

Articolo

## La documentazione del patrimonio culturale perduto mediante fotogrammetria e intelligenza artificiale

*The documentation of lost cultural heritage using photogrammetry and artificial intelligence*

Francesca Condorelli

Assistant Professor, PhD, Free University of Bozen (Italy)  
francesca.condorelli@unibz.it  
<https://orcid.org/0000-0003-3786-4868> 

DOI: <https://doi.org/10.56205/mim.2-1.5>

### Abstract

Recibido  
29/10/22  
Aprobado  
19/12/22  
Publicado  
31/12/22

*This research aims to give an analysis and assessment through the extraction of metric information from historical images and to experiment with its potentialities in the heritage field with the aim of valorising historical iconographical documentation. In particular the paper deals with photogrammetry applied to historical images. A classification and a state of the art of historical archives material considering their possible use in metric documentation and thus suitable for photogrammetry is performed. A photogrammetric workflow is proposed to process historical images and the maximum metric quality level reachable by the photogrammetric processing is investigated. Two case studies in Paris were chosen: the UNESCO Heritage Tour Saint Jacques and the pavilions of Les Halles of the architect Victor Baltard. The two studies represent different situations of heritage because the tower was transformed over time but still exists and the pavilions were destroyed in 1971. Thus, it is possible to compare the different results obtained from the implementation of the workflow to the two case studies.*

Mimesis.jsad  
ISSN 2805-6337



EDITORIAL  
Environment & Technology  
Foundation



*Riassunto*

Questa ricerca si propone di fornire un'analisi e una valutazione attraverso l'estrazione di informazioni metriche da immagini storiche e di sperimentare le sue potenzialità nel campo dei beni culturali con l'obiettivo di valorizzare la documentazione iconografica storica. In particolare, il presente lavoro si occupa di fotogrammetria applicata alle immagini storiche. Viene effettuata una classificazione e uno stato dell'arte del materiale degli archivi storici, considerando il loro possibile utilizzo nella documentazione metrica e quindi adatto alla fotogrammetria. Viene poi proposto un flusso di lavoro fotogrammetrico per l'elaborazione di immagini storiche e viene analizzato il livello massimo di qualità metrica raggiungibile con l'elaborazione fotogrammetrica. Sono stati scelti due casi di studio a Parigi: la Tour Saint Jacques, patrimonio UNESCO, e i padiglioni di Les Halles dell'architetto Victor Baltard. Questi casi studio rappresentano due situazioni diverse del patrimonio, perché la torre è stata trasformata nel tempo ma esiste ancora, mentre i padiglioni sono stati distrutti nel 1971. È quindi possibile confrontare i diversi risultati ottenuti dall'applicazione del flusso di lavoro ai due casi di studio.

<sup>1</sup>Parte del lavoro descritto in questo Capitolo è stato anche precedentemente pubblicato nella tesi di dottorato di Condorelli, 2021.

**Parole chiave:** Fotogrammetria; Intelligenza Artificiale; Patrimonio Culturale, Immagini Storiche; Rilievo Metrico.

*Introduzione*

La documentazione<sup>1</sup> metrica dei Beni Culturali svolge un ruolo essenziale nel preservare la memoria e la conoscenza del passato e costituisce l'insieme di informazioni utili a pianificare qualsiasi tipo di intervento sui beni.

La documentazione è parte comune di tutte le azioni di conservazione, restauro e gestione perché fornisce tutte le informazioni necessarie per comprendere l'oggetto in questione e porta all'adozione delle migliori pratiche per le azioni da pianificare. Le informazioni documentali consentono la ricostruzione virtuale del bene indagato, che costituisce il punto di partenza per la progettazione degli interventi e per la conoscenza completa della situazione attuale e, eventualmente, delle condizioni dello stesso oggetto in epoche storiche diverse.

tutti i dati della documentazione rappresentano una preziosa fonte di conoscenza che può essere trasmessa alle generazioni future e utilizzata per azioni future (Stylianidis, 2019).

La conoscenza delle forme e delle dimensioni è uno dei dati di base della documentazione metrica, utile anche per individuare tutte le altre informazioni non metriche che aiutano la comprensione dei fenomeni fisici (ad esempio le malattie strutturali, ecc.). Le moderne tecniche di geomatica consentono di ottenere tutte queste informazioni metriche con una precisione definita e di estrarre i migliori risultati possibili tenendo conto della qualità dei dati primari utilizzati. Le tecniche integrate di geomatica permettono di definire informazioni metriche, architettoniche e strutturali; in particolare, molti lavori presentano la combinazione di tecniche TLS e fotogrammetriche per la ricostruzione tridimensionale e la valutazione dei cambiamenti e dell'evoluzione delle strutture indagate (Costantino, 2015).

Il rilievo metrico parte dalla raccolta di un numero significativo di punti con coordinate note in un sistema di riferimento stabilito e dalla successiva creazione di un modello 3D dell'oggetto rilevato.

La modellazione 3D richiede una profonda conoscenza del bene rilevato: per quanto riguarda i beni architettonici (sia singoli edifici che centri storici) la forte collaborazione con specialisti in Storia dell'Architettura è essenziale per interpretare e rappresentare correttamente gli elementi originali e gli interventi materiali avvenuti durante la vita del bene indagato.

Tra le varie tecniche geomatiche, la fotogrammetria riveste un ruolo fondamentale, in quanto consente di recuperare i dati metrici necessari alla comprensione geometrica dell'oggetto da documentare mediante immagini.

