

Limbaje independente de context

Limbaje formale și translație (Compilatoare)

December 2, 2020

Mihai-Lica Pura

▶ Analiza sintactică descendentă

- ▶ Analiza sintactică predictivă
- ▶ Mașina abstractă de analiză predictivă
- ▶ Analiza sintactică descendentă cu reveniri
- ▶ Analiza sintactică LL(1)
- ▶ Mașina abstractă de analiză LL(1)
- ▶ Analiza sintactică prin coborâre recursivă

▶ Analiza sintactică ascendentă

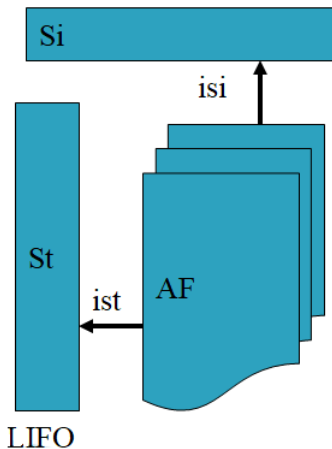
- ▶ Analiza sintactică deplasare - reducere (shift - reduce)
- ▶ Analiza sintactică ascendentă cu reveniri
- ▶ Analiza sintactică bazată pe relații de precedență
 - ▶ Analiza sintactică bazată pe precedența operator (Robert Floyd)
 - ▶ Analiza sintactică bazată pe precedența simplă (Wirth-Weber)
 - ▶ Analiza sintactică bazată pe precedența slabă (Ichbiach-Morse)

Analiza sintactică descendentă

Analiza sintactică descendentă

- ▶ încearcă construirea arborelui sintactic pentru propoziția dată **pleacând de la simbolul de start** către propoziție
- ▶ folosește două operații:
 - ▶ **expandare**
 - ▶ **potrivire**
- ▶ poate fi modelată prin intermediul unui automat finit cu stivă care lucrează asupra unui șir de intrare

Analiza sintactică predictivă



Analiza sintactică predictivă

- ▶ Si – șirul de intrare (conține atomii lexicali obținuți în urma etapei de analiză lexicală)
- ▶ isi – indice pentru Si
- ▶ St – stiva (acces LIFO) pentru construirea arborelui sintactic
- ▶ ist – vârful stivei

Analiza sintactică predictivă

Algoritmul analizei sintactice predictive pentru un limbaj definit printr-o gramatică G este:

1. Analiza sintactică predictivă, fiind un tip de analiză sintactică descendentă, **pleacă de la simbolul de start S , care este introdus în stivă.**
2. Dacă în vârful stivei se află un neterminal, atunci se face **expandarea** vârfului stivei, alegând convenabil o regulă de producție.

Analiza sintactică predictivă

3. Dacă în vârful stivei se află un terminal, acesta este comparat cu simbolul curent din șirul de intrare.
 - ▶ Dacă cele două simboluri sunt identice, atunci este scos simbolul din vârful stivei și se avansează un pas în șirul de intrare.
 - ▶ Altfel, se semnalează eroare.
4. La sfârșit:
 - ▶ Dacă **stiva este goală** și dacă **s-a ajuns la sfârșitul șirului de intrare**, atunci acesta este **corect**.
 - ▶ Altfel, șirul de intrare nu este corect.

Analiza sintactică predictivă

- ▶ algoritm **nedeterminist**
 - ▶ dacă pentru neterminalul aflat în vârful stivei există mai multe reguli de producție
 - ▶ algoritmul NU precizează **cum se alege regula de producție** care va fi folosită pentru expandare
- ▶ poate fi implementat prin
 - ▶ mașina abstractă de analiză predictivă
 - ▶ analizor sintactic descendent cu reveniri
- ▶ însă este ineficient, presupunând încercarea tuturor variantelor posibile

Analiza sintactica predictiva

- ▶ Fie G gramatica care definește limbajul pentru care se constăruiește analizorul sintactic predictiv. În construirea arborelui sintactic, analiza sintactică predictivă folosește derivarea stânga:
- ▶ $S \Rightarrow w_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow w_n$, unde:
 - ▶ $w_i = x_i A \alpha_i$, $w_{i+1} = x_i \beta_i \alpha_i$
 - ▶ cu proprietatea că $A \rightarrow \beta_i \in P$,
 - ▶ iar $x_i \in \Sigma^*$ și $\alpha_i \in (V_N \cup \Sigma)$

Analiza sintactică predictivă

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, E, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{+, *, \text{id}, (,)\}$
- ▶ $V_N = \{E, T, E', T', F\}$
- ▶ E
- ▶ $P = \{$
 - $E \rightarrow T E'$
 - $E' \rightarrow + T E'$
 - $E' \rightarrow \epsilon$
 - $T \rightarrow F T'$
 - $T' \rightarrow * F T'$
 - $T' \rightarrow \epsilon$
 - $F \rightarrow \text{id}$
 - $F \rightarrow (E) \}$

Funcționarea automatului de analiză sintactică predictivă pentru analiza propoziției **id+(id*id)** date este:

Analiza sintactică predictivă

Stack (top on left)	Input	Remarks
E	id+(id*id)	replace
TE'	id+(id*id)	replace
FT'E'	id+(id*id)	replace
idT'E'	id +(id*id)	erase
T'E'	+(id*id)	replace
E'	+(id*id)	replace
+TE'	+ (id*id)	erase
TE'	(id*id)	replace
FT'E'	(id*id)	replace
(E)T'E'	(id*id)	erase
E)T'E'	id*id)	replace
TE')T'E'	id*id)	replace
FT'E')T'E'	id*id)	replace
idT'E')T'E'	id *id)	erase

Analiza sintactică predictivă

Stack (top on left)	Input	Remarks
$T'E')T'E'$	$*id)$	replace
$*FT'E')T'E'$	$*id)$	erase
$FT'E')T'E'$	$id)$	replace
$idT'E')T'E'$	$id)$	erase
$T'E')T'E'$	$)$	replace
$E')T'E'$	$)$	replace
$)T'E'$	$)$	erase
$T'E'$	ϵ	replace
E'	ϵ	replace
ϵ	ϵ	accept

Automatul finit cu stivă

- ▶ **Modelul matematic** al analizorului sintactic descendent este automatul finit cu stivă:
- ▶ $AP = \langle Q, \Sigma, \Gamma, f, q_0, z_0, F \rangle$, unde:
 - ▶ Q - mulțimea stărilor
 - ▶ Σ - alfabetul automatului
 - ▶ Γ - alfabetul stivei
 - ▶ z_0 - simbolul inițial al stivei
 - ▶ q_0 - starea inițială
 - ▶ F - mulțimea stărilor finale
 - ▶ f - funcția de tranziție
$$f : Q \times (\Sigma \cup \{\epsilon\}) \times \Gamma \rightarrow P(Q \times \Gamma^*),$$

P fiind o mulțime de perechi

Automatul finit cu stivă

► Configurația automatului

- (q, x, γ) , $q \in Q$, $x \in \Sigma^*$, $\gamma \in \Gamma^*$
- configurația inițială: (q_0, x, S)

► Relația de mișcare

- $(q_1, ax, z\gamma) \vdash (q_2, x, \alpha\gamma) \Leftrightarrow (q_2, \alpha) \in f(q_1, a, z)$

► Un șir $w \in \Sigma^*$ este **acceptat** de către automat:

- criteriul stării vide:
 $(q_0, w, z_0) \vdash^+ (q, \varepsilon, \varepsilon)$
- criteriul stării finale:
 $(q_0, w, z_0) \vdash^+ (q, \varepsilon, \gamma)$, $q \in F$

Automatul finit cu stivă

► f

- $f(q, a, a) = \{(q, \epsilon)\}$, $\forall a \in \Sigma$ - (**potrivire**)
- $f(q, \epsilon, A) = \{(q, \alpha)\}$, $\forall A \rightarrow \alpha \in P$ - (**expandare**)
- $f(q, \epsilon, \epsilon) = \{(q, \epsilon)\}$ - (**accept**)
- $f(q, \epsilon, \alpha)$ - (**error**)

Exemplu

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, E, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{+, *, (,), i\}$
- ▶ $V_N = \{E, T, F\}$
- ▶ E
- ▶ $P = \{$
 $E \rightarrow E + T \mid T$
 $T \rightarrow T * F \mid F$
 $F \rightarrow i \mid (E)$
 $\}$

Exemplu

Automatul de analiza sintactică predictivă corespunzător gramaticii este:
 $AP = \langle Q, \Sigma, \Gamma, f, q_0, z_0, F \rangle$

- ▶ $Q = \{q\}$
- ▶ $\Sigma = \{+, *, (,), i\}$
- ▶ $\tau = \{E, T, F, +, *, (,), i\}$
- ▶ $z_0 = E$
- ▶ $q_0 = q$
- ▶ $F = \emptyset$

Exemplu

► f

- $f(q, a, a) = \{(q, \epsilon)\}, \forall a \in \Sigma$
- $f(q, \epsilon, A) = \{(q, \alpha)\}, \forall A \rightarrow \alpha \in P$
 - $f(q, \epsilon, E) = \{(q, E + T), (q, T)\}$
 - $f(q, \epsilon, T) = \{(q, T * F), (q, F)\}$
 - $f(q, \epsilon, F) = \{(q, i), (q, (E))\}$

Exemplu

Succesiunea de relații de mișcare ale automatului pentru analiza propoziției $i * i + i$ este:

$(q, i*i+i, E)$

$\vdash (q, i*i+i, E+T)$

$\vdash (q, i*i+i, T+T)$

$\vdash (q, i*i+i, T*F+T)$

$\vdash (q, i*i+i, F*F+T)$

$\vdash (q, i*i+i, i*F+T)$

$\vdash (q, *i+i, *F+T)$

$\vdash (q, i+i, F+T)$

$\vdash (q, i+i, i+T)$

$\vdash (q, +i, +T)$

$\vdash (q, i, T)$

$\vdash (q, i, F)$

$\vdash (q, i, i)$

$\vdash (q, \epsilon, \epsilon)$

Condiții

Fie G o gramatică. Pentru a se putea construi un analizor sintactic predictiv pentru limbajul definit de gramatica G , aceasta trebuie să îndeplinească condițiile:

1. în cadrul regulile de producție, **nu se folosește recursivitate stânga** (directă sau indirectă):
 - ▶ nu există niciun neterminal A astfel încât $A \Rightarrow^+ A\alpha$
 - ▶ îndeplinirea acestei condiții asigură faptul că stiva nu se va extinde la infinit, având în vedere că, pentru înlocuirea neterminalelor, se folosește derivarea stânga

Condiții

2. pentru orice neterminal, **părțile drepte ale regulilor sale de producție încep diferit:**
- ▶ nu există două reguli de producție $A \rightarrow \alpha\beta$ și $A \rightarrow \alpha\gamma$, cu $\alpha \neq \epsilon$
 - ▶ această condiție asigură identificarea ușoară a regulii de producție care trebuie folosită pentru a expanda neterminalul din vârful stivei, pe baza simbolului curent din șirul de intrare

Eliminarea recursivității stânga

- ▶ Dacă există reguli de producție care folosesc recursivitatea stânga, de exemplu:

$$A \rightarrow A\alpha$$

$$A \rightarrow \beta$$

- ▶ Atunci:

- ▶ se adaugă în mulțimea V_N a gramaticii un nou neterminat A'
- ▶ iar cele două reguli de producție din mulțimea P se înlocuiesc cu:

$$A \rightarrow \beta A'$$

$$A' \rightarrow \alpha A'$$

$$A' \rightarrow \epsilon$$

Eliminarea recursivității stânga

Exemplu:

- ▶ $E \rightarrow E + T$
 $E \rightarrow T$
- ▶ $E \rightarrow T E'$
 $E' \rightarrow + T E'$
 $E' \rightarrow \epsilon$

Eliminarea regulilor cu același început

- ▶ Dacă nu este îndeplinită a doua condiție, iar gramatica conține, de exemplu, regulile de producție:

$$A \rightarrow \alpha\beta$$

$$A \rightarrow \alpha\gamma$$

- ▶ atunci:

- ▶ se adaugă în mulțimea V_N a gramaticii un nou neterminat A'

- ▶ iar cele două reguli de producție sunt înlocuite cu:

$$A \rightarrow \alpha A'$$

$$A' \rightarrow \beta$$

$$A' \rightarrow \gamma$$

Eliminarea regulilor cu același început

Exemplu:

- ▶ $C \rightarrow \text{if } t \text{ then } C \text{ endif}$
 $C \rightarrow \text{if } t \text{ then } C \text{ else } C \text{ endif}$
- ▶ $C \rightarrow \text{if } t \text{ then } C \ C'$
 $C' \rightarrow \text{endif}$
 $C' \rightarrow \text{else } C \text{ endif}$

Eliminarea recursivității stânga

Un exemplu mai complex:

$$A \rightarrow Ac$$

$$A \rightarrow Aa$$

$$A \rightarrow b$$

- Soluția este:

$$A \rightarrow bA'$$

$$A' \rightarrow aA'$$

$$A' \rightarrow cA'$$

$$A' \rightarrow \epsilon$$

- după cum se observă, a mai apărut o tranziție pentru A' . Acum există câte o tranziție pentru A' pentru fiecare regulă a lui A care folosește recursivitate stânga

Eliminarea regulilor cu același început

Un exemplu mai complex:

$$A \rightarrow ab$$
$$A \rightarrow ac$$
$$A \rightarrow Aa$$

- ▶ Mai întâi se rezolvă problema primelor două reguli de producție, obținând:

$$A \rightarrow Aa$$
$$A \rightarrow aA'$$
$$A' \rightarrow b$$
$$A' \rightarrow c$$

- ▶ Apoi, pentru primele două reguli de producție se aplică transformarea pentru eliminarea recursivității stânga:

$$A \rightarrow aA'A''$$
$$A'' \rightarrow aA''$$
$$A'' \rightarrow \epsilon$$
$$A' \rightarrow b$$
$$A' \rightarrow c$$

Exercițiu

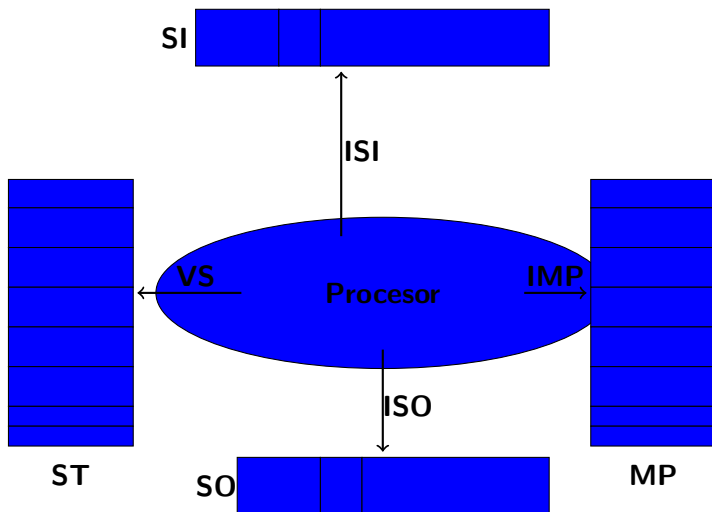
Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, E, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{+, -, *, /, id\}$
- ▶ $V_N = \{E\}$
- ▶ E
- ▶ $P = \{$
 $E \rightarrow +EE$
 $E \rightarrow -EE$
 $E \rightarrow *EE$
 $E \rightarrow /EE$
 $E \rightarrow id \}$

Să se construiască automatul finit cu stivă pentru analiza sintactică predictivă pentru limbajul definit de gramatică și să se analizeze sintactic propoziția $/ * id id - id id$

Mașina de analiză predictivă

Structura mașinii de analiză predictivă



Mașina de analiză predictivă

- ▶ **Procesorul** este unitatea centrală virtuală care interpretează programele și le execută.
- ▶ **SI** este șirul de intrare cu indicele ISI care marchează poziția atomului lexical curent de analizat
- ▶ **SO** este șirul de ieșire cu indicele ISO care marchează ultimul element introdus în șir
- ▶ **ST** este o memorie de tip stivă, cu VS vârful stivei
- ▶ **MP** este memoria program, accesibilă doar la citire, cu IMP indicele instrucțiunii curente

Mașina de analiză predictivă

- ▶ Procesorul citește programele din MP și le executa la fel ca și procesorul oricărui calculator real
- ▶ El poate citi un atom din SI, poate scrie un atom lexical în SO și poate scrie sau citi din vârful stivei ST

Mașina de analiză predictivă

MAP recunoaște și execută **patru instrucțiuni**:

1. Instrucțiunea de **test (V)**
2. Instrucțiunea de **apel cu revenire (A)**
3. Instrucțiunea **adevărat (T)**
4. Instrucțiunea **fals (F)**

Instrucțiunea de test

$$V(a), E_1, E_2$$

- ▶ Instrucțiunea de test face **verificarea identității dintre atomul lexical curent din SI și atomul lexical indicat între paranteze**, adică a.
- ▶ În caz de identitate:
 - ▶ a este scris în șirul SO
 - ▶ se avansează în SI
 - ▶ și se continuă execuția cu instrucțiunea E_1
- ▶ În caz contrar:
 - ▶ se continuă execuția cu instrucțiunea E_2

Instrucțiunea de test

$$V(a), E_1, E_2$$

- ▶ Dacă câmpurile E_1 și E_2 sunt vide, atunci execuția se continuă cu următoarea instrucțiune din MP
- ▶ E_1 și E_2 pot fi etichete ale unor instrucțiuni din MP, sau pot fi una dintre instrucțiunile T și F

Instrucțiunea de apel cu revenire

$$A(E), E_1, E_2$$

- ▶ Permite execuția secvenței de program de la eticheta E
- ▶ Înainte de execuția primei instrucțiuni de la eticheta E , se salvează starea mașinii de analiză, adică tripletul (ISI, ISO, IMP), în ST
- ▶ Dacă returul din secvență se face cu instrucțiunea adevarat (T), atunci se va executa în continuare instrucțiunea E_1
- ▶ Dacă returul din secvență se face cu instrucțiunea fals (F), atunci se va executa în continuare instrucțiunea E_2

