

Come descrivere un Linguaggio di Programmazione

Sommario: 7-13 marzo, 2018

- Sintassi, Semantica, Pragmatica e Implementazione
- Grammatiche e Sintassi
- Grammatiche Context Free: Derivazione, Alberi, Ambiguità
- Sintassi: Proprietà contestuali
- Compilatore: Le fasi di analisi sintattica, semantica e di generazione del codice
- Esercizi Parte1: Front-End
- Semantica: Formalismi
- Semantica operativa strutturata: Stato, Transizione, Computazione.
- Esercizi Parte2: Semantica

- Un programma si presenta come una "lunga" sequenza di caratteri che rappresentano simboli e strutture del linguaggio con cui il programma è espresso.

```
#include<stdio.h> #include<stdlib.h> voidXSwap(intA[], intB[]){A[0] = ...
```

- **Lessico.** La definizione di come e quali sequenze di caratteri formano simboli (inclusi i separatori di simboli) affidata al Lessico.
- **Sintassi.** La definizione di come e quali sequenze di simboli formano costrutti e la struttura del programma affidata alla Sintassi.

- **Grammatiche.** Lessico e Sintassi possono essere completamente definite mediante grammatiche:
 - Lineari, per il lessico, $\mathcal{G}^{\mathcal{R}}$.
 - Libere da contesto (Context Free), per la sintassi, $\mathcal{G}^{\mathcal{F}}$.
 - $\mathcal{G}^{\mathcal{R}} \subset \mathcal{G}^{\mathcal{F}}$.
- Sia A insieme finito di simboli (caratteri):
 - A^* insieme di tutte le sequenze finite di simboli su A .
 - A^* è chiuso rispetto all'operatore binario, associativo, \dots , chiamato *giustapposizione*¹: esempio $\text{Pi.sa} = \text{Pisa}$.
 - $\epsilon \in A^*$ seq. vuota: $\epsilon.q = q = q.\epsilon, \forall q \in A^*$

Definition (Linguaggio (formale) su A)

Un linguaggio (formale) su A è un sottoinsieme di A^*

¹ la sua notazione è omessa quando non vi è ambiguità

Definition (Grammatica Libera)

Una grammatica libera è una quadrupla (NT, T, R, S) tale che:

- **NT** insieme finito dei non terminali.
- **T** insieme finito dei terminali.
- **S** simbolo iniziale, $S \in NT$.
- **R** insieme finito delle produzioni,

$$R \equiv \{V_i \rightarrow w_i \mid V_i \in NT, w_i \in (T \cup NT)^*, i \in [1, k]\}$$

Esempio

$$G = (\{E\}, \{I, +, *, (,)\}, E, R)$$
$$R = \{E \rightarrow E + E, E \rightarrow E * E, E \rightarrow I, E \rightarrow (E)\}$$

Notazione. $V \rightarrow \alpha_1 | \dots | \alpha_k$ invece di $V_1 \rightarrow \alpha_1, \dots, V_k \rightarrow \alpha_k$ quando, $V = V_1 = \dots = V_k$.

Esempio

$$R = \{E \rightarrow E + E \mid E * E \mid I \mid (E)\}$$

Esempio

$$G = (\{E\}, \{I, +, *, (,)\}, E, R)$$

$$R = \{E \rightarrow E + E, E \rightarrow E * E, E \rightarrow I, E \rightarrow (E)\}$$

Qual'è il significato di G ? ²

Definition (La relazione \Rightarrow)

Ogni grammatica libera $G \equiv (NT, T, R, S)$ definisce una relazione binaria \Rightarrow_G (o, semplicemente \Rightarrow) su $(T \cup NT)^*$ tale che:

$$\forall \alpha.V.\rho, \alpha.\gamma.\rho \in (T \cup NT)^*, \quad \alpha V \rho \Rightarrow \alpha \gamma \rho \text{ sse } V \rightarrow \gamma \in R$$

Definition (Linguaggio generato)

Sia $G \equiv (NT, T, R, S)$ libera. Il linguaggio definito da G :

$$\mathcal{L}(G) = \{\alpha \in T^* \mid S \Rightarrow^* \alpha\}$$

dove, \Rightarrow^* è la chiusura transitiva (e riflessiva) di \Rightarrow_G

² "sse" sta per "se e solo se"

Definition (Derivazione)

Sia $G \equiv (NT, T, R, S)$ libera. Siano $v, w \in (T \cup NT)^*$. Sia $v \Rightarrow^* w$. Una derivazione, in G , da v a w , è una sequenza $v \Rightarrow w_0 \Rightarrow w_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow w$

Esempio

La derivazione ci fornisce una prova di appartenenza. Si dimostri che $I * I + I \in \mathcal{L}(G)$.

$$G = (\{E\}, \{I, +, *\}, E, R)$$

$$R = \{E \rightarrow E + E, E \rightarrow E * E, E \rightarrow I, E \rightarrow (E)\}$$

Procediamo applicando una \Rightarrow alla volta a partire da E

$$E \Rightarrow_2 E * E^3$$

$$\Rightarrow_3 I * E$$

$$\Rightarrow_1 I * E + E$$

$$\Rightarrow_3 I * I + E$$

$$\Rightarrow_3 I * I + I$$

Aggiungendo induzione possiamo dimostrare che:

$$\{I.\alpha_1.\dots.\alpha_n \mid \alpha_i \in \{+I, *I\}, n \geq 0\} \subset \mathcal{L}(G).$$

³Un pedice può indicare la produzione usata. In questo caso, usiamo la posizione a partire da 1 per la produzione più a sinistra

Esempio

$$G = (\{E\}, \{I, +, *, (,)\}, E, R)$$

$$R = \{E \rightarrow E + E, E \rightarrow E * E, E \rightarrow I, E \rightarrow (E)\}$$

- La \Rightarrow su sequenze di simboli (stringhe) grammaticali ci dice proprio tutto?

