

LINGUAGGIO PROLOG

- PROLOG: PROgramming in LOGic, nato nel 1973
- E' il più noto linguaggio di Programmazione Logica

ALGORITMO = LOGICA + CONTROLLO

- Si fonda sulle idee di Programmazione Logica avanzate da R. Kowalski
- Basato sulla logica dei Predicati del Primo Ordine (prova automatica di teoremi - risoluzione)
- Manipolatore di SIMBOLI e non di NUMERI
- Linguaggio ad ALTISSIMO LIVELLO: utilizzabile anche da non programmatori
- APPLICAZIONI DI AI

LINGUAGGIO PROLOG

- Lavora su strutture ad ALBERO
 - anche i programmi sono strutture dati manipolabili
 - utilizzo della ricorsione e non assegnamento
- Metodologia di programmazione:
 - concentrarsi sulla specifica del problema rispetto alla strategia di soluzione
- Svantaggi:
 - linguaggio relativamente giovane
 - efficienza paragonabile a quella del LISP
 - non adatto ad applicazioni numeriche o in tempo reale
 - mancanza di ambienti di programmazione evoluti

ALGORITMO = LOGICA + CONTROLLO

- Conoscenza sul problema indipendente dal suo utilizzo
 - Esprimo COSA e non COME
 - Alta modularità e flessibilità
 - Schema progettuale alla base di gran parte dei SISTEMI BASATI SULLA CONOSCENZA (Sistemi Esperti)
- LOGICA: conoscenza sul problema
 - correttezza ed efficienza
- CONTROLLO: strategia risolutiva
 - efficienza
- Algoritmi equivalenti:
 - $A1 = L + C1$
 - $A2 = L + C2$

PROLOG: ELABORATORE DI SIMBOLI

- ESEMPIO: somma di due numeri interi

`sum(0, X, X) .`  **FATTO**

`sum(s(X), Y, s(Z)) :- sum(X, Y, Z) .`  **REGOLA**

- Simbolo `sum` non interpretato.
- Numeri interi interpretati dalla struttura “successore” `s(x)`
- Si utilizza la ricorsione
- Esistono molte possibili interrogazioni

`:- sum(s(0), s(s(0)), Y) .`

`:- sum(s(0), Y, s(s(s(0)))) .`

`:- sum(X, Y, s(s(s(0)))) .`

`:- sum(X, Y, Z) .`

`:- sum(X, Y, s(s(s(0)))) , sum(X, s(0), Y) .`

PROVA DI UN GOAL

- Un goal viene provato provando i singoli letterali **da sinistra a destra**

`:- collega(X, Y), persona(X), persona(Y).`

- Un goal atomico (ossia formato da un singolo letterale) viene provato confrontandolo e **unificandolo** con le teste delle clausole contenute nel programma
- Se esiste una sostituzione per cui il confronto ha successo
 - se la clausola con cui unifica e' un fatto, la prova termina;
 - se la clausola con cui unifica e' una regola, ne viene provato il Body
- Se non esiste una sostituzione il goal fallisce

PROVA DI UN GOAL: esempio

`append([], X, X) .`

`append([X|Z], Y, [X|T]) :- append(Z, Y, T) .`

`:- append([a, b], [c, d], [a, b, c, d]) .`

- Questo goal atomico viene provato unificandolo con la testa della seconda regola: intuitivamente `x` unifica con `a`, `z` con la lista `[b]`, `y` con la lista `[c, d]` `T` con la lista `[b, c, d]`

- Viene quindi provato il body dopo aver effettuato le sostituzioni

`:- append([b], [c, d], [b, c, d]) .`

- Questo goal atomico viene provato unificandolo con la testa della seconda regola: `x` unifica con `b`, `z` con la lista `[]`, `y` con la lista `[c, d]` `T` con la lista `[c, d]`

PROVA DI UN GOAL: esempio

```
append([], X, X) .
```

```
append([X|Z], Y, [X|T]) :- append(X, Y, T) .
```

```
:- append([a, b], [c, d], [a, b, c, d]) .
```

- Viene quindi provato il body dopo aver effettuato le sostituzioni

```
:- append([], [c, d], [c, d]) .
```

- Questo goal atomico viene provato unificandolo con la testa della prima regola che e' un fatto e quindi la prova termina con successo

PROVA DI UN GOAL: esempio

```
append([], X, X) .
```

```
append([X|Z], Y, [X|T]) :- append(X, Y, T) .
```

Come vengono dimostrati i successivi goal ?

```
:- append([a, b], Y, [a, b, c, d]) .
```

```
:- append(X, [c, d], [a, b, c, d]) .
```

```
:- append(X, Y, [a, b, c, d]) .
```

```
:- append(X, Y, Z) .
```

PIU' FORMALMENTE

- Linguaggio Prolog: caso particolare del paradigma di Programmazione Logica
- SINTASSI: un programma Prolog e' costituito da un insieme di **clausole definite** della forma

(c11) **A**. \longrightarrow **FATTO o ASSERTIONE**

(c12) **A :- B1, B2, ..., Bn.** \longrightarrow **REGOLA**

(c13) **:- B1, B2, ..., Bn.** \longrightarrow **GOAL**

- In cui **A** e **B_i** sono formule atomiche
- **A** : **testa** della clausola
- **B1, B2, ..., Bn** : **body** della clausola
- Il simbolo “,” indica la congiunzione; il simbolo “:-” l'implicazione logica in cui **A** e' il conseguente e **B1, B2, ..., Bn** l'antecedente

PIU' FORMALMENTE

- Una **formula atomica** e' una formula del tipo

$$p(t_1, t_2, \dots, t_n)$$

in cui **p** e' un **simbolo predicativo** e t_1, t_2, \dots, t_n sono **termini**

- Un **termine** e' definito ricorsivamente come segue:
 - le costanti (numeri interi/floating point, stringhe alfanumeriche aventi come primo carattere una lettera minuscola) sono termini
 - le variabili (stringhe alfanumeriche aventi come primo carattere una lettera maiuscola oppure il carattere “_”) sono termini.
 - $f(t_1, t_2, \dots, t_k)$ e' un termine se “**f**” e' un simbolo di funzione (operatore) a k argomenti e t_1, t_2, \dots, t_k sono termini. $f(t_1, t_2, \dots, t_k)$ viene detta struttura

NOTA: le costanti possono essere viste come simboli funzionali a zero argomenti.

ESEMPI

- COSTANTI: a , pippo , aB , 9 , 135 , $a92$
- VARIABILI: x , $x1$, Pippo , $_pippo$, $_x$, $_$
 - la variabile $_$ prende il nome di variabile anonima
- TERMINI COMPOSTI: $f(a)$, $f(g(1))$, $f(g(1), b(a))$, 27
- FORMULE ATOMICHE: p , $p(a, f(x))$, $p(Y)$, $q(1)$
- CLAUSOLE DEFINITE:
 - $q.$
 - $p:-q, r.$
 - $r(z).$
 - $p(x):-q(x, g(a)).$
- GOAL:
 - $:-q, r.$
- Non c'è distinzione tra costanti, simboli funzionali e predicativi.

