

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



A.A. 2004-2005

1/58

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



Perchè Sistemi Intelligenti?



- Ricerca ontologica su WEB.
- Sistemi di visione artificiale.
- Pervasive computing.
- Agenti fissi e mobili.
- Robotica

.....

.....

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

A.A. 2004-2005

2/58

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



Programma



Sul sito WEB:

[http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/Teaching/Intelligent Systems/Programma.html](http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/Teaching/Intelligent%20Systems/Programma.html).



Sommario



Organizzazione del corso e dell'esame.

Introduzione ai Sistemi Intelligenti.

Intelligenza simbolica: la macchina di Turing.



Sistemi intelligenti (6cfu)



	Lezioni		
Martedì	17.30-19.30		Sala Lauree
Venerdì	16.30-18.30		Sala Lauree
Progetti			
Laboratorio	Orario da concordare		AIS-Lab
Ricevimento			
Mercoledì	14.30-15.30		Stanza 104
Su appuntamento	borgnese@dsi.unimi.it		
Tel. (02)503.16325		Fax (02)503.16373	

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

A.A. 2004-2005

5/58

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



Come studiare



Il corso è suddiviso in 4 macro-blocchi: Introduzione ed intelligenza simbolica, intelligenza biologica, introduzione al connessionismo, visione.

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 macro-blocco.

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

A.A. 2004-2005

6/58

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



Modalità di esame



- Scritto **per tutti**. E' richiesta una conoscenza del corso di 3o livello.

e

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



Testi di supporto ed approfondimento



Pagina del corso:

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



Precedenze



Precedenze consigliate:

Analisi I. Fisica I. Elaborazione dei segnali. Geometria computazionale.

Corsi di approfondimento

Elaborazione delle immagini (Prof.ssa Campadelli)

Reti Neurali (Prof. Apolloni)

Intelligenza Artificiale (Prof. Ornaghi)

Robotica ed Animazione (A.A. 2005-2006)?



Sommario



Organizzazione del corso e dell'esame.

Introduzione ai Sistemi Intelligenti.

Intelligenza simbolica: la macchina di Turing.



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/>



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....



Perchè lo studio dell'intelligenza biologica è interessante?



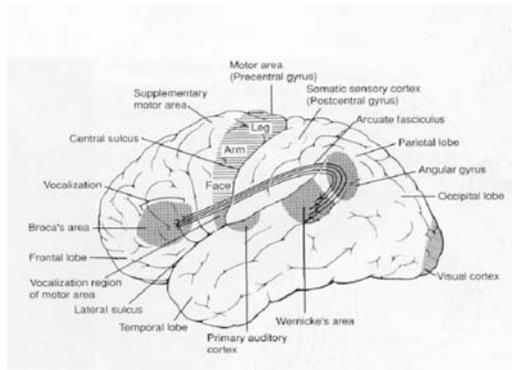
Robusto e fault tolerant

Flessibile

Calcolo parallelo

Dissipa poca energia.

Gestisce informazioni sensoriali affette da rumore.



A.A. 2004-2005

13/58

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



Come si "apprende" l'intelligenza?



Cartesio (1596-1650)

Separazione tra corpo e mente.

Mente: Idee innate (sviluppatesi al di fuori della mente).

Idee derivate da esperienze sensoriali. La mente è astratta, riacordata al corpo dalla ghiandola pineale - epifisi).

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



Antonio Damasio (1994)

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

Intelligenza razionale ed intelligenza emotiva sono strettamente collegate.

A.A. 2004-2005

14/58

<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 evolversi.	Sì	Nì
<i>Ma anche:</i>		
•Capacità di interagire con altre entità (intelligenza emotiva).	No	Nì
•Istinto?	Sì	Sì

A.A. 2004-2005 15/58 http://homes.dsi.unimi.it/~borghese/



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.
- B) Dimensione temporale. Funzionamento di un sistema.

. Interazione funzionale e sostanziale tra le varie parti.



Sistemi intelligenti.



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

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



Alcuni punti fermi

Intelligenza vs. istinto.

Adattabilità genetica vs. adattabilità cognitiva.

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.

La sfida tecnologica e scientifica è capire, duplicare e “migliorare” queste abilità umane.



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.

Analisi delle macchine intelligenti artificiali.

D. Marr, 1980



Le 4 prospettive sui sistemi intelligenti



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.

Agenti. Esseri virtuali in grado di avere comportamenti intelligenti.



Le 4 prospettive sui sistemi intelligenti

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).



