TEMA
Technologies Engineering Materials Architecture
e-ISSN 2421-4574
Vol. 5, No. 1 (2019)

Mapping and monitoring building decay patterns by photomodelling based 3D models

Mariella De Fino*, Rosella Alessia Galantucci, Fabio Fatiguso

Highlights

The state of the art on photoscanning based environments and models in the field of building assessment and control is presented.
A workflow identifying aims, tools and functions of virtual tours and coloured point clouds for building decay diagnosis is proposed.
Some image treatment routines for decay monitoring on building surfaces are discussed and applied to a representative case study.

Abstract

A framework is presented for the evaluation and diagnosis of the state of conservation of the built heritage, based on the use of virtual immersive environments and three-dimensional models, as essential tools for the analysis and correlation of diagnostic data. Thus, some early studies are presented on the application of image processing routines that might extract from the point clouds some relevant information toward the semi-automated control of cracking patterns and surface alterations in heritage buildings.

Keywords

Construction History and Preservation, Built Heritage, Assessment and Diagnosis, 3D Point Clouds, Image Treatment

1. INTRODUCTION

In the last decade, the development of three-dimensional models from photo-modelling of historical artefacts, particularly in the form of coloured point clouds and texturized polygonal meshes, acquired considerable relevance and maturity [1] [2] [3]. There are several studies and applications concerning the geometric survey of archaeological and architectural sites [4] [5], with the aim both of technical-specialised studies [6] [7] and informative fruition [8] [9]. On the other hand, the employment of virtual reconstructions seems less consolidated, as a support to the process of qualification, evaluation and control of the state of conservation and the residual performances of historical buildings. Actually scientific literature, related to 3D models

Mariella De Fino
DICATECh - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica, Politecnico di Bari, Via Orabona 4, Bari, 70125, Italia

Rosella A. Galantucci
DICATECh - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica, Politecnico di Bari, Via Orabona 4, Bari, 70125, Italia

Fabio Fatiguso
DICATECh - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica, Politecnico di Bari, Via Orabona 4, Bari, 70125, Italia

* *Corresponding author*
Tel.: +39-080-5963420;
fax: +39-080-5963414;
e-mail: mariella.defino@poliba.it

from photo-modelling, is quite recent and constantly evolving, especially in terms of: development of digital management platforms, with the possibility of including and consulting geo-referenced and semantically structured information for the interpretation of diagnostic data [10] [11] [12] [13] [14]; segmentation and classification methods for the identification of material-construction types, by means of texture and/or geometry recognition, through machine learning algorithms [15] [16]; automatic routines for the detection of technical characteristics and surface alterations with imaging techniques [17] [18] [19] [20].

The literature review, together with the authors' previous and ongoing research experience on these topics [21] [22] [23], induces a consideration about the main aspects defining the framework of fields and purposes, according to which the aid of three-dimensional photorealistic models is desirable in the phases of knowledge, analysis and diagnosis, with particular reference to the mapping and monitoring of symptomatic decay expressions. In terms of experimentation, within an accomplished workflow (par. 2), it is interesting to highlight the operational possibilities of interrogation for specific purposes, here exemplified by image processing procedures for semi-automatic analyses to monitor damages and alterations on stone surfaces (par. 3).

In detail, with respect to the critical reading of the state of art on these issues, it is necessary to observe that, in the first place, there are plenty of solutions for the representation of the built heritage. The choice of the most appropriate answer/s rely on the specific application contexts. In general, provided that immersive, augmented and interactive environments primarily refer to touristic-experiential purposes, with regard to technical studies on the built heritage, particularly with historical-architectural value, the scientific community emphasizes the opportunity to exploit spherical images and 3D models, acquired from cameras or even from drone, navigable in interactive tours and managed by platforms for the insertion of external links to specialized contents and for the creation of attributes and thematic layers. In particular, the most interesting experiences are related to some informative systems. Among these, it is worth to mention: MONDIS, a web and mobile application for the enrichment of photorealistic three-dimensional models, with information on symptomatic manifestations of damage, meant as a support for decision procedures to identify causes and select conservative measures; MONUMENTUM, a numerical modelling environment for the built heritage, equipped with representation, consultation and management of material-construction information, decay expressions and "in situ" experimental measurements, for the integrated development of structural

1. INTRODUZIONE

Lo sviluppo di modelli tridimensionali da fotomodellazione di manufatti del patrimonio costruito storico, in particolare nella forma di nuvole di punti colorate e mesh poligonali testurizzate, ha acquisito considerevole rilevanza e maturità nell'ultimo decennio [1] [2] [3]. In particolare, numerosi risultano gli studi e le applicazioni nel campo del rilievo geometrico di complessi archeologici e architettonici [4] [5], con finalità tanto di studio tecnico-specialistico [6] [7] quanto di fruizione divulgativa [8] [9]. Di contro, meno compiutamente consolidato appare l'ambito di tali ricostruzioni virtuali quale supporto al processo di qualificazione, valutazione e controllo dello stato di conservazione e delle prestazioni residue degli edifici storici, tanto che risulta recente e in costante evoluzione la produzione scientifica relativa a modelli 3D da fotomodellazione in termini di: sviluppo di piattaforme digitali di gestione, con possibilità di inserimento e consultazione di informazioni geo-referenziate e semanticamente strutturate per l'interpretazione correlata di dati diagnostici [10] [11] [12] [13] [14]; metodi di segmentazione e classificazione di tipologie materico-costruttive mediante riconoscimento di texture e/o geometrie con algoritmi di machine learning [15] [16] ; routine di riconoscimento automatico di caratteristiche tecniche e alterazioni superficiali con tecniche di trattamento immagini [17] [18] [19] [20].

