

Grundbegriffe der Informatik

Tutorium 33

Lukas Bach, lukas.bach@student.kit.edu | 19.01.2017



Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Wie stellen wir Graphen da?

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Repräsentation von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

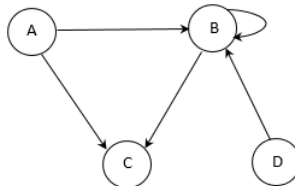
Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Wie stellen wir Graphen da?



Anschaulich ja, aber wie können wir Graphen z.B. mit Java realisieren?

Klassenmodell?

Repräsentation von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Objektorientierte Repräsentation von Graphen

Klassenmodell?

```
class Vertex {  
    String name; //Genauer Inhalt interessiert uns nicht  
}
```

```
class Edge {  
    Vertex start;  
    Vertex end;  
}
```

```
class Graph {  
    Vertex[] vertices;  
    Edge[] edges;  
}
```

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

+ Intuitiv

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Repräsentation von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

+ Intuitiv

– Es lassen sich nur schwer Algorithmen hierfür entwerfen (z.B. gilt
 $(x, y) \in E?$)

Repräsentation mit Adjazenzlisten

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Jeder Knoten speichert seine Nachbarn:

```
class Vertex {  
    String name; //Genauer Inhalt interessiert uns nicht  
    Vertex[] neighbours; //Alle Nachbarknoten  
}  
  
class Graph {  
    Vertex[] vertices;  
    Edge[] edges;  
}
```

- + Speicherplatzeffizient bei wenigen Kanten im Vergleich zur Knotenanzahl ($|E| \ll |V|^2$)
- + Flexibel mit verketteten Listen statt Arrays (Leichtes Hinzufügen und Entfernen)

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation
von Graphen

■ Was ist eine Adjazenzmatrix?

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

- Was ist eine Adjazenzmatrix?
- Zu allen Paaren (i, j) mit $i, j \in V$ wird gespeichert, ob $(i, j) \in E$ gilt

- Was ist eine Adjazenzmatrix?
- Zu allen Paaren (i, j) mit $i, j \in V$ wird gespeichert, ob $(i, j) \in E$ gilt
- Zweidimensionales Array

```
class Graph {  
    boolean[] [] edges; //Größe  $|V| \times |V|$   
}
```

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Repräsentation von Graphen

Adjazenzlisten

+ Speicherplatzeffizient bei annähernd maximaler Anzahl von Kanten
($|E| \approx |V|^2$)

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Repräsentation von Graphen

Adjazenzlisten

+ Speicherplatzeffizient bei annähernd maximaler Anzahl von Kanten
($|E| \approx |V|^2$)

Erreichbarkeit

+ Algorithmen aus linearer Algebra können verwendet werden
(Matrizenrechnung)

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Repräsentation von Graphen

Adjazenzlisten

+ Speicherplatzeffizient bei annähernd maximaler Anzahl von Kanten
($|E| \approx |V|^2$)

Erreichbarkeit

+ Algorithmen aus linearer Algebra können verwendet werden
(Matrizenrechnung)

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

– nicht flexibel

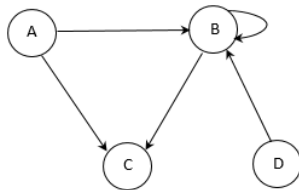
Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Aufgabe

Gebe alle Adjazenlisten und die Adjazenzmatrix für diesen Graphen an:



Repräsentation
von Graphen

Adjazenlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

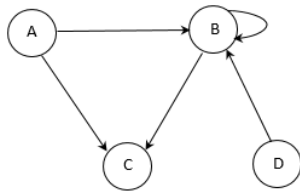
Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Aufgabe

Gebe alle Adjazenlisten und die Adjazenzmatrix für diesen Graphen an:



$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Repräsentation
von Graphen

Adjazenlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Repräsentation von zweistelligen Relationen durch Matrizen

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Wir können jede endliche zweistellige Relation durch eine Matrix darstellen!

