

VON NEUMANN E LANGTON: DALLA LOGICA DELLA VITA ALLA COMPUTAZIONE EMERGENTE

ELEONORA BILOTTA, PIETRO PANTANO
Centro Interdipartimentale della Comunicazione
Università della Calabria

1. Introduzione

Sin dalla fine degli anni '40, l'interesse nei sistemi autoriproduttivi emerse come il tentativo di intendere fino in fondo le caratteristiche degli organismi biologici. In diversi settori scientifici attuali, un fenomeno d'autoriproduzione comprende accezioni più vaste di quelle alle quali tradizionalmente possiamo pensare. Si potrebbe considerare che l'autoriproduzione sia una delle proprietà fondamentali di molti sistemi, naturali e artificiali, tra i quali possiamo enumerare:

- a. i virus e altre entità dello stesso tipo. La riproduzione nei sistemi del DNA e dell'RNA è solo un esempio di una larga classe di reazioni auto e etero catalitiche, fenomeni appartenenti alla vita e alle fasi immediatamente precedenti la vita (Maynard Smith, e Szathmàry, 1995).
- b. Le cellule. Sono unità riproduttive di base con un ambiente interno, che può essere rappresentato come un sistema di riproduzione di DNA-RNA.
- c. Organismi. Sono sistemi multicellulari che riproducono se stessi come singole unità.
- d. Popolazioni di organismi biologici (branchi, stormi, ecc. sistemi non ancora strutturati dal punto di vista sociale) sono più o meno complessi unificati che riproducono se stessi attraverso la riproduzione dei loro membri. Tali sistemi tendono a mantenere un numero stabile dei loro componenti.
- e. Gruppi sociali, collettivi, organizzazioni, che mantengono se stessi come autoriproduttori. Se alcuni componenti abbandonano il gruppo, il gruppo stesso si può ricostruire attraverso il coinvolgimento di altri membri o individui.
- f. Società. Alcuni teorici ritengono che la società possa essere considerata come un unico, grande autoriproduttore naturale (Luksha, 2002). In tale ottica, anche le abilità sociali e la conoscenza sociale, incluse le scienze e le lingue naturali, possono essere pensati come sotto-sistemi di una memoria sociale che è riprodotta come una parte di un sistema culturale.

Dagli esempi riportati sopra, si può estrarre il concetto di base d'autoriproduzione. Un sistema che si autoriproduce deve essere capace di produrre un sistema con strutture e funzioni simili a se stesso. In tal modo, ogni sistema che cresce (capace di produrre elementi strutturali di se stesso) ha le proprietà di un autoriproduttore, come per esempio i cristalli. Questo è quello che pensava von Neumann che mise in evidenza che: "... una delle difficoltà nel definire cosa s'intende per autoriproduzione è che certe organizzazioni, come i cristalli che si sviluppano, sono autoriproduttivi se guardiamo il fenomeno in modo superficiale, ma nessuno è disposto a riconoscere loro la proprietà d'essere degli autoriproduttori (von Neumann, 1966). Infatti, ci vogliono altre qualità per avere un sistema che si autoriproduca. Molti sistemi biologici sono solo capaci di autoriprodursi attraverso cicli di crescita e di separarsi (separazione della membrana nella riproduzione cellulare, atto della nascita che culmina con la separazione dalla madre, separazione sociale che dà luogo a forme di riproduzione della società, ecc.). Altri sistemi si diffondono attraverso meccanismi che proiettano organizzazioni simili a loro in spazi e tempi diversi. Per cui, se un sistema è capace di produrre strutture e funzioni in luoghi lontani, dando di fatto adito a sistemi separati, in spazi e tempi che non sono identici ai suoi, in sostanza è un auto-riproduttore. Per cui, i sistemi autoriproduttori sono emersi come il risultato dello sviluppo di complessi sistemi auto-organizzati, capaci di crescere e di distribuirsi nello spazio e nel tempo. Questo processo implica quindi un trasporto funzionale d'informazione, che deriva in parte dalla visione che la vita sia una sorta di macchina che processa informazione. Tale idea, che appartiene anche alla neurobiologia, alla logica, alla teoria degli automi, alla psicologia cognitiva e persino alla biologia molecolare, ha dato vita allo sviluppo della Cibernetica, alla Computer Science e alla Scienza Cognitiva, forse in stretta correlazione con l'uso della logica matematica di McCulloch e Pitt per definire e caratterizzare le capacità di reti di neuroni nei primi anni '40 e alla concezione di von Neumann della macchina autoriproduttiva, intorno agli inizi degli anni '50. Fu proprio von Neumann infatti che, per capire le origini della vita, pensò alla possibilità teoretica di costruire una "macchina" che contenesse una completa descrizione di se stessa e capace di autoriproduzione e assemblaggio (von Neumann 1966; Langton 1984; Weisbuch, 1986). Da allora, gli organismi biologici e le loro funzioni, sono modellizzati attraverso i linguaggi artificiali della logica e della matematica (compresi i processi cognitivi nel settore dell'Intelligenza Artificiale) e spesso implementati in computer che permettono la simulazione di comportamenti complessi. Si

potrebbe anche pensare che la Cibernetica sia fondata nella tradizione meccanicistica della biologia. Infatti, nel XVII e nel XVIII secolo la biologia cominciò a fare un uso sistematico di analogie basate sui meccanismi attraverso i quali gli organi del corpo umano funzionano, ispirate dalla scienza di Galileo e di Cartesio (Canguilhem, 1973). In tal modo, la nozione d'organismo come una macchina che processa informazione rappresenta un punto d'intersezione fra due metafore: la vita intesa come una macchina e la vita intesa come linguaggio.

