



Colloqui.AT.e 2020

New Horizons for Sustainable Architecture

Nuovi orizzonti per l'architettura sostenibile

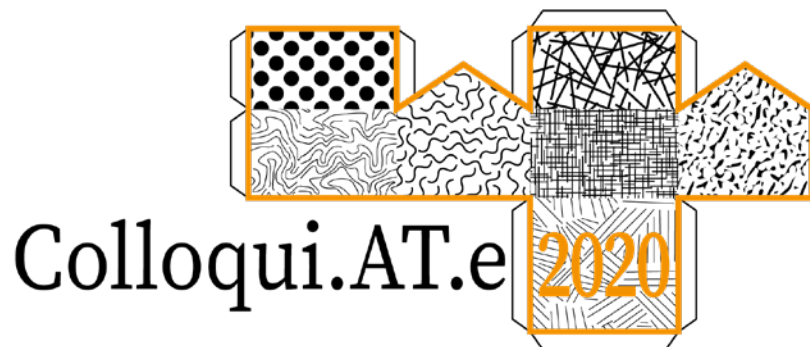
Editors

Santi Maria Cascone

Giuseppe Margani

Vincenzo Sapienza





**NEW HORIZONS
FOR SUSTAINABLE ARCHITECTURE
NUOVI ORIZZONTI
PER L'ARCHITETTURA SOSTENIBILE**

Editors

Santi Maria Cascone, Giuseppe Margani, Vincenzo Sapienza

10 dicembre 2020

Virtual meeting

Organizing Institution: University of Catania



Finalità dell'applicazione del Motion Magnification ai modelli HBIM

M. Angelosanti*

* Sapienza Università di Roma, Roma, marco.angelosanti@uniroma1.it

Abstract

In caso di evento sismico, la sicurezza umana è relazionata alla vulnerabilità del patrimonio edilizio, ed in particolare quello storico è la principale causa di interferenza che divide gli evacuanti dai luoghi sicuri.

Inoltre, le statistiche del Dipartimento della Protezione Civile evidenziano come circa il 25% dei morti causati da un terremoto siano dovuti a danni non strutturali degli edifici (caduta di tramezzi, vetrate, cornicioni, tegole, ecc.) e a fenomeni indotti dal terremoto stesso, difficilmente prevedibili con le metodologie e strumentazioni odierne.

In tal senso, la ricerca mira a sviluppare strumenti e metodi per innovare l'aspetto della valutazione speditiva della vulnerabilità degli edifici attraverso lo studio dei suoi componenti, al fine della elaborazione di scenari di danno che studino l'interferenza tra organismo edilizio ed elementi non strutturali.

Si propone l'applicazione della recente tecnica vibrometrica del Motion Magnification (MM – Moto Magnificato) in campo dell'analisi del rischio, con il fine di verificare i meccanismi di collasso di strutture in muratura, all'interno di determinate bande di frequenza.

La strutturazione del workflow di progetto risponde all'esigenza di archiviazione dei dati di indagine, basandosi sulla trasposizione in ambiente BIM del costruito storico rilevato mediante fotogrammetria e TLS (*Terrestrial Laser Scanner*).

In particolare, l'implementazione di parametri strutturali vibrometrici sarà funzionale a proporre scenari di intervento per la riduzione e risoluzione delle criticità in fase d'emergenza.

1. Introduzione

I consueti eventi calamitosi hanno mostrato come l'ambiente costruito è sempre più incline ad essere soggetto a disastri ad insorgenza improvvisa (SUOD – *Suddenly ONset Disaster*) [1], tra cui il terremoto, mostrando una scarsa resilienza. Diventa, quindi, fondamentale prevedere la risposta all'emergenza sismica e valutare la sicurezza del costruito.

Secondo la comunità scientifica [2-3] e come affermato nelle "Linee guida nazionali italiane per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale" [4], il monitoraggio

della salute strutturale (SHM – *Structural Health Monitoring*) mira a dare, in ogni momento della vita di una struttura, una diagnosi dello stato complessivo e dei materiali costitutivi [3].

Quindi, lo SHM svolge un ruolo cruciale per integrare e supportare le strategie di conservazione per i beni architettonici storici, potendo essere utilizzato per verificare lo stato di danneggiamento delle strutture dopo un evento o una serie di eventi sismici, come nel caso della recente sequenza di lunga durata dell'Italia centrale 2016-7, con il susseguirsi di scosse di magnitudo momento fino a 6.5 [2, 5].

Proprio tali eventi hanno contribuito ad accrescere l'interesse nello studio del comportamento del patrimonio edilizio esistente e a verificare gli attuali criteri di valutazione della sicurezza [6]. Importante è considerare che il comportamento strutturale degli edifici storici è reso complesso per la disomogeneità del materiale che costituisce la muratura e per la mancanza di integrità strutturale. Inoltre, la scarsa conoscenza dei molteplici eventi storici che hanno cambiato le proprietà meccaniche delle costruzioni aggiunge nuove incertezze alla modellazione.

Sebbene l'attuale capacità di calcolo disponibile sia significativa, è ancora molto difficile affrontare lo studio degli edifici storici con una modellazione discreta [7] perché il numero di variabili da indirizzare sarebbe estremamente elevato [8].

In questo contesto, indagini periodiche con tecniche di analisi non distruttiva (NDT – *Non-Destructive Testing*) possono fornire un contributo prezioso.

Ad esempio, i test che prendono in esame le vibrazioni ambientali sono in grado di fornire informazioni sulla salute globale della struttura attraverso l'indagine del suo comportamento dinamico, mirando a identificare i parametri modali che potrebbero cambiare nel tempo sia per le modificazioni delle condizioni ambientali (specialmente in termini di temperatura [4]) sia per una degradazione della salute strutturale.

Per supportare la continua innovazione delle prove NDT, i ricercatori puntano all'avanzamento tecnologico dei sistemi di sensoristica in modo da ampliare ed estendere le loro capacità predittive.

Ad oggi è stata sviluppata una varietà di dispositivi di monitoraggio tra cui sensori capacitivi, accelerometri a contatto, sensori ottici, laser, sistemi satellitari globali di navigazione GNSS, trasformatori differenziali lineari variabili [9] che presentano svantaggi come costo, dimensione, complessità dell'elettronica associata e, in particolare, la necessità di un gran numero di dispositivi per saturare la superficie da analizzare. Infatti, se così non fosse, una bassa risoluzione spaziale fornirebbe una caratterizzazione approssimativa o addirittura assente delle forme modali a causa dell'aliasing spaziale. In particolare, la risoluzione non sarebbe sufficiente per comprendere il comportamento di piccole zone critiche.