Aufgabe

Stelle die Kleiner-Gleich-Relation auf der Menge $\{0, 1, 2, 3\}$ dar!

Repräsentation von zweistelligen Relationen durch Matrizen

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Wir können jede endliche zweistellige Relation durch eine Matrix darstellen!

Aufgabe

Stelle die Kleiner-Gleich-Relation auf der Menge $\{0, 1, 2, 3\}$ dar!

$$R_{\leq} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

■ Algorithmisches Problem

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

- Algorithmisches Problem
- Intuitiv: Gibt es einen Weg von i nach j ?

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

- Algorithmisches Problem
- Intuitiv: Gibt es einen Weg von i nach j ?

Wege-Problem

Gegeben einem Graphen $G = (V, E)$. Ist für $i, j \in V$ auch $(i, j) \in E^*$?

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

- Algorithmisches Problem
- Intuitiv: Gibt es einen Weg von i nach j ?

Wege-Problem

Gegeben einem Graphen $G = (V, E)$. Ist für $i, j \in V$ auch $(i, j) \in E^*$?

Ziel

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

- Algorithmisches Problem
- Intuitiv: Gibt es einen Weg von i nach j ?

Wege-Problem

Gegeben einem Graphen $G = (V, E)$. Ist für $i, j \in V$ auch $(i, j) \in E^*$?

Ziel

- Gegeben: Adjazenzmatrix

- Algorithmisches Problem
- Intuitiv: Gibt es einen Weg von i nach j ?

Wege-Problem

Gegeben einem Graphen $G = (V, E)$. Ist für $i, j \in V$ auch $(i, j) \in E^*$?

Ziel

- Gegeben: Adjazenzmatrix
- Gesucht: Zugehörige **Wegematrix**, für die gilt:

- Algorithmisches Problem
- Intuitiv: Gibt es einen Weg von i nach j ?

Wege-Problem

Gegeben einem Graphen $G = (V, E)$. Ist für $i, j \in V$ auch $(i, j) \in E^*$?

Ziel

- Gegeben: Adjazenzmatrix
- Gesucht: Zugehörige **Wegematrix**, für die gilt:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & , \text{ falls ein Weg von } i \text{ nach } j \text{ existiert} \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases}$$

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Was wisst ihr zu folgenden Begriffen?

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Was wisst ihr zu folgenden Begriffen?

■ Matrizenmultiplikation

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Was wisst ihr zu folgenden Begriffen?

- Matrizenmultiplikation
- Matrizenaddition

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Was wisst ihr zu folgenden Begriffen?

- Matrizenmultiplikation
- Matrizenaddition
- Potenzieren

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Was wisst ihr zu folgenden Begriffen?

- Matrizenmultiplikation
- Matrizenaddition
- Potenzieren
- Einheitsmatrix

Was wisst ihr zu folgenden Begriffen?

- Matrizenmultiplikation
- Matrizenaddition
- Potenzieren
- Einheitsmatrix
- Nullmatrix

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Aufgabe

Quadriere die Adjazenzmatrix von vorhin: $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

Quadrierte Adjazenzmatrix

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Aufgabe

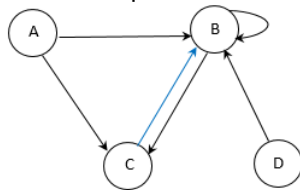
Quadriere die Adjazenzmatrix von vorhin: $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

Ergebnis

$$A^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Aufgabe

Bilde und quadriere die Adjazenzmatrix des veränderten Graphen:



Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

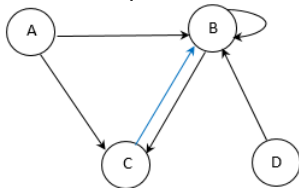
Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Aufgabe

Bilde und quadriere die Adjazenzmatrix des veränderten Graphen:



$$A' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ und } A'^2 = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Aufgabe

Was fällt euch auf? Wann steht in A'^2 eine 1, wann eine 2 und was bedeutet das für unseren Graphen?

