

Algoritmy syntaktické analýzy (pomocí CFG)

Vladimír Kadlec, Aleš Horák

E-mail: hales@fi.muni.cz
http://nlp.fi.muni.cz/poc_lingv/

Obsah:

- ▶ Základní postupy pro syntaktickou analýzu obecných CFG
- ▶ Tomitův zobecněný analyzátor LR
- ▶ Algoritmus CKY
- ▶ Tabulkové analyzátory
- ▶ Porovnání jednotlivých algoritmů

Základní postupy pro syntaktickou analýzu obecných bezkontextových gramatik

- ▶ **obecná CFG** – rozsáhlá, (silně) víceznačná, s ϵ -pravidly
- ▶ všechny uvedené algoritmy pracují s *polynomiální časovou a prostorovou složitostí*
- ▶ **Tomitův zobecněný algoritmus LR** (*generalized LR*)
- ▶ **algoritmus CKY** – *Cocke, Kasami, Younger*;
- ▶ **tabulková (chart) analýza** (*Chart Parsing*):
 - shora dolů (*top-down*);
 - zdola nahoru (*bottom-up*);
 - analýza řízená hlavou pravidla (*head-driven*);

Syntaktická analýza

▶ Vstupy:

- řetězec lexikálních kategorií (preterminálních symbolů) $a_1 a_2 \dots a_n$

např.: ADJ CONJ ADJ N V PREP N ' '

- bezkontextová gramatika $G = \langle N, \Sigma, P, S \rangle$.

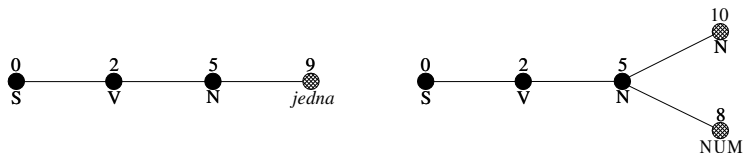
▶ Výstup:

- efektivní reprezentace derivačních stromů.

Tomitův zobecněný analyzátor LR

- ▶ **generalized LR parser (GLR)**
- ▶ Masaru Tomita: **Efficient parsing for natural language**, 1986
- ▶ standardní **LR tabulka**, která může obsahovat **konflikty**;
- ▶ zásobník je reprezentován **acyklickým orientovaným grafem (DAG)**
- ▶ derivační stromy jsou uloženy ve **sbaleném "lese" stromů**
- ▶ v podstatě stejný, jako algoritmus LR
- ▶ udržujeme si **seznam aktivních uzlů** zásobníku (grafu)
- ▶ akce **redukce** provádíme vždy před akcemi čtení
- ▶ akci **čtení** provádíme pro všechny aktivní uzly najednou
- ▶ kde je to možné, tam uzly **slučujeme**

Příklad konfliktu redukce/redukce



stav	položka	akce	symbol	další stav
5	$CLAUSE \rightarrow V N \bullet NUM$	shift	NUM	8
	$NN \rightarrow N \bullet N$		N	10
	$NUM \rightarrow \bullet jedna$		$jedna$	9
	$N \rightarrow \bullet tramvaj$		$tramvaj$	7
	$N \rightarrow \bullet jedna$			
9	$NUM \rightarrow jedna \bullet$	reduce (6)		
	$N \rightarrow jedna \bullet$	reduce (5)		

Algoritmus CKY

- ▶ Gramatika musí být v **Chomského normální formě**

$$\text{CNF: } \begin{array}{l} A \rightarrow BC \\ D \rightarrow 'd' \end{array}$$

- ▶ **Převod** libovolné CFG do CNF:

1. přidáme **nový kořen** S_0 : $S_0 \rightarrow S$

2. eliminujeme ϵ -pravidla:

$$\begin{array}{l} S \rightarrow Ab \mid B \\ A \rightarrow a \mid \epsilon \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} S \rightarrow Ab \mid b \mid B \\ A \rightarrow a \end{array}$$