$$E \Rightarrow_2 E * E \Rightarrow_3 I * E \Rightarrow_1 I * E + E \Rightarrow_3 I * I + E \Rightarrow_3 I * I + I$$

$$E \Rightarrow_2 E * E \Rightarrow_1 E * E + E \Rightarrow_3 I * E + E \Rightarrow_3 I * I + E \Rightarrow_3 I * I + I$$

$$E \Rightarrow_1 E + E \Rightarrow_2 E * E + E \Rightarrow_3 I * E + E \Rightarrow_3 I * I + E \Rightarrow_3 I * I + I$$

- In realtà NO.
 - 2 delle 3 derivazioni sopra ci dicono la stessa cosa, 1 dice una cosa differente.
 - Quali? In cosa, sono diverse?
 - Useremo la struttura degli alberi per rispondere.
- La sequenza di simboli grammaticali non è abbastanza espressiva

Definition

- $[] \in \text{Tree}^A$
- $[a - (t_1, \dots, t_n)] \in \text{Tree}^A$, per $a \in A, t_i \in \text{Tree}^A, n \geq 0$

Notazione. $[a - ()]$ può essere scritto $[a]$.

- Gli alberi possono essere utilizzati come relazioni sulla struttura di un termine
 - Ogni arco è una coppia della relazione *sottotermine*
- Hanno una rappresentazione grafica.
 - mostriamo quella di $[E - ([E],[+],[E])]$

Definition (La relazione $\Rightarrow^{\text{Tree}}$)

Ogni grammatica libera $G \equiv (NT, T, R, S)$ definisce una relazione binaria $\Rightarrow_G^{\text{Tree}}$ (o, semplicemente $\Rightarrow^{\text{Tree}}$, ovvero \Rightarrow) su $\text{Tree}^{\text{TUNT}}$ tale che:

- $[V] \Rightarrow [V - ([u_1], \dots, [u_n])]$
sse $V \rightarrow u_1 \dots u_n \in R$ and $u_i \in (T \cup NT)$
- $[V - (t_1, \dots, t_j, \dots, t_n)] \Rightarrow [V - (t_1, \dots, r_j, \dots, t_n)]$
sse $1 \leq j \leq n \wedge (\forall i) t_i \in \text{Tree}^{\text{TUNT}} \wedge t_j \Rightarrow r_j$

Definition (Linguaggio generato su $\text{Tree}^{\text{TUNT}}$ - Parse Tree set)

Sia $G \equiv (NT, T, R, S)$ libera. L'insieme dei parse tree di G :

$$\mathcal{PT}(G) = \{\alpha \in \text{Tree}^{\text{TUNT}} \mid [S] \Rightarrow^* \alpha\}$$

dove, \Rightarrow^* è la chiusura transitiva (e riflessiva) di \Rightarrow

Definition (Derivazione su $\text{Tree}^{\text{TUNT}}$)

Sia $G \equiv (\text{NT}, \text{T}, \text{R}, \text{S})$ libera. Siano $u, q \in \text{Tree}^{\text{TUNT}}$. Sia $u \Rightarrow^* q$.
Una derivazione, in G , da u a q , è una sequenza
 $u \Rightarrow q_0 \Rightarrow q_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow q$

Esempio

$$G = (\{E\}, \{I, +, *, (,)\}, E, R)$$
$$R = \{E \rightarrow E + E, E \rightarrow E * E, E \rightarrow I, E \rightarrow (E)\}$$

- La \Rightarrow su stringhe ci dice proprio tutto?

$$E \Rightarrow_2 E * E \Rightarrow_3 I * E \Rightarrow_1 I * E + E \Rightarrow_3 I * I + E \Rightarrow_3 I * I + I$$
$$E \Rightarrow_2 E * E \Rightarrow_1 E * E + E \Rightarrow_3 I * E + E \Rightarrow_3 I * I + E \Rightarrow_3 I * I + I$$
$$E \Rightarrow_1 E + E \Rightarrow_2 E * E + E \Rightarrow_3 I * E + E \Rightarrow_3 I * I + E \Rightarrow_3 I * I + I$$

- La \Rightarrow su alberi?

$$[E] \Rightarrow_2 [E - ([E], [*], [E])] \Rightarrow_3 [E - ([E - ([I]), [*], [E])]$$
$$\Rightarrow^* [E - ([E - ([I]), [*], [E - ([E - ([I]), [+], [E - ([I])])])])]$$

$$[E] \Rightarrow^* \dots$$

$$[E] \Rightarrow_1 [E - ([E], [+], [E])] \Rightarrow_2 [E - ([E - ([E], [*], [E]), [+], [E])]$$
$$\Rightarrow^* [E - ([E - ([E - ([I]), [*], [E - ([I])]), [+], [E - ([I])])])]$$

La relazione \Rightarrow su alberi: Una vista grafica

Esempio

- La \Rightarrow su alberi?

$$\begin{aligned} [E] &\Rightarrow_2 [E - ([E], [*], [E])] \Rightarrow_3 [E - ([E - ([I])], [*], [E])] \\ &\Rightarrow^* [E - ([E - ([I])], [*], [E - ([E - ([I])], [+], [E - ([I])]])] \end{aligned}$$

$[E] \Rightarrow^* \dots$

$$\begin{aligned} [E] &\Rightarrow_1 [E - ([E], [+], [E])] \Rightarrow_2 [E - ([E - ([E], [*], [E]), [+], [E])] \\ &\Rightarrow^* [E - ([E - ([E - ([I])], [*], [E - ([I])]), [+], [E - ([I])])] \end{aligned}$$

Definition (Frontiera di un albero)

La frontiera di un albero $q \in \text{Tree}^A$ è una stringa di A^* , ovvero $\text{fron}(q) \in A^*$ per ogni q , così definita:

- $\text{fron}([\])=\epsilon$
- $\text{fron}([a])=a$
- $\text{fron}([a - (t_1, \dots, t_n)]) = \text{fron}(t_1) \dots \text{fron}(t_n), \quad n > 0$