INTERPRETAZIONE DICHIARATIVA

- Le variabili all' interno di una clausola sono quantificate universalmente
- per ogni asserzione (fatto)

$$p(t_1, t_2, \dots, t_m) .$$

se x_1, x_2, \dots, x_n sono le variabili che compaiono in t_1, t_2, \dots, t_m il significato e' : $\forall x_1, \forall x_2, \dots, \forall x_n (p(t_1, t_2, \dots, t_m))$

- per ogni regola del tipo

$$A :- B_1, B_2, \dots, B_k .$$

se y_1, y_2, \dots, y_n sono le variabili che compaiono solo nel body della regola e x_1, x_2, \dots, x_n sono le variabili che compaiono nella testa e nel corpo, il significato e' :

$$\forall x_1, \forall x_2, \dots, \forall x_n, \forall y_1, \forall y_2, \dots, \forall y_n ((B_1, B_2, \dots, B_k) \rightarrow A)$$

$$\forall x_1, \forall x_2, \dots, \forall x_n ((\exists y_1, \exists y_2, \dots, \exists y_n (B_1, B_2, \dots, B_k)) \rightarrow A)$$

INTERPRETAZIONE DICHIARATIVA

- ESEMPI

`padre (X, Y)` “x e’ il padre di y”

`madre (X, Y)` “x e’ la madre di y”

`nonno (X, Y) :- padre (X, Z) , padre (Z, Y) .`

“per ogni x e y, x e’ il nonno di y se esiste z tale che x e’ padre di z e z e’ il padre di y”

`nonno (X, Y) :- padre (X, Z) , madre (Z, Y) .`

“per ogni x e y, x e’ il nonno di y se esiste z tale che x e’ padre di z e z e’ la madre di y”

ESECUZIONE DI UN PROGRAMMA

- Una computazione corrisponde al tentativo di dimostrare, tramite la risoluzione, che una formula segue logicamente da un programma (e' un teorema).
- Inoltre, si deve determinare una sostituzione per le variabili del goal (detto anche "query") per cui la query segue logicamente dal programma.
- Dato un programma P e la query:

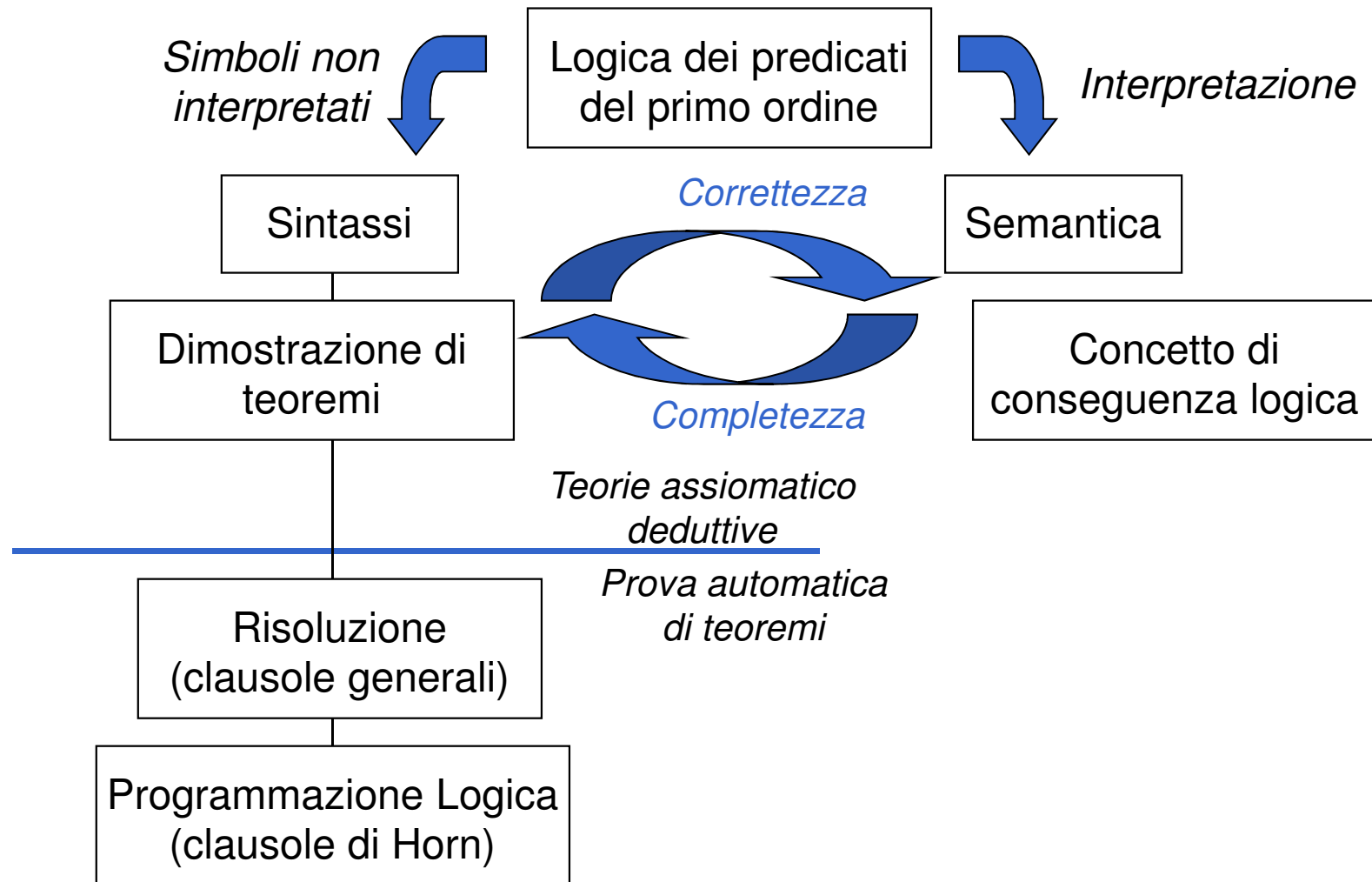
$:- p(t_1, t_2, \dots, t_m) .$

se x_1, x_2, \dots, x_n sono le variabili che compaiono in t_1, t_2, \dots, t_m il significato della query e' $\exists x_1, \exists x_2, \dots, \exists x_n p(t_1, t_2, \dots, t_m)$ e l'obiettivo e' quello di trovare una sostituzione

$\sigma = \{x_1/s_1, x_2/s_2, \dots, x_n/s_n\}$

dove s_i sono termini tale per cui $P \models [p(t_1, t_2, \dots, t_m)]\sigma$

SCHEMA RIASSUNTIVO



PROGRAMMAZIONE LOGICA

- Dalla Logica dei predicati del primo ordine verso un linguaggio di programmazione;
 - requisito efficienza
- Si considerano solo clausole di Horn (al più un letterale positivo)
 - il letterale positivo corrisponde alla testa della clausola
- Si adotta una strategia risolutiva particolarmente efficiente
 - RISOLUZIONE SLD (corrisponde al Backward chaining per clausole di Horn).
 - Non completa per la logica a clausole, ma completa per il sottoinsieme delle clausole di Horn.

RISOLUZIONE SLD

- Risoluzione Lineare per Clausole Definite con funzione di Selezione (backward chaining)
 - completa per le clausole di Horn
- Dato un programma logico \mathcal{P} e una clausola goal G_0 , ad ogni passo di risoluzione si ricava un nuovo **risolvente** G_{i+1} , se esiste, dalla clausola goal ottenuta al passo precedente G_i e da una variante di una clausola appartenente a \mathcal{P}
- Una **variante** per una clausola C e' la clausola C' ottenuta da C rinominando le sue variabili (*renaming*)
 - Esempio:
 $p(x) :- q(x, g(z)) .$
 $p(x1) :- q(x1, g(z1)) .$

RISOLUZIONE SLD –backward chaining

(continua)

- La Risoluzione SLD seleziona un atomo \mathbf{A}_m dal goal \mathbf{G}_i secondo un determinato criterio, e lo unifica se possibile con la testa della clausola \mathbf{C}_i attraverso la *sostituzione* più generale: **MOST GENERAL UNIFIER** (MGU) θ_i
- Il nuovo risolvente e' ottenuto da \mathbf{G}_i riscrivendo l' atomo selezionato con la parte destra della clausola \mathbf{C}_i ed applicando la sostituzione θ_i .
- Più in dettaglio:
 - $:- \mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{A}_{m-1}, \mathbf{A}_m, \mathbf{A}_{m+1}, \dots, \mathbf{A}_k.$ Risolvente
 - $\mathbf{A}:- \mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_q.$ Clausola del programma P
 - e $[\mathbf{A}_m]\theta_i = [\mathbf{A}] \theta_i$ allora la risoluzione SLD deriva il nuovo risolvente
 - $:- [\mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{A}_{m-1}, \mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_q, \mathbf{A}_{m+1}, \dots, \mathbf{A}_k]\theta_i.$

UNIFICAZIONE

- L' unificazione è un meccanismo che permette di calcolare una sostituzione al fine di rendere uguali due espressioni. Per espressione intendiamo un termine, un letterale o una congiunzione o disgiunzione di letterali.
- SOSTITUZIONE: $\theta = [\mathbf{x}_1/\mathbf{T}_1, \mathbf{x}_2/\mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{x}_n/\mathbf{T}_n]$ insieme di legami di termini \mathbf{T}_i a variabili \mathbf{x}_i che rendono uguali due espressioni.
L' applicazione di una sostituzione a un' espressione E, $[E]\theta$ produce una nuova espressione in cui vengono sostituite tutte le variabili di E con i corrispondenti termini.
- Esempio: Espressione 1: $c(X,Y)$ Espressione 2: $c(a,K)$
sostituzione unificatrice: $\theta = [\mathbf{x}/\mathbf{a}, \mathbf{Y}/\mathbf{K}]$

