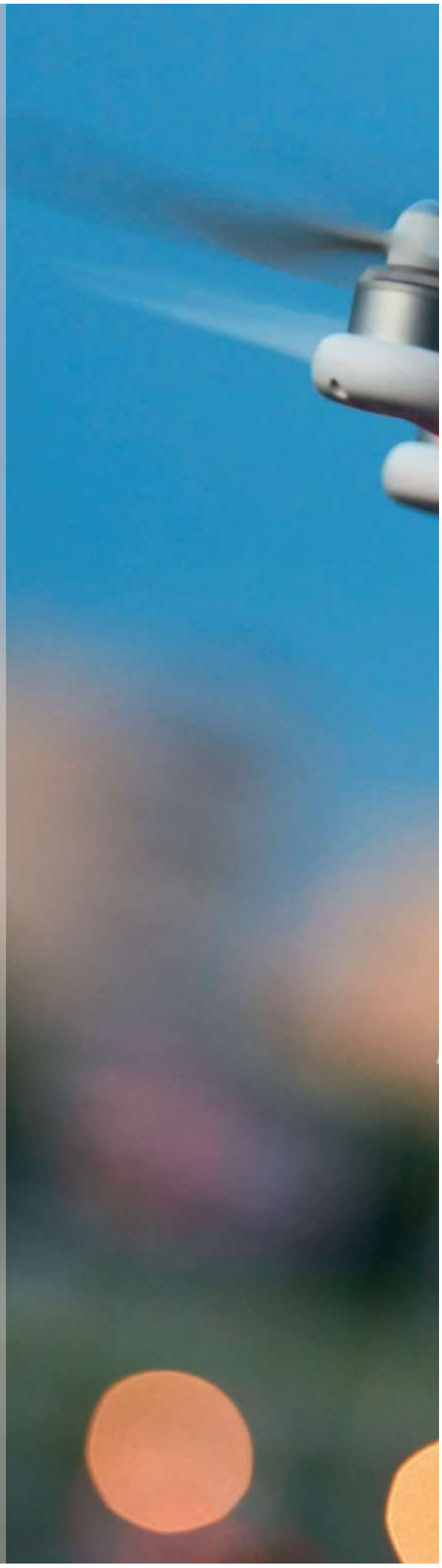


I SISTEMI SHM PER LA MANUTENZIONE E SICUREZZA DELLE INFRASTRUTTURE

Le infrastrutture di ingegneria civile sono centrali per lo sviluppo socioeconomico di un Paese. Per queste ragioni è necessario intervenire con una adeguata attività di manutenzione per garantire il loro utilizzo nella massima sicurezza. Oggi tale obiettivo è raggiungibile con il supporto dei sistemi SHM (Structural Health Monitoring) che hanno lo scopo di monitorare anche H24 lo stato di salute dell'infrastruttura, consentendo una migliore ed efficiente manutenzione e, soprattutto, segnalando in tempo utile le condizioni che possono portare ad un crollo. La realizzazione di un sistema SHM affidabile ed efficace richiede uno sforzo multidisciplinare per la definizione delle sue funzioni, della sua architettura e dei sensori da impiegare. Certamente le prestazioni di questi sistemi miglioreranno nel prossimo futuro grazie all'impegno del mondo della ricerca e dell'industria di settore.

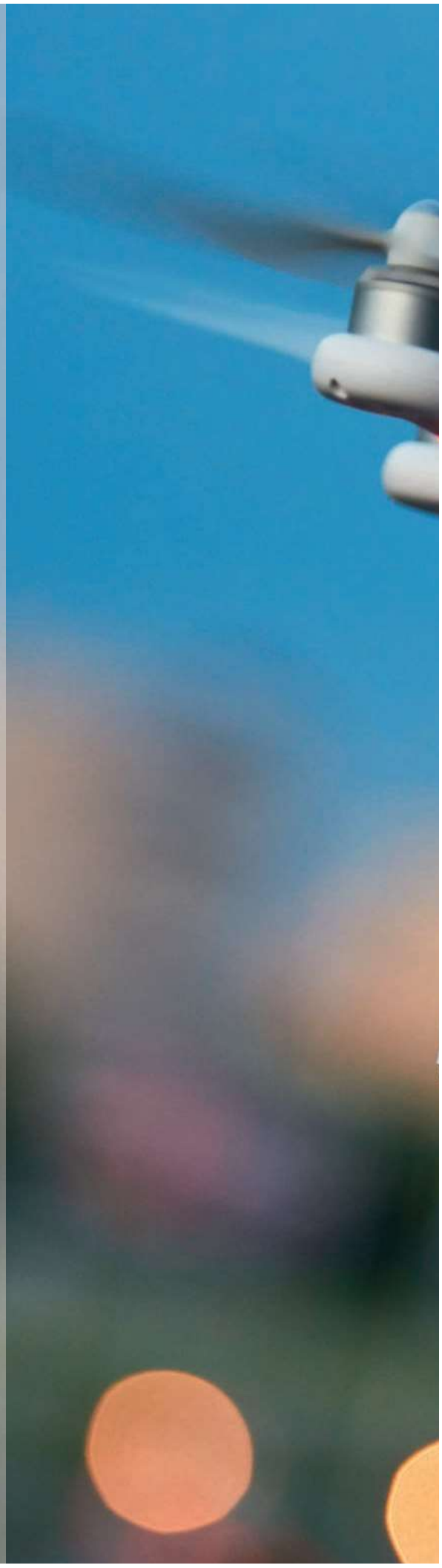
a cura di Ing. G. Manco
SGI - Stati Generali per l'Innovazione
ing.gio.manco@gmail.com



I SISTEMI SHM PER LA MANUTENZIONE E SICUREZZA DELLE INFRASTRUTTURE

Le infrastrutture di ingegneria civile sono centrali per lo sviluppo socioeconomico di un Paese. Per queste ragioni è necessario intervenire con una adeguata attività di manutenzione per garantire il loro utilizzo nella massima sicurezza. Oggi tale obiettivo è raggiungibile con il supporto dei sistemi SHM (Structural Health Monitoring) che hanno lo scopo di monitorare anche H24 lo stato di salute dell'infrastruttura, consentendo una migliore ed efficiente manutenzione e, soprattutto, segnalando in tempo utile le condizioni che possono portare ad un crollo. La realizzazione di un sistema SHM affidabile ed efficace richiede uno sforzo multidisciplinare per la definizione delle sue funzioni, della sua architettura e dei sensori da impiegare. Certamente le prestazioni di questi sistemi miglioreranno nel prossimo futuro grazie all'impegno del mondo della ricerca e dell'industria di settore.

a cura di Ing. G. Manco
SGI - Stati Generali per l'Innovazione
ing.gio.manco@gmail.com





Introduzione

Il crollo del Ponte Morandi di Genova avvenuto il 14/8/2018, che ha causato 43 vittime, ha posto al centro dell'attenzione del nostro Paese il tema della manutenzione e della sicurezza delle infrastrutture (autostrade, ponti, porti, aeroporti, ferrovie, acquedotti, ecc.) e più in generale di tutte le rilevanti opere strutturali di ingegneria civile presenti sul territorio nazionale.