Esempio

$$\begin{aligned} \text{fron}([E - ([E - ([I]), [*], [E - ([E - ([I]), [+], [E - ([I])])])])]) &= \\ &= \text{fron}([E - ([I])]).\text{fron}([*]).\text{fron}([E - ([E - ([I]), [+], [E - ([I])])]) \\ &= \text{fron}([I]).\text{fron}([*]).\text{fron}([E - ([I])]).\text{fron}([+]).\text{fron}([E - ([I])]) \\ &= \text{fron}([I]).\text{fron}([*]).\text{fron}([I]).\text{fron}([+]).\text{fron}([I]) \\ &= I \cdot * \cdot I \cdot + \cdot I = I * I + I \end{aligned}$$

Definition (Linguaggio generato utilizzando Parse Tree)

Sia $G \equiv (NT, T, R, S)$ libera. Il linguaggio definito da G :

$$\mathcal{L}(G) = \{\text{fron}(q) \in T^* \mid [S] \Rightarrow^* q\}$$

dove, \Rightarrow^* è la chiusura transitiva (e riflessiva) di $\Rightarrow_G^{\text{Tree}^{\text{TUNT}}}$

Definition (Grammatica Ambigua)

$G \equiv (NT, T, R, S)$ è ambigua se $\exists q_1 \neq q_2 \in \text{Tree}^{\text{TUNT}}$:

- $[S] \Rightarrow^* q_1, [S] \Rightarrow^* q_2$
- $\text{fron}([q_1]) = \text{fron}([q_2]) \in T^*$

- La **sintassi di un LP** deve essere espressa mediante una grammatica libera **non ambigua**
- Ogni **termine** di LP deve avere **un'unica struttura sintattica** che ne mostra i sottotermini componenti

Esempio Grammatica Ambigua

$$G = (\{E\}, \{I, +, *\}, E, R)$$

$$R = \{E \rightarrow E + E, E \rightarrow E * E, E \rightarrow I, E \rightarrow (E)\}$$

Esempio Grammatica non Ambigua

$$G' = (\{E, F, T\}, \{I, +, *\}, E, R')$$

$$R' = \{E \rightarrow E + F \mid F$$

$$F \rightarrow F * T \mid T$$

$$T \rightarrow I \mid (E)\}$$

$$\mathcal{L}(G) = \mathcal{L}(G')$$

- Lessico e Sintassi si integrano nella definizione di un Linguaggio

Esempio sottoLinguaggio delle Espressioni Aritmetiche

Sintassi: Espressione

$$G = (\{E, F, T\}, \{N, +, -, *\}, E, R_G)$$

$$R_G = \{E \rightarrow E + F \mid F$$

$$F \rightarrow F * T \mid T$$

$$T \rightarrow -T \mid N \mid (E)\}$$

Lessico: Naturale (Identificatore)

$$H = (\{L, N, D\}, \{-, +, *, 0, \dots, 9\}, L, R_H)$$

$$R_H = \{L \rightarrow N \mid * \mid - \mid +$$

$$N \rightarrow D N \mid D$$

$$D \rightarrow 0 \mid 1 \mid \dots \mid 9\}$$

Riconosciamo la stringa, $13*-5+007 \in \mathcal{L}(\langle G, H \rangle)$.

Compiler/Interprete: Front-End e Back-End

Front-End
(Compilatore
Interprete)

SYMBOL TABLE	
1	position . . .
2	initial . . .
3	rate . . .
4	

Back-End
Compilatore

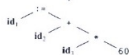
Aho, A.V. et al., Compilers: Principles,
Techniques, & Tools, 2 ed., Addison-Wesley,
2007, pag. 7, Fig. 1.7

position := initial + rate * 60

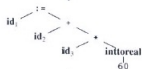
lexical analyzer

$id_1 := id_2 + id_3 * 60$

syntax analyzer



semantic analyzer



intermediate code generator

```
temp1 := intoreal(60)
temp2 := id3 * temp1
temp3 := id2 + temp2
id1 := temp3
```

code optimizer

```
temp1 := id3 * 60.0
id1 := id2 + temp1
```

code generator

```
MOVF id3, R2
MULF #60.0, R2
MOVF id2, R1
ADDF R2, R1
MOVF R1, id1
```


- **Programmi (sintatticamente) Legali** sono i programmi sintatticamente corretti a cui la semantica del linguaggio può associare la funzione calcolabile descritta dal programma.
- La sintassi espressa da una grammatica non ambigua non è sufficiente a identificare tutti e soli i programmi legali.
- Ad esempio: $x = 7$ è un assegnamento
 - sintatticamente corretto in tutti i programmi C⁴
 - ma non è legale se x non è stato *dichiarato*⁵

⁴e di tutti i L.P. dove x , $_=_$, 7 siano la sintassi per una variabile, per l'operatore di assegnamento, per un'espressione

⁵opportunamente, nel programma

- **Proprietà contestuali** (delle regole di composizione) non possono essere espresse da una grammatica libera (da contesto, i.e. Context-Free):
 - identificatori usati devono essere dichiarati prima ...;
 - numero di parametri attuali e formali devono coincidere
 - compatibilità nell'assegnamento, tra il tipo di una variabile e il tipo dell'espressione assegnata
 - ...
- Queste proprietà contestuali **fanno parte della definizione del linguaggio**, ma devono essere espresse con strumenti adatti.
- **Analisi Statica** Sono procedimenti di analisi e formalismi specifici (ad es., Sistema dei Tipi) per controllare che il programma soddisfi tutte le proprietà contestuali del linguaggio.

