

Metodi avanzati per il monitoraggio, la verifica e la gestione degli interventi di riabilitazione di ponti esistenti: progetto BEDD

Fulvio Bergantin, Agostino Forestiero

RT-ICAR-CS-25-06

Febbraio 2025



Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Calcolo e Reti ad Alte Prestazioni (ICAR)
– Sede di Cosenza, Via P. Bucci 8-9C, 87036 Rende, Italy, URL: www.icar.cnr.it
– Sezione di Napoli, Via P. Castellino 111, 80131 Napoli, URL: www.icar.cnr.it
– Sezione di Palermo, Via Ugo La Malfa, 153, 90146 Palermo, URL: www.icar.cnr.it

Sommario

1	Introduzione	3
2	Contesto e rilevanza nel panorama delle infrastrutture civili	3
3	Strumenti e Normative per il Monitoraggio delle Infrastrutture	5
3.1	Sfide e problemi associati al monitoraggio delle strutture ponte	5
3.2	Tecniche di monitoraggio esistenti: panoramica e limiti	6
3.3	Normative e linee guida per il monitoraggio delle infrastrutture	7
4	Tecnologie e Soluzioni per il Monitoraggio Avanzato	9
4.1	Intelligenza Artificiale: approcci e algoritmi per il monitoraggio strutturale	9
4.2	Sensoristica IoT per l'acquisizione dati in tempo reale	10
4.3	Sistemi Cloud/Edge Computing per l'elaborazione distribuita dei dati	11
4.4	Integrazione delle tecnologie in piattaforme software avanzate	12
4.5	Sistemi per la manutenzione predittiva basati su analisi data-driven	13
5	Ispezioni Visive Automatizzate e loro potenziale impatto	14
5.1	Introduzione alle ispezioni visive automatizzate	14
5.2	Tecnologie utilizzate per le ispezioni visive	15
5.3	Impatti e benefici delle ispezioni visive automatizzate	17
6	Innovazione Digitale nella Gestione dei Ponti	18
7	Studio delle Forme di Alterazione e Degrado dei Ponti Esistenti	19
8	Integrazione e Sviluppo del Modello Predittivo	20
8.1	Workflow per l'aggiornamento dei modelli HBIM con dati IA	20
8.2	Dimostratore di ricerca: applicazioni pratiche	21
8.3	Verso un modello predittivo integrato per il monitoraggio	23
9	Conclusioni	23

1 Introduzione

Il progetto BEDD (Bridge Early Damage Detection) nasce dall'urgenza di garantire la sicurezza e la sostenibilità delle infrastrutture civili, in particolare dei ponti, sempre più esposti a rischi legati all'invecchiamento, all'aumento del traffico e agli eventi climatici estremi. Per rispondere a queste sfide, l'iniziativa punta a superare le limitazioni delle attuali pratiche di monitoraggio, introducendo soluzioni innovative basate su tecnologie avanzate. Tra gli obiettivi principali vi è l'identificazione delle criticità del sistema attuale, come il degrado delle strutture e i limiti delle ispezioni tradizionali, tenendo conto anche delle difficoltà economiche e delle condizioni ambientali avverse. Il progetto propone quindi l'adozione di nuove tecnologie come l'Intelligenza Artificiale e l'Internet of Things per raccogliere ed elaborare dati in tempo reale, permettendo un monitoraggio continuo, efficiente e scalabile. Si prevede inoltre lo sviluppo di sistemi automatizzati per le ispezioni visive tramite robot, droni e tecniche di visione artificiale, insieme all'elaborazione di modelli predittivi basati su analisi dei dati storici e in tempo reale. Questi strumenti saranno fondamentali per implementare strategie di manutenzione preventiva. Un altro aspetto chiave del progetto è l'allineamento agli obiettivi di sostenibilità e sicurezza, attraverso la riduzione dell'impatto ambientale e l'ottimizzazione delle risorse. Infine, l'iniziativa mira a creare un ecosistema digitale integrato, basato su modelli 3D e flussi di lavoro collaborativi, che favorisca una gestione più efficace e trasparente delle infrastrutture.

In sintesi, il progetto non si limita a migliorare le pratiche attuali, ma ambisce a definire nuovi standard di gestione infrastrutturale, dove innovazione, efficienza e sostenibilità sono centrali per affrontare le sfide future.

2 Contesto e rilevanza nel panorama delle infrastrutture civili

Le infrastrutture civili, in particolare i ponti, rivestono un ruolo cruciale per l'economia, la mobilità e la sicurezza delle comunità. Tuttavia, molte di queste strutture sono soggette a un progressivo deterioramento dovuto all'invecchiamento, all'aumento del traffico e agli eventi climatici estremi. Gli incidenti avvenuti negli ultimi anni hanno evidenziato i limiti dei metodi tradizionali di ispezione e la necessità urgente di un monitoraggio più efficace e continuo. Le ispezioni manuali, pur essendo state finora lo standard, risultano spesso lente, costose e soggette a errori. Inoltre, non riescono a fornire una diagnosi tempestiva dei problemi strutturali. Per affrontare queste sfide, è necessario un approccio moderno basato su tecnologie avanzate come l'Intelligenza Artificiale, l'Internet of Things (IoT) e la modellazione 3D. Questi strumenti permettono di raccogliere ed elaborare dati in tempo reale, identificare precocemente anomalie e rendere la manutenzione più efficiente e sostenibile. Anche le politiche

pubbliche stanno evolvendo in questa direzione. In particolare, l'Unione Europea e il governo italiano stanno investendo in ricerca e innovazione per rafforzare la sicurezza e la resilienza delle infrastrutture. L'Italia, con una rete infrastrutturale ampia e spesso datata, affronta sfide importanti, ma sta aumentando gli investimenti, come dimostrano i 45,3 miliardi di euro destinati tra il 2020 e il 2021, con un focus sul trasporto sostenibile. In Figura 1 vengono mostrate le prime nove regioni in Italia in termini di investimenti infrastrutturali nel 2022.

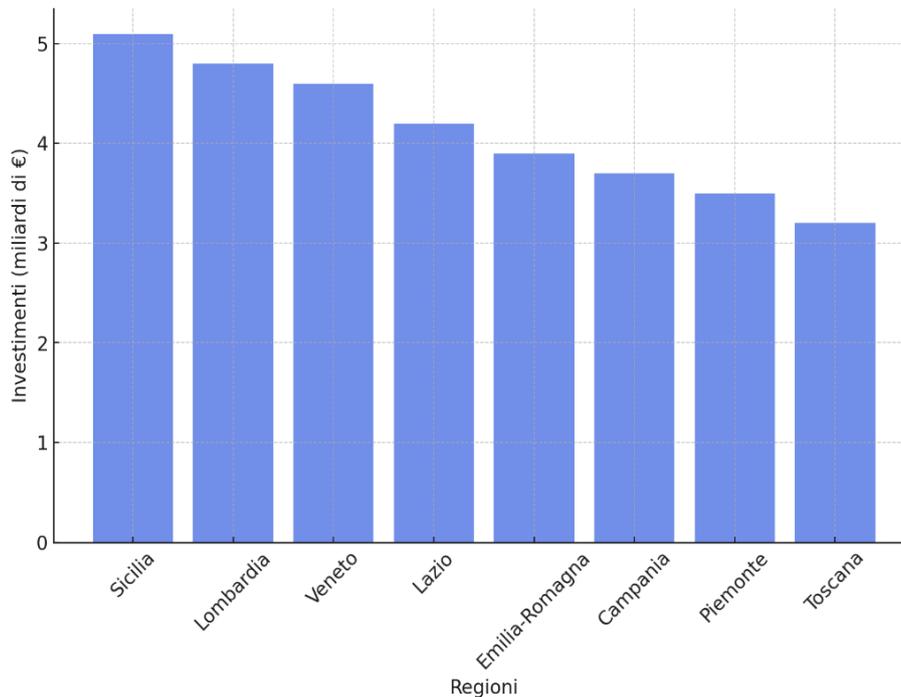


Fig.1: Investimenti infrastrutturali per regione in Italia (2022)

Da tutte le premesse sopra e dai dati rilevati si deduce che il progetto è importante perché può fornire un sistema completo e integrato per la gestione delle infrastrutture civili. La creazione di nuovi dispositivi tecnologici non è l'unico obiettivo; è necessario anche cambiare l'approccio alla gestione e alla manutenzione. La creazione di un sistema infrastrutturale più sicuro, resiliente e sostenibile, in grado di affrontare le sfide future, è possibile attraverso la combinazione di tecnologie digitali, analisi avanzata dei dati e collaborazione tra istituzioni pubbliche e private.