Un tema da sempre molto importante perché i costi e la sicurezza di queste infrastrutture incidono sullo sviluppo economico del Paese e sulla qualità di vita dei cittadini. Spesso si trascura che esse sono opere complesse, soggette nel tempo ad alterazioni delle proprie caratteristiche che ne possono pregiudicare le prestazioni fino a provocare dei veri disastri se non si interviene con un'adeguata attività di manutenzione. In generale non è possibile parlare di un rischio zero nel loro utilizzo, e di tale limite scientifico e tecnologico è bene che tutti, cittadini inclusi, ne siano coscienti. Perciò è necessario fare il massimo sforzo per ridurli al minimo, garantendo innanzitutto la vita delle persone. A tale obiettivo possono e devono contribuire non solo la ricerca sui materiali e le tecniche per le costruzioni, ma anche nuove strategie di manutenzione che fanno uso di strumenti e sistemi ICT (Information&Communication Technology).

In questo quadro vanno considerati i moderni sistemi di SHM (Structural Health Monitoring) che hanno lo scopo di monitorare in modo continuo lo stato di salute della struttura, consentendo una migliore ed efficiente manutenzione e, soprattutto, segnalando in tempo utile le condizioni che possono portare ad un crollo. In senso ampio tali sistemi rientrano sia tra quelli per l'Homeland Security e sia tra quelli per Smart City.

Nel mondo già da alcuni anni esistono applicazioni di sistemi SHM per il controllo strutturale di opere di ingegneria civile, ma la loro presenza è certamente più diffusa nel settore industriale- in particolare in quello aeronautico - dove stanno contribuendo a cambiare il modo di fare manutenzione e allungare il tempo di vita utile sfruttando anche il paradigma dell'Industria 4.0. Da qui l'azione di molti stakeholder del nostro Paese a spingere per una loro rapida diffusione nel settore delle infrastrutture civili.

Un moderno sistema SHM opera come un sistema di supporto alle decisioni critiche per la manutenzione. Può impiegare dispositivi (sensori/attuatori) e apparati posizionati solo a terra, ma anche far uso di sistemi satellitari o aerei (ad es. droni).

Esso è in grado di trattare, con varie tecniche

di elaborazione (di recente si stanno applicando anche quelle di IA-Intelligenza Artificiale), grosse quantità di informazioni locali a cui possono aggiungersi quelle prelevate da altre banche dati (utilizzo di Big Data). Il tutto anche in modo *real time* o *near real time*.

L'impiego di sistemi non terrestri, viene fatto per il monitoraggio di grandi opere o per aree estese su cui risiedono più opere strutturali (ponti, edifici, ecc.). In particolare quelli basati su droni vengono impiegati essenzialmente per automatizzare le ispezioni visive.

Ovviamente la complessità di un sistema SHM è legata alla natura e dimensione dell'opera da monitorare ed alla necessità di effettuare un monitoraggio H24. Infatti, ci possono essere casi in cui bastano pochi sensori collegati ad un semplice apparato di acquisizione, analisi e presentazione dei dati PC based per eseguire dei controlli puntuali e limitati nel tempo.

Nel seguito si affronteranno le problematiche dei sistemi SHM destinati al monitoraggio H24 di opere strutturali critiche (vitali).

Il ruolo dei sistemi SHM nella manutenzione e gestione delle infrastrutture di ingegneria civile

La parte strutturale di un'infrastruttura di ingegneria civile è da tempo progettata seguendo norme tecniche che si evolvono nel tempo man mano che si introducono nuovi materiali costruttivi e aumentano le conoscenze sulle sollecitazioni a cui possono essere sottoposte durante la loro vita utile.

La durabilità, e di conseguenza la disponibilità e la sicurezza, di un'opera del genere è di norma affidata al rispetto delle NTC (Norme Tecniche per le Costruzioni di cui la più recente è la NTC2018) e quindi ad una corretta progettazione, realizzazione ed attività di manutenzione. Quest'ultima svolta secondo un Piano di Manutenzione obbligatorio previsto dalle leggi e norme vigenti.

Nel settore dell'ingegneria civile, proprio per la natura delle sue opere, è più difficile e costoso impiegare efficaci tecniche di Damage Tolerance per ottenere la disponibilità e la sicurezza desiderata. Molte delle azioni adottate a tal scopo, attengono ai metodi del Safe Life (ad es. uso di coefficienti di sicurezza nel dimensionamento) e a quelli tradizionali della manutenzione programmata e su evento. Diversa è la situazioni di altri settori, come quelli dell'aeronautica o dell'automotive, dove per ridurre i danni, e garantire in presenza di un difetto/guasto (fault) un sufficiente livello funzionale/prestazionale prima della riparazione, vengono adottate anche tecniche di ridondanza: tecniche di Damage Tolerance e più in genera-

le di Fail Safe. Per questi motivi per le opere strutturali di ingegneria civile- almeno per quelle critiche- si impone l'utilizzo dei sistemi SHM. Per meglio comprendere questa necessità è bene considerare che da tempo le attività di manutenzione hanno subito, soprattutto in ambito industriale, una profonda trasformazione dando vita alla cosiddetta *ingegneria della manutenzione* che è oggetto anche di norme ISO/EN/UNI. Il suo obiettivo è quello di realizzare in modo efficace ed al minimo costo tutte quelle attività da svolgere durante il ciclo di vita di un'opera (in generale di un'entità) per mantenerla o riportarla in uno stato in cui possa eseguire la sua funzione.

