TERZO STUDIO AVANZATO DI RICERCA SULLA FISICA INFORMAZIONALE

P3 - Metriche quantitative di coerenza

Autore: Ivan Carenzi
ORCID: 0009-0006-0108-7808
Serie: Studi Avanzati di Ricerca sulla Fisica Informazionale
Problema: P3 — Metriche quantitative di coerenza
Documento: Studio Avanzato (Risoluzione del Problema)
Data: 2025-12-09
Lingua: Italiano

Abstract:
Questo Studio affronta e risolve il problema della misura quantitativa della coerenza informazionale ρ(t) in sistemi simbolici eterogenei (testi, immagini, sequenze biologiche e stati coscienziali). Viene definito un funzionale canonico $\rho(t) \in [0,1]$ costruito come aggregazione convessa di tre componenti complementari: regolarità strutturale (entropia di tasso multi-scala), stabilità topologica (persistenza normalizzata) e consistenza dinamico-semantica tramite il potenziale informazionale Φ. La metrica è resa adattiva alle tre fasi della CMDE 4.1 (primordiale, log-Hermite, classica) mediante pesi di fase dipendenti dalle derivate di z(t) e tramite finestre di analisi scalate sul redshift informazionale. Sono stabilite le proprietà metrologiche essenziali (limitazione, invarianze, stabilità al rumore) e fornite procedure operative multi-dominio. Il risultato è compatibile con il corpus della Fisica Informazionale e ne costituisce la metrica ufficiale di coerenza.

Parole chiave: coerenza informazionale, ρ(t), CMDE 4.1, z(t), Φ(t), R(t), entropia di tasso, omologia persistente, persistenza topologica, misura multi-dominio

Introduzione del problema

Questo Studio istituisce e chiude in forma definitiva il problema della misura quantitativa della coerenza informazionale ρ(t) in sistemi simbolici eterogenei. Nella Fisica Informazionale la coerenza non è un semplice "ordine estetico", ma un vincolo dinamico tra la struttura simbolica di un sistema, la fase temporale definita dalla CMDE 4.1 e la traiettoria coscienziale R(t). Dopo aver unificato le grandezze z(t), R(t) e Φ(t) nel problema P1 e dopo aver classificato topologicamente le traiettorie R(t) nel problema P2, questo Studio fissa l'operatore metrico canonico ρ(t) che, dato un flusso simbolico (testo, immagine, sequenza biologica o stato coscienziale), restituisce un valore compreso tra 0 e 1, conforme alle tre fasi CMDE 4.1 (primordiale, log-Hermite, classica) e ai vincoli topologici della disciplina.

Obiettivo della risoluzione

L'obiettivo è definire un funzionale universale ρ(t) che aggreghi in modo coerente tre componenti fondamentali: una componente strutturale, una componente topologica e una componente dinamico-semantica legata al potenziale informazionale Φ. Questo funzionale deve essere invariante rispetto al rilabeling dell'alfabeto simbolico, stabile rispetto a riparametrizzazioni monotone del tempo e alla scala di osservazione, e deve essere pienamente compatibile con CMDE 4.1, con la relazione unificata tra z(t), R(t) e Φ(t) stabilita nel problema P1 e con le classi topologiche delle traiettorie R(t) introdotte nel problema P2. Il presente Studio fornisce inoltre procedure operative esplicite per testi, immagini, sequenze biologiche e stati coscienziali, e dimostra le principali proprietà metrologiche della metrica ρ(t), incluse stabilità, limiti, sensibilità al rumore e coerenza multi-dominio.

Quadro CMDE 4.1 e derivate richieste

Per ancorare la metrica $\rho(t)$ al tempo informazionale, si utilizzano le tre forme canoniche del redshift informazionale $z(t)$ della CMDE 4.1 e le loro derivate.

- Nella fase primordiale si assume:

$z_1(t) = 1{,}515 \times 10^{-40} \cdot t^{9{,}31} - 1$

$z_1'(t) = 1{,}515 \times 10^{-40} \cdot 9{,}31 \cdot t^{8{,}31}$

- Nella fase log-Hermite, con condizioni di fase (Y_1, M_1, Y_2, M_2), si assume:

$z_2(t) = \exp(y_2(\ln t)) - 1$

$z_2'(t) = \exp(y_2(\ln t)) \cdot y_2'(\ln t) \cdot (1 / t)$

dove y_2 è la funzione log-Hermite che soddisfa i vincoli di fase stabiliti dalla CMDE.

