

M. MONGELLI, S. MIGLIORI

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Information and Communications Technology
Sede Legale, Roma

A. PEROZZIELLO, G. BRACCO, B. CALOSSO

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Information and Communications Technology
Centro Ricerche Frascati

M. GUARNERI

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Divisione Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute
Centro Ricerche Frascati

S. PIERATTINI

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Information and Communications Technology
Via Madonna del Piano, 10 Sesto Fiorentino (FI), Italia

A. QUINTILIANI, L. DE MARTINO

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Information and Communications Technology
Centro Ricerche Casaccia

I. BELLAGAMBA

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Borsa GARR c/o Divisione Information and
Communications Technology
Centro Ricerche Casaccia

G. CHELLINI

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Information and Communications Technology
Stagista nell'ambito del progetto "Torno Subito" della
Regione Lazio D.D. n. 1234 del 19 Aprile 2017
Centro Ricerche Frascati

**RICOSTRUZIONE FOTOGRAMMETRICA 3D
E MODELLAZIONE DEL "TRONO CORSINI"
E DEL RITRATTO DI ALESSANDRO VII CHIGI,
BUSTO IN TERRACOTTA DI GIAN LORENZO BERNINI**

Stato di avanzamento (mesi 01-06)

RT/2018/13/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

M. MONGELLI, S. MIGLIORI

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Information and Communications Technology
Sede Legale, Roma

A. PEROZZIELLO, G. BRACCO, B. CALOSSO

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Information and Communications Technology
Centro Ricerche Frascati

M. GUARNERI

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Divisione Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute
Centro Ricerche Frascati

S. PIERATTINI

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Information and Communications Technology
Via Madonna del Piano, 10 Sesto Fiorentino (FI), Italia

A. QUINTILIANI, L. DE MARTINO

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Information and Communications Technology
Centro Ricerche Casaccia

I. BELLAGAMBA

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Borsa GARR c/o Divisione Information and
Communications Technology
Centro Ricerche Casaccia

G. CHELLINI

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Information and Communications Technology
Stagista nell'ambito del progetto "Torno Subito" della
Regione Lazio D.D. n. 1234 del 19 Aprile 2017
Centro Ricerche Frascati

RICOSTRUZIONE FOTOGRAMMETRICA 3D E MODELLAZIONE DEL "TRONO CORSINI" E DEL RITRATTO DI ALESSANDRO VII CHIGI, BUSTO IN TERRACOTTA DI GIAN LORENZO BERNINI

Stato di avanzamento (mesi 01-06)

RT/2018/13/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

RICOSTRUZIONE FOTOGRAMMETRICA 3D E MODELLAZIONE DEL "TRONO CORSINI" E DEL RITRATTO DI ALESSANDRO VII CHIGI, BUSTO IN TERRACOTTA DI GIAN LORENZO BERNINI

Stato di avanzamento (mesi 01-06)

M. Mongelli, S. Migliori, S. Pierattini, I. Bellagamba, B. Calosso, G. Chellini, A. Quintiliani
L. De Martino, M. Guarnieri, A. Perozziello, G. Bracco

Riassunto

Il presente rapporto tecnico descrive lo stato di avanzamento del sotto progetto n.6 realizzato nell'ambito dell'attività progettuale denominata "WeACT3" (Agire Insieme - La Tecnologia per Arte, Cultura Turismo e Territorio – firmata dal comitato CIVITA, di cui l'ENEA è socio onorario, e le Gallerie Nazionali Barberini e Corsini"), schedato per il primo semestre; tali attività sono, inoltre, previste dal protocollo d'intesa del 6 giugno 2016 tra il MIBACT e l'ENEA.

Il sotto progetto prevede la restituzione 3D, mediante l'utilizzo della tecnica fotogrammetrica da immagini digitali 2D, della scultura romana denominata "Trono Corsini" e del ritratto di Alessandro VII Chigi, busto in terracotta di Gian Lorenzo Bernini, presenti nella Galleria Corsini.

I modelli 3D fotogrammetrici dei due casi studio sono stati realizzati, dalla divisione ICT del Dipartimento di Tecnologie Energetiche, mediante la messa a punto di tecnologie, risorse hardware/software e strumentazioni accessibili via Internet, fruibili da remoto su GRID, sfruttando l'infrastruttura CRESCO6 del "Calcolo Scientifico ad Alte prestazioni".

La restituzione fotogrammetrica, poiché largamente impiegata sia nella riproduzione 3D di opere d'arte di dimensione ridotte, che per complessi monumentali di notevoli estensioni, essendo non invasiva, a basso costo, non a contatto, veloce, di facile esecuzione, consente di fornire in modo veloce e semi-automatico, modelli 3D, sotto forma di nuvole di punti, di adeguata precisione, in termini di dati metrici (forme, geometrie, dimensioni) e colori, scalabili ed estendibili alle molteplici opere presenti nella galleria, favorendone la relativa fruizione in modalità virtuale per vari livelli di utenza, rafforzando l'offerta museale, facilitando la visibilità e la fruizione di alcune opere importanti, non sempre adeguatamente visibili, data la loro collocazione.

Tramite la ricostruzione 3D fotogrammetrica mediante tecnica "Structure from Motion" (SFM) sono state effettuate le ricostruzioni 3D del trono e del busto al fine di:

- > Realizzare video multimediali 3D per garantire la fruizione in modalità virtuale delle opere in esame anche mediante l'ausilio di schermi di visualizzazione tridimensionale.
- > Confrontare lo stato di conservazione delle opere nel tempo.

Parole chiave: Palazzo Corsini, Fotogrammetria, Structure from Motion, Ricostruzione 3D.

Abstract

The technical report shows the 3D photogrammetric reconstruction starting from 2D digital images, of the Roman sculpture called "Trono Corsini" and of the portrait of Alessandro VII Chigi, a terracotta bust by Gian Lorenzo Bernini, located in the Galleria Corsini.

The activity was developed within the "WeACT3" (Acting Together - Technology for Art, Culture, Tourism and Territory) project signed between CIVITA Committee, of which ENEA is honorary member, and the National Galleries Barberini and Corsini. These activities are also included in the Corporate Agreement between MIBACT and ENEA (June 6th, 2016).