- **Programmi (sintatticamente) Legali.** Compilatori e Interpreti trattano tutti questi aspetti nel front-end.
- Il **Front-End** di C./I.⁶ provvede alla:
 - **Analisi Lessicale** in accordo al lessico
 - **Analisi Sintattica** in accordo alla sintassi
 - **Analisi Statica** in accordo alle proprietà contestuali
 - **Costruzione Abstract Tree** $AT(p)$ che fornisce una rappresentazione interna del programma sorgente p .
- $AT(p)$ è successivamente utilizzato dal **Back-End** di C./I. per completare la realizzazione dell'esecutore.
- Vediamo tutto questo nella tipica struttura (in fasi) di un Compilatore.

⁶Compilatori e Interpreti

Compiler/Interprete: Front-End e Back-End

Front-End
(Compilatore
Interprete)

SYMBOL TABLE	
1	position . . .
2	initial . . .
3	rate . . .
4	

Back-End
Compilatore

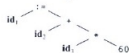
Aho, A.V. et al., Compilers: Principles,
Techniques, & Tools, 2 ed., Addison-Wesley,
2007, pag. 7, Fig. 1.7

position := initial + rate * 60

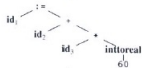
lexical analyzer

$id_1 := id_2 + id_3 * 60$

syntax analyzer



semantic analyzer



intermediate code generator

```
temp1 := intoreal(60)
temp2 := id3 * temp1
temp3 := id2 + temp2
id1 := temp3
```

code optimizer

```
temp1 := id3 * 60.0
id1 := id2 + temp1
```

code generator

```
MOVf id3, R2
MULF #60.0, R2
MOVf id2, R1
ADDF R2, R1
MOVf R1, id1
```

Sintassi Concreta e Sintassi Astratta

Definition (Sintassi Concreta)

Insieme delle sequenze di simboli, dato un lessico, che formano i costrutti ed i programmi esprimibili in un Linguaggio di Programmazione.

Definition (Sintassi Astratta)

Insieme degli alberi etichettati che rappresentano i costrutti ed i programmi esprimibili in un Linguaggio di Programmazione. La rappresentazione deve mostrare la relazione tra il termine e i sotto-termini che lo compongono..

Esempio sottoLinguaggio delle Espressioni Aritmetiche (omettiamo il lessico per N)

Sintassi Astratta: Una grammatica (su Tree) per Sintassi Astratta delle Espressioni

$$G^A = (\{E\}, \{N, +, -, *\}, E, R_{G^A})$$

$$R_{G^A} = \{E \rightarrow E + E \mid E * E \mid - E \mid N\}$$

Sintassi Concreta: Una grammatica non ambigua per S. Concreta delle Espressione

$$G = (\{E, F, T\}, \{N, +, -, *\}, E, R_G)$$

$$R_G = \{E \rightarrow E + F \mid F$$

$$F \rightarrow F * T \mid T$$

$$T \rightarrow -T \mid N \mid (E)\}$$

costruiamo l'albero
astratto della stringa

Riconosciamo la stringa, $13*-5+007 \in \mathcal{L}(\langle G, H \rangle)$.

- Una grammatica G calcola un linguaggio. Si dica:
 - Quali sono gli oggetti di tale linguaggio;
 - Di quale insieme è sotto-insieme tale linguaggio
 - Quale relazione (fornire definizione) permette di definire tale linguaggio?
 - Si fornisca la definizione di tale linguaggio
- Sia $G \equiv \{\{T\}, \{A, E\}, T, \{T \rightarrow A, T \rightarrow A, T \rightarrow A E T\}\}$. Si applichino a G le formulazioni date nei punti (a)-(e) di esercizio L4.1.
- Si formalizzi la relazione tra \Rightarrow_G e $\Rightarrow_G^{\text{Tree}}$
 - Quando usare l'una e quando l'altra?
- Si completi la definizione di una grammatica le cui produzioni sono sotto.
 - Si mostri che la grammatica ottenuta è ambigua.
$$\begin{aligned} E &\rightarrow T \mid T + E \mid T - E \\ T &\rightarrow A \mid A * E \end{aligned}$$
- Si dia una grammatica non ambigua che generi tutte e sole le sequenze di parentesi angolate bilanciate
- Si chiama regolare una grammatica...
Si mostri che il linguaggio $L \equiv \{a^n b^m \mid n, m \geq 1\}$ è regolare.
- Si dia una grammatica non ambigua per che il linguaggio $L \equiv \{a^n b^m \mid n \leq m\}$.
- A cosa serve la sintassi concreta di un L . di Programmazione?
 - Cosa la distingue dalla sintassi astratta.

Altri esercizi in:

* Esercizi4Lezione4Parte1

* Cap. 2 [GM]

- Associare significato ai termini del linguaggio.
- Vari formalismi con differenti accezioni di significato e differenti usi.
- Due da ricordare:
 - **Semantica Denotazionale**
 - *Significato*: Funzione Calcolata
 - *Usi*: Molteplici incluso definizione di C. e di I.
 - *Laboratorio*: Interpreti di \mathcal{L} , derivabili dalla S. Den. di \mathcal{L} , riscritta in un Linguaggio di P. Funzionale, OCaml
 - *Caratteristica*: Orientata allo studio di proprietà di \mathcal{L} , Astratta dall'implementazione di \mathcal{L} .
 - **Semantica Operazionale**

- Associare significato ai termini del linguaggio.
- Vari formalismi con differenti accezioni di significato e differenti usi.
- Due da ricordare:
 - **Semantica Denotazionale**
 - **Semantica Operazionale**
 - *Significato*: Computazione (su Macchina)
 - *Usi*: Definizione di I., anche didattici e per studio di programmi e programmazione in \mathcal{L}
 - *Caratteristica*: Basata sulla nozione di Stato, transizione di stato, computazione
- Useremo una Semantica Operazionale *Strutturata* in cui la Macchina è una Macchina Astratta.

