

Grundlagen der Künstlichen Intelligenz

8. Klassische Suche: Datenstrukturen für Suchalgorithmen

Malte Helmert

Universität Basel

9. März 2015

Grundlagen der Künstlichen Intelligenz

9. März 2015 — 8. Klassische Suche: Datenstrukturen für Suchalgorithmen

8.1 Einführung

8.2 Suchknoten

8.3 Open-Liste

8.4 Closed-Liste

8.5 Zusammenfassung

Klassische Suche: Überblick

Kapitelüberblick klassische Suche:

- ▶ 5.–7. Grundlagen
- ▶ 8.–12. Basisalgorithmen
 - ▶ 8. Datenstrukturen für Suchalgorithmen
 - ▶ 9. Baumsuche und Graphensuche
 - ▶ 10. Breitensuche
 - ▶ 11. uniforme Kostensuche
 - ▶ 12. Tiefensuche und iterative Tiefensuche
- ▶ 13.–20. heuristische Algorithmen

8.1 Einführung

Suchalgorithmen

- ▶ Wir befassen uns jetzt mit **Suchalgorithmen**.
- ▶ Wie überall in der Informatik sind geeignete **Datenstrukturen** ein Schlüssel zu guter Performance.
 - ↪ **häufige** Operationen müssen **schnell** sein
- ▶ gut implementierte Suchalgorithmen verarbeiten bis zu $\sim 30,000,000$ Zustände/Sekunde auf einem CPU-Kern
 - ↪ Zusatzmaterial (Paper von Burns et al.)

dieses Kapitel: einige **grundlegende Datenstrukturen** für Suche

Vorschau: Suchalgorithmen

- ▶ Ab dem nächsten Kapitel betrachten wir Suchalgorithmen genauer.
- ▶ hier eine kurze **Vorschau**, um unsere Diskussion von Datenstrukturen zu motivieren

Beispiel: Suchalgorithmus

- ▶ Ausgehend vom **Anfangszustand**,
- ▶ **expandiere** wiederholt einen Zustand durch **Erzeugen** seiner **Nachfolger**.
- ▶ Höre auf, wenn ein **Zielzustand** expandiert wird
- ▶ oder **alle erreichbaren Zustände** betrachtet wurden.

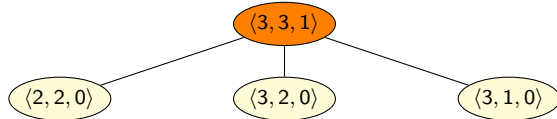
Beispiel: Suchalgorithmus

- ▶ Ausgehend vom **Anfangszustand**,
- ▶ **expandiere** wiederholt einen Zustand durch **Erzeugen** seiner **Nachfolger**.
- ▶ Höre auf, wenn ein **Zielzustand** expandiert wird
- ▶ oder **alle erreichbaren Zustände** betrachtet wurden.

$\langle 3, 3, 1 \rangle$

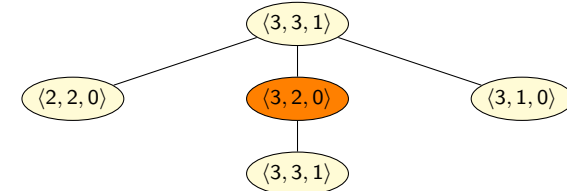
Beispiel: Suchalgorithmus

- ▶ Ausgehend vom **Anfangszustand**,
- ▶ **expandiere** wiederholt einen Zustand durch **Erzeugen** seiner **Nachfolger**.
- ▶ Höre auf, wenn ein **Zielzustand** expandiert wird
- ▶ oder **alle erreichbaren Zustände** betrachtet wurden.



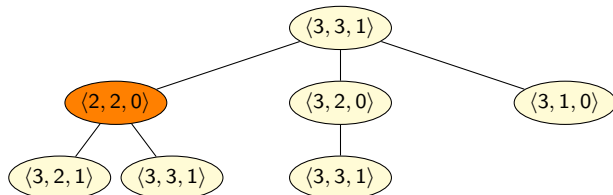
Beispiel: Suchalgorithmus

- ▶ Ausgehend vom **Anfangszustand**,
- ▶ **expandiere** wiederholt einen Zustand durch **Erzeugen** seiner **Nachfolger**.
- ▶ Höre auf, wenn ein **Zielzustand** expandiert wird
- ▶ oder **alle erreichbaren Zustände** betrachtet wurden.



