

Comportamentul colectiv și formarea modelului spațio-temporal în sistemele dinamice

Sinteza tezei

Rezumat

Comportamentul colectiv și formarea modelului pot apărea în sistemele aparent simple. Prezenta teză oferă o imagine de ansamblu a factorilor care conduc la apariția autoorganizării prin analizarea unuia dintre cele mai elementare modele care o ilustrează – oscilatoarele cuplate – și prin creșterea complexității acestuia pas cu pas. Chiar dacă modelul este unul teoretic, tendințele și tranzițiile descoperite explică diferența în privința tipului de sincronizare întâlnit la sistemele echivalente din lumea reală, cum ar fi metronoamele de pe o platformă comună în raport cu ceasurile cu pendul prinse de o grindă. Un alt model studiat este acela al unui sistem de agenți economici care comercializează mărfuri folosind graful Erdős-Rényi. În urma efectuării unor analize detaliate și a identificării limitelor parametrilor acestor sisteme am descoperit un număr de tendințe și tranziții de fază neobservate anterior care pot fi aplicate unei varietăți de probleme din lumea reală cu o mecanică similară.

Mulțumiri

Aș dori să îi mulțumesc coordonatorului tezei, domnului Zoltán Néda, pentru sfaturile prețioase acordate în domeniul autoorganizării, precum și pentru interesul și răbdarea de care a dat dovadă.

Aș dori, de asemenea, să le mulțumesc colaboratorilor și colegilor care au lucrat alături de mine pe parcursul activității de cercetare și care mi-au împărtășit punctele lor de vedere: Botond Tyukodi, Szeréna Ujvári, Szilárd Boda, Sándor Borbély, lect. dr. Zsolt Lázár, Szabolcs Horváth și Gabriel Istrate.

Aș dori să aduc mulțumiri familiei mele pentru că a crezut în mine și pentru sprijinul pe care mi l-a acordat.

Imaginea de ansamblu și motivația cercetării

Tema autoorganizării spontane reprezintă un domeniu științific transdisciplinar vast care cuprinde un număr mare de teme de cercetare. Aplicațiile acestora se întind de la matematica pură la fizica particulelor sau biologie, de la calculul paralel la sociologie și psihologie. În general, de fiecare dată când avem de-a face cu un sistem de agenți independenți multipli sau cu obiecte care interacționează, vorbim despre autoorganizare.

Autoorganizarea spontană sau emergentă este cunoscută de sute de ani, mai ales din observarea sistemelor mecanice simple cum ar fi ceasurile cu pendul. Cea mai mare provocare în studierea unui astfel de tip de autoorganizare este aceea că majoritatea sistemelor compuse din mai mulți agenți nu sunt – din punct de vedere analitic – rezolvabile, necesitând un volum

enorm de calcul. Iată de ce această temă a devenit populară numai după inventarea calculului paralel.

Astăzi, domeniul cunoaște o explozie de popularitate în rândul comunității științifice atât datorită complexității sale, cât și a diversității aplicațiilor. Fie că dorim să studiem dinamica unui roi de insecte, mișcarea atomilor într-o moleculă ori sincronizarea metronoamelor cuplate, există modele comune și tranziții de fază care rezultă din proprietățile matematice și fizice ale acestor sisteme. Scopul prezentei teze este acela de a observa aceste modele și tranziții comune în modelele simple și de a analiza factorii care le infleuțează.

Activitatea de cercetare a început cu analiza celui mai simplu model care prezintă o autoorganizare spontană, adică două oscilatoare cuplate pe același substrat. În continuare, am crescut gradual complexitatea sistemului și am constatat în timpul monitorizării diferiților parametri și a tipurilor de sistem apariția unor noi comportamente. Deși concluziile noastre sunt pur teoretice, acestea pot fi aplicate unei varietăți de probleme din lumea reală constând în elemente interdependente pentru găsirea condițiilor de apariție a autoorganizării, dar și pentru realizarea sau evitarea unor astfel de comportamente.

Abordare și metodologie

Instrumentul primar al cercetării noastre este simularea pe calculator. Fiecare sistem analizat este modelat în *Mathematica* datorită multiplelor funcții implementate, a paralelizării automate, ca și a simplității vizualizării prin utilizarea respectivului software. Ecuațiile sunt rezolvate pe cale analitică atunci când este posibil, însă ecuațiile neliniare mai complexe sunt rezolvate pe cale numerică. Pentru sistemele care simulează un număr mare de agenți interdependenți am utilizat metoda Monte Carlo și metoda dinamicii moleculare.

Pentru ca rezultatele să fie în continuare bazate pe realitate, am comparat rezultatele simulării noastre cu studiile experimentale ale altor cercetători din grupul nostru în cazul unor sisteme echivalente, precum și cu ale altor cercetători din întreaga lume.