- La definizione di Stato, Transizione di stato e Computazione di una S.O.S, dipende dal Linguaggio.
- Vediamole per il Linguaggio sotto.
- Assumiamo che sintassi (concreta) e lessico siano già stati trattati, analizzati, fornendoci la sintassi astratta dei termini del linguaggio: "(AExp-AExp)" va letto come un albero con radice "-" e due alberi "AExp" come figli (i simboli "(" , ")" rimarcano questa lettura).

$$Num ::= 1 \mid 2 \mid 3 \mid \dots$$
$$Var ::= X_1 \mid X_2 \mid X_3 \mid \dots$$
$$AExp ::= Num \mid Var \mid (AExp + AExp) \mid (AExp - AExp)$$
$$BExp ::= \mathbf{tt} \mid \mathbf{ff} \mid (AExp == AExp) \mid \neg BExp \mid (BExp \wedge BExp)$$
$$Com ::= \mathbf{skip} \mid Var := AExp \mid Com; Com \mid$$
$$\mathbf{if} BExp \mathbf{then} Com \mathbf{else} Com \mid \mathbf{while} BExp \mathbf{do} Com$$

$$Num ::= 1 \mid 2 \mid 3 \mid \dots$$
$$Var ::= X_1 \mid X_2 \mid X_3 \mid \dots$$
$$AExp ::= Num \mid Var \mid (AExp + AExp) \mid (AExp - AExp)$$
$$BExp ::= \mathbf{tt} \mid \mathbf{ff} \mid (AExp == AExp) \mid \neg BExp \mid (BExp \wedge BExp)$$
$$Com ::= \mathbf{skip} \mid Var := AExp \mid Com; Com \mid$$
$$\mathbf{if} BExp \mathbf{then} Com \mathbf{else} Com \mid \mathbf{while} BExp \mathbf{do} Com$$

- La definizione di Stato.
 - Memoria simbolica per trattare le variabili (valori modificabili)
 - Non abbiamo I/O, file systems,... Lo stato è la sola memoria
 - Lo stato è rappresentato da sequenza finita di coppie (X_i, n_i) , indicante ...
 - Lo stato è denotato con le variabili σ, τ (anche con pedici)

$$Num ::= 1 \mid 2 \mid 3 \mid \dots$$
$$Var ::= X_1 \mid X_2 \mid X_3 \mid \dots$$
$$AExp ::= Num \mid Var \mid (AExp + AExp) \mid (AExp - AExp)$$
$$BExp ::= \mathbf{tt} \mid \mathbf{ff} \mid (AExp == AExp) \mid \neg BExp \mid (BExp \wedge BExp)$$
$$Com ::= \mathbf{skip} \mid Var := AExp \mid Com; Com \mid$$
$$\mathbf{if} BExp \mathbf{then} Com \mathbf{else} Com \mid \mathbf{while} BExp \mathbf{do} Com$$

- La definizione di Transizione.
 - Esecuzione di un costrutto c nello stato σ della Macchina Astratta
 - La esprimiamo con:
 - $\langle c, \sigma \rangle \rightarrow \tau$, indicante ...
 - $\langle c, \sigma \rangle \rightarrow \langle c', \sigma' \rangle$, indicante ...
 - $\langle c_1, \sigma_1 \rangle \rightarrow \langle c'_1, \sigma'_1 \rangle, \dots, \langle c_k, \sigma_k \rangle \rightarrow \langle c'_k, \sigma'_k \rangle / \langle c, \sigma \rangle \rightarrow \langle c', \sigma' \rangle$,
k-premesse/1-conclusione, indicante ...
 - La semantica di \mathcal{L} fornisce le transizioni che sono specifiche per \mathcal{L}

$$Num ::= 1 \mid 2 \mid 3 \mid \dots$$
$$Var ::= X_1 \mid X_2 \mid X_3 \mid \dots$$
$$AExp ::= Num \mid Var \mid (AExp + AExp) \mid (AExp - AExp)$$
$$BExp ::= \mathbf{tt} \mid \mathbf{ff} \mid (AExp == AExp) \mid \neg BExp \mid (BExp \wedge BExp)$$
$$Com ::= \mathbf{skip} \mid Var := AExp \mid Com; Com \mid$$
$$\mathbf{if} BExp \mathbf{then} Com \mathbf{else} Com \mid \mathbf{while} BExp \mathbf{do} Com$$

- La definizione di Computazione di $p \in \mathcal{L}$.
 - Sequenza degli stati attraversati effettivamente dalle transizioni usate nell'esecuzione del programma p .

SOS: Notazione usata

$$Num ::= 1 \mid 2 \mid 3 \mid \dots$$
$$Var ::= X_1 \mid X_2 \mid X_3 \mid \dots$$
$$AExp ::= Num \mid Var \mid (AExp + AExp) \mid (AExp - AExp)$$
$$BExp ::= \mathbf{tt} \mid \mathbf{ff} \mid (AExp == AExp) \mid \neg BExp \mid (BExp \wedge BExp)$$
$$Com ::= \mathbf{skip} \mid Var := AExp \mid Com; Com \mid$$
$$\mathbf{if} BExp \mathbf{then} Com \mathbf{else} Com \mid \mathbf{while} BExp \mathbf{do} Com$$

- Notazione.

$(X_1, n_1), \dots, (X_k, n_k)$ stato con k variabili legate

σ, τ (anche con pedici) sono stati della macchina

$\sigma(X_i) = n_i$ quando $\sigma = (X_1, n_1), \dots, (X_i, n_i), \dots, (X_k, n_k)$,

$\sigma[X_i \leftarrow m_i] = (X_1, n_1), \dots, (X_i, m_i), \dots, (X_k, n_k)$

quando $\sigma = (X_1, n_1), \dots, (X_i, n_i), \dots, (X_k, n_k)$

$n, n_i \in Num$ valori numerici

$a, a_i \in AExp$ espressioni aritmetiche

$b, b_i \in BExp$ espressioni booleane

\mathbf{tt}, \mathbf{ff} i valori true e false

$c, c_i \in Com$ comandi del linguaggio

$$Num ::= 1 \mid 2 \mid 3 \mid \dots$$
$$Var ::= X_1 \mid X_2 \mid X_3 \mid \dots$$
$$AExp ::= Num \mid Var \mid (AExp + AExp) \mid (AExp - AExp)$$