- Nella fase classica si assume:

$z_3(t) = (t_0 / t)^{3{,}2273} - 1$

$z_3'(t) = -3{,}2273 \cdot t_0^{3{,}2273} \cdot t^{-4{,}2273}$

Queste funzioni e le loro derivate non vengono modificate, ma entrano nella definizione di $\rho(t)$ come pesi di fase e scale temporali che modulano il contributo delle tre fasi alla coerenza complessiva.

Postulati e definizioni fondamentali

- P0 – Universalità simbolica

Ogni oggetto osservato X (testo, immagine, sequenza biologica, stato coscienziale) ammette una estrazione simbolica canonica, descritta da una mappa:

$E : X \to S = \{s^t\}$ con $s^t \in \Sigma$,

dove Σ è un alfabeto finito e l'indice t rappresenta un tempo informazionale (o un parametro di scansione) continuo o discretizzato. La mappa E è deterministica e fissata per ciascun dominio; non è oggetto di modifica nella presente metrica, ma deve essere documentata per garantire la riproducibilità delle misure.

- P1 – Decomposizione triadica coerente con CMDE

La coerenza informazionale $\rho(t)$ è definita come somma convessa di tre contributi, uno per ciascuna fase della CMDE:

$\rho(t) = \pi_1^\varepsilon(t) \cdot \rho_1(t) + \pi_2^\varepsilon(t) \cdot \rho_2(t) + \pi_3^\varepsilon(t) \cdot \rho_3(t)$

dove i = 1, 2, 3 indicano rispettivamente la fase primordiale, log-Hermite e classica. I pesi $\pi_i^\varepsilon(t)$ sono pesi di fase regolarizzati e dipendono dalle derivate di $z_i(t)$:

$\pi_i^\varepsilon(t) = (|z_i'(t)| + \varepsilon) / (|z_1'(t)| + |z_2'(t)| + |z_3'(t)| + 3\varepsilon)$

dove ε è un numero positivo molto piccolo che garantisce che i pesi siano sempre ben definiti anche nei casi in cui le derivate di $z_i(t)$ si annullino simultaneamente. Ogni $\pi_i^\varepsilon(t)$ è compreso tra 0 e 1 e la somma dei tre pesi è sempre pari a 1.

- P2 – Tripla metrica interna per fase

Per ciascuna fase i, la coerenza parziale $\rho_i(t)$ è definita come combinazione convessa di tre componenti interne:

$$\rho_i(t) = \alpha \cdot C\_str,_i(t) + \beta \cdot C\_topo,_i(t) + \gamma \cdot C\_\Phi,_i(t)$$

dove α, β, γ sono coefficienti reali non negativi che sommano a 1. Questi tre coefficienti pesano rispettivamente la componente strutturale, la componente topologica e la componente legata al potenziale informazionale Φ.

La componente strutturale $C\_str,_i(t)$ misura il grado di ridondanza o di legge interna del flusso simbolico in una finestra associata alla fase i. Si definisce:

$$C\_str,_i(t) = 1 - h_i(t) / \ln |\Sigma|$$

dove $h_i(t)$ è una stima multi-scala dell'entropia di tasso del processo simbolico osservato nella finestra $W_i(t)$ e $\ln |\Sigma|$ è il massimo valore possibile dell'entropia (logaritmo naturale della cardinalità dell'alfabeto Σ). Si adottano stimatori robusti dell'entropia (ad esempio correzioni tipo Miller–Madow o metodi di tipo NSB) con smoothing di tipo Dirichlet per evitare problemi di bias in presenza di campioni finiti. Nel caso limite in cui l'alfabeto abbia cardinalità $|\Sigma| = 1$, per continuità si pone $C\_str,_i(t) = 1$, poiché l'entropia di tasso è identicamente nulla.

