Wissensrepräsentation

Christopher Habel, Carola Eschenbach
Universität Hamburg, FB Informatik
AB Wissens- und Sprachverarbeitung (WSV)

Sommersemester 2003

Wissensrepräsentation
–
Christopher Habel, Carola Eschenbach

Sommersemester 2003

Sitzung 25: Aktionen und Instruktionen

- Situationskalkül
  - Spezifikationen von Aktionen
- Erweiterung: Golog: Programmiersprache für Agenten
  - Instruktionsbasiertes Handeln

Literatur

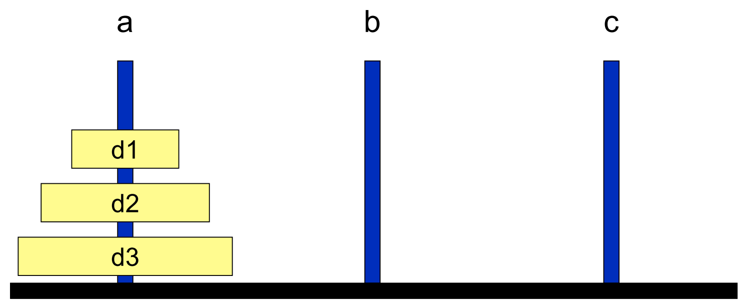
Levesque, Hector J., Raymond Reiter, Yves Lespérance, Fangzhen Lin & Richard B. Scherl (1997). GOLOG: A logic programming language for dynamic domains. Journal of Logic Programming 31. 59–84.

Brachman, Ronald J. & Hector J. Levesque (to appear). Knowledge Representation and Reasoning. Chapter 14.

Reiter, Raymond (1991). The frame problem in the situation calculus: A simple solution (sometimes) and a completeness result for goal regression. In V. Lifschitz (ed.) Artificial Intelligence and Mathematical Theory of Computation (pp. 359–380). Academic Press: Boston.

Aktionen für den Turm von Hanoi

Gruppen-diskussion



Welche Relationen, Fluents, Aktionen werden benötigt?

Welche Vorbedingungen und Effekte haben die Aktionen?

Turm von Hanoi

Aktionen

- move(x, y, d) % Bewege Scheibe d von Stab x zu Stab y

Fluents

- ontop(d, x, s) % Scheibe d ist die oberste Scheibe an Stab x
- free(x, s) % Stab x ist frei
- on(d, d', s) % Scheibe d liegt auf Scheibe d'

Situationsinvariante Relationen

- d < d' % Scheibe d ist kleiner als Scheibe d'

Vorbedingungen

- Poss(move(x, y, d), s) ⇔ ontop(d, x, s) ∧
  ¬∃d' [ontop(d', y, s) ∧ d' < d]

Turm von Hanoi

Hintergrundwissen

- Stäbe: a, b, c
- Scheiben: d1, d2, d3
- Größenverhältnisse: d1 < d2, d2 < d3, d1 < d3

Startsituation

- ontop(d1, a, s0)
- free(b, s0)
- free(c, s0)
- on(d1, d2, s0)
- on(d2, d3, s0)

Revision: Aufzug

Primitive actions

turnoff(n)	% Turn off call button n.
open	% Open elevator door.
close	% Close elevator door.
up(n)	% Move elevator up to floor n.
down(n)	% Move elevator down to floor n.

Fluents

on(n, s)	% unanswered call on floor n
currentFloor(n, s)	% current floor has number n
+d_closed(s)	% the elevator door is closed

Revision: Vorbedingungen

Preconditions for Primitive Actions

$\mathcal{Pre}_{EL}$

∀s, n [poss(turnoff(n),s) ⇔ on(n, s) ∧
currentFloor(n, s) ∧ ¬d_closed(s)]

% Anforderung befriedigt wenn mit offener Tür auf Etage

∀s [poss(open,s) ⇔ d_closed(s)] % nur geschl. Tür öffnen

∀s [poss(close,s) ⇔ ¬d_closed(s)] % nur offene Tür schließen

∀s, n, m [poss(up(n), s) ⇔ currentFloor(m, s) ∧ m < n ∧
d_closed(s)] %Fahrt nur mit geschlossener Tür

