

# Sistemi Intelligenti Introduzione

Alberto Borghese

Università degli Studi di Milano  
Laboratorio di Sistemi Intelligenti Applicati (AIS-Lab)  
Dipartimento di Scienze dell'Informazione  
[borghese@dsi.unimi.it](mailto:borghese@dsi.unimi.it)



A.A. 2007-2008

1/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Sommario



**Organizzazione del corso e dell'esame.**

Sistemi Intelligenti: cosa e perché?

Le 4 prospettive sui Sistemi Intelligenti.

Breve storia dei Sistemi Intelligenti.

Intelligenza simbolica: la macchina di Turing.

A.A. 2007-2008

2/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Sistemi intelligenti (6cfu)



	Lezioni		
Martedì	10.30-12.30		Aula Beta
Giovedì	8.30-10.30		Aula Beta
Progetti			
Laboratorio	Orario da concordare		AIS-Lab
Ricevimento			
Martedì	10.30-12.30		Via Celoria
Su appuntamento	borghese@dsi.unimi.it		
Tel. (02)503.16325		Fax (02)503.16373	

*Le lezioni frontali saranno integrate da seminari di esperti del settore.*

A.A. 2007-2008

3/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Programma di massima



- Riflessioni filosofiche
- Sistemi Fuzzy
- Algoritmi genetici
- Reinforcement Learning
- Sistemi biologici
- Machine learning
- Introduzione sulla VR

A.A. 2007-2008

4/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Come studiare

Gli argomenti principali saranno: intelligenza simbolica, introduzione ai sistemi fuzzy, algoritmi genetici, apprendimento con rinforzo, clustering e mappe neurali, modelli parametrici, realtà virtuale.

Il corso è un corso flessibile e potete quindi (entro limiti ragionevoli!), decidere il livello di studio più appropriato ai vostri interessi.

**3o livello** – conoscenza generale. Contenuto delle slide. Elementi fondamentali di tutte le lezioni.

**2o livello** – Approfondimento – approfondimento sui testi o su articoli segnalati, degli argomenti relativi ad un argomento.

**1o livello** – Progetto – realizzazione di algoritmi e soluzioni da sperimentare su casi reali relative ad uno degli argomenti trattati.

A.A. 2007-2008

5/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Modalità di esame

- Scritto **per tutti**. E' richiesta una conoscenza di base degli argomenti del corso.

e

- Orale su ciascuna delle quattro parti (conoscenza di 2o livello).
- In alternativa: progetto su una o più parti del corso.

A.A. 2007-2008

6/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Testi di supporto ed approfondimento



**Testo di riferimento:** R. Sutton and A. Barto, Reinforcement Learning, MIT Press, 1998. On line a: <http://www.cs.ualberta.ca/~sutton/book/the-book.html>



**Testi ed articoli** relativi agli argomenti trattati verranno via via inseriti nella pagina WEB: <http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/Teaching/IntelligentSystems/References.rtf>

### **Programma Sul sito WEB:**

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/Teaching/IntelligentSystems/Programma.html>.

A.A. 2007-2008

7/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Precedenze



Precedenze consigliate:  
Matematiche. Fisica I. Elaborazione dei segnali.

### **Corsi di approfondimento**

Complementi di Ricerca Operativa (Prof. Trubian)  
Elaborazione delle immagini (Prof.ssa Campadelli)  
Fuzzy system (Prof. Aguzzoli, Prof. Marra)  
Intelligenza Artificiale (Prof. Ornaghi)  
Robotica ed Animazione (Prof. Borghese)  
Soft Computing (Prof. Apolloni)  
WEB, struttura, analisi e classificazione (Prof. Cesa-Bianchi).

.....

A.A. 2007-2008

8/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## I 3 filoni di sviluppo dell'informatica



- 1) Sistemi informativi (logistica/economia. Gran parte delle attività in Italia, supporto alla produzione aziendale, ma anche all'Amministrazione pubblica).
- 2) Computer Science / Computer Engineering (molto diminuita la differenza nel tra Science and Engineering, sviluppo di metodologia per elaborazione di informazione (immagini, database, genoma,...)).
- 3) Ingegneria del SW (campo attivo soprattutto negli USA e in India, produzione del SW e tecnologie relative).



