Elaborazione di dati di spostamento da sistema di *motion capture* 3D per prove su tavola vibrante



Gerardo De Canio, Marialuisa Mongelli, Ivan Roselli, Angelo Tatì
ENEA, C. R. Casaccia, Via Anguillarese 301, 00123 Roma

Keywords: Motion Capture 3D , tavole vibranti, filtraggio dati di spostamento

ABSTRACT
Nell'ambito delle campagne sperimentali su tavola vibrante effettuate presso il centro di ricerche ENEA Casaccia vengono impiegate varie tipologie di strumentazioni per il monitoraggio del comportamento dinamico di modelli di strutture sottoposti a input sismico.
Tra i diversi sistemi di misura è attualmente installato in laboratorio anche un sistema di *motion capture* 3D, denominato 3DVision, il quale è in grado di acquisire la posizione di un numero elevato di marcatori retroriflettenti collocati nei punti di misura desiderati sulla struttura e sulla tavola vibrante.
Per ogni marcatore il sistema ricostruisce la traiettoria nello spazio 3D, misurata rispetto ad un riferimento fisso a terra, da cui si può ottenere il moto completo a partire dallo spostamento assoluto. Ogni operazione numerica di derivazione successiva, però, come noto, porta ad un effetto di amplificazione dell'errore di misura che è necessario correggere se si vuole ottenere una stima della velocità e dell'accelerazione.
La fase di elaborazione del segnale acquisito, quindi, riveste un ruolo importante sulla qualità delle informazioni che si possono estrarre dal dato, in particolare, per quanto riguarda l'applicazione di filtri digitali.
Nel presente lavoro l'efficacia di alcuni tra i più comuni algoritmi di filtraggio secondo varie strategie (passabanda, spline, smoothing, etc.) è stata testata sui dati acquisiti dal 3DVision in varie campagne sperimentali con differenti input sismici. Nel dettaglio, particolare attenzione è stata focalizzata sulla calibrazione ottimale dei parametri di filtraggio degli algoritmi presi in considerazione tramite il confronto con le corrispondenti misure ottenute con accelerometri convenzionali.

1 INTRODUZIONE

Le campagne sperimentali su tavola vibrante hanno rappresentato negli ultimi decenni un contributo imprescindibile allo studio del comportamento dinamico delle strutture.

In questo tipo di prove sperimentali vengono tipicamente misurati alcuni parametri del moto nei vari punti di interesse dell'oggetto verificato sperimentalmente nonché della tavola stessa per controllare l'input sismico somministrato.

In particolare, la strumentazione più comunemente impiegata in laboratorio consiste in accelerometri e sensori di spostamento, affidando, quindi, a due tipi di strumenti diversi la misura di due differenti parametri dello stesso evento vibrazionale. Ciò deriva dalla nota difficoltà di ottenere da un'unica misura il moto completo, ovvero la conoscenza con elevata accuratezza di tutti i parametri che definiscono in modo esaustivo il moto osservato.

Storicamente è stata spesso percorsa la strada di integrare le misure accelerometriche per ottenere velocità e spostamento. A tale riguardo esiste una vasta letteratura sugli algoritmi di elaborazione e di correzione del segnale accelerometrico per ovviare ai problemi legati all'integrazione numerica (Berg et al. 1961, Boore 2001).

Se, invece, si effettuano misure di spostamento assoluto è possibile percorrere la strada inversa,

ovvero ottenere la velocità e l'accelerazione tramite operazioni di derivazione numerica successiva del dato di partenza.

In questa direzione, ha interessanti prospettive una tipologia relativamente nuova di strumentazione basata sulle recenti evoluzioni dell'opto-elettronica applicata ai dispositivi di visione digitale. Questi sistemi aprono a una nuova concezione della misura del moto di punti nello spazio attraverso tecnologie hardware e software che vanno via via consolidandosi nell'utilizzo in laboratorio, anche nei test su tavola vibrante (Beraldin et al 2004, Lunghi et al. 2012). Tra i primi sistemi di questo tipo in Italia, il 3DVision, è stato istallato alcuni anni fa nel laboratorio delle tavole vibranti presso il C.R. ENEA Casaccia (Mongelli et al. 2010). In particolare, tale sistema offre vantaggi relativi alla flessibilità del sistema, al numero di punti di misura, all'uso di marker di facile allestimento e di scarsissimo peso e ingombro, alle potenzialità di computergrafica 3D e di condivisione delle sperimentazioni in real-time tramite laboratori virtuali, come DYSCO messo a punto di recente dall'ENEA (Roselli et al. 2010). Inoltre, misure sperimentali di questo tipo forniscono un dato particolarmente utile per l'applicazione di approcci agli spostamento per la progettazione sismica in linea con le ultime normative.

D'altra parte, ricavare il moto completo dei punti di misura a partire dallo spostamento assoluto è una opzione non priva di inconvenienti. Ciò è dovuto agli effetti di amplificazione dell'errore legati alle operazioni di derivazione numerica del dato iniziale (Bevington 1969). Conseguentemente, nasce l'esigenza di elaborare il segnale in spostamento con efficienti algoritmi di filtraggio al fine di ricavare con accettabile approssimazione una stima delle storie temporali delle velocità e delle accelerazioni raggiunte nel corso dei test.

2 IL SISTEMA 3DVISION

Il 3DVision è un sistema opto-elettronico di *motion capture* 3D, basato su tecnologia VICON MX, in gradi di registrare il moto di marcatori (marker) in uno spazio tridimensionale tramite la triangolazione dei dati acquisizioni da una "costellazione" di telecamere. Il funzionamento è assimilabile a un sistema di posizionamento "locale" in cui le telecamere MX, una volta fissate alle pareti o montati su appositi tripodi, illuminano il proprio campo di vista per mezzo di una serie di led che emettono con lunghezze d'onda predominanti nel vicino infrarosso (NIR) ed acquisiscono la radiazione retro-riflessa dai marcatori posizionati nei punti di cui si vuole stabilire il moto.