The photogrammetric 3D models were obtained exploiting the ENEA ICT CRESCO6 infrastructure of "High Performance Scientific Computing", via INTERNET, through the hardware/software capabilities available in the network.

The photogrammetric reconstruction being non-invasive, low cost, non-contact, fast, easy to execute, allows to provide fast and semi-automatic 3D models, as point clouds, with good precision in terms of metric data (shapes, geometries, dimensions) and colors and it can be scalable to the many assets of the gallery, favoring their fruition in virtual mode for various levels of users, reinforcing the museum offer, improving their visibility.

Through the photogrammetric 3D reconstruction using "Structure from Motion" (SFM) technique, 3D reconstructions of the throne and of the bust were carried out in order to:

- Create 3D multimedia videos to ensure the virtual use of the works in question also by means of three-dimensional display screens.
- Compare their conservation status over the time.

Keywords: Palazzo Corsini, Photogrammetry, Structure from Motion, 3D Reconstruction

INDICE

1. INTRODUZIONE	7
2. RICOSTRUZIONE FOTOGRAMMETRICA E TECNICA SFM	7
2.1 Agisoft PhotoScam: il software per la ricostruzione con tecnica SfM	9
3. STRUMENTAZIONE	10
4. RICOSTRUZIONE FOTOGRAMMETRICA TRONO CORSINI	10
5. RICOSTRUZIONE FOTOGRAMMETRICA DEL BUSTO IN TERRACOTTA DI GIAN LORENZO BERNINI	14
5.1 Rilievo delle impronte digitali dalla ricostruzione 3D fotogrammetrica	17
5.2. Definizione del modello metricamente corretto	18
6. CONCLUSIONI	21
7. FUTURI SVILUPPI	22
BIBLIOGRAFIA	22

1. INTRODUZIONE

La fotogrammetria è una tecnologia molto diffusa che consente di ottenere un modello 3D, a partire da immagini digitali 2D, si basa sui principi teorici dell'ottica, della fotografia e della geometria descrittiva, in particolare della prospettiva inversa.

Per entrambi i casi studio si è utilizzato il software **Agisoft PhotoScan**, che utilizza la tecnica "Structure from Motion" (SfM), disponibile sui sistemi HPC CRESCO del *Calcolo Scientifico ad Alte Prestazioni*, fruibile da remoto tramite la tecnologia FARO2 per l'accesso via web alla griglia computazionale all'infrastruttura di calcolo dell'ENEA.

"Structure from Motion", letteralmente "struttura dal movimento", dà un'idea delle potenzialità della tecnica, che, dall'acquisizione delle immagini digitali 2D prese da diverse prospettive, restituisce la tridimensionalità della struttura.

Gli algoritmi che sono alla base della tecnica SfM nascono dalla fotogrammetria tradizionale e si sono evoluti grazie all'implementazione di quelli della Computer Vision. Ai principi teorici di collinearità, intersezione di raggi proiettivi, calibrazione della fotocamera, si affiancano inoltre gli algoritmi tipici della visione robotica che permettono di analizzare e correlare immagini digitali in modo veloce e quasi automatico.

La caratteristica fondamentale che il modello 3D digitale deve possedere è di **essere metricamente corretto**: ciò significa che deve essere in scala reale e deve essere possibile **effettuare misure precise** su di esso. Se il modello deve essere fruito sul web o su applicazioni per tablet e smartphone, è importante, inoltre, che anche **il colore sia realistico**.

La possibilità di accedere alle risorse di calcolo disponibili sull'infrastruttura consente di disporre di software finalizzati alla "grafica computerizzata", di risorse computazionali che riducono notevolmente i tempi necessari al processamento delle immagini e alla ricostruzione 3D, nonché di aree per condividere foto, risultati e documenti on-Cloud e archiviare una grande mole di dati e immagini su sistemi di storage basati su file system ad alte prestazioni (afs/gpfs).

Tali strumenti e risorse messe a disposizione da ENEA permettono di superare uno dei maggiori ostacoli nell'utilizzo della fotogrammetria, imputabile alle notevoli richieste hardware e software per l'elaborazione delle immagini e lo storage dei dati.

2. RICOSTRUZIONE FOTOGRAMMETRICA E TECNICA SFM

La tecnica di rilievo di SfM è un metodo che consente, a partire da una serie di immagini bidimensionali, la restituzione di un modello tridimensionale sotto forma di punti, oltre che delle relative posizioni e orientamenti degli apparecchi di ripresa fotografici.

La ricostruzione della scena, unitamente al posizionamento e all'orientamento della telecamera, vengono risolti per mezzo di algoritmi complessi, in via automatica, dal software utilizzato.

Dato un set di m immagini rappresentanti n punti reali, il problema consiste nello stimare le m matrici di proiezione P_j e gli n vettori X_i date le nm corrispondenze x_{ij} (Figura 1).

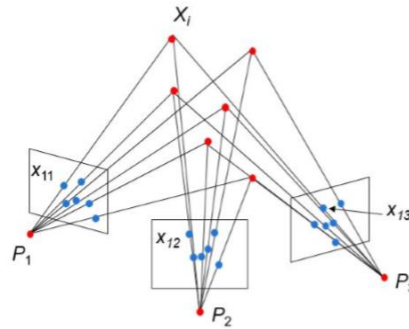


Figura 1: Proiezione di un punto su più immagini

La tecnica SfM si basa su metodi e algoritmi complessi studiati in passato e sulla tecnica di rilievo della fotogrammetria ed entrambe le tecniche hanno come fondamento teorico le equazioni di collinearità. Tali equazioni costituiscono un modello matematico che mette in relazione le coordinate dei punti di un sensore bidimensionale con le coordinate tridimensionali dei punti appartenenti al soggetto rappresentato.

I sistemi di structure from motion lavorano attraverso determinate fasi durante le quali vengono adoperati degli specifici algoritmi. Tali sistemi, partendo dalle prese fotografiche, individuano inizialmente delle features, o punti notevoli, con i quali viene generato un database.

