

---

ANNO ACCADEMICO 2024/2025

---

# Intelligenza Artificiale e Laboratorio

---

Teoria

Altair's Notes



---

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA

---



<b>CAPITOLO 1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>PAGINA 5</b>
-------------------	---------------------	-----------------

- |     |   |   |
|-----|---|---|
| 1.1 | Il Corso in Breve...<br>Motivazioni — 5 | 5 |
|-----|---|---|

<b>CAPITOLO 2</b>	<b>IL PROLOG</b>	<b>PAGINA 8</b>
-------------------	------------------	-----------------

- |     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Le Basi<br>Liste — 10  | 8  |
| 2.2 | Interprete PROLOG<br>Breve Ripasso di Logica — 11 • Risoluzione SLD — 13 • Il Cut — 14 | 10 |
| 2.3 | Strategie di Ricerca in PROLOG<br>Ricerca nello Spazio degli Stati — 16                | 15 |

<b>CAPITOLO 3</b>	<b>ANSWER SET PROGRAMMING</b>	<b>PAGINA 18</b>
-------------------	-------------------------------	------------------



# Premessa

## Licenza

Questi appunti sono rilasciati sotto licenza Creative Commons Attribuzione 4.0 Internazionale (per maggiori informazioni consultare il link: <https://creativecommons.org/version4/>).



## Formato utilizzato

Box di "Concetto sbagliato":

### Concetto sbagliato 0.1: Testo del concetto sbagliato

Testo contenente il concetto giusto.

Box di "Corollario":

### Corollario 0.0.1 Nome del corollario

Testo del corollario. Per corollario si intende una definizione minore, legata a un'altra definizione.

Box di "Definizione":

### Definizione 0.0.1: Nome delle definizioni

Testo della definizione.

Box di "Domanda":

### Domanda 0.1

Testo della domanda. Le domande sono spesso utilizzate per far riflettere sulle definizioni o sui concetti.

Box di "Esempio":

### Esempio 0.0.1 (Nome dell'esempio)

Testo dell'esempio. Gli esempi sono tratti dalle slides del corso.

**Box di "Note":**

**Note:-**

Testo della nota. Le note sono spesso utilizzate per chiarire concetti o per dare informazioni aggiuntive.

**Box di "Osservazioni":**

**Osservazioni 0.0.1**

Testo delle osservazioni. Le osservazioni sono spesso utilizzate per chiarire concetti o per dare informazioni aggiuntive. A differenza delle note le osservazioni sono più specifiche.



# 1

## Introduzione

### 1.1 Il Corso in Breve...

#### 1.1.1 Motivazioni

##### Definizione 1.1.1: Intelligenza Artificiale

L'intelligenza artificiale (o IA, dalle iniziali delle due parole, in italiano) è una disciplina appartenente all'informatica che studia i fondamenti teorici, le metodologie e le tecniche che consentono la progettazione di sistemi hardware e sistemi di programmi software capaci di fornire all'elaboratore elettronico prestazioni che, a un osservatore comune, sembrerebbero essere di pertinenza esclusiva dell'intelligenza umana.

##### Note:-

Meh, in realtà l'IA è una disciplina di confine. Però le tematiche sono prettamente informatiche.

#### IA In breve:

- Area di ricerca dell'informatica.
- Si occupa di tutto ciò che serve per rendere un computer intelligente come un essere umano.
- Interessata a problemi *intelligenti*: problemi per cui non esiste/non è noto un algoritmo di risoluzione<sup>1</sup>.

##### Note:-

Il cubo di Rubik non è un gioco intelligente >:(

#### Ci sono tante sotto-aree di ricerca:

- Rappresentazione della conoscenza e ragionamento.
- Interpretazione/sintesi del linguaggio naturale.
- Apprendimento automatico.
- Pianificazione.
- Robotica.

---

<sup>1</sup>Tris, il labirinto, etc.



Si collega a tante discipline, oltre all'informatica:

- Filosofia.
- Fisica.
- Psicologia.

