

3.6 Cocke-Younger-Kasami -jäsenysalgoritmi

Osittava jäsentäminen on selkeä ja tehokas jäsenysmenetelmä LL(1)-kieliopeille: n merkin mittaisen syötemerkkijonon käsittely sujuu ajassa $O(n)$. LL(1)-kieliopit ovat kuitenkin melko rajoitettu luokka; yleisen jäsenysongelman ratkaisu ei ole yhtä helppoa.

Periaatteessa ongelma voidaan ratkaista esim. soveltamalla yleistä (peruuttavaa) osittavaa jäsenystä, mutta käytännössä vaikeudeksi muodostuu erilaisten kokeiltavien johtovaihtoehtojen suuri määrä. (Tyypillisesti $O(c^n)$ kpl jollakin $c \geq 2$.)

1. ε -produktioiden poistaminen

Olkoon $G = (V, \Sigma, P, S)$ yhteydetön kielioppi. Välike $A \in V - \Sigma$ on *tyhjentyvä*, jos $A \Rightarrow_G^* \varepsilon$.

Lemma 3.5. Mistä tahansa yhteydetömmästä kieliopista G voidaan muodostaa ekvivalentti kielioppi G' , jossa enintään lähtösymboli on tyhjentyvä.

Cocke-Younger-Kasami -algoritmi on yleiseen ns. dynaamisen ohjelmoinnin tekniikkaan (t. osaratkaisujen taulukointiin) perustuva menetelmä mielivaltaisen yhteydetömmän kieliopin tuottamien merkkijonojen tunnistamiseen. Menetelmä toimii ajassa $O(n^3)$, missä n on tutkittavan merkkijonon pituus.

Algoritmia varten määritellään ensin joitakin kielioppimuunnoksia.

Todistus. Olkoon $G = (V, \Sigma, P, S)$. Selvitetään ensin G :n tyhjentyvät välitteet seuraavasti:

(i) asetetaan aluksi

$$\text{NULL} := \{A \in V - \Sigma \mid A \rightarrow \varepsilon \text{ on } G\text{:n produktio}\};$$

(ii) toistetaan sitten seuraavaa NULL-joukon laajennusoperaatiota, kunnes joukko ei enää kasva:

$$\begin{aligned} \text{NULL} &:= \text{NULL} \cup \\ &\{A \in V - \Sigma \mid A \rightarrow B_1 \dots B_k \text{ on } G\text{:n prod.}, \\ &B_i \in \text{NULL} \text{ kaikilla } i = 1, \dots, k\}. \end{aligned}$$

Tämän jälkeen korvataan kukin G :n produktio $A \rightarrow X_1 \dots X_k$ kaikkien sellaisten produktioiden joukolla, jotka ovat muotoa

$$A \rightarrow \alpha_1 \dots \alpha_k, \quad \text{missä}$$

$$\alpha_i = \begin{cases} X_i, & \text{jos } X_i \notin \text{NULL}; \\ X_i \text{ tai } \varepsilon, & \text{jos } X_i \in \text{NULL}. \end{cases}$$

Lopuksi poistetaan kaikki muotoa $A \rightarrow \varepsilon$ olevat produktiot. Jos poistettavana on myös produktio $S \rightarrow \varepsilon$, otetaan muodostettavaan kielioppiin G' uusi lähtösymboli S' ja sille produktiot $S' \rightarrow S$ ja $S' \rightarrow \varepsilon$. \square

2. Yksikköproduktioiden poistaminen

Produktio muotoa $A \rightarrow B$, missä A ja B ovat välitteitä, on *yksikköproduktio*.

Lemma 3.6. Mistä tahansa yhteydettömästä kieliopista G voidaan muodostaa ekvivalentti kielioppi G' , jossa ei ole yksikköproduktioita.

