SISTEMI CIBER-FISICI PER LA PROTESICA ORTOPEDICA INTELLIGENTE

VERSO LA MANUTENZIONE PREDITTIVA IN PROTESI DI ANCA, SPALLA E GINOCCHIO

TRAMITE SENSORI FBG, DIGITAL TWIN E INTELLIGENZA ARTIFICIALE

SENSORI FBG



- Misurazione in tempo reale di deformazioni, temperature e vibrazioni
- Alta sensibilità e precisione
- Miniaturizzati, biocompatibili e a basso consumo
- Monitoraggio continuo 24/7



DIGITAL TWIN



- Modelli multifisici termomeccanici
- Simulazione continua della protesi
- Aggiornamento in tempo reale con i dati dei sensori
- Individuazione delle aree a rischio di usura

SICUREZZA

Monitoraggio continuo dello stato delle protesi

PREVISIONE

Algoritmi di IA predicono il degrado con anticipo

PERSONALIZZAZIONE

Riabilitazione e terapie su misura per ogni paziente

SOSTENIBILITÀ

Meno revisioni chirurgiche, meno costi, più qualità di vita



INTELLIGENZA ARTIFICIALE

- Algoritmi avanzati di Machine Learning
- Predizione del degrado con accuratezza > 80%
- Anticipazione fino a 50.000 cicli articolari
- Allarmi intelligenti e raccomandazioni cliniche

ANCA



- Sensori FBG
- Digital Twin
- IA Predittiva

SPALLA



- Sensori FBG
- Digital Twin
- IA Predittiva

GINOCCHIO



- Sensori FBG
- Digital Twin
- IA Predittiva

L'ARCHITETTURA DEL SISTEMA INTELLIGENTE



SENSORI FBG
Raccolgono dati in tempo reale

→

INTERFACCIA OTTICO-ELETTRONICA
Elabora i segnali

→

DIGITAL TWIN
Replica virtuale della protesi

→

ALGORITMI DI IA
Analizzano e prevedono il degrado

→

INTERFACCIA CLINICA
Supporto decisionale per il medico

TECNOLOGIA, INGEGNERIA E INTELLIGENZA AL SERVIZIO DELLA VITA

MIGLIORA LA VITA DEL PAZIENTE | PREVIENE LE COMPLICANZE | RIDUCE I COSTI E LE REVISIONI | DATI, CONOSCENZA, DECISIONI MIGLIORI | IL FUTURO È OGGI

DALLA RICERCA ALLA PRATICA, PER COSTRUIRE INSIEME
LA PROTESICA DEL FUTURO.

Sistemi Ciber-Fisici per la Protesica Ortopedica Intelligente

Verso la Manutenzione Predittiva in Protesi di Anca, Spalla e Ginocchio tramite Sensori FBG, Digital Twin e Intelligenza Artificiale

Aurora Ammoscato – Diego Dell'Erba

Abstract

Questo studio si colloca nell'ambito dell'innovazione biomedica, con un focus particolare sulla chirurgia protesica ortopedica, dove si intende superare il modello tradizionale di intervento reattivo.

L'obiettivo principale è quello di adottare un paradigma predittivo e personalizzato, in grado di migliorare il monitoraggio e la gestione delle protesi articolari.

La ricerca propone lo sviluppo di una piattaforma intelligente, progettata per il monitoraggio in tempo reale delle protesi di anca, spalla e ginocchio, che si avvale di sensori a fibra ottica di tipo FBG, modelli Digital Twin multifisici e algoritmi di intelligenza artificiale.

Questo sistema innovativo permette di prevedere il degrado biomeccanico degli impianti con un'accuratezza che supera l'80%, fornendo previsioni fino a 50.000 cicli articolari in anticipo.

La co-simulazione dinamica, l'adattamento ai dati sensoriali in tempo reale e le interfacce cliniche intelligenti rappresentano le fondamenta per una nuova era di manutenzione predittiva e riabilitazione personalizzata, con potenziali benefici significativi per la qualità della vita dei pazienti.

