



Test dinamici con una nuova generazione di accelerometri

Dott. Ingg. Luca ZANAICA^(*, **), Dae-Hyun KIM^(**, ***)
Manuel GRENDENE^(*), Maria Q. FENG^(**), Claudio MODENA^(*)

SOMMARIO - Il controllo in tempo reale di strutture civili è fondamentale per la sicurezza e la salvaguardia del territorio. Nell'ambito delle ricerche sperimentali svolte presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale a UC Irvine, sono state investigate le reali possibilità di utilizzo di questi accelerometri di nuova generazione a fibra ottica, basati sul fenomeno di Moiré.

L'analisi fisica dell'accelerometro porta alla configurazione di partenza di un algoritmo numerico, studiato per il *real time*, atto ad eliminare le carenze fisiche del sensore stesso visto come accelerometro. Si verifica l'applicazione reale del sensore a fibre ottiche mediante prove dinamiche su tavola vibrante, svolte sul modellino di un edificio. Si provvede all'identificazione dinamica, al danneggiamento e, successivamente, alla localizzazione del danno. Si effettua, infine, il monitoraggio delle vibrazioni di un ponte esistente in Sud Corea. Si confrontano sempre le acquisizioni dinamiche di tale nuovo sensore con quelle ottenute da altri validi accelerometri di riferimento.

Questa nuova generazione di accelerometri è del tutto paragonabile ad altri già in commercio, anzi il segnale risulta essere praticamente privo di interferenze e la risoluzione dello stesso è di alto livello. La definizione dei modi di vibrare e la localizzazione del danno è quindi facilitata. Questi sensori si prestano benissimo ad applicazioni nelle quali il rumore elettromagnetico distorcerebbe enormemente i segnali.

1. Introduzione

1.1. Tecnologia per strutture "intelligenti" a fibre ottiche

Una fibra ottica è un filo flessibile e sottile di materiale dielettrico che può ricevere la radiazione ottica ad una estremità e guiderla all'altra estremità. Normalmente, la fibra è costituita di almeno due materiali otticamente dissimili, assemblati così che il materiale con l'indice di rifrazione più basso (rivestimento) circondi completamente l'altro [1]. Il materiale centrale (nucleo) trasporta le onde di luce, le quali sono intrappolate nel nucleo stesso dalla riflessione all'interfaccia tra i due materiali. Il nucleo ed il rivestimento sono solitamente costituiti primariamente da silice con quantità molto piccole di dopanti, come il

germanio e il boro, aggiunti per cambiare gli indici di riflessione del nucleo. Comunemente, la copertura è fatta di plastica per dare flessibilità alla fibra. Ogni sensore a fibra ottica richiede, di base, i seguenti componenti: la sorgente di luce, i separatori e gli accoppiatori, i sensori, il sistema di demodulazione e quello di elaborazione.

La grande diffusione delle fibre ottiche, in combinazione con i grossi progressi sulle tecnologie relative ai materiali compositi, ha aperto il nuovo campo tecnologico per strutture "intelligenti" a fibre ottiche che offre agli ingegneri strutturisti e meccanici la possibilità di incorporare le fibre ottiche all'interno del design stesso dei vari sistemi progettati. Edifici e ponti possono quindi indirizzare informazioni ad una centralina riportando il loro stato d'efficienza conseguente a terremoti, catastrofi naturali o semplicemente al passare del tempo.

La tecnologia a sensori a fibra ottica ha permesso l'implementazione di un sistema "nervoso":

1. fornendo sensori piccoli e sufficientemente resistenti, integrabili ed inseribili direttamente nei materiali;
2. costruendo sensori molto sensibili e in grado di funzionare in un ampio *range* dinamico, nonostante le loro piccole dimensioni;

^(*) Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Università degli Studi di Padova, Italia.

^(**) The Henry Samueli School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Irvine, U.S.A.

^(***) Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul, Sud Corea.

SCIENZA E TECNICA

3. rendendo questi sensori molto leggeri utili laddove strumenti più grandi o pesanti non possono essere installati;
4. dando la possibilità di installare i sensori in quantità distribuite in linea ma anche nelle tre direzioni dello spazio;
5. rendendo possibile il *multiplexing* di molteplici sensori su una singola linea, permettendo così una riduzione del peso e minimizzando i punti di ingresso ed uscita;
6. fornendo isolamento elettrico ed immunità alle interferenze elettromagnetiche (EMI);
7. fornendo immunità alle interferenze con le frequenze radio (RFI);
8. fornendo sensori funzionanti in un'ampia banda di frequenze, necessario per avere elevate prestazioni;
9. rendendo i sensori utili anche in varie condizioni ambientali avverse compresa l'alta temperatura;
10. migliorando i sensori che resistono ad elevati livelli di vibrazioni e shock, grazie alle loro configurazioni "solide"[5] [9] [17].

Tuttavia, in molti campi di utilizzo, i sensori a fibra ottica dovrebbero competere con altri di tecnologie molto

più mature come quelli elettronici. Le funzioni base di una struttura "intelligente" a fibre ottiche sono:

- rilevare le condizioni ambientali all'interno della od attorno alla struttura;
- ritrasmettere indietro l'informazione all'elaboratore di segnali (ottico od elettronico);
- svolgere un'azione derivante dal risultato dell'informazione rilevata.

La fig. 1 mostra schematicamente il diagramma funzionale del sistema tipo.

1.1.1. I sensori a fibra ottica

Le applicazioni di questi sensori a fibra ottica includono sensori di rotazione, sensori di vibrazioni, sensori di fumo, sensori di posizioni lineari ed angolari, sensori di deformazione e temperatura e sensori per applicazioni in campo elettromagnetico [17].

I sensori a fibra ottica sono spesso classificati come estrinseci oppure intrinseci. I primi hanno la fibra ottica che trasporta la luce verso e da una "black box" che in risposta agli effetti ambientali modula la luce stessa. I sen-

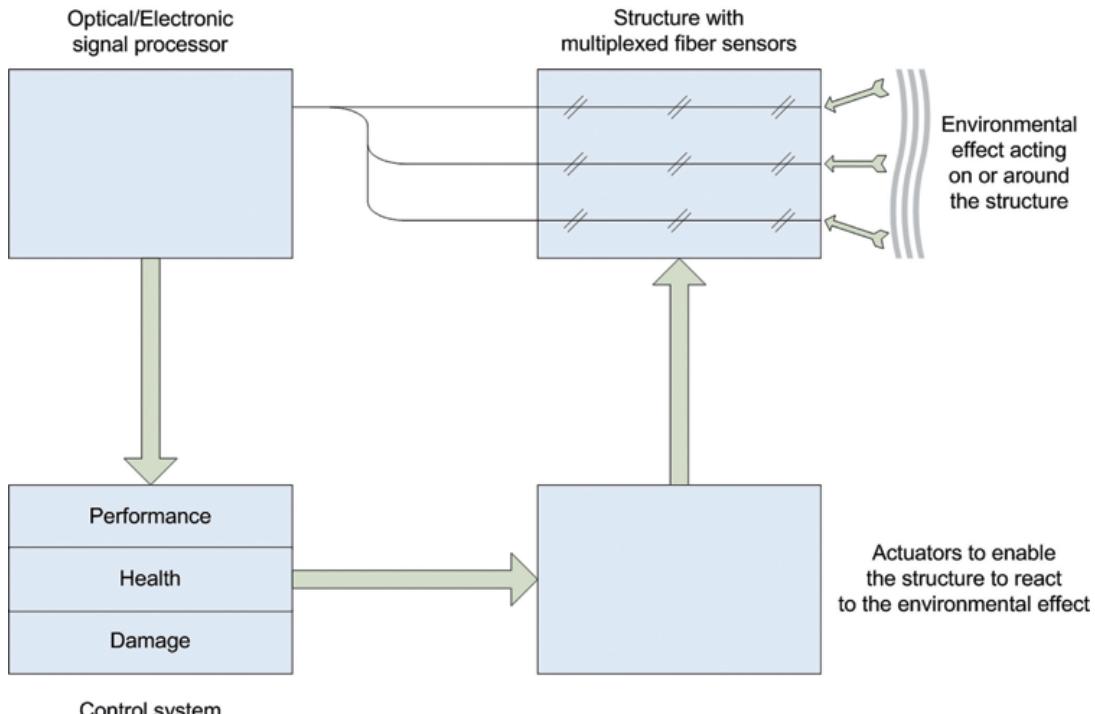


Fig. 1 - Diagramma del funzionamento di base di un *fiber optic smart structure system*.

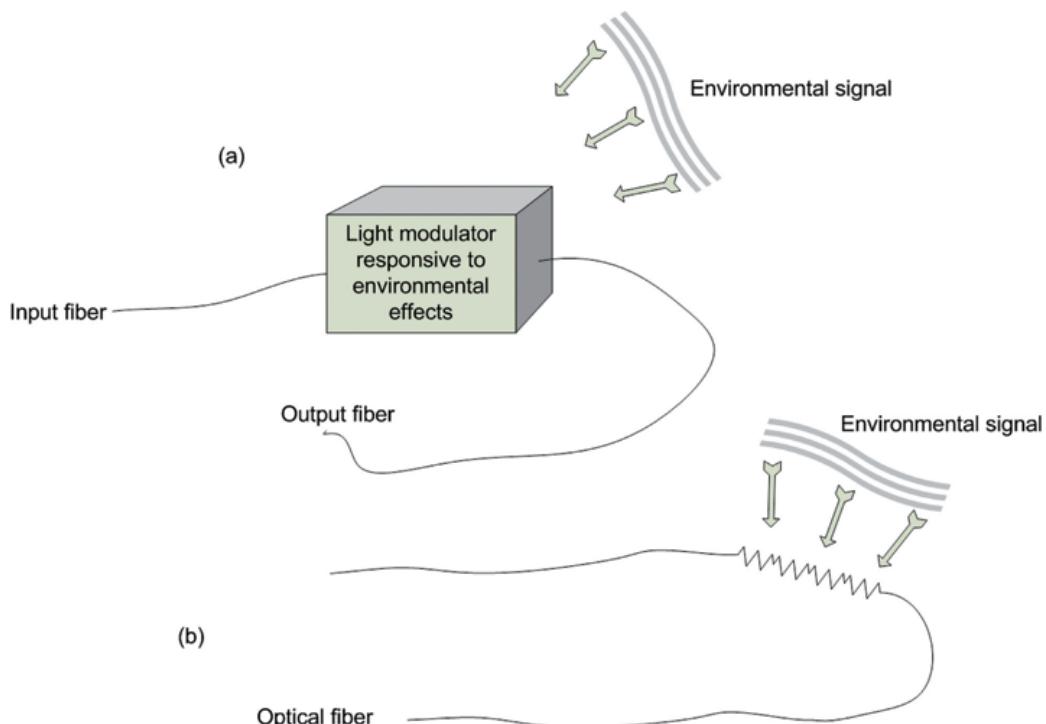


Fig. 2 - (a) Sensori estrinseci o ibridi; (b) Sensori intrinseci.

sori intrinseci misurano la modulazione della luce effettuata dall'agente ambientale all'interno della fibra stessa. La fig. 2 chiarisce schematicamente queste due tipologie di sensori. I sensori estrinseci a fibra ottica hanno trovato il loro uso in commercio come sensori di posizioni angolari e lineari, nel campo della misurazione di temperatura, di pressione, di livello di liquidi e misure di flusso nel controllo di alcuni particolari processi.

Un'importante sottoclasse dei sensori intrinseci è quella degli interferometrici, che spesso sono caratterizzati da elevata sensibilità e competono con i convenzionali sensori in alcune aree quali l'acustica e il rilevamento delle rotazioni e delle deformazioni lineari.

1.2. Stato dell'arte

Le richieste di sensibilità sono molto complicate perché la maggior parte dei parametri da misurare presentano un comportamento dinamico con costanti (in funzione del tempo) che variano su molti ordini di grandezza. Sistemi di controllo strutturale attivo richiedono anche un monitoraggio in tempo reale di carichi esterni.

I carichi esterni derivanti dall'ambiente sono il peso proprio, il traffico, i terremoti, il meteo, le onde, le allu-

vioni, gli attacchi chimici dei fuochi, ecc. La misura degli effetti dei terremoti ha ricevuto un considerevole aumento di attenzione nell'arco degli ultimi anni: si misurano infatti le risposte sotto forma di accelerazioni, deformazioni, deflessioni e forze interne.