L'analisi della letteratura, unita all'esperienza di ricerca pregressa e in corso da parte degli autori [21] [22] [23] sulle tematiche di riferimento, consente di proporre una riflessione sui principali aspetti che concorrono a definire il quadro degli ambiti e delle finalità, per cui è auspicabile un supporto di modelli tridimensionali fotorealistici nelle fasi di conoscenza, analisi e diagnosi, con particolare riferimento alla mappatura e al monitoraggio delle manifestazioni sintomatiche di degrado. Tanto nell'ottica di sperimentare, all'interno di un flusso di lavoro compiuto (par.2), delle possibilità operative di interrogazione per finalità specifiche, qui esemplificate da procedure di trattamento immagini per operazioni semi-automatiche di controllo di lesioni e alterazioni di paramenti lapidei (par.3).

In dettaglio, con riferimento alla lettura critica dello stato dell'arte sui temi richiamati, occorre osservare, in primo luogo, che esistono una pluralità di soluzioni per la rappresentazione del patrimonio costruito. La scelta della/e soluzione/i più opportuna/e dipende dai contesti applicativi specifici. In linea generale, fermo restando che ambienti immersivi, aumentati e interattivi restano riferiti principalmente a finalità turistico-esperienziali, nel campo dello studio tecnico del patrimonio costruito, in particolare con valenze storico-architettoniche, la comunità

diagnosis; AIOLI, a collaborative platform for the storing of various kinds of documents (video, text, images, audio, ...), with cloud technology and direct annotation of graphic information on 3D models.

Secondly, it is important to keep in mind that, apart from the adoptable tools, the experts in the field of analysis and diagnosis of the built heritage dwell on two prerogatives: on the one hand, the structuring, correlation and sharing of an extraordinary and heterogeneous variety of data, with regard to the types and themes involved, and, on the other hand, the process of transversal evaluation of information, aimed at increasing knowledge from "preliminary" to "consolidated". These two visions, although complementary, require extremely different functionalities: storage, consultation and communication, on one side; analysis, interaction and implementation, on the other, with an obvious influence on the level of methodological-operational complexity, as well as on the employment of economic and temporal resources. Therefore, simpler and more immediate applications of virtual tours/informative models with 360 ° panoramas, are exploited to the archiving and referencing of written-graphic information, in order to obtain a data cataloguing and management tool. As well, there are numerous more complex and burdensome computational experiences, in particular for articulated objects and detailed investigations, in which point clouds and polygonal meshes, generally retrieved from laser scanner survey, are based on a careful calibration of resolution, accuracy and environmental sensitivity of measurements.

On the basis of the outlined contents, it is necessary to consider the role of photorealistic three-dimensional models, in light of the context and the purpose of application, which determine the typological variety and the degree of reliability of the required functions, due to the complexity of the building, the nature, extent and intensity of the degradation conditions, as well as the logistical-operational resources available.

2. METHODOLOGY

In accordance with the previous considerations, a workflow is proposed, explaining the function of photorealistic three-dimensional models, elaborated in the form of coloured point clouds and textured polygonal meshes of architectural artefacts, within the cognitive and diagnostic process, with particular attention to the mapping and monitoring of symptomatic decay expressions.

The workflow focuses on the context/purpose of the analysis and diagnosis, starting from the integrated and correlated reading of spatial and semantic relationships between damages, constitutive characteristics and diagnostic

scientifica pone l'accento sulla opportunità di avvalersi di foto sferiche e modelli 3D, acquisiti da immagini fotografiche, anche da drone, navigabili in tour interattivi e gestiti da piattaforme per l'inserimento di collegamenti esterni a contenuti specialistici e per la creazione di attributi e layer tematici. In particolare, le esperienze più interessanti in questo campo sono relative ad alcuni sistemi informativi. Fra questi, meritano una menzione: MONDIS, applicazione web e mobile per l'arricchimento di modelli tridimensionali fotorealistici con informazioni su manifestazioni sintomatiche di danneggiamento, indirizzate a procedure di supporto decisionale per l'identificazione delle cause e la selezione delle misure conservative: MONUMENTUM, ambiente di modellazione numerica del patrimonio costruito corredato di sistema di rappresentazione, consultazione e gestione di informazioni materico-costruttive, manifestazioni di degrado e misure sperimentali in situ per lo sviluppo integrato della diagnosi strutturale; AIOLI, piattaforma collaborativa per l'archiviazione di documenti di diversa natura (video, testi, immagini, audio, ...) con tecnologia cloud e l'annotazione diretta su modelli 3D di informazioni grafiche, organizzate su scale temporali.

