

Rozpoznávanie obrazcov

šk.r. 2019-20

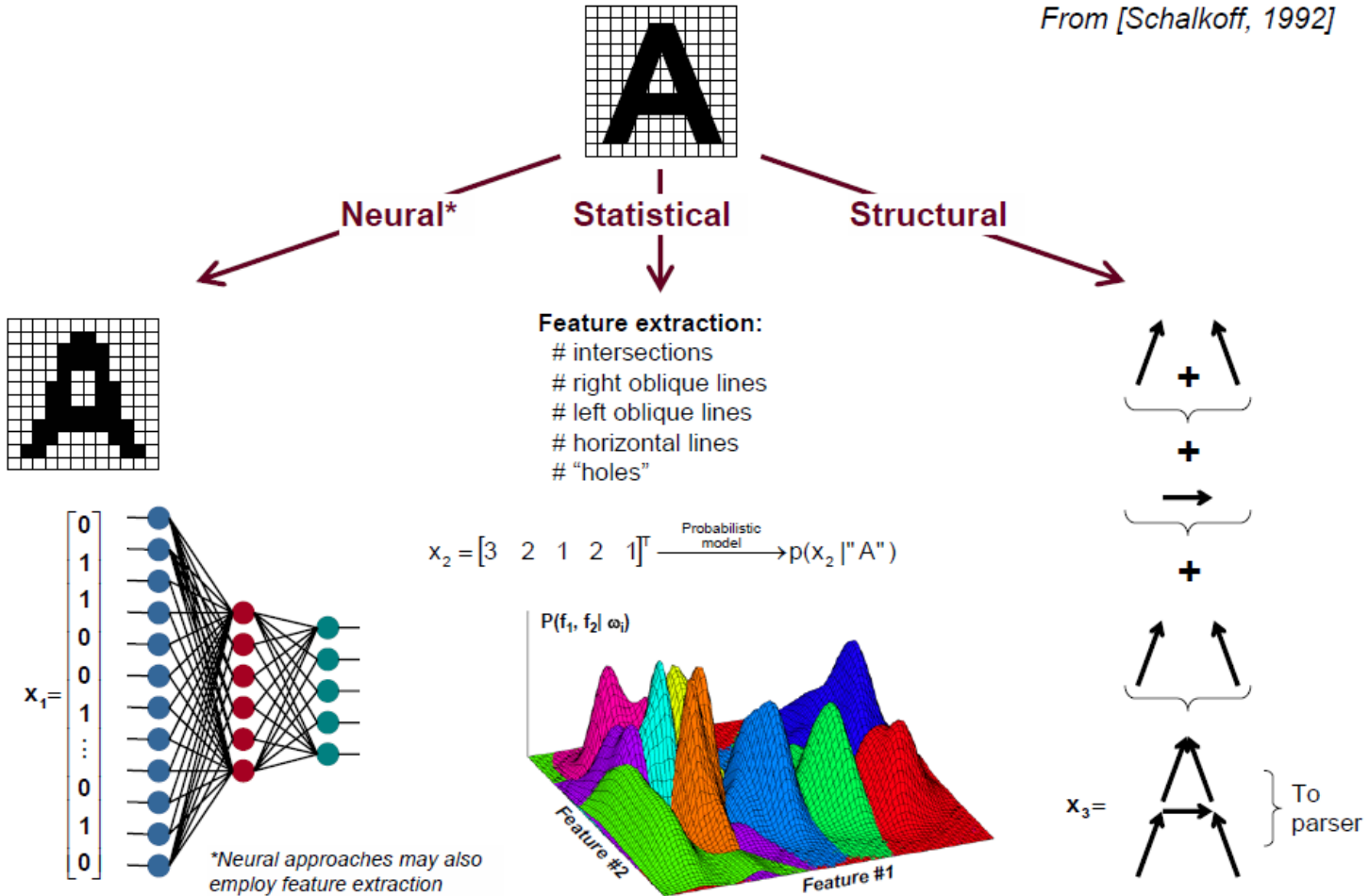
Štruktúrálna (syntaktická)
rozhpoznávanie

Doc. RNDr. Milan Ftáčnik, CSc.

Štatistické vs. neurálne vs. štrukturálne

Example: neural, statistical and structural OCR

From [Schalkoff, 1992]



Štruktúrálné (syntaktické) metódy

- Pracujú s relačnými štruktúrami, ktoré sa skladajú:
 - **z prvkov nosiča relačnej štruktúry**
 - zodpovedajú primitívam ako ďalej nedeliteľným častiam obrazu
 - **z relácií, ktoré sú nad nimi definované**
 - n -árne relácie, ale n -árnu reláciu možno bez straty informácie previesť na relačnú štruktúru s nanajvýš binárnymi reláciami

Relačné štruktúry

- Možno ich znázorniť pomocou grafov:
 - Prvky nosiča – vrcholy grafu
 - Prvky binárnych symetrických relácií – neorientované hrany
 - Prvky binárnych nesymetrických relácií – orientované hrany
 - Prvky unárnych relácií – mená a vlastnosti prvkov nosiča = relácie: určujúce vyjadrujú definičné vlastnosti primitíva, doplnkové detaily

Použitie štrukturálnych metód

- Štrukturálne metódy sa uplatňujú najčastejšie pri riešení troch skupín úloh:
 - A) pri klasifikácii časových priebehov
 - B) pri rozpoznávaní dvojrozmerných útvarov
 - C) pri rozpoznávaní scény, t.j. pri súčasnom rozpoznávaní množiny 3D objektov a vzťahov medzi nimi, obvykle na základe 2D obrazu

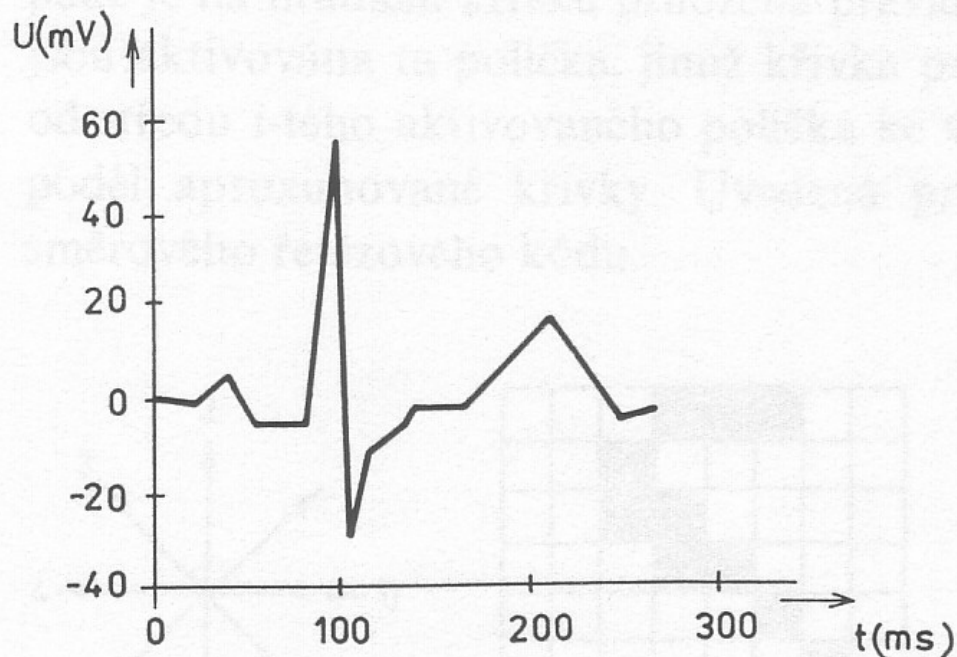
Klasifikácia časových priebehov

- Relácia – zretáženie, vyjadrujúce bezprostrednú časovú následnosť
- Ekvidištančné rozdelenie signálu na úseky rovnakej časovej dĺžky. Každý úsek je značený symbolom abecedy (signál v danom úseku tvorí primitívum)
- Označenie využíva lokálne charakteristiky signálu – často vyjadruje tvarové vlastnosti