Il dato grezzo che fornisce il sistema è costituito dalla traiettoria nello spazio di tali punti in un sistema di riferimento prefissato tramite la procedura di calibrazione del sistema. La configurazione delle telecamere è principalmente dettata dalle esigenze di visibilità dei marker (tenendo presente che ogni marker deve essere osservato da almeno due telecamere per consentire la triangolazione in 3D), nonché dalle esigenze logistiche di posizionamento delle telecamere all'interno del laboratorio.

Nel suo insieme, il sistema istallato nel laboratorio del C.R. ENEA Casaccia è dotato di 9 telecamere digitali MX nell'infrarosso per le acquisizioni 3D e 4 videocamere DV per i filmati sovrapponibili in sincrono con i marker.

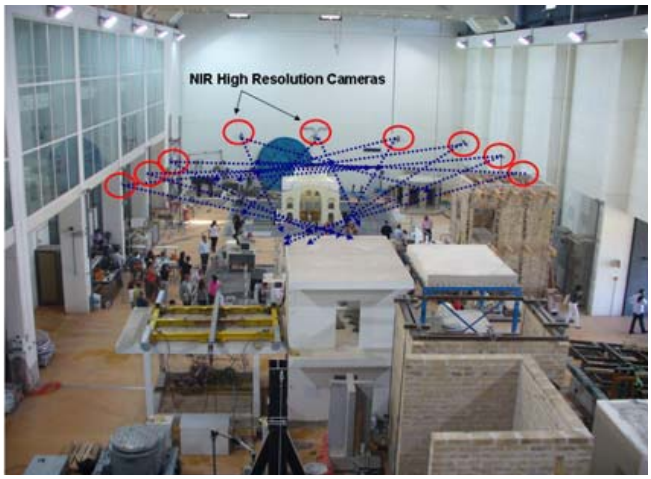


Figura 1. Vista del laboratorio delle tavole vibranti presso il C.R. ENEA Casaccia. Sono evidenziate le telecamere del sistema 3DVision.

2.1 Errore di misura e accuratezza del sistema

L'accuratezza delle misure effettuate con il sistema 3DVision dipende da varie tipologie di errori di misura.

Un importante parametro da considerare è la risoluzione delle telecamere MX, le quali sono equipaggiate con un sensore CMOS da 4 Mpixel in grado di acquisire in *full-frame* fino a 370Hz e fino a 2000 Hz con parzializzazione progressiva del sensore.

Inoltre, trattandosi di un sistema di visione 3D, la risoluzione geometrica raggiungibile dipende, come è noto, dalla configurazione spaziale adottata (in particolare, dalla posizione delle telecamere rispetto ai marker) e dalla qualità della calibrazione dinamica, che consiste in una procedura di acquisizione effettuata con uno

strumento apposito che viene adeguatamente movimentato all'interno del volume di misura.

Altro aspetto da curare è la perfetta stabilità dei supporti e/o dei tripodi delle telecamere: un minimo movimento e/o vibrazione di queste inficerebbe la validità della calibrazione effettuata. Nella specifica applicazione ai test su tavole vibranti, quest'aspetto comporta l'accortezza di posizionare i tripodi al di fuori della massa di contrasto (la quale tende a muoversi in reazione alla spinta degli attuatori oleo-dinamici della tavola) e di mantenere in perfetta efficienza il sistema di isolamento della massa di contrasto per evitare che trasmetta le suddette vibrazioni al pavimento.

Dal punto di vista software assume anche notevole rilievo l'efficacia e la stabilità degli algoritmi di triangolazione e di ricostruzione 3D, i quali sono influenzati dalle condizioni di illuminazione del laboratorio, che di conseguenza devono essere il più possibile stabili.

Per le usuali configurazioni adottate nel laboratorio del C.R. ENEA Casaccia, si ottengono misure di accuratezza stimabile come ordine di grandezza da +/- 0.01 mm a +/- 0.1 mm (Figura 2).

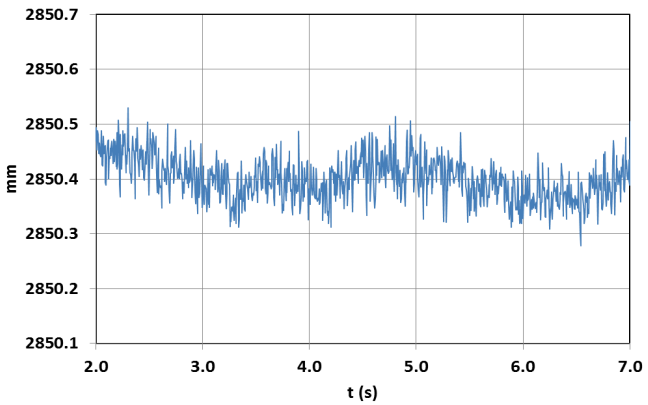


Figura 2. Errore di misura nella posizione di un marker statico.

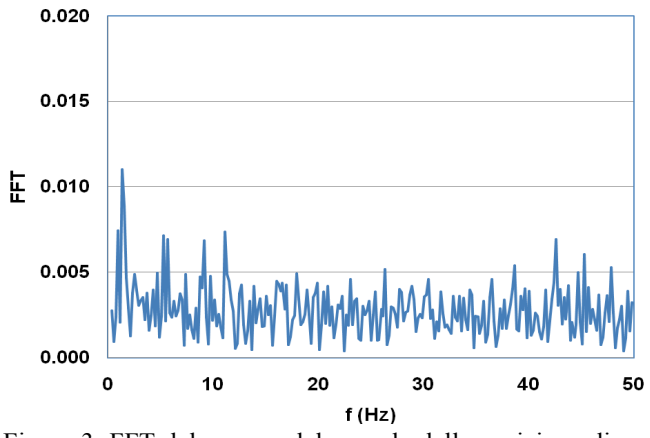


Figura 3. FFT del rumore del segnale della posizione di un marker statico.

Dall'analisi nel dominio della frequenza tramite la FFT del segnale della posizione di un marker statico si osserva che si tratta praticamente di un rumore bianco (Figura 3).