Semantica delle Espressioni AExp.

$$\langle X, \sigma \rangle \rightarrow \langle \sigma(X), \sigma \rangle$$
$$\frac{\langle n + m, \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}{\text{where } p = n + m}$$
$$\frac{\langle n - m, \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}{\text{where } p = n - m \text{ e } n \geq m}$$
$$\frac{\langle a_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle (a_1 + a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' + a_2), \sigma \rangle} \quad \frac{\langle a_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle a'', \sigma \rangle}{\langle (a_1 + a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a_1 + a''), \sigma \rangle}$$
$$\frac{\langle a_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle (a_1 - a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' - a_2), \sigma \rangle} \quad \frac{\langle a_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle a'', \sigma \rangle}{\langle (a_1 - a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a_1 - a''), \sigma \rangle}$$

- L'ordine di valutazione degli argomenti delle operazioni è inessenziale
- Se lo volessimo da sinistra a destra: Come modificarla?

$$AExp = Var \mid Num \mid (AExp + AExp) \mid (AExp - AExp)$$

$\text{var: } \frac{X \in \text{Var}}{\langle X, \sigma \rangle \rightarrow \langle \sigma(X), \sigma \rangle}$	
$\text{primPlus: } \frac{n, m \in \text{Num} \quad p = n \oplus m}{\langle (n + m), \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}$	$\text{primMinus: } \frac{n, m \in \text{Num} \quad p = n \ominus m}{\langle (n - m), \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}$
$\text{plusL: } \frac{\langle a_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle (a_1 + a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' + a_2), \sigma \rangle}$	$\text{plusR: } \frac{\langle a_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle a'', \sigma \rangle}{\langle (a_1 + a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a_1 + a''), \sigma \rangle}$
$\text{minusL: } \frac{\langle a_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle (a_1 - a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' - a_2), \sigma \rangle}$	$\text{minusR: } \frac{\langle a_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle a'', \sigma \rangle}{\langle (a_1 - a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a_1 - a''), \sigma \rangle}$

Applichiamo le regole all'espressione $a \equiv ((x - y) + 7)$ nello stato $\sigma \equiv (x, 12), (y, 3)$

Step 1: PlusL

$$R(\text{PlusL}) \frac{\langle ((x - y) + 7), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' + 7), \sigma \rangle}{\langle (x - y), \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}$$

Step 1: PlusL

Step 2: MinusL

$$R(\text{plusL}) \frac{\langle ((x - y) + 7), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' + 7), \sigma \rangle}{R(\text{minusL}) \frac{\langle (x - y), \sigma \rangle \rightarrow \langle (x' - y), \sigma \rangle}{\langle x, \sigma \rangle \rightarrow \langle x', \sigma \rangle}}$$

- continua

$$AExp = Var \mid Num \mid (AExp + AExp) \mid (AExp - AExp)$$

$\text{var: } \frac{X \in \text{Var}}{\langle X, \sigma \rangle \rightarrow \langle \sigma(X), \sigma \rangle}$	
$\text{primPlus: } \frac{n, m \in \text{Num} \quad p = n \oplus m}{\langle (n + m), \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}$	$\text{primMinus: } \frac{n, m \in \text{Num} \quad p = n \ominus m}{\langle (n - m), \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}$
$\text{plusL: } \frac{\langle a_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle (a_1 + a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' + a_2), \sigma \rangle}$	$\text{plusR: } \frac{\langle a_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle a'', \sigma \rangle}{\langle (a_1 + a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a_1 + a''), \sigma \rangle}$
$\text{minusL: } \frac{\langle a_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle (a_1 - a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' - a_2), \sigma \rangle}$	$\text{minusR: } \frac{\langle a_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle a'', \sigma \rangle}{\langle (a_1 - a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a_1 - a''), \sigma \rangle}$

Step 1: PlusL

Step 2: MinusL

Step 3: Var

$$\begin{array}{c}
 R(\text{plusL}) \frac{\langle (x - y) + 7, \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' + 7), \sigma \rangle}{\langle (x - y), \sigma \rangle \rightarrow \langle (x' - y), \sigma \rangle} \\
 R(\text{minusL}) \frac{\langle (x - y), \sigma \rangle \rightarrow \langle (x' - y), \sigma \rangle}{\langle x, \sigma \rangle \rightarrow \langle x', \sigma \rangle} \\
 R(\text{Var}) \frac{\langle x, \sigma \rangle \rightarrow \langle x', \sigma \rangle}{x \in \text{Var}, x' = \sigma(x) = 12}
 \end{array}$$

Questo conduce alla seguente transizione:

$$\langle (x - y) + 7, \sigma \rangle \xrightarrow{(\text{plusL}, \text{minusL}, \text{Var})} \langle ((12 - y) + 7), \sigma \rangle$$

$$AExp = Var \mid Num \mid (AExp + AExp) \mid (AExp - AExp)$$

$\text{var: } \frac{X \in \text{Var}}{\langle X, \sigma \rangle \rightarrow \langle \sigma(X), \sigma \rangle}$	
$\text{primPlus: } \frac{n, m \in \text{Num} \quad p = n \oplus m}{\langle (n + m), \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}$	$\text{primMinus: } \frac{n, m \in \text{Num} \quad p = n \ominus m}{\langle (n - m), \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}$
$\text{plusL: } \frac{\langle a_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle (a_1 + a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' + a_2), \sigma \rangle}$	$\text{plusR: } \frac{\langle a_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle a'', \sigma \rangle}{\langle (a_1 + a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a_1 + a''), \sigma \rangle}$
$\text{minusL: } \frac{\langle a_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle (a_1 - a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' - a_2), \sigma \rangle}$	$\text{minusR: } \frac{\langle a_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle a'', \sigma \rangle}{\langle (a_1 - a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a_1 - a''), \sigma \rangle}$