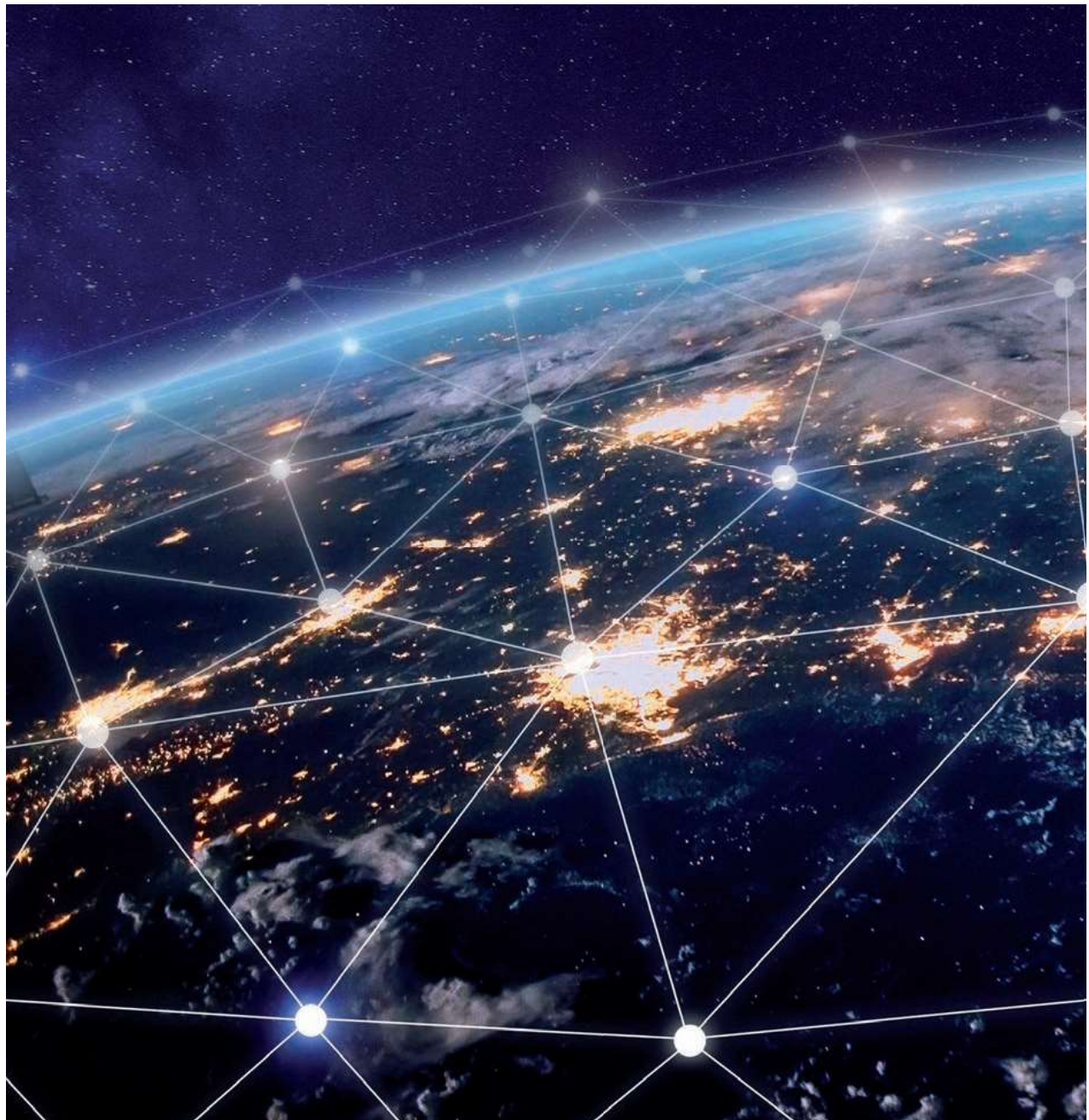
Il maggior contributo di questo cambiamento è venuto dal settore militare USA con la RCM (Reliability Centered Maintenance) che si concentra sull'affidabilità e la tolleranza ai guasti, e dal settore automobilistico con il TPM (Total Productive Maintenance) introdotto negli anni '80 da Seiichi Nakajima della Toyota Motor Co. In base alle normative tecniche vigenti, le atti-

vità di manutenzione seguono le seguenti politiche o strategie:

- *Manutenzione incidentale* (Break Maintenance o manutenzione a guasto);
- *Manutenzione preventiva predeterminata* (TBM Time Based Maintenance o programmata);
- *Manutenzione preventiva secondo condizione* (CBM Condition Based Maintenance detta anche predittiva);
- *Manutenzione migliorativa* (o proattiva).

In queste strategie di manutenzione le tecnologie ICT e gli stessi sistemi SHM, stanno fornendo un grosso contributo. In particolare con i sistemi SHM si sta supportando a basso costo tutta una serie di attività di manutenzione, come quelle predittive e migliorative, prima impensabili. La loro capacità di rilevare, localizzare e prognosticare un danno con metodi NDE (Non-Destructive Evaluation) di tipo statico o dinamico, rende possibile la individuazione e la conseguente rimozione di errori di progettazione/realizzazione, l'introduzione di pos-





sibili miglioramenti, la gestione di diversi livelli di allerta e la predeterminazione della vita residua in sicurezza (Safe lifetime).

Il tutto a vantaggio della sicurezza, dei costi e della vita utile della parte strutturale di un'opera. Se si vuole anche a vantaggio dell'ambiente, quando una buona manutenzione porta a risparmi energetici o alla riduzione dei consumi dei materiali impiegati.

Ovviamente le tecniche e i metodi usati nei sistemi SHM sono destinati a contribuire anche allo sviluppo della manutenzione degli impianti e dei prodotti dell'Industria 4.0, soprattutto nell'ambito dell'integrazione orizzontale dell'ecosistema di un'impresa.

Un ecosistema che per garantire la massima disponibilità e sicurezza del prodotto venduto ormai include il suo controllo remoto e l'esper-

ienza degli utilizzatori finali.

Per quanto riguarda il settore dell'ingegneria civile si sta assistendo, sia pure più lentamente, all'impiego dei risultati dell'ingegneria della manutenzione del settore industriale.

Certamente l'uso dei sistemi SHM può contribuire al trasferimento di questi risultati, soprattutto in chiave di Damage Tolerance. La loro introduzione consente di individuare in modo anticipato errori di progetto o di esecuzione, controllare lo stato di salute della struttura anche sulla base dell'andamento dinamico del carico a cui è sottoposta (lavoro a fatica), localizzare problemi/difetti, produrre i dovuti allarmi e, anche se resta ancora molto lavoro da fare, valutare la vita residua dell'opera.

Tipicamente la strategia per la manutenzione adottata nell'ingegneria civile, si basa su ispe-



zioni visuali periodiche o su evento accidentale (incendio, terremoto, esplosione, ecc.) corredate dalla descrizione delle condizioni in termini di degrado e vulnerabilità, seguite eventualmente da prove.