Successivamente viene eseguito un matching delle immagini sulla base delle features precedentemente rilevate, raggruppando le immagini che presentano dei punti in comune. Le informazioni ottenute vengono processate attraverso un software di bundle adjustment, il quale determina gli orientamenti interni, esterni e la posizione delle features (Figura 2).

Esso è un metodo di calibrazione delle camere digitali basato sulle equazioni di collinearità, mediante il quale viene perciò effettuata un'autocalibrazione delle stesse, determinando i parametri di correzione delle distorsioni radiali proprio a partire dalle immagini non calibrate.

Il bundle adjustment opera minimizzando l'errore di riproiezione, definito come la distanza tra il punto proiettato e quello misurato.

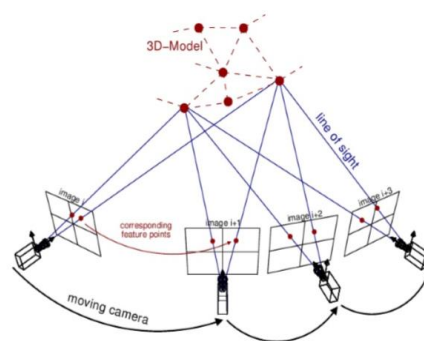


Figura 2: Fase di matching tra le foto che contengono le stesse features

Il risultato di questa fase è una nuvola sparsa di punti costituita dalle features individuate, cioè da punti caratterizzati da tre coordinate spaziali e da un'informazione cromatica ricavata dalle fotografie: il metodo minimizza l'errore di riproiezione totale rispetto a tutti i punti 3D e a tutti i parametri delle prese fotografiche.

I parametri ricavati, compresi quelli relativi alla distorsione, vengono usati da un algoritmo di dense image matching che, mediante la comparazione approfondita delle immagini, estrapola una nuvola densa di punti. A tali punti vengono associati un vettore normale e una terna di valori cromatici (RGB) estratti dalle foto associate a ciascun punto.

Molti software di ricostruzione 3D, tra cui PhotoScan, non si limitano a fornire una semplice nuvola di punti, ma tale nuvola verrà processata ed utilizzata per generare un modello poligonale, composto da vertici e facce. Successivamente, grazie alle informazioni ottenute sull'orientamento dei punti di scatto delle fotografie, segue una fase di texture mapping in cui viene generato un modello texturizzato tramite la proiezione di tali immagini sul modello poligonale.

2.1 Agisoft PhotoScan: il software per la ricostruzione con tecnica SfM

L'utilizzo della tecnica Structure from Motion, impiegata tramite il software Agisoft PhotoScan via HPC CRESCO, è in grado di gestire un gran numero di immagini restituendo modelli 3D di alta qualità con una ricostruzione di tipo multiview. La procedura di post-processing delle immagini, una volta selezionate, è semplice e quasi-automatica, basandosi su algoritmi di "Computer Vision", estrae i punti notevoli dalle singole foto, desume i parametri fotografici e individuando i punti riconoscibili su più immagini, rileva le coordinate nello spazio dei punti stessi e ricostruisce un modello poligonale (mesh).

Il flusso di lavoro di Photoscan può essere riassunto con il seguente diagramma (Figura 3).

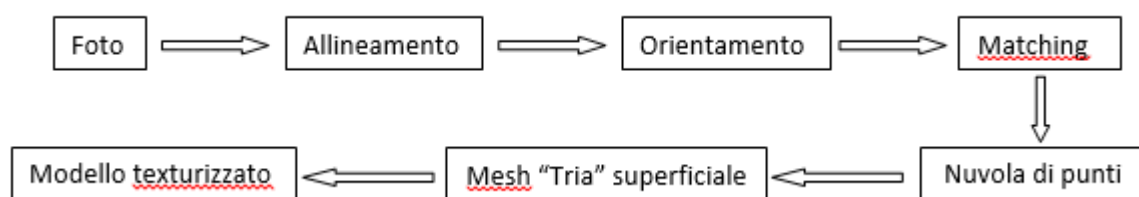


Figura 3: Flusso di lavoro di Photoscan

Le fasi che definiscono il processo sono di seguito descritte:

- Allineamento delle immagini all'interno di ciascun chunk e creazione della "Sparse Cloud": per mezzo dell'algoritmo SIFT e di algoritmi di multi stereo matching il software orienta e posiziona i punti di presa fotografici ed estrae una nuvola sparsa di punti (Sparse Cloud);
- Creazione della "Dense Cloud": processo mediante il quale vengono analizzati dettagliatamente i punti di tutte le immagini caricate in ciascun chunk estraendo la nuvola densa di punti;

- Creazione del modello poligonale: processo di creazione di un modello poligonale ottenuto dall'unione della nuvola di punti e costituito da una densità di mesh con elementi tria (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.);
- Creazione del modello texturizzato: processo di creazione di una texture sulla superficie costituita da mesh. I metodi di creazione della texture sono 2: il metodo mosaic, che proietta su una porzione di oggetto la foto con la risoluzione migliore; il metodo average, che prende il valore medio dai singoli pixel di tutte le foto.

L'unità fondamentale del programma, contenitore di tutte le immagini caricate che si vogliono elaborare, è il chunk, esso rappresenta un "raggruppamento" di foto sulla base delle quali si effettua la ricostruzione fotogrammetrica. Per restituzioni caratterizzate da un elevato numero di immagini, può essere necessario creare diversi chunk, che vengono successivamente uniti ed allineati andando a formare un unico modello 3D.

Suddividendo le fotografie, la fase di matching delle features avviene su un numero minore di immagini, facendo diminuire sensibilmente il tempo necessario per stimare la posizione delle prese fotografiche.

3. STRUMENTAZIONE

Per le riprese fotografiche è stata utilizzata una fotocamera digitale reflex CANON EOS 550D, con sensore CMOS APS-C da 18 megapixel.

Per illuminare in modo uniforme ed omogeneo le due opere oggetto dello studio sono state impiegate lampade a luce bianca che hanno consentito di realizzare immagini digitali 2D nitide e prive di distorsioni.

