and flexibly. In the original planning, the restoration project had to include the creation of rendered material. For this reason, three video clips were created using computer animation, in order to complement the video footage taken during the recovery and restoration of the statue.

The three sequences show the three-dimensional models of the colored fragments and details can be clearly seen while they are being combined to re-form the complete statue. The potential of digital animation permits various parts to be shown, even while being assembled, without resorting

to complex video-filming or to the creation of ad-hoc support structures.

#### RIASSEMBLAGGIO VIRTUALE E SUPPORTO ALLA RICOSTRUZIONE

Uno degli obiettivi del progetto era realizzare l'assemblaggio virtuale dei vari frammenti prima di procedere alla ricostruzione fisica della statua. Questa operazione doveva consentire dapprima di va-

lidare le ipotesi di ricomposizione e successivamente di fornire supporto alla fase di progettazione e realizzazione dei supporti.

Sfruttando solo la geometria dei frammenti, non è stato però possibile assemblare in maniera soddisfacente la statua in modo del tutto automatico, a causa del degrado delle superfici di giunzione dei frammenti. Per questo motivo, in una successiva sessione di acquisizione dati, sono state rilevate (nuovamente utilizzando lo scanner tridimensionale) le posizioni di coppie di frammenti accostate seguendo gli attacchi rilevati dal team di restauro. In tal modo, l'esperienza e le capacità di analisi del team di restauro sono state il punto di partenza per la successiva fase informatizzata (mantenendo il restauratore e la sua conoscenza all'interno del processo di riassetto virtuale).

Partendo da questi accoppiamenti di base, è stato possibile accostare i vari frammenti nello spazio digitale, utilizzando i punti di contatto noti. Durante questo primo assemblaggio digitale, sono stati individuati sui frammenti altri due punti di contatto precedentemente non conosciuti. Questi punti di contatto individuati nella rappresentazione virtuale sono stati poi validati sui veri frammenti (sotto la supervisione del personale di restauro) ed aggiunti al dataset, rendendo possibile un completo e soddisfacente riassetto della statua. Il riuscire ad individuare questi nuovi punti

55





di contatto è la conferma della precisione del procedimento e dimostra l'utilità del lavoro svolto sulla rappresentazione digitale 3D della Madonna.

Utilizzando i risultati intermedi e finali del riassetto virtuale, è stato possibile esplorare la geometria ricomposta della statua e validarla in modo estremamente più semplice e veloce di quanto sarebbe stato possibile nello spazio reale, effettuando misurazioni e analisi visive direttamente sulla sua controparte virtuale. È importante sottolineare come in questa fase non si siano dovute operare azioni di riassetto parziale, che richiedono normalmente pesanti azioni di manipolazione dei frammenti e costruzione delle necessarie strutture di sostegno. Utilizzando unicamente il clone digitale, i restauratori hanno valutato le lacune, il possibile posizionamento di altri frammenti e compreso in dettaglio come e quanto i pezzi andassero a contrasto uno dell'altro. Potendo osservare tutti i pezzi ricomposti, è apparso chiaro come gli spazi in cui lavorare ed il tipo di elementi di supporto si sarebbero dovuti adattare il più possibile alla complicata geometria dell'interno della statua.

L'idea è stata quindi quella di cercare di progettare gli elementi di sostegno per il riassetto direttamente al computer, sfruttando al massimo i dati dei frammenti e del riassetto virtuale.

Gli elementi di supporto sono stati creati a partire dai modelli tridimensionali dei frammenti come entità geometriche digitali, e sono stati realizzati come oggetti fisici utilizzando tecnologie di Rapid Prototyping (stampa tridimensionale), in

modo da essere utilizzati direttamente nella costruzione della struttura di supporto.

Come le tecnologie di scansione 3D, utilizzate per la generazione dei modelli digitali, anche le tecniche di "rapid prototyping" (riproduzione materica) nascono in un contesto industriale, dove la maggior parte della progettazione di manufatti avviene al computer, ma è spesso necessario avere mezzi veloci ed economicamente validi per ottenere copie fisiche prototipali.