3 Strumenti e Normative per il Monitoraggio delle Infrastrutture

3.1 Sfide e problemi associati al monitoraggio delle strutture ponte

Il monitoraggio delle infrastrutture civili, in particolare dei ponti, è una funzione fondamentale ma estremamente complessa. Le amministrazioni si trovano a fronteggiare molteplici sfide di natura tecnica, economica, ambientale e organizzativa che richiedono un approccio integrato e multidisciplinare. Tra i problemi principali emerge l'invecchiamento delle strutture, molte delle quali risalgono a decenni fa e non sono più adeguate a sostenere i carichi e le sollecitazioni attuali, aggravate da traffico intenso e cambiamenti climatici. Le tecniche tradizionali di ispezione, come i controlli visivi e gli strumenti manuali, si rivelano spesso insufficienti per individuare i difetti nascosti o per garantire una diagnosi strutturale completa. Inoltre, il monitoraggio sistematico di una rete infrastrutturale così vasta come quella italiana – con circa 61.000 ponti, molti in zone impervie – comporta notevoli difficoltà logistiche, soprattutto in assenza di tecnologie moderne largamente diffuse. Un ulteriore fattore critico è rappresentato dal cambiamento climatico, che con eventi meteorologici estremi accelera il degrado strutturale, aumentando il rischio di cedimenti. Allo stesso tempo, i vincoli economici e la carenza di risorse impediscono spesso una manutenzione preventiva e programmata, lasciando spazio a interventi solo in caso di emergenza. Alla base del problema vi è anche la mancanza di standardizzazione nei processi di monitoraggio: ogni ente utilizza metodi e criteri diversi, ostacolando la comparazione dei dati e la pianificazione coordinata degli interventi. Inoltre, la transizione verso tecnologie avanzate come sensori IoT e Intelligenza Artificiale è rallentata dalla carenza di personale con le competenze tecniche necessarie.

In sintesi, i principali nodi critici sono:

- **L'invecchiamento delle infrastrutture e il degrado strutturale;**
- **Le difficoltà logistiche e la vastità della rete da monitorare;**
- **L'impatto dei cambiamenti climatici sul deterioramento;**
- **Le limitazioni economiche che ostacolano una manutenzione efficace;**
- **L'assenza di standard condivisi e di una gestione centralizzata dei dati;**
- **La carenza di competenze per adottare tecnologie innovative.**

Per affrontare efficacemente questi problemi, è necessario un cambio di paradigma verso un sistema di monitoraggio moderno, integrato e tecnologicamente avanzato, sostenuto da risorse adeguate e politiche coordinate a livello nazionale. In Figura 2 viene rappresentato un grafico a torta che rende maggiormente l'idea della distribuzione dell'età delle infrastrutture (ponti e viadotti) in Italia:

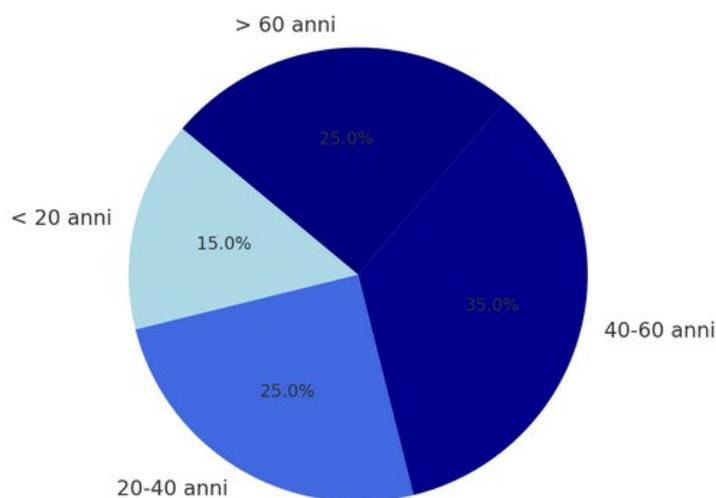


Fig.2: Distribuzione dell'età di ponti e viadotti in Italia

3.2 Tecniche di monitoraggio esistenti: panoramica e limiti

Nel tempo, la tecnologia di monitoraggio delle infrastrutture ha subito un'evoluzione per rispondere alle crescenti esigenze di sicurezza e manutenzione. Tuttavia, nonostante i progressi, molte delle tecniche attualmente in uso presentano ancora importanti limiti, specialmente in contesti complessi e in continua trasformazione. La metodologia più diffusa rimane l'ispezione visiva, che si basa sull'osservazione diretta da parte di tecnici specializzati. Questo approccio, pur essendo semplice e immediato, è soggetto a diversi problemi: dipende molto dall'esperienza dell'operatore, rende difficile accedere a tutte le parti della struttura e fornisce solo informazioni qualitative, senza misurazioni oggettive e precise. Per ovviare a queste criticità, si è iniziato a impiegare tecnologie come droni, telecamere ad alta risoluzione e software di Intelligenza Artificiale, che migliorano la qualità e la sicurezza delle ispezioni. Accanto alle ispezioni visive, si utilizzano i test non distruttivi (NDT), che permettono di valutare l'integrità dei materiali senza danneggiarli. Tecniche come gli ultrasuoni, la termografia infrarossa, le prove magneto-induttive e il radar a penetrazione del terreno consentono di individuare difetti nascosti o danni interni. Questi metodi sono molto più efficaci rispetto alle sole ispezioni visive, ma hanno comunque dei limiti: coprono solo porzioni limitate della struttura, sono costosi e richiedono competenze elevate per l'interpretazione dei dati. Negli ultimi anni, si è diffuso anche l'uso del monitoraggio statico e dinamico. Il primo misura deformazioni e tensioni sotto carichi ordinari, mentre il secondo analizza le vibrazioni generate da sollecitazioni esterne come traffico o eventi sismici. Queste tecniche offrono una visione più dettagliata e in tempo reale delle condizioni strutturali, ma implicano costi elevati per l'installazione permanente dei sensori e sono sensibili a disturbi ambientali. Per superare tali ostacoli, si sta

lavorando su sistemi wireless e algoritmi intelligenti capaci di filtrare i dati anomali. Un problema trasversale a tutte le tecniche è la scarsa integrazione: spesso, i dati raccolti da diverse fonti non vengono combinati in un'unica piattaforma, rendendo difficile ottenere un quadro completo e coerente delle condizioni strutturali. In risposta a questa frammentazione, si stanno sviluppando soluzioni digitali avanzate come i **Digital Twin** e la **modellazione 3D**, che permettono di aggiornare in tempo reale una rappresentazione virtuale della struttura, integrando i dati provenienti da sensori, test e ispezioni.

Possiamo dunque affermare che le attuali tecniche di monitoraggio rappresentano un passo avanti, ma sono ancora limitate da alti costi, frammentazione dei dati, mancanza di continuità nel controllo e difficoltà di interpretazione. L'obiettivo oggi è adottare un approccio integrato e intelligente, basato sulla sinergia tra sensori IoT, Intelligenza Artificiale e modelli digitali, per rendere il monitoraggio più preciso, tempestivo, sostenibile e capace di prevenire i rischi strutturali.

3.3 Normative e linee guida per il monitoraggio delle infrastrutture

Le normative e le linee guida per il monitoraggio delle infrastrutture civili rivestono un ruolo fondamentale nel garantire la sicurezza, la funzionalità e la sostenibilità delle opere. Questi strumenti definiscono standard minimi per le ispezioni, i criteri di valutazione e i requisiti per la manutenzione, stabilendo un quadro di riferimento per gli enti gestori e i professionisti del settore. Organizzazioni internazionali come la **Federation Internationale du Béton (fib)** e l'**International Organization for Standardization (ISO)** hanno sviluppato linee guida tecniche per il monitoraggio e la manutenzione delle strutture. Ad esempio, la ISO 55000 promuove un approccio sistemico alla manutenzione e la norma ISO 2394 stabilisce principi generali per la valutazione dell'affidabilità strutturale. Questi standard facilitano la collaborazione e la condivisione delle migliori pratiche in tutto il mondo fornendo un linguaggio comune e un quadro pratico. Su questo argomento vi sono molti siti ed articoli che ne parlano ed in questo deliverable è stato proposto quello di *Olia Kanevskaia, International Organization for Standardization (ISO)*. In Europa, una raccolta di regole armonizzate per la progettazione, la costruzione e la gestione delle infrastrutture, hanno un impatto significativo sulla legislazione europea. In particolare, gli Eurocodici strutturali forniscono linee guida approfondite su come valutare la sicurezza e la durabilità delle opere esistenti tenendo conto dei carichi, delle condizioni ambientali e del comportamento dei materiali nel tempo. Inoltre, i materiali utilizzati nelle infrastrutture devono soddisfare elevati standard di qualità e sicurezza, come stabilito dal **Regolamento europeo sui prodotti da costruzione (CPR)**. A livello nazionale, i paesi hanno sviluppato normative specifiche per rispondere alle loro esigenze locali.

In Italia, il **Codice degli appalti** e il **Testo Unico delle Costruzioni** regolano le attività di monitoraggio e manutenzione delle opere pubbliche. Le **Linee Guida per la Classificazione e Gestione del Rischio, la Valutazione della Sicurezza e il Monitoraggio dei Ponti Esistenti** introdotte dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici rappresentano un documento di riferimento fondamentale. Queste linee guida definiscono criteri per la classificazione dei rischi, le priorità di intervento e l'uso di tecnologie avanzate nel monitoraggio, incoraggiando un approccio proattivo basato su dati oggettivi. Anche se i regolamenti sono sofisticati, ci sono difficoltà significative nell'implementarli. L'applicazione uniforme delle linee guida è difficile a causa della frammentazione delle responsabilità tra diversi enti gestori, della scarsità di risorse finanziarie e di personale e dell'assenza di sistemi centralizzati per la gestione dei dati. Inoltre, le leggi spesso non seguono le nuove tecnologie, lasciando in sospeso problemi relativi all'uso di nuovi strumenti come droni, sensori dell'Internet delle cose e modelli di intelligenza artificiale. In questo contesto, emerge la necessità di una revisione e aggiornamento costante delle normative, per integrare le tecnologie emergenti e affrontare le sfide future. Promuovere una maggiore collaborazione tra enti pubblici, istituzioni accademiche e industrie private può accelerare questo processo e favorire l'adozione di soluzioni innovative, garantendo che le infrastrutture siano gestite in modo più sicuro ed efficiente.

