



Potenzialità del moto magnificato nel monitoraggio dei ponti storici: il caso del Ponte delle Torri di Spoleto

Vincenzo Fioriti^a, Ivan Roselli^a, Massimiliana Ruberto^b, Gerardo De Canio^a

^a ENEA, C.R. Casaccia, Laboratorio SSPT-MET-DISPREV Via Anguillarese 301 Roma, Italia

^b Università di Roma Tre, Via della Vasca Navale, Roma, Italia

Keywords: Patrimonio culturale; moto magnificato; danneggiamento da vibrazioni

ABSTRACT

Il Moto Magnificato (MM) è una metodologia di recente introduzione che consiste nella amplificazione di piccoli spostamenti ravvisabili nei comuni video digitali. Non si tratta di un ingrandimento delle immagini, ma di una vera e propria amplificazione dei piccoli moti delle strutture che altrimenti risulterebbero invisibili, pur lasciando inalterata la topologia della singola immagine. I video sono processati tramite algoritmi recentemente implementati dal MIT di Boston e finora utilizzati prevalentemente in altri campi (medicina, fisiologia, meccanica, proprietà dei materiali). Recentissimo è il tentativo di applicare questa tecnica all'analisi delle vibrazioni anche in campo strutturale. Un rilevante vantaggio del MM consiste nell'utilizzo della mappatura delle superfici riprese dalla videocamera come matrice di "sensori virtuali" contactless. In pratica ogni pixel è interpretato come un sensore, che acquisisce e registra una determinata grandezza fisica per tutta la durata del video, frame dopo frame. Il segnale è dato dalla variazione di luminosità del pixel e può essere trattato tramite le tradizionali tecniche di analisi in frequenza. Ogni punto della superficie del campione ripreso nel video rappresenta un sensore, quindi potenzialmente si hanno a disposizione milioni di punti di misura per i moderni video dalle dimensioni di vari mega pixel. Utilizzando videocamere ad alta risoluzione e alta velocità si ottengono risultati notevoli, ma impongono l'impiego di risorse hardware e software rilevanti dovendo elaborare una quantità di dati molto elevata. Per tale motivo, nella presente memoria si esplora la potenzialità di questa tecnica con video acquisiti da comuni smartphone commerciali. In particolare, se l'oggetto ripreso oscilla a frequenze proprie di pochi Hz, come succede in molte strutture reali, le comuni velocità di ripresa (30-60 fps) sono teoricamente sufficienti. Inoltre, per limitare le risorse di calcolo necessarie, si seleziona un numero limitato di pixel con caratteristiche ottimali (regione di interesse, o ROI). Tale selezione, va eseguita sui pixel con maggiore contrasto rispetto ai pixel adiacenti in modo da aiutare l'efficacia degli algoritmi. Vari criteri possono essere utilizzati per una scelta ottimale della ROI, tra cui quella della massima entropia di immagine. Comunque, a posteriori si possono scegliere altri pixel da elaborare, eventualmente tutti quelli che rappresentino la struttura studiata.

Per l'uso efficace del MM per il monitoraggio vibrazionale in campo, ad esempio di ponti o edifici reali, occorre porre attenzione ad alcune criticità (condizioni di illuminazione, punti di vista non ottimali, ecc.), decisamente superiori alle condizioni controllate di laboratorio. Nella presente memoria si mostra l'applicazione del MM per l'identificazione delle frequenze principali del Ponte delle Torri di Spoleto, un'opera monumentale in muratura storica risalente in gran parte all'epoca medioevale. Oltre alle riprese video con un comune smartphone per il MM, il Ponte è stato studiato estensivamente per mezzo di velocimetri triassiali i cui dati sono stati elaborati con tecniche di analisi modale operativa (OMA). I risultati ottenuti tramite OMA hanno costituito il riferimento per la validazione degli analoghi valori modali ottenuti dalla metodologia del Moto Magnificato. Nonostante l'acquisizione dei video per mezzo di un comune smartphone commerciale, l'elevato livello di rumore e le difficoltà ambientali incontrate nella registrazione all'aperto per del Ponte, i risultati ottenuti si sono rivelati molto promettenti, con errori nella prima frequenza modale inferiore al 10%.