Le tecnologie di Rapid Prototyping si dividono in *sottrattive* dove, partendo da un blocco solido di materiale viene scolpito seguendo la geometria del modello digitale, ed *additive*, dove il materiale viene aggiunto in maniera controllata fino a ricostruire l'oggetto desiderato. In questo caso, si è scelta una tecnologia additiva di ottima precisione, dove l'oggetto viene ricostruito da strati successivi di gesso sintetico infiltrato di uno speciale fissante, che rende il materiale sufficientemente duro e resistente. Seguendo questa metodologia, sono stati progettati e prodotti due elementi di sostegno: uno relativo ai frammenti della testa e uno dedicato al supporto dei frammenti del busto della statua.

La testa era una porzione dell'oggetto di difficile trattamento, a causa del suo peso e della ridotta superficie di contatto con il resto del busto: questo ha giustificato la necessità di un punto di supporto che permettesse di scaricarne il peso e di connetterla con il busto in modo indipendente dalla superficie di contatto della terracotta.

Essendo il retro della testa cavo, tale cavità è stata considerata una risorsa ideale per creare

il supporto. La geometria della cavità è stata isolata ed utilizzata per generare un elemento geometrico digitale che si adattasse perfettamente all'interno della superficie cava della testa. Questo oggetto tridimensionale è stato poi diviso in due parti, lasciando in mezzo alle due uno spazio di un paio di centimetri per il montaggio di un elemento metallico di interconnessione con il busto (vedere immagine in figura). Infine, le due metà di questo oggetto sono state manualmente ritoccate per ridurre le aree di sottosquadro che avrebbero reso difficile il montaggio. Le due calotte sono fissate ad un'asta di supporto e, tramite un elemento estensibile, siano portate a contatto con la cavità della testa in modo solido.

Per il supporto del busto il lavoro è stato simile, ma decisamente più complesso a causa dei numerosi frammenti coinvolti. I vari frammenti non erano sufficienti per ricostruire completamente la statua e, a causa dei frammenti mancanti e della geometria dei punti di contatto, è stato necessario approntare una struttura che supportasse il peso dei vari pezzi dall'interno, adattandosi alla geometria delle superfici interne dei frammenti. Anche il busto della statua presenta una cavità posteriore che permette l'alloggiamento di un volume di supporto. Le superfici dei frammenti rivolte verso l'interno del busto sono state isolate e, da queste, è stato generato un modello digitale tridimensionale di riempimento della cavità del busto che a sua volta è stato riprodotto con tecnologia di stampa tridimensionale. Questa struttura interna, adattandosi perfettamente alle superfici dei frammenti, è stata usata come elemento su cui appoggiare e fissare i vari elementi per ricostruire il busto della statua. Anche in questo caso si è proceduto ad un ritocco manuale delle superfici per ridurre le aree di sottosquadro che avrebbero reso difficile il montaggio.

#### REASSEMBLING, VIRTUAL RECONSTRUCTION AND SUPPORT

One of the goals of the project was to complete virtual assembly of the fragments prior to physical reconstruction. This would, firstly, permit the validation of hypotheses about possible configurations and, later, to assist in the design and implementation of physical support structures.

Using only the geometrical shapes of the fragments, it was not possible to assemble the statue in a satisfactory manner automatically. This was because of the deterioration of the surfaces of the fragments



where they joined. For this reason, in a subsequent session of data acquisition, additional scans were performed, again using the three-dimensional scanner, on the positions of pairs of aligned fragments according to the positioning determined by the restoration team. In this way, the experience and analytical capacity of the restoration team was the starting point for subsequent elaboration, so keeping the restorer and his knowledge as part of the process of virtual reassembly.