3 PROPAGAZIONE DELL'ERRORE E TECNICHE DI FILTRAGGIO

Poniamo per semplicità di misurare una vibrazione sinusoidale di ampiezza A con frequenza f, esprimibile con la relazione:

$$s(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t) \tag{1}$$

dove s è lo spostamento assoluto nel tempo t, con $\omega = 2\pi f$. Ipotizziamo, inoltre, che l'errore di misura riguardi solo l'ampiezza dell'oscillazione. La legge generale di propagazione dell'errore ci porta a scrivere (Bevington 1969):

$$\Delta s(t) = \Delta A \cdot \cos(\omega \cdot t) \tag{2}$$

Analogamente, per velocità v e accelerazione a:

$$\Delta v(t) = -\Delta A \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \tag{3}$$

$$\Delta a(t) = -\Delta A \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) \tag{4}$$

Le relazioni suddette ci mostrano come l'ampiezza dell'errore si propaghi in v e a coll'aumentare della frequenza (Figura 4). Questo effetto si riscontra sperimentalmente sull'accelerazione ottenuta dalle misure con il sistema 3DVision (Figura 5).

Un'altra fonte importante di rumore è insita nell'operazione stessa di derivazione numerica del segnale acquisito (Lyness et al 1967).

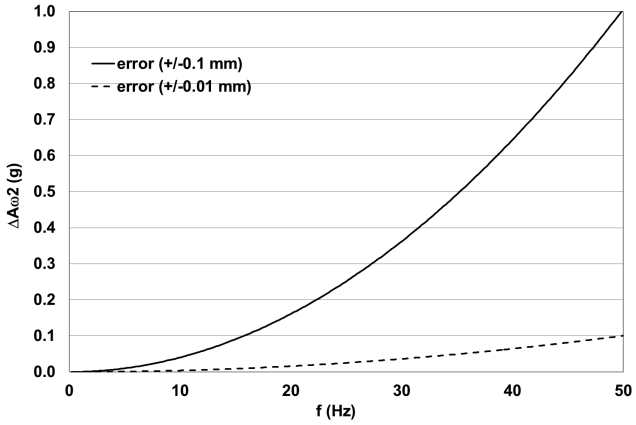


Figura 4. Curve di propagazione dell'errore di misura sull'ampiezza dell'accelerazione $\Delta A\omega^2$ in funzione dell'errore in spostamento.

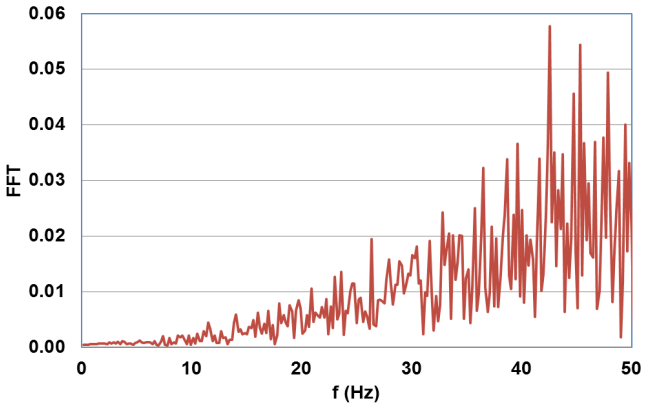


Figura 5. FFT dell'accelerazione ottenuto dalla doppia derivazione numerica del rumore del segnale di un marker statico.

Al fine di attenuare l'effetto di amplificazione del rumore si possono applicare opportuni algoritmi di filtraggio dei dati e di derivazione numerica.

3.1 Strategie di filtraggio dei dati

Notoriamente, il filtraggio per via digitale dei dati sperimentali è un'operazione alquanto delicata e consiste, in linea generale, nel tentativo di eliminare il più possibile il rumore di misura dal segnale vero e proprio. Ciò premesso, uno degli approcci più comunemente utilizzato, consiste nell'analizzare le caratteristiche del rumore e del segnale nel dominio della frequenza. Se le bande di frequenza in cui ricadono sono nettamente diverse, si può, generalmente, procedere con successo con un filtro del tipo passa-banda (o le varianti passa-alto, passa-basso, stop-band). In ambito sismico, le frequenze di taglio per la correzione degli accelerogrammi sono tipicamente tra 0.1-0.5 Hz e 25-30 Hz, in quanto la maggior parte dei sismi naturali ha in questo intervallo dello spettro il maggior contenuto energetico (Rinaldis 2004).

Tra i vari algoritmi di tipo passa-banda disponibili nella vasta letteratura, che si distinguono per lo più per la forma delle curve di taglio (detti fianchi), molto diffuso per semplicità ed efficacia è il filtro Butterworth. Oltre alle frequenze di taglio questo algoritmo è funzione di un solo parametro, rappresentato dall'ordine del polinomio di Butterworth che regola la ripidità dei fianchi: più è alto l'ordine, più netto sarà il taglio alle frequenze desiderate.

Un'altra strategia di pulizia del segnale è stata tentata tramite l'applicazione della funzione spline (De Boor 2001). Questa tecnica di *smoothing* sfrutta l'interpolazione dei dati (nodi della spline) con un insieme di polinomi raccordati tra loro, in modo da ottenere una curva continua fino ad un dato ordine di derivate in ogni punto dell'intervallo. L'interpolazione viene regolata tramite un parametro di *smoothing* che va da 0 (interpolazione senza ammorbidimento della curva) a infinito (massimo ammorbidimento).

Infine, è stato testato l'effetto di un algoritmo basato sulla media mobile. In particolare, è stato considerato il filtro Savitzky-Golay, tra i più utilizzati ed efficaci per l'attenuazione di rumore random da segnali digitali (Savitzky et al 1964). I parametri che regolano questo filtro sono due: l'ordine del polinomio di *fitting* ai minimi quadrati e l'ampiezza della finestratura (Press et al. 2007). L'ordine assume valori pari. La finestratura può essere simmetrica o asimmetrica, a seconda che si prenda un numero di punti differente a sinistra (nl) o a destra (nr) intorno al punto da stimare. L'ampiezza della finestra mobile influisce anche sull'effetto del filtro nel dominio della frequenza determinando ripide depressioni localizzate con periodicità stabilita (Figura 6). Conseguentemente, questo filtro ha un effetto simile a un passa-basso solo fino alla prima depressione, che avviene a frequenza crescente con l'ordine del filtro, ma poi assumere un comportamento selettivo periodico che non annulla del tutto i contributi delle alte frequenze, ma agisce più efficacemente in termini di attenuazione del rumore bianco.