∀s, n, m [poss(down(n), s) ⇔ currentFloor(m, s) ∧ m > n ∧
d_closed(s)] %Fahrt nur mit geschlossener Tür

Revision: Effekte

Effect Axioms for Primitive Fluents

$\mathcal{Eff}_{EL}$

- **Positive Effekte**
- $\forall$s [d_closed(do(close, s))] % Tür zu
- $\forall$s, m [currentFloor(m, do(up(m), s))] % Position
- $\forall$s, m [currentFloor(m, do(down(m), s))] % Position
- **Negative Effekte**
- $\forall$s, m [¬on(m, do(turnoff(m), s))] % Anforderung aus
- $\forall$s [¬d_closed(do(open, s))] % Tür auf
- $\forall$s,n,m [n≠m ⇒ ¬currentFloor(m,do(up(n),s))] % Position
- $\forall$s,n,m [n≠m ⇒ ¬currentFloor(m,do(down(n),s))] % Position

Mögliche Aktionen

Initiale Situation s0

Call buttons: 3 and 5. Elevator is at floor 4. Door is open.

$\mathcal{Init}_{EL}$: on(3, s_0), on(5, s_0), currentFloor(4, s_0)

Mögliche Aktionen in

s_0	do(close, s_0)	do(up(5), do(close, s_0))	do(open, do(up(5), do(close, s_0)))
close	open up(5) down(3) down(2) down(1)	open down(4) down(3) down(2) down(1)	close turnoff(5)

?

$\mathcal{Pre}_{EL} \cup \mathcal{Eff}_{EL} \cup \mathcal{Init}_{EL} \vDash$ poss(close, s_0) ?

$\forall$s [poss(close, s) ⇔ ¬d_closed(s)] $\in \mathcal{Pre}_{EL}$

Initiale Situation

- Call buttons: 3 and 5. Elevator is at floor 4. Door is open.

on(3, s_0), on(5, s_0), currentFloor(4, s_0) $\in \mathcal{Init}_{EL}$

- Closed World Assumption (?)

Vollständige Spezifikation der initialen Situation

$\mathcal{Init}_{EL}$

$\forall$ m [on(m, s_0) ⇔ m = 3 ∨ m = 5]

$\forall$ m [currentFloor(m, s_0) ⇔ m = 4]

¬d_closed(s_0)

$\mathcal{Pre}_{EL} \cup \mathcal{Eff}_{EL} \cup \mathcal{Init}_{EL} \vDash$ poss(open, do(close, s_0)) ?

$\forall$s [poss(open, s) ⇔ d_closed(s)] $\in \mathcal{Pre}_{EL}$

Positives Effekt-Axiom

$\forall$s [d_closed(do(close, s))] $\in \mathcal{Eff}_{EL}$

Also gilt sogar

$\mathcal{Pre}_{EL} \cup \mathcal{Eff}_{EL} \vDash \forall$s [poss(open, do(close, s))]

(Was auch immer ist, wenn man gerade die Tür geöffnet hat, dann kann man sie auch wieder schließen)

$\mathcal{Pre}_{EL} \cup \mathcal{Eff}_{EL} \cup \mathcal{Init}_{EL} \models$ **poss(up(5), do(close, s_0))** ?

$\forall$s, n, m [poss(up(n), s) $\Leftrightarrow$ currentFloor(m, s) $\wedge$
m < n $\wedge$ d_closed(s)] $\in \mathcal{Pre}_{EL}$

- Gilt $\mathcal{Pre}_{EL} \cup \mathcal{Eff}_{EL} \cup \mathcal{Init}_{EL} \models$ currentFloor(m, do(close, s_0)) für irgendein m?