## Perchè Sistemi Intelligenti?



- Utilizzo dei calcolatori per trovare soluzioni a problemi, soluzioni che gli esseri umani non sono in grado di trovare (facilmente).
- Realizzazione di macchine che sappiano imparare da sole.
- Capacità di analizzare le situazioni e scegliere i comportamenti migliori.
- Capacità di analizzare le situazioni e scegliere i comportamenti più adatti alle situazioni (clustering).
  
- La nuova generazione di macchine mira a dare un'intelligenza alle macchine.
  
- Calcolatore come partner intelligente dell'uomo.



## Alcune macchine intelligenti



- Alcuni nomi: agenti, google engine, smart routing, smart scheduling, smart phone....
  
- Ricerca ontologica su WEB.
- Sistemi di visione artificiale.
- Pervasive computing.
- Agenti fissi e mobili.
- Robotica
- Routing
- Scheduling
  
- .....
- .....



## Il nostro approccio all'intelligenza delle macchine



Vedremo alcune tecniche ed i fondamenti su cui vengono sviluppate le applicazioni “intelligenti”.

Prima di immergerci in questi problemi, riprenderemo gli argomenti principali dell'intelligenza artificiale classica e gli studi sull'intelligenza simbolica.

Il nostro approccio alla soluzione di problemi è basato sull'**intelligenza sub-simbolica**.



## Sommario



Organizzazione del corso e dell'esame.

**Sistemi Intelligenti: cosa e perché?**

Le 4 prospettive sui Sistemi Intelligenti.

Breve storia dei Sistemi Intelligenti.

Intelligenza simbolica: la macchina di Turing.



## Domanda di fondo



**Agente** (software): essere software che svolge servizi per conto di un altro programma, solitamente in modo automatico ed invisibile. Tali software vengono anche detti agenti intelligenti

Un agente può valutare il proprio comportamento in questi termini:

Adeguato – Non adeguato.

Successo – Fallimento.

Quanto adeguato? Quanto successo?

Richiede una misura di performance (può essere solamente una misura relativa).

Ottimizzazione: Comportamento più adeguato, più succesful.

Scopo: Agenti sempre migliori.



## Sistemi intelligenti.



**Sistema.** Aggregato complesso di oggetti o entità.  
Sistema articolato. Calcolatore (sistema elettronico). Robot. Cellula. Esseri viventi.

- A) Integrazione tra le varie parti. Funzionamento come un tutt'uno (e.g. rete di agenti, sensor networks, rete di elementi con intelligenza limitata, emergent computation).
  - B) Dimensione temporale. Funzionamento di un sistema (evoluzione, miglioramento con il tempo).
- . Interazione funzionale e sostanziale tra le varie parti.

15/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Sistemi intelligenti.



**Intelligenti.** (lat. intelligentia, da intelligere, intendere). Facoltà di conoscere, di comprendere, di intendere. Capacità di comprendere, di intendere con facilità, di discriminare.

**Intelligenza cognitiva.** E' una definizione soddisfacente?

Dai sistemi naturali ai sistemi artificiali; dall'intelligenza umana all'intelligenza delle macchine.

A.A. 2007-2008

16/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Capacità associate all'intelligenza



	Il virus è intelligente?	Il robot è intelligente?
•Capacità di interazione con l'ambiente in modo efficace.	Sì	Sì
•Capacità di adattarsi alle modifiche ambientali.	Sì	No
•Capacità di generalizzazione, inferenza.	No	Nì
•Capacità di analisi.	No	Nì
•Capacità di sintesi.	No	Nì
•Capacità di apprendere.	Nì	Nì
•Capacità di evolvere.	Sì	Nì
<i>Ma anche:</i>		
•Capacità di interagire con altre entità (intelligenza emotiva).	No	Nì

A.A. 2007-2008

17/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Punto di vista antropocentrico



C'è più intelligenza nel risolvere un'equazione differenziale o nel bere da un bicchiere d'acqua?

Dal nostro punto di vista sicuramente nel risolvere un'equazione differenziale, ma dal punto di vista di un robot?

Sono più intelligenti gli insetti, sopravvissuti a miliardi di anni di storia o l'uomo?