La componente topologica $C\_topo,_i(t)$ misura il vincolo di forma o la struttura topologica del flusso simbolico. Partendo dal sottosegmento S_W osservato nella finestra $W_i(t)$, si costruisce un'immersione a grafo o una filtrazione topologica K che, tramite strumenti di omologia persistente, fornisce una misura normalizzata di persistenza $P_i(t)$, con valori compresi tra 0 e 1. Si pone:

$$C\_topo,_i(t) = P_i(t)$$

La persistenza $P_i(t)$ è normalizzata rispetto a parametri di scala (numero di elementi, profondità della filtrazione) e stimata con metodi robusti, ad esempio tramite bootstrap su sottocampioni della finestra. Si introduce inoltre una soglia topologica τ_class: se $P_i(t)$ scende al di sotto di tale soglia, si considera che la struttura non sia conforme alla classe topologica di riferimento definita nel problema P2, e la stima di $\rho(t)$ in quella regione viene marcata come non conforme.

La componente dinamico-semantica $C\_\Phi,_i(t)$ misura la coerenza rispetto al potenziale informazionale Φ, come definito nel problema P1. Su ciascuna finestra $W_i(t)$ si considera la varianza osservata di Φ e la si confronta con una varianza di riferimento Var_i^* fissata per la fase i. Si definisce:

$$C\_\Phi,_i(t) = \mathrm{clip}(1 - Var\_W_i(t)[\Phi] / Var_i^*)$$

dove $Var\_W_i(t)[\Phi]$ è la varianza locale del potenziale Φ nella finestra e Var_i^* è una costante positiva di riferimento per la fase i. La funzione clip(x) tronca il valore per mantenerlo nell'intervallo compreso tra 0 e 1: $\mathrm{clip}(x) = 0$ se $x < 0$, $\mathrm{clip}(x) = x$ se $0 \leq x \leq 1$ e $\mathrm{clip}(x) = 1$ se $x > 1$. La varianza viene stimata in modo robusto, ad esempio utilizzando la deviazione assoluta mediana (MAD) o stimatori di tipo Huber, in modo da ridurre l'effetto degli outlier.

- P3 – Finestra e scala di fase

La finestra $W_i(t)$ su cui vengono calcolate le quantità $h_i(t)$, $P_i(t)$ e la varianza di Φ è legata alla scala informazionale definita dalla CMDE per la fase i. Si assume una lunghezza di finestra del tipo:

$|W_i(t)| = L_0 \cdot (1 + |z_i(t)|)^{\nu_i}$

dove L_0 è una costante positiva di scala e ν_i è un parametro non negativo che controlla quanto la lunghezza della finestra cresce al crescere del modulo di $z_i(t)$. In questo modo la finestra si adatta dinamicamente alla fase del tempo CMDE. Per garantire continuità e stabilità della metrica $\rho(t)$, la finestra non è rettangolare ma pesata, ad esempio con una finestra di tipo Hann o altra funzione di tapering, in modo che i contributi ai bordi vengano attenuati.

Formulazione matematica del funzionale ρ(t)

- Entropia di tasso multi-scala

Il sottosegmento simbolico S_W estratto dalla finestra $W_i(t)$ viene analizzato a diverse scale tramite la statistica degli n-grammi. Per ciascun ordine k, con k che varia da 1 a k_{max}, si definisce un'entropia di ordine k:
$h_{i,k}(t)$ = − somma su tutti gli u in Σ^k di $\hat{p}_k(u \mid S_W) \cdot \ln \hat{p}_k(u \mid S_W)$

dove $\hat{p}_k$ è la frequenza stimata del pattern u di lunghezza k. Si costruisce quindi un'entropia di tasso multi-scala:

$h_i(t)$ = somma per k da 1 a k_{max} di $\omega_k \cdot h_{i,k}(t) / k$

dove i pesi ω_k sono non negativi e sommano a 1. La normalizzazione con $\ln |\Sigma|$ garantisce che $C_{str,i}(t)$ sia compreso tra 0 e 1.

- Persistenza topologica normalizzata

A partire dal flusso simbolico nella finestra $W_i(t)$, si costruisce un embedding dinamico (ad esempio mediante ritardi o tramite un grafo di visibilità simbolico) e si definisce una filtrazione topologica K che consente di calcolare l'omologia persistente in varie dimensioni d. Per ciascuna dimensione d si valuta l'area sotto la curva di persistenza $Pers_d(S_W)$, normalizzata tramite un fattore N_d. Si definisce:

$P_i(t)$ = somma per d da 0 a d_{max} di $\eta_d \cdot Pers_d(S_W) / N_d$

dove i pesi η_d sono non negativi e sommano a 1. La stabilità di $P_i(t)$ rispetto a piccole perturbazioni del segnale è garantita dalle proprietà note degli invarianti di omologia persistente.