Initiale Situation

$\forall$ m [currentFloor(m, s_0) $\Leftrightarrow$ m = 4] $\in \mathcal{Init}_{EL}$

Effekt-Axiome zu currentFloor: $\mathcal{Eff}_{EL}$

$\forall$s, m [currentFloor(m, do(up(m), s))]
$\forall$s, n, m [n $\neq$ m $\Rightarrow$ ¬currentFloor(m, do(up(n), s))]
$\forall$s, m [currentFloor(m, do(down(m), s))]
$\forall$s, n, m [n $\neq$ m $\Rightarrow$ ¬currentFloor(m, do(down(n), s))]

- Das Schließen der Tür hat keinen Effekt auf die Position des Aufzugs

Frame-Problem

McCarthy & Hayes (1969)

Effekte von Handlungen

- sind (in der Regel) beschränkt
  - Das Fallenlassen des Stiftes verändert nicht seine Farbe.
  - Das Schließen der Tür verändert nicht die Position des Aufzugs.
- und die Beschränkungen sind uns (weitgehend) bekannt.

Frame-Axiome

- machen Aussagen über Invarianz von Fluents
- (Kein-)Effekt-Axiome
- Sind im Normalfall nicht aus Effekt-Axiomen folgerbar.

Im Aufzug-Beispiel

- Das Öffnen und Schließen der Tür und das Ausschalten der Anforderung verändert die Position des Fahrstuhls nicht.

$\mathcal{Fr}_{EL}$

$\forall$s, m [currentFloor(m,do(turnoff(n),s)) $\Leftrightarrow$ currentFloor(m,s)]
$\forall$s, m [currentFloor(m,do(open,s)) $\Leftrightarrow$ currentFloor(m,s)]
$\forall$s, m [currentFloor(m,do(close,s)) $\Leftrightarrow$ currentFloor(m,s)]

$\mathcal{Pre}_{EL} \cup \mathcal{Eff}_{EL} \cup \mathcal{Fr}_{EL} \cup \mathcal{Init}_{EL} \models$ **poss(up(5), do(close, s_0))**

$\forall$s, n, m [poss(up(n), s) $\Leftrightarrow$ currentFloor(m, s) $\wedge$
m < n $\wedge$ d_closed(s)] $\in \mathcal{Pre}_{EL}$

- Gilt $\mathcal{Pre}_{EL} \cup \mathcal{Eff}_{EL} \cup \mathcal{Fr}_{EL} \cup \mathcal{Init}_{EL} \models$ currentFloor(m, do(close, s_0)) für irgendein m?

Initiale Situation

$\forall$m [currentFloor(m, s_0) $\Leftrightarrow$ m = 4] $\in \mathcal{Init}_{EL}$

Frame Axiom

$\forall$s,m[currentFloor(m,do(close,s))$\Leftrightarrow$currentFloor(m,s)] $\in \mathcal{Fr}_{EL}$

Also gilt

$\mathcal{Fr}_{EL} \cup \mathcal{Init}_{EL} \models$ currentFloor(4, do(close, s_0))
$\mathcal{Pre}_{EL} \cup \mathcal{Eff}_{EL} \cup \mathcal{Fr}_{EL} \cup \mathcal{Init}_{EL} \models$ poss(up(5), do(close, s_0))

Weitere Frame-Axiome

$\mathcal{E\!f\!f}_{EL}$

$\forall$s, m [¬on(m, do(turnoff(m), s))]

$\forall$s [d_closed(do(close, s))]

$\forall$s [¬d_closed(do(open, s))]

$\mathcal{F\!r}_{EL}$

$\forall$s, m [on(m,do(open,s)) ⇔ on(m,s)]

$\forall$s, m [on(m,do(close,s)) ⇔ on(m,s)]

$\forall$s, m, n [on(m,do(up(n),s)) ⇔ on(m,s)]

$\forall$s, m, n [on(m,do(down(n),s)) ⇔ on(m,s)]

$\forall$s, m [d_closed(do(turnoff(m),s)) ⇔ d_closed(s)]

$\forall$s, m [d_closed(do(up(m),s)) ⇔ d_closed(s)]

$\forall$s, m [d_closed(do(down(m),s)) ⇔ d_closed(s)]

Frame-Axiome

Mögliches Problem

- Kein-Effekt ist der Normalfall.
- Bei n primitiven Aktionen und m primitiven Fluents ergeben sich $\mathcal{O}$(m*n) Frame-Axiome
- (Wie) lassen sich die Frame-Axiome automatisch bestimmen?