Grazie ai recenti sviluppi nell'acquisizione e nell'elaborazione dei dati fotogrammetrici mediante algoritmi SFM (Structure from Motion) e Multi View Stereo (MVS), è stato raggiunto un elevato livello di automazione e facilità d'uso di strumenti e software, che ha incoraggiato un numero sempre maggiore di ricercatori ed esperti nel campo dei Beni Culturali a utilizzare questa tecnica nel loro lavoro. Questi vantaggi consentono di estendere l'applicazione dei metodi fotogrammetrici ai diversi operatori che lavorano nel campo dei beni culturali, fornendo un adeguato strumento di analisi e studio finalizzato alla pianificazione degli interventi sul patrimonio storico.

Tuttavia, automatismo non significa autonomia e quindi, se è vero che da una qualsiasi serie di foto acquisite in modo vario e casuale è possibile ottenere una nuvola di punti 3D, non è detto che la qualità dell'output finale sia adeguata agli scopi prefissati.

I requisiti di precisione sono necessari per estrarre informazioni metriche e ottenere prodotti metrici definiti di alta qualità certificata, essenziali per la documentazione.

I ricercatori hanno mostrato maggiore interesse in questa direzione e numerosi studi hanno confrontato diversi strumenti di acquisizione e software di elaborazione in diverse situazioni e casi di studio. Questo continuo sviluppo offre anche l'opportunità di aggiornare approcci ben definiti per estrarre informazioni metriche dalle immagini.


#### *Questioni aperte e scopo della ricerca*

Se questa esigenza di valutazione della precisione e dell'accuratezza è importante per le nuove indagini, lo stesso approccio è necessario per i dati estratti dalle informazioni storiche. Infatti, una delle sfide più affascinanti è l'utilizzo non di nuovi dati ma di risorse conservate in archivi storici.

Elaborando immagini storiche, a parte alcuni casi lodevoli ma molto rari, le condizioni ottimali ottenibili con immagini acquisite ex-novo sono raramente presenti e quindi è tanto più necessario poter verificare il massimo risultato ottenibile in termini di accuratezza in modo ancora più rigoroso che nel caso di immagini acquisite appositamente per un rilievo fotogrammetrico.

Tuttavia, gli archivi sono potenti piattaforme per salvare tesori inestimabili dall'enorme potenziale informativo e svolgono un ruolo essenziale nella conservazione dei Beni Culturali. Oltre ai documenti scritti, vecchie fotografie e video, che si sono conservati nel tempo, sono in molti casi testimoni unici delle trasformazioni architettoniche e urbane.

Monumenti, edifici storici e paesaggi, che sono stati trasformati o distrutti nel corso del tempo, appaiono in esse e diventano l'unico modo per documentare i cambiamenti degli oggetti attualmente esistenti e delle parti non più visibili e per testimoniare lo stato degli edifici, delle parti di una città e dell'ambiente urbano in un momento specifico. Nel caso di beni non più esistenti, le fotografie e i filmati



storici sono le uniche fonti per recuperarne forme, dimensioni e ubicazione. Si tratta di un'opportunità che potrebbe supportare gli studi storici e aiutare in qualche modo le decisioni di restauro e conservazione.

In tutte le carte internazionali per la conservazione del patrimonio culturale, la fotografia è citata come uno dei modi migliori per documentare i beni culturali. Queste raccomandazioni sono sempre state interpretate come una necessità di documentazione fotografica, senza tenere conto del potenziale metrico delle immagini fotografiche e del beneficio che queste proprietà potrebbero fornire per le efficaci misure di documentazione necessarie prima di qualsiasi tipo di restauro. Albrecht Meydenbauer, un giovane architetto tedesco, divenne un pioniere nella valorizzazione dei Beni Culturali attraverso la fotogrammetria (Albertz, 2001).

Nel 1858 ebbe l'idea di utilizzare le immagini fotografiche per la documentazione metrica degli edifici. Era consapevole dell'imminente pericolo per i beni culturali ed era convinto che gli oggetti più importanti del patrimonio culturale dovessero essere registrati in un archivio dei beni culturali, in modo da poterli ricostruire anche in caso di distruzione. Le immagini fotogrammetriche erano il mezzo più efficace per raggiungere questo obiettivo e lui aveva combattuto contro molti ostacoli e critiche per affermare questo metodo di documentazione scientifica. Queste immagini sono state ampiamente utilizzate durante la ricostruzione della città di Berlino alla fine del secolo scorso.

#### *Stato dell'arte*

Negli ultimi anni, grazie agli sforzi di digitalizzazione di molti archivi, è aumentato l'interesse per le fotografie e i video storici come fonti preziose per lo studio dei Beni Culturali e la ricostruzione dello sviluppo storico. Il problema principale delle fonti storiche riguarda il tipo di supporto (cartaceo o digitale) e l'eterogeneità del materiale; in particolare per l'archivio cartaceo, sarà necessario considerare l'eventuale presenza di deformazioni delle dimensioni originali e di danni dovuti a una conservazione non corretta.

I recenti sviluppi nel campo dell'elaborazione delle immagini e della Computer Vision hanno portato a un rinnovato interesse per l'elaborazione di dati privi di proprietà essenziali per l'informazione metrica 3D, dando la possibilità, attraverso l'uso di opportuni algoritmi, di estrarre il contenuto metrico e di visualizzare il materiale e il contenuto di conservazione.

Questa ricerca si propone di esaminare la possibilità di estrarre informazioni metriche di edifici storici da fotografie e filmati storici per la loro ricostruzione virtuale in 3D. Per raggiungere questo obiettivo, vengono analizzate due questioni: la disponibilità di materiale d'archivio storico, spesso resa difficile da un'enorme quantità di dati non organizzati sul patrimonio storico, e le limitazioni nell'elaborazione di fotografie e filmati storici per la presenza di caratteristiche che rendono difficile l'implementazione della tecnica fotogrammetrica.