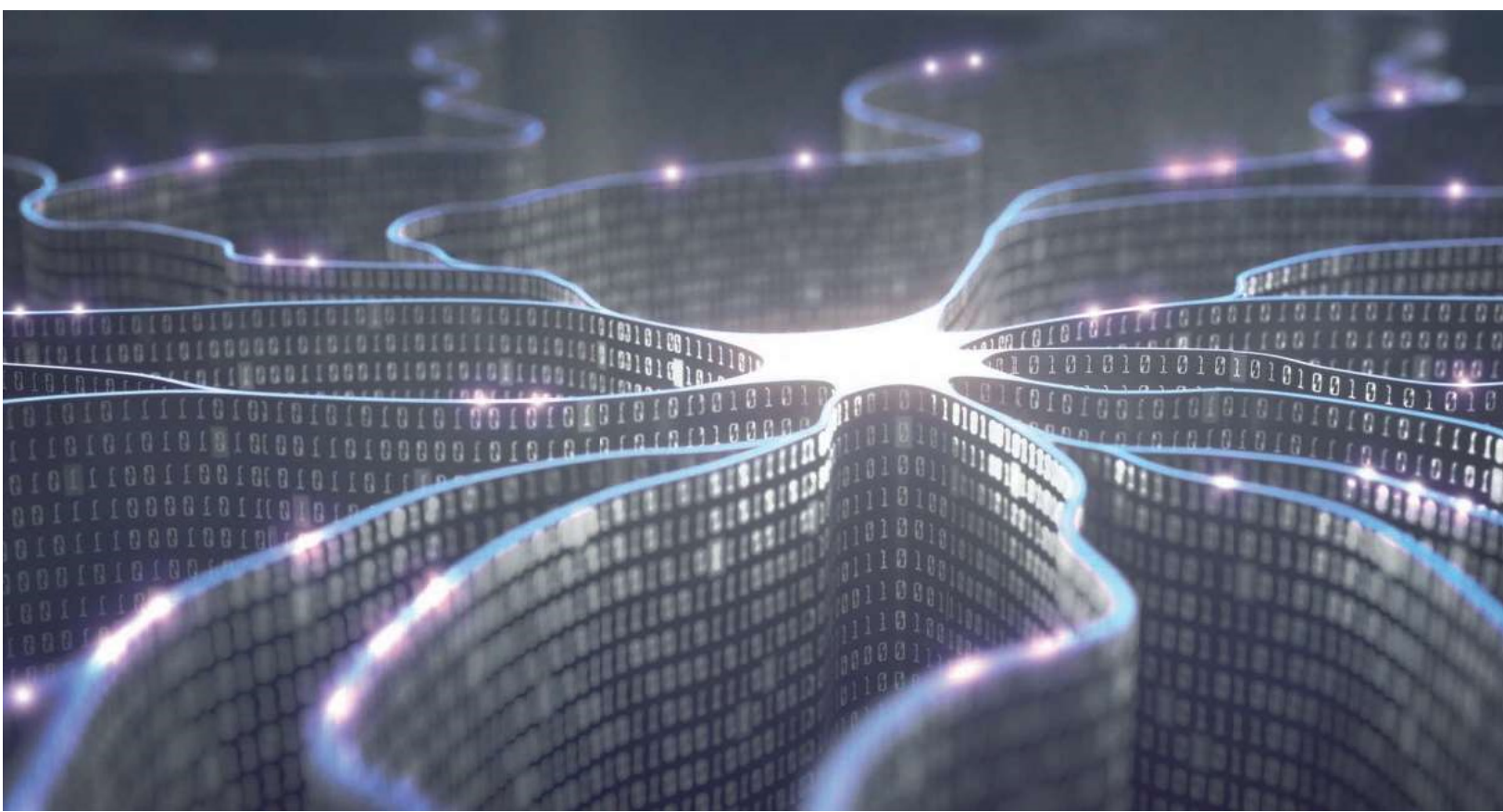
I sistemi SHM consentono l'adozione di una nuova strategia basata sul monitoraggio continuo e la possibilità di automatizzare le ispezioni visuali. Ovviamente si possono sempre fare controlli con prove in situ eseguite a cura di operatori.

La realizzazione di un tale sistema richiede uno sforzo multidisciplinare, perché non si tratta solo di posizionare sensori/attuatori e raccogliere ed elaborare dati, ma di conoscere il modello strutturale dell'opera stessa, le sollecitazioni, i meccanismi di degrado e i criteri per la valutazione del suo stato.

Il monitoraggio dello stato di salute di una struttura di ingegneria civile, come quello di un ponte, comporta la valutazione dell'effetto di azioni di tipo fisico, meccanico e chimico che incidono sulla sua durabilità, ad esempio: i sovraccarichi, le azioni del vento, i cicli termici naturali gelo-disgelo, gli agenti chimici ambientali come quelli che comportano la corrosione delle armature del cemento armato da carbonatazione/cloruri, i terremoti, le esplosioni, gli incendi, ecc..

Ai fini della gestione di un danno un sistema SHM attua un processo basato sulle seguenti funzioni.

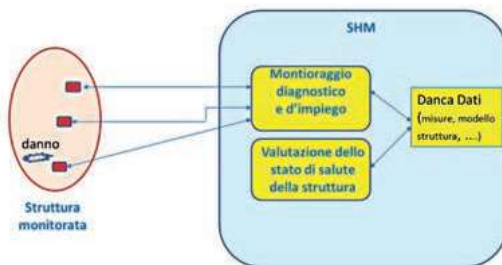
- Rilevamento;
- Localizzazione;
- Caratterizzazione e valutazione della gravità;



- Segnalazione del danno e valutazione della vita utile residua in sicurezza della struttura.

Figura 1

Schema operativo di un sistema SHM



Per quanto riguarda le modalità operative, un sistema SHM deve avere sensori in grado di monitorare le reali condizioni d'impiego e la presenza di un danno (v. Fig 1). Inoltre può operare un controllo cosiddetto statico, ovvero monitorare solo i parametri variabili lentamente

durante un periodo di osservazione e valutarne la tendenza (ad. Esempio uno spostamento assoluto o relativo), o dinamico, ovvero monitorare le caratteristiche dinamiche (come le vibrazioni) della struttura.

I dati così raccolti consentono l'impiego di metodi "intelligenti" di rilevamento e gestione di un eventuale danno e possono popolare una banca di dati storici della struttura. Ma volendo possono popolare anche banche dati per una classe di strutture simili. I dati memorizzati possono essere utilizzabili anche per post analisi dei problemi strutturali verificatosi e, se serve, in indagini forensi.

