Repräsentation operationaler Begriffe*

Volker Klingspor

Universität Dortmund
Lehrstuhl Informatik VIII
D-44221 Dortmund
volker@ls8.informatik.uni-dortmund.de

Zusammenfassung

Um Handlungen von Robotern zu planen und auszuführen, reichen Operatoren, die nur die Handlungen umfassen, nicht aus. *Operationale Begriffe*, eingeführt durch K. Morik und A. Rieger, sollen dagegen Wahrnehmungen und Handlungen integrieren. In diesem Text werden zunächst die Anforderungen an eine Repräsentation für operationale Begriffe erörtert, es wird eine mögliche Repräsentation vorgestellt und schließlich angerissen, wie Verfahren des maschinellen Lernens zum Definieren solcher Begriffe verwendet werden können.

1 Einführung

Zukünftige Robotersysteme sollen den heutigen Systemen gegenüber um einige Eigenschaften erweitert werden, die eine einfachere und flexiblere Handhabung erlauben. Dies fängt bei menschengerechter gestalteten Befehlsschnittstellen an, führt zur Adaptivität und Portierbarkeit der Roboter in neue, bisher unbekannte Arbeitsumgebungen und umfaßt auch die Möglichkeit, unsichere und unbekannte Ereignisse handhaben zu können [Dillmann, 1993]. Momentan werden Befehle meist mittels realer Weltkoordinaten abgesetzt, bestenfalls kann der Benutzer Gegenstände benennen, deren Positionen dem Roboter aber schon bekannt sein müssen. Wir wollen dem Anwender erlauben, seine Befehle in einer begrifflichen Ebene an den Roboter zu richten, so daß er nicht mehr einzelne, bekannte Gegenstände bennenen muß, sondern zur Befehlsbeschreibung eine Klasse von Gegenständen verwendet, wobei der Roboter an einer Instanz dieser Klasse eine Handlung durchführen soll. Beispielsweise kann er den Roboter dazu veranlassen, den Raum, in dem er sich befindet, durch eine Tür zu verlassen, sich nach links zu drehen und bis zum Erreichen eines Schrankes der Wand zu folgen. Dabei muß dem Roboter weder die konkrete Tür, noch der Flur oder der Schrank bekannt sein, er muß ausschließlich wissen, wie solche Objekte üblicherweise aussehen, und wie man die entsprechenden Handlungen an ihnen durchführt.

Um die Wahrnehmungen von Gegenständen und die entsprechenden Handlungen dazu auf begrifflicher Ebene zu integrieren, wurden von K. Morik und A. Rieger *operationale Begriffe* eingeführt [Morik und Rieger, 1993]. Der Unterschied zwischen operationalen Begriffen und den üblichen Operatoren, wie sie in der Handlungsplanung verwendet werden,

*Diese Arbeit wurde zum Teil durch die Europäische Gemeinschaft durch das Projekt B-Learn II (P7274) und das Forschungsministerium des Landes Nordrhein-Westfalen finanziert.

läßt sich an einem Beispiel aus [Fikes et al., 1972] verdeutlichen. In dem Artikel wird der Operator GOTHRU (d, r_1, r_2) definiert, der beschreibt, daß sich der Roboter von Raum r_1 durch die Tür d in den Raum r_2 bewegt:

Precondition:
INROOM(ROBOT, r_1) $\wedge$ CONNECTS(d, r_1, r_2)
Delete List:
INROOM(ROBOT, $)
Add List:
INROOM(ROBOT, r2)

Dieser Operator beschreibt, wie sich der Weltzustand unter Ausführung der entsprechenden Handlung ändert. Er beschreibt jedoch nicht die Handlung selbst oder die Wahrnehmungen, die bei Ausführung der Handlung zu erwarten sind. Daher sind für die Verwendung des Operators durch einen realen Roboter weitere Informationen notwendig. Genau diese Informationen sind Bestandteil der operationalen Begriffe, sie integrieren also alle zur Wahrnehmung und Handlungsausführung notwendigen Informationen, wobei diese auf verschieden abstrakten Ebenen repräsentiert werden.