1. Introduzione e Obiettivi

L'invecchiamento della popolazione mondiale, unito all'aumento della prevalenza di patologie articolari e alle revisioni chirurgiche necessarie, impone una trasformazione radicale nella gestione e nel monitoraggio degli impianti ortopedici. Secondo le statistiche, il numero di interventi chirurgici ortopedici è in costante aumento, e con esso la necessità di approcci innovativi per garantire il successo a lungo termine degli impianti.

Tradizionalmente, gli interventi chirurgici si sono basati su un modello reattivo, in cui le problematiche venivano affrontate solo al manifestarsi dei sintomi. Questa ricerca si propone di sviluppare un sistema integrato, intelligente e miniaturizzato, capace di monitorare e prevedere l'usura delle protesi.

L'obiettivo finale è ottimizzare gli interventi chirurgici, migliorare i processi di riabilitazione e garantire una maggiore sicurezza per i pazienti, riducendo il rischio di complicazioni e migliorando la loro qualità di vita. Attraverso questo progetto, intendiamo non solo migliorare i risultati clinici, ma anche ridurre i costi associati alle revisioni chirurgiche e aumentare la soddisfazione del paziente.

2. Metodologia Tecnologica

2.1 Sensori a Fibre Ottiche FBG

I sensori FBG, acronimo di Fiber Bragg Grating, rappresentano una tecnologia avanzata che sfrutta la riflessione selettiva di lunghezze d'onda specifiche, correlate a deformazioni meccaniche e variazioni di temperatura. Questi sensori sono stati strategicamente collocati in aree critiche delle protesi, utilizzando cablaggi miniaturizzati e a basso consumo energetico, garantendo così una compatibilità con i sistemi indossabili. La loro capacità di monitorare continuamente le condizioni meccaniche e ambientali delle protesi rappresenta un passo fondamentale verso una gestione proattiva delle stesse. Inoltre, i sensori FBG offrono un'elevata sensibilità e precisione, permettendo una rilevazione tempestiva di variazioni che potrebbero indicare un degrado imminente dell'impianto.

2.2 Digital Twin Multifisico

Il Digital Twin è stato realizzato attraverso l'applicazione di software di analisi agli elementi finiti (FEM) accoppiato a modelli termomeccanici. Questa tecnologia consente la simulazione continua della risposta delle protesi in scenari fisiologici reali, come la camminata, la salita delle scale e la corsa. Inoltre, il Digital Twin si aggiorna in tempo reale grazie ai dati forniti dai sensori FBG, permettendo un'identificazione automatica delle aree più soggette a fatica e, di conseguenza, alla potenziale usura. Questo approccio consente una previsione più accurata delle problematiche che potrebbero insorgere, e la possibilità di intervenire prima che si verifichino danni irreversibili. Grazie alla simulazione continua, i clinici possono visualizzare le performance delle protesi in tempo reale, facilitando decisioni informate riguardo alla gestione del paziente.

2.3 Intelligenza Artificiale

Per quanto riguarda l'intelligenza artificiale, sono stati sviluppati tre modelli specifici per le diverse articolazioni:

- Un modello basato su RNN (Reti Neurali Ricorrenti) dedicato alla previsione delle serie temporali per il ginocchio, in grado di analizzare e prevedere l'andamento dell'usura.

- Un modello di regressione bayesiana per l'anca, capace di calcolare la probabilità di degradazione in base ai dati raccolti.

- Un modello ibrido che combina CNN (Reti Neurali Convoluzionali) e RNN per la spalla, in grado di identificare pattern spaziali e dinamici. L'output di questi modelli include grafici predittivi e avvisi clinici presentati in un formato semaforico, facilitando l'interpretazione da parte degli operatori sanitari. Questi modelli non solo forniscono previsioni, ma apprendono anche dai dati in tempo reale, migliorando continuamente la loro accuratezza e adattabilità

3. Validazione Sperimentale: Di seguito sono riportati i risultati relativi all'accuratezza dei modelli e ai tempi di anticipazione della previsione per ciascuna articolazione:

Articolazione	Accuratezza Modello	Anticipo Previsione
Anca	87%	~50.000 cicli
Ginocchio	82%	~30.000 cicli
Spalla	79%	~18.000 cicli

I prototipi sono stati testati in laboratorio su banchi dinamici, simulando cicli articolari realistici. I modelli hanno dimostrato buone capacità di previsione precoce delle anomalie, con margini di errore significativamente contenuti e una risposta tempestiva alle variazioni nei dati. I risultati ottenuti confermano l'efficacia della piattaforma proposta, evidenziando il potenziale per un’applicazione clinica reale.