Časové priebehy - príklad

- Ak uvažujeme signál, ktorý aproximuje priamkovými úsekmi signál EKG, potom signál na obrázku zapíšeme reťazcom

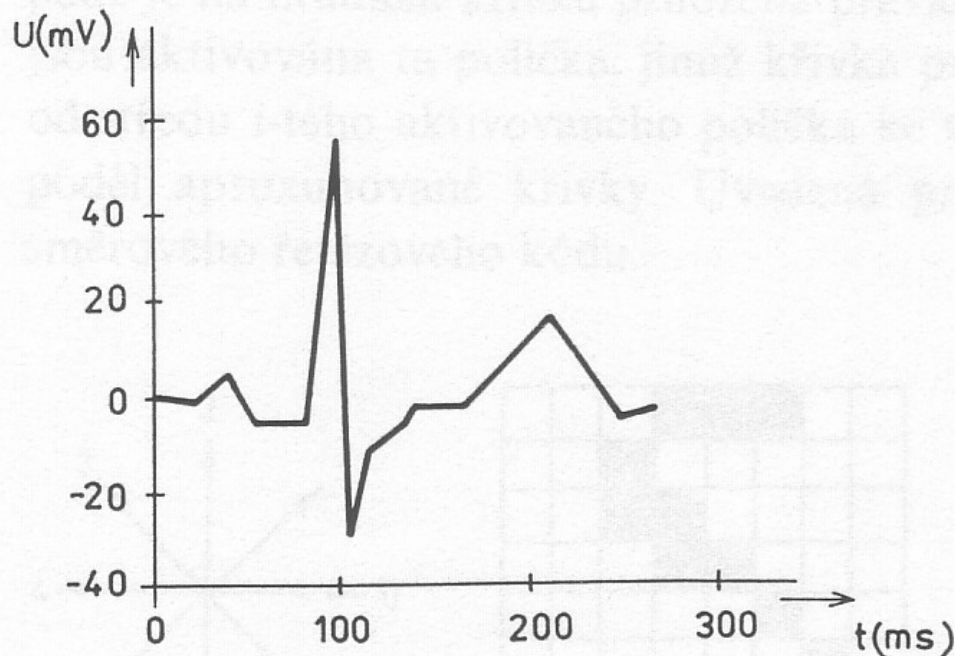
0 / \ 0 / \ / / 0 / \ 0



/ znamená sklon úseku väčší ako zvolený prah
\ sklon menší ako záporná hodnota prahu
0 úsek so sklonom v intervale medzi nimi

Časové priebehy – príklad II

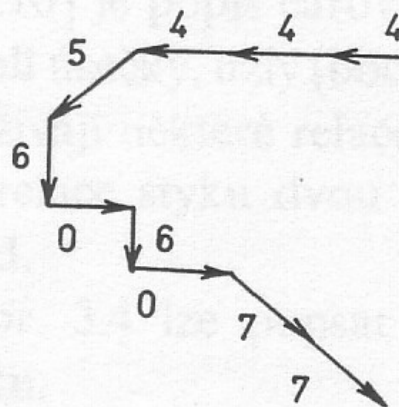
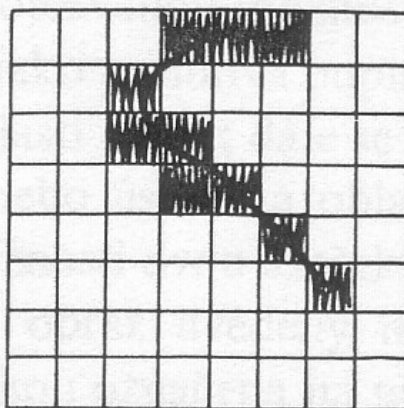
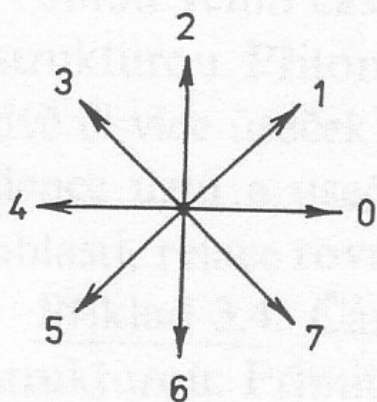
- Spolu s tvarovým reťazcom používame aj sémantický reťazec symbolov, ktorý zachytáva absolútnu hodnotu signálu na začiatku jednotlivých úsekov 0000AA000000



A – úroveň signálu je väčšia ako zvolený prah
- úroveň je menšia ako záporná hodnota prahu
0 – ak je v intervale medzi nimi

Štruktúrálny popis 2D útvarov

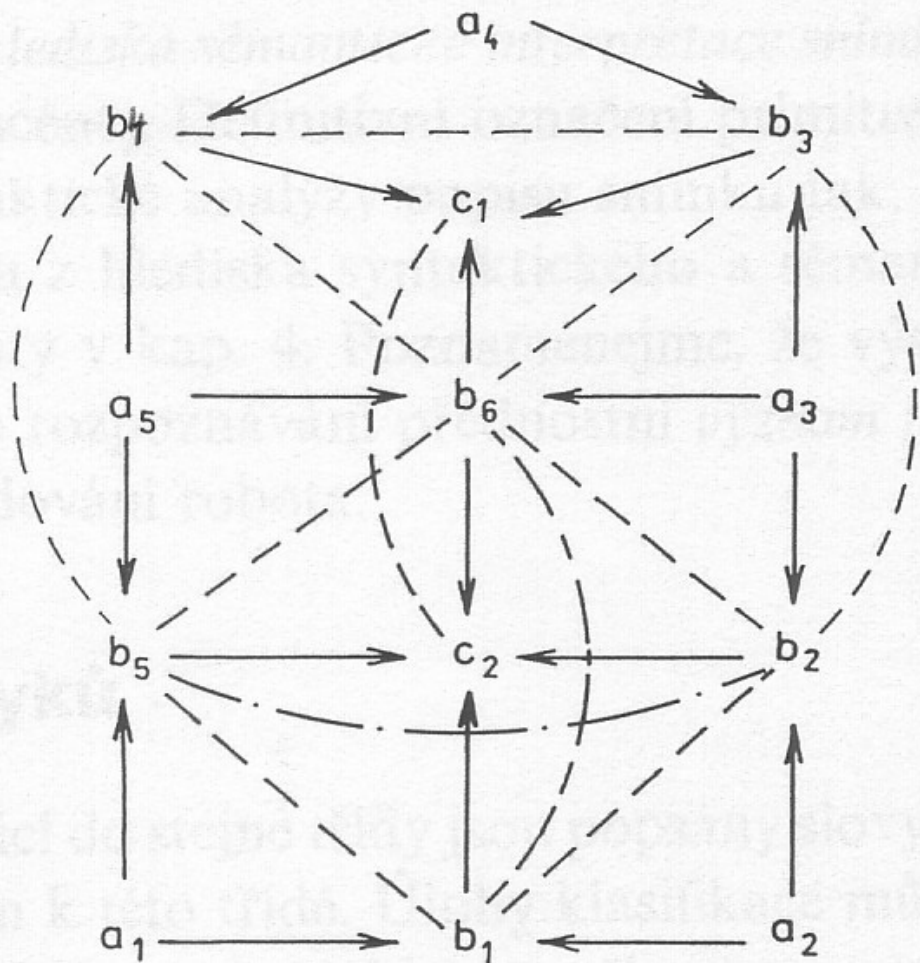
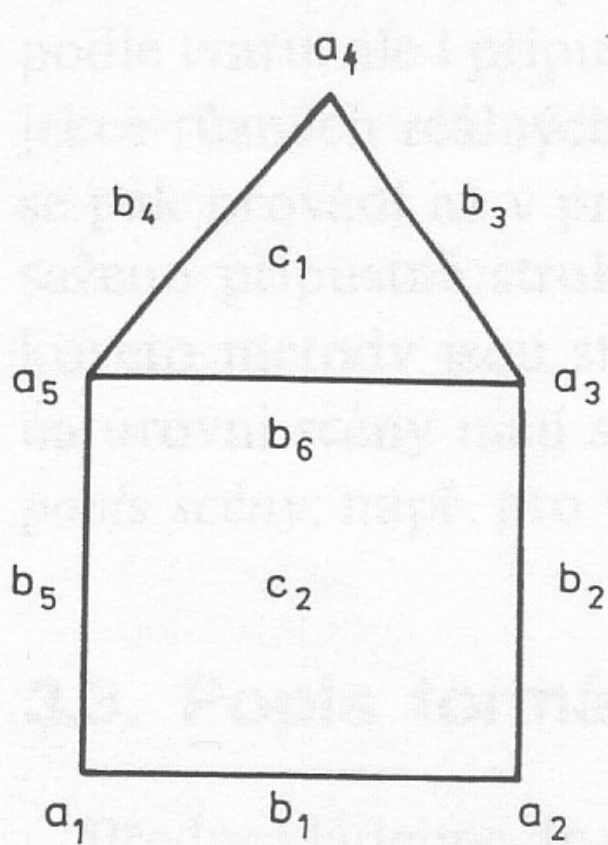
- Ekvidištančná metóda popisu uzavretých čiarových útvarov (pomocou ich hranice) s využitím reťazcových kódov a relácie zreťazenia