1 INTRODUZIONE

L'idea di sfruttare registrazioni video per analizzare strutture, ponti, edifici non è nuova, ma fino a pochissimi anni fa non si erano ottenuti

risultati apprezzabili, soprattutto a causa delle difficoltà connesse alla elaborazione delle immagini. Tuttavia, di recente sono stati compiuti grandi progressi grazie a nuovi algoritmi sviluppati presso il Massachusetts Institute of

Technology di Boston (Liu et al. 2005). Tali algoritmi, denominati moto magnificato (MM) o aumentato (MA), sono in grado di amplificare i piccoli e piccolissimi spostamenti che una struttura subisce a seguito di una qualche sollecitazione e che in genere non sono rilevabili. In un certo senso, i piccoli moti presenti nel video originale vengono amplificati nel video processato come se si disponesse di un microscopio. Il video, preferibilmente, ma non necessariamente, registrato con videocamere ad alta velocità ed alta risoluzione, è apparentemente statico, cioè non vi si discerne alcun movimento, ma una volta elaborato, mette in mostra una serie di evidenti movimenti. Inizialmente il MM è stato impiegato per visualizzare fenomeni della fisiologia umana (Rubinstein et al. 2013). In seguito, ci si è resi conto delle potenzialità in altri ambiti, quali la meccanica e l'ingegneria civile. In particolare, nell'ambito dell'analisi della vibrazione l'applicazione del MM è stato confrontato con i risultati ottenuti con metodi più consolidati su oggetti semplici come una sbarra vincolata (Chen et al. 2014), ottenendo buoni risultati qualitativi e quantitativi. Per estendere tali risultati al settore dell'ingegneria sismica, presso il laboratorio Tecnologie per l'Innovazione Sostenibile del C. R. ENEA Casaccia sono stati intrapresi degli esperimenti di MM nell'ambito del Progetto COBRA, finanziato dalla regione Lazio con lo scopo di propagare tecniche innovative al patrimonio culturale. Pertanto, anche in considerazione dei presumibili sviluppi che il MM potrà apportare nell'ingegneria civile e particolarmente in quella sismica, abbiamo sperimentato la nuova metodologia su un pannello murario in pietra calcarea, rappresentativo delle costruzioni dei centri storici dell'appennino centrale, sottoponendoli a vibrazioni indotte tramite la tavola vibrante del C.R. ENEA Casaccia (Fioriti et al. 2017). Un primo evidente vantaggio consiste nella possibilità di evitare l'esecuzione della caratterizzazione dinamica a livelli di accelerazione elevate, con possibile danneggiamento dei campioni prima ancora di sottoporli ai test sismici. Infatti, grazie al MM, se nei test sismici non ci si discosta troppo dal regime di linearità, già nelle prime fasi della sperimentazione con test sismici scalati a livelli di accelerazione molto bassi, è possibile osservare quali sarebbero gli effetti di scosse estremamente forti pur somministrando in realtà delle sollecitazioni di bassa intensità. I campioni quindi rimangono intatti e riutilizzabili, con notevole risparmio di tempo e risorse. Un altro non meno

rilevante vantaggio, consiste nell'utilizzo della superficie ripresa dalla videocamera come matrice di "sensori virtuali". In pratica ogni pixel è interpretato come un sensore che produce un segnale lungo quanto il video, frame dopo frame. Il segnale è dato dalla variazione di intensità del pixel o della media di un gruppo di pixel ed è trattato tramite l'analisi in frequenza tradizionale.

Durante una precedente campagna di monitoraggio delle vibrazioni ambientali è stata impiegata per la prima volta la metodologia del MM applicata ad un grande monumento storico. Si trattava del cosiddetto Tempio di Minerva Medica a Roma, situato in prossimità della Stazione Termini. La misurazione del primo modo è stata ottenuta con un errore inferiore all'1% rispetto al riferimento fornito dall'analisi modale tramite misure di velocimetri convenzionali (Fioriti et al. 2018, Fioriti et al. 2017). In quel caso, però, la struttura è soggetta a vibrazioni rilevanti dovute al passaggio nelle immediate vicinanze di treni e tram. Nella presente memoria si esplora l'applicazione della tecnica MM su una struttura situata in un contesto molto poco urbanizzato, in cui la vibrazione ambientale è molto modesta e sostanzialmente generata da sorgenti naturali, quali il vento, piuttosto che dall'attività antropica tipica del contesto urbanizzato.

