

Modelarea bazată pe agenți (MBA) și utilizarea ei în domeniul economic

Nora Mihail

Profesor universitar doctor
Academia de Studii Economice București

Abstract. *The last ten years of the XX century has been the witnesses of the apparition of a new scientific field, which is usually defined as the study of “Complex adaptive systems”. This field, generic named Complexity Sciences, shares its subject, the general proprieties of complex systems across traditional disciplinary boundaries, with cybernetics and general systems theory.*

But the development of Complexity Sciences approaches is determined by the extensive use of Agent-Based-Models (ABM) as a research tool and an emphasis on systems, such as markets, populations or ecologies, which are less integrated or “organized” than the ones, such as companies and economies, intensively studied by the traditional disciplines.

For ABM, a complex system is a system of individual agents who have the freedom to act in ways that are not always totally predictable, and whose actions are interconnected such that one agent’s actions changes the context (environment) for other agents. These are many examples of such complex systems: the stock market, the human body immune system, a business organization, an institution, a work-team, a family etc.

Key words: Complexity Sciences; Agent-Based-Models; dynamic proprieties; real modeled systems; system behaviour.

1. Ce sunt modelele bazate pe agenți?

A-life este numele unui domeniu de cercetare multidisciplinară care încearcă să dezvolte modele pentru a demonstra cum cresc și evoluează organismele vii.

Se speră că prin acest mod se va pătrunde mai adânc în cunoașterea naturii vieții organice și se vor înțelege mai bine procesele aflate la originea vieții. A-life a stimulat apariția unor noi metode în cibernetică. Termenul de „a-life” a fost introdus de Christopher Langton, care a organizat prima conferință despre a-life la Santa Fe ca în 1987. Aceasta nu înseamnă că studii similare, sub diferite nume, nu ar fi apărut înainte de 1980.

De fapt, doi savanți au avut cercetări teoretice similare, părintele teoriei automatelor, John von Neumann, matematician celebru și pionier al științei calculatoarelor, și matematicianul polonez Stanislan Ulam, care, spre sfârșitul anilor '50, au început să exploreze natura

automatelor celulare. Intenția lor era să aplice aceste teorii în studii privind creșterea, dezvoltarea și reproducerea ființelor vii. Aceste celule matematice pot fi utilizate pentru a simula procese fizice, biologice și economice prin supunerea celulelor unei mulțimi simple de reguli care se aplică în mod repetat (de exemplu, fiecare celulă își schimbă culoarea în raport cu regulile respective și cu culorile celulelor vecine).

Von Neumann și Ulam au arătat că, prin utilizarea unui set de reguli destul de simple, este posibil ca o configurație de celule să revină la configurația inițială (de exemplu la culorile inițiale), ceea ce înseamnă că ele s-au „reprodus”. Aceste automate celulare apar sub forma unor latices de celule. Fiecare celulă este caracterizată prin valori specifice care pot fi schimbate în raport cu regulile fixate. O nouă culoare a celulei este determinată pe baza valorii sale

curente și a valorilor vecinilor imediați. Astfel de automate celulare formează forme, se reproduc și mor.

Langton a utilizat lucrările lui von Neumann ca punct de plecare pentru a proiecta un sistem a-life care poate fi simulat pe un calculator. În 1979 el a dezvoltat un „organism” care avea proprietăți asemănătoare organismelor vii. Această creatură se reproducea singură într-un mod care, cu fiecare generație nou apărută, ducea mai departe proprietățile organismului inițial, dar apăreau și noi proprietăți. Astfel de comportament simula, deci, procesul de mutație și evoluție din organisme vii.

Economistul Thomas Schelling a fost unul din primii cercetători care a încercat să aplice metodele a-life în științele economice. El a creat o lume artificială utilizând nu un calculator, ci o masă de șah pe care monede de diferite dimensiuni se mișcau pe baza unor reguli simple. În acest mod, el a creat o lume artificială (virtuală) și a arătat că, pe lângă alte proprietăți, o are și pe aceea că chiar și preferințe foarte slabe pentru a locui și lucra într-o anumită parte a mesei conduc la diferențe mari între indivizi (monede).

Pornind de aici, au apărut modelele bazate pe agenți (MBA). Biologul Tom Ray a creat programe „agent” pe laptop-ul său. Scopul fiecărui agent era să facă o copie a lui însuși în memorie. Ray a presupus un timp de viață finit pentru fiecare program. El a lăsat programele să ruleze toată noaptea și dimineața a observat că agenții săi erau angajați în activități echivalente digital cu competiția și colaborarea. Când agenții-programe realizau copii ale lor în calculator, schimbau aleatoriu codul apărut. Astfel, se poate spune că ei sufereau mutații distructive care duceau la „moartea” programelor, dar unele schimbări făceau un agent să-și îndeplinească mai bine sarcina, în sensul că ei aveau nevoie de mai puține instrucțiuni și erau capabili să se autocopieze mai rapid, mai sigur și să ruleze mai repede. Versiunile mai scurte se reproduceau și mai repede și, foarte curând, îi înlăturau pe „competitorii” lor mai lenți.

Metoda a-life a generat „modelarea bazată pe agenți”, care este denumită în acest fel pentru a face distincția comparativ cu „modelarea bazată pe ecuații”. Putem scrie, de exemplu, ecuații diferențiale pentru a modela interacțiunile dintr-o populație de indivizi (de exemplu modelul Lotka-Volterra), dar putem la fel de bine să urmărim evoluția individuală a fiecărui animal (element, agent) și să concentrăm această evoluție în anumite caracteristici agregate. Aceste două metode sunt esențial diferite și este dificil acum să spunem care este mai bună.