3. eliminujeme **jednoduchá pravidla**:

$$\begin{array}{l} A \rightarrow B \\ B \rightarrow a \mid CD \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} A \rightarrow a \mid CD \\ B \rightarrow a \mid CD \end{array}$$

4. rozgenerujeme **dlouhá pravidla**:

$$A \rightarrow BCD \rightarrow \begin{array}{l} A \rightarrow BA_1 \\ A_1 \rightarrow CD \end{array}$$

Algoritmus CKY, příklad – zadání

- ▶ vstupní gramatika je:

$$S \rightarrow AA|BB|AX|BY|a|b$$

$$X \rightarrow SA$$

$$Y \rightarrow SB$$

$$A \rightarrow a$$

$$B \rightarrow b$$

- ▶ vstupní řetězec je $w = abaaba$.

Algoritmus CKY, příklad – řešení (matice V)

a b a a b a

 $S \rightarrow AA|BB|AX|BY|a|b$
 $X \rightarrow SA$
 $Y \rightarrow SB$
 $A \rightarrow a$
 $B \rightarrow b$

p – pozice, q – délka

$q \backslash p$	1	2	3	4	5	6
1	S, A	S, B	S, A	S, A	S, B	S, A
2	Y	X	S, X	Y	X	
3	S	\emptyset	Y	S		
4	X	S	\emptyset			
5	\emptyset	X				
6	S					

Algoritmus CKY pokrač.

- ▶ Gramatika musí být v **Chomského normální formě**.
- ▶ Pro daný vstup délky n derivujeme **podřetězce** symbolů **délky q** na **pozici p** , značíme $w_{p,q}$, $1 \leq p, q \leq n$.
- ▶ Derivace **řetězců délky 1**, $A \Rightarrow w_{p,1}$, je prováděno prohledáváním terminálních pravidel.
- ▶ Derivace **delších řetězců** $A \Rightarrow^* w_{p,q}$, $q \geq 2$ vyžaduje aby platilo $A \Rightarrow BC \Rightarrow^* w_{p,q}$. Tedy z B derivujeme řetězec délky k , $1 \leq k \leq q$, a z C derivujeme zbytek, řetězec délky $q - k$. Tzn. $B \Rightarrow^* w_{p,k}$ a $C \Rightarrow^* w_{p+k,q-k}$. Kratší řetězce máme tedy vždy “předpočítané.”

Algoritmus CKY pokrač.

```

program CKY Parser;
begin
  for  $p := 1$  to  $n$  do  $V[p, 1] := \{A \mid A \rightarrow a_p \in P\}$ ;
  for  $q := 2$  to  $n$  do
    for  $p := 1$  to  $n - q + 1$  do
       $V[p, q] = \emptyset$ ;
      for  $k := 1$  to  $q - 1$  do
         $V[p, q] =$ 
           $V[p, q] \cup$ 
           $\{A \mid A \rightarrow BC \in P, B \in V[p, k], C \in V[p + k, q - k]\}$ ;
      od
    od
  od
end

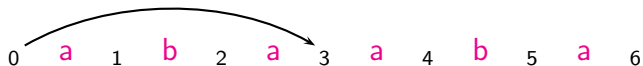
```

složitost CKY je $O(n^3)$

Tabulkové (chart) analyzátořy

- ▶ Rozlišujeme tři základní typy **tabulkových analyzátořů**:
 - shora dolů;
 - zdola nahoru;
 - analýza řízená hlavou pravidla.
- ▶ Mnoho dalších variant je popsáno v:

Sikkel Klaas: [Parsing Schemata: A Framework for Specification and Analysis of Parsing Algorithm](#), 1997.
- ▶ Neklade se žádné omezení na gramatiku.
- ▶ Analyzátořy typu “chart” v sobě většinou obsahují dvě datové struktury **chart** a **agendu**. Chart a agenda obsahují tzv. *hrany*.
- ▶ **Hrana** je trojice $[A \rightarrow \alpha \bullet \beta, i, j]$, kde:
 - i, j jsou celá čísla, $0 \leq i \leq j \leq n$ pro n slov ve vstupní větě
 - a $A \rightarrow \alpha\beta$ je pravidlem vstupní gramatiky.

