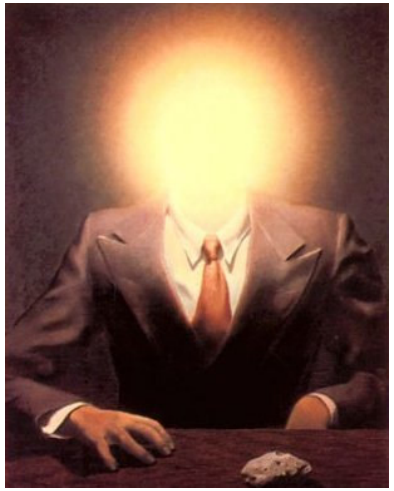
Intelligenza Artificiale II

Introduzione al corso

Dal calcolo simbolico al *natural computing*

Marco Piastra



- Searle, J. R., *Minds, Brain and Science*, 1986

"Because we do not understand the brain very well we are constantly tempted to use the latest technology as a model for trying to understand it.

In my childhood we were always assured that the brain was a telephone switchboard ('*What else could it be?*').

I was amused to see that Sherrington, the great British neuroscientist, thought that the brain worked like a telegraph system. Freud often compared the brain to hydraulic and electro-magnetic systems. Leibniz compared it to a mill, and I am told some of the ancient Greeks thought the brain functions like a catapult.

At present, obviously, the metaphor is the digital computer."

- Crick, F., *The Astonishing Hypothesis*, 1994

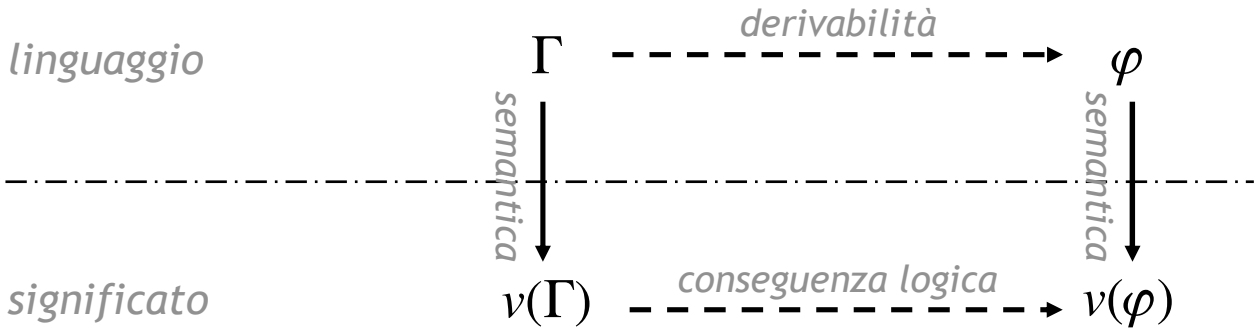
  "You, your joys and your sorrows, your memories
  and your ambitions, your sense of personal identity and free will,
  are in fact no more than the behavior of a vast assembly
  of nerve cell and their associated molecules."

IA1: Logica classica

- **Linguaggio logico** + **Struttura semantica**
  - Linguaggio formale (L_{PO})
    - Simboli di base: costanti, variabili, funzioni, predicati
    - Connettivi (+ parentesi e virgole)
    - Quantificatori (universale ed esistenziale)
    - Regole sintattiche (o di buona formazione), formule ben formate (*fbf*)
  - Struttura semantica $<\mathbf{U}, v>$
    - Interpretazione composizionale (connettivi come operatori di un algebra di Boole)
    - Predicati come relazioni tra oggetti in $\mathbf{U}$
    - Funzioni in $\mathbf{U}$
    - Quantificatori come astrazioni su sottoinsiemi di $\mathbf{U}$ o di relazioni in $\mathbf{U}$
- Relazioni semantica tra formule
  - **Conseguenza logica** $\Gamma \models \varphi$
- Calcolo simbolico (per trasformazione sintattica di formule)
  - **Derivabilità** $\Gamma \vdash \varphi$

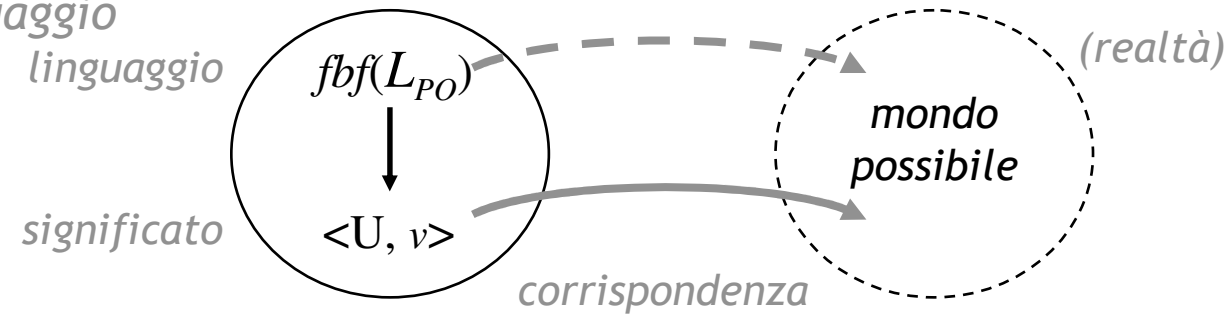
IA1: Rappresentazione logico-formale

- Semantica come relazione tra linguaggio e significato



- La corrispondenza con la realtà è su entrambi i piani

La corrispondenza del linguaggio (formale) passa attraverso il significato (formale)