Il filtro Savitzky-Golay, tra l'altro, è intrinsecamente adatto ad essere implementato esplicitamente per la derivazione numerica dei dati, il ché lo rende di particolare interesse nel presente studio.

Per quanto concerne la derivazione numerica, sono presenti in letteratura vari metodi. Gli stessi metodi classici delle derivate centrali alle differenze finite di ordine superiore mostrano un effetto, per quanto limitato, di attenuazione delle alte frequenze (Lyness et al. 1967). In generale, per tali metodi la derivata numerica f' nel generico punto della funzione f si può scrivere:

$$f' = \frac{1}{\Delta t}\sum_{k=1}^{M} c_k \left(f_k - f_{-k}\right) \qquad (5)$$

dove $M = (N\text{-}1)/2$ con N numero di punti della finestra mobile e Δt è lo step temporale.

Da questi discendono vari metodi, detti di convoluzione, i quali combinano il calcolo della derivata con l'effetto di filtraggio numerico variando i coefficienti c_k impiegati nell'equazione 5, detti perciò coefficienti di convoluzione.

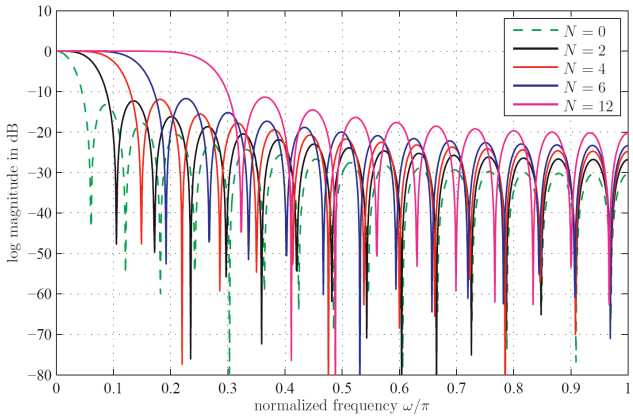


Figura 6. Effetto nel dominio della frequenza del filtro Savitzky-Golay per diversi valori dell'ordine N con finestratura simmetrica di 33 punti (Schafer 2010).

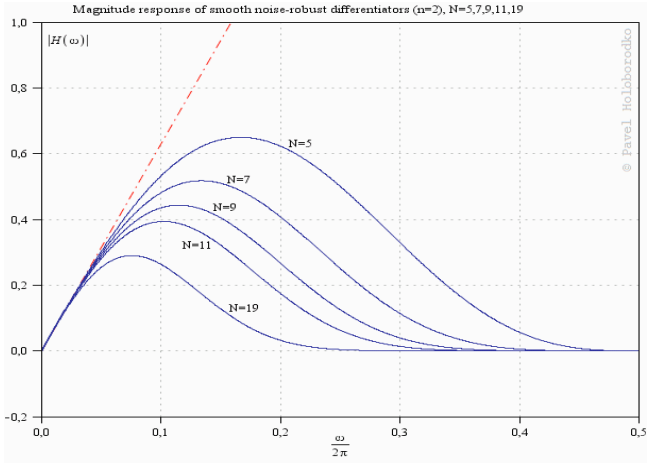


Figura 7. Effetto nel dominio della frequenza della derivazione numerica con SNRD per vari valori del numero di punti N della finestra mobile (Holoborodko 2008).

Il filtro Savitzky-Golay implementato per la derivazione può essere considerato un caso specifico di questa famiglia di metodi.

Altri esempi si possono reperire in rete o in letteratura, come l'algoritmo SNRD (*Smooth Noise Robust Differentiator*) proposto da Holoborodko (Holoborodko 2008), che di fatto ottiene un effetto simile ad un filtro passa-basso (Figura 7).

3.2 Confronto con dati accelerometrici

Valutare l'efficacia di una operazione di filtraggio è un processo difficilmente codificabile e dipende dall'obiettivo che il filtraggio stesso si propone di raggiungere.

Se l'obiettivo è quello di riprodurre fedelmente un segnale di riferimento, come nel caso in esame, l'esame visivo non è di fatto sostituibile del tutto con parametri sintetici che forniscono una valutazione non del tutto esaustiva della verosimiglianza tra i due segnali.

Conseguentemente, nel presente lavoro il confronto con i dati accelerometrici è stato condotto inizialmente per via visiva, previa sincronizzazione dei due segnali tramite un algoritmo basato sulla funzione di cross-correlazione.

A questo punto, come indicatore oggettivo per stimare l'efficacia del filtraggio, è stato considerato l'errore RMS (scarto quadratico medio) calcolato tra l'accelerogramma ottenuto dai marker del 3DVision e quello acquisito dall'accelerometro preso a riferimento.

Un'altra comparazione è stata effettuata tramite il calcolo di alcuni tra i più importanti indici caratteristici del moto sismico del suolo di consueto ricavati dalle misure accelerometriche.

Gli indici utilizzati sono i seguenti:

- A_{max} = Accelerazione di picco o PGA;
- A_{rms} = Accelerazione quadratica media dell'accelerogramma;
- Indice di Arias:

$$I_A = \frac{\pi}{2g}\int_0^{\infty} a(t)^2\,dt \qquad (6)$$

- Intensità caratteristica:

$$I_C = A_{rms}^{1.5}\, t_D^{0.5} \qquad (7)$$

con t_D durata significativa dell'evento sismico pari a $t_D = t_{95} - t_5$ dove t_{95} e t_5 sono rispettivamente i tempi in cui viene raggiunto il 95 % e il 5% di I_A;

- HI = Intensità spettrale di Housner:

$$HI = \int_{0.1}^{2.5} S_v(t,\xi)\,dt \qquad (8)$$

dove S_v è lo spettro di velocità e ξ è il coefficiente di smorzamento.

