CYBER–PHYSICAL STRUCTURAL SAFETY (CPSS)

Un Framework basato sui Dati per il Monitoraggio Strutturale Avanzato e la Manutenzione Predittiva

di Ing. Diego Dell'Eba



Il monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring – SHM) ha migliorato significativamente la capacità di osservare il comportamento delle strutture nel tempo;
tuttavia, la sua integrazione nella gestione predittiva della sicurezza rimane limitata. Gli approcci esistenti sono principalmente focalizzati sull'acquisizione dei dati e sull'individuazione del danno, mancando di un framework pienamente integrato per il processo decisionale continuo.

Anno 2026

CYBER–PHYSICAL STRUCTURAL SAFETY (CPSS)

Un Framework basato sui Dati per il Monitoraggio Strutturale Avanzato e la Manutenzione Predittiva

di Ing. Diego Dell'Erba

ABSTRACT

Il monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring – SHM) ha migliorato significativamente la capacità di osservare il comportamento delle strutture nel tempo; tuttavia, la sua integrazione nella gestione predittiva della sicurezza rimane limitata. Gli approcci esistenti sono principalmente focalizzati sull'acquisizione dei dati e sull'individuazione del danno, mancando di un framework pienamente integrato per il processo decisionale continuo.

Il presente lavoro introduce il concetto di **Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)**, un nuovo paradigma ingegneristico che integra strutture fisiche, modelli di Digital Twin, sistemi di monitoraggio e intelligenza artificiale in un unico sistema cyber–fisico.

Il modello proposto è basato su un'architettura a ciclo chiuso che include: misura, acquisizione dati, modellazione, analisi, previsione e decisione. Un'innovazione chiave è rappresentata dal concetto di **memoria strutturale**, che consente l'accumulo continuo della conoscenza e il miglioramento della capacità predittiva.

Le applicazioni in contesti di ricostruzione post-sisma dimostrano la fattibilità dell'approccio. Il paradigma CPSS ridefinisce la sicurezza strutturale come un processo dinamico, dipendente dal tempo e basato sulla conoscenza.

PAROLE CHIAVE

Sistemi cyber–fisici; Monitoraggio strutturale; Digital Twin; Manutenzione predittiva; Intelligenza artificiale; Memoria strutturale; Resilienza delle infrastrutture

1. INTRODUZIONE

La sicurezza strutturale è stata tradizionalmente definita attraverso modelli deterministici e procedure di verifica eseguite nella fase di progettazione. Sebbene questo paradigma abbia sostenuto lo sviluppo delle infrastrutture per decenni, esso risulta sempre più inadeguato nell'affrontare la complessità del mondo reale.

Le strutture ingegneristiche operano in ambienti dinamici caratterizzati da:

- degrado dei materiali
- variabilità ambientale
- interazione terreno–struttura
- eventi estremi quali terremoti e frane

Questi fattori introducono comportamenti dipendenti dal tempo che non possono essere completamente descritti da assunzioni statiche di progetto.

Il monitoraggio strutturale (SHM) ha affrontato in parte questa limitazione, consentendo l'osservazione continua. Tuttavia, la maggior parte dei sistemi SHM rimane di tipo diagnostico piuttosto che predittivo, mancando di integrazione con modelli avanzati e sistemi di supporto alle decisioni.

2. LACUNE DELLA LETTERATURA

Nonostante i progressi nelle tecnologie di sensori e nell'elaborazione dei dati, gli attuali approcci SHM presentano importanti limitazioni:

- assenza di integrazione con modelli Digital Twin
- utilizzo limitato dell'intelligenza artificiale per la previsione
- mancanza di framework di conoscenza continua
- frammentazione tra monitoraggio e processo decisionale

Di conseguenza, lo SHM viene spesso ridotto a un sistema di raccolta dati, piuttosto che a uno strumento di sicurezza predittiva.

Questa lacuna motiva lo sviluppo di un nuovo paradigma:

Cyber–Physical Structural Safety (CPSS).

3. FRAMEWORK TEORICO: CPSS

Il CPSS è definito come:

La capacità di un sistema ingegneristico di mantenere nel tempo condizioni di sicurezza attraverso l'integrazione continua tra struttura fisica, Digital Twin, sistemi di monitoraggio e intelligenza artificiale.

Il framework integra quattro domini:

- Struttura fisica
- Digital Twin
- Sistemi di monitoraggio
- Intelligenza artificiale

Figura 1 – Architettura del framework CPS

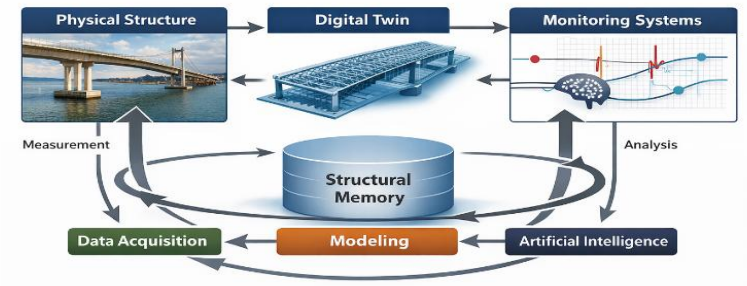


Figure 1. Cyber–Physical Structural Safety (CPSS) framework architecture.

