

# LFC (Linguaggi Formali e Compilatori) - Note del Corso

Edoardo Lenzi

January 31, 2018

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
1.1	Front-End of the Compiler . . . . .	3
1.2	Back-End of the Compiler . . . . .	3
1.3	Lexical analysis . . . . .	3
1.4	Session syntax analyzer . . . . .	4
1.5	Semantic analyzer . . . . .	4
1.6	Intermediate code generation . . . . .	4
1.7	Code generation . . . . .	4
<b>2</b>	<b>2</b>	<b>5</b>
2.1	Syntax Analysis . . . . .	5
2.2	Derivations . . . . .	6
2.3	Parsing . . . . .	6
2.4	Precedenze degli operatori . . . . .	7
2.5	Java statements . . . . .	7
2.6	Syntax Directed Translation . . . . .	8
2.7	Tree traversals . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Link</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Introduzione</b>	<b>10</b>
4.1	Grammatiche . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Linguaggi liberi</b>	<b>12</b>
5.1	Grammatica libera dal contesto (context free) . . . . .	12
5.2	Abstract syntax Tree . . . . .	12
5.3	Grammatiche ambigue . . . . .	13
5.4	Linguaggi liberi . . . . .	13
5.5	Pumping Lemma per Linguaggi Liberi . . . . .	14
5.6	Pumping Lemma per assurdo . . . . .	16
<b>6</b>	<b>Automi a stati finiti</b>	<b>20</b>
6.1	Thompson construction . . . . .	20
6.2	Simulare un NFA . . . . .	21
6.3	DFA . . . . .	22
6.4	Subset Construction . . . . .	23
6.5	Partition Refinement . . . . .	24
6.6	Algoritmo di minimizzazione di DFA . . . . .	25
6.7	Ricapitolando . . . . .	28
<b>7</b>	<b>Linguaggi Regolari o Lineari</b>	<b>29</b>
7.1	Da DFA a Grammatica Regolare . . . . .	29
7.2	Pumping Lemma per Linguaggi Regolari . . . . .	30
<b>8</b>	<b>Analisi Sintattica</b>	<b>32</b>
8.1	Parsing Top-down . . . . .	32
8.2	Parsing Top-down predittivo (o non ricorsivo) . . . . .	32
8.3	Grammatica LL(1) . . . . .	32
8.4	First . . . . .	32
8.5	Follow . . . . .	34
8.6	Tabella di parsing . . . . .	35
8.7	Algoritmi di Parsing . . . . .	36

8.8	Grammatica Ricorsiva Sinistra . . . . .	38
8.9	Eliminazione Left Recursion immediata . . . . .	38
8.10	Left Factoring . . . . .	39
8.11	Algoritmo di fattorizzazione a sinistra . . . . .	39
<b>9</b>	<b>Parsing Bottom Up (Zampedri)</b>	<b>41</b>
9.1	Reductions . . . . .	41
9.2	Handle Pruning . . . . .	41
9.3	Shift reduce parsing . . . . .	42
9.4	LR parsing . . . . .	42
9.5	Algoritmo generazione canonical collection C . . . . .	44
9.6	Simple LR (SLR) . . . . .	44
9.7	The LR-Parsing Algorithm . . . . .	45
9.8	Viable Prefixes . . . . .	49
9.9	More Powerful LR Parsers . . . . .	50
9.10	Canonical LR(1) items . . . . .	50
9.11	LALR (LookAhead LR) Parsing Table . . . . .	53
9.12	Efficient Construction of LALR Parsing Table . . . . .	54
<b>10</b>	<b>Bottom Up (Farina)</b>	<b>55</b>
10.1	Algoritmo di shift/reduce . . . . .	56
10.2	Items . . . . .	58
<b>11</b>	<b>Costruzione di un automa caratteristico LR(0) o LR(1)</b>	<b>59</b>
11.1	Algoritmo di $closure_0(P)$ . . . . .	60
11.2	LR(0) automaton . . . . .	60
11.3	Creazione della tabella di parsing . . . . .	60
11.4	LR(1) . . . . .	64
11.5	Algoritmo $Closure_1(P)$ . . . . .	64
11.6	Esempio grammatica LALR . . . . .	65
11.7	Algoritmo LALR(1) (inefficiente) . . . . .	67
11.8	Algoritmo LALR (efficiente) . . . . .	69
11.9	Costruzione automa simbolico . . . . .	71
11.10	Grammatiche Attribuite . . . . .	72
11.11	Attributi Sintetizzati ed Ereditati . . . . .	72

# Chapter 1

## Introduzione

Un compilatore é un programma che legge un **linguaggio source** e lo traduce in un **equivalente linguaggio di programmazione target**. Solitamente il compilatore compila in **assembly** e poi un **assembler** produce codice macchina. Se il target language é un programma eseguibile può processare input e produrre output.

Un **interprete** é un altro tipo di language processor, invece di tradurre il linguaggio lo esegue direttamente quindi piglia sia il source program che gli input e processa l'output

Infine il **preprocessore** risolve le macro nel sorgente codificandole in linguaggio nativo (espandendole) prima di compilare.

Solitamente il compilato va piú veloce mentre l'interprete ti da diagnosi piu accurate dato che esegue il codice. Nel caso di Java compilo il sorgente in linguaggio intermedio **bytecode** che poi interpreto sulla JVM.

Il **linker** "linka" assieme moduli e librerie dove ho riferimenti ad altri file (risolve gli indirizzi). Il **loader** invece fa il merge in memoria per l'esecuzione.

### 1.1 Front-End of the Compiler

La **parte analitica** del processo di compilazione spacca la sorgente in parti costituenti e impone su di esse una struttura grammaticale (stile dtd); sfrutta questa struttura per creare una rappresentazione intermedia. Se non passa la validazione grammaticale mi tira errori. Il sorgente viene storicizzato in una struttura dati chiamata **symbol table**.

### 1.2 Back-End of the Compiler

La **parte di sintesi** invece traduce il sorgente guardando la rappresentazione intermedia e la symbol table; le parti di analisi e sintesi sono chiamate anche **front-end of the copiler** mentre le restanti **back-end**.

### 1.3 Lexical analysis

Fa uno scan e raggruppa le parole in **lexems**, per ogni lexem genera un **token** della forma

(token name, attribute value)

Il **token name** é un simbolo astratto usato nella syntax analysis mentre il **value** é un puntatore alla symbol table entry.

ie)

position = initial + rate \* 60 diventa (id, 1) (=) (id, 2) (+) (id, 3) (\*) (60)  
gli operatori matematici sono simboli astratti che non hanno attribute value (?non sono referenziati nella symbol table?).

## 1.4 Session syntax analyzer

É un parsing, con i token crea una **rappresentazione ad albero (syntax tree)** nel quale il nodo é un operatore e i figli gli operandi.

gli operatori devono avere priorit  per costruire l'albero, la struttura grammaticale serve anche a definire le priorit  degli operatori.

## 1.5 Semantic analyzer

Piglia il **syntax tree** e guarda se   semanticamente consistente con la definizione del linguaggio. (ie **type checking**). Il linguaggio puo ammettere cast impliciti chiamati **coercizioni** o tirare cogne.

*“into float”*   una coercizione dell'intero 60 in float dato che gli altri operandi sono float.

## 1.6 Intermediate code generation

Nel processo di compilazione posso avere varie rappresentazioni intermedie come alberi etc.. Dopo semantic analysis solitamente creo un codice basso livello, machine-like, *“easy to produce and easy to translate into target machine code”*. Nella figura ho un tree address code ricavato dal syntax tree.

In un tree address code a destra ho al massimo un operatore (assembly like), e le operazioni sono in ordine.

Devo avere variabiline intermedie

## 1.7 Code generation

Segue la fase opzionale di **code optimization**, prende la rappresentazione intermedia e la mappa in un target language. Le istruzioni intermedie vengono tradote in istruzioni macchina (presumibilmente).

Devo capire come mappare variabili su registri

Nella symbol table devo storicizzare tutti gli attributi di un variable name.

Solitamente posso agglomerare le fasi di analisi in front end pass e le altre in back end pass.

# Chapter 2

## 2

Syntax descrive la forma appropriata di un programma Semantic descrive il significato...

Per specificare la sintassi uso BNF (Backus Naur Form) context-free grammar

**Analisi** consiste nel (guardando la **sintassi**) spaccare il sorgente in parti costituenti (lexems) e generare tokens che li rappresentano (ho un linguaggio intermedio). La **Sintesi** invece parte dal linguaggio intermedio e sintetizza il target program.

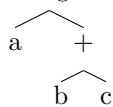
Per specificare la **sintassi** uso la notazione della **context-free grammar** o BNF (Backus Naur Form).

### 2.1 Syntax Analysis

Vedo una sequenza di caratteri come entità chiamate tokens

Creo un **abstract syntax tree** con entità sulle foglie e operatori sugli altri nodi (intermedi).

assign **three address instruction** per via del fatto che ho tre variabili (istruzione assembly).



---

```
if(expression) statement else statement
```

```
stmt -> if(expr) stmt else stmt
```

```
// -> la traduco in "can have the form"
```

---

La regola sopra può essere chiamata **produzione**.

In una **produzione** elementi lessicali come if e parentesi (keywords) sono chiamati **terminali** mentre le variabili sono **non terminali** (ulteriormente espandibili con produzioni).

Una **context-free grammar** ha:

- un **set di terminali** (tokens), set di simboli elementari del linguaggio definiti dalla grammatica
- un **set di non terminali** o syntactic variables
- un **set di produzioni** (*Head* → *Body*)  
head é il costruito, body la forma scritta del costruito
- un non terminale chiamato **start symbol**

In un compilatore il lexical analyzer legge i caratteri del sorgente, li raggruppa in lexems e produce tokens (della forma (**TokenName**, **AttributeValue**)).

Specifico, nella pratica, una grammatica come lista di produzioni (con quelle contenenti lo start symbol per prime). Simboli come <, >, = e le keyword del linguaggio sono terminali.

Per convenzione scrivo in *italic i non terminali* ed in **boldface per i terminali**. Uso l'operatore OR | (pipeline) per separare gli elementi nel body. Definisco  $\epsilon$  come empty string.

### 2.1.1 ie)

ho  $5 + 9 - 3 + 5 - 6 - 7 + 1$

---

```
list -> list + digit | list - digit | digit
digit -> 0|1|2|...|9
```

---

I terminali sono  $\{+ - 0123\dots 9\}$ , i non terminali  $\{list, digit\}$ , start symbol é  $list$

## 2.2 Derivations

Una grammatica deriva stringhe partendo dallo start symbol e ricorsivamente applicando le produzioni sui non terminali. Il linguaggio definito da una grammatica é il  $\{\text{stringhe ottenute}\}$ .

### 2.2.1 ie)

---

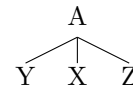
```
//argomenti di una funzione
call -> id(optparams)
optparams -> params | Epsilon
params -> params, param | param
```

---

## 2.3 Parsing

Il **parsing** é il problema secondo cui, data una stringa di terminali, devo capire come é stata costruita partendo da uno start symbol (tirare eccezione altrimenti).

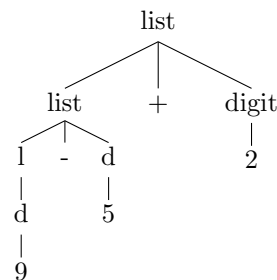
Uso **parse trees**  $A \rightarrow XYZ \Rightarrow$



Regole di costruzione:

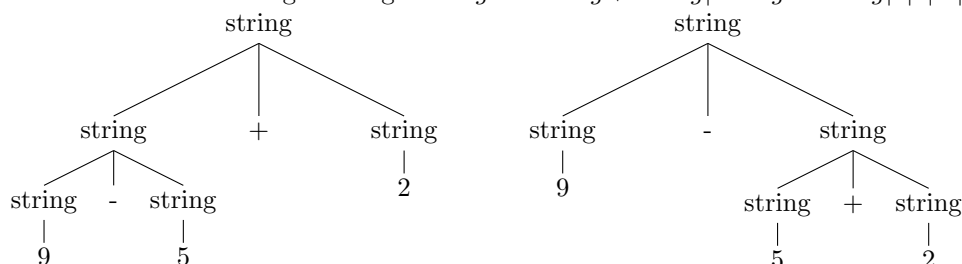
- la root é lo start symbol
- le foglie sono terminali o  $\varepsilon$
- i nodi interni sono non-terminali
- se A non-terminali ha figli  $x_1, \dots, x_n \Rightarrow A \rightarrow x_1 \dots x_n$

9-5+2



Una stringa può avere più parse tree ma ciò implica che la **grammatica é ambigua**; la presenza di più alberi implica l'esistenza di più significati diversi.

Mergiando le nozioni di list e digit ottengo  $string \rightarrow string + string | string - string | 1|2|\dots|9$  9-5+1 ha



### 2.3.1 Associativit  a sinistra

L'operatore + associa a sinistra perch  se ho un pezzo di espressione  $+5+$  il + a sinistra viene applicato al 5 mentre ad esempio per l'elevamento a potenza o l'assegnazione di una variabile (=) l'associativit    a destra (right associative).

---

```
a = b = c -> a = (b = c)
2^3^4 -> (2^3)^4
1 + 2 + 3 -> (1 + 2) + 3
```

---

Stringhe right associative (l'abero cresce a destra) sono generate dalla grammatica:

---

```
right -> letter = right | letter
letter -> [ab...z]
```

---

## 2.4 Precedenze degli operatori

L'associativit  vale per operandi uguali ma non risolve  $a + b * c$ . In questo caso ho due livelli di precedenza uno per  $+-$  ed uno per  $*/$ . Creo *expr* e *term* per i due livelli e *factor* per i base units.

---

```
factor -> digit | (expr)
term -> term * factor
      | term / factor
      | factor
expr -> expr + term
      | expr - term
      | term
```

---

La grammatica sar  quindi

---

```
expr -> expr + term | expr - term | term
term -> term * factor | term / factor | factor
factor -> digit | (expr)
// non posso avere un operatore vicino ad un fattore
```

---

Posso generalizzare il concetto per n livelli di precedenza (per n livelli mi servono n+1 non terminali)

$\text{expr} = \text{list } \{\text{terms separati da } */\}$

## 2.5 Java statements

---

```
stmt -> id = expr
      | if (expr) stmt
      | if (expr) stmt else stmt
      | while (expr) stmt
      | do stmt while (expr)
      | {stmts}
stmts -> stmts stmt
      | Epsilon
```

---

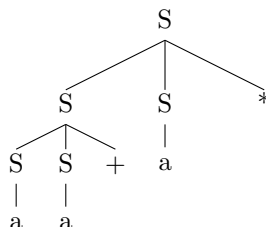
### 2.5.1 ie) notazione postfissa

---

```
//prefissa con  SS -> +SS|*SS|a
SS -> SS+|SS*|a
genera aa+a*
S->SS*-> Sa*->SS+a*->aa+a*
```

---





### 2.5.2 ie)

---

$S \rightarrow 0S1 \mid 01$

000000111111

$0^n 1^n$

$S \rightarrow S(S)S \mid E$

$S \rightarrow S(S)S \rightarrow S(S)S(S)S \rightarrow S(S(S(S(S)S)S)S)S(S)S(S)S(S)S$

$E(E(E(E(E)E)E)E)E(E)E(E)E(E)E$

avro' sempre una  $E(E$  all'inizio ed una  $E)E$  alla fine

$S \rightarrow aSbS \mid bSaS \mid E$

avro' sempre un numero uguale di  $a$  e  $b$ , lunghezza totale pari

---

## 2.6 Syntax Directed Translation

Fatte attaccando regole o frammenti di programma a produzioni.

**Attributi** sono proprietà di espressioni del linguaggio (length).

**Syntax Directed Translation Schemes**

### 2.6.1 Postfix notation

$(ab+)$ ,  $9-5+2$  diventa  $95-2+$ ,  $9-(5+2)$  diventa  $952+-$ . La notazione postfissa non necessita di parentizzazioni, non può avere ambiguità. Per leggere l'espressione faccio uno scan da destra fino al primo operatore e lo applico (vado avanti ricorsivamente).

**Syntax Directed Definition** associa

- ad ogni simbolo un set di **attributes**
- ad ogni produzione un set di **semantic rules** per computare i valori degli attributi associati ai simboli che compaiono nella produzione

Per una stringa  $x$  faccio un **parse tree** poi applico le regole semantiche per valutare gli attributes ad ogni nodo dell'albero.  $x.a$  è l'attributo  $a$  di  $x \rightarrow$  **annoted parse tree**

Un attributo è detto **sintetizzato** se il suo valore in un nodo è determinato dai valori dei suoi figli e dal nodo stesso. Un attributo è detto **inherited** se il suo valore in un nodo è determinato dai valori del padre, dei fratelli e di se stesso.

Uso l'operatore  $||$  per concatenare le stringhe. Le regole semantiche sono applicate agli attributi.

---

```
expr -> term => expr.t = term.t
```

```
expr -> expr1 + term => expr.t = expr1.t || term.t || '+'
```

```
// l'attributo nella head = attributi nel body concatenati con strighe extra ('+')
```

---

## 2.7 Tree traversals

## Chapter 3

### Link

Vecchio sito  
Note Drive

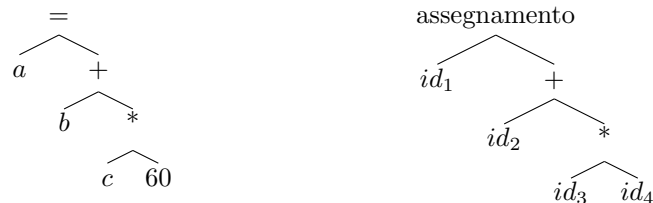
# Chapter 4

## Introduzione

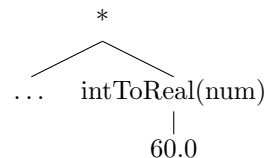
I linguaggi di **analisi lessicale** lavorano con simboli e caratteri; devo costruire una **tavola dei simboli** (specifica per un dato programma e compilatore). L'analisi restituisce dei **tokens** (puntatori) a record nella tavola dei simboli. La maggior parte delle implementazioni usano un numero come **identificatore**.

L'**analisi sintattica** invece studia la **grammatica del linguaggio**. Viene costruito un **abstract syntax tree**:

$$a = b + c \cdot 60$$



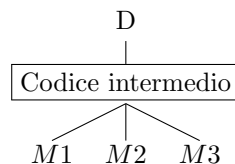
L'**analisi semantica** si occupa di vedere se c'è una corretta semantica (variabili dichiarate precedentemente). Se \* necessita di un float allora 60 dev'essere convertito a float.



Generazione di **codice intermedio**:

$temp_1 = \text{intToReal}(60)$   
 $temp_2 = id_3 * temp_1$   
 $temp_3 = id_2 + temp_2$   
 $id_1 = temp_3$

VISITA DELL'ALBERO



### 4.1 Grammatiche

Una **grammatica** è una tupla  $G(V, T, S, P)$  con:

V	vocabolario
T	set simboli terminali
S	start symbol
P	set delle produzioni
$V \setminus T$	simboli
$\varepsilon$	parola vuota, non può essere un terminale!

Le produzioni sono della forma  $\alpha \rightarrow \beta$  con  $\alpha$  **stringa non vuota di simboli V con almeno un non terminale**,  $\beta$  stringa su  $V \cup \varepsilon$ .

Per convenzione i caratteri in maiuscolo denotano simboli non terminali mentre in minuscolo terminali. Quindi i simboli in  $T$  sono tutti lettere minuscole.

Considero  $X, Y$  variabili, generico simbolo in  $V$  e  $\alpha \beta \delta$  stringhe su  $V^*$   
 $S \rightarrow aSb$   
 $S \rightarrow \varepsilon \quad T = \{a, b\}$  (terminali),  $(V \setminus T) = \{S, A\}$  (non terminali)  
 $S \rightarrow A$

#### 4.1.1 Derivazioni

Date  $\mu = \mu_1 \alpha \mu_2$ ,  $\alpha \rightarrow \beta$ , produzioni della grammatica  $G$ ,  $\gamma = \mu_1 \beta \mu_2$  é una derivazione in uno o piú passi partendo da  $\mu$ .

Scrivendo  $\mu \rightarrow^+ \gamma$  intendo che posso derivare  $\gamma$  da  $\mu$  in uno o piú passi di derivazione.

#### 4.1.2 Linguaggio generato da una grammatica

$$L(G) = \{w \mid w \in T^*, S \rightarrow_G^+ w\}$$

Dato il linguaggio  $L$  possono esistere piú grammatiche diverse tra loro che generano  $L$ . Pertanto dal linguaggio non posso risalire con certezza alla grammatica.

In generale dato un linguaggio generale  $L$  ed una grammatica  $G$   $\nexists$  un algoritmo per dimostrare che  $L = L(G)$ .

# Chapter 5

## Linguaggi liberi

### 5.1 Grammatica libera dal contesto (context free)

Una grammatica generata é libera dal contesto (context free) se ogni sua produzione ha la forma:

$$A \rightarrow \beta$$

Con  $A$  non terminale. ( $\alpha \rightarrow \beta$ ,  $\alpha$  deve essere un solo simbolo non terminale, altrimenti é condizionata).  
Con  $\beta$  qualsiasi (terminali, non terminali o  $\varepsilon$ ).

Grammatiche libere si prestano in modo naturale a descrivere derivazioni in viste ad albero.

#### 5.1.1 Esempi

$$S \rightarrow aAb$$

$$aA \rightarrow aaAb \quad \text{Non é context free, genera } L(G) = \{a^n b^n / n > 0\}.$$

$$A \rightarrow \varepsilon$$

$$S \rightarrow aSb|\varepsilon$$

$$S \rightarrow aSb \rightarrow aaSbb \rightarrow aabb \implies \{a^n b^n / n \geq 0\} \quad \text{Context free, genera lo stesso L di quella sopra.}$$

Serve per parentesizzare correttamente codice (genera  $a^n b^n$ ).

$$S \rightarrow AB$$

$$A \rightarrow Aa|a \quad \text{Tutto ciò che deriva da A é indipendente da ciò che deriva da B. } a^n b^m, n, m \geq 0$$

$$B \rightarrow Bb|b$$

Se ho produzioni impossibili che non finiscono in terminali la grammatica genera un linguaggio vuoto ( $(\{S, B, a\}, \{A\}, S, \{S \rightarrow aB\})$ ).