Questo insegnamento ha l'obiettivo di approfondire le conoscenze di Intelligenza Artificiale con particolare riguardo alle capacità di un agente intelligente di fare *inferenze* sulla base di una *rappresentazione esplicita della conoscenza* sul dominio. In questo corso si faranno anche sperimentazione di metodi di ragionamento basati sul paradigma della *programmazione logica*, sull'uso di *formalismi a regole* (CLIPS) e su *reti bayesiane* (ragionamento probabilistico<sup>2</sup>).

**Programma:**

- Dal punto di vista metodologico saranno a rontate problematiche relative a:
  - Meccanismi di ragionamento per calcolo dei predicati del primo ordine.
  - Programmazione logica.
  - Ragionamento non monotono.
  - Answer set programming.
- Queste metodologie verranno a rontate dal punto di vista sperimentale con l'introduzione dei principali costrutti del *Prolog*, lo sviluppo di strategie di ricerca in Prolog e l'utilizzo dell'ambiente *CLINGO* nella risoluzione di problemi in cui sia necessaria l'applicazione di meccanismi di ragionamento non monotono e del paradigma dell'Answer Set Programming.

**Domanda 1.1**

E le novità dell'AI che vanno di moda?

**Risposta:** vengono trattate in altri corsi (TLN, RNDL, AAUT, ELIVA, AGINT).

---

<sup>2</sup>Odio la probabilità con tutto il mio cuore <3



# 2

## Il PROLOG

### Definizione 2.0.1: PROLOG

PROLOG (Programming Logic) è un *linguaggio dichiarativo* basato sul *paradigma logico*:

- Non si descrive cosa fare per risolvere un problema.
- Si descrive la situazione reale con *fatti* e *regole* e si chiede all'interprete di verificare se un *goal* segue oppure no secondo una logica classica.

### Note:-

Il PROLOG è equivalente alla logica dei predicati del primordine.

## 2.1 Le Basi

### Definizione 2.1.1: Fatti

Si rappresenta con dei *fatti* un dominio di interesse.

#### Esempio 2.1.1 (Fatto)

Fatto per descrivere che un alimento contiene più calorie di un altro:

- piuCalorico(wurstel, banana).
- Rappresenta il fatto che il würstel è un alimento maggiormente calorico rispetto alla banana.

### Definizione 2.1.2: Regole

Si rappresentano le possibili inferenze con delle *regole*:

`head := subgoal1, subgoal2, ..., subgoaln`

#### Esempio 2.1.2 (Regola)

`felino(X) := gatto(X)`

Rappresenta la regola che permette di concludere che i gatti sono felini.

### Idee di base del PROLOG:

- Regole ricorsive.
- L'interprete analizza i fatti e le regole nell'ordine in cui si trovano nel programma.
- Meccanismo di pattern matching per unificare variabili e termini.
- L'interprete, dato un programma, cerca di dimostrare un goal considerando fatti e applicando regole, nel secondo caso generando sotto-goal.

#### Definizione 2.1.3: Clausole

Le clausole sono i fatti o le regole. Contengono:

- Atomi:
  - Costanti.
  - Numeri.
- Variabili.
- Termini Composti, ottenuti applicando funtori a termini.

#### Note:-

Un programma PROLOG è un insieme di clausole.

#### Osservazioni 2.1.1

- L'estensione dei file PROLOG è 'pl'.
- In PROLOG le variabili hanno l'iniziale maiuscola.
- L'unica struttura dati nativa è la lista.
- Per eseguire swi: swipl.
- Per compilare: ['nomefile.pl'].
- Il comando ';' indica possibili alternative.
- Il comando 'trace.' consente un'esecuzione passo per passo.
- '\+' rappresenta la negazione per fallimento.
- L'ordine è importante perché PROLOG "legge" dall'alto verso il basso.

### Qualche predicato *built-in*:

- `var(X)`: indica se X è una variabile.
- `ground(X)`: indica se X è istanziata.
- `atom(X)`: indica se X è atomica.