Molteplicità delle interpretazioni (mondi possibili):
una fbf vera (in una teoria) corrisponde ad un *insieme* di mondi possibili

IA1: Calcolo automatico

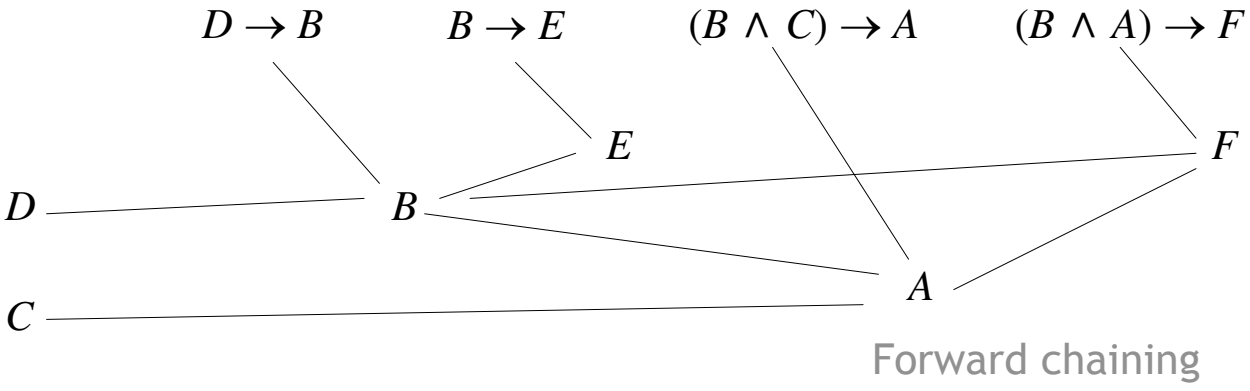
La **derivabilità** ($\Gamma \vdash \varphi$) non presuppone l'esistenza di una procedura automatica ...

- Decidibilità

  Esiste una procedura effettiva per stabilire se $\Gamma \vdash \varphi$?
  (oppure se $\Gamma \models \varphi$?)

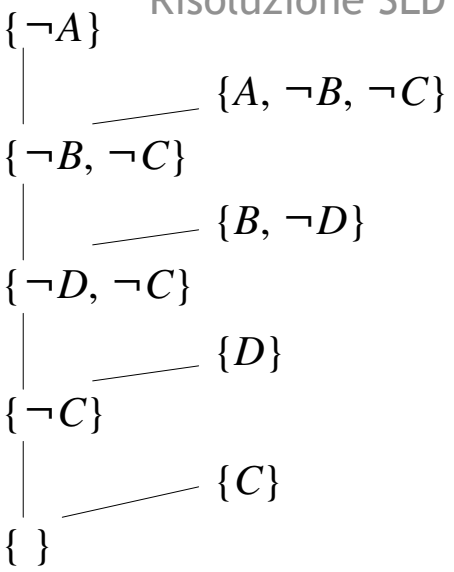
- Metodi di calcolo

  (fbf qualsiasi) Risoluzione per refutazione, Tableau
  (clausole di Horn) Risoluzione SLD, Forward Chaining (+ alg. Rete)

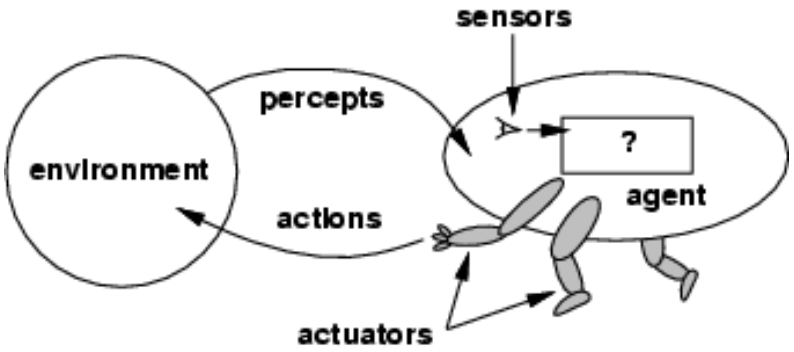


Forward chaining

Risoluzione SLD



IA1: Agenti



- Agente razionale

  Un sistema come che interagisce con l'ambiente

  Elaborazione ciclica (sequenziale o parallela) $f: P^* \rightarrow A$

  - Percezione (attraverso i sensori, P^*)
  - Valutazione (processi interni $f: P^* \rightarrow A$)
  - Azione (attraverso gli attuatori, A)

- Tank in JessRobocode

  Un programma Java/Jess che interagisce con l'ambiente Robocode

  Elaborazione ciclica (sequenziale) $f: P^* \rightarrow A$

  - Percezione (eventi prodotti in Robocode, P^*)
  - Valutazione (regole logiche del programma Jess $f: P^* \rightarrow A$)
  - Azione (comandi di Robocode, A)

  Parallelismo: molteplici agenti (almeno 2 tank) in ciascun round

Programmazione logica

Il Jess è un sistema relativamente semplice e facile da usare

Dal punto di vista del calcolo (logico) automatico, si può fare di più ...