La valutazione del danno tramite l'identificazione dinamica è uno dei principali campi di studio: si identifica l'avvenimento o meno del danno, si determina la localizzazione geometrica del danno, si stima la severità dello stesso e si predice il rimanente tempo di vita della struttura.

Molti tipi di accelerometro sono stati sviluppati e ancor più sensori a fibra ottica sono stati usati nella pratica comune nelle strutture civili. Il futuro dei sensori di accelerazione è collegato alle fibre ottiche e agli accelerometri. Gli accelerometri in fibra ottica sono ancora in fase di sviluppo. Tramite una ricerca nella letteratura di questo campo è possibile avere un'idea dello stato dell'arte. Gli interferometrici sembrano essere i più importanti.

1.2.1. Accelerometro interferometrico Michelson

Nel 1995 PECHSTEDT et al. [15] progettarono un accelerometro interferometrico Michelson. Questo è formato da

una massa sismica che è tenuta in sede da due cilindri identici. Fibre del tipo *monomodale* su due bracci sono utilizzate come un interferometro Michelson. Si relaziona la lunghezza del cilindro con l'accelerazione del suolo tramite una legge di proporzionalità. La gomma del cilindro permette il suo impiego ad elevate temperature e, per gli autori, l'effetto della temperatura è trascurabile. Risulta però fisicamente difficile ottenere un accelerometro a bassa frequenza con alta risoluzione (ottimale per monitoraggio strutturale).

1.2.2. Accelerometro con cavo vibrante

Nel 1995 FENG et al. [5] fecero un particolare tipo di accelerometro basato su un cavo vibrante la cui tensione può essere modulata da una forza esterna (oppure da una deformazione o una vibrazione esterni) ed è tramutata nel cambio della frequenza propria di vibrare del cavo: la frequenza di risonanza del cavo è proporzionale alla radice quadrata della tensione del cavo. Questo tipo di sensore ha alcune caratteristiche positive perché la frequenza delle vibrazioni del cavo è un segnale sicuro e la perdita della potenza della luce nella fibra ottica è quasi nulla. È insensibile alle variazioni di temperatura. Uno sviluppo successivo incompiuto sarebbe stato quello di trasformarlo in un accelerometro tramite l'attacco di una massa e di uno smorzatore.

1.2.3. Accelerometri a "mensola"

Negli anni 1997-1998 ci sono alcuni esempi di accelerometri a mensola con fibra ottica. LÓPEZ-HIGUERA et al. [11] svilupparono un accelerometro per basse frequenze, basato su una mensola di fibra ottica senza nessuna massa aggiuntiva. Questo è un buon sensore per monitorare vibrazioni a basse frequenze con piccole ampiezze su grandi macchine rotanti. Tuttavia, può essere utilizzato solo se non è richiesto un elevato grado di accuratezza.

KALENIK et al. [7] studiarono un tipo di accelerometro basato sulla modulazione dell'ampiezza di vibrazione della mensola: l'ampiezza è proporzionale all'accelerazione. Questo accelerometro è compatto, facile da costruire, poco costoso. Ha una bassa precisione a causa della modulazione dell'ampiezza: spesso la precisione di ampiezza è condizionata dalle variazioni della luce ambientale, dagli spostamenti della sorgente luminosa e dalla sensibilità di captazione del segnale.

Un tipo avanzato di accelerometro a mensola era stato trattato da DOYLE et al. [3]. Questo è un accelerometro a due assi di misurazione con una fibra ottica a mensola impiegata come massa inerziale. Una fibra ottica perfettamente simmetrica permette di avere l'accelerazione su due assi perpendicolari. Così, i quattro segnali ottici possano differire in intensità. È richiesta una normalizzazione ed un *offset* prima di usare il sensore. Questo sensore ha gli stessi aspetti negativi dei due precedenti accelerometri qui trattati.

1.2.4. Accelerometro con grata di diffrazione

Un'idea innovativa è stata presentata nel 1998 da VALLET et al. [18]. Questo è un sensore interferometrico dove le informazioni relative all'accelerazione sono date dal conteggio delle frange della grata. Infatti, l'accelerazione è dedotta dalla misura ad ogni istante dello spostamento relativo tra l'involucro (fissato a terra) e la massa sismica. Quando la scatola riceve un'accelerazione in input, il conteggio delle frange che si spostano permette di determinare lo spostamento relativo ad ogni istante. Questo è un accelerometro compatto e facile da montare con un *range* di misurazioni molto basso. Sembra utile per applicazioni all'interno di ambienti elettromagnetici.

1.2.5. Accelerometri a "reticolo di Bragg"

Sensori a Bragg grating sono di solito utilizzati per misurare la deformazione. Un miglioramento di questo tipo è stato fatto da MITA et al. [12] usando tale tecnologia per un accelerometro. Questa particolare applicazione di FBG (Fiber Bragg Grating) ha una sensibilità che decresce monotonicamente all'aumentare della frequenza naturale. L'aspetto negativo in questo caso è che si ha un'elevata amplificazione in prossimità della frequenza naturale dell'accelerometro perché non è inserito nessun tipo di smorzamento.

Un altro tipo di accelerometro a FBG è stato sviluppato da KRÄMMER et al. [1]. Il principio di funzionamento è un sistema molla-massa con una massa inerziale connessa al telaio di base attraverso una fibra ottica che contiene due Bragg grating che si sovrappongono parzialmente. Prendendo misure in continuo degli spostamenti della massa inerziale, è possibile ottenere l'accelerazione della massa. Il sensore è insensibile alle variazioni di temperatura ma non ha nessuno smorzamento che è fondamentale per il monitoraggio delle strutture civili.

2. Misuratori di vibrazioni

2.1. Misuratori di spostamento

Il più semplice strumento di misurazione è costituito da un sistema massa-molla. Ciò si ottiene facendo la molla del trasduttore così flessibile o la massa del trasduttore così grande, o entrambi, talché la massa rimane ferma mentre il supporto si muove. La scatola rigida (il contenitore) è infatti collegata al sistema vibrante.

Per analizzare il concetto di base, si consideri uno spostamento armonico

(2.1)

Con la forzante ,
l'equazione

(2.2)

SCIENZA E TECNICA

governa lo spostamento relativo della massa. Conoscendo il risultato di un sistema smorzato sotto forzante armonica

$$(2.3)$$

dove

è il

fattore di risposta in accelerazione ed il ritardo di fase è

Per frequenze della forzante ω molto più alte della frequenza naturale ω_n , R_d è prossimo all'unità (si veda u_0/u_{g0} in fig. 3, infatti u_0/u_{g0} è proporzionale a R_d) e ϕ è circa 180° , e (2.3) diventa

$$(2.4)$$

Questo spostamento è lo stesso di quello del supporto (2.1) ma con il segno opposto, il che rende la lettura di $u(t)$ facilmente gestibile.

In conclusione, uno strumento che misura spostamenti è uno strumento "sismico" con la propria frequenza naturale minore o uguale alla metà della più piccola frequenza da misurare. Se il moto ha frequenze maggiori della frequenza fondamentale, ciò non è un problema perché la precisione sarebbe maggiore. Il campo di misurazioni può essere aumentato diminuendo la frequenza naturale ω_n che significa aumentare la massa m del sistema oppure diminuire la rigidezza k del sistema. Dalla fig. 3 con un fattore di smorzamento $\zeta = 50\%$ e $\omega > \omega_n$ lo spostamento misurato u_0 è praticamente lo stesso spostamento di base u_{g0} .

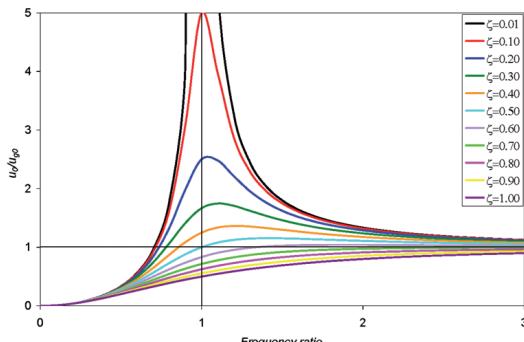


Fig. 3 - Definizione del miglior valore di *damping ratio* per un misuratore di spostamenti.

2.2. L'accelerometro tradizionale

Si consideri la misurazione del moto armonico descritto da

$$(2.5)$$

Per questa forzante l'equazione del moto è la (2.2), dove la funzione forzante è

Conoscendo bene, anche in questo caso, il comportamento di un sistema forzato da un'armonica

$$(2.6)$$

che può anche essere riscritto come

$$(2.7)$$

ed è lo spostamento della massa dello strumento relativamente al telaio esterno su cui è fissata la massa stessa. Lo spostamento registrato $u(t)$ è l'accelerazione di base modificata dal fattore $-R_d/\omega_n^2$ e registrata con un ritardo temporale di ϕ/ω .

Nelle equazioni già utilizzate

è il fattore di risposta in spostamento e $(u_{st})_0$ è il massimo valore della deformazione statica.

Quando si progetta uno strumento si cerca di rendere R_d e ϕ/ω indipendenti il più possibile dalla frequenza forzante perché ogni componente armonica dell'accelerazione sarà registrata con lo stesso fattore di risposta e con lo stesso ritardo di fase. Poi anche se il moto da registrare consiste di molte componenti armoniche, lo spostamento registrato $u(t)$ avrà la stessa forma del moto del supporto con un costante scostamento temporale. Questo scostamento temporale (costante) muove semplicemente un po' la scala, che di solito non è importante. Dalla (2.6) è possibile estrapolare la relazione tra i massimi valori:

$$(2.8)$$

Avendo alla fine

$$(2.9)$$

che è graficato in fig. 4. Da questa figura si ricava che se il fattore di smorzamento $0.6 \leq \zeta \leq 0.7$, R_d con frequenze che ricadono in $0 \leq \omega/\omega_n \leq 0.6$, è vicino all'unità (con un errore minore del 2.5%) e la variazione di ϕ con ω è pressoché lineare, cioè ϕ/ω è sostanzialmente costante.

Quindi uno strumento con una frequenza naturale di 50 Hz e fattore di smorzamento di 0.7 ha un intervallo "utile" di frequenze da 0 a 30 Hz con minimo errore. Se si aumenta ω_n si ottengono maggiori intervalli "utili" di frequenza.

3. Accelerometro a fibra ottica

Questo accelerometro (fig. 5) [22] utilizza il fenomeno detto delle frange di Moiré come meccanismo per misu-

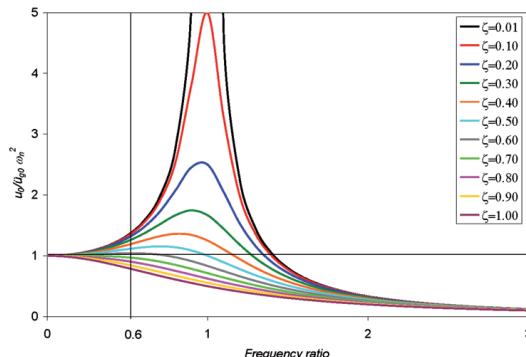


Fig. 4 - Definizione del miglior valore di *damping ratio* per un misuratore di accelerazioni.

rare lo spostamento relativo. La luce è trasmessa al sensore attraverso le fibre di tipo *multimodale*. La grandezza fisica da misurare è modulata dai segnali di luce dovuti al fenomeno di Moiré. Poi, la luce è trasmessa ad una unità centrale che elabora i dati.

Come mostrato in fig. 5, l'accelerometro a fibra ottica consiste di una massa, una molla ed uno smorzatore, nella tipica configurazione di un sistema ad un singolo grado di libertà. Nello specifico, ci sono due grate ottiche: una collegata alla massa e l'altra alla scatola. Due coppie di fibre ottiche sono posizionate perpendicolarmente alle grate. Lo spostamento relativo tra le due grate ottiche è lo stesso spostamento relativo che si ha tra la massa ed il telaio del sensore.

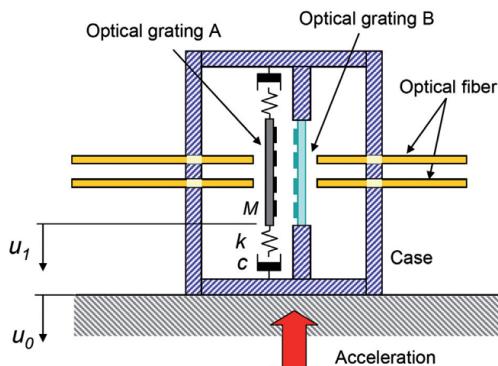


Fig. 5 - *Conceptual design* dell'accelerometro a fibre ottiche basato sul principio di Moiré fringe.