Operationale Begriffe erlauben im Gegensatz zu Operatoren auch, die ausgeführten Handlungen und die Wahrnehmungen zu klassifizieren. Ein Roboter kann mit Hilfe operationaler Begriffe also auch dann erkennen, daß er durch eine Tür gegangen ist, wenn dies durch Zufall geschah, zum Beispiel, wenn der Raum erkundet wird. Auf diese Weise können auch Karten von der Umgebung, erzeugt werden. Wird die Umwelt durch Zustände beschrieben, so wie in dem Operator, ist es nicht möglich zu erkennen, ob der Roboter durch die Tür ging. Die Änderung des Weltzustandes, die durch GOTHRU hervorgerufen wird, kann auch dadurch erreicht worden sein, daß der Roboter mit einer Sackkarre durch das ganze Gebäude transportiert und nach einiger Zeit in dem zweiten Raum wieder abgestellt wurde.

In ihrem Artikel beschreiben K. Morik und A. Rieger ebenfalls, wie die Wahrnehmungsmerkmale operationaler Begriffe repräsentiert und Definitionen von Wahrnehmungen maschinell gelernt werden können. Letzteres soll insbesondere die Adaptierung und Portierung von Robotern erleichtern, sowie eine enge Beziehung zwischen den tatsächlichen Wahrnehmungen und Handlungen auf der einen sowie operationalen Begriffen auf der anderen Seite erreichen. In diesem Text wird dargestellt, wie durch operationale Begriffe die Handlungs- und die Wahrnehmungsmerkmale verknüpft werden, und so die Begriffe zur Handlungsplanung und -ausführung verwendet werden können. Ebenso wie schon bei der Repräsentation der Wahrnehmungsmerkmale wird dabei insbesondere auf eine Repräsentation Wert gelegt, die den maschinellen Erwerb der Begriffsdefinitionen erlaubt.

Im folgenden werden zunächst die Anforderungen an eine solche Repräsentation für operationale Begriffe beschrieben. Dann wird in Abschnitt 3 eine mögliche Repräsentation vorgeschlagen, wobei die einzelnen Komponenten erläutert werden. In Abschnitt 4 wird skizziert, wie Verfahren des maschinellen Lernens zum Erwerb der Begriffsdefinitionen verwendet werden können. Der Artikel schließt mit einer Diskussion (Abschnitt 5).

2 Anforderungen an operationale Begriffe

Die Anforderungen, die an einen operationalen Begriff gestellt werden, veranschaulichen wir an einem Beispiel. Dem Roboter wird befohlen eine Tür zu durchfahren. Für die Ausführung dieses Befehls muß er zunächst eine Tür finden. Da die Umgebung nicht bekannt ist, bleibt dem Roboter nichts anderes übrig, als die Tür zu suchen. Dazu muß er wiederum wissen, wie Türen von verschiedenen Positionen aus aussehen. Da der Roboter aber nicht willkürlich durch den Raum fahren soll, in der Hoffnung, irgendwann einmal eine Tür wahrzunehmen, müssen auch Handlungen bekannt sein, wie üblicherweise Türen gefunden werden. Er kann z.B. zunächst zu einer Wand des Raumes fahren und dieser dann folgen. Dennoch muß der Roboter auch auf seine Wahrnehmungen reagieren können, bevor er die Suchhandlung vollständig ausgeführt hat. Beispielsweise wenn er während der Fahrt in Richtung Wand bereits eine Tür wahrnimmt.

Hat der Roboter eine Tür gefunden, muß er eine Position vor der Tür finden, die es ihm ermöglicht, sie zu durchfahren. Die dazu notwendige Aktion ist abhängig von der Art, wie die Tür gefunden wurde und von der Wahrnehmung des Roboters. Ziel dieser Handlung ist, daß der Roboter zentriert vor der Tür steht. Zuletzt muß er dann den eigentlichen Befehl, das durch die Tür fahren, ausführen. Dabei muß kontrolliert werden, ob die Wahrnehmungen dem Muster einer Tür beim Durchfahren entsprechen, es kann sich schließlich um einen Irrtum handeln. Außerdem muß diese Handlung, wie alle vorigen Handlungen auch, ein definiertes Ende haben.

Aus dem Beispiel ergeben sich folgende Anforderungen an eine Repräsentation operationaler Begriffe:

- Die verschiedenen operationalen Begriffe sollen in sich abgeschlossen sein. Für jeden Begriff muß deutlich sein, wann er angewendet werden darf und worin die entsprechende Handlung resultiert. Das Resultat muß dazu verwendet werden können, weitere Handlungen anzustoßen. Ebenso muß es möglich sein, von einem gesetzten Ziel aus rückwärts verkettend eine Folge sinnvoller Handlungen auszuwählen. Das bedeutet allerdings nicht, daß genau diese Folge dann auch durchgeführt werden muß.

