

AUTOMI CELLULARI: GENESI DI UN PARADIGMA

Salvatore Di Gregorio

Dipartimento di Matematica - Università della Calabria - 87036 Arcavacata di Rende (CS)
e. mail toti.dig@unical.it

1. Rilevanza degli Automi Cellulari

Gli Automi Cellulari (per il seguito AC) negli ultimi anni hanno riscosso una notevole attenzione non soltanto come un modello emergente di Calcolo Parallelo, ma anche come uno strumento efficace per la modellizzazione e la simulazione nel campo dei fenomeni complessi, il cui interesse investe le aree più disparate: dalla Fisica alla Pianificazione Territoriale, dalle Scienze della Terra alla Medicina.

Essi rappresentano uno dei più significativi paradigmi per lo studio dei sistemi complessi ed, insieme alle reti neurali e agli algoritmi genetici, costituiscono oggi un insieme di metodi e supporti all'indagine scientifica, che hanno tratto la loro ispirazione dal campo biologico, e che sono, per taluni aspetti, alternativi agli approcci classici, che si basano sull'uso dei sistemi di equazioni differenziali.

2. Il problema dell'autoriproduzione

Gli AC sono stati concepiti in quel contesto fecondo di studi ed idee, che aveva presieduto alla nascita della Cibernetica ed allo sviluppo dei primi elaboratori elettronici. Per ironia della sorte al nome del loro ideatore, John von Neumann, ora è associato il termine di "macchina di von Neumann" per indicare la primitiva architettura sequenziale dell'elaboratore elettronico, da lui sviluppata, in contrapposizione alle nuove architetture parallele.

Nel '47 von Neumann aveva intrapreso lo studio su quali fossero le caratteristiche e la complessità di un sistema che lo rendano capace di autoriproduzione. La strada inizialmente intrapresa fu quella di un modello continuo, basato su un sistema di equazioni differenziali di tipo diffusivo, per descrivere uno spazio in cui fluttuano liberamente una sorta di robot assemblatore ed innumerevoli copie dei pezzi di cui egli stesso è composto; il robot era programmato ad "agganciare" i pezzi nello spazio ed ad assemblarli opportunamente per costruire una copia di se stesso.

3. Caratteristiche di un nuovo approccio

Le difficoltà a gestire un tale complesso modello portarono von Neumann nel '51, su suggerimento di Stanislaw Ulam, a cambiare radicalmente approccio: una scacchiera infinita, le cui celle quadrate inglobano un automa finito (detto poi automa elementare), sostituisce lo spazio tridimensionale continuo con uno bidimensionale discreto; il tempo è anch'esso discreto nel senso che le celle sincronamente cambiano stato in un "passo di calcolo" in relazione al proprio stato attuale ed a quello delle celle "vicine", dove la "vicinanza" è data da una relazione spaziale fissa nello spazio e nel tempo (una vicinanza a croce fu quella scelta da von Neumann).

Lo stato della cella individua lo stato funzionale di un pezzo dell'assemblatore oppure è "quiescente", cioè individua una porzione di spazio inattiva, che può assumere una funzionalità (passare dallo stato quiescente ad uno diverso), solo se "stimolata" da una o più celle vicine non in stato quiescente; le funzioni di transizione degli automi finiti sono le stesse da per tutto nello spazio e non variano col tempo. A questo punto l'assemblatore diventa un modificatore degli stati quiescenti delle celle, da cui è circondato, fino a costruire una copia di se stesso.

Sono immediate le suggestioni a cui von Neumann si ispirò nello sviluppare la sua idea: le reti di neuroni di McCulloch e Pitts, di cui l'AC rappresenta quasi una versione ordinata e regolare, e la macchina universale di Turing, la quale con il suo nastro infinito, con inizialmente solo una sequenza finita di simboli diversi dallo "spazio vuoto", diventa un costruttore universale in una superficie tassellata, in cui soltanto un numero finito di celle non sta nello stato quiescente.

Però v'è da dire che sicuramente von Neumann vedeva il suo AC più che come modello di calcolo (e lo è senz'altro e per giunta di calcolo parallelo!), come un sostitutivo (anche se in una forma piuttosto debole) ad una equazione che classicamente risolve un sistema fisico.