Cercetările actuale în MBA sunt orientate către identificarea comportamentelor individuale ale ființelor vii și apoi către utilizarea acestora pentru a simula cum „se mișcă, zboară, și cooperează” fără să încorporeze aceste caracteristici în mod explicit în tipurile de comportament al acestor elemente. Multe creaturi a-life constau în nu mai mult decât câteva linii de program și trăiesc în medii artificiale compuse din pixeli și mulțimi de date. Rețeta pentru a realiza o astfel de creatură este destul de simplă:

se pregătește un mediu în care experimentele sintetice vor acționa, se creează câteva sute de indivizi care vor popula acest mediu și se definește un set de reguli pe care aceștia le vor urma. Se încearcă să se simplifice problema cât mai mult posibil pentru a păstra doar esențialul. Se scrie un program care simulează regulile simple ale interacțiunilor în comportamentele elementelor. Se rulează programul de multe ori cu diferite numere aleatoare așteptând să înțelegem cum reguli simple dau naștere la comportamentul observat. Se localizează sursa de comportament și efectele diferiților parametri. Se simplifică simularea cât mai mult posibil sau se adaugă elemente adiționale dacă este necesar.

De fapt se rezolvă o ecuație simplă:

Agenți (entități micro) + Mediu + Dinamică = A-life

2. Ce sunt totuși agenții?

Carl Hewitt, un mare specialist în IA, spunea că a răspunde la întrebarea „Ce este un agent?” echivalează cu a răspunde la întrebarea „Ce este inteligența?”. Acest lucru nu trebuie să fie, totuși, o problemă. Sunt rare acele domenii științifice în care există o singură definiție unanim acceptată a unui concept. Totuși, pentru ca termenul de „agent” să nu devină subiect de abuz, trebuie date anumite definiții.

Se pot distinge în literatură două utilizări generale ale conceptului de „agent”: una în sens larg și una în sens restrâns.

Notiunea de „agent” în sens larg

Probabil că cel mai general sens în care un agent este utilizat este cel de sistem de calcul care are următoarele proprietăți:

- *autonomie*: agenții operează fără intervenția directă a oamenilor sau a altor sisteme și au un anumit tip de control asupra acțiunilor proprii și stării interne;
- *abilitate socială*: agenții interacționează cu alți agenți (și posibil oameni) utilizând un anumit limbaj de comunicare – agent;
- *reactivitate*: agenții percep mediul înconjurător (care poate fi realitatea fizică, un utilizator prin intermediul unei interfețe grafice, o mulțime de alți agenți, INTERNET sau combinații ale acestora) și răspund într-o modalitate anumită la schimbările ce au loc în el;
- *proactivitate*: agenții nu acționează simplu doar ca răspuns la mediul înconjurător; ei sunt capabili să execute comportamente orientate către realizarea unor scopuri, având inițiativă proprie.

Notiunea de „agent” în sens restrâns

Uneori termenul de „agent” are un înțeles mai strict și mai specific. Acest sens apare atunci când notiunea se folosește în IA, de exemplu.

Se înțelege prin agent un sistem de calcul care, pe lângă proprietățile identificate mai sus, este conceptualizat sau implementat utilizând concepte care sunt mai obișnuit să fie aplicate oamenilor.

De exemplu, este destul de comun în IA să se caracterizeze un agent utilizând noțiuni mentale, cum ar fi cunoașterea, convingerea, intenția și obligația.

Unii cercetători merg mai departe vorbind de *agenți emoționali*.

Alte atribute cu care pot fi înzestrați agenții considerați în sens restrâns, depinzând de domeniul de utilizare, sunt:

- *mobilitate*: este abilitatea unui agent de a se mișca într-o rețea electronică;
- *veracitate*: este ipoteza că agenții nu comunică informații false;
- *bunăvoința*: este ipoteza că agenții nu au scopuri conflictuale și că fiecare agent va face întotdeauna ceea ce i se cere;
- *raționalitatea*: este ipoteza că un agent va acționa pentru a-și atinge scopurile și nu va întreprinde nimic care să primejduiască atingerea acestora;
- *inteligența*: este ipoteza că un agent acționează similar unei ființe inteligente.

3. Cum se construiește un MBA?

Nimeni nu cunoaște cel mai bun mod de a construi MBA. Diferite arhitecturi (deci proiecte) au merite depinzând de scopul simulării. Desigur că fiecare MBA trebuie să includă mecanisme pentru primirea inputurilor din mediu, pentru stocarea unei istorii privind inputurile și acțiunile precedente, pentru determinarea a ceea ce este de făcut, pentru realizarea acțiunilor și pentru distribuirea outputurilor. Arhitecturile de agenți pot fi împărțite în cele care sunt realizate utilizând paradigma simbolică a AI și metode nonsimbolice, cum ar fi cele bazate pe rețele neuronale. În plus, există MBA hibride (Kluver, 1998).

Tehnici pentru construirea agenților

a) Sisteme de producție

Una din cele mai simple, dar eficiente metode de construire a MBA este utilizarea unui sistem de producție. Un sistem de producție are trei componente:

- o mulțime de reguli;
- o memorie de lucru;
- un interpretator al regulii.