Quest'ultima linea di pensiero ha portato nella biologia l'idea che il materiale genetico debba essere organizzato come un codice o lo script di un codice, che veicola informazione biologica sui caratteri ereditari di un organismo, idea rintracciabile nel lavoro di Weismann (Maynard Smith, e Szathmàry, 1995). Quando la struttura del DNA fu chiarita e si cominciò a studiare il codice genetico, il concetto d'organismo come determinato da un programma genetico sembrò essere basato su fatti biochimici, nonostante l'enorme mancanza di conoscenza sulle relazioni epigenetiche tra genotipo e fenotipo. Contemporaneamente, il concetto di contenuto di informazione di Shannon e Weaver (1949) influenzò prepotentemente la discussione in biologia, paragonabile alle istruzioni o agli algoritmi nei linguaggi di programmazione artificiali. Numerosi ricercatori hanno comunque criticato tale uso della teoria dell'informazione in questo ambito (Apter and Wolpert, 1965; Waddington, 1968). In particolare, Waddington (1968) sostiene: “..l'*informazione* non è meramente trascritta o tradotta ma opera come se fosse istruzioni- se si vuole usare un gergo elaborato, opera come se fosse una serie di *algoritmi*. Il DNA fabbrica RNA e l'RNA in seguito produce una proteina e a sua volta la proteina produce un effetto nelle sue immediate vicinanze, cosa che dà luogo alla produzione di una vasta gamma di molecole rispetto a prima. Non c'è niente di misterioso in questo, a meno che non si veda questo processo in termini di messaggi che corrono lungo le linee telefoniche”. Nonostante tali critiche, tutta la biologia molecolare si fondò sulla potente metafora del programma genetico, anche grazie ai simultanei sviluppi della Cibernetica e della Computer Science. In quest'ampio e complesso panorama s'inquadra la ricerca di von Neumann, che voleva estrarre le basi matematiche del processo d'autoriproduzione di cellule viventi, dando vita negli anni successivi fino ai giorni nostri al settore di ricerca noto come Vita Artificiale, che permette di studiare la biologia o la vita “come potrebbe essere”, una biologia sintetica che è riprodotta in altri media digitali come i computer. All'interno di tale settore d'indagine, lo studio di sistemi autoreplicanti occupa un posto di grande rilievo. In quest'articolo, tenteremo di tracciare le motivazioni fondamentali che hanno

portato alla nascita di tale settore di ricerca e infine descriveremo i quattro principali campi di indagine ad esso relativi, che grossolanamente si possono identificare nei seguenti:

- a. Implementazione di costruttori universali sull'approccio dell'automa autoreplicante di von Neumann, rintracciabile in un gruppo di studi degli anni '50 e '60;
- b. Ricerca di un sistema minimo capace di replicazione non triviale, grazie ad una serie di studi iniziati da Langton (1984) che ha dato origine ad altri lavori negli '80 e '90;
- c. Aggiunte di nuove capacità computazionali all'autoriproduttore di Langton, studiate negli anni '90;
- d. Evoluzione d'autoreplicatori tramite Algoritmi Genetici, studiati dagli anni '90 fino ai nostri giorni.

2. Le prime ricerche: Da von Neumann a Langton

Può un computer riprodursi? Questo problema, posto per la prima volta dal matematico John von Neumann nei primi anni '50, è stato ripreso da alcuni ricercatori che hanno dato vita ad un nuovo settore di ricerca, quello della Vita Artificiale. von Neumann si chiedeva se una macchina potesse creare una copia di se stessa, che a sua volta potesse riprodurre altre copie analoghe, come succede in natura, nel mondo biologico. Egli non era interessato a costruire una macchina funzionante a livello bio-chimico o genetico. A quel tempo, infatti, il modello del DNA a doppia elica non era ancora stato scoperto.

Per condurre un'indagine formale su questo problema, von Neumann usò il modello degli *Automi Cellulari*. Questo sistema matematico consiste di un reticolo di celle, ognuna delle quali è in un certo stato, in un dato tempo. Tutte le celle variano il loro stato simultaneamente, in ossequio ad una legge locale, che dipende dallo stato della cella e dallo stato delle celle immediatamente vicine. von Neumann aveva come obiettivo la progettazione di una *macchina costruttrice universale*, che può leggere le *istruzioni di assemblaggio* di ogni possibile macchina (che si volesse creare) e costruire quella specifica macchina di conseguenza.

Il costruttore universale di von Neumann può costruire ogni macchina, date le appropriate istruzioni d'assemblaggio. Se queste istruzioni sono utili per creare un costruttore universale, allora la macchina può creare un duplicato di se stessa, in altre parole può riprodursi. Se volessimo che i prodotti di tale macchina si riproducessero a loro volta, bisognerebbe copiare

le istruzioni di assemblaggio ed attaccarli ad essi. In tal modo, von Neumann mostrò che un processo riproduttivo è possibile in una macchina artificiale.

Il modello (Figura 1) presenta i quattro costituenti principali della macchina costruttrice universale (Emmeche, 1996): a) la fabbrica A; b) il duplicatore B; c) il controllore C; d) l'istruzione D.

Inoltre, nel modello è presente un contenitore di materiali grezzi, dal quale la fabbrica può prendere tutti i pezzi che servono, nel processo di duplicazione.

Indichiamo con X il prodotto e con $b(X)$ la descrizione logica del prodotto. A sceglie e assembla i materiali del contenitore in ossequio all'istruzione $b(X)$. La duplicazione avviene secondo i seguenti passi:

1. C invia a B l'istruzione $b(X)$, affinché avvenga la duplicazione;
2. B restituisce ad A una copia dell'istruzione;
3. C manda ad A l'istruzione $b(X)$, affinché costruisca il prodotto;
4. C invia al prodotto la copia dell'istruzione $b(X)$, una copia del duplicatore B (in questo caso l'istruzione $B(b(X))=b(X) + b'(X)$), mantenendo per sé l'originale;
5. D è un'istruzione che consente alla macchina di riprodursi esattamente; D rappresenta l'autodescrizione della macchina $D=b(A+B+C)$.