- Niekedy používame diferenčný kód, t.j. zmenu smeru oproti predchádzajúcemu úseku – takýto popis zachytáva tvar a je invariantný voči natočeniu

Popis relačnou štruktúrou

- Pri popise čiarového obrazu využijeme:
- Primitíva – úsečky, uzly (ako body, v ktorých sa dotýkajú dve a viaceré úsečky), oblasti apod.
- Relácie – incidencia uzlov a úsečiek, alebo uzlov a oblastí, styk dvoch úsečiek, alebo dvoch oblastí, rovnobežnosť dvoch úsečiek apod.
- Príklad nasleduje:



Použité relace :

$b_1 \longrightarrow a_1$

...

b_1 inciduje s a_1

$b_5 \text{ --- } b_6$

...

b_5 a b_6 se stýkají

$b_5 \text{ -.- } b_2$

...

b_5 a b_2 jsou rovnoběžné

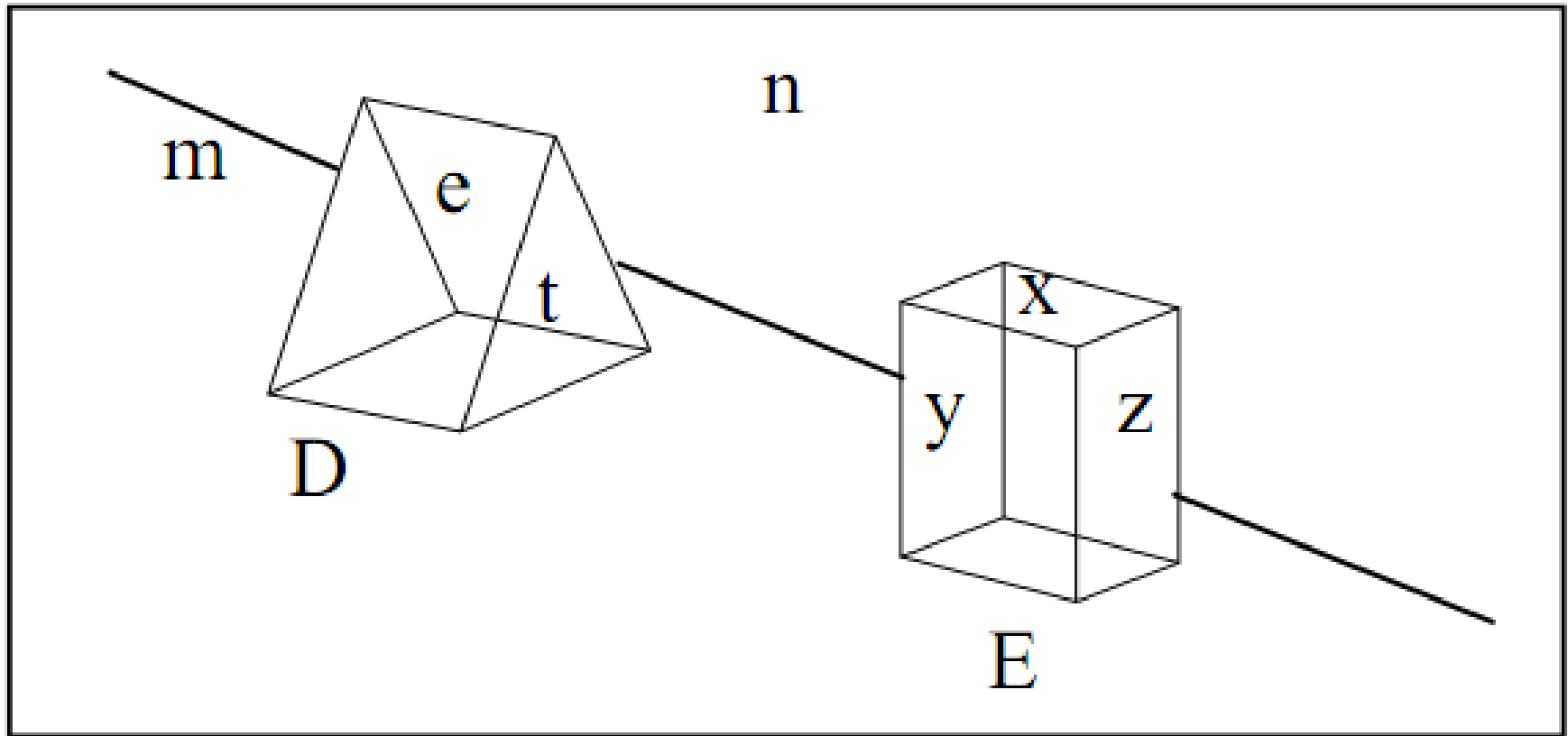
Obr. 3.4. Příklad popisu čárového obrazu relační strukturou.

Štrukturálny popis scény

- Vychádzame z 2D obrazov, ktoré vzniknú zobrazením scény
- Množina 2D útvarov, ktoré možno popísať čiarovými obrazmi
- Primitíva – jednotlivé typy objektov (kocka, ihlan, trojboký hranol)
- Relácie označujú vzájomnú polohu objektov apod.

