

# Structural Health Monitoring by Combining Metaheuristics and Machine Learning Techniques

Angelo Cavallaro, Carolina Crespi, Vincenzo Cutello, Mario Pavone, Francesco Zito

Department of Mathematics and Computer Science

University of Catania

viale A. Doria 6 – 95125 Catania, Italy

angelo.cavallaro@actwo.net,

{carolina.crespi, francesco.zito}@phd.unict.it,  
{cutello, mario.pavone}@unict.it

## Abstract

Il presente progetto di ricerca nasce con l'obiettivo di promuovere una collaborazione tra azienda (AC2 srl) e polo accademico (Università di Catania) all'avanguardia nello studio delle tecnologie di ottimizzazione, con specifico riferimento agli approcci meta-euristici, in applicazioni specifiche di Intelligenza Artificiale. Nello specifico, le applicazioni che si vorranno approfondire riguardano l'ottimizzazione di modelli ad elementi finiti applicati attraverso l'uso di algoritmi di intelligenza computazionale, a modelli dinamici come le infrastrutture civili o i modelli di dissesto idrogeologico e di rischio ambientale.

## 1 Descrizione

Sistemi di monitoraggio delle infrastrutture e/o sistemi di analisi del rischio ambientale, come il dissesto idrogeologico o il monitoraggio dell'evoluzione delle frane, rappresentano oggi uno degli aspetti di maggiore preoccupazione per i decision-maker ed ha portato allo sviluppo di numerosi e complessi modelli numerici. Tutte le infrastrutture civili possono subire danni durante gli anni a causa di azioni naturali e antropiche [Koh and Perry, 2010; Alves *et al.*, 2020], i quali ovviamente non sono da sottovalutare e necessitano pertanto di essere costantemente monitorati e corretti preventivamente.

Un danno strutturale si manifesta attraverso cambiamenti nelle proprietà fisiche dell'infrastruttura, che se non monitorati e riparati tempestivamente potrebbero non solo compromettere le prestazioni della struttura, e quindi causare cedimenti strutturali, ma comporterebbe un considerevole aumento dei costi di manutenzione. Alla luce di ciò, diventa quindi fondamentale garantire l'integrità strutturale attraverso il rilevamento (in servizio) di possibili danni in una struttura il prima possibile (quasi in tempo reale), al fine di garantire un'azione correttiva e tempestiva per ridurre al minimo i tempi di fermo del sistema, i costi operativi e di manutenzione complessivi e, ovviamente, ridurre il rischio di guasti catastrofici.

Un primo tradizionale approccio per il rilevamento automatizzato dei danni in *Structural Health Monitoring* (SHM) si basa principalmente sulle leggi fisiche che governano il comportamento strutturale (*physics-based approach*) il cui lo scopo è quello di estrarre informazioni significative sul danno e sulla sua evoluzione dai dati dei sensori misurati. Tuttavia, però, diversi fattori, come ad esempio la difficoltà nella modellazione di strutture complesse del mondo reale, modalità di rilevamento multiple, non linearità del materiale e/o geometrica, incertezza nelle proprietà dei materiali, variazioni ambientali/operative, rendono questo approccio spesso impraticabile in strutture complesse limitando di conseguenza la loro applicazione al solo monitoraggio di strutture piuttosto semplici con condizioni al contorno predefinite e ambienti ben controllati [Giurgiutiu, 2007; Yuan, 2016; Cawley, 2018].

Grazie ai progressi tecnologici degli ultimi decenni, è adesso possibile monitorare un gran numero di parametri *in situ* in strutture grandi e complesse, sulla base di approcci basati sui dati: *data-driven approach*. In questi approcci, la valutazione del danno strutturale viene trattata come problema di riconoscimento di modelli statistici, aggirando così alcune delle principali sfide associate all'approccio *physics-based*. È ben noto in letteratura come metodi classici risultano poco efficienti nella rilevazione di un numero elevato di parametri, i quali caratterizzano modelli realistici, a causa dell'assenza di informazioni necessarie a guidare il processo di ricerca verso una soluzione ottima [Koh and Perry, 2010]. A differenza dei metodi classici, le *metaeuristiche* trovano soluzioni quasi ottimali e in modo rapido su tutti quei problemi dove nessuna ricerca *forza bruta* può essere computazionalmente eseguita a causa del numero elevato delle soluzioni. Le metaeuristiche sono considerate come metodologie euristiche di livello superiore che combinano regole euristiche classiche a ricerche casuali al fine di risolvere problemi hard e di grandi dimensioni. Rappresentano oggi una classe speciale di algoritmi approssimati, applicati con successo proprio su molti problemi complessi.