- Dalla risoluzione SLD in L_P alla programmazione logica in tre passaggi
  1) Clausole di Horn (in L_{PO}) con **funzioni** e **quantificazione esistenziale** (implicita)
  2) Risoluzione per refutazione ed **unificazione**
  3) Dalla dimostrazione ($\Gamma \vdash \varphi$) all'identificazione delle possibili istanziazioni
     (p.es. $Sorella(amelia, x)$? = "di chi è sorella Amelia?")

Si ottiene

La possibilità di derivare nuove clausole qualsiasi (anche regole, non solo fatti)

Un linguaggio di programmazione completo (Prolog)
(con qualche ulteriore "stranezza", p.es. *negation as failure*)

Oltre la logica classica

L'uso di *assert* e *retract* in Jess esula dal paradigma della logica classica, in quanto viene meno la proprietà di *monotonia sintattica*

In programmazione logica si hanno ulteriori eccezioni

- Ipotesi del mondo aperto (logica classica)

  Dati Γ e φ, in logica classica si hanno tre possibili casi

  $\Gamma \models \varphi$
  $\Gamma \models \neg\varphi$
  $\Gamma \not\models \varphi, \Gamma \not\models \neg\varphi$ (il valore di φ non è determinato da Γ)

- Ipotesi del mondo chiuso (*closed world assumption, CWA*)

  $\Gamma \not\models \varphi \Rightarrow \neg\varphi$ (assumo false le fbf φ il cui valore non è determinato da Γ)

- Negazione per fallimento (*negation as failure, NAF*)

  $\Gamma \not\vdash_P \varphi \Rightarrow \neg\varphi$ (assumo false le fbf φ che *non riesco a dimostrare*, con una procedura P)

- *CWA* e *NAF* non sono inferenze corrette, ma solo *plausibili*

Inferenza plausibile (*defeasible reasoning*)

Le inferenze *plausibili* non sono *corrette* ma solo *compatibili* con le premesse

- Nuovi schemi di ragionamento

Logica deduttiva (inferenza corretta)

Si derivano le conseguenze logiche delle premesse

"Tutti i fagioli del sacco sono bianchi,
questa manciata di fagioli viene dal sacco"
"I fagioli sono bianchi"

modus ponens

$$\frac{\varphi \rightarrow \psi \quad \varphi}{\psi}$$

Logica induttiva (inferenza plausibile)

Date associazioni di fatti, si derivano regole

"Questa manciata di fagioli viene dal sacco,
i fagioli sono bianchi"
"Tutti i fagioli del sacco sono bianchi"

$$\frac{\varphi \quad \psi}{\varphi \rightarrow \psi}$$

Logica abduttiva (inferenza plausibile)

Dati regole ed effetti si derivano le cause

"Tutti i fagioli del sacco sono bianchi,
i fagioli sono bianchi"
"Questa manciata di fagioli viene dal sacco"

$$\frac{\varphi \rightarrow \psi \quad \psi}{\varphi}$$

Attenzione! Non è il modus ponens

Logiche modali e temporali, *model checking*

- Logica modale

  In L_P i simboli proposizionali rappresentano affermazioni

  Una notazione per distinguere le affermazioni

  A = affermazione vera (p.es. "Oggi è venerdì")

  $\Box A$ = affermazione vera secondo $\Box$ (p.es. "$\Box$ ritiene che oggi sia venerdì")

  Formule e regole di inferenza 'ad hoc'

  $A \vdash \Box A$ Se A è vera, allora $\Box$ ritiene vera A

  $\Box (A \rightarrow B), A \vdash \Box B$ Se $\Box$ ritiene vera $(A \rightarrow B)$ e A è vera, allora $\Box$ ritiene vera B

  $\Box (A \rightarrow B), A \nvdash B$ Dalle stesse premesse non è derivabile che B è vera

- Logica temporale

  Notazione e regole per il ragionamento sulle sequenze temporali

  $\Box (A \rightarrow B)$ D'ora in poi, se A allora B

  $A \rightarrow \Box B$ Se A allora d'ora in poi B

- *Model checking* per le logiche temporali

  Verifica diretta (per generazione di modelli/sequenze) di insoddisfacibilità

  Serve a verificare le proprietà dei **modelli di processo**

Multivalenza, logiche sfumate (*fuzzy logics*)