## 2.1.1 Liste

**Definizione 2.1.4: Lista**

La *lista* è la struttura dati principale in PROLOG. Una lista è caratterizzata da una testa e da una coda:

- Testa: primo termine (a sinistra) della lista.
- Coda: la lista dei termini dal secondo (incluso) in poi.

**Note:-**

Rappresentata come [Head | Tail].

```
?- [1,2,3,4,5] = [Head | Tail].
Head = 1
Tail = [2,3,4,5] = [Head | Tail]
Yes

?- [a, ciao, [], 2, [1, saluti]] = [Head | Tail].
Head = a
Tail = [ciao, [], 2, [1, saluti]]
Yes
```

Figure 2.1: Le liste in PROLOG.

**Predicati *built-in*:**

- `length(Lista, N)`: ha successo se la *Lista* contiene *N* elementi.
- `member(Elemento, Lista)`: ha successo se la *Lista* contiene il termine *Elemento*.
- `select(Elemento, Lista, Rimanenti)`: rimuove *Elemento* da *Lista* e restituisce *Rimanenti*.

## 2.2 Interprete PROLOG

**Domanda 2.1**

Come avviene l'esecuzione di programmi PROLOG?

- Esecuzione mediante *backward chaining* in profondità.
- Si parte dal *goal* che si vuole derivare:
  - *Goal* = congiunzione di formule atomiche  $G_1, G_2, \dots, G_n$ .
  - Si vuole dimostrare, mediante risoluzione, che il goal segua logicamente dal programma.
- Una regola  $A : -B_1, B_2, \dots, B_m$  è applicabile a  $G_i$  se:
  - Le variabili vengono rinominate.
  - $A$  e  $G_i$  unificano.

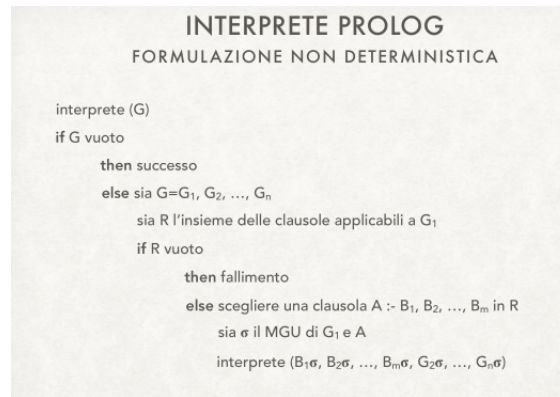


Figure 2.2: Una formulazione non deterministica di come funziona l'interprete PROLOG.

**Note:-**

MGU è il Most General Unifier: minimo sforzo per rendere uguali due variabili (il fatto e il goal).

- La computazione ha successo se esiste una computazione che termina con successo.
- Non determinismo: non è specificata la regola scelta in R.
- Ma l'interprete PROLOG si comporta in modo *deterministico*:
  - Le clausole vengono considerate nell'ordine in cui sono scritte nel programma.
  - Viene fatto backtracking all'ultimo punto di scelta ogni volta che la computazione fallisce.
- In caso di successo, l'interprete restituisce una sostituzione per le variabili che compaiono nel goal.

**2.2.1 Breve Ripasso di Logica****Definizione 2.2.1: Logica Classica**

Conseguenza logica definita semanticamente: dato una teoria e una formula, diciamo che la formula segue dalla teoria se essa è vera in tutti i modelli della teoria.

**Esempio 2.2.1 (Gatti)**

- I gatti miagolano:  $\text{gatto} \rightarrow \text{miagola}$ .
- I persiani sono gatti:  $\text{persiano} \rightarrow \text{gatto}$ .
- Si vuole dimostrare che i persiani miagolano:  $k \models \text{persiano} \rightarrow \text{miagola}$ .