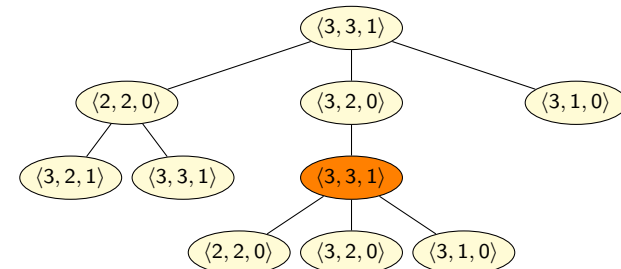
Beispiel: Suchalgorithmus

- ▶ Ausgehend vom **Anfangszustand**,
- ▶ **expandiere** wiederholt einen Zustand durch **Erzeugen** seiner **Nachfolger**.
- ▶ Höre auf, wenn ein **Zielzustand** expandiert wird
- ▶ oder **alle erreichbaren Zustände** betrachtet wurden.



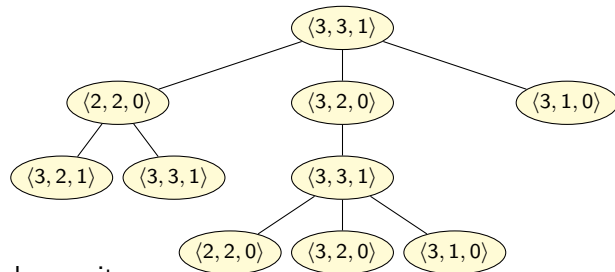
Beispiel: Suchalgorithmus

- ▶ Ausgehend vom **Anfangszustand**,
- ▶ **expandiere** wiederholt einen Zustand durch **Erzeugen** seiner **Nachfolger**.
- ▶ Höre auf, wenn ein **Zielzustand** expandiert wird
- ▶ oder **alle erreichbaren Zustände** betrachtet wurden.



Beispiel: Suchalgorithmus

- ▶ Ausgehend vom **Anfangszustand**,
- ▶ **expandiere** wiederholt einen Zustand durch **Erzeugen** seiner **Nachfolger**.
- ▶ Höre auf, wenn ein **Zielzustand** expandiert wird
- ▶ oder **alle erreichbaren Zustände** betrachtet wurden.



... und so weiter.

(Expansionsreihenfolge hängt vom gewählten Suchalgorithmus ab.)

Grundlegende Datenstrukturen für Suche

Wir betrachten drei abstrakte Datenstrukturen für Suche:

- ▶ **Suchknoten**: speichern welche Zustände erreicht werden können, wie, und unter welchen Kosten
 - ↪ Knoten des Beispielsuchbaums
- ▶ **Open-Liste**: organisiert die Blätter des Suchbaums effizient
 - ↪ Menge der Blätter des Beispielsuchbaums
- ▶ **Closed-Liste**: merkt expandierte Zustände, um mehrfache Expansion desselben Zustands zu vermeiden
 - ↪ innere Knoten eines Suchbaums

Nicht alle Algorithmen verwenden alle drei Datenstrukturen, und manchmal sind sie implizit (z. B. im CPU-Stack).

8.2 Suchknoten

Suchknoten

Suchknoten

Suchknoten (kurz: **Knoten**) speichern welche Zustände erreicht werden können, wie, und unter welchen Kosten

Gemeinsam bilden sie den so genannten **Suchbaum**.

Attribute von Suchknoten

Attribute eines Suchknoten n

- $n.state$ Zustand, der zu diesem Knoten gehört
 - $n.parent$ Suchknoten, der diesen Knoten erzeugte (**none** für den Wurzelknoten)
 - $n.action$ Aktion, die von $n.parent$ zu n führt (**none** für den Wurzelknoten)
 - $n.path_cost$ Kosten des Pfades vom Anfangszustand zu $n.state$, der aus Verfolgen der parent-Referenzen resultiert (traditionell mit $g(n)$ bezeichnet)
- ... und manchmal zusätzliche Felder (z. B., **Tiefe** im Baum)

Suchknoten: Java

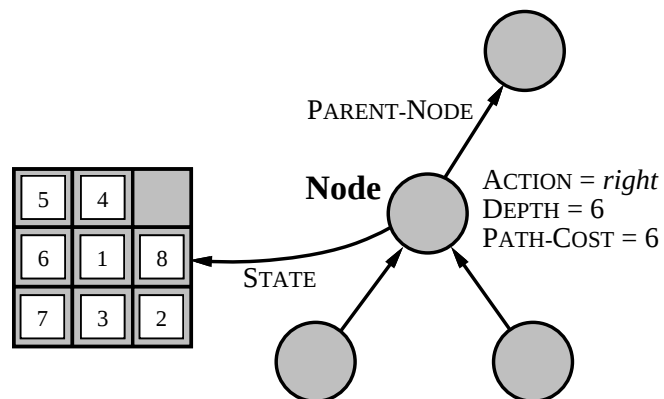
Suchknoten in Java-Syntax

```
public interface State {
}

public interface Action {
}

public class SearchNode {
    State state;
    SearchNode parent;
    Action action;
    int pathCost;
}
```

Knoten in einem Suchbaum



Implementierung von Suchknoten

- ▶ **vernünftige Implementierung** von Suchknoten ist einfach
- ▶ **fortgeschrittene Aspekte:**
 - ▶ Benötigen wir überhaupt explizite Knoten?
 - ▶ Können wir Lazy Evaluation verwenden?
 - ▶ Lohnt sich manuelle Speicherverwaltung?
 - ▶ Können wir Information komprimieren?

