

# Sistemi Intelligenti Macchine e Menti

Alberto Borghese

Università degli Studi di Milano  
Dipartimento di Informatica  
Laboratorio di Sistemi Intelligenti Applicati (AIS-Lab)  
Dipartimento di Informatica  
[alberto.borghese@unimi.it](mailto:alberto.borghese@unimi.it)



A.A. 2023-2024

1/68



<http://borghese.di.unimi.it>



## Sommario



### **Sistemi Intelligenti: cosa e perché?**

La macchina di Turing

Macchine e Mente

Altri modi di esplorare l'intelligenza

A.A. 2023-2024

2/68



## Perchè Sistemi Intelligenti?



- Utilizzo dei calcolatori per trovare **soluzioni a problemi**, soluzioni che gli esseri umani non sono in grado di trovare (facilmente): partite a scacchi / Go – Alberi delle decisioni (AI classica).
- Realizzazione di **macchine che sappiano imparare da sole** (e.g. configurazione automatica della posizione degli avvertimenti pubblicitari nelle interfacce – Reinforcement Learning - ....).
- Capacità di analizzare le situazioni, raggrupparle (**clustering**), classificarle (**classificazione**) e definire delle predizioni (**regressione predittiva**).
- Capacità di fornire una soluzione a problemi logici, i cui predicati non sono esprimibili con la logica classica utilizzando un ragionamento simile a quello che fornirebbe un umano (**sistemi fuzzy**)
  
- La nuova generazione di macchine mira a dare un'intelligenza alle macchine in tante sfaccettature
- Calcolatore come partner intelligente dell'uomo (emotional intelligence).



## Alcune macchine intelligenti



- Alcuni nomi: agenti, Google Tensor Processing Unit, smart routing, smart scheduling, smart phone, Alexa, smart watch, ....
- Sistemi automatici (intelligenti) per radiografia, radioterapia e chirurgia (Cyber-Knife, da Vinci)
- Ricerca semantica e ontologica su WEB (Web2.0).
- Sistemi di visione artificiale (smart car).
- Pervasive computing (IoT).
- Robotica (umanoide, empatica -> service robots...)
- Recommending systems
- Scheduling

.....

.....



## 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. 2023-2024

5/68

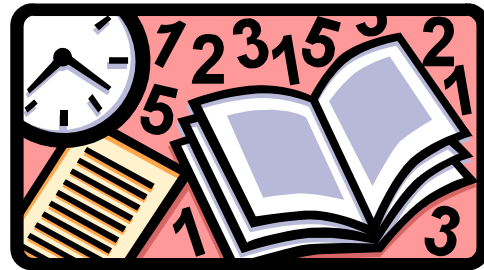
<http://borghese.di.unimi.it>



## 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://borghese.di.unimi.it>



## Le intelligenze



- Linguistico-verbale (padronanza delle parole e loro utilizzo efficace: N. Chomsky).
- Logico-matematica (valutare gli oggetti scoprendone le relazioni ed i principi ad essi sottesi, H.Poincarè, A.Einstein, S.Hawking).
- Visivo-spaziale (capacità di visualizzare e trasformare mentalmente scene tridimensionali, Michelangelo, G.Kasparov).
- Kinestetica o fisica (abilità nella percezione accurata del proprio corpo e della sua posizione, e del controllo e della coordinazione accurata del movimento, M.Jordan, K.Lewis, L.Messi, R.Federer).
- Naturalistica (osservazione di una parte del tutto e sua classificazione, K.Lorentz).
- Musicale (capacità di discriminazione dei suoni in modo esatto, orecchio assoluto, A.Mozart, L.van Beethoven).
- Intrapersonale (capacità di conoscere a fondo il proprio stato d'animo, le proprie aspirazioni e le pulsioni, S.Freud)
- Interpersonale (capacità di percepire gli stati d'animo altrui, M.Goethe).
- Esistenziale (Riflettere sulle domande fondamentali dell'esistenza: chi sono? Da dove vengo? Dove andiamo? (S.Kierkegaard, E.Kant).

**Perché una persona ha più o meno intelligenza in un certo campo?**

**Di quale intelligenza parliamo quando consideriamo le macchine?**

A.A. 2023-2024

7/68

<http://borghese.di.unimi.it>



## 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, *possibilmente cogliendo **razionalmente** i **significati** e le **relazioni** tra gli oggetti (**explainable AI**), 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.

Le intelligenze devono co-evolvere.

A.A. 2023-2024

8/68

<http://borghese.di.unimi.it>



# Le 4 prospettive sui sistemi intelligenti

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

**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 biologica.** Se il cervello contiene intelligenza, perché non cercare di capirlo per duplicarne i meccanismi «cognitive science»

**Prospettiva robotica.**

Il corso è un corso di “puntatori” ed elementi di base.

A.A. 2023-2024

9/68

<http://borghese.di.unimi.it/>



# Pezzi di intelligenza incontrate

Algoritmi: sequenza di operazioni per risolvere problemi.  
(Algoritmi da Muhammad Ibn Musa al-Kharezmi, matematico arabo dell'inizio del IX sec)

**Intelligenza  
Simbolica  
(explainable)**

Logica classica: sequenza di operazioni logiche per verifica, controllo, identificazione...

Intelligenza Artificiale. Sviluppo di motori inferenziali per la soluzione dei problemi. Soluzione non-ottima, ma “veloce”.  
Rappresentazioni di Conoscenza - Metodi euristici



**Intelligenza  
Sub-Simbolica**

.....