Esimerkki. Poistetaan ε -produktiot kieliopista:

$$\begin{aligned} S &\rightarrow A \mid B \\ A &\rightarrow aBa \mid \varepsilon \\ B &\rightarrow bAb \mid \varepsilon \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad (\text{NULL} = \{A, B, S\})$$

$$\begin{aligned} S &\rightarrow A \mid B \mid \varepsilon \\ A &\rightarrow aBa \mid aa \mid \varepsilon \\ B &\rightarrow bAb \mid bb \mid \varepsilon \end{aligned} \quad \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} S' &\rightarrow S \mid \varepsilon \\ S &\rightarrow A \mid B \\ A &\rightarrow aBa \mid aa \\ B &\rightarrow bAb \mid bb. \end{aligned}$$

Todistus. Olkoon $G = (V, \Sigma, P, S)$. Selvitetään ensin G :n kunkin välikkeen “yksikköseuraajat” seuraavasti:

(i) asetetaan aluksi kullekin $A \in V - \Sigma$:

$$F(A) := \{B \in V - \Sigma \mid A \rightarrow B \text{ on } G\text{:n produktio}\};$$

(ii) toistetaan sitten seuraavia F -joukkojen laajennusoperaatioita, kunnes joukot eivät enää kasva:

$$F(A) := F(A) \cup \bigcup \{F(B) \mid A \rightarrow B \text{ on } G\text{:n produktio}\}.$$

Tämän jälkeen poistetaan G :stä kaikki yksikköproduktiot ja lisätään niiden sijaan kaikki mahdolliset produktiot muotoa $A \rightarrow \omega$, missä $B \rightarrow \omega$ on G :n ei-yksikköproduktio jollakin $B \in F(A)$. \square

Esimerkki. Poistetaan yksikköproduktiot aiemmin muodostetusta kieliopista:

$$\begin{array}{l} S' \rightarrow S \mid \varepsilon \\ S \rightarrow A \mid B \\ A \rightarrow aBa \mid aa \\ B \rightarrow bAb \mid bb. \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Välikkeiden yksikköseuraajat ovat:} \\ F(S') = \{S, A, B\}, F(S) = \{A, B\}, \\ F(A) = F(B) = \emptyset. \text{ Korvaamalla} \\ \text{yksikköproduktiot edellä esitetyllä tavalla} \\ \text{saadaan kielioppi:} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} S' \rightarrow aBa \mid aa \mid bAb \mid bb \mid \varepsilon \\ S \rightarrow aBa \mid aa \mid bAb \mid bb \\ A \rightarrow aBa \mid aa \\ B \rightarrow bAb \mid bb. \end{array}$$

(Huomataan, että välike S on nyt itse asiassa "turha", so. se ei voi esiintyä minkään kieliopin lauseen johdossa. Myös turhat välikkeet voidaan haluttaessa poistaa kieliopista samantapaisella algoritmilla (HT).)



Chomskyn normaalimuoto

Yhteydetön kielioppi $G = (V, \Sigma, P, S)$ on *Chomskyn normaalimuodossa*, jos sen välikkeistä enintään S on tyhjentyvä, ja mahdollista produktiota $S \rightarrow \varepsilon$ lukuunottamatta muut produktiot ovat muotoa

$$A \rightarrow BC \quad \text{tai} \quad A \rightarrow a,$$

missä A, B ja C ovat välikkeitä ja a on päätemerkki.

Lisäksi vaaditaan yksinkertaisuuden vuoksi, että lähtösymboli S ei esiinny minkään produktio-oikealla puolella.



Lause 3.7. Mistä tahansa yhteydettömästä kieliopista G voidaan muodostaa ekvivalentti Chomskyn normaalimuotoinen kielioppi G' .

Todistus. Olkoon $G = (V, \Sigma, P, S)$. Mikäli lähtösymboli S esiintyy G :ssä jonkin produktio-oikealla puolella, otetaan käyttöön uusi lähtösymboli S' ja lisätään G :hen produktio $S' \rightarrow S$. Poistetaan sitten G :stä ε -produktiot ja yksikköproduktiot lemmojen 3.5 ja 3.6 konstruktiolla. Tämän jälkeen kaikki G :n produktiot ovat muotoa $A \rightarrow a$ tai $A \rightarrow X_1 \dots X_k$, $k \geq 2$ (tai $S \rightarrow \varepsilon/S' \rightarrow \varepsilon$).