$$[A \rightarrow BC \bullet DE, 0, 3]$$


Obecný analyzátor typu “chart”

```
program Chart Parser;
```

```
begin
```

```
  inicializuj (CHART);
```

```
  inicializuj (AGENDA);
```

```
  while (AGENDA  $\neq$   $\emptyset$ ) do
```

```
    E := vezmi hranu z AGENDA;
```

```
    for each (hrana F, která může být vytvořena pomocí  
      hrany E a nějaké jiné hrany z CHART) do
```

```
      if  $F \notin$  AGENDA and  $F \notin$  CHART and  $F \neq E$ 
```

```
        then přidej F do AGENDA;
```

```
      fi;
```

```
    od;
```

```
    přidej E do CHART;
```

```
  od;
```

```
end;
```

složitost tabulkové analýzy je $O(n^3)$ ($|Pravidla|$ bereme jako konstantu)

Varianta shora dolů

Inicializace:

- ▶ $\forall p \in P \mid p = S \rightarrow \alpha$ přidej hranu $[S \rightarrow \bullet \alpha, 0, 0]$ do agendy.
- ▶ počáteční chart je prázdný.

Iterace – vezmi hranu E z agendy a pak:

- (*fundamentální pravidlo*) pokud je E ve tvaru $[A \rightarrow \alpha \bullet, j, k]$, potom pro každou hranu $[B \rightarrow \gamma \bullet A \beta, i, j]$ v chartu vytvoř hranu $[B \rightarrow \gamma A \bullet \beta, i, k]$.
- (*uzavřené hrany*) pokud je E ve tvaru $[B \rightarrow \gamma \bullet A \beta, i, j]$, potom pro každou hranu $[A \rightarrow \alpha \bullet, j, k]$ v chartu vytvoř hranu $[B \rightarrow \gamma A \bullet \beta, i, k]$.
- (*terminál na vstupu*) pokud je E ve tvaru $[A \rightarrow \alpha \bullet a_{j+1} \beta, i, j]$, vytvoř hranu $[A \rightarrow \alpha a_{j+1} \bullet \beta, i, j+1]$.
- (*predikce*) pokud je E ve tvaru $[A \rightarrow \alpha \bullet B \beta, i, j]$ potom pro každé pravidlo $B \rightarrow \gamma \in P$, vytvoř hranu $[B \rightarrow \bullet \gamma, i, i]$.

Příklad – tabulkové analýzy (typu chart)

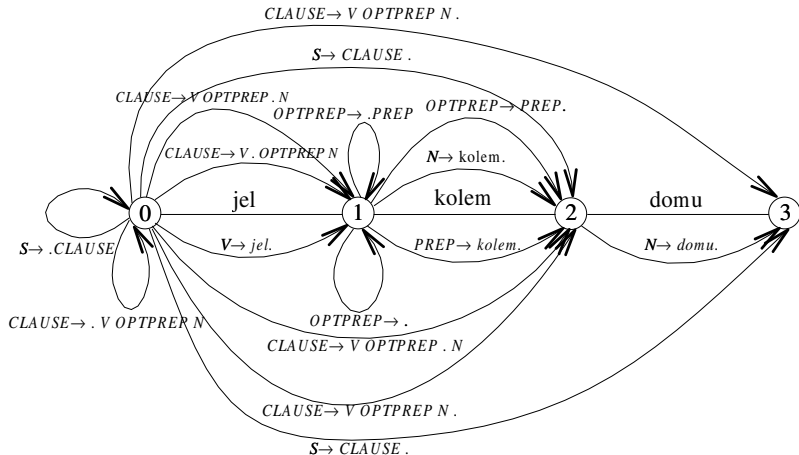
Gramatika:

<i>S</i>	→	<i>CLAUSE</i>
<i>CLAUSE</i>	→	<i>V OPTPREP N</i>
<i>OPTPREP</i>	→	ϵ
<i>OPTPREP</i>	→	<i>PREP</i>
<i>V</i>	→	<i>jel</i>
<i>PREP</i>	→	<i>kolem</i>
<i>N</i>	→	<i>domu</i>
<i>N</i>	→	<i>kolem</i>

Věta:

"jel kolem domu" ($a_1=jel$, $a_2=kolem$, $a_3=domu$).