Ad esempio una tale equazione ci risponderà docilmente dello stato del nostro universo ad un qualsiasi istante di tempo da noi scelto fra gli infiniti di un continuum, così l'AC è in grado di specificarci la sua configurazione (le celle in stato non quiescente ed ovviamente il loro stato) in qualsiasi passo di calcolo, però con alcune importanti diversità: siamo costretti, a partire da una configurazione iniziale, a calcolarci tutte le configurazioni intermedie per arrivare alla configurazione del sistema al passo da noi prescelto; in più non possiamo risalire indietro nel tempo, quando l'AC non è reversibile.

Quindi sono estranee o per lo meno secondarie preoccupazioni di tipo computazionale come definire quando un AC termina il suo calcolo; mentre diventa interessante capire se l'AC è in grado di simulare una macchina di Turing universale, la risposta positiva a questo quesito colloca gli AC nell'Olimpo dei modelli di calcolo universali, tutto ciò che è calcolabile può essere calcolato con un AC!

John von Neumann morì prematuramente nel '57 e non ebbe tempo di completare il suo "Theory of self reproducing automata", uscito postumo nel '66 a cura di A. W. Burks.

Se leggiamo questo libro, ne emerge anzitutto la preoccupazione di individuare formalmente le caratteristiche dell'autoriproduzione fra diverse possibili opzioni, quindi di esibire un automa autoriproducentesi con una descrizione dettagliata della complicatissima funzione di transizione e dell'evoluzione dell'AC a partire dalla configurazione iniziale fino alla duplicazione, infine di considerare le proprietà formali del sistema che fossero fondamentali affinché vi potesse essere autoriproduzione.

E' interessante notare qui come gli studi sulla struttura del DNA, proposta da James Watson e Francis Crick nel '53, abbiano confermato le vedute generali di von Neumann sui sistemi autoriproducentesi e verificato nel reale la presenza di quelle proprietà di base individuate permettere l'autoriproduzione.

Una cosa può colpire il lettore moderno di "Theory of self reproducing automata": l'enorme lavoro di verifica, che fu necessario a von Neumann per descrivere l'evoluzione del suo AC, utilizzando principalmente supporti cartacei; mentre un analogo lavoro oggi sarebbe stato per lo meno impostato per buona parte all'elaboratore elettronico. Ma ovviamente a quei tempi non era disponibile una potenza di calcolo adeguata.

4. Definizione formale dell'AC

Forse a questo punto è doveroso dare una definizione formale di AC, quale si impose, per immediata generalizzazione dell'AC di von Neumann, da parte di coloro che cercarono di indagare le proprietà del nuovo paradigma subito dopo la pubblicazione postuma del lavoro.

Un AC è una quadrupla

$$A=(E^d, S, X, \sigma)$$

dove E^d è l'insieme delle celle identificate dai punti con coordinate intere in uno spazio Euclideo d-dimensionale (cioè suddiviso in celle quadrate - cubiche - ipercubiche per $d=2,3,4,\dots$), S è l'insieme finito degli stati dell'automa elementare; X , l'indice di vicinanza, è un insieme finito di vettori d-dimensionali, che definiscono l'insieme $V(X,i)$ delle celle vicine alla cella i di coordinate $\langle i_1, i_2, \dots, i_d \rangle$ come segue: sia $X=\{\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{m-1}\}$ con $m=\#X$, allora il vicinato di ogni cella i è dato da $V(X,i) = \{i+\xi_0, i+\xi_1, \dots, i+\xi_{m-1}\}$ con $\xi_0=\langle 0, 0, \dots, 0 \rangle$; $\sigma: S^m \rightarrow S$ è la funzione di transizione deterministica dell'automa elementare.

$C=\{c|c:E^d \rightarrow S\}$ è l'insieme dei possibili assegnamenti di stato ad A e sarà chiamato l'insieme delle configurazioni; $c(i)$ è lo stato della cella i ; l'evoluzione dell'AC, cioè il passare in un passo da una configurazione ad un'altra, è specificato dalla funzione di transizione globale τ : sia $c(V(X,i))$ l'insieme ordinato di stati della vicinanza di i , allora $\tau: C \rightarrow C \rightarrow [\tau(c)](i) = \sigma(c(V(X,i)))$.

Lo stato quiescente q_0 è tale che $\sigma(q_0, q_0, \dots, q_0)=q_0$ ed una configurazione c è finita, se $c(i)=q_0$ solo per un numero finito di celle.

