

Dagli Assiomi di Sistema al Silicio: L'Infrastruttura Idraulica Avanzata HYDRO-LINK PRIULA

Connessione Funzionale tra Architettura Bionica 5D e Controllo Locale
Deterministico 2D

Ing. Antonio Triassi

Abstract

La gestione della sicurezza nelle grandi opere idrauliche richiede modelli capaci di governare la complessità sistemica senza rinunciare alla reattività d'azione in tempo reale. Il presente articolo illustra l'architettura del sistema HYDRO-LINK PRIULA, formalizzando l'unificazione tra il modello assiomatico globale a cinque dimensioni (5D) e il nucleo di controllo locale a due dimensioni (2D) del modulo RCMC-H5G. Attraverso una decomposizione spettrale rigorosa basata sulle proprietà di antisimmetria del commutatore, si dimostra come i vincoli di coerenza ad alto livello si traducano in una legge di controllo geometrica in $SO(2)$ interamente priva di logiche probabilistiche, garantendo l'invarianza energetica e la stabilità strutturale su dispositivi FPGA/ASIC.

1 Introduzione: La Necessità di un Approccio Sistemico

Le infrastrutture idrauliche moderne non possono più essere considerate come semplici elementi passivi di contenimento. L'interazione dinamica tra le piene fluviali, le deformazioni dei materiali compositi e i bilanci energetici locali richiede una supervisione olistica. Nel progetto *HYDRO-LINK PRIULA*, questo obiettivo viene raggiunto separando la complessità computazionale su due livelli gerarchici: un modello assiomatico globale che monitora la coerenza del sistema e un kernel mecatronico ultra-veloce che intercetta i transitori fisici distruttivi prima che possano propagarsi nell'opera [1].

2 L'Architettura Assiomatica Globale (5D)

Lo stato macroscopico del sistema bionico è mappato all'interno di uno spazio vettoriale a cinque dimensioni $\mathbb{R}^5$ [1]:

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

dove le coordinate definiscono rispettivamente la pressione p , la portata q , la velocità di vibrazione v , lo strain flessionale ε e il bilancio energetico locale e [1].

La sicurezza e l'integrità dell'intera infrastruttura sono garantite da una matrice diagonale di vincoli di targa H e da una condizione assiomatica di limitatezza energetica [1]:

$$H = \text{diag}(p_{\max}, q_{\max}, v_{\max}, \varepsilon_{\max}, e_{\min}) \quad (2)$$

$$\|[H, V]\| \leq D_{\max} \quad (3)$$

Questo vincolo definisce lo spazio operativo sicuro. Se le mutue interazioni tra il fluido e il condotto in fibra di basalto (BFRP) rimangono all'interno di questo dominio, l'opera mantiene la sua coerenza strutturale [1]. Tuttavia, calcolare questa norma globale richiede tempi di elaborazione incompatibili con la banda passante delle oscillazioni idrauliche, che necessitano di risposte nell'ordine dei microsecondi.

3 Decomposizione Locale e Riduzione Dimensionale (2D)

Per risolvere il paradosso computazionale, il sistema esegue una scomposizione matematica: lo spazio globale 5D viene proiettato ortogonalmente sul solo sottospazio critico bidimensionale delle instabilità flessionali $S = \{v(t), \varepsilon(t)\} \subset \mathbb{R}^5$ [1]. All'interno di questo spazio ridotto, il controllore RCMC-H5G isola le matrici locali d'interazione [1]:

$$H_S = \begin{bmatrix} 900 & 0 \\ 0 & 1200 \end{bmatrix}, \quad V_S = \begin{bmatrix} 0 & -2.8 \\ -2.8 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Il monitoraggio dell'energia scambiata tra il flusso turbolento e la parete d'alveo si materializza nel calcolo del commutatore locale $\Xi = [H_S, V_S] = H_S V_S - V_S H_S$, la cui risoluzione algebrica produce [1]:

$$\Xi = \begin{bmatrix} 0 & -2520 \\ -3360 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -3360 \\ -2520 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 840 \\ -840 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

