

ALGORITHMEN UND DATENSTRUKTUREN

ÜBUNG 12: AHO-HOPCRAFT-ULLMANN-ALGORITHMUS

Eric Kunze

`eric.kunze@tu-dresden.de`

TU Dresden, 10. Januar 2022

letzte Änderung:
30.12.2021, 14:52

Algebraisches Pfadproblem

FLOYD-WARSHALL-ALGORITHMUS

Ziel: kürzeste Wege in einem Graphen $G = (V, E, c)$

- ▶ $P_{u,v}^{(k)}$ = Menge aller Wege von u nach v mit inneren Knoten in $\{1, \dots, k\}$
- ▶ $D_G^{(k)}(u, v) = \begin{cases} \min \{c_p : p \in P_{u,v}^{(k)}\} & \text{wenn } P_{u,v}^{(k)} \neq \emptyset \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$

Initialisierung:

$$D_G^{(0)} = mA_G = \min \{A_G, \mathbf{0}_n\} = \begin{cases} c(u, v) & \text{wenn } u \neq v, (u, v) \in E \\ 0 & \text{wenn } u = v \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$$

Rekursion:

$$\begin{aligned} D_G^{(k+1)}(u, v) &= \min \left\{ D_G^{(k)}(u, v), D_G^{(k)}(u, k+1) + D_G^{(k)}(k+1, v) \right\} \\ &= \min \left\{ \text{alt}, \text{Zeile} + \text{Spalte} \right\} \end{aligned}$$

Ende: $D_G = D_G^{(n)}$ mit $n = |V|$

ABSTRAKTION: ALGEBRAISCHES PFADPROBLEM

- **bisher:** kürzeste Wege
 - Summation + entlang der Pfade
 - Minimum min über alle Pfade
- **jetzt:** Verallgemeinerung
 - Pfadoperation \odot entlang der Pfade
 - Akkumulationsoperation \oplus
- **Ergebnis:** allgemeine algebraische Struktur Semiring $(S, \oplus, \odot, \mathbf{0}, \mathbf{1})$

	Werte S	\oplus	\odot	$\mathbf{0}$	$\mathbf{1}$
kürzeste Wegeproblem	$\mathbb{R}_{\geq 0}^{\infty}$	min	+	∞	0
Kapazitätsproblem	\mathbb{N}_{∞}	max	min	0	∞
Erreichbarkeitsproblem	$\{\text{true}, \text{false}\}$	\vee	\wedge	false	true
Zuverlässigkeitsproblem	$[0, 1]$	max	\cdot	0	1
Prozessproblem	$\mathcal{P}(\Sigma^*)$	\cup	\circ	\emptyset	$\{\varepsilon\}$

FLOYD-WARSHALL → AHO-HOPCRAFT-ULLMANN

modifizierte Adjazenzmatrix

$$mA_G = \begin{cases} A_G(u, v) & \text{wenn } u \neq v \\ A_G(u, v) \oplus \mathbf{1} & \text{wenn } u = v \end{cases}$$

Initialisierung: $D_G^{(0)} = mA_G$

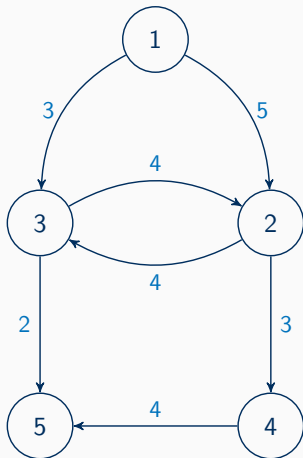
Rekursion:

$$\begin{aligned} & D_G^{(k+1)}(u, v) \\ = & D_G^{(k)}(u, v) \oplus \left(D_G^{(k)}(u, k+1) \odot (D_G^{(k)}(k+1, k+1))^* \odot D_G^{(k)}(k+1, v) \right) \end{aligned}$$

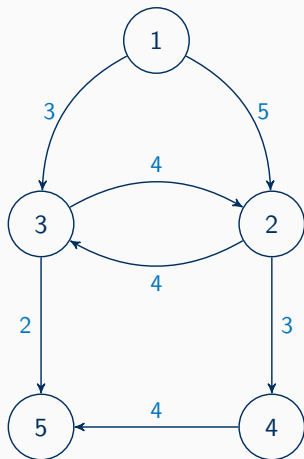
vgl. dazu Floyd-Warshall:

$$\begin{aligned} & D_G^{(k+1)}(u, v) \\ = & \min \left\{ D_G^{(k)}(u, v), D_G^{(k)}(u, k+1) + 0 + D_G^{(k)}(k+1, v) \right\} \end{aligned}$$

AUFGABE 1



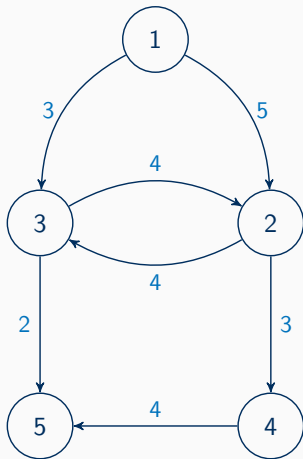
AUFGABE 1



Teil (a) :

$$(S, \oplus, \odot, \mathbf{0}, \mathbf{1}) = (\mathbb{N}_{\infty}, \max, \min, 0, \infty)$$