Tale definizione formale corrisponde oggi alla definizione di AC omogeneo (quando τ non è determinata tramite σ and X costanti, allora l'AC non è omogeneo); essa fu in seguito estesa a differenti tipi di spazio, per esempio spazi Riemanniani o differenti tassellature per esempio esagonali o triangolari nello spazio bidimensionale, sono stati considerati anche automi elementari con funzione di transizione probabilistica e non-deterministica.

Sono state proposte in relazione a questa definizione ulteriori estensioni che a mio avviso rischiano di intaccare l'idea originale, come quella di AC privi della proprietà di sincronicità oppure AC, i cui automi elementari cambiano vicinanza e funzione di transizione nel tempo e nello spazio.

V'è comunque da rilevare, ad onor del vero, che buona parte di queste innovazioni sono di comodo, nel senso che servono ad esprimere in maniera efficace particolari applicazioni degli AC e da un punto di vista formale si può dimostrare nella maggior parte dei casi che tali estensioni sono equivalenti ad AC omogenei.

5. Parallelismo ed acentrismo

E' importante a questo punto focalizzare le caratteristiche notevoli, che emergono dalla struttura di un AC e lo individuano come un paradigma nuovo: a mio avviso queste caratteristiche sono principalmente due: parallelismo ed acentrismo, negli AC queste due proprietà si amalgamano in modo tale da coincidere di fatto.

La prima è banalmente verificata dalla struttura stessa dell'AC, idealmente composto da infinite unità di calcolo, gli automi finiti, probabilmente i più semplici modelli di calcolo esistenti, ulteriormente semplificati all'interno dell'AC, dove lo stato della cella si identifica con la sua uscita.

Oggi si può dire in termini di Calcolo Parallelo che l'AC è un modello di Calcolo Parallelo a grana molto fine, che si presta naturalmente ad essere supportato con grande facilità sui nuovi sistemi paralleli, che rappresentano una importante frontiera dell'Informatica, la cui importanza è data dalle prospettive di potere disporre e sfruttare una potenza computazionale inimmaginabile fino a pochi anni fa.

Brevemente ricordiamo qui come la nozione di acentrismo (introdotta o meglio rielaborata da Jean Petitot nel '77, voce centrato-acentrato dell'Enciclopedia Einaudi) riguarda le proprietà e le modalità per cui un sistema, le cui componenti interagiscono esclusivamente in base ad una informazione locale, è in grado di perseguire obiettivi globali.

In certo qual modo l'idea di sistema acentrato, cioè privo di centro, compete da un punto di vista epistemologico con quella di sistema gerarchico-centrato; gli AC da un punto di vista definitorio sono un purissimo esempio di sistema acentrato e senz'altro il nome cellulare è stato scelto per assonanza con la parola cellula, volendo così stabilire un'analogia con quei processi biologici, in cui un gruppo di cellule coopera per il raggiungimento di un determinato fine in assenza di un ordine gerarchico.

L'acentrismo degli AC in von Neumann non risulta però così stringente a livello di concezione dei meccanismi di autoriproduzione; a rischio di banalizzarlo, possiamo descrivere l'apparato riproduttivo come una macchina di Turing universale, inglobata in un discreto bidimensionale, dotata di "bracci", che muovendosi sono in grado di modificare gli stati delle celle quiescenti, da cui è attorniata, costruendo una copia di se stessa.

Ma una macchina di Turing è senz'altro sinonimo di modello di calcolo sequenziale e certo non è concepibile come una struttura acentrata; il paradosso sta nel fatto che noi possiamo avere un AC che ingloba, simulandola, una macchina di Turing universale e quindi riproduce in un contesto formale parallelo e acentrato meccanismi che sono puramente sequenziali e centrati.

6. Il gioco della vita

Il punto era quindi quello di verificare le potenzialità degli AC nel loro proprio ambito di acentrismo e parallelismo; questo obiettivo, che von Neumann non ebbe tempo di affrontare, ho la sensazione che non fosse immediatamente focalizzato dai ricercatori che ne raccolsero l'eredità, esso emerse nella sua importanza quasi per forza propria e, a mio avviso, ciò, che ha messo stupendamente in risalto tale problematica, è stato il gioco della vita ideato da Conway alla fine degli anni '60.

Il gioco della vita è dato da un semplicissimo AC bidimensionale a celle quadrate con due soli stati vivo e morto (equivalente allo stato quiescente); la funzione di transizione è data per analogia alla dinamica di una popolazione: una cella viva muore per isolamento se è in contatto con meno di due celle vive, muore per sovrappopolazione se è in contatto con più di tre celle vive, invece una cella morta diventa viva se è in contatto con esattamente tre celle vive.