Le 4 prospettive sui sistemi intelligenti

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 del **Connessionismo**.



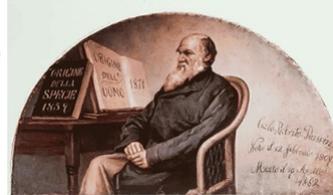
Il connessionismo



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.



Le 4 prospettive sui sistemi intelligenti



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





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).



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

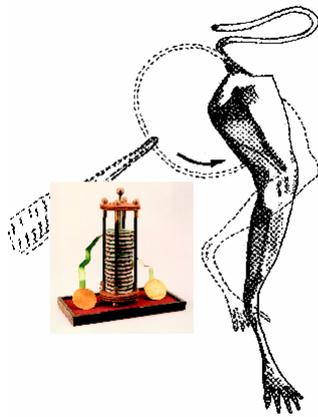


Galeno (129-199). Medico greco a Pergamo: prime osservazioni *neurologiche*. La sede delle attività intelligenti è il *cervello*.

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



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/>

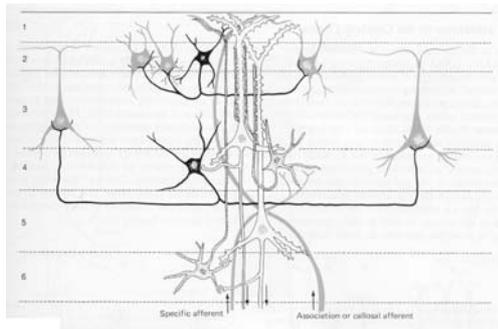
A.A. 2004-2005

27/58

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



Camillo Golgi & Raymon 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. 2004-2005

28/58

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



Localizzazioneismo



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*.



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 è la teoria moderna delle funzioni cognitive cerebrali.

Circuiti neurali.



Gli albori dei sistemi intelligenti artificiali



Teoria del controllo retroazionato (Maxwell, 1868: “On Governors”)

Teoria del *controllo stocastico* (N. Wiener and D. Kolmogorov, 1943)
“Behavior, Purpose and Technology”, Rosemblyeth, Wiener, Bigelow.
=> *Machine learning*.

“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.

“A Logical Calculus of the Ideas Immanent in the Nervous Activity”, 1943. *Connessionismo*. Il sistema nervoso centrale può quindi implementare una macchina di Turing.

A.A. 2004-2005

31/58

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



Le ricadute dei sistemi intelligenti



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”.

A.A. 2004-2005

32/58

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



Sommario



Organizzazione del corso e dell'esame.

Introduzione ai Sistemi Intelligenti.

Intelligenza simbolica: la macchina di Turing.



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 => Computazione =>
Metodo di computazione => Algoritmo =>
Macchina computazionale



Sistema logico



- Un sistema logico comprende vari assiomi da cui otteniamo dei teoremi in seguito all'applicazione ripetuta di regole di inferenza.
- La scuola dei formalisti a cui faceva capo Hilbert, traduceva gli assiomi in stringhe e le regole di inferenza in manipolazioni di stringhe.
- Affermavano anche che le regole di inferenza dovessero operare esclusivamente secondo modalità bene definite (e.g. Macchina di Turing).
- Un sistema logico che soddisfi tali condizioni **formali** si definisce **logica ricorsiva**.
- Problema di **completezza**. E' possibile dimostrare come toremi tutti gli enunciati veri all'interno del sistema logico.



Il teorema di incompletezza di Gödel



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 **computabilità**.



Computabilità



La tesi di Church (1936):

Ogni funzione che sia *effettivamente* calcolabile è *ricorsivamente* computabile (λ -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.

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

A.A. 2004-2005

37/58

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



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.cs.umass.edu/~immerman/cs601/turingReference.html>
- Il sito ufficiale di Alan Turing è:
 - ◆ <http://www.turing.org.uk/turing/>.