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

A.A. 2023-2024

10/68

<http://borghese.di.unimi.it/>



# Programma di massima



- L'intelligenza
- I Sistemi Fuzzy
- Apprendimento statistico.
- Reti neurali
- Machine learning
- Sistemi biologici
- Apprendimento con rinforzo
- Alberi delle decisioni e robotica
- Algoritmi genetici

A.A. 2023-2024

11/68

<http://borghese.di.unimi.it>



# Sito del corso



Sistemi Intelligenti Avanzati 2023-2024

[borghese.di.unimi.it/teaching/SIA/SIA.html](http://borghese.di.unimi.it/teaching/SIA/SIA.html)

## Sistemi Intelligenti Avanzati - Advanced Intelligent Systems

Docente: Prof. [Alberto Borghese](#) - Laboratorio di Sistemi Intelligenti Applicati ([AIS-Lab](#))

Corso di laurea magistrale in Informatica, Università degli Studi di Milano. A.A. 2023-2024, primo semestre.

**Avvisi:**

**Orario delle lezioni:**  
 Lunedì, ore 10.30-12.30, aula Beta in Via Celoria 18  
 Mercoledì ore 8.30-10.30, aula Alfa in Via Celoria 18

L'esame è costituito da una prova **scritta** e da un progetto. **Possibili progetti per l'A.A. 2023-2024 sono riportati qui, Alcuni progetti terminati.**

**N.B.:** Il diritto a scaricare il materiale accessibile da questa pagina è riservato solamente agli studenti regolarmente iscritti al corso.  
**Notice:** The right to download the material accessible from this page is granted only to the students regularly enrolled in the hereabove University course.

[Programma dettagliato](#), A.A. 2023-2024  
 Program in English and References, [click here](#).  
 Materiale bibliografico del corso.

**Termini d'esame:**

<a href="#">25 Gennaio 2022</a>	<a href="#">24 Febbraio 2022</a>	23 Giugno 2022	<a href="#">19 Luglio 2022</a>	27 Settembre 2022
21 Gennaio 2021 ore 9.00	<a href="#">23 Febbraio 2021</a> ore 9.00	22 Giugno 2021 ore 9.00	<a href="#">20 Luglio 2021</a> ore 9.00	27 Settembre 2021 ore 9.00
<a href="#">23 Gennaio 2020</a>	<a href="#">20 Febbraio 2020</a>	23 Giugno 2020	23 Luglio 2020	<a href="#">22 Settembre 2020</a>
<a href="#">28 Gennaio 2019</a>	21 Febbraio 2019	<a href="#">20 Giugno 2019</a>	25 Luglio 2019	19 Settembre 2019
<a href="#">25 Gennaio 2018</a>	<a href="#">28 Febbraio 2018</a>	21 Giugno 2018	26 Luglio 2018	27 Settembre 2018
<a href="#">27 Gennaio 2017</a>	<a href="#">24 Febbraio 2017</a>	<a href="#">15 Giugno 2017</a>	25 Luglio 2017	<a href="#">28 Settembre 2017</a>
<a href="#">29 Gennaio 2016</a>	<a href="#">24 Febbraio 2016</a>	15 Giugno 2016	21 Luglio 2016	<a href="#">28 Settembre 2016</a>
<a href="#">29.01.2015</a>	<a href="#">25.02.2015</a>	24.06.2015	<a href="#">21.07.2015</a>	25.09.2015
<a href="#">26.09.2013</a>	<a href="#">28.01.2014</a>	<a href="#">27.01.2014</a>	<a href="#">26.06.2014</a>	30.09.2014

A.A. 2023-2024

12/68

<http://borghese.di.unimi.it>



# Programma



Programma corso di Sistemi Inti: x +

Programma Dettagliato del corso di Sistemi Intelligenti.  
A.A. 2023-2024

N.B.: Il diritto di scaricare il materiale accessibile da questa pagina e' riservato solamente agli studenti regolarmente iscritti al corso.  
Notice: The right to download the material accessible from this page is granted only to the students regularly enrolled in the hereabove University course.

	<b>Intelligenza Simbolica</b>
03.10.2023	1. Introduzione al corso. L'intelligenza simbolica. <a href="#">La macchina di Turing e gli algoritmi</a> <a href="#">Il test di Turing e la stanza cinese di Searle</a> . Altre forme di intelligenza ( <a href="#">flock e particle</a> , automi cellulari, ...). <a href="#">Video</a> . (Ultima modifica: 28.09.2022).
	<b>Fuzzy system</b>
04.10.2023	2. Gli insiemi fuzzy. I sistemi fuzzy. (Ultima modifica: 4.10.2022).
09.10.2023	E1. Applicazioni dei sistemi fuzzy. <a href="#">Video da Youtube</a> (Ultima modifica: 05.10.2022).
	<b>Apprendimento statistico</b>
11.10.2023	3. Inferenza Statistica. Il teorema di Bayes. Stima a-posteriori. <a href="#">Esercizi</a> . <a href="#">Software in Scilab</a> (Ultima modifica: 12.10.2021).
16.10.2023	4. Modelli. Soluzione di problemi lineari. Distribuzioni di probabilità. Stima alla massima verosimiglianza. (Ultima modifica: 17.10.2022).
18.10.2023	5. Relazione tra stima a massima verosimiglianza e soluzione dei sistemi lineari ai minimi quadrati. Valutazione dell'incertezza della stima. <a href="#">Ottimizzazione non-lineare</a> : metodo di Gauss-Newton (Ultima modifica: 19.10.2022).
23.10.2023	6. <a href="#">Stima a massima posteriori e regolarizzazione</a> . Ruolo del parametro di regolarizzazione. (Ultima modifica: 26.10.2022).
	<b>Apprendimento con rinforzo</b>
25.10.2023	7. Apprendimento con rinforzo. Tecniche greedy ed epsilon-greedy, prussit. (Ultima modifica: 26.10.2022).
30.10.2023	8. L'apprendimento con rinforzo di comportamenti ( <a href="#">video1</a> , <a href="#">video2</a> ) I modelli Markoviani. Calcolo della Q Function. La formulazione ricorsiva del calcolo della Q function. <a href="#">Software</a> . Esempio. (Ultima modifica: 08.11.2022).
01.11.2023	Festività di Ognissanti