Regulile constau din două părți: o condiție care arată când regula va fi executată și o parte de acțiune.

De exemplu, un agent poate fi proiectat să se plimbe într-un mediu simulat colectând orice mâncare pe care o întâlnește în drumul său. Un astfel de agent poate să includă o regulă care spune: DACĂ eu dau de o anumită mâncare ATUNCI o adun. Aceasta ar fi una din multele reguli, fiecare cu o condiție diferită. Unele reguli vor include acțiuni care însușează fapte ce se petrec în

memoria de lucru și alte reguli vor avea condiții care testează stări ale memoriei de lucru.

Interpretatorul de reguli consideră fiecare regulă la rând, alege pe cele pentru care partea de condiție este îndeplinită, execută acțiunile indicate și repetă acest ciclu de un număr nedefinit de ori. Reguli diferite pot fi executate la fiecare ciclu deoarece mediul imediat s-a schimbat sau deoarece o regulă a modificat memoria de lucru într-un astfel de mod încât o nouă regulă a devenit eligibilă. Utilizând un sistem de producție este relativ ușor să construiești agenți reactivi care răspund la stimuli din mediu prin anumite acțiuni. Este, de asemenea, posibil, dar mai dificil să construiești agenți care au capacitatea să reflecte acest mediu prin decizii și, deci, să modelezi cunoașterea. O altă posibilitate este să construiești agenți care își schimbă propriile reguli utilizând un algoritm adaptiv care favorizează regulile ce generează acțiuni relativ eficiente și le penalizează pe celelalte. Aceasta este baza *sistemelor clasificatoare*.

b) Învățarea

Agenții bazați pe sisteme de producție au potențialul să învețe despre mediul lor și despre alți agenți prin adăugarea unor cunoștințe în memoria de lucru. Regulile agenților înșiși, totuși, rămân neschimbate. Pentru anumite probleme, este de dorit să se creeze agenți care sunt capabili să învețe: deci structura internă și prelucrarea regulilor să se adapteze la circumstanțe schimbătoare. Există două tehnici care se utilizează în acest sens: *rețelele neuronale și algoritmii evolutivi*. Rețelele neuronale sunt inspirate din analogia cu conexiunile din creier. O rețea neuronală constă din trei sau mai multe straturi de neuroni cu fiecare neuron conectat la toți ceilalți neuroni de pe straturile adiacente. Primul strat acceptă inputuri din mediu, le prelucreză și le trece următorului strat. Semnalul este transmis prin straturi până când ajunge la stratul de ieșire. Fiecare neuron acceptă inputuri de la stratul precedent, ajustează inputurile cu ponderi pozitive și negative, le însumează și transmite semnalul mai departe. Utilizând un algoritm denumit backpropagare a erorii, rețeaua poate fi reglată astfel încât fiecare model de input să dea naștere la un model diferit de output. Acest lucru este făcut prin antrenarea rețelei cu exemple cunoscute și ajustând ponderile până sunt generate outputurile dorite, dându-se inputuri particulare. Spre deosebire de sistemul de producție, o rețea neuronală poate modifica răspunsurile sale la stimuli în lumina experienței anterioare. Un număr de topologii de rețele au fost utilizate pentru a modela agenți astfel încât ei să fie capabili să învețe din acțiunile lor și din răspunsurile celorlalți agenți.

Un alt mod de a permite unui agent să învețe este utilizarea unui algoritm evolutiv. Aceștia sunt bazați pe analogia cu biologia, decurgând din teoria evoluției prin selecție naturală. Cel mai frecvent utilizat algoritm de acest tip este algoritmul genetic (GA).

Acesta lucrează cu o populație de indivizi, fiecare dintre ei având un anumit nivel măsurabil de „fitness” utilizând o metrică definită de constructorul de model.

Indivizii cei mai adaptați sunt „reproduși” prin înmulțire cu alți indivizi adaptați pentru a produce urmași care împart caracteristici luate de la fiecare părinte.

Înmulțirea continuă mai multe generații, având drept rezultat că fitnessul mediu al populației crește pe măsură ce populația se adaptează la mediul său.

Atât în cazul utilizării rețelelor neuronale, cât și al algoritmilor genetici, constructorul de modele trebuie să ia o decizie privind scala la care vrea ca modelul să lucreze. De exemplu, în cazul modelelor genetice, este posibil să se considere întreaga populație ca un singur agent. Algoritmul genetic va fi atunci o „cutie neagră” utilizată pentru a da agentului abilitatea să învețe și să se adapteze. Alternativ, fiecare individ poate fi un agent având ca rezultat că vom avea o populație de agenți privită ca un întreg care evoluează. Similar, este posibil ca fiecare agent individual să fie modelat utilizând o rețea neuronală sau o întreagă societate (economie) să fie reprezentată ca o rețea, cu fiecare neuron dându-i-se o interpretare ca agent (deși, în ultimul caz, este greu să construim toate atributele agenților).

Agenții și mediul

Agenții sunt aproape întotdeauna modelați ca funcționând într-un mediu social constând dintr-o rețea de interacțiuni cu alți agenți.

Uneori este, totuși, util pentru model să se specifice un mediu fizic care impune anumite restricții privind localizarea agenților. Ipoteza uzuală constă în faptul că este mult mai probabil ca agenții apropiați să interacționeze sau să fie capabili să se influențeze unul pe altul decât cei îndepărtați.