4. Implicazioni Cliniche e Industriali

Il passaggio da un approccio di manutenzione reattivo a uno predittivo ha il potenziale di trasformare radicalmente la gestione clinica, rendendola più sicura, sostenibile e altamente personalizzata.

Questo cambiamento non solo migliora la qualità dell'assistenza ai pazienti, ma apre anche nuove opportunità nel settore industriale. Infatti, l'innovazione proposta apre la strada alla produzione di dispositivi medici intelligenti e interoperabili, che possono aumentare il ciclo di vita degli impianti e contribuire a una significativa riduzione dei costi sanitari legati alle operazioni di revisione, rendendo il sistema sanitario più efficiente. Inoltre, la possibilità di monitoraggio continuo delle protesi consente ai medici di fornire un'assistenza più proattiva e reattiva, migliorando la soddisfazione del paziente e riducendo il numero di interventi chirurgici non necessari.

5. Considerazioni Etiche e Normative

Sebbene i vantaggi della tecnologia proposta siano significativi, è fondamentale considerare anche le implicazioni etiche e normative.

La gestione dei dati sensibili dei pazienti richiede rigorose misure di sicurezza e conformità alle normative sulla privacy, come il GDPR in Europa.

È essenziale garantire che i pazienti siano informati e diano il consenso all'uso dei loro dati per il monitoraggio e l'analisi. Inoltre, è necessario un dialogo continuo con enti regolatori e organismi di certificazione per garantire che le tecnologie sviluppate soddisfino gli standard di sicurezza e qualità richiesti nel settore sanitario.

L'implementazione di tecnologie **ciber-fisiche nella salute pubblica** presenta diverse sfide significative che devono essere affrontate per garantire un'integrazione efficace e sicura. Ecco alcune delle principali difficoltà:

1. Sicurezza dei Dati : Uno dei principali problemi riguarda la protezione dei dati sensibili dei pazienti. Le tecnologie ciber-fisiche, che raccolgono e analizzano enormi quantità di dati, devono essere progettate con robusti protocolli di sicurezza per prevenire accessi non autorizzati e attacchi informatici. La violazione dei dati può compromettere la privacy dei pazienti e minare la fiducia nel sistema sanitario.

2. Interoperabilità; Le tecnologie ciber-fisiche devono essere in grado di comunicare efficacemente tra loro e con i sistemi esistenti. Tuttavia, la mancanza di standard comuni e protocolli di interoperabilità può ostacolare l'integrazione. È essenziale sviluppare soluzioni

che possano funzionare in modo sinergico all'interno di un'infrastruttura sanitaria complessa.

3. Regolamentazione e Normative: L'introduzione di nuove tecnologie nella salute pubblica deve rispettare normative rigorose. Gli enti regolatori devono garantire che le tecnologie siano sicure ed efficaci, ma il processo di approvazione può essere lungo e complesso. È fondamentale lavorare a stretto contatto con le autorità per garantire che le innovazioni siano conformi agli standard richiesti.

L'adozione di nuove tecnologie da parte degli operatori sanitari e dei pazienti può incontrare resisten

4. Accettazione e Formazione: È essenziale fornire formazione adeguata e sensibilizzare gli utenti sui benefici delle tecnologie ciber-fisiche. La mancanza di competenze digitali tra il personale sanitario può rappresentare un ostacolo significativo. L'integrazione di tecnologie avanzate richiede investimenti significativi in infrastruttura,

5. Costi di Implementazione: formazione e manutenzione. Le organizzazioni sanitarie devono valutare i costi a lungo termine e il ritorno sugli investimenti, bilanciando le necessità finanziarie con il desiderio di migliorare la qualità dell'assistenza.