Lisätään nyt kielioppiin kutakin päätemerkkiä a varten uusi välike C_a ja sille produktio $C_a \rightarrow a$. Korvataan kussakin muotoa $A \rightarrow X_1 \dots X_k$, $k \geq 2$, olevassa produktiossa ensin kaikki päätemerkit em. uusilla välikkeillä, ja sitten koko produktio produktiojoukolla

$$\begin{array}{l} A \rightarrow X_1 A_1 \\ A_1 \rightarrow X_2 A_2 \\ \vdots \\ A_{k-2} \rightarrow X_{k-1} X_k, \end{array}$$

missä A_1, \dots, A_{k-2} ovat jälleen uusia välikkeitä. \square



Em. konstruktiolla saatu
Chomskyn normaalimuoto:

Esimerkki. Kielioppi:

$$\begin{aligned} S &\rightarrow aBCd \mid bbb \\ B &\rightarrow b \\ C &\rightarrow c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &\rightarrow C_a S_1^1 \\ S_1^1 &\rightarrow B S_2^1 \\ S_2^1 &\rightarrow C C_d \\ S &\rightarrow C_b S_1^2 \\ S_1^2 &\rightarrow C_b C_b \\ B &\rightarrow b \\ C &\rightarrow c \\ C_a &\rightarrow a \\ C_b &\rightarrow b \\ C_c &\rightarrow c \\ C_d &\rightarrow d. \end{aligned}$$



Joukkojen N_{ik} laskeminen:

(i) asetetaan aluksi kaikilla $i = 1, \dots, n$:

$$N_{i1} := \{A \in V - \Sigma \mid A \rightarrow a_i \text{ on } G\text{:n produktio}\};$$

(ii) lasketaan sitten kaikilla $k = 2, \dots, n$ ja kullakin k kaikilla $i = 1, \dots, n - k + 1$:

$$N_{ik} := \bigcup_{j=1}^{k-1} \{A \in V - \Sigma \mid A \rightarrow BC \text{ on } G\text{:n produktio, missä } B \in N_{ij} \text{ ja } C \in N_{i+j, k-j}\}. \quad \square$$



CYK-algoritmi

Olkoon $G = (V, \Sigma, P, S)$ yhteydetön kielioppi. Lauseen 3.7 nojalla voidaan olettaa, että G on Chomskyn normaalimuodossa. Kysymys, kuuluuko annettu merkkijono x kieleen $L(G)$ voidaan tällöin ratkaista seuraavasti:

Jos $x = \varepsilon$, niin $x \in L(G)$ joss $S \rightarrow \varepsilon$ on G :n produktio.

Muussa tapauksessa merkitään $x = a_1 \dots a_n$ ja tarkastellaan x :n eri osajonojen tuottamista.

Merkitään N_{ik} :lla niiden välikkeiden A joukkoa, joista voidaan tuottaa x :n positiosta i alkava, k merkin mittainen osajono:

$$N_{ik} = \{A \in V - \Sigma \mid A \xRightarrow{*}_G a_i \dots a_{i+k-1}\}, \\ 1 \leq i \leq i+k-1 \leq n.$$

Joukot N_{ik} voidaan laskea taulukoimalla lyhyistä osajonoista pitempiin seuraavassa esitettävällä tavalla. Selvästi on $x \in L(G)$ joss $S \in N_{1n}$.