A.A. 2004-2005

38/58

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



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

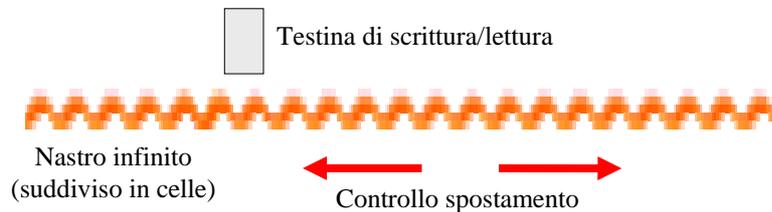


Un calcolatore digitale tradizionale, purché abbia il programma giusto, una memoria abbastanza grande e tempo a sufficienza, può calcolare qualsiasi funzione tra ingresso e uscita governata da regole (che siano meccaniche e deterministiche). Può cioè fornire in ogni caso un'uscita adeguata in funzione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

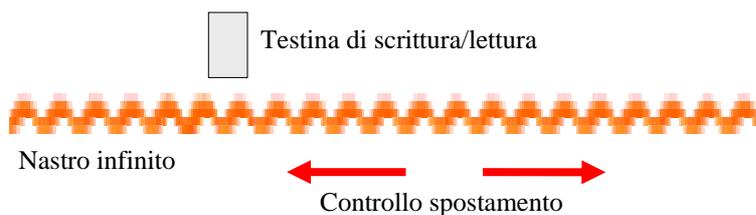
A.A. 2004-2005

41/58

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



Stato della macchina



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. 2004-2005

42/58

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



Funzionamento (istruzioni)

Testina di scrittura/lettura



Nastro infinito



Controllo spostamento

Alfabeto

$A [a_0, a_1, .. a_n]$

Stato

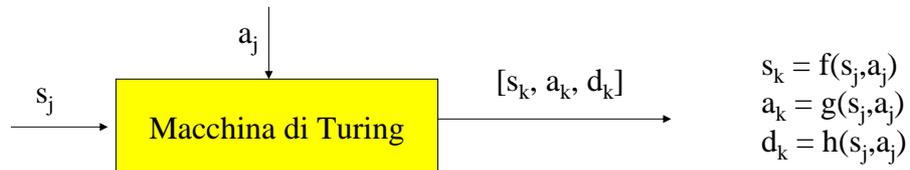
$S [s_0, s_1, .. s_m]$

Direzione (dx, sx, stop)

$d [d_1, d_2, d_3]$

Istruzioni (terna di valori)

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



Costruzione di una macchina di Turing per l'addizione

Somma di due numeri in notazione unaria
Stop



Algoritmo per l'addizione unaria



Definizione dell'insieme delle istruzioni (ISA)

Codifica unaria (2 simboli: 0, 1). Il numero decimale corrisponde ad un numero corrispondente di 1. Due numeri sono separati da un solo "0".

Ipotesi. Due numeri da sommare sono separati da 1 solo "0".

Consideriamo: 0000 111111 0 11111111 0000000 (6 + 8)
N M

- 1) Spostati verso dx fino a che non trovi il primo 1. Modifica l'uno in zero e spostati a dx.
- 2) Spostati verso dx fino a che non trovi il primo 0. Modifica lo zero in uno e spostati a dx.
- 3) Spostati verso dx fino a che non trovi il primo 0. Fermati.

Risultato: 0000 011111 1 11111111 0000000 (14 uni consecutivi)



Costruzione della macchina di Turing



Alfabeto

$A [a_0, a_1, .. a_n] = [0, 1]$

Stato

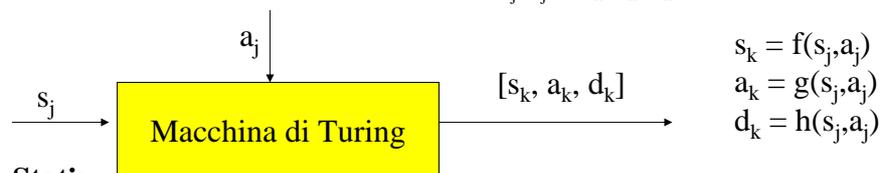
$S [s_0, s_1, .. s_m] = [s_0, s_1, s_2]$

Direzione (dx, sx, stop)

$d [d_1, d_2, d_3] = [dx, sx, HALT]$

Istruzioni (terna di valori)

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



Stati:

Stato s_0 : esamino gli 0 (leading zeros), quando trovo 1, sostituisco 1 con 0 e passo allo stato s_1 .

Stato s_1 (primo numero): esamino gli 1, quando trovo 0, sostituisco 0 con 1 e passo allo stato s_2 .

Stato s_2 (secondo numero) stop.



Assegnazione dei valori delle funzioni



s_0 = leading zeros.

s_1 = ones of the first number.

s_2 = second number.