Quando due grate ottiche, costituite dall'alternarsi di strisce trasparenti ed opache, vengono sovrapposte, la luce viene trasmessa quando le fasce trasparenti coincidono, mentre non viene trasmessa quando non coincidono. In teoria, lo spostamento relativo tra le due grate può essere misurato con il tracciamento delle frange di Moiré che passano attraverso un punto. Tuttavia, osservando le frange di

Moiré su un punto soltanto, non si ha l'informazione necessaria per determinare anche la direzione del movimento; questo risulta essere necessario per determinare la direzione dei movimenti relativi delle due griglie. Fortunatamente, la direzione può essere determinata così come l'ampiezza dello spostamento grazie al monitoraggio delle frange su due punti, i quali sono posti ad una distanza reciproca pari ad un quarto della larghezza di frangia.

Questo tipo di sensore ha tutti i vantaggi tipici dei sensori a fibra ottica.

3.1. Caratterizzazione fisica dell'OFA

3.1.1. Primo prototipo

Il primo obiettivo è determinare le caratteristiche fisiche dell'OFA (*Optical Fiber Accelerometer*):

- frequenza naturale f_n ;
- fattore di smorzamento ζ ;
- curva di *trasmissibilità* – frequenza.

In questo caso, lo studio è fatto in un primo prototipo (fig. 6). Questo sensore presenta al suo interno due coppie di mensole di ottone che sono collegate tra loro. Lo smorzamento è magnetico: una "testa" cilindrica metallica è incollata sulle mensoline del sensore e il magnete è fuori dalla scatola stessa del sensore. Le fibre ottiche sono del tipo *multimode*.

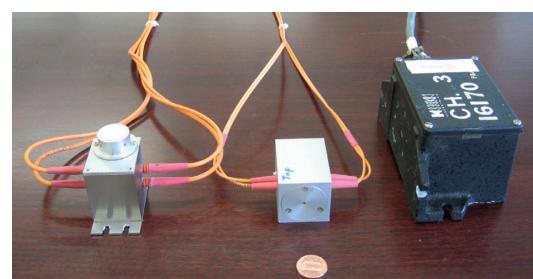


Fig. 6 - Primo e secondo prototipo dell'OFA e sensore Kinematics.

A causa della difficoltà nell'ottenere la risposta statica del sensore tramite un generatore di vibrazioni, la frequenza naturale ed il *fattore di smorzamento* sono determinati attraverso la curva di risposta in frequenza ottenuta sperimentalmente.

Procedura sperimentale

L'accelerometro a fibra ottica e il sensore convenzionale preso a riferimento sono saldamente attaccati alla tavola vibrante. Per controllare la tavola vibrante si utilizza un generatore di funzioni in modalità *fixed-sine*. La risposta viene osservata finché si vede che la parte transitoria dello smorzamento svanisce, così viene quindi misurata l'ampiezza dell'accelerazione in fase stazionaria. Le fre-

SCIENZA E TECNICA

quenze indagate sono 0.5Hz, 1.0Hz, 2.5Hz, 5.0Hz, 10.0Hz, 15.0Hz, 16.0Hz, 17.0Hz, 18.0Hz, 19.0Hz, 20.0Hz, 21.0Hz, 21.5Hz, 22.0Hz, 23.0Hz, 24.0Hz, 25.0Hz, 30.0Hz, e 40.0Hz. La frequenza forzante è fatta, quindi, variare in un *range* che include la frequenza naturale del sistema. Ogni caso è ripetuto cinque volte, in modo da mediare gli eventuali errori nelle misurazioni e da controllare la deviazione standard dei dati (tabelle 1, 2 e 3).

TABELLA 1

INFORMAZIONI RELATIVE AI TRE ACCELEROMETRI

	<i>Identification</i>	<i>Channel n°</i>	<i>Power</i>	<i>Output</i>	<i>Sensitivity</i>
Optical fiber accelerometer	1 st prototype	Ch 1 and Ch 2	±9V DC	±10V	N.A.
Optical fiber accelerometer	2 nd prototype	Ch 1 and Ch 2	±9V DC	±10V	N.A.
Reference conventional accelerometer	Kinematics 16083	Ch 3	±12V DC	±10V	1g/2.5V

Assumendo che l'accelerometro preso a riferimento misuri correttamente l'accelerazione A_{excite} , è utile graficare (fig. 7) il rapporto tra lo spostamento del prototipo e l'accelerazione del sensore di riferimento (D_{OFA}/A_{excite}) in funzione di ω . Il rapporto seguente

$$(3.1)$$

è il fattore di risposta in spostamento (*transmissibility*).

A questo punto, il metodo del *half-power bandwidth* può essere utilizzato per ottenere le caratteristiche fisiche del sensore a fibra ottica. Un ottimo confronto è effettuato provando a vedere l'effettivo combaciare dei dati ottenuti nel test con la curva teorica ottenuta una volta indi-

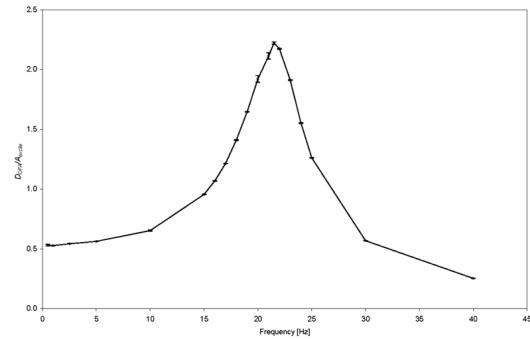


Fig. 7 - Risultato sperimentale derivante dai dati acquisiti (1° prototipo OFA).

viduati frequenza naturale e fattore di smorzamento col metodo sopra citato (fig. 8).

3.1.2. Secondo prototipo

Il secondo prototipo di questa nuova generazione di accelerometri a fibra ottica (fig. 6) presenta al suo interno una molla spiroideale con uno smorzatore che, in questo caso, è ad aria. Il principio base di funzionamento è lo stesso del primo prototipo, tramite il fenomeno di Moiré ed impiega fibre ottiche di tipo *multimode*. Lo stesso esperimento illustrato nel precedente paragrafo viene effettua-

TABELLA 2

DETTAGLI SUI DATI ACQUISITI COL PRIMO PROTOTIPO DI OFA

Frequency [Hz]	Level [mVpk]	Sampling Freq. [kHz]	D/A 1	D/A 2	D/A 3	D/A 4	D/A 5	Average	Standard Deviation
0.5	100	2.5	0.5241	0.5245	0.5331	0.5295	0.5423	0.5307	0.0075
1.0	150	5.0	0.5285	0.5352	0.5445	0.5353	0.5246	0.5275	0.0022
2.5	50	10.0	0.5302	0.5459	0.5436	0.5411	0.5422	0.5374	0.0025
5.0	60	25.0	0.5612	0.5523	0.5625	0.5625	0.5627	0.5612	0.0008
10.0	20	50.0	0.6493	0.6519	0.6579	0.6578	0.6453	0.6524	0.0055
15.0	20	50.0	0.9540	0.9566	0.9540	0.9557	0.9558	0.9552	0.0012
16.0	20	50.0	1.0701	1.0854	1.0710	1.0636	1.0691	1.0678	0.0032
17.0	20	50.0	1.2145	1.2130	1.2141	1.2151	1.2134	1.2140	0.0008
18.0	20	50.0	1.4112	1.4128	1.4122	1.4063	1.4051	1.4095	0.0036
19.0	20	50.0	1.6455	1.6500	1.6434	1.6453	1.6436	1.6456	0.0027
20.0	10	100.0	1.9381	1.8783	1.9073	1.9375	1.9436	1.9210	0.0278
21.0	10	100.0	2.0984	2.1110	2.1013	2.1608	2.0968	2.1137	0.0269
21.5	33	100.0	2.2320	2.2297	2.2235	2.2098	2.2112	2.2212	0.0103
22.0	33	100.0	2.1718	2.1726	2.1706	2.1721	2.1740	2.1737	0.0042
23.0	33	100.0	1.9143	1.9147	1.9173	1.9176	1.9161	1.9152	0.0024
24.0	33	100.0	1.5417	1.5532	1.5548	1.5537	1.5505	1.5519	0.0028
25.0	40	100.0	1.2604	1.2844	1.2615	1.2609	1.2611	1.2617	0.0016
30.0	100	100.0	0.5680	0.5679	0.5679	0.5677	0.5673	0.5678	0.0003
40.0	150	100.0	0.2514	0.2527	0.2531	0.2535	0.2536	0.2529	0.0009

TABELLA 3

DETTAGLI SUI DATI ACQUISITI COL SECONDO PROTOTIPO DI OFA

Frequency [Hz]	Level [mVpk]	Sampling Freq. [kHz]	D/A 1	D/A 2	D/A 3	D/A 4	D/A 5	Average	Standard Deviation
0.5	100	2.5	0.4993	0.5267	0.5073	0.4977	0.5074	0.5077	0.0115
1.0	150	5.0	0.4983	0.5047	0.5070	0.5030	0.5011	0.5028	0.0033
2.5	50	10.0	0.5117	0.5125	0.5105	0.5058	0.5098	0.5103	0.0022
5.0	50	25.0	0.5305	0.5307	0.5320	0.5328	0.5303	0.5313	0.0011
10.0	20	50.0	0.6034	0.6033	0.6033	0.6041	0.6041	0.6036	0.0004
15.0	20	50.0	0.8687	0.8681	0.8669	0.8662	0.8654	0.8667	0.0013
16.0	20	50.0	0.9525	0.9525	0.9524	0.9525	0.9525	0.9525	0.0010
17.0	20	50.0	1.0705	1.0728	1.0718	1.0711	1.0711	1.0714	0.0008
18.0	20	50.0	1.2223	1.2237	1.2238	1.2235	1.2220	1.2229	0.0012
19.0	20	50.0	1.4109	1.4097	1.4092	1.4101	1.4115	1.4103	0.0009
20.0	10	100.0	1.6496	1.6496	1.6490	1.6515	1.6522	1.6504	0.0014
21.0	10	100.0	1.9022	1.9017	1.9055	1.9017	1.9048	1.9032	0.0018
21.5	33	100.0	1.9986	1.9969	1.9958	1.9952	1.9971	1.9967	0.0013
22.0	33	100.0	2.0467	2.0480	2.0480	2.0507	2.0472	2.0481	0.0015
22.5	33	100.0	2.0355	2.0348	2.0360	2.0396	2.0411	2.0374	0.0028
23.0	33	100.0	1.9518	1.9482	1.9498	1.9518	1.9514	1.9506	0.0016
24.0	40	100.0	1.6730	1.6714	1.6724	1.6718	1.6671	1.6711	0.0023
25.0	100	100.0	1.3803	1.3818	1.3803	1.3824	1.3811	1.3812	0.0009
30.0	150	100.0	0.6037	0.6039	0.6042	0.6038	0.6035	0.6038	0.0003
40.0	150	100.0	0.2589	0.2591	0.2590	0.2590	0.2591	0.2590	0.0001

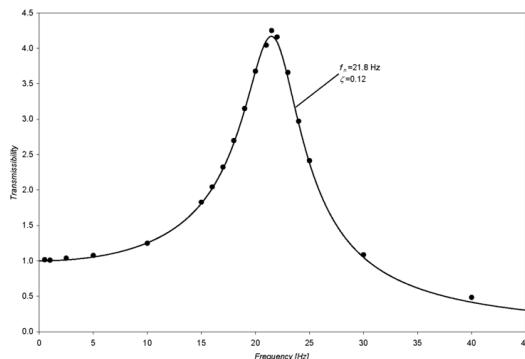


Fig. 8 - Fitting della transmissibilità finale tra i dati reali e la curva teorica (1° prototipo OFA).

to anche su questo secondo prototipo, ottenendo così le sue caratteristiche fisiche (fig. 9). Una volta note queste ultime, è possibile impostare i parametri necessari per il corretto funzionamento dell'algoritmo che lavora in *tempo reale*.

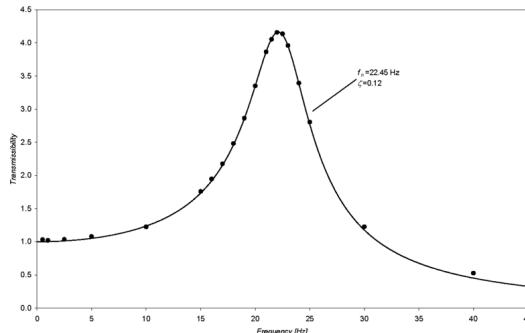


Fig. 9 - Fitting della transmissibilità finale tra i dati reali e la curva teorica (2° prototipo OFA).