Grazie allo sforzo di istituzioni culturali come musei, gallerie e organizzazioni di gestione del patrimonio, che hanno investito molte risorse per digitalizzare e conservare le loro collezioni utilizzando tecnologie di acquisizione all'avanguardia, questo processo è stato spesso considerato un successo. Molteplici iniziative come repliche di alta qualità di oggetti culturali, visite virtuali ai musei, valorizzazione digitale, ecc. hanno sviluppato una nuova consapevolezza culturale e sistemica dell'importanza dei dati sul patrimonio culturale.

Con la recente diffusione dell'Intelligenza Artificiale (AI), sono state sviluppate

nuove tecniche come il Machine Learning (ML) e il Deep Learning (DL) che forniscono strumenti adeguati per i processi decisionali. In particolare, è possibile attraverso tali algoritmi classificare automaticamente una nuvola di punti evidenziando, ad esempio, diverse caratteristiche strutturali. In passato, l'arricchimento dei dati culturali era possibile solo utilizzando annotazioni manuali che non sfruttavano appieno le informazioni nascoste.

Oggi sono sorte nuove sfide per i ricercatori, per rendere più efficiente la conservazione digitale dei beni con tecniche di intelligenza artificiale per la classificazione e la generazione dei contenuti.

Uno degli aspetti di maggior successo della diffusione dell'IA è la sua applicazione in diverse discipline. L'Intelligenza Artificiale, infatti, coinvolge, ad esempio, l'informatica, l'ingegneria, l'arte, la medicina, la linguistica, ecc. La fusione dei campi disciplinari è anche il punto di partenza per un cambiamento culturale che non distingue più tra discipline umanistiche, scientifiche e artistiche. (Andrianaivo et al., 2019). Dato lo scarso coinvolgimento dei ricercatori in ambito umanistico nella progettazione di infrastrutture su materiali del patrimonio storico, l'applicazione di metodi di IA nei progetti urbani e architettonici può migliorare la partecipazione degli utenti finali di tali strumenti.

Infatti, per quanto riguarda il processo di documentazione e in particolare la raccolta di dati e informazioni sul patrimonio, può essere realmente migliorato se l'Intelligenza Artificiale viene combinata con tecniche ampiamente utilizzate nel campo del patrimonio, come la modellazione da TLS o i rilievi fotogrammetrici. Per questo motivo, la ricerca recente in questo campo ha visto un rapido sviluppo di tecnologie a supporto della gestione e dell'analisi dei dati del patrimonio storico. Grazie all'intelligenza artificiale, compiti come l'elaborazione di queste grandi quantità di dati e la riduzione dello sforzo umano possono essere automatizzati e quindi resi più efficienti.

La creazione di nuovi strumenti per l'utente finale di questi dati è un tema di ricerca interessante, soprattutto nel campo dei beni culturali. Infatti, il volume, le dimensioni e la varietà dei dati storici comportano alcuni fattori critici.

Il più importante di questi è la manodopera necessaria per organizzare e cercare i documenti. Per risolvere questo problema, l'applicazione dell'Intelligenza Artificiale offre la possibilità di migliorare gli archivi storici e il recupero delle informazioni sui Beni Culturali.

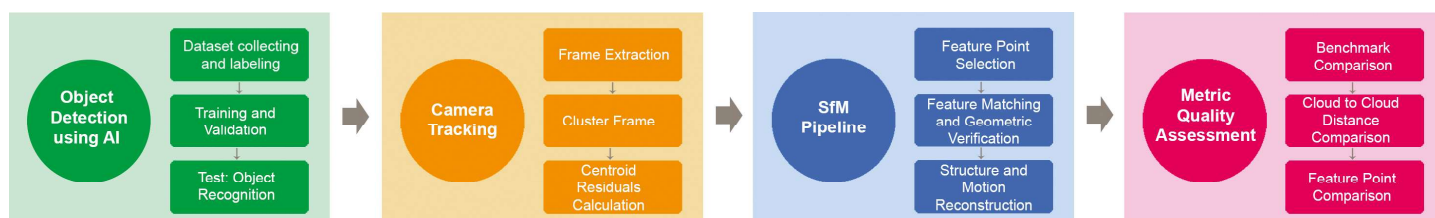
### Metodologia e risultati

La prima fase del flusso di lavoro mira a rendere automatica la ricerca di uno specifico patrimonio architettonico identificando e tracciando le caratteristiche dal video. Questa operazione è stata eseguita utilizzando una Rete neurale per il rilevamento degli oggetti addestrata per riconoscere automaticamente il monumento nel filmato.

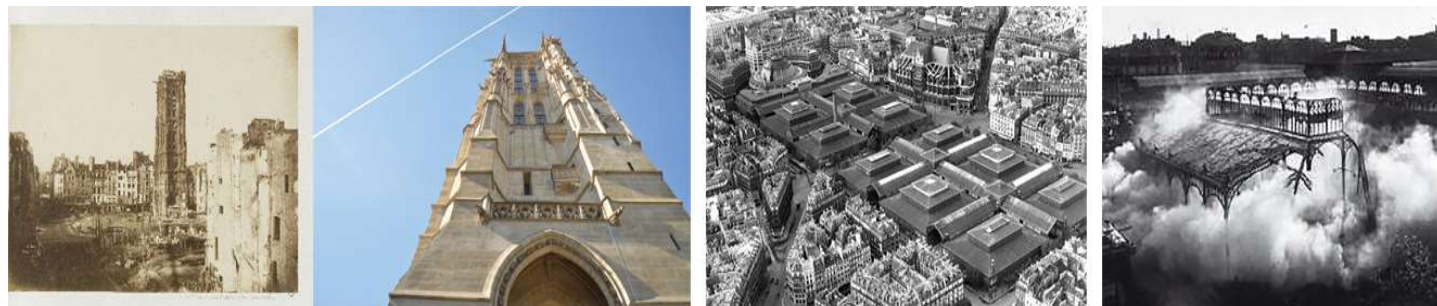
Nella seconda fase del flusso di lavoro, tra tutti i fotogrammi rilevati dalla Rete Neurale vengono selezionati quelli adatti a essere elaborati con la fotogrammetria.