Dunque, le normative e le linee guida sono strumenti imprescindibili per garantire un monitoraggio efficace delle infrastrutture, poiché stabiliscono i criteri fondamentali per la sicurezza, la gestione e la manutenzione. Tuttavia, per essere realmente efficaci, queste normative devono evolversi continuamente per tenere il passo con i progressi tecnologici e rispondere alle sfide emergenti. Le tecnologie moderne, come l'uso di droni, sensori IoT e l'intelligenza artificiale, stanno trasformando il panorama del monitoraggio delle infrastrutture, ma le normative spesso non riescono a integrarle pienamente. È fondamentale che le normative vengano costantemente aggiornate per includere questi strumenti innovativi, in modo da migliorare la precisione, la tempestività e l'efficienza del monitoraggio. Inoltre, un aspetto cruciale per il successo di queste normative è la collaborazione tra enti pubblici, istituzioni accademiche e il settore privato. Solo attraverso un lavoro sinergico, che superi la frammentazione delle responsabilità e le risorse limitate, sarà possibile ottimizzare l'uso delle tecnologie emergenti, ridurre i rischi e garantire la sicurezza e la durata delle infrastrutture nel lungo periodo. In basso uno schema riassuntivo (Fig.3) delle normative per il monitoraggio delle infrastrutture.

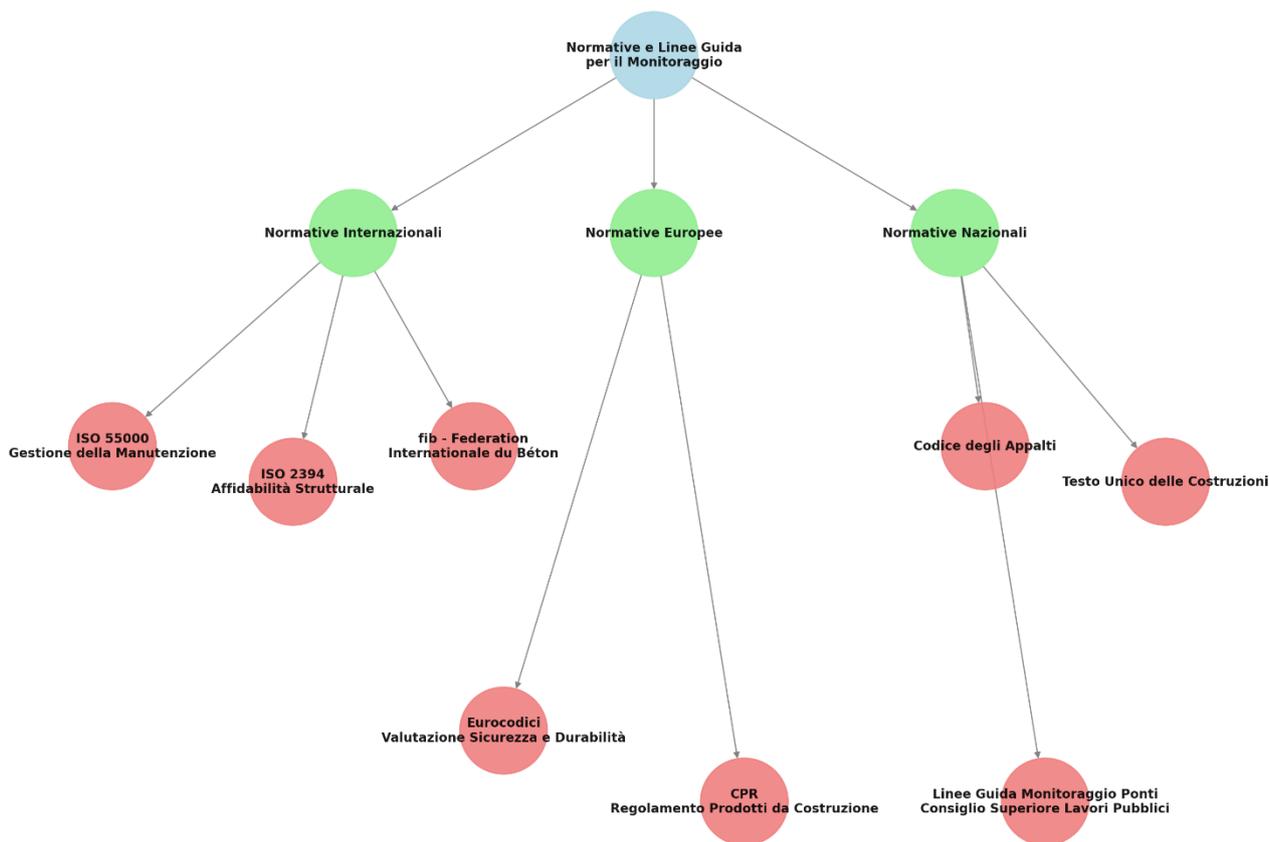


Fig.3: Schema riassuntivo normative monitoraggio infrastrutture

4 Tecnologie e Soluzioni per il Monitoraggio Avanzato

4.1 *Intelligenza Artificiale: approcci e algoritmi per il monitoraggio strutturale*

L'intelligenza artificiale (IA) sta trasformando profondamente il monitoraggio delle infrastrutture civili, offrendo strumenti in grado di analizzare grandi quantità di dati in modo rapido, preciso e automatizzato. Grazie a tecniche come il **Machine Learning** e il **Deep Learning**, è oggi possibile rilevare segni di degrado strutturale, come fessure o corrosione, attraverso l'elaborazione di immagini, video e dati sensoriali raccolti da droni e dispositivi IoT. Questi algoritmi permettono non solo di identificare anomalie, ma anche di prevederne l'evoluzione nel tempo, migliorando l'efficacia della manutenzione predittiva. L'IA è in grado di integrare dati provenienti da fonti diverse (sensori, rilievi tradizionali, immagini satellitari) offrendo così una visione complessiva e accurata dello stato delle infrastrutture. Tecniche come la classificazione, la regressione e il clustering aiutano a distinguere tra condizioni normali e segnali critici, mentre i modelli temporali migliorano la pianificazione degli interventi futuri.

Tuttavia, l'adozione dell'IA non è priva di ostacoli: servono dati affidabili e completi per addestrare i modelli, risorse hardware e software adeguate, e personale con competenze specialistiche. Nonostante ciò, l'IA rappresenta oggi uno strumento indispensabile per una gestione più sicura, efficiente e sostenibile delle infrastrutture, contribuendo a prevenire i rischi e ottimizzare le risorse nel lungo termine.

4.2 Sensoristica IoT per l'acquisizione dati in tempo reale

La sensoristica basata sull'Internet of Things (IoT) rappresenta una delle tecnologie più innovative e promettenti per il monitoraggio in tempo reale delle infrastrutture civili. Grazie alla capacità di raccogliere, trasmettere ed elaborare dati in modo continuo e automatizzato, i sensori IoT consentono di ottenere informazioni dettagliate sullo stato delle strutture, migliorando l'efficienza e la tempestività degli interventi manutentivi. I sensori IoT possono monitorare molti parametri strutturali e ambientali. Su questa tematica sono stati scritti vari paper molto interessanti come quello di T. Jothi Saravanan e team in cui viene proposto un microcontrollore (NODE MCU ESP8266) e un accelerometro a 6 assi (MPU6050) che tracciano la frequenza in tempo reale della struttura in scala di laboratorio indirettamente tramite la misurazione della storia temporale delle accelerazioni, e i loro risultati vengono confrontati con gli accelerometri convenzionali di standard industriale.

Infatti, tornando a parlare di sensoristica IoT, giroscopi e accelerometri misurano le vibrazioni e i movimenti delle strutture, mentre sensori di deformazione, anche noti come Strain Gauges, registrano cambiamenti nelle tensioni interne dei materiali. Altri dispositivi, come sensori di temperatura e umidità, possono accelerare i processi di degrado monitorando le condizioni ambientali. Tutti questi sensori sono mostrati in Figura 4 (immagine generata con AI per puro scopo dimostrativo).

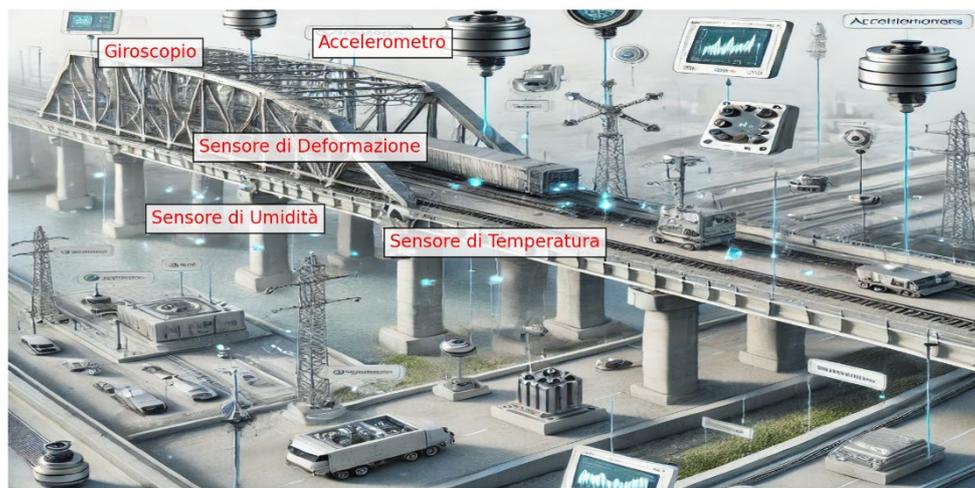


Fig.4: Esempio di posizionamento di sensori per il monitoraggio di infrastrutture

Inoltre, i sensori più avanzati, come i dispositivi basati su ultrasuoni o LIDAR (Fig.5), consentono analisi precise e non invasive per identificare difetti interni o nascosti. La capacità di trasmettere dati a piattaforme centralizzate in tempo reale è un componente essenziale dell'IoT.