La norma UNI/TR 11634:2016 fornisce le linee guida per il monitoraggio strutturale.

In concreto un sistema SHM è in grado di fornire al responsabile della gestione della manutenzione un supporto molto oggettivo sullo stato dell'opera. Il che è di rilevante importanza quando si tratta di intraprendere azioni di manutenzione critiche o di decidere di limitarne l'uso (per esempio chiusura del traffico di un ponte).

Un sistema di monitoraggio può essere impie-

gato anche durante la fase di costruzione, consentendo così di verificare le ipotesi progettuali e di controllare le operazioni di realizzazione. A questi obiettivi possono contribuire anche le tecniche di simulazione e quanto prima, per le nuove costruzioni, l'impiego BIM (Building Information Modelling) che in Italia sarà obbligatorio dal 2019 per tutte le opere pubbliche con un importo a partire da 100MI di euro. In particolare quando si diffonderà anche l'utilizzo del BIM to Field, il "dialogo" con il relativo SHM contribuirà maggiormente a realizzare strutture sempre più sicure ed una ottimizzata manutenzione (da indagini di settore risulta che ca il 64% dei problemi di degrado derivano da deficienze del processo di costruzione e il 12% da errori di progettazione, il resto da altre motivazioni).

Per le nuove costruzioni la maggior parte dei sensori/attuatori possono essere immersi direttamente (cioè resi embedded) negli elementi della struttura, dando vita a quella che può essere considerata una SMS (Smart Materials/Strutture). Per le costruzioni esistenti i sensori/attuatori sono tipicamente sistemati sugli elementi esistenti.

I costi di realizzazione e gestione di un sistema SHM incidono in minima parte sul quello della struttura da monitorare. Da alcune esperienze di utilizzo per ponti risulta che essi consentono di ridurre il costo dell'intero ciclo di vita dell'opera di c.a. il 10%.

Infine è bene dire che un sistema SHM può integrarsi anche con sistemi per la gestione funzionale dell'infrastruttura, come, ad esempio, quelli che gestiscono il traffico su un ponte autostradale in base anche alle condizioni ambientali (pioggia, nebbia, ecc.).

L'Architettura di un sistema SHM

Un sistema SHM ha una architettura di tipo distribuita. Esso può essere destinato al monitoraggio di una o più strutture. In linea generale può impiegare soli dispositivi e apparati sistemati a terra (sistema SHM terrestre) e/o di sensori alloggiati come payload su satelliti per la Earth Observation o su aerei (impiego di elicotteri o droni).

Le macrofunzioni svolte, come già in indicato in precedenza, sono:

- acquisizione dati;
- elaborazione dei dati acquisiti per individuare l'esistenza di danni con la relativa localizzazione e gravità;
- indicazioni di manutenzione e di eventuali limitazione d'uso.

Il successo dipende dai criteri di progettazione adottati e dai metodi di estrazione della conoscenza dai dati acquisiti per supportate le de-

cisioni di manutenzione da prendere. Perciò le tecniche di elaborazione utilizzate possono essere diverse. In particolare, vista la natura e la elevata quantità di dati che ormai possono essere raccolti, si sta passando all'impiego di tecniche di IA debole (ad esempio impiego di reti neurali artificiali).

I sistemi soltanto satellitari sfruttano i servizi di Earth Observation di costellazioni a ciò dedicate (ad esempio, l'italiana Cosmo Skymed o la tedesca TerraSAR-X) con dispositivi e apparati a terra in grado di ricevere ed elaborare i dati raccolti dai satelliti. In aree poco coperte da reti TLC terrestri, per far comunicare operatori e gli apparati, si possono utilizzare i servizi TLC satellitari.

Il vantaggio di un loro impiego consiste nel fatto che con costi di realizzazione e gestione sostenibili si può:

- monitorare una struttura di grandi dimensioni (dighe, infrastrutture autostradali, ecc.) o tutte quelle di un'intera area;
- operare in zone di difficile accesso e anche in presenza di eventi come frane, terremoti, ecc.;
- realizzare e operare in modo poco invasivo rispetto alla struttura monitorata e alle sue funzionalità (per esempio nel caso di un ponte non bisogna fare installazioni sulla struttura né occupare spazi dell'impalcato per fare ispezioni/misure);
- disporre anche di dati satellitari precedenti all'attivazione del sistema;
- ricevere ed elaborare altri dati satellitari per monitorare anche altri rischi che possono danneggiare la struttura di interesse, come quello idrogeologico.

Il limite maggiore della modalità da satellite risiede nel fatto che la natura e la tempistica di acquisizione (anche diversi giorni) dei dati consentono solo un monitoraggio di tipo statico. In altri termini si riescono a valutare bene i fenomeni di deformazione localizzata ma non si possono, ad esempio, valutare le vibrazioni a cui la struttura è soggetta.

Per queste ragioni, recentemente si tende a integrarli con sensori/attuatori a terra, ovvero con sistemi SHM terrestri.

La tecnologia su cui oggi sono basati i sensori dei payload è la InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) che rende possibile anche la Tomografia SAR.

Va detto che si stanno realizzando anche sistemi di monitoraggio statico e dinamico di rapida installazione che impiegano un radar terrestre (sistemi TInRAR-Terrestrial Interferometric Real Aperture Radar), ma hanno il limite che le parti da monitorate devono essere in linea di vista alla postazione radar (LoS- Line Of Sight).

È recente l'intenzione del Governo italiano di far realizzare all'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) e al CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) un sistema satellitare per il monitoraggio delle infrastrutture del Paese. Anche la Toscana sta adottando questa tipologia di sistema.

Per i sistemi aerei, la soluzione basata su SAPR (Sistema Aeromobili a Pilotaggio Remoto), che fa uso di APR (droni), è quella che si sta maggiormente affermando. I sensori del loro payload possono essere videocamere o termocamere ad alta definizione, sensori multispettrali, Lidar (Laser Imaging Detection and Ranging).

I vantaggi e i limiti di questi sistemi sono in buona parte comuni a quelli di tipo satellitare; spesso impiegati solo per ispezioni visive in supporto alle attività di monitoraggio con o senza sistemi SHM terrestri con cui possono essere bene integrati.