Figura 1. Lo schema del workflow proposto.

Figure 1. A sketch of the proposed workflow.







La selezione viene effettuata in base a specifici movimenti della telecamera all'interno della scena del video.

Solo le riprese effettuate da più punti di vista della stessa scena sono adatte al processo fotogrammetrico. La terza fase riguarda la ricostruzione fotogrammetrica del patrimonio con algoritmi open-source. Durante il processo vengono selezionati manualmente specifici punti caratteristici per garantirne la presenza nella nuvola di punti finale. Questo passaggio sarà molto utile durante la quarta fase di valutazione della qualità metrica del modello.

I risultati della ricostruzione 3D del patrimonio sono stati confrontati con un benchmark creato appositamente per valutare la qualità metrica del modello in base al tipo di movimento della telecamera utilizzata.

La valutazione è stata completata con la scala del modello attraverso i punti caratteristici selezionati durante il processo fotogrammetrico e il confronto con materiale esistente da cui estrarre informazioni metriche: una nuvola di punti, se presente, o disegni storici, ad esempio.

In entrambi i casi, la presenza di specifici punti caratteristici sia nella nuvola di punti risultante dal processo che nel materiale esistente è necessaria per il confronto metrico e la scala.

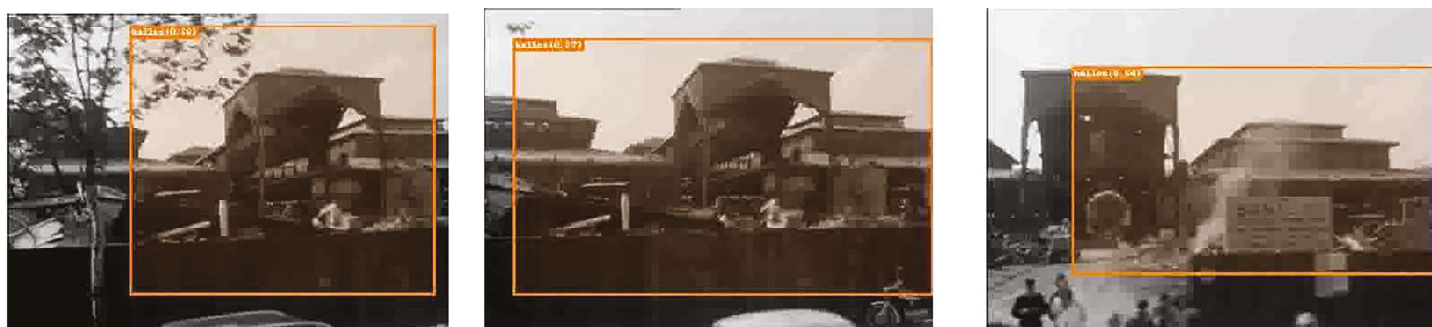
Per testare il flusso di lavoro, sono stati scelti due casi-studio a Parigi, il patrimonio UNESCO della Tour Saint Jacques e i padiglioni delle Halles di Baltard.

Figure: 2. Tour Saint Jacques Figura 3. Nuovo stato della torre Figura 4. Padiglioni delle Halles Figura 5. Demolizione delle Halles.

Figures: 2. Tour Saint Jacques Figure 3. New state of the tower Figure 4. Pavilions of the Halles Figure 5. Demolition of the Halles.

Figura 6. La prima fase del flusso di lavoro: l'identificazione e il tracciamento delle caratteristiche del video.

Figure 6. Ideation sketch for a single-family villa in Civita Castellana, Giulio Mondini, 2005 approx.



Questi casi studio rappresentano due situazioni diverse del patrimonio, perché la torre è stata trasformata nel tempo ma esiste ancora (Figure 2 e 3) e i padiglioni sono stati distrutti nel 1971 (Figure 4 e 5).

Per questo motivo, è possibile confrontare i diversi risultati ottenuti dall'applicazione del flusso di lavoro ai due casi di studio.

La Tour Saint Jacques è stata scelta per la messa a punto delle reti nella migliore situazione di un patrimonio ancora esistente, mentre Les Halles per testare gli algoritmi su un caso reale di architettura distrutta.

Le figure 6 e 7 mostrano che il metodo è riuscito a riconoscere l'inquadratura corretta per la modellazione fotogrammetrica, sia nel caso della torre che dei padiglioni. Gli esperimenti sono stati condotti utilizzando i cluster di High-Performance Computing (HPC) IBM Power9 del CINECA con NVIDIA v100. Grazie all'uso di questo hardware, i risultati mostrano che la riduzione del tempo necessario per elaborare un'immagine durante la fase di addestramento è di circa il 95% (0,3 s/immagine VS 9 s/immagine di un laptop di fascia media).