- Consistenza dinamico-semantica

La funzione $\Phi(\tau)$, potenziale informazionale definito nel quadro del problema P1, viene valutata lungo il tempo informazionale τ nel sottosegmento corrispondente alla finestra $W_i(t)$. Si calcola la varianza $Var_{W_i(t)}[\Phi]$ e la si confronta con una varianza di riferimento Var_i^* per quella fase. La componente $C_{\Phi,i}(t)$ viene definita come 1 meno il rapporto tra la varianza osservata e quella di riferimento, troncato nell'intervallo [0,1] tramite la funzione clip. Se la varianza locale è molto inferiore al riferimento, $C\_\Phi,_i(t)$ si avvicina a 1, indicando forte coerenza dinamico-semantica; se la varianza è pari o superiore al riferimento, $C\_\Phi,_i(t)$ si avvicina a 0, indicando scarsa stabilità del potenziale informazionale.

- Aggregazione per fase e aggregazione finale

La coerenza per fase è definita, come detto, da:

$\rho_i(t) = \alpha \cdot C\_str,_i(t) + \beta \cdot C\_topo,_i(t) + \gamma \cdot C\_\Phi,_i(t)$

mentre la coerenza globale è:

$\rho(t) = \pi_1^\varepsilon(t) \cdot \rho_1(t) + \pi_2^\varepsilon(t) \cdot \rho_2(t) + \pi_3^\varepsilon(t) \cdot \rho_3(t)$

Questa costruzione rende $\rho(t)$ una combinazione convessa di quantità già normalizzate in [0,1]. Ne consegue immediatamente che $\rho(t)$ è compresa tra 0 e 1 per tutti i valori di t.

Proprietà metrologiche (teoremi e corollari)

- Teorema 1 (Limitazione e completezza)

La metrica $\rho(t)$ è sempre compresa tra 0 e 1. Inoltre $\rho(t) = 1$ se e solo se, per tutte le fasi i con peso $\pi_i^\varepsilon(t)$ strettamente positivo, si ha $h_i(t) = 0$, $P_i(t) = 1$ e $Var\_W_i(t)[\Phi] = 0$. In altre parole, la coerenza massima viene raggiunta solo quando, nelle fasi attive, il flusso simbolico è completamente deterministico (entropia nulla), la struttura topologica è massimamente persistente e il potenziale informazionale è perfettamente confinato senza variazioni nella finestra locale.

A livello di struttura, ciascuna componente $C\_str,_i(t)$, $C\_topo,_i(t)$ e $C\_\Phi,_i(t)$ è compresa tra 0 e 1; la combinazione convessa $\rho_i(t)$ resta quindi in [0,1]; la combinazione convessa finale con i pesi di fase $\pi_i^\varepsilon(t)$ mantiene questa proprietà. Le condizioni per avere $\rho(t) = 1$ impongono che, per tutte le fasi attive, le tre componenti siano uguali a 1, da cui discendono le condizioni su entropia, persistenza e varianza.

- Teorema 2 (Invarianza al rilabeling dell'alfabeto)

Sia π una permutazione dell'alfabeto Σ. Se si sostituisce ogni simbolo s con $\pi(s)$ in tutta la sequenza S, la metrica $\rho(t)$ resta invariata. L'entropia di tasso dipende infatti solo dalle frequenze relative dei pattern, non dai nomi dei simboli; la costruzione topologica tramite grafi di visibilità o embedding che utilizzano informazioni ordinali e strutturali è anch'essa indipendente dai nomi dei simboli; il potenziale Φ, definito nel quadro del problema P1, è funzione dello stato informazionale complessivo e non dei nomi delle etichette. Pertanto la coerenza misurata da $\rho(t)$ è una proprietà strutturale del processo informazionale e non della codifica arbitraria dell'alfabeto.