( $\{S\}, \{\}, S, \{S \rightarrow \varepsilon\}$ ) invece genera un linguaggio  $\{\varepsilon\} \neq \emptyset$

$$S \rightarrow 0B|1A$$

$$A \rightarrow 0|0S|1AA \quad L(G) = \{w / \text{count}(0,w)=\text{count}(1,w)\}$$

$$B \rightarrow 1|1S|0BB$$

Definire una grammatica per  $L = \{a^k b^n / k, n > 0\}$

$$S \rightarrow aS|aB \quad S \rightarrow AB$$

$$A \rightarrow aA|a \quad S \rightarrow ab|aS|Sb$$

$$B \rightarrow bB|b \quad B \rightarrow bB|b$$

$$S \rightarrow AB$$

Definire G tale che  $L(G) = \{a^k b^n c^{2n} / k, n > 0\}$

$$A \rightarrow aA|a$$

$$B \rightarrow bBcc|bcc$$

Definire G tale che  $L(G) = \{a^k b^n d^{2k} / k, n > 0\}$

$$S \rightarrow aSdd|B$$

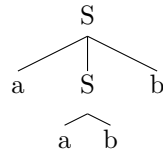
$$B \rightarrow bB|b$$

$$S \rightarrow aSdd|aBdd$$

$$B \rightarrow bB|b$$

### 5.2 Abstract syntax Tree

$$S \rightarrow aSb|ab$$



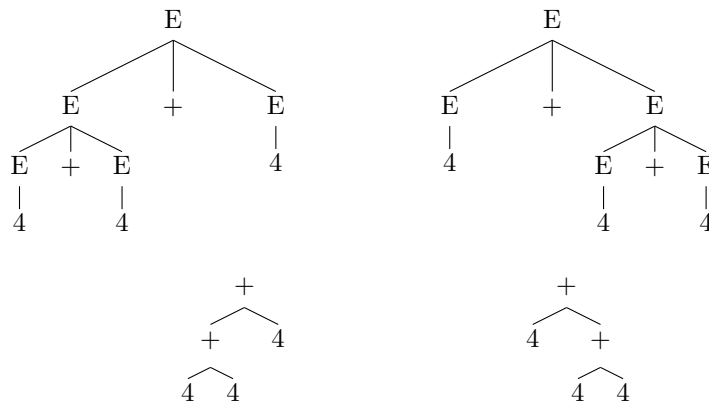
aabb, derivazione canonica  $\mu \rightarrow \gamma$

### 5.3 Grammatiche ambigue

Nel caso di grammatiche libere si definiscono le **derivazioni canoniche destre e sinistre**, nel caso **rightmost** si richiede che ad ogni passo di derivazione  $\mu \rightarrow \gamma$  venga rimpiazzato il terminale più a destra di  $\mu$ ; nel caso **leftmost** quello più a sinistra.

$G$  é **ambigua** se esiste una parola del linguaggio generato da  $G$ , generabile con due derivazioni canoniche distinte entrambe destre o entrambe sinistre.

$E \rightarrow E + E \mid E * E \mid 4$  (il  $+$  associa a sinistra)



[Analogo con il  $*$ ] Essendo derivazioni entrambe leftmost  **$G$  é ambigua.**

Occhio a non confondere la struttura dell'albero di derivazione con la sua sequenza di derivazioni.

La derivazione leftmost sostituisce prima i non terminali a sinistra e poi procede con i successivi.

Quello a sx prima spacca la  $E$  in  $E+E$  che poi viene spaccato in  $E+E$  dove poi vanno sostituiti alle  $E$  i non terminali 4.

Quello a dx invece spacca  $E$  in  $E+E$ , sostituisce alla prima  $E$  il 4 e poi passa alla sostituzione della seconda  $E$  con  $E+E$ .

In entrambi i casi la sostituzione dei non terminali avviene sempre prendendo il primo non terminale della stringa, cioè quello più a sinistra.

Finché considero sostituzioni con un solo carattere a destra della produzione leftmost e rightmost sono del tutto equivalenti; la differenza arriva quando considero produzioni con sostituzioni su più di un carattere perché mangi caratteri a possibili derivazioni future.

$S \rightarrow \text{if } b \text{ then } S \mid \text{if } b \text{ then } S \text{ else } S \mid \text{altro}$   
 $\text{if } b \text{ then if } b \text{ then altro else altro}$   
 $\text{if } b \text{ then } S \text{ else } S$

### 5.4 Linguaggi liberi

Un linguaggio é libero se esiste una grammatica libera che lo genera.

**Lemma 1:** La classe dei linguaggi liberi é **chiusa all'unione** (se  $L_1$  e  $L_2$  sono liberi allora  $L_1 \cup L_2$  é ancora libero)

$$\begin{aligned} L_1 \text{ libero} &\implies \exists G_1 = (V_1, T_1, S_1, P_1) / L_1 = L(G_1) \\ L_2 \text{ libero} &\implies \exists G_2 = (V_2, T_2, S_2, P_2) / L_2 = L(G_2) \\ (\{V_1 \cup V_2 \cup \{S\}, T_1 \cup T_2, S, P_1 \cup P_2 \cup (S \rightarrow S_1 S_2)\}) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Devo rinominare i non terminali di  $G_1$  e  $G_2$  in modo da non avere omonimie (clash). Notare la produzione che aggiunge un nuovo start symbol per agganciarsi ai vecchi.

**Lemma 2:** La classe dei linguaggi liberi é **chiusa rispetto alla concatenazione** (se  $L_1$  e  $L_2$  sono liberi allora  $\{w_1 w_2 / w_1 \in L_1, w_2 \in L_2\}$  é esso stesso un linguaggio libero).

$$G = (V_1 \cup V_2' \cup \{S\}, T_1 \cup T_2, S, P_1 \cup P_2' \cup \{S \rightarrow S_1 S_2'\})$$

$P_1 \cup P_2 \cup \{S \rightarrow S_1 S_2\}$  anche in questo caso bisogna stare attenti ad eliminare possibili clash dei simboli non terminali di  $G_2$ . Metto un apice per indicare una rinominazione dei non terminali ( $V_2'$ ,  $S_2'$ ,  $P_2'$ ). In pratica concateno gli start symbols.

### 5.4.1 Esempio

Il linguaggio  $\{a^n b^n / n > 0\}$  é libero perché  $\exists$  una grammatica libera che lo genera ( $G_1$ ):

$$\begin{aligned} G_1 \quad & S \rightarrow aSb / ab \quad G_1 \text{ libera} \\ G_2 \quad & s \rightarrow aAb, A \rightarrow aaAb, A \rightarrow \varepsilon \quad G_2 \text{ non libera } \square \end{aligned}$$

## 5.5 Pumping Lemma per Linguaggi Liberi

Serve per dimostrare che un linguaggio non é libero. Ossia non esiste alcuna grammatica libera che lo genera.

**Pumping lemma:**

Sia  $L$  un linguaggio libero allora  $\exists p \in \mathbb{N}^+ / \forall z \in L / |z| > p, \exists uvwxy :$

i)  $z = uvwxy \wedge$

ii)  $|vwx| \geq p \wedge$

iii)  $|vx| > 0 \wedge$

$$\forall i \in \mathbb{N} / uv^iwx^iy \in L$$

### 5.5.1 Commento definizione

$\exists p \in \mathbb{N}^+$	esiste una costante $p > 0$
$\forall z \in L :  z  > p$	ogni parola con piú elementi di $p$
$\exists uvwxy / z = uvwxy$	esistono 5 sottostringhe che compongono $z$
$ vwx  \leq p$	la lunghezza delle 3 stringhe centrali é minore di $p$
$ vx  > 0$	la seconda e la quarta non sono mai entrambe nulle
$\forall i \in \mathbb{N} uv^iwx^iy \in L$	se ripeto $i$ volte (i può essere 0) la 2 e la 4 sono ancora in $L$

### 5.5.2 Dimostrazione Pumping Lemma

**Osservazione 1:** Data una grammatica  $G$  posso sempre creare una altra grammatica  $G'$  modificata dalla prima che genera lo stesso linguaggio.

**Osservazione 2:** Una grammatica si può portare in forma normale (di Chomsky) togliendo eventuali ridondanze o produzioni che terminano per forza con  $\varepsilon$  (a meno che non debba fare parte del linguaggio, ma a quel punto si scrive come  $S \rightarrow \varepsilon$ ).

**CNF**

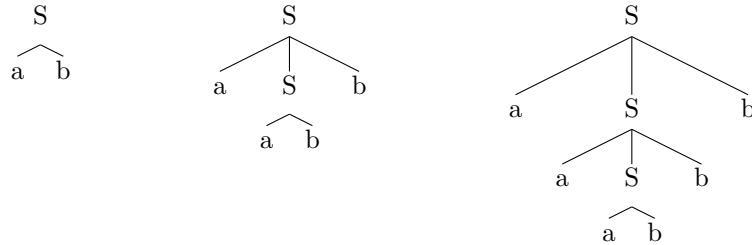
Chomsky Normal Form esige che una grammatica non abbia produzioni ridondanti:

ie)  $G_1 \quad S \rightarrow aSb|ab|B, B \rightarrow aBb|ab \leftarrow$  doppioni

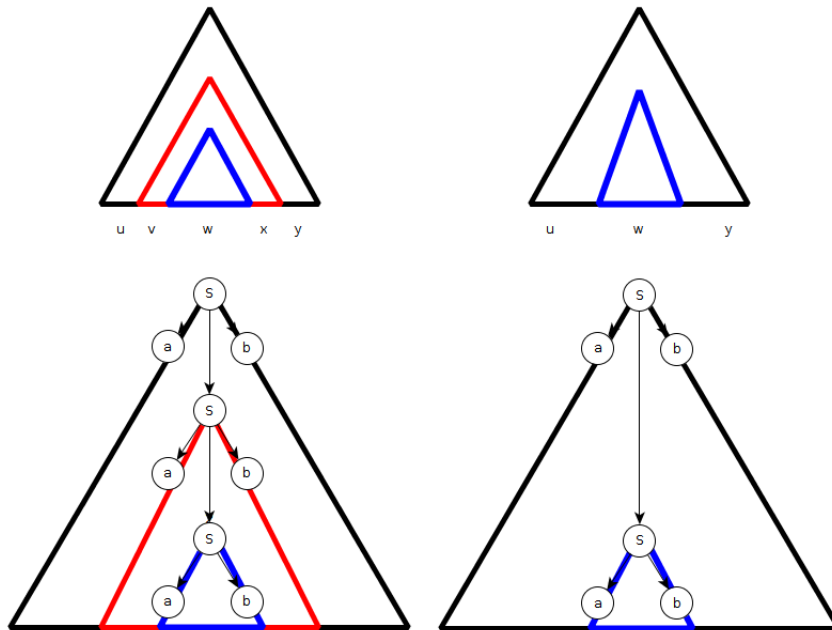
**Dimostrazione:**  $L$  é un linguaggio libero  $\implies \exists G$  in Chomsky Normal Form tale che  $L = L(G)$ .

Definisco  $p$  come la lunghezza della parola piú lunga che può essere derivata usando un albero di derivazione i cui cammini dalla radice sono lunghi al piú come il numero di simboli non terminali della grammatica  $(|V \setminus T|)$ .

$S \rightarrow aSb|ab$ , ha due non terminali,  $p = 2$



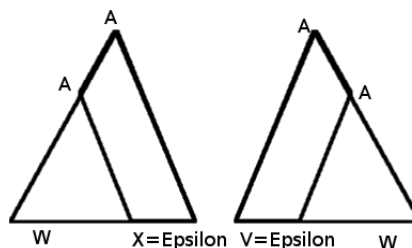
Guardo il cammino  $S \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \dots \rightarrow S_K$  di lunghezza  $K$ . Se  $z \in L \wedge |z| > p \implies$  nell'albero di derivazione di  $z$  esiste almeno un cammino la cui lunghezza é maggiore di  $|V \setminus T| \implies$  allora esiste almeno un non-terminale che occorre almeno due volte lungo quel cammino ( $S$ , nell'esempio sotto).



ie)  $p = 2$ , se prendo una qualunque parola piú lunga di 3 generata da  $G$ :  $aaaabbbb$ , la posso dividere in 5 con due pumpable:  $u=aa, v=a, w=abb, x=b, y=b$

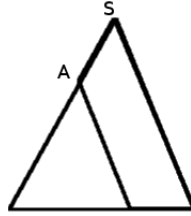
Se prendo  $z \in L \wedge |z| > p \implies$  ho dovuto usare un albero di derivazione /  $\exists$  al meno un cammino piú lungo di  $|V \setminus T|$  per definizione di  $z$ .  $\implies$  ho un non terminale ripetuto al meno due volte  $\implies \exists$  al meno un non terminale che occorre al meno 2 volte lungo quel cammino

con l'**un-pumping** la parola sta sempre nel linguaggio (**taglio un pezzo di albero**) Dato che  $w$  e  $x$  non possono essere entrambi nulli al massimo avrò  $A \rightarrow aA$ , o  $A \rightarrow Aa$



ie) linguaggio libero  $\{a, b\}$ ,  $S \rightarrow ab$





## 5.6 Pumping Lemma per assurdo

(tesi) = L libero  $\implies \exists p \in \mathbb{N}^+ / \forall z \in L / |z| > p, \exists uvwxy :$

i)  $z = uvwxy \wedge$

ii)  $|vwx| \geq p \wedge$

iii)  $|vx| > 0 \wedge$

$\forall i \in \mathbb{N} / uv^iwx^iy \in L$

$\neg(\text{tesi}) = \forall p \in \mathbb{N}^+ / \exists z \in L / |z| > p \forall uvwxy / [(z = uvwxy \wedge |vwx| \leq p \wedge |vx| > 0) \implies \exists i \in \mathbb{N} / uv^iwx^iy \notin L]$

Se si verifica la tesi negata il linguaggio non é libero.

Suppongo  $L_1 = w_1w_2 / w_1 = w_2, w_1, w_2 \in \{a, b\}^*$  **libero**;

Sia  $p$  un naturale qualunque sempre positivo;

Sia  $z = a^pb^pa^pb^p$  ( $|z| = 4p$ );

Allora  $z \in L_1, |z| > p$

Siano  $uvwxy / z = uvwxy, |vwx| \leq p \wedge |vx| > 0$  distinguiamo vari casi:

- 1)  $vwx$  é composto da 'a' che occorrono a sinistra ( $w_1$ )
- 2)  $vwx$  é a cavallo e contiene sia 'a' che 'b' in  $w_1$
- 3)  $vwx$  contiene solo 'b' in  $w_1$
- 4) 'b' in  $w_1$  e 'a' in  $w_2$

5,6,7) ...speculare su  $w_2$

- Nei casi 1, 3, 5, 7 considero le parole  $z^1 = uv^0wx^0y$  ( $i=0$ );

- nel caso 1 sono certo di togliere alcune occorrenze di a quindi avrò  $z^1 = a^kb^pa^pb^p, k < p \implies z^1 \notin L$ .

- Nel caso 3  $z^1 = a^pb^ka^pb^p, k < p \implies z^1 \notin L$ .

- Nel caso 5  $z^1 = a^pb^pa^kb^p, k < p \implies z^1 \notin L$ .

- Nel caso 7  $z^1 = a^pb^pa^pb^k, k < p \implies z^1 \notin L$ .

- Nei casi 2, 4, 6 invece avr  ancora  $z^1 = uv^0wx^0y$  ( $i=0$ );
- Nel caso 2  $z^1 = a^kb^pa^pb^p$ , o  $a^pb^ka^pb^p$ , o  $a^jb^ka^pb^p$ ,  $j, k < p \implies z^1 \notin L$ .
- ...

In pratica facendo l'unpumping in tutti i casi  $z_1 \notin L$  quindi  $L$  non   libero.

### 5.6.1 How not to use Pumping Lemma

Se avessi preso  $\{ww \mid w \in \{a, b\}^*\}$  sia  $z = (ab)^p(ab)^p$ , prendo  $p=4$ ,  $v \in \varepsilon$ ,  $x = a$ ,  $i = 0$  cos  non dimostro niente perch  se voglio dimostrare con il pumping lemma la negazione della tesi devo dimostrare un asserto che vale  $\forall p \in \mathbb{N}^+$ . Pertanto non posso prendere un arbitrario  $p=4$ .

**Pumping lemma for free languages.** Let  $L$  be a free language. The  $\exists p \in \mathbb{N}^+$  depending only on  $L$  such that  $\forall z \in L, |z| > p$ :

- $z = uvwxy$
- $|vwx| \leq p$
- $vx \neq \varepsilon$
- $uv^iwx^iy \in L \forall i \in \mathbb{N}$

1)  $L$  libero  $\implies$  ★ (non   detto che  $L$  libero  $\iff$  ★)  
Quindi anche se verifico che "... u v<sup>i</sup> w x<sup>i</sup> y appartiene ad  $L$  per ogni  $i$  in  $\mathbb{N}$ " non ho dimostrato che  $L$    libero giusto? 14:38 ✓

2) dimostro per assurdo, suppongo  $L$  libero e dimostro che invece non pu  essere libero perch  si verifica la negazione della tesi. 14:42 ✓

3) mettiamo che provo ad usare il 2) ma mi accorgo che non   valida la tesi negata. In questo caso non ho dimostrato che non   libero ma nemmeno che   libero, quindi non ho dimostrato un cazzo, giusto? 14:43 ✓

Quindi in pratica se ho culo riesco a dimostrare che non   libero ma non posso MAI dimostrare che   libero!!! 14:44 ✓

Quindi l'unico modo per dimostrare che un linguaggio   libero   inventarsi una grammatica libera che lo generi o sbaglio? 15:04 ✓

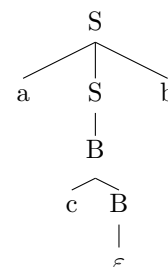
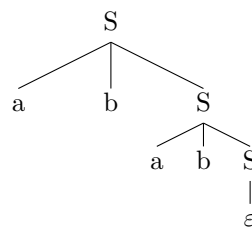
### 5.6.2 Esempi

ie)  $\{a^n b^n c^j \mid n, j \geq 0\} = L_{17}$

$S \rightarrow aSb \mid B$

$B \rightarrow cB \mid \varepsilon$

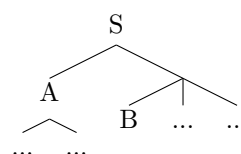
$acb \in L_{17}$



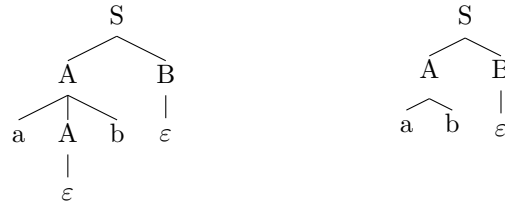
$S \rightarrow abA \mid B$

$B \rightarrow cB \mid \varepsilon$

s



$$\begin{aligned}
S &\rightarrow AB \\
A &\rightarrow aAb|ab|\varepsilon \\
B &\rightarrow Ab|c|\varepsilon
\end{aligned}$$



### 5.6.3 Esempi Linguaggi Liberi

Essendo un linguaggio libero chiuso rispetto alla concatenazione, dati:

$L_1 = \{a^n b^n c^j \mid n, j \geq 0\}$  Libero perché concatenazione di  $\{a^n b^n \mid n \geq 0\}$  e  $\{c^j \mid j \geq 0\}$ , entrambi liberi

$L_2 = \{a^j b^n c^n \mid n, j \geq 0\}$  Libero, inverso di  $L_1$

$L_3 = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$  Non é libero:

Suppongo  $L_3$  libero, sia  $p \in \mathbb{N}^+$ ,  $z = a^p b^p c^p$  Allora  $z \in L_3$ ,  $|z| = 3p > p$

Spacco  $z$  in  $A = a...a$ ,  $B = b...b$ ,  $C = c...c$

Siano  $z = uvwxy \wedge |vwx| \leq p \wedge |vx| > 0$ :

- $vwx$  é composto da sole  $a$  in  $A$
- $vwx$  é composto da  $a$  in  $A$  e  $b$  in  $B$
- $vwx$  é composto da sole  $b$  in  $B$
- $vwx$  é composto da  $b$  in  $B$  e  $c$  in  $C$
- $vwx$  é composto da sole  $c$  in  $C$

Considero la parola  $z' = uv^0wx^0y$

1.  $z' = a^k b^p c^p$ ,  $k < p$ ,  $z' \notin L_3$
3.  $z' = a^p b^k c^p$ ,  $k < p$ ,  $z' \notin L_3$
5.  $z' = a^p b^p c^k$ ,  $k < p$ ,  $z' \notin L_3$
2.  $z' = a^k b^j c^p$ ,  $k < p \vee j < p$ ,  $z' \notin L_3$
4.  $z' = a^p b^k c^j$ ,  $k < p \vee j < p$ ,  $z' \notin L_3$

Quindi visto che la parola non appartiene mai ad  $L_3$  il linguaggio non é libero.  $\square$

### 5.6.4 Conferma $a^n b^n c^n$ non é libero

In effetti se provo ad applicare il pumping lemma mi accorgo che non ce la faccio:

considero  $aaaabbbbcccc$ ,  $u = a^3$ ,  $v = ab$ ,  $w = b^3$ ,  $x = c$ ,  $y = c^3$  é la cosa piú ragionevole ma quando faccio  $uv^2wx^2y$  mi viene fuori  $aaa abab bbb cc ccc$ . Se invece considero  $v = a$  e  $x = c$  alla fine  $|a| = |c| \neq |b|$ .

Quindi é vero che concatenando  $a^n b^n$  libero con  $c^n$  libero ho un linguaggio libero ma mi viene  $a^n b^n c^{n^1} \neq a^n b^n c^{n!}$

### 5.6.5 La classe dei linguaggi liberi non é chiusa all'intersezione

Nota che  $L_1$  ed  $L_2$  risultano liberi anche facendo pumping lemma per assurdo perché nel caso in cui  $vwx$  cada nel terminale ripetuto  $j$  volte con l'unpumping la stringa appartiene comunque al linguaggio (quindi ho almeno un caso in cui appartiene al linguaggio e non posso applicare il pumping lemma per assurdo).

Quindi la classe di linguaggi liberi **non é chiusa rispetto all'intersezione**

$L_4 = \{a^n b^m c^{n+m} \mid n, m > 0\}$  Libero  
 $S \rightarrow aSc \mid aBc$   
 $B \rightarrow bBc \mid bc$

$L_5 = \{a^n b^m c^n d^m \mid n, m > 0\}$  Non libero  
 $L_6 = \{wcw^R \mid w \in \{a, b\}^+\}$  Libero  
 $S \rightarrow aSa \mid bSb \mid aca \mid bcb$

## Chapter 6

# Automi a stati finiti

Un NFA accetta/riconosce un certo linguaggio.

Sia  $N$  un NFA, allora il linguaggio riconosciuto/accettato da  $N$  é il set delle parole per le quali esiste almeno un cammino dallo stato iniziale di  $N$  ad uno stato finale di  $N$ .

notare che  $\forall a \in A, a\varepsilon = \varepsilon a = a$ .

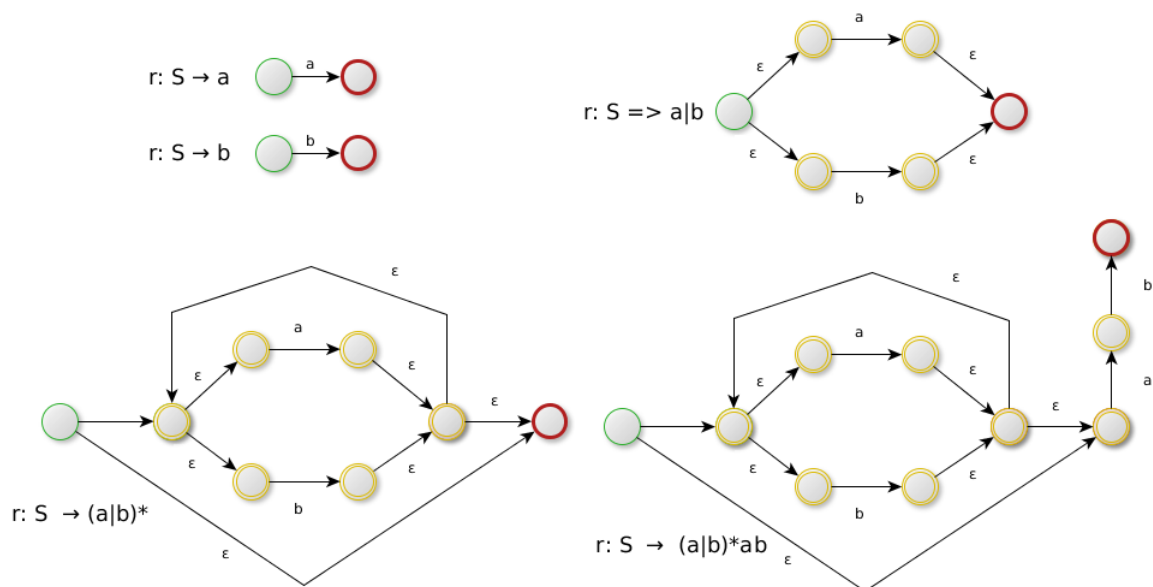
### 6.1 Thompson construction

input	regular expression $r$
output	NFA $N$ / $L(N) = L(r)$

Gli NFA usati nei passi della costruzione hanno:

- un solo stato finale
- non hanno archi entranti sul nodo iniziale
- non hanno archi uscenti dal nodo finale

**Lemma:** Lo NFA ottenuto dalle costruzioni di Thompson ha al massimo  $2k$  stati e  $4k$  archi, con  $k$  lunghezza della re.  $r$ . **Osservazione:** Ogni passo della costruzione introduce al massimo 2 nodi e 4 archi.