3.2. Risoluzione obiettivo

La risoluzione per questo tipo di accelerometri è pari a $0.1gal = 10^{-4}g$. Per avere questo risultato con un ipotetico accelerometro con frequenza naturale di 40Hz, tramite l'equazione dello spostamento, si ottiene che il minimo spostamento rilevabile è $D_{\min} = 15.5nm$.

3.3. Formula compensatrice della frequenza

3.3.1. Algoritmo compensatore

Come già espresso nel §2, per misurare l'accelerazione, uno strumento ottimale dovrebbe avere un fattore di smorzamento di $\zeta = 0.707$. Con questa configurazione, nella fig. 4 è chiaro che il fattore R_d è praticamente 1 nel-

l'intervallo $0 \leq \omega/\omega_n \leq 0.6$.

Per il monitoraggio strutturale le frequenze da analizzare sono in genere abbastanza basse. Perciò uno strumento con frequenza naturale 40 Hz e fattore di smorzamento di 0.707 ha un intervallo utile con errore minimo tra 0 e 25Hz. Il primo prototipo ha caratteristiche fisiche non ottimali ($\zeta_0 = 12.0\%$ e $f_0 = 21.8 \text{ Hz}$), mentre un accelerometro ideale dovrebbe avere $\zeta_1 = 70.7\%$ e $f_1 = 40.0 \text{ Hz}$.

Il motivo principale per cui si ha questa differenza è che l'Accelerometro a Fibre Ottiche (OFA) non può avere un elevato smorzamento per sua stessa natura. Infatti, il sensore è concepito in modo da essere privo di Interferenze Elettromagnetiche (EMI) e lo smorzatore non è elettrico ma magnetico (oppure ad aria), avendo così uno smorzamento basso.

Studiare un metodo numerico per poter proseguire nell'impiego di tale sensore è dunque stata una premessa doverosa. Come già citato, l'equazione differenziale che governa la risposta del sistema ad un grado di libertà eccitato da una forza esterna è:

(3.1)

Con i dati registrati si hanno *time history* caratterizzati da un valore di U ogni ΔT che rappresenta il periodo di campionamento: $U_1, U_2, \dots, U_{n-1}, U_n, U_{n+1}, \dots$

Questa *time history* di spostamenti può essere facilmente trasformata in una *time history* in accelerazione (X), utilizzando la semplice relazione

La procedura vuole generare una *time history* in accelerazione "compensata": $Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1}, Y_n, Y_{n+1}, \dots$ per esprimere lo stesso fenomeno fisico. In questo caso, se V è lo spostamento ipotetico per il sistema compensato, c'è una relazione $Y = V\omega_l^2$. Quindi, l'accelerazione esterna può essere rappresentata in due modi, utilizzando sia i dati realmente registrati che quelli compensati ottenuti alla fine:

(3.2)

(3.3)

A questo punto si possono utilizzare le differenze finite per approssimare accelerazioni e velocità: la formula alle differenze centrate

per approssimare \dot{U} e \ddot{V} ; la formula che utilizza assieme la formula delle differenze in avanti ed all'indietro

per approssimare le accelerazioni \dot{U} e \ddot{V} . Per U (ed allo stesso modo per V) si utilizza la seguente espressione per fare in modo che il valore dipenda dai due valori antecedente e seguente:

$$(3.4)$$

L'equazione finale allo step $n - 1$ può essere ottenuta:

$$(3.5)$$

Assumendo:

$$(3.6)$$

$$(3.7)$$

$$(3.8)$$

e moltiplicando per 12, si giunge facilmente a:

e moltiplicando per 12, si giunge facilmente a:

$$(3.9)$$

Se ora i termini in U e V vengono trasformati in termini in accelerazione (X e Y) è possibile ottenere la seguente formula:

$$(3.10)$$

Infine, con i seguenti parametri:

$$(3.11)$$

$$(3.12)$$

$$(3.13)$$

è possibile semplificare l'equazione in

$$(3.14)$$

Ora la formula detta di compensazione può essere così semplicemente espressa, come l'equazione di un filtro:

$$(3.15)$$

3.3.2. Analisi della formula

Questo algoritmo è molto utile, perché può essere impiegato (in questo caso specifico si sono utilizzati C++ e MATLAB®) per ottenere *time history* "virtuali" che possono essere considerate come il punto di partenza per ogni analisi strutturale successiva. È come creare un nuovo accelerometro.

Per vedere il reale comportamento di questo algorit-

mo, si può osservare la fig. 13 che presenta anche l'accelerazione di un accelerometro di riferimento. Tramite tale figura è evidente che i dati ottenuti sono molto simili a quelli registrati dall'accelerometro preso a confronto. Un filtro di tipo low-pass può essere utilizzato per eliminare le oscillazioni sulle alte frequenze, con un eventuale controllo sul ritardo di fase.

Ci sono due metodi "classici" per esprimere la funzione di trasformazione (il filtro di compensazione): matematico (vedasi eq. 3.15) e grafico. Quest'ultimo è tipicamente effettuato tramite il grafico di Bode, che consiste di due diagrammi:

1. diagramma del modulo (*gain – frequenza*);
2. diagramma della fase (*fase – frequenza*).

Analizzando un filtro digitale, MATLAB® presenta la funzione

$$(3.16)$$

che viene utilizzata per trovare la risposta in frequenza.

Diagramma del modulo

Il diagramma del modulo è un grafico della funzione di trasformazione in decibel (dB) in funzione delle frequenze in Hz:

$$(3.17)$$

dove V_{out} e V_{in} sono i voltaggi di output ed input.

Il modo più semplice per visualizzare il comportamento del filtro è graficare assieme i due diagrammi del modulo ottenuti dall'accelerometro a fibre ottiche senza l'applicazione dell'algoritmo (prototipo 1) e da quello ideale (fig. 10).

Per valutare se effettivamente il risultato è paragonabile a quello ottenuto con il sensore ideale voluto ($\zeta = 70.7\%$ e $f = 40.0 \text{ Hz}$), viene prodotto un altro grafico di confronto (fig. 11). Alla fine, il risultato "compensato" combacia molto bene sulla curva di trasmissibilità per il sensore ideale voluto: il filtro è molto efficiente.

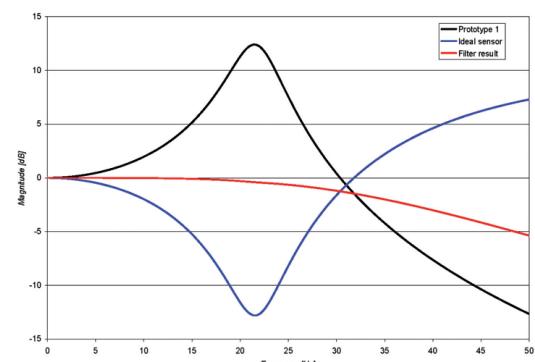


Fig. 10 - Gain plot con magnitudo in dB per l'analisi del filtro compensatore.

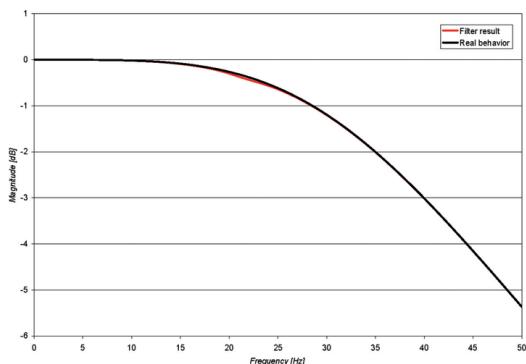


Fig. 11 - Confronto tra i grafici delle magnitudini ottenute dal filtro e dal sensore ideale (curva teorica).

Diagramma della fase

Questo diagramma è un grafico della differenza di fase in gradi (o radianti) tra output e input in funzione della frequenza in Hz. Ciò, se una sinusoida con una certa magnitudine e frequenza è imposta ad un sistema, il risultato in output è una sinusoida che è stata traslata nel tempo: mentre il segnale di input è dato da $V_{in} = \sin(\omega t)$, quello in output è $V_{out} = \sin(\omega t - \phi)$.

4. Monitoraggio strutturale di un edificio reale

The Cal-(IT)² Building

Questo edificio è di circa 1605000 m² di cui, approssimativamente, 925000 risultano essere l'area netta utilizzabile. Tutti i test di laboratorio sono stati eseguiti nel primo piano di questo edificio, nella stanza adibita a laboratorio. In questo ambiente sono presenti degli accelerometri Kinematics, già installati da United States Geological Survey (USGS) su alcuni nodi del telaio principale dell'edificio (sul pavimento, ed anche sul soffitto) per monitorare entrambe le direzioni orizzontali.

4.1. Confronto di sensori

Si sono confrontati i segnali ottenuti da tre diversi accelerometri installati sullo stesso nodo del Cal-(IT)² Building nel campus di University of California Irvine (UCI) (fig. 12):

1. il primo prototipo di OFA;
2. un sensore capacitivo della Tokyo Sokushin Co (il sensore cilindrico nero e argento in fig. 12);
3. un sensore Kinematics (si vede la scatola contenente i sensori in fig. 12).

Prima di tutto, si effettua un confronto tra il prototipo ed il sensore capacitivo lungo la direzione Z. Si misura la vibrazione ambientale per 4000 secondi. Il risultato otte-

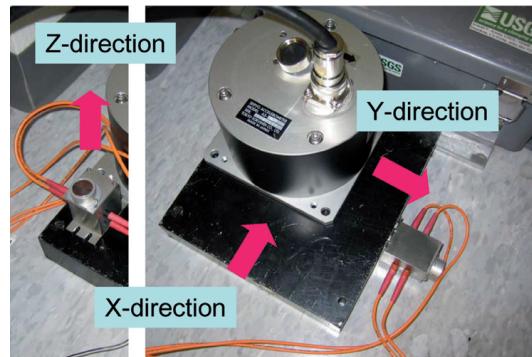


Fig. 12 - Disposizione dei sensori per il monitoraggio del Cal-(IT)² Building.

nuto con l'algoritmo compensatore sul sensore a fibra ottica è più evidente su un ingrandimento tra i 10 e i 12 secondi (fig. 13). Per analizzare la vera efficienza del sensore a fibra ottica e dell'algoritmo compensatore utilizzato, si effettua un confronto sulle potenze di densità spettrale (fig. 16). Dopo il test in direzione Z, si è proseguito il confronto sulle altre due direzioni orizzontali, utilizzando quindi anche i sensori Kinematics (figg. 14 e 15).

4.2. Risultati

Dai grafici, l'OFA fornisce un segnale che è completamente confrontabile con quello derivante da diversi sensori già in commercio. L'algoritmo compensatore lavora efficientemente dando un'accelerazione come se fosse ottenuta dall'accelerometro ideale voluto. Questo algoritmo è anche utilizzabile in un'analisi in *real-time* per monitoraggio strutturale.

L'analisi delle potenze spettrali forniscono 3.00Hz e 3.80Hz come le prime due frequenze dell'edificio.

Da un punto di vista economico si può affermare che il sensore capacitivo della Tokyo Sokushin Co. è un triassiale commercializzato per 3000\$; i Kinematics sono tutti accelerometri elettrici monoassiali che fanno parte di un set di 46 sensori installato nel Cal-(IT)² Building dall'USGS, ogni Kinematics è commercializzato per circa 600\$. Il sensore a fibra ottica costa indicativamente 900\$ e non è ancora in commercio a causa del bisogno di ulteriori test per migliorare la propria efficienza (tutti questi dati sono risalenti al momento della stesura della presente memoria: luglio 2005). Per essere un nuovo tipo di accelerometro, ancora in fase di sviluppo, è molto soddisfacente.