Un bambino di 1 anno è in grado di riconoscere perfettamente i volti delle persone care, i sistemi di visione in grado di controllare gli accessi sono ancora in studio....

A.A. 2007-2008

18/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Intelligenza (operativa)



Intelligenza è una funzione **attiva**, che consente a breve termine di trovare **soluzioni nuove** a problemi nei domini di **interazione** con l'ambiente.

Capacità di **destreggiarsi** in **situazioni nuove** o insolite cogliendo i **significati** e le **relazioni** tra gli oggetti, senza passare necessariamente per tentativi ed/od addestramento.

- 1) Destreggiarsi. Agire congruentemente con un'analisi della situazione.
- 2) Cogliere le relazioni tra oggetti o situazioni. Associazione tra situazioni simili.

Reinforcement learning, clustering, modelli statistici parametrici.



## Pezzi di intelligenza incontrate



Algoritmi: sequenza di operazioni per risolvere problemi.

Intelligenza Artificiale. Strumenti per sviluppare soluzioni a problemi.

.....

Connessionismo, Ant colonies... Ricerca di soluzioni per problemi complessi.

Intelligenza  
Simbolica



Intelligenza  
Sub-Simbolica



## Il nostro punto di vista



Un essere umano **impara interagendo** con l'ambiente.

Una macchina deve essere dotata di una "machinery" in grado di farla imparare dalle sue azioni, ovvero di modificare il suo comportamento in modo adeguato.

In particolare analizzeremo a fondo l'**apprendimento con rinforzo** (**reinforcement learning**) e vedremo come le macchine possano autonomamente strutturarsi per risolvere problemi complessi in alcuni casi ottenendo soluzioni migliori delle soluzioni algoritmi, AI...

Per imparare la macchina deve analizzare la sua interazione con l'ambiente (la statistica non è inutile....).



## I principi del reinforcement learning



L'ambiente fornisce un'informazione del tipo giusto/sbagliato successo/fallimento

Questa è un'informazione qualitativa → *learning with a critic*.

*L'informazione disponibile si chiama segnale di rinforzo. Non dà alcuna informazione su come aggiornare i pesi. Non è possibile definire una funzione costo o un gradiente.*

*Obiettivo: creare degli agenti "intelligenti" che abbiano una "machinery" (critic) per analizzare l'interazione con l'ambiente e migliorarsi cuiè per apprendere dalla loro esperienza.*



## Sommario

Organizzazione del corso e dell'esame.

Sistemi Intelligenti: cosa e perché?

**Le 4 prospettive sui Sistemi Intelligenti.**

Breve storia dei Sistemi Intelligenti.

Intelligenza simbolica: la macchina di Turing.

A.A. 2007-2008

23/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Quale intelligenza?

Bambini autistici di Oliver Sacks (*O. Sacks, un antropologo su Marte, Feltrinelli*).



Vincent Van Gogh (1853-1890)

<http://www.ibiblio.org/wm/paint/auth/gogh/>

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Le intelligenze

- Linguistico-verbale (padronanza delle parole e loro utilizzo efficace).
- Logico-matematica (valutare gli oggetti scoprendone le relazioni ed i principi ad essi sottesi).
- Visivo-spaziale (capacità di visualizzare e trasformare mentalmente scene tridimensionali).
- Kinestesica o fisica (abilità nella percezione accurata del proprio corpo e della sua posizione, e del controllo e della coordinazione accurata del movimento).
- Naturalistica (osservazione di una parte del tutto e sua classificazione).
- Musicale (capacità di discriminazione dei suoni in modo esatto, orecchio assoluto).
- Intrapersonale (capacità di conoscere a fondo il proprio stato d'animo, le proprie aspirazioni e le pulsioni)
- Interpersonale (capacità di percepire gli stati d'animo altrui).
- Esistenziale (Rillettere sulle domande fondamentali dell'esistenza: chi sono? Da dove vengo? Dove andiamo?)



## Le 4 prospettive sui sistemi intelligenti

**Prospettiva Intelligenza simbolica.** Ragionamento automatico, rappresentazione della conoscenza.

**Prospettiva biologica.** Se il cervello contiene intelligenza, perché non cercare di capirlo per duplicarne i meccanismi?

**Prospettiva cibernetica.** Parte dal controllo delle macchine per arrivare al controllo intelligente. Si è sviluppata nel connessionismo e più recentemente nel filone del “machine learning”.