Starting from these base pairs, it was possible to bring the various fragments into alignment in digital space, using the known contact points. During this first digital assembly, two further points of attachment between pairs of fragments, which had not been previously identified, were found. These contact points, which had been identified in the virtual representation, were then confirmed on the real fragments under the supervision of the restoration staff and added to the dataset. In this way complete reassembly of the statue was achieved satisfactorily. The discovery of new points of contact confirms the accuracy of the procedure and clearly demonstrates the usefulness of 3D digital representation during restoration of the Madonna.

For both intermediate working theories and final results of virtual reassembly, it was possible to explore the geometry of the reconstructed image, and to validate it extremely easily and quickly. Further, it was

possible to take measurements and to perform visual analyses directly on the virtual counterpart of the statue. It's important to note that these operations are usually very difficult to carry out in the real world, since they require the physical manipulation of the fragments and construction of the necessary support structures. Using only digital clones, the restorers were able to analyze the spaces and the possible placement of other fragments and to clearly understand if there was obstruction. The analysis of the virtual model added information about the physical space required for the reconstruction and the type of support elements to be created to support the complicated action of positioning the fragments

The idea was then to try to design the support elements for computerised reassembly, taking into account the data about the fragments themselves and their virtual reassembly.

Support elements were created from three-dimensional models of the fragments as separate digital forms and were transformed into physical objects using Rapid Prototyping (three-dimensional printing) technology.

Similarly to 3D scanning technology, which is used to generate digital models, "rapid prototyping" techniques were born in an industrial context, where most design is performed on the computer. However, it is often necessary to have fast, cost-effective ways to make physical copies of the proto-

types.

Rapid Prototyping Technology is divided into two approaches – "subtractive," where an initial solid block of material is carved according to the geometry of the digital model, and "additive," where material is added in a controlled manner to build up to the object required. In this case, high-precision additive Rapid Prototyping was chosen with the object created by successive layers of synthetic gypsum interspersed with a special fixative, making the material sufficiently hard and tough.

In this way, two support elements were designed and produced - one for the fragments of the head and one to support the fragments of the bust.

The head was a difficult portion of the object to handle because of its weight and the reduced contact area with the rest of the bust. This led to the choice of creating a support piece which would be in contact with the main support structure.

As the back of the head is empty, the cavity was considered ideal for creating the piece. The geometry of the cavity was identified and used to generate a digital shape that fitted inside the hollow area of the head. This three-dimensional object was then divided into two parts, leaving a space of a couple of inches between the two, so that a metal connection to the trunk could be attached. Finally, the two halves were manually adjusted, to reduce the areas that would make





them difficult to mount. The two “cups” were attached to a support pole, and an extensible element was adjusted to bring them into contact with the cavity of the head.

The work for the creation of the bust was similar, but much more complex because of the large number of pieces involved and because the fragments collected were insufficient to rebuild the statue fully. Given that there were missing fragments and considering the geometry of the points of contact of those present, it was necessary to design a piece that would support the weight of the various fragments from the inside, while being adapted to the internal surface geometry. The torso of the statue has a cavity in the back, which permitted the insertion of this piece. The surfaces of the fragments towards the center of the bust were isolated and a 3D model was created from these. After some modifications had been made to perfect the design, the filling was produced using three-dimensional printing technology. This internal structure, which would fit perfectly to the internal surfaces of the fragments, was used as a base structure on which to attach and fix the fragments to reconstruct the bust of the statue.

#### CONCLUSIONI

Questa breve memoria descrive come le tecnologie di scansione 3D e di modellazione grafica siano state utilizzate nell’ambito del progetto di restauro della Madonna di Pietranico, seguendo due principali obiettivi: la documentazione dell’intervento ed il supporto attivo alla realizzazione del restauro.

L’acquisizione dei modelli tridimensionali dei principali frammenti della statua ha fornito una documentazione accurata del loro stato, con una descrizione di alta qualità di geometria e colore. Inoltre, l’uso di strumenti software ha permesso di ottenere in modo semplice ulteriori dati ed elaborati, come misurazioni, prospetti e sezioni.