Esimerkki. Chomskyn normaalimuotoinen kielioppi G :

$$\begin{aligned} S &\rightarrow AB \mid BC \\ A &\rightarrow BA \mid a \\ B &\rightarrow CC \mid b \\ C &\rightarrow AB \mid a \end{aligned}$$

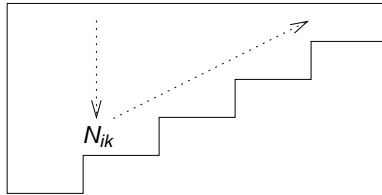
CYK-algoritmin laskenta kieliopilla G ja syötteellä $x = baaba$:

		$i \rightarrow$				
		$1 : b$	$2 : a$	$3 : a$	$4 : b$	$5 : a$
$k \downarrow$	1	B	A, C	A, C	B	A, C
	2	S, A	B	S, C	S, A	–
	3	\emptyset	B	B	–	–
	4	\emptyset	S, A, C	–	–	–
	5	S, A, C	–	–	–	–

Koska lähtösymboli S kuuluu joukkoon N_{15} , päätellään että x kuuluu kieleen $L(G)$.



Yleisesti ottaen CYK-algoritmissa jotakin joukkoa N_{ik} määritettäessä edetään samanaikaisesti sarakkeessa N_{ij} joukkoa N_{ik} "kohti" ja diagonaalia $N_{i+j,k-j}$ pitkin siitä "poispäin":



Määritelmä 3.2 Pinoautomaatti on kuusikko

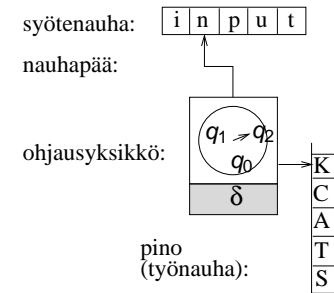
$$M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, F),$$

missä

- ▶ Q on tilojen äärellinen joukko;
- ▶ Σ on syötealkkosto;
- ▶ Γ on pinoalkkosto;
- ▶ $\delta : Q \times (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times (\Gamma \cup \{\varepsilon\}) \rightarrow \mathcal{P}(Q \times (\Gamma \cup \{\varepsilon\}))$ on (joukkoarvoinen) siirtymäfunktio;
- ▶ $q_0 \in Q$ on alkutila;
- ▶ $F \subseteq Q$ on (hyväksyvien) lopputilojen joukko.

3.7 Pinoautomaatit

Yhteydettömille kielille saadaan automaattikarakterisointi ns. pinoautomaattien avulla:



Pinoautomaatti on kuin äärellinen automaatti, johon on lisätty rajoittamattoman suuri pino. Pinon käyttö on varsin rajallista: automaatti voi lukea, kirjoittaa, poistaa tai lisätä merkkejä vain pinon päälle.

Siirtymäfunktion arvon

$$\delta(q, \sigma, \gamma) = \{(q_1, \gamma_1), \dots, (q_k, \gamma_k)\}$$

tulkinta on, että ollessaan tilassa q ja lukiessaan syötemerkin σ ja pinomerkin γ automaatti voi siirtyä johonkin tiloista q_1, \dots, q_k ja korvata vastaavasti pinon päällimmäisen merkin jollakin merkeistä $\gamma_1, \dots, \gamma_k$. Pinoautomaatit ovat siis yleisessä tapauksessa epädeterministisiä.

Jos $\sigma = \varepsilon$, automaatti tekee siirtymän syötemerkkiä lukematta. Jos $\gamma = \varepsilon$, automaatti ei lue pinomerkkiä ja uusi kirjoitettu merkki tulee pinon päälle vanhaa päällimmäistä merkkiä poistamatta ("push"-operaatio). Jos pinosta luettu merkki on $\gamma \neq \varepsilon$ ja kirjoitettavana on $\gamma_i = \varepsilon$, pinosta poistetaan sen päällimmäinen merkki ("pop"-operaatio).

Automaatin *tilanne* on kolmikko $(q, w, \alpha) \in Q \times \Sigma^* \times \Gamma^*$; erityisesti automaatin *alkutilanne* syötteellä x on kolmikko (q_0, x, ε) .