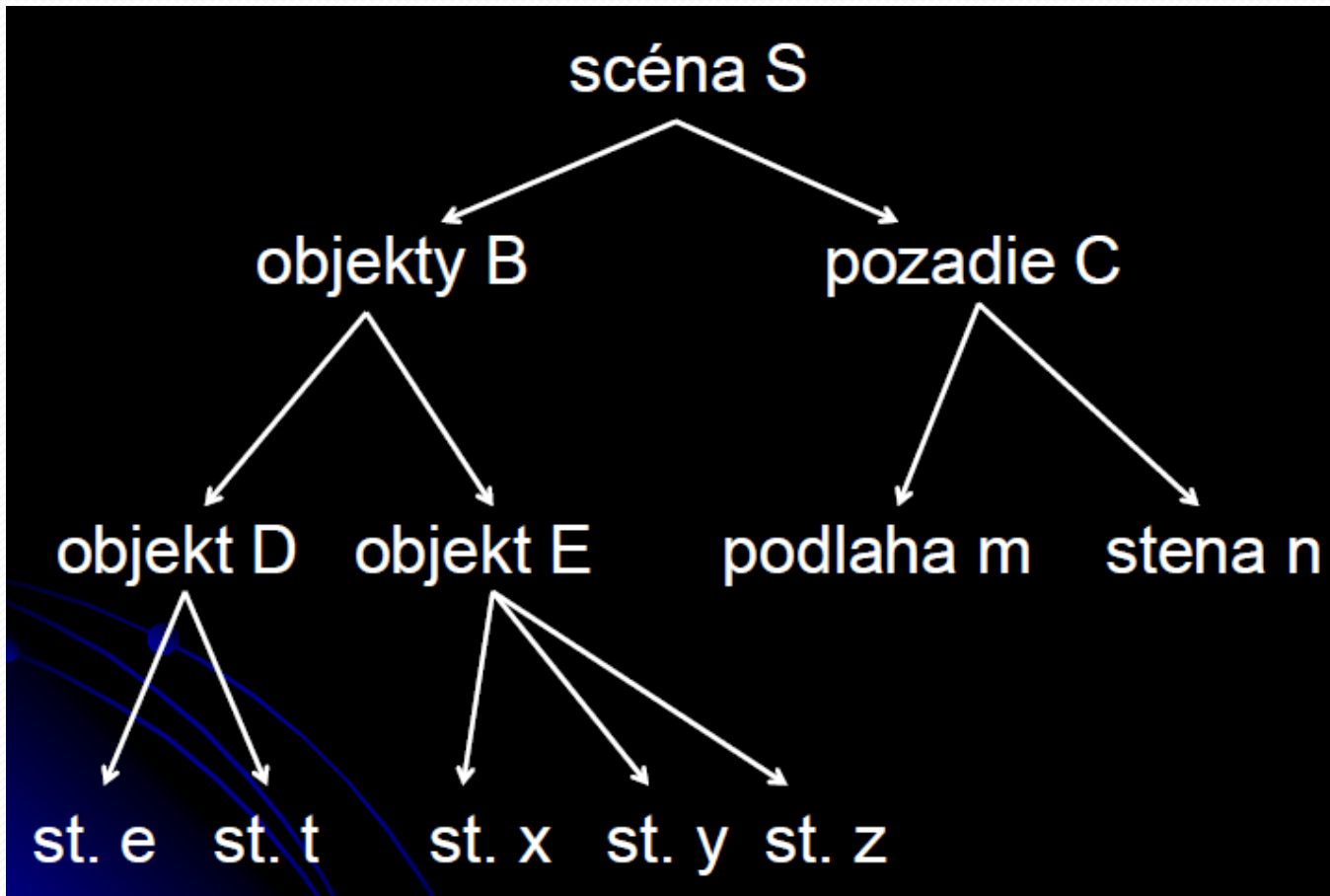
Popis scény - príklad

scéna S



Popis scény – príklad II

- Relačný graf, s reláciami JE ČASŤOU, JE PRED, JE VĽAVO, JE POD



Špeciálny prípad relačnej štruktúry

- Má jedinú binárnu reláciu t
- Nech x, y, z sú tri rôzne prvky nosiča
- t spĺňa vlastnosti **ostrého úplného usporiadania**:
- a) ak $\langle x, y \rangle \in t$ a $\langle y, z \rangle \in t$, potom aj $\langle x, z \rangle \in t$ (tranzitívnosť)
- b) pre žiadny prvok nosiča neplatí $\langle x, x \rangle \in t$
- c) $\forall x, y, x \neq y$ platí alebo $\langle x, y \rangle \in t$ alebo $\langle y, x \rangle \in t$

Špeciálny prípad II

- Potom reláciu t môžeme chápať ako zreťazenie, kde $\langle x, y \rangle \in t$ znamená **x je vľavo od y**
- Prvky nosiča popisujúce objekt môžeme usporiadať do postupnosti symbolov
- Takýmito postupnosťami symbolov sa vo všeobecnosti zaoberá teória formálnych jazykov a automatov

Teória formálnych jazykov

- Abeceda:
 - Konečná neprázdna množina symbolov V
- Slovo nad touto abecedou:
 - Konečná postupnosť α prvkov abecedy
- Prázdne slovo:
 - ε – neobsahuje žiadny symbol

Teória formálnych jazykov II

- Ak α, β sú slová, potom $\gamma = \alpha\beta$ je slovo, ktoré vzniklo ich zretázením
- Množinu všetkých slov nad abecedou V označujeme ako V^*
- Množinu L niektorých slov nad abecedou V označujeme ako jazyk nad V^* , pričom platí

$$L \subset V^*$$

Rozpoznávanie

- Objekty sú popísané slovami nad nejakou abecedou V
- Objekty patriace do jednej triedy tvoria jazyk príslušný k tejto triede
- Klasifikácia – rozhodnutie, či slovo popisujúce neznámy objekt patrí do jazyka niektorej z tried

Rozpoznávanie II

- Jazyky – môžu byť konečné alebo nekonečné
- Konečné jazyky – porovnávanie sa končí, keď sa nájde zhoda alebo sa vyčerpali všetky slová jazyka
- Nekonečné jazyky – ich slová zapisujeme pomocou formalizmu: buď ich reťazce generujú gramatiky alebo ich reťazce akceptujú stavové automaty

Gramatiky

- Gramatika $G = (V_T, V_N, S, P)$, kde:
 - V_T - konečná množina terminálnych symbolov
 - V_N - konečná množina neterminálnych symbolov $V_T \cap V_N = \emptyset$
 - S je počiatočný symbol $\in V_N$
 - P je konečná množina pravidiel $\alpha \rightarrow \beta$ tvaru:
 $(V_T \cup V_N)^* V_N (V_T \cup V_N)^* \rightarrow (V_T \cup V_N)^*$

Gramatiky II

- Množinu všetkých reťazcov generovaných gramatikou G a tvorených len ich terminálnymi symbolmi nazývame jazyk generovaný gramatikou G a označujeme ho $L(G)$
- Podľa tvaru pravidiel a obmedzení, ktoré musia spĺňať prepisovacie pravidlá, delíme gramatiky na viacero druhov – jazyky nimi generované vytvárajú hierarchiu

Príklad jednoduchovej gramatiky

- $V_T = \{a, b\}$
- P prepisovacie pravidlá:
 - 1. $S \rightarrow aSb$
 - 2. $S \rightarrow ba$
- Príklad generovaného slova:
$$S \Rightarrow aSb \Rightarrow aaSbb \Rightarrow aababb$$
- Jazyk generovaný gramatikou
$$L(G) = \{ba, a^n bab^n \mid n = 1, 2, \dots\}$$

Chomského hierarchia jazykov

- Gramatiky typu 0 – frázové – žiadne obmedzenia na prepisovacie pravidlá
- Gramatiky typu 1 – kontextové – pravidlá typu $uXw \rightarrow uxw$
- Gramatiky typu 2 – bezkontextové
 $X \rightarrow w$ a $X \in V_N$ a $w \in (V_N \cup V_T)^+$
- Gramatiky typu 3 – regulárne – pravidlá typu $X \rightarrow w$ alebo $X \rightarrow wY$ a $w \in V_T^+$