• Semantica: tavola di verità

$\text{gatto} \rightarrow \text{miagola}$			$\text{persiano} \rightarrow \text{gatto}$			$\text{persiano} \rightarrow \text{miagola}$		
0	1	0	1	0	1	0	0	1
0	1	1	1	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	0	0	1	1
1	0	0	0	0	1	1	0	1
1	1	1	1	0	1	1	0	1
1	0	0	0	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1

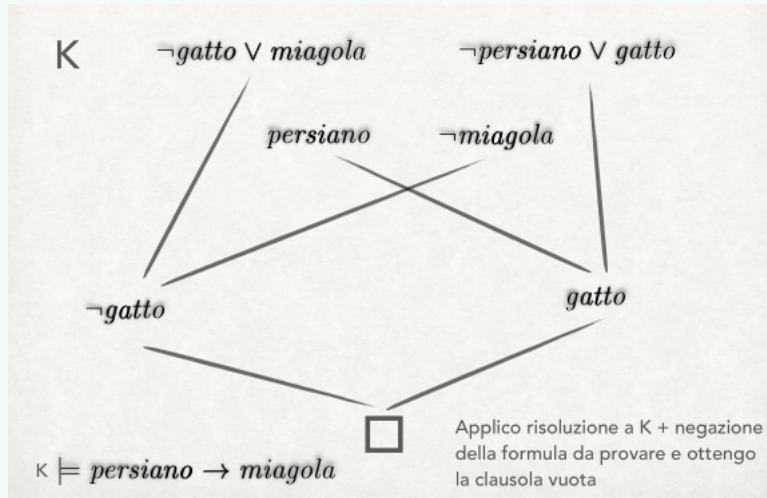
$\text{gatto} \rightarrow \text{miagola} \wedge \text{persiano} \rightarrow \text{gatto}$

- Tuttavia il processo è molto laborioso già con poche formule e basi di conoscenza piccole.
- Metodo di prova: procedura/algoritmo che calcola/dimostra se una formula è conseguenza logica della teoria.
  - *Corretto*: se l'algoritmo dimostra F da K, allora F è conseguenza logica di K.
  - *Completo*: se F è conseguenza logica di K, allora l'algoritmo dimostra F da K.

### Risoluzione:

- Si applica a formule in forma di *clausole* (disgiunzioni di letterali<sup>1</sup>).
- Si basa su un'unica regola di inferenza:
  - Date due clausole  $C_1 = A_1 \vee \dots \vee A_n$  e  $C_2 = B_1 \vee \dots \vee B_m$ .
  - Se ci sono due letterali  $A_i$  e  $B_j$  tali che  $A_i = \neg B_j$ , allora posso derivare la clausola *risolvente*  $A_1 \vee \dots \vee A_{i-1} \vee A_{i+1} \vee \dots \vee A_n \vee B_1 \vee \dots \vee B_{j-1} \vee B_{j+1} \vee \dots \vee B_m$ .
  - Il risolvente è conseguenza logica di  $C_1 \cup C_2$
- Data una teoria (insieme di formule) K e una formula F, dimostro che F è conseguenza logica di K per refutazione (dimostrare che  $K \cup \neg F$  è inconsistente).
- Si parte dalle clausole  $K \cup \neg F$ , risolvendo a ogni passo due clausole e aggiungendo il risolvente all'insieme di clausole.
- Si conclude quando si ottiene la clausola vuota.

### Esempio 2.2.2 (Risoluzione gatti)



### Inoltre:

- Se le due clausole  $C_1 = A_1 \vee \dots \vee A_n$  e  $C_2 = B_1 \vee \dots \vee B_m$  contengono variabili, i due letterali  $A_i$  e  $B_j$  devono essere tali che si possa fare l'*unificazione* tra i due:
  - Unificazione: sostituzione  $\alpha$  di variabili con termini o uguaglianza di variabili affinché  $A_i = \neg B_j$ .
  - Clausola risolvente  $[A_1 \vee \dots \vee A_{i-1} \vee A_{i+1} \vee \dots \vee A_n \vee B_1 \vee \dots \vee B_{j-1} \vee B_{j+1} \vee \dots \vee B_m] \alpha$ .
  - Le sostituzioni di  $\alpha$  sono applicate a  $A_1 \vee \dots \vee A_{i-1} \vee A_{i+1} \vee \dots \vee A_n \vee B_1 \vee \dots \vee B_{j-1} \vee B_{j+1} \vee \dots \vee B_m$ .