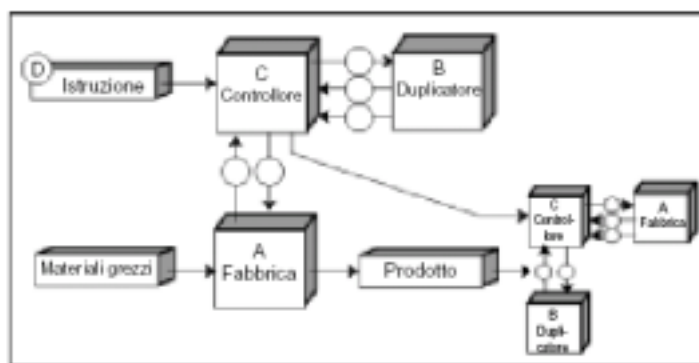


Fig. 1 - Il modello semplificato della macchina costruttrice universale di von Neumann.

von Neumann non era particolarmente soddisfatto del suo modello. Infatti, la parte meccanica rendeva molto complessa la realizzazione ed oscurava l'essenza del processo di replicazione. Dopo un confronto con il grande fisico Ulam, von Neumann elaborò il modello degli automi cellulari. Il sistema d'automati inventato da von Neumann per simulare la macchina

autoreplicante risulta assai complesso; era basato sull'elaboratore universale di Turing e comprendeva vari meccanismi di retroazione.

Questo modello consentiva:

- a) la costruzione;
- b) la duplicazione;
- c) il trasferimento dell'informazione;
- d) l'immagazzinamento dell'informazione.

Successivamente gli automi cellulari hanno avuto un grande sviluppo, tanto da diventare un sistema molto usato per modellizzare diversi fenomeni sia naturali che artificiali. Per un'esposizione dettagliata delle caratteristiche degli automi cellulari si veda Wolfram (2002).

Una delle conclusioni principali, cui giunse von Neumann, fu che il processo di riproduzione usa le istruzioni d'assemblaggio in due modi distinti: come codice interpretato (durante l'assemblaggio corrente) e come dati non interpretati (copiando le istruzioni d'assemblaggio per i successori).

Quando il meccanismo di base della trasmissione genetica cominciò ad essere svelato, divenne chiaro che la natura ha in qualche modo *adottato* le conclusioni di von Neumann. Il processo attraverso il quale le istruzioni d'assemblaggio (ovvero il DNA) sono usate per creare una macchina funzionante in realtà, le proteine, come le istruzioni del costruttore universale, fa un doppio uso dell'informazione: come codice che interpreta e come dati non interpretati. In Biologia, ci si riferisce al primo processo come *traduzione*, al secondo come *trascrizione*. L'approccio teorico di von Neumann fu usato per sviluppare un settore di ricerca interdisciplinare, con ricercatori provenienti dalla Computer Science, Fisica, Biologia, Economia, Filosofia, Intelligenza Artificiale, il cui obiettivo principale è di riprodurre, dentro i computer ed altri media artificiali, le caratteristiche salienti dei fenomeni biologici.

A seguito dei lavori pionieristici di von Neumann, altri autori, tra il 1955 ed il 1984 hanno affrontato il problema dell'autoreplicazione in vari contesti come Penrose e Penrose (1959), Moore (1956), Jacobson (1958, 1959), Morowitz (1959), Barricelli (1962, 1963), Arbib (1966), Codd (1968), Case (1971, 1974), Bratley e Millo (1972), Vitányi (1973, 1976, 1978), Laing (1975, 1976, 1977), Freitas (1980, 1983).

E' importante notare che la maggior parte di questi lavori hanno carattere teorico (cioè non hanno una controparte implementativa) e solo alcuni utilizzano come modello i già citati automi cellulari. In particolare, il lavoro originario di von Neumann prevedeva automi cellulari con 29 stati e 5 intorni per cella (Figura 2). Particolarmente interessante è la semplificazione operata da Codd che utilizza automi cellulari di 8 stati per cella, con un

intorno di 5 celle. Come nei lavori originali di von Neumann, anche nell'implementazione realizzata da Codd, l'autoreplicazione è ottenuta come un caso speciale della costruzione universale

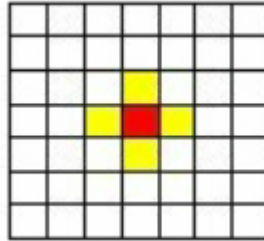


Fig. 2 – L'intorno di von Neumann.

3. Langton e la nascita della Vita Artificiale

C.G. Langton (1984), ripercorre il cammino di von Neumann, prima di arrivare a definire il sistema che da lui prenderà il nome, il famoso “loop di Langton”, un organismo artificiale che si riproduce, generando complesse configurazioni. Burks (von Neumann, 1966), che aveva lavorato alla progettazione della complessa macchina autoriproduttrice di von Neumann sostiene che egli “desiderava estrarre dal problema dell'auto-riproduzione naturale la sua forma logica”. In altre parole, von Neumann era interessato in quale tipo d'organizzazione logica fosse sufficiente per un automata in modo che fosse capace di riprodurre se stesso. L'approccio è quindi di tipo matematico-algoritmico. La versione che fornisce Burks del pensiero di von Neumann è la seguente. Se l'auto-riproduzione è realizzata da una macchina biochimica, allora il comportamento di quella macchina può essere descritto come una sequenza logica di passi, traducibile in un algoritmo. La conseguenza di tale assunto è un processo ciclico: se un algoritmo può essere eseguito da una qualsiasi macchina, allora esiste sempre una macchina di Turing che può riprodurlo. Ma, von Neumann prosegue, facendo un salto intellettuale e dice che se tale macchina esiste, è plausibile pensare che molti processi dei sistemi viventi siano descrivibili algoritmicamente e quindi che la vita è riproducibile tramite una macchina. von Neumann chiamò la particolare architettura, sopra descritta, *costruttore universale* e il processo di auto-riproduzione è un caso speciale quando la macchina descritta sul nastro è il costruttore universale stesso. Tale processo è ripetibile all'infinito. Il sistema ha due livelli: l'automa cellulare stesso (la stringa fisica), e il costruttore universale che è incorporato nel sistema fisico come

una configurazione di stati. Quando ci si riferisce al concetto di automa che si auto-riproduce, s'intende la parte che è incorporata nel sistema fisico e non il sistema fisico stesso. E anche l'informazione in questo contesto ha due differenti significati:

- a. l'informazione sul nastro è trattata come istruzioni che devono essere interpretate. Quando tali informazioni sono eseguite, esse danno luogo alla costruzione della macchina da qualche parte, nella struttura fisica (l'array);
- b. l'informazione sul nastro è trattata come dati non interpretati che devono essere copiati e attaccati alla nuova macchina.