**Prospettiva robotica.**



## 1) Intelligenza simbolica



**Prospettiva Intelligenza simbolica.** Ragionamento automatico, rappresentazione della conoscenza.

Codifica della realtà mediante simboli e manipolazione degli stessi per ottenere la soluzione ai problemi sottostanti.

**Intelligenza Artificiale.** Sistemi che pensano o agiscono come gli umani. Sistemi che pensano o agiscono razionalmente.

**Algoritmi.** Codifica di un procedimento per la soluzione di un problema o per la codifica di un procedimento per ricercare una soluzione ad un problema.

**Agente.** Essere (software) che svolge servizi per conto di un altro programma, solitamente in modo automatico ed invisibile.



## 1) Algoritmi & AI



Conoscenza + metodi per la soluzione di problemi

Informatica



Definizione di algoritmi (da Muhammad Ibn Musa al-Kharezmi, matematico arabo dell'inizio del IX sec).

AI



Conoscenza - Metodi euristici

Marvin Minsky: *the society of mind* (1961).

Sviluppo di motori inferenziali per la soluzione dei problemi. Soluzione non-ottima, ma "veloce".



## Analisi / Sintesi di sistemi intelligenti



### **Analisi del funzionamento e della struttura dei sistemi intelligenti naturali.**

Descrizione algoritmica del funzionamento.

Applicazione a strutture artificiali.

Sintesi del funzionamento.

### **Sintesi delle macchine intelligenti artificiali.**

D. Marr, 1980

E' un approccio simbolico?

In che relazione sta con l'apprendimento con il rinforzo?



## 2) Prospettiva biologica



**Prospettiva biologica.** Capacità di apprendere. Il nostro sistema nervoso centrale è costituito da unità elementari: i neuroni. Come questi neuroni riescono ad organizzare e gestire i comportamenti visivi e motori più complessi, ma anche le emozioni, i sentimenti....

Cosa possiamo imparare dai sistemi biologici?

Una risposta è data dalle **Scienze Cognitive** (data di nascita 1977).



### 3) La cibernetica



**Prospettiva Cibernetica.** Comportamento, controllo e comunicazione tra esseri intelligenti e macchine. Κυβερνητη (kubernete, timoniere).

Teoria del controllo. Controllo stabile, robusto; controllo lineare, non-lineare. Controllo stocastico.

Ci occuperemo in particolare della **Computational Intelligence**.



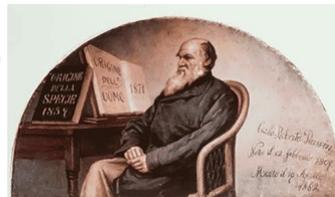
### Computational Intelligence



**Connessionismo.** Modelli del funzionamento del sistema nervoso centrale, reti neurali.

Capacità di evolvere. **Algoritmi genetici / evolutivi** (C. Darwin, 1859).

- Colori mimetici (camaleonti, polpi, squali)
- Disegni che spezzano la forma (zebre, pesci)
- Falsi occhi
- Membrana tra le dita degli uccelli.



**Artificial life.** Capacità di interagire con altri esseri. (ant colony).

Giochi (gioco della vita). Automi cellulari (modelli, computer graphics). Dinamiche di popolazione.

**Machine learning.** Apprendimento da parte delle macchine.



## 4) La robotica



**Prospettiva Robotica.** Robotica antropomorfa. Animatronica. (K. Capeck, 1921, Asimov, 1944). “Force through intelligence” - “Where AI meet the real world”.



A.A. 2007-2008

33/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Riassunto



L'intelligenza è qualcosa difficile da definire, è qualcosa che si vorrebbero avessero anche le macchine.

Intelligenza è una funzione *attiva*, che consente a breve termine di trovare soluzioni nuove a problemi nei domini di interazione con l'ambiente: razionale, motorio, visivo, emozionale. Questa abilità è presente nel bambino già a 12 mesi.

Intelligenza indica anche la capacità di comprendere, estrazione di conoscenza dagli input sensoriali.

Grossi sforzi multi-disciplinari sono nella direzione di chiarire cosa e come funzioni la nostra intelligenza (o meglio i nostri sistemi intelligenti).