4. RICOSTRUZIONE FOTOGRAMMETRICA TRONO CORSINI

Il "trono Corsini", esposto nella galleria, risale al I secolo A.C., fu rinvenuto tra il 1732 e il 1734, durante gli scavi effettuati per realizzare le fondamenta della cappella della famiglia Corsini nella basilica di San Giovanni in Laterano. L'opera si ispira alla tipologia e alle decorazioni etrusche, ma essendo realizzato in marmo con tecnica romana è riconducibile al I sec. d.C., rappresenta così un esemplare unico, realizzato probabilmente per glorificare e nobilitare le origini della famiglia dei Plautii, legata per vie matrimoniali a celebri discendenti etruschi come la nobildonna Urgulania.

Restano da chiarire, però, la sua funzione e le complesse soluzioni iconografiche della decorazione del basamento, che tutt'ora alimentano il dibattito scientifico.

Proprio per facilitarne la lettura dell'iconografia narrativa dei bassorilievi, arricchendo conseguentemente la documentazione del museo, sono state eseguite delle scansioni fotogrammetriche e a luce strutturata.

Il presente deliverable riporta i risultati ottenuti con la restituzione 3D fotogrammetrica, mentre la ricostruzione 3D a luce strutturata, la cui elaborazione è attualmente in corso, saranno incluse in un prossimo documento.

Obiettivo, inoltre, dello studio sarà quello di mostrare la possibile integrazione delle due tecnologie, fotogrammetria e luce strutturata, sovrapponendo i bassorilievi ottenuti ad alta risoluzione sul modello numerico fotogrammetrico.

In particolare, nel Dicembre 2017 durante un primo sopralluogo sono state realizzate 176 immagini digitali 2D che hanno permesso di realizzare una ricostruzione 3D preliminare volta a valutare le problematiche connesse al caso studio ed in particolare alla luminosità della sala.

Successivamente, nei mesi di gennaio e marzo 2018 sono state eseguite diverse scansioni fotografiche mediante l'utilizzo di lampade a luce fredda.

Durante l'ultima scansione sono state prese di 516 immagini digitali, con risoluzione 5184 x 3456 pixel, pari a 5MB ciascuna.

Le singole immagini sono state analizzate singolarmente e ne sono state selezionate 445. Quest'ultime sono state elaborate da remoto, via web, tramite piattaforma virtuale ITACHA, su ENEAGRID mediante il codice Agisoft PHOTOSCAN Pro (Figura 4).

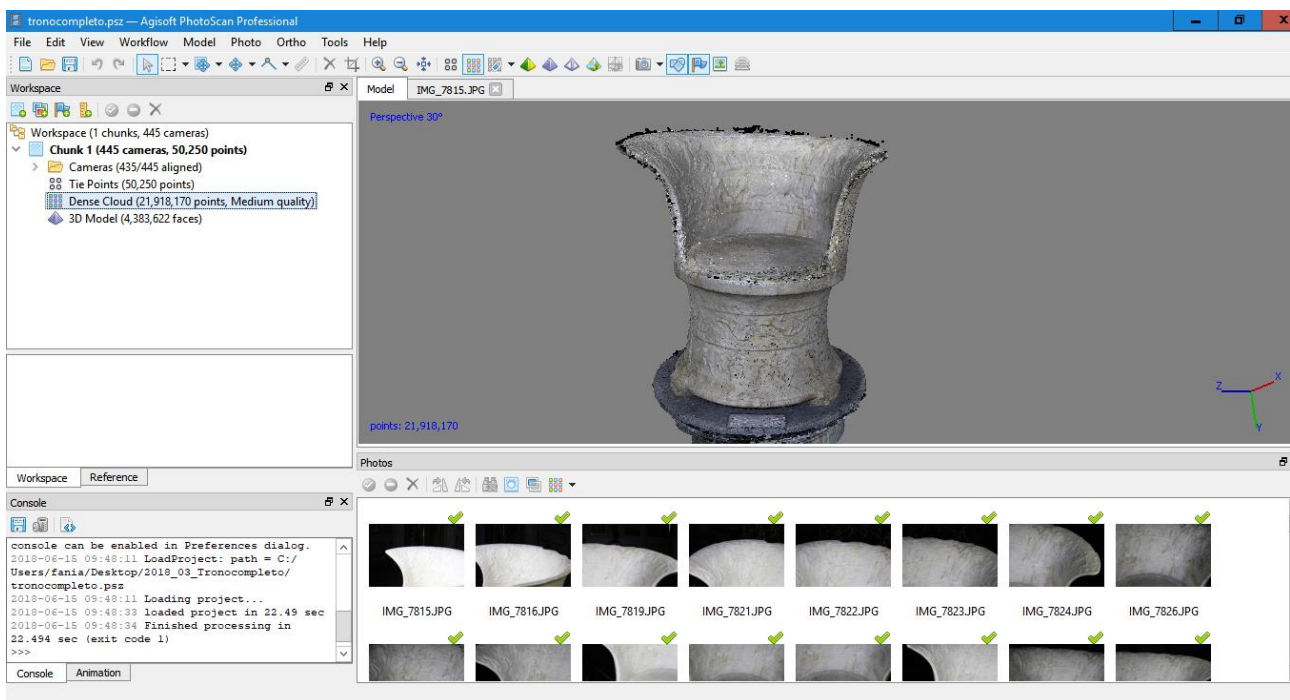


Figura 4: Elaborazione delle immagini digitali tramite Agisoft Photoscan Pro

Delle 445 foto selezionate sono state allineate e processate 435 immagini, e con una procedura semi automatica, è stata realizzata la nuvola di punti, la mesh e la texture per ottenere la ricostruzione 3D dell'opera d'arte (Figura 5).

Grazie all'utilizzo delle risorse hardware e software dell'infrastruttura di calcolo ICT dell'ENEA, è stato possibile ottenere la ricostruzione 3D del trono Corsini in circa 200 minuti (Figura 6).