Fig.5: Varie tipologie di sensori Lidar

4.3 Sistemi Cloud/Edge Computing per l'elaborazione distribuita dei dati

L'integrazione dei sistemi **Cloud** ed **Edge Computing** sta trasformando il modo in cui vengono gestiti e analizzati i dati nel monitoraggio delle infrastrutture civili. Queste tecnologie permettono di affrontare in modo più efficiente la crescente mole di informazioni generate da sensori IoT, droni e altri dispositivi intelligenti, offrendo soluzioni scalabili, rapide e affidabili per il controllo strutturale. Il **Cloud Computing** (Fig.6) fornisce una piattaforma centralizzata dove i dati raccolti vengono archiviati ed elaborati attraverso potenti algoritmi, spesso basati su Intelligenza Artificiale. Questo consente un'analisi approfondita e la generazione di modelli predittivi, ottimizzando i costi e la gestione delle risorse senza dover disporre di infrastrutture locali complesse. Parallelamente, il **calcolo Edge** (Fig.7) sposta parte dell'elaborazione direttamente vicino alla fonte del dato, cioè sul campo, tramite dispositivi intelligenti come gateway e microprocessori. Questo consente risposte immediate, riducendo la latenza e la necessità di trasmettere grandi volumi di dati al cloud, con vantaggi anche in termini di consumo energetico e costi di rete. Studi recenti evidenziano l'efficacia di **architetture ibride** che combinano entrambi gli approcci: l'Edge gestisce il pretrattamento e la selezione dei dati più rilevanti, mentre il Cloud esegue analisi avanzate e conserva lo storico. Questa sinergia è particolarmente utile per il monitoraggio distribuito su larga scala, come nel caso di reti di ponti e viadotti. Tuttavia, non mancano le sfide: la sicurezza informatica è un tema critico, vista l'integrazione tra dispositivi distribuiti e sistemi centralizzati. Inoltre, servono reti ad

alta affidabilità (come il 5G) e competenze tecniche avanzate per la gestione di queste architetture complesse.

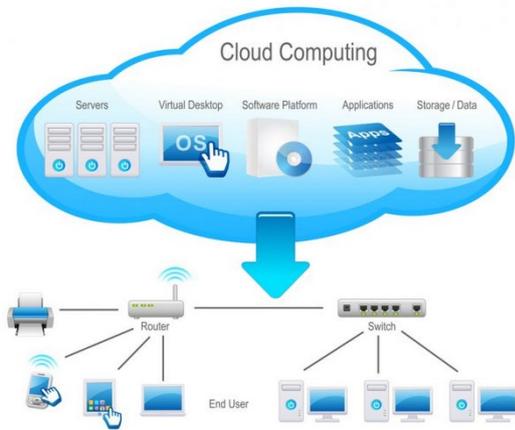


Fig.6: Cloud Computing

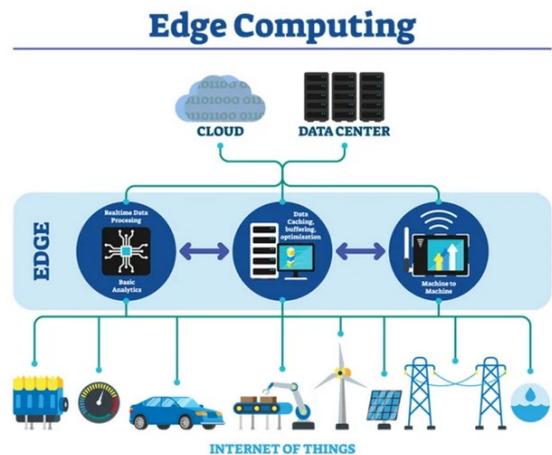


Fig.7: Edge Computing

In sintesi, Cloud ed Edge Computing rappresentano strumenti essenziali per la digitalizzazione intelligente delle infrastrutture. Offrono una gestione più reattiva, efficiente e sostenibile, e sono destinati a diventare un pilastro fondamentale nella manutenzione e nella sicurezza del patrimonio infrastrutturale moderno.

4.4 Integrazione delle tecnologie in piattaforme software avanzate

L'integrazione di tecnologie emergenti all'interno di **piattaforme software avanzate** sta rivoluzionando il monitoraggio e la gestione delle infrastrutture civili. Questi sistemi digitali permettono di raccogliere, elaborare e visualizzare in tempo reale una grande quantità di dati provenienti da sensori IoT, droni, telecamere e altri strumenti di rilevamento. Grazie a un'architettura scalabile e modulare, le piattaforme consentono l'interoperabilità tra dispositivi eterogenei attraverso protocolli standardizzati, facilitando l'unificazione dei dati e migliorando la qualità dell'analisi. Una delle caratteristiche più distintive di queste piattaforme è l'integrazione con l'Intelligenza Artificiale, che consente di rilevare anomalie, prevedere guasti e suggerire azioni manutentive tramite modelli predittivi basati su machine learning e deep learning. Queste capacità analitiche vengono ulteriormente potenziate da interfacce visive interattive, come dashboard dinamiche e modelli 3D, che offrono agli

operatori una rappresentazione chiara dello stato delle infrastrutture. Strumenti come il **Building Information Modeling (BIM)** e il **Digital Twin** permettono la creazione di repliche virtuali delle strutture, aggiornate in tempo reale con i dati raccolti sul campo. Questi modelli digitali supportano anche simulazioni di scenari critici, come terremoti o sollecitazioni da traffico intenso, aiutando nella pianificazione preventiva. A supporto della gestione del rischio, molte piattaforme integrano mappe dinamiche per individuare le aree più vulnerabili e ottimizzare gli interventi. Un altro punto di forza è la capacità di facilitare la collaborazione tra i diversi attori coinvolti nella manutenzione e gestione delle infrastrutture. L'accesso condiviso ai dati in tempo reale tramite portali multiutente consente una comunicazione più fluida tra tecnici, amministratori e responsabili, migliorando la coordinazione operativa e la rapidità d'intervento. Inoltre, grazie all'integrazione con sistemi GIS, è possibile associare i dati strutturali a informazioni geografiche, offrendo un supporto prezioso alla gestione su scala territoriale. Le piattaforme avanzate includono anche funzioni automatizzate di reportistica e allerta, che avvisano gli operatori in caso di condizioni critiche, riducendo i tempi di risposta e aumentando la sicurezza. Tuttavia, la loro implementazione presenta alcune sfide: i costi elevati legati alla gestione di grandi volumi di dati, la necessità di infrastrutture robuste e il rischio di attacchi informatici richiedono attenzione e competenze specifiche.

4.5 Sistemi per la manutenzione predittiva basati su analisi data-driven

L'introduzione dei sistemi di manutenzione predittiva basati su analisi data-driven rappresenta un cambiamento significativo nella gestione delle infrastrutture civili. Questo approccio innovativo sfrutta dati storici e in tempo reale, raccolti da sensori, droni e dispositivi IoT, per monitorare continuamente lo stato delle strutture e prevedere potenziali guasti. Attraverso l'uso di algoritmi di machine learning e intelligenza artificiale, è possibile individuare schemi e segnali precoci di deterioramento analizzando parametri come deformazioni, vibrazioni e variazioni di temperatura. A differenza delle tecniche tradizionali, la manutenzione predittiva non si basa su ispezioni periodiche o reazioni a guasti già avvenuti, ma consente di pianificare interventi mirati prima che le criticità diventino gravi. Questo approccio riduce i costi operativi, migliora la sicurezza pubblica e contribuisce a prolungare la vita utile delle infrastrutture. I dati raccolti vengono elaborati tramite piattaforme Cloud ed Edge Computing, che permettono la generazione automatica di avvisi e previsioni, riducendo i tempi di risposta e la necessità di ispezioni manuali frequenti. Un ulteriore passo avanti è rappresentato dall'integrazione con i modelli Digital Twin, repliche virtuali delle infrastrutture aggiornate in tempo reale. Questi modelli permettono di simulare

scenari e testare strategie manutentive in modo sicuro e predittivo, migliorando ulteriormente la precisione e la tempestività delle decisioni operative. Nonostante i numerosi vantaggi, l'adozione di questi sistemi presenta ancora alcune sfide, come la gestione di grandi volumi di dati e la necessità di garantirne la qualità e l'affidabilità. Tuttavia, ricerche recenti – come quella condotta da Shouyan Jiang e il suo team – dimostrano come l'uso combinato di modelli computazionali avanzati e reti neurali profonde consenta di rilevare difetti strutturali complessi con grande efficacia, aprendo nuove prospettive per il monitoraggio di infrastrutture su larga scala. In sintesi, la manutenzione predittiva data-driven rappresenta una soluzione sostenibile, intelligente e proattiva per la gestione delle infrastrutture civili. La sua diffusione su larga scala sarà fondamentale per garantire infrastrutture più sicure, resilienti e durature nel tempo.