- Die operationalen Begriffe sollen anwendbar sein, sobald ausreichend Evidenz für das Vorhandensein eines dem Begriff zugehörigen Objekts vorhanden ist.

- Die Klassifikation einer Wahrnehmung ist auch abhängig von der während der Wahrnehmung durchgeführten Aktion. D.h. erst in Kombination mit einer gewissen Aktion vermutet der Roboter, eine Instanz eines Begriffs erkannt zu haben.

- Die Beschreibungen für operationale Begriffe sollten maschinell erlernt werden können, da so Repräsentationen, die auf den realen Wahrnehmungen und Handlungen basieren, einfacher gefunden werden können. Zudem Unterstützt die Lernfähigkeit die Portierung und Adaptierung des Roboters.

Die aus diesen operationalen Begriffen bestehenden Pläne dürfen, [Agre und Chapman, 1990] entsprechend, weniger als explizite Befehlsfolge verstanden werden, sondern als einen von einem weiteren Programm zu interpretierenden „plan-as-communication". Während der Ausführung des Plans muß ständig überwacht werden, ob nicht bessere Befehlsfolgen existieren, beziehungsweise ob mit den bisher geplanten das Ziel überhaupt noch erreicht werden kann. Die Handlungsplanung ist also ein eng mit der Ausführung verknüpfter Prozeß.

3 Repräsentation operationaler Begriffe

Ein operationaler Begriff besteht aus verschiedenen Handlungsmöglichkeiten und entsprechenden Wahrnehmungen. Jede solche Handlungs-/Wahrnehmungsbeschreibung besteht aus fünf Teilen:

1. dem Begriff selbst,
2. der Vorbedingung,
3. dem Aktionsmuster,
4. dem Wahrnehmungs-/Verifikationsmuster
5. und dem Handlungsendemuster.

Diese werden im folgenden detailliert vorgestellt.

3.1 Der Begriff

Der operationale Begriff selbst wird als vierstelliges Prädikat repräsentiert. Die Argumente sind:

- Idenfikator der Fahrt des Roboters.

  Er ist notwendig, weil jedes der Beispiele, die wir zum Lernen der Begriffe verwenden, eine ununterbrochene Bewegungssequenz beschreibt. Bewegungen sind in unserem Scenario die einzigen Handlungen, die durchgeführt werden.

- Startzeitpunkt während der Fahrt.

  Eine Fahrt ist in Zeitpunkte aufgeteilt, zu denen der Roboter seine Sensoren aktiviert und ausgelesen hat. Eine solche Aufteilung der Zeit in diskrete Zeitpunkte ist sinnvoll, da die Wahrnehmungen, also die Sensormessungen, den Anfang und das Ende von Handlungen steuern sollen. Dieser Wert gibt also an, ab welchem Zeitpunkt innerhalb der Fahrt die dem Begriff entsprechende Handlung ausgeführt wurde, sowie ab welchem Zeitpunkt die entsprechende Wahrnehmung stattfand.

- Endzeitpunkt während des Fahrt.

  Dies entspricht dem vorhergehenden Parameter, angewendet auf das Ende der Handlung und der Wahrnehmung. In unserem Scenario werden Handlungen immer sukzessiv durchgeführt. Die Zeitpunkte werden zum einen dazu verwendet, Wahrnehmungen und entsprechende Handlungen innerhalb eines Begriffs miteinander in Beziehung zu setzen, wenn sie gleichzeitig auftreten. Zum anderen definieren sie das direkte zeitliche Aufeinanderfolgen zweier Begriffe, wenn des einen Endzeitpunkt des zweiten Startzeitpunkt ist. Wir verwenden Zeitpunkte nicht im Sinne von Allens Relationen [Allen, 1984], mit denen vielseitige temporale Beziehungen zwischen Teilhandlungen ausgedrückt werden können. Dies ist in unserem Zusammenhang nicht sinnvoll, da zu jedem Zeitpunkt nur eine Handlung ausgeführt wird.