A.A. 2023-2024

13/68

<http://borgnese.di.unimi.it>



## Sistemi intelligenti (6cfu)



	Lezioni		
Lunedì	10.30-12.30		Aula Beta
Mercoledì	8.30-10.30		Aula Alfa
	<b>Progetti</b>		
Laboratorio	Orario da concordare		AIS-Lab
	<b>Ricevimento</b>		
Su appuntamento	<a href="mailto:borgnese@di.unimi.it">borgnese@di.unimi.it</a>		
			Tel. (02)503.16325

A.A. 2023-2024

14/68

<http://borgnese.di.unimi.it>



## Modalità d'esame



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

**1o livello** – conoscenza generale. Contenuto descritto nelle slide. Elementi fondamentali di tutte le lezioni.

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

**Progetto** – Approfondimento sperimentale mediante realizzazione di algoritmi e soluzioni da sperimentare su casi reali relative ad uno degli argomenti trattati.

- **ORALE per tutti.** E' richiesta una conoscenza di base degli argomenti del corso.  
e
- **Progetto su una o più parti del corso:**
  - **Implementazione di 1 algoritmo visto nel corso (FIFO).**
  - **Progetti di AIS-Lab.**
  - **Progetti suggeriti da voi.**
- **Utilizzo del software disponibile che implementa alcuni degli algoritmi**
- **I progetti, opportunamente dimensionati, si possono fare anche con altri corsi.**

A.A. 2023-2024

15/68

<http://borgnese.di.unimi.it>



## Elenco di progetti sul corso (tentativo)



Fuzzy system  
Teorema di Bayes (software available)  
Confidenza sulla stima lineare (software available)  
Regularizzazione e teorema di Bayes (software available)  
Apprendimento con rinforzo (caso stazionario)  
Apprendimento con rinforzo alle differenze temporali (Q-learning, SARSA + traccia)  
Robotica  
Alberi delle decisioni  
Classificazione (support vector machines, boosting)  
Clustering (K-means, software available)  
Clustering (soft-clustering partizionale)  
Regressione multi-scala  
Reti neurali  
Algoritmi genetici  
Ottimizzazione evolutiva

Progetti disponibili in laboratorio:

[http://borgnese.di.unimi.it/Teaching/AdvancedIntelligentSystems/AislabProjects\\_210924.pdf](http://borgnese.di.unimi.it/Teaching/AdvancedIntelligentSystems/AislabProjects_210924.pdf)

A.A. 2023-2024

16/68

<http://borgnese.di.unimi.it>



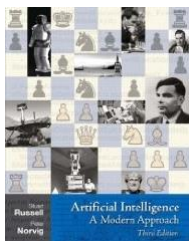


## Testi principali



R. Sutton and A. Barto, Reinforcement Learning, MIT Press, 2018. Second edition.

Final draft, on line at: <http://incompleteideas.net/book/RLbook2018.pdf>



Stuart Russel, Peter Norvig.  
Artificial Intelligence: a Modern  
Approach, 3rd Edition Pearson. 2013.



I testi sono riportati a: <http://borgnese.di.unimi.it/Teaching/IntelligentSystems/References.rtf>

A.A. 2023-2024

17/68

<http://borgnese.di.unimi.it>



## Sommario



Sistemi Intelligenti: cosa e perché?

**La macchina di Turing**

Macchine e Mente

Altri modi di esplorare l'intelligenza

A.A. 2023-2024

18/68

<http://borgnese.di.unimi.it>



## 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 (in)completezza 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.

Fondamenti del ragionamento logico articolato (e.g. dimostrazione teoremi).



## 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.

**Un ragionamento può essere svolto da una macchina!**



## Per conoscere meglio A. Turing.



- L'articolo originale di Turing:  
Alan. M.Turing, "On Computable Numbers, With an Application to the Entscheidungs problem," *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/>.
  
- Film: the imitation game



## La macchina di Turing (razionale)



Come si fa a dare una definizione precisa di metodo?

Il metodo è un algoritmo. Passi elementari automatici.

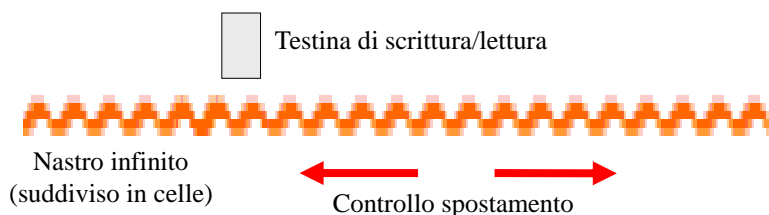
Si può implementare una macchina che implementi questi passi elementari.

**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.



# Una macchina di Turing



Alfabeto finito

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

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

Fu sviluppata durante la guerra per decodificare le trasmissioni dell'esercito tedesco.