In secondo luogo, occorre tener presente che, al di là dagli strumenti adottabili, gli specialisti nel campo dell'analisi e diagnosi del costruito pongono come centrali due prerogative legate da una relazione di propedeuticità: da un lato, la strutturazione, correlazione e condivisione di una varietà straordinaria ed eterogenea di dati diversi per tipologie e tematismi coinvolti, dall'altro, la conduzione di un processo di valutazione trasversale delle informazioni, finalizzata ad un accrescimento della conoscenza da "preliminare" a "consolidata". Queste due visioni, pur complementari, richiedono funzionalità profondamente diverse, di archiviazione, consultazione e comunicazione, da un lato, di analisi, interazione e implementazione dall'altro, con evidenti ricadute sul livello di complessità metodologico-operativo, nonché sull'impiego di risorse economiche e temporali. Si possono riscontrare, dunque, applicazioni più semplici e immediate di tour virtuali/modelli informativi con panorami a 360° per la catalogazione e referenziazione di informazioni scritto-grafiche, nell'ottica di disporre di uno strumento di catalogazione dei dati che contenga gli oneri di gestione. Come pure, numerose sono le esperienze più complesse e onerose a livello computazionale, in particolare per oggetti articolati e osservazioni di dettaglio, in cui le restituzioni in nuvole di punti e mesh poligonali, generalmente da rilievo laser scanner, sono basate su attenta e gravosa calibrazione di risoluzione, accuratezza, e sensitività ambientale delle misure.

Alla luce dei contenuti delineati, emerge, dunque, la necessità e

measures. In this regard, coloured points clouds and texturized polygonal meshes of significant parts of the building, retrieved from images by cameras on tripods/telescopic rods/drone and/or laser scanner, are particularly appropriate. Indeed, these models can guide the critical understanding of pathologies affecting the building and its parts, in a dual way: directly, through different 3D and 2D visualization modes, combined with functions for the measurement of distances and areas, or the editing of lines and surfaces, which allow the extraction of metric and optical data for diagnostic purposes; indirectly, through the association of layers for the taxonomic classification of decay and the integration of material-constructive information and experimental data.

The direct approach depends on the restitution of the onsite conditions and enables the understanding of spatial and morphological connections between elements, in order to identify nature and causes of the evolving phenomena. This can be observed, for example, in the interpretation of a static instability, which typically arises through composite crack and deformation patterns, or in the understanding of humidity problems, in which the spatial distribution of symptomatic evidences provides critical information about the origin of the alteration process.

The indirect approach, on the other hand, is based on the creation of ontologies, which could explain the semantic relationships existing between symptomatic manifestations attributes (material, construction technique, measurement of structural and environmental parameters, ...) with the purpose of analysing the impact of factors on effects. As an example, the diagnosis of stone deterioration involves a series of intrinsic - kind of support, method of installation, chemical-physical-mechanical properties ... - and extrinsic agents - exposure, microclimate ... – which contribute to the identification of anomalies.

According to this view, medium resolution three-dimensional models may be preferred, for the sake of processing and interrogating speed, with the aim of providing a “relationship” model, rather than a “representation” of the building. Nevertheless, their fruition should be integrated within an immersive environment, extended to the entire building, by creating virtual tours of 360° spherical pictures, acquired by high-resolution cameras on panoramic heads. Specifically, navigation through panoramas is designed to support, in a systematic and exhaustive way, the visual survey as well as the archiving, sharing and consultation of geo-referenced analytical, documentary and experimental sources. In this sense, together with the link to 3D models, in some areas, spherical photos should include hot spots to external contents,

l’opportunità di considerare il ruolo dei modelli tridimensionali fotorealistici, alla luce del contesto e della finalità di applicazione, che ne determinano la varietà tipologica e il grado di affidabilità delle funzioni richieste, in ragione della complessità del fabbricato, della natura, estensione e intensità delle condizioni di degrado, nonché delle risorse logistico-operative disponibili.

2. METODOLOGIA

Sulla base delle considerazioni svolte, si propone un flusso di lavoro, che espliciti il ruolo dei modelli tridimensionali fotorealistici, elaborati nella forma di nuvole di punti colorate e mesh poligonali testurizzate di manufatti del patrimonio costruito storico, all’interno del processo conoscitivo e diagnostico, con particolare attenzione alla mappatura e al monitoraggio delle manifestazioni sintomatiche di degrado.

Il flusso di lavoro pone come centrale l’ambito/finalità dell’analisi e della diagnosi, sulla base della lettura integrata e correlata delle relazioni spaziali e semantiche fra manifestazioni di degrado, da un lato, e caratteristiche costitutive e misure diagnostiche, dall’altro. Per lo scopo, particolarmente indicate appaiono, appunto, nuvole di punti colorate e mesh poligonali testurizzate di parti significative del fabbricato, elaborate da immagine acquisite con fotocamera da terra/aste telescopiche/drone e/o laser scanner. Difatti, tali modelli tridimensionali fotorealistici possono guidare la comprensione critica delle patologie della fabbrica e delle sue parti, sia in modo diretto che indiretto: in modo diretto, attraverso diverse modalità di visualizzazione tridimensionale e bidimensionale, unite a funzioni di misurazione di distanze e aree e di tracciamento di linee e superfici relative alle patologie; in modo indiretto, attraverso l’associazione di layer per la classificazione tassonomica delle manifestazioni di degrado e l’integrazione di informazioni materico-costruttive e dati sperimentali.

L’approccio diretto dipende dalla possibilità di restituzione dello stato dei luoghi e abilita la comprensione delle dipendenze spaziali e morfologiche fra gli elementi, condizione fondamentale per l’identificazione della natura e delle cause dei fenomeni in atto. Si pensi alla interpretazione di un dissesto statico, che tipicamente si manifesta con quadri lesionativi compositi per aree e componenti coinvolte.