Instrucțiunea de apel cu revenire

$$A(E), E_1, E_2$$

- ▶ Dacă câmpurile E_1 și E_2 sunt vide, atunci execuția se continuă cu următoarea instrucțiune din MP
- ▶ E_1 și E_2 pot fi etichete ale unor instrucțiuni din MP, sau pot fi una dintre instrucțiunile T și F

Algoritmul mașinii de analiză predictivă

ISI,ISO,VS,IMP \leftarrow 0

repetă

 dacă MP(IMP)=A

 atunci *A

 altfel *V

Instrucțiunea V

k=1

daca $MP(IMP+1)=SI(ISO)$

atunci

$ISO \leftarrow ISO+1$

$SO(ISO) \leftarrow MP(IMP+1)$

$ISO \leftarrow ISO+1$

$K1 \leftarrow IMP+2$

altfel

$K1 \leftarrow IMP+3$

Intrucciunea V

```
repetă până când k=0
    dacă MP(K1)=blank
        atunci IMP = IMP + 4; K=0
    altfel
        dacă MP(K1)=T
            atunci *T
        altfel
            dacă MP(K1)=F
                atunci *F
            altfel IMP = MP(K1); K=0
```


Instrucțiunea A

$ST(VS) = ISI, ISO, IMP$

$VS = VS + 3$

$IMP \leftarrow MP(IMP + 1)$

Instrucțiunea F

```
daca VS=0
    atunci *eexec
altfel
    IMP=ST(VS)
    ISO=ST(VS)
    ISI=ST(VS)
    K1=IMP+3
    VS=VS-3
```

Instrucțiunea T

```
daca VS != 0 atunci
    IMP = ST(VS)
    VS = VS-3
    SO(ISO) = MP(IMP+1)
    ISO = ISO + 1
    K1 = IMP + 2
altfel daca VS=0 atunci
    daca SI(ISO-1) =  $\epsilon$ 
        atunci *succes
    altfel *ecec
```

Algoritmul mașinii de analiză predictivă

Pentru a putea utiliza mașina de analiză predictivă:

- ▶ gramatica generatoare a limbajului țintă **trebuie să îndeplinească numai prima condiție** dintre cele cerute pentru analiza sintactică predictivă

Exemplu

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, X, P \rangle$, unde:

▶ $\Sigma = \{+, *, -, a, (,)\}$

▶ $V_N = \{X, Y, Z, W\}$

▶ X

▶ $P = \{$

$$X \rightarrow Y$$

$$Y \rightarrow Z + W$$

$$Y \rightarrow Z * W$$

$$Y \rightarrow Z$$

$$Z \rightarrow -W$$

$$Z \rightarrow W$$

$$W \rightarrow a$$

$$W \rightarrow (Y) \}$$

- ▶ Scrieti programul mașinii de analiză predictivă pentru limbajul definit de gramatica G .
- ▶ Analizați propoziția $a+(-a)$.

Exemplu

	+	*	-	a	()
X			Y	Y	Y	
Y			Z+W Z*W Z	Z+W Z*W Z	Z+W Z*W Z	
Z			-W	W	W	
W				a	(Y)	

Exemplu

```
00 X: A(Y), ,F
04   : V( $\epsilon$ ),T,F
08 Y: A(Z), ,F
12   : V(+),Y1,
16   : V(*),Y1,T
20 Y1: A(W),T,F
24 Z: V(-), ,
28   : A(W),T,F
32 W: V(a),T,
36   : V((), ,F
40   : A(Y), ,F
44   : V()),T,F
```

Exemplu

SI	ISI	ISO	IMP	SO	ST
$\underline{a} + (-a)\$$	0	0	0	-	
$\underline{a} + (-a)\$$	0	0	0	-	(0,0,0)
$\underline{a} + (-a)\$$	0	0	8	-	(0,0,0)(0,0,8)
$\underline{a} + (-a)\$$	0	0	24	-	(0,0,0)(0,0,8)
$\underline{a} + (-a)\$$	0	0	28	-	(0,0,0)(0,0,8)(0,0,28)
$\underline{a} + (-a)\$$	0	0	32	-	(0,0,0)(0,0,8)(0,0,28)
$\underline{a} + (-a)\$$	1	2	28	aw	(0,0,0)(0,0,8)
$\underline{a} + (-a)\$$	1	3	8	awz	(0,0,0)
$\underline{a} + (-a)\$$	1	3	12	awz	(0,0,0)

Exemplu

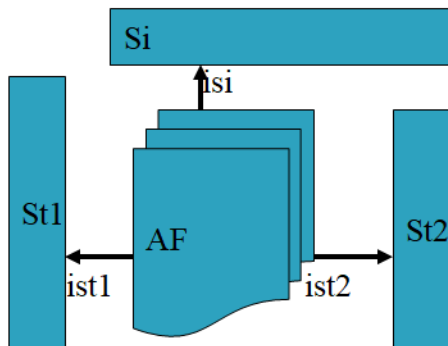
SI	ISI	ISO	IMP	SO	ST
$a + (-a)$$	2	4	20	awz+	(0,0,0)
$a + (-a)$$	2	4	32	awz+	(0,0,0)(2,2,20)
$a + (-a)$$	2	4	36	awz+	(0,0,0)(2,2,20)
$a + (-a)$$	3	5	40	awz+(	(0,0,0)(2,2,20)
$a + (-a)$$	3	5	8	awz+(	(0,0,0)(2,2,20)(3,3,40)
$a + (-a)$$	3	5	24	awz+(	(0,0,0)(2,2,20)(3,3,40)(3,3,8)
$a + (-a)$$	4	6	28	awz+(-	(0,0,0)(2,2,20)(3,3,40)(3,3,8)
$a + (-a)$$	4	6	32	awz+(-	(0,0,0)(2,2,20)(3,3,40)(3,3,8)(4,4,28)
$a + (-a)$$	5	8	28	awz+(-aw	(0,0,0)(2,2,20)(3,3,40)(3,3,8)

Exemplu

SI	ISI	ISO	IMP	SO	ST
$a + (-a)\$$	5	9	8	$awz + (-awz$	$(0, 0, 0)(2, 2, 20)(3, 3, 40)$
$a + (-a)\$$	5	9	12	$awz + (-awz$	$(0, 0, 0)(2, 2, 20)(3, 3, 40)$
$a + (-a)\$$	5	9	16	$awz + (-awz$	$(0, 0, 0)(2, 2, 20)(3, 3, 40)$
$a + (-a)\$$	5	10	40	$awz + (-awzy$	$(0, 0, 0)(2, 2, 20)$
$a + (-a)\$$	6	11	20	$awz + (-awzy)$	$(0, 0, 0)$
$a + (-a)\$$	6	12	0	$awz + (-awzy)w$	—
$a + (-a)\$$	6	13	4	$awz + (-awzy)wv$	—

Analiza sintactică descendentă cu reveniri

- Analiza sintactică descendentă cu reveniri este o implementare deterministă a analizei sintactice predictive



Analiza sintactica descendenta cu reveniri

- ▶ Si - șirul de intrare (conține atomii lexicali obținuți în urma etapei de analiză lexicală)
- ▶ isi - indice pentru Si
- ▶ St1 - stiva (acces LIFO) pentru construirea arborelui sintactic
- ▶ ist1 - vârful stivei St1
- ▶ St2 - stiva de retur
- ▶ Ist2 - vârful stivei St2

Analiza sintactica descendenta cu reveniri

Configurația automatului finit cu memorie:

(s, i, α, β)

- ▶ **s** - starea automatului finit, care poate fi:
 - ▶ q (stare normală)
 - ▶ b (stare de revenire)
 - ▶ e (stare de eroare)
 - ▶ a (stare de acceptare)
- ▶ **j** - indicele șirurului de intrare
- ▶ α - șirul din stiva St2, formată din atomi lexicali deja recunoscuți în șirul de intrare și din indicii regulilor de producție utilizate în relațiile de derivare
- ▶ β - șirul din stiva St1

Analiza sintactica descendenta cu reveniri

1. configuratia initiala

$(q, 0, \epsilon, S)$

2. expandarea

$(q, j, \alpha, A\beta) \rightarrow (q, j, \alpha A1, \alpha_1\beta)$

unde $A1: A \rightarrow \alpha_1$ este prima regula de productie pentru neterminalul A din varful stivei $St1$ (A va fi expandat conform primei alternative)

3. avans

$(q, j, \alpha, a\beta) \rightarrow (q, j+1, \alpha a, \beta),$

cand in varful stivei $St1$ se afla un terminal identic cu cel din pozitia curenta (j) a sirului de intrare

Analiza sintactica descendenta cu reveniri

4. necoincidența

$$(q, j, \alpha, i\beta) \rightarrow (b, j, \alpha, i\beta)$$

- ▶ când în vârful stivei St1 se află un terminal care nu este identic cu cel din poziția curentă (j) a șirului de intrare

5. revenire

$$5.1 \quad (b, j, \alpha i, \beta) \rightarrow (b, j-1, \alpha, i\beta)$$

- ▶ când în vârful stivei St2 se află un terminal
- ▶ pasul 5.1 se repetă atâta timp cât se află un terminal în vârful stivei St2

$$5.2 \quad (b, j, \alpha A_i, \alpha_i \beta) \rightarrow (q, j, \alpha A_{i+1}, \alpha_{i+1} \beta)$$

- ▶ se sare la pasul 3

$$5.3 \quad (b, j, \alpha A_n, \alpha_n \beta) \rightarrow (b, j, \alpha, A\beta)$$

- ▶ se sare la pasul 5.1

Analiza sintactica descendenta cu reveniri

6 eșec

$$(b, j, \alpha, S\beta) \rightarrow (e, j, \alpha, S\beta)$$

7 succes

$$(q, n+1, \alpha, \epsilon) \rightarrow (a, n+1, \alpha, \epsilon)$$

Analiza sintactică descendentă cu reveniri

Pentru a putea utiliza analiza sintactică cu reveniri:

- ▶ gramatica generatoare a limbajului țintă **trebuie să îndeplinească numai prima condiție** dintre cele cerute pentru analiza sintactică predictivă

Exemplu

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, S, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{a, b, c\}$
- ▶ $V_N = \{S, A, B\}$
- ▶ S
- ▶ $P = \{$
 - $(S1) S \rightarrow Ab$
 - $(S2) S \rightarrow Ac$
 - $(A1) A \rightarrow a$
 - $(A2) A \rightarrow bAB$
 - $(B1) B \rightarrow a$ $\}$

Folosind automatul finit cu memorie cu reveniri, analizați propozițiile:

- ▶ bbaaab
- ▶ bbaabab

Exemplu

$(q, 1, \epsilon, S)$

- $\vdash (2) \quad (q, 1, S1, Ab) \quad // \text{expandare}$
- $\vdash (2) \quad (q, 1, S1A1, ab) \quad // st2(ist2) \neq si(isi)$
- $\vdash (4) \quad (b, 1, S1A1, ab) \quad // \text{necoincidenta}$
- $\vdash (5.2) \quad (q, 1, S1A2, bABb) \quad // \text{revernire}$
- $\vdash (3) \quad (q, 2, S1A2b, ABb) \quad // \text{avans})$
- $\vdash (2) \quad (q, 2, S1A2bA1, aBb) \quad // \text{expandare } A1 \rightarrow a)$
- $\vdash (4) \quad (b, 2, S1A2bA1, aBb) \quad // \text{necoincidenta})$
- $\vdash (5.2) \quad (q, 2, S1A2bA2, bABBB) \quad // \text{revenire})$

Exemplu

$\vdash (3)$	$(q, 3, S1A2bA2b, ABBb)$	//avans
$\vdash (2)$	$(q, 3, S1A2bA2bA1, aBBb)$	//expandare
$\vdash (3)$	$(q, 4, S1A2bA2bA1a, BBb)$	//avans
$\vdash (2)$	$(q, 4, S1A2bA2bA1aB1, aBb)$	//expandare
$\vdash (3)$	$(q, 5, S1A2bA2bA1aB1a, Bb)$	//avans
$\vdash (2)$	$(q, 5, S1A2bA2bA1aB1aB1, ab)$	//expandare
$\vdash (3)$	$(q, 6, S1A2bA2bA1aB1aB1a, b)$	//avans
$\vdash (3)$	$(q, 7, S1A2bA2bA1aB1aB1ab, \$)$	//avans
$\vdash (7)$	$(q, 7, S1A2bA2bA1aB1aB1ab, \epsilon)$	//succes
$\vdash (7)$	$(a, 7, S1A2bA2bA1aB1aB1ab, \epsilon)$	

Analiza sintactică LL(1)

- ▶ Analiza LL(k)
 - ▶ tip de analiză sintactică descendentă
 - ▶ analizează intrarea de la stânga la dreapta (Left to right)
 - ▶ construiește o derivare stânga pentru aceasta (Leftmost derivation)
 - ▶ de aici denumirea de LL
 - ▶ decizia de a folosi a anumită regulă de producție pentru a expanda vârful stivei se ia după inspectarea în avans a unui număr de k atomi lexicali din șirul de intrare
 - ▶ de aici denumirea de LL(k)
 - ▶ în consență, analiza nu folosește reveniri

Analiza sintactică LL(1)

- ▶ Dacă pentru a anumită gramatică generatoare G se poate defini un analizor $LL(k)$, atunci gramatica se numește **gramtică $LL(k)$**
- ▶ Limbajul definit printr-o astfel de gramatică se numește limbaj $LL(k)$
- ▶ Cele mai răspândite sunt **gramaticile $LL(1)$**
 - ▶ analizorul trebuie să inspecteze doar următorul atom lexical din șirul de intrare pentru a putea lua deciziile de analiză

Analiza sintactică LL(1)

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, S, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{a, b, c\}$
- ▶ $V_N = \{S, A\}$
- ▶ S
- ▶ $P = \{$
 - (1.1) $S \rightarrow \underline{a}SAc$
 - (1.2) $S \rightarrow \underline{\epsilon}$
 - (2.1) $A \rightarrow \underline{b}A$
 - (2.2) $A \rightarrow \underline{\epsilon}$ $\}$

	a	b	c
S	1.1	1.2	1.2
A		2.1	2.2

Analiza sintactică LL(1)

- Succesiunea de relații de mișcare ale automatului finit cu memorie, conform algoritmului de analiză LL(1) pentru propoziția: **aabcc**

$(q, 0, S)$ - a următorul atom, deci alegem 1.1

$\vdash (q, 0, aSAc)$

$\vdash (q, 1, SAc)$ - a următorul atom, deci alegem 1.1

$\vdash (q, 1, aSAcAc)$

$\vdash (q, 2, SAcAc)$ - b următorul atom, deci alegem 1.2

$\vdash (q, 2, AcAc)$ - b următorul atom, deci alegem 2.1

Analiza sintactică LL(1)

$\vdash (q, 2, bAcAc)$

$\vdash (q, 3, AcAc)$

- c următorul atom, deci alegem 2.2

$\vdash (q, 3, cAc)$

$\vdash (q, 4, Ac)$

- c următorul atom, deci alegem 2.2

$\vdash (q, 4, c)$

$\vdash (q, 5, \epsilon)$

Gramatici LL(1)

- ▶ Pentru a putea construi un analizor LL(1) pentru o gramatică $G = \langle \Sigma, V_N, S, P \rangle$, aceasta trebuie să fie o **gramatică LL(1)**
- ▶ Condiții necesare și suficiente pentru ca o gramatică independentă de context să fie o gramatică LL(1):

$\forall A \in V_N, A \rightarrow \alpha_1 | \alpha_2 | \dots | \alpha_n \in P$

- ▶ 1. $FIRST^+(\alpha_i) \cap FIRST^+(\alpha_j) = \emptyset, \forall i \neq j$
- ▶ 2. $FOLLOW^+(A) \cap FIRST^+(\alpha_j) = \emptyset, \forall i, \alpha_i \Rightarrow^* \epsilon \wedge \forall j$

Pentru fiecare $A \rightarrow \alpha_1 | \alpha_2 | \dots | \alpha_n \in P, A \in V_N, \forall i \alpha_i \neq \epsilon$

- ▶ $FIRST^+(\alpha_i) = \{a \in \Sigma | \alpha_i \Rightarrow^* a\gamma, \gamma \in V^*\}$
- ▶ Dacă $\alpha_i \Rightarrow^* \epsilon$, atunci trebuie să se țină cont de ceea ce urmează după A
- ▶ (În cazul metodei LL1 se analizează în avans **un singur** atom lexical.)

Pentru $A \rightarrow \epsilon \in P, A \in V_N$

- ▶ $FOLLOW^+(A) = \{a \in \Sigma \mid (S \Rightarrow^* \alpha A a \beta, \alpha, \beta \in V^*) \vee (S \Rightarrow^* x A Y, a \in FIRST^+(Y), x \in \Sigma^*) \vee (S \Rightarrow^* \alpha A, a \in FOLLOW^+(S))\}$
- ▶ (În cazul metodei LL1 se analizează în avans **un singur** atom lexical.)