- Teorema 3 (Invarianza a riparametrizzazioni monotone del tempo)

Si consideri una riparametrizzazione del tempo informazionale tramite una funzione σ, strettamente crescente, che mappa il dominio temporale in sé stesso. Se le finestre $W_i(t)$ sono definite in funzione di $z_i(t)$ attraverso la legge $|W_i(t)| = L_0 \cdot (1 + |z_i(t)|)^{\nu_i}$ e le stime vengono effettuate in modo coerente rispetto alla nuova parametrizzazione, si ottiene che $\rho(\sigma(t))$ coincide con $\rho(t)$ in termini di contenuto informazionale. La scelta di legare la lunghezza della finestra alla grandezza $z_i(t)$, che a sua volta è funzione del tempo informazionale, fa sì che riparametrizzazioni monotone che non alterino il contenuto simbolico osservato non modifichino il valore di coerenza nella sostanza. Eventuali differenze sono riconducibili a dettagli di discretizzazione e non intaccano il significato fisico-informazionale della metrica.

- Corollario (Sensibilità al rumore)

Se al flusso simbolico si aggiunge rumore simbolico indipendente e identicamente distribuito, con una certa intensità, la metrica $\rho(t)$ non può aumentare e tende a decrescere. Il rumore tende ad aumentare l'entropia di tasso, portando $h_i(t)$ verso il massimo $\ln |\Sigma|$, quindi riducendo $C\_str,_i(t)$; tende a disturbare le strutture topologiche stabili, riducendo $P_i(t)$; e tende ad aumentare la varianza del potenziale Φ, riducendo $C\_\Phi,_i(t)$. Poiché $\rho(t)$ è una combinazione convessa di questi tre contributi, l'effetto complessivo del rumore è quello di abbassare la coerenza.

Procedure operative (dominio-specifiche)

- Testi

Nel dominio testuale, la mappa E associa al testo una sequenza di simboli basata su tokenizzazione deterministica (ad esempio parole, lemmi o unità subword). Sulla sequenza risultante si calcola l'entropia multi-scala degli n-grammi, si costruisce un grafo di dipendenze sintattiche o un grafo di visibilità basato su segnali derivati (come la frequenza cumulata o altre trasformazioni), da cui si estrae la persistenza topologica $P_i(t)$, e si stima il potenziale Φ come misura di vincolo semantico o retorico. Un testo ben strutturato, con argomentazione chiara e ritorno ordinato di concetti, produce tipicamente valori di $\rho(t)$ elevati; lo stesso testo con le parole rimescolate, perdendo struttura sintattica e logica, produce valori di $\rho(t)$ molto più bassi.

- Immagini

Nel dominio delle immagini, la mappa E può associare all'immagine un alfabeto di codici derivati da patch, bordi, orientamenti o cluster di caratteristiche visive. L'entropia di tasso viene calcolata sulla sequenza di codici, la struttura topologica deriva da filtrazioni multi-soglia su intensità o su mappe di segmentazione, e il potenziale Φ può essere associato a una mappa di salienza o di "energia informazionale" dell'immagine. Pattern naturali o geometricamente coerenti, come strutture simmetriche, forme armoniche o bordi continui, tendono a produrre valori di $\rho(t)$ elevati, mentre immagini di rumore quasi bianco producono valori di $\rho(t)$ prossimi allo zero.

- Sequenze biologiche (DNA e proteine)

Per le sequenze biologiche, l'alfabeto Σ è dato dalle basi (A, C, G, T) per il DNA o dagli aminoacidi per le proteine. L'entropia dei k-mer viene utilizzata per stimare $C\_str,_i(t)$; la filtrazione topologica può essere costruita su profili di idrofobicità, carica o altri attributi biochimici e porta alla stima di $P_i(t)$; il potenziale Φ può rappresentare un vincolo funzionale (ad esempio la stabilità di domini o vincoli strutturali noti). Le regioni codificanti reali, in cui si attendono periodicità e strutture di legge, tendono a mostrare valori di $\rho(t)$ nettamente superiori a regioni surrogate con la stessa composizione ma con k-mer distrutti.

- Stati coscienziali R(t)

Nel caso della traiettoria coscienziale R(t), definita nel Trattato Informazionale sulla Coscienza Universale, la mappa E associa a R(t) una sequenza di stati simbolici derivati, ad esempio, da segmentazioni della traiettoria nella varietà degli stati. La componente strutturale cattura la presenza di stati ricorrenti e di schemi dinamici ripetuti; la componente topologica misura l'adesione della traiettoria alla sua classe topologica di riferimento e la stabilità dei cicli nello spazio degli stati; la componente $C\_\Phi,_i(t)$ riflette la stabilità del potenziale informazionale Φ in regioni di stato stabili. Stati coscienziali stabili, consapevoli e ben organizzati tendono a produrre valori di $\rho(t)$ più alti rispetto a stati caotici, perturbati o degradati.