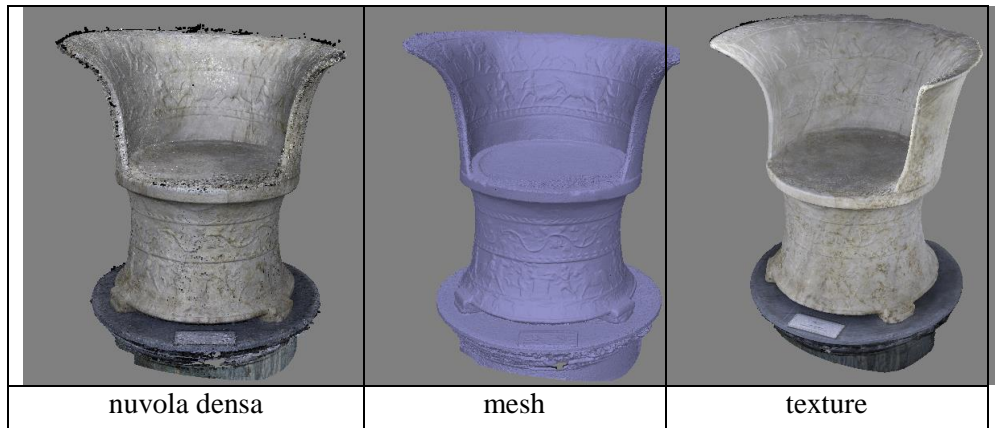


Figura 5: Fasi di elaborazione delle immagini 2D per la restituzione fotogrammetrica 3D

Property	Value
General	
Cameras	445
Aligned cameras	435
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	50,250 of 77,700
RMS reprojection error	0.191842 (2.78594 pix)
Max reprojection error	0.589433 (44.0576 pix)
Mean key point size	13.6433 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	6.84535
Alignment parameters	
Accuracy	Low
Generic preselection	No
Reference preselection	No
Key point limit	40,000
Tie point limit	1,000
Filter points by mask	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	31 minutes 36 seconds
Alignment time	3 minutes 46 seconds
Dense Point Cloud	
Points	21,918,170
Point colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	45 minutes 56 seconds
Dense cloud generation time	46 minutes 24 seconds
Model	
Faces	4,383,622
Vertices	2,194,383
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	4,096 x 4,096 x 10, 4 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Surface type	Arbitrary
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Face count	4,383,622
Processing time	23 minutes 29 seconds
Texturing parameters	
Blending mode	Average
Texture size	4,096 x 4,096
Enable color correction	Yes
Enable hole filling	Yes
UV mapping time	1 minutes 24 seconds
Blending time	51 minutes 43 seconds

Figura 6: Step e tempi di esecuzione della restituzione 3D fotogrammetrica tramite Agisoft Photoscan Pro

Successivamente, ai fini di una ricostruzione 3D metricamente corretta in termini di forme e dimensioni, il modello è stato editato, ripulito (Figura 7), e scalato sulla base delle misure reali, rilevate durante la scansione fotografica (Figura 8 - Figura 9).



Figura 7: Restituzione 3D fotogrammetrica dopo le operazioni di “editing e cleaning”



Figura 8: Misura delle dimensioni reali



Figura 9: Ricostruzione 3D metricamente corretta

5. RICOSTRUZIONE FOTOGRAMMETRICA DEL BUSTO IN TERRACOTTA DI GIAN LORENZO BERNINI

In accordo con il curatore della galleria Corsini è stato individuato d'interesse ai fini progettuali lo studio di un busto in terracotta che ritrae Alessandro VII Chigi realizzato da Gian Lorenzo Bernini.

Poiché l'opera, posta al lato di un tavolo, a ridosso di una parete, è visibile solo frontalmente, il primo obiettivo è stato quello di realizzare un modello 3D completo delle parti non fruibili in modo di arricchire la documentazione museale.

A tal fine è stato necessario richiedere la movimentazione dell'opera con l'ausilio di una ditta addetta e messa a disposizione dalla galleria, ed eseguire tre set di fotografie sulla terracotta posta in posizione frontale, retrostante e sottostante.

Per il rilievo fotografico sono state realizzate 3 differenti scansioni fotografiche. Le prime due acquisizioni, eseguite rispettivamente a Dicembre 2017 e a Gennaio 2018, sono state utili al fine di realizzare delle ricostruzioni 3D preliminari volte a determinare le diverse problematiche connesse all'acquisizione di immagini in ambienti chiusi e poco illuminati.

Successivamente, nel mese di aprile 2018, per garantire una omogenea illuminazione dell'oggetto ripreso sono state utilizzate lampade a luce fredda per effettuare la scansione fotografica.

Durante le differenti scansioni sono state acquisite rispettivamente:

450 immagini – Prima acquisizione - Dicembre 2017

175 immagini – Seconda acquisizione - Gennaio 2018

239 immagini – Terza acquisizione - Marzo 2018.

Per permettere la ricostruzione del busto completo l'acquisizione fotografica è stata eseguita ponendo il busto in due posizioni differenti: la prima, in posizione verticale, ha permesso la ricostruzione della parte frontale, la seconda, in posizione orizzontale, ha permesso invece di ricostruire la parte inferiore dello stesso.

In posizione verticale sono state acquisite ed elaborate 162 immagini, in posizione orizzontale, per un totale di 223 immagini. I risultati di post processazione, realizzati in due aree di lavoro distinte denominate rispettivamente in chunk1 e chunk2 con Photoscan Pro, sono riportate nelle figure di seguito in termini di nuvola di punti, mesh e texture. La ricostruzione 3D è stata realizzata mediante l'unione manuale dei due singoli modelli restituiti in posizione verticale e orizzontale dai due "chunk" (Figura 10 - Figura 11) e scalati metricamente sulla base delle geometrie reali, misurate durante le riprese fotografiche.