- Roboterorientierung relativ zu einem durch den Begriff beschriebenen Gegenstand.

  Dieser Parameter unterscheidet zum Beispiel, ob der Roboter parallel oder schräg an einer Wand entlangfährt.

move_through_door(t3, 8, 15, parallel)[1] ist beispielsweise ein solcher operationaler Begriff. Er beschreibt, daß der Roboter in Trace 3 von der 8. bis zur 15. Sensormessung parallel zu den Türrahmen durch eine Türöffnung fuhr. Die Eigenschaften des operationalen Begriffs werden als Prämissen einer Regel mit der Begriff als Konklusion dargestellt (Abschnitt 3.6).

3.2 Vorbedingung

Die Vorbedingung beschreibt, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen um die Handlung durchführen zu können. Vorbedingung kann entweder ein operationaler Begriff selbst sein. Z.B. muß sich der Roboter korrekt vor eine Tür gestellt haben, um sie durchfahren zu können. Dann wäre der Fakt move_in_front_of_door(t3, 6, 8, parallel) eine mögliche Vorbedingung für den Begriff. Es kann aber auch das Wahrnehmen eines Gegenstands im Sinne der Verifikations-/Wahrnehmungsmuster sein, um z.B. Aktionen zu veranlassen, diesen Gegenstand weiter zu erkunden.

3.3 Handlungsmuster

Das Handlungsmuster beschreibt ein Folge von abstrakten Bewegungsoperatoren des Roboters. Wir haben für unsere Versuche mit dem Roboter PRIAMOS [Dillmann et al., 1993], entwickelt an der Universität Karlsruhe, diese Operatoren auf geradeaus fahren und auf der Stelle drehen beschränkt[2]. Die abstrakten Operatoren können während der Planinterpretierung einfach in konkrete elementare Operatoren des Roboters umgewandelt werden. Die beiden ausgewählten Operatoren werden wie folgt repräsentiert:

move_forward (Trace, $Time_1$, $Time_2$, Speed, Direction)
rotate (Trace, $Time_1$, $Time_2$, Speed, Direction)

move_forward beschreibt eine gerade, drehungslose Bewegung in Richtung Direction mit der angegebenen Geschwindigkeit, rotate eine entsprechende Drehung. Speed und Direction sind symbolische Argumente mit den möglichen Werten [slow, med_speed, fast] bzw. [forward, right, left, backward]. Gemäß unsere Definition ist die Front des Roboters immer die Seite, in deren Richtung er sich während einer Geradeausfahrt bewegt. Das Argument Direction gibt daher an, wo sich für die nächste Aktion die Front des Roboters befindet. Bei Drehungen gibt das Argument dagegen die Drehrichtung an, diese ist unabhängig von der letzten Bewegung. Anhand der Argumente berechnet der Planinterpreter Werte für die Richtung und die Geschwindigkeit der nächsten elementaren Roboteroperationen. Innerhalb der Handlungsmuster sind die Operationen unabhängig von den Wahrnehmungen, nur deren Ende wird durch sie bestimmt. Die genaue Darstellung solcher Handlungsmuster auf den niedrigen Repräsentationsebenen und ihre Verwendung durch einen Interpreter muß noch entwickelt werden.

[1] Wir folgen der PROLOG-Konvention und schreiben Konstanten klein, Variablen groß.

[2] PRIAMOS ist zusätzlich in der Lage, sich in alle beliebigen Richtung zu bewegen und sich dabei zu drehen und auch Kurven zu fahren.

3.4 Verifikations-/Wahrnehmungsmuster

Das Verifikationsmuster soll einerseits ermöglichen, einen Gegenstand zu klassifizieren, als auch während einer Aktion kontrollieren, ob die Aktion korrekt ausgeführt wurde. In [Morik und Rieger, 1993] ist eine mehrstufige Repräsentation für diese Wahrnehmungsmerkmale beschrieben, daher beschränke ich mich hier auf die letztendlich von den operationalen Begriffen verwendeten Prädikaten. through_door(t3, 8, 15, parallel) gibt beispielsweise an, daß die Robotersensoren die Muster für das parallele Durchfahren einer Türöffnung gemessen haben. Die Argumente sind dieselben wie bei den operationalen Begriffen selbst. Definitionen für diese Wahrnehmungsmerkmale werden ebenfalls durch maschinelles Lernen erworben.