Příklad – chart po analýze shora dolů



Varianta zdola nahoru

Inicializace:

- ▶ $\forall p \in P \mid p = A \rightarrow \epsilon$ přidej hrany $[A \rightarrow \bullet, 0, 0]$, $[A \rightarrow \bullet, 1, 1]$, ..., $[A \rightarrow \bullet, n, n]$ do agendy.
- ▶ $\forall p \in P \mid p = A \rightarrow a_i \alpha$ přidej hranu $[A \rightarrow \bullet a_i \alpha, i-1, i-1]$ do agendy.
- ▶ počáteční chart je prázdný.

Iterace – vezmi hranu E z agendy a pak:

- a) (*fundamentální pravidlo*) pokud je E ve tvaru $[A \rightarrow \alpha \bullet, j, k]$, potom pro každou hranu $[B \rightarrow \gamma \bullet A \beta, i, j]$ v chartu vytvoř hranu $[B \rightarrow \gamma A \bullet \beta, i, k]$.
- b) (*uzavřené hrany*) pokud je E ve tvaru $[B \rightarrow \gamma \bullet A \beta, i, j]$, potom pro každou hranu $[A \rightarrow \alpha \bullet, j, k]$ v chartu vytvoř hranu $[B \rightarrow \gamma A \bullet \beta, i, k]$.
- c) (*terminál na vstupu*) pokud je E ve tvaru $[A \rightarrow \alpha \bullet a_{j+1} \beta, i, j]$, potom vytvoř hranu $[A \rightarrow \alpha a_{j+1} \bullet \beta, i, j+1]$.
- d) (*predikce*) pokud je E ve tvaru $[A \rightarrow \alpha \bullet, i, j]$, potom pro každé pravidlo $B \rightarrow A \gamma$ vstupní gramatiky vytvoř hranu $[B \rightarrow \bullet A \gamma, i, i]$.

Analýza řízená hlavou pravidla

- ▶ *head-driven chart parsing*
- ▶ **Hlava pravidla** – libovolný (určený) symbol z pravé strany pravidla.
Například pravidlo $CLAUSE \rightarrow V \underline{PREP} N$ může mít hlavy $V, PREP, N$.
- ▶ Epsilon pravidlo má hlavu ϵ .
- ▶ Hrana v analyzátoru řízeném hlavou pravidla – trojice $[A \rightarrow \alpha \bullet \beta \bullet \gamma, i, j]$, kde i, j jsou celá čísla, $0 \leq i \leq j \leq n$ pro n slov ve vstupní větě a $A \rightarrow \alpha\beta\gamma$ je pravidlo vstupní gramatiky a hlava je v β .
- ▶ Algoritmus vlastní analýzy (varianta zdola nahoru) je podobný jednoduchému přístupu. Analýza neprobíhá zleva doprava, ale začíná na hlavě daného pravidla.

Analyzátoř řízený hlavou pravidla

Inicializace:

- ▶ $\forall p \in P \mid p = A \rightarrow \epsilon$ přidej hrany $[A \rightarrow \bullet\bullet, 0, 0]$, $[A \rightarrow \bullet\bullet, 1, 1]$, ..., $[A \rightarrow \bullet\bullet, n, n]$ do agendy.
- ▶ $\forall p \in P \mid p = A \rightarrow \alpha \underline{a_i} \beta$ (a_i je hlavou pravidla) přidej hranu $[A \rightarrow \alpha \bullet a_i \bullet \beta, i-1, i]$ do agendy.
- ▶ počáteční chart je prázdný.