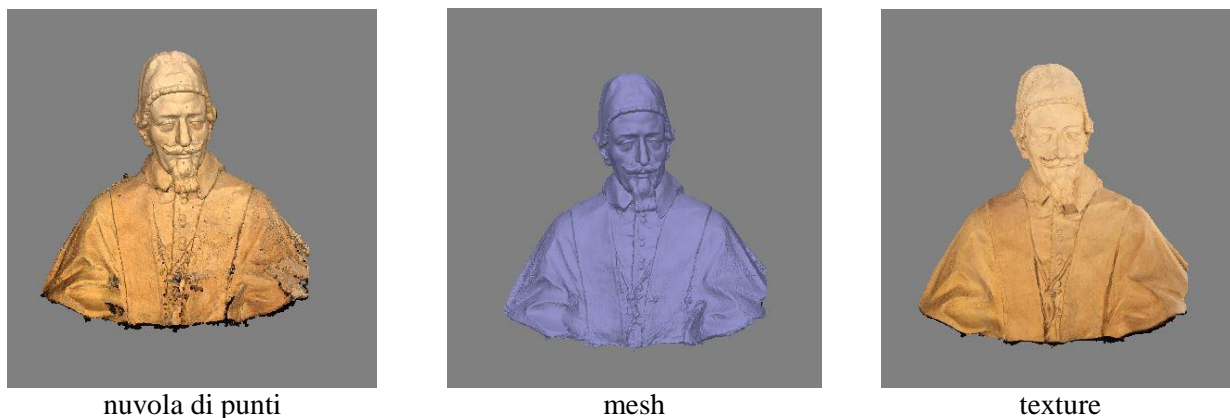


Figura 10: Elaborazione delle immagini 2D per la restituzione fotogrammetrica 3D posizione verticale (chunk1)

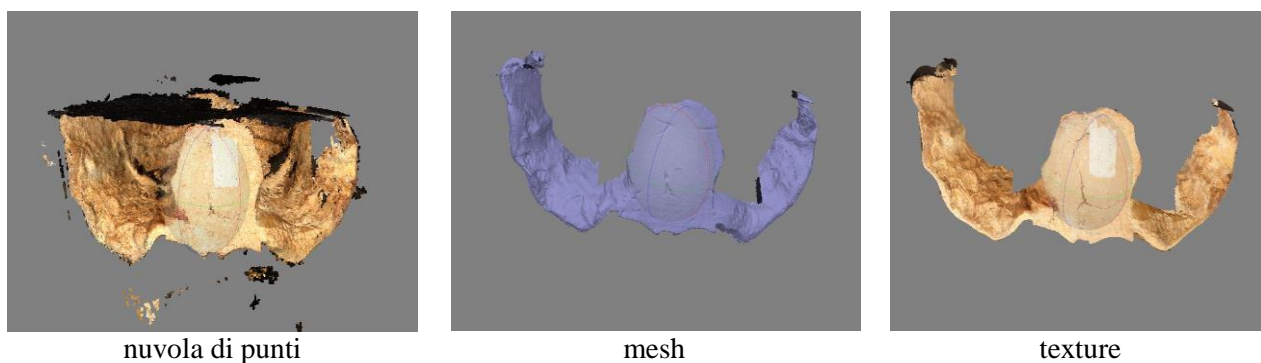


Figura 11: Elaborazione delle immagini 2D per la restituzione fotogrammetrica 3D posizione orizzontale (chunk2)

I dettagli delle ricostruzioni 3D effettuate in termini di tempi di elaborazione, numero di punti della “sparse cloud” e della “dense cloud” e numero di mesh del modello poligonale, sono riassunti nelle tabelle seguenti, la prima relativa al Chunk 1, la seconda riferita al Chunk 2 e l’ultima relativa al modello 3D completo, denominato “merged chunk” (Figura 12 - Figura 13).

Property	Value
General	
Cameras	161
Aligned cameras	161
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	73,048 of 87,358
RMS reprojection error	0.108823 (1.68208 pix)
Max reprojection error	0.330708 (48.3071 pix)
Mean key point size	14.273 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.38538
Alignment parameters	
Accuracy	Low
Generic preselection	No
Reference preselection	No
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Filter points by mask	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	13 minutes 28 seconds
Alignment time	3 minutes 30 seconds
Dense Point Cloud	
Points	10,489,107
Point colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	1 hours 27 minutes
Dense cloud generation time	19 minutes 57 seconds
Model	
Faces	699,270
Vertices	350,811
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	4,096 x 4,096 x 6, 4 bands...
Reconstruction parameters	
Surface type	Arbitrary
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Face count	699,270
Processing time	27 minutes 58 seconds
Texturing parameters	
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
Enable color correction	No
Enable hole filling	Yes
UV mapping time	1 minutes 49 seconds
Blending time	6 minutes 59 seconds

Figura 12: Dettagli elaborazioni Chunk 1 (sx) e Chunk 2 (dx)

Property	Value
General	
Cameras	223
Aligned cameras	223
Markers	10
Scale bars	5
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	105,801 of 126,178
RMS reprojection error	0.106792 (1.65524 pix)
Max reprojection error	0.330708 (48.3071 pix)
Mean key point size	14.1763 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.27697
Dense Point Cloud	
Points	16,925,345
Point colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Model	
Faces	923,885
Vertices	464,580
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	4,096 x 4,096 x 10, 4 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Surface type	Arbitrary
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Texturing parameters	
Blending mode	Average
Texture size	4,096 x 4,096
Enable color correction	Yes
Enable hole filling	Yes
UV mapping time	35 seconds
Blending time	14 minutes 56 seconds

Figura 13: Dettagli elaborazioni "Merged Chunk"

5.1. Rilievo delle impronte digitali dalla ricostruzione 3D fotogrammetrica

Sul richiesta dei curatori del museo è stata manifestata l'esigenza di verificare se era possibile utilizzando la tecnica fotogrammetrica visualizzare la presenza delle impronte digitali lasciate da Gian Lorenzo Bernini durante la realizzazione dell'opera.

Come evidenziato dall'ortofoto del lato destro del busto (Figura 14) la restituzione 3D ha rivelato la presenza di impronte digitali sulla "papalina" (Figura 15).



Figura 14: Ortofoto lato destro busto



Figura 15: Rilievo impronte digitali

5.2. Definizione del modello metricamente corretto

La fase di dimensionamento reale del modello numerico è visualizzabile in

Figura , le misure reali in Figura 17, la restituzione geometrica metricamente corretta in Figura 18.