Come riportano Friswell e Mottershead [10], la possibilità di effettuare misure vibrazionali a pieno campo e ad alta risoluzione è stata a lungo auspicata, nell'ambito dello SHM, ai fini di caratterizzare, validare e aggiornare i modelli per analisi strutturali dinamiche.

Per questo sono state sviluppate diverse tecnologie di *motion capture*, come *3D Vision* [11], *2D-DIC*, *3D-DIC* [12] per valutare lo spostamento di punti o *marker* fissati sull'oggetto di studio.

Tali applicativi risolvono in parte il problema, ma restano poco pratici fuori dal laboratorio.

Alla luce di tali complicazioni, accentuate per elementi vulnerabili non strutturali [13], una soluzione che parte dalla computer-vision, è offerta dalla vibrometria visuale, con l'innovativa tecni-

ca del Motion Magnification (MM – Moto Magnificato) [14].

Il MM nasce in campo medico per avere diagnosi rapide ed efficaci di problemi cardiovascolari, poiché consente di amplificare, a partire da sequenze di frame di video e all'interno di determinate bande di frequenza (ad esempio 0.8-1.2 Hz per il battito cardiaco), i piccoli movimenti di una struttura o di sue parti, a seguito di anche minime sollecitazioni.

Il video è apparentemente statico ma, una volta elaborato, enfatizza evidenti movimenti delle singole parti dell'oggetto di studio che altrimenti risulterebbero invisibili all'occhio umano.

Il MM è frutto sia dell'evoluzione tecnologica dei sistemi hardware, cioè dell'aumento del frame-rate e della risoluzione in termini di pixel della camera, che dello sviluppo, a partire dai lavori di un gruppo di ricerca del MIT di Boston [14], di algoritmi in grado di gestire movimenti relativi a spostamenti impercettibili.

Nel presente studio è fondamentale l'inserimento di questa molteplicità di dati vibrometrici in un adeguato repository quale è l'HBIM (*Heritage Building Information Modeling*), che si offre come strumento di documentazione e conservazione del patrimonio architettonico [15], [16].

Il lavoro di ricerca si inquadra come un'indagine metodologica sperimentale sulle possibilità degli algoritmi di MM come strumenti di elaborazione video, applicati ai fini di una migliore ispezione visiva in ottica SHM. Più specificamente, vengono affrontati i problemi di rilevamento, dalla localizzazione e valutazione dei danni, fino alla visualizzazione diretta del movimento amplificato del meccanismo attivato.

In questo studio, vengono quindi esplorate le capacità della combinazione tra BIM e MM, trasferendo in parametri condivisi di progetto del modello informato gli output vibrometrici ottenuti dall'eccitazione randomica dei resti della volta a schifo del salone al piano nobile di Villa Palma Guazzaroni a Terni, dimora gentilizia risalente al XVI secolo [17].

I video magnificati e la quantificazione dello spostamento hanno permesso un'interpretazione intuitiva della deformazione, facilitando la caratterizzazione del comportamento di questa volta di notevole interesse storico e strutturale.

2. Metodologia

Workflow di ricerca

La ricerca si basa sulla creazione di un workflow, cioè di una sequenza di operazioni completa e descrivibile, che parte dal rilievo fotogrammetrico e con TLS di un organismo edilizio storico, per generare una nuvola di punti ed elaborarla criticamente in ambiente BIM (a sinistra in Fig. 1) [18].

La ricerca intende indagare quanto dell'oggetto architettonico stesso può essere tradotto in modello digitale, valutando sia il LoA (*Level of Accuracy*) con il quale tale obiettivo può essere compiuto che il LoD (*Level of Development*) necessario da raggiungere [19].

L'attenzione agli aspetti strutturali di dettaglio motiva la ricostruzione del modello con alto LoD, in cui ogni istanza verrà caratterizzata con i rispettivi parametri modali, derivanti dai dati vibrometrici, che daranno informazioni sullo stato di salute della struttura [20].

Per l'approfondimento del caso studio (Villa Palma Guazzaroni a Terni) e della parte del Sur-