A.A. 2007-2008

34/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Sommario



Organizzazione del corso e dell'esame.

Sistemi Intelligenti: cosa e perché?

Le 4 prospettive sui Sistemi Intelligenti.

**Breve storia dei Sistemi Intelligenti.**

Intelligenza simbolica: la macchina di Turing.



## Come si "apprende" l'intelligenza?



### Cartesio (1596-1650)

*Separazione tra corpo e mente.*

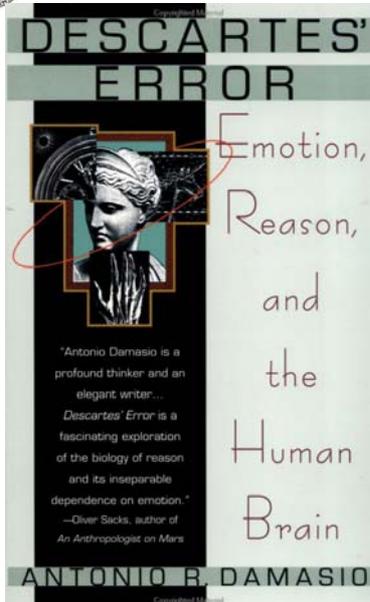
**Mente:** Idee innate (sviluppatasi al di fuori della mente). Idee derivate da esperienze sensoriali. La mente è astratta, raccordata al corpo dalla ghiandola pineale - epifisi).

**Corpo:** Parte Motoria. Parte sensoriale (può essere imitata dagli automi)





## Antonio Damasio (1994)



### Phineal Gage

Interazione molto stretta tra mente (intesa come sede delle facoltà intellettive) e corpo sede delle capacità sensoriali e motorie.

*Intelligenza razionale ed intelligenza emotiva sono strettamente collegate.*

<http://www.sicap.it/merciai/psicosomatica/students/damasio-s1.htm>



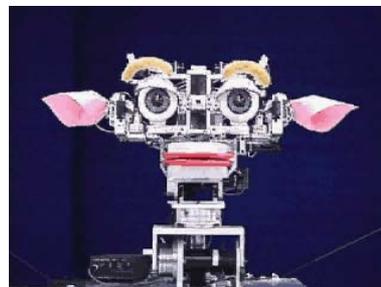
## Le macchine emotive



“Il problema non è se le macchine intelligenti possano avere emozioni, ma se le macchine possano essere intelligenti senza avere alcuna emozione” (M. Minski, the society of mind, 1985).



Leonardo



Kismet

A.A. 2007-2008

38/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## La sede dell'intelligenza naturale in prospettiva storica



Aristotele (384-323b.C.)

- L'intelligenza ha sede nel **cuore** (mente associazionista).
- Modello funzionale: idee, immagini, sensazioni.
- Principi di associazione: Similarità Opposizione Contiguità di tempo e spazio



Galeno (129-199). Medico greco a Pergamo: prime osservazioni **neurologiche**. La sede delle attività intelligenti è il **cervello**.

Il cervello viene definito come grossa ghiandola i cui "umori" (ormoni) vengono portati alla periferia mediante i nervi

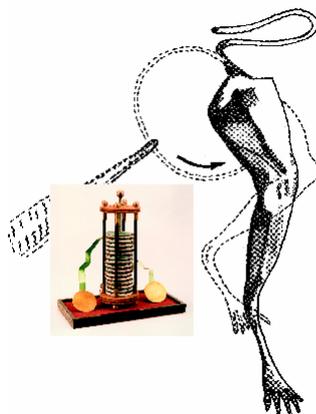
A.A. 2007-2008

39/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## I fondamenti dell'intelligenza nell'uomo



Luigi Galvani (Bologna 1737-1798). "**De viribus electricitatis in motu musculari. Commentarius**".

Nel 1780, osservò per caso che un bisturi, avvicinato inavvertitamente ai nervi di una rana scuoiata, provocava violente contrazioni dei muscoli dell'animale e attribuì la causa del fenomeno a una particolare forma di elettricità animale. Questa teoria, avversata dal Volta, dette origine a una violenta polemica tra i due.