Modelele de acest tip se construiesc utilizând, de regulă, automatele celulare. Am văzut că un automat celular este format dintr-un număr de celule așezate într-o arie regulată (latice), fiecare dintre ele având un număr mic de stări. Starea unei celule este determinată de un set de reguli simple și depinde doar de starea celulelor vecine și de propria sa stare. Automatele celulare au fost studiate intensiv în ultima vreme din perspectiva utilizării lor în modelele bazate pe agenți. Deși au la bază reguli și mecanisme simple de determinare a stării celulelor, aceleași principii se regăsesc în mecanismele complexe, astfel că celulele reprezentând agenți și mediul lor ca un întreg pot fi utilizate pentru a reprezenta diferite sisteme economice sau sociale complexe.

O altă modalitate utilizată în reprezentarea mediului în MBA o reprezintă crearea de organizații ierarhice emergente (agenții). Acestea sunt grupuri de agenți care au proprietăți emergente. Termenul de „proprietate emergentă” înseamnă că ele apar spontan din dinamica sistemului mai degrabă decât impuse de o autoritate

externă. Ordinea observată specifică a unei firme sau a unei specii animale cu fazele sale inițiale, de maturitate și declin, emerge din agregarea unui mare număr de indivizi acționând singuri și independent. În acest sens, trebuie amintită *teoria cooperării*, dezvoltată în ultimii ani de Axelrod, a cărei problemă fundamentală este să studieze cum cooperează un individ (agent) aflat într-un grup (agenție). Modelele propuse în cadrul acestei teorii ne ajută să înțelegem mai bine raporturile între agenți și mediu. Utilizarea unor jocuri cum ar fi *Dilema Prizonierului* sau *Jocul Minorităților* în aceste modele le aproprie foarte mult de problematica decizională din economie.

4. Aplicații ale modelelor bazate pe agenți

Aplicațiile agenților și modelelor bazate pe agenți sunt extraordinar de diversificate în privința domeniilor abordate: economic, industrial, comercial, financiar, militar, informatic ș.a.

În economie s-a constituit un domeniu nou ce se ocupă exclusiv cu studiul aplicării agenților în rezolvarea diferitelor tipuri de probleme economice, domeniu denumit *Economia bazată pe agenți*. Scopul acesteia derivă din A-life: crearea de economii artificiale cu ajutorul unor interacțiuni economice între agenți care la început nu au cunoștințe despre mediul înconjurător, dar au abilitatea de a învăța și apoi se observă ce tipuri de piețe, instituții și tehnologii dezvoltă agenții, cum își coordonează ei acțiunile și cum se organizează ei înșiși într-o economie.

Economiile de piață sunt privite ca sisteme adaptive complexe, constând dintr-un mare număr de agenți adaptivi întreținând interacțiuni paralele locale. Aceste interacțiuni locale dau naștere anumitor regularități macroeconomice cum ar fi protocoale de împărțire a pieței și norme de comportament care, la rândul lor, au o reacție inversă asupra determinării interacțiunilor locale. Rezultatul este un sistem dinamic complicat de lanțuri cauzale recurente, conectând comportamente individuale, rețele de interacțiuni și rezultate sociale.

Desigur că acest dublu feedback între nivelul micro și cel macroeconomic este cunoscut în cibernetica economică de mult timp. Ceea ce a lipsit până acum au fost mijloacele ca acest feedback cantitativ să fie modelat în întreaga sa complexitate dinamică. Economia bazată pe agenți ca metodă de studiu a economiilor modelate ca sisteme evolutive formate din agenți autonomi interactivi aduce sistemul economic în laboratoare, pentru a studia evoluția economiilor de piață descentralizate în condiții experimentale controlate. Două aspecte fundamentale decurg din aceste studii.

Primul aspect este descriptiv, axat pe explicarea constructivă a comportamentului global emergent. De ce apar regularități globale în aceste economii în ciuda unei planificări și a unui control de sus în jos? Cum sunt generate de jos în sus, aceste regularități globale, prin

interacțiunile locale repetate dintre agenți interacționând autonom? Și cum de apar aceste regularități și nu altele?

Al doilea aspect este normativ, axat pe proiectarea de mecanisme de reglare și control. Dându-se o entitate economică particulară, existentă sau virtuală, care sunt implicațiile acestei entități pentru performanțele economiei ca un întreg? De exemplu, cum poate afecta un protocol de piață anumit sau o reglementare guvernamentală eficiența economică?

În laboratorul experimental se începe cu construirea unei economii virtuale cu o populație inițială de agenți. Acești agenți pot include atât agenți economici (de exemplu: investitori, bănci etc.), cât și agenți reprezentând diferite fenomene sociale sau din mediu (de exemplu guvernul, pământul, vremea etc.). Starea inițială a economiei este determinată prin specificarea atributelor inițiale ale agenților. Atributele inițiale ale unui agent pot include caracteristici asupra tipului de agent, norme comportamentale internalizate, moduri interne de comportament (inclusiv modul de comunicare și învățare) și informația stocată intern despre sine și despre ceilalți agenți din economie. Economia evoluează apoi în timp, fără alte intervenții din afară. Toate evenimentele care apar ulterior trebuie să decurgă din interacțiunile agent-agent care au loc în timpul simulării. Nicio coordonare exterioară nu este permisă. Rezultatele obținute sunt utilizate pentru a modifica constructiv sistemele economice reale sau a crea, pornind de la sistemele virtuale, noi sisteme economice care au performanțe superioare.