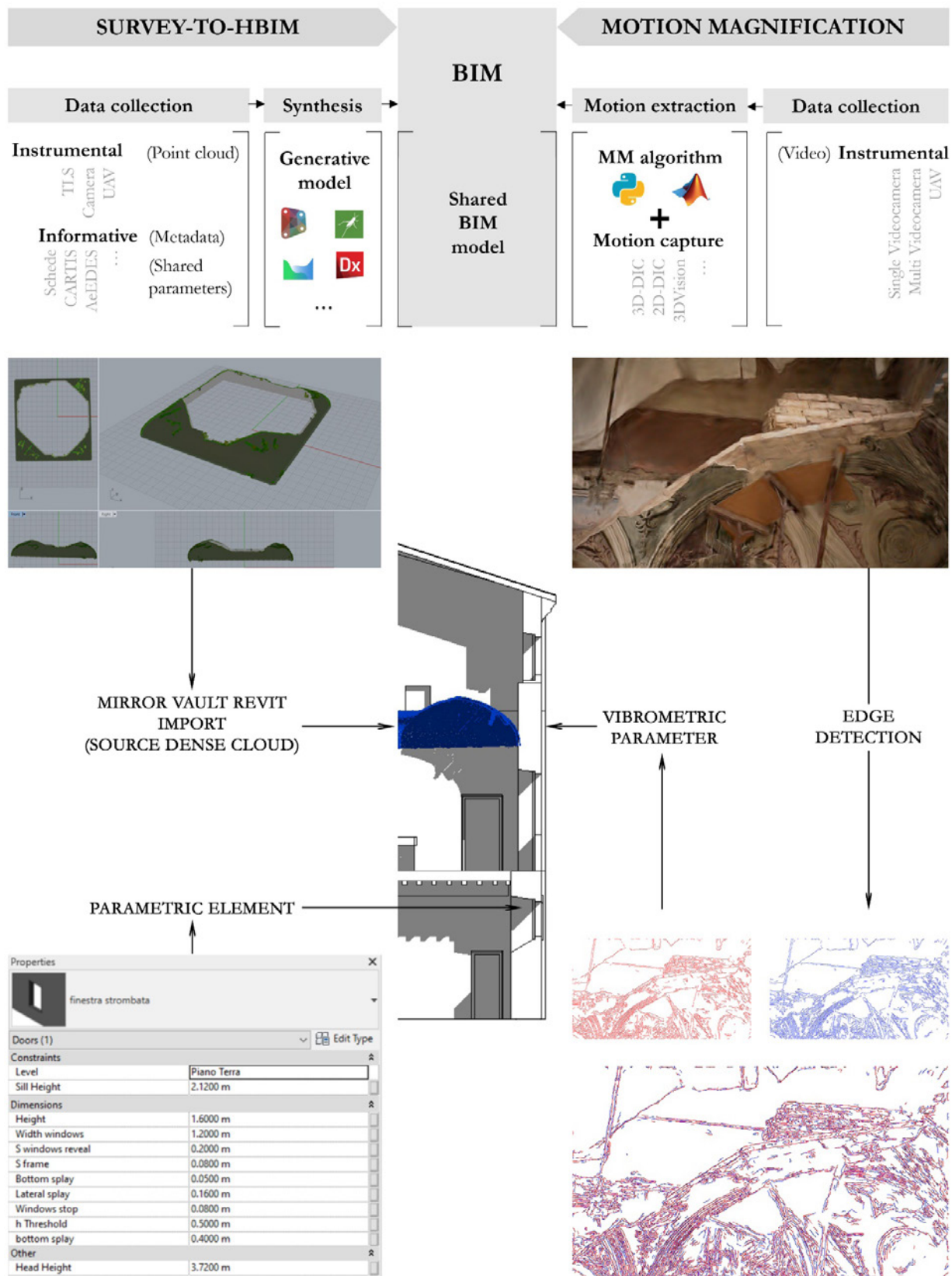


Fig. 1. Descrizione del workflow di ricerca: i due input, Survey-to-HBIM a sinistra e MM a destra, confluiscono nell'arricchimento del modello BIM che si trova al centro.

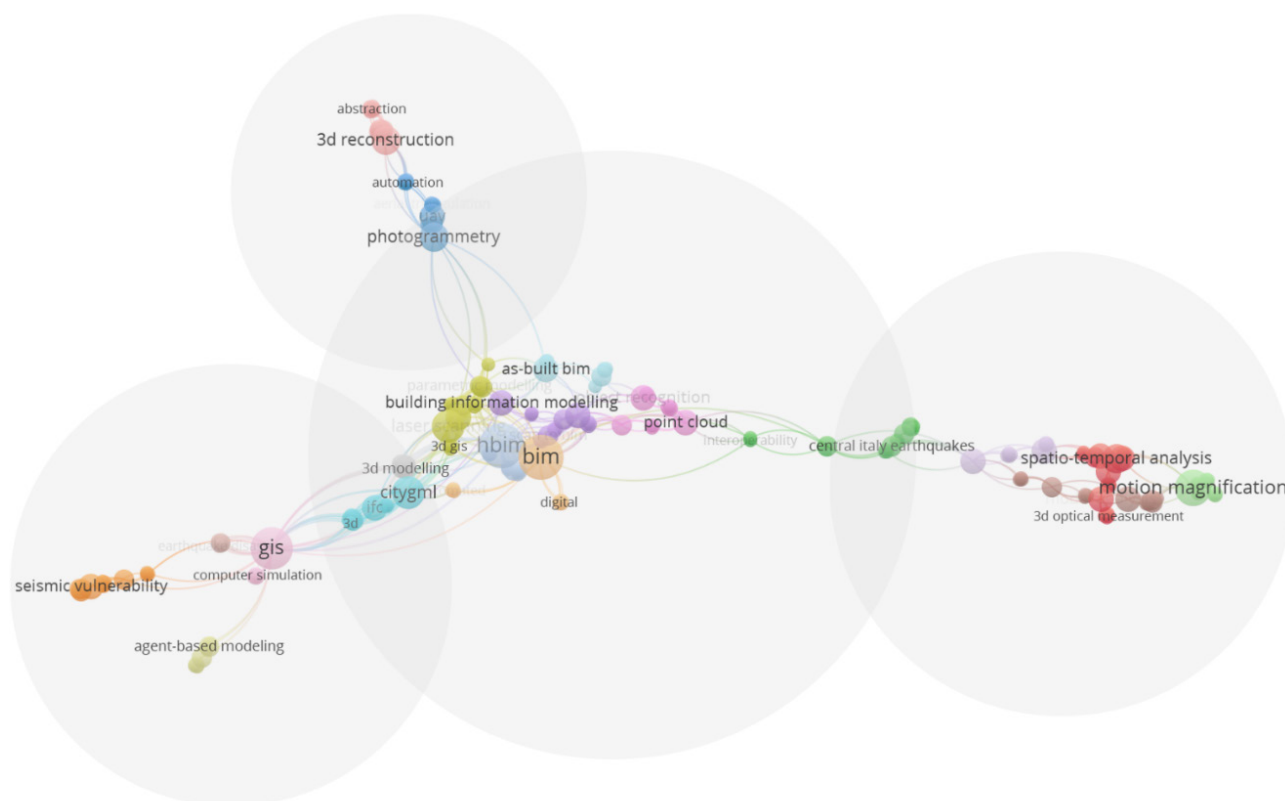


Fig. 2. Rete neurale delle keywords a ricorrenza doppia nei documenti della letteratura scientifica esaminata.

vey-to-HBIM (a sinistra in Fig. 1) si rimanda a [16, 21].

Nel seguente lavoro viene approfondita la parte relativa al MM (a destra in Fig. 1) e all'implementazione di parametri vibrometrici in ambiente BIM (al centro in Fig. 1).

Per sintetizzare e graficizzare il tema di ricerca è stata applicata la tecnica bibliometrica dell'analisi di ricorrenza delle keywords [22]. Grazie al software bibliometrico VOSviewer [23] sono state elaborate quelle a ricorrenza almeno pari a 2. Il risultato è una rete neurale (Fig. 2) in cui la dimensione di un cerchio rappresenta la ricorrenza di un termine (maggiore è la dimensione, maggiore è la ricorrenza), mentre i collegamenti tra i cerchi rappresentano la relazione tra i termini. In particolare, si può notare il ruolo baricentrico della Keyword "BIM" che funge da collegamento con il ramo della "3D RECONSTRUCTION", quello dell'analisi vibrometrica del "MOTION MAGNIFICATION" e quello della "SEISMIC VULNERABILITY".

L'obiettivo di questa applicazione metodologica è esplicitare le tendenze recenti negli studi sulla vulnerabilità urbana, trovare le lacune nella letteratura esistente, riconoscere opportunità e impostare direttrici di ricerca.

Motion Magnification

Le tecniche di MM possono essere classificate, coniando i termini dalla fluido-meccanica, tra approcci lagrangiani ed euleriani. Mentre per il primo viene tracciata una specifica feature per

ogni fotogramma, nel secondo ci si avvale del concetto matematico di campo andando a studiare i cambiamenti radiometrici dei singoli pixel della matrice bidimensionale che è il frame.