Intuitio: tilanteessa (q, w, α) automaatti on tilassa q , syötemerkkijonon käsittelemätön osa on w ja pinossa on ylhäältä alas lukien merkkijono α .

Tilanne (q, w, α) johtaa suoraan tilanteeseen (q', w', α') , merkitään

$$(q, w, \alpha) \vdash_M (q', w', \alpha')$$

jos voidaan kirjoittaa $w = \sigma w', \alpha = \gamma \beta, \alpha' = \gamma' \beta$ ($|\sigma|, |\gamma|, |\gamma'| \leq 1$), siten että

$$(q', \gamma') \in \delta(q, \sigma, \gamma).$$

Tilanne (q, w, α) johtaa tilanteeseen (q', w', α') , merkitään

$$(q, w, \alpha) \vdash_M^* (q', w', \alpha'),$$

jos on olemassa tilannejono $(q_0, w_0, \alpha_0), (q_1, w_1, \alpha_1), \dots, (q_n, w_n, \alpha_n), n \geq 0$, siten että

$$(q, w, \alpha) = (q_0, w_0, \alpha_0) \vdash_M (q_1, w_1, \alpha_1) \vdash_M \dots \vdash_M (q_n, w_n, \alpha_n) = (q', w', \alpha').$$

Pinoautomaatti M hyväksyy merkkijonon $x \in \Sigma^*$, jos

$$(q_0, x, \varepsilon) \vdash_M^* (q_f, \varepsilon, \alpha) \quad \text{joillakin } q_f \in F \text{ ja } \alpha \in \Gamma^*,$$

siis jos se syöteen loppuessa on jossakin hyväksyvässä lopputilassa; muuten M hylkää x :n.

Automaatin M tunnistama kieli on:

$$L(M) = \{x \in \Sigma^* \mid (q_0, x, \varepsilon) \vdash_M^* (q_f, \varepsilon, \alpha) \text{ joillakin } q_f \in F \text{ ja } \alpha \in \Gamma^*\}.$$

Esimerkki. Pinoautomaatti kielelle $\{a^k b^k \mid k \geq 0\}$:

$$M = (\{q_0, q_1, q_2, q_3\}, \{a, b\}, \{A, \underline{A}\}, \delta, q_0, \{q_0, q_3\}),$$

missä

$$\delta(q_0, a, \varepsilon) = \{(q_1, \underline{A})\},$$

$$\delta(q_1, a, \varepsilon) = \{(q_1, \underline{A})\},$$

$$\delta(q_1, b, A) = \{(q_2, \varepsilon)\},$$

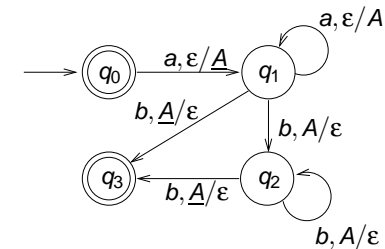
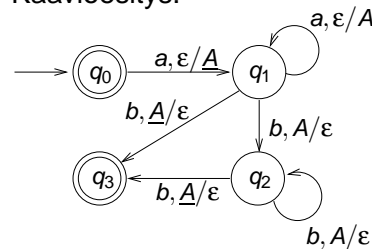
$$\delta(q_1, b, \underline{A}) = \{(q_3, \varepsilon)\},$$

$$\delta(q_2, b, A) = \{(q_2, \varepsilon)\},$$

$$\delta(q_2, b, \underline{A}) = \{(q_3, \varepsilon)\},$$

$$\delta(q, \sigma, \gamma) = \emptyset \text{ muilla } (q, \sigma, \gamma).$$

Kaavioesitys:



Automaatin toiminta syötteellä $aabb$:

$$(q_0, aabb, \varepsilon) \vdash (q_1, abb, \underline{A}) \vdash (q_1, bb, \underline{A}\underline{A}) \vdash (q_2, b, \underline{A}) \vdash (q_3, \varepsilon, \varepsilon).$$

Koska $q_3 \in F = \{q_0, q_3\}$, on siis $aabb \in L(M)$.