Stato:

$s_{0,0} \rightarrow s_0$

$s_{0,1} \rightarrow s_1$

$s_{1,0} \rightarrow s_2$

$s_{1,1} \rightarrow s_1$

$s_{2,0} \rightarrow \text{HALT}$

$s_{2,1} \rightarrow \text{HALT}$

Stampa (output):

$s_{0,0} \rightarrow 0$

$s_{0,1} \rightarrow 0$

$s_{1,0} \rightarrow 1$

$s_{1,1} \rightarrow 1$

$s_{2,0} \rightarrow \text{HALT}$

$s_{2,1} \rightarrow \text{HALT}$

Direzione:

$s_{0,0} \rightarrow d_1$

$s_{0,1} \rightarrow d_1$

$s_{1,0} \rightarrow \text{indiff.}$

$s_{1,1} \rightarrow d_1$

$s_{2,0} \rightarrow d_3 = \text{HALT}$

$s_{2,1} \rightarrow d_3 = \text{HALT}$

$$s_k = f(s_j, a_j)$$

$$a_k = g(s_j, a_j)$$

$$d_k = h(s_j, a_j)$$

E' una macchina di Mealy
o di Moore?

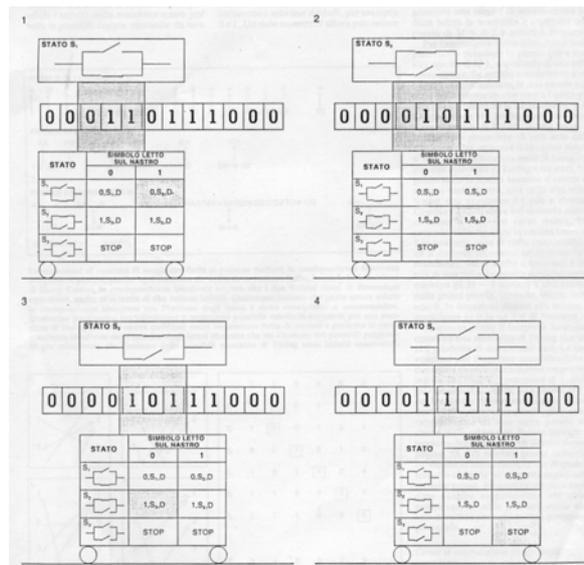
A.A. 2004-2005

47/58

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



Esempio: somma (2+3)



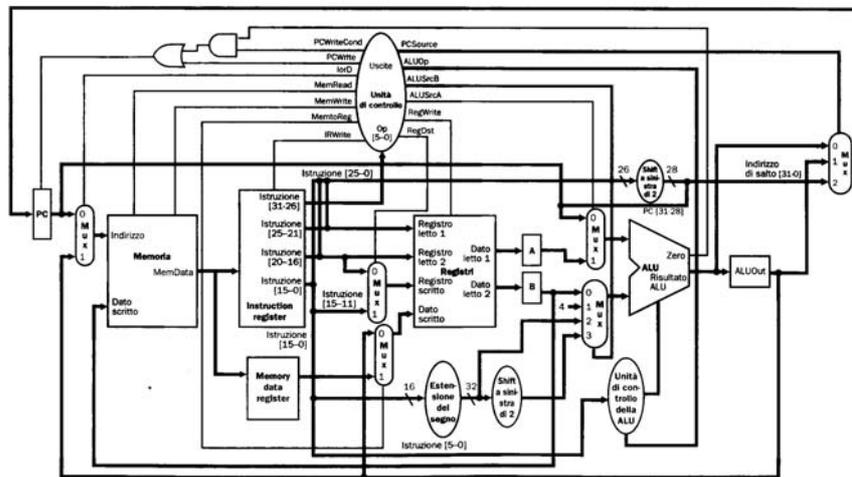
A.A. 2004-2005

48/58

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



La CPU come macchina di Turing



CPU MIPS semplificata in versione multi-ciclo.

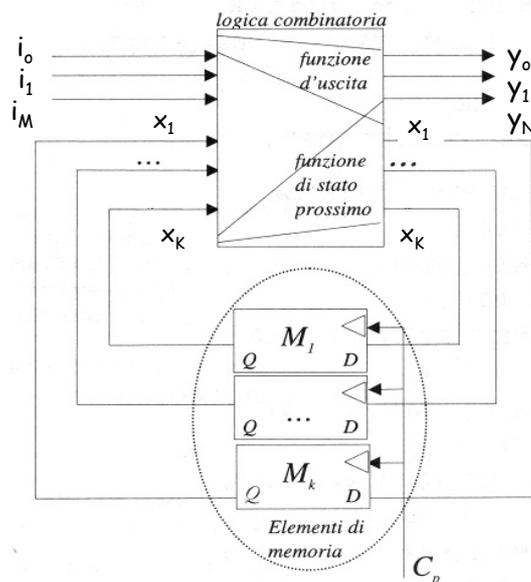
A.A. 2004-2005

49/58

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



L'unità di controllo come macchina di Moore (FSM)