Inoltre, sono stati confrontati gli spettri di accelerazione Sa(T, ξ) e di energia Se(T, ξ) ottenuti in corrispondenza di alcuni valori caratteristici del periodo T pari a 0.15 s, 0.4 s, 0.5 s, 2 s, 3 s e 4 s, i quali consentono di definire lo spettro di risposta sismica per molti terreni nel territorio italiano.

4 CAMPAGNA SPERIMENTALE

Nel presente lavoro sono stati considerati due input sismici triassiali, ognuno scalato a diverse intensità fino a una PGA di circa 0.4 g. Si tratta di

uno spettro compatibile con lo standard IEEE Std 693-2005, Par. A.1.2.2.2 (Figura 8) e di un sisma naturale, di seguito denominato Nat1 (Figura 9). Nella Tabella 1 si riporta la sequenza dei test effettuati.

Sia i dati del 3DVision che i dati accelerometrici sono stati acquisiti con campionamento a 200 Hz.

Tabella 1. Sequenza dei test effettuati e scalatura dell'input nelle direzioni x, y e z.

Test	x	y	z
IEEE693_10p	10%	10%	10%
IEEE693_20p	20%	20%	20%
IEEE693_30p	30%	30%	20%
IEEE693_40p	40%	40%	20%
IEEE693_50p	50%	50%	20%
IEEE693_60p	60%	60%	20%
IEEE693_60p_z30p	60%	60%	30%
Nat1_10p	10%	10%	10%
Nat1_20p	20%	20%	20%
Nat1_30p	30%	30%	30%
Nat1_40p	40%	40%	40%

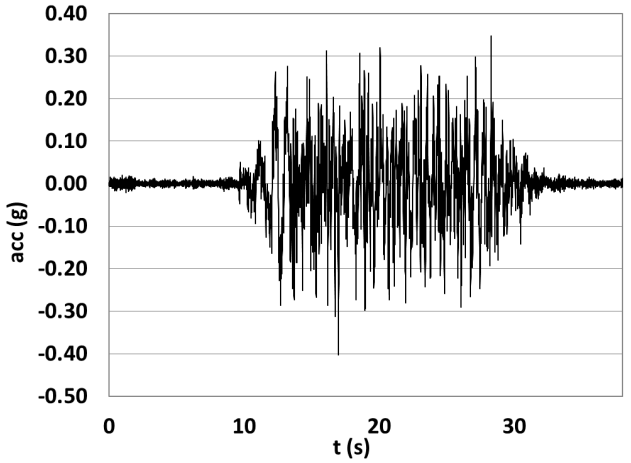


Figura 8. Input sismico compatibile con lo standard IEEE Std 693-2005 in direzione x scalato al 60% dell'accelerazione.

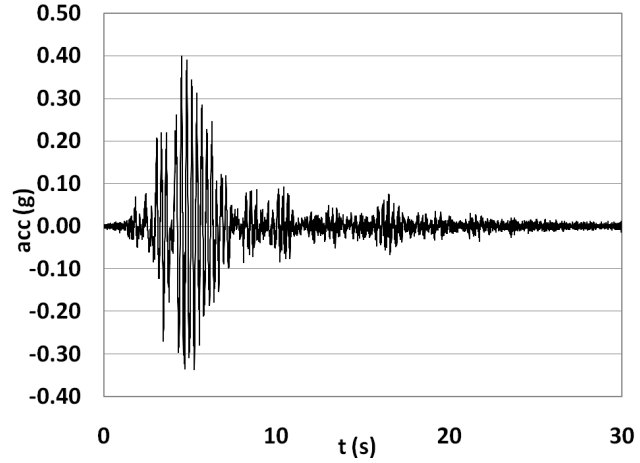


Figura 9. Input sismico naturale Nat1 in direzione x scalato al 40% dell'accelerazione.

Tabella 2. Errore di misura in direzione x, y e z in condizioni statiche nella configurazione dei test effettuati.

	Δx	Δy	Δz
Scarto medio (mm)	0.0310	0.0389	0.0468

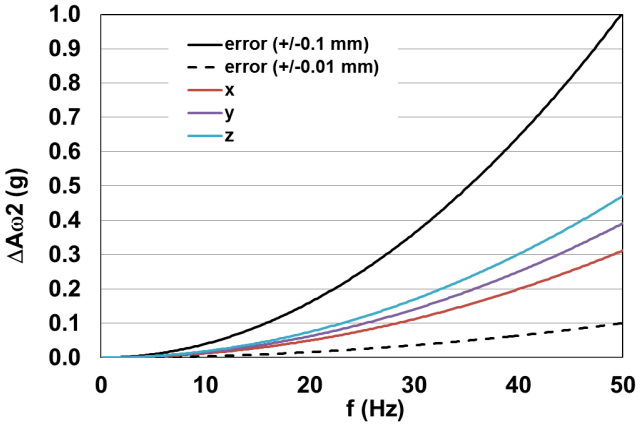


Figura 10 Curve di propagazione dell'errore sull'ampiezza dell'accelerazione riscontrato in direzione x, y e z nella configurazione del 3DVsion adottata (Tabella 2).

Per la configurazione adottata la accuratezza riscontrata in condizioni statiche in termini di scarto medio nelle varie direzioni è riportata in Tabella 2. Le conseguenti curve teoriche di propagazione dell'errore in termini di accelerazione sono mostrate in Figura 10.

5 RISULTATI

Dopo vari tentativi di trattamento dei dati dei marker con diversi filtri, variando i rispettivi parametri interni, nonché applicando alcuni algoritmi di derivazione numerica, sono stati riscontrati i risultati più soddisfacenti con il filtro Savitzky-Golay. Questo filtro ha dimostrato maggiore efficacia nella riduzione del rumore pur non penalizzando eccessivamente le alte frequenze, a differenza di un comune filtro passa-basso. A titolo di esempio, si mostra in Figura 11 come il derivatore numerico SNRD a 9 punti smussi eccessivamente i picchi ad alta frequenza dell'accelerogramma rispetto al Savitzky-Golay.

In particolare, il Savitzky-Golay di ordine 6 e finestratura di 27 punti ha mostrato le prestazioni migliori in termini di riproduzione del segnale di riferimento (Figura 12).