L’approccio indiretto, invece, si basa sulla opportunità di creare ontologie che esplicitino le relazioni semantiche fra gli attributi (materiale, tecnica costruttiva, misura di parametri strutturali e ambientali, ...) delle manifestazioni sintomatiche, nell’ottica dell’analisi di incidenza dei fattori sugli effetti. Si pensi, in questo caso, alla diagnosi del degrado dei paramenti lapidei, in cui agenti intrinsechi – tipologia di supporto, modalità di posa in

in “display mode” file format – historical data, drawings, diagrams, schemes, diagnostic reports - as well as panoramas with thematic maps – dampness or crack patterns, surface alterations. In this way, 3D models are exploited for specialized investigations, in order to increase the level of knowledge from preliminary to consolidated, ascribing to spherical photos the documents management and the global realistic representation of the site conditions, with the help of rapid and immediate tools.

Nevertheless, the proposed workflow entails the possibility of connecting highly accurate three-dimensional models, if they refer to limited parts for specific problems, such as, for example, the monitoring of crack and deterioration patterns over time, through image-processing techniques.

In summary, it should be highlighted that the outlined methodological framework is based on a scalar approach, which yield to the development of integrated informative tools, with growing computational requirements, applied to more and more limited areas. With reference to the evaluation and control of the state of conservation, systematic mapping of visible alterations is associated to the purpose of consultation and communication, through virtual tours of spherical photos linked to thematic 360 ° panoramas. On the contrary, medium resolution 3D models supply qualitative analyses of building portions, for the purposes of spatial and semantic correlation of pathologies, while high resolution models provide quantitative evaluations of chromatic and/or metric variations of limited regions, for the monitoring of visible alterations.

3. EXPERIMENTATION AND RESULTS

As part of the general methodological framework, a thematic study is proposed below, focusing on the testing and validation of interrogation instruments, applied to high-resolution point clouds and polygonal meshes. A more careful and onerous acquisition campaign is applied to limited areas of a building for specific purposes.

In detail, the investigation concerns the use of semi-automatic procedures for the analysis and measurement of point clouds, in order to highlight, quantify and monitor physical alterations on a building, through Reverse Engineering and Digital Image Processing techniques, for image acquisition, reconstruction and processing of three-dimensional models.

By way of example, here the case study of Palazzo Palmieri (Monopoli, Puglia) is presented, a late baroque building of the XVIII century, on which two “in situ” photogrammetric surveys were performed, in a time interval of eighteen months.

opera, proprietà chimico-fisiche-meccaniche...- e agenti estrinsechi –esposizione, microclima...– concorrono alla determinazione dell’anomalia.

In accordo a questa visione, si ritiene che i modelli tridimensionali fotorealistici possano essere restituiti con una risoluzione media, anche a beneficio dell’agilità e velocità di elaborazione e interrogazione, avendo, comedetto, lo scopo di fornire un modello di “relazione”, piuttosto che di “rappresentazione” del fabbricato. Nondimeno, la loro fruizione dovrebbe essere inquadrata all’interno di un ambiente immersivo, esteso alla totalità del fabbricato, mediante creazione di tour virtuali di foto sferiche a 360°, acquisite da fotocamere ad alta risoluzione su teste panoramiche. Nello specifico, la possibilità di navigazione attraverso i panorami è concepita per supportare in modo sistematico e esaustivo le fasi di rilievo visivo, nonché di archiviazione, condivisione e consultazione di fonti analitiche, documentali e sperimentali geo-referenziate. In tal senso, unitamente al collegamento ai modelli tridimensionali in alcune aree, le foto sferiche dovrebbero costituire la base per hot spots a contenuti esterni, nella forma di file in “modalità visualizzazione” - dati storici, elaborati grafici, diagrammi, schemi, report diagnostici – nonché per panorami con mappature tematiche - quadri umidi, lesionativi, alterazioni superficiali. In questo modo, i modelli 3D vengono utilizzati per elaborazioni specialistiche che incrementino il livello di conoscenza preliminare in consolidata, rimandando alle foto sferiche la gestione dei documenti e la restituzione globale “dal vero” dello stato dei luoghi con strumenti rapidi e immediati.

Nondimeno, il flusso di lavoro, contempla la possibilità di collegare modelli tridimensionali altamente accurati, se riferiti a parti limitate per problematiche specifiche, quali, a titolo esemplificativo, il controllo di quadri lesionativi e/o la valutazione di lacune nel tempo, mediante tecniche di image-processing.

In sintesi, si evidenzia che il quadro metodologico delineato si basa su un approccio scalare, in cui si sviluppano in modo integrato e complementare strumenti informativi a onere computazionale crescente man man che risulta più circoscritta l’area di rappresentazione. In particolare, con riferimento alla valutazione e controllo dello stato di conservazione, si prevede la mappatura sistematica delle manifestazioni visibili di degrado ai fini della consultazione e comunicazione tramite tour virtuali di foto sferiche collegate a panorami a 360° tematici. Di contro, nuvole di punti e mesh testurizzate sono acquisite per consentire analisi qualitative di parti del fabbricato ai fini della correlazione spaziale e semantica delle patologie, se a media risoluzione, e valutazioni quantitative di variazioni cromatiche e/o metriche

The photographic acquisitions concerned the main façade, with particular attention to portions of masonry affected by widespread alterations, in order to understand their evolution over time. For the entire facade (about 765 m^2), the shooting distance was of 10 m, with a resolution of 2.67 mm/pixel on the façade level and 5.34 mm/pixel in depth. For detailed shootings (about 10 m^2), the shooting distance was of 1.20 m, with a resolution of 0.26 mm/pixel and 0.53 mm/pixel respectively.