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

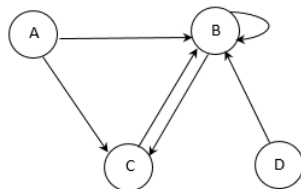
O-Notation

$$A' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad A'^2 = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Aufgabe

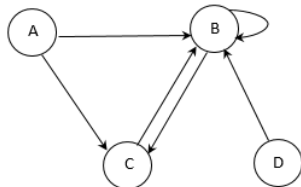
Was fällt euch auf? Wann steht in A'^2 eine 1, wann eine 2 und was bedeutet das für unseren Graphen?

$$A' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad A'^2 = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$



Aufgabe

Was fällt euch auf? Wann steht in A'^2 eine 1, wann eine 2 und was bedeutet das für unseren Graphen?



$$A' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad A'^2 = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

			b_{11}	b_{12}	b_{13}
			b_{21}	b_{22}	b_{23}
			b_{31}	b_{32}	b_{33}
a_{11}	a_{12}	a_{13}	c_{11}	c_{12}	c_{31}
a_{21}	a_{22}	a_{23}	c_{21}	c_{22}	c_{23}
a_{31}	a_{32}	a_{33}	c_{31}	c_{32}	c_{33}

Tipp: $c_{11} = a_{11} \cdot b_{11} + a_{12} \cdot b_{21} + a_{13} \cdot b_{31}$

Lösung

In der i -ten Zeile und j -ten Spalte von A^2 steht die Anzahl der Wege von i nach j der Länge zwei.

→ $(A^2)_{ij}$ = Anzahl der Pfade von i nach j der Länge zwei.

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lösung

In der i -ten Zeile und j -ten Spalte von A^2 steht die Anzahl der Wege von i nach j der Länge zwei.

→ $(A^2)_{ij}$ = Anzahl der Pfade von i nach j der Länge zwei.

Aufgabe

Habt ihr Ideen, wie man herausfindet, zwischen welchen Knoten Pfade der Länge n existieren?

Lösung

In der i -ten Zeile und j -ten Spalte von A^2 steht die Anzahl der Wege von i nach j der Länge zwei.

→ $(A^2)_{ij}$ = Anzahl der Pfade von i nach j der Länge zwei.

Aufgabe

Habt ihr Ideen, wie man herausfindet, zwischen welchen Knoten Pfade der Länge n existieren?

Lösung

Betrachte A^n !

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Eigentlich interessiert uns nur, ob ein Pfad der Länge zwei existiert und nicht wie viele...

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Eigentlich interessiert uns nur, ob ein Pfad der Länge zwei existiert und nicht wie viele...

Definition Signum-Funktion

$$\text{sgn} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$x \mapsto \begin{cases} 1 & , \text{ falls } x > 0 \\ 0 & , \text{ falls } x = 0 \\ -1 & , \text{ falls } x < 0 \end{cases}$$

Eigentlich interessiert uns nur, ob ein Pfad der Länge zwei existiert und nicht wie viele...

Definition Signum-Funktion

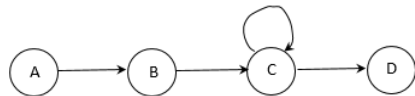
$$\text{sgn} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$x \mapsto \begin{cases} 1 & , \text{ falls } x > 0 \\ 0 & , \text{ falls } x = 0 \\ -1 & , \text{ falls } x < 0 \end{cases}$$

$\text{sgn}(A^2)$ liefert uns die Zwei-Erreichbarkeitsmatrix

Aufgabe

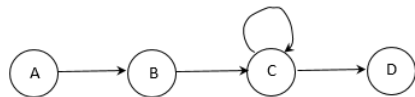
Gebe A^0 , A^2 und die Wegematrix W an!



Aufgabe

Gebe A^0 , A^2 und die Wegematrix W an!