Analiza sintactică LL(1)

Pentru a putea construi un analizor sintactic LL(1):

- ▶ gramatica generatoare a limbajului țintă **trebuie să îndeplinească ambele condiții** cerute pentru analiza sintactică predictivă

Analiza sintactică LL(1)

Etapele analizei sintactice LL(1):

- ▶ Construirea analizorului sintactic LL(1):
 - ▶ Modificarea gramaticii astfel încât să respecte cele două condiții cerute pentru analiza sintactică predictivă
 - ▶ Calcularea mulțimilor de simbolii directori (mulțimile $FIRST^+$ sau $FOLLOW^+$)
 - ▶ Verificarea îndeplinirii condițiilor pentru ca G să fie o gramatică LL(1)
 - ▶ Construirea tabelii de analiză sintactică
 - ▶ Implementarea analizorului sintactic LL(1)
- ▶ Analiza propriu-zisă a unei propoziții

Exemplu

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, E, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{+, *, (,), a\}$

- ▶ $V_N = \{E, T, F\}$

- ▶ E

- ▶ $P = \{$
 $E \rightarrow E + T \mid T$
 $T \rightarrow T * F \mid F$
 $F \rightarrow a \mid (E)$
 $\}$

- ▶ Gramatica folosește **recursivitatea stânga**

- ▶ pentru a se putea construi un analizor sintactic LL(1) (descendent), ea trebuie să fie modificată

Exemplu

Gramatica modificată este $G = \langle \Sigma, V_N, E, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{+, *, (,), a\}$
- ▶ $V_N = \{E, E_1, T, T_1, F\}$
- ▶ E
- ▶ $P = \{$
 1. $E \rightarrow TE_1$
 2. $E_1 \rightarrow +TE_1$
 3. $E_1 \rightarrow \varepsilon$
 4. $T \rightarrow FT_1$
 5. $T_1 \rightarrow *FT_1$
 6. $T_1 \rightarrow \varepsilon$
 7. $F \rightarrow (E)$
 8. $F \rightarrow a$ $\}$

Exemplu

- ▶ Se calculează mulțimile de simbolii directori:
- ▶ $D_1 = \text{FIRST}^+(TE_1) = \text{FIRST}^+(F) = \{ (, a \}$
- ▶ $D_2 = \text{FIRST}^+(+TE_1) = \{ + \}$
- ▶ $D_3 = \text{FOLLOW}^+(E_1) = \text{FOLLOW}^+(E) = \{) \}$
- ▶ $D_4 = \text{FIRST}^+(FT_1) = \text{FIRST}^+(F) = \{ (, a \}$
- ▶ $D_5 = \text{FIRST}^+(*FT_1) = \{ * \}$
- ▶ $D_6 = \text{FOLLOW}^+(T_1) = \text{FOLLOW}^+(T) = \text{FIRST}^+(E_1) \cup \text{FOLLOW}^+(E) = \{ + \} \cup \{) \} = \{ +,) \}$
- ▶ $D_7 = \text{FIRST}^+((E)) = \{ (\}$
- ▶ $D_8 = \text{FIRST}^+(a) = \{ a \}$

Exemplu

- ▶ Se verifică îndeplinirea condițiilor pentru ca G să fie o gramatică LL(1):
 - ▶ $D_2 \cap D_3 = \emptyset$
 - ▶ $D_5 \cap D_6 = \emptyset$
 - ▶ $D_7 \cap D_8 = \emptyset$
- ▶ **Rezultă faptul că gramatica este o gramatică LL(1)**

Tabela de analiză sintactică

- ▶ pe baza mulțimilor FIRST și FOLLOW calculate, se generează tabela de analiză sintactică

$\Sigma \cup \{\$ \}$

V_N			
\cup			
Σ			
$\{\$ \}$			

- ▶ P - pop - scoate un simbol din stivă și înaintează în SI
- ▶ A - accept - propoziția este corectă
- ▶ E - error - propoziția este incorectă
- ▶ R n - replace - se înlocuiește VS cu partea dreaptă a regulii de producție n , după care n se scrie în SO
- ▶ simbolul \$ reprezintă terminatorul de șir pentru SI

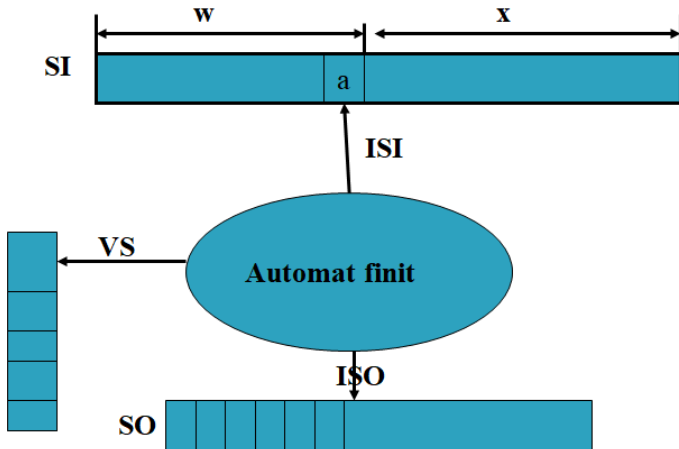
Tabela de analiză sintactică

Algoritmul de construcție a tabelii de analiză sintactică:

- ▶ Pentru fiecare regulă de producție $n : A \rightarrow \alpha \in P$
 - ▶ pentru fiecare terminal din $FIRST^+(\alpha)$, se completează cu R n celula din tabelă corespunzătoare coloanei terminalului respectiv și liniei neterminalului A
 - ▶ **sau**
 - ▶ pentru fiecare terminal din $FOLLOW^+(A)$, se completează cu R n celula din tabelă corespunzătoare terminalului respectiv și liniei neterminalului A

Analiza sintactică LL(1)

- ▶ pe baza tabelului de analiză sintactică se poate implementa un analizor sintactic determinist cu structura



Exemplu

- pentru exemplul anterior, tabela de analiză sintactică este (celulele goale reprezintă E):

	a	$($	$)$	$+$	$*$	$\$$
E	R 1	R 1				
E_1			R 3	R 2		R 3
T	R 4	R 4				
T_1			R 6	R 6	R 5	R 6
F	R 8	R 7				
a	P					
$($		P				
$)$			P			
$+$				P		
$*$					P	
$\$$						A

Algoritmul de analiză sintactică LL(1)

```
sf  $\leftarrow$  false  
repetă până când sf = true  
    dacă  $\text{St}(\text{VS}) \in \Sigma \wedge \text{St}(\text{VS}) = \text{SI}(\text{ISI})$   
    atunci  
        pop  
         $\text{ISI} = \text{ISI} + 1$   
    sau  $\text{St}(\text{VS}) \in \Sigma$  și  $\text{St}(\text{VS}) \neq \text{SI}(\text{ISI})$   
    atunci  
        error
```

Algoritmul de analiză sintactică LL(1)

sau $\text{St}(\text{VS}) = A \in V_N$

atunci

 replace n

$\text{SO}(\text{ISO}) = n$

$\text{ISO} = \text{ISO} + 1$

sau $\text{St}(\text{VS}) = \text{SI}(\text{ISI}) = \$$

atunci

 accept

$\text{sf} \leftarrow \text{true}$

altfel

 error

$\text{sf} \leftarrow \text{true}$

Analiza sintactică LL(1)

- ▶ Modelul matematic al acestui tip de analiză rămâne automatul finit cu stivă
 - ▶ un element suplimentar: șirul de ieseire
- ▶ Funcția de tranziție ($a, b, i, x \in \Sigma$):
 - ▶ $f(q, a, a) = \{(q, \epsilon)\}$ pop
 - ▶ $f(q, \$, \$) = \{(a, \epsilon)\}$ accept
 - ▶ $f(q, b, A) = \{(q, \alpha)\}$ replace $A \rightarrow b\alpha$ conform tablei de analiză sintactică
 - ▶ $f(q, i, x) = \{(e, \epsilon)\}$ error

Analiza sintactică LL(1)

► Configurația automatului:

- (q, x, γ, y)
- q - starea automatului
- x - șirul de intrare rămas de analizat
- γ - stiva
- y - șirul de ieșire, format din indicii regulilor de producție utilizate în derivări

► Configurații posibile: $(a, b, i \in \Sigma, x \in \Sigma^*)$

- $(q, ax, a\gamma, y) \rightarrow (q, x, \gamma, y)$ pop
- $(q, ax, A\gamma, y) \rightarrow (q, x, \alpha\gamma, yi)$ replace i , conform tabelii de analiză
- $(q, \$, \$, y) \rightarrow (a, \epsilon, \epsilon, y)$ accept
- $(q, bx, i\gamma, y) \rightarrow (e, \epsilon, \epsilon, y)$ error

Exemplu

Sucesiunea relațiilor de mișcare pentru analiza propoziției $a * a + a$ de către automatul construit în cadrul exemplului:

$$(q, a * a + a$, E$, \epsilon)$$

$$\vdash^r (q, a * a + a$, TE_1$, 1)$$

$$\vdash^r (q, a * a + a$, FT_1 E_1$, 14)$$

$$\vdash^r (q, a * a + a$, aT_1 E_1$, 148)$$

$$\vdash^p (q, *a + a$, FT_1 E_1$, 148)$$

$$\vdash^r (q, *a + a$, *FT_1 E_1$, 1485)$$

$$\vdash^p (q, a + a$, FT_1 E_1$, 1485)$$

$$\vdash^r (q, a + a$, aT_1 E_1$, 14858)$$

$$\vdash^p (q, +a$, aT_1 E_1$, 14858)$$

Exemplu

Sucesiunea relațiilor de mișcare pentru analiza propoziției $a * a + a$ de către automatul construit în cadrul exemplului:

$$\vdash^r (q, +a$, aE_1 $, 148586)$$

$$\vdash^r (q, +a$, $+TE_1$ $, 1485862)$$

$$\vdash^p (q, a$, TE_1 $, 1485862)$$

$$\vdash^r (q, a$, FT_1E_1 $, 14858624)$$

$$\vdash^r (q, a$, aT_1E_1 $, 148586248)$$

$$\vdash^p (q, $, T_1E_1 $, 148586248)$$

$$\vdash^r (q, $, E_1 $, 1485862486)$$

$$\vdash^r (q, $, $, 14858624863)$$

$$\vdash^a (a, $, $, 14858624863)$$

Exercițiu

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, \langle \text{instructiune} \rangle, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{\text{if, then, (,), else, repeat, until, :=, <, <=, i,,}\}$
- ▶ $V_N = \{\langle \text{instructiune} \rangle, \langle \text{expr-logica} \rangle, \langle \text{factor} \rangle, \langle \text{lista} \rangle\}$
- ▶ $\langle \text{instructiune} \rangle$

Exercițiu

- $P = \{$
1. $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow \text{if } \langle \text{expr-logica} \rangle \text{ then } (\langle \text{instructiune} \rangle) [\text{else } \langle \text{instructiune} \rangle]$
 2. $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow \text{repeat } \langle \text{instructiune} \rangle \text{ until } \langle \text{expr-logica} \rangle$
 3. $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow \langle \text{factor} \rangle := \langle \text{factor} \rangle$
 4. $\langle \text{expr-logica} \rangle \rightarrow \langle \text{factor} \rangle < \langle \text{factor} \rangle \mid \langle \text{factor} \rangle < = \langle \text{factor} \rangle$
 5. $\langle \text{factor} \rangle \rightarrow i \mid i (\langle \text{lista} \rangle)$
 6. $\langle \text{lista} \rangle \rightarrow i \mid \langle \text{lista} \rangle, i$
- $\}$

Exercițiu

Gramatica modificată este $G = \langle \Sigma, V_N, \langle \textit{instructiune} \rangle, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{\text{if, then, (,), else, repeat, until, :=, <, <=, i, ,,}\}$
- ▶ $V_N = \{\langle \textit{instructiune} \rangle, \langle \textit{expr-logica} \rangle, \langle \textit{factor} \rangle, \langle \textit{lista} \rangle, I1, E1, F1, L1\}$
- ▶ $\langle \textit{instructiune} \rangle$

Exercițiu

- $P = \{$
1. $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow \text{if } \langle \text{expr-logica} \rangle \text{ then } (\langle \text{instructiune} \rangle) \text{ l1}$
 2. $\text{l1} \rightarrow \text{else } \langle \text{instructiune} \rangle$
 3. $\text{l1} \rightarrow \epsilon$
 4. $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow \text{repeat } \langle \text{instructiune} \rangle \text{ until } \langle \text{expr-logica} \rangle$
 5. $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow \langle \text{factor} \rangle := \langle \text{factor} \rangle$
 6. $\langle \text{expr-logica} \rangle \rightarrow \langle \text{factor} \rangle \text{ E1}$
 7. $\text{E1} \rightarrow \langle \text{factor} \rangle$

Exercițiu

- ▶ 8. $E1 \rightarrow <= <factor>$
- 9. $<factor> \rightarrow i F1$
- 10. $F1 \rightarrow (<lista>)$
- 11. $F1 \rightarrow \epsilon$
- 12. $<lista> \rightarrow i L1$
- 13. $L1 \rightarrow , i <lista>$
- 14. $L1 \rightarrow \epsilon$
- }

Exercițiu

- ▶ **FIRST⁺** { if }
- ▶ **FIRST⁺** { else }
- ▶ **FOLLOW⁺** {) until \$ }
- ▶ **FIRST⁺** { repeat }
- ▶ **FIRST⁺** { i }
- ▶ **FIRST⁺** { i }
- ▶ **FIRST⁺** { < }
- ▶ **FIRST⁺** { <= }
- ▶ **FIRST⁺** { i }
- ▶ **FIRST⁺** { (}

Exercițiu

- ▶ $\text{FOLLOW}^+(F1) = \text{FOLLOW}^+(\langle \text{factor} \rangle)$
 $= \{ := \} \cup \text{FIRST}^+(E1) = \{ := < <= \} \cup$
 $\text{FOLLOW}^+(E1) \cup \text{FOLLOW}^+(\langle \text{instrucțiune} \rangle)$
 $= \{ := < <= \text{ then} \rangle \text{ until } \$ \}$
- ▶ $\text{FIRST}^+ \quad \{ i \}$
- ▶ $\text{FIRST}^+ \quad \{ , \}$
- ▶ $\text{FOLLOW}^+ \quad \{) \}$

Mașina abstractă de analiză LL(1)

- ▶ Structura mașinii de analiză LL(1) corespunde cu structura mașinii abstracte de analiză predictivă

Mașina abstractă de analiză LL(1)

- ▶ Setul de instrucțiuni al procesorului acestei mașini este format din:
- ▶ **check(a) L**
 - ▶ verifică dacă atomul lexical curent din șirul de intrare este identic cu a
 - ▶ dacă da, atunci execuția se continuă cu instrucțiunea de la eticheta L
 - ▶ dacă nu, se continuă execuția cu instrucțiunea următoare
- ▶ **call A**
 - ▶ apel cu revenire la eticheta A

Mașina abstractă de analiză LL(1)

- ▶ **return**
 - ▶ revenire dintr-un **call**
- ▶ **pop**
 - ▶ avansare în șirul de intrare
- ▶ **accept**
 - ▶ încheiere execuție program - propoziția este corectă
- ▶ **error**
 - ▶ încheiere execuție program - propoziția este incorectă

Exemplu

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, E, P \rangle$, unde:

► $\Sigma = \{+, *, (,), a, ,, \}$

► $V_N = \{E, T, F, L\}$

► E

► $P = \{$

$$E \rightarrow E + T$$

$$E \rightarrow T$$

$$T \rightarrow T * F$$

$$T \rightarrow F$$

$$F \rightarrow a$$

$$F \rightarrow a(L)$$

$$F \rightarrow (E)$$

$$L \rightarrow E$$

$$L \rightarrow E, L$$

$\}$

Exemplu

- ▶ Să se constuiască analizorul sintactic LL(1) pentru limbajul definit de G.
- ▶ Să se scrie programul pentru mașina abstractă de analiză LL(1) pentru analizorul construit.

Exemplu

Se modifică gramatica pentru a respecta condițiile pentru implementarea analizei sintactice predictive:

Gramatica modificată este $G = \langle \Sigma, V_N, E, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{+, *, (,), a, ,, \}$
- ▶ $V_N = \{E, T, F, L\}$
- ▶ E
- ▶ $P = \{$
 1. $E \rightarrow TE_1$
 2. $E_1 \rightarrow +TE_1$
 3. $E_1 \rightarrow \epsilon$
 4. $T \rightarrow FT_1$

Exemplu

$$5. T_1 \rightarrow *FT_1$$

$$6. T_1 \rightarrow \epsilon$$

$$7. F \rightarrow aF_1$$

$$8. F \rightarrow (E)$$

$$9. F_1 \rightarrow (L)$$

$$10. F_1 \rightarrow \epsilon$$

$$11. L \rightarrow EL_1$$

$$12. L_1 \rightarrow , L$$

$$13. L_1 \rightarrow \epsilon$$

}

Exemplu

Calculăm mulțimile de simbolii directori:

$$D_1 = FIRST^+(TE_1) = \{a; (\}$$

$$D_2 = FIRST^+(+TE_1) = \{+\}$$

$$D_3 = FOLLOW^+(E_1) = FOLLOW^+(E) = \{); , \} \cup FOLLOW^+\{L_1\} = \{); , ; \$\}$$

$$D_4 = FIRST^+(FT_1) = FIRST^+(F) = \{a; (\}$$

$$D_5 = FIRST^+(*FT_1) = \{*\}$$

$$D_6 = FOLLOW^+(T_1) = FOLLOW^+(T) =$$

$$FIRST^+(E_1) \cup FOLLOW^+(E_1) = \{+\} \cup \{)\} \cup FIRST^+(L_1) = \{+;); , ; \$\}$$

Exemplu

$$D_7 = FIRST^+(*aF_1) = \{a\}$$

$$D_8 = FIRST^+((E)) = \{(\}$$

$$D_9 = FIRST^+((L)) = \{(\}$$

$$D_{10} = FOLLOW^+(F_1) = FOLLOW^+(F) =$$

$$FIRST^+(T_1) \cup FOLLOW^+(T_1) = \{*\} \cup \{+;);,; \$\} = \{*;);,; \$\}$$

$$D_{11} = FIRST^+(EL_1) = FIRST^+(F) = \{a; (\}$$

$$D_{12} = FIRST^+(, L) = \{, \}$$

$$D_{13} = FOLLOW^+(L_1) = FOLLOW^+(L) = \{)\}$$

Exemplu

Construim tabelul de analiză LL(1):

	+	*	<i>a</i>	()	,	\$
<i>E</i>			R 1	R 1			
<i>E</i> ₁	R 2				R 3	R 3	R 3
<i>T</i>			R 4	R 4			
<i>T</i> ₁	R 6	R 5			R 6	R 6	R 6
<i>F</i>			R 7	R 8			
<i>F</i> ₁	R 10	R 10		R 9	R 10	R 10	R 10
<i>L</i>			R 11	R 11			
<i>L</i> ₁					R 13	R 12	
+	P						
*		P					
<i>a</i>			P				
(				P			
)					P		
,						P	
\$							A

Exemplu

PP: call E
 check(\$) EE
 error
EE: accept

Exemplu

E: check(a) EA
 check() EA
 error

EA: call T
 call E1
 return

Exemplu

```
E1: check(+) E1A
      check()) E1B
      check(,) E1B
      check($) E1B
      error
E1A: pop (+)
      call T
      call E1
E1B: return
```


Exemplu

T: check(a) TA
 check(()) TA
 error

TA: call F
 call T1
 return

Exemplu

T1: check(*) T1A
check(+) T1B
check()) T1B
check(,) T1B
check(\$) T1B
error

T1A: pop (*)
call F
call T1

T1B: return

Exemplu

F: check(a) FA

check() FB

error

FA: pop (a)

call F1

return

FB: pop ((

call E

check()) FC

error

FC: pop ())

return

Exemplu

```
F1: check (() F1A
      check (+) F1B
      check (*) F1B
      check ()) F1B
      check (,) F1B
      check ($) E1B
      error
F1A: pop (()
      call L
      check ()) F1C
      error
F1C: pop ())
F1B: return
```

Exemplu

L: check(a) LA
 check() LA
 error

LA: call E
 call L1
 return

Exemplu

L1: check(,) L1A
 check()) L1B
 error

L1A: pop (<)
 call L

L1B: return

Exercițiu

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, E, P \rangle$, unde:

► $\Sigma = \{+, -, *, /, (,), a, ,, \}$

► $V_N = \{E, T, F, L\}$

► E

► $P = \{$
 $E \rightarrow E + T \mid E - T \mid T$
 $T \rightarrow T * F \mid T / F \mid F$
 $F \rightarrow a \mid a(L) \mid (E)$
 $L \rightarrow E \mid E, L$
 $\}$

Să se scrie programul mașinii abstracte de analiză predictivă LL(1) pentru limbajul definit de gramatica G.