Rispetto all'approccio lagrangiano proposto in Liu et al [14], nella famiglia degli approcci euleriani qualsiasi sottogruppo di pixel può essere utilizzato per ottenere serie temporali di intensità di luminosità e quindi qualsiasi elemento della griglia può essere utilizzato come sensore "virtuale". Pertanto, il costo computazionale viene notevolmente ridotto rispetto all'utilizzo dei dispositivi di monitoraggio consolidati, poiché vengono evitate attività time-demanding come il posizionamento, la relativa calibrazione e il costante monitoraggio. Un algoritmo interessante, sviluppato da Wadhwa et al. [24], permette l'ingrandimento del movimento basato sulle fasi (PBMM – *Phased-Based Motion Magnification*). È un nuovo approccio euleriano all'elaborazione video in cui i segnali vengono decomposti utilizzando complessi filtri piramidali orientabili [25]. La fase locale nel dominio del tempo viene filtrata temporalmente e amplificata di un fattore di ingrandimento. Quando le immagini vengono ricostruite, il risultato è l'ingrandimento del movimento armonico in quella banda di frequenza.

In particolare, rispetto alla tecnica lineare euleriana proposta in Wu et al. [26], nell'algoritmo PBMM il rumore nel video viene riconosciuto e non amplificato insieme al contenuto di interesse, supportando fattori di amplificazione più grandi senza distorsione.

L'algoritmo PBMM è stato integrato da Chen et al. [27] con una tecnica di rilevamento dei bordi (Edge Detection) per descrivere le forme di deflessione operativa (ODS – *Operating Deflection Shape*) ed evidenziarne l'ingrandimento. In un'immagine, un bordo interno è una curva che segue un percorso di rapido cambiamento di intensità e spesso risulta associato ai confini degli oggetti in una scena.

Analogamente, Fioriti et al. [28] ha utilizzato la scheletronizzazione morfologica dell'immagine per il rilevamento dei contorni significativi, ai fini del riconoscimento dei punti dell'oggetto edilizio più inclini a subire danneggiamento.

Parametri condivisi nei modelli HBIM

L'HBIM [15], in questo contesto, viene sfruttato per l'alto potenziale che offre nell'organizzazione e gestione dei dati, siano essi storici, geometrici o relativi all'apparecchiatura costruttiva. L'unicità delle costruzioni storiche, unita alla logica preindustriale che le governa, richiede l'utilizzo di famiglie strutturate in modo da garantire l'inclusione nel modello delle caratteristiche costruttive (materiali, tecnologia costruttiva, stato di conservazione): il TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) insieme alla fotogrammetria digitale sono unanimemente considerati gli strumenti consolidati per la raccolta accurata di tali dati sulla complessità dell'edificio storico [15].

Diventa fondamentale, quindi, strutturare un'organizzazione parametrica interna al modello mediante l'utilizzo di parametri condivisi, definiti come contenitori di informazioni utilizzabili in più famiglie o progetti. Essi consistono in un file .txt indipendente, che può essere caricato in rete per consentirne l'accesso ad altri utenti, in modo da accedervi da diverse famiglie o diversi progetti. Tali parametri possono essere suddivisi per discipline, ad esempio "Structural", e sono la base per la creazione di parametri condivisi di progetto, sia di istanza che di tipo a seconda che il valore del parametro cambi o meno per tutte le istanze di un gruppo.

3. Sperimentazione

Acquisizione dei video

In primo luogo sono stati registrati diversi video, da vari punti di vista, della volta a schifo parzialmente crollata del salone al piano nobile di villa Palma-Guazzaroni [21] durante la campagna del 2 gennaio 2020.

Le riprese sono state effettuate per mezzo di una camera SONY A7 mirrorless full-frame (risoluzione video 1920x1080 pixel) in formato AVCHD (*Advanced Video Coding High Definition*) e modalità 50p.

A differenza della modalità 50i, che registra 50 frame al secondo utilizzando il sistema di scansione interlacciata, la 50p registra 50 frame al secondo utilizzando il sistema di scansione progressiva. Il sistema di scansione interlacciato legge alternativamente linee di scansione pari e dispari, mentre il sistema di scansione progressiva le legge simultaneamente, quindi ha una doppia informazione per unità di tempo rispetto al sistema di scansione interlacciata e, per questo, è stata la modalità utilizzata per l'acquisizione. La scelta della SONY A7 è dovuta alla grande qualità del sensore full-frame, che permette di ottenere video più luminosi con meno disturbo e maggiore nitidezza nei dettagli rispetto ai sensori APS-C. Durante i video si è avuta cura di evitare grandi movimenti di altri oggetti non di interesse, che restano una delle più importanti fonti di rumore per il MM, sebbene ci siano stati notevoli passi in avanti nel trattamento di video in condizioni non ottimali [29]. Inoltre, per evitare vibrazioni della camera, le riprese sono state effettuate con l'ausilio di un treppiedi.

Le principali fonti di vibrazione sono quelle ambientali, quindi casuali come il vento e i fenomeni atmosferici in generale, il movimento di persone, il traffico veicolare.

Per una corretta riproduzione del segnale è necessario che sia rispettato il limite di Nyquist-Shannon [26] secondo cui la frequenza di campionamento del segnale, che nel caso di acquisizione video coincide con il valore di frame rate (fps), deve essere maggiore del doppio della frequenza massima del dominio temporale:

$$f_{\text{campionamento}} \geq 2 f_{\text{max}} \Rightarrow f_{\text{fps}} \geq 2 f_{\text{max}}$$

Più alta sarà la f_{fps} , maggiore sarà il range di frequenze magnificabili. Questo fattore è fondamentale, all'interno della ricerca, per il corretto svolgimento dell'analisi con MM, dato che essa si incentra sugli edifici dell'edilizia storica e sui loro precisi elementi costitutivi più vulnerabili, i cui modi di vibrazione sono medio-alti [30].

Quindi, nel presente caso, la frequenza massima del moto da amplificare è di 50 Hz/2=25 Hz, al di sopra della quale sarebbero introdotte frequenze spurie a causa dell'aliasing. La risoluzione in frequenza

$$\Delta f = \frac{f_{\text{campionamento}}}{N f_{\text{frames}}}$$

è definita come il rapporto tra la frequenza di campionamento e il n° dei campioni. Per ottenere una risoluzione in frequenza delle elaborazioni di almeno 0.1 Hz, i video devono essere lunghi almeno 10s. La lunghezza dei video eseguiti per la sperimentazione è tra i 15 e i 20 secondi.