Stato $x^t = f(x^{t-1}, i^t)$
 Uscita $y^t = g(x^t)$

A.A. 2

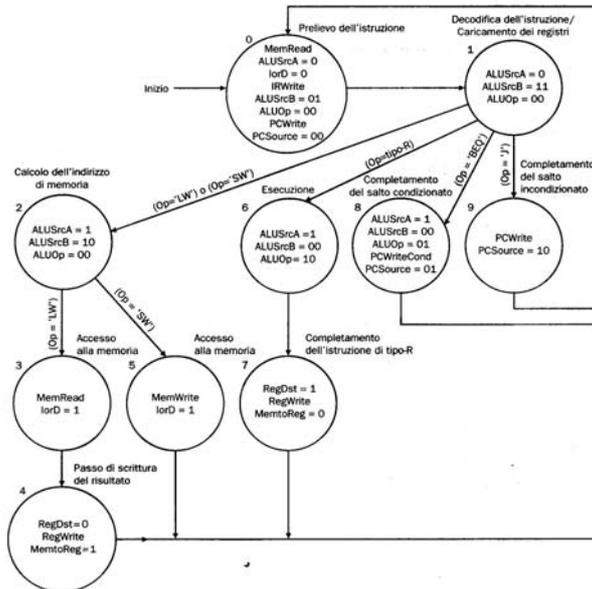
homes.dsi.unimi.it/~borghese/



L'unità di controllo come FSM



Stato $x^t = f(x^{t-1}, i^t)$
Uscita $y^t = g(x^t)$



A.A. 2004-2005

51/58

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



L'unità di controllo come FSM

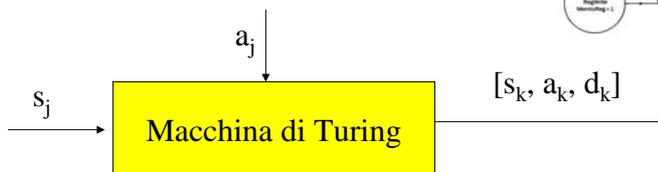
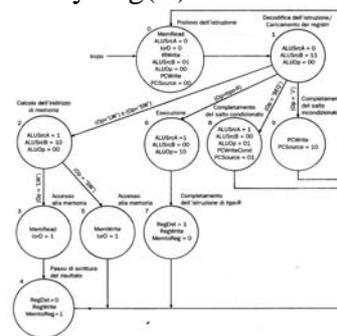


Stato prossimo: $x^t = f(x^{t-1}, i^t)$
Uscita $y^t = g(x^t)$

Stato: (situazione di processamento dell'istruzione): lettura, fetch, decodifica, memoria, write_back.

Input: istruzione letta dalla memoria.

Output: segnali di controllo per la CPU (mux, r/w...).



$$s_k = f(s_j, a_j)$$

$$a_k = g(s_j, a_j)$$

$$d_k = h(s_j, a_j)$$

A.A. 2004-2005

52/58

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



FSM e Macchina di Turing



Input: = alfabeto della macchina di Turing. L'UC legge l'istruzione dalla memoria (= lettura da nastro).

Stato: viene scritto nella memoria = stato della macchina di Turing.

Uscita: = alfabeto della macchina di Turing (l'UC invia i segnali di controllo alla CPU = scrittura su nastro).

Stato prossimo: l'istruzione (input) viene utilizzata nello stato di decodifica e di esecuzione delle lw/sw. I segnali di controllo (uscita) possono essere utilizzati nell'esecuzione (istruzione di branch).

d_k può rappresentare l'avanzamento di 1 istruzione in memoria.

Come si eseguono i salti = come funziona la macchina per i salti?

FSM

Stato prossimo $x^t = f(x^{t-1}, i^t)$

Uscita $y^t = g(x^t)$

Turing $s_k = f(s_j, a_j)$

$a_k = g(s_j, a_j)$

$d_k = h(s_j, a_j)$

A.A. 2004-2005

53/58

<http://homes.dsi>



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).

A.A. 2004-2005

54/58

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



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?