AUFGABE 1



Teil (a) :

$$(S, \oplus, \odot, \mathbf{0}, \mathbf{1}) = (\mathbb{N}_\infty, \max, \min, 0, \infty)$$

Teil (b) :

$$mA_G = D_G^{(0)} = \begin{pmatrix} \infty & 5 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & \infty & 4 & 3 & 0 \\ 0 & 4 & \infty & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & \infty & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \infty \end{pmatrix}$$

AUFGABE 1

Teil (c) :

Zunächst einige Hinweise zur Notation und zum Verständnis...

AUFGABE 1

Teil (c) :

Zunächst einige Hinweise zur Notation und zum Verständnis...

Verallgemeinerte Operationen:

allgemeine
Akkumulationsoperation:

$$s_0 \oplus s_1 \oplus \cdots \oplus s_n = \sum_{i \in \{0, \dots, n\}}^{\oplus} s_i$$

gewöhnliche
Addition:

$$s_0 + s_1 + \cdots + s_n = \sum_{i \in \{0, 1, \dots, n\}} s_i$$

AUFGABE 1

Teil (c) :

Zunächst einige Hinweise zur Notation und zum Verständnis...

Verallgemeinerte Operationen:

allgemeine
Akkumulationsoperation:

$$s_0 \oplus s_1 \oplus \cdots \oplus s_n = \sum_{i \in \{0, \dots, n\}}^{\oplus} s_i$$

gewöhnliche
Addition:

$$s_0 + s_1 + \cdots + s_n = \sum_{i \in \{0, 1, \dots, n\}} s_i$$

Potenz: induktiv definiert über

$$s^0 := 1 \quad \text{und} \quad s^{n+1} := s \odot s^n$$

AUFGABE 1

Teil (c) :

Zunächst einige Hinweise zur Notation und zum Verständnis...

Verallgemeinerte Operationen:

allgemeine
Akkumulationsoperation:

$$s_0 \oplus s_1 \oplus \cdots \oplus s_n = \sum_{i \in \{0, \dots, n\}}^{\oplus} s_i$$

gewöhnliche
Addition:

$$s_0 + s_1 + \cdots + s_n = \sum_{i \in \{0, 1, \dots, n\}} s_i$$

Potenz: induktiv definiert über

$$s^0 := 1 \quad \text{und} \quad s^{n+1} := s \odot s^n$$

Stern:

$$s^* = \sum_{n \in \mathbb{N}}^{\oplus} s^n$$

AUFGABE 1

Teil (c) : Laut Vorlesung gilt $s^* = \sum_{n \in \mathbb{N}}^{\oplus} s^n$ mit $s^0 = \mathbf{1}$ und $s^{n+1} = s \odot s^n$.
Im Semiring $(S, \oplus, \odot, \mathbf{0}, \mathbf{1}) = (\mathbb{N}_{\infty}, \max, \min, 0, \infty)$ gilt:

- ▶ $s^0 = \mathbf{1} = \infty$
- ▶ $s^1 = s \odot s^0 = \min \{s, \infty\} = s$
- ▶ $s^2 = s \odot s^1 = \min \{s, s\} = s$
- ▶ ...

Schließlich ist

$$s^* = \sum_{n \in \mathbb{N}}^{\max} s^n = \sup \{s^n : n \in \mathbb{N}\} = \sup \{\infty, s, s, \dots\} = \infty = \mathbf{1}.$$

Somit gilt dann in der Updateformel

$$\begin{aligned} D_G^{(k+1)}(u, v) &= \max \left\{ D_G^{(k)}(u, v), \min \left\{ D_G^{(k)}(u, k+1), \infty, D_G^{(k)}(k+1, v) \right\} \right\} \\ &= \max \left\{ D_G^{(k)}(u, v), \min \left\{ D_G^{(k)}(u, k+1), D_G^{(k)}(k+1, v) \right\} \right\} \\ &= D_G^{(k)}(u, v) \oplus \left(D_G^{(k)}(u, k+1) \odot D_G^{(k)}(k+1, v) \right) \end{aligned}$$

Teil (d) :

- ▶ $D_G^{(1)}$: keine Änderung (Quelle)
- ▶ $D_G^{(2)}$: (1, 3, 4), (3, 4, 3), (1, 4, 3)
- ▶ $D_G^{(3)}$: (1, 5, 2), (2, 5, 2)
- ▶ $D_G^{(4)}$: (1, 5, 3), (2, 5, 3), (3, 5, 3)
- ▶ $D_G^{(5)}$: keine Änderung (Senke)

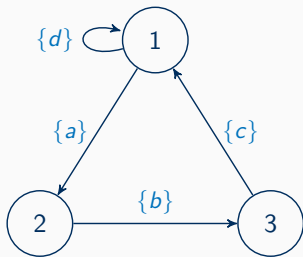
Teil (d) :