3.5 Handlungsende

Das Ende einer Aktion muß ebenfalls definiert sein, damit ausgehend von dieser Situation weitere Handlungen angestoßen werden können. Im Gegensatz zu den Verifikationsmustern, die Wahrnehmungen über ein Zeitintervall beschreiben, ist das Handlungsende von den Sensormessungen zu einem einzelnen Zeitpunkt abhängig. Beim Durchfahren der Tür ist zum Beispiel das Ende der Handlung erreicht, wenn die hinteren Ecksensoren von PRIAMOS zum ersten Mal die Innenkanten des Türrahmens messen. Dies wird durch

in_front_of_door(t3, 15, back_sensors)

beschrieben. Auch eine solche Repräsentation muß noch gefunden werden. Die notwendigen Handlungsendemuster sind jedoch von den verwendeten operationalen Begriffen abhängig.

3.6 Die Definition der Begriffe

Bei der Darstellung von Handlungen ist das Hauptproblem die Repräsentation zeitlicher Abläufe. In jedem der verwendeten Prädikate sind dazu Zeitpunkte als Argumente aufgenommen. Prädikatenlogik 1. Stufe erlaubt durch die Möglichkeit Relationen darzustellen eine sehr einfache Repräsentation der zeitlichen Zusammenhänge. Ein Beispiel für die Beschreibung eines operationalen Begriffs ist:

$$\begin{aligned}
&\mathsf{move_in_front_of_door(Trace,\ _,\ Time_1,\ parallel)}\ \&\\
&\mathsf{move_forward(Trace,\ Time_1,\ Time_2,\ slow,\ backward)}\ \&\\
&\mathsf{through_door(Trace,\ Time_1,\ Time_2,\ parallel)}\ \&\\
&\mathsf{in_front_of_door(Trace,\ Time_2,\ back_sensors)}\\
\rightarrow\ &\mathsf{move_through_door(Trace,\ Time_1,\ Time_2,\ parallel)}.
\end{aligned}$$ [3]

In dieser Regel treten alle zuvor genannten Bestandteile auf. Die erste Prämisse repräsentiert die Vorbedingung, die zweite die Handlung, die dritte das Verifikation-/Wahrnehmungsmuster und die letzte das Handlungsende. Repräsentationssprachen, die eine Trennung der verschiedenen Bestandteile eines Begriffs abhängig von deren Aufgabe erlauben, ermöglichen sicherlich anschaulichere Repräsentationen. Die gewählte Hornlogik erlaubt aber die besonders einfache Anwendung von bekannten Verfahren des maschinellen Lernens.

[3] Es ist verwirrend, daß der Roboter rückwärts losgehen soll, um durch die Tür zu fahren. Dies hängt jedoch mit der Art, wie er sich vor die Tür stellt, zusammen.

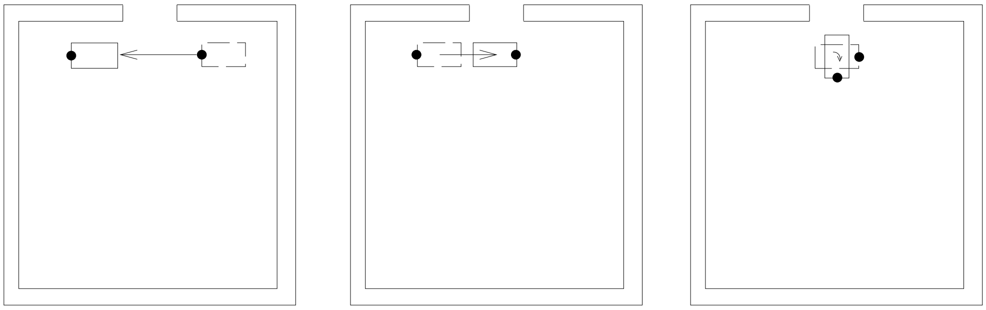

Abbildung 1: Eine Fahrt, repräsentiert durch *move_in_front_of_door*

Die dargestellte Regel kann in zwei verschiedenen Situationen angewendet werden. Zum einen, wenn der Planer diesen Begriff für die als nächstes auszuführende Handlung ausgewählt hat. Dann ist der Startzeitpunkt und die Fahrtnummer bereits durch den zuvor ausgeführten Befehl gebunden, wobei der Startzeitpunkt zugleich der Endzeitpunkt der vorhergenden Handlung ist. Der Interpreter führt die Handlung move_forward aus, wobei ihr Endzeitpunkt noch nicht an einen festen Zeitpunkt gebunden ist. In dem Moment, in dem, ausgehend von den Sensordaten, das Handlungsende in_front_of_door abgeleitet werden kann, wird der Endzeitpunkt Time_2 durch den aktuellen Zeitpunkt gebunden und die Handlung beendet.