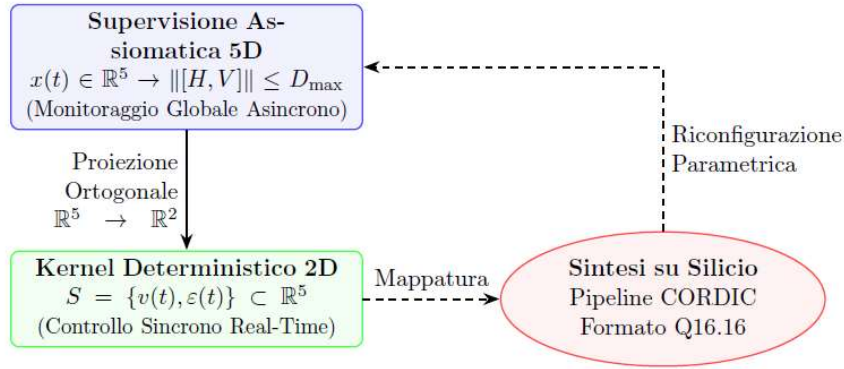


Figure 1: Architettura gerarchica del sistema HYDRO-LINK PRIULA: la transizione geometrica dalla supervisione globale 5D all'attuazione hardware 2D sul silicio.

L'antisimmetria intrinseca di questa struttura ($\Xi^T = -\Xi$) vincola matematicamente gli autovalori a essere complessi coniugati puramente immaginari ($\lambda_{1,2} = \pm 840i$), garantendo la conservazione della norma nello spazio rotazionale $SO(2)$ [1]. L'energia cinetica perturbativa viene forzata a orbitare senza divergere, consentendo alla legge di controllo geodetico $u_{geo} = [0.84, 0.84]^T$ V di agire stabilmente sui materiali piezoelettrici dell'opera [1].

4 Autoconsistenza Hardware e Robustezza di Lyapunov

Il vantaggio computazionale di questa architettura risiede nella sua natura deterministica non probabilistica. Molti approcci meccatronici tradizionali si affidano ad algoritmi stocastici che tentano di prevedere statisticamente l'evoluzione delle sollecitazioni. Tali metodi introducono lunghi tempi di calcolo e vulnerabilità software legate al non-determinismo delle CPU (jitter).

L'architettura bionica risolve questo limite delegando la verifica globale 5D a un sistema di supervisione asincrono di alto livello, mentre confina l'attuazione strutturale a una rete fissa di porte logiche implementata su FPGA [1]. Il calcolo delle rotazioni geometriche nello spazio delle fasi avviene tramite una pipeline hardware CORDIC operante in virgola fissa Q16.16 [1]. Inoltre, per prevenire derive termiche o rumori di quantizzazione che potrebbero alterare gli zeri ideali della diagonale del commutatore, il silicio integra un filtro attivo di *Jitter Compensation* [1]. Questo blocco forza asintoticamente a zero le componenti spurie, blindando la stabilità secondo il criterio di Lyapunov ed evitando spirali divergenti distruttive [1].

5 Conclusioni

Il modello HYDRO-LINK PRIULA dimostra che l'unificazione formale tra visioni sistemiche di alto livello e rigorosi vincoli hardware costituisce la chiave per la resilienza delle infrastrutture idrauliche del futuro. La riduzione dimensionale operata dal controllore RCMC-H5G permette di condensare la complessità assiomatica 5D in un chip deterministico e autoconsistente [1]. L'adozione di tale architettura mecatronica consente di soddisfare rigorosamente i requisiti di sicurezza strutturale e durabilità prescritti dal Capitolo 6 delle NTC 2018 e dalle direttive CNR-DT 200/2013, aprendo le porte a una nuova era di opere civili intelligenti e strutturalmente protette.

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] CNR, *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante Compositi Fibrorinforzati (CNR-DT 200/2013)*, Roma, 2013.
- [4] R. A. Horn, C. R. Johnson, *Matrix Analysis*, Cambridge University Press, 1985.
- [5] J. E. Volder, "The CORDIC Trigonometric Computing Technique", *IRE Transactions on Electronic Computers*, vol. EC-8, pp. 330-334, 1959.