<http://www.bo.infn.it/galvani/>

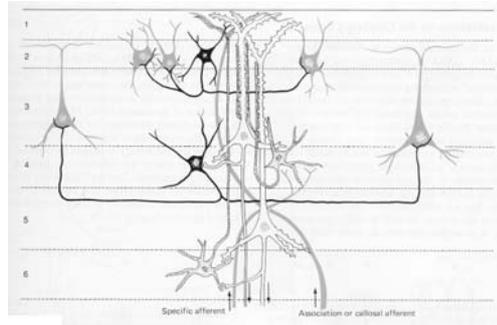
A.A. 2007-2008

40/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Camillo Golgi & Ramon y Cajal



Il sistema nervoso dell'uomo è costituito da elementi (cellule), connesse in punti particolari (le sinapsi).

**Von Helmholtz** scoprì che l'attività elettrica scoperta da Galvani si trasmetteva da una parte all'altra del neurone e da un neurone all'altro.

**Claude Bernard e John Lagley** dimostrarono che alcuni farmaci potevano inibire la trasmissione del segnale elettrico.

A.A. 2007-2008

41/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



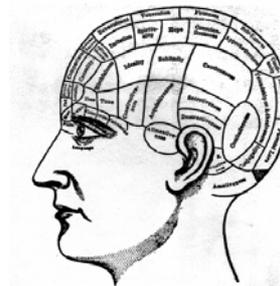
## Localizzazione



**Frenologia** (F.J. Gall, 1825).

- Localizzazione delle funzioni mentali.
- Modulazione dell'ampiezza delle aree associate con l'uso della funzione (e.g. muscolo attivato).

Cosa succede se una regione si allarga?



- Protrude sulle regioni più vicine creando i solchi cerebrali.
- *Anatomical Personology.*

A.A. 2007-2008

42/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Teorie alternative



**Teoria del campo aggregato** (P. Flourens, 1823).

- Tutte le aree del cervello partecipano a tutte le attività intellettive.
- Una lesione affligge tutte le attività intellettive allo stesso modo.

**Connessionismo cellulare** (K. Wernicke and R. Cajal, fine 1800)

- I neuroni sono connessi tra loro in gruppi funzionali.
- Le connessioni sono in numero definito.
- Gruppi funzionali diversi danno origine a funzioni intellettive diverse.

Quest'ultima e' la teoria moderna delle funzioni cognitive cerebrali.

**Circuiti neurali.**



## Gli albori dei sistemi intelligenti artificiali



“Steps towards *Artificial Intelligence*”, M. Minsky, 1961.

**La macchina di Turing, 1936.** Qualsiasi operazione di calcolo simbolico fattibile può essere effettuata da una macchina dotata di un insieme finito di regole.

I primi esperimenti con “neuroni artificiali”: McCulloch&Pitts, 1947.  
“A Logical Calculus of the Ideas Immanent in the Nervous Activity”

**Connessionismo.** Il sistema nervoso centrale puo' quindi implementare una macchina di Turing e viceversa!



## Le origini del RL



### Due matrici:

- Teoria del controllo retroazionato (Maxwell, 1868: “On Governors”) e sua evoluzione verso il Controllo Stocastico (Wiener & Kolmogorov, 1943; Ka “Behavior, Purpose and Technology”, Rosembueth, Wiener, Bigelow; Kalman).
- Psicologia. Apprendimento mediante trial and error (-> rinforzo, I.Pavlov).  
=> **Machine learning**).

*“Of several responses made to the same situationj, those which are accompanied or closely followed by satisfaction to the animal will, other things being equal, be more firmly connected with the situation, so that, when it recurs, they will be more likely to recur; those which are accompanied or closely followed by discomfort to the animal will, other things being equal, have their connections with that situation weakened, so that, when it recurs, they will be less likely to occur. The greater the satisfaction or discomfort, the greater the strengthening or weakening of the bond. (Thorndike, 1911, p. 244).*

### Law of effects.

A.A. 2007-2008

45/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## The law of effects



- Selettività
- Associatività (alla situazione – stato).

Search  
Memory

M. Minsky

SNARC, 1960

Steps Toward Artificial Intelligence, 1961.

*Credit Assignment.*

Michie Chambers. Box controller to learn to maintain upright a pole. Reinforcement was used to discover the proper action associated to each state (box). 1968.