L'errore RMS commesso con questa soluzione è risultato dell'ordine di 0.01-0.02 g, con un tendenziale incremento con l'intensità dell'input (Figura 13). Questo livello di errore RMS può essere ritenuto un ottimo risultato se si considera che sono stati confrontati due sistemi di

acquisizione totalmente indipendenti e sincronizzati in post-processamento.

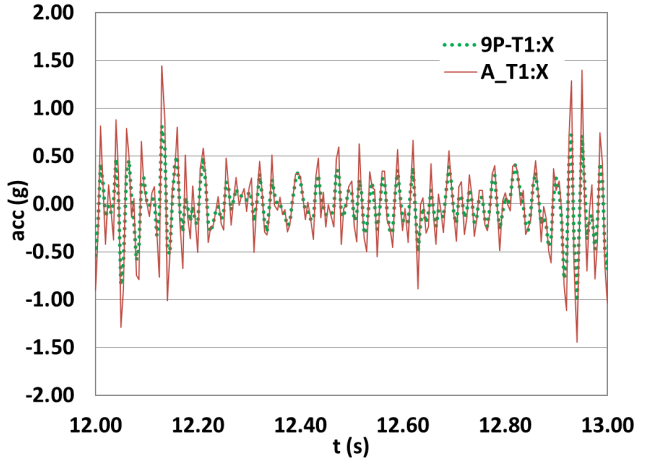


Figura 11. Confronto tra il filtraggio con Savitzky-Golay di ordine 6 e finestratura di 9 punti (A_T1:X) e con SNRD con 9 punti (9P-T1:X).

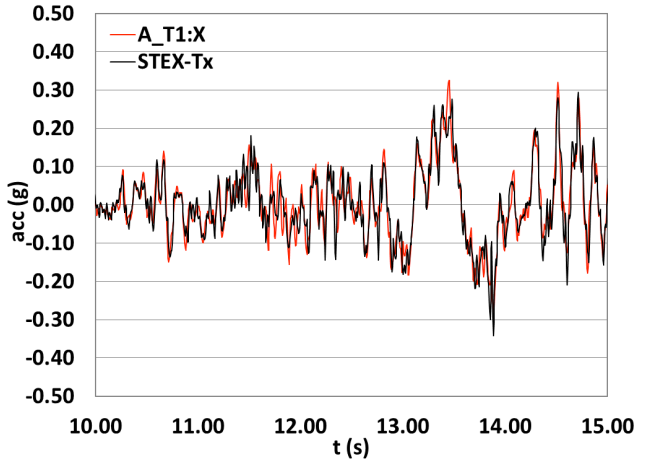


Figura 12. Confronto tra l'input IEEE693_60p_z30p registrato dall'accelerometro (STEX-Tx) e quello ottenuto dal marker (A_T1:x) con filtraggio Savitzky-Golay di ordine 6 e finestratura di 27 punti.

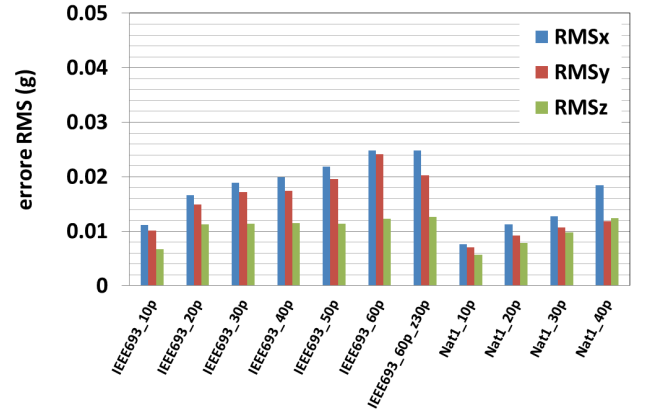


Figura 13. Errori RMS tra l'accelerometro di riferimento e i dati 3DVision dopo filtraggio Savitzky-Golay di ordine 6 e finestratura di 27 punti, per ogni input testato nelle varie direzioni.

Si nota, inoltre, che alla frequenza di campionamento di 200 Hz con 27 punti di finestratura, pari a 0.135 s, il filtro mostra la prima depressione dello spettro a circa 20 Hz, non inficiando sostanzialmente il contenuto informativo nel dominio della frequenza degli accelerogrammi considerati, come si vede dal confronto tra le PSD (Figura 14 e Figura 15).

Analogamente, tra le A_{rms} cumulate in frequenza (Figura 16) si osserva un buon accordo tra i due sistemi, con un minimo discostamento al crescere delle frequenze.

Anche gli spettri di accelerazione Sa e di energia Se, sono stimati con buona precisione (Figura 17 e Figura 18), confermando le potenzialità del sistema 3DVision nel fornire informazioni coerenti e complete in tutte le zone dello spettro più rilevanti ai fini della progettazione anti-sismica.

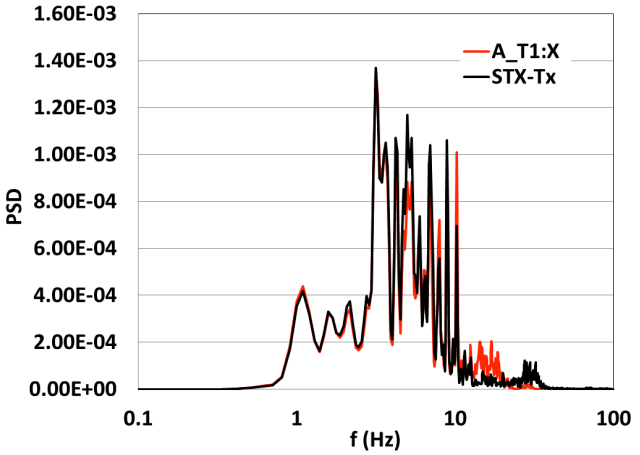


Figura 14. Confronto tra la PSD dell'input IEEE693_60p_z30p da dati accelerometrici (STEX-Tx) e quello ottenuto dal marker (A_T1:x).