Starting from point clouds, obtained through a 3D photogrammetric reconstruction software (Agisoft Photoscan), a procedure was outlined to identify and monitor different degradation morphologies. The analyses were carried out through the application of a series of spatial and morphological filters, in order to extrapolate significant quantitative information for the detection of selected kinds of alteration. To this end, software generally used for laboratory and industrial research (MountainsMap) were chosen.

Processing routines first of all involve the use of noise reduction filters, levelling or shape removing, in order to eliminate interference within the model (anomalous values, surface curvature). Depending on the pathology (cracks or alterations related to stone degradation), the approach utilises edge-extraction filters, threshold operators, binarization, segmentation and grain analysis.

Specifically, the gradient filter is appropriate for detecting cracks, mostly characterized by very sharp edges. In fact, this operator extracts the edges of a region, by subtracting points near its centre and removing small intensity variations (low frequencies), in order to enhance discontinuities in intensity values (high frequencies). The regions at a greater depth, identified through a sudden slope variation, are extracted and isolated from the background, with the help of the gradient function - vector whose components are represented by the directional derivatives at each point of the surface - to carry out further analysis and to obtain the related quantitative information.

Instead, in case of alterations due to stone degradation - cavities, erosions, alveolizations – thresholding segments the surface, cutting of values exceeding a selected depth and keeping only elements within the range. In fact, the inclusion interval can be varied by changing the threshold values, to study only affected portions, visualized in false colour maps, with associated depth scales (Fig. 1).

Quantitative analysis of previously detected alterations goes through the study of their geometric and topological characteristics. Grain/motifs analysis is a fundamental step, in which areas identified by edge- extraction and thresholding are divided and grouped into grains/motifs, aiming at the

di aree ridotte per il monitoraggio nel tempo delle alterazioni visibili, se ad alta risoluzione.

3. SPERIMENTAZIONE E RISULTATI

Nell'ambito del quadro metodologico generale delineato, si propone, di seguito, un approfondimento tematico, incentrato sulla sperimentazione e validazione di strumenti di interrogazione di nuvole di punti e mesh poligonali ad elevata risoluzione e accuratezza, in cui una più onerosa e attenta campagna di acquisizione viene applicata ad aree circoscritte del fabbricato per finalità specifiche.

In dettaglio, il suddetto approfondimento riguarda l'uso di procedure semi-automatiche di analisi e misurazione di nuvole di punti, al fine di evidenziare, quantificare e monitorare le alterazioni fisiche presenti su un fabbricato, attraverso l'utilizzo congiunto di tecniche di Reverse Engineering, come la fotogrammetria digitale, per l'acquisizione delle immagini e la consenguente ricostruzione dei modelli tridimensionali, e tecniche di Digital Image Processing, per la successiva elaborazione degli stessi.

Ci si riferisce qui, a titolo esemplificativo, a Palazzo Palmieri (Monopoli, Puglia), un edificio tardo barocco del XVIII secolo, sul quale sono state svolte due sessioni di rilievo fotogrammetrico in situ a distanza di diciotto mesi.

Le acquisizioni fotografiche hanno interessato il prospetto principale, con particolare attenzione per porzioni di muratura che presentassero manifestazioni critiche di alterazione dei paramenti lapidei, al fine di disporre di elementi utili alla comprensione delle trasformazioni nel tempo. Per riprese dell'intera facciata (circa 765 m^2), si è adottata una distanza di ripresa di 10 m, ottenendo un modello con risoluzione di 2,67 mm/pixel sul piano della facciata e 5,34 mm/pixel in profondità. Per le riprese di dettaglio (circa 10 m^2), la distanza di ripresa è stata di 1,20 m, con valori di risoluzione rispettivamente di 0,26 mm/pixel e 0,53 mm/pixel.

A partire dalle nuvole di punti, ottenute mediante un software di ricostruzione fotogrammetrica 3D (Agisoft Photoscan), si è delineata una procedura volta ad identificare e monitorare diverse morfologie di degrado. Le analisi sono state condotte attraverso l'applicazione, a partire dai modelli tridimensionali, di una serie di filtri spaziali e morfologici, al fine di estrapolare informazioni quantitative significative per il rilievo di determinate tipologie di alterazione. A tale scopo si sono adottati strumenti software (MountainsMap) generalmente utilizzati nelle ricerche di laboratorio e industriali.