Step 1: PlusL

Step 2: MinusR

Step 3: Var

$$\begin{array}{c}
 \text{R(plusL)} \frac{\langle ((12 - y) + 7), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' + 7), \sigma \rangle}{\langle (12 - y), \sigma \rangle \rightarrow \langle (12 - y'), \sigma \rangle} \\
 \text{R(minusR)} \frac{\langle (12 - y), \sigma \rangle \rightarrow \langle (12 - y'), \sigma \rangle}{\langle y, \sigma \rangle \rightarrow \langle y', \sigma \rangle} \\
 \text{R(Var)} \frac{\langle y, \sigma \rangle \rightarrow \langle y', \sigma \rangle}{y \in \text{Var}, y' = \sigma(y) = 3}
 \end{array}$$

Questo conduce alla seguente sequenza di transizioni:

$$\begin{array}{l}
 \langle ((x - y) + 7), \sigma \rangle \\
 (\text{plusL}, \text{minusL}, \text{Var}) \rightarrow \langle ((12 - y) + 7), \sigma \rangle \\
 (\text{minusR}, \text{Var}) \rightarrow \langle ((12 - 3) + 7), \sigma \rangle
 \end{array}$$

$$AExp = Var \mid Num \mid (AExp + AExp) \mid (AExp - AExp)$$

$\text{var: } \frac{X \in \text{Var}}{\langle X, \sigma \rangle \rightarrow \langle \sigma(X), \sigma \rangle}$	
$\text{primPlus: } \frac{n, m \in \text{Num} \quad p = n \oplus m}{\langle (n + m), \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}$	$\text{primMinus: } \frac{n, m \in \text{Num} \quad p = n \ominus m}{\langle (n - m), \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}$
$\text{plusL: } \frac{\langle a_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle (a_1 + a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' + a_2), \sigma \rangle}$	$\text{plusR: } \frac{\langle a_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle a'', \sigma \rangle}{\langle (a_1 + a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a_1 + a''), \sigma \rangle}$
$\text{minusL: } \frac{\langle a_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle (a_1 - a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' - a_2), \sigma \rangle}$	$\text{minusR: } \frac{\langle a_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle a'', \sigma \rangle}{\langle (a_1 - a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a_1 - a''), \sigma \rangle}$

Step 1: PlusL

Step 2: primMinus

$$R(\text{plusL}) \frac{\langle ((12 - 3) + 7), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' + 7), \sigma \rangle}{R(\text{primMinus}) \frac{\langle (12 - 3), \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}{12, 3 \in \text{Num}, p = 12 \ominus 3} \quad a' \equiv p}$$

Questo conduce alla seguente sequenza di transizioni:

$\langle (x - y) + 7, \sigma \rangle$

$(\text{plusL}, \text{minusL}, \text{Var}) \rightarrow \langle ((12 - y) + 7), \sigma \rangle$

$(\text{minusR}, \text{Var}) \rightarrow \langle ((12 - 3) + 7), \sigma \rangle$

$(\text{primMinus}) \rightarrow \langle (9 + 7), \sigma \rangle$

$$AExp = Var \mid Num \mid (AExp + AExp) \mid (AExp - AExp)$$

$\text{var: } \frac{X \in \text{Var}}{\langle X, \sigma \rangle \rightarrow \langle \sigma(X), \sigma \rangle}$	
$\text{primPlus: } \frac{n, m \in \text{Num} \quad p = n \oplus m}{\langle (n + m), \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}$	$\text{primMinus: } \frac{n, m \in \text{Num} \quad p = n \ominus m}{\langle (n - m), \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}$
$\text{plusL: } \frac{\langle a_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle (a_1 + a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' + a_2), \sigma \rangle}$	$\text{plusR: } \frac{\langle a_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle a'', \sigma \rangle}{\langle (a_1 + a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a_1 + a''), \sigma \rangle}$
$\text{minusL: } \frac{\langle a_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle (a_1 - a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a' - a_2), \sigma \rangle}$	$\text{minusR: } \frac{\langle a_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle a'', \sigma \rangle}{\langle (a_1 - a_2), \sigma \rangle \rightarrow \langle (a_1 - a''), \sigma \rangle}$

Step 1: primPlus

$$R(\text{primPlus}) \frac{\langle (9 + 7), \sigma \rangle \rightarrow \langle p, \sigma \rangle}{9, 7 \in \text{Num}, p = 9 \oplus 7}$$

Questo conduce alla seguente sequenza di transizioni:

$$\begin{aligned} & \langle ((x - y) + 7), \sigma \rangle \\ & (\text{plusL, minusL, Var}) \rightarrow \langle ((12 - y) + 7), \sigma \rangle \\ & (\text{minusR, Var}) \rightarrow \langle (((12 - 3) + 7), \sigma) \rangle \\ & (\text{primMinus}) \rightarrow \langle (9 + 7), \sigma \rangle \\ & (\text{primPlus}) \rightarrow \langle 16, \sigma \rangle \end{aligned}$$

$$\text{Com} ::= \text{skip} \mid \text{Var} := A\text{Exp} \mid \text{Com}; \text{Com} \mid$$
$$\text{if } B\text{Exp} \text{ then } \text{Com} \text{ else } \text{Com} \mid \text{while } B\text{Exp} \text{ do } \text{Com}$$

Semantica dei Comandi Com.