Per quanto riguarda i sistemi terrestri, va detto che possono essere realizzati per effettuare sia il monitoraggio statico e sia quello dinamico. Le parti che compongono la loro architettura sono:

- Struttura da monitorare
- Sensori/attuatori
- Sottosistemi di acquisizione e concentrazione dei dati
- Reti per il trasferimento dei dati
- Sottosistema centrale di memorizzazione e elaborazione (analisi) centralizzata dei dati.
- Interconnessione con banche dati (Big Data) ed altri sistemi.

I sensori/attuatori impiegati costituiscono di fatto un sistema "nervoso" che monitora gli spostamenti e le deformazioni della struttura legati all'azione di tutti gli agenti meccanici, chimici e fisici che comportano un suo degrado prestazionale. Questi dispositivi, appartengono a diverse tipologie e sono basati su diversi metodi e

tecnologie, gli esempi più importanti sono: estensimetri, accelerometri, inclinometri, misuratori di parametri ambientali o chimici (misuratori di temperatura, anemometri,...). Per quanto riguarda le tecnologie utilizzate, oltre a quelle resistive, piezoresistive e piezoelettriche, si vanno sempre di più diffondendo le MEMS-Micro Electro-Mechanical Systems (utilizzate per estensimetri, inclinometri e accelerometri) e le FOS (Fiber Optic Sensing) del tipo FBG-Fiber Bragg Grating (utilizzate per estensimetri, accelerometri, misuratori temperatura, ecc.).

Altri tipi di sensori possono essere poi impiegati per valutare ulteriori condizioni d'uso o integrare la gestione delle funzionalità della struttura monitorata come, ad esempio, nel caso di un ponte, i misuratori del traffico che transita su di esso.

Le caratteristiche dei sensori da impiegare sono quelli classici per i sistemi di misura:

- essere sensibile alla proprietà misurata;
- essere insensibile alle altre proprietà;
- non influenzare la proprietà misurata;
- essere lineare nel range di misurazione della proprietà misurata.

Essi poi devono essere affidabili (con un lungo ciclo di vita), avere dei bassi consumi di energia elettrica e delle caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche che gli consentono di operare nelle condizioni ambientali del sito monitorato. Infatti uno dei problemi dei sistemi SHM sono proprio i malfunzionamenti dei sensori. Il loro costo già oggi contenuto è destinato a scendere con la loro diffusione.

A seconda della natura e della dimensione (o dislocazione) dell'opera o delle opere da monitorare, l'architettura di un SHM può prevedere uno o più sottosistemi locali di acquisizione/concentrazione.

Per la connessione dei vari sensori/attuatori a

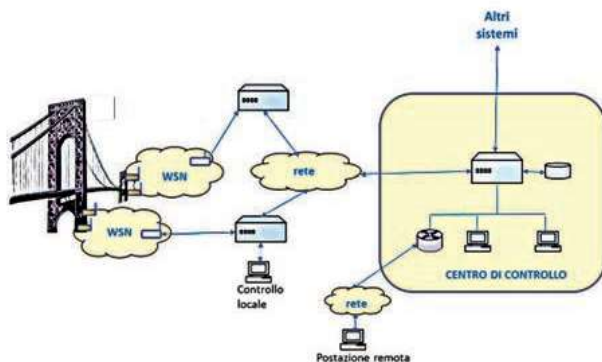


Figura 2A: Architettura generale sistema SHM integrato

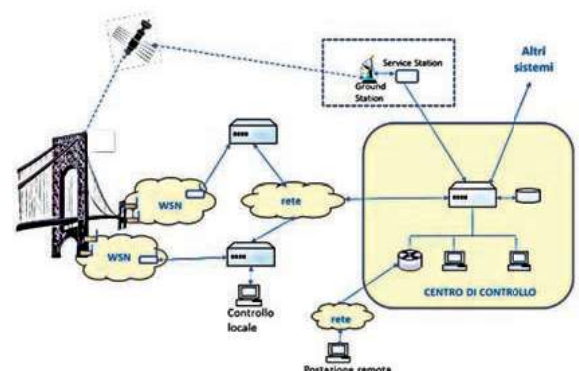


Figura 2B: Architettura generale sistema SHM integrato con sistema SAT

tali sottosistemi si tende ormai a utilizzare delle WSN (Wireless Sensor Network Std IEEE 802.15.4x su cui si basa anche ZigBee), anche se non mancano casi di collegamenti LAN (Local Area Network), WLAN (Wireless LAN), seriali multipoint RS485, ecc..

I sottosistemi di acquisizione/concentrazione dei dati possono anche essere dotati di funzioni di elaborazioni per un controllo puntuale ed essere accessibili da un posto operatore locale. Essi sono connessi al sottosistema centrale attraverso una rete che può essere LAN/WLAN, MAN/WAN o altra soluzione.

Nel sottosistema centrale avviene la raccolta e la elaborazione centralizzata dei dati. Esso è dotato di varie postazioni di lavoro locali e remote, e può essere connesso ad altri sistemi. Nel caso di integrazione con un sistema SHM satellitare o SAPR, è tipicamente connesso rispettivamente alla Service Station (a sua volta connessa a una Ground Station) o alla Stazione di Controllo (v. Fig 2a, 2b e 2c).

Il SW svolge sia le funzioni di gestione (configurazione, diagnostica e recovery, ecc.) che di elaborazione dei dati acquisiti o presenti nelle banche dati locali/cloud, per la gestione dello stato di salute della struttura. Quest'ultime sono svolte da programmi che utilizzano avanzati metodi di analisi, che nel prossimo futuro saranno basati su tecniche di IA.

Nel suo insieme un sistema SHM deve essere ad alta dependability (affidabile, mantenibile, accurato, robusto, sicuro...), modulare, facilmente configurabile e protetto da cyberattach. Va detto che allo stato dell'arte esso non può essere considerato una commodity, ma deve essere strutturato e configurato per l'applicazione specifica. Tra l'altro è necessario eseguire anche tutte le operazioni per rendere accurate le misure dei sensori e prevedere funzioni

di cleansing delle stesse. Inoltre, l'intero sistema deve garantire una sincronizzazione temporale dei dispositivi di misura. Solo operando in tal modo si possono ottenere misure corrette ed evitare mancati o falsi allarmi, ovvero realizzare un attendibile ed efficace controllo dello stato di salute della struttura monitorata.

Uno sguardo al futuro e conclusioni

L'utilizzo nella società moderna di infrastrutture di ingegneria civile vitali e complesse, richiede che esse abbiano un lungo ciclo di vita con un'alta dependability. In particolare è necessario assolutamente evitare che un loro danneggiamento provochi disastri con perdite di vite umane. Un contributo determinante al raggiungimento di tali obiettivi può venire dai moderni sistemi SHM, che stanno mantenendo la loro promessa. Pertanto, sul modello di quanto avviene o sta avvenendo in altri paesi, è auspicabile l'obbligo per legge di un loro impiego.