### Conclusioni

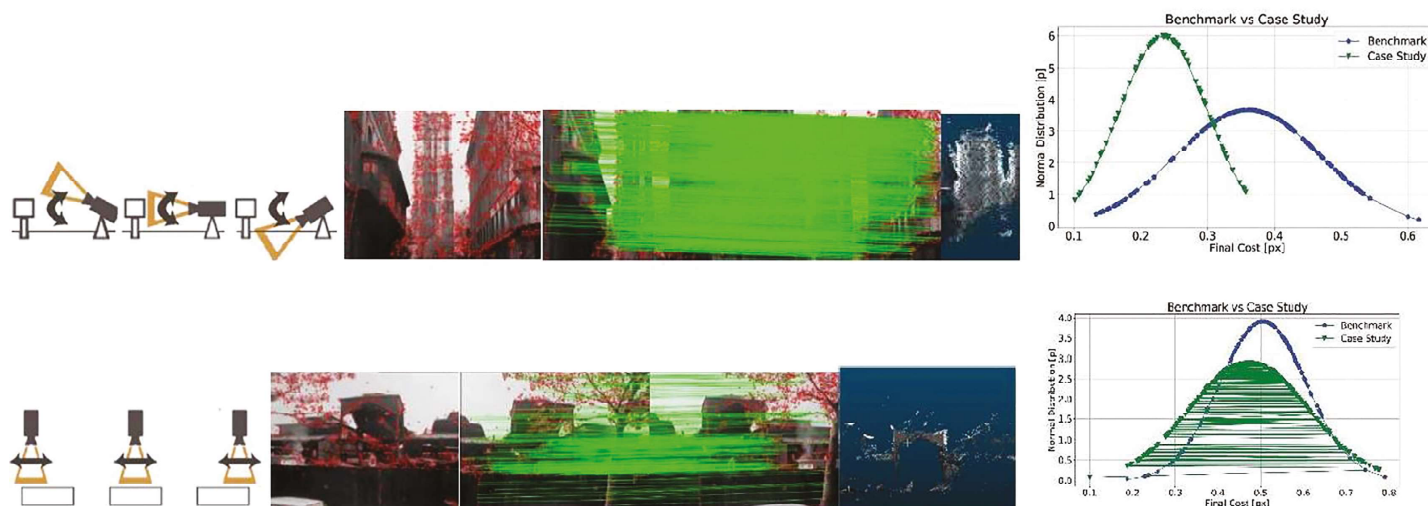
I risultati dimostrano che, combinando diverse informazioni provenienti da archivi storici come vecchi rilievi, progetti e fotografie di edifici, è possibile ottenere una ricostruzione tridimensionale, con una precisione accettabile. Questa ricerca si rivelerà utile per ampliare la comprensione di come l'uso del Machine Learning possa realmente migliorare e potenziare i metodi già noti per la documentazione del patrimonio perduto. Sono diverse le aree in cui questo studio offre un contributo originale nel campo dei beni culturali.


Oltre alla creazione di un nuovo strumento per la ricerca di materiale storico negli archivi grazie all'automazione di un compito manuale e al miglioramento del processo fotogrammetrico attraverso la selezione del materiale più adatto all'applicazione, la ricerca ha un grande impatto sulla protezione e la valorizzazione del patrimonio culturale da un punto di vista diverso.

La ricostruzione virtuale di Beni Culturali trasformati o perduti permette a storici e architetti di esplorare come erano in passato e di comprendere il loro sviluppo e lo stato originario di edifici e ambienti urbani. Per valorizzare l'archivio e sfruttare in modo innovativo le risorse archivistiche, l'uso del *Deep Learning* ha rafforzato i metodi noti di documentazione del patrimonio perduto. Ha avuto un impatto non solo sul miglioramento della piattaforma di archiviazione delle

Figura 7 La seconda, terza e quarta fase del flusso di lavoro: l'estrazione automatica del fotogramma con le coordinate delle bounding box che contengono il monumento, l'identificazione dei movimenti della fotocamera, la ricostruzione fotogrammetrica e la valutazione metrica della qualità.

Figure 7. The second, third and fourth step of the workflow: the automatic extraction of the frame with the coordinates of the bounding boxes that contain the monument, the identification of the camera motions, the photogrammetric reconstruction and the metric quality assessment.





immagini esistente, creando un sistema più efficiente e accurato per gli utenti delle risorse digitali (studiosi, educatori, studenti, musei, ecc.), ma ha anche offerto alcune importanti intuizioni sulla gestione e l'organizzazione delle informazioni storiche e sulla protezione del passato.

Queste informazioni sono estremamente utili per prendere decisioni e interventi sul patrimonio, per la gestione, i restauri e le analisi strutturali.

Nonostante i suoi limiti, lo studio contribuisce sicuramente a una maggiore consapevolezza nella valorizzazione dei dati dei Beni Culturali e dovrebbe essere ripetuto utilizzando diversi set di dati e condizioni di imaging.

L'approccio descritto in questo lavoro può essere applicato a diversi monumenti storici. Sono necessarie ulteriori ricerche per valutare l'efficacia della metodologia sperimentale e per estendere la sua applicazione ad altri casi di studio, in particolare al patrimonio perduto. Sarebbe interessante applicare la procedura ad altri monumenti distrutti per i quali la ricostruzione 3D da video storici è l'unica opzione possibile.

Un'altra interessante estensione futura di questo studio potrebbe riguardare la complessità dei dati storici. Ulteriori ricerche amplieranno la discussione sulle questioni aperte negli archivi storici e forniranno riferimenti per possibili soluzioni. Lo sviluppo di una struttura standard per i metadati relativi alle immagini storiche, ad esempio, consentirà di classificare e collegare le collezioni tra diverse banche dati e istituzioni.