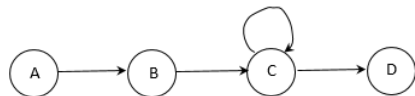
$$A^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



Aufgabe

Gebe A^0 , A^2 und die Wegematrix W an!

$$A^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



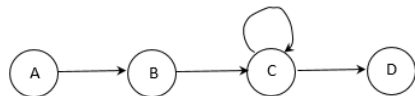
Aufgabe

Gebe A^0 , A^2 und die Wegematrix W an!

$$A^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$W = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



Für Pfade beliebiger Länge erhalten wir:

$$W = \text{sgn}(A^0 + A^1 + A^2 + A^3 + \dots) = \text{sgn}\left(\sum_{i=0}^{\infty} A^i\right)$$

Für Pfade beliebiger Länge erhalten wir:

$$W = \text{sgn}(A^0 + A^1 + A^2 + A^3 + \dots) = \text{sgn}\left(\sum_{i=0}^{\infty} A^i\right)$$

Wir können nicht unendlich lange addieren... Ist das ein **Problem**?

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Wenn ein Pfad p der Länge $\geq n := |V|$ zwischen $i \neq j$ existiert, muss mindestens ein Knoten doppelt vorgekommen sein!

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Wenn ein Pfad p der Länge $\geq n := |V|$ zwischen $i \neq j$ existiert, muss mindestens ein Knoten doppelt vorgekommen sein! Der Pfad p enthält also einen Zyklus, den wir raus kürzen können.

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Wenn ein Pfad p der Länge $\geq n := |V|$ zwischen $i \neq j$ existiert, muss mindestens ein Knoten doppelt vorgekommen sein! Der Pfad p enthält also einen Zyklus, den wir raus kürzen können.

Ergebnis

Wenn ein Pfad p der Länge $\geq n := |V|$ zwischen $i \neq j$ existiert, existiert auch ein Pfad p' der Länge $< n$.

Erreichbarkeit- unendlich addieren?

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Wenn ein Pfad p der Länge $\geq n := |V|$ zwischen $i \neq j$ existiert, muss mindestens ein Knoten doppelt vorgekommen sein! Der Pfad p enthält also einen Zyklus, den wir raus kürzen können.

Ergebnis

Wenn ein Pfad p der Länge $\geq n := |V|$ zwischen $i \neq j$ existiert, existiert auch ein Pfad p' der Länge $< n$.

Für Pfade beliebiger Länge erhalten wir:

$$W = \text{sgn}(A^0 + A^1 + A^2 + A^3 + \dots) = \text{sgn}\left(\sum_{i=0}^{\infty} A^i\right) = \text{sgn}\left(\sum_{i=0}^{n-1} A^i\right)$$

Einfacher Algorithmus zu Berechnung der Wegematrix

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

⟨Matrix A sei die Adjazenzmatrix⟩

$W \leftarrow 0$

for $i \leftarrow 0$ **to** $n - 1$ **do**

$M \leftarrow I$

for $j \leftarrow 1$ **to** i **do**

$M \leftarrow M \cdot A$

od

$W \leftarrow W + M$

od

$W \leftarrow \text{sgn}(W)$

Einfacher Algorithmus zu Berechnung der Wegematrix

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

⟨Matrix A sei die Adjazenzmatrix⟩

$W \leftarrow 0$

for $i \leftarrow 0$ **to** $n - 1$ **do**

$M \leftarrow I$

for $j \leftarrow 1$ **to** i **do**

$M \leftarrow M \cdot A$

od

$\{ M = A^i \}$

$W \leftarrow W + M$

$\{ W = \sum_{k=0}^i A^k \}$

od

$W \leftarrow \text{sgn}(W)$

$\{ W \text{ ist die Wegematrix} \}$

Aufwand:

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{i=0}^{n-1} i \right) \cdot (2n^3 - n^2) + n \cdot n^2 + n^2 \\ &= n^5 - \frac{3}{2}n^4 + \frac{3}{2}n^3 + n^2 \end{aligned}$$

Einfacher Algorithmus zu Berechnung der Wegematrix

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

⟨Matrix A sei die Adjazenzmatrix⟩

$W \leftarrow 0$

for $i \leftarrow 0$ **to** $n - 1$ **do**

$M \leftarrow 1$

for $j \leftarrow 1$ **to** i **do**

$M \leftarrow M \cdot A$

od

$\{ M = A^i \}$

$W \leftarrow W + M$

$\{ W = \sum_{k=0}^i A^k \}$

od

$W \leftarrow \text{sgn}(W)$

$\{ W \text{ ist die Wegematrix} \}$

Aufwand:

$$\left(\sum_{i=0}^{n-1} i \right) \cdot (2n^3 - n^2) + n \cdot n^2 + n^2$$
$$= n^5 - \frac{3}{2}n^4 + \frac{3}{2}n^3 + n^2$$

Wie könnte man diesen Algorithmus schneller machen?

Einfacher Algorithmus zu Berechnung der Wegematrix

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

```
W ← 0
M ← I
for i ← 0 to n - 1 do
    W ← W + M
    M ← M · A
od
W ← sgn(W)
```

für A^i kann man A^{i-1} wiederverwenden

Aufwand:

$$n \cdot (n^2 + (2n^3 - n^2)) + n^2 = 2n^4 + n^2$$

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Wichtige Komplexitätsmaße:

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Wichtige Komplexitätsmaße:

- Speicherplatzbedarf

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Wichtige Komplexitätsmaße:

- Speicherplatzbedarf
- Rechen- bzw. Laufzeit

Unterscheidung in

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Wichtige Komplexitätsmaße:

- Speicherplatzbedarf
- Rechen- bzw. Laufzeit

Unterscheidung in

- Best Case (oft uninteressant)

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Wichtige Komplexitätsmaße:

- Speicherplatzbedarf
- Rechen- bzw. Laufzeit

Unterscheidung in

- Best Case (oft uninteressant)
- Average Case (schwierig zu finden, deswegen selten angegeben)

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Wichtige Komplexitätsmaße:

- Speicherplatzbedarf
- Rechen- bzw. Laufzeit

Unterscheidung in

- Best Case (oft uninteressant)
- Average Case (schwierig zu finden, deswegen selten angegeben)
- Worst Case (meistens angegeben)

Definition

Seien $g, f : \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ Funktionen. Dann wächst g asymptotisch genauso schnell wie f genau dann, wenn gilt:

$$\exists c, c' \in \mathbb{R}_+ : \exists n_0 \in \mathbb{N}_0 : \forall n \geq n_0 : c \cdot f(n) \leq g(n) \leq c' \cdot f(n)$$

Definition

Seien $g, f : \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ Funktionen. Dann wächst g asymptotisch genauso schnell wie f genau dann, wenn gilt:

$$\exists c, c' \in \mathbb{R}_+ : \exists n_0 \in \mathbb{N}_0 : \forall n \geq n_0 : c \cdot f(n) \leq g(n) \leq c' \cdot f(n)$$

Notation

$f \asymp g$ oder $f(n) \asymp g(n)$ ("asymptotisch gleich")

Bemerkung

\asymp ist eine Äquivalenzrelation

Definition

$$\Theta(f) = \{g \mid g \asymp f\}$$

Definition

$$\Theta(f) = \{g \mid g \asymp f\}$$

Satz

$$\forall a, b \in \mathbb{R}_+ : \Theta(a \cdot f) = \Theta(b \cdot f)$$

Obere Schranke (Worst-Case Approximation)

$$O(f) = \{g \mid \exists c \in \mathbb{R}_+ : \exists n_0 \in \mathbb{N}_0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \leq c \cdot f(n)\}$$