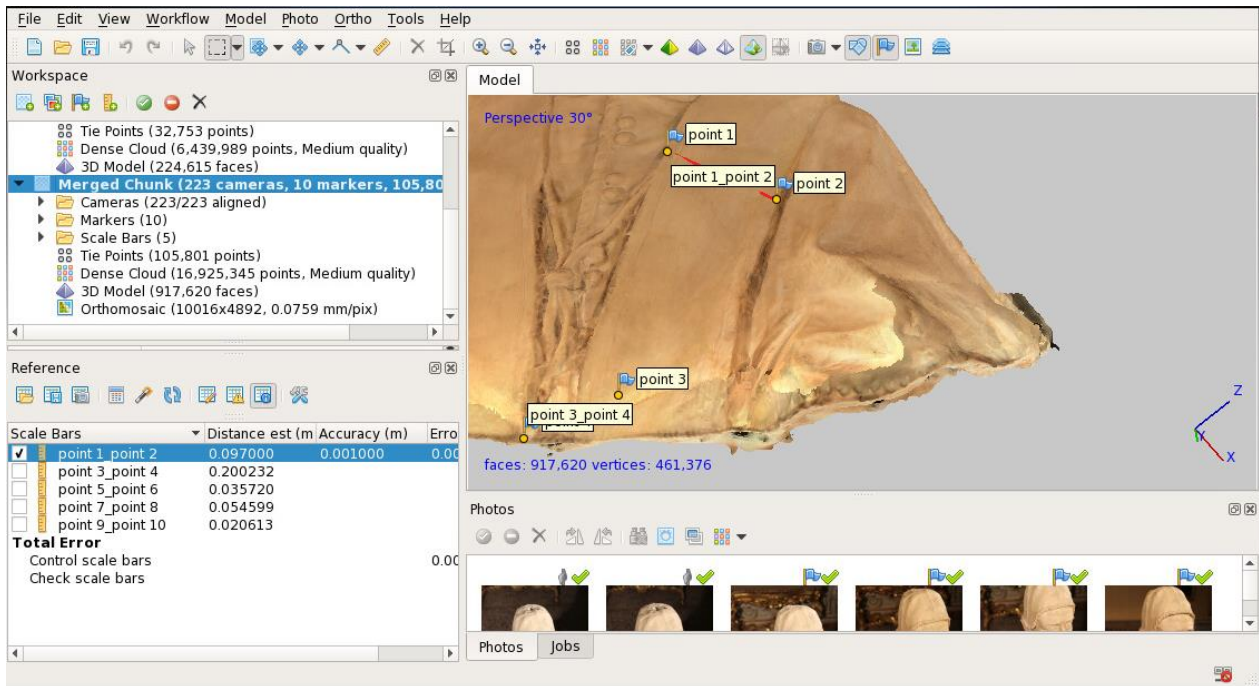


Figura 16: Modello scalato in base alle dimensioni reali



Figura 17: Misura delle dimensioni reali

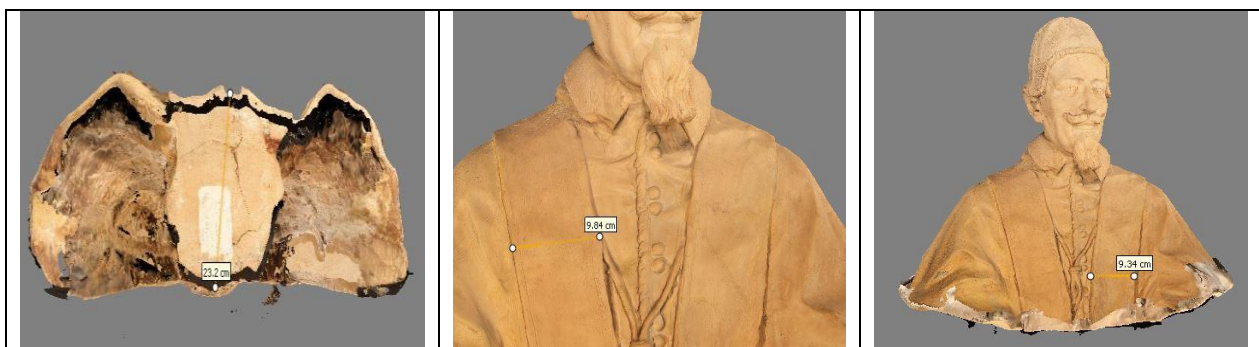


Figura 18: Ricostruzione 3D metricamente corretta

Sulla base del modello 3D metricamente corretto è stato possibile determinare, in maniera non invasiva, la lunghezza di alcune lesioni che investono la scultura in terracotta. Questa informazione è molto utile ai fini diagnostici in quanto può rappresentare un punto di partenza per il monitoraggio nel tempo dello stato di conservazione dell'opera. Sarà infatti possibile, in futuro, realizzare una nuova scansione fotogrammetrica per monitorare, mediante un confronto tra i due modelli, l'eventuale evoluzione delle lesioni individuate. La Figura 19 e la Figura 20 mostrano le ricostruzioni delle lesioni individuate in corrispondenza della spalla destra e della parte inferiore del busto, mentre in Tabella 1 e in Tabella 2 si riporta l'elenco delle lesioni individuate e le relative dimensioni.