5 Ispezioni Visive Automatizzate e loro potenziale impatto

5.1 Introduzione alle ispezioni visive automatizzate

Una delle innovazioni più importanti nel monitoraggio delle infrastrutture civili sono le ispezioni visive automatizzate, che superano i limiti delle tecniche tradizionali utilizzando tecnologie avanzate come la visione artificiale, i droni e i sistemi robotici. Questo metodo è progettato per aumentare la rapidità, l'accuratezza e la sicurezza delle operazioni di ispezione mentre riduce i costi e i rischi associati agli interventi manuali. Tradizionalmente, le ispezioni visive erano basate sull'osservazione diretta da parte di tecnici specializzati che trovavano crepe, corrosione o deformazioni visibili. Anche se questo metodo è stato essenziale per decenni, ha alcuni limiti. Questi includono la discrezionalità delle valutazioni, i problemi di accesso a particolari aree delle infrastrutture e i lunghi tempi richiesti per coprire grandi superfici. L'automazione delle ispezioni visive utilizza tecniche basate sulla visione artificiale e sull'Intelligenza Artificiale per analizzare immagini e video con maggiore velocità e precisione. I droni e i robot autonomi sono strumenti chiave in questo ambito. Dotati di fotocamere ad alta risoluzione e sensori avanzati, possono acquisire immagini dettagliate anche in aree difficili da raggiungere, come sottostrutture di ponti o altezze elevate. Questi dispositivi permettono di ridurre significativamente il rischio per il personale, eliminando la necessità di accessi fisici pericolosi. Inoltre, la capacità dei droni di coprire rapidamente vaste aree consente di completare ispezioni in tempi molto più brevi rispetto ai metodi tradizionali. La visione artificiale, potenziata dall'uso di

algoritmi di deep learning, gioca un ruolo cruciale nelle ispezioni visive automatizzate. Questi sistemi possono analizzare automaticamente le immagini raccolte per rilevare segni di degrado, come fessure o corrosione, e classificarli in base alla loro gravità. L'IA consente inoltre di creare un archivio storico delle condizioni delle infrastrutture, facilitando il monitoraggio dell'evoluzione del degrado nel tempo. Le ispezioni visive automatizzate presentano, però, alcune sfide nonostante i progressi. La qualità delle immagini e dei dati raccolti dipende dalle condizioni ambientali, come la luce e il meteo, e lavorare in ambienti difficili richiede strumenti affidabili. Inoltre, l'adozione di questi sistemi richiede investimenti iniziali significativi e competenze specializzate nella gestione e nell'analisi dei dati.

Per concludere, le ispezioni visive automatizzate sono un grande progresso nella gestione dell'infrastruttura civile. Migliorano la qualità e la tempestività delle ispezioni e garantiscono la sicurezza e la sostenibilità delle opere nel lungo termine utilizzando tecnologie e automazione avanzate

5.2 Tecnologie utilizzate per le ispezioni visive

Le ispezioni visive automatizzate utilizzano una serie di tecnologie sofisticate che sono state sviluppate per aumentare l'efficacia, la precisione e la sicurezza delle operazioni di monitoraggio. Per superare le limitazioni delle tecniche tradizionali, queste tecnologie possono essere utilizzate in sistemi innovativi per rilevare i segni di degrado strutturale con maggiore rapidità e accuratezza. I **droni autonomi** (Fig.8) dotati di sensori avanzati e fotocamere ad alta risoluzione sono tra le tecnologie più utilizzate. Queste macchine possono acquisire immagini approfondite di aree difficilmente accessibili, come le parti inferiori dei ponti o strutture a grandi altezze, senza mettere in pericolo il personale. I droni possono essere programmati per coprire tutte le superfici da ispezionare seguendo percorsi predefiniti.



Fig.8: Esempio di drone autonomo

La **visione artificiale** (Fig.9), potenziata dall'uso di algoritmi di deep learning, è un'altra tecnologia fondamentale. I sistemi di visione artificiale analizzano automaticamente le immagini raccolte per individuare segni di degrado come fessure, corrosione o deformazioni. Gli algoritmi di intelligenza artificiale sono in grado di classificare le anomalie in base alla loro gravità, riducendo i tempi di analisi e migliorando l'accuratezza delle valutazioni. Inoltre, la visione artificiale può essere integrata con sensori LIDAR per creare modelli tridimensionali dettagliati delle infrastrutture.



Fig.9: Esempio di visione artificiale

I **robot mobili** (Fig.10) rappresentano una soluzione complementare ai droni, in particolare per le ispezioni interne o in ambienti confinati. Questi robot possono muoversi autonomamente all'interno di gallerie, tubazioni o altre strutture chiuse, raccogliendo dati visivi e ambientali. Dotati di fotocamere, sensori termici e strumenti per la misurazione delle vibrazioni, i robot mobili offrono una valutazione completa dello stato delle infrastrutture in condizioni difficili.



Fig.10: Esempio di robot per ispezioni interne

Un'altra tecnologia chiave è l'**image stitching** (Fig.11), che consente di combinare le immagini acquisite dai dispositivi per creare mappe dettagliate e ad alta risoluzione delle superfici ispezionate. Queste mappe offrono agli operatori una visione globale dello stato della struttura, facilitando l'individuazione di aree critiche e la pianificazione degli interventi.



Fig.11: Esempio di image stitching

Altrettanto cruciale è l'uso di **piattaforme cloud** per l'archiviazione e l'elaborazione dei dati raccolti dalle tecnologie sopra descritte. Le immagini e i dati acquisiti vengono inviati a piattaforme centralizzate, dove possono essere analizzati utilizzando algoritmi avanzati. Questi sistemi consentono di condividere facilmente le informazioni tra diverse parti interessate, migliorando la collaborazione e la pianificazione delle attività manutentive.

Anche se ci sono molti vantaggi, l'utilizzo di queste tecnologie presenta alcune difficoltà. Mentre l'uso di droni e robot richiede competenze tecniche avanzate per la programmazione e la gestione, la qualità delle immagini può essere influenzata da fattori ambientali come la luce e il meteo. Inoltre, la raccolta e l'elaborazione di volumi significativi di dati richiede infrastrutture e soluzioni scalabili. In sintesi, le ispezioni visive automatizzate stanno rendendo le operazioni più sicure, rapide e accurate, rivoluzionando il monitoraggio infrastrutture. Con il continuo progresso tecnologico, queste soluzioni saranno sempre più accessibili e integrate, migliorando notevolmente la gestione delle infrastrutture civili.

5.3 Impatti e benefici delle ispezioni visive automatizzate

Le ispezioni visive automatizzate stanno rivoluzionando il monitoraggio delle infrastrutture civili, offrendo vantaggi concreti in termini di efficienza, sicurezza e

sostenibilità. Grazie all'uso di droni, robot e algoritmi di intelligenza artificiale, è possibile coprire vaste aree in tempi ridotti, riducendo le interruzioni e migliorando la precisione delle analisi. Questi sistemi automatizzati riescono a rilevare con maggiore accuratezza anomalie difficilmente visibili all'occhio umano, come microfessure o segni iniziali di corrosione, fornendo valutazioni più oggettive e affidabili per la pianificazione degli interventi. Allo stesso tempo, migliorano la sicurezza del personale tecnico, evitando l'esposizione a luoghi pericolosi o difficili da raggiungere. Dal punto di vista economico, nonostante i costi iniziali di implementazione, le ispezioni automatizzate consentono una notevole riduzione dei costi operativi a lungo termine, grazie a un uso più efficiente delle risorse e alla prevenzione dei guasti critici. Inoltre, favoriscono un passaggio verso la manutenzione predittiva, più sostenibile e meno dispendiosa della manutenzione reattiva. Anche l'ambiente trae beneficio: l'eliminazione dell'uso di mezzi pesanti riduce l'impatto ambientale e le emissioni. Infine, la disponibilità di dati aggiornati e dettagliati in tempo reale permette una gestione più informata e tempestiva, migliorando la sicurezza pubblica.

6 Innovazione Digitale nella Gestione dei Ponti

Nel contesto italiano, la gestione dei ponti si inserisce in uno scenario complesso e diversificato, caratterizzato da un'ampia rete di infrastrutture che comprende ponti storici, viadotti e strutture moderne, realizzate con tecniche e materiali differenti. Molti di questi manufatti risalgono a decenni fa e mostrano segni evidenti di invecchiamento strutturale, spesso accentuati dalla presenza di fattori di rischio ambientale come frane, terremoti o condizioni meteorologiche avverse. A partire da eventi critici come il crollo del Ponte Morandi, il dibattito sulla sicurezza delle infrastrutture è diventato centrale, spingendo verso l'adozione di protocolli normativi più rigorosi e lo sviluppo di metodi di monitoraggio più avanzati. In questo contesto, l'innovazione digitale ha assunto un ruolo determinante. L'integrazione di tecnologie come laser scanner, fotogrammetria, droni e modelli tridimensionali, consente una mappatura precisa delle strutture e un'acquisizione sistematica dei dati. Questo approccio, che prevede la combinazione di strumenti digitali e tecniche tradizionali, permette di superare i limiti delle sole ispezioni visive, offrendo una visione più completa dello stato di salute delle infrastrutture. La digitalizzazione delle infrastrutture non si limita alla raccolta dei dati, ma si estende alla loro gestione e analisi attraverso piattaforme integrate e tecnologie emergenti. L'impiego di sistemi come il **Digital Twin** e l'**Extended Reality (XR)** consente di creare repliche virtuali navigabili delle strutture, in cui convergono informazioni strutturali, geografiche, storiche e diagnostiche. Questo approccio permette una valutazione più approfondita e una collaborazione più efficace tra tecnici,

amministratori e decisori, agevolando interventi mirati e tempestivi. L'adozione di sistemi di **Structural Health Monitoring (SHM)** connessi all'Internet of Things ha introdotto il monitoraggio continuo, in tempo reale, grazie a sensori intelligenti e reti di comunicazione avanzate. L'uso di modelli **BIM** e **BrIM**, anche nella loro declinazione storica (HBrIM), permette inoltre di integrare dati parametrici, ambientali e territoriali per una gestione proattiva e sostenibile delle infrastrutture. L'integrazione di queste piattaforme con sistemi GIS e linguaggi di programmazione visuale (VPL) consente l'automazione di analisi complesse e l'ottimizzazione dei flussi di lavoro. Tutto ciò promuove un cambio di paradigma nella manutenzione, sempre più orientata alla previsione e prevenzione dei rischi, sostenuta dall'analisi avanzata dei dati tramite l'intelligenza artificiale. Questo approccio rappresenta una risposta concreta alle sfide della gestione infrastrutturale moderna, combinando tecnologia, sicurezza e sostenibilità in un'unica visione integrata.