Analiza sintactică prin coborâre recursivă

- ▶ **implementare a analizei sintactice predictive**
- ▶ fiecare neterminal devine un nume de funcție
- ▶ funcția principală
 - ▶ apelează funcția corespunzătoare simbolului de start
 - ▶ apoi verifică dacă s-a ajuns la sfârșitul șirului de intrare
- ▶ funcția corespunzătoare unui anumit neterminal
 - ▶ este responsabilă să verifice dacă, de la poziția curentă din șirul de intrare, se poate găsi o derivare care pornește de la acest neterminal
 - ▶ dacă nu este posibil, funcția trebuie să sară peste ceea ce a găsit și să semnaleze o eroare
- ▶ există o funcție **next** care face un avans cu o poziție în șirul de intrare

Exemplu

Exemplificarea implementării analizei sintactice LL(1) prin coborâre recursivă pentru limbajul definit de gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, E, P \rangle$:

- ▶ $\Sigma = \{+, *, (,), a\}$
- ▶ $V_N = \{E, T, F\}$
- ▶ E
- ▶ $P = \{$
 $E \rightarrow E + T \mid T$
 $T \rightarrow T * F \mid F$
 $F \rightarrow a \mid (E)$
 $\}$

Exemplu

Gramatica modificată este $G = \langle \Sigma, V_N, E, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{+, *, (,), a\}$
- ▶ $V_N = \{E, E_1, T, T_1, F\}$
- ▶ E
- ▶ $P = \{$
 1. $E \rightarrow TE_1$
 2. $E_1 \rightarrow +TE_1$
 3. $E_1 \rightarrow \varepsilon$
 4. $T \rightarrow FT_1$
 5. $T_1 \rightarrow *FT_1$
 6. $T_1 \rightarrow \varepsilon$
 7. $F \rightarrow (E)$
 8. $F \rightarrow a$ $\}$

Exemplu

- ▶ Se calculează mulțimile de simbolii directori:
- ▶ $D_1 = \text{FIRST}^+(TE_1) = \text{FIRST}^+(F) = \{ (, a \}$
- ▶ $D_2 = \text{FIRST}^+(+TE_1) = \{ + \}$
- ▶ $D_3 = \text{FOLLOW}^+(E_1) = \text{FOLLOW}^+(E) = \{) \}$
- ▶ $D_4 = \text{FIRST}^+(FT_1) = \text{FIRST}^+(F) = \{ (, a \}$
- ▶ $D_5 = \text{FIRST}^+(*FT_1) = \{ * \}$
- ▶ $D_6 = \text{FOLLOW}^+(T_1) = \text{FOLLOW}^+(T) = \text{FIRST}^+(E_1) \cup \text{FOLLOW}^+(E) = \{ + \} \cup \{) \} = \{ +,) \}$
- ▶ $D_7 = \text{FIRST}^+((E)) = \{ (\}$
- ▶ $D_8 = \text{FIRST}^+(a) = \{ a \}$

Exemplu

- ▶ Se verifică îndeplinirea condițiilor pentru ca G să fie o gramatică LL(1):
 - ▶ $D_2 \cap D_3 = \emptyset$
 - ▶ $D_5 \cap D_6 = \emptyset$
 - ▶ $D_7 \cap D_8 = \emptyset$
- ▶ **Rezultă faptul că gramatica este o gramatică LL(1)**

Exemplu

	a	$($	$)$	$+$	$*$	$\$$
E	R 1	R 1				
E_1			R 3	R 2		R 3
T	R 4	R 4				
T_1			R 6	R 6	R 5	R 6
F	R 8	R 7				
a	P					
$($		P				
$)$			P			
$+$				P		
$*$					P	
$\$$						A

Analiza sintactică prin coborâre recursivă

```
PROCEDURE MAIN IS  
BEGIN  
    E;  
    IF input is empty  
    THEN  
        accept;  
    ELSE  
        error;  
    ENDIF;  
END MAIN;
```

Analiza sintactică prin coborâre recursivă

```
PROCEDURE E IS
BEGIN
    IF head of input='a' OR
       head of input='('
    THEN
        T;
        E1;
    ELSE
        error;
    ENDIF;
END E;
```

Analiza sintactică prin coborâre recursivă

```
PROCEDURE E1 IS
BEGIN
    IF      head of input='+'
    THEN
        next;
        T;
        E1;
    ELSEIF  head of input=')' OR
            head of input=  $\epsilon$ 
    THEN
        ;
    ELSE
        error;
    EDIF;
END E1;
```


Analiza sintactică prin coborâre recursivă

```
PROCEDURE F IS
BEGIN
    IF      head of input='a'
    THEN next
    ELSEIF head of input='('
    THEN next;
        E;
        IF      head of input=')'
        THEN next;
        ELSE error;
        ENDIF;
    ELSE error;
    ENDIF;
END F;
```

Exercițiu

1. Să se scrie funcțiile corespunzătoare neterminalelor T și $T1$ pentru gramatica anterioară.
2. Să se analizeze propoziția "(a)", reprezentând stările stivei de apeluri.

Întrebări recapitulative

- ▶ Fie $AP = (Q, \Sigma, \Gamma, f, q_0, z_0, F)$ un automat finit cu stivă care implementează analiza sintactică descendentă pentru gramatica $G = (\Sigma, V_N, S, P)$. Scrieți care este configurația inițială a automatului pentru analiza propoziției p date și explicați.
- ▶ În cazul în care s-ar folosi derivarea dreapta, enumerați care ar fi restricțiile pe care ar trebui să le îndeplinească o gramatică G , pentru a se putea construi un analizor sintactic descendent care să verifice dacă o propoziție dată aparține mulțimii $L(G)$.
- ▶ Explicați de ce este nedeterminist algoritmul general de analiză sintactică descendentă.

Întrebări recapitulative

- ▶ Explicați în ce scop analizorul LL(1) citește un atom lexical în avans.
- ▶ Explicați de ce nu se poate aplica analiza sintactică descendentă în cazul unei propoziții care aparține limbajului definit de o gramatică ale cărei reguli de producție folosesc recursivitatea stânga.
- ▶ Care sunt intrarea și ieșirea analizei sintactice?

Întrebări recapitulative

- ▶ Explicați care ar fi avantajul utilizării analizei $LL(k)$, $k > 1$, față de analiza $LL(1)$.
- ▶ Explicați de ce, în cazul gramaticilor $LL(1)$, intersecția mulțimilor de simbolii directori calculate pentru regulile de producție ale aceluiași neterminal trebuie să fie mulțimea vidă.
- ▶ Explicați ce rol are recursivitatea în cadrul analizei sintactice prin coborâre recursivă.

Întrebări recapitulative

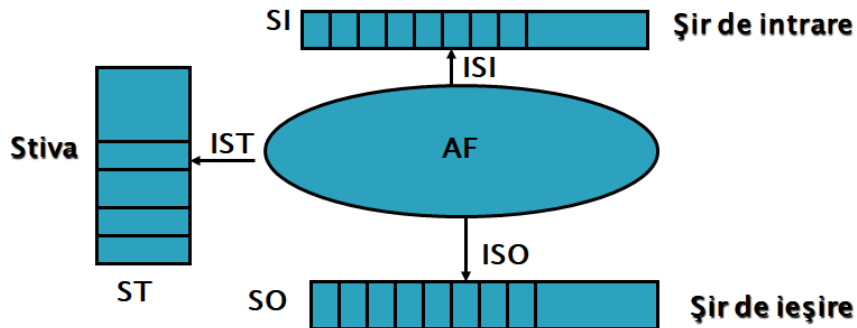
- ▶ Explicați cum rezolvă analiza sintactică descendentă cu reveniri nedeterminismul analizei sintactice predictive.
- ▶ Explicați cum rezolvă analiza LL(1) nedeterminismul analizei sintactice predictive.

Analiza sintactică ascendentă

Analiza sintactică ascendentă

- ▶ încearcă construirea arborelui sintactic pentru propoziția dată **pleacând de la propoziție** către simbolul de start
- ▶ folosește două operații:
 - ▶ căutarea frazei simple (priza) - **shift**
 - ▶ reducerea frazei simple - **reduce**
- ▶ poate fi modelată prin intermediul unui automat finit cu stivă care lucrează asupra unui șir de intrare

Analiza sintactică ascendentă



Analiza sintactică ascendentă

Algoritmul analizei sintactice ascendente pentru un limbaj definit printr-o gramatică G este:

- ▶ 1. Stiva este inițial goală.
- ▶ 2. Se deplasează un atom lexical din șirul de intrare în vârful stivei (**shift**).
- ▶ 3. Se repetă pasul al 2-lea până când în vârful stivei se regăsește partea dreaptă a unei reguli de producție.

Analiza sintactică ascendentă

- ▶ 4. Se înlocuiește vârful stivei care reprezintă partea dreaptă a unei reguli de producție, cu partea stângă a regulii de producție respective (**reduce**).
- ▶ 5. Se repetă pașii 2, 3, 4.
- ▶ 6. La sfârșit:
 - ▶ Dacă **s-a ajuns la sfârșitul șirului de intrare** și dacă **stiva conține numai simbolul de start**, atunci acesta este **corect**.
 - ▶ Altfel, șirul nu este corect.

Analiza sintactică ascendentă

- ▶ algoritm **nedeterminist**

- ▶ dacă vârful stivei coincide cu părțile drepte ale mai multor reguli de producție
 - ▶ algoritmul NU precizează **cum se alege regula de producție** care va fi folosită pentru reducere
- ▶ dacă vârful stivei coincide cu partea dreaptă a unei reguli de producție și dacă mai există atomi lexicali în șirul de intrare
 - ▶ algoritmul NU precizează **cum se va alege operația** care va fi realizată: shift sau reduce

Exemplu

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, E, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{\text{id}, (,), +\}$
- ▶ $V_N = \{E\}$
- ▶ E
- ▶ $P = \{$
 1. $E \rightarrow (E + E)$
 2. $E \rightarrow \text{id}$ $\}$

Propoziția de analizat:

$(\text{id} + (\text{id} + \text{id})) \in \Sigma^*$

Stack	Input	Comments
ϵ	(id+(id+id))	shift, shift
(id	+(id+id))	reduce 2
(E	+(id+id))	shift, shift, shift
(E+(id	+id))	reduce 2
(E+(E	+id))	shift, shift
(E+(E+id	))	reduce 2
(E+(E+E	))	shift
(E+(E+E)	)	reduce 1
(E+E	)	shift
(E+E)	ϵ	reduce 1
E	ϵ	accept

Automatul finit cu stivă

- ▶ **Modelul matematic** al analizorului sintactic ascendent este automatul finit cu stivă:
- ▶ $AP = \langle Q, \Sigma, \Gamma, f, q_0, z_0, F \rangle$, unde:
 - ▶ Q - mulțimea stărilor
 - ▶ Σ - alfabetul automatului
 - ▶ Γ - alfabetul stivei
 - ▶ z_0 - simbolul inițial al stivei
 - ▶ q_0 - starea inițială
 - ▶ F - mulțimea stărilor finale
 - ▶ f - funcția de tranziție
$$f : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times \Gamma \rightarrow P(Q \times \Gamma^*),$$

P fiind o mulțime de perechi

Automatul finit cu stivă

► Configurația automatului

- (q, x, γ) , $q \in Q$, $x \in \Sigma^*$, $\gamma \in \Gamma^*$
- configurația inițială: (q_0, x, ϵ)

► Relația de mișcare

- $(q_1, ax, \alpha\beta) \vdash (q_2, x, \alpha\gamma) \Leftrightarrow (q_2, \gamma) \in f(q_1, a, \beta)$

► Un șir $w \in \Sigma^*$ este **acceptat** de către automat:

- criteriul stării vide:
 $(q_0, w, z_0) \vdash^+ (q, \epsilon, S)$
- criteriul stării finale:
 $(q_0, w, z_0) \vdash^+ (q, \epsilon, \gamma)$, $q \in F$

Automatul finit cu stivă

► f

- $f(q, a, \alpha) = \{(q, a\alpha)\}$ - (**shift**)
- $f(q, \epsilon, \alpha\beta) = \{(q, A\beta)\} \Leftrightarrow A \rightarrow \alpha \in P$ - (**reduce**)
- $f(q, \epsilon, S) = \{(q, \epsilon)\}$ - (**accept**)
- $f(q, \epsilon, \alpha)$ - (**error**)

Exemplu

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, S, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{a, b, c\}$
- ▶ $V_N = \{S, A\}$
- ▶ S
- ▶ $P = \{$
 1. $S \rightarrow aAc$
 2. $A \rightarrow bA$
 3. $A \rightarrow b$ $\}$

Propoziția de analizat:

$abbbc \in \Sigma^*$

Exemplu

$(q, \text{abbbbc}\$, \$)$

$\vdash^s (q, \text{bbbc}\$, \text{a}\$)$

$\vdash^s (q, \text{bbc}\$, \text{ab}\$)$

$\vdash^s (q, \text{bc}\$, \text{abb}\$)$

$\vdash^s (q, \text{c}\$, \text{abbb}\$)$

$\vdash^{r(3)} (q, \text{c}\$, \text{abbA}\$)$

$\vdash^{r(2)} (q, \text{c}\$, \text{abA}\$)$

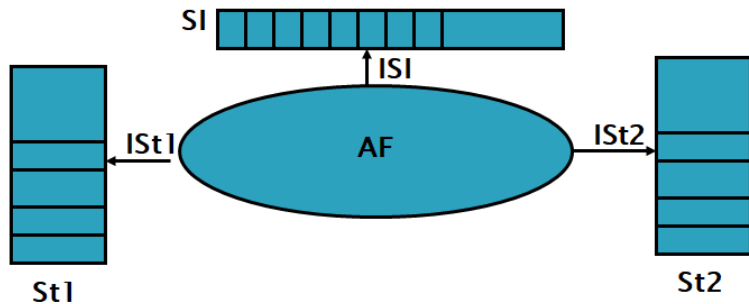
$\vdash^{r(2)} (q, \text{c}\$, \text{aA}\$)$

$\vdash^s (q, \$, \text{aAc}\$)$

$\vdash^{r(1)} (q, \$, \text{S}\$)$

$\vdash^a (q, \$, \$)$

Analiza sintactică ascendentă cu revenire



Analiza sintactică ascendentă cu revenire

1. SI - șirul de intrare (conține atomii lexicali obținuți în urma etapei de analiză lexicală)
2. ISI - indice pentru SI
3. St1 - stiva (acces LIFO) pentru construirea arborelui sintactic
4. ISt1 - vârful stivei St1
5. St2 - stiva de retur
6. ISt2 - vârful stivei St2

Analiza sintactică ascendentă cu revenire

- ▶ (1) **Configurația inițială:**

$$(q, 0, \$, \epsilon)$$

- ▶ (2) **reduce:**

$$(q, i, \beta\alpha, \gamma) \vdash (q, i, \beta A, \gamma j) \Leftrightarrow \exists j : A \rightarrow \alpha \in P$$

- ▶ regulile de producție sunt ordonate crescator, după lungimea părților drepte
- ▶ se buclează (2) atât timp cât se mai poate face o reducere

Analiza sintactică ascendentă cu revenire

► (3) **shift**

$(q, i, \alpha, \gamma) \vdash (q, i+1, \alpha a, \gamma/)$

- / indică un avans în șirul de intrare
- dacă $i < n+1$, atunci se sare la (2)
- dacă $i = n+1$, atunci se sare la (4)

► (4) **accept**

$(q, n+1, \$\$, \gamma) \vdash (a, n+1, \$\$, \gamma)$

- γ va conține șirul derivărilor stânga
- dacă nu se poate aplica (4), atunci se sare la (5)