Structura tezei

Primul capitol intitulat „Autoorganizarea: aspecte generale” urmează unei introduceri generale și include o scurtă prezentare a temei autoorganizării, a teoriei bifurcației, a teoriei haosului și a formării modelului, toate acestea fiind necesare înțelegerii contextului cercetării din prezenta teză; de asemenea, capitolul conține o privire de ansamblu a altor lucrări semnificative publicate în domeniu.

Capitolul „Oscilatoarele mecanice cuplate” deschide corpul principal al tezei, capitol în care am analizat un sistem de două oscilatoare identice conectate la o platformă comună. Am plecat de la un sistem ideal și ne-am apropiat de realitate prin adăugarea unor elemente ca forța și amortizarea. În continuare, am comparat rezultatele obținute cu rezultatele experimentale ale altor grupuri de cercetători care au studiat sistemele cu metronoame sau cu ceasuri cu pendul.

Capitolul „Oscilatoarele neidentice multiple” dezvoltă și mai mult tema sistemului de oscilatoare cuplate. Ce-ar fi dacă ar exista mai mult de două oscilatoare pe o platformă

comună? Ce-ar fi dacă ar varia frecvențele lor naturale? Am aruncat o privire asupra rezultatelor teoretice și asupra modelului experimental al metronoamelor aflate pe o platformă rotativă și am descoperit câteva puncte ale tranziției de fază în limitele parametrilor.

În capitolul „Oscilatoarele cuantice cuplate” se transferă sistemul oscilator la nivel cuantic. Astfel, oscilatoarele și platforma sunt acum obiecte cuantice. Cu toate că am descoperit că au un comportament asemănător cu cel al oscilatoarelor clasice ideale, există unele diferențe cauzate de efectele cuantice.

Capitolul „Jocul falimentului pe rețele” schimbă subiectul, trecând de la oscilatoare la jocul falimentului mai multor agenți jucători unde aceștia – reprezentați printr-un graf – negociază. Acesta este un exemplu al unui alt tip de sisteme care se autoorganizează, dar care arată, de asemenea, atât formarea modelului, cât și tranzițiile de fază.

Concluzii

Am analizat câteva sisteme de complexitate variabilă care prezintă o autoorganizare spontană și am descoperit condițiile pentru tranzițiile de fază în fiecare dintre acestea. De asemenea, la sistemele de oscilatoare cuplate am descoperit modele temporale care există doar între anumite limite ale parametrilor, cum ar fi sincronizarea completă, sincronizarea în antifază și oscilațiile cvasiperiodice. În jocul falimentului am descoperit modele spațiale care se manifestă într-un anumit număr de noduri ce absorb, la final, capitalul, precum și repartiția exponențială între acestea a capitalului, independent de topologia specială a grafurilor. Aceste rezultate sunt suficient de generale pentru a fi remarcate la sistemele echivalente de natură biologică, fizică sau electronică și, probabil că într-o zi, vor putea ajuta la înțelegerea, estimarea și modelarea comportamentului sistemelor reale care se autoorganizează, cum ar fi organismele multicelulare, rețelele neuronale, comportamentele coloniilor de animale și multe altele.

Contribuții științifice

Publicații privind teza:

1. Néda, Z., Davidova, L., Ujvári, S., Istrate, G., 2017. "Gambler's Ruin Problem on Erdős-Rényi Graphs" în *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 468, p. 147-157.

Am programat simularea pe calculator necesară cercetării și am derivat ecuațiile pentru abordarea sistemului din punctul de vedere al evoluției în timp; am contribuit, de asemenea, la revizia și la redactarea manuscrisului.

2. Davidova, L., Borbély, S., Néda, Z., 2015. "Collective Behavior of Coupled Quantum Mechanical Oscillators" în *Studia Universitatis Babeș-Bolyai, Physica*, 60 (1).

Am avut ideea de a studia acest sistem și am desfășurat toată activitatea legată de programare și de analiză a rezultatelor.

3. Davidova, L., Boda, Sz., Néda, Z., 2014. "Order-disorder Transitions in a Minimal Model of Self-sustained Coupled Oscillators" în *Romanian Reports in Physics*, 66 (4), p. 1018-1028.

Am condus multe simulări pe calculator cu privire la sistemul oscilatoarelor cuplate și am descoperit potențiale noi efecte ale sincronizării ca funcție a parametrilor de sistem.

4. Boda, S., Davidova, L., Néda, Z., 2014. "Order and Disorder in Coupled Metronome Systems" în *The European Physical Journal Special Topics*, 223 (4), p. 649-663.

Am contribuit cu sugestii conform cărora anumiți parametri de sistem pot avea efecte interesante asupra dinamicii sistemului și am ajutat la simulările pe calculator.

5. Davidova, L., Ujvári, Sz., Néda, Z., 2014. "Sync or Anti-sync – Dynamical Pattern Selection in Coupled Self-sustained Oscillator Systems" în *Journal of Physics: Conference series* (vol. 510, nr. 1, p. 012009). IOP Publishing.

Am realizat toate simulările pe calculator pe durata activității de cercetare, precum și analiza rezultatelor.