Barto, Sutton, Anderson, 1983. Neuronlike elements that can solve difficult learning control problems. *IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics.*

A.A. 2007-2008

46/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Learning and machines



Learning with a teacher (receive information)

Learning with a critic (build knowledge)

(Widrow, Gupta and Maitra, 1973)

Klopf – end of the seventies.

Appendimento con una critica attraverso l'ambiente.

Sutton, 1978. Temporal difference

Temporal difference <--> Optimal control through Dynamic Programming -> Qlearning (Watkins, 1989).



## Sommario



Organizzazione del corso e dell'esame.

Sistemi Intelligenti: cosa e perché?

Le 4 prospettive sui Sistemi Intelligenti.

Breve storia dei Sistemi Intelligenti.

**Intelligenza simbolica: la macchina di Turing.**



## Matematica e logica



Una formula della logica formale può essere soddisfatta o meno?  
Si può arrivare alle dimostrazioni automatiche? (David Hilbert, 1900).

Parallelo tra logica e matematica.

Espressioni matematiche come espressioni logiche

Dimostrazione di espressioni logiche  $\rightarrow$  Dimostrazioni di teoremi.



## Il teorema di incompletezza di Gödel (1931)



Esempio: sistema logico associato ai numeri interi positivi.

Non può esistere un metodo che consenta di stabilire, per qualunque enunciato dell'aritmetica che riguarda i numeri interi e positivi, se è vero o falso.

*“Qualunque sistema coerente di logica formale, deve comprendere enunciati veri di cui non è possibile dare una dimostrazione (1931)”.*

Questo ha spostato l'attenzione della logica dal concetto di **verità** al concetto di **provabilità**.



## Computabilità - Church, 1936



### La tesi di Church (1936):

Ogni funzione che sia *effettivamente* calcolabile è *ricorsivamente* computabile ( $\lambda$ -calcolo  $\Rightarrow$  LISP).

*effettivamente* indica che esiste una procedura “meccanica” in grado di calcolare la funzione in un tempo **finito** (uscita in funzione dell'ingresso:  $y=f(x)$ )

*ricorsivamente* indica che esiste un insieme **finito** di operazioni aritmetiche elementari che, applicate all'ingresso e poi ai risultati successivi delle operazioni stesse, conducono, in un tempo **finito**, al valore della funzione.



## La macchina di Turing (1936)



Una formula della logica formale può essere soddisfatta o meno?  
Si può arrivare alle dimostrazioni automatiche? (David Hilbert, 1900).

Soluzione di un problema  $\Rightarrow$  Computazione  $\Rightarrow$   
Metodo di computazione = Algoritmo  $\Rightarrow$   
Macchina computazionale

### Dimostrazione di Turing (1936):

Qualsiasi funzione ricorsivamente computabile può essere calcolata in un tempo finito da una macchina manipolatrice di simboli (**macchina universale di Turing**).

Un algoritmo eseguibile dalla macchina di Turing è detto esattamente computabile



## Per conoscere meglio A. Turing.



- L'articolo originale di Turing:  
Alan. M.Turing, "On Computable Numbers, With an Application to the Entscheidungsproblem," *Proc. London Math. Soc.*, 2(42) (1936), 230-265; può essere reperito all'indirizzo:  
[http://www.thocp.net/biographies/papers/turing\\_oncomputablenumbers\\_1936.pdf](http://www.thocp.net/biographies/papers/turing_oncomputablenumbers_1936.pdf)
- Il sito ufficiale di Alan Turing è:
  - ◆ <http://www.turing.org.uk/turing/>.



## La macchina di Turing (razionale)



Come si fa a dare una definizione precisa di metodo?

Il metodo è un algoritmo. Passi elementari automatici.

Si può implementare una macchina che implementi questi passi elementari.

**Dato un tempo finito, la macchina di Turing è in grado di effettuare qualunque calcolo che possa essere eseguito da un moderno calcolatore digitale, di qualunque potenza esso sia. (esempio: programma ha un'uscita (risultato) o rimane in loop?).**

La macchina di Turing realizza un algoritmo, computabile.