<sup>1</sup>Formule atomiche o negazione di formule atomiche.

	costante $c_2$	variabile $x_2$	composto $s_2$
costante $c_1$	unificano se $c_1 = c_2$	unificano con $x_2/c_1$	non unificano
variabile $x_1$	unificano con $x_1/c_2$	unificano con $x_1/x_2$	unificano con $x_1/s_2$
composto $s_1$	non unificano	unificano con $x_2/s_1$	unificano se il functore in $s_1$ e $s_2$ è lo stesso e gli argomenti unificano

Figure 2.3: Unificazione di due termini.

**Note:-**

Per ragioni d'efficienza, PROLOG non fa *occur check*, ossia una variabile  $X$  unifica con  $f(X)$ .

**2.2.2 Risoluzione SLD**

Per arrivare a un linguaggio di programmazione PROLOG si vuole una strategia efficiente.

**Definizione 2.2.2: Risoluzione SLD**

Linear resolution with Selection function for Definite clauses:

- $K$  con clausole *definite*:
  - Clausole di Horn: al più un letterale non negato.
  - Strategia linear input: a ogni passo di risoluzione, una *variante* di una clausola è sempre scelta nella  $K$  di partenza (programma) mentre l'altra è sempre il risolvente del passo precedente (goal, la negazione di  $F$  al primo passo).
  - Variante: clausola con variabili rinominate.

**Note:-**

NON LSD.

**Domanda 2.2**

Ma perché ci si limita alle clausole di Horn?

**Risposta:** si rimuove la parte "intuitiva" che non può essere implementata nel PROLOG. Inoltre le clausole di Horn garantiscono la completezza.

**Derivazione SLD per un goal  $G_0$  da un insieme di clausole  $K$  è:**

- Una sequenza di clausole goal  $G_0, G_1, \dots, G_n$ .
- Una sequenza di varianti di clausole di  $K$   $C_1, C_2, \dots, C_n$ .
- Una sequenza di MGU  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ , tali che  $G_{i+1}$  è derivato da  $G_i$  e da  $C_{i+1}$  attraverso la sostituzione  $\alpha_{i+1}$ ,



**Tre possibili tipi di derivazioni:**

- Successo se  $G_n$  è vuoto (**true**).
- Fallimento finito, se non è possibile derivare da  $G_n$  alcun risolvibile e  $G_n$  non è vuoto (**false**).
- Fallimento infinito, se è sempre possibile derivare nuovi risolventi (loop infinito).

**Due forme di non determinismo:**

- Regola di calcolo per selezionare a ogni passo l'atomo  $B_i$  del goal da unificare con una clausola.
- Scelta di quale clausola utilizzare a ogni passo di risoluzione.

**Definizione 2.2.3: Regola di calcolo**

Funzione che ha come dominio l'insieme dei goal e per ogni goal seleziona un suo atomo.

**Note:-**

La regola di calcolo non influenza correttezza e completezza del metodo di prova.

**Domanda 2.3**

Come si costruisce l'albero SLD?

**Data una regola di calcolo, è possibile rappresentare tutte le derivazioni con un albero SLD:**

- Nodo: goal.
- Radice: goal iniziale  $G_0$ .
- Ogni nodo  $\leftarrow A_1, \dots, A_m, \dots, A_k$ , dove  $A_m$  è l'atomo selezionato dalla regola di calcolo, ha un figlio per ogni clausola  $A \leftarrow B_1, \dots, B_k$  tale che  $A$  e  $A_m$  sono unificabili con MGU  $\alpha$ . Il nodo figlio è etichettato con il goal  $\leftarrow [A_1, \dots, A_{m-1}, B_1, \dots, B_k, A_{m+1}, \dots, A_k]\alpha$ . Il ramo dal padre al figlio è etichettato con  $\alpha$  e con la clausola selezionata.