Algoritmo a complessità  $O(|r|)$

## 6.2 Simulare un NFA

Il backtracking consiste nel seguire un percorso e se non va bene tornare in dietro e provarne un altro finché alla fine li provo tutti mal che vada.

$N = (S, A, move_n, S_0, F)$ ,  $S$  insieme stati,  $A$  i non terminali (label degli archi),  $S_0$  stato iniziale,  $F$  set stati finali,  $move_n$  funzione di transizione ( $S \otimes A \rightarrow S$ )  
 $t \in S, T \subset S$

### 6.2.1 $\varepsilon$ - closure

$\varepsilon$  - closure( $\{t\}$ ) il set degli stati  $S$  raggiungibili tramite zero o più  $\varepsilon$  - transizioni da  $t$  (in pratica il nodo stesso e tutti i nodi raggiungibili con una  $\varepsilon$  - transition [applicato ricorsivamente]).

Nota che  $\forall t \in S, t \in \varepsilon$  - closure( $t$ )       $\varepsilon$  - closure( $T$ ) =  $\cup_{t \in T} \varepsilon$  - closure( $t$ )

Questo algoritmo é piú performante del backtracking.

### 6.2.2 Algoritmo per la computazione $\varepsilon$ - closure

Strutture dati:

- pila
- bool[] alreadyOn, dimensione  $|S|$
- array[][]  $move_n$

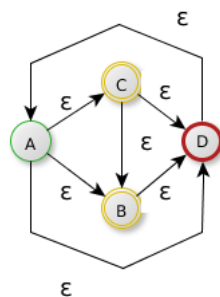
---

```

for(int i = 0; i < |S|; i++){
    alreadyOn[i] = false;
}
closure(t, stack){
    push t onto stack;
    alreadyOn[t] = true; //posso sempre arrivare a me stesso con una epsilon-transition
    foreach(i in move_n(t, epsilon)){
        if(!alreadyOn[i]){
            closure(i, stack);
        }
    }
}

```

---




---

```

alreadyOn[F F F F];
closure(A, pila vuota)
[A] [T F F F]
    //B non e' ancora nella pila
    closure(B, [A])
        [A, B] [T T F F]

```

```

closure(D, [A, B])
  [A, B, D] [T T F T]
closure(C, [A, B, D])
  [A, B, C, D] [T T T T]

```

---

### 6.2.3 Algoritmo per la simulazione di un NFA

input    NFA  $N$ ,  $w\$$   
output    yes se  $w \in L(N)$ , no altrimenti

---

```

N = (S, A, move_n, S_0, F)
states = epsilon-closure({S_0})
symbol = nextchar()
while(symbol != $){
  states = epsilon-closure(Unione_{t in states} di move_n(t, symbol));
  //l'insieme di tutti gli stati raggiungibili con la sottostringa letta fin ora
  symbol = nextchar();
}
if(states intersecato F != emptyset){
  return yes;
}
return no;

```

---

Algoritmo a complessità  $O(|w|(n + m))$

### 6.2.4 Sink

non serve semplicemente per avere una funzione di transizione totale inserisco un nodo pozzo sink dove confluiscono tutte le transizioni non presenti nel DFA. Dato che non é possibile uscire dal pozzo le parole che finiscono in sink non arriveranno mai ad uno stato finale, quindi non sono riconosciute da  $L$ .

## 6.3 DFA

Automa a stati finiti, deterministico; una sottoclasse degli NFA che rispettano:

$$\begin{aligned} \text{DFA} &\triangleq (S, A, \text{move}_d, s_0, F) \\ \text{move}_d &\triangleq (S \otimes A) \rightarrow S \end{aligned}$$

- non hanno  $\varepsilon$  - transizioni
- $\forall a \in A, s \in S$ ,  $\text{move}_n(s, a)$  é un unico stato se ho una **funzione di transizione totale** (al piú uno stato se ho una **funzione di transizione parziale**)

**Sink** é il nodo pozzo dove **confluiscono tutte le transizioni non segnate** (per ogni stato se mi manca una transizione per un determinato terminale ne faccio una su sink); viene aggiunto per rendere la funzione di transizione una funzione di transizione totale

### 6.3.1 Linguaggio riconosciuto dal DFA

Dato il DFA  $D$ ,  $L(D)$  é il linguaggio riconosciuto da  $D$ .

$$L(D) = \{w = a_1, \dots, a_k \mid \exists \text{ cammino in } D \text{ dallo stato iniziale al finale}\}. \quad \varepsilon \in L(D) \iff s_0 \in F.$$

### 6.3.2 Simulazione di un DFA con $\text{move}_d$ totale

input     $w\$$ , DFA  $D = (S, A, \text{move}_d, F)$   
output    yes se  $w \in L(D)$ , no altrimenti

---

```

state = s_0;
while(symbol != $ && state != bottom){
    //move_d(s, a) = bottom <=> move_d non e' definita su (s,a)
    //se sono in bottom sono in sink
    state = move_d(state, symbol);
    symbol = nextchar();
}
if(state in F)
    return yes;
return no;

```

---

Simulazione NFA costa  $O(|w|(n + m))$  Simulazione DFA costa  $O(|w|)$

## 6.4 Subset Construction

input	$NFA(S^n, A, move_n, S_0^n, F^n)$
output	$DFA(S^d, A, move_d, S_0^d, F^d)$

---

```

S_0^d = epsilon-closure({S_0^n});
//raggruppo stati della epsilon closure in un unico stato S_0^d del DFA
states = {S_0^d};
tag S_0^d come non marcato;

while(exist T in states non marcato){
    marco T;
    foreach(a in A){ //guardo ogni arco
        T_1 = epsilon-closure(U_{t in T} di move_n(t,a));
        //tutti gli stati raggiungibili con una a-transition da uno stato in T
        //poi la loro epsilon closure
        if(T_1 != emptySet){
            move_d(T, a) = T_1;
            if(T_1 !in states){
                aggiungi T_1 a states come non marcato;
            }
        }
    }
}

foreach(T in states){
    if( (T intersecato F^n) != 0){
        metti T in F^d;
    }
}

```

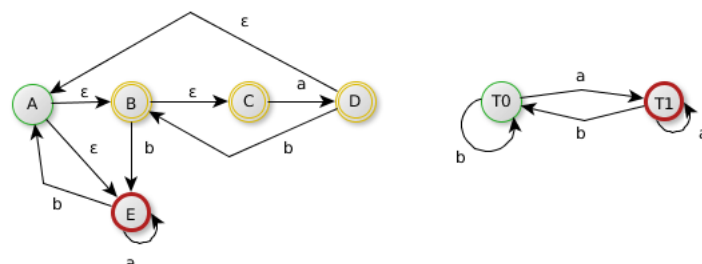
---

Lo stato iniziale del DFA sarà la  $\varepsilon$  - closure dallo stato iniziale del NFA (quindi un set di stati). Considero lo stato iniziale del NFA e lo marco in grassetto poi espando  $T_0$  con la  $\varepsilon$  - closure dello stato iniziale.

Dallo stato  $T_0$  guardo per ogni arco gli stati in cui arrivo e li marco in grassetto ( $T_1, T_2, \dots$ ); poi espando quelli in grassetto guardando le rispettive  $\varepsilon$  - closure.

Alla fine guardo i set degli stati se due set coincidono mergio gli stati.

### 6.4.1 Esercizio





**States** $T0 = \{ \mathbf{A} \ B \ C \ E \}$  $T1 = \{ \mathbf{A} \ B \ C \ \mathbf{D} \ \mathbf{E} \}$  $T2 = \{ \mathbf{A} \ B \ C \ \mathbf{E} \} = T0$  (quindi T0 va in T0 tramite b)**a**

T1

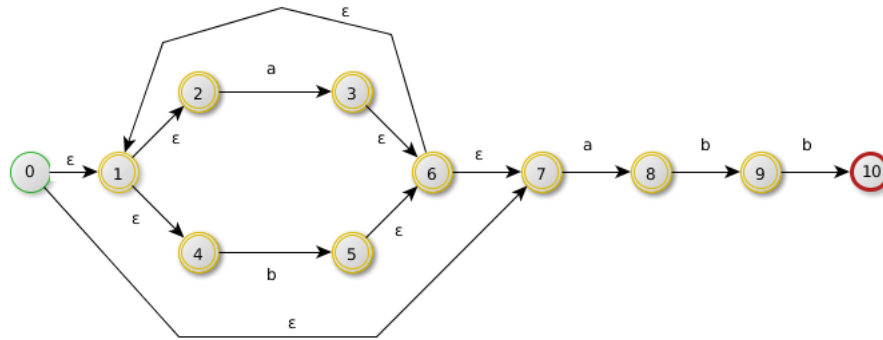
T1

come T0

**b** $T2 = T0$ 

T0

come T0

**6.4.2 Esercizio****States** $S_0^d = \{ \mathbf{0} \ 1 \ 2 \ 4 \ 7 \}$  $T1 = \{ 1 \ 2 \ \mathbf{3} \ 4 \ 6 \ 7 \ 8 \}$  $T2 = \{ 1 \ 2 \ 4 \ \mathbf{5} \ 6 \ 7 \}$  $T3 = \{ 1 \ 2 \ 4 \ \mathbf{5} \ 6 \ 7 \ 9 \}$  $T4 = \{ 1 \ 2 \ 4 \ \mathbf{5} \ 6 \ 7 \ \mathbf{10} \}$ **a**

T1

T1

T1

T1

T1

**b**

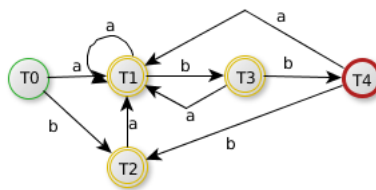
T2

T3

T2

T4

T2

 $T0 = A$  $T1 = B$  $T2 = C$  $T3 = D$  $T4 = E$ 

Quindi sono in uno stato T e guardo un terminale, prima guardo per ogni stato in T se ci sono transizioni per quel terminale (in caso scrivo lo stato in cui arrivo in grassetto). A questo punto espando con  $\epsilon$ -transition ogni stato grassetto. Scrivo uno stato in grassetto anche se già contenuto in T.

**6.5 Partition Refinement**

Guado gli archi, se tutta la partizione punta ad un nodo dell'altra transizione con lo stesso non terminale allora va bene; altrimenti spacco la partizione.

**6.5.1 Algoritmo di Partition Refinement**Input DFA  $D = \{S, A, move_d, s_0, F\}$ 

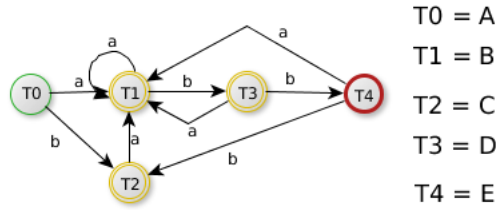
Output partizione di S in blocchi equidistanti

```

B_1 = F;
B_2 = S \ F;
P = {B_1, B_2};
while (exists B_i, B_j in P, exists a in A, B_i e'' partizionabile rispetto a (B_j, a)) {
    sostituire B_i in P con split(B_i, (B_j, a));
}

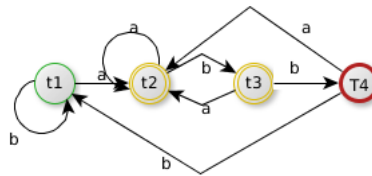
```

### 6.5.2 Esempio



$\{ A B C D \} \{ E \}$	Considero le partizioni dei finali e non finali
$\{ A B C D \} \{ E \}$	Con a-transizione non esco dal primo set
$\{ A B C \} \{ D \} \{ E \}$	Con b-transizione vado da D in E (e A B C non vanno in E con b-transizioni)
$\{ A B C \} \{ D \} \{ E \}$	Con a-transizione non esco
$\{ A C \} \{ B \} \{ D \} \{ E \}$	Con b-transizione vado da B in D e gli altri no quindi splitto
$\{ A C \} \{ B \} \{ D \} \{ E \}$	vanno bene

Rinomino  $\{ A C \} \{ B \} \{ D \} \{ E \}$  in  $t_1, t_2, t_3, t_4$



## 6.6 Algoritmo di minimizzazione di DFA

Input DFA  $D = \{S, A, move_d, s_0, F\}$  con  $move_d$  totale

Output minimo DFA ( $\min(D)$ ) che riconosce lo stesso linguaggio del primo

---

```

P = PartitionRefinement(DFA D);
// P = (B_1, ..., B_k);
foreach(B_i in P){
    var t_i = B_i;           //do un nome alla partizione, un alias
    if(s_o in B_i){
        t_i e'' iniziale per min(D); //setto lo stato iniziale di min(D)
    }
}

foreach(B_i in P/ B_i subset F){
    t_i = B_i;
    t_i e'' lo stato finale di min(D); //setto lo stato finale di min(D), t_i = B_i
}

foreach( (B_i, a, B_j) / esiste s_i in B_i, s_j in B_j / che move_d(s_i, a) = s_j){
    //per ogni tupla (stato, arco, stato) faccio la rispettiva transizione in min(D)
    setto una transizione temporanea in min(D) da t_i a t_j secondo il simbolo a;
}

foreach(dead state t_i){ //uno stato che non potra' mai arrivare in un finale
    rimuovere t_i e tutte le transizioni da/verso t_i;
}

tutti i temporanei residui (sia stati che transizioni) sono gli stati e le transizioni
di min(D);
  
```

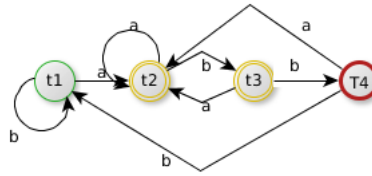
---

Complessità  $O(n \lg n)$ .

Un **dead state** é uno stato che non può essere raggiunto, nel nostro caso anche sink é un dead state.

### 6.6.1 Esempio

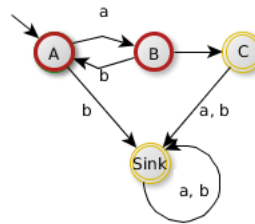
Arrivato qua:  $t_1 = \{ A C \}$ ,  $t_2 = \{ B \}$ ,  $t_3 = \{ D \}$ ,  $t_4 = \{ E \}$ , applico la minimizzazione del DFA.



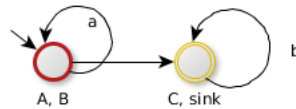
### 6.6.2 Esempio



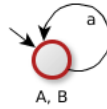
Aggiungo il nodo sink (se richiesta fn transizione completa)



Ho le partizioni  $\{A, B\}$ ,  $\{C, \text{sink}\}$ , applico partition refinement ma sono già partizionati correttamente.

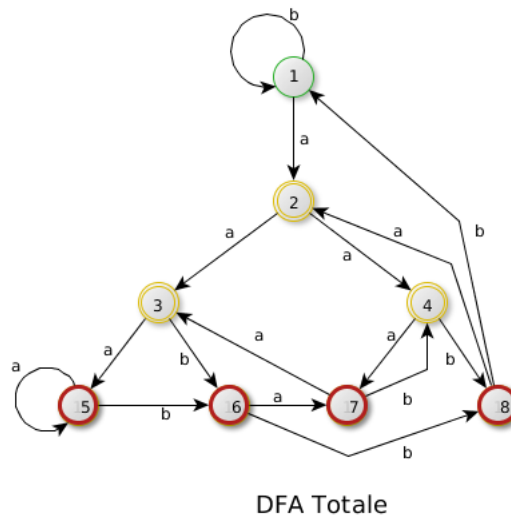
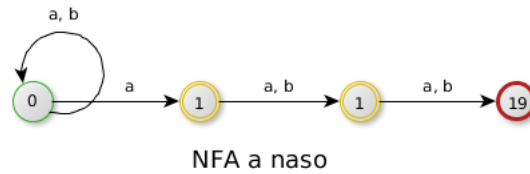
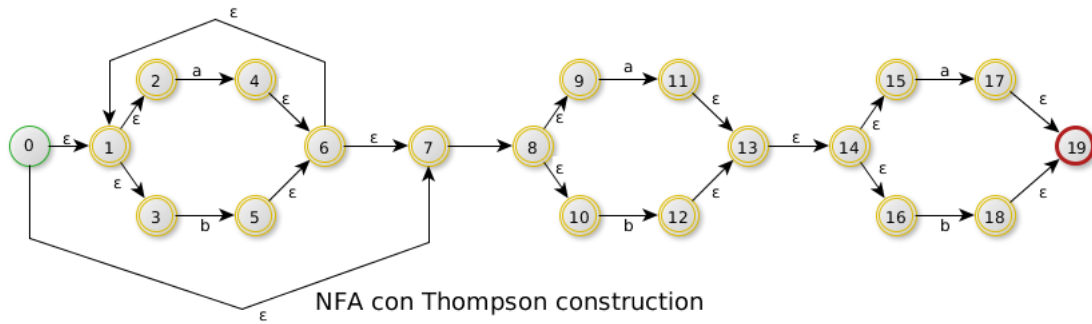


Visto  $\{C, \text{sink}\}$  un dead state per il grafo, posso eliminarlo



### 6.6.3 Esempio

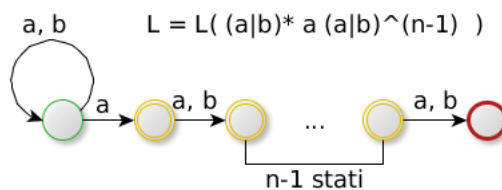
Sia  $r = (a|b) * a(a|b)(a|b)$ , per determinare il minimo DFA di riconoscimento di  $L(r)$  posso usare Thompson e spararmi in faccia o andare a naso.



#### 6.6.4 Lemma

Lemma:  $\forall n \in \mathbb{N}^+, \exists$  un NFA con  $(n+1)$  stati il cui minimo DFA equivalente ha almeno  $2^n$  stati.

Dim:



Per assurdo suppongo esista un DFA minimo con meno di  $2^n$  stati.

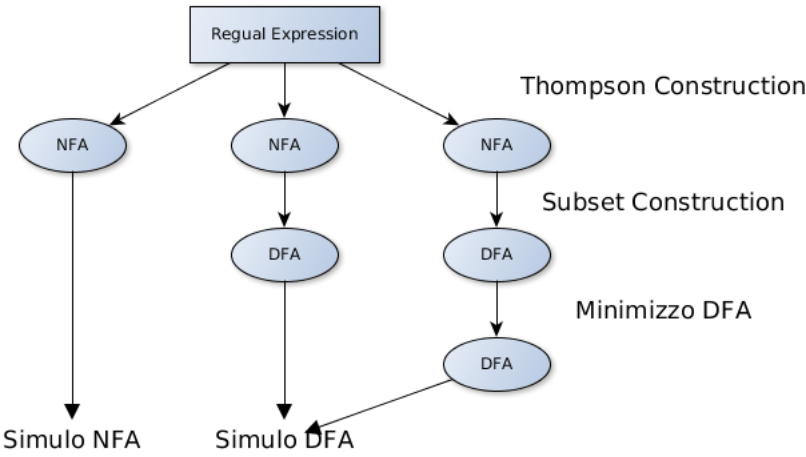
Osservo che esistono  $2^n$  possibili parole di lunghezza  $n$  con simboli  $\{a, b\}$  (osservazione indipendente dal grafo, tutte le possibili combinazioni).

$\Rightarrow \exists w_1 \neq w_2 / |w_1| = |w_2| = n$  e il loro riconoscimento conduce allo stesso stato del DFA.

$\Rightarrow$  esiste almeno una posizione per cui  $w_1$  e  $w_2$  differiscono (considero quella più a destra).

$w_1 = w'_1 a x$ ,  $w_2 = w'_2 b x$  iniziano diversi ma finiscono con  $x$  entrambe. Considero  $w'_1 = w'_1 a b^{n-1}$   $w'_2 = w'_2 b b^{n-1}$  raggiungo uno stato finale  $t$ ; la seconda parola però non appartiene al linguaggio, nonostante possa comunque raggiungere lo stato  $t$ . Pertanto contraddiciamo che  $t$  sia finale. Quindi sono ad un assurdo, il DFA minimo deve avere per forza almeno  $2^n$  stati.

6.7 Ricapitolando



Algoritmo	Complessità nello spazio	Complessità nel tempo
Thompson Construction	$O( r )$	$O( r ) \parallel O(n_n + m_n)$ , [nel caso di $\varepsilon$ -closure]
Simulazione NFA	-	$O( w (n_n + m_n))$
Subset Construction	-	$O(n_d  A (n_n + m_n))$ , [spesso $ A  = O( r )$ ]
Minimizzazione DFA	-	$O(n_d \lg(n_d))$
Simulazione DFA	-	$O( w )$

## Chapter 7

# Linguaggi Regolari o Lineari

### 7.1 Da DFA a Grammatica Regolare

Una grammatica é regolare se le produzioni sono della forma:  $A \rightarrow \beta$ , con  $\beta$  terminale non-terminale, viceversa o terminale e basta.

$$\begin{array}{ll} A \rightarrow aB & B \rightarrow b \quad \text{grammatica lineare destra} \\ B \rightarrow Ab & A \rightarrow a \quad \text{grammatica lineare sinistra} \end{array}$$

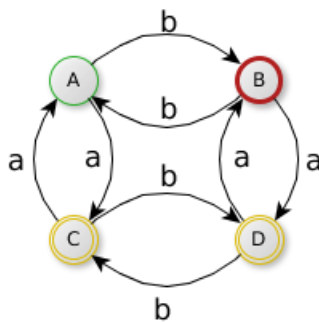
In pratica é la diretta trascrizione di un DFA in regex!

Dato un DFA D voglio trovare una grammatica regolare G tale che  $L(G) = L(D)$ . Se ho una transizione  $A \rightarrow B$  con una a-transizione diventerá  $A \rightarrow aB$ . Segno il nome del nodo che sto considerando prima della freccia e, dopo la freccia, il non terminale ed il nodo destinazione. Se ho un nodo foglia C avró  $C \rightarrow \varepsilon$ .

Se invece ho una grammatica regolare e voglio trovare un DFA D /  $L(G) = L(D)$ , faccio il procedimento inverso a prima; se ottengo un NFA basta fare Subset Construction.

#### 7.1.1 Esempio

$L = \{w / w \in \{a, b\}^* \&\& |a| \text{ pari}, |b| \text{ dispari}\}$ , L é regolare?



Sí é regolare.