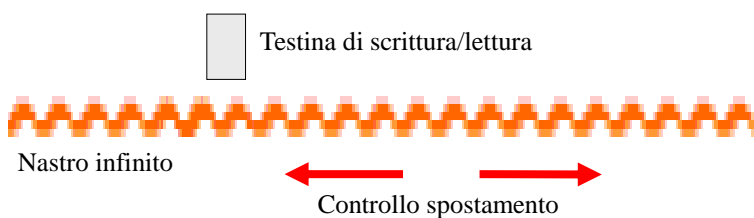
A.A. 2023-2024

25/68

<http://borghese.di.unimi.it>



# Stato della macchina e Direzione spostamento



Alfabeto

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

Stato

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

Direzione (dx, sx, stop)

$d [d_1, d_2, d_3]$

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....

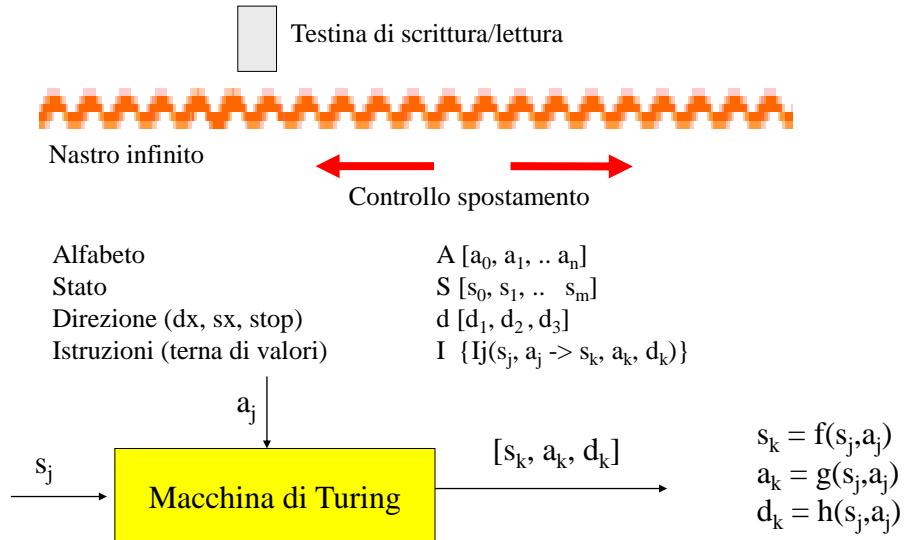
A.A. 2023-2024

26/68

<http://borghese.di.unimi.it>



## Funzionamento (istruzioni)



A.A. 2023-2024

27/68

<http://borgese.di.unimi.it>



## La macchina di Turing universale



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

Ponte tra logica e macchina (la macchina effettua operazioni elementari ma «esegue» un ragionamento logico).

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. 2023-2024

28/68

<http://borgese.di.unimi.it>



## 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).



## La macchina di Turing::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 si pone quindi come soluzione operativa di un qualsiasi problema (risolvibile).

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? E' uno strumento "intelligente"?



## Sommario



Organizzazione del corso e dell'esame.

Sistemi Intelligenti: cosa e perché?

La macchina di Turing

**Macchine e Mente**

Altri modi di esplorare l'intelligenza



## Macchine intelligenti



Domanda: una macchina che manipoli simboli secondo regole che tengano conto della struttura (posizione e simboli), può pensare?

**Tesi di Church:** i ragionamenti logici possono essere espressi come funzioni calcolabili ricorsivamente.

**Macchina di Turing:** macchina che implementa questo calcolo ricorsivo in modo meccanico.

Il calcolatore può essere assimilabile ad una macchina di Turing.

Non rimane altro che identificare la funzione (complessa) da scrivere ed implementarla in software. **Questo è il programma dell'intelligenza artificiale classica.**

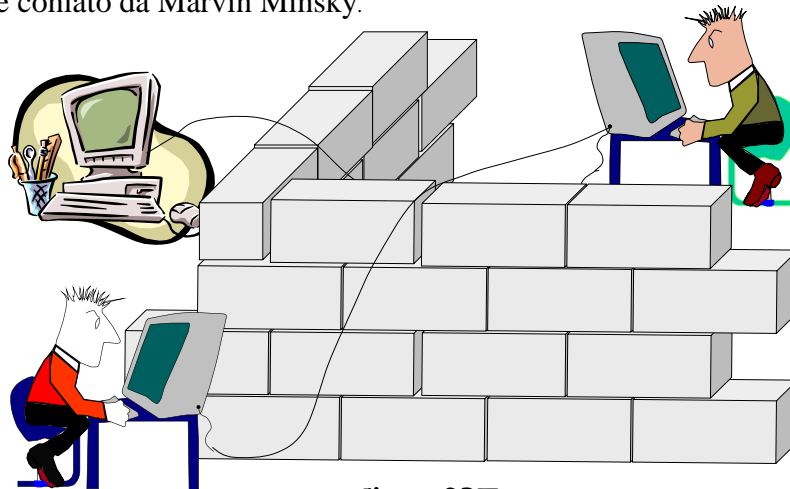




# Il test di Turing (1950)



La nascita dell'intelligenza artificiale, 2 anni prima che il termine fosse coniato da Marvin Minsky.



Chat GPT

A.A. 2023-2024

33/68

<http://borghese.di.unimi.it>



# WEB 2.0



<http://www.expertsystem.net/>



A.A. 2023-2024

34/68

<http://borghese.di.unimi.it>



## L'ipotesi debole o cauta sull'intelligenza artificiale



Funzionalismo: la macchina funziona come se...

Una macchina può pensare? Può volare? Può nuotare?  
Intelligenza simbolica, motoria, visiva,.... emotiva,....