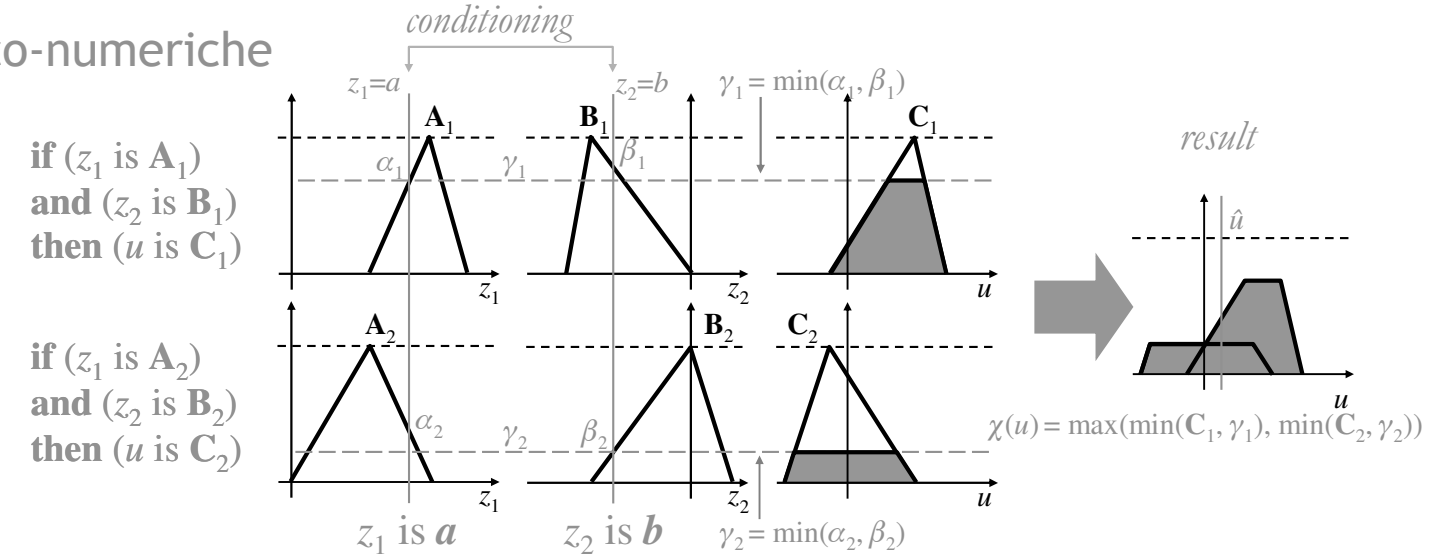
- Forme di logica su base numerica

  Si ammettono valori compresi tra 0 e 1 (intermedi, tra falsità e verità)
  mantenendo l'idea di associare operatori algebrici ai connettivi

  Ad esempio: $v(A \wedge B) = \min(v(A), v(B))$

- Sistemi di inferenza sfumata

  Insiemi di regole logico-numeriche



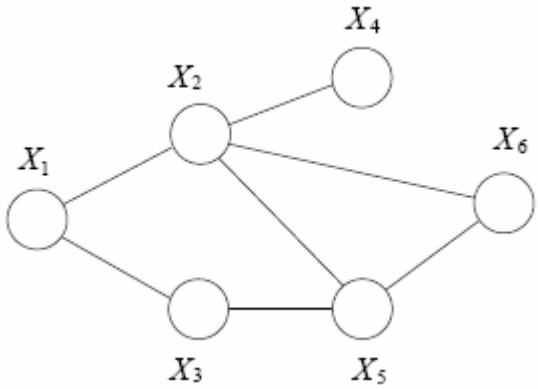
  Universal Approximators (L.X. Wang, 1992)

  Possono approssimare qualsiasi funzione continua

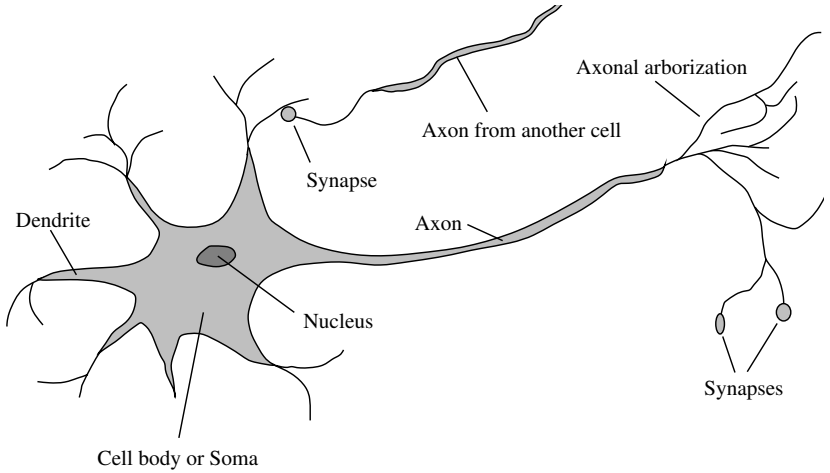
  Costruzione modulare, combinazione per interpolazione

Incertezza, probabilità, modelli grafici

- Incertezza e probabilità
  - La probabilità è una rappresentazione numerica dell'incertezza
    - Per sua natura, è sistemica: si riferisce ad un intero sistema di eventi
    - Non è vero-funzionale: non esiste una funzione f tale per cui $P(A \wedge B) = f(P(A), \mathrm{P}(B))$
- Distribuzioni (discrete) e densità (continue) di probabilità
  - La misura di probabilità si riferisce a tutte le possibili combinazioni di eventi
    - Dalla misura congiunta è possibile calcolare la misura di eventi particolari (marginalizzazione) o sotto determinate ipotesi (condizionalizzazione)
    - Una misura di probabilità si può stimare partendo dai dati (inferenza statistica)
    - Nel discreto, la complessità numerica è notevole
    - Nel continuo si aggiunge anche la complessità analitica (*spesso il risultato non è esprimibile in forma analitica*)
- Modelli grafici
  - Rappresentazione strutturata di misure di probabilità
    - La struttura (grafo) descrive dipendenze tra eventi, i valori numerici completano la definizione della misura
    - I modelli grafici, in generale, sono più efficacemente trattabili