Chomského hierarchia jazykov II

- Potom platí $L_3 \subset L_2 \subset L_1 \subset L_0$
- Reálne sa používajú regulárne a bezkontextové jazyky, taká je väčšina programovacích jazykov
- U nich vieme efektívne zvládnuť úlohu overiť, či dané slovo je generované danou gramatikou, čiže patrí do jazyka, ktorý takáto gramatika generuje – to robí syntaktická analýza

Príklad ďalšej gramatiky

- $V_N = \{S, A, B\}$
- $V_T = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$
- P :

$$S \rightarrow SB \quad S \rightarrow A$$

$$A \rightarrow 1 \quad A \rightarrow 2$$

$$A \rightarrow 3 \quad A \rightarrow 4$$

$$A \rightarrow 5 \quad A \rightarrow 6$$

$$A \rightarrow 7 \quad A \rightarrow 8$$

$$A \rightarrow 9$$

$$B \rightarrow 0 \quad B \rightarrow A$$

$$S \rightarrow SB|A$$

$$A \rightarrow 1|2|3|4|5|6|7|8|9$$

$$B \rightarrow 0|A$$

$$S \Rightarrow SB \Rightarrow SBB \Rightarrow ABB \Rightarrow 1BB \Rightarrow 1AB \Rightarrow 12B \Rightarrow 120$$

Príklad ďalšej gramatiky II

- $V_N = \{S, A\}$
- $V_T = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$
- P :

$S \rightarrow 1|2|3|4|5|6|7|8|9$

$S \rightarrow 1A|2A|3A|4A|5A|6A|7A|8A|9A$

$A \rightarrow 1|2|3|4|5|6|7|8|9|0$

$A \rightarrow 1A|2A|3A|4A|5A|6A|7A|8A|9A|0A$

- Ten istý jazyk, ale gramatika má iba dva terminálne symboly

Stochastická gramatika

- Naviac má rozloženie pravdepodobnosti jednotlivých pravidiel
- Ku každému vygenerovanému slovu stochastická gramatika priradí pravdepodobnosť jeho vygenerovania, ako súčin pravdepodobností použitých pravidiel

$$S \xrightarrow{1} aA$$

$$A \xrightarrow{0.7} bB$$

$$A \xrightarrow{0.3} a$$

$$B \xrightarrow{0.4} b$$

$$B \xrightarrow{0.6} aS$$

$$S \Rightarrow aA \Rightarrow abB \Rightarrow abaS \Rightarrow abaaA \Rightarrow abaabB \Rightarrow abaabb$$

$$p(abaabb) = 1 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 0,4 = 0,1176$$

Inferencia gramatiky

- To je odvodenie gramatiky na základe trénovacej množiny štrukturálnych popisov
- Nie je to jednoznačná úloha a boli pri nej dosiahnuté iba skromné výsledky
- Všeobecný postup inferencie neexistuje, existujú iba metódy inferencie pre najjednoduchšie regulárne a bezkontextové gramatiky

Inferencia gramatiky II

- Vstup: Trénovacia množina $T = \{x_1, \dots, x_t\}$
- Výstup: Regulárna gramatika $G = (V_T, V_N, S, P)$
- Krok 1
- Nájsť všetky terminály v T a vytvoriť V_T
- Krok 2
- Pre \forall vzor $x_i = a_{i1} \dots a_{in}$ ($x_i \in T$) vytvoriť pravidlá
 $S \rightarrow a_{i1}Z_{i1}, Z_{i1} \rightarrow a_{i2}Z_{i2}, \dots, Z_{i,n-2} \rightarrow a_{i,n-1}Z_{i,n-1},$
 $Z_{i,n-1} \rightarrow a_{in}$, kde $\forall Z_{ij}$ predstavuje nový neterminál

Inferencia gramatiky III

- Regulárna gramatika G^* ... Neznáma

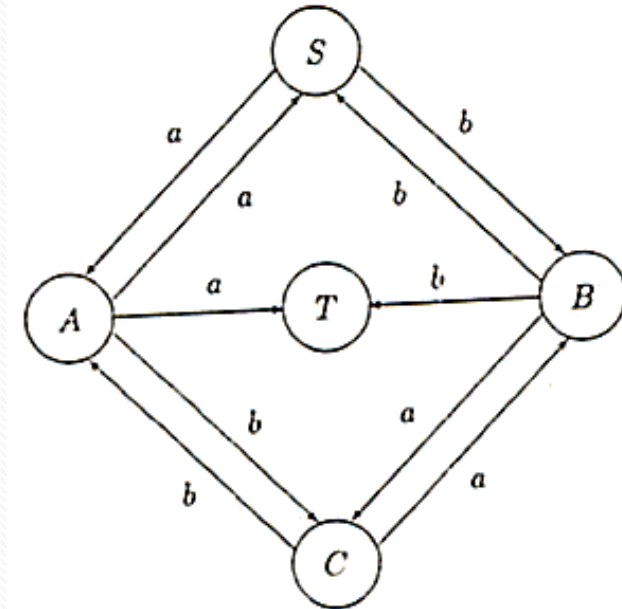
- $G^* = (\{S, A, B, C\}, \{a, b\}, S, P)$

$S \rightarrow aA|bB$

$A \rightarrow a|aS|bC$

$B \rightarrow b|bS|aC$

$C \rightarrow aB|bA$



Tréno vacia množina

$T = \{abab, bbaa, baba, aabb\}$

Konečný auto-
mat pre G^*

Inferencia gramatiky IV

- Odvodená gramatika

- $V_T = \{a, b\}$

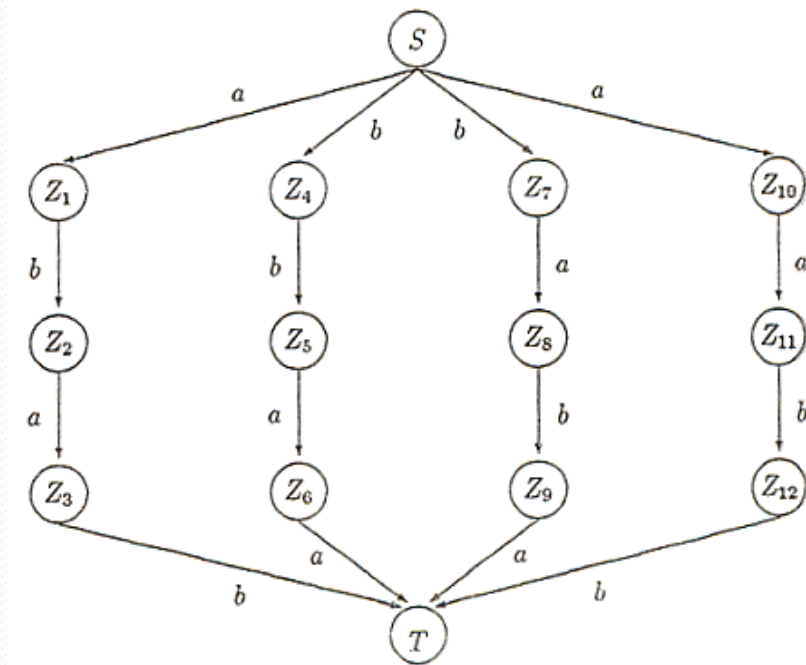
- $V_N = \{S, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8, Z_9, Z_{10}, Z_{11}, Z_{12}\}$