*“Il calcolatore non ha stampato perché pensava di essere collegato ad un'altra stampante.”*

Si tratta di trovare una funzione complessa a piacere. Non è necessaria che la funzione “funzioni” come la nostra mente. Deve essere funzionale all'hardware. Importante e' il risultato finale.

Thinking machines.

A.A. 2023-2024

35/68

<http://borghese.di.unimi.it/>



## Critiche all'AI classica



**INTELLIGENZA:** L'unico problema che resta è quello di identificare la funzione, indubbiamente complessa, che governa la struttura delle risposte umane all'ambiente e poi scrivere il programma (l'insieme delle regole applicabili ricorsivamente) per mezzo del quale la macchina MS la calcola. Questi obiettivi costituiscono il **programma di ricerca basilare dell'intelligenza artificiale classica**.

**Il cervello e la macchina di Turing sono molto diversi (si parla di funzionamento equivalente, ipotesi debole).**

**CRITICA DI HUBERT L. DREYFUS, 1972:** mancava il vasto cumulo di conoscenze di base inarticolate che ogni persona possiede e la capacità che ha il buon senso di sfruttare gli aspetti utili di tali conoscenze al mutare delle circostanze. Pensiero ed intelligenza non possono ridursi solamente alla manipolazione di simboli mediante regole applicabili ricorsivamente (intuito, istinto, pensiero non-razionale, associatività).

*L'ipotesi debole può essere soddisfatta in modo “debole”.*

<http://borghese.di.unimi.it/>



## Critiche all'ipotesi debole



- 1) Una macchina non può originare nulla di nuovo, esegue dei programmi.
- 2) Il comportamento intelligente non può essere completamente replicato.
- 3) Il comportamento intelligente non può essere completamente catturato da regole formali (argument for informality).
- 4) Anche se un computer si comportasse in modo da superare il test di Turing, non sarebbe comunque classificato come intelligente.



## 1) Risposta alla critica: una macchina non può originare nulla di nuovo



Una cosa che può fare una macchina è imparare dall'esperienza. Programma di scacchi. Algoritmi per la valutazione della sequenza di mosse, e da qui miglioramento della strategia di gioco. **Machine learning. Reinforcement learning.**

Apprendimento, come sfruttiamo il patrimonio genetico e culturale per sviluppare la nostra intelligenza? Non apprendiamo dal nulla.

Come si sviluppano gli umani dalla nascita all'età adulta?



## 2) Risposta alla critica: Il comportamento intelligente non può essere completamente replicato (argument from disability)



Cosa non può fare una macchina?

*“Essere gentile, bellissima, amichevole, avere iniziativa, essere spiritosa, distinguere il bene dal male, innamorarsi, essere golosa di fragole alla panna, fare innamorare qualcuno, imparare dall’esperienza, avere proprietà di linguaggio, riflettere su sé stessa, avere una varietà di comportamenti, essere veramente creativa” (A. Turing, 1940).*

E’ una questione di tempo e di conoscenze nel campo delle Scienze Cognitive?

A.A. 2023-2024

39/68

<http://borghese.di.unimi.it>



## Alcuni androidi – Actroid – 2003 – Kokoro



**Actroid** – guida nei musei e ai ristoranti.

1,58cm per 30 kg.

Pelle al silicone.

Capacità di esprimere  
40 diverse “emozioni

Motori pneumatici.



A.A. 2023-2024

40/68

<http://borghese.di.unimi.it>



## I robot nella storia



Automi di Efesto (Iliade)

Teste parlanti degli alchimisti (Medio Evo)

Golem (creatura di argilla del XV secolo – Praga)

Automi a orologeria (XVIII secolo)

Giocatori di scacchi (con nano incluso)

Mostro di Frankenstein (Mary Shelley 1818)

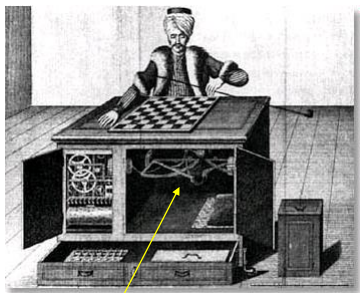


A.A. 2023-2024

41/68



## I precursori dell'animatronica



Il giocatore di scacchi,  
Wolfgang von Kempelen, 1769



La musicista,  
Pierre Jaquet-Droz, (1753-1791)  
(cf. Waseda – II)

[http://access.tucson.org/~michael/hm\\_intro.html](http://access.tucson.org/~michael/hm_intro.html)

Scomparto per  
nascondere  
l'aiutante (nano)  
A.A. 2023-2024

Omaggio alla complessità della natura umana.  
Omaggio all'abilità dell'inventore.



# Interazione emotiva



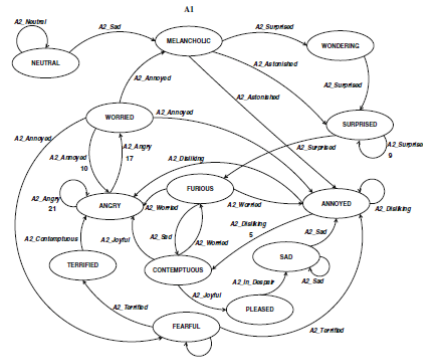
Biol Cybern  
DOI 10.1007/s00422-008-0254-9

ORIGINAL PAPER

Biological  
Cybernetics

Interacting with an artificial partner: modeling the role of emotional aspects

Isabella Cattinelli · Massimiliano Goldwurm · N. Alberto Borghese



A.A. 2023-2024

43/68



## Il comportamento intelligente non può essere completamente catturato da regole formali (argument from informality)



Il comportamento umano è troppo complesso per essere codificato in regole formali.