1.1 L'algoritmo di magnificazione

Come è noto, i filmati video sono composti di sequenze di immagini bidimensionali formate dai pixel (picture element), il cui valore di intensità è $I(x, t)$. La matrice 2D così ottenuta descrive il dominio spaziale dell'immagine, mentre la sequenza delle immagini determina il dominio temporale. In questo paragrafo presenteremo la versione cosiddetta euleriana dell'algoritmo di magnificazione (Wadhwa et al. 2017a) (anche se per le nostre elaborazioni abbiamo impiegato la versione phase-based). Per semplificare la formulazione, prenderemo in considerazione nel seguito soltanto le traslazioni in una direzione dell'immagine il cui spostamento è $\delta(t)$. Ovviamente, nell'altra direzione la formulazione sarà del tutto analoga. Per la trattazione del caso generale si rimanda a (Yu-Wu et al. 2017).

Dalla relazione di intensità dei pixel:

$$I(x, t) = f(x - \delta(t)) \quad (1)$$

con $I(x, 0) = f(x)$.

Si vuol giungere alla espressione teorica del moto magnificato per una costante α :

$$\Delta I = f(x - (1 + \alpha) \delta(t)) \quad (2)$$

Ora, se lo spostamento $\delta(t)$ è “abbastanza” piccolo, è possibile espandere con la serie Taylor arrestata al primo ordine la (1), intorno ad x e al tempo t :

$$I(x, t) = f(x) - \delta(t) (\partial f / \partial x) + \varepsilon \quad (3)$$

dove ε è l'errore dovuto alla approssimazione di Taylor. Poiché l'intensità della variazione in ogni pixel può essere scritta come:

$$\Delta(x, t) = I(x, t) - I(x, 0) \quad (4)$$

considerata la equazione (3), la relazione (4) diviene:

$$\Delta(x, t) = f(x) - \delta(t) (\partial f / \partial x) + \varepsilon - f(x) \quad (5)$$

ed infine:

$$\Delta(x, t) \approx -\delta(t) (\partial f / \partial x) \quad (6)$$

tralasciando l'errore ε perché la variazione assoluta di intensità Δ è proporzionale allo spostamento ed al gradiente spaziale. Il valore di intensità per pixel allora è:

$$I(x, t) \approx I(x, 0) + \Delta(x, t) \quad (7)$$

Magnificare il moto di una costante α , usando le equazioni (3) e (4), significa semplicemente che $I(x, t)$ sarà sostituita da $I_{\text{magn}}(x, t)$ secondo la seguente espressione:

$$I_{\text{magn}}(x, t) \approx I(x, 0) + \alpha \Delta(x, t) \approx f(x) - \delta(t) (\partial f / \partial x) - \alpha \delta(t) (\partial f / \partial x) + O(\varepsilon, \delta) \quad (8)$$

dove $O(\varepsilon, \delta)$ è il resto della serie di Taylor. La intensità magnificata viene calcolata come:

$$I_{\text{magn}}(x, t) \approx f(x) - (1 + \alpha) \delta(t) (\partial f / \partial x) \quad (9)$$

a meno del resto. Ma la equazione (9) si deriva immediatamente dalla espansione del primo ordine di Taylor del moto magnificato teorico:

$$\Delta I = f(x) - (1 + \alpha) \delta(t) (\partial f / \partial x) \quad (10)$$

Ora, poiché la (6) si può ricavare anche attraverso un filtraggio passa-banda, possiamo dire che per ottenere la magnificazione basta aggiungere la quantità $\alpha \Delta(x, t)$ a $I(x, t)$, se la espansione di Taylor (9) resta valida, ossia finché il resto $O(\varepsilon, \alpha)$ si mantiene piccolo. Questa è la fondamentale limitazione imposta dallo sviluppo lineare di Taylor e costituisce lo svantaggio maggiore dell'algoritmo euleriano. Nella pratica operativa i limiti di linearità sono rispettati per α piccolo, $O(\varepsilon, \alpha, 2\sigma^2\alpha^2)$ piccolo e se le immagini cambiano lentamente da frame a frame.