6. Gestione della Complessità: Le tecnologie ciber-fisiche possono aumentare la complessità dei sistemi sanitari. Coordinare diversi dispositivi, piattaforme e flussi di dati richiede una pianificazione attenta e una gestione efficace. È fondamentale sviluppare strategie per semplificare l'integrazione e garantire un flusso di lavoro fluido.

7. Etica e Responsabilità: L'uso di tecnologie ciber-fisiche solleva questioni etiche, come la responsabilità in caso di malfunzionamenti o errori. È importante definire chiaramente le responsabilità e stabilire protocolli per gestire i rischi associati. Inoltre, è necessario garantire che le tecnologie siano utilizzate in modo equo e accessibile a tutte le popolazioni.

8. Adattabilità e Aggiornamenti: Le tecnologie e le esigenze sanitarie evolvono rapidamente. Pertanto, è necessario garantire che i sistemi siano adattabili e aggiornabili senza interruzioni significative del servizio. La pianificazione per futuri aggiornamenti e manutenzioni è cruciale per la sostenibilità a lungo termine delle soluzioni implementate.

Affrontare queste sfide richiede una collaborazione multidisciplinare tra ingegneri, professionisti della salute, esperti di sicurezza informatica e responsabili politici, al fine di creare un ecosistema sanitario più efficace, sicuro e reattivo alle esigenze della popolazione.

6. Conclusioni e Prospettive Future

Il progetto delineato rappresenta una nuova generazione di protesi intelligenti, dotate di sistemi di auto-monitoraggio e capacità di apprendimento adattativo.

I prossimi passi nello sviluppo includono:

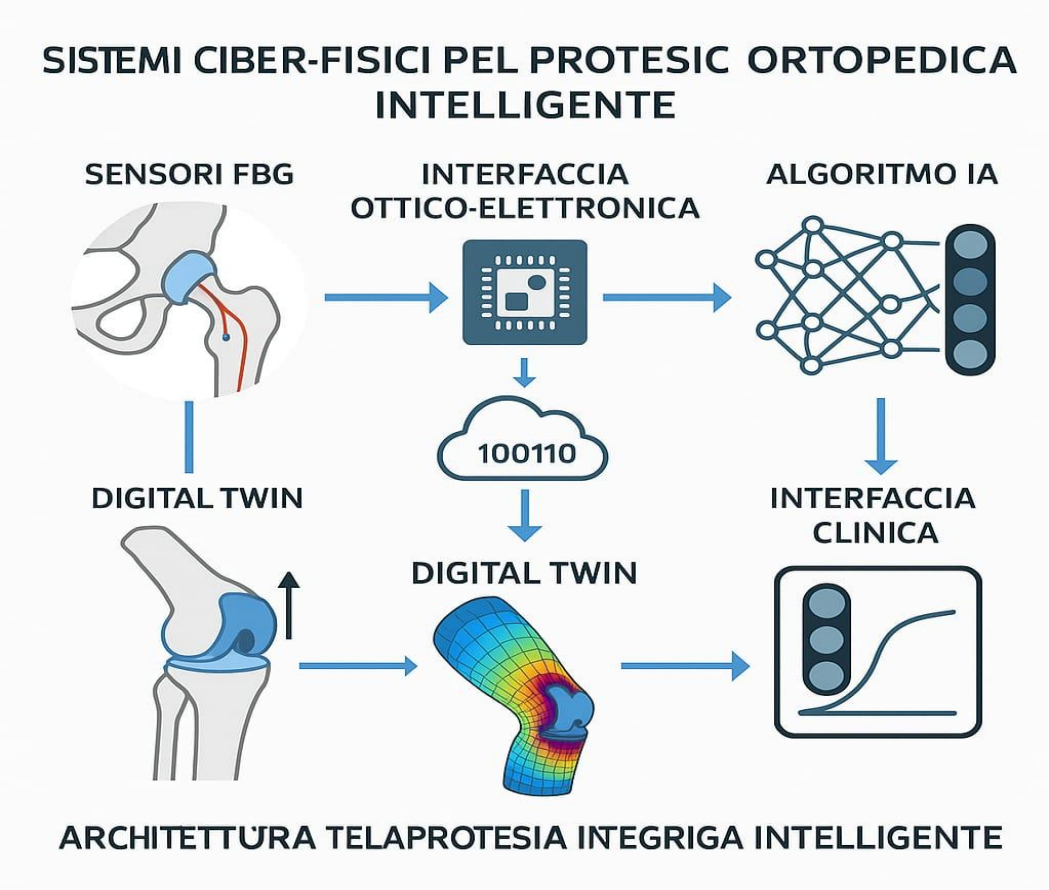
- Sperimentazioni cliniche su pazienti reali per valutare l'efficacia del sistema in ambienti pratici.