Processamento dei video

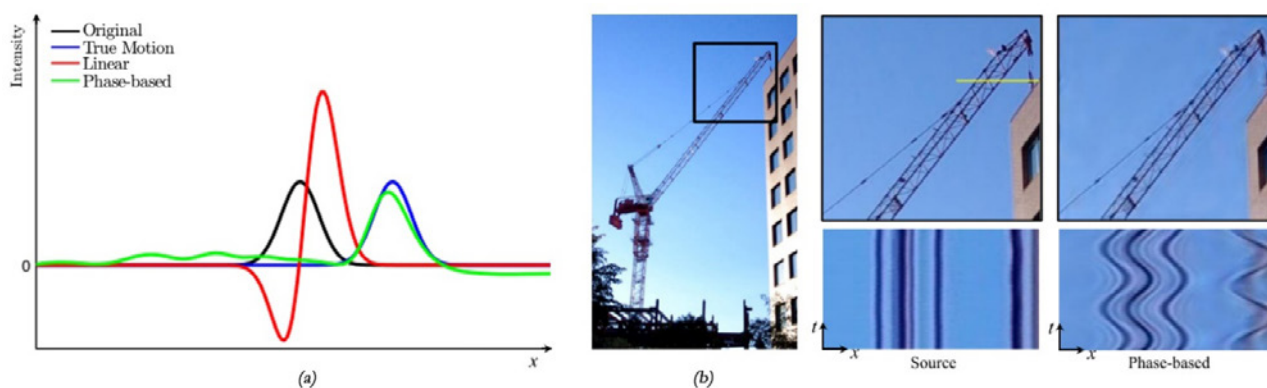


Fig. 3. Sfasamento $x + \delta(t)$ per moti non periodici con fattore di magnificazione α , in verde il risultato dell'algoritmo PBMM (a) ed esempio applicativo (b), sviluppato da [24].

In questo studio, la tecnica di MM impiegata è quella basata su fasi (PBMM) sviluppata da Wadhwa et al. [24]. Questo algoritmo sfrutta i segnali di fase di complesse piramidi orientabili, in posizioni e orientamenti diversi per identificare i movimenti locali nelle sottobande spaziali di un'immagine.

Per intuire il processo consideriamo un profilo di intensità del dominio spaziale monodimensionale generico, $f(x)$, che viene spostato secondo una funzione del dominio del tempo, $\delta(t)$, e può essere descritto da una decomposizione della serie di Fourier come segue:

$$f(x + \delta(t)) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} A_{\omega} e^{i\omega_s(x + \delta(t))}$$

dove ω_s è la frequenza e A_{ω} l'ampiezza della sinusoidale. La fase viene codificata come sfasamento $x + \delta(t)$ rispetto alla posizione iniziale. Quindi, il segnale di fase di ogni piramide viene filtrato tramite un filtro passa-banda e moltiplicato per un fattore α per ottenere una complessa sinusoidale con movimento $1+\alpha$ volte l'input:

$$\widehat{S}_{\omega_s}(x, t) = A_{\omega} e^{i\omega_s(x + (1 + \alpha)\delta(t))}$$

Lo spostamento di fase di una singola frangia sinusoidale per un movimento lungo la direzione x è mostrato in Fig. 3. La ricostruzione del video mostra una versione ingrandita del moto presente in quella determinata banda di frequenza, precedentemente impercettibile. Considerando la natura casuale della vibrazione registrata, maggiore è la sequenza, migliori e più ricchi sono i risultati. Tuttavia, l'ingrandimento del movimento basato sulla fase richiede molta memoria e questo limita la lunghezza della sequenza.

Per questa ricerca è stato impiegato un computer con processore i7-7700k e 32 GB di RAM in modo da processare agevolmente video in full-hd di 20 secondi.

Per la corretta esecuzione dell'algoritmo, tra i filtri applicabili è stato scelto quello di mezza ottava poiché richiede un onere computazionale non eccessivo, a metà tra il filtro di ottava e di $1/4$ di ottava, fornendo buoni risultati [27-31].

Un ulteriore parametro su cui è stato fondamentale ragionare è la definizione delle bande di frequenza da magnificare poiché, come precedentemente evidenziato, il MM funge da filtro passa-banda.

Per consentire un'adeguata discretizzazione degli intervalli di frequenza, e allo stesso tempo renderli facilmente parametrizzabili, si è proceduto con bande di 5 Hz. Il fattore di magnificazione che ha consentito di ottenere risultati intuitivamente comprensibili è stato $\alpha=50$.

Per rendere quantificabile la deformazione mostrata nei video, nella ricerca è stato utilizzato un algoritmo Canny Edge Detection per rilevare i bordi significativi dei singoli frame. Dopo una iniziale rimozione del rumore di fondo dell'immagine (Noise Reduction), viene valutato il gradiente di intensità dell'immagine (Intensity Gradient). Lo step successivo è la Non-maximum Suppression, in cui alcuni pixel vengono rimossi in modo che non potranno essere confusi come edge. Infine l'ultima fase è l'applicazione di una soglia di isteresi (Hysteresis Thresholding).

4. Implementazione di parametri vibrometrici in BIM

Si è utilizzato il modello a LoD 350 [32] della volta a schifo del salone al piano nobile di villa Palma Guazzaroni per il quale si rimanda a [16-21].

La ricerca si indirizza sull'implementazione di 5 parametri condivisi vibrometrici discretizzati per bande di frequenza di 5 Hz di intervallo tra 0 e 25 Hz (0-5; 5-10; 10-15; 15-25 Hz).

Dal file dei parametri condivisi sono stati strutturati, di conseguenza, dei parametri di progetto in modo da poter caratterizzare l'istanza di interesse con il valore dello spostamento misurato, ottenuto incrociando i dati dell'Edge Detection e della nuvola di punti, diviso il fattore di magnificazione $\alpha=50$ per ottenere il valore reale.

5. Risultati e discussione

Applicazione del MM

Nel presente contributo è stato applicato il MM in regime di linearità con vibrazioni ambientali, per cui è possibile osservare quali sarebbero gli effetti di scosse sismiche estremamente forti pur essendo in presenza di sollecitazioni di bassa intensità: l'oggetto edilizio rimane intatto, con notevole risparmio di tempo e risorse [28].

La metodologia innovativa si basa sullo sfruttare un dominio spaziale coincidente con la superficie dei singoli frame, visti come matrici bidimensionali di pixel con una determinata cronologia temporale di variazione dell'intensità luminosa, dal primo all'ultimo fotogramma del video, che contiene le informazioni sugli spostamenti dei punti fisici relativi ai pixel. Ogni pixel è stato utilizzato come sensore virtuale che produce un segnale lungo quanto il video (dominio temporale). La grande quantità di tali sensori virtuali garantisce l'omogeneità dei dati sulla superficie di studio, al contrario delle soluzioni con sensori fisici per le quali si possono selezionare solo alcuni punti, raggiungibili e orizzontali [30].