IA1: Reti neurali artificiali



- Elaborazione numerica

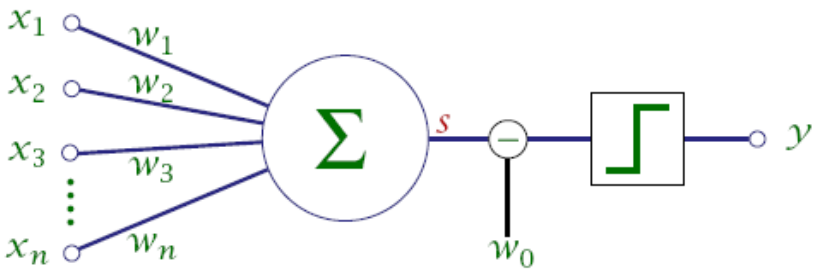
  Si basa sulla propagazione dei segnali attraverso la rete, a partire dalle unità di input

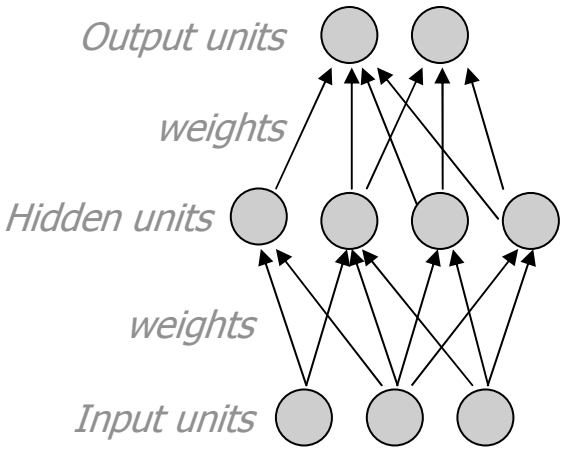
- Apprendimento supervisionato (*backpropagation*)

  Le reti apprendono le configurazioni dei pesi a partire da associazioni input/output note a priori

  Universal Approximators (Hornik et al., 1989)
  Possono approssimare qualsiasi funzione continua

  Basta un solo livello di *hidden units*





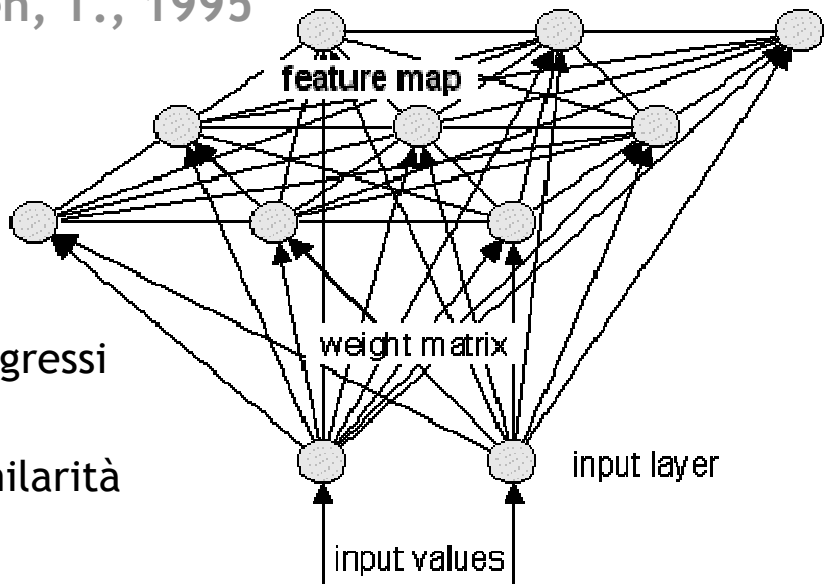
Organizzazione spontanea (*self-organization*)

- C. Shalizi, *http://www.cscs.umich.edu/~crshalizi/notebooks/self-organization.html* 2006

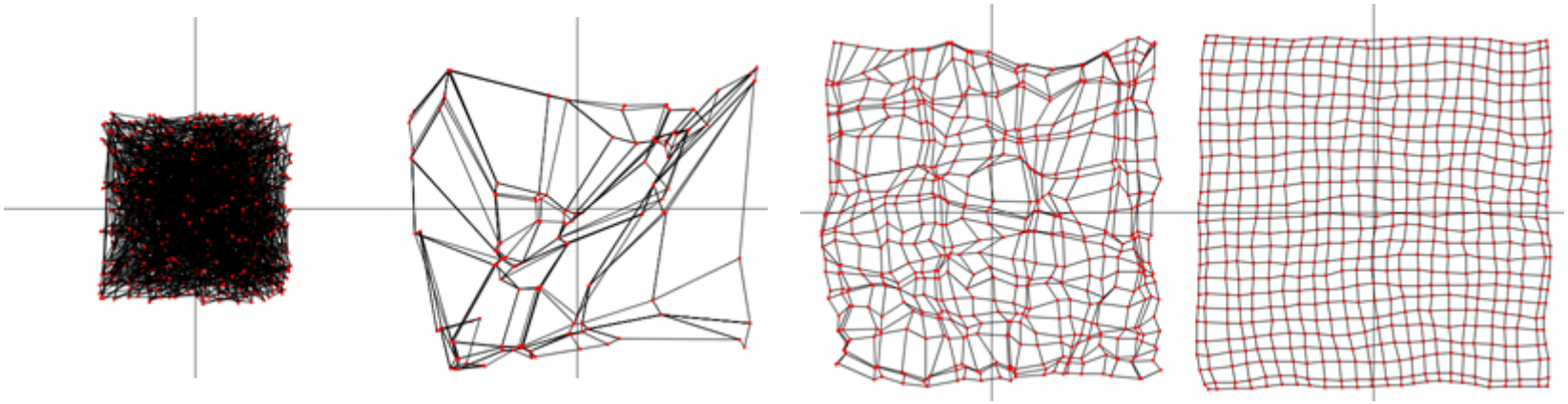
  "Something is self-organizing if, left to itself, it tends to become more organized. This is an unusual, indeed quite counter-intuitive property: we expect that, left to themselves, things get messy, and that when we encounter a very high degree of order, or an increase in order, something, someone, or at least some peculiar thing, is responsible. [...]