- Validazione clinica multicentrica per garantire l'efficacia e la sicurezza del dispositivo in diverse popolazioni.

- Collaborazioni con enti regolatori come la FDA e l'EMA per facilitare l'approvazione e l'implementazione delle tecnologie, contribuendo a una rapida diffusione di tali innovazioni nel mercato.

Inoltre, si prevede di esplorare ulteriormente l'integrazione di tecnologie emergenti, come la telemedicina e l'intelligenza artificiale avanzata, per migliorare ulteriormente i risultati clinici e l'esperienza del paziente.

La continua evoluzione delle tecnologie ciber-fisiche offre opportunità per sviluppi futuri, come la creazione di protesi completamente autonome che possano adattarsi dinamicamente alle condizioni fisiche e ambientali del paziente.



Architettura della piattaforma intelligente

SCHEMA DI POSIZIONAMENTO DEI SENSORI A FIBRA QTTICA

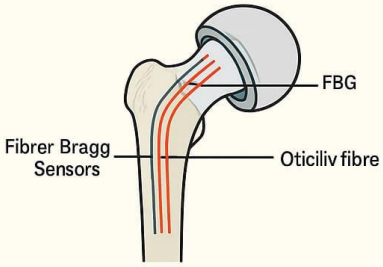
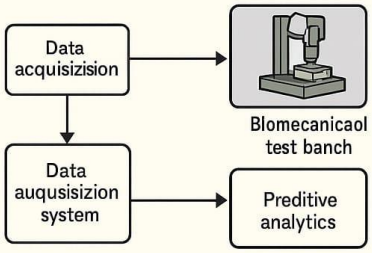