Operationen für Suchknoten: make_root_node

Erzeuge Wurzelknoten eines Suchbaums:

```
function make_root_node()  
  node := new SearchNode  
  node.state := init()  
  node.parent := none  
  node.action := none  
  node.path_cost := 0  
  return node
```

Operationen für Suchknoten: make_node

Erzeuge Kindknoten in einem Suchbaum:

```
function make_node(parent, action, state)  
  node := new SearchNode  
  node.state := state  
  node.parent := parent  
  node.action := action  
  node.path_cost := parent.path_cost + cost(action)  
  return node
```

Operationen für Suchknoten: extract_path

Extrahiere den Pfad zu einem Suchknoten:

```
function extract_path(node)  
  path :=  $\langle \rangle$   
  while node.parent  $\neq$  none:  
    path.append(node.action)  
    node := node.parent  
  path.reverse()  
  return path
```

8.3 Open-Liste

Open-Listen

Open-Liste

Die **Open-Liste** (auch: **Frontier**) organisiert die Blätter des Suchbaums.

Sie muss zwei Operationen effizient unterstützen:

- ▶ bestimme und entferne den nächsten zu expandieren Knoten
- ▶ füge einen neuen Knoten ein, der Kandidat für Expansion ist

Anmerkung: trotz des Namens ist es meist eine sehr schlechte Idee, die Open-Liste als einfache **Liste** zu implementieren.

Open-Listen: Einträge modifizieren

- ▶ Manche Implementierungen unterstützen zusätzlich die **Modifikation** eines Eintrags in der Open-Liste, wenn ein billigerer Pfad zum zugehörigen Zustand gefunden wird.

- ▶ Dies macht die Implementierung komplizierter.

~> wir betrachten solche Modifikationen nicht und verwenden stattdessen **verzögerte Duplikateliminierung** (~> später)

Interface von Open-Listen

Methoden einer Open-Liste *open*

open.is_empty() testet, ob die Open-Liste leer ist

open.pop() entfernt den nächsten zu expandieren Knoten und liefert ihn zurück

open.insert(*n*) fügt Knoten *n* in die Open-Liste ein

- ▶ Unterschiedliche Suchalgorithmen verwenden unterschiedliche Strategien für die Entscheidung, welcher Knoten in ***open.pop*** zurückgeliefert wird.
- ▶ Die Wahl der passenden Datenstruktur hängt von dieser Strategie ab (z. B.: Stack, Deque, Min-Heap).

8.4 Closed-Liste

Closed-Listen

Closed-Liste

Die **Closed-Liste** merkt sich die expandierten Zustände, um mehrfache Expansion desselben Zustands zu vermeiden

Sie muss zwei Operationen effizient unterstützen:

- ▶ füge einen Knoten ein, dessen Zustand noch nicht in der Closed-Liste ist
- ▶ teste, ob ein Knoten mit einem gegebenen Zustand in der Closed-Liste ist; falls ja, liefere ihn zurück

Anmerkung: trotz des Namens ist es meist eine sehr schlechte Idee, die Closed-Liste als einfache **Liste** zu implementieren. (**Warum?**)

Interface und Implementierung von Closed-Listen

Methoden einer Closed-Liste *closed*

closed.insert(*n*) füge Knoten *n* in *closed* ein;
falls ein Knoten mit demselben Zustand bereits in *closed* existiert, ersetze ihn

closed.lookup(*s*) teste, ob ein Knoten mit Zustand *s* in der Closed-Liste vorhanden ist;
falls ja, liefere ihn zurück;
sonst, liefere **none** zurück

- ▶ Hash-Tabellen mit Zuständen als Schlüssel können als effiziente Implementierung einer Closed-Liste dienen.

8.5 Zusammenfassung

Zusammenfassung

- ▶ **Suchknoten:**
repräsentieren während der Suche erreichte Knoten und zugehörige Informationen
- ▶ **Knotenexpansion:**
Erzeugen der Nachfolgeknoten eines Knoten durch Anwenden der Aktionen, die im Zustand des Knoten anwendbar sind
- ▶ **Open-Liste** oder **Frontier:**
Menge der Knoten, die derzeit Kandidaten für Expansion sind
- ▶ **Closed-Liste:**
Menge der bereits expandierten Knoten (und deren Zustände)