Closed World Assumption für Fluents und Aktionen

- Wenn ein Fluent durch eine Aktion nicht verändert wird, dann hat er nach der Durchführung denselben Wert wie vorher.
- Bei vollständigem Wissen über die Effekte aller primitiven Aktionen ist die Bestimmung der Frame-Axiome möglich.

Bestimmung der Frame-Axiome

Gegeben

- ein Fluent Φ
- Vollständige Spezifikation der positiven und negativen Effekte aller Handlungen bzgl. Φ

Ziel

- Generierung der Frame-Axiome für Φ
- Darstellung in kompakter Form

Lösung

- Zusammenfassung der Effekt-Axiome
- Generierung der Erklärungsabschlussaxiomen (explanation closure)
- Bestimmung von Nachfolgezustandsaxiomen (successor state axioms)

Bestimmung der Frame-Axiome: Vorbereitung

- bringe die positiven und negativen Effekt-Axiome zu Φ in folgende Normalform,
  $\forall x, s\ [\Psi_i(x, s) \Rightarrow \Phi(x, do(a_i, s))]$
  $\forall x, s\ [\Theta_j(x, s) \Rightarrow \neg\Phi(x, do(b_j, s))]$
  s eine Situationsvariable, x ein Variablen-Vektor, a_i, b_i Namen von Aktionen, $\Psi_i(x, s)$, $\Theta_j(x, s)$ Formeln mit x und s als freie Variablen
- Schreibe die Normalformen um (mit a, b neue Variablen)
  $\forall x, s, a\ [\Psi_i(x, s) \wedge a = a_i \Rightarrow \Phi(x, do(a, s))]$
  $\forall x, s, b\ [\Theta_j(x, s) \wedge b = b_j \Rightarrow \neg\Phi(x, do(b, s))]$
- Fasse positive bzw. negative Effekte zusammen zu
  $\forall x, s, a\ [\Pi_\Phi(x, a, s) \Rightarrow \Phi(x, do(a, s))]$
  $\forall x, s, b\ [N_\Phi(x, b, s) \Rightarrow \neg\Phi(x, do(b, s))]$

Beispiel: on(x, s)

- Effekt-Axiom: $\forall s, x\ [\neg on(x, do(turnoff(x), s))]$
- bringe das negativen Effekt-Axiom in Normalform,
  $\forall x, s\ [\Theta_j(x, s) \Rightarrow \neg\Phi(x, do(b_j, s))]$
  $\forall x, s[\top \Rightarrow \neg on(x, do(turnoff(x), s))]$
- Schreibe die Normalformen um
  $\forall x, s, b\ [\Theta_j(x, s) \wedge b = b_j \Rightarrow \neg\Phi(x, do(b, s))]$
  $\forall x, s, b\ [b = turnoff(x) \Rightarrow \neg on(x, do(b, s))]$
- Fasse positive bzw. negative Effekte zusammen zu
  $\forall x, s, a\ [\Pi_\Phi(x, a, s) \Rightarrow \Phi(x, do(a, s))]$
  $\forall x, s, a\ [\bot \Rightarrow on(x, do(a, s))]$
  $\forall x, s, b\ [N_\Phi(x, b, s) \Rightarrow \neg\Phi(x, do(b, s))]$
  $\forall x, s, b\ [b = turnoff(x) \Rightarrow \neg on(x, do(b, s))]$

Beispiel: d_closed(s)

- Effekt-Axiome
  $\forall s\ [d\_closed(do(close, s))]$
  $\forall s\ [\neg d\_closed(do(open, s))]$
- bringe die Effekt-Axiom in Normalform
  $\forall x, s\ [\Psi_i(x, s) \Rightarrow \Phi(x, do(a_i, s))]$
  $\forall s\ [\top \Rightarrow d\_closed(do(close, s))]$
  $\forall x, s\ [\Theta_j(x, s) \Rightarrow \neg\Phi(x, do(b_j, s))]$
  $\forall x, s\ [\top \Rightarrow \neg d\_closed(do(open, s))]$
- Schreibe die Normalformen um
  $\forall x, s, a\ [\Psi_i(x, s) \wedge a = a_i \Rightarrow \Phi(x, do(a, s))]$
  $\forall s, a\ [a = close \Rightarrow d\_closed(do(a, s))]$
  $\forall x, s, b\ [\Theta_j(x, s) \wedge b = b_j \Rightarrow \neg\Phi(x, do(b, s))]$
  $\forall s, b\ [b = open \Rightarrow \neg d\_closed(do(b, s))]$