Sfruttando i vantaggi della fotogrammetria e delle tecnologie di intelligenza artificiale, è stato possibile identificare e ricostruire virtualmente le tracce residue di monumenti e parti di città andate perdute o modificate nel tempo. Tuttavia, le potenzialità del metodo vanno oltre il semplice processo di documentazione di qualcosa di reale che è esistito nel passato.

La forza del metodo sta nel creare una base di informazioni e conoscenze per le generazioni future. Infatti, le immagini e i video che vengono ripresi ogni giorno semplicemente camminando per una città possono essere utilizzati in futuro per ricostruire il patrimonio culturale. Trovare nuovi modi per riscoprire il passato e trattare il materiale storico che diventerà una memoria per il futuro è la sfida principale affrontata in questa ricerca.

### *Riferimenti*

Ibertz, J. (2001). Albrecht Meydenbauer – Pioneer of photogrammetric documentation of the Cultural Heritage. In: *Proceedings 18th International Symposium CIPA 2001*, September 18 - 21, 2001, Potsdam, Germany.

Amato, F., Moscato, V., Picariello, A., Colace, F., Santo, M.D., Schreiber, F.A., Tanca, L. (2017). Big data meets digital Cultural Heritage: Design and implementation of scrabs, a smart contextaware browsing assistant for cultural environments. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)* Vol. 10 No. 1, 6 (2017).



- Andrianaivo, L. N., D'Autilia, R., and Palma, V. (2019). Architecture recognition by means of convolutional neural networks, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W15, 77–84, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLII-2-W15-77-2019>, 2019.
- Baltard, V. (1863). Monographie des Halles centrale de Paris. *Archives de Paris*, ATLAS 97: INHA.
- Bitelli, G., Girelli, V.A., Marziali, M., Zanutta, A. (2007). Use of historical images for the documentation and the metrical study of cultural heritage by means of digital photogrammetric techniques, in: A. Georgopoulos (Ed.), Proceedings of CIPA, XXI Symposium, Athens, Greece. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI5/C53, 8 pages.
- COLMAP, Johannes L. Schoenberger (2019). COLMAP - Structure-From-Motion and Multi-View Stereo. <https://github.com/colmap/colmap>.
- Condorelli, F. and Rinaudo, F. (2018). Cultural Heritage reconstruction from historical photographs and videos, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 259-265, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-259-2018>.
- Condorelli, F. and Rinaudo, F. (2019). Benchmark of metric quality assessment in photogrammetric reconstruction for historical film footage. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Vol. XLII-2/W11, pp. 443-448, [doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-443-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-443-2019).
- Condorelli, F., Higuchi, R., Nasu, S., Rinaudo, F., and Sugawara, H. (2019). Improving performance of feature extraction in SfM algorithms for 3D sparse point cloud, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W17, 101–106, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-101-2019>, 2019.
- Condorelli, F., Rinaudo, F., Salvatore, F., Tagliaventi, S. (2020). A Neural Networks Approach to Detecting Lost Heritage in Historical Video, *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2020, 9(5), 297; <https://doi.org/10.3390/ijgi9050297>.
- Costantino, D., & Angelini, M. G. (2015). Three-dimensional integrated survey for building investigations. *Journal of forensic sciences*, 60(6), 1625-1632.
- Pepe, M., Alfio, V. S., Costantino, D., & Scaringi, D. (2022). Data for 3D reconstruction and point cloud classification using machine learning in cultural heritage environment. *Data in Brief*, 42, 108250.
- Llamas, J., Lerones, P.M., Medina, R., Zalama, E., Gómez-García-Bermejo, J. (2017). Classification of architectural heritage images using deep learning techniques. *Appl. Sci.* 2017, 7, 992, doi:10.3390/app7100992.
- Maiwald, F., Henze, F., Bruschke, J., and Niebling, F. (2019). Geo-information technologies for a multimodal access on historical photographs and maps for research and communication in urban history, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W11, 763–769, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLII-2-W11-763-2019>, 2019.
- Meurgey, J. (1926). Histoire de la paroisse Saint-Jacques de-la-Boucherie; *Bibliothèque de l'École des chartes: Paris*, p. 347.
- Stylianidis, E. (2019). CIPA - Heritage Documentation: 50 Years: Looking Backwards, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W14, 1–130, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W14-1-2019>, 2019.

## The documentation of lost cultural heritage using photogrammetry and artificial intelligence

### *Introduction*

The Cultural Heritage [1] metric documentation plays an essential role in preserving memory and knowledge of the past and constitutes the set of information useful to plan any kind of interventions on assets. The documentation is a common part of all the preservation, restoration, and management actions because provides all the information necessary to understand the object in question and leads to the adoption of best practices for the actions to be planned. The documentation information allows the virtual reconstruction of today the investigated asset which forms the starting point for each design of interventions and for complete knowledge about the present situation and, in case, of conditions of the same object in different historical epochs. All the documentation data represent a valuable source of knowledge that can be passed on to future generations and used for future actions (Stylianidis, 2019).

The knowledge of shapes and dimensions are one of the basic data of metric documentation useful also to locate all other non-metric information to help the comprehension of physical phenomena (e.g. structural diseases, etc.).

The modern geomatics techniques allow obtaining all these metric information with a defined accuracy and by extracting the best possible results by considering the quality of the used primary data. The integrated techniques of geomatics make it possible to be able to define metric, architectural, and structural information; in particular, many works present the combination of TLS and photogrammetric techniques for three-dimensional reconstruction and evaluation of changes and evolution of the investigated structures (Costantino, 2015). The metric survey starts from the collection of a significant number of points with known coordinates in a established reference system and the subsequent creation of a 3D model of the surveyed object. The 3D modelling requires a deep knowledge of the surveyed asset: as far as architectural assets (both single buildings and historical centres) the strong collaboration with specialists in History of Architecture is essential to correctly interpret and represent the original elements and the material interventions that occurred during the life of the investigated asset.