La macchina costruita da von Neumann e Burks era troppo articolata e, più complessa è la macchina, più lungo e complesso sarà l'algoritmo che la possa gestire. La sfida che Langton si pone è "trovare una macchina semplice capace d'autoriproduzione". Codd (1968) riduce la complessità, realizzando un costruttore universale che richiede solo 8 stati per celle. La struttura di base della macchina autoriproduttrice di Codd contiene una funzione particolare (data-path) che funziona come un segnalatore di dati, come si evince dalla Figura 2.

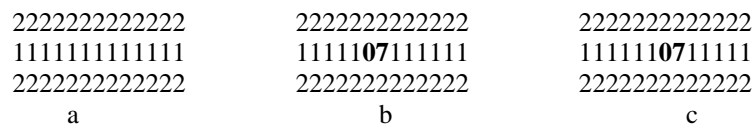


Fig. 2 – Propagazione del segnale.

Tale segnalatore consiste di una stringa di celle nello stato 1 (le celle interne), circondate da celle nello stato 2 (le celle esterne). Tale struttura è capace di trasmettere dati nella forma di "segnali". Un segnale consiste di un pacchetto di due stati che viaggiano insieme (nel caso della Figura 2, lo stato 7) seguito dallo stato 0. Tale pacchetto di informazione viaggia con il segnale stato avanti e lo stato 0 dietro. Tali segnalatori possono dislocarsi spazialmente in tanti modi diversi, per esempio girandosi e, in questo caso, anche i segnali sono duplicati nel punto di svolta, come evidenziato in Figura 3.

	212	212	212	212
	212	212	212	212
	212	212	212	272
2222221222222	2222212222222	2222227222222	2222220222222	
1111071111111	1111107111111	1111110711111	1111111071111	
2222222222222	2222222222222	2222222222222	2222222222222	
(Tempo t)	(Tempo t-1)	(Tempo t-2)	(Tempo t-3)	

Fig. 3 – Duplicazione di segnali.

Che cosa accade quando il segnale incontra una giunzione e forma di T? Intanto i segnali sono raggruppati in sequenze, che sono trattate come istruzioni per effettuare alcune azioni specifiche. Una di tali azioni, l'estensione del data-path, è illustrata nella Figura 4

2222222222222	2222222222222	2222222222222
1111061107111 2	1111111106111 1	1111111111111 2
2222222222222	2222222222222	2222222222222

Fig. 4 – Estensione del data-path.

Fin qui la descrizione del sistema di Codd. Langton altera il significato dei segnali, cambiando le configurazioni nell'array e cambiando anche la regola di transizione, che controlla il comportamento delle configurazioni nell'array. Attraverso tale tecnica, è possibile ridurre la sequenza necessaria per costruire un lato e un angolo, in modo tale che esso possa nuovamente ricadere nel cerchio (loop) della grandezza che il sistema costruisce. Per cui è lo stesso segnale che causa la dilatazione di se stesso. La sequenza finale di istruzioni per l'auto-riproduzione è:

“70 – 70 – 70 - 70 – 70 -70 – 40 -40 “.

I sei segnali “70” estenderanno il braccio di sei celle, mentre i due segnali “40” costruiranno un angolo a sinistra, alla fine della struttura. In sostanza, la struttura è in grado d'autoreplicarsi all'infinito: è il famoso loop di Langton. Complessivamente, l'architettura del sistema è formata da una stringa di 86 celle. Come il sistema di Codd, le celle interne sono quasi tutte nello stato 1 e le celle esterne nello stato 2 (Figura 5).

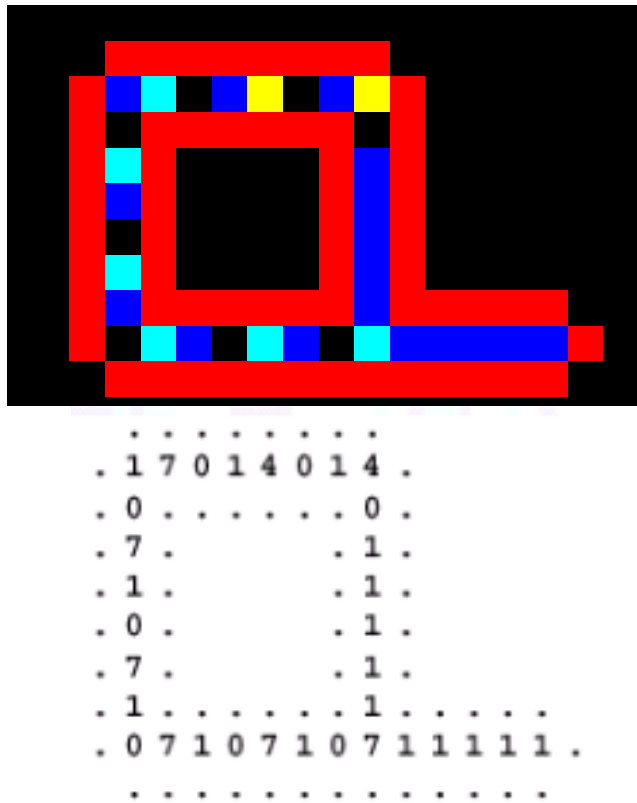


Fig. 5 – Loop di Langton.