Beispiel: currentFloor(x, s)

- Effekt-Axiome: $\forall s, x\ [currentFloor(x, do(up(x), s))]$
  $\forall s, x\ [currentFloor(x, do(down(x), s))]$
  $\forall s, n, x\ [n \neq x \Rightarrow \neg currentFloor(x, do(up(n), s))]$
  $\forall s, n, x\ [n \neq x \Rightarrow \neg currentFloor(x, do(down(n), s))]$
- Normalform
  $\forall x, s\ [\top \Rightarrow currentFloor(x, do(up(x), s))]$
  $\forall x, s\ [\top \Rightarrow currentFloor(x, do(down(x), s))]$
  $\forall x, n, s\ [n \neq x \Rightarrow \neg currentFloor(x, do(up(n), s))]$
  $\forall x, n, s\ [n \neq x \Rightarrow \neg currentFloor(x, do(down(n), s))]$
- Schreibe die Normalformen um
  $\forall x, s, a\ [a = up(x) \Rightarrow currentFloor(x, do(a, s))]$
  $\forall x, s, a\ [a = down(x) \Rightarrow currentFloor(x, do(a, s))]$
  $\forall x, s, b\ [\exists n\ [n \neq x \wedge b = up(n)] \Rightarrow \neg currentFloor(x,do(b,s))]$
  $\forall x, s, b\ [\exists n\ [n \neq x \wedge b=down(n)] \Rightarrow \neg currentFloor(x,do(b,s))]$

Beispiel: currentFloor(x, s) (Forts.)

- Fasse positive bzw. negative Effekte zusammen zu
  $\forall x, s, a\ [\Pi_\Phi(x, a, s) \Rightarrow \Phi(x, do(a, s))]$
  $\forall x, s, a\ [a = up(x) \vee a = down(x) \Rightarrow currentFloor(x,do(a,s))]$
  $\forall x, s, b\ [N_\Phi(x, b, s) \Rightarrow \neg\Phi(x, do(b, s))]$
  $\forall x, s, b\ [\exists n\ [(n \neq x \wedge b = up(n)) \vee (n \neq x \wedge b = down(n))]$
  $\Rightarrow \neg currentFloor(x, do(b, s))]$

Bestimmung der Frame-Axiome: Erklärungsabschluss

zusammengefasste Effekt-Axiome

$\forall x, s, a\ [\Pi_\Phi(x, a, s) \Rightarrow \Phi(x, do(a, s))]$

$\forall x, s, b\ [N_\Phi(x, b, s) \Rightarrow \neg\Phi(x, do(b, s))]$

Annahme

- Alle Effekte sind explizit kodiert.

Erklärungsabschlussaxiome (explanation closure) $\mathcal{Fr}$

- Erkläre jeden Wechsel durch bekannte Effekte
  $\forall x, s, a\ [\neg\Phi(x, s) \wedge \Phi(x, do(a, s)) \Rightarrow \Pi_\Phi(x, a, s)]$
  $\forall x, s, b\ [\Phi(x, s) \wedge \neg\Phi(x, do(b, s)) \Rightarrow N_\Phi(x, b, s)]$
- in Frame-Axiom-Form: Fehlen Voraussetzungen für Effekte, dann bleibt alles wie gehabt
  $\forall x, s, a\ [\neg\Phi(x, s) \wedge \neg\Pi_\Phi(x, a, s) \Rightarrow \neg\Phi(x, do(a, s))]$
  $\forall x, s, b\ [\Phi(x, s) \wedge \neg N_\Phi(x, b, s) \Rightarrow \Phi(x, do(b, s))]$