#### 7.1.2 Considerazioni

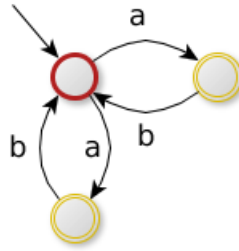
Regular expression, NFA e DFA hanno la stessa potenza espressiva, sono solo notazioni diverse.

Dal DFA posso sempre costruirmi una **grammatica regolare** equivalente.

Non devo fare l'errore di assumere che qualsiasi grammatica sia esprimibile attraverso un NFA.

### 7.1.3 Esempio

$L = \{w / w \in \{a, b\}^* \wedge |a| = |b|\}$ ,  $L$  é regolare?



Non potrà mai essere regolare, per il pumping lemma per i linguaggi regolari.

## 7.2 Pumping Lemma per Linguaggi Regolari

Sia  $L$  un linguaggio regolare  $\implies \exists p \in \mathbb{N}^+ / \forall z \in L / |z| > p, \exists u, v, w / :$

- i)  $z = uvw \wedge$
- i)  $|uw| \leq p \wedge$
- i)  $|v| > 0, \forall i \in \mathbb{N}, uv^i w \in L$

### 7.2.1 Dimostrazione

$L$  é regolare quindi può essere riconosciuto da un automa a stati finiti.

Sia  $D$  il min DFA /  $L(D) = L$ ,  $p = |S|$ , allora i cammini più lunghi che non passano più di una volta nel medesimo stato hanno al più lunghezza  $(p-1)$ .

Allora se  $z \in L$  con  $|z| > p$ ,  $z$  é riconosciuta tramite un cammino che attraversa almeno due volte uno stato.

### 7.2.2 Negazione testi Pumping Lemma per linguaggi regolari

$\forall p \in \mathbb{N}^+ / \exists z \in L / |z| > p. \forall uvw z = uvw \wedge |uw| \leq p \wedge |v| > 0) \implies \exists i \in \mathbb{N} / uv^i w \notin L)$

Lemma:  $L = \{a^n b^n / n \geq 0\}$  non é regolare

Dim: Assumo per assurdo che  $L$  sia regolare, dato  $p$  un qualunque numero positivo e  $z = a^p b^p$  allora  $\forall uvw / z = uvw \wedge |uw| \leq p \wedge |v| > 0$  (la stringa  $v$  contiene solo (e almeno una) 'a').

allora  $uv^2w$  ha la forma  $a^{p+k}b^p$ ,  $k > 0$  allora  $uv^2w \notin L$  il che contraddice il Pumping Lemma per linguaggi regolari.

[ $v$  può assumere  $a^i$ ,  $a^i b^j$ ,  $b^i$ , in ogni caso per qualunque potenza di  $v$  non appartiene ad  $L$  (con  $(a^i b^j)^2$  ho )]

### 7.2.3 Esercizio

$L_1 = \{w / w \in \{a, b\}^* \text{ e contiene almeno una occorrenza di "aa" }\}$

$L_1: A \rightarrow aA | bA | aB$   
 $B \rightarrow aC$   
 $C \rightarrow aC | bC | \varepsilon$

$L_2 = \{ww / w \in \{a, b\}^*\}$   
 non é libero per il pumping lemma (già dimostrato), quindi non é regolare.

$\neg L \text{ Libero} \implies \neg L \text{ Regolare}$   
 $\neg L \text{ Libero} \not\iff \neg L \text{ Regolare}$

$$L_3 = \{ww^r \mid w \in \{a,b\}^*\}$$

Non é regolare ma libero.  $z = a^p b^p b^p a^p \in L_3$  visto che  $uv < p$ ,  $uv$  é composta solo da a  $uv^i w = a^p b^{2p} a^p \notin L_3$  quindi non può essere regolare.

[ $w^r$  é w rovesciato]

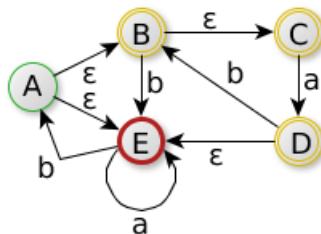
### 7.2.4 Esercizi di esame

Sia  $N_1$  lo NFA con stato iniziale A e finale E con la seguente funzione di transizione:

	$\varepsilon$	a	b
A	$\{B, E\}$	$\emptyset$	$\emptyset$
B	$\{C\}$	$\emptyset$	$\{E\}$
C	$\emptyset$	$\{D\}$	$\emptyset$
D	$\{E\}$	$\emptyset$	$\{B\}$
E	$\emptyset$	$\{E\}$	$\{A\}$

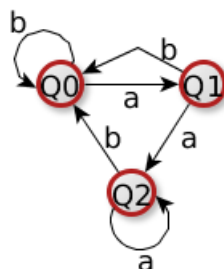
1)  $aa \in L(N_1)$ ?

2) D é il DFA ottenuto da  $N_1$ , per subset construction, Q stato iniziale di D,  $Q_{ab}$  lo stato di D che si raggiunge da Q tramite il cammino ab. Dire a quale sottoinsieme degli stati di  $N_1$  corrisponde  $Q_{ab}$ .



1) Sí facendo  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow E$  2) Facendo la subset construction:

	a	b
$Q0 = \{A, B, C, D\}$	Q1	Q0
$Q1 = \{D, E\}$	Q2	Q0
$Q2 = \{E\}$	Q2	Q0





## Chapter 8

# Analisi Sintattica

$$\begin{aligned} S &\rightarrow cAd \\ A &\rightarrow ab|a \end{aligned}$$

### 8.1 Parsing Top-down

Parto dal starting symbol ed espando le derivazioni dando priorità alle derivazioni più a sinistra. Cerco quindi di ricostruire una derivazione leftmost della stringa  $w$  data in input.

$$\begin{aligned} w\$, \$ &\notin V \\ w &= cabd \end{aligned}$$

Per ricostruire la parola  $w$  parto dalla prima derivazione  $S \rightarrow cAd$  derivo la  $A$  più a sinistra (leftmost) e posso scegliere fra  $a$  ed  $ab$ ; scelgo  $a$  e mi accorgo che ho sbagliato, torno in dietro e scelgo  $ab$ .

### 8.2 Parsing Top-down predittivo (o non ricorsivo)

Cambio la grammatica sopra in:

$$\begin{aligned} S &\rightarrow cAd \\ A &\rightarrow aB \\ B &\rightarrow b|\varepsilon \end{aligned}$$

$$S \rightarrow cAd \rightarrow caBd \rightarrow \text{vedo che mi serve una } b, \text{ escludo a priori } \varepsilon$$

### 8.3 Grammatica LL(1)

Le grammatiche LL(1) sono un subset delle grammatiche libere.

prima **L** leggiamo la input string da sinistra (left)

seconda **L** ricostruiamo una leftmost derivazione

(1) decidiamo quale operazione effettuare guardando un solo simbolo in input

### 8.4 First

Data una generica  $\alpha \in V^*$  per  $G=(V, T, S, P)$ ,  $\text{first}(\alpha)$  é l'insieme dei simboli terminali  $b$  tali che  $\alpha \Rightarrow bv$ . Inoltre se  $\alpha \Rightarrow \varepsilon$  allora  $\varepsilon \in \text{first}(\alpha)$

#### 8.4.1 Esercizio

$$\begin{aligned} S &\rightarrow A|B \\ A &\rightarrow a|C \\ C &\rightarrow \varepsilon \end{aligned}$$

Allora  $\text{first}(A) = \{a, \varepsilon\}$  ( $\varepsilon$  perché posso fare  $A \Rightarrow C \Rightarrow \varepsilon$ ).

#### 8.4.2 Esercizio

$$\begin{aligned} S &\rightarrow A|B \\ A &\rightarrow a|C \end{aligned}$$

$C \rightarrow bB$

Allora  $\text{first}(A) = \{a, b\}$  (b perché posso fare  $A \Rightarrow C \Rightarrow bB$ , ma B non esiste).

### 8.4.3 Esercizio

$S \rightarrow A|B$

$A \rightarrow a|C$

$C \rightarrow bB$

$B \rightarrow c$

Allora  $\text{first}(A) = \{a, b\}$  ( $A \Rightarrow C \Rightarrow bB \Rightarrow bc$ , ma tengo solo il primo simbolo (b))

### 8.4.4 Esercizio

$A \rightarrow A|C$

$C \rightarrow bB|\varepsilon$

$B \rightarrow c$

Allora  $\text{first}(A) = \{a, b, \varepsilon\}$

### 8.4.5 Algoritmo calcolo dei first

$G=(V,T,S,P)$  Sia  $X \in V$ . L'insieme  $\text{first}(X)$  viene calcolato come segue:

- 1) inizializzo  $\text{first}(X)$  vuoto  $\forall X \in V$
- 2) se  $X \in T$  allora  $\text{first}(X) = \{X\}$
- 3) se  $X \rightarrow \varepsilon \in P$  allora aggiungere  $\varepsilon$  ai  $\text{first}(X)$
- 4) se  $X \rightarrow Y_1 \dots Y_n \in P$ , con  $n \geq 1$  allora uso la seguente procedura:

---

```

j = 1;
while(j <= n){
    aggiungere ai first(X) ogni b tale che b in first(Yj)
    if(epsilon in first(Yj)){
        j++;
    } else {
        break;
    }
}

if(j == n+1){
    aggiungere epsilon ai first(X);
}

```

---

### 8.4.6 Esercizio

$E \rightarrow TE'$

$E' \rightarrow +TE'|\varepsilon$

$T \rightarrow FT'$

$T' \rightarrow *FT'|\varepsilon$

$F \rightarrow (E)|id$

First:

$E = \{id, ()$  ovviamente ha gli stessi first di T per  $E \rightarrow TE'$

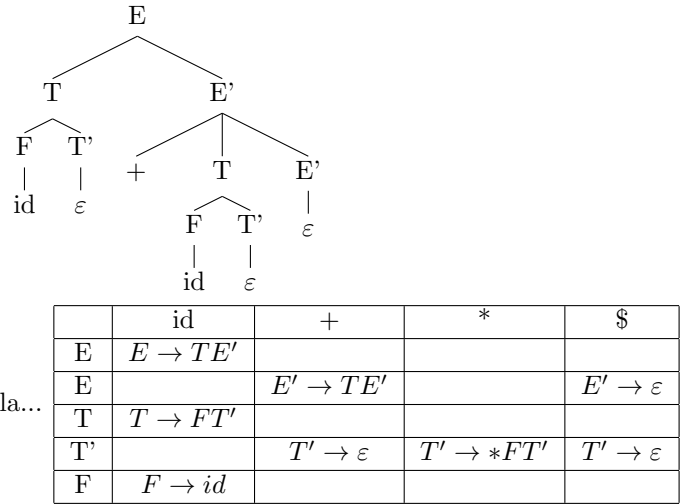
$E' = \{+, \varepsilon\}$

$T = \{id, ()$  ha gli stessi first di F per  $T \rightarrow FT'$

$T' = \{*, \varepsilon\}$

$F = \{id, ()$

Per generare `id + id`:



Mancano le parentesi fra i terminali nella tabella...

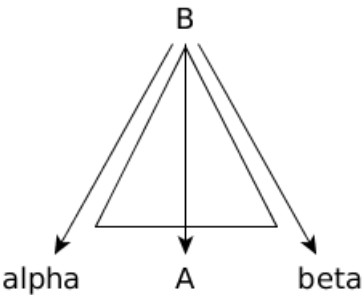
8.5 Follow

$\forall A \in V \setminus T$ , `follow(A)`:

```
follow(A) = emptySet per ogni A in (V \ T);
follow(S).push('$');

repeat{
  foreach(B -> alpha A beta in P){
    if(beta == epsilon){
      follow(A).push(follow(B));
    } else {
      follow(A).push(first(beta) \ epsilon);
      if(epsilon in first(beta)){
        follow(A).push(follow(B));
      }
    }
  }
} until (saturazione);
```

Nei follow non potr  mai avere  $\epsilon$



Quindi in pratica i `follow(A)` li trovo guardando le produzioni con A dopo la freccia.  $\alpha$  e  $\beta$  sono espressioni con lunghezza qualsiasi mentre A   un non terminale.

Se tipo ho `abCdEFGhi` come lo spacco in  $\alpha B \beta$ ? Vai in ordine, se vuoi calcolarti i `follow` di C allora C sar  la tua B.

- Calcolo `follow(B)`, guardo produzioni  $A \rightarrow \alpha B \beta$
- Metti \$ per tutti i non terminali
- Per le produzioni  $A \rightarrow aB$  tutti i `follow` di A vanno in B
- Per  $A \rightarrow aBb$  tutti i `first(b)` meno epsilon vanno in `follow(B)`
- Per  $A \rightarrow aBb$  con epsilon appartenente ai `first(b)` allora aggiungi anche i `follow(A)` ai `follow(B)`

### 8.5.1 Esempio

$S \rightarrow aABb$   
 $A \rightarrow Ac|d$   
 $B \rightarrow CD$   
 $C \rightarrow e|\varepsilon$   
 $D \rightarrow f|\varepsilon$

	First	Follow
$S =$	$\{a\}$	$\{\$ \}$
$A =$	$\{d\}$	$\{e, f, b \text{ (da } S \rightarrow aABb), c \text{ (da } A \rightarrow Ac)\}$
$B =$	$\{e, f, \varepsilon\}$	$\{b \text{ (da } S \rightarrow aABb)\}$
$C =$	$\{a, \varepsilon\}$	$\{f \text{ (da } B \rightarrow CD)\}$
$D =$	$\{f, \varepsilon\}$	$\{\}$

Poi i follow(B) vanno in D perché ho  $B \rightarrow CD$  e anche in C perché D può essere  $\varepsilon$ .

### 8.5.2 Esempio

$S \rightarrow aA|bBc$   
 $A \rightarrow Bd|Cc$   
 $B \rightarrow e|\varepsilon$   
 $C \rightarrow f|\varepsilon$

	First	Follow
$S =$	$\{a, b\}$	$\{\$ \}$
$A =$	$\{e, d, f, c\}$	$\{\$, (?)\}$ Occhio che nei first di A non ci va $\varepsilon$ perché ci può essere dalla
$B =$	$\{e, \varepsilon\}$	$\{c, d\}$
$C =$	$\{f, \varepsilon\}$	$\{c\}$

sostituzione con B ma subito dopo hai d quindi in questo caso il first é d

### 8.5.3 Esempio

$E \rightarrow TE'$   
 $E' \rightarrow +TE'|\varepsilon$   
 $T \rightarrow FT'$   
 $T' \rightarrow *FT'|\varepsilon$   
 $F \rightarrow (E)|id$

	First	Follow
$E =$	$\{id, (\}$	$\{\$, )\}$
$E' =$	$\{+, \varepsilon\}$	$\{\}$ ed eredita i follow di E
$T =$	$\{id, (\}$	$\{+\}$ ed eredita i follow di E, E'
$T' =$	$\{*, \varepsilon\}$	$\{\}$ ed eredita i follow di T
$F =$	$\{id, (\}$	$\{*\}$ ed eredita i follow di T, T'

Quindi diventa:

$E =$	$\{id, (\}$	$\{\$, )\}$
$E' =$	$\{+, \varepsilon\}$	$\{\$, )\}$
$T =$	$\{id, (\}$	$\{+, \$, )\}$
$T' =$	$\{+, \varepsilon\}$	$\{+, \$, )\}$
$F =$	$\{id, (\}$	$\{*, +, \$, )\}$

Parsing di “ $id + id * id\$$ ”  $E \rightarrow TE' \rightarrow FT'E' \rightarrow idT'E' \rightarrow \dots$

## 8.6 Tabella di parsing

Nella cella  $[A, b]$  metto le produzioni  $A \rightarrow \beta / b \in first(\beta)$ . Se epsilon appartiene ai first devi anche controllare che il terminale sia contenuto nei follow del non terminale

Quindi in  $[A, b]$  metto  $(A \rightarrow \beta) \in P / b \in first(\beta)$  e se  $\varepsilon \in first(\beta) \implies b \in follow(A)$ .

### 8.6.1 Algoritmo di costruzione della tabella di parsing predittivo top-down

input  $G=(V,T,S,P)$   
 output Tabella T di parsing predittivo top-down se  $G$  é LL(1)

---

```
foreach((A -> alpha) in P){
  forall b in first(alpha), poniamo A -> alpha in T[A, b];
  if(epsilon in first(alpha)){
    forall x in follow(A) poniamo A -> alpha in T[A, x];
  }
}

poniamo error() in tutte le entry di T che sono rimaste vuote;

if(la tabella non ha entry multiply-defined)
  G e' LL(1);
```

---

### 8.6.2 Esempio

$E \rightarrow E + T | T$   
 $T \rightarrow T * F | T$   
 $F \rightarrow (E) | id$

	First	Follow		id	
$E =$	$\{ (, id \}$	$\{ \$, +, ) \}$	$\{ \$, +, ) \}$	$E \rightarrow E + T$	Guardo se é LL(1)
$T =$	$\{ (, id \}$	$\{ * \}$ ed eredita i follow di E	$\{ \$, +, *, ) \}$	$E \rightarrow T$	
$F =$	$\{ (, id \}$	$\{ \}$ ed eredita i follow di T	$\{ \$, +, *, ) \}$		

Pur non sviluppando tutta la tabella si vede che ci sono entry multiple **quindi non é LL(1)**.

## 8.7 Algoritmi di Parsing

input buffer  $w\$$   
 stack bottom  $[\$ \quad ]$  top  
 parsing table con tante righe quante non terminali, tante colonne quante terminali ( $\$$  incluso)  
 in ogni cella metto un'eventuale trasformazione o "error "

### 8.7.1 Algoritmo di parsing non-ricorsivo

input stringa  $w$ , tabella parsing non ricorsivo T, per  $G$   
 output derivazione leftmost di  $w$  se  $w \in L(G)$ , error() altrimenti

---

```
//non terminali e gli stati del grafo sono la stessa cosa
//init
buffer = {w$}; //meglio $w^r
stack.push($S); //stack di terminali e non terminali

let b = buffer.pop() //il primo simbolo di w
let x = stack.top()

while(x != $){
  if(x == b){ //ho il carattere giusto e lo brucio
    stack.pop(x);
    b = buffer.nextChar();
  } else if(x e' terminale){
    //sono arrivato ad un terminale diverso da quello della stringa
    error();
  } else if(T[x,b] contiene x -> Y1...Yn){ //x e' un non terminale (nello stack)
    //se la tabella di parsing contiene una entry
    cout << x -> Y1...Yn;
    stack.pop(x);
    stack.push(Yn...Y1); //li pusha al contrario
    //se ho una epsilon non la pusho
  }
}
```

```
x = stack.top()
}
```

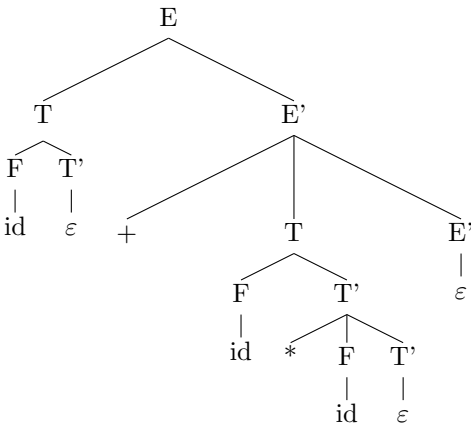
8.7.2 Esempio

```
E → TE'
E' → +TE'|ε
T → FT'
T' → *FT'|ε
F → id
```

First and Follow		
Non terminale	First	Follow
E	id	\$
E'	+, ε	\$
T	id	+, \$
T'	*, ε	+, \$
F	id	+, *, \$

Tabella di parsing				
	id	+	*	\$
E	$E \rightarrow TE'$			
E'		$E' \rightarrow +TE'$		$E' \rightarrow \epsilon$
T	$T \rightarrow FT'$			
T'		$T' \rightarrow \epsilon$	$T' \rightarrow *FT'$	$T' \rightarrow \epsilon$
F	$F \rightarrow id$			

Passi dell'algoritmo		
pila	input	output
\$ <u>E</u>	<u>id</u> +id * id \$	$E \rightarrow TE'$
\$ E <u>T'</u>		$T \rightarrow FT'$
\$ E T' <u>F</u>		$F \rightarrow id$
\$ E T' <u>id</u>		
\$ E' <u>T'</u>	<u>+</u> id * id \$	$T' \rightarrow \epsilon$
\$ <u>E'</u>		$E' \rightarrow TE'$
\$ E' T <u>+</u>	<u>id</u> *id \$	
\$ E' <u>T</u>		
	...Avanti così	



8.7.3 Esercizio

```
S → aA|bB
A → c
B → d
```

```
w = ac$

Parsing: S ==> aA ==> ac
```

First and Follow

Non terminali	First	Follow
S	a, b	\$
A	c	\$
B	d	\$

Tabella di parsing con le produzioni di G

	a	b	c	d	\$
S	$S \rightarrow aA$	$S \rightarrow bB$			
A			$A \rightarrow c$		
B				$B \rightarrow d$	

## 8.8 Grammatica Ricorsiva Sinistra

Una grammatica G esibisce **left recursion** se  $\exists A \in (V \setminus T) / A \rightarrow^* A\alpha, \alpha \in V^*$

La left recursion é immediata se G ha almeno una produzione del tipo  $A \rightarrow A\alpha$  (ovvero se succede nel passato). Nell'esempio di prima c'era left recursion immediata nei primi due casi ( $E \rightarrow E\alpha \wedge T \rightarrow T\alpha$ ).

Proposizione: ogni grammatica che esibisce left recursion **non é LL(1)**.

Proposizione: ogni grammatica che nella tabella di parsing ha piú di una entry in una cella **non é LL(1)**. Altrimenti lo é.

Se una grammatica é LL(1)  $\implies$  non da conflitti nella tabella di parsing  $\implies$  é una grammatica libera.

$$A \rightarrow B$$

$$B \rightarrow Aa$$

Esempio di left recursion in piú passi.

## 8.9 Eliminazione Left Recursion immediata

### 8.9.1 Esempio

$A \rightarrow A\alpha|\beta$ , con  $\beta \neq A \wedge \alpha \neq \varepsilon$  diventa:

$$A \rightarrow \beta A'$$

$$A' \rightarrow \alpha A'|\varepsilon$$

Piú in generale  $A \rightarrow A\alpha_1|\dots|A\alpha_n|\beta_1|\dots|\beta_n$ ,  $\beta_1, \dots, \beta_n \neq A$ ,  $\alpha_1, \dots, \alpha_n \neq \varepsilon$  diventa

$$A \rightarrow \beta_1 A'|\dots|\beta_n A'$$

$$A' \rightarrow \alpha_1 A'|\dots|\alpha_n A'|\varepsilon$$

Ho introdotto A' nuovo non terminale in G.

### 8.9.2 Esempio

Eliminare Left Recursion immediata da:

$$E \rightarrow E + T | T$$

$$T \rightarrow T * F | F$$

$$F \rightarrow (E) | id$$

Diventa:

$$E \rightarrow TE'$$

$$E' \rightarrow +TE'|\varepsilon$$

$$T \rightarrow FT'$$

$$T' \rightarrow *FT'|\varepsilon$$

$$F \rightarrow (E) | id$$

	First	Follow
$E =$	$\{id, (\}$	$\{\$, )\}$
$E' =$	$\{+, \varepsilon\}$	$\{\$, )\}$
$T =$	$\{id, (\}$	$\{+, \$, )\}$
$T' =$	$\{*, \varepsilon\}$	$\{+, \$, )\}$
$F =$	$\{id, (\}$	$\{*, +, \$, )\}$

**Tabella di parsing**

	id	+	*	(	)	\$
E	$E \rightarrow TE'$			$E \rightarrow TE'$		\$
E'		$E' \rightarrow +TE'$			$E' \rightarrow \varepsilon$	$E' \rightarrow \varepsilon$
T	$T \rightarrow FT'$			$T \rightarrow FT'$		\$
T'		$T' \rightarrow \varepsilon$	$T' \rightarrow *FT'$		$T' \rightarrow \varepsilon$	$T' \rightarrow \varepsilon$
F	$F \rightarrow id$			$F \rightarrow (E)$	)	\$

I campi vuoti sono error, non ci sono multiple entries quindi é LL(1).