Si sono definite delle routine di elaborazione che prevedono, in primo luogo, l'utilizzo di filtri di riduzione del rumore, di livellamento o di rimozione di forma, al fine di eliminare gli elementi di disturbo

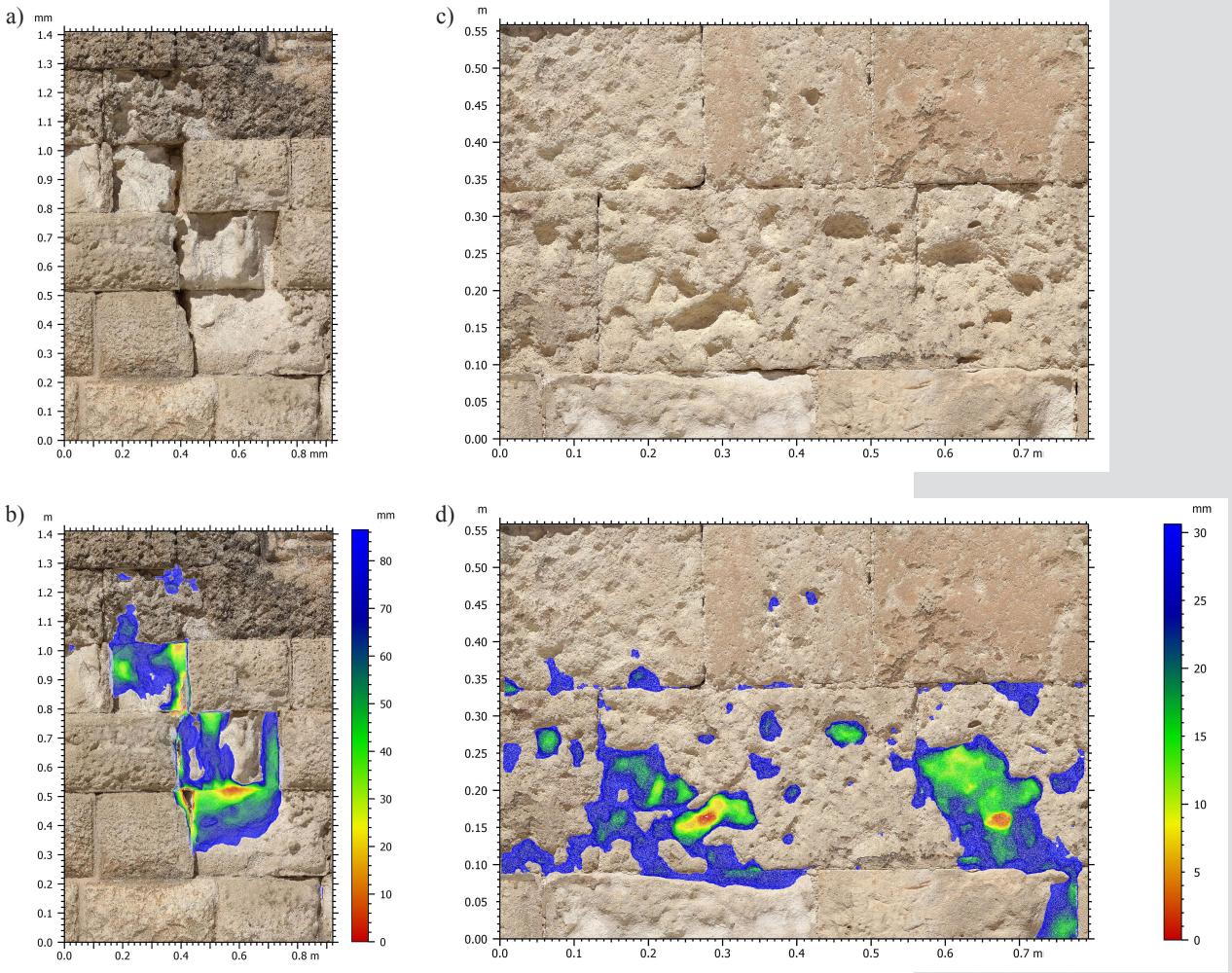


Figure 1. a) and b) Photorealistic point clouds, representing two portions of the main façade: a) ashlar basement; b) limestone masonry; c) and d) Overlapping of the point clouds with corresponding false colour maps, after models' segmentation by a depth threshold.

calculation of some parameters such as amplitude, depth, perimeter, area, volume, average/minimum/maximum diameter, orientation, roundness, compactness, aspect ratio, form factor, useful to quantitatively describe and monitor an alteration over time.

It is important to underline that the minimum detectable dimensions are strongly influenced by 3D models resolution, which should always be lower than the smallest damage to be detected.

In support of the deterioration assessment, direct measurement tools (distances, areas and volumes) and profile extraction were used, in order to observe the transversal development of an alteration and quantify depth variations corresponding to critical points.

These procedures were performed on two samples of the external facade (Fig.1), obtained from two survey sessions (18-month interval), in order to compare results and highlight any changes. Divergences between the two models were in order of a few centimetres. As an example, we observed a

all'interno del modello (valori anomali, eventuale curvatura della superficie). A seconda della patologia da individuare (in particolare fessurazioni, o alterazioni legate al degrado della pietra), si sono adottati filtri di estrazione dei contorni, operatori di soglia, binarizzazione, segmentazione e analisi dei grani.
Nello specifico, il filtro gradiente è risultato appropriato per individuare le fessurazioni, caratterizzate per lo più da contorni molto netti. Tale operatore infatti estrae i bordi di una regione, sottraendo i punti vicini ad un punto centrale ed eliminando le piccole variazioni di intensità (basse frequenze), per esaltare le discontinuità nei valori di intensità (alte frequenze). I contorni delle regioni a maggiore profondità, riconosciuti grazie alla repentina variazione di pendenza, vengono estratti e isolati dallo sfondo, tramite il calcolo della funzione gradiente - vettore le cui componenti sono rappresentate dalle derivate direzionali calcolate in ogni punto della superficie - per poterne effettuare ulteriori analisi e ricavarne le relative informazioni quantitative.