In effetti avremmo dovuto considerare un rumore di varianza σ^2 da aggiungere alla intensità, il quale viene ugualmente amplificato producendo un rumore di varianza $2\sigma^2\alpha^2$. Pertanto

l'errore vero è in realtà $O(\varepsilon, \alpha, 2\sigma^2\alpha^2)$. Inoltre si deve osservare che il calcolo di $\Delta(x, t)$ implica considerare un intervallo dal primo frame al frame corrente all'istante t . Naturalmente, se il video è lungo, il tempo di elaborazione potrebbe costituire un grosso problema. Infine, osserviamo che il limite Shannon-Nyquist deve essere comunque rispettato. Per una corretta riproduzione del segnale è necessario che:

$$f_{\text{camp}} \geq 2f_{\text{max}} \quad (11)$$

in cui f_{max} è la frequenza massima del dominio temporale ed f_{camp} è la frequenza di campionamento del segnale. Nel nostro caso la (11) diviene:

$$f_{\text{fps}} \geq 2f_{\text{max}} \quad (12)$$

in cui il frame rate f_{fps} prende il posto del campionamento. Quindi, impiegando come nel nostro caso una videocamera da 50 fps, la frequenza massima del moto da amplificare non dovrebbe eccedere i 25 Hz. La risoluzione in frequenza delle elaborazioni è 0.1 Hz, il che impone per i video una lunghezza di almeno 10 secondi.

Altre limitazioni fisiche che influiscono sulla qualità della elaborazione MM sono la stabilità dell'illuminazione, la presenza di ombre, possibili movimenti della telecamera, presenza di ampi movimenti nella scena, rilevante distanza dalla struttura, angolo di vista non ottimale. Tutti questi aspetti sono di entità rilevante nelle applicazioni in campo su grandi strutture all'aperto, come nel caso di studio del Ponte delle Torri.

2 IL PONTE DELLE TORRI

2.1 Cenni storici

Il Ponte delle Torri è una grande costruzione che unisce Colle Sant'Elia e Monteluco, a Spoleto (Figura 1).



Figura 1. Il Ponte delle Torri di Spoleto (vista da Nord).

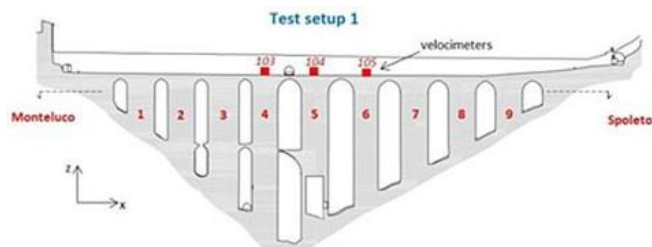


Figura 2. Posizione dei velocimetri (in rosso) nel primo setup sperimentale.

Fu costruita prevalentemente nel XIII-XIV secolo, forse su precedenti rovine etrusche e romane (Sansi 1884). La struttura del Ponte si compone di un camminamento pedonale, provvisto di un canale per le acque in cima al muro sul lato sud, sostenuto da 9 pilastri noti come “torri”. La struttura è solo apparentemente regolare, infatti pilastri ed archi hanno tutti differenti forme e dimensioni. Sono diverse anche le tessiture e le tipologie murarie, a causa del sovrapporsi nel tempo di diverse tecniche edificatorie e di rifacimenti in varie epoche. La lunghezza complessiva del Ponte è di circa 230 m, mentre nel punto più alto l'altezza è di circa 70 m.

Il Ponte mostra uno stato di diffuso degrado e estesi danneggiamenti in diverse parti. In particolare, pesanti infiltrazioni di acqua hanno creato nel tempo una situazione di degrado soprattutto sulla parte sommitale delle arcate.

2.2 Identificazione dinamica tramite OMA

Per la identificazione delle proprietà dinamiche attraverso dati sperimentali on site il 29 maggio 2017 sono stati usati dei sismografi SL06 della SARA Instruments, dotati di velocimetri SS02, settati con frequenza di campionamento a 200 Hz. In Figura 2 alcune delle posizioni acquisite con i velocimetri.

I dati sono stati acquisiti in 8 configurazioni ognuna rappresentante un setup di test, per almeno 20 minuti. In tutte le 8 configurazioni uno strumento è rimasto nella stessa posizione per essere impiegato come riferimento. Il sensore di riferimento è stato posto nella posizione in cui si suppone i modi di interesse hanno la maggior risposta secondo le forme modali FEM.