La replicazione avviene dopo 126 passi temporali (Figura 6). Le strutture interne sono capaci di trasmettere dati in forma di segnali, che sono pacchetti di due stati viaggianti

I segnali presenti dentro il loop contengono, in forma compressa, le istruzioni per la replicazione, i.e. il genoma. Langton enfatizza il modo in cui l'informazione è usata: interpretata e non interpretata che corrisponde al processo biologico della *traslazione* e *trascrizione*. Nel loop di Langton la traslazione avviene alla fine del braccio e dalla collisione di segnali con altri segnali. La trascrizione avviene con la duplicazione del segnale negli incroci tra due rami.

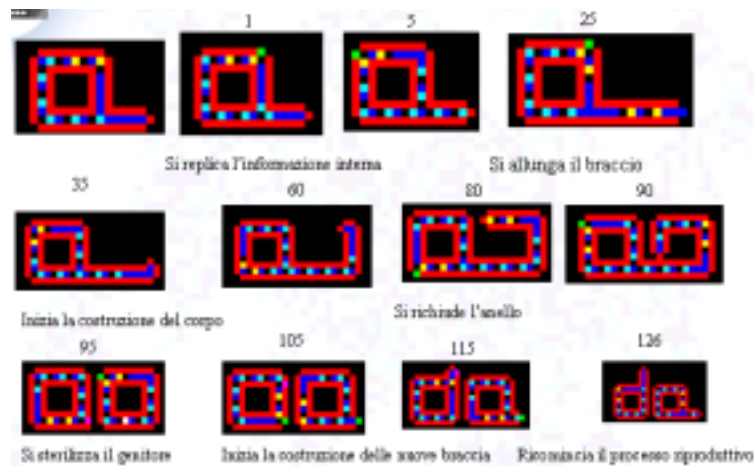


Fig. 6 – Il processo di auto-replicazione del Loop di Langton.

Successivamente a questo lavoro, Langton (1986, 1990) definisce un nuovo settore interdisciplinare, ora noto come Vita Artificiale, in cui confluiranno idee dalla Fisica, dalla Biologia, dalla Cibernetica, dalla Computer Science. Questo settore avrà, a partire dalla fine degli anni '80, un rapido sviluppo e darà vita a sua volta ad altri settori specialistici come la Robotica Evolutiva o la Chimica Artificiale (per una rassegna di questo settore si veda Langton, 1995).

La Vita Artificiale, come disciplina, riguarda la costruzione e lo studio di sistemi creati dall'uomo, che possiedono le proprietà essenziali della vita naturale. I principali problemi di cui s'interessa sono: quali sono le proprietà essenziali della vita? Si possono utilizzare tali forme di vita per investigare alcuni problemi in aree tradizionali quali la Biologia e l'Ingegneria? Langton (1992) sostiene che la Vita Artificiale ha l'obiettivo di comprendere la vita tentando di astrarre i principi fondamentali delle dinamiche che soggiacciono ai fenomeni biologici, per ricreare tali dinamiche in altri media fisici, i computer, e renderli accessibili a nuovi tipi di manipolazioni sperimentali e di verifiche empiriche.

Mentre la ricerca biologica è essenzialmente *analitica*, in quanto cerca di scomporre fenomeni complessi nelle unità di base che li costituiscono, gli studi condotti nel settore della Vita Artificiale sono *sintetici*, in quanto si pensa di costruire i fenomeni partendo dalle loro unità elementari. In questo modo, la Vita Artificiale funge da settore complementare alla ricerca

biologica tradizionale, alla scoperta di nuovi percorsi, per comprendere i fenomeni della natura e della vita.

L'uso del termine *artificiale* è utilizzato per indicare che i sistemi sono stati costruiti dall'uomo, in altre parole, le componenti di base di tali sistemi non sono state costruite dalla natura, attraverso l'evoluzione. In ogni caso, i fenomeni che si costruiscono attraverso sistemi di Vita Artificiale sono autentici. Il processo di riproduzione dettagliato da von Neumann è reale come quello naturale. La differenza è che la natura utilizza diverse componenti di base: le cellule biologiche. Langton conclude che la Vita Artificiale ci permette di estendere i nostri studi su come la *vita potrebbe essere*.

4. Autoriproduttori con capacità computazionali

Nel 1989 Byl trova altri loop utilizzando solo 6 stati per cella e mantenendo l'intorno classico costituito da 5 celle. Il loop è molto più semplice rispetto a quello di Langton, in quanto il sistema finale è composto da 12 celle invece che 86. In Figura 7 il Loop di Byl e il suo ciclo di riproduzione.

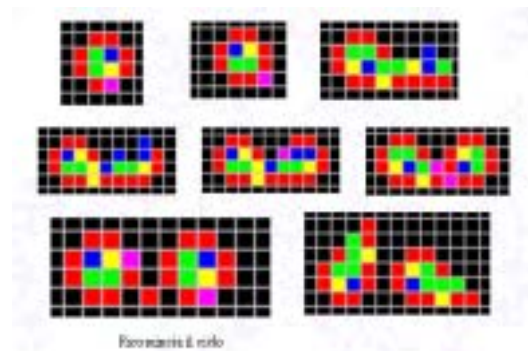


Fig. 7 – Il Loop di Byl e il suo ciclo di riproduzione.

Nel 1993 Reggia assieme ad altri collaboratori (Reggia et al., 1993) , utilizzando automi cellulari con 6 ed 8 stati, ed intorni a 5 e 9 celle trovano molti altri loop auto-replicanti. Il più piccolo tra questi ha 5 celle. Pur mantenendo l'appoggio di Langton, i loop non hanno guscio. Inoltre viene utilizzato un intorno di 9 celle, che non è usuale in questo tipo di studi.