- P :

$$\begin{array}{llll} S \rightarrow aZ_1 & Z_1 \rightarrow bZ_2 & Z_2 \rightarrow aZ_3 & Z_3 \rightarrow b \\ S \rightarrow bZ_4 & Z_4 \rightarrow bZ_5 & Z_5 \rightarrow aZ_6 & Z_6 \rightarrow a \\ S \rightarrow bZ_7 & Z_7 \rightarrow aZ_8 & Z_8 \rightarrow bZ_9 & Z_9 \rightarrow a \\ S \rightarrow aZ_{10} & Z_{10} \rightarrow aZ_{11} & Z_{11} \rightarrow bZ_1 & Z_{12} \rightarrow b \end{array}$$

Trénovacia množina

$$T = \{abab, bbaa, baba, aabb\}$$



Inferencia gramatiky V

- Porovnanie:
- $L(G^*)$ je nekonečný jazyk
- $L(G)$ je konečný jazyk
- $L(G) = T \subseteq L(G^*)$
- Veľké množstvo neterminálov – niektoré neterminály sú ekvivalentné – takéto skupiny treba nahradiť jedným neterminálom
- Generuje len reťazce z T a žiadne iné (gramatika nevie zovšeobecňovať)

Gramatiky v úlohách rozpoznávania

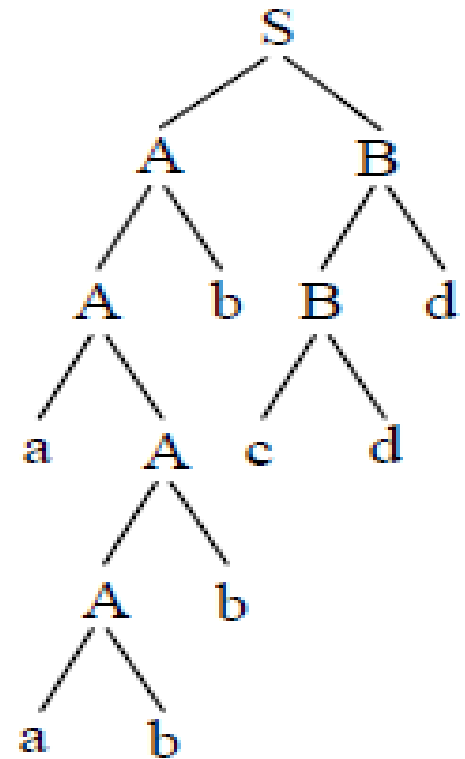
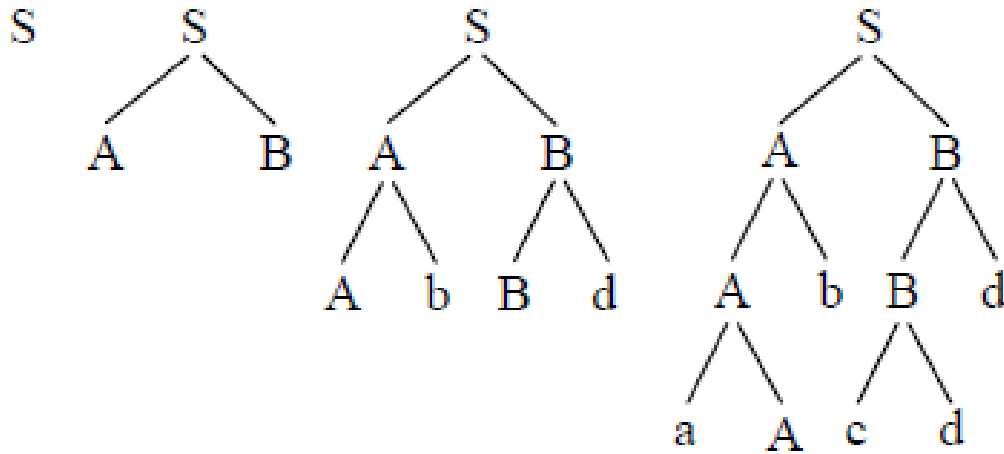
- Klasifikátor rozhodne o zaradení neznámeho slova podľa toho, do jazyka generovaného ktorou gramatikou toto slovo patrí
- Ako prvý krok môže klasifikátor overiť, či slovo je nad abecedou terminálnych slov gramatiky
- Takýmto spôsobom môžeme redukovať počet gramatík, ktoré treba otestovať na príslušnosť slova k ich jazyku

Syntaktická analýza

- Na zistenie príslušnosti slova do jazyka (tzv. syntaktickú analýzu) máme dve možnosti:
- Výpočty **zhora nadol**
- Tieto metódy sa snažia odvodiť slovo od počiatočného symbolu až k terminálnemu symbolu pomocou pravidiel gramatiky. Prehľadávajú strom odvodenia od koreňa až po listy

Syntaktická analýza II

- Výpočty zhora nadol

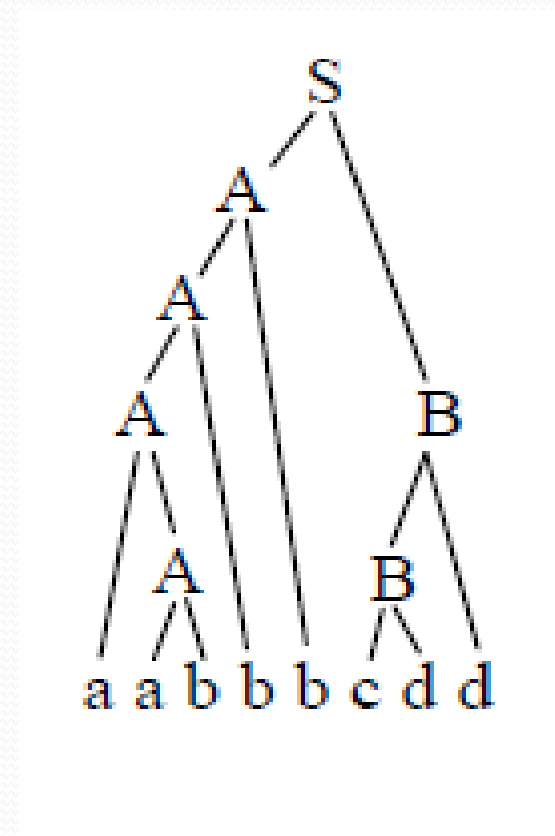
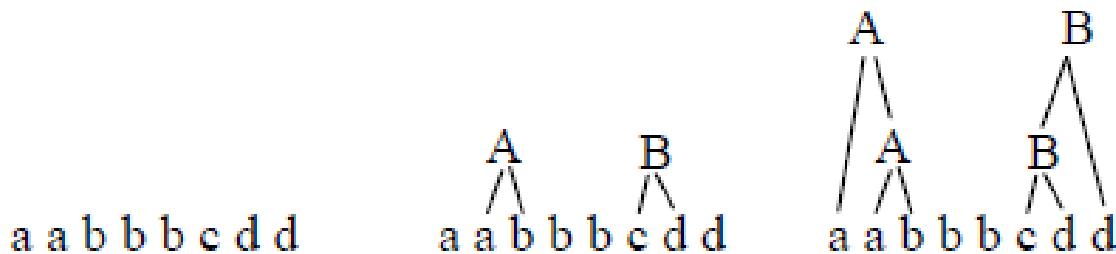


Syntaktická analýza III

- Výpočty **zdola nahor**
- Tieto metódy sa snažia spätnou substitúciou prepisovacích pravidiel určiť, či slovo patrí do jazyka.
- V slove sa hľadajú časti, ktoré tvoria pravú stranu nejakého pravidla a ktoré sa pri analýze nahradia ľavou stranou
- Cieľom je dosiahnuť počiatočný symbol