La conoscenza non è sempre codificabile in forma simbolica.

Rappresentazione sub-simbolica della conoscenza => intelligenza è una proprietà emergente dell'architettura neurale, conoscenza **sub-simbolica**, struttura + collegamenti + funzionamento).

C'è un'intelligenza anche se la conoscenza non è espressa in modo simbolico esplicito (conoscenza sub-simbolica).

Distinzione tra conscio e non-conscio, diversi livelli di rappresentazione ed elaborazione della conoscenza.

A.A. 2023-2024

44/68

<http://borghese.di.unimi.it>



## La macchina che passa il test di Turing potrebbe non essere intelligente (potrebbe confutare l'ipotesi debole)



Manca di coscienza.

Non è sufficiente che la macchina replichi o interpreti il funzionamento di un'altra macchina. Occorre che sia anche conscia.

Occorre che un calcolatore non sia in grado solamente di replicare il funzionamento di un altro, ma che ne replichi gli algoritmi implementati dal Sistema Operativo.

L'intelligenza va al di là di “thinking rationally” o “thinking machine”.



## L'omuncolo di Dennet



“It is rather as philosophers were to proclaim themselves expert explainers of the methods of a stage magician, and then, when we ask them to explain how the magician does the saw-the lady-in-half trick, they explain that it is really quite obvious: the magician doesn't really saw her in half; he simply makes it appear that he does. “But how **does he do that?**” we ask. “**Not our department**”, say the philosophers. (Dennet, 1984).

Ipotesi dell'”Omuncolo”

Noi vogliamo arrivare a capire cosa c'è dietro. Qual è l'algoritmo la logica dietro un programma eseguito da una macchina di Turing. Come fa la macchina di Turing ad autoprogrammarsi?





## J. Searle: critica all'intelligenza classica



- Una manipolazione adeguata di simboli strutturali tramite l'applicazione ricorsiva di regole che tengono conto della struttura non può produrre un'intelligente cosciente.
- Dominio privilegiato di applicazione del "thinking rationally" associato all'ipotesi debole: **sistemi esperti**.

<http://www.expertsystem.net/>

A.A. 2023-2024

47/68

<http://borghese.di.unimi.it/>



## La Stanza Cinese (J. Searle, 1980)



La persona (CPU).  
Un libro di regole (Il programma).  
Un pacco di fogli (la memoria).



Il calcolatore potrebbe dimostrare di essere intelligente per il test di Turing, senza comprendere nulla. Il signore nella stanza cinese riceve in ingresso dei simboli che manipola secondo regole a lui ignote e poi fornisce le risposte. Lui non conosce il cinese!

Non si può generare la semantica dalla sintassi!

A.A. 2023-2024

48/68

<http://borghese.di.unimi.it/>





## Osservazioni



Criterion non comportamentale per l'intelligenza: gli elementi dell'intelligenza cosciente devono possedere un contenuto semantico reale.

**La sintassi, di per sé, non è condizione essenziale, né sufficiente, per la determinazione della semantica.**

**I programmi non sono condizione essenziale né sufficiente perché sia data una mente (il calcolatore non ha una mente)**

**Criterion non compartamentale per definire l'intelligenza: gli elementi dell'intelligenza cosciente devono possedere un contenuto semantico reale.**



## Contraddittorio



**Ragionamento:**

- 1) Alcuni oggetti non sono capaci di comprensione (del cinese).
- 2) La persona nella stanza, il libro di regole e la pila di fogli sono oggetti di questo tipo.
- 3) Se ciascuno di questi oggetti è privo di comprensione, allora un qualsiasi sistema costruito con questi oggetti è privo di comprensione.
- 4) Non c'è conoscenza nella stanza.

***Dato che gli uomini sono costituiti da molecole, e le molecole non hanno COSCIENZA, l'uomo non ha coscienza?***



## Soluzione del contraddittorio



La coscienza è una **proprietà emergente** di sistemi di neuroni, propriamente disposti, ed attivi (J. Searle, “*The Rediscovery of Mind*”, 1992). Questo punto di vista è condiviso dagli scienziati cognitivi.

[Esempio: un bambino che impara una lingua estera non è molto diverso dalla stanza cinese].

Il focus del machine learning è proprio sull'**emergent intelligence**, collective intelligence. L'intelligenza che emerge “dal basso”, mediante **interazione attiva** tra elementi relativamente semplici e della rete di elementi semplici con **l'ambiente**.



## Emergenza dell'ipotesi forte dell'AI



- L'architettura funzionale delle macchine di Turing classiche non è quella adatta a svolgere compiti tanto impegnativi.
- Dobbiamo quindi scoprire architetture diverse.
- **Possiamo ispirarci al cervello umano**. Cosa sappiamo sul cervello umano?

Reti neurali, connessionismo, machine learning, scienze cognitive.....



## Le ipotesi sull'AI



Le macchine possono essere costruite per agire *come se* fossero intelligenti? **Weak AI position.**

Il calcolatore è uno strumento molto potente per lo studio e la replicazione della mente umana. *Thinking rationally* (logica, AI).

Le macchine che agiscono intelligentemente hanno una mente (reale e conscia). **Strong AI position.**

Il calcolatore, convenientemente programmato, è di per se stesso una mente, in grado di comprendere e di avere altri stati cognitivi, diversi (inferiori) a quelli del cervello umano. Obiettivo è *Thinking humanly* (cognitive science).