5. Test dinamici

Trattasi di test dinamici effettuati su un modellino di un edificio (fig. 17) che non vuole essere un edificio in sca-

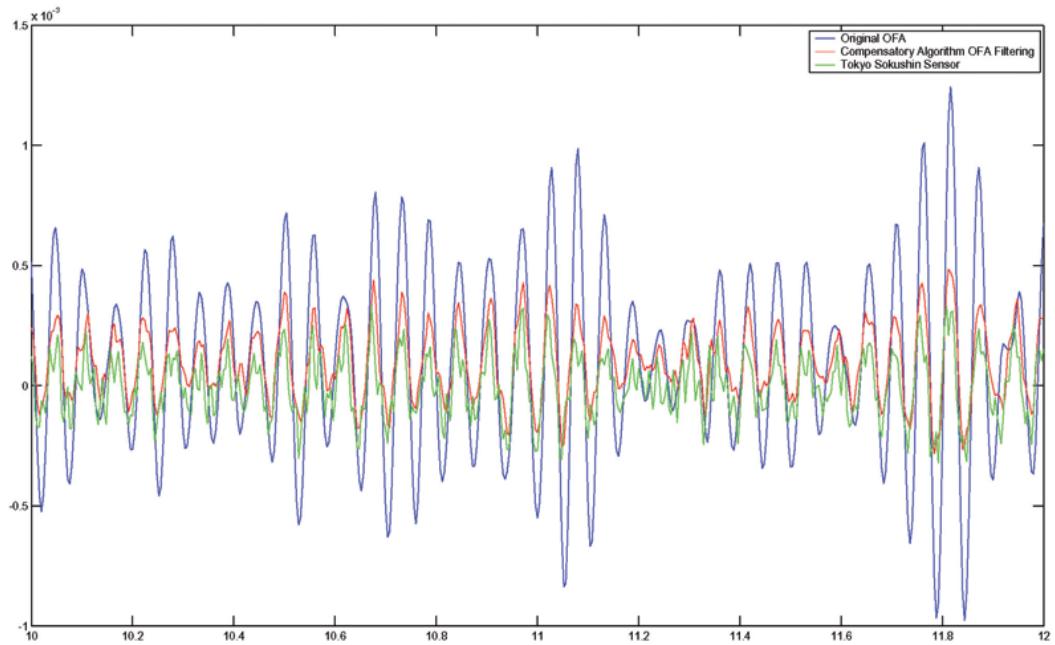


Fig. 13 - Zoom nella time history in direzione Z.

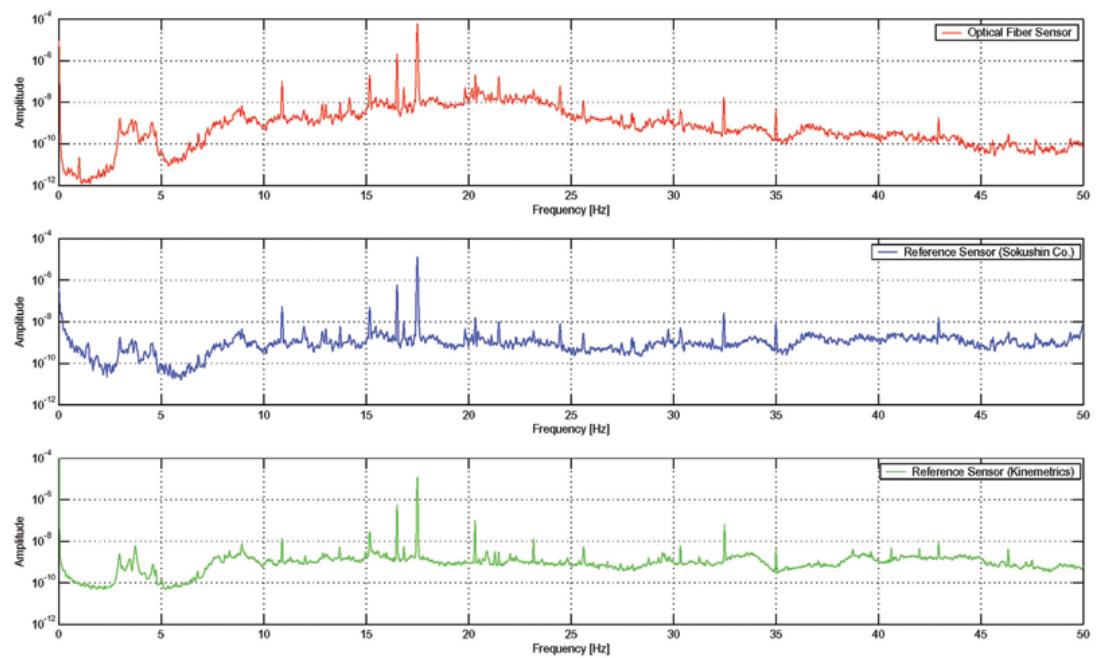


Fig. 14 - Spettro in potenza lungo la direzione X.

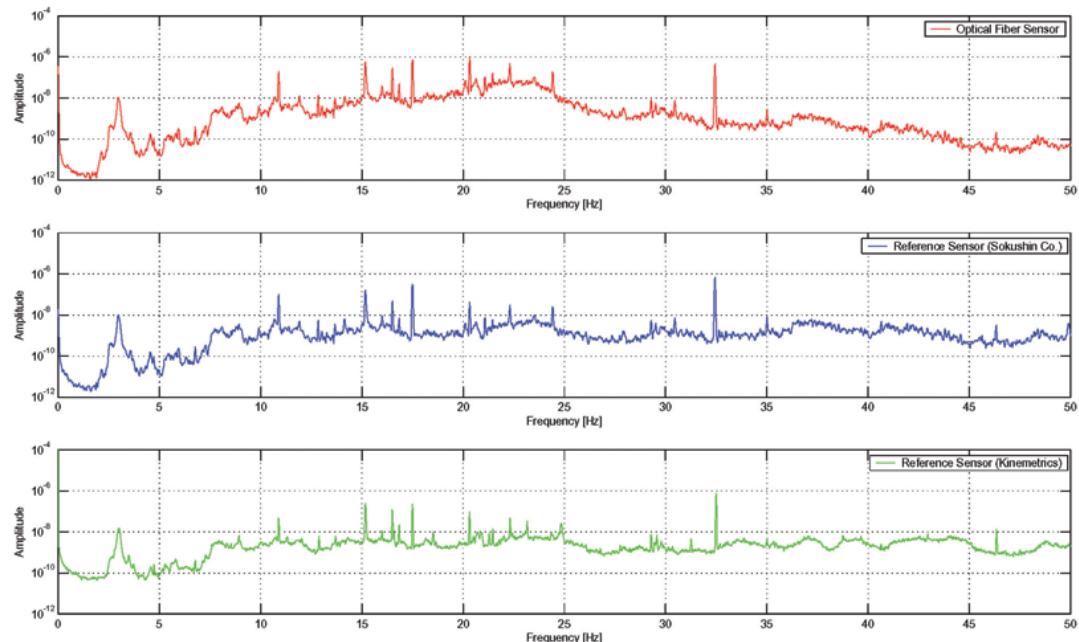


Fig. 15 - Spettro in potenza lungo la direzione Y.

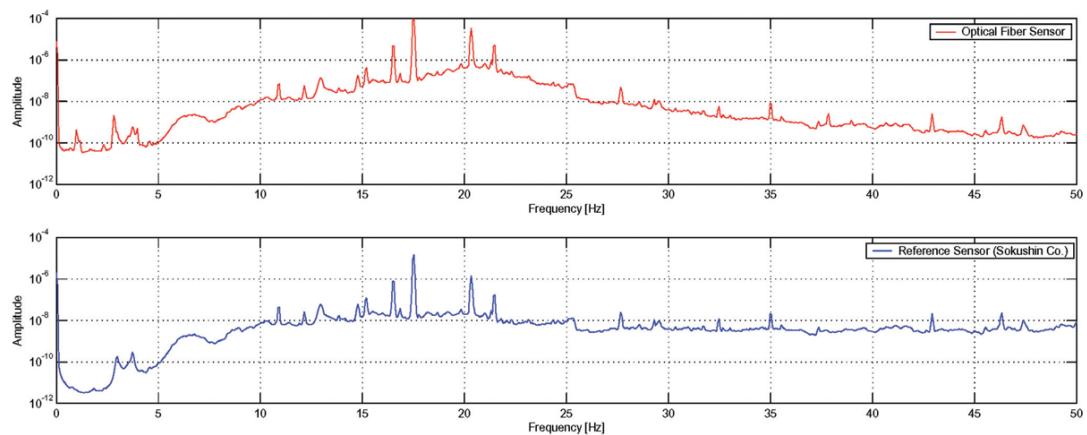


Fig. 16 - Spettro in potenza lungo la direzione Z.

la, bensì simulare plausibilmente il comportamento del *Cal-(IT)² Building*. È un edificio a quattro piani di forma rettangolare (200 mm per 300 mm). Ogni piano è connesso agli adiacenti tramite sei colonne d'acciaio fatte da barre filettate (#10 per le colonne dalla base al 2° piano, #8 per le altre). Ogni barra filettata è connessa sulle due travi con dei dadi ben fissati, in modo da simulare delle connessioni

rigide. Le travi sono degli angolari ad L in alluminio, dello spessore di 1/16. Ogni piano è costituito da un piatto di legno di 17mm di spessore che è connesso sulle due travi del piano sui lati lunghi dello stesso. Inoltre, i piatti collegano i due telai metallici del modello dell'edificio. La massa è costituita da quattro blocchi d'acciaio da quattro chili l'uno, incollati sul centro geometrico di ogni piano.

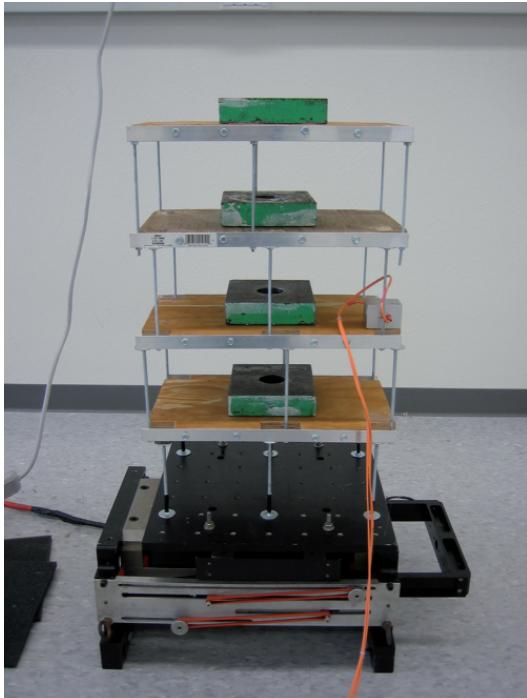


Fig. 17 - Modellino dell'edificio a 4 piani.

5.1. Analisi del modello dell'edificio

Il modello è stato testato in due differenti configurazioni. La prima configurazione prevede 3 accelerometri PCB Piezotronics su ogni piano (si evidenziano le direzioni di monitoraggio in fig. 18). La seconda configurazione prevede l'impiego del secondo prototipo di OFA spostato di volta in volta sulle stesse posizioni degli accelerometri della configurazione precedente, in modo da ottenere dati confrontabili.

I test sono tutti eseguiti con una tavola vibrante, utilizzando vibrazioni random. La prima cosa da fare è identificare le frequenze principali del modello e gli intervalli di frequenze da investigare. Si registra un set di 12 segnali (più la base) facendo anche una media delle FRF (*Frequency Response Function*) risultanti. Si ricreano le forme modali per i primi cinque modi di vibrare. In secondo luogo, si genera un danno e, dopo un'ulteriore identificazione dinamica della struttura, si esegue la localizzazione del danno. Obiettivo finale è effettuare un confronto tra gli accelerometri di tipo commerciale e l'OFA.

Il danno consiste nello svitare due dadi alla base delle colonne sul lato P (figg. 18 e 20).

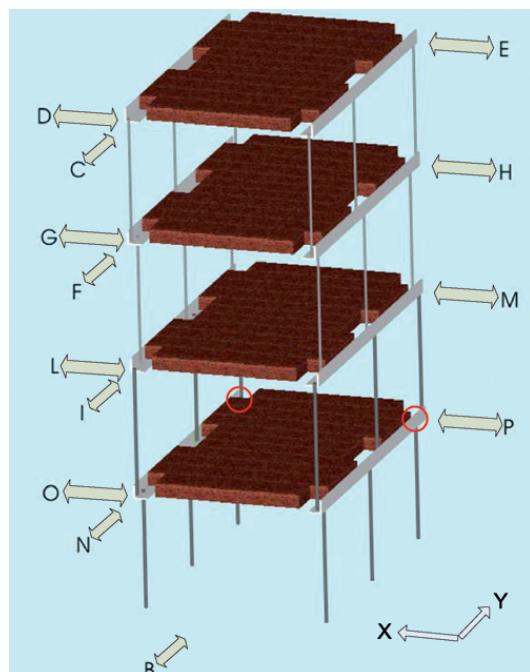


Fig. 18 - Disposizione dei sensori e individuazione dei nodi danneggiati (cerchi rossi).