Queste serie temporali contengono le informazioni sugli spostamenti dei punti fisici relativi ai pixel, sebbene non siano effettivamente reali. Naturalmente, non tutta la superficie della struttura genera informazioni utili e pertanto lo studio si focalizza sull'area della volta a schifo con un

rapporto segnale-rumore (SNR) elevato.

Per stabilire con certezza che gli spostamenti misurati negli intervalli di frequenze selezionati fossero corretti, le analisi sono state eseguite su ulteriori video, con identiche condizioni di luminosità, che hanno confermato i risultati ottenuti.

Inoltre, per individuare e verificare i punti più vulnerabili della volta, sono state effettuate riprese a tutte le restanti parti puntellate.

Il fattore di magnificazione scelto ($\alpha=50$) ha permesso di produrre video che mostrano un chiaro movimento a occhio nudo, senza evidenti errori dovuti alla sfocatura derivante da un ingrandimento eccessivo.

Come si può vedere dalla Fig. 4 raffigurante i risultati dell'algorithmo di Canny Edge Detection, il confronto dei frame descrive il comportamento locale della volta e si notano deformazioni diverse e di diversa entità da una banda di frequenza all'altra.

Nella banda di frequenza tra 0-5 Hz il moto che viene maggiormente magnificato è quello dei puntelli che reggono la volta. Sebbene questi non siano gli effettivi oggetti di studio, per tutta la durata del video viene registrata un'oscillazione massima di circa $50\text{mm}/(\alpha=50) = 1\text{mm}$ di ampiezza, che è bene poter documentare per comprendere e caratterizzare dinamicamente la volta. Nella stessa banda di frequenza è infatti percepibile un movimento normale alla superficie della volta, quindi perpendicolare alle facce maggiori dei laterizi in foglio, di entità massima pari a circa $20\text{mm}/(\alpha=50) = 0.4\text{mm}$.

Tra 5-10 Hz e 10-15 Hz non vi sono movimenti significativi, mentre tra 15-20 Hz si può osservare il movimento di tutto il frame, probabilmente per problemi di interazione cavalletto-camera sensibili ad una frequenza all'interno del range considerato.

Tra 20-25 Hz è interessante come la combinazione di MM ed Edge Detection permetta di osservare lo spostamento degli edges corrispondenti ai giunti tra laterizi della volta, in particolare il giunto con una fessura a scaletta nella malta evidenziato in Fig. 4, a conferma che a frequenze più alte corrispondono moti più locali. Tale fessura risente del movimento del puntello che si trova immediatamente al di sotto e presenta uno spostamento massimo di circa $15\text{ mm}/(\alpha=50) = 0.3\text{ mm}$ nella soluzione di continuità.



Fig. 4. Frame del video processato con algoritmo PBMM a 25 Hz (a sinistra); Sovrapposizione di frame del video processato con algoritmo PBMM a 25 Hz e Canny Edge Detection (a destra).

Verso un BIM STRUCTURAL USE

La scelta degli intervalli di frequenza in bande di 5 Hz permette di considerare l'eventuale spostamento di frequenza nel tempo che è un chiaro segnale di danno [31], così da avere risultati significativi. Più stretto è l'intervallo, più focalizzata è l'amplificazione e meno rumore viene amplificato. I risultati di queste analisi possono essere usati come valori di riferimento dopo ogni misurazione periodica durante la vita della struttura, in ottica SHM (Fig. 5).

È necessario considerare che nel caso di edifici storici non stiamo misurando il valore dello stato vergine della struttura, ma visualizzando l'evoluzione di un meccanismo di danno, nel caso studio già attivato. Risulta, quindi, difficile dedurre una formulazione matematica basata sulla VBI (Vibration Based Inspection) [33] e per questo la presente proposta si inquadra in un'ottica più qualitativa, per bande di frequenza.

Rispetto al rapporto tra frequenza naturale allo stato vergine e frequenza naturale in una misurazione periodica, nella presente ricerca si propone:

$$if \left| \frac{\delta_{\Delta f_i^p}}{\delta_{\Delta f_i}} - 1 \right| < \gamma \rightarrow NO ALARM$$

if else \rightarrow *NO ALARM*

in cui $\delta_{\Delta f_i}$ = spostamento massimo in una banda di frequenza i di intervallo 5 Hz (misurazione iniziale) e $\delta_{\Delta f_i^p}$ = spostamento massimo nella stessa banda di frequenza di intervallo 5 Hz (misurazione periodica). Tale relazione è graficizzata in basso a sinistra in Fig. 5.

6. Conclusioni

Nel lavoro presentato è stata indagata la potenzialità di effettuare un'analisi qualitativa della vulnerabilità dei resti di una volta a schifo, mediante la tecnica del MM. A tal fine, è risultato vantaggioso trasportare i dati vibrometrici in parametri condivisi BIM per facilitare il monitoraggio della salute strutturale dell'oggetto edilizio. L'impostazione metodologica adottata sfrutta il MM come selezionatore di frequenze cercando di intercettare modi di vibrare significativi.

La ricerca è finalizzata all'individuazione di strumenti innovativi, e di facile elaborazione rispetto alla strumentazione sensoristica consolidata, per la valutazione della sicurezza all'interno del costruito storico, studiando come il danneggiamento di elementi non strutturali possa interferire con il network delle vie di fuga, generando macerie durante e dopo un evento sismico. Nel lavoro sono stati presi in esame i resti di una volta a schifo puntellati, ma tale ragionamento può essere esteso a intonaci, rivestimenti, paramenti, tamponature, modanature, cornicioni, tegole.

Un primo evidente vantaggio, avuto dall'estensione della tecnica del MM dal campo medico a quello dell'edilizia storica, è stato l'ottenimento di output significativi sulla risposta sismica evitando di raggiungere livelli di accelerazione elevati. Il MM è in grado, quindi, di fornire visivamente indicazioni predittive sulle zone più critiche e sull'integrità della struttura muraria prima che si concretizzi un palese danneggiamento [11].