La metodologia dell'Operational Modal Analysis (OMA) implementata dal tool software ARTEMIS Modal Pro è stata successivamente usata per elaborare i dati raccolti. In particolare, sono state applicate le tecniche Frequency Domain Decomposition (FDD), Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) e la Stochastic Subspace Identification (SSI). I valori delle frequenze fornite nelle tabelle 1 e 2 sono

ottenuti come valori medi delle frequenze identificate con le suddette tecniche (Roselli et al. 2018).

3 ANALISI MM

Tuttavia il Ponte delle Torri rappresenta un caso di studio molto più complesso, per motivi che saranno spiegati in seguito. Inoltre sono stati presi in considerazione i primi quattro modi, e non solo il primo. Il procedimento inizia naturalmente dalla registrazione dei video digitali, eseguita durante la campagna del 29 maggio 2017, avendo cura di evitare di riprendere grandi movimenti quali pedoni passanti davanti alla telecamera od oggetti oscillanti. Infatti la presenza di movimenti di grande entità, costituisce la fonte di disturbo più significativa per l'algoritmo. Tuttavia non sempre è facile evitarli. Il dispositivo impiegato è una camera commerciale con risoluzione pixel 360 x 445 e frame rate 50 fps). Il processamento MM è eseguito senza alcun filtraggio delle immagini. La metodologia MM si avvantaggia del grande numero di pixel presenti in una immagine: infatti, in teoria potremmo avere, in questo caso, 160.200 “sensori virtuali”, in quanto ogni pixel produce una serie temporale di variazione delle intensità di colore frame dopo frame. Le serie temporali contengono informazioni sugli spostamenti dei punti rappresentati dai pixel (anche se non sono immediatamente utilizzabili come spostamenti veri e propri). Naturalmente non siamo interessati a tutti i pixel dell'immagine, in quanto non tutti sono punti della struttura. Inoltre, non tutti i punti della struttura vengono ripresi con uguale efficacia, ovvero tramite pixel con pari rapporto segnale-rumore (SNR). Per questi motivi, ma anche allo scopo di limitare il numero di dati da elaborare, si individua una regione di interesse (ROI). La identificazione della ROI è un aspetto cruciale della procedura, in quanto un alto SNR garantisce una buona precisione nel calcolo dei modi.

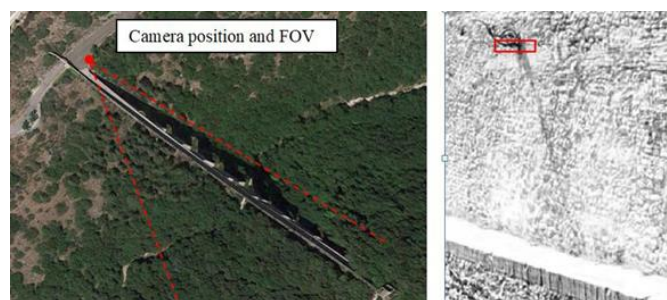


Figura 3. Posizionamento della camera e suo campo visivo (sinistra). A destra il ROI (riquadro in rosso) usato per estrarre le serie temporali.

In particolare, per avere un alto SNR bisogna scegliere un angolo camera-superficie vicino ai 90° , ma nel nostro caso l'angolazione è decisamente minore, (vedere la Figura 3). Altre fonti di disturbo per il video sono: l'indice di rifrazione dell'aria, la direzione del vento, la temperatura, l'umidità, la distanza. Si è scelto di non compensare questi disturbi filtrando le immagini. Il monumento è sottoposto a sollecitazioni dovute principalmente al vento (debole e quasi perpendicolare al Ponte) e meno della strada che fiancheggia il Ponte. Si tratta evidentemente di sollecitazioni di bassa intensità, ma sufficienti a indurre significative vibrazioni. Il posizionamento della camera a circa 60 metri dalla ROI risente inoltre delle vibrazioni prodotte dalla strada, a causa della mancanza di un opportuno isolamento dal suolo. L'algoritmo *phase-based* del MIT viene impostato sulla base di due parametri principali, che sono:

- L'intervallo di frequenze da magnificare;
- Il fattore di amplificazione α .

Nel nostro caso il range è compreso tra 0.5 e 2.5 Hz con α pari a 140. Nella scelta delle frequenze siamo stati facilitati dalla conoscenza a priori dei modi OMA, ma in generale ci si deve affidare all'esperienza o all'intuizione (Whadwa et al. 2017a). A questo punto si dispone del video magnificato, e si possono estrarre le time series dai pixel della ROI. La ROI, (figura 3) deve essere scelta sulla base del massimo contrasto con le zone adiacenti in modo da formare degli *edge*, i quali, insieme ad eventuali *texture* nell'immagine ripresa, sono le aree di solito a maggior valore di SNR. In realtà il monumento risultata nelle riprese cromaticamente abbastanza omogeneo, con pochi elementi di contrasto e di conseguenza il rumore è elevato.