Analiza sintactică ascendentă cu revenire

(5) revenire

$$(q, n+1, \alpha, \gamma) \vdash (b, n+1, \alpha, \gamma)$$

$$5.1. (b, i, \alpha a, \gamma/) \vdash (b, i-1, \alpha, \gamma)$$

se ciclează cât timp există / în vârful St2

$$5.2. (b, i, \alpha A, \gamma j) \vdash (q, i, \alpha'' B, \gamma k) \Leftrightarrow \alpha = \alpha'' \alpha'$$

și $\exists k : B \rightarrow \alpha' \beta$ și $j : A \rightarrow \beta \in P$

se sare apoi la (2)

$$5.3. (b, i, \alpha A, \gamma j) \vdash (q, i+1, \alpha \beta a, \gamma/) \Leftrightarrow i < n$$

se sare apoi la (2)

$$5.4. (b, n+1, \alpha A, \gamma j) \vdash (q, n+1, \alpha \beta, \gamma)$$

se sare apoi la (2)

Exemplu

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, S, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{a, b, c\}$
- ▶ $V_N = \{S, A, B, C\}$
- ▶ S
- ▶ $P = \{$
 1. $S \rightarrow Bab$
 2. $S \rightarrow Cac$
 3. $A \rightarrow BA$
 4. $A \rightarrow a$
 5. $B \rightarrow a$
 6. $C \rightarrow a$ $\}$

Propoziția de analizat: aab

Exemplu

$(q, 0, \$, \epsilon)$

$\vdash^s (q, 1, \$a, /)$

$\vdash^r (q, 1, \$A, /4)$

$\vdash^s (q, 2, \$Aa, /4/)$

$\vdash^r (q, 2, \$AA, /4/4)$

$\vdash^s (q, 3, \$AAb, /4/4/)$

$\vdash^b (b, 3, \$AAb, /4/4/)$

$\vdash_{s.1}^b (b, 2, \$AA, /4/4)$

$\vdash_{s.2}^b (q, 2, \$AB, /4/5)$

$\vdash^s (q, 3, \$ABb, /4/5/)$

$\vdash^s (b, 3, \$ABb, /4/5/)$

$\vdash_{s.1}^b (b, 2, \$AB, /4/5)$

Exemplu

$\vdash_{s.2}^b (q, 2, \$AC, /4/6)$
 $\vdash^s (q, 3, \$ACb, /4/6/)$
 $\vdash_s^b (b, 3, \$ACb, /4/6/)$
 $\vdash_{s.1}^b (b, 2, \$AC, /4/6)$
 $\vdash_{s.3}^b (q, 3, \$Aab, /4//)$
 $\vdash_s^b (b, 3, \$Aab, /4//)$
 $\vdash_{s.1}^b (b, 1, \$A, /4)$
 $\vdash_{s.2}^b (q, 1, \$B, /5)$
 $\vdash^s (q, 2, \$Ba, /5/)$
 $\vdash^r (q, 2, \$BA, /5/4)$
 $\vdash^r (q, 2, \$A, /5/43)$
 $\vdash^r (q, 3, \$Ab, /5/43/)$
 $\vdash^r (b, 3, \$Ab, /5/43/)$
 $\vdash^r (b, 2, \$A, /5/43)$
 $\vdash^s (q, 3, \$BAb, /5/4/)$

Exemplu

$\vdash^s (b, 3, \$BAb, /5/4/)$

$\vdash^{s.1} (b, 2, \$BA, /5/4)$

$\vdash^{s.2} (q, 2, \$BB, /5/5)$

$\vdash^{5.2} (q, 2, \$BB, /5/5)$

$\vdash^s (q, 3, \$BBb, /5/5/)$

$\vdash^5 (b, 3, \$BBb, /5/5/)$

$\vdash^{5.1} (b, 2, \$BB, /5/5)$

$\vdash^{5.2} (q, 2, \$BC, /5/6)$

$\vdash^s (q, 3, \$BCb, /5/6/)$

$\vdash^5 (b, 3, \$BCb, /5/6/)$

$\vdash^{5.1} (b, 2, \$BC, /5/6)$

$\vdash^{5.3} (q, 3, \$Bab, /5//)$

Exemplu

$\vdash^r (q, 3, \$S, /5//1)$

$\vdash^s (q, 4, \$S$, /5//1)$

$\vdash (a, 4, \$S$, /5//1)$

Exemplu

Șirul reducerilor stânga: 5 1

$aab \rightarrow^{(5)} Bab \rightarrow^{(1)} S$

Șirul derivărilor stânga: 1 5

$S \Rightarrow^{(5)} Bab \Rightarrow^{(1)} aab$

Analiza sintactică bazată pe relații de precedență

- ▶ mulțimea limbajelor de precedență \subset mulțimea limbajelor independente de context
- ▶ relații de precedență $<$ $=$ $>$
 - ▶ operator
 - ▶ simplă
 - ▶ slabă
- ▶ pentru a determina un capăt se analizează relațiile de precedență dintre ST(IST) și SI(ISI)

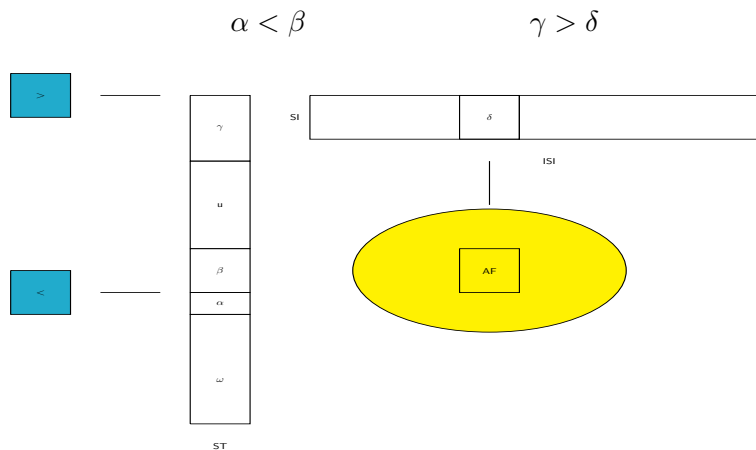
Analiza sintactică bazată pe relații de precedență

$$S \Rightarrow^* \omega \alpha \underline{A} \delta \nu \Rightarrow \omega \alpha \underline{\beta v \gamma} \delta \nu, \exists A \rightarrow \beta v \gamma \in P$$

$$\alpha \in (V_N \cup \Sigma) \quad \beta \in (V_N \cup \Sigma) \quad v \in (V_N \cup \Sigma)^*$$

$$\gamma \in (V_N \cup \Sigma) \quad \delta \in \Sigma \quad \nu \in \Sigma^*$$

Analiza sintactică bazată pe relații de precedență



Analiza sintactică bazată pe precedența operator (Robert Floyd)

Robert Floyd

Carnegie Mellon University, Stanford University

Lucrari in:

theory of parsing, semantics of programming languages, automatic program verification, automatic program synthesis, and analysis of algorithms



Analiza sintactică bazată pe precedența operator

O gramatică

- ▶ independentă de context
- ▶ fără reguli vide

este o **gramatică în forma operator** dacă

- ▶ nu are reguli de producție vide
- ▶ nu are reguli de producție de forma:

$$\mathbf{A} \rightarrow \alpha BC\beta \text{ și } A \rightarrow B$$

$$\alpha, \beta \in (V_N \cup \Sigma)^*, B, C, \in V_N$$

(Adică în partea dreaptă a oricărei reguli de producție nu există două neterminale unul după celălalt, și nici un singur neterminal.)

Analiza sintactică bazată pe precedența operator

Într-o astfel de gramatică operanzii sunt neterminalele, iar operatorii sunt terminalele.

Orice gramatică independentă de context poate fi adusă la forma operator fără a afecta limbajul definit de gramatică.

Analiza sintactică bazată pe precedența operator

Definirea **relațiilor de precedență operator**

- ▶ se face pentru simbolurile terminale
- ▶ are scopul de a elimina ambiguitățile algoritmului general de analiză sintactică descendentă și anume:
 - ▶ de a identifica partea dreaptă a regulii de producție care va fi folosită pentru reducere (atunci când există mai multe variante posibile)
 - ▶ de a identifica operația care fi executată (shift sau reduce) atunci când ambele sunt posibile

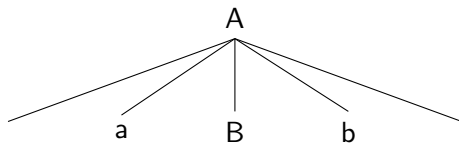
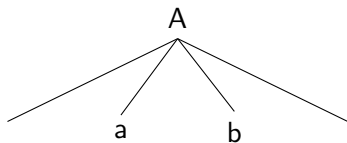
Analiza sintactică bazată pe precedența operator

- ▶ $<_o$ Determină capătul din stânga al părții drepte a regulii de producție
- ▶ $>_o$ Determină capătul din dreapta al părții drepte a regulii de producție
- ▶ $=_o$ Determină interiorul părții drepte al regulii de producție

Definirea relațiilor de precedență operator

$$a =_o b \Leftrightarrow \exists A \rightarrow \alpha ab\beta \in P \textbf{ sau } A \rightarrow \alpha aBb\beta \in P$$

unde $a, b \in \Sigma$, $A, B \in V_N$ și $\alpha, \beta \in V^*$



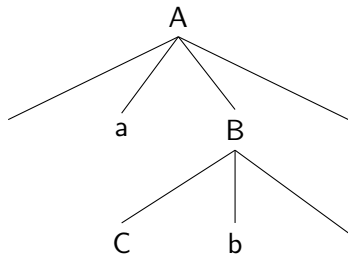
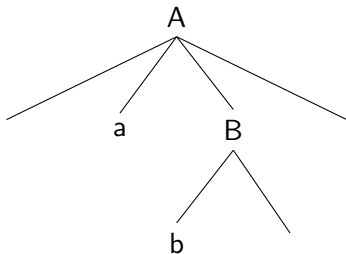
Definirea relațiilor de precedență operator

$$a <_o b \Leftrightarrow \exists A \rightarrow \alpha a B \beta \in P \text{ și } B \Rightarrow^+ b \gamma \text{ sau } B \Rightarrow^+ C b \gamma$$

unde $a, b \in \Sigma$, $A, B, C \in V_N$ și $\alpha, \beta \in V^*$

și se scrie $a <_o FIRST \sim^+(B)$

($FIRST \sim^+ =$ terminalul care apare pe prima poziție sau terminalul care apare pe a doua poziție, dacă pe prima este un neterminal)



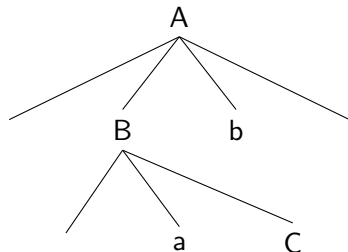
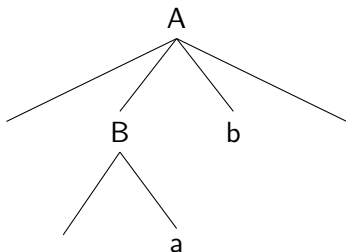
Definirea relațiilor de precedență operator

$$a >_o b \Leftrightarrow \exists A \rightarrow \alpha B b \beta \in P \text{ și } B \Rightarrow^+ \gamma a \text{ sau } B \Rightarrow^+ \gamma a C$$

unde $a, b \in \Sigma$, $A, B, C \in V_N$ și $\alpha, \beta \in V^*$

și se scrie $LAST \sim^+ (B) >_o b$

($LAST \sim^+ =$ terminalul care apare pe ultima poziție sau terminalul care apare pe penultima poziție, dacă pe ultima este un neterminal)



Definirea relațiilor de precedență operator

$$\$ <_o a \Leftrightarrow S \Rightarrow^* a\alpha \text{ sau } S \Rightarrow^* Aa\alpha$$

\$ este mai mic decât orice terminal care apare pe prima poziție sau pe a doua, dacă pe prima este un neterminal, în formele propoziționale

$$a >_o \$ \Leftrightarrow S \Rightarrow^* \alpha a \text{ sau } S \Rightarrow^* \alpha aA$$

este mai mare decât \$ orice terminal care apare pe ultima poziție sau pe penultima, dacă pe ultima este un neterminal, în formele propoziționale

Definirea relațiilor de precedență operator

- ▶ la fel ca și la calculul mulțimilor $FIRST^+$ și $FOLLOW^+$ de la analiza LL(1), și în cazul mulțimilor $FIRST \sim^+$ și $LAST \sim^+$ de la precedența operator se merge (în adâncime) până la nivelul maxim posibil
- ▶ e.g. dacă, în cazul relației de precedență operator mai mic, se află un neterminal pe prima poziție, atunci se ia terminalul de după, dar se și continuă aplicând pe $FIRST \sim^+$ și pentru acel neterminal
- ▶ analog și în cazul relației de precedență operator mai mare

Analiza sintactică bazată pe precedența operator

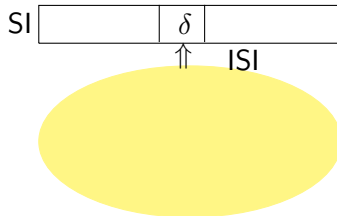
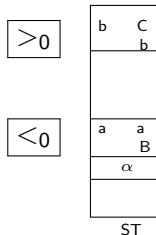
relatii de ordine

<0	$=0$	>0
------	------	------

$$S \Rightarrow w\alpha \underline{A} \delta v \Rightarrow w\alpha\beta u\gamma\delta v, \exists A \rightarrow \beta u\gamma$$

$$\begin{array}{ll} \beta = (a) \vee (aB) & a, b \in \Sigma \\ \gamma = (b) \vee (bC) & \\ \delta \in \Sigma & B, C \in V_N \end{array}$$

$$\begin{array}{l} u \in (V_N \cup \Sigma) \\ v \in \Sigma^* \\ \alpha \in \Sigma \end{array}$$



Analiza sintactică bazată pe precedența operator

Etapele analizei sintactice bazate pe precedența operator:

- ▶ Construirea analizorului sintactic bazat pe precedența operator:
 - ▶ Modificarea gramaticii astfel încât să respecte condițiile cerute pentru gramaticile operator
 - ▶ Calcularea relațiilor de precedență operator (pe baza mulțimilor $FIRST \sim^+$ sau $LAST \sim^+$)
 - ▶ Construirea matricei de precedență operator
 - ▶ Implementarea analizorului bazat pe relațiile de precedență operator
- ▶ Analiza propriu-zisă a unei propoziții

Matricea de precedență operator

	$\Sigma \cup \{\$, \$\}$		
Σ			
\cup			
$\{\$, \$\}$			

- ▶ relația de precedență operator existentă între terminalul de pe linia i și terminalul de pe coloana j
- ▶ în celula corespunzătoare perechii $(\$, \$)$ relația este "accept" - propoziția este acceptată
- ▶ în toate celulele care rămân necompletate relația este "error" - propoziția nu este acceptată

Algoritmul de analiză pe baza matricei de precedență operator

$ISI \leftarrow 0$

repetă

dacă $ST(IST) = \$$ și $SI(ISI) = \$$ atunci propoziția este acceptată
altfel

$a \leftarrow ST(IST)$

$b \leftarrow SI(ISI)$

dacă $a <_o b$ sau $a =_o b$ atunci

shift b în stivă

$ISI \leftarrow ISI + 1$

altfel dacă $a >_o b$ atunci

repetă

scoate un terminal din stivă până când

$ST(IST) <_o$ decât ultimul terminal scos din stivă

altfel eroare

Exemplu

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, E, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{+, *, (,), a\}$
- ▶ $V_N = \{E, T, F, S, D\}$
- ▶ E
- ▶ $P = \{$
 - $E \rightarrow E + T$
 - $E \rightarrow T$
 - $T \rightarrow T * F$
 - $T \rightarrow F$
 - $F \rightarrow SED$
 - $F \rightarrow a$
 - $S \rightarrow ($
 - $D \rightarrow)$ $\}$

Să se analizeze sintactic propoziția $\$(a + (a + a) * a)\$$, folosind modelul automatului finit cu stivă.