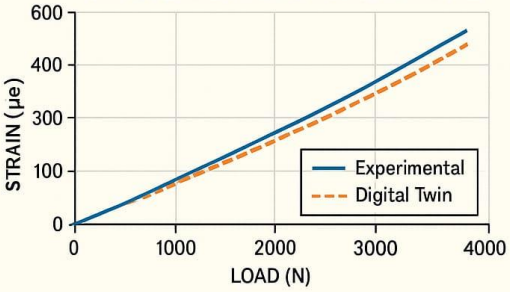
DIAGRAMMA A BLOCCHI DEL SETUP SPERIMENTALE



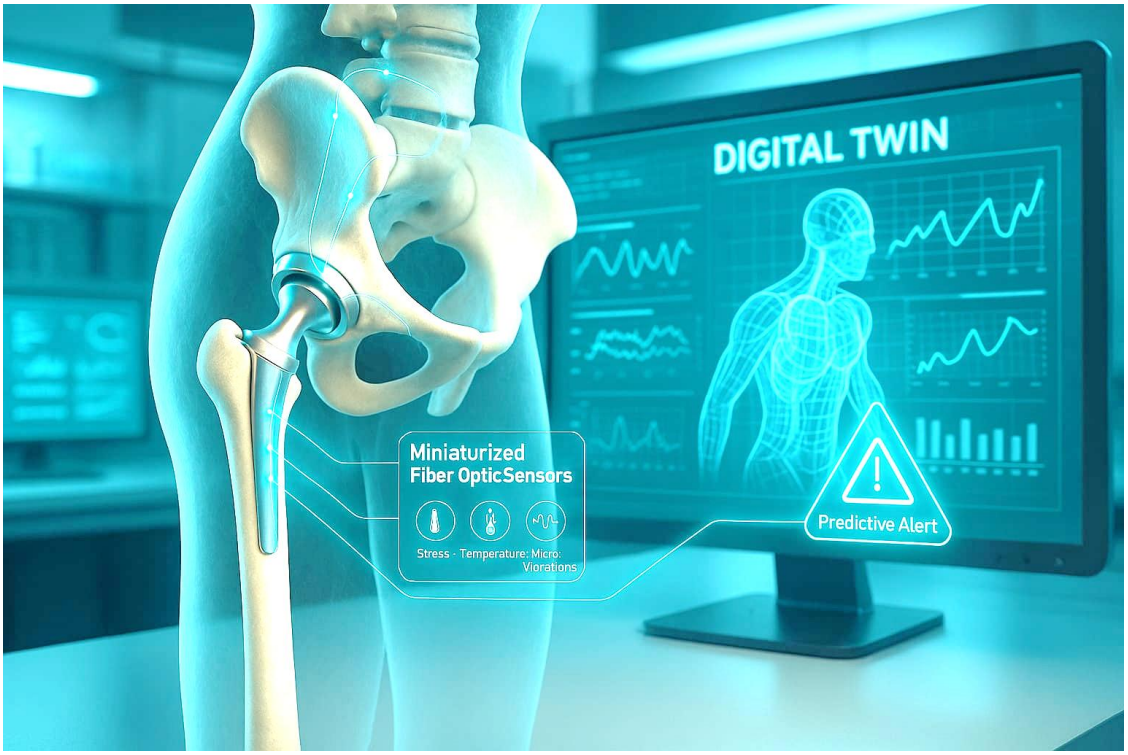
TAθ, 1 RIEPILOGO DELLE MISURE DI DEFORMAZIONE

CONDIZIONE DI CARICO	DEFORMAZIONE MEDIA (με) (με)	FREQUENZA DI CAMPIONAM-MENTO (Hz)
Statica	180	1000
Dinamica (Vanam (mala)	200	450
Torsione	100	250