Beispiel: on(x, s)

zusammengefasste Effekt-Axiome

$\forall x, s, a\ [\bot \Rightarrow on(x, do(a, s))]$

$\forall x, s, b\ [b = turnoff(x) \Rightarrow \neg on(x, do(b, s))]$

Erklärungsabschlussaxiome $\mathcal{Fr}_{EL}$

- Erkläre jeden Wechsel durch bekannte Effekte
  $\forall x, s, a\ [\neg on(x, s) \wedge on(x, do(a, s)) \Rightarrow \bot]$
  $\forall x, s, b\ [on(x, s) \wedge \neg on(x, do(b, s)) \Rightarrow b = turnoff(x)]$
- in Frame-Axiom-Form: Fehlen Voraussetzungen für Effekte, dann bleibt alles wie gehabt
  $\forall x, s, a\ [\neg on(x, s) \Rightarrow \neg on(x, do(a, s))]$
  $\forall x, s, b\ [on(x, s) \wedge b \neq turnoff(x) \Rightarrow on(x, do(b, s))]$

Beispiel: d_closed(s)

Bestimmung der Frame-Axiome: Erklärungsabschluss

- zusammengefasste Effekt-Axiome
  $\forall x, s, a\ [a = close \Rightarrow d\_closed(do(a, s))]$
  $\forall x, s, b\ [b = open \Rightarrow \neg d\_closed(do(b, s))]$

Erklärungsabschlussaxiome $\mathcal{Fr}_{EL}$

- Erkläre jeden Wechsel durch bekannte Effekte
  $\forall x, s, a\ [\neg d\_closed(s) \wedge d\_closed(do(a, s)) \Rightarrow a = close]$
  $\forall x, s, b\ [d\_closed(s) \wedge \neg d\_closed(do(b, s)) \Rightarrow b = open]$
- in Frame-Axiom-Form: Fehlen Voraussetzungen für Effekte, dann bleibt alles wie gehabt
  $\forall x, s, a\ [\neg d\_closed(s) \wedge a \neq close \Rightarrow \neg d\_closed(do(a, s))]$
  $\forall x, s, b\ [d\_closed(s) \wedge b \neq open \Rightarrow d\_closed(do(b, s))]$

Beispiel: currentFloor(x, s) (Forts.)

Bestimmung der Frame-Axiome: Erklärungsabschluss

- zusammengefasste Effekt-Axiome
  $\forall x, s, a\ [a = up(x) \vee a = down(x) \Rightarrow currentFloor(x,do(a,s))]$
  $\forall x,s,b[\exists n\ [n \neq x \wedge (b=up(n) \vee b=down(n))] \Rightarrow \neg cFl(x,do(b,s))]$

Erklärungsabschlussaxiome $\mathcal{Fr}_{EL}$

$\forall x, s, a\ [\neg currentFloor(x, s) \wedge currentFloor(x, do(a, s)) \Rightarrow$
$a = up(x) \vee a = down(x)]$

$\forall x, s, b\ [currentFloor(x, s) \wedge \neg currentFloor(x, do(b, s)) \Rightarrow$
$\exists n\ [n \neq x \wedge (b = up(n) \vee b = down(n))]]$

- in Frame-Axiom-Form
  $\forall x,s,a\ [\neg cFl(x,s) \wedge a \neq up(x) \wedge a \neq down(x)) \Rightarrow \neg cFl(x,do(a,s))]$
  $\forall x,s,b\ [cFl(x,s) \wedge \forall n\ [(n=x \vee (b \neq up(n) \wedge b \neq down(n)))] \Rightarrow$
  $cFl(x,do(b,s))]$

Axiome des Nachfolgezustands

zusammengefasste Effekt-Axiome

$\forall s, x, a\ [\Pi_\Phi(x, a, s) \Rightarrow \Phi(x, do(a, s))]$
$\forall s, x, b\ [N_\Phi(x, b, s) \Rightarrow \neg\Phi(x, do(b, s))]$

Annahme

- Alle Effekte sind explizit kodiert.
- Integrität: $\mathcal{KB} \models \forall s, x, a\ [\neg(\Pi_\Phi(x, a, s) \wedge N_\Phi(x, a, s))]$