7 Studio delle Forme di Alterazione e Degrado dei Ponti Esistenti

Lo studio delle forme di alterazione e degrado nelle infrastrutture esistenti, in particolare nei ponti, richiede un approccio integrato che unisca linguaggio tecnico, normativa specifica e metodologie avanzate. In Italia, questo tema è stato affrontato già a partire dagli anni '80 con l'introduzione delle norme NORMAL, promosse dal Consiglio Nazionale delle Ricerche e dall'Istituto Centrale per il Restauro. Le norme NORMAL 1/85 e 1/88, insieme alla più recente UNI 11182, hanno fornito le basi terminologiche per classificare in modo sistematico i fenomeni di alterazione e degrado dei materiali, sia naturali che artificiali. Secondo queste normative, si definisce *alterazione* una modifica del materiale che non compromette direttamente le sue caratteristiche di conservazione o strutturali, mentre il *degrado* è una modifica che comporta un effettivo deterioramento. Queste distinzioni risultano fondamentali per interpretare correttamente lo stato delle infrastrutture, che, nel contesto italiano, spaziano da ponti storici in muratura a strutture moderne in cemento armato, acciaio o legno. La complessità del patrimonio infrastrutturale italiano rende necessario un metodo rigoroso di classificazione e gestione dei fenomeni di degrado, soprattutto in aree soggette a rischi naturali come terremoti o frane.

Le **Linee Guida per la Classificazione del Rischio, la Valutazione della Sicurezza e il Monitoraggio dei Ponti Esistenti** (MIT, 2018; aggiornate nel 2020) rappresentano il principale riferimento normativo per affrontare questi temi. Il protocollo previsto è articolato in sei livelli, partendo dalla raccolta delle informazioni (Livello 0) fino ad arrivare alle analisi avanzate per ponti strategici (Livello 5), includendo ispezioni visive, valutazione del rischio, verifiche strutturali e monitoraggi. Un elemento chiave

è l'adozione delle **Schede di Difetto** (Livello 1), che permettono di catalogare in modo dettagliato i fenomeni di degrado osservati durante le ispezioni. Le schede sono suddivise per materiali – come acciaio, calcestruzzo armato e precompresso, muratura e legno – e includono anche difetti generici relativi a componenti come dispositivi d'appoggio, fondazioni, giunti e elementi accessori. Il Livello 2 introduce il concetto di **Classe di Attenzione (CdA)**, suddivisa in cinque livelli da "Alta" a "Bassa", utile per orientare le azioni da intraprendere: dalle ispezioni ordinarie fino alle analisi strutturali approfondite e agli interventi straordinari. Questo sistema consente di valutare l'evoluzione del degrado nel tempo e stabilire priorità d'intervento, promuovendo un approccio preventivo alla manutenzione. Il quadro normativo così strutturato mira a garantire una gestione uniforme, efficace e sostenibile del patrimonio infrastrutturale, assicurando la sicurezza e la durabilità delle opere nel lungo periodo.

8 Integrazione e Sviluppo del Modello Predittivo

8.1 Workflow per l'aggiornamento dei modelli HBIM con dati IA

Un processo innovativo e fondamentale per garantire una gestione dinamica e precisa delle infrastrutture storiche è l'aggiornamento dei modelli HBIM (Heritage Building Information Modeling) con dati ottenuti dall'Intelligenza Artificiale (IA). Questo processo di lavoro combina strumenti di modellazione digitale, analisi predittiva e acquisizione dati, fornendo una piattaforma completa per il monitoraggio e la manutenzione. Il processo inizia con l'acquisizione di dati sul campo utilizzando tecnologie avanzate come la fotogrammetria, i sensori IoT e i sistemi di scansione laser LIDAR. Le risorse forniscono informazioni dettagliate sulla geometria, i materiali e le condizioni infrastrutturali, fornendo una base solida per l'aggiornamento dei modelli HBIM. Gli algoritmi di intelligenza artificiale elaborano le immagini e i dati raccolti per trovare danni, anomalie o cambiamenti. In Figura 12 è rappresentato, in maniera molto semplice, il diagramma di flusso che sintetizza il processo di acquisizione e rilevamento possibili anomalie strutturali.

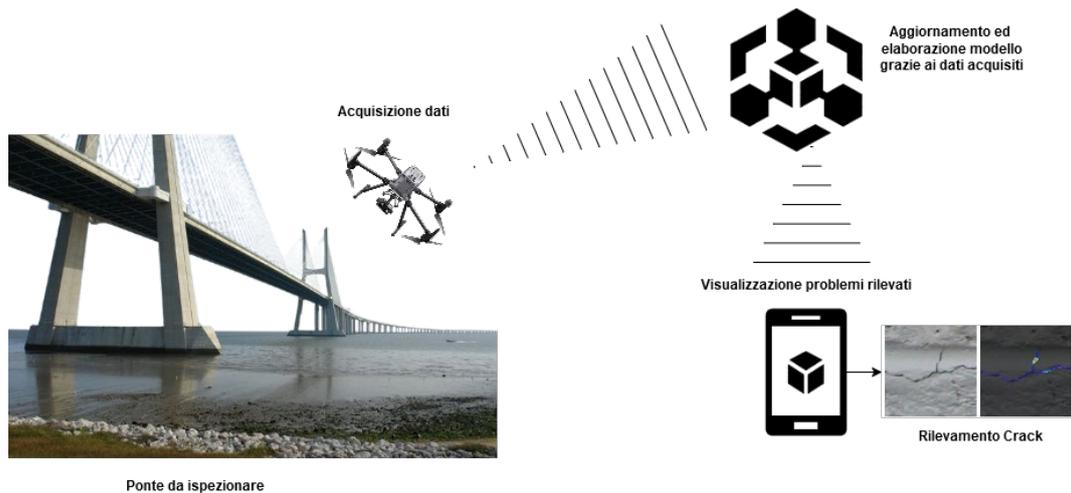


Fig.12: Diagramma di flusso per il rilevamento di anomalie strutturali

Un passaggio chiave del workflow è l'**elaborazione automatizzata dei dati**. Gli algoritmi di deep learning, addestrati su dataset storici e recenti, sono in grado di classificare i difetti rilevati (come fessure o corrosione) e di quantificarne la gravità. Le informazioni vengono successivamente tradotte in input per il modello HBIM, che viene aggiornato con nuovi dati relativi alle condizioni strutturali. Questo approccio elimina gran parte del lavoro manuale tradizionalmente necessario per mantenere aggiornati i modelli. Il passo successivo consiste nell'**integrazione dei dati analizzati nel modello HBIM**. Utilizzando piattaforme BIM avanzate, i dati possono essere incorporati direttamente nei modelli tridimensionali, arricchendoli con annotazioni specifiche e metadati. Ad esempio, una crepa rilevata su una parete può essere rappresentata visivamente nel modello, con dettagli su posizione, dimensioni e progressione temporale. Questa integrazione consente agli operatori di visualizzare le condizioni reali dell'infrastruttura in un ambiente digitale interattivo. L'analisi predittiva e la pianificazione degli interventi sono anche supportate dall'aggiornamento continuo dei modelli HBIM con dati IA. I modelli migliorati possono essere utilizzati per simulare scenari futuri e valutare l'efficacia di una varietà di strategie manutentive. Ad esempio, l'analisi basata sui dati storici può prevedere come si svilupperà un difetto e consentire la definizione di interventi tempestivi prima che il problema diventi significativo. Un fattore cruciale per un eccellente risultato è la collaborazione fra le parti. I tecnici, gli amministratori e i decisori possono condividere i modelli HBIM con dati IA aggiornati, favorendo un approccio coordinato alla gestione delle infrastrutture. L'accesso a modelli migliorati aumenta la comunicazione e facilita la presa di decisioni più consapevoli. Il workflow ha molti vantaggi, ma ha anche alcune sfide. Mentre l'implementazione di algoritmi di intelligenza artificiale (IA) richiede dataset di alta qualità per garantire risultati accurati, l'elaborazione dei dati richiede competenze

tecniche avanzate e infrastrutture tecnologiche robuste. Inoltre, l'integrazione tra piattaforme HBIM e strumenti di acquisizione dati può essere difficile e richiede standardizzazione e interoperabilità.

Per riassumere, il processo di aggiornamento dei modelli HBIM con dati IA è un passo importante verso una gestione delle infrastrutture storiche, dinamico e sostenibile. Questo metodo consente di mantenere i modelli sempre aggiornati, migliorando il monitoraggio, la manutenzione e la conservazione a lungo termine, combinando tecnologie avanzate e analisi intelligenti.