**8.9.3 Esempio**

Eliminare Left Recursion immediata da:

$$E \rightarrow E + E \mid E * E \mid (E) \mid id$$

Diventa:

$$E \rightarrow (E)E' \mid idE'$$

$$E' \rightarrow +EE' \mid *EE' \mid \varepsilon$$

(Parte della tabella tanto non serve tutta)

	First	Follow
$E =$	$\{id, (\}$	$\{\$, ), +, *\}$ ed i follow di $E'$
$E' =$	$\{+, *, \varepsilon\}$	$\{\}$ ed i follow di $E$

Visto che ho almeno una entry multipla la grammatica non é LL(1).

L'eliminazione della left recursion ci ha dato un grammatica che non é comunque LL(1). Nel nostro caso é anche ambigua.

Lemma: L'eliminazione della left recursion NON elimina l'ambiguitá.

**8.10 Left Factoring**

$$S \rightarrow aSb \mid ab$$

	a	b	\$
S	$S \rightarrow aSb$ $S \rightarrow ab$		

La grammatica non é LL(1).

Possiamo però fattorizzare le produzioni considerando una parte che é a sinistra ed é comune a piú produzioni, per ottenere una **grammatica LL(1)** che genera lo stesso linguaggio.

$$S \rightarrow aA'$$

$$A' \rightarrow Sb \mid b$$

**DEF**

Una grammatica G può essere fattorizzata a sinistra quando esistono almeno due produzioni  $A \rightarrow \alpha\beta_1$  e  $A \rightarrow \alpha\beta_2$  per qualche  $A \in V \setminus T$ ,  $\alpha, \beta_1, \beta_2 \in V^* \wedge \alpha$  non comincia per A.

**DEF**

G può essere fattorizzata a sinistra se:  $A \rightarrow \alpha\beta_1$ ,  $A \rightarrow \alpha\beta_2 \in P$  con  $\alpha, \beta_1, \beta_2 \in V^*$ ,  $\alpha$  non ha A come primo simbolo,  $A \in V \setminus T$

**Lemma**

Se G può essere fattorizzata a sinistra allora **G non é LL(1)**.

**8.11 Algoritmo di fattorizzazione a sinistra**

```
foreach(A in V \ T){
    trovare il prefisso piu lungo comune a due o piu produzioni per A, chiamato alpha
    if(alpha != epsilon){
        sostituire A -> alpha beta_1 | ... | alpha beta_n | Y_1 | ... | Y_k
    }
}
```



```
    con A -> alpha A' | Y_1 | Y_k
  con A' -> beta_1 | ... | beta_n e A' nuovo simbolo
}
```

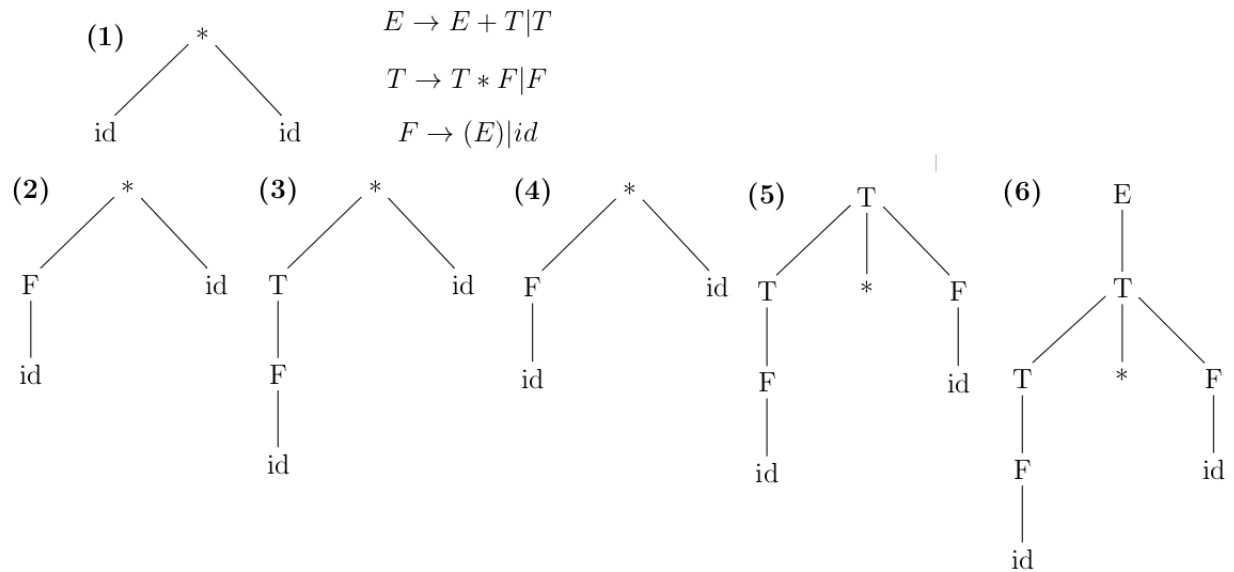
---

manca roba

## Chapter 9

# Parsing Bottom Up (Zampedri)

The following sequence of tree snapshots illustrates a bottom-up parse of the token stream  $\text{id} * \text{id}$ , with respect to the expression grammar



Riduzione:  $\text{id} * \text{id}, F * \text{id}, T * \text{id}, T * F, T, E$   
 Derivazione:  $E \rightarrow T \rightarrow T * F \rightarrow T * \text{id} \rightarrow F * \text{id} \rightarrow \text{id} * \text{id}$

### 9.1 Reductions

La **riduzione** é l'operazione inversa della **derivazione**. Posso pensare al parsing bottom up come al processo di riduzione di una stringa  $w$  allo start symbol della grammatica. In ogni step di riduzione una sottostringa che matcha con il body di una produzione viene ridotta con la testa della produzione.

Le scelte critiche sono quando ridurre e cosa ridurre.

### 9.2 Handle Pruning

Chiamo handle una sottostringa che matcha con il body di una produzione, e la sua riduzione é un passo inverso, al contrario, di una rightmost derivation.

Right Sentential Form	Handle	Reducing Production
$\text{id}_1 * \text{id}_2$	$\text{id}_1$	$F \rightarrow \text{id}$
$F * \text{id}_2$	$F$	$T \rightarrow F$
$T * \text{id}_2$	$\text{id}_2$	$F \rightarrow \text{id}$
$T * F$	$T * F$	$E \rightarrow T * F$

### 9.3 Shift reduce parsing

È una forma di bottom up parsing in cui mi appoggio ad uno stack contenente i simboli della grammatica e un buffer per la input string da parsare.

```
//init
stack = $;
buffer = w$;
//faccio uno scan da sx a dx e shifto simboli dal buffer allo stack
//quando nello stack posso fare una riduzione sostituisco
//vado avanti finche' non ho un error o finisce il buffer
```

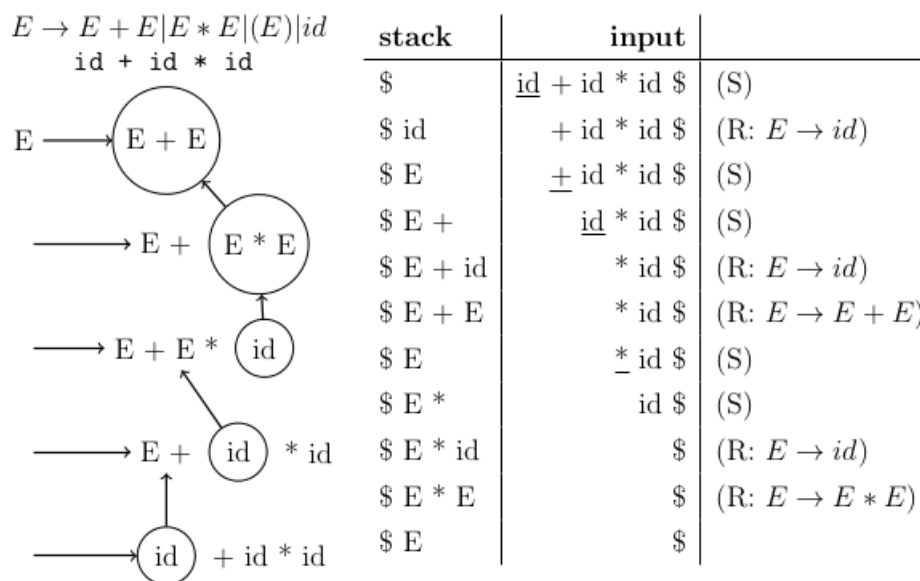
Sembra che qualsiasi stringa possa essere parsata, basta continuare a shiftare???

	Stack	Input	Action
	\$	id <sub>1</sub> * id <sub>2</sub> \$	shift
id <sub>1</sub> * id <sub>2</sub>	\$ id <sub>1</sub>	* id <sub>2</sub> \$	reduce by F → id
$E \rightarrow E + T \mid T$	\$ F	* id <sub>2</sub> \$	reduce by T → F
$T \rightarrow T * F \mid F$	\$ T	* id <sub>2</sub> \$	shift
$F \rightarrow (E) \mid id$	\$ T *	id <sub>2</sub> \$	shift
	\$ T * id <sub>2</sub>	\$	reduce by F → id
	\$ T * F	\$	reduce by T → T * F
	\$ T	\$	reduce by E → T
	\$ E	\$	accept

Ho **shift** quando passo un simbolo dal buffer allo stack, **reduce** quando applico una riduzione sul top dello stack (mai inside), **accept** se sono in fondo al buffer e ho quindi parsato correttamente la stringa, **error** nol va!

L'algoritmo shift reduce non funziona per tutte le grammatiche, può essere che in certi casi mi trovi in situazioni dove non so decidere se fare shift o reduce o non so quale reduce scegliere (reduce conflicts).

### 9.3.1 Esempio



## 9.4 LR parsing

	L	left to right input scan
Il metodo piú usato é LR(k) parsing con	R	rightmost derivation costruita inversamente
	(k)	numero di input symbol lookahead messi per prendere le decisioni

Se ometto  $k$  assumo che sia  $k = 1$  ( $LR = LR(1)$ ). Una grammatica é  $LR(1)$  se capace di parsare in shift reduce le stringhe (riconosce gli handles sul top dello stack).

### 9.4.1 LR(0) Automaton

Per prendere decisioni critiche mi serve tener traccia dello stato in cui mi trovo nel parsing. Per rappresentare gli stati uso gli items; un item é una produzione con un punto:  $A \rightarrow XYZ$  codifica 4 items:  $A \rightarrow .XYZ$ ,  $A \rightarrow X.YZ$ ,  $A \rightarrow XY.Z$ ,  $A \rightarrow XYZ.$ . La produzione  $A \rightarrow \varepsilon$ , mi produce solo un item  $A \rightarrow .$ .

Intuitivamente  $A \rightarrow X.YZ$  mi dice che ho già visto  $X$  ma non  $YZ$ .

**canonical LR(0) collection** é un set di item LR(0) che mi permettono di costruire DFA in grado di prendere decisioni precise per il parsing; in particolare ogni stato nel automa rappresenta un set di item del canonical LR(0) collection.

Per costruire l'automa definisco una grammatica aumentata e le funzioni CLOSURE e GOTO. Data  $G$  con start symbol  $S$ ,  $G'$  é una grammatica aumentata di  $G$  ed ha la produzione  $S' \rightarrow S$  (start symbol  $S'$ ). Questo serve essenzialmente per poter annunciare la fine del parsing.

#### Closure of Item Sets

Dato  $I$  set di item per  $G$ ,  $CLOSURE(I)$  é il set degli item costruito da  $I$  /

- i) inizialmente  $closure(I) = I$
- ii) se  $(A \rightarrow \alpha.B\beta) \in closure(I) \wedge (B \rightarrow \gamma) \in P$  aggiungi  $B \rightarrow .\gamma$  a  $closure(I)$  (se non già presente).

Vado avanti ricorsivamente finché non ho aggiunto tutto quello che potevo.

---

#### Example.

Consider the augmented expression grammar:

$$E' \rightarrow E$$

$$E \rightarrow E + T | T$$

$$T \rightarrow T * F | F$$

$$E \rightarrow (E) | id$$

To see how closure is compute,  $E' \rightarrow E$  is put in  $CLOSURE(I)$  by rule (1). Since there is an  $E$  immediately to the right of a dot, we add the  $E$ -productions with dots at the left ends:  $E \rightarrow .E + T$  and  $E \rightarrow .T$ . Now, there is a  $T$  immediately to the right of a dot in the latter item, so we add  $T \rightarrow .T * F$  and  $T \rightarrow .F$ . Next, the  $F$  to the right of a dot forces us to add  $F \rightarrow .(E)$  and  $F \rightarrow .id$ , but no other items need to be added.

---

Sembra che  $E' \rightarrow E$  sia lo stesso di  $E' \rightarrow .E$ ; in pratica per ogni item guardo se ho un non terminale subito a destra del punto e casomai inserisco tutti gli item con tale simbolo in testa.

---

```

J = I;
repeat{
  foreach( [A -> alpha . B beta] in J)
    foreach( [B -> gamma] in G)
      if( [B -> .gamma] not in J)
        J.add( [B -> .gamma] );
} until (saturation) //nothing more can be added!

```

---

#### GOTO funtion

$GOTO(I, X)$ ,  $I$  set of items,  $X \in V$ ,  $\triangleq closure(\{[A \rightarrow \alpha X \beta] \mid [A \rightarrow \alpha.X\beta] \in I\})$ .

In pratica lo uso per definire le transizioni nell'automa LR(0); gli stati sono set di item e le transizioni sono definite dai GOTO(I, X) (dallo stato I per il simbolo X).

### 9.4.2 Esempio

$$I = \{[E' \rightarrow E.], [E \rightarrow E. + T]\} \quad \left| \quad G = \begin{array}{l} E' \rightarrow E \\ E \rightarrow E + T|T \\ T \rightarrow T * F|F \\ E \rightarrow (E)|id \end{array} \right.$$

$$GOTO(I, +) = \left[ \begin{array}{ll} [E \rightarrow E + .T], & \text{Mi arriva +, scarto } [E' \rightarrow E.], \text{ tengo l'altro'} \\ [T \rightarrow .T * F], & \text{Includo i primi item per le produzioni con T in testa} \\ [T \rightarrow .F], & \\ [F \rightarrow .(E)], & \text{Visto che ho } [T \rightarrow .F] \text{ includo gli item con F} \\ [F \rightarrow .id], & \end{array} \right|$$

## 9.5 Algoritmo generazione canonical collection C

Per trovare C, canonical collection of sets of LR(0) items for an augmented grammar G'.

---

```

C = [CLOSURE{S' -> S}]
repeat{
  foreach(I in C){ //set of item I
    foreach(X in V'){
      if(GOTO(I,X) != empty && not in C yet){
        C.add(GOTO(I,X));
      }
    }
  }
} until (saturation)

```

---

## 9.6 Simple LR (SLR)

SLR parsing consiste nella costruzione della grammatica dell'automa LR(0). Gli stati dell'automa sono set di item derivanti da C (canonical LR(0) collection) e le transizioni derivano dalla GOTO functions.

Lo start state dell'automa LR(0) é  $CLOSURE([S' \rightarrow .S])$  (S' start symbol di G' grammatica aumentata).

Per prendere decisioni, immaginando di arrivare con la stringa  $\gamma$  dallo stato 0 allo stato j; a questo punto posso shiftare il prossimo carattere a se j ha transizioni per a oppure ridurre. Gli item in j mi dicono cosa fare.

### 9.6.1 Esempio

$$G = \left[ \begin{array}{l} E \rightarrow E + T|T \\ T \rightarrow T * F|T \\ F \rightarrow (E)|id \end{array} \right.$$

Aumento la grammatica con  $E' \rightarrow E$ .

$$\text{Computo } CLOSURE(\{E' \rightarrow E\}) : I_0 = \begin{array}{l} E' \rightarrow .E, \\ E \rightarrow .E + T, \\ E \rightarrow .T, \\ T \rightarrow .T * F, \\ T \rightarrow .F, \\ F \rightarrow .(E), \\ F \rightarrow .id \end{array}$$

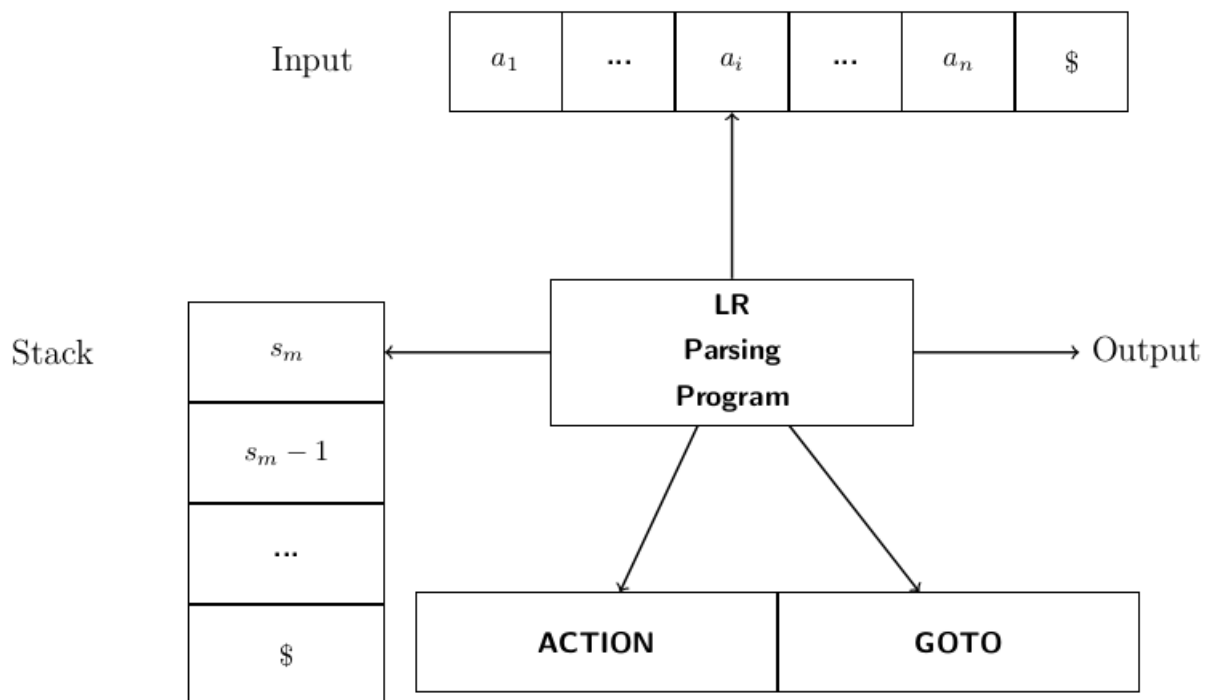
$$\text{Computo i sets } I_1 = GOTO(I_0, E) = \{E' \rightarrow E., E \rightarrow E. + T\}$$

$I_2 = GOTO(I_1, +) = \{E \rightarrow E + .T, T \rightarrow .T * F, T \rightarrow .F, F \rightarrow .(E), F \rightarrow .id\}$   
 Quindi l'automa inizia con una forma di questo genere:



## 9.7 The LR-Parsing Algorithm

An LR parser consists of an input, an output, a stack, a driver program, and a parsing table that has two parts (ACTION and GOTO).



The driver program is the same for all LR parsers; only the parsing table changes from one parser to another.

La differenza fra ACTION e GOTO é che le action sono applicate per input di terminali, GOTO per input di non terminali!

### 9.7.1 Structure of LR Parsing Table

La parsing table é strutturata in due parti: a parsing-action function **ACTION** and a goto function **GOTO**.  $ACTION[i, a], i \in States, a \in T \cup \{\$\}$  può assumere varie forme:

- **Shift**  $j$ ,  $j \in States$  (shifta un carattere a ma usa j per rappresentarlo);
- **Reduce**  $A \rightarrow \beta$  (riduce  $\beta$  ad A)
- **Accept**
- **Error**

La prossima mossa del parser sarà leggere il simbolo corrente  $a_i$  e lo stato in cima allo stack  $s_m$ . Guardo  $ACTION[s_m, a_i]$  nella parsing action table.

### 9.7.2 LR Parsing Algorithm

**Input** string w, LR-parsing table con ACTION e GOTO per la grammatica G  
**Output** gli step di riduzione bottom-up per w o un errore

---

```

stack.push(0); //start state 0
buffer.push(w$);
* ip = leftChar(w); //pointer sul buffer
repeat{
  n = stack.top();
  a = simbolo puntato da ip;
  if(T[n,a] == s_m){ //shift m
    push(a)
    push(m)
    move ip right
  } else if(T[n, a] = r_k con (k): A -> beta){ //reduce k
    pop 2*{|beta|} simboli;
    n' = stack.top();
    push(A);
    push m / T[A, n'] = g_m;
    cout << "A -> beta";
  } else if (T[n, a] == accept){
    accept();
  } else {
    error();
  }
} until (accept() || error());

```

---

### 9.7.3 Costruire SLR-Parsing Table

Il metodo SLR inizia con items LR(0) ed un automa LR(0). Poi aumento la grammatica G, mi trovo C, GOTO e ACTION.