Da queste semplici regole scaturisce una stupefacente varietà di comportamenti; se partiamo da una configurazione casuale dopo un iniziale transiente caotico è possibile rilevare l'emergere di strutture organizzate per un periodo più o meno lungo; l'isolamento e l'osservazione di queste strutture porta talvolta ad identificare processi estremamente complessi e suggestivi, a cui gli appassionati al gioco della vita hanno dato nomi molto fantasiosi. Ciò che rende magico il gioco della vita è da un lato la sorpresa nel vedere emergere un comportamento nel piano cellulare di grande suggestione ed intuitivamente identificabile nelle sue caratteristiche, dall'altro lato, in contrasto, l'incapacità di poter progettare, se non a posteriori sulla base delle precedenti osservazioni, configurazioni con comportamenti specifici non banali.

7. Modellistica e simulazione con gli AC

Questa nostra incapacità è estremamente interessante e ci torneremo in seguito; intanto le ricerche (seconda metà degli anni '70) si muovevano anche sul piano di utilizzare il supporto formale degli AC per la modellizzazione di fenomeni, difficilmente descrivibili in termini di sistemi di equazioni differenziali a causa della loro natura discreta, o per la facilità, con cui potevano essere identificati semplici meccanismi di interazione locale per dar conto di un'evoluzione globale. Pronuba di questi nuovi interessi è la possibilità di utilizzare elaboratori elettronici abbastanza potenti per potere operare simulazioni, significativamente confrontabili con i processi reali e vantaggiose rispetto ai classici supporti formali dei sistemi di equazioni differenziali; von Neumann aveva dovuto farsi i conti "a mano" e poi individuare le specificità della costruzione cellulare ideata; le prime ricerche erano rivolte alle proprietà formali degli AC, quali parallelismo, reversibilità, universalità di calcolo, equivalenze computazionali, complessità, sincronizzazione di processi in celle fra di loro distanti e così via, ma ora si prospettavano modalità nuove di indagine, che venivano applicate a casi sempre più complessi e promettevano di riuscire laddove metodi tradizionali non lasciavano speranza.

Emergeva così a poco a poco la caratteristica probabilmente più rilevante degli AC, la possibilità di descrivere la globalità di un fenomeno estremamente complesso attraverso l'interazione locale di componenti elementari relativamente semplici.

Si può porre a questo punto la questione, forse non sufficientemente meditata, dei rapporti fra strumenti formali, efficientemente ed efficacemente applicabili, e sviluppo della scienza.

Non è un caso che si è assistito, per quanto riguarda lo studio dei sistemi naturali, ad un "imperialismo" della Fisica la quale si è fatta forte dello strumento del calcolo differenziale per descrivere le proprietà globali dei processi fisici.

Altre discipline scientifiche, come ad esempio la Biologia, si sono attestate ad un "livello di scientificità" inferiore, per l'impossibilità da un lato di poter applicare il calcolo differenziale ai propri problemi e dall'altro per mancanza di strumenti alternativi altrettanto potenti; d'altronde è da notare che una situazione analoga s'è verificata per taluni problemi in Fisica, vedi l'esempio classico della turbolenza dei fluidi, in cui le configurazioni del fluido venivano trovate tramite l'osservazione di modellini del sistema fisico in scala (ad esempio sagome nella galleria del vento) per l'impraticabilità di maneggiare il sistema di equazioni differenziali.

Gli AC quindi assumono particolare rilevanza nel momento in cui gli elaboratori elettronici diventano sufficientemente potenti (chi penserebbe seriamente di avviare uno studio con gli AC, calcolandosi la sequenza di configurazioni su fogli di carta squadrettati!) e stanno aprendo nuovi campi di investigazione, laddove non si pensava possibile andare molto oltre una enunciazione di complicate regole empiriche, si incominciano ad attaccare problemi duri nella loro complessità come quelli riguardanti il cancro, l'andamento di un mercato, l'AIDS, l'inquinamento, il traffico, i terremoti, giusto per esemplificare con pochi nomi forti ambiti disciplinari fra i più svariati e fra loro distanti.