Exemplu

Gramatica dată nu este o gramatică operator deoarece:

- ▶ are terminale inutile ($E \rightarrow T$, $T \rightarrow F$)
- ▶ în partea dreaptă a unor reguli de producție există neterminale unul lângă celălalt ($F \rightarrow SED$)
- ▶ prin urmare, pentru a construi un analizor sintactic ascendent bazat pe relațiile de precedență operator, **gramatica trebuie transformată într-o gramatică operator**

Exemplu

Gramatica modificată este $G = \langle \Sigma, V_N, F, P \rangle$, unde:

► $\Sigma = \{+, *, (,), a\}$

► $V_N = \{F\}$

► F

► $P = \{$
 1. $F \rightarrow F + F$
 2. $F \rightarrow F * F$
 3. $F \rightarrow (F)$
 4. $F \rightarrow a$
}

Exemplu

Se calculează relațiile de precedență operator:

$$(1) + <_o FIRST \sim^+ (F)$$

$$(1) LAST \sim^+ (F) >_o +$$

$$(2) * <_o FIRST \sim^+ (F)$$

$$(2) LAST \sim^+ (F) >_o *$$

$$(3) (=)$$

$$(3) (<_o FIRST \sim^+ (F)$$

$$(3) LAST \sim^+ (F) >_o)$$

$$\$ <_o FIRST \sim^+ (F)$$

$$LAST \sim^+ (F) >_o \$$$

Exemplu

Calculând mulțimile $FIRST \sim^+$ și $LAST \sim^+$ se obține:

$$LAST \sim^+ (F) = \{+, *,), a\}$$

$$FIRST \sim^+ (F) = \{+, *, (, a\}$$

Exemplu

Atunci, relațiile de precedență operator ar fi:

$$(1) + <_o FIRST \sim^+ (F) \quad \text{și } FIRST \sim^+ (F) = \{+, *, (, a\}$$

$$(1) LAST \sim^+ (F) >_o + \quad \text{și } LAST \sim^+ (F) = \{+, *,), a\}$$

$$\blacktriangleright + <_o + \quad + >_o +$$

$$\blacktriangleright + <_o * \quad * >_o +$$

$$\blacktriangleright + <_o (\quad) >_o +$$

$$\blacktriangleright + <_o a \quad a >_o +$$

Exemplu

$$(2) * <_o FIRST \sim^+(F)$$

$$\text{și } FIRST \sim^+(F) = \{+, *, (, a\}$$

$$(2) LAST \sim^+(F) >_o *$$

$$\text{și } LAST \sim^+(F) = \{+, *,), a\}$$

$$\blacktriangleright * <_o + \quad + >_o *$$

$$\blacktriangleright * <_o * \quad * >_o *$$

$$\blacktriangleright * <_o (\quad) >_o *$$

$$\blacktriangleright * <_o a \quad a >_o *$$

Exemplu

► $(=_o)$

(3) $(<_o FIRST \sim^+ (F))$

și $FIRST \sim^+ (F) = \{+, *, (, a\}$

(3) $LAST \sim^+ (F) >_o)$

și $LAST \sim^+ (F) = \{+, *,), a\}$

► $(<_o + \quad + >_o)$

► $(<_o * \quad * >_o)$

► $(<_o (\quad) >_o)$

► $(<_o a \quad a >_o)$

Exemplu

$$\$ <_o FIRST \sim^+ (F)$$

$$\text{și } FIRST \sim^+ (F) = \{+, *, (, a\}$$

$$LAST \sim^+ (F) >_o \$$$

$$\text{și } LAST \sim^+ (F) = \{+, *,), a\}$$

$$\blacktriangleright \$ <_o + \quad + >_o \$$$

$$\blacktriangleright \$ <_o * \quad * >_o \$$$

$$\blacktriangleright \$ <_o (\quad) >_o \$$$

$$\blacktriangleright \$ <_o a \quad a >_o \$$$

Exemplu

Se construiește matricea de precedență:

	+	*	(	)	a	\$
+	<,>	<,>	<	>	<	>
*	<,>	<,>	<	>	<	>
(<	<	<	=	<	
)	>	>		>		>
a	>	>		>		>
\$	<	<	<		<	accept

Ambiguitatea limbajelor

- ▶ dacă un limbaj $L(G)$ este un **limbaj ambiguu**, atunci există propoziții ale acestui limbaj pentru care **se pot construi doi sau mai mulți arbori sintactici distincți**
- ▶ dacă un limbaj $L(G)$ este ambiguu, atunci nu este obligatoriu ca pentru toate propozițiile sale să se poată construi mai mulți arbori sintactici distincți
- ▶ în cazul unui limbaj ambiguu, calculul relațiilor de precedență operator în baza gramaticii care îl definește va duce la situația:
 - ▶ **între aceleași două terminale vor exista două relații de precedență operator diferite**

Ambiguitatea limbajelor

- ▶ pentru propoziția "**a+a+a**" se pot construi doi arbori sintactici distincți:

$+ >_o +$ - asociativitate stânga

$+ <_o +$ - asociativitate dreapta

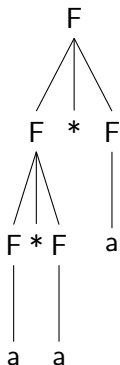


Ambiguitatea limbajelor

- ▶ la fel, pentru propoziția "**a*a*a**" se pot construi doi arbori sintactici distincți:

$* >_o *$ - asociativitate stânga

$* <_o *$ - asociativitate dreapta



Ambiguitatea limbajelor

- ▶ de asemenea, pentru propoziția "**a+a*a**" se pot construi doi arbori sintactici distincți:

$+ >_o *$ - adunarea are $+ <_o *$ - înmulțirea are
prioritate prioritate



Ambiguitatea limbajelor

- ▶ în aceste cazuri, trebuie stabilită care este precedența și asociativitatea operatorilor
- ▶ pentru acest exemplu, se va stabili că:
 - ▶ **adunarea este asociativă la stânga**
 - ▶ se va păstra relația $+ >_o +$
 - ▶ **înmulțirea este asociativă la stânga**
 - ▶ se va păstra relația $* >_o *$
 - ▶ **înmulțirea are precedența mai mare decât adunarea**
 - ▶ se vor păstra relațiile $+ <_o *$ și $* >_o +$

Exemplu

Prin urmare, matricea de precedență va fi:

	+	*	(	)	a	\$
+	>	<	<	>	<	>
*	>	>	<	>	<	>
(<	<	<	=	<	
)	>	>		>		>
a	>	>		>		>
\$	<	<	<		<	accept

Exemplu

$(q, \$, (a+(a+a)^*a)\$, \epsilon)$

$\vdash^d (q, \$, (a+(a+a)^*a)\$, \epsilon)$

$\vdash^d (q, \$ (a, +(a+a)^*a)\$, \epsilon)$

$\vdash^r (q, \$ (F, +(a+a)^*a)\$, 4)$

$\vdash^d (q, \$ (F+, (a+a)^*a)\$, 4)$

$\vdash^d (q, \$ (F+, (a+a)^*a)\$, 4)$

$\vdash^d (q, \$ (F+(a, +a)^*a)\$, 4)$

$\vdash^r (q, \$ (F+(F, +a)^*a)\$, 44)$

Exemplu

$$\vdash^d (q, \$(F+(F+,a)*a)\$,44)$$

$$\vdash^d (q, \$(F+(F+a,)*a)\$,44)$$

$$\vdash^r (q, \$(F+(F+F,)*a)\$,444)$$

$$\vdash^r (q, \$(F+(F,)*a)\$,4441)$$

$$\vdash^d (q, \$(F+(F),*a)\$,4441)$$

$$\vdash^r (q, \$(F+F,*a)\$,44413)$$

$$\vdash^d (q, \$(F+F*,a)\$,44413)$$

$$\vdash^d (q, \$(F+F*a,)\$,44413)$$

$$\vdash^r (q, \$(F+F*F,)\$,444134)$$

Exemplu

$\vdash^r (q, \$(F+F,)\$,4441342)$

$\vdash^r (q, \$(F+F,)\$,4441342)$

$\vdash^r (q, \$(F,)\$,44413421)$

$\vdash^d (q, \$(F,)\$,44413421)$

$\vdash^r (q, \$F,\$,444134213)$

$\vdash^r (a, \$F,\$,444134213)$

Exercițiu

Fie gramatica $G = \langle \Sigma, V_N, \langle \text{instructiune} \rangle, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{\text{for, to, step, let, call, i, (,), ,, =, *, **}\}$
- ▶ $V_N = \{\langle \text{instructiune} \rangle, \langle \text{atribuire} \rangle, \langle \text{lista} \rangle, \langle \text{expresie} \rangle\}$
- ▶ $\langle \text{instructiune} \rangle$
- ▶ $P = \{$
 - $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow \text{for } \langle \text{atribuire} \rangle \text{ to } \langle \text{expresie} \rangle [\text{step } \langle \text{expresie} \rangle]$
 - $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow \text{let } \langle \text{atribuire} \rangle$
 - $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow \text{call } i \text{ } (\langle \text{lista} \rangle)$
 - $\langle \text{lista} \rangle \rightarrow i \mid i, \langle \text{lista} \rangle$
 - $\langle \text{atribuire} \rangle \rightarrow i = \langle \text{expresie} \rangle$
 - $\langle \text{expresie} \rangle \rightarrow i * \langle \text{expresie} \rangle \mid i ** \langle \text{expresie} \rangle \mid i$ $\}$

Să se construiască un analizor sintactic ascendent bazat pe relațiile de precedență operator.

Analiză sintactică bazată pe precedența simplă (Wirth-Weber)

Nikolaus Wirth
Inventatorul lui: Algol W, Euler,
Modula, Oberon, Pascal



Analiză sintactică bazată pe precedența simplă

Relațiile de precedență simplă (Wirth-Weber)

$$<_w, =_w, >_w$$

Fie $\alpha, \beta \in V_N \cup \Sigma$

$$(1) \quad \alpha =_w \beta \iff \exists A \rightarrow x\alpha\beta y \in P$$

$$(2) \quad \alpha <_w \beta \iff \exists A \rightarrow x\alpha B y \in P \wedge B \Rightarrow^+ \beta z$$

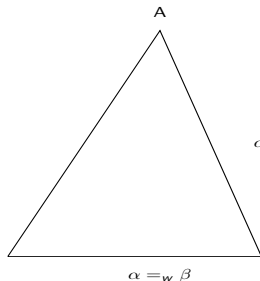
$$(3) \quad \alpha >_w \beta \iff \exists A \rightarrow xB\beta y \in P \wedge B \Rightarrow^+ z\alpha$$

sau

$$\iff \exists A \rightarrow xBCy \in P \wedge B \Rightarrow^+ z\alpha \wedge C \Rightarrow^+ \beta w$$

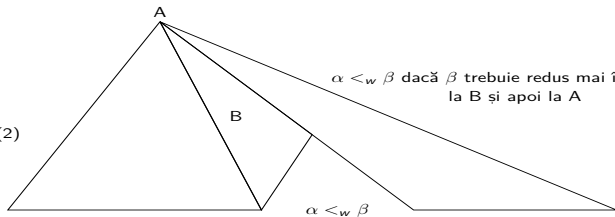
Analiză sintactică bazată pe precedența simplă

(1)



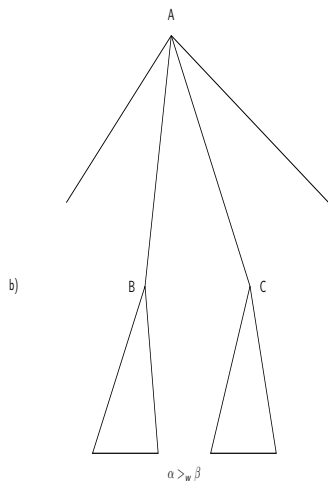
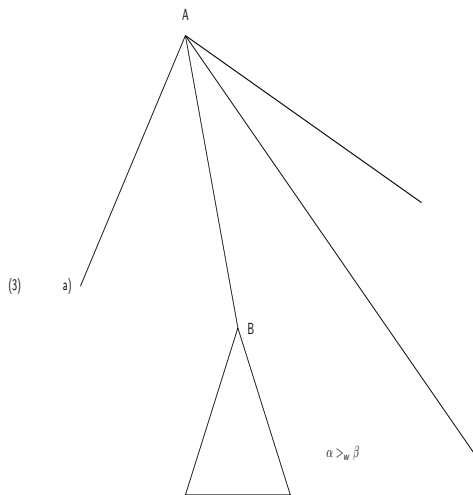
$\alpha =_w \beta$ dacă ele trebuie reduse în același timp la A

(2)



$\alpha <_w \beta$ dacă β trebuie redus mai întâi la B și apoi la A

Analiză sintactică bazată pe precedența simplă



Analiză sintactică bazată pe precedența simplă

Observație:

Relațiile de prezență Wirth-Weber nu sunt simetrice, adică dacă $\alpha >_w \beta$ nu înseamnă că și $\beta <_w \alpha$.

Definiție:

- ▶ O gramatică Wirth-Weber este o gramatică independentă de context, fără reguli vide, reversibilă și în care orice pereche α, β verifică cel mult una din relațiile $<_w, =_w, >_w$.
- ▶ O gramatică este reversibilă dacă nu există mai multe producții cu aceeași parte dreaptă, căci din $A \rightarrow \alpha$ și $B \rightarrow \alpha \Rightarrow A=B$.
- ▶ Relațiile sunt disjuncte dacă între oricare două simboluri α, β există cel mult o relație în același timp.

Analiză sintactică bazată pe precedența simplă

Calculul relațiilor Wirth-Weber:

(1) $\alpha =_w \beta \rightarrow$ este o relație între toate simbolurile succesive (vecine) din partea dreaptă a regulilor de producție

(2) $\alpha <_w \beta \iff A \rightarrow x\alpha By \in P \wedge \beta \in FIRST^+(B)$

(3) $\alpha >_w \beta \iff A \rightarrow xB\beta y \in P \wedge \alpha \in LAST^+(B)$

$\vee A \rightarrow xBCy \in P, \alpha \in LAST^+(B), \beta \in FIRST^+(C)$

Analiză sintactică bazată pe precedență simplă

Observație:

În urma calculului relațiilor de precedență simplă pot apărea **conflicte**:

- (1) $\alpha =_w \beta$ se transformă în $<_w$: $A \rightarrow x\alpha\beta y$
 $\alpha <_w \beta$ $A \rightarrow x\alpha D y$ și $D \Rightarrow^+ \beta z$
- (2) $\alpha =_w \beta$ se transformă în $>_w$: $A \rightarrow x\alpha\beta y$
 $\alpha >_w \beta$ $A \rightarrow xC\beta y$ și $C \Rightarrow^+ z\alpha$

Analiză sintactică bazată pe precedența simplă - Exemplu

Fie gramatica:

$$1. S \rightarrow aSAb$$

$$2. S \rightarrow d$$

$$3. A \rightarrow S$$

$$4. A \rightarrow c$$

Calculul relațiilor de precedență simplă:

$=_w$

$$a =_w S$$

$$S =_w A$$

$$A =_w b$$

Analiză sintactică bazată pe precedență simplă - Exemplu

Fie gramatica:

1. $S \rightarrow aSAb$

2. $S \rightarrow d$

3. $A \rightarrow S$

4. $A \rightarrow c$

Calculul relațiilor de precedență simplă:

$<_w$

$$a <_w FIRST^+(S)$$

$$S <_w FIRST^+(A)$$

$$\$ <_w FIRST^+(S)$$

$$(\$ S \$)$$

$$FIRST^+(S) = \{a, d\}$$

$$FIRST^+(A) = \{a, c, d, S\}$$

Analiză sintactică bazată pe precedența simplă - Exemplu

Fie gramatica:

1. $S \rightarrow aSAb$

2. $S \rightarrow d$

3. $A \rightarrow S$

4. $A \rightarrow c$

Calculul relațiilor de precedență simplă:

$>_w$

$$LAST^+(S) >_w FIRST^+(A)$$

$$LAST^+(A) >_w \{b\}$$

$$LAST^+(S) >_w \$$$

$$(\$ S \$)$$

$$\{b, d\} >_w \{a, c, d, S\}$$

$$\{S, c, b, d\} >_w \{b\}$$

$$\{b, d\} >_w \$$$

Analiză sintactică bazată pe precedență simplă - Exemplu

	S	A	a	b	c	d	\$
S	$<_w$	$=_w$	$<_w$	$>_w$	$<_w$	$<_w$	
A				$=_w$			
a	$=_w$		$<_w$			$<_w$	
b	$>_w$		$>_w$	$>_w$	$>_w$	$>_w$	$>_w$
c				$>_w$			
d	$>_w$		$>_w$	$>_w$	$>_w$	$>_w$	$>_w$
\$			$<_w$			$<_w$	

Analiză sintactică bazată pe precedența simplă

Algoritmul de analiză sintactică bazat pe relațiile de precedență simplă este de tip deplasare - reducere

- ▶ $(q, \alpha a, bx, \beta) \vdash^d (q, \alpha ab, x, \beta)$
 $\iff f(a, b) = \text{depl}$
- ▶ $(q, \alpha c\gamma a, bx, \beta) \vdash^r (q, \alpha cA, bx, \beta i)$
 $\iff f(a, b) = \text{red}, g(c\gamma a) = i, i: A \rightarrow \gamma a \in P$

Analiză sintactică bazată pe precedența simplă

f - funcția de deplasare-reducere

$f: (V_N \cup \Sigma) \times \Sigma \rightarrow \{\underline{\text{depl}}, \underline{\text{red}}, \underline{\text{accept}}, \underline{\text{error}}\}$

- ▶ $f(\alpha, a) = \underline{\text{depl}} \iff \alpha <_w a \text{ sau } \alpha =_w a$
- ▶ $f(\alpha, a) = \underline{\text{red}} \iff \alpha >_w a$
- ▶ $f(\alpha, a) = \underline{\text{error}} \iff$ între α și a nu există relație de precedență simplă
- ▶ $f(\$S, \$) = \underline{\text{accept}}$

Analiză sintactică bazată pe precedența simplă

g - funcția de reducere

$g : (V_N \cup \Sigma)^* \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ unde:

- ▶ $(V_N \cup \Sigma)^*$ - vârful stivei
- ▶ $\{1, 2, 3, \dots\}$ - indicele regulilor de producție

$$g(\beta x_1 x_2 \dots x_n) = i \iff \exists i : A \rightarrow x_1 x_2 \dots x_n \in P \wedge \beta <_w x_1$$

Analiză sintactică bazată pe precedența simplă - Exemplu

Valorile funcția f rezultă imediat din matricea relațiilor de precedență simplă.

e.g.

$$f(S, a) = \text{depl}$$

$$f(S, b) = \text{red}$$

Valorile funcției g rezultă imediat din regulile de producție.

e.g.

$$g(\text{SaSAb}) = 1$$

$$g(\text{aaSAb}) = 1$$

$$g(\$ \text{aSAb}) = 1$$

$$g(\text{Sd}) = 2$$

$$g(\text{ad}) = 2$$

$$g(\$ \text{d}) = 2$$

$$g(\text{SS}) = 3$$

$$g(\text{Sc}) = 4$$

Analiză sintactică bazată pe precedență simplă - Exemplu

	S	A	a	b	c	d	\$
S	<	=	<	>	<	<	
A				=			
a	=		<			<	
b	>		>	>	>	>	>
c				>			
d	>		>	>	>	>	>
\$			<			<	