I loop di Langton, Byl e Reggia hanno solamente la capacità di autoriprodursi. Tempesti nel 1995, sviluppa un loop analogo a quello di Langton, con la possibilità di attaccare all'automa un programma eseguibile,

che è duplicato ed attaccato ad ogni sua copia. Il programma è conservato dentro il loop, interconnesso con il suo codice di autoreplicazione (vedi Figura 8). Tempesti considera automi cellulari con 10 stati ed un intorno costituito da 9 celle.

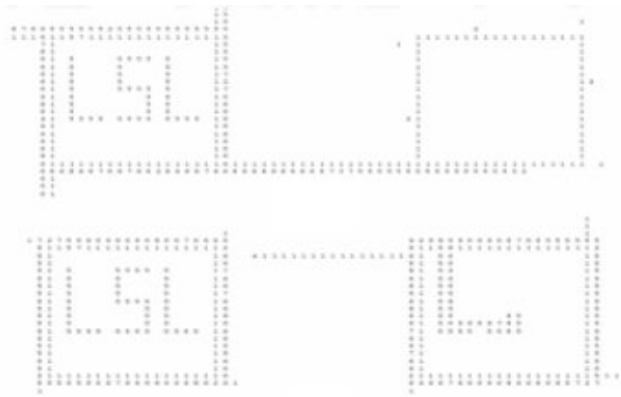


Fig. 8 – Sistema di auto-replicazione di Tempesti.

5. Evoluzione di autoriproduttori

Molti dei modelli di loop realizzati fino al 1995 erano stati specificatamente progettati (hand-designed), con un processo difficile e costoso in termini di tempo. Nel 1995 Lohn e Reggia (1995) introducono gli Algoritmi Genetici per scoprire regole d'Automi Cellulari che governano processi autoreplicanti emergenti.

Gli Algoritmi Genetici furono introdotti da John Holland (1975), a seguito di ricerche svolte negli anni '60 e '70. Mentre un programmatore sviluppa un singolo programma, tentando di perfezionarlo al massimo, una programmazione genetica coinvolge una popolazione di programmi. La popolazione iniziale, chiamata prima generazione, consiste di programmi creati a caso. Le generazioni di programmi che seguono sono costruiti attraverso un processo d'evoluzione in modo tale che, nel tempo, la popolazione consista di programmi quasi sempre migliori (o più idonei a soddisfare i vari scopi dei programmi stessi). Ogni generazione di programmi è creata applicando operatori genetici alle precedenti generazioni di programmi. Tali operatori sono conosciuti in biologia come *incroci* (*crossover*) e *mutazioni*. Due programmi *genitori* sono selezionati a caso. I genitori si riproducono creando un programma *figlio*, che consiste di una

commistione di materiale genetico dei genitori (incrocio o crossover), con un piccolo numero d'errori di riproduzione (mutazione). Il processo di selezione e di riproduzione continua fino a quando la generazione successiva non è creata, in analogia a quanto avviene in natura: una data generazione consiste di creature differenti (programmi), i cui cambiamenti di sopravvivenza sono in relazione con la loro idoneità (*fitness*). Migliore (più adatta) è una creatura (un programma), più alta è la sua probabilità di sopravvivenza, e, nel tempo, tutta la popolazione arriva ad essere costituita dalle creature migliori.

Cosa rende un programma buono (adatto)? Tale domanda, anche se complessa, ha una risposta semplice, nel contesto della programmazione genetica: l'idoneità (*fitness*) è definita dal programmatore, in accordo con un particolare problema da risolvere, attraverso tale tipo di programmazione. Si noti che l'evoluzione procede senza l'intervento umano. Dopo che il compito è stato stabilito, una popolazione iniziale è generata a caso e l'evoluzione agisce fino a quando una soluzione ottimale non viene ottenuta. Un metodo evolutivo è vantaggioso non solo nella risoluzione di problemi difficili, ma anche nell'offrire una migliore adattabilità. Infatti, l'evoluzione offre la possibilità di adattarsi ad un ambiente dinamico e, quando capita un evento imprevisto, il sistema può evolvere; in altre parole, si adatta alla nuova situazione, così come avviene in natura.

Gli Algoritmi Genetici richiedono l'uso di funzioni di fitness che selezionino l'individuo più adatto in ogni generazione. La scoperta di una funzione di fitness è molto complicata e dipende strettamente dal problema considerato. Nel caso dell'autoriproduzione in automi cellulari bidimensionali, Lohn e Reggia nel 1995 forniscono una soluzione al problema costruendo un modello d'automa cellulare autoreplicante mobile (detto automa effettore), incorporato in uno spazio cellulare. Per tali nuovi modelli di Automi Cellulari fu introdotto un nuovo sistema di automa d'input, detto "input non sensibile di orientamento". Con queste innovazioni, Lohn e Reggia scoprirono 6 strutture autoreplicanti, composte da 2, 3 e 4 automi, dopo aver fatto girare un algoritmo genetico per 75 passi. Le principali differenze tra Automi Cellulari (CA) ed Automi Effettori (EA) è che negli Automi Cellulari ciascuna cella è un automa, mentre negli Automi Effettori ciascuna cella è una locazione nello spazio e gli automi sono entità che possono occupare una cella. Quindi i due modelli differiscono per il tipo d'output prodotto: negli Automi Cellulari l'output è una transizione dello stato interno, mentre negli Automi Effettori l'output è un'azione che sarà effettuata, come quella di muoversi in una cella vicina.

Mentre molti dei sistemi autoreplicanti citati precedentemente realizzano l'autoreplicazione di una struttura specifica data, Chou e Reggia (1997)

esplorano la possibilità di creare un universo di Automi Cellulari, simile ad una zuppa primordiale, in cui strutture autoreplicanti non sono create *ab initio*, ma piuttosto emergono in una maniera spontanea. I sistemi che essi ottengono sono molto soddisfacenti e sono una chiara manifestazione dei risultati possono essere ottenuti con gli Algoritmi Genetici.