**G' non é SLR se costruendo la parsing table ho dei conflitti.**

**Input** G' grammatica arricchita  
**Output** Parsing table o un errore

---

```

Define [I_0, ..., I_n] set items LR(0) per G'
Define lo stato i nella tabella (ie row i) dopo l'elemento I_i come segue:

* if (A -> alpha . a beta in I_i && GOTO(I_i, a) == I_j){
  T[i, a] = s_j; // shift corrisponde ad un cambio di stato
}
* if (A -> alpha . in I_i){
  foreach(x in FOLLOW(A)){
    T[i,X] = r"A -> alpha"; // reduce
  }
}
* if (S' -> S. in I_i){ //ACCEPT
  T[i, $] = accept;
}

if(le azioni precedenti generano conflitti){
  throw Exception("G is not SLR"); //G non e' SLR
} else {
  if(GOTO(I_i, A) == I_j){
    T[i, a] = g_j; // goto
  }
  Put error() nelle entry vuote //ERROR
  I_0 = CLOSURE(S' -> .S)
}

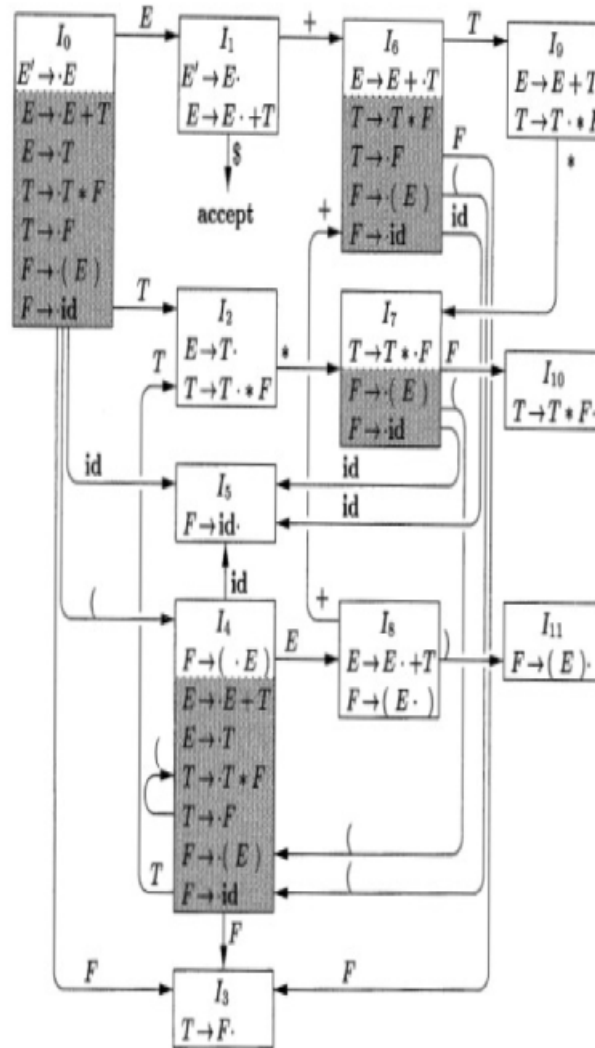
```

---

### 9.7.4 Esempio

- 1)  $E \rightarrow R + T$
- 2)  $E \rightarrow T$
- 3)  $T \rightarrow T * F$
- 4)  $T \rightarrow F$
- 5)  $F \rightarrow (E)$
- 6)  $F \rightarrow id$

Arricchisco la grammatica con  $E' \rightarrow E$ , trovo l'automa LR(0):



#### Osservazioni

Per ogni stato guardo solo i simboli dopo il punto negli item

quindi ie l'item  $F \rightarrow \cdot (E)$  mi genera  $ACTION[0, (] = \text{shift } 4$

Da notare che da  $I_1$  con  $\$$  vado in ACCEPT perché ho l'item  $E' \rightarrow E$ .

La closure di  $T \rightarrow T * F = \emptyset$ , **non espando i terminali**

Considero  $I_2$ , dato l'item  $E \rightarrow T \cdot$  e dato che  $FOLLOW(E) = \{\$, +, )\}$

$\implies ACTION[2, \$] = ACTION[2, +] = ACTION[2, )] = REDUCEE \rightarrow T$

**In pratica l'automa mi crea la parsing table**



STATE	ACTION						GOTO		
	id	+	*	(	)	\$	E	T	F
0	s5			s4			1	2	3
1		s6				acc			
2		r2	s7		r2	r2			
3		r4	r4		r4	r4			
4	s5			s4			8	2	3
5		r6	r6		r6	r6			
6	s5			s4				9	3
7	s5			s4					10
8		s6			s11				
9		r1	s7		r1	r1			
10		r3	r3		r3	r3			
11		r5	r5		r5	r5			

ie.  $w = id * id + id$

	STACK	SYMBOLS	INPUT	ACTION
(1)	0		id * id + id \$	shift
(2)	0 5	id	* id + id \$	reduce by $F \rightarrow id$
(3)	0 3	F	* id + id \$	reduce by $T \rightarrow F$
(4)	0 2	T	* id + id \$	shift
(5)	0 2 7	T *	id + id \$	shift
(6)	0 2 7 5	T * id	+ id \$	reduce by $F \rightarrow id$
(7)	0 2 7 10	T * F	+ id \$	reduce by $T \rightarrow T * F$
(8)	0 2	T	+ id \$	reduce by $E \rightarrow T$
(9)	0 1	R	+ id \$	shift
(10)	0 1 6	E +	id \$	shift
(11)	0 1 6 5	E + id	\$	reduce by $F \rightarrow id$
(12)	0 1 6 3	E + F	\$	reduce by $T \rightarrow F$
(13)	0 1 6 9	E + T	\$	reduce by $E \rightarrow E + T$
(14)	0 1	E	\$	accept

Sono in 0, mi arriva id faccio shift 5, pusho 5 sullo stack e id nei simboli; mi arriva \*, faccio reduce  $F \rightarrow id$ , sostituisco F a id nei simboli, faccio una pop dallo stack e mi trovo nello stato 0 con simbolo F che é una goto 3 (pusho 3). Occhio che in (7) sono nello stato 10 e mi arriva +, faccio la reduce  $T \rightarrow T * F$  e devo fare  $|T * F| = 3$  pop dello stack.

### 9.7.5 Shift/Reduce Conflicts

SLR é una grammatica non ambigua, notare che ci sono grammatiche non ambigue che non sono SLR(1). Considero G:

$$S \rightarrow L = R | R$$

$L \rightarrow *R|id$   
 $R \rightarrow L$

La Canonical collection C é:

$I_0 = \{S' \rightarrow .S, S \rightarrow .L = R, S \rightarrow .R, L \rightarrow . * R, L \rightarrow .id, R \rightarrow .L\}$   
 $I_1 = \{S' \rightarrow S.\}$  (da  $I_0$  mi arriva S)  
 $I_2 = \{S \rightarrow L. = R, R \rightarrow L.\}$  (da  $I_0$  mi arriva L)  
 $I_3 = \{S \rightarrow R.\}$  (da  $I_0$  mi arriva R)  
 $I_4 = \{L \rightarrow *.R, R \rightarrow .L, L \rightarrow . * R, L \rightarrow .id\}$  (da  $I_0$  mi arriva \*, poi espando con le closure a cascata)  
 $I_5 = \{L \rightarrow id.\}$  (da  $I_0$  mi arriva id)  
 $I_6 = \{S \rightarrow L. = R, R \rightarrow .L, L \rightarrow . * R, L \rightarrow .id\}$  (da  $I_2$  mi arriva =)  
 $I_7 = \{L \rightarrow *.R.\}$  (da  $I_4$  mi arriva R)  
 $I_8 = \{R \rightarrow L.\}$  (da  $I_4$  mi arriva L)  
 $I_9 = \{S \rightarrow L = R.\}$  (da  $I_6$  mi arriva R)

Se guardo  $I_2$  con il simbolo = il primo item mi suggerisce di fare shift 6, il secondo una reduce  $R \rightarrow L$  quindi ho un conflitto. In ogni caso la grammatica non é ambigua, é solo che SLR parser non ha abbastanza memoria per decidere l'azione corretta.

## 9.8 Viable Prefixes

A **Viable Prefix** é un prefisso di una right-sentential form che non continua oltre l'estremità destra dell'handle più a destra di quella sentential form (forma sentenziosa).

Per definizione é possibile aggiungere simboli terminali alla fine di un viable prefix per ottenere una right-sentential form.

Dico che un item  $A \rightarrow \beta_1 \otimes \beta_2$  é valido per un viable prefix  $\alpha\beta_1$  se ho una derivazione  $S' \rightarrow_{rm}^* \alpha A \omega \rightarrow \alpha\beta_1\beta_2\omega$ .

Questo fatto mi dice molto in caso di shift/reduce conflicts infatti:

- se  $\beta_1 \neq \varepsilon$  mi suggerisce che non abbiamo ancora shiftato l'handle nello stack quindi faccio uno shift
- se  $\beta_1 = \varepsilon$  allora  $A \rightarrow \beta_1$  é l'handle e devo ridurre

Sfortunatamente non possiamo supporre che tutte i conflitti possono essere risolti se il metodo LR é applicato su una grammatica arbitraria.

### 9.8.1 Resolve Shift/Reduce Conflicts

(0)  $E' \rightarrow E$

(1)  $E \rightarrow E + E$

(2)  $E' \rightarrow E * E$

(3)  $E' \rightarrow id$

$\implies FOLLOW(E) = \{+, *, \$\}$  calcolo C LR(0) su G':

$I_0 = \{E' \rightarrow .E, E \rightarrow .E + E, E \rightarrow .E * E, E \rightarrow .id\}$

$I_1 = \{E' \rightarrow E., E \rightarrow E. + E, E \rightarrow E. * E\}$  (E)

$I_2 = \{E \rightarrow id.\}$  (id)

$I_3 = \{E \rightarrow E + .E, E \rightarrow .E * E, E \rightarrow .E + E, E \rightarrow .id\}$  (da  $I_1$  +)

$I_4 = \{E \rightarrow E * .E, E \rightarrow .E + E, E \rightarrow .E * E, E \rightarrow .id\}$  (da  $I_1$  \*)

$I_5 = \{E \rightarrow E + E., E \rightarrow E. * E, E \rightarrow E. + E\}$  (da  $I_3$  E)

$I_6 = \{E \rightarrow E * E., E \rightarrow E. + E, E \rightarrow E. * E\}$  (da  $I_4$  E)

	id	+	*	\$	E
0	s2				1
1		s3	s4	acc	
2		r3	r3	r3	
3	s2				5
4	s2				6
5		s3/r1	s4/r1	r1	
6		s3/r2	s4/r2	r2	

Noto che ci sono dei conflitti, in action  $[5, +]$  se voglio favorire l'associatività a sinistra del  $+$  scelgo  $r1$ , se voglio far valere la precedenza del  $*$  scelgo  $s4$  per la action  $[5, *]$ .

## 9.9 More Powerful LR Parsers

Estendo il parser di prima aggiungendo un simbolo di lookahead; ci sono due metodi:

- **canonical-LR** usa grandi set di items LR(1) per il lookahead
- **lookahead-LR o LALR method** basato su set di items LR(0) ed ha pochi stati rispetto ai parsers basati su items LR(1)

## 9.10 Canonical LR(1) items

Cerco di portarmi dietro più informazioni, splitto gli stati del SLR. Definisco un **LR(1) item** come un oggetto della forma  $[A \rightarrow \alpha\beta, a]$  con  $a$  un terminale o un end-marker  $\$$  chiamato **lookahead** dell'item. Un item  $[A \rightarrow \alpha, a]$  viene ridotto solo se il simbolo dopo è una  $a$ . Il lookahead set dev'essere un subset dei follow di  $A$ .

### 9.10.1 Closure Function for LR(1) Sets of Items

---

```
repeat{
  foreach([A -> alpha B beta, a] in I){
    foreach(B -> gamma in P){
      foreach(b in T / b in first(beta alpha))
        I.add[B -> .gamma, b]
    }
  }
} until (no more items are added to I)
return I;
```

---

### 9.10.2 Costructing LR(1) Goto Function

---

```
goto(I,X){
  J = emptySet;
  foreach([A -> alpha X beta, a] in I){
    J.add([A -> alpha X beta, a]);
  }
  return closure(J);
}
```

---

### 9.10.3 Items( $G'$ )

---

```

C = closure({[S' -> .S, $]});
repeat{
  foreach(set of items I in C){
    foreach(X in V){
      if(goto(I,X) != empty & not in C){
        C.add(goto(I,X));
      }
    }
  }
} until(no new sets of items are added to C);

```

---

### 9.10.4 Esempio

$$S' \rightarrow S$$

$$S \rightarrow CC$$

$$C \rightarrow cC|d$$

Inizio computando la chiusura di  $\{[S' \rightarrow .S, \$]\}$  che mi deve matchare con  $[A \rightarrow \alpha B \beta, a]$  ( $A = S'$ ,  $B = S$ ,  $a = \$$ ). Devo quindi aggiungere  $[B \rightarrow \gamma, b]$  con  $b \in \text{first}(\beta\alpha)$ . Devo per forza aggiungere  $S \rightarrow CC$  e dato che  $\beta = \text{varepsilon}$ ,  $b$  può essere solo  $\$$ . Quindi aggiungo  $[S \rightarrow .CC, \$]$ .

Continuo la closure con  $[C \rightarrow .\gamma, b]$  con  $b \in \text{first}(C\$) = \text{first}(C) = \{c, d\} \implies$  aggiungo gli items  $[C \rightarrow .cC, c]$ ,  $[C \rightarrow .cC, d]$ ,  $[C \rightarrow .d, c]$ ,  $[C \rightarrow .d, d]$ ; nessuno di questi può essere ulteriormente espanso quindi ho finito per questo set.

$$I_0 = \{[S' \rightarrow .S, \$], [S \rightarrow .CC, \$], [C \rightarrow .cC, c|d], [C \rightarrow .d, c|d]\}$$

Computo  $\text{goto}(I_0, S)$ , devo aggiungere  $[S' \rightarrow S., \$]$  che non può essere ampliato.

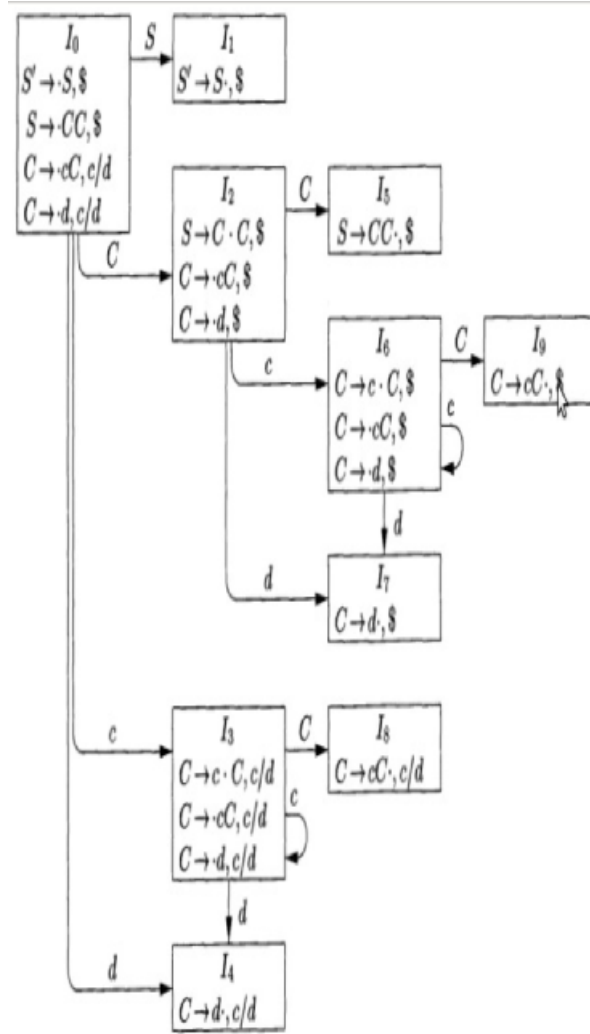
$$I_1 = \{[S' \rightarrow S., \$]\}$$

Computo  $\text{goto}(I_0, C)$  aggiungo  $[S \rightarrow C.C, \$]$  ed espando

$$I_2 = \{[S \rightarrow C.C, \$], [C \rightarrow .cC, \$], [C \rightarrow .d, \$]\}$$

$$I_3 = \{[C \rightarrow .cC, c|d], [C \rightarrow .CC, c|d], [C \rightarrow .d, c|d]\}$$

$$I_4 = \{[C \rightarrow .d., c|d]\}$$



### 9.10.5 Canonical LR(1) Parsing Table

- $C' = \{I_0, I_1, \dots, I_n\}$  la collection dei set LR(1)
- lo stato  $i$  del parser é costruito da  $I_i$ . La parsing action dello stato  $i$  é determinata:
  - a) se  $[A \rightarrow \alpha a \beta, b] \in I_i$  e  $\text{goto}(I_i, a) = I_j \implies \text{ACTION}[i, a] = \text{shift } j, a \in T$
  - b) se  $[A \rightarrow \alpha., a] \in I_i, A \neq S' \implies \text{action}[i, a] = \text{reduce } A \rightarrow \alpha''$
  - c) se  $[S' \rightarrow S., \$] \in I_i \implies \text{action}[i, \$] = \text{accept}$
- Se  $\text{goto}(I_i, A) = I_j \implies \text{goto}(i, A) = j$
- Tutte le entry non definite generano error()
- Lo stato iniziale é costruito a partire da  $[S' \rightarrow S, \$]$

Se emergono conflitti nella costruzione della parsing table la grammatica **non é LR(1)**.

### 9.10.6 Esempio

$S' \rightarrow S$   
 $S \rightarrow CC$   
 $C \rightarrow cC|d$

	c	d	\$	S	C
0	s3	s4		1	2
1			acc		
2	s6	s7			5
3	s3	s4			8
4	r3	r3			
5			r1		
6	s6	s7			9
7			r3		
8	r2	r2			
9			r2		

## 9.11 LALR (LookAhead LR) Parsing Table

É spesso usata perché le tabelle LALR sono più piccole delle canonical LR tables.

$I_3 = \{[C \rightarrow c.C, c|d], [C \rightarrow .cC, c|d], [C \rightarrow .d, c|d]\}$   
 $I_4 = \{[C \rightarrow .d, c|d]\}$   
 $I_6 = \{[C \rightarrow c.C, \$], [C \rightarrow .cC, \$], [C \rightarrow .d, \$]\}$   
 $I_7 = \{[C \rightarrow .d, \$]\}$

Inoltre so che  $goto(I_3, c) = I_3$ ,  $goto(I_3, d) = I_4$ ,  $goto(I_6, c) = I_6$ ,  $goto(I_6, d) = I_7$ ; in questo caso  $I_4$  e  $I_7$  hannoun core comune  $\{C \rightarrow .d\}$ ,  $I_3$  ed  $I_6$  hanno un core  $\{C \rightarrow c.C, C \rightarrow .cC, C \rightarrow .d\}$ .

In generale un **core** é un set di item LR(0) / la grammatica può produrre più di due set di item con lo stesso core.

Finché il core di  $goto(I, X)$  dipende solo dal core di  $I$ , le goto di set mergiati possono essere mergiate. Quindi non ho problemi a risolvere la goto di set mergiati. Quindi in pratica se ho una grammatica LR(1) senza conflitti e unisco gli stati con lo stesso core potrò avere solo conflitti reduce/reduce ed é improbabile.

### 9.11.1 LALR Parsing Table

- genero la collection  $C = \{I_0, \dots, I_n\}$
- unisco gli stati in C con la loro unione generando  $C' = \{J_0, \dots, J_m\}$  (**LALR(1) items**)
- genero le action come per cLR su  $C'$  (**LALR(1) collection**)
- Se  $I_n \subset J \implies goto(J, X) = gk$ ,  $k = union(item LR(1) / hanno lo stesso core di  $goto(I_n, X)$ )$

Se emergono conflitti nella costruzione della parsing table la grammatica G **non é** **LALR(1)**; altrimenti G é LALR(1).

### 9.11.2 Esempio

$$S' \rightarrow S$$

$$S \rightarrow CC$$

$$C \rightarrow cC|d$$

Ottengo coppie con lo stesso core ( $I_3$  e  $I_6$ ,  $I_4$  e  $I_7$ ,  $I_8$  e  $I_9$ ). Ottengo questa parsing table:

	c	d	\$	S	C
0	s36	s47		1	2
1			acc		
2	s36	s47			5
36	s36	s47			89
47	r3	r3	r3		
5			r1		
89	r2	r2	r2		

Notare che  $\text{goto}(I_{36}, C)$  originariamente era (in LR(1))  $\text{goto}(I_3, C) = I_8$  e  $I_8$  adesso é parte di  $I_{89}$ , allora metto  $\text{goto}(I_{36}, C) = I_{89}$ .

Naturalmente arrivavo alla stessa conclusione anche per  $I_6$ , parte di  $I_{36}$ , con  $\text{goto}(I_6, C) = I_9$  che adesso appartiene a  $I_{89}$ .

Quando parso una stringa i parser LR e LALR fanno le stesse sequenze di riduzioni solo che in LALR hanno nomi diversi.

## 9.12 Efficient Construction of LALR Parsing Table

Posso evitare di costruire l'intera collection di LR(1) items; posso rappresentare LR(0) e LR(1) items con il loro **kernel** (il body della produzione dopo il punto). Posso costruire i kernel degli item LALR(1) partendo dai kernel degli item LR(0) per propagazione e spontanea generazione dei lookahead.

# Chapter 10

## Bottom Up (Farina)

Ricostruire, se  $w \in L(G)$ , una rightmost derivation al contrario

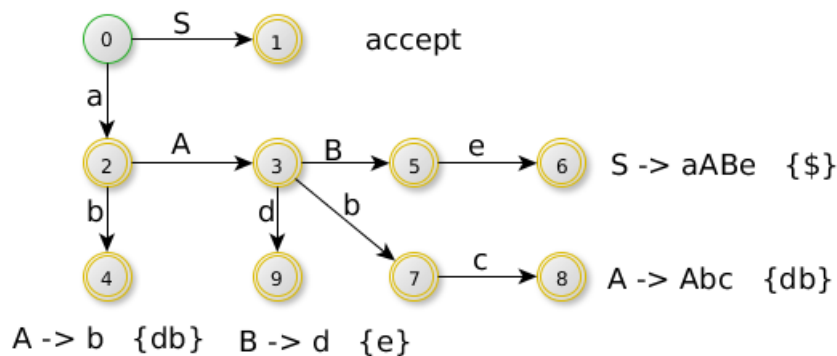
### 10.0.1 Esempio

$S \rightarrow aABe$

$A \rightarrow Abc|b$

$B \rightarrow d$

$w = abbcde$  visto che é rightmost devo espandere B dato che é il non terminale piú a destra.  
 $S \rightarrow aABe \rightarrow aAde \rightarrow aAbcde \rightarrow abbcde$



La sottolineatura significa che se arrivo in questo stato e sto leggendo come prossimo input una d o una b posso fare la riduzione della b usando A. Lo stesso vale per le altre, ovviamente con i loro simboli. La roba fra parentesi graffe si chiama look-ahead set.

Nel grafo faccio quindi i seguenti passi (i numeri sono i nodi):

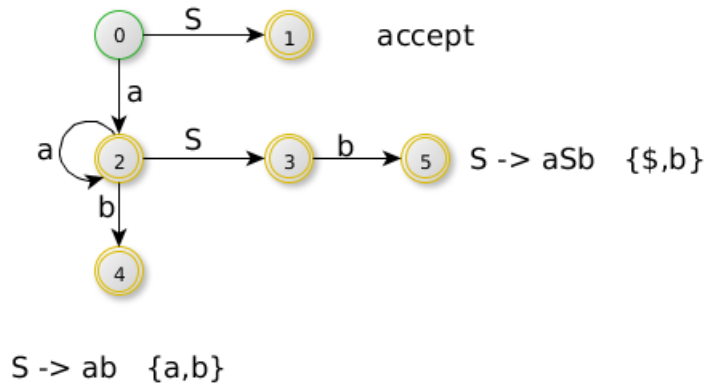
0	$abbcde\$$
$0 \rightarrow 2$ consumando 'a'	$a  bbcde\$$
$2 \rightarrow 4$ consumando 'b'	$ab  bcde\$$
4 riduco $A \rightarrow b$	$aA  bcde$

A questo punto torno al nodo 2 ovvero il precedente. Vado quindi in 3, perché ho la A al posto della b che avevo prima.