Analiză sintactică bazată pe precedența simplă - Exemplu

$(q_0, \$, \text{adadcbb}\$, \epsilon)$

$\vdash^d (q, \$a, \text{dadcb}\$, 1)$

$\vdash^d (q, \$ad, \text{adcb}\$, 1)$

$\vdash^r (q, \$aS, \text{adcb}\$, 2)$

$\vdash^d (q, \$aSa, \text{dcb}\$, 2)$

$\vdash^d (q, \$aSad, \text{cbb}\$, 2)$

$\vdash^r (q, \$aSaS, \text{cbb}\$, 22)$

$\vdash^d (q, \$aSaSc, \text{bb}\$, 22)$

$\vdash^r (q, \$aSaSA, \text{bb}\$, 224)$

$\vdash^d (q, \$aSaSAb, \text{b}\$, 224)$

$\vdash^r (q, \$aSS, \text{b}\$, 2241)$

$\vdash^r (q, \$aSA, \text{b}\$, 22413)$

$\vdash^d (q, \$aSAb, \$, 22413)$

$\vdash^r (q, \$S, \$, 224131)$

Analiză sintactică bazată pe precedența simplă

Algoritmul de analiză este următorul:

```
{
    step ← false
    ISI; ISO; IST ← 1
    ST(IST) = $
    {
        repeta
        {
            {
                daca  $f(ST(IST), ST(IST)) = \text{deplaseaza}$ 
                atunci
                    IST ← IST + 1
                    ST(IST) ← SI(ISI)
                    ISI ← ISI + 1
            }
            ori daca  $f(ST(IST), SI(ISI)) = \text{reducere}$ 
            atunci * cauta in jos in stiva doua simboluri  $x, y$  a.i  $x <_w y$ 
                * redu sirul  $y\alpha$  si inlocuieste varful stivei conform
                     $g(xy\alpha)$  ( $i : A \rightarrow y\alpha$ )
                    SO(ISO) ←  $g(xy\alpha) = i$ 
                    ISO ← ISO + 1
            ori daca  $f(ST(IST), SI(ISI)) = \text{accept}$ 
            atunci * OK
                step ← true
            ori daca  $f(ST(IST), SI(ISI)) = \text{error}$ 
            atunci * NOT OK
                step ← true
        }
    }
    până când step este true
}
```

Analiză sintactică bazată pe precedența simplă - Exercițiu

1. $E \rightarrow E + T$
2. $E \rightarrow T$
3. $T \rightarrow T * F$
4. $T \rightarrow F$
5. $F \rightarrow a$
6. $F \rightarrow a(L)$
7. $F \rightarrow (E)$
8. $L \rightarrow E$
9. $L \rightarrow E, L$

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă (Ichbiach - Morse)

$$\beta \in \Sigma \quad \alpha \in V_N \cup \Sigma \quad (1) \quad \alpha <_I \beta \iff (A \rightarrow x\alpha\beta y \in P) \vee (A \rightarrow x\alpha B y \in P)$$

$$(2) \quad \alpha >_I \beta \iff (A \rightarrow x\alpha\beta y \in P) \vee (A \rightarrow x\alpha B y \in P), \text{ unde } B \Rightarrow^+ \beta \gamma \\ C \Rightarrow^+ \beta z;$$

Definirea unei gramatici cu precedența slabă Este o gramatică independentă de variabile inutile, la care se definesc două condiții : (1) $<_I$ și $>_I$ sunt disjuncte
 $\rightarrow x\alpha y$, $B \rightarrow y \Rightarrow$ nu există o relație între α și **B** (imbricare ilegală);

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

Conflicte ce pot apărea :

$\alpha <_I \beta$ si $\alpha >_I \beta \Rightarrow$ exista $A \rightarrow x\alpha\beta y$ sau $A \rightarrow xB\beta y$ ($B \Rightarrow^+ z\alpha$)

Rezolvare :

Se introduce o variabila C, $C \rightarrow \alpha$ si se fac inlocuirile:

$$A \rightarrow xC\beta y$$

$$A \rightarrow xC\beta y \Rightarrow \alpha_I \beta$$

$$C \rightarrow \alpha$$

Algoritmul de analiza este de tipul “deplaseaza - reduce”

(f) - face deplasarea;

$$f(\alpha, a) = \underline{\text{deplaseaza}}, \alpha <_I a$$

$$f(\alpha, a) = \underline{\text{reduce}}, \alpha >_I a$$

$$f(S, \$) = \underline{\text{accept}}$$

$$f(\alpha, a) = \underline{\text{error}} \Leftrightarrow (\alpha, a) \in R, \text{ unde } R - \text{multimea relatiilor.}$$

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

(g) - face reducerea;

$g(\alpha\beta)=i \iff$ $(\exists i, B \rightarrow \beta \in P$ (se alege productia cu partea dreapta cea mai lunga care are sufixul β);
 $Nu(\exists j, A \rightarrow x\alpha\beta \in P, j>i;$

Observatie:

Productiile sunt ordonate descrescator in functie de lungimea partii drepte.

Exemplu:

1. $E \rightarrow E+T$

2. $E \rightarrow T$

3. $T \rightarrow T * F$

4. $T \rightarrow F$

5. $F \rightarrow (E)$

6. $F \rightarrow (a)$

	E	T	F	a	()	+	*	\$
E						< _I	< _I		
T						> _I	> _I	< _I	> _I
F						> _I	> _I	> _I	> _I
a						> _I	> _I	> _I	> _I
(	<_I	< _I	< _I	< _I	< _I				
)						> _I	> _I	> _I	> _I
+		< _I	< _I	< _I	< _I				
*			< _I	< _I	< _I				
\$	< _I	< _I	< _I	< _I	< _I				

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

- $LAST^+(E) >_I \{ + \} \Rightarrow \{ \}, a \} >_I \{ + \}$
- $\{ + \} <_I FIRST^+(T) \Rightarrow \{ + \} <_I \{ \}, a \}$
- $T <_I \{ * \}, \{ * \} <_I F$
- $LAST^+(T) >_I \{ * \}$
- $\{ * \} <_I FIRST^+(F)$
- $\{ (\} <_I E, E <_I \{) \}$
- $\{ (\} <_I FIRST^+(E) \Rightarrow \{ (\} <_I \{ E, T, F, (, a \}$
- $LAST^+(E) >_I \{) \} \Rightarrow \{ T, F,), a \} >_I \{) \}$
- $\$ <_I FIRST^+(E)$
- $LAST^+(E) >_I \$$

Analiza conflictelor :

$E \rightarrow E+T$ $E \rightarrow T$, verif. $(+, E) \Rightarrow$ nu exista relatie	| \Rightarrow nu exista imbricari ilegale
$T \rightarrow T * F$ $T \rightarrow F$, verif. $(+, E) \Rightarrow$ nu exista relatie	

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

f()

f(E,)) = deplasare

f(E, +) = deplasare

f(T,)) = reducere

...

g()

g(E+T) = 1

g(T*F) = 3

g((E)) = 5

g(T) = 2

g(F) = 4

g(a) = 6

...

In sirul de intrare

nu se introduc decat terminalele.

$$\begin{aligned}
 &(\$, a * (a + a) \$, \wedge) \xrightarrow{d} (\$ a , * (a + a) \$, \wedge) \\
 &\quad \xrightarrow{r} (\$ F , * (a + a) \$, 6) \\
 &\quad \xrightarrow{r} (\$ T , * (a + a) \$, 64) \\
 &\quad \xrightarrow{d} (\$ T * , (a + a) \$, 64) \\
 &\quad \xrightarrow{d} (\$ T * (, a + a) \$, 64) \\
 &\quad \xrightarrow{d} (\$ T * (a , + a) \$, 64) \\
 &\quad \xrightarrow{r} (\$ T * (F , + a) \$, 646) \\
 &\quad \xrightarrow{r} (\$ T * (T , + a) \$, 6464) \\
 &\quad \xrightarrow{r} (\$ T * (E , + a) \$, 64642) \\
 &\quad \xrightarrow{d} (\$ T * (E + , a) \$, 64642) \\
 &\quad \xrightarrow{d} (\$ T * (E + a ,) \$, 64642) \\
 &\quad \xrightarrow{r} (\$ T * (E + F ,) \$, 646426) \\
 &\quad \xrightarrow{r} (\$ T * (E + T ,) \$, 6464264) \\
 &\quad \xrightarrow{r} (\$ T * (E ,) \$, 64642641) \\
 &\quad \xrightarrow{d} (\$ T * (E ,) \$, 64642641) \\
 &\quad \xrightarrow{r} (\$ T * F , \$, 646426415) \\
 &\quad \xrightarrow{r} (\$ T , \$, 6464264153) \\
 &\quad \xrightarrow{r} (\$ T E , \$, 64642641532) \\
 &\text{Sirul reducerilor stanga } 64642641532 \\
 &\text{Sirul derivarilor dreapta } 23514624646
 \end{aligned}$$

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

1. $E \rightarrow E+T$

2. $E \rightarrow T$

3. $T \rightarrow T * F$

4. $T \rightarrow F$

5. $F \rightarrow a$

6. $F \rightarrow a(L)$

7. $F \rightarrow (E)$

8. $L \rightarrow E$

9. $L \rightarrow E, L$

1. Calculul relatii W-W

- $E = +$
- $+ = T$
- $\text{Last}(E) > +$ $\{T, F, a, \}\} > +$
- $+ < \text{First}(T)$ $+ < \{T, F, a, (\}$

- $T = *$
- $* = F$
- $\text{Last}(T) > *$ $\{F, a, \}\} > *$
- $* < \text{First}(F)$ $* < \{a, (\}$

- $a = ($
- $(= L$
- $L =)$
- $(< \text{First}(L)$ $(< \{E, T, F, a, (\}$
- $\text{Last}(L) >)$ $\{E, L, T, F, a \}\} >)$

- $(= E$
- $E =)$
- $(< \text{First}(E)$ $(< \{E, T, F, a, (\}$
- $\text{Last}(E) >)$ $\{T, F, a, \}\} >)$

- $E = ,$
- $, = L$
- $, < \text{First}(L)$ $, < \{E, T, F, a, (\}$
- $\text{Last}(E) > ,$ $\{T, F, a, \}\} > ,$

$\$E\$$

- $\$ = E$
- $E = \$$
- $\$ < \text{First}(E)$ $\$ < \{E, T, F, a, (\}$
- $\text{Last}(E) > \$$ $\{T, F, a, \}\} > \$$

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

	E	T	F	L	+	*	a	()	,	\$
E					=				=>	=	=
T					>	=			>	>	>
F					>	>			>	>	>
L									=		
+		=<	<				<	<	>		
*			=				<	<			
a					>	>	<	=	>	>	>
(=<	<	<	=			<	<			
)					>	>			>	>	>
,	<	<	<	=			<	<			
\$	=<	<	<				<	<			

- Nu este gramatica W-W se incerca I-M

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

1. $E \rightarrow E+T$
2. $E \rightarrow T$
3. $T \rightarrow T * F$
4. $T \rightarrow F$
5. $F \rightarrow a$
6. $F \rightarrow a(L)$
7. $F \rightarrow (E)$
8. $L \rightarrow E$
9. $L \rightarrow E, L$

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

- (1) $\langle \text{instr} \rangle \rightarrow \text{CALL } i \ (\langle \text{parametrii} \rangle)$
- (2) $\langle \text{parametrii} \rangle \rightarrow \langle \text{expr} \rangle / \langle \text{parametrii} \rangle , \langle \text{expr} \rangle$
- (3) $\langle \text{expresie} \rangle \rightarrow \langle \text{term} \rangle / \langle \text{expr} \rangle + \text{term} / \langle \text{expr} \rangle - \langle \text{term} \rangle$
- (4) $\langle \text{term} \rangle \rightarrow \langle \text{factor} \rangle / \langle \text{term} \rangle * \langle \text{factor} \rangle / \langle \text{term} \rangle / \langle \text{factor} \rangle$
- (5) $\langle \text{fact} \rangle \rightarrow i(i(\langle \text{expr} \rangle))$

a). Sa se construiasca matricea rel de precedenta IM pentru instructiunea FORTRAN de apel subrutine CALL

b). Sa se verifice functionarea masinii pe instructiunea CALL polinom

$(A+B|C, T1 (D2*D3(E))F)$

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

Aplicatie 2 gramatici slaba (I-M)

	<instr>	<param>	<expr>	<term>	<fact>	CALL	i	()	+	-	*	/	,	\$
<instr>															
<param>									<					<	
<expr>									>	<	<			>	
<term>									>	>	>	<	<	>	
<fact>									>	>	>	>	>	>	
CALL							<								
I								<	>	>	>	>	>		
(<	<	<	<		<								
)									>	>	>	>	>	>	>
+				<	<		<								
-				<	<		<								
*					<		<								
/					<		<								
,			<	<	<		<								
\$	<					<									

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

Pentru a rezolva conflictul rescriu productia (5)

- (1) $\langle \text{instr} \rangle \rightarrow \text{call } i(\langle \text{param} \rangle)$
- (2) $\langle \text{param} \rangle \rightarrow \langle \text{expr} \rangle / \langle \text{param} \rangle, \langle \text{expr} \rangle$
- (3) $\langle \text{expr} \rangle \rightarrow \langle \text{term} \rangle / \langle \text{expr} \rangle + \langle \text{term} \rangle / \langle \text{expr} \rangle - \langle \text{term} \rangle$
- (4) $\langle \text{term} \rangle \rightarrow \langle \text{fact} \rangle / \langle \text{term} \rangle * \langle \text{fact} \rangle / \langle \text{term} \rangle / \langle \text{fact} \rangle$
- (5) $\langle \text{fact} \rangle \rightarrow \langle i / i \rangle \langle \text{expr1} \rangle$
- (6) $\langle \text{expr1} \rangle \rightarrow (\langle \text{expr} \rangle$

Rescriu productiile in ordinea descrescatoare a lungimii.

- (1) $\langle \text{instr} \rangle \rightarrow \text{call } i(\langle \text{param} \rangle)$
- (2) $\langle \text{fact} \rangle \rightarrow i \langle \text{expr1} \rangle$
- (3) $\langle \text{param} \rangle \rightarrow \langle \text{param} \rangle, \langle \text{expr} \rangle^*$
- (4) $\langle \text{expr} \rangle \rightarrow \langle \text{expr} \rangle + \langle \text{term} \rangle^*$
- (5) $\langle \text{expr} \rangle \rightarrow \langle \text{expr} \rangle - \langle \text{term} \rangle^*$
- (6) $\langle \text{term} \rangle \rightarrow \langle \text{term} \rangle * \langle \text{fact} \rangle^*$
- (7) $\langle \text{term} \rangle \rightarrow \langle \text{term} \rangle / \langle \text{fact} \rangle^*$
- (8) $\langle \text{fact} \rangle \rightarrow i$
- (9) $\langle \text{expr1} \rangle \rightarrow (\langle \text{expr} \rangle$
- (10) $\langle \text{param} \rangle \rightarrow \langle \text{expr} \rangle^*$
- (11) $\langle \text{term} \rangle \rightarrow \langle \text{fact} \rangle^*$
- (12) $\langle \text{expr} \rangle \rightarrow \langle \text{term} \rangle^*$

Trebuie verificate si conditiile de imbricare:

Daca avem +, - nu are rel cu $\langle \text{expr} \rangle$

*, / nu are rel cu $\langle \text{term} \rangle$

nu are rel cu $\langle \text{param} \rangle$

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

$(\$, \text{call } i(i+i/i, i(i*i(i))), i) \$, \wedge) F$

$\xrightarrow{d} (\$ \text{ call}, i(i+i/i, i(i*i(i))), i) \$, \wedge)$

$\xrightarrow{d} (\$ \text{ call } i(i, +i/i, i(i*i(i))), i) \$, \wedge)$

$\xrightarrow{r} (\$ \text{ call } i(<\text{fact}>, +i/i, i(i*i(i))), i) \$, 9)$

$\xrightarrow{r} (\$ \text{ call } i(<\text{expr}>, +i/i, i(i*i(i))), i) \$, 9 \ 11 \ 12)$

$\xrightarrow{d} (\$ \text{ call } i(<\text{expr}>+, i/i, i(i*i(i))), i) \$, 9 \ 11 \ 12)$

...