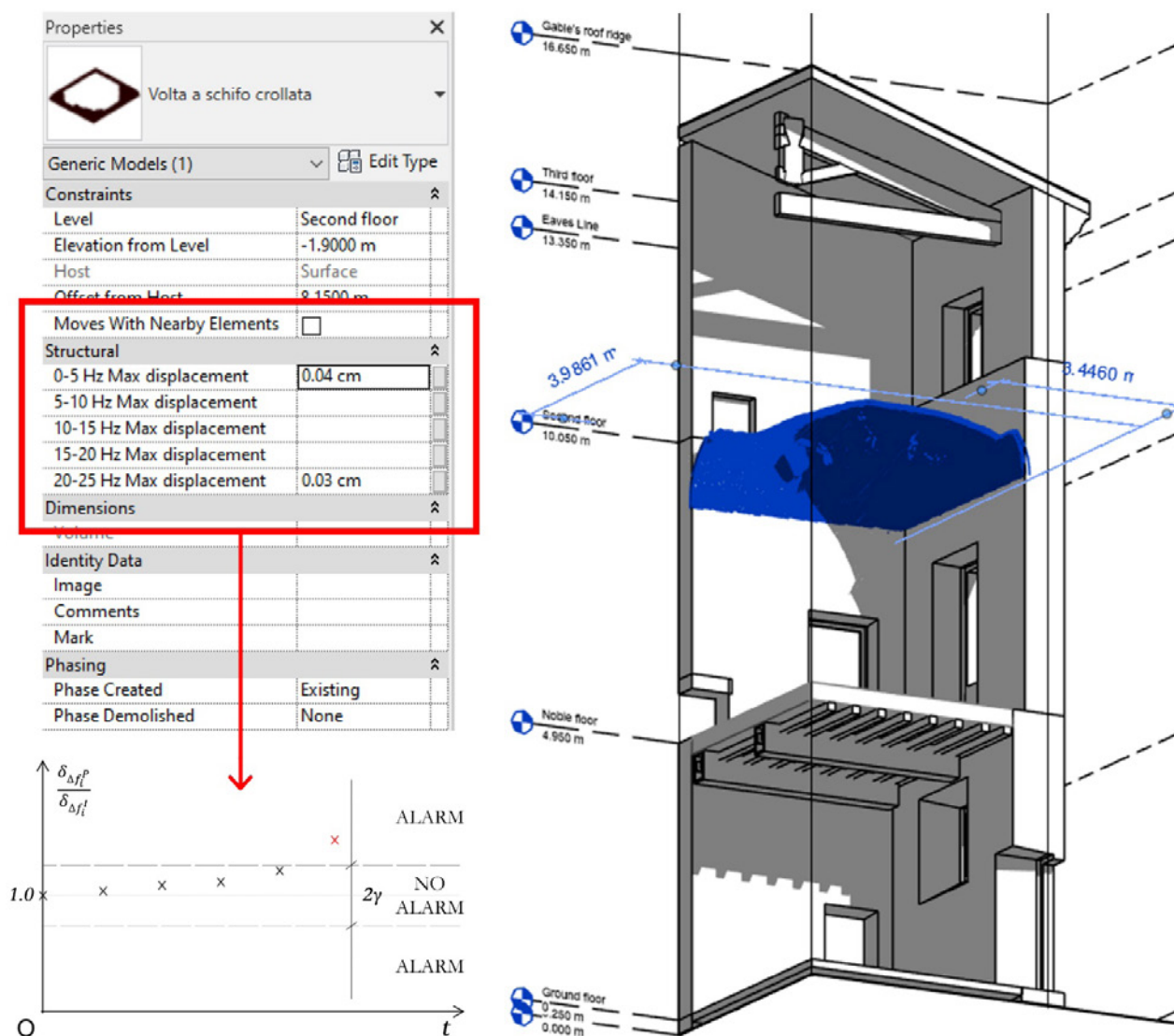


Fig. 5. Parametri vibrometrici in BIM della volta oggetto di studio, evidenziata in blu.

La metodologia proposta si presta ad essere implementata in approcci di valutazione di vulnerabilità sia empirico-osservazionale che analitico-meccanici.

Nel primo caso, analogamente a quello presentato nella presente ricerca, l'analisi MM è incisiva per lo studio di indicatori delle carenze intrinseche di carattere costruttivo (come la disconnessione muraria, la presenza di solai sfalsati, l'interazione piano-altimetrica, ecc) poiché il sisma tende a colpire dove si concentrano soluzioni tecniche e sistemi di connessione più carenti, come spesso avviene nei nodi tra pareti ed orizzontamenti [34].

Nel secondo caso l'indagine si concentra sui parametri modali (frequenza di risonanza, rapporto di smorzamento, forma del modo di vibrazione), atti a dare informazioni sullo stato di salute della struttura e sull'avanzamento del degrado [35]. In questo ambito, gli output del MM possono essere utilizzati per calcolare, ad esempio, la densità spettrale di potenza (PSD – Power Spectral Density) [36].

Inoltre, per il caso studio presentato, lo sviluppo del modello HBIM ad alto LoD ha garantito un adeguato repository dei dati vibrometrici in parametri condivisi di istanza. L'obiettivo dell'integrazione tra HBIM e output del MM è garantire un approccio speditivo, economico e contact-less per un'applicazione veloce a larga scala, per integrare l'approccio basato sull'attribuzione della caratterizzazione costruttiva su base tipologica [37].

I futuri lavori di ricerca saranno indirizzati alla validazione dei risultati del MM con strumenti sensoristici consolidati, come velocimetri, sebbene tale corrispondenza e conferma di veridicità sia stata più volte dimostrata in letteratura [20-38]. Verrà inoltre eseguito un monitoraggio periodico del caso studio proposto nel contributo, per dare evidenza di eventuali anomalie.

Dai risultati presentati, emerge la grande potenzialità della tecnica del MM per andare oltre lo SHM della singola struttura a favore del passaggio alla scala urbana [39], prospettiva che verrà approfondita. Gli strumenti metodologici da sviluppare ragionano sull'analisi di scenari, per andare ad innovare l'aspetto della valutazione speditiva della vulnerabilità del tessuto urbano e dei suoi componenti, per la predizione di scenari di danno tramite analisi di vibrometria visuale.