$3 \rightarrow 7$ consumando 'b'	$aAb  cde\$$
$7 \rightarrow 8$ consumando 'c'	$aAbc  de\$$
8 riduco $A \rightarrow Abc$	$aA  de$
torno a 7, torno in 3, vado in 9	
$3 \rightarrow 9$ consumando 'd'	$aAd  e\$$
riduco $B \rightarrow d$	$aAB  e\$$
torno a 3, vado in 5, vado in 6	
$5 \rightarrow 6$ consumando 'e'	$aABe  \$$
6 riduco $S \rightarrow aABe$	$S  \$$
torno a 0, vado in 1, ho finito	

Noi vogliamo avere grammatiche di tipo LALR(1). Grammatiche:  $SLR(1) \subset LALR(1) \subset LR(1)$





$S \rightarrow aSb|ab$   
 $w = aaabbb\$$

0	aaabbb\$
0 → 2	a  aabb\$
2 → 2	aa  abb\$
2 → 2	aaa  bb\$
2 → 4	aaab  b\$
4 riduco $S \rightarrow ab$	aaS  b\$
torno a 2, vado in 3, vado in 5	
3 → 5	aaSb  b\$
5 riduco $S \rightarrow aSb$	aS  b\$
torno a 3, vado in 5	
3 → 5	aSb  \$
5 riduco $S \rightarrow aSb$	S  \$
torno a 0, vado in 1, ho finito	

Questa é una tabella:

	terminali $\cup \$$	$V \setminus T$
stati	shift-k: leggi un simbolo di input e vai allo stato reduce $A \rightarrow b$	goto-k: descrive le funzioni di transizione identificate dai non terminali quando consumi roba

## 10.1 Algoritmo di shift/reduce

(comune a SLR(1), LR(1), LALR(1))

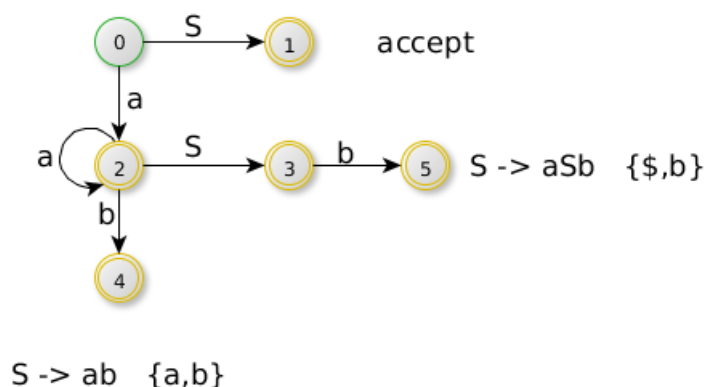
input  $w$ , tabella di parsing bottom-up di tipo  $\diamond$ , con  $\diamond$  scelto fra  $\{SLR(1), LALR(1), LR(1)\}$  G.  
output derivazione rightmost di  $w$  se  $w \in L(G)$ , altrimenti error()

```

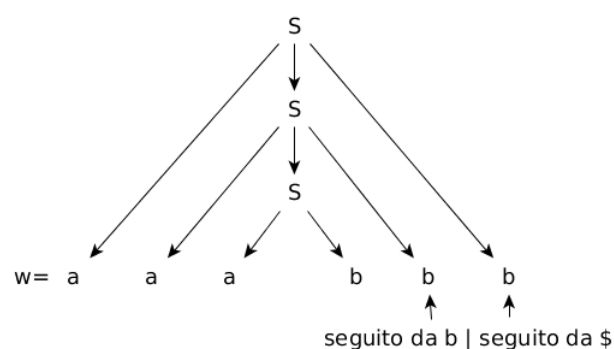
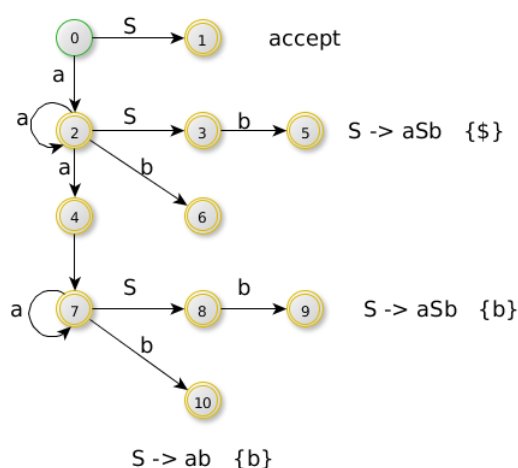
stack.push(s_0);
buffer = w$;
while(true){
    let s = stack.top();
    if(M[s,b] == shift-k){
        stack.push(b);
        stack.push(k);
        let b = buffer.readNext();
    } else if(M[s,b] == "reduce A -> beta"){
        stack.pop() 2|beta| simboli;
        let j tale che M[m, A] = gj;
        push(A);
        push(j);
        output "A -> beta";
    } else if(M[s,b] = accetta){
        break;
    } else {
        error();
    }
}

```

\*sketo\*  $S \rightarrow aSb|ab$



Questo é uguale ma scritto diversamente per separare  $\{ \$, b \}$  in  $\{ \$ \}$  e  $\{ b \}$ . Nel caso di  $w = aaabbb\$$ . Una caso rappresenta il ramo piú in alto, mentre l'altro il secondo ramo (piú interno).



- Automa caratteristico
- Lookahead Function

Coppie diverse di questi due insiemi ci danno tipi di grammatiche diverse.

Gli automi che stiamo utilizzando devono essere in grado di ricordare abbastanza da essere in grado di tornare indietro fino al punto in cui abbiamo sostituito una certa sequenza di terminali/non terminali con un'altra.

$G = (V, T, S, P)$ , aggiungo una produzione  $S' \rightarrow S \implies G' = (V \cup \{S'\}, T, S', P \cup \{S' \rightarrow S\})$

### 10.1.1 Closure

All'inizio ho  $.S$ , ovvero non ho ancora letto nulla e devo leggere  $S$ .

All'inizio (il nodo iniziale), non ho ancora visto nulla. Visto che  $S$  può iniziare con  $aSb$  o  $ab$  non sappiamo davanti a quale sviluppo ci troviamo. Il primo stato é quindi

$$\begin{aligned} S' &\rightarrow .S \\ S &\rightarrow .aSb \\ S &\rightarrow .ab \end{aligned}$$

Questo può essere visto come un nodo. Da questo stato mi muovo verso un altro stato (con una  $a$ -transizione, perché vedo che iniziano quasi tutte con  $a$ ). In questo stato avrò:  $S \rightarrow a.Sb$

$$S \rightarrow a.b$$

Adesso mi aspetto di vedere l'espansione di una  $S$ . Devo quindi aggiungere a questo nodo anche quelle produzioni, e diventa quindi:  $S \rightarrow a.Sb$

$S \rightarrow a.b$   
 $S \rightarrow .aSb$   
 $S \rightarrow .ab$

Quando computo uno stato ho i **kernel items** che poi vengono espansi con la **closure**. Notare che gli ultimi due items sono gli stessi degli ultimi due del nodo precedente. Quella é la chiusura, mentre i primi due sono i generatori dello stato (kernel dello stato o **kernel items**).

Gli stati che terminali dell'automa (le foglie) sono del tipo  $S \rightarrow ab.$ , quindi hanno incontrato tutto i simboli e possono essere ridotti (**reducing items**).

Dallo stato con 4 items che avevo prima, si può fare una b-transizione che va in uno di quelli stati terminali, ovvero:  $S \rightarrow ab.$

Questo perché la seconda produzione si aspetta b, che poi completa quello che viene generato da quella produzione. Sempre da quello stato con 4 produzioni partirá anche una a-transizione ed una S-transizione. Per vedere che transizioni devo avere, devo vedere la prima lettera dopo il punto per ogni item di quel nodo.

## 10.2 Items

$G = (V, T, S, P)$

$G' = (V \cup \{S'\}, T, S', P \cup \{S' \rightarrow S\})$ , con  $S' \notin V$ .

Un LR(0)-item di  $G'$  é una produzione di  $G$  con un punto in qualche posizione del body, ovvero  $A \rightarrow \alpha.\beta$ . Alla produzione della forma  $A \rightarrow \varepsilon$  corrisponde un solo LR(0)-item, ovvero  $A \rightarrow .$

	iniziale	se $A = S' \wedge \alpha = \varepsilon \wedge \beta = S$ , cioè se l'item é $S' \rightarrow .S$
	accepting	se $A = S' \wedge \alpha = S \wedge \beta = \varepsilon$ , cioè se l'item é $S' \rightarrow S.$
L'item $A \rightarrow \alpha.\beta$ é detto:	kernel	se é un iniziale o tale che $\alpha! = \varepsilon$
	closure	se $\alpha = \varepsilon$ e non é iniziale
	reducing	se non é accepting e $\beta = \varepsilon$ , cioè se il punto é in fondo $\wedge$ !accepting

## Chapter 11

# Costruzione di un automa caratteristico LR(0) o LR(1)

(data un'appropriata istanziazione di  $P_0$  (stato iniziale) e closure function)

Prima di tutto facciamo la costruzione dell'automa caratteristico, usando l'algoritmo sotto riportato.

Istanziando  $P_0$ , closure otteniamo:

- automi caratteristici LR(0)-automi  $\leftarrow$  parsing SLR(1)
- automi caratteristici LR(1)-automi  $\leftarrow$  parsing LR(1)

Lookahead function  $LA : (FxP) \rightarrow p(T \cup \{\$\})$  con  $F$  = insieme degli stati finali dell'automa caratteristico considerato. Si considerano stati finali gli stati che contengono almeno un reducing item.

L'automa caratteristico sarà necessario per la creazione della tabella di parsing.

---

```
Inizializzare la collezione Q di stati come {P_0};
flag P_0 come non-marcato;
```

```
while(ho uno stato non marcato P in Q){
  marca P;
  foreach(A -> a.Ybeta in P){
    tmp.add( A->aY.beta );
  }
  if(tmp == kernel(R)){ //per qualche R in Q
    tau(P, Y) = R; //goto function
  } else {
    newState = closure(tmp);
    tau(P, Y) = newState;
    Q.add(newState); //come non-marcato
  }
}
```

---

### 11.0.1 Esempi di closure, grammatica SLR

se ho la grammatica:

$$S' \rightarrow S$$
$$S \rightarrow aSb|ab$$

$closure_0(\{S' \rightarrow .S\})$  é composta da:

$$S \rightarrow .aSb$$
$$S \rightarrow .ab$$

Se invece ho una grammatica:

$$E' \rightarrow E$$
$$E \rightarrow E + T|T$$
$$T \rightarrow T * F|F$$
$$F \rightarrow (E)|id$$

Allora  $\text{closure}_0(\{E' \rightarrow .E\})$  diventa  
 $E \rightarrow .E + T$  quelle con il punto prima della E le ho già aggiunte, non faccio nulla  
 $E \rightarrow .T$  ora aggiungo quelle con il punto prima della T  
 $T \rightarrow .T * F$  quelle con il punto prima della T le ho già aggiunte, non faccio nulla  
 $T \rightarrow .F$  ora aggiungo quelle con il punto prima della F  
 $F \rightarrow .(E)$  terminale dopo il punto, non devo aggiungere nulla  
 $F \rightarrow .id$  terminale dopo il punto, non devo aggiungere nulla  
 Si devono fare in ordine per non dimenticarsene in giro.

## 11.1 Algoritmo di $\text{closure}_0(P)$

---

```

tag ogni item in P come non-marcato

while(ho ancora un item I non marcato in P){
  marca I;
  if(I ha la forma A -> alpha .B beta){
    foreach ((B -> Y) in P){
      if(B -> Y not in P){
        add(B -> .Ya);
        segna P come non-marcato;
      }
    }
  }
}
return P;

```

---

## 11.2 LR(0) automaton

Si ricava utilizzando, nell'algoritmo di costruzione dell'automa caratteristico:

- $P_0 = \text{closure}_0(\{S' \rightarrow .S\})$  per la grammatica G arricchita con  $S' \rightarrow S$
- $\text{closure}_0$  per closure

### 11.2.1 Esempio

$S' \rightarrow S$   
 $S \rightarrow aSb|ab$

$P_0 =$	$S' \rightarrow .S$	
	$S \rightarrow .aSb$	
	$S \rightarrow .ab$	
$P_1 =$	$S' \rightarrow S.$	ci si arriva con una S-transizione (ACCEPT)
$P_2 =$	$S \rightarrow a.Sb$	ci si arriva con una a-transizione
	$S \rightarrow a.b$	
	$S \rightarrow .aSb$	
	$S \rightarrow .ab$	
	$P_0$ e $P_1$ sono finiti, guardo $P_2$	
$P_3 =$	$S \rightarrow aS.b$	ci si arriva con una S-transizione da $P_2$
$P_4 =$	$S \rightarrow ab.$	ci si arriva con una b-transizione da $P_2$
$P_5 =$	$S \rightarrow .aSb$	ci si arriva con una a-transizione da $P_2$ (stesse righe di $P_2$ )
	$S \rightarrow .ab$	la freccia quindi va da $P_2$ a $P_2$ , perché $P_5 \subset P_2$
	ora guardo $P_3$	
$P_6 =$	$S \rightarrow aSb.$	ci si arriva con una b-transizione da $P_3$

## 11.3 Creazione della tabella di parsing

$\tau$  funzione di transizione (GOTO) dell'automa caratteristico considerato.  
**LA** lookahead function considerata.

La tabella di parsing bottom-up per la coppia prescelta di automa e lookahead function é una matrice  $Q \otimes (V \cup \{\$\})$  dove  $Q$  é l'insieme degli stati dell'automa prescelto.

$\forall \text{ entry } (P, Y):$	inserire <b>shift</b>	se $Y \in T \wedge \tau(P, Y) = R$
	inserire <b>reduce</b> $A \rightarrow \beta$	se $A \rightarrow \beta. \in P \wedge Y \in LA(P, A \rightarrow \beta)$
	inserire <b>accept()</b>	se $Y = \$ \wedge S' \rightarrow S. \in P$
	inserire <b>error()</b>	se $Y \in T \cup \{\$\} \wedge$ non é ancora stato inserito nulla
	applicando i passi precedenti	
	inserire <b>goto R</b>	se $Y \in V \setminus T \wedge \tau(P, Y) = R$

### 11.3.1 Esercizio

SLR(1)

LR(0) automa

$LA(P, A \rightarrow \beta) = follow(A) \forall P \in Q$  (automa)

[numero nodo]	[parte che	puó avere	conflitti]	[goto part]
	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>\$</b>	<b>S</b>
<b>0</b>	S2			g1
<b>1</b>			ACCEPT	
<b>2</b>	S2	S4		g3
<b>3</b>		s5		
<b>4</b>		$R : S \rightarrow ab$	$R : S \rightarrow ab$	
<b>5</b>		$R : S \rightarrow aSb$	$R : S \rightarrow aSb$	

S = shift R = reduce g = goto

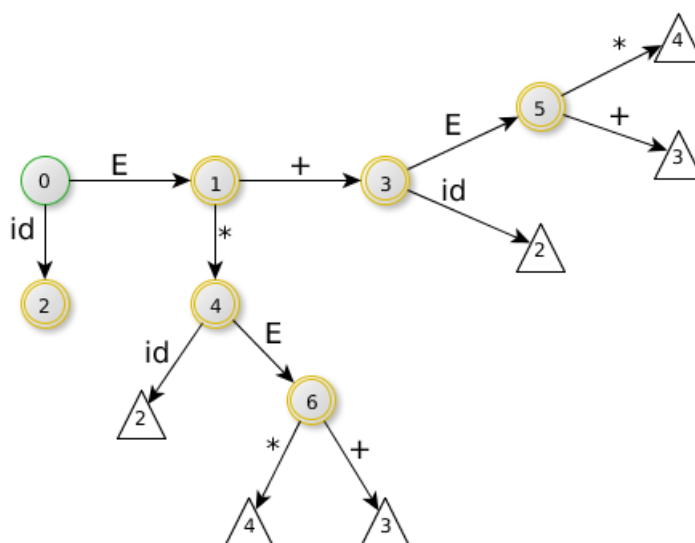
Se ho la parola  $w = aabb\$$  faccio:

0	$aabb\$$	sono in 0 e vedo a. Faccio [0, a] nella tabella
0a2	$abb\$$	sono in 2 e vedo a. Faccio [2, a] nella tabella
0a2a2	$bb\$$	sono in 2 e vedo b. Faccio [2, b] nella tabella
aa2a2b4	$b\$$	sono in 4 e vedo b. Faccio il reduce (cella 4b) visto che crea 2S, e [2, S] = g3, aggiungo 3
0a2S3	$b\$$	sono in 3 e vedo b. Faccio [3, b] nella tabella
0a2S3b5	$\$$	sono in 5 e vedo \$. Faccio il reduce (cella 5\$ visto che crea 0S, e [0, S] = g1, aggiungo 1
0S1	$\$$	ok perché [S, 1] é accept

### 11.3.2 Esempio Conflitti Shift/Reduce

(Esempio con una grammatica ambigua)

$E \rightarrow E + E | E * E | id$   
automa LR(0)



//Se va a triangoli, non parte dal kernel, altrimenti si(?)

$$0 = \begin{array}{l} E' \rightarrow .E \\ E \rightarrow .E + E \\ E \rightarrow .E * E \\ E \rightarrow .id \end{array}$$

$$1 = \begin{array}{l} E' \rightarrow E. \\ E \rightarrow E. + E \\ E \rightarrow E. * E \end{array}$$

$$2 = E \rightarrow id.$$

$$3 = \begin{array}{l} E \rightarrow E + .E \\ E \rightarrow .E * E \\ E \rightarrow .id \end{array}$$

$$4 = \begin{array}{l} E \rightarrow E * .E \\ E \rightarrow .E + E \\ E \rightarrow .E * E \\ E \rightarrow .id \end{array}$$

$$5 = \begin{array}{l} E \rightarrow E + E. \\ E \rightarrow E. + E \\ E \rightarrow E. * E \end{array}$$

$$6 = \begin{array}{l} E \rightarrow E * E. \\ E \rightarrow E. + E \\ E \rightarrow E. * E \end{array}$$

	id	+	*	\$
0	S2			
1		S3	S4	ACCEPT
2		$R: E \rightarrow id$	$R: E \rightarrow id$	$R: E \rightarrow id$
3	S2			
4	S2			
5		<b><math>S3, R: E \rightarrow E + E</math></b>	<b><math>S4, R: E \rightarrow E + E</math></b>	$R: E \rightarrow E + E$
6		<b><math>S3, R: E \rightarrow E * E</math></b>	<b><math>S4, R: E \rightarrow E * E</math></b>	$R: E \rightarrow E * E$

Visto che ci sono **conflitti** nella tabella, questa grammatica **non é SLR**.

In questo caso i conflitti sono di tipo Shift/Reduce. Ma possono essere anche di tipo Reduce/Reduce.

Tra le produzioni nelle celle colorate, quali sono quelle da tenere per avere una grammatica che associa a sinistra?

Nella cella [5, +] devo tenere R “ $E \rightarrow E + E$ ”

Nella cella [5, \*] devo tenere S4

Nella cella [6, +] devo tenere R “ $E \rightarrow E * E$ ”

Nella cella [6, \*] devo tenere R “ $E \rightarrow E * E$ ”

$$W = id * id + id\$$$

0

0id2

0E1

0E1 \* 4id2

0E1 \* 4E6

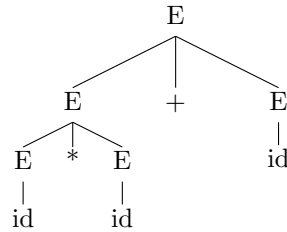
0E1

0E1 + 3id2

0E1 + 3E5

0E1

ok



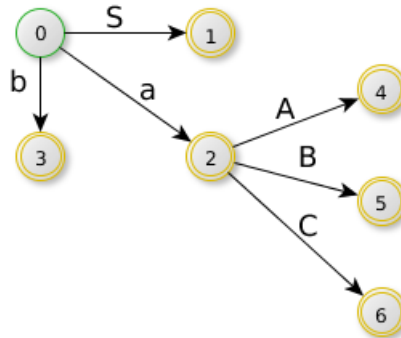
### 11.3.3 Esempio Conflitti Reduce/Reduce

$S \rightarrow aAd|bBd|aBe|bAe$

$A \rightarrow c$

$B \rightarrow c$

Questa grammatica produce 4 stringhe, ogniuna in un modo, e quindi ovviamente non é ambigua.



$S' \rightarrow .S$   
 $S \rightarrow .aAd$   
 $0 = S \rightarrow .bBd$   
 $S \rightarrow .aBe$   
 $S \rightarrow .bAe$

$1 = S' \rightarrow S.$

$S \rightarrow a.Ad$   
 $S \rightarrow a.Be$   
 $2 = A \rightarrow .c$   
 $B \rightarrow .c$

$S \rightarrow b.Bd$   
 $S \rightarrow b.Ae$   
 $3 = B \rightarrow .c$   
 $A \rightarrow .c$

$4 = S \rightarrow aA.d$

$5 = S \rightarrow aB.e$

$6 = A \rightarrow c.$   
 $B \rightarrow c.$

	a	b	d	e	\$
6			$R: A \rightarrow c$ $R: B \rightarrow c$	$R: A \rightarrow c$ $R: B \rightarrow c$	

Anche se non é una grammatica ambigua ci sono multiple entries. Questo dipende dal modo in cui scegliamo i follow. Nel parsing canonico infatti non si usano gli item LR(0) ma gli item LR(1) perché ci portiamo dietro informazione direttamente dagli item. Questo riduce/rimuove i problemi di questo tipo.

Un item LR(1) canonico é del tipo  $A \rightarrow \alpha.\beta, \delta$  con  $\delta \subset T \cup \{\$\}$ .



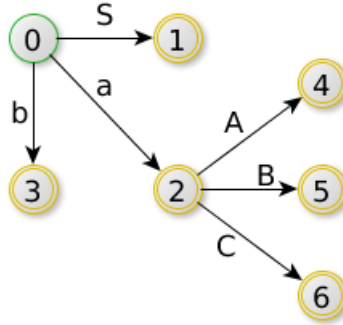
## 11.4 LR(1)

Negli automi caratteristici LR(1) si considera come stato iniziale lo stato che si ottiene facendo:  $\text{closure}_1(\{[S' \rightarrow .S, \{\$ \}]\})$

### 11.4.1 Esempio grammatica LR(1)

$$S \rightarrow aAd|aBe|bBd|bAe$$

$$A \rightarrow c$$

$$B \rightarrow c$$


$$\begin{aligned}
 & S' \rightarrow .S, \{\$ \} \\
 & S \rightarrow .aAd, \{\$ \} \\
 0 = & S \rightarrow .aBe, \{\$ \} \\
 & S \rightarrow .bBd, \{\$ \} \\
 & S \rightarrow .bAe, \{\$ \}
 \end{aligned}$$

$$1 = S' \rightarrow S., \{\$ \}$$

$$\begin{aligned}
 & S \rightarrow a.Ad, \{\$ \} \\
 & S \rightarrow a.Be, \{\$ \} \\
 2 = & A \rightarrow .c, \{d\} \\
 & B \rightarrow .c, \{e\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & S \rightarrow b.Bd, \{?\} \\
 & S \rightarrow b.Ae, \{?\} \\
 3 = & A \rightarrow .c, \{?\} \\
 & B \rightarrow .c, \{?\}
 \end{aligned}$$

$$4 = S \rightarrow aA.d, \{?\}$$

$$5 = S \rightarrow aB.e, \{?\}$$

$$\begin{aligned}
 6 = & A \rightarrow c., \{d\} \\
 & B \rightarrow c., \{e\}
 \end{aligned}$$

## 11.5 Algoritmo $\text{Closure}_1(P)$

---

```

every item in P is unmarked
while(exists an item I in P unmarked){
  mark I;
  if([ A -> alpha. B beta, delta ] in I){
    delta1 = Union(d in delta) first(beta d)
    foreach([ B -> Y ] in P){
      if([ B -> .Y ] not in proj(P)){ //projection is the first component of an item
        yet collected
        P.add([ B -> .Y, delta1] as unmarked)
      } else {

```

```

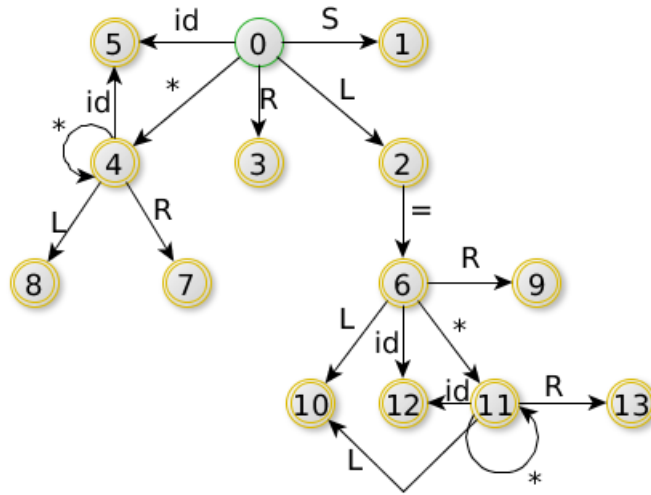
    if([ B -> .Y, gamma ] in P && delta1 not subset gamma ){
        update [ B -> .Y, gamma ] in [Bb -> .Y, gamma U delta1] as unmarked;
    }
}
}
}
}
return P;

```

## 11.6 Esempio grammatica LALR

 $S \rightarrow L = R | R$ 
 $L \rightarrow *R | id$ 
 $R \rightarrow L$ 

Computare la  $closure_1(\{[S' \rightarrow S, \{\$\}]\})$  (nodo 0 e disegnare l'automa LR(1). Capire se é SLR(1)).