UNIFICAZIONE

- COMPOSIZIONE DI SOSTITUZIONI: $\theta_1 \theta_2$
 $\theta_1 = [X_1/T_1, X_2/T_2, \dots, X_n/T_n]$ $\theta_2 = [Y_1/Q_1, Y_2/Q_2, \dots, Y_n/Q_n]$
 $\theta_1 \theta_2 = [X_1/[T_1] \theta_2, \dots, X_n/[T_n] \theta_2, Y_1/Q_1, Y_2/Q_2, \dots, Y_n/Q_n]$
equivale quindi ad applicare prima θ_1 e poi θ_2 .
- Esempio: $\theta_1 = [X/f(Z), W/R, S/c]$ $\theta_2 = [Y/X, R/W, Z/b]$
 $\theta_1 \theta_2 = [X/f(b), S/c, Y/X, R/W, Z/b]$
- Due atomi : A_1 e A_2 sono *unificabili* se esiste una sostituzione θ tale che $[A_1] \theta = [A_2] \theta$

UNIFICAZIONE

- Una sostituzione θ_1 è più generale di un'altra θ_2 se esiste una terza sostituzione θ_3 tale che $\theta_2 = \theta_1 \theta_3$
- Esistono in generale più sostituzioni unificatrici. Noi siamo interessati nell'unificazione più generale: MOST GENERAL UNIFIER
- Esiste un algoritmo che calcola l'unificazione più generale se due atomi sono unificabili, altrimenti termina in tempo finito nel caso in cui i due atomi non sono unificabili.

UNIFICAZIONE

		T2		
		costante c2	variabile X2	termine composto S2
T1	costante c1	unificano se $c1=c2$	unificano $X2=c1$	non unificano
	variabile X1	unificano $X1=c2$	unificano $X1=X2$	unificano $X1=S2$
	termine composto S1	non unificano	unificano $X2=S1$	Unificano se uguale funtore e parametri unificabili

OCCUR CHECK

- L'unificazione tra una variabile x e un termine composto s è molto delicata: infatti è importante controllare che il termine composto s non contenga la variabile da unificare x .
- Questo inficerebbe sia la terminazione, sia la correttezza dell'algoritmo di unificazione.
- Esempio: si consideri l'unificazione tra $p(x, x)$ e $p(y, f(y))$.
La sostituzione è $[x/y, x/f(x)]$
Chiaramente, due termini unificati con lo stesso termine, sono uguali tra loro. Quindi, $y/f(y)$ ma questo implica $y=f(f(f(f(\dots))))$ e il procedimento non termina

RISOLUZIONE SLD: ESEMPIO

$\text{sum}(0, X, X) . \quad (\text{C1})$

$\text{sum}(s(X), Y, s(Z)) :- \text{sum}(X, Y, Z) . \quad (\text{C2})$

- Goal $\text{sum}(s(0), 0, W) .$
- Al primo passo genero una variante della clausola (C2)
 $\text{sum}(s(X1), Y1, s(Z1)) :- \text{sum}(X1, Y1, Z1) .$

Unificando la testa con il goal ottengo la sostituzione MGU

$\theta_1 = [X1/0, Y1/0, W/s(Z1)]$

Ottingo il nuovo risolvete G1: $:- [\text{sum}(X1, Y1, Z1)] \theta_1$

ossia

$:-\text{sum}(0, 0, Z1) .$

DERIVAZIONE SLD (backward chaining)

- Una **derivazione SLD** per un goal G_0 dall'insieme di clausole definite P e' una sequenza di clausole goal G_0, \dots, G_n , una sequenza di varianti di clausole del programma C_1, \dots, C_n , e una sequenza di sostituzioni MGU $\theta_1, \dots, \theta_n$ tali che G_{i+1} è derivato da G_i e da C_{i+1} attraverso la sostituzione θ_i . La sequenza può essere anche infinita.
- Esistono tre tipi di derivazioni;
 - **successo**, se per n finito G_n è uguale alla clausola vuota $G_n = :-$
 - **fallimento finito**: se per n finito non è più possibile derivare un nuovo risolvente da G_n e G_n non è uguale a $:-$
 - **fallimento infinito**: se è sempre possibile derivare nuovi risolventi tutti diversi dalla clausola vuota.

DERIVAZIONE DI SUCCESSO

$\text{sum}(0, X, X) .$ (CL1)

$\text{sum}(s(X), Y, s(Z)) :- \text{sum}(X, Y, Z) .$ (CL2)

- Goal $G_0 :- \text{sum}(s(0), 0, W)$ ha una derivazione di successo
C1: variante di CL2 $\text{sum}(s(X1), Y1, s(Z1)) :- \text{sum}(X1, Y1, Z1) .$
 $\theta_1 = [X1/0, Y1/0, W/s(Z1)]$
 $G_1: :- \text{sum}(0, 0, Z1) .$
C2: variante di CL1 $\text{sum}(0, X2, X2) .$
 $\theta_2 = [Z1/0, X2/0]$
 $G_2: :-$

DERIVAZIONE DI FALLIMENTO FINITA

$\text{sum}(0, X, X) .$ (CL1)

$\text{sum}(s(X), Y, s(Z)) :- \text{sum}(X, Y, Z) .$ (CL2)

- Goal $G_0 :- \text{sum}(s(0), 0, 0)$ ha una derivazione di fallimento finito perché l'unico atomo del goal non è unificabile con alcuna clausola del programma

DERIVAZIONE DI FALLIMENTO INFINITA

$\text{sum}(0, X, X) .$ (CL1)

$\text{sum}(s(X), Y, s(Z)) :- \text{sum}(X, Y, Z) .$ (CL2)

- Goal $G_0 :- \text{sum}(A, B, C)$ ha una derivazione SLD infinita, ottenuta applicando ripetutamente varianti della seconda clausola di P

C1: variante di CL2 $\text{sum}(s(X1), Y1, s(Z1)) :- \text{sum}(X1, Y1, Z1) .$

$\theta_1 = [A/s(X1), B/Y1, C/s(Z1)]$

$G_1: :- \text{sum}(X1, Y1, Z1) .$

C2: variante di CL2 $\text{sum}(s(X2), Y2, s(Z2)) :- \text{sum}(X2, Y2, Z2) .$

$\theta_2 = [X1/s(X2), Y1/Y2, Z1/s(Z2)]$

$G_2: :- \text{sum}(X2, Y2, Z2) .$

...

LEGAMI PER LE VARIABILI IN USCITA

- Risultato della computazione:
 - eventuale successo
 - *legami* per le variabili del goal G_0 , ottenuti componendo le sostituzioni MGU applicate

Se il goal G_0 è del tipo:

- $\neg A_1(t_1, \dots, t_k), A_2(t_{k+1}, \dots, t_h), \dots, A_n(t_{j+1}, \dots, t_m)$
 - i termini t_i “ground” rappresentano i *valori di ingresso* al programma, mentre i termini variabili sono i destinatari dei *valori di uscita* del programma.
- Dato un programma logico P e un goal G_0 , una *risposta* per $P \cup \{G_0\}$ è una sostituzione per le variabili di G_0 .

LEGAMI PER LE VARIABILI IN USCITA

- Si consideri una refutazione SLD per $P \cup \{G_0\}$. Una *risposta calcolata* q per $P \cup \{G_0\}$ è la sostituzione ottenuta restringendo la composizione delle sostituzioni mgu q_1, \dots, q_n utilizzate nella refutazione SLD di $P \cup \{G_0\}$ alle variabili di G_0 .
- La risposta calcolata o *sostituzione di risposta calcolata* è il “testimone” del fatto che esiste una dimostrazione costruttiva di una formula quantificata esistenzialmente (la formula goal iniziale).

$$\text{sum}(0, X, X) . \quad (\text{CL1})$$

$$\text{sum}(s(X), Y, s(Z)) :- \text{sum}(X, Y, Z) . \quad (\text{CL2})$$

$G = :-\text{sum}(s(0), 0, W)$ la sostituzione $\theta = \{W/s(0)\}$ è la risposta calcolata, ottenuta componendo θ_1 con θ_2 e considerando solo la sostituzione per la variabile W di G .