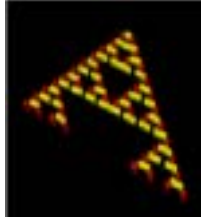
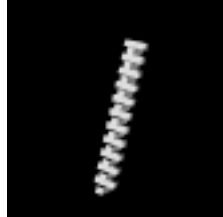


6. Recenti sviluppi

Tutti i settori citati in precedente continuano ad essere oggetto di ricerca corrente. DA Tempesti (1995) seguono gli studi di Perrier, Sipper e Zahnd (1996), i quali hanno implementato un loop capace di realizzare qualunque programma, purché scritto in un linguaggio molto semplice. Sayama (1998, 2000) ha realizzato un loop analogo a quello di Langton che si auto-dissolve: accanto alla proprietà di autoriproduzione ha anche la capacità di auto-distruggersi.

Altri filoni di interesse riguardano:

- a) capacità di auto-ispezione basata sulla replicazione;
- b) auto-replicazione in Automi Cellulari reversibili (Morita e Imai, (1996,1997);
- c) auto-replicazione in Automi Cellulari lineari (Julian e Chua , 2001);
- d) auto-replicazione in grafi di automi (Tomita et al., 2002).

In una serie di recenti lavori (Bilotta, Lafusa e Pantano 2002, 2003 e 2004), utilizzando un nuovo tipo di intorno con regole di evoluzione *k-totalistiche*, hanno trovato una grande quantità di autoreplicatori. Queste strutture, emergono spontaneamente dal brodo primordiale e si manifestano con forme e funzioni completamente differenti rispetto ai tradizionali loop (Figura 9). Le caratteristiche principali possono sinteticamente essere enucleate nelle seguenti:

			
Autoriproduttori lineari	Autoriproduttori tipo Glider	Autoriproduttori a forma di piramide	Autoriproduttori a forma di rombo

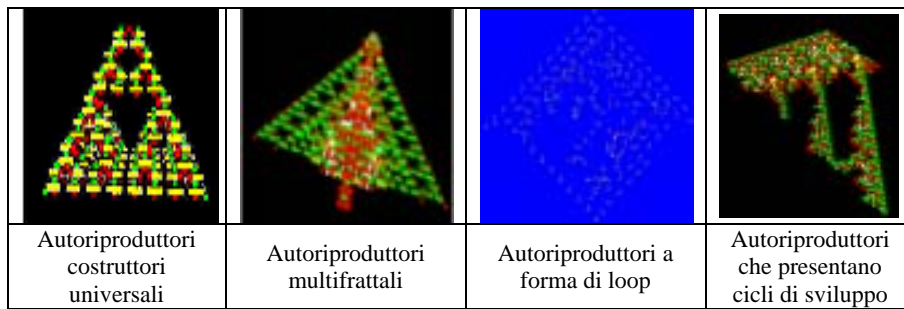


Fig. 9 – Una grande varietà di autoriproduttori.

- a) Sono strutture di tutte le taglie e dimensioni, da configurazioni estremamente piccole, in alcuni casi coincidenti con una sola cella, a sistemi estremamente grandi
- b) Hanno differenti comportamenti nella crescita delle colonie: lineari, rettangolari, romboidali, etc.
- c) Hanno strutture frattali;
- d) Possiedono una notevole stabilità rispetto a cambiamenti nel dato iniziale e manifestano capacità di autoriparazione, sfruttando la replicazione
- e) Possiedono reti di consultazione genica che consentono una grande stabilità strutturale, permettono una crescita e una specializzazione dei sistemi, se evoluti con Algoritmi Genetici.
- f) La capacità di autoreplicazione è emergente e le reti si manifestano in una regione limitata tra ordine e caos.

Bibliografia

- Apter M.J. and Wolpert L. (1965). "Cybernetics and development. 1: Information theory." *Journal of Theoretical Biology*, **8**, pp. 244-257.
- Arbib M. A. (1966). "Simple self-reproducing universal automata." *Information and Control*, Vol. **9**, pp. 177-189.
- Barricelli N. A (1962). "Numerical testing of evolution theories. Part I. Theoretical introduction and basic tests." *Acta Biotheoretica*, Vol. **XVI**, Parts I/II, pp. 69-98.
- Barricelli N. A. (1963). "Numerical testing of evolution theories. Part II. Preliminary tests of performance. Symbiogenesis and terrestrial life." *Acta Biotheoretica*, Vol. **XVI**, Parts III/IV, pp. 99-126.
- Bilotta E., Lafusa A., Pantano P. (2002). "Is self-replication an emdedded characteristic of artificial/living matter?" *Proc. Artificial Life VIII, Alife VIII*, Sydney, MIT Press.
- Bilotta E., Lafusa A., Pantano P. (2003). "Searching for complex CA rules with Gas." *Complexity*, **8-3**, pp.56-67.
- Bilotta E., Lafusa A., Pantano P. (2004). "Life-like self-reproducers". *Complexity*, **9-1**, 38-55.
- Bratley P. and Millo J. (1972). "Computer recreations: Self-reproducing programs." *Software Practice and Experience*, Vol. **2**, pp. 397-400.