Se observă similitățile dintre construirea unei economii bazate pe agenți și metoda a-life. Totuși există o deosebire fundamentală între cele două domenii. Dacă a-life consideră modelele sale ca o *sinteză* a lumii vii pe calculatoare, mașini sau alte medii alternative, economia bazată pe agenți privește modelele sale ca reprezentări ale proceselor economice existente sau virtuale realizate în scopul perfecționării acestora. Direcțiile principale în care s-au dezvoltat în ultima perioadă aplicațiile economiei bazate pe agenți pot fi considerate următoarele:

- Învățarea;
- Evoluția normelor de comportament;
- Modelarea „bottom-up” a proceselor economice de piață;
- Formarea rețelelor economice;
- Modelarea organizațiilor;
- Proiectarea agenților pentru piețe automatizate;
- Experimente paralele cu agenți reali și computaționali;
- Construirea de laboratoare computaționale.

Să trecem în revistă câteva dintre realizările obținute în domeniile amintite.

Învățarea

Învățarea este o caracteristică de bază a agenților economici. Primele aplicații ale proceselor de învățare în

economie au fost cele ale algoritmilor genetici, programării genetice și ale altor forme de învățare evolutivă în modelarea proceselor sociale.

Mulți astfel de algoritmi de învățare s-au dezvoltat inițial având formulate obiective de optimizat. Pentru MBA, algoritmi de învățare sunt motivați de necesitatea utilizării unor scheme de învățare globală în care strategiile agenților sunt îmbunătățite continuu pentru a realiza un anumit criteriu exogen de „fitness” (de exemplu eficiența pieței). Pe de altă parte, pentru modelele proceselor economice cu participanți umani, algoritmi de învățare utilizați în MBA vor fi necesari pentru a încorpora caracteristici fundamentale ale comportamentului decidenților umani. În astfel de cazuri, se pot utiliza scheme de învățare locale în care diferite „vecinătăți” de agenți (cum ar fi firmele în cadrul unei industrii) evoluează în mod separat conform unor strategii care sunt învățate pe măsură ce criteriul de fitness este îndeplinit (de exemplu, profitabilitatea relativă a firmei).

Într-un studiu recent, Daniol abordează performanțele algoritmilor de învățare în diferite contexte economice. El dovedește utilitatea deosebită a algoritmilor genetici utilizați în implementarea strategiilor individuale de evoluție. El a arătat că aspectele particulare ale implementării cum ar fi configurația precisă a valorilor date parametrilor pot influența puternic rezultatele potențiale pe termen lung. Această lucrare a avut un impact substanțial asupra cercetărilor în domeniul MBA deoarece algoritmi genetici au fost utilizați tot mai mult pentru reprezentarea învățării la agenții economici.

De asemenea, un studiu al lui Rust ș.a. a avut o influență mare în acest domeniu. El face o analiză comparativă a algoritmilor utilizați în licitația dublă continuă pe piețele valutare. Licitatia dublă continuă este o licitație pentru unități standardizate de activ real sau financiar în care ofertele de cumpărare și vânzare sunt efectuate și ajustate continuu. Astfel de licitații duble au loc pe bursele cele mai mari din lume, Chicago, New York și Tokio. S-a arătat că eficiența alocativă a acestui tip de licitație decurge din structura sa, independent de efectele de învățare. Mai precis, s-a arătat că, în acest caz, nivelurile de eficiență ale pieței apropiate de 100% sunt atinse chiar dacă agenții au o „inteligentă zero”, deci ei acționează în mod aleatoriu, având în vedere doar restricția bugetară.

Evoluția normelor de comportament

Conceptul de „normă” este foarte important în MBA, deoarece, pornind de la acestea, definim regulile după care agentul se comportă. Axelrod arată că „o normă” există într-un context social dat pentru a determina indivizii să acționeze în mod obișnuit într-un anumit fel și a-i pedepsi când nu acționează în acest fel.

Procesul de apariție, creștere și decădere a normelor este un proces evolutiv. Utilizând MBA, Axelrod a demonstrat că cooperarea reciprocă poate evolua chiar în

cazul unor agenți egoiști care nu au relații stabile de cooperare. Cartea sa „Teoria cooperării”, scrisă în 1997, a avut un impact major asupra cercetărilor în domeniul agenților.

Alte cercetări în acest domeniu care au influențat profund pe economiști sunt cele ale lui Thomas Schilling. Utilizând exemple obișnuite, fără utilizarea unui aparat matematic sofisticat, el a arătat că comportamentul social poate apărea ca o consecință a unor interacțiuni locale repetate între agenții care urmează reguli de comportament simple. De exemplu, el a arătat că segregarea rasială poate apărea ca urmare a unor reacții în lanț locale dacă unii agenți preferă să aibă cel puțin jumătate dintre agenții învecinați de aceeași rasă cu ei.

Modelarea „bottom-up” a proceselor economice de pe piață

Proprietățile autoorganizatoare ale piețelor sunt recunoscute. MBA a studiat diferite tipuri de piețe: financiară, a electricității, a muncii, cu amănuntul, a resurselor naturale, e- comerțul ș.a. pentru a explica aceste mecanisme de piață.