Figure 1. Cyber–Physical Structural Safety (CPSS) framework architecture. The figure illustrates the integrated cyber-physical system enabling continuous structural safety management. The framework combines four primary domains, the physical structure, the Artificial Intelligence algorithms.

Descrizione:
L'architettura CPSS integra la struttura fisica, il Digital Twin, i sistemi di monitoraggio e l'intelligenza artificiale in un sistema a ciclo chiuso. La memoria strutturale agisce come archivio centrale dei dati, consentendo apprendimento continuo e capacità predittive.

4. METODOLOGIA: MODELLO A CICLO CHIUSO

Il CPSS opera attraverso un processo a ciclo chiuso:

1. Misura
2. Acquisizione dati
3. Modellazione (Digital Twin)
4. Analisi (IA)
5. Previsione
6. **Decisione**

Questo ciclo trasforma la sicurezza in un processo continuo e adattivo.

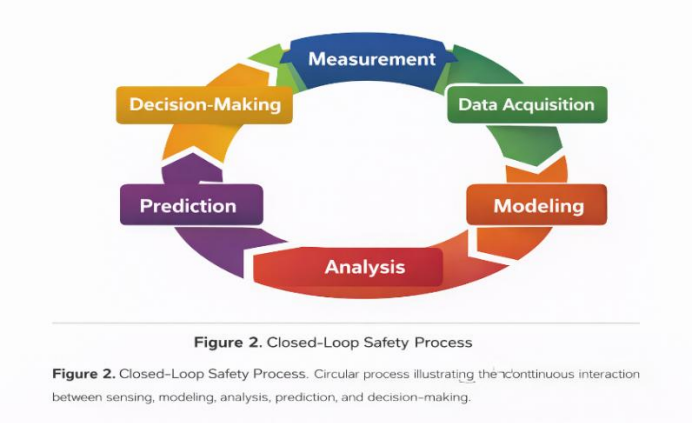


Figure 2. Closed-Loop Safety Process

Figure 2. Closed-Loop Safety Process. Circular process illustrating the continuous interaction between sensing, modeling, analysis, prediction, and decision-making.

Figura 2 – Processo di sicurezza a ciclo chiuso

Descrizione:
Processo circolare che rappresenta l'interazione continua tra acquisizione dati, modellazione, analisi, previsione e decisione.

5. MEMORIA STRUTTURALE

La memoria strutturale rappresenta un'innovazione fondamentale.

A differenza degli approcci tradizionali:

- i dati vengono accumulati continuamente
- la conoscenza evolve nel tempo
- l'accuratezza predittiva aumenta

La memoria strutturale consente:

- individuazione precoce delle anomalie
- monitoraggio del comportamento nel lungo periodo
- miglioramento dell'affidabilità

6. APPLICAZIONI E CASI STUDIO

Il framework CPSS è stato applicato in contesti di ricostruzione post-sisma.

Implementazioni:

- sistemi di ispezione digitale
- piattaforme integrate di gestione dati
- attivazione del Digital Twin durante le fasi di costruzione

- monitoraggio supportato da intelligenza artificiale

Osservazioni:

- individuazione di trend strutturali
- correlazione tra ambiente e comportamento della struttura
- identificazione precoce di anomalie

Figura 3 – Applicazione del Digital Twin nello SHM

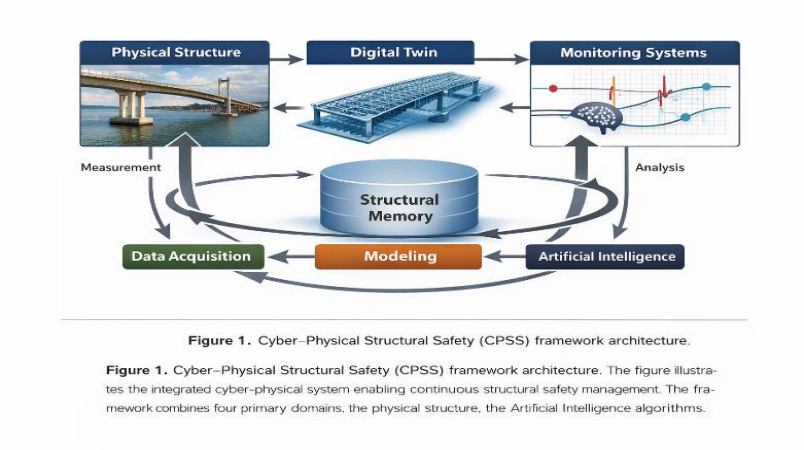


Figure 1. Cyber–Physical Structural Safety (CPSS) framework architecture.