NON DETERMINISMO

- Nella risoluzione SLD così come è stata enunciata si hanno *due forme di non determinismo*
- La prima forma di non determinismo è legata alla selezione di un atomo A_m del goal da unificare con la testa di una clausola, e viene risolta definendo una particolare *regola di calcolo*.
- La seconda forma di non determinismo è legata alla scelta di quale clausola del programma P utilizzare in un passo di risoluzione, e viene risolta definendo una *strategia di ricerca*.

REGOLA DI CALCOLO

- Una *regola di calcolo* è una funzione che ha come dominio l'insieme dei goal e che seleziona un suo atomo A_m dal goal

$:-A_1, \dots, A_{m-1}, A_m, A_{m+1}, \dots, A_k, (A_m : \textit{atomo selezionato})$.

$\text{sum}(0, X, X) . \quad (\text{CL1})$

$\text{sum}(s(X), Y, s(Z)) :- \text{sum}(X, Y, Z) . \quad (\text{CL2})$

$G0 = :-\text{sum}(0, s(0), s(0)), \text{sum}(s(0), 0, s(0)) .$

- Se si seleziona l'atomo più a sinistra al primo passo, unificando l'atomo $\text{sum}(0, s(0), s(0))$ con la testa di CL1, si otterrà:

$G1 = :- \text{sum}(s(0), 0, s(0)) .$

- Se si seleziona l'atomo più a destra al primo passo, unificando l'atomo $\text{sum}(s(0), 0, s(0))$ con la testa di CL2, si avrà:

$G1 = :- \text{sum}(0, s(0), s(0)), \text{sum}(0, 0, 0) .$

INDIPENDENZA DALLA REGOLA DI CALCOLO

- La regola di calcolo influenza solo l'efficienza
 - Non influenza né la correttezza né la completezza del dimostratore.
- **Proprietà** (*Indipendenza dalla regola di calcolo*)
 - Dato un programma logico P, l'insieme di successo di P non dipende dalla regola di calcolo utilizzata dalla risoluzione SLD.

STRATEGIA DI RICERCA

- Definita una regola di calcolo, nella risoluzione SLD resta un ulteriore grado di non determinismo poiché possono esistere più teste di clausole unificabili con l'atomo selezionato.

sum (0, X, X) . (CL1)

sum (s (X) , Y, s (Z)) :- sum (X, Y, Z) . (CL2)

G0 = :-sum (W, 0, K) .

- Se si sceglie la clausola CL1 si ottiene il risolvente

G1 = :-

- Se si sceglie la clausola CL2 si ottiene il risolvente

G1 = :- sum (X1, 0, Z1)

STRATEGIA DI RICERCA

- Questa forma di non determinismo implica che possano esistere più soluzioni alternative per uno stesso goal.
- La risoluzione SLD (completezza), deve essere in grado di generare tutte le possibili soluzioni e quindi deve considerare ad ogni passo di risoluzione tutte le possibili alternative.
- La strategia di ricerca deve garantire questa completezza
- Una forma grafica utile per rappresentare la risoluzione SLD e questa forma di non determinismo sono gli **alberi SLD**.

ALBERI SLD

- Dato un programma logico P , un goal G_0 e una regola di calcolo R , un albero SLD per $P \cup \{G_0\}$ via R è definito come segue:
 - ciascun nodo dell'albero è un goal (eventualmente vuoto);
 - la radice dell'albero è il goal G_0 ;
 - dato il nodo $:-\mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{A}_{m-1}, \mathbf{A}_m, \mathbf{A}_{m+1}, \dots, \mathbf{A}_k$ se \mathbf{A}_m è l'atomo selezionato dalla regola di calcolo R , allora questo nodo (*genitore*) ha un nodo *figlio* per ciascuna clausola $C_i = \mathbf{A}:-\mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_q$ di P tale che \mathbf{A} e \mathbf{A}_m sono unificabili attraverso una sostituzione unificatrice più generale θ . Il nodo figlio è etichettato con la clausola goal:
 $:-[\mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{A}_{m-1}, \mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_q, \mathbf{A}_{m+1}, \dots, \mathbf{A}_k] \theta$ e il ramo dal nodo padre al figlio è etichettato dalla sostituzione θ e dalla clausola selezionata C_i ;
 - il nodo vuoto (indicato con “:-”) non ha figli.

ALBERI SLD

- A ciascun nodo dell'albero può essere associata una *profondità*.
 - La radice dell'albero ha profondità 0, mentre la profondità di ogni altro nodo è quella del suo genitore più 1.
- Ad ogni ramo di un albero SLD corrisponde una derivazione SLD.
 - Ogni ramo che termina con il nodo vuoto (“:-”) rappresenta una derivazione SLD di successo.
- La regola di calcolo influisce sulla struttura dell’albero per quanto riguarda sia l’ampiezza sia la profondità. Tuttavia non influisce su correttezza e completezza. Quindi, qualunque sia R , il numero di cammini di successo (se in numero finito) è lo stesso in tutti gli alberi SLD costruibili per $P \cup \{G0\}$.
- R influenza solo il numero di cammini di fallimento (finiti ed infiniti).

ALBERI SLD: ESEMPIO

$\text{sum}(0, X, X) .$ (CL1)

$\text{sum}(s(X), Y, s(Z)) :- \text{sum}(X, Y, Z) .$ (CL2)

$G0 = :- \text{sum}(W, 0, 0), \text{sum}(W, 0, K) .$

- Albero SLD con regola di calcolo “left-most”

$:- \text{sum}(W, 0, 0), \text{sum}(W, 0, K)$

| CL1 $s1 = \{W/0\}$

$:- \text{sum}(0, 0, K)$

| CL1 $s1 = \{K/0\}$

$:-$

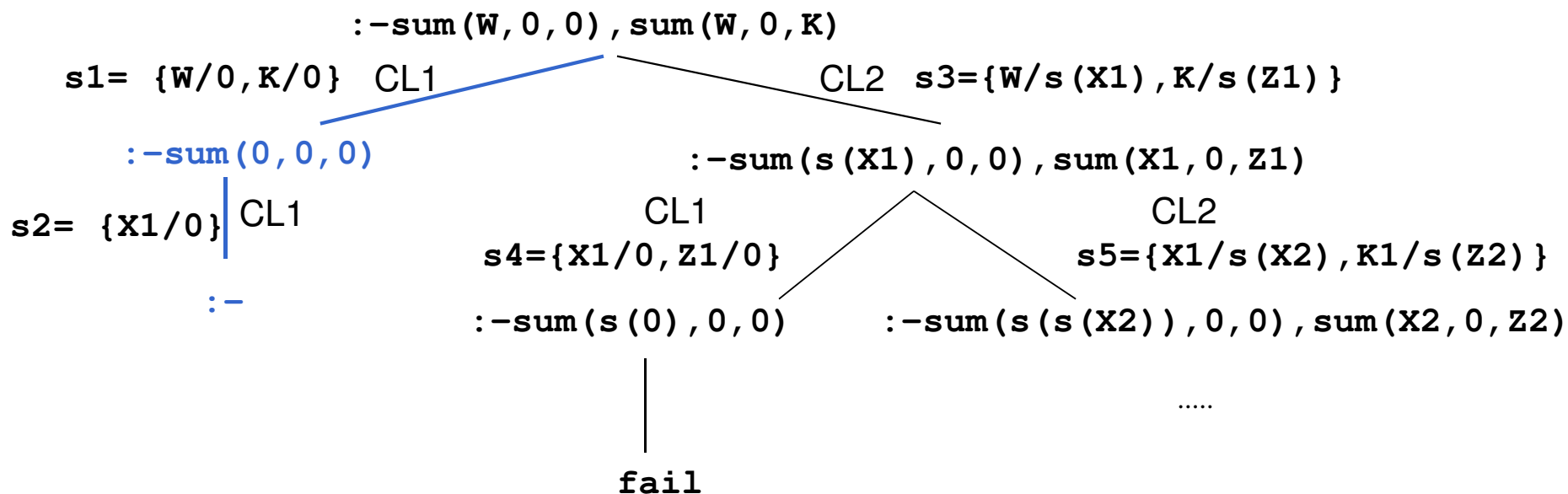
ALBERI SLD: ESEMPIO

$\text{sum}(0, X, X) .$ (CL1)

$\text{sum}(s(X), Y, s(Z)) :- \text{sum}(X, Y, Z) .$ (CL2)

$G0 = :- \text{sum}(W, 0, 0), \text{sum}(W, 0, K) .$

- Albero SLD con regola di calcolo “right- most”



ALBERI SLD: ESEMPIO

- Confronto albero SLD con regola di calcolo left most e right most:
 - In entrambi gli alberi esiste una refutazione SLD, cioè un cammino (ramo) di successo il cui nodo finale è etichettato con ":-".
- La composizione delle sostituzioni applicate lungo tale cammino genera la sostituzione di risposta calcolata $\{\mathbf{w}/\theta, \mathbf{\kappa}/\theta\}$.
- Si noti la differenza di struttura dei due alberi. In particolare cambiano i rami di fallimento (finito e infinito).