## 2 Metodologie di AI Utilizzate

Le metaeuristiche rappresentano una famiglia di tecniche di ottimizzazione approssimata in grado di fornire soluzioni ac-

cettabili in tempi ragionevoli per problemi complessi e difficili. Nell'arco degli anni queste metodologie si sono dimostrate valide alternative ai metodi tradizionali fornendo un miglior compromesso tra qualità delle soluzioni e tempo di elaborazione. Difatti, l'abilità di trovare buone soluzioni, lì dove altri metodi falliscono, ha permesso che le metaeuristiche venissero scelte come principali tecniche di risoluzione per molti problemi del mondo reale. È importante sottolineare come i metodi meta-euristici sono progettati per essere applicati indipendentemente dal tipo di problema: la soluzione viene prodotta in maniera iterativa cercando di migliorare continuamente la soluzione candidata.

Tuttavia, i recenti progressi nell'ambito dell'intelligenza artificiale, hanno portato i ricercatori a rivedere tali metodologie integrandole con tecniche di apprendimento automatico con il principale scopo di migliorarne le prestazioni. In [Karimi-Mamaghan *et al.*, 2022] gli autori hanno ampliato discusso su come il processo di integrazione tra metaeuristica e machine learning possa condurre le metaeuristiche verso una ricerca più efficiente, più efficace e più robusta, incrementandone considerevolmente le prestazioni in termini di qualità della soluzione, tasso di convergenza e robustezza. In [Talbi, 2022] è stata proposta una tassonomia per le metaeuristiche basata sui dati (data-driven metaheuristics) con l'obiettivo di evidenziare e motivare i ricercatori operanti nel settore dell'ottimizzazione a includere insieme tecniche del machine learning con approcci meta-euristici.

È stato ampiamente provato in [Bengio *et al.*, 2021] come problemi di ottimizzazione possono trarre beneficio dall'applicazione del machine learning; l'idea di base consiste proprio nell'utilizzare tali tecniche per svolgere compiti pesanti dal punto di vista computazionale. In generale, gli algoritmi meta-euristici producono molte informazioni durante il processo di ricerca della soluzione ottimale, sebbene non vengano direttamente sfruttate per migliorare al meglio il metodo di ricerca. A tal fine, l'impiego di tecniche di machine learning potrebbero invece aiutare le metaeuristiche a sfruttare in pieno queste informazioni per estrarre opportunamente conoscenza/informazione da utilizzare per modificare dinamicamente il comportamento dell'algoritmo in funzione all'esperienza acquisita [Yaman *et al.*, 2013]. Il processo di integrazione tra le metaeuristiche e le tecniche di machine learning oggi viene analizzato e discusso rispetto i seguenti casi [Talbi, 2022]:

- utilizzo delle tecniche di machine learning per la modellazione del problema di ottimizzazione da risolvere (es. funzione obiettivo, vincoli) e nella scomposizione del problema;
- utilizzo delle tecniche di machine learning per inizializzare i parametri del processo di ricerca, come: neighborhoods nella local search, mutation rate, crossover, etc;
- utilizzo delle tecniche di machine learning nelle Hyper-Heuristic con il principale scopo di generare nuove metaeuristiche sulla base dei dati osservati dal mondo reale.

È quindi importante evidenziare come, in prospettiva futura, l'integrazione tra metaeuristica e machine learning rap-

presenta un potenziale nuovo strumento di ottimizzazione efficiente e robusto, come possibile applicazione in molte aree di ricerca. Nel presente progetto, si intende applicare nuove metodologie di integrazione tra metaheuristics e machine learning per il problema SHM (Structural Health Monitoring). Specificatamente a questo problema, l'integrazione del machine learning potrebbe aiutare le metaeuristiche population-based (es. Genetic Algorithm, Immune-Inspired algorithm e/o Swarm Intelligence) ad esplorare lo spazio di ricerca in maniera mirata, modificando dinamicamente il comportamento dell'algoritmo stesso sulla base di fattori esterni influenzati dall'ambiente. A conferma di ciò, in [Chou and Ghaboussi, 2001] si è provato come gli algoritmi genetici ottengono risultati incoraggianti che potrebbero essere ulteriormente migliorati adottando metodi di apprendimento automatico.

