

Un Nuovo Paradigma per la Sicurezza delle Infrastrutture Idrauliche: Il Controllo Attivo Morfonico nel Progetto HYDRO-LINK PRIULA

Intersezione tra Materiali Compositi BFRP, Algebra Lineare e Sintesi
Hardware su FPGA

Ing. Antonio Triassi

Abstract

La protezione delle infrastrutture idrauliche critiche richiede oggi un cambio di paradigma, superando i tradizionali approcci di difesa passiva. La presente nota tecnica illustra i fondamenti scientifici e realizzativi del sistema HYDRO-LINK PRIULA, un'opera d'avanguardia in cui un condotto in fibra di basalto (BFRP) viene monitorato in tempo reale tramite sensori a fibra ottica (FOS) e stabilizzato attivamente mediante il controllore morfonico RCMC-H5G. Attraverso una riduzione dimensionale deterministica e l'implementazione su logiche programmabili in virgola fissa Q16.16, l'energia distruttiva delle turbolenze idrodinamiche viene intrappolata entro orbite rotazionali stabili in $SO(2)$, azzerando i ritardi computazionali e garantendo la robustezza strutturale dell'opera secondo i criteri di Lyapunov.

1 Introduzione: L'Era delle Strutture Intelligenti

Nelle opere idrauliche tradizionali, il contrasto alle sollecitazioni idrodinamiche transitorie e ai fenomeni di fessurazione da fatica si affida esclusivamente all'aumento di massa della struttura. Il progetto *HYDRO-LINK PRIULA* scardina questo approccio introducendo il concetto di struttura bionica attiva. Il condotto in fibra di basalto (BFRP), qualificato secondo le severe linee guida CNR-DT 200/2013, non è più un elemento passivo, ma integra una fitta rete di sensori a fibra ottica (FOS) accoppiati ad attuatori piezoelettrici industriali. Questa architettura consente di contrastare le vibrazioni indotte dai flussi turbolenti in alveo direttamente alla radice, introducendo contro-forze elettromeccaniche in scala microsecondaria.

2 Il Modello Matematico: La Geometria dell'Energia

Dal punto di vista sistemistico, la dinamica globale dell'infrastruttura si sviluppa in uno spazio di stato a cinque dimensioni $\mathbb{R}^5$, mappando variabili eterogenee quali pressione, portata, vibrazioni meccaniche, strain flessionale e bilancio energetico [1]:

$$x(t) = [p(t), q(t), v(t), \varepsilon(t), e(t)]^T \in \mathbb{R}^5 \quad (1)$$

Per consentire l'elaborazione ad altissima velocità su micro-architetture digitali dedicate, il sistema viene proiettato ortogonalmente sul sottospazio critico bidimensionale $S = \{v(t), \varepsilon(t)\} \subset \mathbb{R}^5$, focalizzato sull'interazione flessionale fluido-struttura. Siano H_S la matrice di rigidità strutturale e V_S la matrice di accoppiamento idrodinamico:

$$H_S = \begin{bmatrix} 900 & 0 \\ 0 & 1200 \end{bmatrix}, \quad V_S = \begin{bmatrix} 0 & -2.8 \\ -2.8 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$



Il nucleo algoritmico del controllore RCMC-H5G sfrutta l'operatore d'interazione per eccellenza: il commutatore di matrice $\Xi = [H_S, V_S] = H_S V_S - V_S H_S$. Sviluppando l'algebra tensoriale riga per colonna si ottiene:

$$\Xi = \begin{bmatrix} 0 & -2520 \\ -3360 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -3360 \\ -2520 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 840 \\ -840 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

La perfetta antisimmetria del commutatore così ottenuto ($\Xi^T = -\Xi$) è un pilastro concettuale. Essa garantisce che gli autovalori associati siano numeri complessi coniugati puramente immaginari:

$$\lambda_{1,2} = \pm 840i \quad (4)$$

In termini fisici, la totale assenza di una parte reale negli autovalori dimostra che il sistema non immette né distrugge energia in modo lineare, ma costringe l'energia cinetica perturbativa a ruotare indefinitamente lungo traiettorie chiuse nello spazio delle fasi dello spazio $SO(2)$ [4].

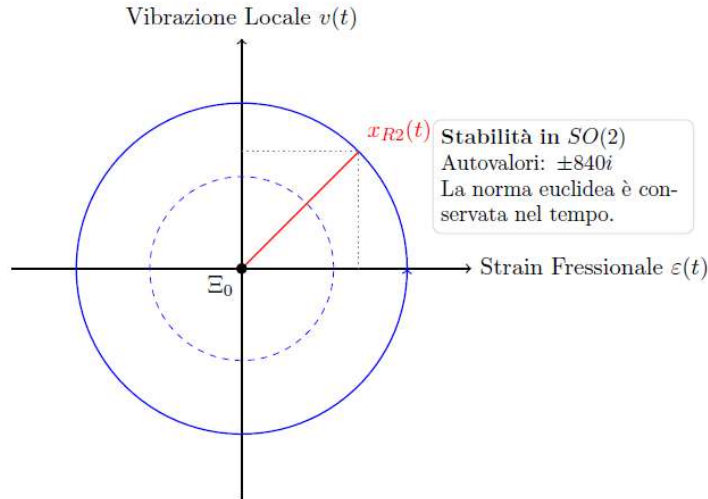


Figure 1: Rappresentazione geometrica dello spazio delle fasi del kernel RCMC-H5G: l'azione combinata di sensori e attuatori intrappola le instabilità all'interno di un'orbita circolare chiusa.