8.2 Dimostratore di ricerca: applicazioni pratiche

Un dimostratore di ricerca rappresenta una piattaforma o un prototipo sviluppato per testare e validare tecnologie innovative in contesti reali o simulati. Nel campo del monitoraggio delle infrastrutture, i dimostratori di ricerca svolgono un ruolo cruciale, traducendo i risultati della ricerca teorica in applicazioni pratiche che possono essere adottate su larga scala. Questi strumenti permettono di dimostrare l'efficacia di nuovi approcci, ottimizzare le metodologie e individuare eventuali criticità prima dell'implementazione definitiva. Un esempio comune di dimostratore di ricerca è l'integrazione di modelli HBIM con tecnologie di monitoraggio avanzate come i sensori IoT e gli algoritmi di intelligenza artificiale. Un dimostratore analizza l'impatto di diverse strategie per simulare scenari di degrado e intervento manutentivo su infrastrutture esistenti o virtuali. Ad esempio, è possibile aggiungere dati in tempo reale da accelerometri o sensori di deformazione a un modello HBIM di un ponte storico per osservare il comportamento della struttura sotto carichi dinamici. I dimostratori di ricerca possono testare algoritmi di previsione del degrado basati sull'analisi dei dati. È possibile addestrare e validare modelli di apprendimento automatico per trovare segnali precoci di deterioramento utilizzando dataset raccolti da infrastrutture monitorate. Prima della loro implementazione operativa, questi dimostratori possono valutare l'affidabilità degli algoritmi in contesti complessi e migliorarne l'efficacia. Un altro campo di applicazione sono i sistemi di ispezione visiva automatizzata. Per simulare l'acquisizione di immagini in un ambiente reale, i dimostratori possono utilizzare droni dotati di fotocamere ad alta risoluzione e sensori termici. Gli algoritmi di visione artificiale analizzano quindi le immagini raccolte per trovare fessure, corrosione o deformazioni. L'intero flusso di lavoro, dall'acquisizione dei dati all'elaborazione e alla visualizzazione nei modelli digitali, può essere testato con il dimostratore. I dimostratori di ricerca trovano applicazione anche nella formazione e nella collaborazione. Piattaforme simulate consentono ai tecnici e agli operatori di acquisire competenze pratiche utilizzando tecnologie avanzate, migliorando la loro capacità di affrontare situazioni reali. Inoltre, i dimostratori favoriscono la

collaborazione tra enti di ricerca, amministrazioni pubbliche e aziende private, creando un terreno comune per lo sviluppo e l'implementazione delle innovazioni. Nonostante i vantaggi, l'implementazione di dimostratori di ricerca presenta alcune sfide. La creazione di ambienti realistici richiede investimenti significativi in tecnologie e infrastrutture. Inoltre, è fondamentale garantire la qualità dei dati utilizzati nei test e l'interoperabilità tra i diversi sistemi.

In sintesi, i dimostratori di ricerca rappresentano un ponte tra innovazione e applicazione pratica, fornendo un quadro per testare, validare e ottimizzare le tecnologie prima della loro adozione su larga scala. Questi strumenti accelerano la transizione dalla ricerca alla pratica, migliorando la sostenibilità, la sicurezza e l'efficienza nella gestione delle infrastrutture civili.

8.3 Verso un modello predittivo integrato per il monitoraggio

Un obiettivo ambizioso ma essenziale per garantire una gestione proattiva e sostenibile delle opere civili è la creazione di un modello predittivo integrato per il monitoraggio delle infrastrutture. Questo metodo utilizza tecnologie avanzate come l'Intelligenza Artificiale, i sensori IoT e modelli digitali per fornire previsioni accurate sullo stato di salute delle strutture e sugli interventi necessari. Un modello predittivo integrato può trovare segnali precoci di degrado o anomalie strutturali utilizzando dati storici, rilevazioni in tempo reale e analisi avanzate. Il sistema può utilizzare algoritmi di machine learning e analisi data-driven per analizzare enormi quantità di dati da fonti come sensori di vibrazioni, deformazioni e variazioni termiche. Queste informazioni vengono utilizzate per sviluppare modelli fisici o statistici che stimano come le condizioni strutturali si sono evolute nel tempo. I modelli digitali tridimensionali, come i Digital Twin o i modelli HBIM, elaborano e sincronizzano i dati raccolti dai sensori IoT in tempo reale. Queste risorse facilitano l'interpretazione dei risultati e la pianificazione delle azioni, consentendo una rappresentazione visiva e interattiva delle infrastrutture. Ad esempio, un Digital Twin di un ponte può aggiornare le previsioni utilizzando le nuove rilevazioni per mostrare i carichi dinamici e le aree più a rischio in tempo reale. Il supporto alla manutenzione predittiva è uno dei principali vantaggi del modello predittivo integrato. Il sistema utilizza le previsioni per pianificare interventi mirati, riducendo i costi operativi e migliorando l'efficienza, invece di basarsi su ispezioni periodiche o interventi reattivi. I modelli predittivi possono anche essere utilizzati per simulare scenari futuri e valutare l'impatto di eventi eccezionali come terremoti o alluvioni per creare strategie preventive. Inoltre, il modello predittivo integrato stimola la collaborazione tra le varie parti interessate, che includono amministratori, tecnici e decisori. Tutte le parti interessate possono collaborare per prendere decisioni basate su informazioni affidabili grazie all'accesso a dati aggiornati

e modelli dinamici. Grazie a questa collaborazione, la gestione complessiva delle infrastrutture diventa più trasparente e reattiva. Tuttavia, ci sono alcune difficoltà nella creazione di un modello predittivo integrato. Sebbene la qualità dei dati sia essenziale per garantire previsioni accurate, le infrastrutture esistenti spesso mancano di sistemi di monitoraggio adeguati. Inoltre, l'implementazione richiede investimenti significativi in tecnologie, infrastrutture Cloud ed Edge computing e formazione del personale per gestire e interpretare i risultati.

9 Conclusioni

L'adozione di tecnologie avanzate e di approcci data-driven rappresenta un passaggio fondamentale per il futuro della gestione delle infrastrutture civili. I benefici attesi da queste innovazioni si riflettono principalmente in tre ambiti interconnessi: **sicurezza**, **sostenibilità** e **ottimizzazione**. La possibilità di monitorare in tempo reale le condizioni strutturali grazie a sensori IoT, modelli digitali e intelligenza artificiale consente di rilevare precocemente anomalie o segnali di degrado, prevenendo guasti improvvisi e migliorando la sicurezza pubblica. Allo stesso tempo, la manutenzione predittiva riduce sprechi di risorse e interventi inutili, rendendo la gestione delle infrastrutture più sostenibile. L'integrazione di piattaforme digitali e sistemi collaborativi migliora la gestione dei dati, facilita le decisioni e ottimizza tempi, costi e risorse umane.

Guardando al futuro, il potenziale di sviluppo è enorme. Tecnologie come i **Digital Twin**, combinati con algoritmi sempre più sofisticati, permetteranno di simulare scenari complessi e valutare l'impatto di eventi straordinari con maggiore accuratezza. La diffusione del **5G**, l'uso crescente di **robotica autonoma** e **droni intelligenti**, così come il perfezionamento dell'**intelligenza artificiale**, offriranno strumenti sempre più precisi e rapidi per il monitoraggio. Anche l'efficienza energetica e l'adozione di fonti rinnovabili diventeranno aspetti chiave, integrabili nei sistemi di gestione infrastrutturale. Inoltre, le piattaforme collaborative basate su cloud favoriranno la condivisione dei dati tra istituzioni, enti pubblici e privati, accelerando l'innovazione e migliorando la trasparenza dei processi.

L'impatto di questo cambiamento si riflette anche a livello territoriale. Una gestione più efficace delle infrastrutture contribuisce a migliorare la **resilienza ai cambiamenti climatici**, ridurre i rischi legati a eventi estremi e garantire continuità ai servizi essenziali, incidendo positivamente sulla qualità della vita delle persone. Le infrastrutture monitorate in modo efficiente rendono la mobilità più fluida, riducono i disagi per i cittadini e sostengono lo sviluppo di aree urbane e rurali. Dal punto di vista

gestionale, l'utilizzo di strumenti digitali consente un maggiore controllo, una migliore pianificazione delle risorse e una riduzione dei costi di manutenzione. Questo approccio favorisce una gestione più sostenibile anche dal punto di vista economico, oltre a stimolare la nascita di nuove competenze professionali legate all'utilizzo delle tecnologie emergenti.

In definitiva, l'innovazione tecnologica applicata al monitoraggio e alla manutenzione delle infrastrutture civili ha un impatto positivo su più livelli: operativo, territoriale, economico e sociale. Promuove un sistema infrastrutturale più sicuro, intelligente e connesso, in grado di affrontare le sfide del futuro con una visione sostenibile, resiliente e orientata al benessere collettivo.