Figure 1. Cyber–Physical Structural Safety (CPSS) framework architecture. The figure illustrates the integrated cyber-physical system enabling continuous structural safety management. The framework combines four primary domains, the physical structure, the Artificial Intelligence algorithms.

Descrizione:
Rappresentazione dell'interazione tra struttura reale e Digital Twin, con integrazione di dati da sensori in tempo reale, analisi tramite intelligenza artificiale e modellazione predittiva.

7. RUOLO DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

L'intelligenza artificiale consente:

- elaborazione di grandi quantità di dati
- individuazione di anomalie
- modellazione predittiva

Essa migliora le capacità ingegneristiche:

- riducendo l'incertezza
- aumentando l'accuratezza delle previsioni
- consentendo decisioni in tempo reale

8. DISCUSSIONE

Ingegneria Tradizionale	CPSS
Sicurezza statica	Sicurezza dinamica
Ispezioni periodiche	Monitoraggio continuo
Manutenzione reattiva	Manutenzione predittiva
Dati frammentati	Conoscenza integrata

9. RISULTATI E IMPLICAZIONI

Tecnici:

- individuazione precoce dei problemi
- miglioramento dei modelli
- aumento della vita utile

Economici:

- riduzione dei costi di emergenza
- ottimizzazione della manutenzione

Sociali:

- maggiore sicurezza
- infrastrutture resilienti

10. CONCLUSIONI

La Cyber–Physical Structural Safety rappresenta un cambiamento di paradigma:

- da sicurezza statica a dinamica
- da sistemi reattivi a predittivi
- da dati a conoscenza

La sicurezza non è una condizione,

ma un processo continuo basato sulla conoscenza.

BIBLIOGRAFIA

Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. Wiley.

Worden, K., Farrar, C. R., Manson, G., & Park, G. (2007). The fundamental axioms of structural health monitoring. *Proceedings of the Royal Society A*, 463(2082), 1639–1664.

Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., & Stinemates, D. W. (2004). *A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001*. Los Alamos National Laboratory.

Zonta, D., Zandonini, R., & Bortot, F. (2021). Digital Twin for civil engineering systems: Opportunities and challenges. *Engineering Structures*, 246, 112873.

Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157–169.

Gao, Y., Spencer, B. F., & Ruiz-Sandoval, M. (2022). AI-based structural health monitoring: A review. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(3), e2898.

Chen, Z., Chen, B., & Li, H. (2023). Artificial intelligence in structural engineering: Recent advances and future trends. *Automation in Construction*, 144, 104629.

Sun, H., Burton, H. V., & Huang, H. (2020). Machine learning applications for structural health monitoring. *Engineering Structures*, 216, 110570.

Bolton, A., Butler, L., & Dabson, I. (2018). The Digital Twin concept in infrastructure management. *Proceedings of the ICE – Smart Infrastructure and Construction*, 171(2), 53–62.

Khan, S., Yairi, T. (2018). A review on the application of deep learning in system health management. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 107, 241–265.

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85–113).

Ing. Diego Dell'Erba

Ingegnere nucleare multidisciplinare, con oltre cinquant'anni di esperienza nella progettazione e direzione dei lavori di opere di ingegneria civile e infrastrutturale in Italia e all'estero.

Nel corso della sua carriera ha operato in contesti di elevata complessità, partecipando alla realizzazione e gestione di importanti interventi quali gallerie, opere stradali, infrastrutture portuali e interventi di consolidamento geotecnico, collaborando con imprese di rilievo internazionale e centri di ricerca.

È stato protagonista in numerosi interventi di ricostruzione post-sisma, in particolare negli eventi del 2009 (L'Aquila) e del 2016 (Abruzzo–Lazio–Marche), dove ha ricoperto il ruolo di progettista e Direttore dei Lavori, introducendo metodologie innovative nella gestione dei cantieri e nel controllo del costruito.

La sua attività professionale si distingue per l'integrazione tra ingegneria tradizionale e innovazione tecnologica, con particolare riferimento a: • monitoraggio strutturale avanzato (sensori a fibra ottica – FBG) • Digital Twin applicato alle opere di ingegneria • manutenzione predittiva • utilizzo dell'intelligenza artificiale nei processi decisionali È ideatore del paradigma Cyber–Physical Structural Safety (CPSS), una nuova visione della sicurezza delle opere fondata sulla conoscenza continua, sull'integrazione tra sistemi fisici e digitali e sulla prevenzione predittiva.

Svolge inoltre attività di divulgazione tecnico-scientifica e formazione, collaborando con università, enti di ricerca e istituzioni, contribuendo allo sviluppo di una nuova cultura della sicurezza nel settore delle costruzioni.