5.2. Analisi con l'OFA

5.2.1. Identificazione dinamica prima del danno

Si utilizzano le vibrazioni random con l'OFA come per i sensori piezometrici, in modo da ottenere i picchi delle FRF.

Una caratterizzazione dinamica completa dell'edificio è stata svolta in due fasi differenti:

1. test in direzione Y con segnali ottenuti da ogni canale (ad esempio si veda fig. 16);

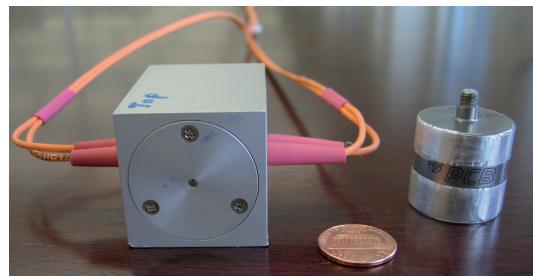


Fig. 19 - 2° prototipo dell'OFA e accelerometro PCB Piezotronics.

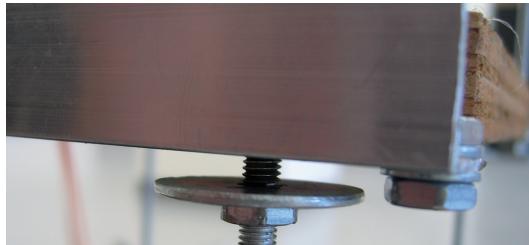


Fig. 20 - Danno indotto.

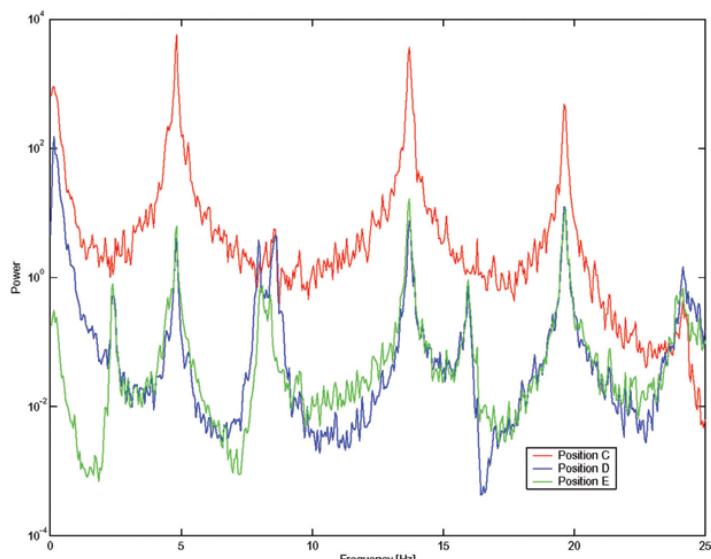


Fig. 21 - FRF per il 4° piano con l'OFA (direzione Y di shaking).

2. test in direzione X con segnali ottenuti da ogni canale disposto lungo la direzione X.

5.2.2. Identificazione dinamica a danno avvenuto

Per il modello danneggiato (fig. 20) si effettua lo stesso tipo di test random, con la conseguente derivazione delle curve FRF. Così facendo, le frequenze modali vengono identificate e si nota chiaramente (fig. 22) uno spostamento verso sinistra dei grafici, come quanto rilevato in precedenza anche con i sensori piezometrici.

Anche per il modello danneggiato si effettua una caratterizzazione dinamica completa dell'edificio nelle due fasi per le direzioni X e Y.

Da questa prima importante parte del test, le frequenze naturali e i modi sono ben determinati in entrambe le situazioni non-danneggiata e danneggiata (tabella 4).

TABELLA 4
FREQUENZE NATURALI E IDENTIFICAZIONE MODALE CON L'OFA

<i>Undamaged Frequency [Hz]</i>	<i>Damaged Frequency [Hz]</i>	<i>Mode</i>
2.24	2.22 (-0.89%)	I X-displacement mode
4.63	4.54 (-1.94%)	I Y-displacement mode
7.79	7.70 (-1.16%)	I Torsional mode
8.51	8.47 (-0.47%)	II X-displacement mode
13.56	13.02 (-3.98%)	II Y-displacement mode

Direttamente dalle Funzioni di Risposta in Frequenza (FRF), dopo aver trovato le frequenze modali, la radice quadrata di ogni valore è calcolata per ogni punto monitorato. Il risultato finale è costituito da vettori spostamento che sono poi normalizzati per ottenere gli autovettori. Così non è possibile controllare anche il segno dello spostamento ma si fa un facile confronto con i segni ottenuti dai dati dell'esperimento precedente (tabelle 5 e 6). Gli autovettori ottenuti dai sensori PCB sono nelle tabelle 7 e 8.

5.3. Localizzazione del danno

Il problema della localizzazione del danno è stato affrontato con due differenti metodi, presi dalla letteratura di ingegneria civile, utilizzando principalmente autovettori e frequenze. In questa sezione si riportano i risultati di uno studio comparativo tra:

- i metodi COMAC e FBDD;
- i nuovi OFA e i PCB Piezotronics.

5.3.1. Il metodo COMAC

Coordinate Modal Assurance Criterion [4] esprime la distanza locale tra le forme modali correlate. Solitamente,

TABELLA 5
AUTOVETTORI PER IL MODELLO INTEGRO (OFA)

<i>Story</i>	<i>I-X</i>	<i>I-Y</i>	<i>I-Torsional</i>	<i>II-X</i>	<i>II-Y</i>
4	1.000	1.000	1.000	-1.000	-0.665
3	0.816	0.604	0.462	0.113	0.302
2	0.459	0.549	0.402	0.967	1.000
1	0.377	0.415	0.170	-0.101	0.521

TABELLA 6
AUTOVETTORI PER IL MODELLO DANNEGGIATO (OFA)

<i>Story</i>	<i>I-X</i>	<i>I-Y</i>	<i>I-Torsional</i>	<i>II-X</i>	<i>II-Y</i>
4	1.000	1.000	1.000	-1.000	-0.883
3	0.868	0.678	0.604	0.204	0.319
2	0.649	0.605	0.178	0.846	1.000
1	0.550	0.392	0.059	-0.195	0.674

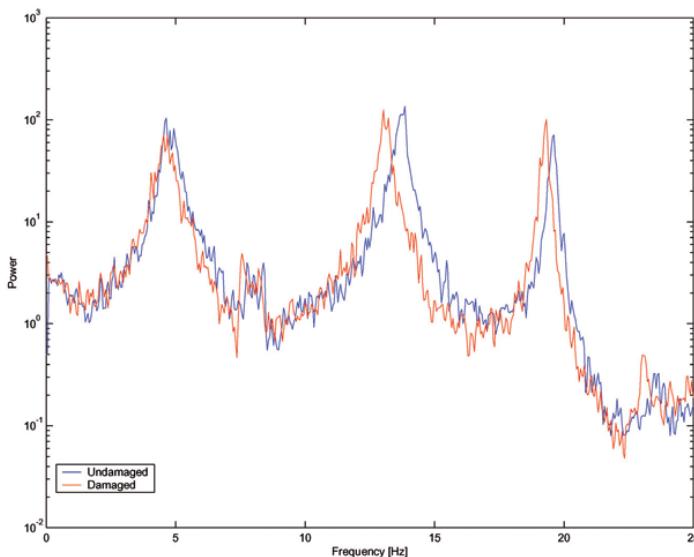


Fig. 22 - Confronto di FRF per il 4° piano con l'OFA in posizione C (direzione Y di shaking).

TABELLA 7

AUTOVETTORI PER IL MODELLO INTEGRO (SENSORI PIEZOMETRICI)

Story	I-X	I-Y	I-Torsional	II-X	II-Y
4	1.000	1.000	1.000	-0.867	-0.906
3	0.635	0.794	0.709	0.240	0.294
2	0.389	0.725	0.371	1.000	1.000
1	0.209	0.461	0.130	-0.195	0.567

TABELLA 8

AUTOVETTORI PER IL MODELLO DANNEGGIATO (SENSORI PIEZOMETRICI)

Story	I-X	I-Y	I-Torsional	II-X	II-Y
4	1.000	1.000	1.000	-0.904	-0.828
3	0.956	0.852	0.700	0.236	0.141
2	0.690	0.675	0.150	1.000	1.000
1	0.553	0.572	-0.108	-0.232	0.708

questo metodo non è considerato utile per localizzare il danno in quanto si ritiene inadeguato a causa dell'assenza di significato fisico dei suoi parametri [16]. Ad ogni modo, FRANCHETTI, nella sua tesi [6], sottolineò che Ko J.M. et al. (1994) usarono il COMAC con risultati promettenti su di un portale d'acciaio.

Esso può essere espresso come il rapporto tra forme modali in alcuni punti precisi della struttura, come segue:

(5.1)

dove i modi P e Q sono accoppiati (in questo caso specifico non sono che lo stesso modo ma in situazione prima non-danneggiata e poi danneggiata), i è il punto di

misurazione, m il numero totale di coppie modali correlate, $f_{sp}^{(i)}$ è l' i -esimo elemento sul vettore di P all' s -esimo modo.

COMAC è eseguito con gli autovettori normalizzati per 4 forme modali: il primo e il secondo in entrambe le direzioni X e Y. Ogni piano ha il corrispondente valore negli autovettori (per il piano terra in ogni caso è zero) come è chiaro dalle tabelle 5 a 8.

Il danno viene localizzato in entrambi i casi, utilizzando i PCB ed il sensore a fibra ottica (figg. 23 e 24).

5.3.2. Il metodo FBDD

Questo algoritmo (*Frequency Based Damage Detection*) fu presentato da J.-T. KIM e N. STUBBS [8] e già utilizzato da FRANCHETTI [6]. Gli autori formularono questo modello di localizzazione di danno relazionando linearmente la sensibilità del sistema strutturale sulle caratteristiche modali ai cambiamenti delle frequenze modali dovute al danno.

Per un sistema strutturale di n elementi, la localizzazione del danno può essere predetta utilizzando la seguente equazione di sensibilità:

(5.2)

dove δ_i è il danno inflitto alla i -esima posizione (questo è una riduzione nell' i -esimo parametro di rigidezza e $-1 \leq \delta_i \leq 0$) e

(5.3)

dove $\Delta\omega_s^2 = \omega_s^2 - \bar{\omega}_s^2$ è la differenza tra i quadrati delle frequenze naturali s -esime allo stato non-danneggiato e danneggiato ($s = 1, \dots, m$). F_{si} è la sensibilità modale della s -esima rigidezza modale rispetto all' i -esimo elemento:

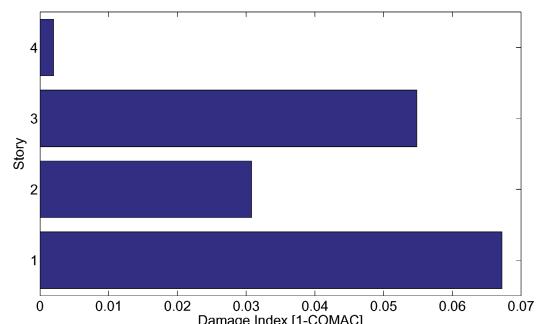


Fig. 23 - Sensori PCB: COMAC index method – danno al 1° piano.

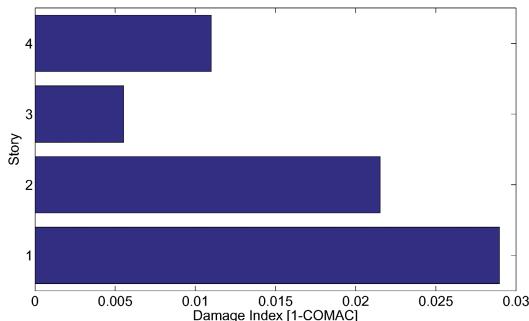


Fig. 24 - OFA: COMAC index method – danno al 1° piano.