3 Dalle Matrici al Silicio: L'Architettura Digitale Deterministica

Tradurre questo modello matematico continuo in un dispositivo di controllo fisico per la sicurezza pubblica solleva problemi di natura prettamente informatica. L'utilizzo di microprocessori standard e di algoritmi stocastici o probabilistici introduce ritardi software imprevedibili (jitter) e latenze di calcolo inaccettabili.

Per blindare il sistema, il controllore è stato ingegnerizzato su due livelli paralleli:

1. **Software Embedded Autoconsistente (C++)**: Sviluppato escludendo l'allocazione dinamica di memoria per rispettare gli standard *MISRA C++* mission-critical. Il codice integra una barriera attiva di stabilità secondo Lyapunov, troncando istantaneamente le microscopiche derive numeriche spurie (inferiori a 10^{-4}) sulla diagonale principale del commutatore prima che possano innescare spirali divergenti.

2. **Sintesi Hardware Combinatoria (Verilog):** Per azzerare i tempi di calcolo, l'algoritmo è mappato sulla logica programmabile di un'FPGA sfruttando l'aritmetica in virgola fissa ****Q16.16**** in complemento a due (moltiplicando le costanti per il fattore binario $2^{16} = 65536$). Il guadagno $G = 10^{-3}$ è discretizzato nel parametro intero statico 66 (0.001×65536).

Essendo un modulo interamente combinatorio, l'elaborazione avviene a livello sub-nanometrico sfruttando le celle DSP native del silicio, riducendo la latenza computazionale intrinseca a meno di 2 ns su tecnologie a 28 nm. Il clock digitale opera così in un regime di oversampling assoluto rispetto al transitorio meccanico dei piezo ($\approx 1.5 \mu s$), eliminando sfasamenti numerici all'interno del loop retroazionato.

4 La “Fisicizzazione” del Software: Oltre il Non-Determinismo

Nel panorama del controllo strutturale, il software tradizionale introduce spesso elementi di vulnerabilità critica. Sistemi operativi real-time (RTOS) e routine sequenziali basate su micro-processori commerciali sono intrinsecamente soggetti a ritardi imprevedibili — noti come *jitter* computazionale — causati da interrupt hardware, logiche di caching e rinfreschi di memoria. In un'opera idraulica immersa in un flusso altamente turbolento, un ritardo anche solo millisecondario nell'erogazione del feedback si traduce in uno sfasamento distruttivo, trasformando l'azione di smorzamento in una forza forzante che amplifica la risonanza del condotto.

Per ovviare a questa barriera tecnologica, l'architettura RCMC-H5G persegue la strada della “fisicizzazione” del codice. L'algoritmo matematico non viene interpretato riga per riga da una CPU, ma si materializza direttamente sul silicio tramite una topologia circuitale fissa. Il software cessa di esistere come entità logica astratta e diventa una rete di porte logiche e moltiplicatori hardware DSP interconnessi in modo permanente. Il flusso dei bit attraverso questa struttura combinatoria ricalca fedelmente il comportamento di un fluido in una condotta o della corrente in un circuito analogico puro: non vi è memorizzazione, non vi è attesa di cicli di clock, ma solo una propagazione istantanea del segnale basata sui tempi fisici del silicio.

5 Conclusioni

La convergenza sinergica tra la rigorosa formulazione spettrale delle matrici d'interazione e l'efficienza della sintesi hardware in virgola fissa Q16.16 dimostra che la mecatronica d'avanguardia è oggi pienamente matura per governare la sicurezza delle grandi opere civili. Grazie all'adozione del controllore morfonico RCMC-H5G, l'infrastruttura HYDRO-LINK PRIULA è in grado di soddisfare rigorosamente i requisiti di sicurezza geotecnica e idraulica prescritti dal Capitolo 6 delle NTC 2018. Tale approccio trasforma il condotto in un sistema autogovernato e autoconsistente, capace di eliminare il rischio di risonanze idrodinamiche distruttive e di ridefinire gli standard di longevità e resilienza delle opere in alveo.

References

- [1] A. Triassi, *Modello Assiomatico, Fondamenti Matematici e Sintesi del Controllore Morfonico RCMC-H5G*, Relazione Tecnica Interna, 2026.
- [2] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018)*, Capitolo 6: Progettazione geotecnica e opere in alveo, Roma, 2018.
- [3] Consiglio Nazionale delle Ricerche, *Linee guida per la qualificazione e progettazione di strutture in composito (CNR-DT 200/2013)*, Roma, 2013.