Bibliografia

- ❖ Shamila Ebenezer, S. Deepa Kanmani , V. Sheela , K. Ramalakshmi , V. Chandran , M. G. Sumithra , B. Elakkiya , and Bharani Murugesan. Identification of Civil Infrastructure Damage Using Ensemble Transfer Learning Model. *Hindawi Advances in Civil Engineering*. Volume 2021, Article ID 5589688, 13 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/5589688>

- ❖ Martin Mundt, Sagnik Majumder, Sreenivas Murali, Panagiotis Panetsos, Visvanathan Ramesh. Goethe University. Egnatia Odos A. E. Meta-learning Convolutional Neural Architectures for Multi-target Concrete Defect Classification with the CONcrete DEfect BRidge IMage Dataset. arXiv:1904.08486v1 [cs.CV] 2 Apr 2019

- ❖ Qianyun Zhang, Kaveh Barri, Saeed K. Babanajad, Amir H. Alavi. Real-Time Detection of Cracks on Concrete Bridge Decks Using Deep Learning in the Frequency Domain. *Research Civil Engineering—Article*. Available online on 19 November 2020. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

- ❖ John Leander a, Jacob Nyman b, Raid Karoumi a, Peter Rosengren b, Gunnar Johansson. Dataset for damage detection retrieved from a monitored bridge pre and post verified damage. Available online 26 October 2023. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/dib

- ❖ Kaifeng Ma, Xiang Meng, Mengshu Hao, Guiping Huang, Qingfeng Hu, Peipei He. Research on the Efficiency of Bridge Crack Detection by Coupling Deep Learning Frameworks with Convolutional Neural Networks. *Detection by Coupling Deep Learning Frameworks with Convolutional Neural Networks*. *Sensors* 2023, 23, 7272. <https://doi.org/10.3390/s23167272>

- ❖ Qianjiang Hu, Zhimin Zhang, Wei Hu. RangeLDM: Fast Realistic LiDAR Point Cloud Generation. Wangxuan Institute of Computer Technology, Peking University, Beijing, China. arXiv:2403.10094v2 [cs.CV] 10 Sep 2024

- ❖ Andres Acero Molina, Yilei Huang, Zhen Zhu, Mostafa Namian. Comparing the Accuracy between UAS Photogrammetry and LiDAR in Bridge Inspections. *Construction Research Congress* 2024. <https://doi.org/10.1061/9780784485262.024>

- ❖ Anna M. Rakoczy, Diogo Ribeiro, Vedhus Hoskere, Yasutaka Narazaki, Piotr Olaszek, Wojciech Karwowski, Rafael Cabral, Yanlin Guo, Marcos Massao Futai, Pietro Milillo, Ricardo Santos, Adriana Trias, José Campos Matos, Franziska Schmidt. Technologies and Platforms for Remote and Autonomous Bridge Inspection – Review. *Journal Structural Engineering International*, 2024. <https://doi.org/10.1080/10168664.2024.2368220>

- ❖ Ben Bartlett; Matheus Santos; Marco Moreno; Sagar Dalai; Cillian Fahy; Alexander Dow. Cooperative Robotic Path Planning for Comprehensive Bridge Inspection with LiDAR Technology: Navigating Unknown Structures. *OCEANS 2024-Singapore*, pag. 1-7. IEEE, 2024.

- ❖ Alberto Armijo, Diego Zamora-Sánchez. Integration of Railway Bridge Structural Health Monitoring into the Internet of Things with a Digital Twin: A Case Study. Academic Editor: Jiawei Xiang. *Sensors* 2024, 24, 2115. <https://doi.org/10.3390/s24072115>

- ❖ T. Jothi Saravanan, Mayank Mishra, Abhishek Dilip Aherwar, Paulo B. Lourenço. Internet of things (IoT)-based structural health monitoring of laboratory-scale civil engineering structures. *Innovative Infrastructure Solutions* (2024) 9:110. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01413-9>

- ❖ Azad, Muhammad Muzammil and Kim, Sungjun and Cheon, Yu Bin and Kim, Heung Soo. Intelligent structural health monitoring of composite structures using machine learning, deep learning, and transfer learning: a review. *Journal: Advanced Composite Materials*, 2024. <https://doi.org/10.1080/09243046.2023.2215474>

- ❖ P. Sunil, P. Chandu, D. Vivek, A. Santosh Karthik, Ch. Pavan Kumar, P N E Naveen. A Review: Non - Destructive Testing (NDT) Techniques, Applications and FutureProspects. *Journal of Science and Technology*. ISSN: 2456-5660 :: Volume: 09, Issue No: 01, January 2024

- ❖ Ottosen, Lisbeth M and Kunther, Wolfgang and Ingeman-Nielsen, Thomas and Karatosun, Serkan. Non-Destructive Testing for Documenting Properties of Structural Concrete for Reuse in New Buildings: A Review. Published: 2 August 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17153814>

- ❖ Xiaonan Lai, Ziyun Kan, Wei Sun, Xueguan Song, Baomin Tian & Tengfei Yuan. Digital twin-based non-destructive testing for structural health monitoring of bridges. Published online: 26 Jul 2023. <https://doi.org/10.1080/10589759.2023.2239434>

- ❖ Xueliang Rong, Anqiao Xie, Pin Zhao, Sui Wang⁴, Xinxin Wei. Damage Detection and Evaluation of Stud Connectors for Composite Girder Bridge Using Acoustic Emission. American Society of Civil Engineers, January 5, 2024. DOI: 10.1061/JBENF2.BEENG-6559

- ❖ Lara Guizi Anoni, Vladimir Guilherme Haach, Lev Khazanovich. Image reconstruction in concrete ultrasound tomography: A systematic review. Construction and Building Materials, Volume 441, 30 August 2024, 137472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137472>

- ❖ Paola Boldrin, Giacomo Fornasari, Enzo Rizzo. Review of Ground Penetrating Radar Applications for Bridge Infrastructures. 21 March 2024. NDT 2024, 2, 53–75. <https://doi.org/10.3390/ndt2010004>

- ❖ Chenglong Liu, Yuchuan Du, Guanghua Yue, Yishun Li, Difei Wu, Feng Li. Advances in automatic identification of road subsurface distress using ground penetrating radar: State of the art and future trends. Automation in Construction, Volume 158, February 2024, 105185. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105185>

- ❖ Hongshuo Sun, Li Song, Zhiwu Yu. Bridge damage localization and quantification using deep learning and FEM static simulation. Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 211, 1 April 2024, 111177. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.111177>

- ❖ Shuai Huang, Chuanzheng Liu. Dynamic behavior analysis of bridge pier under impact of dam-break flood in different directions. Natural Hazards (2024) 120:2705–2730. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06301-6>

- ❖ Olia Kanevskaia. International Organization for Standardization (ISO). Chapter of book, 28 Jul 2024. <https://doi.org/10.4337/9781800882324.iso.fs>

- ❖ Aulia Chanief Rahita , Ahmad Zaki, Guntur Nugroho, Seplika Yadi. Internet of Things (IoT) in Structural Health Monitoring: A Decade of Research Trends. *Instrumentation Mesure Métrologie* Vol. 23, No. 2, April, 2024, pp. 123-139. <https://doi.org/10.18280/i2m.230205>

- ❖ Shiji Zhou, Jun Sun, Kangming Xu, Gaike Wang. AI-Driven Data Processing and Decision Optimization in IoT through Edge Computing and Cloud Architecture. *Journal of AI-Powered Medical Innovations*. ISSN: 3078-1930 DOI: 10.60087, 2024, Vol. 2, No. 1, pp. 64–92. DOI: <https://doi.org/10.60087/vol2iissue1.p006>

- ❖ Yi Tan, Wen Yi, Penglu Chen, Yang Zou. An adaptive crack inspection method for building surface based on BIM, UAV and edge computing. *Automation in Construction*, Volume 157, January 2024, 105161. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105161>

- ❖ Daniel Alfonso Verde Romero, Efrain Villalvazo Laureano, Ramón Octavio Jiménez Betancourt, Ernesto Navarro Álvarez. An open source IoT edge-computing system for monitoring energy consumption in buildings. *Results in Engineering*, Volume 21, March 2024, 101875. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101875>

- ❖ Mohammed Alhammad, Matt Eames, Raffaele Vinai. Enhancing Building Energy Efficiency through Building Information Modeling (BIM) and Building Energy Modeling (BEM) Integration: A Systematic Review. *Buildings* 2024, 14(3), 581. <https://doi.org/10.3390/buildings14030581>

- ❖ Abdullah Mohammed Alshehri, Fadia Al Hajj, Ahsan Waqar, Abdulrahman S. Bageis, Moustafa Houda, Omrane Benjeddou. Building information modeling (BIM) driven performance-based construction for the optimization of sustainable and smart structures development. *Environmental Challenges*, Volume 16, August 2024, 100980. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100980>

- ❖ Shouyan Jiang, Wangtao Deng, Ean Tat Ooi, Liguo Sun, Chengbin Du. Data-driven algorithm based on the scaled boundary finite element method and deep learning for the identification of multiple cracks in massive structures.

Computers & Structures, Volume 291, 15 January 2024, 107211.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107211>

- ❖ Avendaño Juan Camilo. Detection and quantification of cracks in concrete bridges using drone-image inspection. Presentation 2024-06-14. ORCID iD: 0009-0003-2220-2770
- ❖ Szu-Pyng Kao, Jhih-Sian Lin, Feng-Liang Wang, Pen-Shan Hung. A Large-Crack Image-Stitching Method with Cracks as the Regions of Interest. *Infrastructures* 2024, 9(4), 74. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9040074>
- ❖ Kewei Hu, Zheng Chen, Hanwen Kang, Yunchao Tang. 3D vision technologies for a self-developed structural external crack damage recognition robot. *Automation in Construction*, Volume 159, March 2024, 105262. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105262>
- ❖ P. Pfändler, K. Bodie, G. Crotta, M. Pantic, R. Siegwart, U. Angst. Non-destructive corrosion inspection of reinforced concrete structures using an autonomous flying robot. *Automation in Construction*, Volume 158, February 2024, 105241. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105241>