La chiave di volta per affrontare questi problemi con gli AC è la possibilità di una descrizione del fenomeno in termini di interazioni locali di unità elementari; ma qui si pone la delicata questione di che cosa sia realmente acentrato; l'acentrismo, più che una proprietà, risulta come una chiave interpretativa della realtà, però, a mio avviso, formalmente interscambiabile con una visione gerarchico-centrata. Ciò si evidenzia immediatamente

osservando, ad esempio, come un AC unidimensionale sia in grado di simulare una macchina di Turing e, viceversa, come questa sia in grado di simulare nel proprio nastro l'evoluzione di una configurazione finita (o equiparabile tale) di un AC unidimensionale.

8. Criteri di economicità e ruolo della rappresentazione

E' certo in ogni caso che alcuni sistemi presentano caratteri fortemente acentrati, mentre altri esibiscono una natura fortemente gerarchica; ma a far pendere verso una interpretazione o un'altra risulta cruciale una sorta di criterio di economicità: sarebbe una follia calcolare il rotolamento di una sfera su un piano in termini di AC (quanti mesi di calcolo prenderebbe un PC e con quale approssimazione verrebbero fuori i risultati?), mentre risulta enormemente vantaggioso implementare il gioco della vita su una macchina parallela; ma a prescindere da casi estremi non è facile dare un explicandum a questo criterio di economicità; a complicare ulteriormente le cose dobbiamo considerare il ruolo, che assume la rappresentazione del nostro sistema: un esempio meglio di ogni altra cosa può forse chiarire questo fattore che risulta essere molto spesso elusivo ad una analisi approfondita: con un AC senz'altro siamo in grado di operare l'addizione di due interi positivi, ma nella rappresentazione numerica usuale il problema del riporto rende il parallelismo di calcolo una caricatura dell'usuale calcolo sequenziale, ma se noi adottiamo una appropriata rappresentazione numerica ridondante allora si dispiega tutta la potenza del parallelismo e dell'acentrismo.

Quindi la rappresentazione gioca un ruolo non banale e gli AC si dimostrano capaci di supportare naturalmente e di esaltare le potenzialità computazionali di rappresentazioni, che sono poco rilevanti in termini di calcolo sequenziale, ma eccezionalmente vantaggiose in termini di calcolo parallelo.

A questo punto non possiamo fare a meno di toccare quello che è il tasto dolente del Calcolo Parallelo: l'incapacità di utilizzare a pieno l'enorme potenza computazionale che la tecnologia è in grado di metterci a disposizione sotto la forma di strutture di calcolo parallelo; i nostri processi mentali coscienti si presentano in modo essenzialmente sequenziale, per cui sappiamo esplicitarli in modo diretto in termini di calcolo sequenziale, mentre non siamo in grado di avere consapevolezza degli algoritmi paralleli, che usiamo; ad esempio per il riconoscimento delle immagini, finora non siamo capaci di ottenere in questo campo risultati comparabili a quelli naturali, pur avendo una potenza di calcolo superiore a quella che dispone la parte del cervello preposta a tale compito.

9. Evoluzione degli AC

Le vicissitudini del Calcolo Parallelo hanno portato a proporre negli ultimi tempi modelli di calcolo, che somigliano straordinariamente agli AC; questo segnale di convergenza è molto significativo, indicando che è in atto un processo, forse ancora confuso, che non è banalmente solo quello di omologazione di un paradigma, ma qualcosa di più: il formarsi di una nuova mentalità in grado di analizzare e risolvere i problemi in modo acentrato.

V'è da dire d'altro canto che per quanto riguarda alcune discipline (Biologia ad esempio), che per la loro natura finora non hanno potuto usufruire di supporti di calcolo comparabili con quelli della Fisica, gli AC si propongono come potente strumento di modellistica e simulazione per superare questi limiti e proprio lì rileviamo una tendenza a complicare il modello originario per dar conto di alcune peculiarità dei problemi, che vengono affrontati, introducendo interessanti novità, sempre però in termini di rispetto sostanziale, se non formale, delle proprietà di acentrismo e parallelismo degli AC.

Insieme a questi processi contrastanti di convergenza di modelli verso quello degli AC e nello stesso tempo di veloce differenziazione dal modello originario, si stanno dimostrando estremamente fecondi i tentativi di far convivere AC ed algoritmi genetici, ciò potrebbe rivelarsi un tentativo vincente di supportare la nostra scarsa predisposizione mentale a ragionare in termini acentrati e paralleli, aprendo prospettive di grandissimo interesse; tutta questa strana miscela potrà forse portare a concepire nuovi modi di fare scienza, ma questa è una storia che ancora deve essere scritta.