1.5 cm lowering (from 12.5 cm to 14 cm) of the point at greatest depth in the crack visible (Fig.1a). For the lack (Fig.1a) there was an amplitude increasing of 3.5 cm. The same reasoning was repeated for the second point cloud (Fig. 1 c), where, in correspondence of cavities/alveolizations, differences of a few centimetres were detected.

4. CONCLUSIONS

The paper intended to outline a workflow that enables the explication of the role of photorealistic three-dimensional models within the cognitive and diagnostic process, with particular reference to the mapping and monitoring of damages. In particular, a scalar approach is proposed, centred on the use of coloured point clouds and texturized polygonal meshes, processed through photo-modelling of images by cameras on tripods/telescopic rods/drones. The main purpose was an integrated and correlated reading of spatial and semantic relations among all available information on features, decay patterns and diagnostic measures.

Medium-resolution models, characterized by processing and interrogation speed, are referred to significant parts of the building, within an immersive environment of the entire building, retrieved from high-resolution spherical photos. They are navigable in virtual tours, for the representation of onsite conditions, but also for the storage and sharing of all data in “display mode”. Nevertheless, high accuracy point clouds/polygonal meshes, acquired also through 3D scanner survey, are provided for the study of limited areas and/or specific aspects. Regarding this last issue, the illustrated experimentation, encompassing image processing techniques, turns out to be promising to monitor the evolution of decay over time.

5. REFERENCES

[1] Remondino F, El-Hakim S. Image-Based 3D Modelling : a Review. Photogramm Rec 2006;21:269–91.

[2] Grussenmeyer P, Alby E, Landes T, Koehl M, Guillemin S, Hullo JF, et al. Recording approach of heritage sites based on merging point clouds from high resolution photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning. Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci - ISPRS Arch 2012;39:553–8. doi:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-553-2012.

[3] Bastonero P, Donadio E, Chiabrando F, Spanò A. Fusion of 3D models derived from TLS and image-based techniques for CH enhanced documentation. ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci 2014;II:23–5. doi:10.5194/isprsannals-II-5-73-2014.

[4] Guidi G, Remondino F, Russo M, Menna F, Rizzi A, Ercoli S. A multi-resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archaeological areas. Int J Archit Comput 2009;7:39–56. doi:10.1260/147807709788549439.

[5] Remondino F, El-Hakim S. 3D-Arch'2007: 3D virtual reconstruction and visualization of complex architectures. Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci 2007;XXXVI.

[6] Guidi G, Russo M, Angheleddu D. 3D survey and virtual reconstruction of archaeological sites. Digit Appl Archaeol Cult Herit 2014;1:55–69.

[7] Koutsoudis A, Vidmar B, Ioannakis G, Arnaoutoglou F, Pavlidis G, Chamzas C.

Nel caso di alterazioni dovute al degrado della pietra - cavità, erosioni, alveolizzazioni - ci si è riferiti alla sogliatura, che segmenta una superficie, troncandola artificialmente in corrispondenza di valori di profondità selezionati, mantenendo solo gli elementi che ricadono nell'intervallo selezionato. Difatti, modificando i valori di soglia si può variare l'intervallo di inclusione in modo da isolare e studiare le porzioni affette da alterazione su delle mappe in falsi colori, con scale di profondità associate (Fig. 1).

L'analisi quantitativa delle alterazioni precedentemente rilevate passa attraverso lo studio delle caratteristiche geometriche e topologiche delle stesse. L'analisi dei grani/motivi costituisce un passaggio fondamentale, in cui le aree individuate mediante estrazione dei contorni e sogliatura, vengono suddivise e raggruppate in grani/motivi, funzionali al calcolo di alcuni parametri come ampiezza, profondità, perimetro, area, volume, diametro medio/minimo/massimo, orientamento, rotondità, compattezza, rapporto di forma, fattore di forma, utili a descrivere quantitativamente un'alterazione e a monitorarla nel tempo.

È importante sottolineare che le dimensioni minime rilevabili, attraverso queste routine di analisi, sono fortemente influenzate dalla risoluzione del modello 3D, che deve sempre essere inferiore rispetto alla più piccola alterazione rilevabile.

A supporto del rilievo del degrado del paramento lapideo, si sono stati utilizzati anche strumenti di misurazione diretta (distanze, aree e volumi) sui modelli 3D e di estrazione di profili, per poter osservare lo sviluppo trasversale e quantificare le variazioni di profondità in determinati punti particolarmente critici.

Le procedure appena descritte sono state adottate su due nuvole di punti esemplificative del paramento murario del prospetto esterno (Fig.1), ottenute dalla prima e dalla seconda sessione di rilievo (intervallo di 18 mesi), per poter comparare i risultati e mettere in luce eventuali mutamenti in atto. Tra i modelli del 2015 e del 2017, si sono riscontrate differenze nell'ordine di qualche centimetro. A titolo di esempio, si è osservato un abbassamento di 1,5 cm (da 12,5 cm a 14 cm) del punto a maggiore profondità, nella fessurazione visibile in Fig.1a. Per quanto riguarda la mancanza (Fig.1a), si è riscontrato un incremento in ampiezza pari a 3,5 cm. Lo stesso discorso è stato riproposto nella seconda nuvola di punti, nella quale si sono verificate differenze nell'ordine di qualche centimetro, in corrispondenza delle cavità/alveolizzazioni misurate.