  But we now know of many instances where this expectation is simply wrong, of things which can start in a highly random state and, without being shaped from the outside, become more and more organized"

Self-organizing maps (SOM) Kohonen, T., 1995



- Struttura (tipica) a due livelli
  - Livello di mappa, con unità organizzate secondo una topologia prestabilita
  - Livello di input, o ingressi
  - Il livello di mappa è completamente connesso agli ingressi
  - Le connessioni hanno un peso associato
  - Gli input modificano i pesi secondo un criterio di similarità
- Adattamento (apprendimento?) non supervisionato
  - Le SOM si adattano progressivamente alla topologia del segnale in input



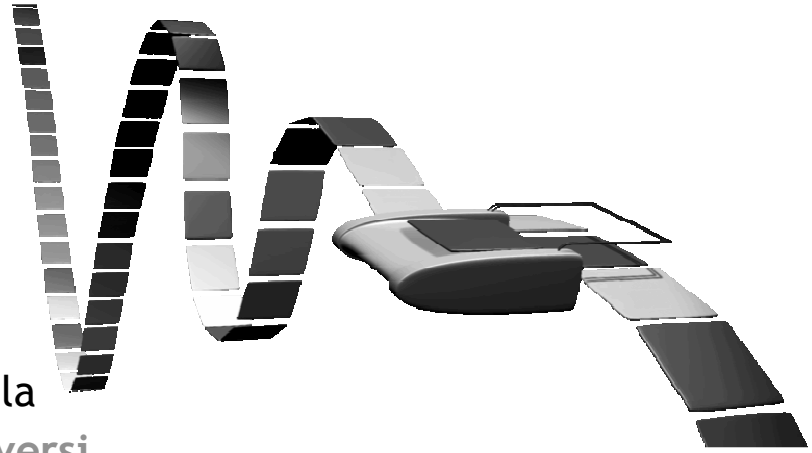
Self-organizing maps ed altre strutture adattative

- Demo

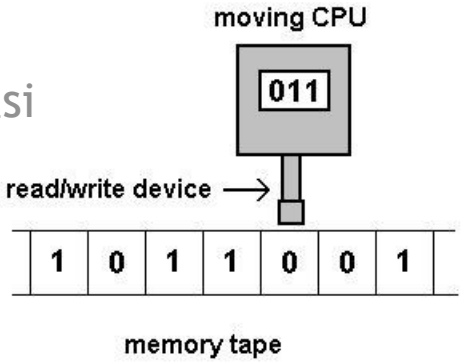
  http://www.neuroinformatik.ruhr-uni-bochum.de/ini/VDM/research/gsn/DemoGNG/SOM.html

  http://www.neuroinformatik.ruhr-uni-bochum.de/ini/VDM/research/gsn/DemoGNG/GNG.html

Macchina di Turing



- Modello astratto di computer
  - Un **nastro** con celle elementari, un **simbolo** in ogni cella
  - Una **testina** di lettura e scrittura delle celle, può **muoversi**
  - Uno **stato** della macchina (un **simbolo**)
  - Una CPU, vale a dire una **tavola di transizione**
    - { <*stato attuale*, *lettura cella*> → <*azione*, *nuovo stato*> }
      - (*azione* può essere *scrittura cella* o *movimento*)
- Generalità
  - Descrive in astratto la potenza di calcolo di un computer qualsiasi
    - Qualunque funzione sia calcolabile da un computer, è calcolabile da una macchina di Turing
    - L'unica differenza rispetto alle realizzazioni è il nastro illimitato



- Macchina di Turing Universale (*Universal Turing Machine*)
  - Versione estesa della macchina di Turing
  - La **tavola di transizione** viene caricata dal **nastro**, all'inizio
    - Può emulare qualsiasi macchina di Turing, data la **tavola di transizione**

Tesi di Church-Turing

Non esiste un'unica, concisa formulazione originale:
si tratta di un concetto espresso in più passaggi, da integrare con risultati teorici

- Una possibile formulazione (Wikipedia)

  "Every 'function which would naturally be regarded as computable' can be computed by a Turing machine."

La vaghezza della formulazione ha dato luogo a diverse interpretazioni,
una molto comune (e non del tutto esatta) può essere espressa come (Wikipedia):

"Every 'function that could be physically computed' can be computed by a Turing machine."

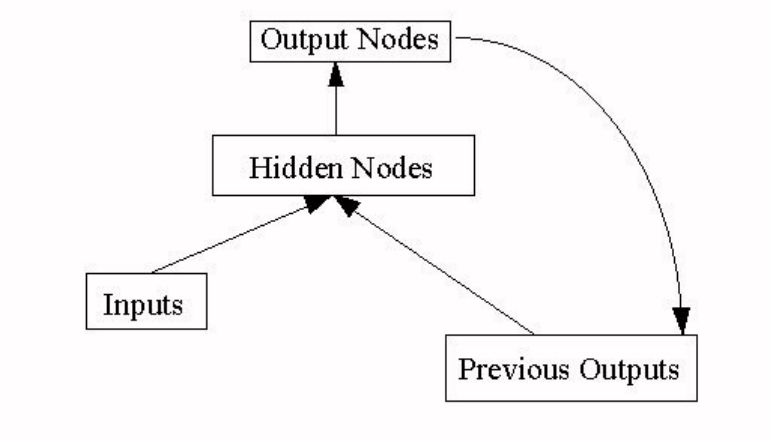
Searle: "... At present, obviously, the metaphor is the digital computer."