Da punto di vista realizzativo, va ribadito che essi non possono essere ancora considerati una commodity ma vanno disegnati e configurati opportunamente per la specifica applicazione. Il che richiede uno sforzo multidisciplinare che attiene a diverse discipline, ed in particolare all'ingegneria civile ed elettronica, e all'ICT.

Allo stato le tecnologie ICT già offrono performanti sensori/attuatori IoT per il monitoraggio statico e dinamico. In ogni caso molte innovazioni sono già state rese disponibili dai sensori/attuatori in F.O.

Guardando al futuro, appare evidente che per la messa in sicurezza delle infrastrutture di un'intera regione o paese si assisterà all'integrazione dei sistemi satellitari con quelli terrestri.

In futuro certamente sarà conveniente l'impiego dei sistemi SHM lungo tutto il ciclo di vita di un'opera. Inoltre essi sarà maggiormente possibile integrarli con i sistemi di gestione funzionale della struttura (ad es. quelli per la gestione del traffico su un ponte) o con quelli della gestione di altri rischi (ad esempio quelli per la gestione del rischio idrogeologico).

I rapporto costo/prestazione dei sistemi SHM è poi destinato a diminuire.

Per quanto riguarda lo sviluppo tecnologico, certamente per strutture complesse sarà diffuso l'uso di BIG Data –che in futuro sarà meglio chiamare Full Data- e dell'IA debole (ad es. reti neurali artificiali). A tal fine sarà bene che oltre a un catasto SINFI (Sistema Informativo Nazionale Federato delle Infrastrutture) delle infrastrutture civili, si creino delle vere banche dati regionali o nazionali con la storia di tutti i comportamenti (anche in presenza di danni) delle strutture monitorate.

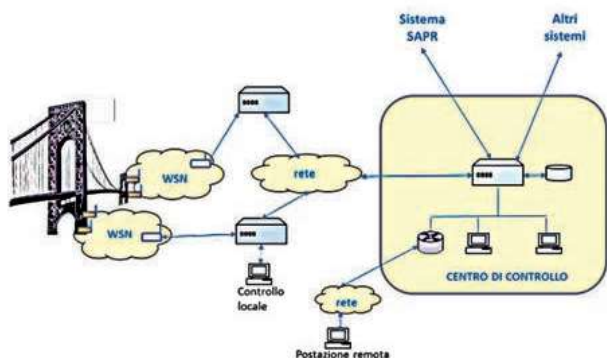
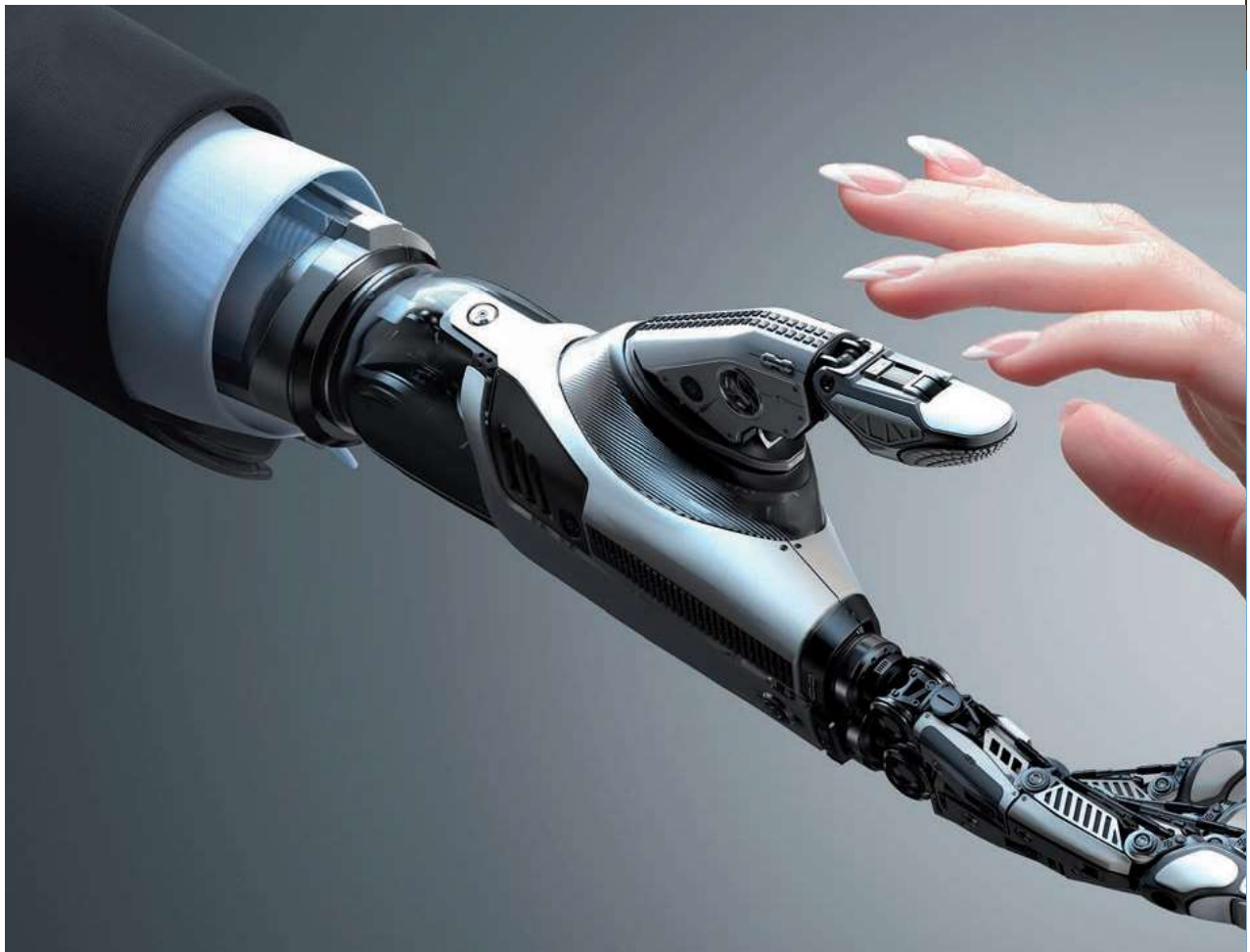


Figura 2C: Architettura generale sistema SHM integrato con sistema SAPR

I sensori/attuatori avranno prestazioni e caratteristiche sempre più adatti ad un loro impiego embedded nella struttura monitorata. In altri termini partendo dal fatto che i sistemi SHM fanno leva su tecniche NDE (Non-Destructive Evaluation) si ipotizza l'impiego di materiali NDERM (NDE Ready Material) con innovazioni anche di alcuni metodi di test.