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Obere und untere Schranke

Obere Schranke (Worst-Case Approximation)

$$O(f) = \{g \mid \exists c \in \mathbb{R}_+ : \exists n_0 \in \mathbb{N}_0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \leq c \cdot f(n)\}$$

Untere Schranke (Best-Case Approximation)

$$\Omega(f) = \{g \mid \exists c \in \mathbb{R}_+ : \exists n_0 \in \mathbb{N}_0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \geq c \cdot f(n)\}$$

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Obere Schranke (Worst-Case Approximation)

$$O(f) = \{g \mid \exists c \in \mathbb{R}_+ : \exists n_0 \in \mathbb{N}_0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \leq c \cdot f(n)\}$$

Untere Schranke (Best-Case Approximation)

$$\Omega(f) = \{g \mid \exists c \in \mathbb{R}_+ : \exists n_0 \in \mathbb{N}_0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \geq c \cdot f(n)\}$$

Notation

- $g \preceq f$ falls $g \in O(f)$ bzw. g wächst asymptotisch höchstens so schnell wie f
- $g \succeq f$ falls $g \in \Omega(f)$ bzw. g wächst asymptotisch mindestens so schnell wie f

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Obere Schranke (Worst-Case Approximation)

$$O(f) = \{g \mid \exists c \in \mathbb{R}_+ : \exists n_0 \in \mathbb{N}_0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \leq c \cdot f(n)\}$$

Untere Schranke (Best-Case Approximation)

$$\Omega(f) = \{g \mid \exists c \in \mathbb{R}_+ : \exists n_0 \in \mathbb{N}_0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \geq c \cdot f(n)\}$$

Notation

- $g \preceq f$ falls $g \in O(f)$ bzw. g wächst asymptotisch höchstens so schnell wie f
- $g \succeq f$ falls $g \in \Omega(f)$ bzw. g wächst asymptotisch mindestens so schnell wie f

Bemerkung

Es gilt $\Theta(f) = O(f) \cap \Omega(f)$

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lemma

$$\log_a n \in \Theta(\log_b n)$$

Beispiel

$$\log_2 n \in \Theta(\log_8 n)$$

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Lemma

$$\log_a n \in \Theta(\log_b n)$$

Beispiel

$$\log_2 n \in \Theta(\log_8 n)$$

Beweis

$$\frac{1}{3} \log_2 n$$

Lemma

$$\log_a n \in \Theta(\log_b n)$$

Beispiel

$$\log_2 n \in \Theta(\log_8 n)$$

Beweis

$$\frac{1}{3} \log_2 n = \frac{1}{\log_2 8} \log_2 n$$

Lemma

$$\log_a n \in \Theta(\log_b n)$$

Beispiel

$$\log_2 n \in \Theta(\log_8 n)$$

Beweis

$$\frac{1}{3} \log_2 n = \frac{1}{\log_2 8} \log_2 n = \frac{\log_2 n}{\log_2 8}$$

Lemma

$$\log_a n \in \Theta(\log_b n)$$

Beispiel

$$\log_2 n \in \Theta(\log_8 n)$$

Beweis

$$\frac{1}{3} \log_2 n = \frac{1}{\log_2 8} \log_2 n = \frac{\log_2 n}{\log_2 8} = \log_8 n \leq \log_2 n$$

Grundbegriffe der Informatik

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Aufgabe

Gilt $\log_2(n^{20}) \in \Theta(\log n)$

Aufgabe

Gilt $\log_2(n^{20}) \in \Theta(\log n)$

Lösung

Ja, denn $\log_2(n^{20}) = 20 \cdot \log_2 n$

Grundbegriffe der Informatik

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Probeklausur

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation

Grundbegriffe der Informatik

Lukas Bach, lu-
kas.bach@student.kit.edu

Repräsentation
von Graphen

Adjazenzlisten

Erreichbarkeit

Zwei-Erreichbarkeit

Erreichbarkeit

Algorithmus

Komplexitätstheorie

O-Notation



That's all Folks!