La dimensione della ROI, ovviamente, influisce sulla pesantezza delle elaborazioni successive, perciò la sua dimensione è stata limitata a circa 1000 pixel. Una prima selezione della ROI è costituita dalla parte inferiore dell'unico lampione presente sul Ponte, fissato alla parete, a circa 60 metri dalla camera. Tramite la valutazione di alcuni parametri informativi dell'immagine, i pixel selezionati mostrano un alto contenuto di complessità informative. La scelta della ROI è in questo caso effettuata sostanzialmente manualmente. Un criterio automatico per la scelta della ROI ottimale può essere effettuata col criterio della massima entropia di immagine, parametro informativo che aumenta con il contrasto rispetto alle aree adiacenti.

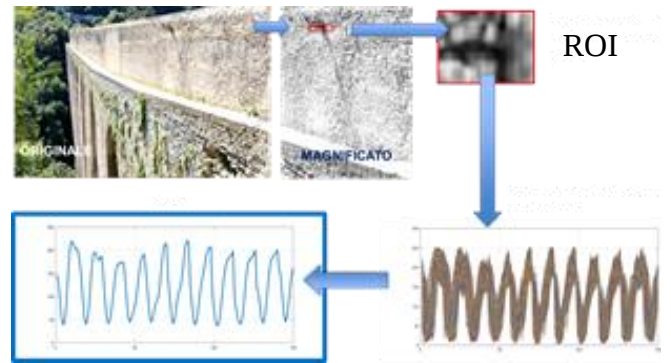


Figura 4. La estrazione di una serie temporale dai pixel di un video frame con scelta manuale della ROI (nel riquadro rosso).

Dalle serie temporali estratte dalla ROI (Figura 4), si ricavano infine le densità spettrali di potenza (PSD) con i metodi usuali di analisi nel dominio delle frequenze.

4 RISULTATI

Nelle tabelle 1 e 2 si possono osservare le frequenze modali ottenute tramite Moto Magnificato su dieci run ottenute con le due metodi di scelta della ROI, comparate ai valori OMA. Si nota un buon accordo fra valori calcolati con MM e valori di riferimento derivati dai velocimetri, specialmente con il criterio della massima entropia per la scelta della ROI (Tabella 3). Le discrepanze rilevate sono probabilmente da attribuirsi alla bassa intensità della sollecitazione (vento, principalmente), che produce un SNR scadente con effetti penalizzanti, specie alle alte frequenze.

Tabella 1. Valori numerici delle prime 4 frequenze modali, secondo il metodo OMA e secondo il metodo MM con ROI scelto manualmente.

Modo	Frequenze (Hz)		
	OMA	MM	Errore (%)
1	0.632	0.685	8.39
2	1.011	1.014	0.30
3	1.496	1.311	-12.37
4	1.975	2.068	4.71

Tabella 2. Valori numerici delle prime 4 frequenze modali, secondo il metodo OMA e secondo il metodo MM con ROI scelto col criterio dell'entropia di immagine.

Modo	Frequenze (Hz)		
	OMA	MM	Errore (%)
1	0.632	0.638	1.00
2	1.011	1.080	6.79
3	1.496	1.522	1.76
4	1.975	2.013	4.92

Si evidenzia, infatti, che un alto livello di rumore durante la registrazione del video non è di per sé un problema, se la sollecitazione fornita alla struttura è parimenti significativa, in quanto la sollecitazione produrrà generalmente un segnale utile tale da elevare a sufficienza l'SNR. Nel caso di vibrazione ambientale, ovviamente, la sollecitazione agente sul ponte è di bassa intensità. Una contromisura potrebbe essere quella di aumentare il fattore di amplificazione. Tuttavia, tale operazione non garantirebbe con certezza un miglioramento dell'SNR, a causa dei vincoli di linearità limitanti il fattore di amplificazione entro il range di frequenze amplificate. In mancanza di una relazione analitica nota tra queste grandezze si dovrebbe procedere per tentativi, estendendo i tempi di calcolo eccessivamente. Non si esclude, peraltro, che ulteriori analisi possano contribuire a chiarire questo particolare aspetto della metodologia.