Ma il contributo più interessante a nostro avviso è stato il supporto al lavoro dei restauratori. In particolare, abbiamo definito una metodologia di lavoro che permette ai restauratori di formulare ipotesi ricostruttive e validarle lavorando il più possibile in modo *digitale*, con l’obiettivo di ridurre la complessità operativa, di ridurre il pericolo di ulteriore degrado dell’opera ed infine di aumentare le loro capacità percettive e di analisi. La ricostruzione virtuale della sta-

tua ha inoltre permesso di fornire indicazioni utili per la produzione di parti mancanti. Infine, sono stati progettati attraverso l’analisi della geometria e riprodotti tramite rapid prototyping due supporti per il posizionamento dei frammenti nella ricostruzione fisica della statua. Questo ha permesso di superare una serie di difficoltà pratiche, tipiche delle operazioni di riassetto da frammenti.

In tutte le fasi del processing sono stati utilizzati strumenti software realizzati da CNR-ISTI. Questi software rappresentano lo stato dell’arte per quel che riguarda la generazione e la manipolazione di modelli tridimensionali complessi a partire da dati di scansione 3D<sup>3</sup>.

#### CONCLUSIONS

This brief section describes how scanning technologies and 3D graphic modeling were used in the Madonna di Pietranico restoration project, which was done with two main objectives - firstly, to document the operation itself and, secondly, to provide active support for the restoration phase.

The production of three-dimensional models of the main fragments of the statue also represented an accurate record of their condition, featuring detailed information on their shape and color. Using software tools also provided the opportunity to extrapolate data to obtain measurements, elevations and sections.

However, the greatest contribution was in supporting the work of the restoration team. In particular, the restorers could formulate hypotheses and prepare directly for reconstruction using the recorded information. This was done with the aims of reducing operational complexity and avoiding any risk of further deterioration of the work, while, at the same time, augmenting the capacity for analysis and visualization. The virtual reconstruction of the statue was also useful during reproduction of missing parts. Finally, two support pieces were designed using geometrical analysis, and they were reproduced through rapid prototyping. This permitted a number of practical issues that arose during the physical re-assembly of the fragments to be overcome much more easily.

All processing phases were carried out using software tools developed by CNR-ISTI. This is state of the art software for the generation and manipulation of complex three-dimensional models from 3D scan data<sup>3</sup>.

#### NOTE

<sup>1</sup> Per una introduzione alle tecnologie di scansione 3D e di elaborazione dei dati campionati vedere: “Processing sampled 3D data: reconstruction and visualization technologies”, Marco Callieri, Matteo Dellepiane, Paolo Cignoni, Roberto Scopigno, in Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation: Analysis, Restoration and Reconstruction of Ancient Artworks, Taylor and Francis, page 103–132 - 2010

<sup>2</sup> Vedere ad esempio lo strumento di visualizzazione ed analisi MeshLab sviluppato da CNR-ISTI <http://meshlab.sourceforge.net>

<sup>3</sup> In particolare, la maggior parte del processing è stata realizzata utilizzando lo strumento di visualizzazione ed editing opensource MeshLab, realizzato da ISTI-CNR e liberamente scaricabile dal sito web (<http://meshlab.sourceforge.net/>).

#### NOTES

<sup>1</sup> For an introduction on 3D scanning technologies and data processing please refer to: “Processing sampled 3D data: reconstruction and visualization technologies”, Marco Callieri, Matteo Dellepiane, Paolo Cignoni, Roberto Scopigno, in Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation: Analysis, Restoration and Reconstruction of Ancient Artworks, Taylor and Francis, page 103–132 - 2010

<sup>2</sup> I.e. MeshLab tool, developed at CNR-ISTI, <http://meshlab.sourceforge.net>

<sup>3</sup> In particular, most of the processing was performed using the MeshLab tool, produced by ISTI-CNR and freely downloadable from the website (<http://meshlab.sourceforge.net/>).