In machine learning questo approccio è esplorato dal “**deep learning**”



## Com'è fatta la mente?



Robotica. The Brain Prosthetic Experiment (*H. Moravec, 1988*).  
Cosa succede se sostituisco uno ad uno tutti i neuroni nella corteccia con un dispositivo elettronico?

Risposta funzionalista (la mente è una scatola nera, i costituenti possono essere diversi, la mente rimane).

Risposta strutturalista (e.g. Searl, ad un certo punto la coscienza svanisce).



## Il cervello e l'intelligenza



Altre differenze tra l'AI e l'intelligenza biologica: come fa il cervello a pensare?



Struttura del SNC:

Altamente parallela ( $10^{11}$  neuroni e  $10^{14}$  connessioni).

Neurone è un elemento relativamente semplice, il suo stato è continuo e non discreto.

Connessioni bidirezionali.

Reti Neurali artificiali si sono rivelati dei modelli parametrici molto potenti per rappresentare i sistemi più diversi.

Il problema rimane l'apprendimento.

A.A. 2023-2024

55/68

<http://borghese.di.unimi.it>



## Implicazioni del confronto



Architettura parallela incrementa la velocità e non soffre di colli di bottiglia.

Resistente ai danni.

Informazione (conoscenza) distribuita e multi-chiave, ad accesso parallelo.

Rappresentazione di funzioni mediante parametri (rappresentazione parametrica).

Funziona male per problemi che devono essere risolti in modo ricorsivo e non possono essere parallelizzati (e.g. calcolo di funzioni).

Funziona bene per tutte le attività che richiedono parallelismo: elaborazione sensoriale, pianificazione, ragionamento.

Rappresentazione di funzioni in modo esplicito, mediante le funzioni stato prossimo ed uscita.

<http://borghese.di.unimi.it>



# Perché è importante per i sistemi intelligenti?



*La macchina di Turing potrebbe eseguire tutti i procedimenti mentali trasformandoli in un procedimento formale di passaggi da uno stato all'altro, ma ... .. è condizione necessaria per l'intelligenza?*

- Inoltre la macchina di Turing manipola simboli di cui non conosce il significato, a differenza della mente umana.
- Dall'analisi dei dati, può derivare un'intelligenza? Machine learning, Reinforcement learning, Biological learning.
- Come generiamo i dati? Facendo allenare una rete contro un'altra (GAN – Generative Adversarial Networks).
- E questa intelligenza quanto ha di semantico e quanto di operativo (explainable AI, Black box approach).
- **Dal sub-simbolico, al simbolico, all'intelligenza.**



## Sommario



Organizzazione del corso e dell'esame.

Sistemi Intelligenti: cosa e perché?

La macchina di Turing

Macchine e Mente

**Altri modi di esplorare l'intelligenza**



# Robotics & Artificial life



Leonardo from MIT and Winston Studios



Swimmer

<http://www.frames.alife.pl>

A.A. 2023-2024

59/68

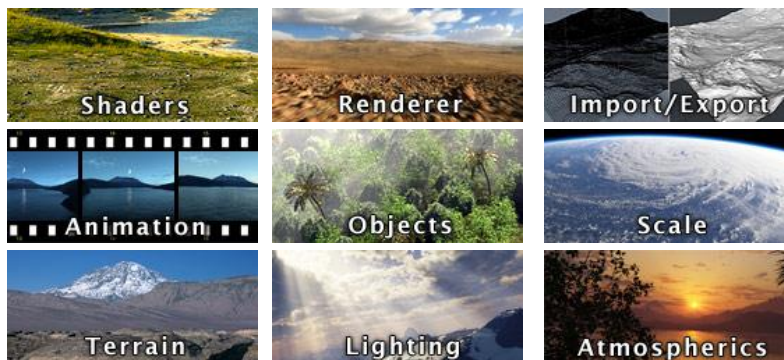
<http://borghese.di.unimi.it>



# Artificial landscape



<http://planetside.co.uk/products/terragen3>



Video on Vajont history

A.A. 2023-2024

60/68

<http://borghese.di.unimi.it>



## Artificial plants



A synthetic model of the topiary garden at Levens Hall, England, by R. Mëch, P. Prusinkiewicz, and M. James. "Garden of L" (inset) by P. Prusinkiewicz,

F. Fracchia, J. Hanan, and D. Fowler; see [www.cpsc.ucalgary.ca/~pwp](http://www.cpsc.ucalgary.ca/~pwp)

Linguaggi ricorsivi:  
L-systems

<http://borghese.di.unimi.it>

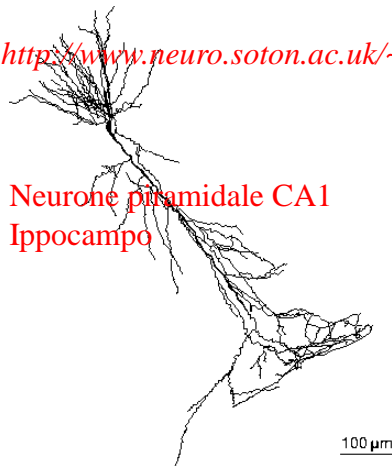


## Neuroni ed alberi

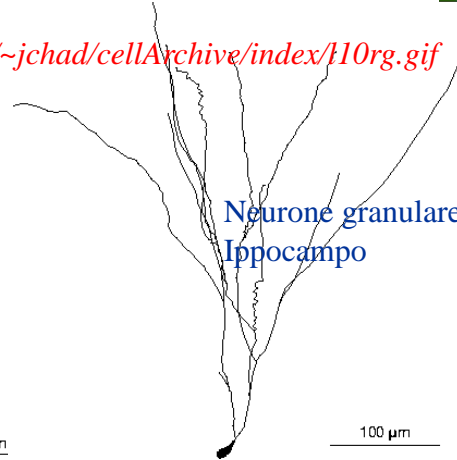


<http://www.neuro.soton.ac.uk/~jchad/cellArchive/index/H10rg.gif>

Neurone piramidale CA1  
Ippocampo



Neurone granulare  
Ippocampo



- Arborescenze dendritiche.