4. CONCLUSIONI

Il contributo ha inteso delineare un flusso di lavoro che consenta di esplicitare il ruolo dei modelli tridimensionali fotorealistici all'interno del processo conoscitivo e diagnostico, con particolare

Multi-image 3D reconstruction data evaluation. J Cult Herit 2014;15. doi:10.1016/j.culher.2012.12.003.
[8] Balsa-Barreiro J, Fritsch D. Generation of visually aesthetic and detailed 3D models of historical cities by using laser scanning and digital photogrammetry. Digit Appl Archaeol Cult Herit 2018;8:57–64. doi:10.1016/j.daach.2017.12.001.
[9] Katz J, Tokovinine A. The past, now showing in 3D: An introduction. Digit Appl Archaeol Cult Herit 2017;6:1–3. doi:10.1016/j.daach.2017.09.001.
[10] Soler F, Melero FJ, Luzón MV. A complete 3D information system for cultural heritage documentation. J Cult Herit 2017;23:49–57. doi:10.1016/j.culher.2016.09.008.
[11] Messaoudi T, Véron P, Halin G, De Luca L. An ontological model for the reality-based 3D annotation of heritage building conservation state. J Cult Herit 2018;29. doi:10.1016/j.culher.2017.05.017.
[12] Napolitano R. Virtual tours and informational modeling for conservation of cultural heritage sites Dear author , Please note that changes made in the online proofing system will be added to the article before publication but are not reflected in this PDF . We also ask 2018. doi:10.1016/j.culher.2017.08.007.
[13] Mandelli A, Achille C, Tommasi C, Fassi F. Integration of 3D models and diagnostic analyses through a conservation-oriented information system. Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci - ISPRS Arch 2017;42:497–504. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-497-2017.
[14] Nespeca R, De Luca L. Analysis, thematic maps and data mining from point cloud to ontology for software development. Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci - ISPRS Arch 2016;41:347–54. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B5-347-2016.
[15] Grilli E, Dininno D, Petrucci G, Remondinoa F. From 2D to 3D supervised segmentation and classification for cultural heritage applications. Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci - ISPRS Arch 2018;42:399–406. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-399-2018.
[16] Grilli E, Remondino F. Classification of 3D Digital Heritage. Remote Sens 2019;11:847. doi:10.3390/rs11070847.
[17] Hallermann N, Morgenthal G, Rodehorst V. Unmanned Aerial Systems (UAS) – Case Studies of Vision Based Monitoring of Ageing Structures. Int Symp Non-Destructive Test Civ Eng 2015.
[18] Mohan A, Poobal S. Crack detection using image processing : A critical review and analysis. Alexandria Eng J 2017. doi:10.1016/j.aej.2017.01.020.
[19] Valença J, Dias-da-costa D, Júlio E, Araújo H, Costa H. Automatic crack monitoring using photogrammetry and image processing 2013;46:433–41. doi:10.1016/j.measurement.2012.07.019.
[20] Sánchez J, Quirós E. Semiautomatic detection and classification of materials in historic buildings with low-cost photogrammetric equipment. J Cult Herit 2017;25:21–30. doi:10.1016/j.culher.2016.11.017.
[21] De Fino M, Scioti A, Rubino R, Pierucci A, Fatiguso F. 'Augmented Diagnostics' for the Architectural Heritage. Int J Herit Archit 2018;2:248–60. doi:10.2495/HA-V2-N2-248-260.
[22] De Fino M, Scioti A, Rubino R, Fatiguso F. Qualificazione e valutazione di caratteristiche, patologie e prestazioni negli edifici storici mediante ambienti digitali immersivi. In: Edicom Edizioni, editor. Colloqui.AT.e 2017 DEMOLITION OR Reconstr., Monfalcone (Gorizia): 2017.
[23] Galantucci RA, Fatiguso F. Advanced damage detection techniques in historical buildings using digital photogrammetry and 3D surface anlysis. J Cult Herit 2018. doi:10.1016/j.culher.2018.09.014.

riferimento alla mappatura e monitoraggio delle manifestazioni di degrado. In particolare, si propone un approccio scalare, che prevede come fulcro l'impiego di nuvole di punti colorate e mesh poligonali testurizzate, elaborate mediante fotomodellazione di immagini da fotocamere da terra/aste telescopiche/ drone, al fine della lettura integrata e correlata delle relazioni spaziali e semantiche fra tutte le informazioni disponibili su caratteristiche, manifestazioni di degrado e misure diagnostiche.
Tali modelli, restituiti a media risoluzione, a beneficio dell'agilità e velocità di elaborazione e interrogazione, vengono riferiti a parti significative del fabbricato, all'interno di un ambiente immersivo dell'intero edificio, realizzato con foto sferiche ad alta risoluzione, navigabili in tour virtuali per la rappresentazione dal vero dello stato dei luoghi e l'archiviazione e condivisione di tutti i dati in "modalità visualizzazione". Nondimeno, nuvole di punti/mesh poligonali ad elevata accuratezza e precisione, anche mediante rilievo scanner 3D, vengono previste per lo studio di aree circoscritte e/o per aspetti specifici. Rispetto a quest'ultimo ambito, la illustrata sperimentazione di tecniche di image processing per il controllo dell'evoluzione nel tempo di lesioni e lacune appare senz'altro promettente.