- ▶ $D_G^{(1)}$: keine Änderung (Quelle)
- ▶ $D_G^{(2)}$: (1, 3, 4), (3, 4, 3), (1, 4, 3)
- ▶ $D_G^{(3)}$: (1, 5, 2), (2, 5, 2)
- ▶ $D_G^{(4)}$: (1, 5, 3), (2, 5, 3), (3, 5, 3)
- ▶ $D_G^{(5)}$: keine Änderung (Senke)

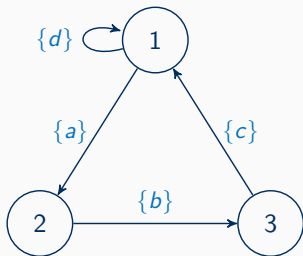
Teil (e) :

$D_{G'}(1, 5) = 2$ über den Pfad (1, 2, 3, 5)

AUFGABE 2



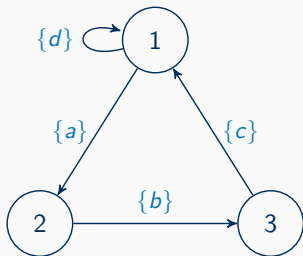
AUFGABE 2



Teil (a) :

$$(S, \oplus, \odot, \mathbf{0}, \mathbf{1}) =$$
$$(\mathcal{P}(\Sigma^*), \cup, \circ, \emptyset, \{\varepsilon\})$$

AUFGABE 2



Teil (a) :

$$(S, \oplus, \odot, \mathbf{0}, \mathbf{1}) = \\ (\mathcal{P}(\Sigma^*), \cup, \circ, \emptyset, \{\varepsilon\})$$

Update-Formel:

$$\begin{aligned} & D_G^{(k+1)}(u, v) \\ &= D_G^{(k)}(u, v) \oplus \left(D_G^{(k)}(u, k+1) \odot (D_G^{(k)}(k+1, k+1))^* \odot D_G^{(k)}(k+1, v) \right) \\ &= D_G^{(k)}(u, v) \cup \left(D_G^{(k)}(u, k+1) \circ (D_G^{(k)}(k+1, k+1))^* \circ D_G^{(k)}(k+1, v) \right) \\ &= \text{alt} \quad \cup \left(\text{Zeile} \quad \circ \quad (\text{Diagonale})^* \quad \circ \quad \text{Spalte} \right) \end{aligned}$$

Teil (b) : $D_G^{(0)} = mA_G = \begin{pmatrix} \{\varepsilon, d\} & \{a\} & \emptyset \\ \emptyset & \{\varepsilon\} & \{b\} \\ \{c\} & \emptyset & \{\varepsilon\} \end{pmatrix}$

AUFGABE 2

Teil (b) : $D_G^{(0)} = mA_G = \begin{pmatrix} \{\varepsilon, d\} & \{a\} & \emptyset \\ \emptyset & \{\varepsilon\} & \{b\} \\ \{c\} & \emptyset & \{\varepsilon\} \end{pmatrix}$

Teil (c) : $D_G^{(1)} = \begin{pmatrix} \{d\}^* & \{d\}^* \{a\} & \emptyset \\ \emptyset & \{\varepsilon\} & \{b\} \\ \{c\} \{d\}^* & \{c\} \{d\}^* \{a\} & \{\varepsilon\} \end{pmatrix}$

Teil (d) :

$$\begin{aligned} D_G^{(2)}(3,3) &= D_G^{(1)}(3,3) \cup \left(D_G^{(1)}(3,2) \circ (D_G^{(1)}(2,2))^* \circ D_G^{(1)}(2,3) \right) \\ &= \{\varepsilon\} \cup \left(\{c\} \{d\}^* \{a\} \circ \{\varepsilon\}^* \circ \{b\} \right) \\ &= \{\varepsilon\} \cup \left(\{c\} \{d\}^* \{ab\} \right) \end{aligned}$$

Teil (d) :

$$\begin{aligned}D_G^{(2)}(3,3) &= D_G^{(1)}(3,3) \cup \left(D_G^{(1)}(3,2) \circ (D_G^{(1)}(2,2))^* \circ D_G^{(1)}(2,3) \right) \\&= \{\varepsilon\} \cup \left(\{c\} \{d\}^* \{a\} \circ \{\varepsilon\}^* \circ \{b\} \right) \\&= \{\varepsilon\} \cup \left(\{c\} \{d\}^* \{ab\} \right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}D_G^{(3)}(3,3) &= D_G^{(2)}(3,3) \cup \left(D_G^{(2)}(3,3) \circ (D_G^{(2)}(3,3))^* \circ D_G^{(2)}(3,3) \right) \\&= D_G^{(2)}(3,3) \cup \left(D_G^{(2)}(3,3) \right)^* \\&= \left(D_G^{(2)}(3,3) \right)^* \\&= \left(\{\varepsilon\} \cup \{c\} \{d\}^* \{ab\} \right)^* \\&= \left(\{c\} \{d\}^* \{ab\} \right)^*\end{aligned}$$