Erklärungsabschlussaxiome (explanation closure)

$\forall s, x, a\ [\neg\Phi(x, s) \wedge \Phi(x, do(a, s)) \Rightarrow \Pi_\Phi(x, a, s)]$
$\forall s, x, b\ [\Phi(x, s) \wedge \neg\Phi(x, do(b, s)) \Rightarrow N_\Phi(x, b, s)]$

Axiom des Nachfolgezustands (successor state axiom)

- Fasst Effekt-Axiome und Erklärungsabschluss zusammen
  $\forall s,x,a\ [\Phi(x,do(a,s)) \Leftrightarrow \Pi_\Phi(x,a,s) \vee (\Phi(x,s) \wedge \neg N_\Phi(x,a,s))]$

Axiome des Nachfolgezustands

Axiom des Nachfolgezustands (successor state axiom)

$\forall s,x,a\ [\Phi(x,do(a,s)) \Leftrightarrow \Pi_\Phi(x,a,s) \vee (\Phi(x,s) \wedge \neg N_\Phi(x,a,s))]$

Beispiel: on(x, s)

$\forall s,x,a\ [on(x,do(a,s)) \Leftrightarrow (on(x,s) \wedge a \neq turnoff(x))]$

Beispiel: d_closed(s)

$\forall s,a\ [d\_closed(do(a,s)) \Leftrightarrow a=close \vee (d\_closed(x,s) \wedge a \neq open)]$

Beispiel: currentFloor(x, s)

$\forall s,x,a\ [currentFloor(x,do(a,s)) \Leftrightarrow a = up(x) \vee a = down(x) \vee$
$(currentFloor(x,s) \wedge \neg\exists n\ [n \neq x \wedge (a=up(n) \vee a=down(n))])]$

Axiome im Situationskalkül

Vorbedingungsaxiome $\mathcal{Pre}$

- Für jede Aktion genau eine Äquivalenz
  $\forall s,a\ [Poss(a, s) \Leftrightarrow \Psi(s)]$

Axiome des Nachfolgezustands $\mathcal{SSt}$

- Zusammenfassung von
  Effekt-Axiomen $\mathcal{Eff}$
  Frame-Axiomen $\mathcal{Fr}$
- Für jeden primitiven Fluent genau eine Äquivalenz
  $\forall s,x,a\ [\Phi(x,do(a,s)) \Leftrightarrow \Pi_\Phi(x,a,s) \vee (\Phi(x,s) \wedge \neg N_\Phi(x,a,s))]$

Spezifikation des Initialzustands $\mathcal{Init}$

- s_0 als einziger Situationsausdruck

Lösung des Frame-Problems im Situationskalkül

Vollständige Spezifikation von (primitiven) Aktionen

- Vorbedingungen
- Effekte
  - Integrität (keine inkonsistenten Effekte)
  - Determiniertheit (keine disjunktiven Effekte)

Spezifikation der (primitiven) Fluents

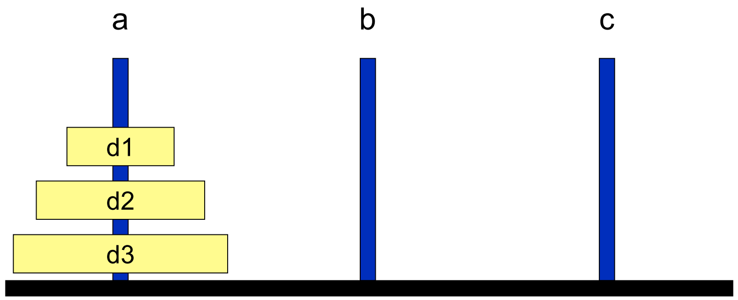
- Nachfolgezustandsaxiome generiert aus Effektspezifikationen der Aktionen (und Vollständigkeitsannahme)
- Keine Abhängigkeiten

(Annahme der eindeutigen Benennung von Aktionen)

- Brachman und Levesque nennen sie als wesentlich, ohne den Grund anzugeben.

Aktionen für den Turm von Hanoi

Gruppen-
diskussion



Welche Axiome des Nachfolgezustands gelten für die Fluents?