Pinoautomaatit ja yhteydettömät kielet

Lause 3.8 Kieli on yhteydeton, jos ja vain jos se voidaan tunnistaa jollakin (epädeterministisellä) pinoautomaatilla. □

Em. lauseen todistus sivuutetaan tässä, mutta periaatteena esim. annettua kielioppia G vastaavan pinoautomaatin M_G toiminnassa on, että M_G :n pinon käyttäytyminen syötteellä x noudattelee G :n mukaisen vasemman lausejohdon $S \xRightarrow{*}_{lm} x$ etenemistä: jos pinon päällimmäisenä on välikemerkki, sovelletaan jotain G :n produktiota ja lisätään pinon pinnalle vastaavat merkit; jos pinon päällimmäisenä on päätemerkki, se sovitetaan yhteen seuraavan syötemerkin kanssa.

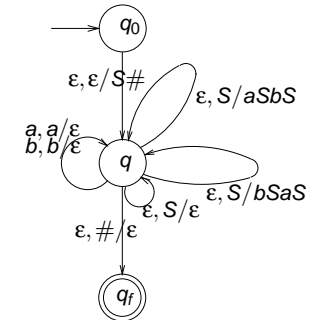
Esimerkiksi syötteellä $abab$ on em. automaatilla seuraava hyväksyvä laskenta:

$$\begin{aligned}
 (q_0, abab, \varepsilon) &\vdash (q, abab, S\#) && \vdash^* (q, abab, aSbS\#) \\
 &\vdash (q, bab, SbS\#) && \vdash^* (q, bab, bSaSbS\#) \\
 &\vdash (q, ab, SaSbS\#) && \vdash (q, ab, aSbS\#) \\
 &\vdash (q, b, SbS\#) && \vdash (q, b, bS\#) \\
 &\vdash (q, \varepsilon, S\#) && \vdash (q, \varepsilon, \#) \\
 &\vdash (q_f, \varepsilon, \varepsilon).
 \end{aligned}$$

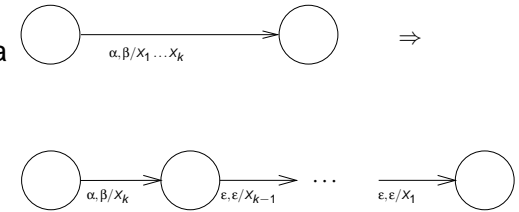
Tämä vastaa annetun kieliopin mukaista lauseen $abab$ vasenta johtoa:

$$\begin{aligned}
 \underline{S} &\Rightarrow a\underline{S}bS \Rightarrow ab\underline{S}aSbS \Rightarrow aba\underline{S}bS \\
 &\Rightarrow abab\underline{S} \Rightarrow abab.
 \end{aligned}$$

Esimerkki. Kielioppia $\{S \rightarrow aSbS \mid bSaS \mid \varepsilon\}$ vastaava pinoautomaatti:



Automaatin kuvauksessa on käytetty seuraavaa luonnollista lyhennemerkintää:



Pinoautomaatti M on *deterministinen*, jos jokaisella tilanteella (q, w, α) on enintään yksi mahdollinen seuraaja (q', w', α') , jolla

$$(q, w, \alpha) \vdash_M (q', w', \alpha')$$

Toisin kuin äärellisten automaattien tapauksessa, *epädeterministiset pinoautomaatit ovat aidosti vahvempia kuin deterministiset*. Esimerkiksi kieli $\{ww^R \mid w \in \{a, b\}^*\}$ voidaan tunnistaa epädeterministisellä, mutta ei deterministisellä pinoautomaatilla. (Tod. siv.)

Yhteydeton kieli on *deterministinen*, jos se voidaan tunnistaa jollakin deterministisellä pinoautomaatilla. Deterministiset kielet voidaan jäsentää ajassa $O(n)$; yleiset yhteydettömät kielet vaativat tunnetuilla menetelmillä lähes ajan $O(n^3)$.