Reti neurali ricorsive (*feedback*)

- Le reti neurali ricorsive sono **macchine da calcolo complete**

  Il feedback include unità di memoria nel tempo
  (il requisito minimo è avere delle *delay unit*)

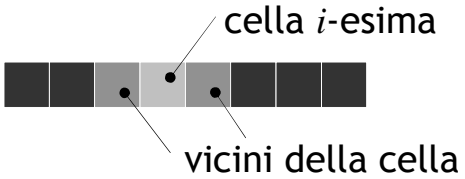
  Sono traducibili in macchine di Turing
  (Hyötyniemi, H., 1996)



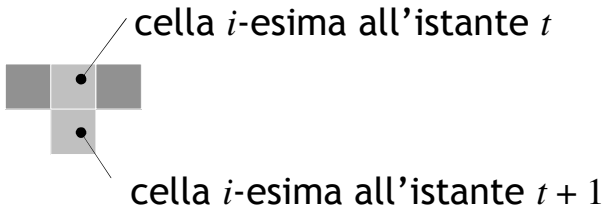
Non si conosce un metodo generale di apprendimento per le reti neurali ricorsive

Automi cellulari (*cellular automaton, CA*)

- Sistemi distribuiti e di calcolo parallelo
  - In ogni istante, ciascuna **cella** si trova in un determinato **stato**
    - Sono dati N stati possibili (minimo 2, ovviamente)
  - Ogni cella è connessa ad un certo numero di **vicini** (*neighbors*)
  - La **transizione di stato** dipende dallo stato attuale e lo stato dei vicini
    - Il processo è definito da regole
    - Ciascuna cella opera in parallelo (in modalità sincrona)
- Esempio
  - Un vettore di celle (automa unidimensionale)
  - 2 possibili stati, 8 possibili regole di transizione



Regola
di transizione



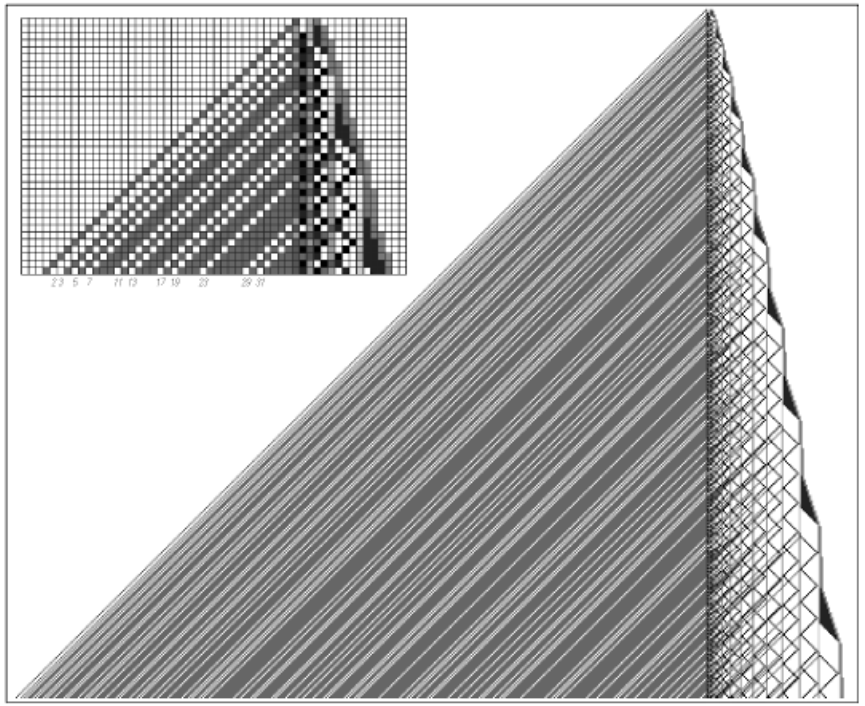
8 regole possibili ($N = 2$)

- Demo
  - *http://math.hws.edu/xJava/CA/*

Automi cellulari come macchine di Turing

- Gli automi cellulari sono modelli di calcolo
  - Data una configurazione iniziale ed un'opportuno set di regole, un CA unidimensionale può calcolare qualsiasi funzione

  Esempio (Wolfram, 2002)
  - Il sistema in figura calcola i numeri primi
    - Regione triangolare di sinistra
    - Le caselle grigie sono multipli di qualche $n > 2$
    - I 'buchi' bianchi sono numeri primi
      - Il 'risultato' si sposta progressivamente a sinistra



- *Universal Cellular Automaton* (Wolfram, 2002)
  - Un automa cellulare che può simulare qualsiasi altro automa cellulare