Among the various geomatic techniques, photogrammetry plays a fundamental role, since it allows the recovery of the metric data necessary for the geometric understanding of the object to be documented using mages.

Thanks to recent developments in the acquisition and processing of photogrammetric data using SFM (Structure from Motion) and Multi View Stereo (MVS) algorithms, a high level of automation and ease of use of tools and software has been achieved, which has encouraged more and more researchers and experts in the field of Cultural Heritage to use this technique in their work. These advantages make it possible

to extend the application of photogrammetric methods to the various operators working in the field of cultural heritage by providing an adequate tool useful for analysis and study aimed at planning interventions on historical heritage

However, automatism does not mean autonomy, and therefore, while it is true that from any series of variously and randomly acquired photos it is possible to obtain a 3D point cloud, it is not necessarily the case that the quality of the final output is adequate for the intended purposes.

Accuracy requirements are necessary to extract metric information and obtain metric products defined as certified high quality, which is essential for documentation.

### *Open Issues and motivation*

If this need for precision and accuracy assessment is important for new surveys, the same approach is necessary for the data extracted from historical information. In fact, one of the most fascinating challenges is the use not of new data but resources stored in historical archives.

Processing historical images, apart from some praiseworthy but very rare cases, the optimal conditions obtainable with images acquired ex-novo are rarely present and therefore it is all the more necessary to be able to verify the maximum result obtainable in terms of accuracy even more rigorously than in the case of images specially acquired for a photogrammetric survey. However, archives are powerful platforms for saving invaluable treasures of enormous informative potential and play an essential role in the conservation of Cultural Heritage. In addition to written documents, old photographs and videos, which have been preserved over time, are in many cases unique witnesses to architectural and urban transformation. Monuments, historic buildings, and landscapes, that have been transformed or destroyed over time, appear in them and they become the only way to document changes of currently existing objects and parts that are no longer visible and to testify the state of buildings, parts of a city and urban environment at a specific time. In the case of assets that no longer exist, historical photographs and films footage are the only sources to recover their forms, dimensions and locations. This is an opportunity that could support historical studies and help in some way with restoration and conservation decisions. In all international charters for the conservation of Cultural Heritage, photography is mentioned as one of the best ways of documenting cultural assets. These recommendations have always been interpreted as a need for photographic documentation, without taking into account the metric potential of photographic images and the benefit that these properties could provide for the effective documentation measures required before any kind of restoration.

Albrecht Meydenbauer, a young German architect, became a pioneer in the valorization of Cultural Heritage through photogrammetry (Albertz, 2001).

In 1858 he had the idea to use photographic images for the metric documentation of buildings. He was aware of the

imminent danger to cultural assets and was convinced that the most important Cultural Heritage objects should be recorded in a Cultural Heritage Archive so that it could be reconstructed even if it was destroyed. Photogrammetric images were the most effective means to achieve this goal, and he had fought against many obstacles and criticisms to establish it as a method of scientific documentation. These images were widely used during the reconstruction of the city of Berlin at the end of the last century.

#### *State of the art*

In recent years, thanks to the digitization efforts of many archives, the interest in historical photographs and videos as valuable sources for the study of Cultural Heritage and the reconstruction of historical development has increased. The main problem with historical sources relates to the type of medium (paper or digital) the heterogeneity of the material; in particular for the paper archive, it will be necessary to consider the possible presence of deformation of the original dimensions and damage due to improper storage.

Recent developments in the field of image processing and Computer Vision have led to a renewed interest in processing data with a lack of essential properties for 3D metric information, giving the possibility through the use of appropriate algorithms to extract the metric content and to visualize the material and conservation content.

This research aims to examine the possibility to extract metric information of historic buildings from historical photographs and film footage for their 3D virtual reconstruction. To reach this objective, two issues are analysed: the availability of historical archives material, often made difficult by an enormous quantity of unorganized data on historic heritage, and the limitations in processing historical photographs and film footage by the presence of characteristics that make difficult to implement photogrammetric technique.

Thanks to the effort of cultural institutions such as museums, galleries and heritage management organizations in investing a great deal of resources to digitize and preserve their collections using state-of-the-art acquisition technologies, this process has often been considered a success. Multiple initiatives such as high-quality replicas of cultural objects, virtual museum tours, digital valorisation, etc. have developed a new cultural and systemic awareness of the importance of data on Cultural Heritage. With the recent spread of Artificial Intelligence (AI), new techniques such as Machine Learning (ML) and Deep Learning (DL) have been developed that provide appropriate tools for decision-making processes. In particular, it is possible such algorithms to automatically classify a point cloud highlighting, for example, different structural. In the past, cultural data enrichment was only possible using manual annotations that did not fully exploit the hidden information. Today, new challenges have arisen for researchers to make the digital preservation of assets more efficient with Artificial Intelligence techniques for content classification

and generation. One of the most successful aspects of the spread of AI is its application in several disciplines. Artificial Intelligence, in fact, involves, for example, computer science, engineering, art, medicine, linguistics etc. The blending of disciplinary fields is also the starting point for a cultural change that no longer differentiates between humanities, science and art disciplines. (Andrianaivo et al., 2019).

Since the lack of involvement of the researcher in the humanities in the design of infrastructures on historical heritage material, the application of AI methods in urban and architecture projects can improve the participation of the final users of such tools.