## Artificial art



Pioniere è stato Karl Sims, 1991 => Sims city



"In the Beginning" (left); "The High Plains of Kilimanjaro" (right).

IMAGES BY STEVEN ROOKE; SEE <http://www.azstarnet.com/~srooke/>

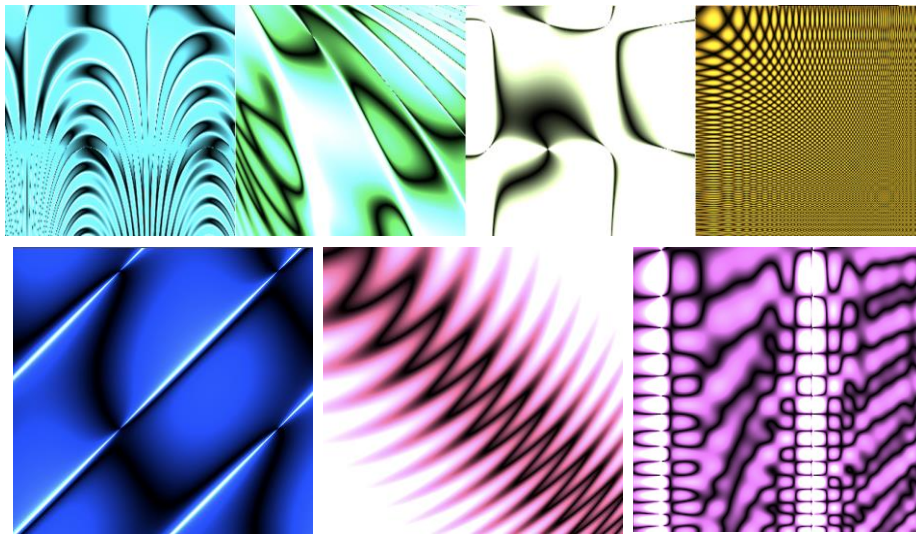
A.A. 2023-2024

63/68

<http://borghese.di.unimi.it>



## Artificial art @ AIS-Lab



R. Bellini, N.A. Borghese (2013) Genetic arts in perspective. In: Innovation, Systems and Technology, Springer Verlag.

A.A. 2023-2024

64/68

<http://borghese.di.unimi.it>





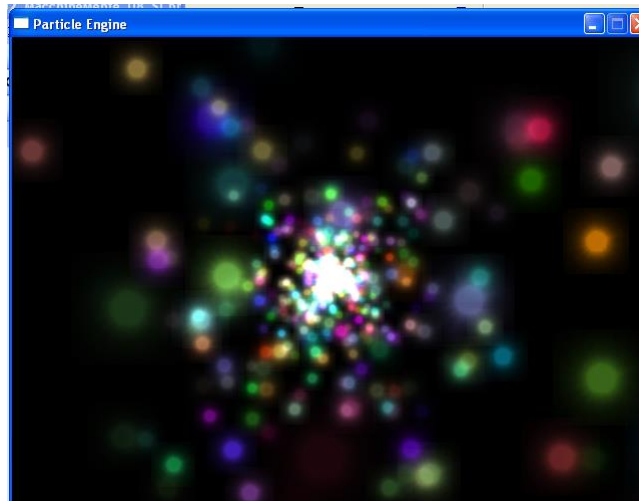
# Examples of flocking and particles



Flock example

Particle example

Executable



A.A. 2023-2024

65/68

<http://borghese.di.unimi.it/>



# Gli avatar



MIRALab, University of Geneva



MIRALab, University of Geneva



MIRALab, University of Geneva



MIRALab, University of Geneva

<http://miralabwww.unige.ch/>

A.A. 2023-2024

66/68

<http://borghese.di.unimi.it/>



## Ant colonies <http://iridia.ulb.ac.be/~ants/ants2004/>



*Fourth International Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence.*

*“Researchers in ethology and animal behavior have proposed many models to explain interesting aspects of social insect behavior such as self-organization and shape-formation. Recently, algorithms inspired by these models have been proposed to solve difficult computational problems.*

*An example of particularly successful research direction in swarm intelligence is **ant colony optimization**, which focuses on discrete optimization problems. Ant colony optimization has been applied successfully to a large number of difficult discrete optimization problems including the traveling salesman, the quadratic assignment, scheduling, vehicle routing, etc., as well as to routing in telecommunication networks.*

*Another example of interesting research direction is **swarm robotics**, where the focus is on applying swarm intelligence techniques to the control of large groups of cooperating autonomous robots”.*

Bonabeau e Theraulaz, Swarm Smarts, Scientific American, 2000.

A.A. 2023-2024

67/68

<http://borghese.di.unimi.it/>



## Collaborative robots



<http://www.youtube.com/watch?v=M2nn1X9Xlps>

Swarmanoid Robotics

Multi-agent systems



A.A. 2023-2024

68/68

<http://borghese.di.unimi.it/>



## Sommario



Organizzazione del corso e dell'esame.

Sistemi Intelligenti: cosa e perché?

La macchina di Turing

Macchine e Mente

Altri modi di esplorare l'intelligenza