Robert Marks este unul dintre primii cercetători din domeniu care a abordat aceste probleme. Mai precis, el a considerat o piață oligopolistă pentru a studia cum firmele vânzătoare (care sunt în număr mic pe astfel de piețe) pot concura cu succes. Modelul său utilizează un algoritm genetic pentru a reprezenta firma în procesul de învățare interactivă. Astfel, operații de mutații și recombinații au fost aplicate în mod repetat strategiilor de determinare a prețurilor utilizate de firme astfel încât să permită firmelor să experimenteze noi idei (mutație) și să se angajeze în imitația socială (recombinație), obținând astfel strategii ce pot fi utilizate în mod profitabil de firme.

Piețele financiare au constituit, de asemenea, un domeniu de mare interes al aplicațiilor MBA. Modelele piețelor financiare au oferit explicații plauzibile unor regularități observate pe astfel de piețe. Piața bursieră artificială construită de Arthur ș.a. la Institutul Santa Fe, Ca., SUA a permis testarea unor modele cu agenți eterogeni care își actualizează prețurile individual și iau decizii pe baza unor sisteme de clasificare a volatilităților observate.

LeBaron a elaborat modele din ce în ce mai perfecționate ale regularităților observate pe piețe. El calibrează aceste modele în funcție de evoluția datelor macroeconomice și a datelor financiare. Toți investitorii utilizează performanțele obținute în trecut pentru a-și evalua performanțele actuale, dar investitorii respectivi se presupune că au memorie de diferite lungimi. Un algoritm genetic este utilizat pentru a reprezenta coevoluția unei colecții de reguli disponibile agenților.

Piețele valutare au fost, de asemenea, studiate intens de MBA. Izumi și Ueda propun o nouă metodă bazată pe agenți pentru a modela o astfel de piață. Agenții din model concurează unii cu alții pentru a dezvolta metode de

previziune a schimbărilor în ratele de schimb valutar, având drept măsură a fitnessului profitabilitatea.

Chen și Yeh arată că învățarea socială sub forma unor strategii de imitare este importantă pe piețele bursiere. Ei construiesc un model de analiză a piețelor bursiere care include un mecanism suplimentar de învățare, numit „școală”. Aceasta constă dintr-un grup de agenți (de exemplu, membrii unei facultăți) care concurează unul cu altul pentru a oferi publicului cel mai bun posibil model de previziune a evoluției cursului acțiunilor. Succesul (fitnessul) membrilor școlii este măsurat prin acuratețea programelor elaborate cu ajutorul modelelor propuse de ei, în timp ce succesul investitorilor de pe piața bursieră este măsurat de averea acumulată de aceștia. Fiecare investitor alege între a acționa pe piața bursieră sau a aștepta ca să testeze un model propus de școală și a alege unul care i se pare mai bun și a-l folosi în mod curent.

Membrii școlii și investitorii conlucrează în timp într-o buclă feedback continuă. Testele făcute pe 14.000 de perioade au arătat că dacă la început investitorii care au ales modelele școlii s-au bucurat de succes, ulterior ei nu au mai avut același succes pe măsură ce modelele școlii erau adoptate de tot mai mulți investitori.

Formarea rețelelor economice

Un important aspect al piețelor competitive imperfecte cu agenți interactivi este maniera în care agenții determină metodele de tranzacționare, ceea ce influențează forma rețelelor de tranzacții ce evoluează în timp. Un tip particular de rețea este așa-numita „rețea mică”. Ea este o rețea conectată care are două proprietăți: (a) fiecare nod este legat de o mulțime relativ bine cunoscută de noduri învecinate; (b) prezența unor conexiuni directe între anumite noduri face ca lungimea medie a drumului minim dintre noduri să fie mică. Astfel de rețele au atât conectivitate locală, cât și accesibilitate globală.

Astfel de rețele sunt foarte importante în schimburile comerciale interțări sau interagenți. Wilhite utilizează un MBA pentru a studia consecințele unor bariere comerciale în astfel de rețele. El analizează patru tipuri de rețele: (i) rețele comerciale complet conectate (fiecare agent poate face schimburi comerciale cu orice alt agent); (ii) rețele comerciale local deconectate constând din grupuri disjuncte de agenți; (iii) rețele comerciale local conectate, constând din grupuri de agenți aflați în jurul unui cerc cu un agent suprapus fiecărui punct de intersecție; și (iv) rețele comerciale mici construite din rețele comerciale local conectate ce permit realizarea unor legături directe cu unul până la cinci membri ai unui grup comercial separat. Pentru fiecare tip de rețea, agenții, înzestrați fiecare cu câte două bunuri, caută metode de schimb, negociază prețuri și apoi fac comerț cu acei agenți care oferă cel mai bun preț, dar sunt și accesibili. Rezultatul simulărilor efectuate a fost că cea mai bună rețea comercială este a patra, cea mică, ce oferă cea mai mare eficiență fiecărui agent participant. El a

descoperit că există anumite stimulente la nivel micro pentru formarea rețelelor comerciale mici, deoarece comercianții care utilizează acest tip de rețea tind să facă mai bine comerț decât ceilalți.

O extensie naturală a acestor lucrări este cea privind modul în care aceste forme inițiale evoluează. Albin și Foley, Kirman și Tesfatsion ș.a. au demonstrat emergența unei rețele comerciale formate dintr-o mulțime de cumpărători și vânzatori ce determină partenerii lor comerciali în mod adaptiv, pe baza experienței trecute cu acești parteneri.