$<\text{instr}> \rightarrow \text{call } i (<\text{lista}>)$

$<\text{instr}> \rightarrow n \text{ call } i (<\text{lista}>)$

$<\text{lista}> \rightarrow <\text{expr}> / <\text{lista}>, <\text{expr}>$

$<\text{expr}> \rightarrow <\text{expr}> + <\text{term}> / <\text{expr}> - <\text{term}> / <\text{term}>$

$<\text{term}> \rightarrow <\text{term}> * <\text{fact}> / <\text{term}> / <\text{fact}> / <\text{fact}>$

$<\text{fact}> \rightarrow i/i (<\text{lista}>)$

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

- 1. $E \rightarrow E+T$
- 2. $E \rightarrow T$
- 3. $T \rightarrow T * F$
- 4. $T \rightarrow F$
- 5. $F \rightarrow a$
- 6. $F \rightarrow a(L)$
- 7. $F \rightarrow (E)$
- 8. $L \rightarrow E$
- 9. $L \rightarrow E, L$

1. Calculul relațiilor W-W

\$E\$

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

	E	T	F	L	+	*	a	()	,	\$
E					=				=>	=	=
T					>	=			>	>	>
F					>	>			>	>	>
L									=		
+		=<	<				<	<	>		
*			=				<	<			
a					>	>		=	>	>	>
(=<	<	<	=			<	<			
)					>	>			>	>	>
,	<	<	<	=			<	<			
\$	=<	<	<				<	<			

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

2. Modificarea gramaticii

+ =< T

1. $E \rightarrow EPT$
2. $P \rightarrow +$

(=< E

E =<)

3. $F \rightarrow a(L)$
4. $F \rightarrow SED$
5. $D \rightarrow)$
6. $S \rightarrow ($
7. $E \rightarrow T$
8. $T \rightarrow T * F$
9. $T \rightarrow F$
10. $F \rightarrow a$
11. $L \rightarrow E$
12. $L \rightarrow E, L$

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

3. Calculul relațiilor W-W

$E \rightarrow EPT$

$E \rightarrow T$

$T \rightarrow T*F$

$T \rightarrow F$

$F \rightarrow a(L)$

$F \rightarrow SED$

$F \rightarrow a$

$L \rightarrow E$

$L \rightarrow E, L$

$S \rightarrow ($

$D \rightarrow)$

$P \rightarrow +$

\$E\$

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

	E	T	F	L	D	S	P	+	*	a	()	,	\$
E					=		=	<				<>	=	=
T								>	=			>	>	>
F								>	>			>	>	>
L												=>		
D	<	<	<			<		>	>	<	<	>	>	>
S	=<	<	<			<				<	<			
P		=<	<			<				<	<			
+		>	>			>				>	>			
*			=			<				<	<			
a								>	>		=	>	>	>
(>	>	>	=		>				>	>			
)								>	>			>	>	>
,	<	<	<	=		<				<	<			
\$	=<	<	<			<				<	<			

CONCLUZIE:

Gramatica nu este W-W; se va încerca analiza cu LL1 sau precedența slabă (I-M)

Analiză sintactică bazată pe precedența slabă

Se considera următoarea gramatică de limbaj de tip PASCAL:

- (1) $\langle \text{instrucțiune} \rangle ::= \text{if} \langle \text{expr} \rangle \text{ then} (\langle \text{instrucțiune} \rangle) [\text{else} \langle \text{instrucțiune} \rangle]$
- (2) $\langle \text{instrucțiune} \rangle ::= \text{repeat} \langle \text{instrucțiune} \rangle \text{ until} \langle \text{expr} \rangle$
- (3) $\langle \text{instrucțiune} \rangle ::= \langle \text{factor} \rangle := \langle \text{factor} \rangle$
- (4) $\langle \text{expr} \rangle ::= \langle \text{factor} \rangle \langle \langle \text{factor} \rangle | \langle \text{factor} \rangle \langle = \langle \text{factor} \rangle$
- (5) $\langle \text{factor} \rangle ::= i | i(\langle \text{lista} \rangle)$
- (6) $\langle \text{lista} \rangle ::= i | i, \langle \text{lista} \rangle$
- (7) $\langle \text{comentariu} \rangle ::= \langle / \{ \langle \text{orice caracter} \rangle \} / \rangle$

Întrebări recapitulative

- ▶ Fie $AP1 = (Q, \Sigma, \Gamma, f, q_0, z_0, F)$ un automat finit cu stivă care implementează analiza sintactică descendentă pentru gramatica $G = (\Sigma, V_N, S, P)$ și fie $AP2 = (Q', \Sigma', \Gamma', f', q'_0, z'_0, F')$ un automat finit cu stivă care implementează analiza sintactică ascendentă pentru aceeași gramatică. Arătați care sunt diferențele dintre elementele care definesc AP1 și cele care îl definesc pe AP2 și explicați.
- ▶ Explicați de ce este nedeterminist algoritmul general de analiză sintactică ascendentă.
- ▶ Explicați rolul relației de precedență operator mai mare în analiza sintactică corespunzătoare.

Întrebări recapitulative

- ▶ Enumerați și explicați diferențele dintre automatul finit cu stivă definit pentru analiza sintactică descendentă și automatul finit cu stivă definit pentru analiza sintactică ascendentă.
- ▶ Explicați care este diferența dintre configurația inițială a automatului finit cu stivă pentru analiza sintactică LL(1) și pentru analiza sintactică bazată pe precedența operator.
- ▶ Explicați cum rezolvă analiza sintactică bazată pe relațiile de precedență operator nedeterminismul algoritmului generic de analiză sintactică ascendentă.

Alte gramatici

$G = \langle \Sigma, V_N, \langle \text{IFlogic} \rangle, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{n, \text{IF}, (,), \text{GOTO}, i, =, +, ., \text{EQ}\}$
- ▶ $V_N = \{ \langle \text{IFlogic} \rangle, \langle \text{IFneetichetat} \rangle, \langle \text{expresie} - \text{logica} \rangle, \langle \text{instructiune} \rangle, \langle \text{expresie} - \text{aritmetica} \rangle, \langle \text{operator} - \text{logic} \rangle \}$
- ▶ $\langle \text{IFlogic} \rangle$
- ▶ $P = \{$
 - $\langle \text{IFlogic} \rangle \rightarrow n \langle \text{IFneetichetat} \rangle \mid \langle \text{IFneetichetat} \rangle$
 - $\langle \text{IFneetichetat} \rangle \rightarrow \text{IF}(\langle \text{expresie} - \text{logica} \rangle) \langle \text{instructiune} \rangle$
 - $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow \text{GOTO } n$
 - $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow i = n \langle \text{expresie} - \text{aritmetica} \rangle$
 - $\langle \text{expresie} - \text{logica} \rangle \rightarrow \langle \text{expresie} - \text{aritmetica} \rangle \langle \text{operator} - \text{logic} \rangle \langle \text{expresie} - \text{aritmetica} \rangle$
 - $\langle \text{expresie} - \text{aritmetica} \rangle \rightarrow \langle \text{expresie} - \text{aritmetica} \rangle + i \mid i$
 - $\langle \text{operator} - \text{logic} \rangle \rightarrow .\text{EQ}.$ $\}$

Alte gramatici

$G = \langle \Sigma, V_N, \langle \text{instructiune} \rangle, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{ \text{if}, :, i, :=, \text{next}, \text{sentence}, +, \text{is}, <, >, ,, \}$
- ▶ $V_N = \{ \langle \text{instructiune} \rangle, \langle \text{cond} \rangle, \langle \text{instructiune1} \rangle, \langle \text{operand} \rangle, \langle \text{oprel} \rangle, \langle \text{operator} \rangle, \langle \text{oprel} \rangle, \langle \text{zona} \rangle \}$
- ▶ $\langle \text{instructiune} \rangle$
- ▶ $P = \{$
 - $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow \langle \text{iif} \rangle \mid \langle \text{imove} \rangle$
 - $\langle \text{iif} \rangle \rightarrow \text{if} \langle \text{cond} \rangle; \langle \text{instructiune1} \rangle [\text{else} \langle \text{instructiune1} \rangle]$
 - $\langle \text{instructiune1} \rangle \rightarrow i := \langle \text{operand} \rangle \mid \text{next sentence}$
 - $\langle \text{cond} \rangle \rightarrow \langle \text{operand} \rangle \langle \text{operator} \rangle \langle \text{operand} \rangle$
 - $\langle \text{operand} \rangle \rightarrow i \mid \langle \text{operand} \rangle + i$
 - $\langle \text{operator} \rangle \rightarrow \text{is} \langle \text{oprel} \rangle \mid \langle \text{oprel} \rangle$
 - $\langle \text{oprel} \rangle \rightarrow < \mid >$
 - $\langle \text{imove} \rangle \rightarrow \text{move} \langle \text{zona} \rangle \mid \text{to} \langle \text{zona} \rangle$
 - $\langle \text{zona} \rangle \rightarrow i \mid \langle \text{zona} \rangle, i$ $\}$

Alte gramatici

$G = \langle \Sigma, V_N, \langle \textit{instructiune} \rangle, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{\textit{if}, \textit{then}, \textit{else}, i, :=, .\textit{or.}, .\textit{and.}, (,), .\textit{not.}\}$
- ▶ $V_N = \{\langle \textit{instructiune} \rangle, \langle \textit{expresie} \rangle, \langle \textit{atribuire} \rangle, \langle \textit{termen} \rangle, \langle \textit{factor} \rangle\}$
- ▶ $\langle \textit{instructiune} \rangle$
- ▶ $P = \{$
 - $\langle \textit{instructiune} \rangle \rightarrow \textit{if} \langle \textit{expresie} \rangle \textit{ then} \langle \textit{atribuire} \rangle [\textit{else} \langle \textit{atribuire} \rangle]$
 - $\langle \textit{atribuire} \rangle \rightarrow i := \langle \textit{expresie} \rangle$
 - $\langle \textit{expresie} \rangle \rightarrow \langle \textit{expresie} \rangle .\textit{or.} \langle \textit{termen} \rangle \mid \langle \textit{termen} \rangle$
 - $\langle \textit{termen} \rangle \rightarrow \langle \textit{termen} \rangle .\textit{and.} \langle \textit{factor} \rangle \mid \langle \textit{factor} \rangle$
 - $\langle \textit{factor} \rangle \rightarrow i \mid (\langle \textit{expresie} \rangle) \mid .\textit{not.} \langle \textit{factor} \rangle$ $\}$

Alte gramatici

$G = \langle \Sigma, V_N, \langle \text{instructiune} \rangle, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{ \text{if, then, else, =, +, i, (,), , } \}$
- ▶ $V_N = \{ \langle \text{instructiune} \rangle, \langle \text{expresie} \rangle, \langle \text{atribuire} \rangle, \langle \text{variabila} \rangle, \langle \text{lista} \rangle \}$
- ▶ $\langle \text{instructiune} \rangle$
- ▶ $P = \{$
 - $\langle \text{instructiune} \rangle \rightarrow \text{if } \langle \text{expresie} \rangle \text{ then } \langle \text{atribuire} \rangle [\text{else } \langle \text{atribuire} \rangle] \mid \langle \text{atribuire} \rangle$
 - $\langle \text{atribuire} \rangle \rightarrow \langle \text{variabila} \rangle = \langle \text{expresie} \rangle$
 - $\langle \text{expresie} \rangle \rightarrow \langle \text{variabila} \rangle \mid \langle \text{expresie} \rangle + \langle \text{variabila} \rangle$
 - $\langle \text{variabila} \rangle \rightarrow i \mid i(\langle \text{lista} \rangle)$
 - $\langle \text{lista} \rangle \rightarrow i \mid \langle \text{lista} \rangle, i$ $\}$

Alte gramatici

$G = \langle \Sigma, V_N, \langle instr.DO \rangle, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{ DO, n, i, =, ,, \}$
- ▶ $V_N = \{ \langle instr.DO \rangle, \langle et \rangle, \langle expresie \rangle, \langle var \rangle \}$
- ▶ $\langle instr.DO \rangle$
- ▶ $P = \{$
 - $\langle instr.DO \rangle \rightarrow \langle et \rangle DO \langle et \rangle \langle expresie \rangle$
 - $\langle instr.DO \rangle \rightarrow DO \langle et \rangle \langle expresie \rangle$
 - $\langle et \rangle \rightarrow n$
 - $\langle expresie \rangle \rightarrow i = \langle lista \rangle$
 - $\langle lista \rangle \rightarrow \langle var \rangle, \langle var \rangle, \langle var \rangle$
 - $\langle var \rangle \rightarrow i$
 - $\langle var \rangle \rightarrow n$ $\}$

Alte gramatici

$G = \langle \Sigma, V_N, \langle \text{decl} \rangle, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{ \text{LET}, i, =, +, -, *, /, \text{FOR}, \text{TO}, \text{STEP}, \text{CALL}, ,, (,) \}$
- ▶ $V_N = \{ \langle \text{decl} \rangle, \langle \text{declLET} \rangle, \langle \text{declFOR} \rangle, \langle \text{declCALL} \rangle, \langle \text{expr} \rangle, \langle \text{term} \rangle, \langle \text{fact} \rangle, \langle \text{lista} \rangle \}$
- ▶ $\langle \text{decl} \rangle$
- ▶ $P = \{$
 - $\langle \text{decl} \rangle \rightarrow \langle \text{declLET} \rangle \mid \langle \text{declFOR} \rangle \mid \langle \text{declCALL} \rangle$
 - $\langle \text{declLET} \rangle \rightarrow \text{LET } i = \langle \text{expr} \rangle$
 - $\langle \text{expr} \rangle \rightarrow \langle \text{expr} \rangle + \langle \text{term} \rangle \mid \langle \text{expr} \rangle - \langle \text{term} \rangle \mid \langle \text{term} \rangle$
 - $\langle \text{term} \rangle \rightarrow \langle \text{term} \rangle * \langle \text{fact} \rangle \mid \langle \text{term} \rangle / \langle \text{fact} \rangle \mid \langle \text{fact} \rangle$
 - $\langle \text{fact} \rangle \rightarrow i \mid (\langle \text{expr} \rangle)$
 - $\langle \text{declFOR} \rangle \rightarrow \text{FOR } i = \langle \text{expr} \rangle \text{ TO } \langle \text{expr} \rangle \text{ STEP } \langle \text{expr} \rangle$
 - $\langle \text{declCALL} \rangle \rightarrow \text{CALL } i (\langle \text{lista} \rangle)$
 - $\langle \text{lista} \rangle \rightarrow i \mid \langle \text{lista} \rangle, i$ $\}$

Alte gramatici

$G = \langle \Sigma, V_N, \langle instr \rangle, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{CALL, i, ,, +, -, *, /, (,)\}$
- ▶ $V_N = \{ \langle instr \rangle, \langle parametrii \rangle, \langle expr \rangle, \langle term \rangle, \langle factor \rangle \}$
- ▶ $\langle instr \rangle$
- ▶ $P = \{$
 - $\langle instr \rangle \rightarrow CALL\ i(\langle parametrii \rangle)$
 - $\langle parametrii \rangle \rightarrow \langle expr \rangle \mid \langle parametrii \rangle, \langle expr \rangle$
 - $\langle expr \rangle \rightarrow \langle term \rangle \mid \langle expr \rangle + \langle term \rangle \mid \langle expr \rangle - \langle term \rangle$
 - $\langle term \rangle \rightarrow \langle factor \rangle \mid \langle term \rangle * \langle factor \rangle \mid \langle term \rangle / \langle factor \rangle$
 - $\langle factor \rangle \rightarrow i \mid (\langle expr \rangle)$ $\}$

Alte gramatici

$G = \langle \Sigma, V_N, \langle \textit{prog} \rangle, P \rangle$, unde:

- ▶ $\Sigma = \{\text{PROGRAM, VAR, BEGIN, END, id, ,, ::, INTEGER, ,, :=, +, -, *, DIV, int, (,), READ, WRITE, FOR, DO, TO}\}$
- ▶ $V_N = \{\langle \textit{prog} \rangle, \langle \textit{prog} - \textit{name} \rangle, \langle \textit{dec} - \textit{list} \rangle, \langle \textit{stmt} - \textit{list} \rangle, \langle \textit{dec} \rangle, \langle \textit{id} - \textit{list} \rangle, \langle \textit{type} \rangle, \langle \textit{stmt} \rangle, \langle \textit{assign} \rangle, \langle \textit{read} \rangle, \langle \textit{write} \rangle, \langle \textit{for} \rangle, \langle \textit{exp} \rangle, \langle \textit{term} \rangle, \langle \textit{factor} \rangle\}$
- ▶ $\langle \textit{prog} \rangle$
- ▶ $P = \{$

Alte gramatici

1. $\langle prog \rangle \rightarrow PROGRAM \langle prog - name \rangle VAR \langle dec - list \rangle BEGIN \langle stmt - list \rangle END.$
2. $\langle prog - name \rangle \rightarrow id$
3. $\langle dec - list \rangle \rightarrow \langle dec \rangle | \langle dec - list \rangle ; \langle dec \rangle$
4. $\langle dec \rangle \rightarrow \langle id - list \rangle : \langle type \rangle$
5. $\langle type \rangle \rightarrow INTEGER$
6. $\langle id - list \rangle \rightarrow id | \langle id - list \rangle , id$

Alte gramatici

- 7. $\langle \text{stmt} - \text{list} \rangle \rightarrow \langle \text{stmt} \rangle \mid \langle \text{stmt} - \text{list} \rangle ; \langle \text{stmt} \rangle$
- 8. $\langle \text{stmt} \rangle \rightarrow \langle \text{assign} \rangle \mid \langle \text{read} \rangle \mid \langle \text{write} \rangle \mid \langle \text{for} \rangle$
- 9. $\langle \text{assign} \rangle \rightarrow \text{id} := \langle \text{exp} \rangle$
- 10. $\langle \text{exp} \rangle \rightarrow \langle \text{term} \rangle \mid \langle \text{exp} \rangle + \langle \text{term} \rangle \mid \langle \text{exp} \rangle - \langle \text{term} \rangle$
- 11. $\langle \text{term} \rangle \rightarrow \langle \text{factor} \rangle \mid \langle \text{term} \rangle * \langle \text{factor} \rangle \mid \langle \text{term} \rangle \text{DIV} \langle \text{factor} \rangle$
- 12. $\langle \text{factor} \rangle \rightarrow \text{id} \mid \text{int} \mid (\langle \text{exp} \rangle)$

Alte gramatici

- 13. $\langle read \rangle \rightarrow READ(\langle id - list \rangle)$
 - 14. $\langle write \rangle \rightarrow WRITE(\langle id - list \rangle)$
 - 15. $\langle for \rangle \rightarrow FOR \langle index - exp \rangle DO \langle body \rangle$
 - 16. $\langle index - exp \rangle \rightarrow id := \langle exp \rangle TO \langle exp \rangle$
 - 17. $\langle body \rangle \rightarrow \langle stmt \rangle | BEGIN \langle stmt - list \rangle END$
- }

Bibliografie

- ▶ R.B. Yehezkael, Course Notes on Formal Languages and Compilers, Jerusalem College of Technology
<http://homedir.jct.ac.il/~rafi/formcomp.pdf>
- ▶ Paul N. Hilfinger, Course Notes, University of California, Berkeley
<http://inst.eecs.berkeley.edu/~cs164/sp10/notes/notes.pdf>
- ▶ Gavrila Ionut, Limbaje Formale și Translatoare
http://facultate.regielive.ro/cursuri/calculatoare/limbaje_formale_si_translatoare-59028.html
- ▶ CIS 324: Language Design and Implementation, Operator Precedence Parsing
<http://homepages.gold.ac.uk/nikolaev/3246-2.doc>