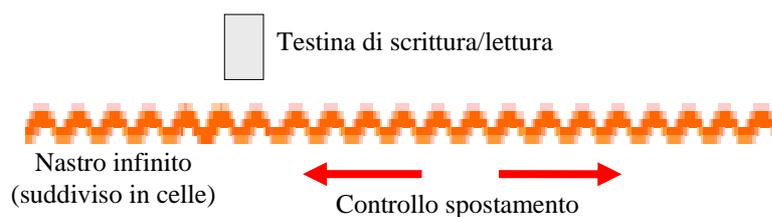
## Conseguenze

Un calcolatore digitale tradizionale, purché abbia il programma giusto, una memoria abbastanza grande e tempo a sufficienza, può calcolare qualsiasi funzione tra ingresso e uscita governata da regole (che siano meccaniche e deterministiche). Può cioè fornire in ogni caso un'uscita adeguata in funzione degli input forniti dall'ambiente e dello stato (che riassume la storia degli input dell'ambiente).

Il problema diventa **definire il programma**. Definizione simbolica (algoritmo), o definizione in linguaggio macchina (sub-simbolica).



## Una macchina di Turing



Alfabeto

$A [a_0, a_1, \dots, a_n]$

Non ci sono limiti alla lunghezza della parola. Un simbolo per cella. Può **cancellare** o **leggere** un simbolo alla volta.

Fu sviluppata durante la guerra per decodificare le trasmissioni.



## Stato della macchina

Testina di scrittura/lettura



Nastro infinito



Alfabeto

$A [a_0, a_1, \dots a_n]$

Stato

$S [s_0, s_1, \dots s_m]$

Stato della macchina. Ciascuno stato viene descritto mediante gli effetti che ha l'azione ha sulla macchina stessa.

Esempio: carattere stampato quando viene premuto Shift, NumLock, Alt, nulla...).

A.A. 2007-2008

57/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## Funzionamento (istruzioni)

Testina di scrittura/lettura



Nastro infinito



Alfabeto

$A [a_0, a_1, \dots a_n]$

Stato

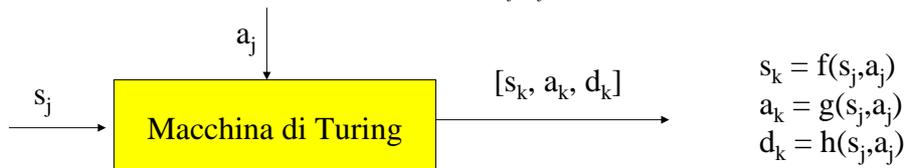
$S [s_0, s_1, \dots s_m]$

Direzione (dx, sx, stop)

$d [d_1, d_2, d_3]$

Istruzioni (terna di valori)

$I \{I_j(s_j, a_j \rightarrow s_k, a_k, d_k)\}$



A.A. 2007-2008

58/62

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/>



## La macchina di Turing universale



Computabilità teorica e sperimentale coincidono (definizione intuitiva di computabilità).

Ponte tra teoria e tecnologia.

Ponte tra matematica e logica (NB i calcolatori sono basati su logica booleana, ma eseguono operazioni matematiche...).

Equivalenza tra una macchina  $M$  ed una macchina astratta (interpreti).



## Che cosa "capisce" la macchina di Turing?



La macchina di Turing manipola simboli di cui non conosce il significato, a differenza della mente umana.

Replica operativa e non semantica.

Replicare il funzionamento di un elaboratore vuol dire capirne il funzionamento, il sistema operativo, l'applicativo?



## Riassunto

La macchina di Turing universale consente di rappresentare un qualunque algoritmo e una qualunque funzione computabile.

E' basata su operazioni elementari su un alfabeto di simboli, molto simile al funzionamento di un calcolatore elettronico.

La macchina di Turing manipola simboli di cui non conosce il significato, a differenza della mente umana.



## Sommario

Organizzazione del corso e dell'esame.

Introduzione ai Sistemi Intelligenti.

Intelligenza simbolica: la macchina di Turing.



## Riflessioni



- Costruire una macchina di Turing in grado di concatenare due stringhe.
- Costruire una macchina di Turing in grado di eseguire le istruzioni di un elaboratore. Come risolvereste il problema di codifica?
- Cosa vuole dire che una macchina di Turing è in grado, mediante un algoritmo, di risolvere un qualsiasi problema. Che relazione ha ciò con l'intelligenza?