Syntaktická analýza IV

- Výpočty zdola nahor



Syntaktická analýza V

- Snaha o skrátenie časovej náročnosti analýzy viedla k tomu, že sa bezkontextové gramatiky často aproximujú regulárnymi
- Stochastické gramatiky umožňujú urýchlenie tým, že vylúčia málo pravdepodobné reťazce
- Proces analýzy sa dá urýchliť aj heuristickým prehľadávaním stavového priestoru (namiesto slepého prehľadávania do hĺbky s návratom)

Heuristiky na urýchlenie

- Obmedzíme voľbu pravidiel podľa:
 - **Dĺžky reťazca** – ak dosiahneme dĺžku reťazca, tak skončíme, lebo z každého neterminálu vznikne aspoň jeden terminál
 - **Výskytu terminálneho symbolu** – pravidlo, ktoré obsahuje terminál, ktorý nie je v analyzovanom reťazci, zamietneme
 - **Ľavých krajných terminálnych symbolov** všetkých reťazcov, ktoré je možné z daného neterminálneho symbolu odvodiť

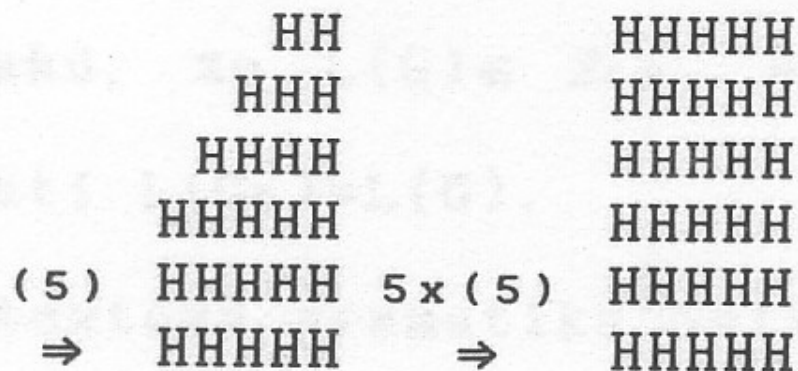
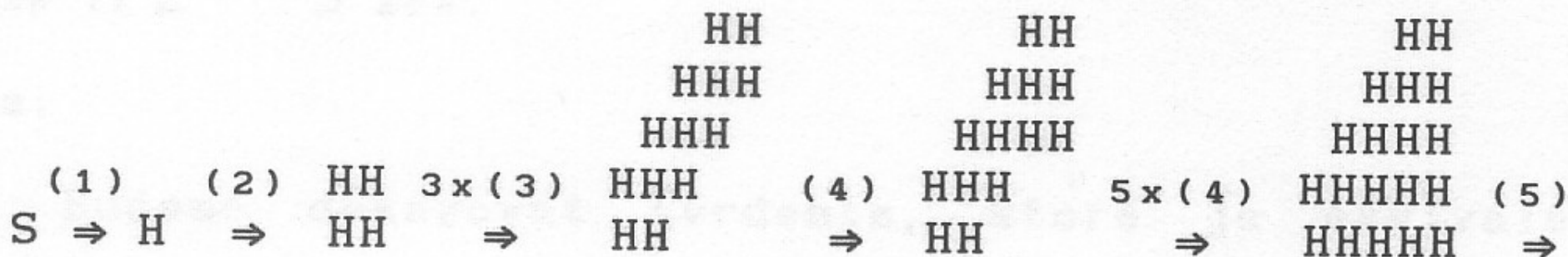
Špeciálne gramatiky

- Niekedy sa používajú viacrozmerné gramatiky, kde sa v reťazci predpokladá n susedov
- Špeciálny prípad je gramatika polí, v ktorej aj ľavé aj pravé strany pravidiel obsahujú plošnú informáciu

$$\begin{array}{l} (1) \quad S^1 \rightarrow H \\ (2) \quad \begin{array}{l} bb \quad HH \\ Hb \rightarrow HH \end{array} \\ (3) \quad \begin{array}{l} bbb \quad bHH \\ HHb \rightarrow HHH \\ HHb \quad HHb \end{array} \\ (4) \quad \begin{array}{l} HH \quad HH \\ Hb \rightarrow HH \end{array} \\ (5) \quad \begin{array}{l} bH \quad HH \\ HH \rightarrow HH \end{array} \end{array}$$

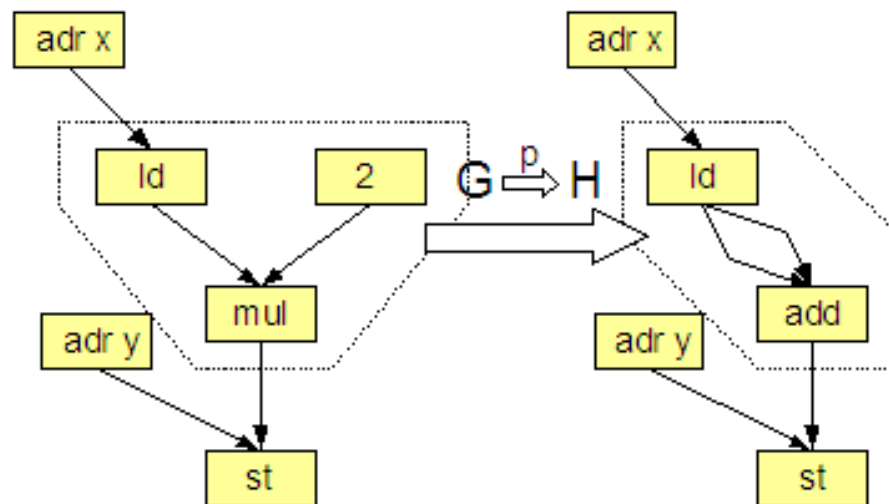
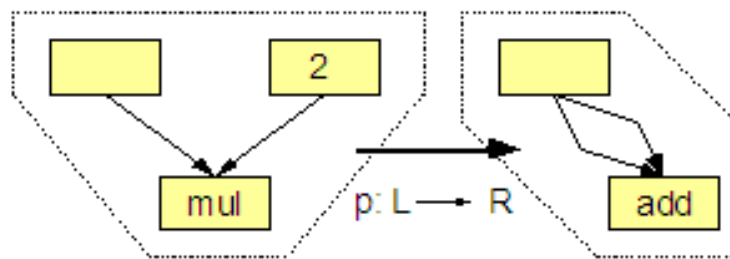
Špeciálne gramatiky II