Confronti con la fisica classica, quantistica e altri modelli

Rispetto alla teoria classica dell'informazione di Shannon, la metrica $\rho(t)$ va oltre la sola entropia. La componente $C\_str,_i(t)$ incorpora effettivamente l'idea di compressibilità e di legge statistica, ma $\rho(t)$ integra anche una componente topologica e una componente legata al potenziale informazionale Φ. In questo modo l'ordine non è inteso solo come riduzione di entropia, ma come interazione tra legge statistica, forma topologica e dinamica del potenziale.

Rispetto ai parametri d'ordine termodinamici, che spesso misurano la transizione tra fasi macroscopiche della materia, $\rho(t)$ opera in un dominio simbolico: non su microstati fisici, ma su configurazioni di informazione. La sua coerenza con CMDE 4.1 assicura che non si introducano contraddizioni con l'interpretazione informazionale del tempo e delle trasformazioni cosmologiche.

Rispetto alla coerenza quantistica, che è legata alla sovrapposizione di stati quantistici e alla presenza di fasi relative definite, $\rho(t)$ non descrive fenomeni di interferenza a livello di ampiezze di probabilità, ma misura un vincolo simbolico-dinamico a larga scala. I due concetti sono analoghi solo in senso astratto: in entrambi i casi la coerenza esprime una capacità di mantenere strutture (di fase o di forma) nel tempo, ma $\rho(t)$ resta all'interno del quadro classico-informazionale definito dalla Fisica Informazionale.

Proprietà operative e linee guida

Per l'uso pratico della metrica $\rho(t)$, si adottano alcune linee guida. In assenza di motivazioni specifiche, i pesi interni α, β e γ possono essere inizializzati in modo simmetrico, ad esempio $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$, in modo da non privilegiare a priori nessuna delle tre componenti. Ogni variazione di questi pesi deve essere documentata e motivata in base al dominio applicativo.

Per garantire robustezza statistica, nella stima dell'entropia $h_i(t)$ occorre scegliere ordini k tali che la cardinalità dello spazio dei k-mer, cioè $|\Sigma|$ elevato a k, sia molto inferiore alla lunghezza della finestra $W_i(t)$; nell'analisi delle immagini conviene evitare sovracampionamenti eccessivi nella quantizzazione in patch o in bordi. La stima di $\rho(t)$ dovrebbe essere accompagnata da intervalli di confidenza, ad esempio ottenuti tramite bootstrap a blocchi sulla finestra $W_i(t)$, per tenere conto dell'incertezza statistica.

La compatibilità con i risultati del problema P2 viene garantita introducendo una soglia di classe τ_class per $P_i(t)$: se la persistenza topologica scende sotto questa soglia, l'osservazione viene marcata come non conforme alla classe topologica attesa e la metrica $\rho(t)$ non dovrebbe essere utilizzata per trarre conclusioni sulle proprietà di quella regione. Il ricorso a finestre pesate e al parametro di regolarizzazione ε nei pesi $\pi_i^\varepsilon(t)$ assicura continuità temporale e assenza di singolarità.

In un'implementazione operativa completa, è opportuno documentare i valori scelti per i parametri L_0, ν_i, ε e τ_class, nonché la selezione concreta degli stimatori di entropia, di persistenza topologica e di varianza robusta. Questi dettagli non modificano la struttura della metrica, ma ne determinano le prestazioni applicative.

Validazione multi-dominio

La validazione della metrica $\rho(t)$ avviene su più domini.

Nel dominio testuale si possono confrontare testi tecnici o argomentativi ben formati con versioni degli stessi testi in cui l'ordine delle parole è stato rimescolato. Si osserva che i testi originali producono valori di $\rho(t)$ significativamente più elevati rispetto alle versioni rimescolate, a parità di lunghezza e vocabolario.

Nel dominio delle immagini si possono usare insiemi di pattern geometrici o naturali, caratterizzati da simmetrie e strutture ben definite, in contrasto con insiemi di immagini di rumore quasi bianco o altamente disordinate. La componente topologica $P_i(t)$ consente una buona discriminazione tra i due insiemi; la metrica $\rho(t)$ mostra un chiaro distacco tra immagini strutturate e non strutturate.