ALBERI SLD LEFT MOST: ESEMPIO (2)

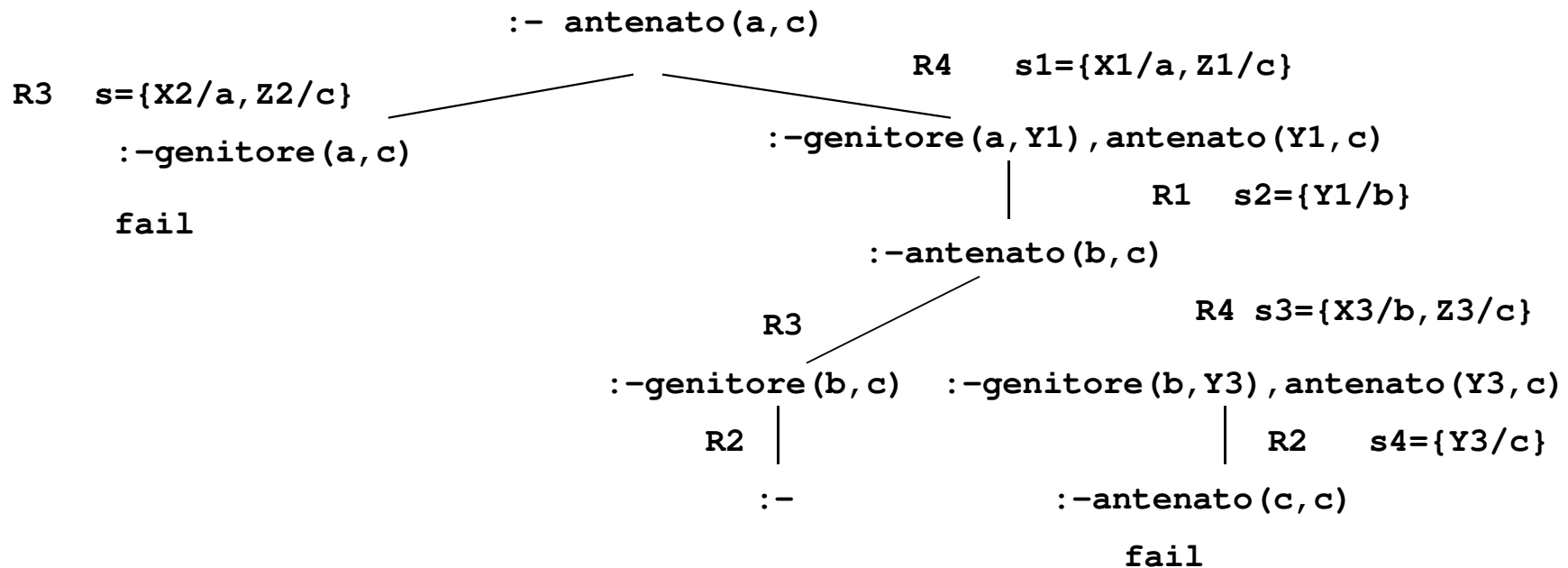
genitore(a,b) . (R1)

genitore(b,c) . (R2)

antenato(X,Z) :-genitore(X,Z) (R3)

antenato(X,Z) :-genitore(X,Y) , antenato(Y,Z) (R4)

G0 :- antenato(a,c)



ALBERI SLD LEFT MOST: ESEMPIO (2)

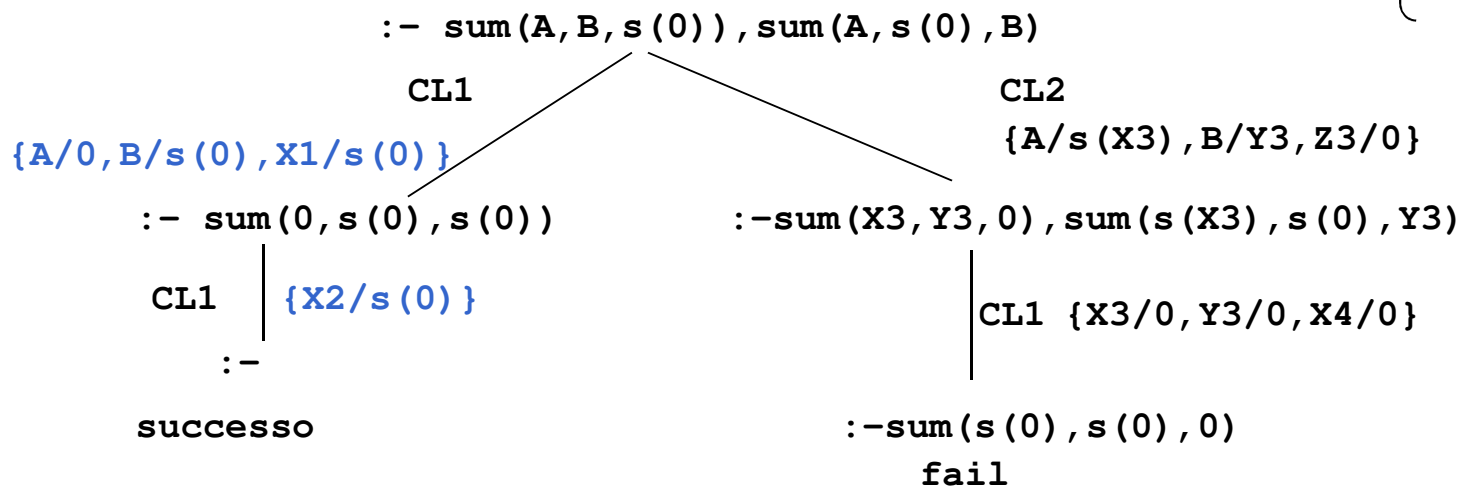
$\text{sum}(0, X, X) .$ (CL1)

$\text{sum}(s(X), Y, s(Z)) :- \text{sum}(X, Y, Z) .$ (CL2)