(5.4)

Una volta che Z_s viene determinata sperimentalmente, l'equazione (5.2) può essere risolta per localizzare il danno nel sistema. Se n (parametri sconosciuti) > m (numero di equazioni) il sistema è malcondizionato. Per ovviare a questo problema, gli autori proposero un concetto sul rapporto di sensibilità. Dividendo l'equazione di sensibilità tra qualsivoglia due modi q ed r ($q \neq r$):

(5.5)

Assumendo che un singolo elemento j sia danneggiato ($\delta_i \neq 0$ se $i = j$, $\delta_i = 0$ se $i \neq j$), questa equazione diventa:

(5.6)

Per tutti i modi m misurati, l'equazione può essere riscritta come:

(5.7)

Questa equazione è vera solo se il j -esimo elemento è danneggiato. Un indice di errore viene definito come segue:

(5.8)

dove e_{si} è l'errore di localizzazione per l's-esimo modo nella i-esima posizione. Se $e_{si} = 0$, il danno è localizzato nell'i-esima posizione, utilizzando l'informazione dall's-esimo modo. Un indice di danno è introdotto per considerare tutti i contributi di tutti i modi disponibili:

(5.9)

dove $0 \leq DI_i \leq \infty$ e il danno è localizzato nell'i-esima posi-

zione se DI_i si avvicina al picco localmente.

Questo metodo è stato implementato in un programma MATLAB® utilizzando i due modi lungo Y individuati in precedenza. In questo modo è venuta utile l'analisi di rigidezze effettuata, durante una fase di valutazione sperimentale, tramite una simulazione del comportamento del modellino dell'edificio con un programma FEM (Straus7™):

$$K_1 = 4.0780 \cdot 10^4 \text{ N/m} \quad K_2 = 3.2650 \cdot 10^4 \text{ N/m}$$

$$K_3 = 2.3521 \cdot 10^4 \text{ N/m} \quad K_4 = 2.6233 \cdot 10^4 \text{ N/m}$$

dove K_i è la rigidezza dell'i-esima colonna.

L'altezza del modellino d'edificio (545 mm) è suddivisa in 109 segmenti da 5mm. Il valore DI è assegnato al punto centrale di ogni segmento che poi è integrato per ottenere F_{si} .

Il paper originale degli autori dimostrò l'efficienza e la praticità di questo approccio per strutture reali. La tesi di FRANCHETTI [6] trattò una prima applicazione di questo metodo su modelli scalati in laboratorio. Qui si ha un ulteriore esperimento, eseguito su un modello di un edificio. Il danno viene ben localizzato solo utilizzando le forme modali derivanti dall'identificazione effettuata con l'OFA (figg. 25 e 26).

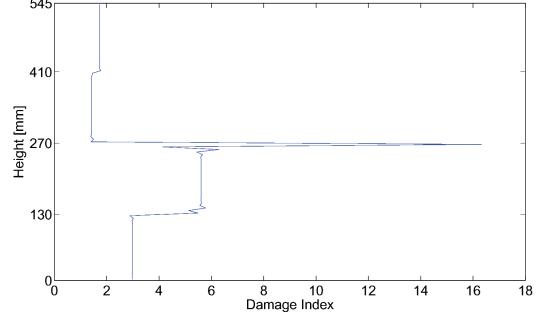


Fig. 25 - Sensori PCB: FBDD method – danno al 2° piano.

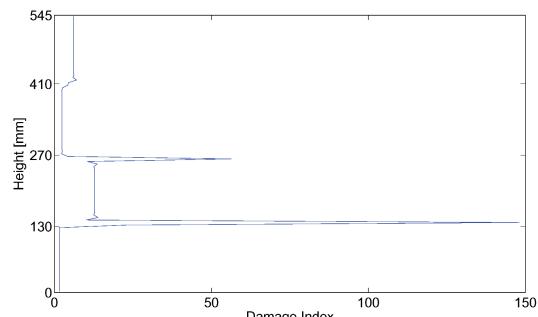


Fig. 26 - OFA: FBDD method – danno al 1° piano.

5.4. Elevata sensibilità dell'OFA

Solitamente, la potenza della tavola vibrante viene scelta con il generatore di funzioni in V_{pk} che va a limitare gli spostamenti della tavola vibrante. Con spostamenti molto piccoli (V_{pk} piccolo) il segnale derivante dal sensore è maggiormente disturbato e diventa di difficile lettura. Quando il rapporto segnale su rumore è basso, si richiede un incremento della potenza della tavola vibrante.

Dopo una serie di test con alti valori di V_{pk} , un'altra serie viene eseguita con il secondo prototipo di OFA, utilizzando un valore molto basso di V_{pk} . Se per la direzione Y sono stati usati con i PCB $800mV_{pk}$, ora con l'OFA si usano $100mV_{pk}$. Il confronto tra queste due situazioni può essere visto rispettivamente nelle figg. 27 e 21. La definizione delle FRF appare migliore nel primo caso ed i picchi di potenza sono aumentati, la forma è più liscia e stretta. L'alto valore del rapporto segnale su rumore permette all'OFA di lavorare bene anche con piccoli spostamenti, cosa impensabile con i sensori piezometrici utilizzati in precedenza.

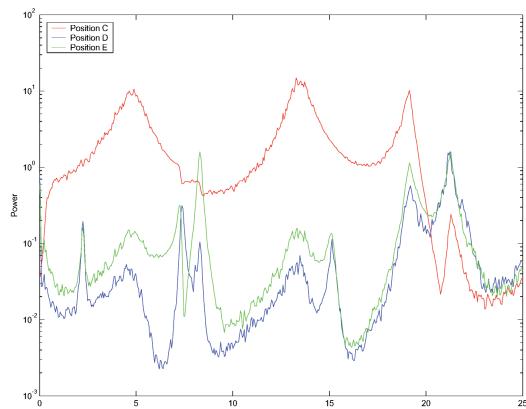


Fig. 27 - FRF per il 4° piano con sensori PCB (direzione Y di shaking).

6. Monitoraggio strutturale di un ponte reale

The Geumdang Bridge

La Korea Highway Corporation (KHC) costruì una strada-test per verificare e migliorare le indicazioni per la progettazione della pavimentazione stradale, basandosi sulle misurazioni reali di traffico ed effetti ambientali. Questa strada-test è una tipica strada ad una carreggiata con due corsie di marcia ed è lunga 7.7 km; è stata costruita lungo la Joongbu Inland Expressway in Corea, come mostrato in fig. 28. Ci sono tre ponti-test lungo la stessa strada. I test con l'OFA sono stati svolti sul Geumdang Bridge, che è un ponte continuo a tre luci (38, 46 e 38m) in calcestruzzo armato, con impalcato a cassone [22].

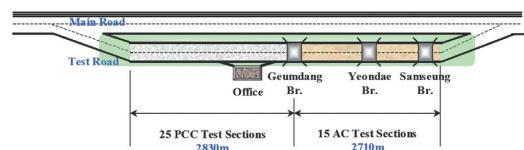


Fig. 28 - KHC Test Road sulla Jungbu Inland Expressway in Corea.

6.1. Test sul Ponte con l'OFA

Per verificare le prestazioni dell'OFA si sono svolti dei test con veicoli transitanti sul ponte. Poiché c'era la disponibilità di un solo sensore, si sono eseguiti dei test "mobili" tre volte com'è visibile in fig. 29 (Set A, Set B e Set C).

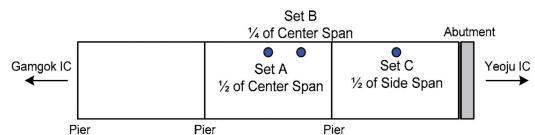


Fig. 29 - Posizionamento dell'OFA sul ponte ad ogni test.

Per effettuare un confronto, si è misurata l'accelerazione verticale in mezzeria alla campata centrale del ponte (set A) anche con un sistema convenzionale composto da accelerometro (393B12, PCB electronics) ed AD converter a 12-bit di risoluzione col campionamento di 200 Hz, indipendentemente (non in simultanea) con i test effettuati con l'OFA. Il livello di vibrazione risulta tra 0.0005g e 0.02g come si vede in fig. 30. Quando i veicoli percorrono il ponte, il livello delle vibrazioni raggiunge un valore pari a 100 volte quello generato dall'ambiente (principalmente il vento), la velocità del ven-

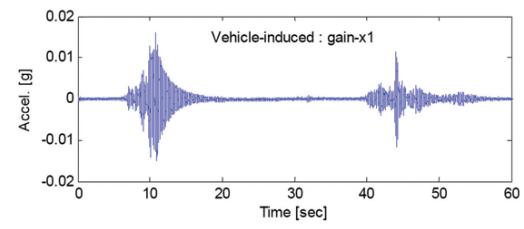


Fig. 30 - Time history in accelerazione ottenute dall'accelerometro convenzionale.

SCIENZA E TECNICA

to non è stata misurata, in quanto l'analisi di correlazione tra la velocità del vento e le vibrazioni della struttura va oltre lo scopo di questo test. Per aumentare la risoluzione in un sistema tradizionale, è richiesto un controllo sul modulo del segnale nella fase di acquisizione dello stesso, quando gli strumenti di confronto vengono utilizzati per misurare i segnali con diversi livelli di risposta. Si deve impostare un modulo di segnale basso per misurare risposte ad ampiezze alte senza possibilità di sovraccarico; quando i veicoli corrono sul ponte. Le vibrazioni ambientali del vento a bassa ampiezza richiedono un'impostazione ad alto modulo di segnale in modo da poter leggere lo stesso (ciò può causare frequenti allarmi di sovraccarico). Selezionare il corretto valore di modulo (*gain*) è un problema di bilanciamento. Questo sarà critico quando l'accelerometro viene impiegato per misurare le vibrazioni ambientali assieme alle vibrazioni forti dovute ai terremoti. In questo studio sono stati utilizzati i due valori distinti di *gain* 1 e 10 per misurare rispettivamente le vibrazioni dovute ai veicoli ed al vento con il sistema di rilevamento convenzionale [22].

Invece, con l'OFA vengono misurate senza alcun aggiustamento del *gain* sia le vibrazioni dovute ai veicoli che quelle ambientali. In fig. 31 si vedono le *time history* delle accelerazioni misurate. Gli spettri di Fourier vengono calcolati utilizzando l'intero segnale registrato: vibrazioni da veicoli con ampiezza grande e vibrazioni ambientali con ampiezza piccola (fig. 31). Inoltre, la fig. 32 funge da confronto, mostrando i risultati dell'analisi modale utilizzando i sensori convenzionali [19].

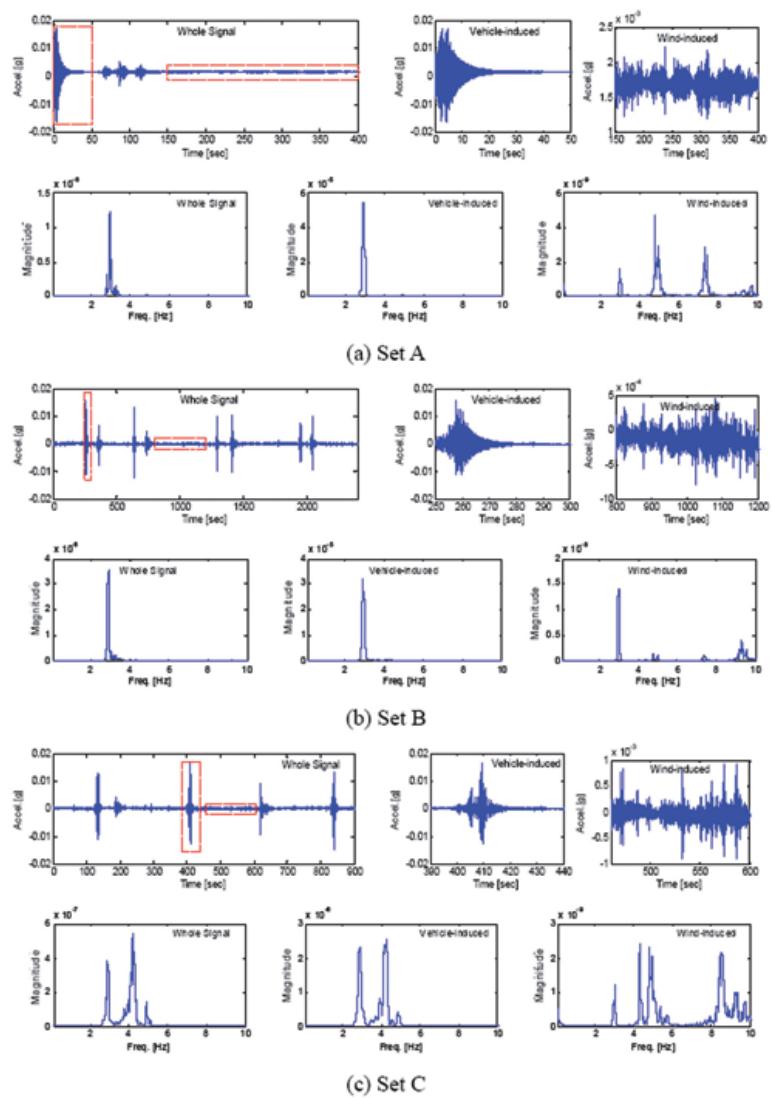


Fig. 31 - Risposte misurate usando l'OFA.