### 3 Challenges/Prospettive

Le applicazioni derivanti dal seguente progetto si pongono in un contesto di forte interesse nel campo della ricerca e dell'industria perché vede applicarsi il *modello impresa-università* all'interno di una problematica molto attuale, quale, nell'asserzione più ampia, il monitoraggio strutturale e il rischio ambientale: questo connubio che vede da un lato il mondo dell'impresa con la sua visione del mercato e delle *problematiche di interesse industriale* e dall'altro il mondo Università che detiene il know-how scientifico specifico necessario per l'attivazione delle tecnologie abilitanti necessarie per il raggiungimento di un obiettivo di ricerca così innovativo.

I vantaggi sono facilmente identificabili in alcuni macro-obiettivi:

- superamento dei limiti della modellistica dei sistemi tradizionale;
- applicazioni di sistemi di classificazioni avanzate (ad esempio, classificazione di un danno strutturale di un edificio o infrastruttura, classificazione del rischio ambientale, etc.);
- predizione ed identificazione di uno specifico evento;
- diffusione pervasiva dell'Intelligenza Artificiale nel settore del monitoraggio della "salute" delle infrastrutture (tema molto attuale e di forte interesse!).

Oltre ai campi applicativi già investigati dal progetto ed alle aree di intervento proposte, l'applicazione di analisi predittive, modellistica e approfondimenti basati su modelli intelligenti ha il potenziale per alimentare ulteriori sviluppi applicativi in altri e numerosi contesti.

### 4 Azienda

La società AC2 srl, con sede operativa a Zafferana Etnea, è una società che eroga servizi ad alto valore aggiunto di conoscenza, di ingegneri, Project Management ed ICT, e opera anche nel contesto dell'ingegneria civile ed edile. In particolare può vantare un ampio know-how nel campo dell'ingegneria ferroviaria, dove tra l'altro, è tra i proponenti di un sistema di Intelligenza Artificiale per l'uso pervasivo nel campo del monitoraggio infrastrutturale in affiancamento ai già consolidati modelli FEM (*Finite Element Method*); nello specifico

gli algoritmi (alimentati dai dati di monitoraggio dei sistemi IOT) dovranno permettere in ultima analisi ed in totale autonomia di identificare comportamenti anomali, individuare danni o condizioni di attenzione nel sistema di monitoraggio strutturale dei ponti e viadotti ferroviari.

## 5 Ricercatori Coinvolti

Angelo Cavallaro<sup>1</sup>, Carolina Crespi, Vincenzo Cutello, Mario Pavone<sup>2</sup>, Francesco Zito

### Riferimenti bibliografici

- [Alves *et al.*, 2020] Vinicius N. Alves, Matheus M. de Oliveira, Diogo Ribeiro, Rui Calçada, and Alexandre Curry. Model-based damage identification of railway bridges using genetic algorithms. *Engineering Failure Analysis Journal*, 118:104845, 2020.
- [Bengio *et al.*, 2021] Yoshua Bengio, Andrea Lodi, and Antoine Prouvost. Machine learning for combinatorial optimization: A methodological tour d’horizon. *European Journal of Operational Research*, 290:405–421, 2021.
- [Cawleyn, 2018] Peter Cawleyn. Structural health monitoring: Closing the gap between research and industrial deployment. *Structural Health Monitoring*, 17:1225–1244, 2018.
- [Chou and Ghaboussi, 2001] Jung-Huai Chou and Jamshid Ghaboussi. Genetic algorithm in structural damage detection. *Computers & Structures*, 79:1335–1353, 2001.
- [Giurgiutiu, 2007] Victor Giurgiutiu. *Structural health monitoring: with piezoelectric wafer active sensors*. Elsevier, 2007.
- [Karimi-Mamaghan *et al.*, 2022] M. Karimi-Mamaghan, M. Mohammadi, P. Meyer, A. M. Karimi-Mamaghan, and E. G. Talbi. Machine learning at the service of meta-heuristics for solving combinatorial optimization problems: A state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, 296(2):393–422, January 2022.
- [Koh and Perry, 2010] Chan Ghee Koh and Michael John Perry. *Structural Identification and Damage Detection using Genetic Algorithms*, volume 6. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2010.
- [Talbi, 2022] El-Ghazali Talbi. Machine learning into metaheuristics. *ACM Computing Surveys*, 54(129):1–32, 2022.
- [Yaman *et al.*, 2013] Fatih Yaman, Valery G. Yakhno, and Roland Potthast. A survey on inverse problems for applied sciences. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013:ID-976837, 2013.
- [Yuan, 2016] Fuh-Gwo Yuan. *Structural health monitoring (SHM) in aerospace structures*. Woodhead Publishing, 2016.

---

<sup>1</sup>Principal Industrial Investigator: angelo.cavallaro@actwo.net

<sup>2</sup>Principal University Investigator: mpavone@dmi.unict.it