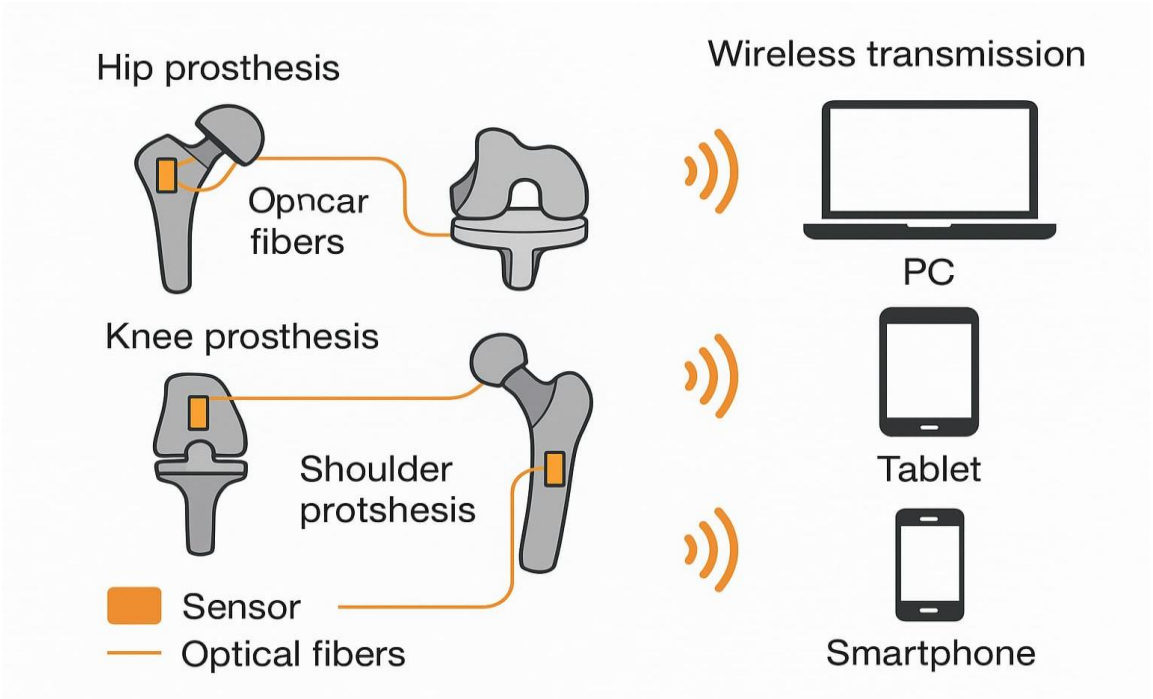
FIG, 1 CURVA DI RISPOSTA STRAIN/CARICO – DATI SPERIMENTALI VS MODELLO DIGITAL



La figura rappresenta uno schema a blocchi che illustra il flusso di dati tra: sensori FBG → interfaccia optoelettronica → Digital Twin → algoritmi di intelligenza artificiale → interfaccia clinica, evidenziando l'integrazione tra le diverse componenti del sistema.



Schema di Digital Twin



Schema trasmissione dati

CURRICULUM VITAE

Ing. Diego Dell'Erba

Ingegnere Nucleare – Ingegnere Multidisciplinare
Ricercatore e Fondatore della Cyber Physical Engineering

Profilo professionale

L'Ing. **Diego Dell'Erba** è un Ingegnere Nucleare e Multidisciplinare con oltre **cinquant'anni di esperienza** nella progettazione, direzione dei lavori, ricerca e sviluppo di grandi infrastrutture civili, industriali e sistemi complessi.

Nel corso della sua attività professionale ha partecipato alla progettazione, costruzione e gestione di importanti opere in Italia e all'estero, ricoprendo incarichi di Direttore dei Lavori, Direttore Generale, Amministratore Delegato e Responsabile di società di ingegneria.

Negli ultimi anni ha sviluppato una nuova metodologia denominata **Cyber Physical Engineering**, che integra monitoraggio strutturale, Digital Twin, sensori in fibra ottica FBG, Intelligenza Artificiale e manutenzione predittiva per la sicurezza delle infrastrutture.

Formazione

- Laurea in **Ingegneria Nucleare** - Specializzazione in Ingegneri Aereospaziale
- Università degli Studi "La Sapienza" di Roma

Attività di ricerca

Ricerca e sviluppo nei settori di:

- Cyber Physical Engineering
- Structural Health Monitoring (SHM)
- Sensori in fibra ottica FBG
- Digital Twin
- Artificial Intelligence
- Predictive Maintenance
- Decision Support Systems
- Smart Infrastructures
- Smart Cities
- Dissesto idrogeologico

- Sicurezza delle infrastrutture
- Ingegneria Biomedica
- Sistemi intelligenti per protesi ortopediche

CURRICULUM

Aurora Ammoscato

Web Researcher
Traduttrice Tecnico-Scientifica
Collaboratrice nella Ricerca sulla Cyber Physical Engineering

Profilo

Aurora Ammoscato svolge attività di ricerca documentale presso banche dati e siti scientifici internazionali, collaborando allo sviluppo di studi riguardanti l'ingegneria innovativa, civile, industriale e biomedica.

Si occupa della ricerca bibliografica, dell'analisi della letteratura scientifica internazionale e della traduzione tecnico-scientifica dall'inglese all'italiano, contribuendo alla diffusione delle nuove conoscenze nel campo della Cyber Physical Engineering.

Attività

- Ricerca scientifica sul Web
- Analisi della letteratura internazionale
- Traduzione di articoli scientifici
- Supporto alla redazione di pubblicazioni tecnico-scientifiche
- Collaborazione nello sviluppo di studi multidisciplinari
- Ricerca bibliografica
- Supporto editoriale

Principali ambiti di ricerca

- Cyber Physical Engineering
- Intelligenza Artificiale
- Digital Twin
- Sensori in fibra ottica FBG

- Ingegneria Biomedica
- Manutenzione predittiva
- Structural Health Monitoring
- Sistemi intelligenti
- Smart Technologies