Je tato inicializace v pořádku?

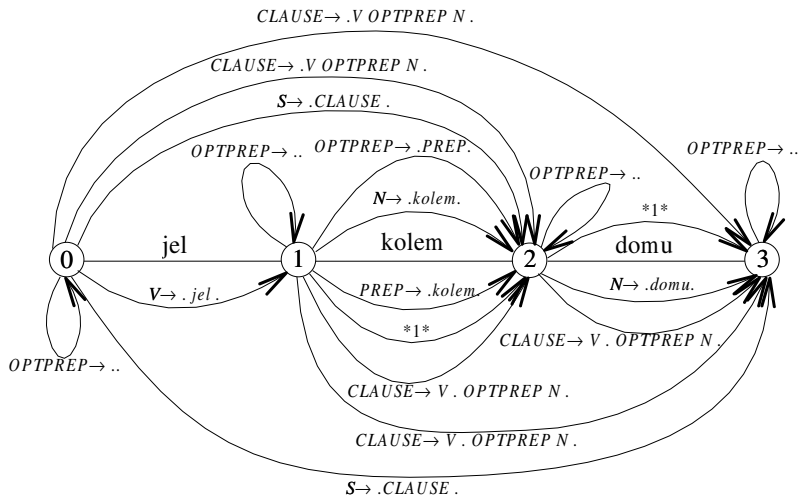
Co když inicializace nic nepřidá? (žadné ϵ ani žádný terminál jako hlava)
 Odpověď: taková gramatika by generovala prázdný jazyk.

Analyzátor řízený hlavou pravidla pokrač.

Iterace – vezmi hranu E z agendy a pak:

- a₁) pokud je E ve tvaru $[A \rightarrow \bullet \alpha \bullet, j, k]$, potom pro každou hranu: $[B \rightarrow \beta \bullet \gamma \bullet A \delta, i, j]$ v chartu vytvoř hranu $[B \rightarrow \beta \bullet \gamma A \bullet \delta, i, k]$,
- a₂) pro $[B \rightarrow \beta A \bullet \gamma \bullet \delta, k, l]$ v chartu vytvoř hranu $[B \rightarrow \beta \bullet A \gamma \bullet \delta, j, l]$.
- b₁) pokud je E ve tvaru $[B \rightarrow \beta \bullet \gamma \bullet A \delta, i, j]$, potom pro každou hranu $[A \rightarrow \bullet \alpha \bullet, j, k]$ v chartu vytvoř hranu $[B \rightarrow \beta \bullet \gamma A \bullet \delta, i, k]$.
- b₂) pokud je E ve tvaru $[B \rightarrow \beta A \bullet \gamma \bullet \delta, k, l]$, potom pro každou hranu $[A \rightarrow \bullet \alpha \bullet, j, k]$ v chartu vytvoř hranu $[B \rightarrow \beta \bullet A \gamma \bullet \delta, j, l]$.
- c₁) pokud je E ve tvaru $[A \rightarrow \beta a_i \bullet \gamma \bullet \delta, i, j]$, potom vytvoř hranu $[A \rightarrow \beta \bullet a_i \gamma \bullet \delta, i-1, j]$.
- c₂) pokud je E ve tvaru $[A \rightarrow \beta \bullet \gamma \bullet a_{j+1} \delta, i, j]$, potom vytvoř hranu $[A \rightarrow \beta \bullet \gamma a_{j+1} \bullet \delta, i, j+1]$.
- d) pokud je E ve tvaru $[A \rightarrow \bullet \alpha \bullet, i, j]$, potom pro každé pravidlo $B \rightarrow \beta \underline{A} \gamma$ ve vstupní gramatice vytvoř hranu $[B \rightarrow \beta \bullet A \bullet \gamma, i, j]$ (symbol A je hlavou pravidla).

Příklad – chart po analýze řízené hlavou pravidla

*1* = $\text{CLAUSE} \rightarrow V \text{ OPTPREP } \cdot N \cdot$

Porovnání jednotlivých algoritmů