Mai recent, cercetările în domeniu au fost orientate către tipuri de piețe specifice. Tesfatsion a abordat piața forței de muncă. Este studiată, în acest context, relația dintre structura de piață, interacțiunea angajat-angajator, comportamentul legat de alegerea locului de muncă și rezultatele asupra bunăstării. Muncitorii și angajatorii formează între ei relații de interacțiune modelate cu jocuri de tipul Dilema Prizonierului și elaborează strategii de-a lungul timpului pe baza câștigurilor asigurate de aceste strategii în interacțiunile anterioare. Simularea acestui model a urmărit două lucruri: concentrarea slujbelor (număr de muncitori raportați la număr de angajatori) și capacitatea slujbelor (total slujbe potențiale raportate la totalul ofertei de muncă). A rezultat că dacă capacitatea slujbelor este constantă atunci schimbările în concentrarea slujbelor au efecte semnificative asupra nivelurilor de putere pe piață atinse. Un alt rezultat a fost acela că efectele de interacțiune sunt puternice, ele determinând adaptarea comportamentelor celor doi agenți de pe piață, muncitori și angajatori.

Modelarea organizațiilor

În cadrul unei economii, un grup de oameni este considerat o organizație dacă grupul are un obiectiv sau un criteriu de performanță care transcede obiectivelor individuale din cadrul grupului. Pionierul studierii organizațiilor ca sisteme, Norbert Simon, laureat al Premiului Nobel, arată că organizațiile sunt capabile de o inteligență colectivă, deci ele se comportă ca un organism unitar ce se adaptează la mediu, suferă mutații, imită alte organizații etc. pentru a-și asigura supraviețuirea. Una dintre cele mai flexibile organizații este birocrăția.

Studiile lui Carley și ale grupului său de la Carnegie Mellon University au arătat că organizațiile pot fi modelate ca sisteme multiagent și au dus chiar la apariția unui domeniu similar economiei bazate pe agenți în cadrul teoriei organizației.

Studiul firmelor ca organizații s-a orientat în două direcții principale: perfecționarea organizării interne a firmei și organizațiile realizate de firme la nivelul piețelor.

Dawid ș.a. au considerat o mulțime de firme din cadrul unei industrii. La începutul fiecărei perioade, fiecare firmă alege dacă să producă un produs existent pe piață sau să introducă un nou produs. Cererea pentru fiecare tip de

produs dispare după o anumită perioadă de timp determinată stohastic, deci fiecare firmă trebuie să se angajeze într-o activitate inovativă pentru a-și susține profitabilitatea.

Firmele diferă între ele în privința abilității de a imita produse existente și în abilitatea de a proiecta un nou produs datorită efectelor aleatoare și a efectelor „learning by doing”, care schimbă structura organizațională a fiecărei firme. Fiecare firmă are o regulă de inovare determinată de decizia de a inova sau nu și firmele coevoluează (schimbă) aceste reguli în timp pe baza profitabilității anticipate.

Autorii au făcut experimente cu modelul obținut pentru a vedea modul în care, pentru a atinge o profitabilitate optimală, regula de inovare a unei firme ar trebui adaptată atât structurii industriei ca un tot, cât și structurii organizaționale a unei firme individuale.

Proiectarea agenților computaționali pentru piețe automatizate

Dezvoltarea piețelor automatizate (bursa automată, e-comerț ș.a.) a dus la creșterea preocupărilor pentru elaborarea unor agenți specializați în această direcție.

De exemplu, contractele utilizate pe piețe automatizate sunt contracte licitate între agenți. Acești agenți sunt astfel proiectați încât să desfășoare un proces de negociere conform unei anumite metode de licitare. Agenții negociatori sunt penalizați în raport cu anumite obiective pe care nu le ating în cursul negocierii și au rutine de învățare astfel încât ei devin tot mai performanți pe măsură ce participă la mai multe procese de negociere. Dezvoltarea explozivă a e-comerțului în ultima perioadă a făcut ca preocuparea pentru agenți mobili negociatori să devină prioritară. Agenții mobili se „mișcă” pe INTERNET căutând produsele dorite și negociază „peer-to-peer” sau multiplu pentru obținerea acestora.

Se prevede că, în curând, tot mai multe gospodării își vor face achizițiile de produse în acest fel.

Experimente paralele cu agenți reali și virtuali

Experimentele economice cu subiecți umani sunt destul de dificile și costisitoare. Totuși, comportamentul uman este foarte important în anumite situații.

Având în vedere posibilul rol sinergetic al experimentelor paralele cu subiecți umani și agenți virtuali, comportamentul uman poate fi utilizat ca un ghid pentru procesele încorporate agenților virtuali. Invers, comportamentul agenților virtuali poate fi utilizat pentru a formula ipoteze privind cauzele de bază care determină anumite comportamente observate la subiecți umani. În cadrul economiei, experimente de acest fel au făcut Miller și Andreoni, Arifovic, Arthur ș.a.

Marimon ș.a. și Duffy au efectuat, de pildă, un experiment paralel de acest fel pentru a examina emergența posibilă a unui mediu de schimb general acceptat (de exemplu banii). Agenții de tip i doresc să consume bunul i,

dar produc bunul $i+1$. În fiecare perioadă, agenții sunt împerecheați în mod aleatoriu și trebuie să decidă dacă schimbă bunurile pe care le produc. Un agent poate accepta un bun fie pentru că îl dorește, fie pentru a-l stoca și a-l utiliza mai târziu ca mijloc de schimb. Bunurile au costuri de stocare diferite. Rezultatul urmărit este dacă agenții converg către a accepta un anumit bun ca monedă pe care ei sunt de acord să o folosească în schimburile viitoare și nu să o consume.