Zum anderen kann die Regel aber auch angewendet werden, wenn der Planer nicht explizit diesen Begriff ausgewählt hat. Insbesondere wenn die Vorbedingung eine Wahrnehmungsmerkmal und kein operationaler Begriff ist, können die Prämissen auch unvorhergesehenerweise erfüllt sein, so daß der Begriff abgeleitet werden kann und dann dem Planer zur Verfügung steht. Auf diese Weise wird erreicht, daß auf diese Wahrnehmung direkt reagiert werden kann.

Aufwendigere Beschreibungen operationaler Begriffe sind natürlich auch möglich, so kann beispielsweise die Handlung aus einer Folge von Einzelaktionen und entsprechenden Wahrnehmungen bestehen, wobei die Wahrnehmungen immer das Ende einer solchen Einzelaktion bestimmen:

$$
\begin{array}{l}
\quad \mathsf{move\_along\_door(Trace,\ \_,\ Time_1,\ parallel)}\ \& \\
\quad \mathsf{move\_forward(Trace,\ Time_1,\ Time}_i\mathsf{,\ slow,\ backward)}\ \& \\
\quad \mathsf{in\_front\_of\_door(Trace,\ Time}_i\mathsf{,\ left\_sensors)}\ \& \\
\quad \mathsf{rotate(Trace,\ Time}_i\mathsf{,\ Time_2,\ slow,\ right)}\ \& \\
\quad \mathsf{in\_front\_of\_door(Trace,\ Time_2,\ back\_sensors)} \\
\rightarrow \mathsf{move\_in\_front\_of\_door(Trace,\ Time_1,\ Time_2,\ parallel).}
\end{array}
$$

In Abbildung 1 ist eine durch diese Regel beschriebene Fahrt dargestellt. Die unterbrochenen Kisten stellen den Roboter vor einer Handlung, die durchgezeichneten nach der Handlung dar. Der schwarze Punkt am Roboter kennzeichnet seine Front jeweils vor und nach der Handlung.

Leider ist diese Darstellung noch abhängig von der Seite, auf der die Tür wahrgenommen wurde, hier war es die rechte. Um entsprechende Begriffsdefinitionen auch für Türen links zur Bewegungsrichtung handhaben zu können, muß eine entsprechende zweite Regel existieren.

4 Lernen operationaler Begriffe

Operationale Begriffe sind stark abhängig von den Aufgaben, die ein Roboter zu erfüllen hat, sowie von der Umgebung, in der er arbeitet. Um die Umrüstung von Robotern zu vereinfachen, ist unser Hauptziel das maschinelle Erlernen von Begriffsdefinitionen, basierend auf ebenfalls maschinell gelernten Merkmalen. Da in diesem Text die Repräsentation von operationalen Begriffen behandelt wurde, beschränken wir uns hier auf das Lernen einer solchen.

Die von uns verwendete Repräsentationssprache basiert auf Hornlogik, daher können Algorithmen der *induktiven logischen Programmierung* verwendet werden. Ziel dieser Algorithmen ist, den sehr großen Hypothesenraum auf verschiedene Weise sinnvoll einzuschränken. In unseren bisherigen Versuchen zum Lernen der Wahrnehmungsmerkmale haben wir die besten Erfahrungen mit Systemen gemacht, bei denen der Hypothesenraum syntaktisch eingeschränkt werden kann. Dieses Eigenschaft besitzen z.B. die Algorithmen GRENDEL [Cohen, 1991, Cohen, 1993], RDT [Kietz und Wrobel, 1992] und eine Abwandlung des letzteren, GRDT [Klingspor, 1994].