$S' \rightarrow .S, \{\$\}$   
 $S \rightarrow .L = R, \{\$\}$   
 $S \rightarrow .R, \{\$\}$   
 $0 = L \rightarrow . * R, \{\$\}$   
 $L \rightarrow .id, \{\$\}$   
 $R \rightarrow .L, \{\$\}$

1 =  $S' \rightarrow S., \{\$\}$

2 =  $S \rightarrow L. = R, \{\$\}$   
 $R \rightarrow L., \{\$\}$

3 =  $S \rightarrow R., \{\$\}$

$L \rightarrow *.R, \{=, \$\}$   
 $R \rightarrow .L, \{=, \$\}$   
 $4 = L \rightarrow .id, \{=, \$\}$   
 $L \rightarrow . * R, \{=, \$\}$

5 =  $L \rightarrow id., \{=, \$\}$

$S \rightarrow L = .R, \{\$\}$   
 $R \rightarrow .L, \{\$\}$   
 $6 = L \rightarrow . * R, \{\$\}$   
 $L \rightarrow .id, \{\$\}$

7 =  $L \rightarrow *R., \{=, \$\}$

$$8 = R \rightarrow L., \{=\$, \$\}$$

$$9 = S \rightarrow L = R., \{\$\}$$

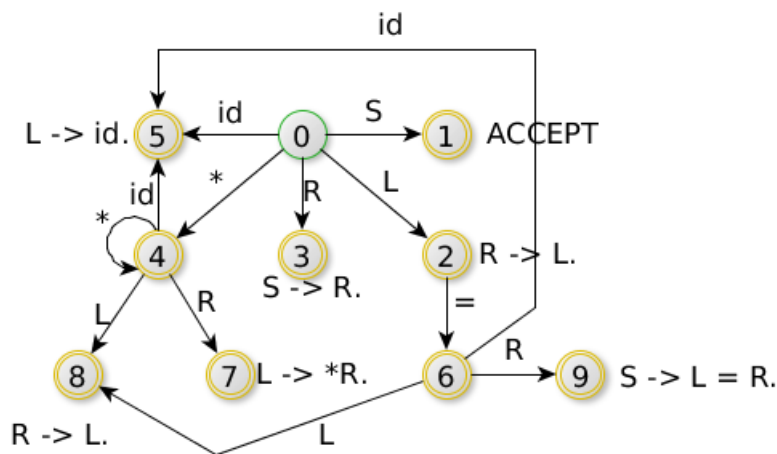
$$10 = R \rightarrow L., \{\$\}$$

$$11 = \begin{array}{l} L \rightarrow *.R, \{\$\} \\ R \rightarrow .L, \{\$\} \\ L \rightarrow .*R, \{\$\} \\ L \rightarrow .id, \{\$\} \end{array}$$

$$12 = L \rightarrow id., \{\$\}$$

$$13 = L \rightarrow *R., \{\$\}$$

Notare che i nodi 8 e 10 sembrano uguali ma non lo sono perché hanno lookahead diversi; anche nel gravo saranno nodi distinti mentre se avessimo fatto un automa LR(0) sarebbero stati uniti. Lo stesso automa LR(0):



Quest'ultimo automa ha almeno uno shift/reduce conflict mentre l'automa LR(1) non ne avrà. Guardiamo se é SLR(1)

	id	*	*	*	S	L	R
0	S5	S4			1	2	3
1				ACC			
2			S6	r: $R \rightarrow L$			
3				r: $S \rightarrow R$			
4	S5	S4				8	7
5			r: $L \rightarrow id$	r: $L \rightarrow id$			
6	S12	S11				10	9
7			r: $L \rightarrow *R$	r: $L \rightarrow *R$			
8			r: $R \rightarrow L$	r: $R \rightarrow L$			
9				r: $S \rightarrow L = R$			
10				r: $R \rightarrow L$			
11	S12	S11				10	13
12				r: $L \rightarrow id$			
13				r: $L \rightarrow *R$			

visto che non ci sono conglitti questa grammatica é LR(1). Gli stati 4 e 11 hanno la stessa proiezione; possiamo quindi fare:  $P_1 \cup P_2$   $A \rightarrow \alpha.\beta$ ,  $\delta_1 \cup \delta_2$ .

Lo posso fare per 4 e 11, 5 e 12, 8 e 10, 7 e 13

	id	*	*	*	S	L	R
<b>411</b>	S512	S411			810	2	713
<b>512</b>			r: $L \rightarrow id$	r: $L \rightarrow id$			
<b>713</b>			r: $L \rightarrow *R$	r: $L \rightarrow *R$			
<b>810</b>			r: $r \rightarrow L$	r: $R \rightarrow L$			

Dovr  anche aggiornare i vari shift e goto delle altre righe per farli andare ai nodi nuovi. S5 ed S12 diventeranno S512.

La grammatica cos'generata   LALR perch  nella tabella non ci sono conflitti.

### 11.6.1 Ricorda

$SLR(1) \subset LALR(1) \subset LR(1)$

Grammatica SLR(1)

$E' \rightarrow E$

$E \rightarrow E + T | T$

$T \rightarrow T * F | F$

$F \rightarrow (E) | id$

Grammatica LR(1)

$S \rightarrow aAd|aBe|bBd|bAe$

$A \rightarrow c$

$B \rightarrow c$

Grammatica LALR

$S \rightarrow L = R | R$

$L \rightarrow *R | id$

$R \rightarrow L$

## 11.7 Algoritmo LALR(1) (inefficiente)

1. Costruzione di  $A_1$  (LR(1) automaton)
2. Creo LR(1) Merged Automa  $A_2$  (mergio gli stati che hanno la stessa proiezione). Se lo stato  $P \in A_2$  e" il merging di  $Q_1, \dots, Q_k$  di  $A_1$  e  $Q_1$  ha una Y-transizione a  $Q'_1$  allora P ha una Y-transizione allo stato  $P' / proj(P') = proj(Q')$
3.  $\forall P$  finale,  $\forall [A \rightarrow \beta., \delta_i] \in P$   $LA(P, A \rightarrow \beta) = \cup_{\delta_i} [A \rightarrow \beta., \delta_i] \in P$

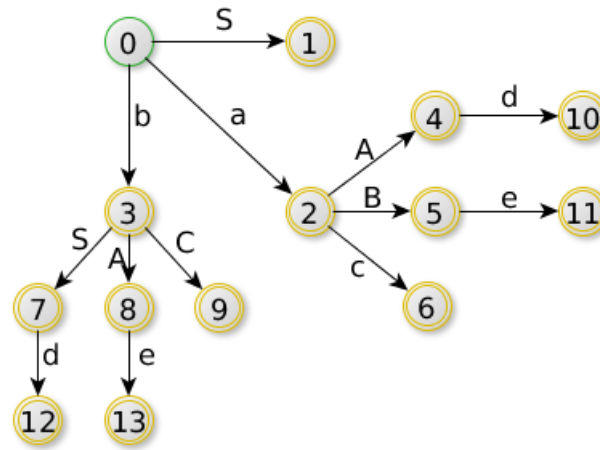
### 11.7.1 Esempio (Vedi esempio conflitti reduce/reduce)

$S \rightarrow aAd|aBe|bBd|bAe$

$A \rightarrow c$

$B \rightarrow c$

Faccio LR(1) automa



$S' \rightarrow .S, \{\$ \}$   
 $S \rightarrow .aAd, \{\$ \}$   
 $0 = S \rightarrow .bBd, \{\$ \}$   
 $S \rightarrow .aBe, \{\$ \}$   
 $S \rightarrow .bAe, \{\$ \}$

$1 = S' \rightarrow S., \{\$ \}$

$S \rightarrow a.Ad, \{\$ \}$   
 $S \rightarrow a.Be, \{\$ \}$   
 $2 = A \rightarrow .c, \{d\}$   
 $B \rightarrow .c, \{e\}$

$S \rightarrow b.Bd, \{\$ \}$   
 $S \rightarrow b.Ae, \{\$ \}$   
 $3 = B \rightarrow .c, \{d\}$   
 $A \rightarrow .c, \{e\}$

$4 = S \rightarrow aA.d, \{\$ \}$

$5 = S \rightarrow aB.e, \{\$ \}$

$6 = A \rightarrow c., \{d\}$   
 $B \rightarrow c., \{e\}$

$7 = S \rightarrow bB.d, \{\$ \}$

$8 = S \rightarrow bA.e, \{\$ \}$

$9 = B \rightarrow c., \{d\}$   
 $A \rightarrow c., \{e\}$

$10 = S \rightarrow aAd., \{\$ \}$

$11 = S \rightarrow aBe., \{\$ \}$

$12 = S \rightarrow bBd., \{\$ \}$

$13 = S \rightarrow bAe., \{\$ \}$

Gli stati 6 e 9 hanno la stessa proiezione quindi li mergio in

$$14 = \begin{array}{l} A \rightarrow c., \{d\} \\ B \rightarrow c., \{e\} \\ A \rightarrow c., \{e\} \\ B \rightarrow c., \{d\} \end{array}$$

Sostituisco 14 a 6 e 9, faccio una transizione da 3 a 14

	a	b	c	d	e	\$	S	A	B
0	S2	S3					g1		
1						ACC			
2			S14					g4	g5
3			S14					g8	g7
4				S10					
5					S11				
7				S12					
8					S13				
10						$S \rightarrow aAd$			
11						$S \rightarrow aBe$			
12						$S \rightarrow bBd$			
13						$S \rightarrow bAe$			
14					$A \rightarrow c \ B \rightarrow c$	$B \rightarrow c \ A \rightarrow c$			

In 14 ho ancora dei conflitti reduce/reduce quindi la grammatica non é LALR.

### 11.7.2 Esempio

$S \rightarrow Ma|bMc|dc|bda$

$M \rightarrow d$

Non dovrebbe essere LALR perché avrei  $M \rightarrow d$  con lookahead set  $\{a\}$  e  $\{d\}$ ...

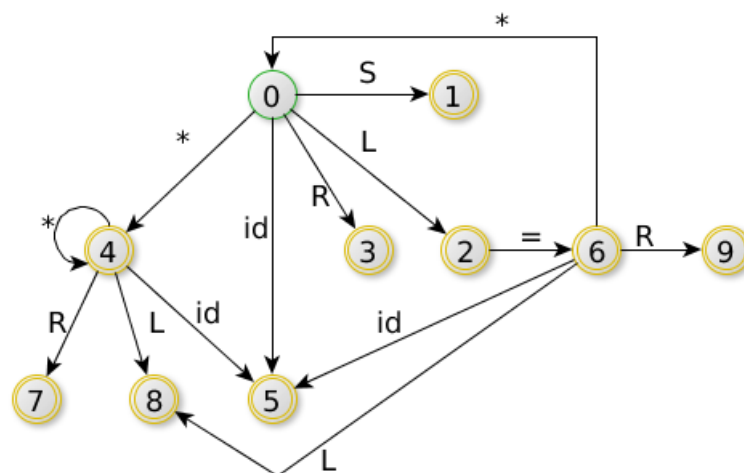
## 11.8 Algoritmo LALR (efficiente)

### 11.8.1 Esempio

$S \rightarrow L = R | R$

$L \rightarrow *R | id$

$R \rightarrow L$



$$0 = \begin{array}{l} S' \rightarrow .S, \{x_0\} \\ S \rightarrow .L, \{x_0\} \\ S \rightarrow .R, \{x_0\} \\ L \rightarrow .*R, \{x_0\} \\ L \rightarrow .id, \{x_0\} \\ R \rightarrow .L, \{x_0\} \end{array}$$

$$1 = S' \rightarrow S., \{x_1\}$$

$$2 = \begin{array}{l} S \rightarrow L. = R, \{x_2\} \\ R \rightarrow L., \{x_3\} \end{array}$$

$$3 = S \rightarrow R., \{x_4\}$$

$$4 = L \rightarrow *.R, \{x_5\}$$

$$5 = L \rightarrow id., \{x_6\}$$

$$6 = \begin{array}{l} S \rightarrow L = .R, \{x_7\} \\ R \rightarrow .L, \{x_7\} \\ L \rightarrow . * R, \{x_7\} \\ L \rightarrow .id, \{x_7\} \end{array}$$

$$7 = L \rightarrow *R., \{x_8\}$$

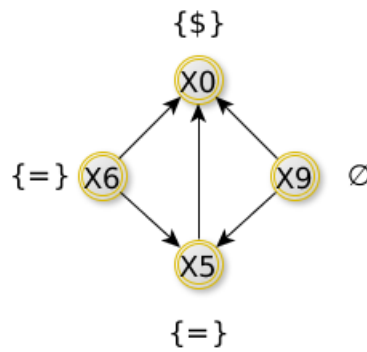
$$8 = R \rightarrow L., \{x_9\}$$

$$9 = S \rightarrow L = R., \{x_{10}\}$$

$$\begin{aligned} x_0 &= \{\$ \} \\ x_1 &= \{x_0\} \\ x_2 &= \{x_0\} \\ x_3 &= \{x_0\} \\ x_4 &= \{x_0\} \\ x_5 &= \{\{=, x_0\} \cup \{x_5\} \cup \{x_7\}\} \\ x_6 &= \{x_5\} \\ x_7 &= \{x_2\} \\ x_8 &= \{x_5\} \\ x_9 &= \{\{x_5\} \cup \{x_7\}\} \\ x_{10} &= \{x_7\} \end{aligned}$$

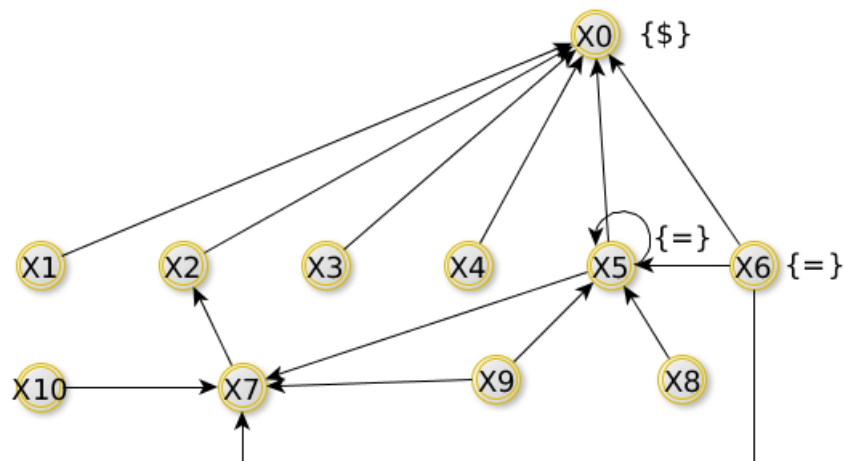
		<b>class</b>
	$x_0 = \{\$ \}$	$x_0$
	$x_1$	$x_0$
	$x_2$	$x_0$
	$x_3$	$x_0$
	$x_4$	$x_0$
Ora devo risolvere il sistema	$x_5 = \{=, x_0, x_5, x_7\}$	$x_5$
	$x_6 = \{=, x_0, x_5, x_7\}$	$x_6$
	$x_7$	$x_0$
	$x_8$	$x_5$
	$x_9 = \{x_5, x_7\}$	$x_9$
	$x_{10}$	$x_{10}$
		$x_0 = \{\$ \}$
		$x_5 = \{=, x_0, x_5, x_7\} = \{=, x_0\}$
Mi rimangono quindi solo 4 variabili $x_0, x_5, x_6, x_9$		$x_6 = \{=, x_0, x_5, x_7\} = \{=, x_0, x_5\}$
		$x_9 = \{x_5, x_7\} = \{x_5, x_0\}$

Creo un grafo mettendo sui nodi le variabili, con solamente i terminali di quella variabile (non quelli presi dalle altre. Solo quelli che non sono  $x_k$  insomma).



Ottingo:  $x_0 = \{\$ \}$   
 $x_5 = \{=, \$ \}$   
 $x_6 = \{=, \$ \}$   
 $x_9 = \{=, \$ \}$

Questi sono il lookahead set che stavo cercando.



## 11.9 Costruzione automa simbolico

---

```

x_0 = new Var();
Vars = {x_0};
P_0 = closure1([S' -> .S, {x_0}]);
States = {P_0};
P_0 unmarked;
while(exists unmarked state P in States){
    mark P;
    foreach(Y in V){
        tmp = emptySet;
        foreach([A -> alpha . Y beta, delta] in P){
            tmp.Add([A -> alpha . Y beta, delta]);
        }
        if(tmp is not empty){
            if(lo stato target non e'' ancora stato collezionato){
                States.Add(versione simbolica del target);
                Queue.Add(equazione per kernel item in tmp);
            } else {
                raffinare le equazioni delle variabili associate ai kernel item del target;
            }
        }
    }
}
}

```

---

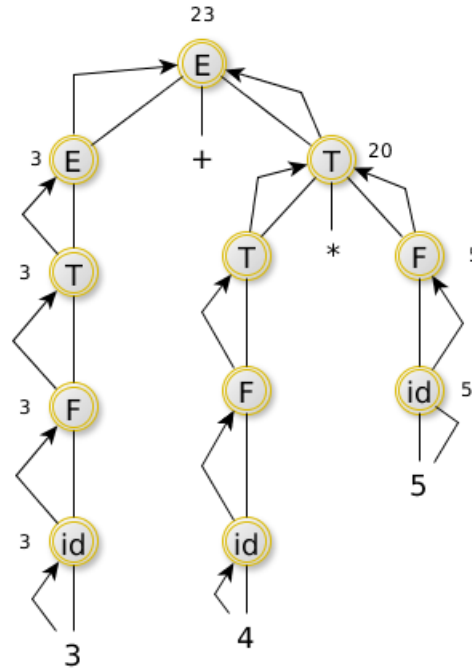


## 11.10 Grammatiche Attribuite

**SDD** Syntax Directed Definition  
**SDT** Syntax Directed Translation

Una grammatica attribuita é una grammatica a cui sono aggiunti attributi e regole.

$E \rightarrow E + T | T$   
 $T \rightarrow T * F | F$   
 $F \rightarrow (E) | id$   
 $w = 3 + 4 * 5$

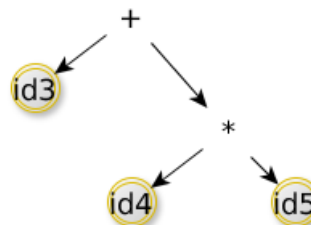


Il valore di propaga dal basso verso l'alto nell'albero e computate le operazioni man mano che si presentano.

$E_1 \rightarrow E_2 + T \quad \{E_1.val = E_2.val + T.val\}$   
 $E \rightarrow T \quad \{E.val = T.val\}$   
 $T_1 \rightarrow T_2 * F \quad \{T_1.val = T_2.val * F.val\}$   
 $T \rightarrow F \quad \{T.val = F.val\}$   
 $F \rightarrow E \quad \{F.val = E.val\}$   
 $F \rightarrow id \quad \{F.val = lexval(id)\}$

← Azione semantica

L'abstract syntax tree di questa grammatica é:

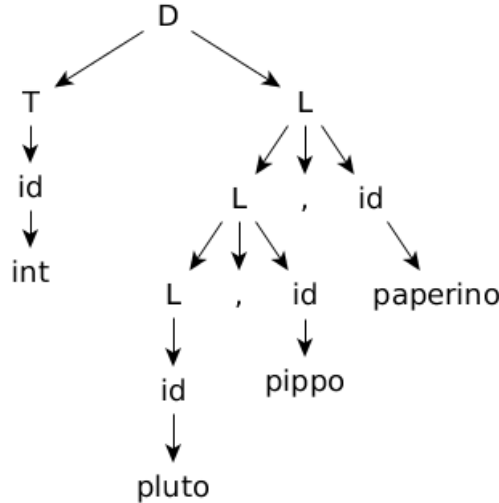


## 11.11 Attributi Sintetizzati ed Ereditati

$A \rightarrow \alpha$  A.a definito come una funzione degli attributi dei terminali e non terminali in  $\alpha$ . Gli attributi dei terminali sono informazioni ottenute durante l'analisi lessicale.

## 11.11.1 Esempio

$D \rightarrow TL$        $\{L.i = T.t\}$   
 $T \rightarrow int$        $\{T.t = integer\}$   
 $T \rightarrow float$        $\{T.t = float\}$   
 $L_1 \rightarrow L_2, id$     $\{L_2.i = L_1.i; addType(lexval(id), L_1.i)\}$   
 $L \rightarrow id$        $\{addType(lexval(id), L_i)\}$   
 $w = int \text{ pluto, pippo, paperino}$



Facendo bottom-up la prima cosa che faremo sarà  $T \rightarrow int$ . A questo punto T conosce “int” e lo dice alla L più in alto (quella subito sotto a D). Quella L lo dice alla L sotto di lui, e questo succede anche per il livello dopo. Adesso L va ad “id” che diventa “pluto” che L viene a conoscere (poiché viene passato in alto). Visto che alcuni attributi dipendono dai padri e dagli attributi dei fratelli, questi sono attributi ereditati.

Gli attributi ereditati sono funzione degli attributi di siblings e del padre.

## 11.11.2 Esempio

$S \rightarrow N$   
 $N \rightarrow o \text{ Digits}$   
 $N \rightarrow \text{Digits}$   
 $\text{Digits} \rightarrow \text{Digits } d$   
 $\text{Digits} \rightarrow d$

Questo albero é simile a quello di prima: cé solo “o” a sinistra e potenzialmente infinite “Digits” a destra, una sotto l’altra. Come fare per essere in grado di distinguere se cé la “o” oppure no?

Posso ribaltare l’albero, riscrivendo la grammatica come:

$S \rightarrow \text{Digits}$        $\{\text{Digits.qualcosa}\}$   
 $\text{Digits}_1 \rightarrow \text{Digits}_2 d$     $\{\text{Digits}_1.val = \text{Digits}_2.val * \text{Digits}_2.base + 'd'\}$   
 $\text{Digits} \rightarrow d$        $\{\text{Digits.base} = 8; \text{Digits.val} = 'd'\}$   
 $\text{Digits} \rightarrow od$        $\{\text{Digits.base} = 10; \text{Digits.val} = 'd'\}$