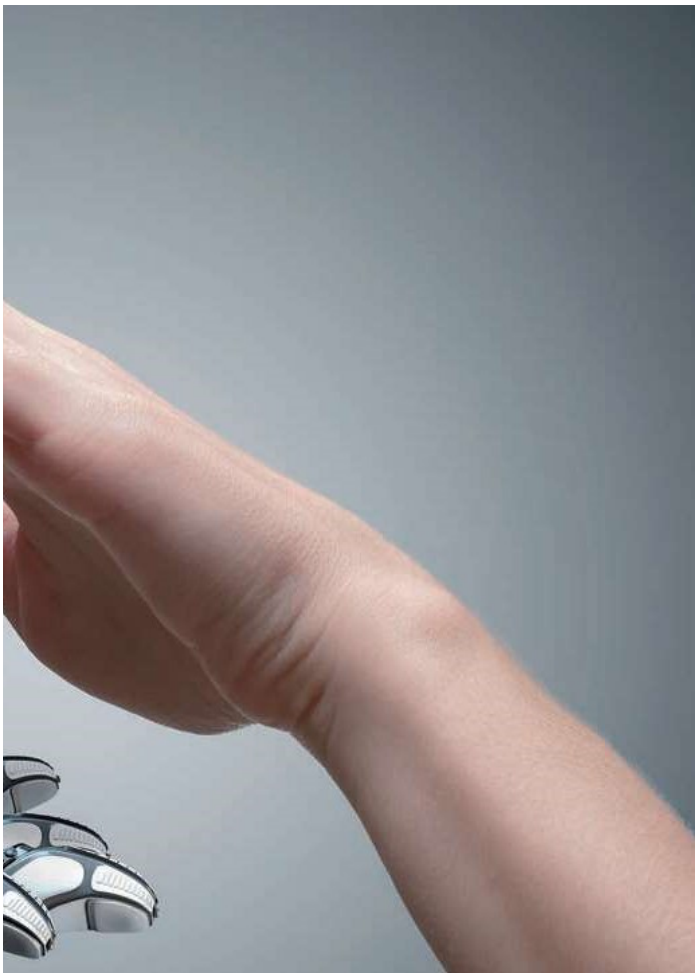
Più in generale per il futuro si sta puntando al SMS (Smart Materials/Structures), idea partita già negli anni '80 in primis nel settore aerospaziale. L'obiettivo è quello di arrivare a materiali intelligenti già pronti per essere monitorati.

Sempre in tema di materiali sicuramente la ricerca ne metterà a disposizione dei nuovi che avranno anche una certa capacità di auto ripararsi. Ma bisogna dire che la Ue e il nostro Paese, seguendo l'esempio degli USA, devono essere meno conservativi nel consentire l'uso dei nuovi materiali. A tal scopo è opportuno che si investa sulle attività relative allo loro sperimentazione e qualificazione. Altro tema importante è quello della formazione degli addetti al settore a queste nuove tecnologie e strumenti. La stessa ingegneria civile, deve accelerare il passaggio dalla cultura del progetto a



quello della manutenzione e gestione. Il tutto tenendo sempre presente che il ruolo della ricerca e delle professioni tecniche resta quello di utilizzare le innovazioni scientifiche e tecnologiche per far crescere il Paese attraverso la gestione del rischio.

Nel concludere va ricordato che esiste tutto un mondo del costruito, a volte anche datato, che solo in minima parte potrà beneficiare di questi sviluppi. Ma per esso le tecnologie alla base dei sistemi SHM già possono apportare il loro determinante contributo per un controllo in tempo reale del loro stato di salute e quindi per un loro utilizzo in sicurezza.



Bibliografia

- 1 Balageas D., Fritzen C-P. and Güemes A., "Structural Health Monitoring". ISBN 1-905209-01-0. ITSE 2006.
- 2 N. Bonessio, P. Zappi, G. Benzoni, T. Simunic Rosing, G. Lomiento, "Structural Health Monitoring of Bridges Via Energy Harvesting Sensor Nodes"- The Open Construction & Building Technology Journal ISSN: 1874-8368 - Volume 12, 2018.
- 3 A. Mufti, "Guidelines for Structural Health Monitoring" - University of Manitoba ISIS Canada, 2001.
- 4 Vincenzi L., Mazzotti C., Guidorzi R. (2010), "Utilizzo di MEMS per il monitoraggio strutturale"- 18° Congresso CTE Brescia, 11-13 novembre 2010.
- 5 D.Huston, "Structural Sensing, Health Monitoring, and Performance Evaluation"- CRC Press ISBN 9781420012354 2010.
- 6 A.E. Del Grosso, "Structural Health Monitoring: research and practice"-IIth Conference on Smart Monitoring Assessment and Rehabilitation of Civil Structure- 2013 Istanbul (Turkey).
- 7 Cristian-Claudiu Comisu., Nicolae Taranub, Gheorghita Boaca, Maria-Cristina Scutaru, "Structural health monitoring system of bridges"- X Inter. Conference on Structural Dynamics, EURODDYN 2017.
- 8 Frangopol, DM and Liu, M. 2006. "Life-cycle cost and performance of civil structures"- McGraw-Hill 2006 Yearbook of Science and Technology, McGraw-Hill, New York.
- 9 Silkorsky, C., "Development of a Health Monitoring System for Civil Structures using a Level IV Non-Destructive Damage Evaluation Method- Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring", Stanford, CA, USA (1999).
- 10 A cura di G. Franceschetti, G. Manco, "I Sistemi di Homeland Security: scenari, tecnologie e applicazioni" EAN: 9788887998986 Ed. Cuzzolin 2009.
- 11 R.C. Tennyson, T. Coroy, G. Duck, G. Manuelpillai, P. Mulvihill, David J.F. Cooper, P.W.E. Smith, A.A. Mufti, and S.J. Jalali, "Fibre optic sensors in civil engineering structures"- Canadian Journal of Civil Engineering · February 2011.
- 12 A. Brunetti*, P. Mazzanti**, "Il monitoraggio dinamico delle strutture e delle infrastrutture con interferometria radar terrestre"- "NHAZA srl Roma, **Dip, Scienze della Terra, Univ. La Sapienza Roma.