$G0 = :- \text{sum}(A, B, s(0)), \text{sum}(A, s(0), B) .$

– La query rappresenta il sistema di equazioni

$$\left\{ \begin{array}{l} A+B=1 \\ B-A=1 \end{array} \right.$$



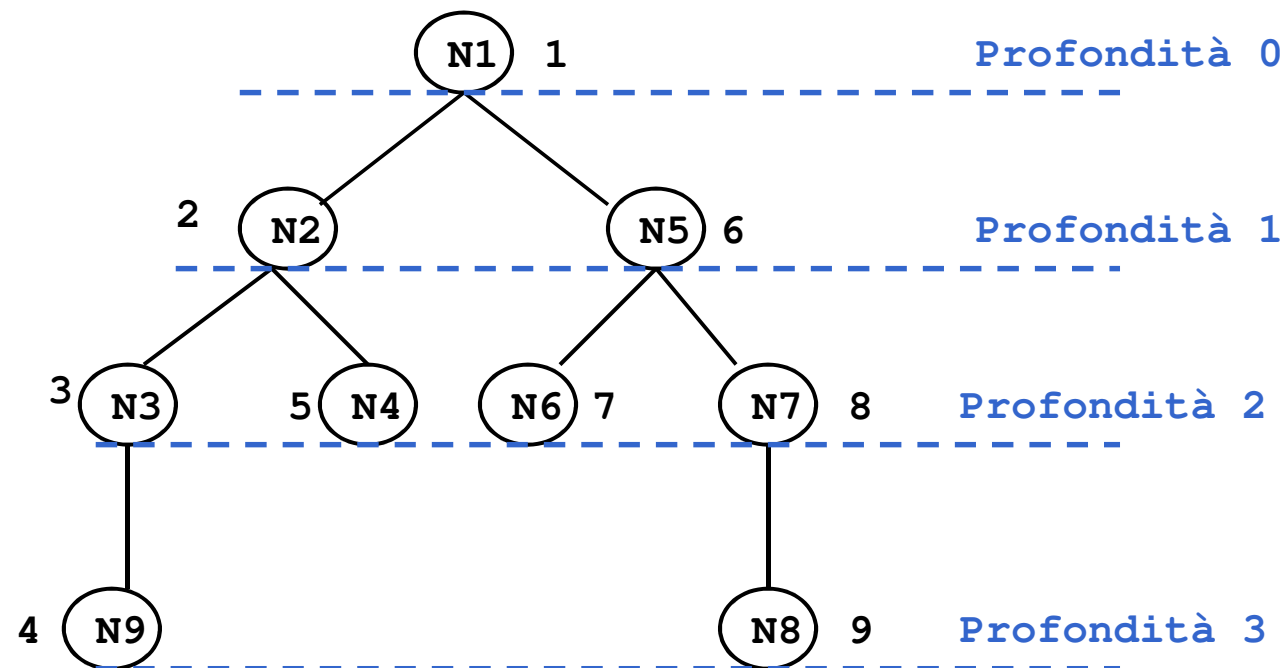
– Per l' unica derivazione di successo, la composizione delle sostituzioni applicate (cioè $\{A/0, B/s(0), X1/s(0)\} \{X2/s(0)\}$), ristretta alle variabili del goal $G0$, produce la risposta calcolata: $\{A/0, B/s(0)\}$ 43

STRATEGIA DI RICERCA

- La realizzazione effettiva di un dimostratore basato sulla risoluzione SLD richiede la definizione non solo di una regola di calcolo, ma anche di una *strategia di ricerca* che stabilisce una particolare *modalità di esplorazione* dell'albero SLD alla ricerca dei rami di successo.
- Le modalità di esplorazione dell' albero piu' comuni sono:
 - depth first
 - breadth first
- Entrambe le modalità implicano l' esistenza di un meccanismo di backtracking per esplorare tutte le strade alternative che corrispondono ai diversi nodi dell' albero.

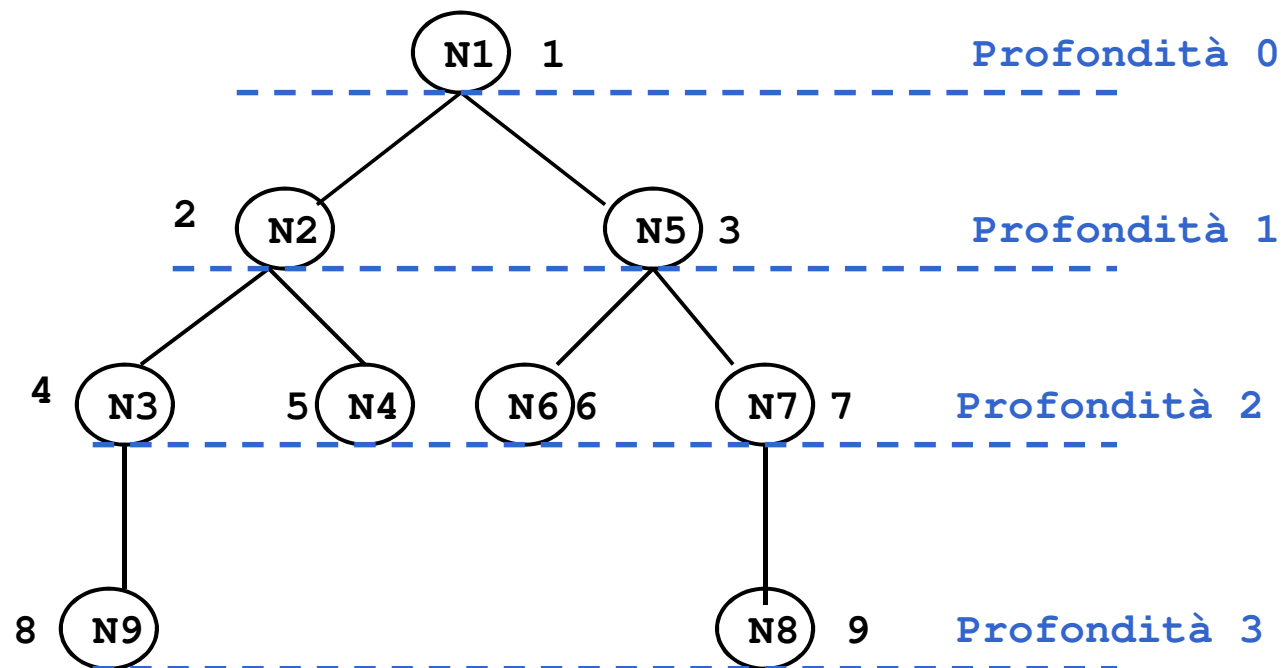
STRATEGIA DEPTH-FIRST

- Ricerca in profondità: vengono prima esplorati i nodi a profondità maggiore. **NON COMPLETA**



STRATEGIA BREADTH-FIRST

- Ricerca in ampiezza: vengono prima esplorati i nodi a profondità minore. **COMPLETA**



STRATEGIE DI RICERCA E ALBERI SLD

- Nel caso degli alberi SLD, lo spazio di ricerca non è esplicito, ma resta definito implicitamente dal programma P e dal goal G_0 .
 - I nodi corrispondono ai risolventi generati durante i passi di risoluzione.
 - I figli di un risolvente G_i sono tutti i possibili risolventi ottenuti unificando un atomo A di G_i , selezionato secondo una opportuna regola di calcolo, con le clausole del programma P .
 - Il numero di figli generati corrisponde al numero di clausole alternative del programma P che possono unificare con A .
- Agli alberi SLD possono essere applicate entrambe le strategie discusse in precedenza.
 - Nel caso di alberi SLD, attivare il “backtracking” implica che tutti i legami per le variabili determinati dal punto di “backtracking” in poi non devono essere più considerati.

PROLOG E STRATEGIE DI RICERCA

- Il linguaggio Prolog, adotta la *strategia in profondità con "backtracking"* perché può essere realizzata in modo efficiente attraverso un unico stack di goal.
 - tale stack rappresenta il ramo che si sta esplorando e contiene opportuni riferimenti a rami alternativi da esplorare in caso di fallimento.
- Per quello che riguarda la scelta fra nodi fratelli, la strategia Prolog li ordina seguendo l'ordine testuale delle clausole che li hanno generati.
- La strategia di ricerca adottata in Prolog è dunque non completa.

PROLOG E STRATEGIE DI RICERCA

`collega (a, b) .` (R1)
`collega (c, b) .` (R2)
`collega (X, Z) :-collega (X, Y) , collega (Y, Z) .` (R3)
`collega (X, Y) :-collega (Y, X) .` (R4)
`Goal: :-collega (a, c)` (G0)

- La formula `collega (a, c)` segue logicamente dagli assiomi, ma la procedura di dimostrazione non completa come quella che adotta la strategia in profondità non è in grado di dimostrarlo.

RIASSUMENDO...

- La forma di risoluzione utilizzata dai linguaggi di programmazione logica è la risoluzione SLD, che in generale, presenta due forme di non determinismo:
 - la regola di computazione
 - la strategia di ricerca
- Il linguaggio Prolog utilizza la risoluzione SLD con le seguenti scelte
 - *Regola di computazione*
 - Regola "left-most"; data una "query":
$$?- G_1, G_2, \dots, G_n.$$
viene sempre selezionato il letterale più a sinistra G_1 .
 - *Strategia di ricerca*
 - In *profondità (depth-first)* con *backtracking cronologico*.

RISOLUZIONE IN PROLOG

- Dato un letterale G_1 da risolvere, viene **selezionata la prima clausola** (secondo l'ordine delle clausole nel programma P) la cui testa è unificabile con G_1 .
- Nel caso vi siano più clausole la cui testa è unificabile con G_1 , la risoluzione di G_1 viene considerata come un **punto di scelta** (*choice point*) nella dimostrazione.
- In caso di fallimento in un passo di dimostrazione, Prolog ritorna in backtracking all'ultimo punto di scelta in senso cronologico (il più recente), e seleziona la clausola successiva utilizzabile in quel punto per la dimostrazione.