- Burger J., Brill D. and Machi F. (1980). "Self-reproducing programs." *Byte*, Vol. **5**, pp. 72-74.
- Byl J. (1989). "Self-Reproduction in small cellular automata." *Physica D*, Vol. **34**, pp. 295-299.
- Canguilhem R. G. (1973). *Introduzione alla storia delle scienze*. Jaca book, Milano.
- Case J. (1971). "A note on degrees of self-describing Turing machines." *Journal of the Association for Computing Machinery*, Vol. **18**, pp. 329-338.
- Case J. (1974). "Recursion theorems and automata which construct." *Proceedings of the 1974 Conference on Biologically Motivated Automata Theory*, IEEE, New York, N.Y.
- Case J. (1974). "Periodicity in generations of automata." *Mathematical Systems Theory*, Vol. **8**, pp. 15-32.
- Chou H. H. and Reggia J. A. (1997). "Emergence of self-replicating structures in a cellular automata space." *Physica D*, vol. **110**, n. 3-4, pp. 252-276.
- Codd E. F. (1968). *Cellular Automata*. Academic Press, New York.
- Emmeche C. (1996). *Il giardino nella macchina*. Bollati Boringhieri, Torino.
- Freitas R. A. Jr. (1980). "A self-reproducing interstellar probe." *Journal of the British Interplanetary Society*, Vol. **33**, pp. 251-264.
- Freitas R. A. Jr. (1983). "Terraforming Mars and Venus using machine self-replicating systems." *Journal of the British Interplanetary Society*, Vol. **36**, pp. 139-142.
- Freitas R. A. Jr. (1983). "Roboclone: Self-replicating robots." *Omni*, Vol. **5**, pp. 44-47.
- Holland J. (1975). *Adaptation In Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Jacobson H. (1958). "On models of reproduction." *American Scientist*, Vol. **46**, pp. 255-284.
- Julian P., Chua L. O. (2001), Replication Properties of Parity Cellular Automata, *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, **12**, pp.477-494.
- Laing R. (1975). "Some alternative reproductive strategies in artificial molecular machines." *Journal of Theoretical Biology*, Vol. **54**, pp. 63-84.
- Laing R. (1976). "Automaton introspection." *Journal of Computer and System Sciences*, Vol. **13**, pp. 172-183.
- Laing R. (1977). "Automaton models of reproduction by self-inspection." *Journal of Theoretical Biology*, Vol. **66**, pp. 437-456.
- Langton C.G. (1984). "Self-Reproduction in Cellular Automata." *Physica D*, **10**, pp. 135-144.
- Langton C.G. (1986). "Studying Artificial Life With Cellular Automata." *Physica D*, **22**, pp. 120-149.
- Langton C.G. (1990). "Computation at the edge of Chaos, Phase Transitions and Emergent Computation." *Physica D*, **42**, pp. 12-37.
- Langton C.G. (1995). *Artificial life: an overview*. MIT Press, Cambridge.
- Lohn J. D. and Reggia J. A. (1995). "Discovery of self-replicating structures using a genetic algorithm." *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'95)*, pp. 678-683.
- Luksha P.O. (2002). "Formal Definition of Self-reproductive Systems." In *Artificial Life VIII*, Standish, Abbass, Bedau (eds.), MIT Press, pp. 414-417.
- Maynard Smith J., and Szathmàry E. (1995). *The Major Transitions in Evolution*. W.H. Freeman, Oxford.
- Moore E. F. (1956). "Artificial living plants." *Scientific American*, Vol. **195**, pp. 118-126.
- Morita K. and Imai K. (1996). "Self-reproduction in a reversible cellular space." *Theoretical Computer Science*, Vol. **168**, pp. 337-366.
- Morita K. and Imai K. (1997). "A simple self-reproducing cellular automaton with shape-encoding mechanism." In C. Langton and T. Shimohara (eds), *Artificial Life V: Proc.*

- Fifth Intern. Workshop on Synthesis and Simulation of Living Systems*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Morowitz H. J. (1959). "A model of reproduction." *American Scientist*, Vol. **47**, pp. 261-263.
- Penrose L. S. and Penrose R. (1959). "Self-reproducing machines." *Scientific American*, Vol. **200**, n. 6., pp. 105-114.
- Perrier J. Y., Sipper M. and Zahnd J. (1996). "Toward a viable, self-reproducing universal computer." *Physica D*, Vol. **97**, pp. 335-352.
- Reggia J. A., Armentrout S. L., Chou H.-H. and Peng Y. (1993). "Simple systems that exhibit self-directed replication." *Science*, Vol. **259**, pp. 1282-1287.
- Sayama H. (1998). "Introduction of Structural Dissolution into Langton's Self-reproducing Loop". In Adami C., Belew R. K., Kitano H., and Taylor C.E. (eds.) *Artificial Life VI: Proceedings of the Sixth International Conference on Artificial Life*, 114-122 Los Angeles, California, MIT Press.
- Sayama H. (2000). "Self-Replicating Worms that Increase Structural Complexity through Gene Transmission". In Bedau M. A., McCaskill J. S., Packard N. H., and Rasmussen S. (eds.) *Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh Int. Conf.*, 467-476. MIT Press.
- Shannon, C. and Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Information*. University of Illinois Press, Urbana.
- Tempesti G. (1995) "A new self-reproducing cellular automaton capable of construction and computation." In F. Morán, A. Moreno, J. J. Merelo, and P. Chacón (eds), *ECAL'95: Third European Conference on Artificial Life*, Vol. 929 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 555-563. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Tomita K., Kurokawa H. and Murata S. (2002). "Graph automata: natural expression of self-reproduction". *Physica D*, Vol. **171**, pp. 197-210.
- Vitanyi P. M. B. (1973). "Sexually reproducing cellular automata." *Mathematical Biosciences*, Vol. 18, pp. 23-54.
- Vitanyi P. M. B. (1974). "Genetics of reproducing automata." In *Proc. 1974 Conference on Biologically Motivated Automata Theory*, IEEE, New York, N. Y., pp. 166-171.
- Vitanyi P. M. B. (1976). "On a problem in the collective behavior of automata." *Discrete Mathematics*, Vol. **14**, pp. 99-101.
- von Neumann J. (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Illinois. Edited and completed by A. W. Burks.
- Waddington, C.H. (1968). *Towards a Theoretical Biology*, I, Univ. Edinburgh Press, Edinburgh
- Weisbuch G. (1986). "Networks of automata and biological organization". *J. Theor. Biol.*, **121**, pp. 255-267.
- Wolfram S. (1984). "Universality and Complexity in Cellular Automata". *Physica D* **10**, 1-35.
- Wolfram S. (2002). *A New Kind of Science*. LLC, Canada.