Figura 19: Ricostruzione fessure spalla destra

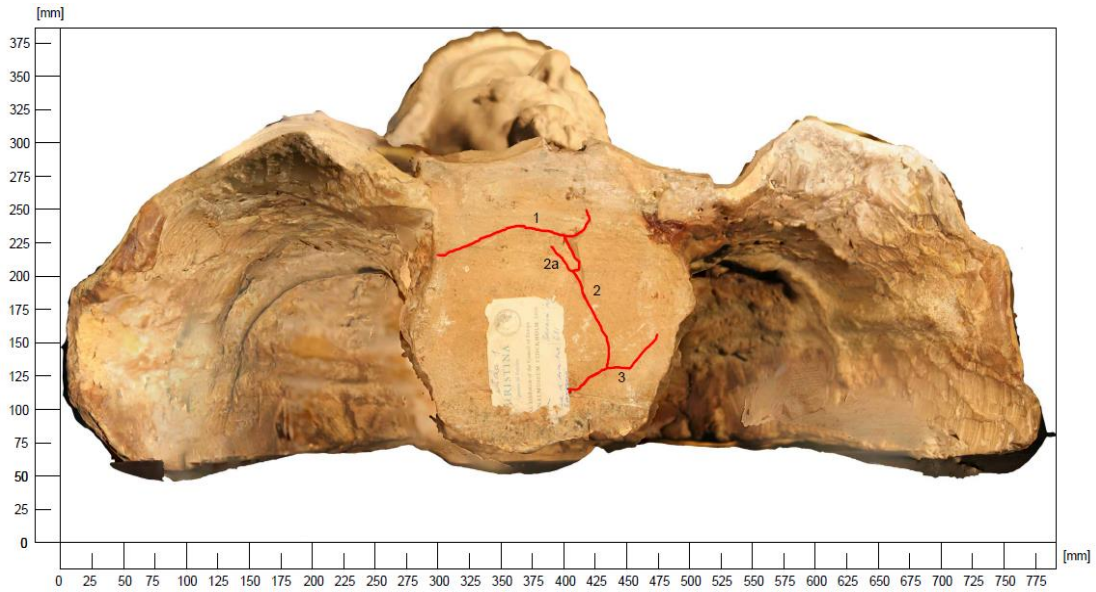


Figura 20: Ricostruzione fessure base

FESSURE SPALLA DESTRA	
Codice fessura	Lunghezza [cm]
1	18,0
2	24,5
3a	7,50
3b	42,5
4	9,40
5	12,0
6a	15,0
6b	7,10
7	25,0
8a	6,60
8b	8,70
8c	11,8
9	21,3
10	10,0
11	16,0
12a	5,30
12b	6,60
13	10,0
14a	16,3
14b	23,0

Tabella 1: Elenco delle fessure sulla spalla destra del busto

FESSURE BASE	
Codice	Lunghezza [mm]
1	142,4
2	115,1
2a	27,2
3	90,0

Tabella 2: Elenco delle fessure alla base del busto

Si riportano infine le ortofoto, in diversi orientamenti, del modello tridimensionale del busto (Figura 21).



Figura 21: Ortofoto del modello 3D del busto

6. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti, descritti nel presente rapporto tecnico, hanno mostrato come l'utilizzo della ricostruzione fotogrammetrica 3D, a partire da immagini digitali bidimensionali, mediante l'impiego della tecnica SfM, possa essere utilizzata anche per scopi diversi da quelli più noti per la fruizione di un bene in modalità "Realtà virtuale".

Ai fini progettuali ha dimostrato di poter essere uno strumento speditivo, di facile esecuzione, a costi contenuti per la digitalizzazione 3D delle opere d'arte volta ad accrescerne da un lato la documentazione

museale, la lettura, l'interpretazione e le conoscenze degli esperti, e dall'altro a monitorarne nel tempo lo stato conservativo; rimane ovviamente sottinteso che ai fini del monitoraggio conservativo sia necessario considerarla ad integrazione con altre indagini diagnostiche di tipo non distruttivo.

Grazie alla possibilità di accedere alle risorse di calcolo disponibili sull'infrastruttura ENEAGRID su CRESCO che consente di disporre dei codici finalizzati alla "grafica computerizzata", di risorse di calcolo adeguate, e di aree per condividere foto, risultati e documenti on-cloud e archiviare una grandi moli di dati e immagini su afs/gpfs è quindi possibile superare il principale ostacolo dell'utilizzo di tale tecnica, dovuto alle notevoli richieste hardware e software per l'elaborazione delle immagini e lo storage dei dati.

7. FUTURI SVILUPPI

Nei prossimi sei mesi verranno elaborate le restituzioni 3D ad alta risoluzione dei bassorilievi del trono Corsini mediante le immagini ottenute dalle scansioni a luce strutturata.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Mongelli, I. Bellagamba, G. Bracco, S. Migliori, A. Perozziello, S. Pierattini, A. Quintiliani, B. Mazzei, "3D photogrammetric reconstruction by "Structure from Motion" as a monitoring technique for safety, conservation and improvement of the fruition of cultural heritage" in Proc. of International Conference of Metrology for Archaeology and cultural heritage (MetroArcheo2017), Lecce 23-25 October, Italy, ISBN: 978-92-990084-0-9.
- [2] Mongelli, M., De Canio, G., Roselli, I., Malena, M., Nacuzi, A., de Felice, G., 2017, 3D Photogrammetric reconstruction by drone scanning for FE analysis and crack pattern mapping of the "Bridge of the Towers", Spoleto. In Proc. of 5th International Conference on Mechanics Of Masonry Structures Strengthened With Composite Materials (MURICO5), Bologna 28-30 June, Italy, published in Key Engineering Materials, Vol. 747 ISBN: 978-3-0357-1164-6, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.747.423.
- [3] Roselli, I., Tati, A., Fioriti, V., Bellagamba, I., Mongelli, M., Barbera, M., Magnani Cianetti, M., De Canio, G., 2017, Non-destructive tests for structural diagnosis of the so-called Temple of Minerva Medica, Rome, in Proc. of International Conference of Metrology for Archaeology and cultural heritage (MetroArcheo), 2017, Lecce 23-25 October, Italy, ISBN: 978-92-990084-0-9
- [4] F. Iannone, I. Bellagamba, G. Bracco, B. Calosso, G. Giovanetti, S. Migliori, M. Mongelli, A. Perozziello, S. Pierattini, A. Quintiliani, F. Ambrosino, D. Di Mattia, A. Funel, G. Guarnieri, G. Ponti, F. Simoni, M. Steffé, 2017, "Staging Storage Sharing System for Data Handling in a Multisite Scientific Organization". Proceedings, April 1, in Proc. Of Communities: CS3 2017 SurfSARA <http://doi.org/10.5281/zenodo.439637>
- [5] F. Ambrosino, G. Bracco, A. Colavincenzo, A. Funel, G. Guarnieri, S. Migliori, G. Ponti. Storage architecture and backup strategy of ENEAGRID/CRESCO systems. In High Performance Computing on

CRESCO infrastructure: research activities and results 2014, ENEA, pages 181-186, December 2015; ISBN: 978-88-8286-325-8.

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
settembre 2018