

Matematica applicata per la salute e i materiali del futuro

L'Istituto per le Applicazioni del Calcolo si occupa di matematica di base e applicata, sviluppa algoritmi innovativi per problemi complessi in ambito ambientale, biomedico, in fluidodinamica e computer graphics.

Calcolo scientifico • Computer graphics • Matematica applicata

La matematica applicata al CNR di Bari

L'Istituto per le Ricerche di Matematica Applicata (IRMA) iniziò la sua attività nel 1983, diretto dal professor Donato Trigiante e supportato da diversi Dipartimenti delle Facoltà di Scienze, Ingegneria, Medicina ed Economia e Commercio dell'Università di Bari. L'intento dell'Istituto era favorire l'utilizzo e lo sviluppo della matematica applicata e delle tecnologie informatiche in ambito scientifico. Fu infatti ritenuto importante favorire la crescita di tale settore scientifico in un istituto del Consiglio Nazionale delle Ricerche che avesse lo scopo di coltivare gli aspetti applicativi della matematica, interloquendo in modo continuo con la comunità scientifica locale e nazionale, con le industrie e con gli enti del territorio. La prima sede fu presso il Dipartimento di Matematica dell'Università di Bari.

Le attività scientifiche svolte presso l'IRMA hanno riguardato, tra l'altro, la modellistica matematica – analisi qualitativa e simulazione – nei sistemi biologici, in problemi ambientali, in chimica ed economia, nello sviluppo di tecniche dell'analisi numerica

Istituto per le Applicazioni del Calcolo

Dipartimento di Ingegneria, ICT e Tecnologie per l'Energia e i Trasporti

e dell'analisi statistica di dati sperimentali e nelle metodologie statistiche per dati spazialmente distribuiti.

Con la riforma della rete scientifica degli Istituti CNR del 2002, l'IRMA è confluito nell'Istituto per le Applicazioni del Calcolo (IAC), oggi diretto dal professor Roberto Natalini, con sede principale a Roma e sedi secondarie a Bari, Firenze e Napoli. Dopo la riforma, l'attività di ricerca dell'IAC-Bari ha riguardato anche altri temi, come argomenti di algebra lineare e le sue applicazioni all'elaborazione di dati e di immagini biomediche (ad esempio risonanza magnetica o tomografia assiale computerizzata) e all'analisi statistica e numerica di segnale di diffrazione; fluidodinamica a livello mesoscopico/nanoscopico e per flussi con transizioni di fase; sviluppo di metodi matematici per l'analisi dei sistemi naturali combinando modellistica differenziale con tecniche numeriche avanzate e analisi di dati.

L'organico della sede di Bari è composto da 9 ricercatori e 4 amministrativi. L'Istituto conduce da anni attività di ricerca in collaborazione con università italiane e straniere, enti di ricerca e aziende italiane ed estere, caratterizzate da aspetti sia teorici

che applicativi. Inoltre, la sede di Bari dell'IAC si caratterizza per un'intensa partecipazione a progetti regionali, nazionali ed europei, accompagnata da una produzione scientifica che contribuisce significativamente alla letteratura internazionale.

Modellistica matematica applicata: dal clima ai suoli, dagli incendi ai vigneti

Il riscaldamento globale, la perdita di biodiversità, il degrado dei suoli e l'aumento degli incendi ci mostrano quanto i sistemi naturali siano vulnerabili. Comprendere questi fenomeni richiede la capacità di rappresentare processi complessi e interdipendenti: qui la matematica offre linguaggi e strumenti preziosi. In questo ambito l'IAC-Bari sviluppa metodi matematici per l'analisi dei sistemi naturali, combinando modellistica differenziale, tecniche numeriche avanzate e analisi dei dati.

In questo ambito, la matematica applicata fornisce mezzi rigorosi e flessibili per affrontare i problemi articolati dell'ambiente e della sostenibilità.

Presso l'IAC si studiano modelli predittivi con applicazioni che spaziano dal degrado del suolo

Il riscaldamento globale, la perdita di biodiversità, il degrado dei suoli e l'aumento degli incendi ci mostrano quanto i sistemi naturali siano vulnerabili.

alla conservazione degli ecosistemi, integrando modellistica matematica, dati satellitari, conoscenza esperta e tecniche innovative. Si cura la formalizzazione di *workflow* di dati, modelli e servizi, contribuendo all'implementazione di infrastrutture digitali per l'integrazione, la gestione e la disseminazione di dati ambientali e di servizi a essi connessi.

Anche la gestione delle specie invasive e la conservazione della biodiversità viene affrontata attraverso modelli di controllo spazio-temporale, con l'integrazione di dati da telerilevamento per ottimizzare le azioni di contenimento [1].

Le interazioni tra incendi e proprietà della zona critica vengono investigate modellizzando come il fuoco alteri il sistema suolo-acqua-vegetazione e



Il telerilevamento è utilizzato per ottimizzare la conservazione della biodiversità.

influenzi il rischio di nuovi incendi. L'attività comprende anche lo sviluppo di modelli accoppiati per descrivere processi a diverse scale temporali e fornire strumenti predittivi per la gestione postincendio.