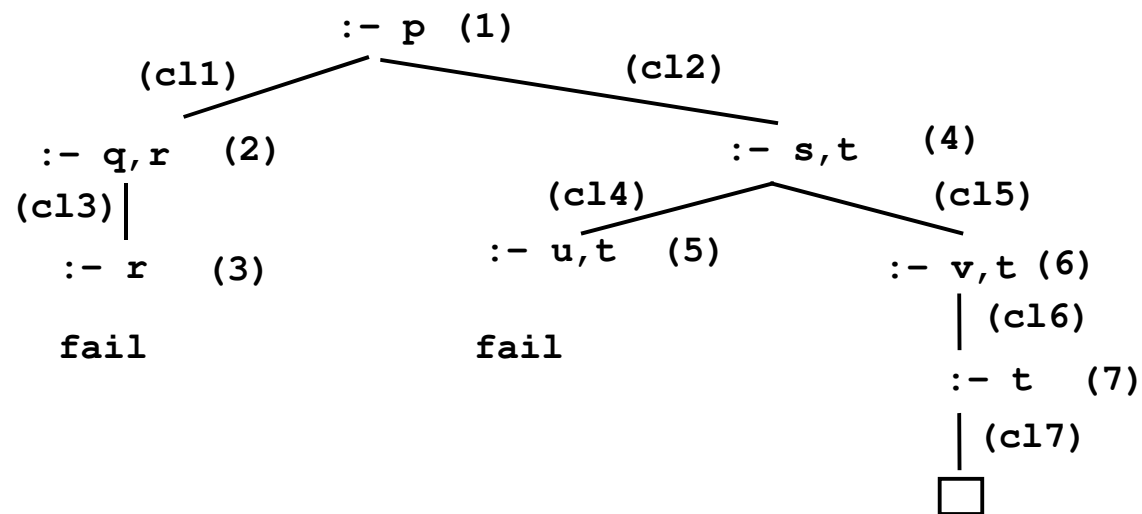
Ricerca in profondità con backtracking cronologico dell'albero di dimostrazione SLD.

RISOLUZIONE IN PROLOG: ESEMPIO

P_1

- (c11) p :- q, r.
- (c12) p :- s, t
- (c13) q.
- (c14) s :- u.
- (c15) s :- v.
- (c16) t.
- (c17) v.

:- p.

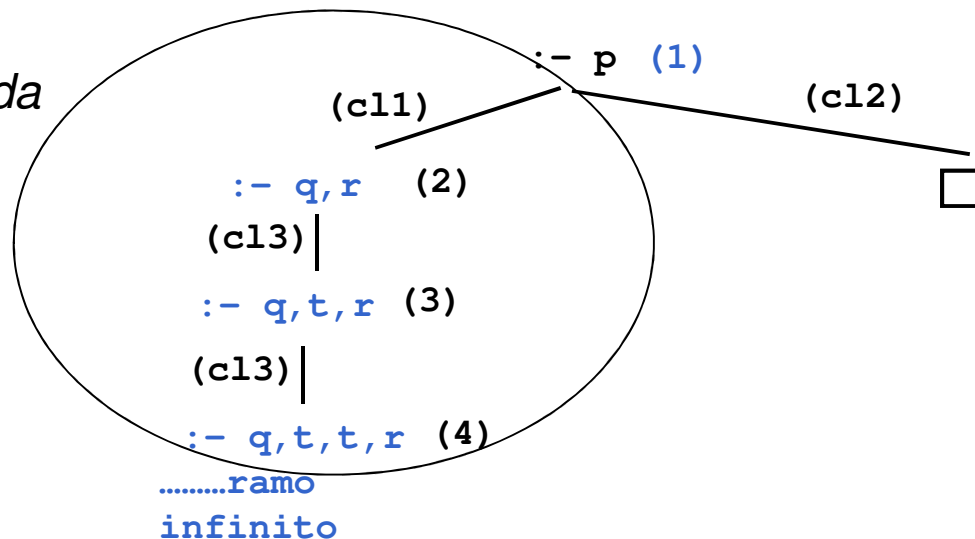


RISOLUZIONE IN PROLOG: INCOMPLETEZZA

- Un problema della strategia in profondità utilizzata da Prolog e' la sua incompletezza.

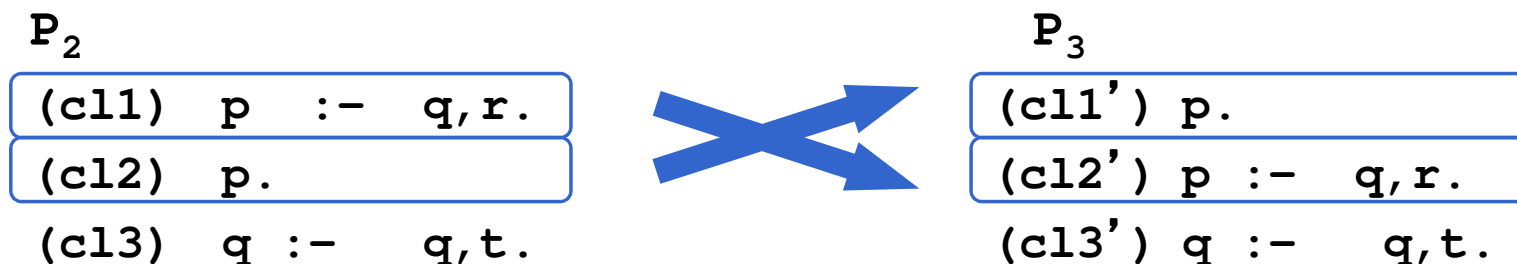
```
P2      (c11) p :- q, r.  
         (c12) p.  
         (c13) q :- q, t.  
         :- p.
```

*Cammino
esplorato da
Prolog*



ORDINE DELLE CLAUSOLE

- L'ordine delle clausole in un programma Prolog è rilevante.



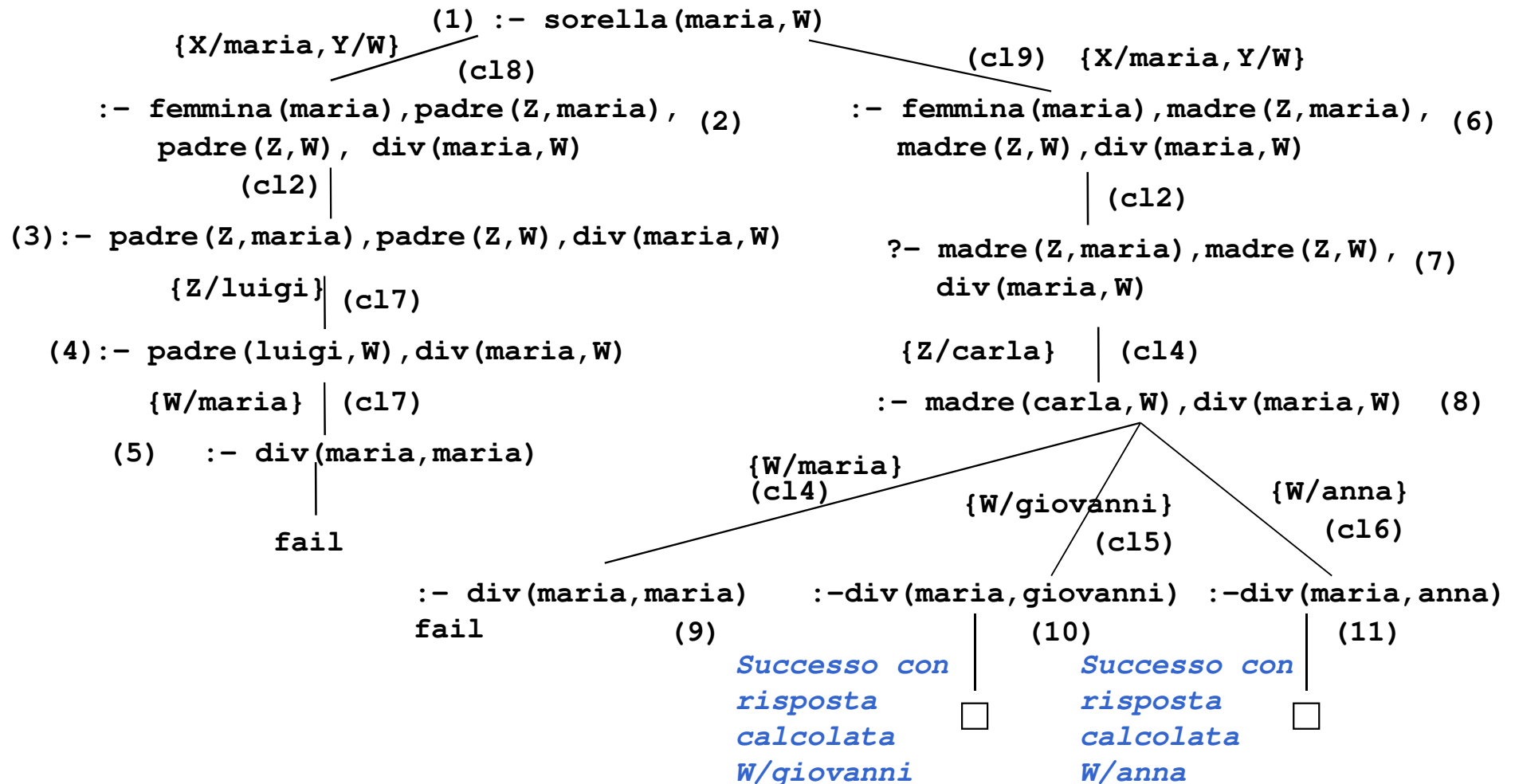
- I due programmi P_2 e P_3 non sono due programmi Prolog equivalenti. Infatti, data la "query": $:-p.$ si ha che
 - la dimostrazione con il programma P_2 non termina;
 - la dimostrazione con il programma P_3 ha immediatamente successo.
- Una strategia di ricerca in profondità può essere realizzata in modo efficiente utilizzando tecniche non troppo differenti da quelle utilizzate nella realizzazione dei linguaggi imperativi tradizionali.