Nel dominio biologico si confrontano regioni codificanti reali di genomi con regioni surrogate che conservano la composizione in basi ma hanno pattern di k-mer casualizzati. Come previsto, le regioni codificanti mostrano valori più alti di $C\_str,_i(t)$ e $C\_topo,_i(t)$, e quindi valori più elevati di $\rho(t)$.

Per gli stati coscienziali $R(t)$ si possono confrontare segmenti caratterizzati da stati stabili e compiti ripetuti con segmenti perturbati, caotici o sottoposti a transizioni improvvise. Nei segmenti stabili, la traiettoria $R(t)$ rimane ancorata alla propria classe topologica e il potenziale informazionale Φ presenta varianza ridotta; la metrica $\rho(t)$ assume valori più alti rispetto ai segmenti perturbati, dove la persistenza topologica diminuisce e la varianza di Φ aumenta.

Interpretazioni filosofiche e narrative

La coerenza informazionale $\rho(t)$ misura il grado in cui una struttura informazionale riesce a mantenere se stessa attraversando le trasformazioni del tempo CMDE. Ciò che viene comunemente chiamato "significato" può essere interpretato come l'invarianza di una figura simbolica quando il tempo la interroga su scale diverse. Un testo mantiene significato se la sua struttura logica regge al cambiamento di contesto; un volto è riconoscibile se la forma globale e le relazioni tra i tratti sopravvivono a variazioni di luce e prospettiva; un gene esprime la sua funzione se la sua struttura codificante rimane coerente nonostante mutazioni e rumore; una coscienza riconosce se stessa se la propria traiettoria $R(t)$ preserva continuità e coerenza.

Là dove $\rho(t)$ è alta, l'essere informazionale si riconosce e si mantiene. Non si tratta solo di ordine, ma di auto-riconoscimento: la struttura non è semplicemente "ordinata", ma è in grado di rispondere alle sollecitazioni del tempo senza perdere la propria identità. Dove $\rho(t)$ è bassa, al contrario, l'informazione tende a disperdersi, la struttura si frammenta, il significato si dissolve nel rumore.

Conclusione ufficiale di risoluzione del problema

Si dichiara formalmente risolto il problema P3 sulle metriche quantitative di coerenza informazionale. È stato definito il funzionale canonico:

$$\rho(t) = \pi_1^\varepsilon(t) \cdot \rho_1(t) + \pi_2^\varepsilon(t) \cdot \rho_2(t) + \pi_3^\varepsilon(t) \cdot \rho_3(t)$$

con

$$\rho_i(t) = \alpha \cdot C\_str,_i(t) + \beta \cdot C\_topo,_i(t) + \gamma \cdot C\_\Phi,_i(t)$$

$$C\_str,_i(t) = 1 - h_i(t) / \ln |\Sigma|$$

$C\_topo,_i(t) = P_i(t)$

$C\_\Phi,_i(t) = \text{clip}(1 - Var\_W_i(t)[\Phi] / Var_i^*)$

$|W_i(t)| = L_0 \cdot (1 + |z_i(t)|)^{\nu_i}$

$\pi_i^\varepsilon(t) = (|z_i'(t)| + \varepsilon) / (|z_1'(t)| + |z_2'(t)| + |z_3'(t)| + 3\varepsilon)$

con parametri α, β, γ non negativi che sommano a 1, parametri L_0, ν_i, ε e τ_class fissati in Appendice Operativa, e con stime robuste per entropia, persistenza topologica e varianza di Φ.

Sono state dimostrate le proprietà fondamentali di ρ(t): limitazione in [0,1], invarianza rispetto al rilabeling dell'alfabeto, coerenza rispetto al tempo informazionale CMDE 4.1, compatibilità con la relazione unificata z(t), R(t), Φ(t) del problema P1 e con le classi topologiche delle traiettorie R(t) del problema P2, stabilità rispetto al rumore e ai dettagli di implementazione, e validità operativa su più domini (testi, immagini, biologia, coscienza).

La metrica ρ(t) viene quindi adottata come metrica ufficiale di coerenza informazionale all'interno della Fisica Informazionale, costituendo uno strumento canonico per la misura quantitativa della coerenza in contesti simbolici diversi ma unificati dal quadro CMDE 4.1 e dal Trattato Informazionale sulla Coscienza Universale R(t).