Altre forme di sistemi adattativi distribuiti

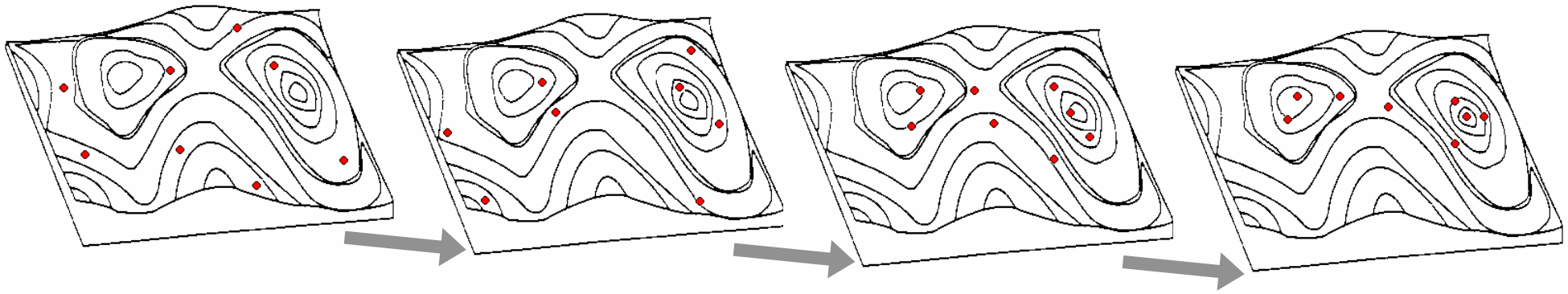
- Demo

  http://www.red3d.com/cwr/boids/

Calcolo evolutivo

- Idea intuitiva: evoluzione di una popolazione
  - Una funzione obiettivo (*fitness*) da ottimizzare
  - Una popolazione di campioni (punti nel dominio della funzione)
  - Operatori di ricampionamento: nuovi campioni da uno (o più) campioni esistenti
  - Selezione casuale della popolazione guidata dalla *fitness*:
    - Si scelgono campioni a caso, *preferendo* i campioni a *fitness* più elevata
    - I campioni prescelti vengono ricampionati e costituiscono una nuova generazione
    - (la prima generazione è generata in maniera completamente casuale)

- Gradualmente, la popolazione migra verso i massimi della *fitness*

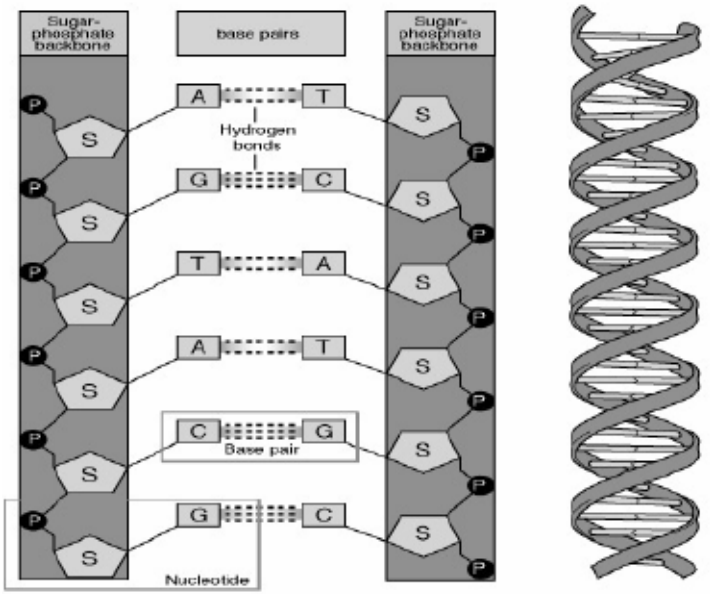


GA, EP e GP

Fondamentale è l'idea che il ricampionamento utilizzi **parti** della **rappresentazione** del campione selezionato (come fosse il DNA di un campione ..)

- Genetic Algorithms (GA)
  - Dominio: vettori di numeri
  - Ricampionamento: mutazione di una cella, ricombinazione di due vettori
  - Applicazione tipica: insiemi di parametri, associazioni, regole
- Evolutionary Programming (GA)
  - Dominio: grafi
  - Ricampionamento: modifica di una grafo, ricombinazione di due grafi
  - Applicazione: automi a stati finiti, reti neurali, circuiti
- Genetic Programming (GP)
  - Dominio: strutture ad albero
  - Ricampionamento: mutazione per ricostruzione, ricombinazione di due alberi
  - Applicazione: programmi, espressioni analitiche

DNA come macchina di Turing



Gli sviluppi della biochimica moderna permettono di operare in modo molto efficace sulle sequenze di DNA

La scala nanometrica dei processi consente di operare ad elevatissimo parallelismo e basso consumo di energia

- Operazioni sulle sequenze di DNA
  - Sintesi
    - Produzione di *oligonucleotidi* (brevi sequenze) con sequenza prestabilita
  - Denaturazione e rinaturazione (*annealing*)
    - *Separazione in due filamenti complementari e ricombinazione*
  - Connessione e taglio
  - Amplificazione
    - La *Polimerase Chain Reaction* (*PCR*) permette di copiare sequenze. Induce crescita *esponenziale*
  - Identificazione
    - Tramite elettroforesi o ibridazione è possibile identificare la presenza di sequenze
- *DNA Computing*
  - *L. Adelman, 1994 ha per primo utilizzato il DNA computing per risolvere un problema di cammino minimo sui grafi. Un noto algoritmo si applica al problema SAT*
  - In generale, l'uso delle operazioni sul DNA per il calcolo automatico