ORDINE DELLE CLAUSOLE: ESEMPIO

```
P4 (c11) femmina(carla) .
      (c12) femmina(maria) .
      (c13) femmina(anna) .
      (c14) madre(carla,maria) .
      (c15) madre(carla,giovanni) .
      (c16) madre(carla,anna) .
      (c17) padre(luigi,maria) .
      (c18) sorella(X,Y) :- femmina(X) ,
                           padre(Z,X) ,
                           padre(Z,Y) ,
                           div(X,Y) .
      (c19) sorella(X,Y) :- femmina(X) ,
                           madre(Z,X) ,
                           madre(Z,Y) ,
                           div(X,Y) .
      (c110) div(carla,maria) .
      (c111) div(maria,carla) .
..... div(A,B) . per tutte le coppie (A,B) con A≠B
```

E la “query”:
:- sorella(maria,W) .

ORDINE DELLE CLAUSOLE: ESEMPIO



SOLUZIONI MULTIPLE E DISGIUNZIONE

- Possono esistere più sostituzioni di risposta per una “query”.
 - Per richiedere ulteriori soluzioni è sufficiente forzare un fallimento nel punto in cui si è determinata la soluzione che innesca il backtracking.
 - Tale meccanismo porta ad espandere ulteriormente l’albero di dimostrazione SLD alla ricerca del prossimo cammino di successo.
- In Prolog standard tali soluzioni possono essere richieste mediante l'operatore “;”.

```
:- sorella(maria,W) .  
yes      W=giovanni;  
         W=anna;  
no
```
- Il carattere “;” può essere interpretato come
 - un operatore di disgiunzione che separa soluzioni alternative.
 - all'interno di un programma Prolog per esprimere la disgiunzione.

INTERPRETAZIONE PROCEDURALE

- Prolog può avere un'interpretazione procedurale. Una *procedura* è un insieme di clausole di P le cui teste hanno lo stesso simbolo predicativo e lo stesso numero di argomenti (arità).
 - Gli argomenti che compaiono nella testa della procedura possono essere visti come i *parametri formali*.

Una “query” del tipo: $:- p(t_1, t_2, \dots, t_n) .$

è la *chiamata* della procedura p . Gli argomenti di p (ossia i termini t_1, t_2, \dots, t_n) sono i *parametri attuali*.
 - L'unificazione è il meccanismo di *passaggio dei parametri*.
- Non vi è alcuna distinzione a priori tra i parametri di ingresso e i parametri di uscita (*reversibilità*).

INTERPRETAZIONE PROCEDURALE (2)

- Il corpo di una clausola può a sua volta essere visto come una sequenza di chiamate di procedure.
- Due clausole con le stesse teste corrispondono a due definizioni alternative del corpo di una procedura.
- Tutte le variabili sono a *singolo assegnamento*. Il loro valore è unico durante tutta la computazione e slegato solo quando si cerca una soluzione alternativa (“backtracking”).

ESEMPIO

```
pratica_sport (mario, calcio) .
pratica_sport (giovanni, calcio) .
pratica_sport (alberto, calcio) .
pratica_sport (marco, basket) .
abita (mario, torino) .
abita (giovanni, genova) .
abita (alberto, genova) .
abita (marco, torino) .

:- pratica_sport (X, calcio) .
    "esiste X tale per cui X pratica il calcio?"
yes    X=mario;
        X=giovanni;
        X=alberto;
no

:- pratica_sport (giovanni, Y) .
    "esiste uno sport Y praticato da giovanni?"
yes    Y=calcio;
no
```

ESEMPIO (2)

```
:- pratica_sport(X,Y) .
   "esistono X e Y tali per cui X pratica lo sport Y"
yes      X=mario          Y=calcio;
         X=giovanni       Y=calcio;
         X=alberto        Y=calcio;
         X=marco          Y=basket;
no

:- pratica_sport(X,calcio) , abita(X,genova) .
   "esiste una persona X che pratica il calcio e abita a Genova?"
yes      X=giovanni;
         X=alberto;
no
```

ESEMPIO (3)

- A partire da tali relazioni, si potrebbe definire una relazione `amico(X, Y)` “ x è amico di y ” a partire dalla seguente specifica: “ x è amico di y se x e y praticano lo stesso sport e abitano nella stessa città”.

```
amico(X, Y) :- abita(X, Z)
               abita(Y, Z),
               pratica_sport(X, S),
               pratica_sport(Y, S).
```

```
:- amico(giovanni, Y).
```

“esiste Y tale per cui Giovanni è amico di Y ?”

```
yes      Y = giovanni;
```

```
         Y=alberto;
```

```
no
```

- si noti che secondo tale relazione ogni persona è amica di se stessa.

ESEMPIO (4)

```
padre(X, Y)      "X è il padre di Y"  
madre(X, Y)     "X è la madre di Y"  
zia(X, Y)       "X è la zia di Y"  
zia(X, Y)       :-sorella(X, Z) , padre(Z, Y) .  
zia(X, Y)       :-sorella(X, Z) , madre(Z, Y) .
```

(la relazione "sorella" è stata definita in precedenza).

- Definizione della relazione "antenato" in modo ricorsivo:

"X è un antenato di Y se X è il padre (madre) di Y"

"X è un antenato di Y se X è un antenato del padre (o della madre) di Y"

```
antenato(X, Y)      "X è un antenato di Y"  
antenato(X, Y)     :- padre(X, Y) .  
antenato(X, Y)     :- madre(X, Y) .  
antenato(X, Y)     :- padre(Z, Y) , antenato(X, Z) .  
antenato(X, Y)     :- madre(Z, Y) , antenato(X, Z) .
```


VERSO UN VERO LINGUAGGIO DI PROGRAMMAZIONE

- Al Prolog puro devono, tuttavia, essere aggiunte alcune caratteristiche per poter ottenere un linguaggio di programmazione utilizzabile nella pratica.
- In particolare:
 - Strutture dati e operazioni per la loro manipolazione.
 - Meccanismi per la definizione e valutazione di espressioni e funzioni.
 - Meccanismi di input/output.
 - Meccanismi di controllo della ricorsione e del backtracking.
 - Negazione
- Tali caratteristiche sono state aggiunte al Prolog puro attraverso la definizione di alcuni predicati speciali (*predicati built-in*) predefiniti nel linguaggio e trattati in modo speciale dall'interprete.