**Scelte per rendere la strategia deterministica:**

- Regola di computazione: *leftmost* (viene sempre scelto il sottogol più a sinistra).
- Clausole considerate nell'*ordine in cui sono scritte nel programma*.
- Strategia di ricerca: *in profondità con backtracking*.
  - Non è completa perché se una computazione che porta al successo si trova a destra di un ramo infinito l'interprete non la trova, perché entra, senza mai uscirne, nel ramo infinito.

**Note:-**

Cercare di mettere a destra le computazioni che possano produrre eventuali casini.

**2.2.3 Il Cut****Definizione 2.2.4: Cut**

Il *cut* è un predicato extra-logico che consente di modificare l'esecuzione dell'interprete PROLOG. CUT (!):

- Predicato sempre vero.
- Se eseguito blocca il backtracking.

**Note:-**

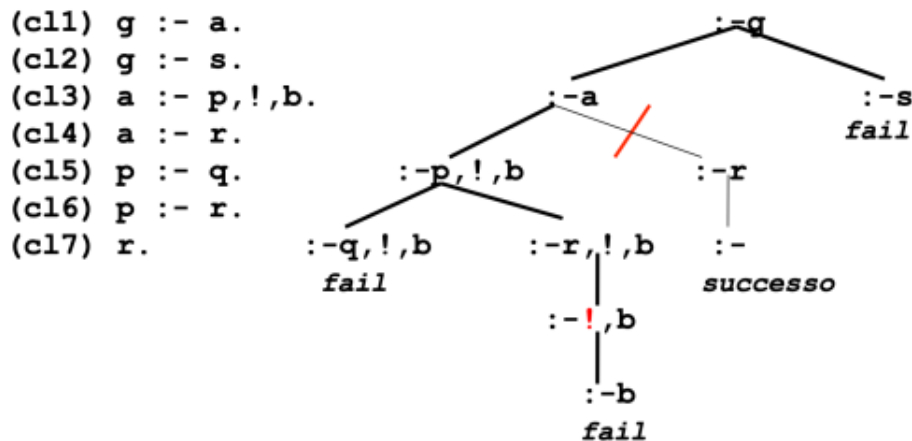
Si rischia di perdere la completezza, ma si guadagna molto in efficienza.

**Modello run-time dell'interprete PROLOG:**

- Due stack:
  - Stack di *esecuzione*: contiene i record di attivazione (environment) dei predicati in esecuzione.
  - Stack di *backtracking*: contiene l'insieme dei punti di scelta (choice-point).
- In realtà c'è un solo stack, con alternanza di environment e choice-point.

**Il cut:**

- Rende definitive le scelte fatte nel corso della valutazione dall'interprete PROLOG (eliminazione di choice-point dallo stack di backtracking).
- Altera il controllo del programma.
- Perdita di dichiaratività.



- tagliando alcuni rami dell'albero SLD (=rimuovendo alcuni punti di backtracking) si perde la **completezza**

Figure 2.4: Esempio di cut che provoca la perdita di completezza.

## 2.3 Strategie di Ricerca in PROLOG

Un problema di ricerca è definito da:

- *Stato iniziale*.
- *Insieme delle azioni* (azione: fa passare da uno stato all'altro).
- Specifica degli obiettivi (goal).
- Costo di ogni azione.

**Note:-**

Non tutti i problemi hanno una naturale soluzione con la ricerca nello spazio degli stati.

### 2.3.1 Ricerca nello Spazio degli Stati

**Definizione 2.3.1: Soluzione a un Problema**

**Corollario 2.3.1** Soluzione Ottima



# 3

## Answer Set Programming