- Odvodenie slova v gramatike polí



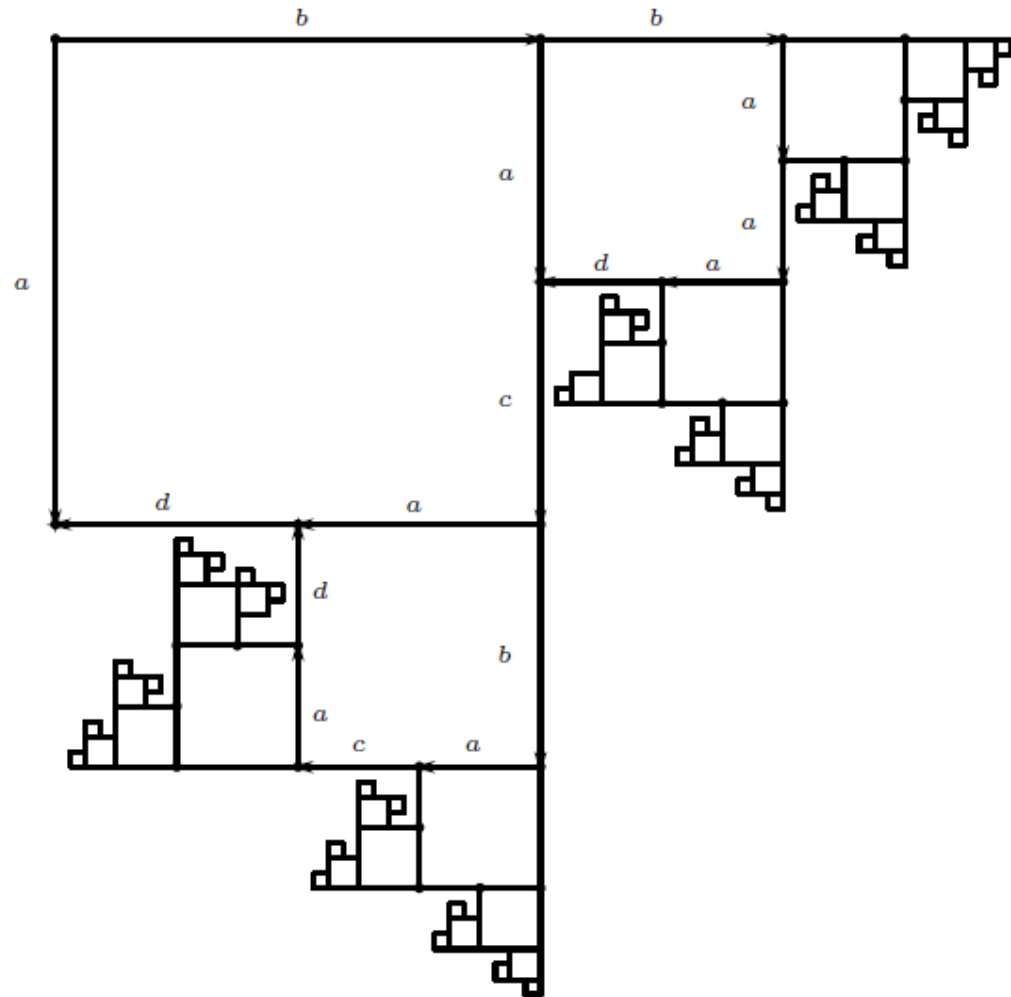
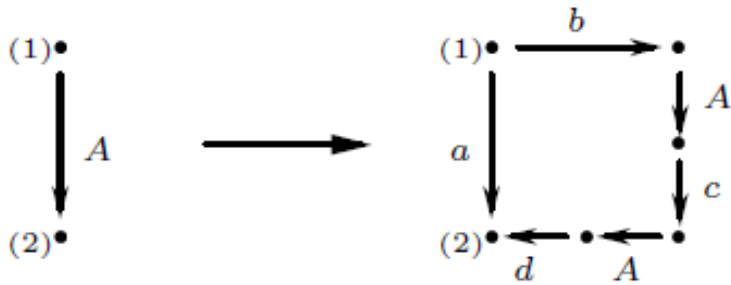
Špeciálne gramatiky III

- Grafové gramatiky sú také gramatiky, ktorých pravidlá majú tvar $L \rightarrow R$, kde L je podgraf, ktorý je nahradený pri prepisovaní podgrafom R



Špeciálne gramatiky IV

- Príklad grafovej gramatiky a jej slova



Syntaktické deformácie

- Existujú poruchy, šum, nepresnosti a deformácie v štruktúre rozpoznávaných obrazcov
- Preto hľadáme obrazce najviac podobné skúmanému
- Metrika podobnosti: napr. Levenshteinova vzdialenosť (počet transformácií potrebných na zmenu reťazca A na B)

Syntaktické deformácie 😊

- Keď v slove LÁSKA zmeníme 4 písmená a jedno uberieme, dostaneme slovo PIVO, čo isto stojí za povšimnutie
- Keď v slove LÁSKA zmeníme 3 písmená, dostaneme slovo VODKA. A to už nemôže byť náhoda!!!

Syntaktická analýza s opravou chýb

- Rozšírime pôvodnú gramatiku o deformačné pravidlá
- Vstup
 - Gramatika G a deformované vzory (vloženie/vypustenie/zámena symbolu)
- Výstup
 - Minimálna oprava deformovaného vzoru y , t.j.
 - $x \in L(G)$, kde $edit(x, y) = \min\{edit(z, y), z \in L(G)\}$

Syntaktická analýza s opravou chýb II

• Krok 1

- $G \rightarrow G'$
- G' generuje $L(G)$ + deformované reťazce

• Krok 2

- Syntaktický analyzátor pracuje s G'
- Hľadá odvodenie deformovaného vzoru s najmenším počtom deformačných pravidiel

• Krok 3

- x získame z odvodenia y vypustením deformačných pravidiel

Príklad na opravu chýb

- Krok 1

$$V'_N = V_N \cup \{S'\} \cup \{E_b \text{ pre } b \in V_T\}$$

$$V'_T = V_T$$

- Krok 2

ak je v P pravidlo $A \rightarrow \alpha_0 b_1 \alpha_1 \dots b_m \alpha_m \Rightarrow$

pridaj do P' pravidlo $A \rightarrow \alpha_0 E_{b_1} \alpha_1 \dots E_{b_m} \alpha_m,$

$\alpha_i \in V_N^*, b_i \in V_T$

Príklad na opravu chýb II

- Krok 3

do P' pridaj nové pravidlá

$$S' \rightarrow S$$

$$(D) S' \rightarrow Sa \quad \text{pre } a \in V_T$$

$$E_a \rightarrow a \quad \text{pre } a \in V_T$$

$$(D) E_a \rightarrow b \quad \text{pre } a \in V_T, b \in V_T, b \neq a$$

$$(D) E_a \rightarrow \lambda \quad \text{pre } a \in V_T$$

$$(D) E_a \rightarrow bE_a \quad \text{pre } a \in V_T, b \in V_T$$

Zhrnutie

- Charakteristický je kvalitatívny popis objektov
- Primitíva – elementárne vlastnosti syntakticky popísaných objektov
- Abeceda – množina všetkých primitív
- Popisný jazyk – množina všetkých slov vytvorených z abecedy, ktoré opisujú objekty z jednej triedy
- Gramatika – množina pravidiel, podľa ktorých sa vytvárajú slová nejakého jazyka z prvkov abecedy

Zhrnutie II

- Syntaktické rozpoznávanie pozostáva z nasledujúcich krokov:
 - definuj primitíva a vzťahy medzi nimi
 - zostroj gramatiku pre každú triedu objektov
 - pre každý objekt vytiahni primitíva a rozpoznaj ich a vzťahy medzi nimi a zostroj slovo reprezentujúce objekt
 - na základe syntaktickej analýzy zarad' predmet do tej triedy, ktorej gramatika ho generuje

Zhrnutie III

- Vytvorenie gramatiky pre triedu si obyčajne vyžaduje výraznú ľudskú interakciu
- Pri inferencii gramatiky, ktorá predstavuje učenie pri syntaktickom rozpoznávaní predkladáme pozitívne aj negatívne príklady
- Rozhodnutie, či neznáme slovo môže alebo nemôže byť generované danou gramatikou sa robí syntaktickou analýzou (zhora nadol alebo opačne)

Zhrnutie IV

- Pri praktickom použití sa okrem čistých nezašumených popisov objektov vyskytujú aj deformácie, šumy, ktoré treba vziať do úvahy
- Preto rozširujeme gramatiky a postupy syntaktickej analýzy o pravidlá, ktoré počítajú s deformáciami
- Používajú sa aj hybridné metódy, ktoré kombinujú štrukturálne a príznakové metódy

Zhrnutie V

- Praktické použitie:
 - EKG snímky
 - Diaľkový prieskum zeme – určovanie kategórií objektov (cesty, jazerá, budovy apod.)
 - Medicínske snímky pľúc apod.
 - Chromozómy v medicínskych snímkach
 - Objekty podľa hranice