Presso lo IAC si valuta anche la diagnosi precoce dei vigneti mediterranei minacciati da infestazioni di insetti pungenti-succhiatori come la cicalina africana. In questo contesto vengono sviluppati modelli predittivi per simulare scenari di diffusione e per supportare interventi di mitigazione tempestivi e mirati. Vengono inoltre elaborati alcuni modelli di reazione-diffusione per descrivere i modelli spaziali del carbonio organico e l'organizzazione microbica nei suoli, con lo sviluppo di nuovi indicatori per comprendere come questi sistemi dinamici reagiscano a modifiche transienti [2, 3]. Si studiano anche i fenomeni intermittenti, acceso/spento, in modelli ecoepidemiologici con componenti stocastiche (casuali) e deterministiche [4, 5]. Si sviluppano metodi numerici avanzati per l'integrazione efficiente di sistemi dinamici complessi, come i metodi di conservazione dell'energia per algoritmi *Hamiltonian Monte Carlo* (HMC) [6].

Progettazione di algoritmi di algebra lineare per l'analisi statistica e numerica dei dati di segnale di diffrazione

L'IAC ha implementato un modello matematico basato su un'equazione di diffusione generalizzata per ridurre il rumore nei pattern bidimensionali di diffrazione di raggi X; tecnica che si usa per capire la struttura della materia, mostrando un miglioramento significativo nel rapporto segnale-rumore di picco e quindi nella determinazione della posizione degli atomi nello spazio.

Inoltre, l'algoritmo statistico noto come Analisi delle Correlazioni Canoniche, migliorato tramite



L'IAC studia anche tecniche per la risoluzione di problemi di computer graphics.

algoritmi di raggruppamento e identificazione di segnali modello, è stato applicato per segmentare (dividere) e classificare regioni in tessuti biologici – ad esempio collagene, cornea, vescicole lipidiche in gel, struttura atomica di fibre polimeriche – con implicazioni per la medicina rigenerativa.

Infine, nell'ambito della diagnostica avanzata, queste tecniche di segmentazione sono state applicate anche a micrografie acquisite con scansioni a raggi X per rilevare precocemente lesioni dovute a microcalcificazioni negli aneurismi dell'arteria addominale/aortica e poplitea, che si trova nella parte posteriore del ginocchio. La metodologia è applicabile anche allo studio di altri tessuti e a patologie associate alla microcalcificazione, come nel carcinoma tiroideo, nel tumore al seno, nella microlitiasi testicolare o nel glioblastoma.

Modellizzazione Lattice Boltzmann per l'isolamento del segnale

Un pattern di diffrazione a raggi X contiene sia informazioni rilevanti (il segnale) che rumore di fondo. Si può assumere che questi si comportino come due componenti di una miscela fluida, ciascuna con proprietà fisiche leggermente differenti legate ai gradienti di densità. A questi sistemi è stato applicato un metodo Lattice Boltzmann per separare le loro dinamiche diffusive distinte, studiare cioè come le due componenti si comportano nel fluido ipotetico. La soluzione è numericamente stabile, computazionalmente efficiente e migliora in modo significativo il rapporto segnale-rumore nei pattern affetti da rumore poissoniano e anomalie sperimentali come nel caso di campioni fibrosi o artefatti dell'apparato. Il modello è stato testato con successo su immagini con risoluzioni variabili.

Formule di quadratura associate a polinomi ortogonali multipli e applicazioni a problemi di computer graphics

In alcune applicazioni di computer graphics è necessario calcolare contemporaneamente diversi integrali pesati con stessa funzione integranda. L'obiettivo è minimizzare il numero di valutazioni della funzione integranda, massimizzando il grado di esattezza delle formule di quadratura utilizzate per approssimare gli integrali da valutare. Le tecniche proposte in letteratura non forniscono risultati accurati.

In tale contesto, l'IAC-Bari si è concentrato sullo studio di tecniche alternative per il calcolo delle suddette formule di quadratura, sviluppando metodi accurati e realizzando un pacchetto software *open source* dedicato [7, 8].

Riferimenti bibliografici

- [1] C.M. BAKER *et al.*, "Using remote sensing data within an optimal spatiotemporal model for invasive plant management: the case of *Ailanthus altissima* in the Alta Murgia National Park", *Scientific Reports*, 13, 1, 2023.
- [2] F. DIELE, I. LUISO, C. MARANGI, A. MARTIRADONNA, "SOC-reactivity analysis for a newly defined class of two-dimensional soil organic carbon dynamics", *Applied Mathematical Modelling*, 118, 2023, pp. 1-21.
- [3] A. MONTI, F. DIELE, D. LACITIGNOLA, C. MARANGI, "Patterns in soil organic carbon dynamics: Integrating microbial activity, chemotaxis and data-driven approaches", *Mathematics and Computers in Simulation*, 234, 2025, pp. 86-101.
- [4] F. DIELE, D. LACITIGNOLA, A. MONTI, "A. On-Off Intermittency and Long-Term Reactivity in a Host-Parasitoid Model with a Deterministic Driver", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 34, 2, 2024.
- [5] A. MONTI, F. DIELE, A. PROVENZALE, "On-off intermittency in population outbreaks: Reactive equilibria and propagation on networks", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 130, 2024.
- [6] C. TAMBORRINO, F. DIELE, C. MARANGI, C. TARANTINO, "Adaptive parameters tuning based on energy-preserving splitting integration for Hamiltonian Monte Carlo Method", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 137, 2024.
- [7] T. LAUDADIO, N. MASTRONARDI, P. VAN DOOREN, "Computational aspects of simultaneous Gaussian quadrature", *Numerical Algorithms*, 100, 2024, pp. 621-643.
- [8] T. LAUDADIO, N. MASTRONARDI, W. VAN ASSCHE, P. VAN DOOREN, "A Matlab package computing simultaneous Gaussian quadrature rules for multiple orthogonal polynomials", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 451, 1, 2024.