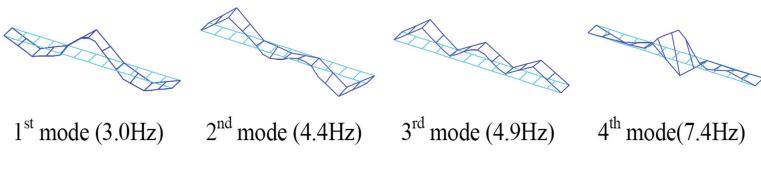


Fig. 32 - I primi 4 modi di vibrare stimati dai test con le vibrazioni ambientali.

6.2. Risultati

In conclusione, i risultati ottenuti possono essere qui riassunti:

1. le risposte strutturali derivanti dal transito dei veicoli e dal vento sono state misurate simultaneamente con il nuovo OFA sviluppato;
2. quando si è utilizzato l'intero segnale, il contributo dato dalle vibrazioni indotte dai veicoli è dominante, ciò amplifica le risposte strutturali dei modi minori;
3. la vibrazione ambientale dovuta al vento è distribuita su un ampio intervallo di frequenze; gli effetti sui modi minori e maggiori sono egualmente distribuiti: questo enfatizza l'efficienza dell'OFA;
4. dai risultati fino a qui espressi, è altamente plausibile che forti azioni esterne (terremoti) possono essere misurate assieme alle vibrazioni ambientali (traffico e vento) quando si utilizza l'OFA sviluppato [22].

7. Conclusioni

Questa nuova generazione di accelerometri ha grandi potenzialità per essere impiegata nel campo del monitoraggio civile anche in larga scala, in modo particolare lad dove ci siano problemi di interferenza elettromagnetica, rischi di esplosione derivanti da scintille elettriche e problemi di cablaggio.

Tutti i test sono stati svolti con due prototipi di OFA, le cui caratteristiche fisiche sono state "compensate" tramite un algoritmo compensatore, studiato per il *real-time*.

Il monitoraggio del *Cal-(IT)² Building* ha messo in evidenza che i segnali ottenuti dall'OFA sono paragonabili con quelli derivanti da sensori già in commercio.

L'identificazione dinamica del modellino ha permesso di constatare un spostamento verso sinistra dei picchi di frequenza in caso di danno. Le forme modali individuate con i PCB e con l'OFA si assomigliano abbastanza, in modo particolare per il 4° ed il 5° modo. Si è riscontrata una discreta difficoltà nell'individuare i primi due modi con i dati ottenuti dai PCB *sensors*.

Per localizzare il danno imposto al modello dell'edificio si sono scelti il COMAC [4] e l'FBDD [8]. Il primo è facile da applicare e localizza il danno; il secondo localizza il danno solo con il set di dati ottenuti dall'impiego dell'OFA.

Il segnale ottenuto dall'OFA permette una migliore definizione delle FRF, in quanto il rapporto *signal-to-noise* è ben più elevato rispetto ad un comune accelerometro piezometrico.

L'accelerometro è stato impiegato per misurare le vibrazioni indotte dal vento e da pesanti autocarri nel monitoraggio del *Geumdang Bridge* [22]. In questo esperimento, le risposte strutturali, vale a dire le grandi vibrazioni indotte dai veicoli e quelle minori derivanti dal ven-

to, sono state misurate con successo simultaneamente dal nuovo OFA sviluppato. Anche se le forti vibrazioni indotte da un camion non sono certo paragonabili a quelle di un sisma, si può ragionevolmente dire che l'OFA misura i terremoti assieme alle vibrazioni ambientali (auto, camion, vento) senza particolari accorgimenti.

Una prima necessaria evoluzione del sistema di monitoraggio con OFA dovrà di certo interessare la possibilità del *multiplexing*.

Un secondo campo da indagare sarà l'applicazione del monitoraggio in ambienti ricchi di EMI e RFI, in modo da poter apprezzare in toto le qualità del nuovo OFA (per esempio lungo vie ferroviarie o centrali elettriche). Il campo dei trasporti ferroviari (nello specifico ponti, dinamica di marcia, armamento e catenaria), infatti, risulta essere l'ambiente più idoneo per sfruttare appieno le caratteristiche di assenza di interferenze radio ed elettromagnetiche, tipiche dei comuni sensori impiegati nella quotidiana pratica ingegneristica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J.R. CASAS and P. J.S. CRUZ, "Fiber optic sensors for bridge monitoring", Journal of Bridge Engineering 8 (2003), no. 6, 362–373.
- [2] A.K. CHOPRA, "Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering", 2 ed., Prentice Hall, September 11 2000.
- [3] C. DOYLE and G.F. FERNANDO, "Two-axis optical fiber accelerometer", Journal of Materials Science Letters (2000), no. 19, 959–961.
- [4] D.J. EWINS, "Modal testing: Theory and practice", 1 ed., Research Studies Press Ltd., 1984.
- [5] M.Q. FENG, H. SUZUKI, and I. YOKOI, "Development of optical sensing systems for smart civil infrastructure", Smart Mater. Struct. 4 (1995), no. A, 114–120.
- [6] P. FRANCHETTI, "Vibration-based damage assessment of precast elements", Ph.D. thesis, Università degli Studi di Trento, Febbraio 2004.
- [7] J. KALENIK and R. PAJÁK, "A cantilever optical fiber accelerometer", Sensors and Actuators A (1998), no. 68, 350–355, Elsevier Science S. A.
- [8] J.-T. KIM and N. STUBBS, "Crack detection in beam-type structures using frequency data", Journal of Sound and Vibration 1 (2003), no. 259, 145–160.
- [9] B. LEE, "Review of the present status of optical fiber sensor", Optical Fiber Technology 9 (2003), 57–79.
- [10] A. LINK, W. WABINSKI, A. POHL, and H.-J. von MARTENS, "Accelerometer identification using laser interferometry", Fourth International Conference on Vibration Measurement by Laser Techniques: Advances and Applications (Enrico Primo TOMASINI, ed.), vol. 4072, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2000, pp. 126–136.

- [11] J.M. LÓPEZ-HIGUERA, M.A. MORANTE, and A. COBO, "Simple low-frequency optical fiber accelerometer with large rotating machine monitoring applications", *Journal of Lightwave Technology* 15 (1997), no. 7, 1120–1130.
- [12] A. MITA and I. YOKOI, "Fiber Bragg grating accelerometer for structural health monitoring", Fifth International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC 2000), Graduate School of Science and Technology, Keio University, Yokohama, Japan - Tokio Sokushin Co. Ltd., Tokyo, Japan, December 2000.
- [13] C. MODENA, P.P. ROSSI, and D. ZONTA, "Inspection and monitoring of the architectural heritage", International colloquium seriate 1997, ISMES and IABSE.
- [14] A. MORASSI, "Analisi lineari e nonlineari in dinamica delle strutture", Università di Udine, Luglio 2004.
- [15] R.D. PECHSTEDT and D.A. JACKSON, "Design of a compliant-cylinder-type fiber-optic accelerometer: theory and experiment", *Applied Optics* 34 (1995), no. 16, 3009–3017.
- [16] D. SONDA, "Caratterizzazione dello stato di integrità di strutture e sottostrutture in c.a. e c.a.p. sulla base dei risultati di prove dinamiche", Ph.D. thesis, Università degli Studi "G. D'Annunzio" di Chieti, Novembre 1998.
- [17] E. UDD, "Fiber optic smart structures", John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [18] F. VALLET and J. MARCOU, "A low-frequency optical accelerometer", *J. Opt.* 29 (1997), 152–155.
- [19] J.-H. YI, S. CHO, K.-Y. KOO, C.-B. YUN, J.-T. KIM, C.-G. LEE, and W.-T. LEE, "Structural Performance Evaluation of a Steel-Plate Girder Bridge Using Ambient Acceleration Measurements", *Smart Structures and Systems* 3(3), 2007.
- [20] G. ZANARDO, "Risposta di ponti su luci multiple a supporto semplice ad azioni sismiche con variabilità spaziale", Ph.D. thesis, Università degli Studi di Trieste - Brescia - Padova - Trento e Istituto Universitario di Architettura di Venezia, 2001.
- [21] D. ZONTA, "Structural damage detection and localization by using vibrational measurements", Ph.D. thesis, Università degli Studi di Bologna, gennaio 2000.
- [22] D.-H. KIM and J.-J. LEE, "Vibration-Monitoring of a Real Bridge by Using a Moiré-Fringe-Based Fiber Optic Accelerometer", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 6, 2007.

Sommaire

ESSAIES DYNAMIQUES AVEC UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'ACCÉLÉROMÈTRES

Le contrôle en temps réel de structures civiles est fondamentale pour la sécurité et la sauvegarde du territoire. Les réelles possibilités d'utilisation de ces accéléromètres de nouvelles générations à fibre optique, basés sur le phénomène de Moiré, ont été investiguées dans le contexte des recherches expérimentales réalisées au près du laboratoire du Département d'Ingénierie Civile et Environnementale de UC Irvine.

L'analyse physique de l'accéléromètre amène à la configuration du départ d'un algorithme numérique, étudié pour le temps réel, apte à éliminer les carences physiques du sensore vu lui-même comme accéléromètre.

On vérifie l'application réelle du sensore à fibres optiques à travers des essayes dynamiques sur table vibrante, réalisés sur la maquette d'un immeuble. On effectue l'identification dynamique, d'abord dans la phase d'endommagement, puis en suite dans la phase de localisation des dommages. On effectue enfin, le monitrage des vibrations d'un pont existant au Coré du Sud. On compare toujours les acquisitions dynamiques de tel nouveau sensore avec celles obtenues avec des autres valables accéléromètres de référence.

Les accéléromètres de cette nouvelle génération ne sont pas seulement totalement comparables en performances aux autres déjà en commerce, mais leur signal résulte être pratiquement pas dégradé par aucune interférence, et sa résolution est aussi de très haut niveau. La définition des modes vibrants, ainsi que la localisation des dommages, sont donc facilitées. Ces sensores se prêtent très bien aux applications dans lesquelles le bruit électromagnétique engendrerait énormément de distorsion au niveau des signaux.

Summary

DYNAMIC TESTS WITH A NEW GENERATION OF ACCELEROMETERS

Real-time control of civil structures is vital for territory safety and preservation. The actual utilization possibilities of these new generation optical-fiber accelerometers, based on Moiré phenomenon, have been investigated within the context of the experimental researches carried out by the laboratory of Civil and Environmental Engineering Department in UC Irvine.

The physical analysis of the accelerometer leads to the initial configuration of a digital algorithm conceived for the *real time* with the aim to eliminate the physical lacks of the sensor itself. The actual application of the optical-fiber sensor is verified by means of dynamic tests on vibrating table, carried out on a building model. After dynamic identification and damage introduction, damage detection is carried out. It is finally set up a vibration monitoring of an existing bridge in South Korea. The dynamic data acquisitions relevant to this new sensor are then compared with data derived from other valid reference accelerometers.

This new generation of accelerometers is essentially comparable with the other generations already on the market and the accelerometer signal has a high resolution and doesn't practically contain any interference. The definition of the vibration modes and the damage detection are then made easy. These sensors are particularly fit for applications where electromagnetic noise does massively distort the signals.

Zusammenfassung

DYNAMISCHE TEST EINER NEUEN BE-SCHLEUNIGUNGSMESSERTYPLOGIE

Beim Labor der Bau- und Umweltabteilung der Universität UC Irvine wurden die tatsächlichen Verwendungsmöglichkeiten der neuen Beschleunigungsmessern, die das Moiré Phänomen benutzen. Die physische Beschleunigungsmesser Analyse bestimmt vorläufig ein numerisches Modell des Sensors. Dieses wurde auf einem Hochbauteilmodell auf Prüfstand geprüft um dynamische Identifizierung des Verhaltens, Beschädigung und ihre Ortung zu erfassen.

Ein Vergleich von verschiedenen Beschleunigungsmessern wurde auf einer Straßebrücke in Korea geführt. Wos sich auf Messleistung bezieht sind die neuen Beschleunigungsmesser ganz vergleichbar mit anderen kommerziellen Typen, aber deren Hauptmerkmale sind die Unempfindlichkeit an elektromagnetischen Störungen und eine hohe Signalauflosungsfähigkeit.