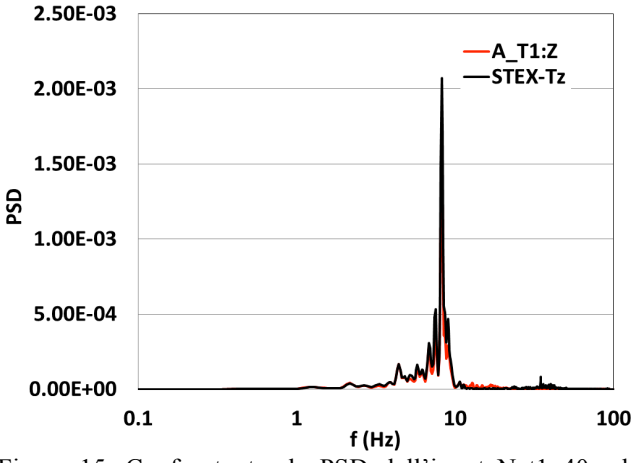


Figura 15. Confronto tra la PSD dell'input Nat1_40p da dati accelerometrici (STEX-Tz) e quello ottenuto dal marker (A_T1:z).

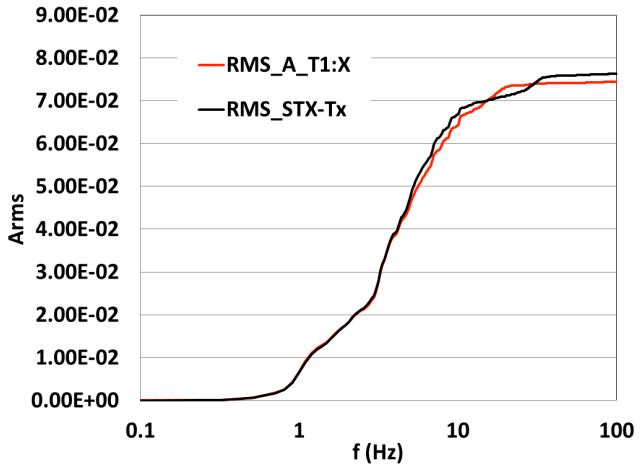


Figura 16. Confronto tra la A_{rms} dell'input IEEE693_60p_z30p da dati accelerometrici (STX-Tx) e quello ottenuto dal marker (A_T1:x).

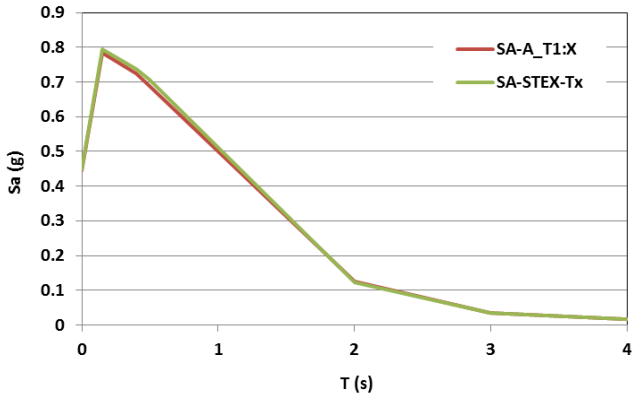


Figura 17 Confronto tra lo spettro di accelerazione Sa dell'input IEEE693_60p_z30p da dati accelerometrici (STEX-Tx) e quello ottenuto dal marker (A_T1:x).

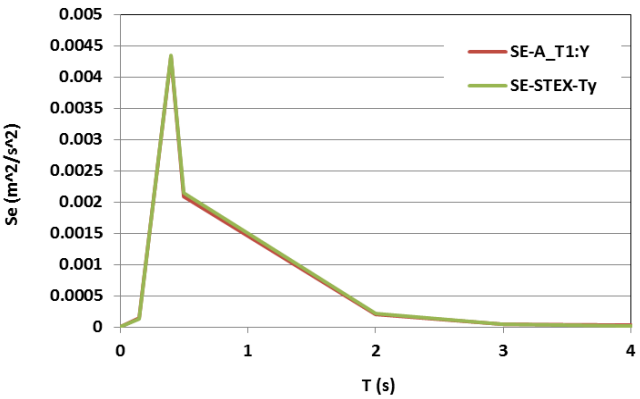


Figura 18 Confronto tra lo spettro di energia Se dell'input Nat1_40p da dati accelerometrici (STEX-Ty) e quello ottenuto dal marker (A_T1:y).

In generale, la soluzione scelta fornisce una stima soddisfacente degli indici caratteristici presi in esame (Figura 19 e Figura 20), con una performance peggiore sulla stima della A_{max} (PGA), sulla quale si commette un errore tendenzialmente più elevato. Ciò, in effetti, è comprensibile dato che la PGA costituisce un valore puntuale spesso dovuto a uno spike o a un picco isolato a frequenza relativamente alta, che viene inevitabilmente penalizzato dal filtraggio.

Ma a questo proposito si ricorda che, proprio per la sua natura puntuale, la PGA ha modesta valenza ad essere rappresentativa dell'intero accelerogramma, come sempre più spesso viene argomentato in letteratura anche di recente (Ye et al. 2011).

Infine, si osserva che gran parte degli indici sono sensibilmente sottostimati allorquando il contenuto in frequenza dell'accelerogramma si concentra su frequenze relativamente alte, dai 10 Hz in su, come nel caso della componente z dell'input Nat1 (Figura 15). Anche in questo caso, però, è interessante rilevare l'ottima stima che si ottiene per HI, in virtù del fatto che nella costruzione di questo parametro Housner considera di maggiore rilevanza le componenti spettrali da 0.4 a 10 Hz.

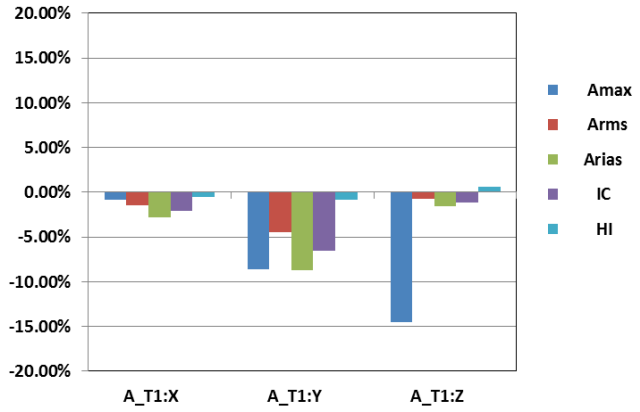


Figura 19. Errore nella stima degli indici caratteristici per l'input IEEE693_60p_z30p dal marker (A_T1) rispetto ai dati accelerometrici.