In fact, for what concerns the documentation process and in particular the collection of data and information about heritage, can really be improved if Artificial Intelligence is combined with techniques widely used in the heritage field such as modeling from TLS or photogrammetric surveys.

For this reason, recent research in this field has seen a rapid development of technologies to support the management and analysis of historical heritage data. Through Artificial Intelligence, tasks such as processing these large amounts of data and reducing human effort can be automated and thus made more efficient. The creation of new tools for the end-user of these data is an interesting research topic, especially in the field of Cultural Heritage. Indeed, the volume, the size and the variety of historical data lead to certain critical factors. The most important of these is the manpower required to organize and search for the documents. To solve this problem, the application of Artificial Intelligence offers the possibility to enhance historical archives and the retrieval of information on Cultural Heritage.

#### *Methodology and results*

Considering these open issues, in this research a workflow (Figure 1) is presented to process historical images and to assess the metric quality of the reconstruction combining Deep Learning techniques with photogrammetry. Deep Learning is used for the retrieval of primary data used as input material. The standard Structure-from-Motion (SfM) pipeline used to reconstruct lost cultural heritage.

The first step of the workflow aims to make automatic the research of a specific architectural heritage identifying and tracking features from the video. This was performed using an object detection Neural Network trained to automatically recognize the monument in the film footage. In the second stage of the workflow, the frames suitable to be processed with photogrammetry are selected from all the frames detected by the Neural Network. The selection is performed according to specific camera motions within the scene of the video. Only the shots taken from multiple points of view of the same scene are suitable for the photogrammetric process.

The third step concerned the photogrammetric reconstruction of the Heritage with open-source algorithms. During the process specific feature points are manually selected in order

to guarantee their presence in the final point cloud. This step will be very useful during the fourth step of the metric quality assessment of the model.

The results of the 3D reconstruction of the Heritage were compared with a benchmark specifically created to evaluate the metric quality of the model according to the type of camera motion used. The assessment was completed with the scale of the model through the feature points selected during the photogrammetric process and the comparison with existing material from which extract metric information: a point cloud, if present or historical drawings, for example. In both cases, the presence of specific feature points in both point cloud resulted from the process and the existing material is necessary for the metric comparison and scale.

To test the workflow, two case-studies in Paris were chosen, the UNESCO Heritage of the Tour Saint Jacques and the pavilions of the Halles of Baltard. These case studies represent two different situations of the heritage because the tower was transformed over time but still exists (Figure 2 and 3) and the pavilions were destroyed in the 1971 (Figure 4 and 5). For this reason, it is possible to compare the different results obtained from the implementation of the workflow to the two case studies. The Tour Saint Jacques is chosen for the tuning of the networks in the best situation of a heritage that still exists, and Les Halles to test the algorithms on a real case of an architecture which has been destroyed. *fotogrammetrica e la valutazione metrica della qualità*. The experiments were conducted using the CINECA High-Performance Computing (HPC) clusters IBM Power9 with NVIDIA v100. Thanks to the use of this hardware, the results show that the reduction of the time required to process an image during the training stage is about 95% (0.3 s/image VS 9 s/image of a mid-range laptop).

### Conclusions

The results show that combining different information from historical archives such as old surveys, projects and photographs of buildings, a three-dimensional reconstruction is possible, with acceptable range of precision. This research will prove useful in expanding the understanding of how the use of Machine Learning could really improve and boost well-known methods for the documentation of lost heritage.

There are several areas where this study makes an original contribution in the field of Cultural Heritage. Besides the creation of a new tool for searching for historical material in archives thanks to the automation of a manual task and the improvement of the photogrammetric process by selecting the right material for the application, the research has a great impact on the protection and valorisation of Cultural Heritage from a different point of views.

The virtual reconstruction of transformed or lost Cultural Heritage allows historians and architects to explore how it was in the past and to understand its development and the original state of buildings and urban environments.

In order to enhance the archive and innovatively exploit archival resources, the use of Deep Learning actually strengthened known methods of documenting lost heritage. It gave an impact not only on improving the existing images archive platform creating a more efficient and accurate system for the users of digital resources (scholars, educators, student, museum etc.) but also offered some important insights into the management and organization of historical information and the protection of the past.

This information is extremely useful to make decisions and interventions on the heritage, for management, restorations works and structural analysis.

Despite its limitations, the study certainly contributes to greater awareness in the valorisation of Cultural Heritage data and should be repeated using different datasets and imaging conditions. The approach described in this work can be applied to different historical monuments. Further research is needed to evaluate the effectiveness of the experimental methodology and to extend its application to other case studies, especially lost heritage. It would be interesting to apply the procedure to other destroyed monuments for which 3D reconstruction from historical videos is the only possible option.

Another interesting future extension of this study could tackle the complexity of historical data. Further research will expand the discussion on open issues in historical archives and provide references for possible solutions.

The development of a standard structure for metadata concerning historical images, for example, will allow the classification and the link of collections across different database and institutions.

Taking advantages of photogrammetry and Artificial Intelligence technologies allowed the identification and the virtual reconstruction of remaining traces of heritage monuments and parts of a city that have been lost or changed over time. However, the potentialities of the method go beyond the simple process of documenting something real that existed in the past.

The strength of the method lies in creating the information and knowledge base for the future generation.

In fact, the pictures and the videos that are taken every day simply by walking through a city can be used in the future to reconstruct the Cultural Heritage. Finding new ways to re-discovering the past and dealing with the historical material that will become a memory for the future is the main challenge faced in this research.

[1] *Part of the work described in this Chapter has also been previously published in the PhD thesis by Condorelli, 2021.*