5 CONCLUSIONI

In questo lavoro abbiamo studiato la applicazione di una recente tecnica di processamento video, il Moto Magnificato, a monumenti storici di grandi dimensioni come il Ponte delle Torri di Spoleto, allo scopo di verificare la fattibilità dell'analisi modale video-driven. In precedenza, presso i laboratori del C. R. ENEA Casaccia ha avuto luogo una positiva valutazione del MM su campioni posti su tavola vibrante, ma evidentemente l'impiego all'aperto presenta difficoltà maggiori e diverse, di cui si è discusso in precedenza. Pertanto si è resa opportuna e necessaria la validazione outdoor su oggetti spazialmente estesi. In effetti, si è osservato che da un comune video digitale è possibile estrarre delle serie temporali di buona qualità originate dalle variazioni di intensità dei pixel, contenenti informazioni sugli spostamenti dei punti materiali da essi individuati. Da tali segnali è quindi del tutto attuabile l'analisi nel dominio delle frequenze, analogamente ai segnali ottenuti dai velocimetri convenzionali. Il rumore, e di conseguenza il rapporto SNR, influiscono pesantemente sulla qualità delle elaborazioni, come si osserva chiaramente dal confronto con i dati di riferimento OMA. Nondimeno i risultati sono molto incoraggianti, specie se si considerano le condizioni ambientali molto sfavorevoli che hanno gravato sulla registrazione dei video digitali e la bassa qualità dei dispositivi impiegati. D'altro canto, i vantaggi forniti dal MM sono

decisamente notevoli: l'enorme numero di "sensori virtuali" contactless disponibili, la possibilità di conservare nel tempo i video per analizzare eventualmente altre aree non prese in considerazione in precedenza, la immediatezza di impiego ed il basso costo. Inoltre non va trascurato il fatto che in futuro nuove tipologie di algoritmi forniranno elaborazioni molto più precise, mentre l'implementazione hardware ne permetterà l'uso in real-time. Si conclude perciò che il Moto Magnificato è una metodologia emergente e dilagante, con vastissime applicazioni in molti campi della scienza e della tecnologia ma soprattutto nel settore del monitoraggio ambientale delle vibrazioni.

BIBLIOGRAFIA

- Chen, J.G., Wadhwa, N., Cha, Y.J., Durand, F., Freeman, W.T., Buyukozturk, O., 2014, Structural Modal Identification through High Speed Camera Video: Motion Magnification. *Proceedings of the 32nd International Modal Analysis Conference*, Orlando Florida, US.
- Fioriti, V., Roselli, I., Tati, A., De Canio, G., 2017, Historic masonry monitoring by motion magnification analysis. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, **223**, 367-375.
- Fioriti, V., Roselli, I., De Canio, G., 2018. Frequency Domain Analysis of the Minerva Medica Temple by means of the Motion Magnification Methodology. *MetroArchaeo Conference, Cassino 2018*, 314-318.
- Liu, C., Torralba, A., Freeman, W.T., Durand, F., Adelson, E.H., 2005, Motion Magnification. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, **24**(3).
- Roselli, I., Malena, M., Mongelli, M., Cavalagli, N., Gioffrè, M., De Canio, G. De Felice, G., 2018. Health assessment and ambient vibration testing of the "Ponte delle Torri" of Spoleto during the 2016-17 Central Italy seismic sequence, *Int. J. Civil Structural Health Monitoring*, **8**(2), 199-216.
- Rubinstein, M., Wadhwa, N., Durand, F., Freeman, W.T., 2013, Revealing Invisible Changes In The World. *Science*, **339**, 6119.
- Sansi, A., 1884. *Storia del comune di Spoleto*. Vol. I - Vol. VIII. Accademia Spoletina, Spoleto.
- Wadhwa N., Wu H., Davis A., Rubinstein, M., Shih E., Mysore G., Chen J., Buyukozturk O., Gutttag J., Freeman W. and, Durand F., 2017. Eulerian Video Magnification and Analysis. *Communications of the ACM*, **60**, 87- 95.
- Yu-Wu, H. et al., 2017. Eulerian Video Magnification for Revealing Subtle Changes in the World, <https://people.csail.mit.edu/mrub/papers/vidmag.pdf>.