Riferimenti bibliografici

- [1] UNISDR. Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction. United Nations Gen. Assem. vol. 41, no. December: 1-44, 2016.
- [2] Roselli I et al. Health assessment and ambient vibration testing of the 'Ponte delle Torri' of Spoleto during the 2016-2017 Central Italy seismic sequence. *J. Civ. Struct. Heal. Monit.* vol. 8, 2: 199-216, 2018.
- [3] Harmanci YE, Gülan U, Holzner M, Chatzi E. A Novel Approach for 3D-Structural Identification through Video Recording : Magnified Tracking. *Sensors*, 1-16, 2019.
- [4] Ministero dei Beni e le Attività Culturali. Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme tecniche per le costruzioni. 2010.
- [5] Luzi L, et al. Preliminary study of Rieti earthquake ground motion data V2. 2016.
- [6] Dolce M, Speranza E, Di Pasquale G, Giordano F, Bocchi F. Indici di operatività per la valutazione della Condizione Limite di Emergenza (CLE). In: 32 Italian Conference GNGTS. 2013, no. November.
- [7] Cannizzaro F. Un nuovo approccio di modellazione della risposta sismica degli edifici storici. Università degli Studi di Catania, 2011.
- [8] Caddemi S et al. La vulnerabilità sismica degli edifici storici in aggregato. Nuove metodologie negli approcci speditivi e di modellazione strutturale. Roma: Edizioni Efestò, 2018.
- [9] Hwang J, Yun H, Park SK, Lee D, Hong S. Optimal methods of RTK-GPS/accelerometer integration to monitor the displacement of structures. *Sensors* vol. 12, 1:1014-1034, 2012.
- [10] Friswell MI, Mottershead JE. Finite element model updating in structural dynamics. 1995.
- [11] Roselli I, Fioriti V, Romano R. Sperimentazione dell'ENEA condivisa in remoto per la diffusione di tecnologie innovative di protezione antisismica. no. January 2018, 2017.
- [12] M. S. & C. S. MESOCOS. DIC measurement in engineering applications. no. August, 113, 2015.
- [13] Bernardini G, Quagliarini E, D'Orazio M. Strumenti per la gestione dell'emergenza nei centri storici. EdicomEdizioni, Monfalcone, 2018.

- [14] Liu C, Torralba A, Freeman WT, Durand F, Adelson EH. Motion Magnification. *ACM Trans. Graph.*, 519-526, 2005.
- [15] Murphy M, McGovern E, Pavia S. Historic building information modelling (HBIM). *Struct. Surv.*, vol. 27, 4: 311-327, 2009.
- [16] Angelosanti M, Carpiceci M. Dal rilievo alla ricostruzione storica, il caso di villa Palma-Guazzaroni. In: *3D Modeling & BIM 2019*, 2019.
- [17] Angelosanti M. Sintesi di conoscenza e rappresentazione della costruzione storica, il caso di villa Palma a Terni. In: Cavallera HA. *L'unica via è il pensiero*. Ed. Terni: Intermedia Edizioni, 2019, 97-113.
- [18] Apollonio FI, Gaiani M, Zheng S. BIM-based modeling and data enrichment of classical architectural buildings. *SCIRES-IT Sci. Res. Inf. Technol.* vol. 2, 2: 41-62, 2012.
- [19] Brusaporci S, Maiezza P, Tata A. A framework for architectural heritage hbim semantization and development. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. – ISPRS Arch.*, vol. 42, 2: 179-184, 2018.
- [20] Molina-Viedma AJ, Lopez-Alba E, Felipe-Sesé L, Diaz FA. Operational Deflection Shape Extraction from Broadband Events of an Aircraft Component Using 3D-DIC in. *Hindawi Shock Vib.* vol. 2019, no. Dic, 2019.
- [21] Currà E, D'Amico A, Angelosanti M. HBIM per la conoscenza e la rappresentazione della costruzione storica. Il caso di villa Palma-Guazzaroni a Terni. In: *Colloqui.AT.e 2019 Ingegno e costruzione nell'epoca della complessità*, 2019, 628-637.
- [22] Koren D, Rus K. The potential of open space for enhancing urban seismic resilience: A literature review. *Sustain.*, vol. 11, 21, 2019.
- [23] van Eck NJ, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics* vol. 84, 2: 523-538, 2010.
- [24] Wadhwa N, Freeman WT. Phase-Based Video Motion Processing. vol. 32, 4, 2013.
- [25] Simoncelli EP, Freeman WT. The steerable pyramid : A flexible architecture for multi-scale derivative computation Eero P Simoncelli GRASP Laboratory, Room 335C 3401 Walnut St Philadelphia, PA 19104-6228 William T Freeman Mitsubishi Electric Research Laboratories Cambridge, MA 02. 2nd IEEE Int. Conf. Image Process. Washington, DC., vol. III, 444-447, 1995.
- [26] Wu H, Rubinstein M, Shih E, Freeman W. Eulerian Video Magnification for Revealing Subtle Changes in the World. 2012.
- [27] Chen JG, Wadhwa N, Cha YJ, Durand F, Freeman WT, Buyukozturk O. Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification. *J. Sound Vib.* vol. 345: 58-71, 2015.
- [28] Fioriti V, Roselli I, De Canio G. Applicazione della vibrometria visuale alla sperimentazione sismica su tavola vibrante. no. October, 2017.
- [29] Wu X, Yang X, Jin J, Yang Z. Amplitude-based filtering for video magnification in presence of large motion. *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, 7: 12-14, 2018.
- [30] Liberatore D, Masini N, Pagliuca A. Il restauro strutturale come atto critico. Il caso del rosone di Troia. In: *Colloqui.AT.e 2016*, 2016.
- [31] Civera M, Zanotti Fragonara L, Surace C. An Experimental Study of the Feasibility of Phase-Based Video Magnification for Damage Detection and Localisation in Operational Deflection Shape. *Strain*. 2020.

- [32] BIM Forum. Level of Development (LOD) Specification Part I & Commentary. 2019.
- [33] Ritter A. Aalborg Universitet Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures Rytter, Anders. University of Aalborg, 1993.
- [34] Mochi G, Predari G. La vulnerabilità sismica degli aggregati edilizi : una proposta per il costruito storico. EdicomEdizioni, 2016.
- [35] Garesci F, Catalano L, Petrone F. Experimental results of a damage detection methodology using variations in modal parameters,” *Exp. Mech.*, vol. 46, 4: 441-451, 2006.
- [36] Fioriti V, Roselli I, Tati A, De Canio G. Historic masonry monitoring by motion magnification analysis. *WIT Trans. Ecol. Environ.* vol. 223, no. December: 367-375, 2017.
- [37] Italian technical commission for seismic micro-zoning. Manuale per l’analisi della Condizione Limite per l’Emergenza (CLE) dell’insediamento urbano. 2014.
- [38] Fioriti V, Roselli I, Tati A, Romano R, De Canio G. Motion magnification analysis applied to the dynamic identification of historic constructions. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* vol. 364, 1, 2018.
- [39] Dasari S, Dorn C, Yang Y, Larson A, Mascareñas D. A framework for the identification of full-field structural dynamics using sequences of images in the presence of non-ideal operating conditions. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 29, 17: 3456-3481, 2018.