$$\langle \text{skip}, \sigma \rangle \rightarrow \sigma \quad (c1)$$

$$\langle X := n, \sigma \rangle \rightarrow \sigma[X \leftarrow n] \quad (c2) \quad \frac{\langle a, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle X := a, \sigma \rangle \rightarrow \langle X := a', \sigma \rangle} \quad (c3)$$

$$\frac{\langle c_1, \sigma \rangle \rightarrow \sigma'}{\langle c_1; c_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle c_2, \sigma' \rangle} \quad (c4) \quad \frac{\langle c_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle c'_1, \sigma' \rangle}{\langle c_1; c_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle c'_1; c_2, \sigma' \rangle} \quad (c5)$$

$$\langle \text{if tt then } c_1 \text{ else } c_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle c_1, \sigma \rangle \quad (c6)$$

$$\langle \text{if ff then } c_1 \text{ else } c_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle c_2, \sigma \rangle \quad (c7)$$

$$\frac{\langle b, \sigma \rangle \rightarrow \langle b', \sigma \rangle}{\langle \text{if } b \text{ then } c_1 \text{ else } c_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle \text{if } b' \text{ then } c_1 \text{ else } c_2, \sigma \rangle} \quad (c8)$$

$$\langle \text{while } b \text{ do } c, \sigma \rangle \rightarrow \langle \text{if } b \text{ then } c; \text{while } b \text{ do } c \text{ else skip}, \sigma \rangle \quad (c9)$$

SOS: Semantica dei Comandi

$$\langle \text{skip}, \sigma \rangle \rightarrow \sigma \quad (c1)$$

$$\langle X := n, \sigma \rangle \rightarrow \sigma[X \leftarrow n] \quad (c2) \quad \frac{\langle a, \sigma \rangle \rightarrow \langle a', \sigma \rangle}{\langle X := a, \sigma \rangle \rightarrow \langle X := a', \sigma \rangle} \quad (c3)$$

$$\frac{\langle c_1, \sigma \rangle \rightarrow \sigma'}{\langle c_1; c_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle c_2, \sigma' \rangle} \quad (c4) \quad \frac{\langle c_1, \sigma \rangle \rightarrow \langle c'_1, \sigma' \rangle}{\langle c_1; c_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle c'_1; c_2, \sigma' \rangle} \quad (c5)$$

$$\langle \text{if tt then } c_1 \text{ else } c_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle c_1, \sigma \rangle \quad (c6)$$

$$\langle \text{if ff then } c_1 \text{ else } c_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle c_2, \sigma \rangle \quad (c7)$$

$$\frac{\langle b, \sigma \rangle \rightarrow \langle b', \sigma \rangle}{\langle \text{if } b \text{ then } c_1 \text{ else } c_2, \sigma \rangle \rightarrow \langle \text{if } b' \text{ then } c_1 \text{ else } c_2, \sigma \rangle} \quad (c8)$$

$$\langle \text{while } b \text{ do } c, \sigma \rangle \rightarrow \langle \text{if } b \text{ then } c; \text{ while } b \text{ do } c \text{ else skip}, \sigma \rangle \quad (c9)$$

Sia c la sequenza di comandi: $X := 1; \text{while } \neg(X == 0) \text{ do } X := X - 1$

$$\begin{aligned} & \langle c, \sigma \rangle \\ & \rightarrow \langle c', \sigma[X \leftarrow 1] \rangle \\ & \rightarrow \langle \text{if } \neg(X == 0) \text{ then } X := (X - 1); c' \text{ else skip}, \sigma[X \leftarrow 1] \rangle \\ & \rightarrow \langle \text{if } \neg(1 == 0) \text{ then } X := (X - 1); c' \text{ else skip}, \sigma[X \leftarrow 1] \rangle \\ & \rightarrow \langle \text{if } \neg\text{ff then } X := (X - 1); c' \text{ else skip}, \sigma[X \leftarrow 1] \rangle \\ & \rightarrow \langle \text{if tt then } X := (X - 1); c' \text{ else skip}, \sigma[X \leftarrow 1] \rangle \\ & \rightarrow \langle X := (X - 1); c', \sigma[X \leftarrow 1] \rangle \\ & \rightarrow \langle X := (1 - 1); c', \sigma[X \leftarrow 1] \rangle \\ & \rightarrow \langle X := 0; c', \sigma[X \leftarrow 1] \rangle \\ & \rightarrow \langle c', \sigma[X \leftarrow 0] \rangle \\ & \rightarrow \langle \text{if } \neg(X == 0) \text{ then } X := (X - 1); c' \text{ else skip}, \sigma[X \leftarrow 0] \rangle \\ & \rightarrow \langle \text{if } \neg(0 == 0) \text{ then } X := (X - 1); c' \text{ else skip}, \sigma[X \leftarrow 0] \rangle \\ & \rightarrow \langle \text{if } \neg\text{tt then } X := (X - 1); c' \text{ else skip}, \sigma[X \leftarrow 0] \rangle \\ & \rightarrow \langle \text{if ff then } X := (X - 1); c' \text{ else skip}, \sigma[X \leftarrow 0] \rangle \\ & \rightarrow \langle \text{skip}, \sigma[X \leftarrow 0] \rangle \\ & \rightarrow \sigma[X \leftarrow 0] \end{aligned}$$

- 1 Significato, Uso, Caratteristica di semantica Denotazionale e semantica Operazionale dei L. di Programmazione
- 2 Quali sono le 3 strutture che devono essere definite per fornire la SOS di un L. di Programmazione?
- 3 Si modifichino le regole di inferenza delle espressioni aritmetiche, date a lezione, in modo da prescrivere una valutazione degli argomenti da sinistra a destra per somma e sottrazione.
- 4 Si indichino le regole di inferenza e si mostrino le transizioni ottenute applicando all'espressione $(y-(7+2))$ la semantica SOS, data a lezione.
- 5 Si annoti, a sinistra di ogni freccia nella figura sotto (v. testo completo), le regole di inferenza (dei comandi c1-c9) utilizzate nella transizione, come abbiamo visto a lezione nel caso delle espressioni.
- 6 Siano c e d i seguenti comandi:
c: `X:=1;`
d: `while(X==1)do skip`
Si dia la sequenza di transizioni ottenute per c;d a partire dallo stato $\sigma = (X, 0)$.

Altri esercizi in:

* Esercizi4Lezione4Parte2

* Cap. 2 [GM]