Regulile comportamentale utilizate în proiectarea agenților virtuali din acest experiment au fost cele pe care le folosesc oamenii în schimburile lor comerciale. Un agent virtual va selecta adaptiv între regulile sale admisibile utilizând un algoritm de învățare. Duffy arată că, treptat, agenții virtuali capătă caracteristicile de bază ale agenților umani.

Construirea de laboratoare de studiu cu agenți computaționali

Ultima direcție de aplicare este cea a utilizării agenților în laborator pentru testarea teoriilor economice. Robert Lucas Jr., laureat al premiului Nobel pentru economie și unul dintre cei mai marcanți economiști ai zilelor noastre scria: „(O teorie) nu este o colecție de afirmații despre comportamentul economiei actuale, ci mai degrabă o mulțime explicită de instrucțiuni pentru construirea unui sistem paralel sau analog – o economie mecanică, imitativă. Sarcina noastră este să scriem un program care va accepta regulile politicii economice specifice ca «intrare» și va genera ca «ieșiri» statistici descriind caracteristicile de

funcționare ale seriilor dinamice pe care le dorim, care sunt permise de rezultatele obținute din aceste politici”.

Realizarea de laboratoare computaționale cu agenți permite construirea în cadrul acestora a unor economii virtuale, piețe virtuale (artificiale), întreprinderi virtuale, gospodării virtuale ș.a. pe care se pot testa diferite ipoteze și situații pe care le întâlnim în economiile reale. În astfel de laboratoare, prin interfețe grafice se pot face simulări și testa senzitivitatea sistemelor la schimbările de parametri, se pot elabora și încerca sisteme care ulterior vor fi puse în practică.

De exemplu, Mc Fadzean ș.a. dezvoltă un astfel de laborator computațional numit „Trade Network Game Lab”, care cuprinde cumpărători, vânzători și dealeri care încearcă să-și găsească parteneri comerciali preferați, sunt angajați în schimburi comerciale riscante modelate ca jocuri necooperative și își dezvoltă strategii comerciale în decursul timpului. Evoluția rețelei comerciale este vizualizată dinamic cu ajutorul animației și date privind performanțele fiecărui agent sunt oferite în timp real.

Aplicațiile economice ale MBA sunt infinite și ele ne vor ajuta să cunoaștem și să reglăm mai bine procesele economice reale. Pe măsura dezvoltării acestui nou domeniu de cercetare, el va oferi mult mai multe posibilități economiștilor de a-și pune în valoare cunoștințele și abilitățile de a construi modele, de a le simula și a le implementa în diferite contexte pe care le oferă economia tot mai dinamică și complexă a viitorului.

Bibliografie

- Axelrod, R. (1997). *The Complexity of Cooperation: Agent Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton University Press, New Jersey
- Axelrod, R. (1984). *The Evolution of Cooperation* – Basic Books – New York
- Axtell, R. (2000) – „Why Agents? On the Varied Motivations for Agent Computing in the Social Sciences”, working paper, *European Centre on Social Economic Dynamics*
- Dooley, K., Cormann, S. (1999). *Agent-based Genetic and Emergent Computational Models of Complex Systems*, www.eas.asu.edu/~kdooley/pubs/
- Farmer, J.D. (2000). *Toward Agent-based Models for Investment*, www.santafe.edu/~jdf/
- Gilbert, N., Terna, P. (1999). *How to build and use agent-based models in social science*, working paper, <http://web.econ.unito.it/deposito>
- Goldstein, J. (2001). *Scientific & Mathematical Roots of Complexity Science*, working paper, www.plexusinstitute.com/edgeware/archive/think
- Holland, J.H. (1999). *Emergence: from chaos to order*, Addison-Wesley
- Jefferies, P., Johnson, N.F. (2002). *Designing agent-based market models*, *Complexity Digest*, 30, www.phil.pku.edu.cn/resguide/comdig
- Mateos, R., Olmedo, E., Sancho, M., Valderas, J.M. (2002). *From Linearity to Complexity: Towards a New Economics*, *Complexity International*, Draft manuscript, www.csu.edu.au/ci/
- Mihail, Nora, Petcu, I. (2005). *Modelarea pietelor de energie*, Editura Avangarde, București
- Parunak, H. Van Dyke (1997). *From Chaos to Commerce: Practical Issues and Research Opportunities in the Nonlinear Dynamics of Decentralized Manufacturing Systems*, Addison-Wesley
- Parunak, H. Van Dyke, Savit, R., Riolo, R.L. (1998). *Agent-Based Modeling vs. Equation Based Modeling: A Case Study and Users Guide*, in: *Proceedings of Multi-agent systems and Agent-based Simulation (MABS'98)*, pp. 10-25, Springer
- Poggio, T., Lo, A.W., LeBaron, B., Chan, N.T. (1999). *Agent-Based Models of Financial Markets: A Comparison with Experimental Markets*, www.ebusiness.mit.edu
- Scarlat, E., Chiriță, N. (2004). *Sistemul cibernetic al economiei de piață*, Editura Economică, București
- Simon, H. (1970). *The Sciences of the Artificial*, Cambridge, Mass.: MIT Press
- Waldrop, M.M. (1992). *Complexity: the emerging science at the edge of order and chaos*, New York: Simon & Schuster
- White, M. (2000). *A Research Agenda for Agent-Based Finance Models*, Cambridge: MIT Press