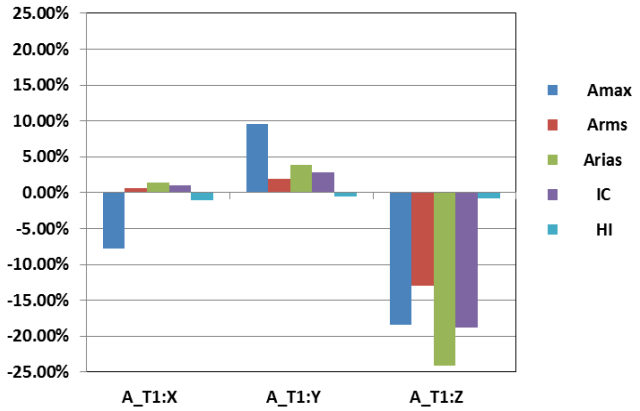


Figura 20. Errore nella stima degli indici caratteristici per l'input Nat1_40p dal marker (A_T1) rispetto ai dati accelerometrici.

6 CONCLUSIONI

Le prove eseguite sono state allestite con una configurazione tipicamente adottata per le consuete campagne sperimentali condotte presso il laboratorio delle tavole vibranti presso il C.R. ENEA Casaccia e perciò da considerarsi molto rappresentative delle potenzialità attuali dell'impiego del sistema 3DVision.

In particolare, le prestazioni ottenute dal filtraggio Savitzky-Golay dei dati di spostamento hanno evidenziato degli ottimi risultati nel campo di frequenze più rilevanti in ambito sismico, sia in termini di riproducibilità degli accelerogrammi che di calcolo degli indici ottenibili con l'uso di accelerometri convenzionali.

Ad ogni modo, saranno condotti nei prossimi mesi ulteriori studi comparati su altri input sismici per avere un campionario più vasto possibile dell'efficacia dei diversi filtri considerati e per una ottimizzazione della scelta dei relativi parametri di filtraggio.

A tale riguardo, si ritiene che uno sforzo finalizzato all'affinamento delle tecniche di elaborazione di questo tipo di dati sia giustificato dai sopracitati vantaggi nell'uso di questi sistemi rispetto alla sensoristica tradizionale comunemente utilizzata per i test su tavola vibrante.

Inoltre, si rimarca che questo tipo di sistemi ha notevoli margini di miglioramento in prospettiva. Sia dal punto di vista hardware, con l'aumento della risoluzione dei sensori digitali CMOS e CCD disponibili a costi sempre più ridotti; connessioni sempre più veloci ed efficaci tra moduli di acquisizione e telecamere; risorse hardware per la capacità e la velocità di calcolo; potenzialità di condivisione della sperimentazione da remoto in real-time. Sia dal punto di vista software con lo sviluppo di nuovi algoritmi più efficaci, stabili e robusti per la ricostruzione 3D dei marker e per la calibrazione dinamica delle telecamere MX, che porterebbero a migliorare ulteriormente l'accuratezza delle misure.

BIBLIOGRAFIA

Beraldin, J. A., Latouche, C., El-Hakim, S. F., Filiatrault, A., 2004. Applications Of Photogrammetric And Computer Vision Techniques In Shake Table Testing, *13th World Conference on Earthquake Engineering*. August 1-6, Vancouver, CA.

Berg, G. V., Housner, G. W., 1961, Integrated velocity and displacement of strong earthquake ground motion, Bull. Seismol. Soc. Amer., **2**, 51.

Bevington, P. R., 1969. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. New York: McGraw-Hill, 58-64.

Boore D. M., 2001. Effect of Baseline Corrections on Displacements and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake Bull. Seismol. Soc. Amer., **91**(5), 1199–1211.

De Boor C., 2001. *A Practical Guide to Splines,* Springer.

Holoborodko, P., 2008, Smooth noise robust differentiators, http://www.holoborodko.com/pavel/numerical-methods.

IEEE Std 693-2005, 2006. *Recommended Practice for Seismic Design of Substations*, IEEE, New York, NY, USA.

Lunghi, F., Pavese, A., 2012. Computer Vision System for Monitoring in Dynamic Structural Testing, *Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering,* **22**, 159-176.

Lyness, J. N., Moler, C. B., 1967. Numerical Differentiation of Analytic Functions , *SIAM Journal on Numerical Analysis*, **4**(2), 202-210.

Mongelli, M., De Canio, G., Roselli, I., Colucci, A., Tatì, A., 2010. 3D motion capture and FEM Analysis for Shaking Table Tests at ENEA Casaccia Research Center, *14th European Conference On Earthquake Engineering.* August 30–September 3, Ohrid, Republic of Macedonia.

Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P., 2007. *Numerical recipes 3rd edition: the art of scientific computing*, Cambridge University Press, New York, NY, USA.

Rinaldis, D., 2004. Aquisition and processing of analogue and digital accelerometric records: ENEA methodology and experience from Italian earthquakes, *COSMOS Invited Workshop on Strong-Motion Record Processing*, Richmond, Ca, USA.

Roselli I., Mencuccini G., Mongelli M., Beone F., De Canio G., Di Biagio F., Rocchi A., 2010. The DySCo virtual lab for Seismic and Vibration Tests at the ENEA Casaccia Research Center, *14th European Conference On Earthquake Engineering.* August 30–September 3, Ohrid, Republic of Macedonia.

Savitzky, A. Golay, M. J. E., 1964. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, *Analytical Chemistry*, **36** (8), 1627–1639.

Schafer, R. W., 2010. *HPL-2010-109: On the Frequency-Domain Properties of Savitzky-Golay filters*, HP Laboratories.

Ye, L., Ma, Q., Miao, Z., Guan, H., Zhuge, Y., 2011. Numerical and comparative study of earthquake intensity indices in seismic analysis, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, John Wiley & Sons, 1-20.