Bei GRENDEL und GRDT kann der Hypothesenraum durch Grammatiken, die die lernbaren Regeln definieren, angegeben werden. In RDT wird der Hypothesenraum durch eine Menge von Regelschemata, dies sind Regeln der Prädikatenlogik 2. Stufe, deren Prädikatsvariablen beim Lernen instantiiert werden, definiert. Wenn die Struktur der zu lernenden Regeln bekannt ist, ist es relativ einfach eine Grammatik für die zu lernenden Regeln zu schreiben. Die folgende Grammatik beschreibt den für unsere Lernaufgabe sinnvollen Hypothesenraum[4]:

operational_concept (Trace, Time_1, Time_2, *Orientation*) $\rightarrow$
  precondition (Trace, _T, Time_1),
  sensing_action_loop (Trace, Time_1, Time_2),
  end_of_action (Trace, Time_2).

precondition (Trace, Time_1, Time_2) $\rightarrow$
  Operational_Concept (Trace, Time_1, Time_2, *Orientation*).

precondition (Trace, Time_1, Time_2) $\rightarrow$
  Timeinterval_Perception (Trace, Time_1, Time_2, *Orientation*).

sensing_action_loop (Trace, Time_1, Time_2) $\rightarrow$
  sensing_action_combination (Trace, Time_1, Time_2).

sensing_action_loop (Trace, Time_1, Time_2) $\rightarrow$
  sensing_action_combination (Trace, Time_1, Time_i),
  sensing_action_loop (Trace, Time_i, Time_2).

sensing_action_combination (Trace, Time_1, Time_2) $\rightarrow$
  Action (Trace, Time_1, Time_2, *Speed, Direction*),

[4] Nichtterminale Symbole sind *kursiv*, die zu lernenden Prädikatsvariablen und Konstanten *geneigt* gesetzt.

Timeinterval_Perception (Trace, Time_1, Time_2, *Orientation*).

sensing_action_combination (Trace, Time_1, Time_2) $\rightarrow$
Action (Trace, Time_1, Time_2, *Speed*, *Direction*),
Timepoint_Perception (Trace, Time_2, *Orientation*).

end_of_action (Trace, Time, *Orientation*) $\rightarrow$
Timepoint_Perception (Trace, Time, *Orientation*).

Alle drei Verfahren lernen aus Beispielen, die durch den Anwender zur Verfügung gestellt werden müssen. Jedes Beispiel muß den operationalen Begriff selbst, sowie alle Bestandteile, die ihn charakterisieren, enthalten. Dies sind die Fakten, die die Vorbedingung, die Handlungsmerkmale, die Wahrnehmungsmerkmale und das Handlungsende beschreiben. Um diese Fakten erzeugen zu können, müssen die Beispielfahrten des Roboters in Sequenzen unterteilt werden, die den operationalen Begriffen zugeordnet werden. Aus diesen Sequenzen werden mit Hilfe der Definitionen für die einzelnen Bestandteile der Begriffe die Beispiele abgeleitet.

Zum Testen der Repräsentation und der Anwendung von Lernverfahren werden wir zunächst Fahrten verwenden, die einen Roboter in die Lage versetzen soll, eine Tür zu finden und sie zu durchfahren. Dazu sind Beispielfahrten erforderlich, die folgende Handlungen enthalten:

1. In eine Ecke oder zu einer Wand fahren, von dort aus kann dann der Raum erkundet werden: move_to_corner bzw. move_to_wall.

2. Sich parallel zu einer Wand hin drehen, damit ihr gefolgt werden kann: rotate_parallel_to_wall.

3. Einer Wand folgen. Dies sollte in einer bestimmten Richtung, z.B. gegen den Uhrzeigersinn erfolgen: move_along_wall.

4. Nach dem Erreichen einer Ecke des Raums sich darin drehen, um der nächsten Wand zu folgen: rotate_in_corner.

5. An einer Tür entlang gehen. Vor allem, um diese wahrnehmen zu können: move_along_door.

6. Sich vor eine Tür stellen: move_in_front_of_door.

7. Eine Türöffnung durchfahren: move_through_door.

5 Diskussion

In dem Artikel wurde eine Repräsentationssprache zur Darstellung operationaler Begriffe vorgestellt, die es Robotern ermöglicht, in unbekannten Umgebungen Befehle auszuführen. Es wurde vorgestellt, wie das Lernen dieser Begriffe vorgesehen ist. In diesem Zustand der Arbeit bleiben natürlich noch einige Fragen offen.

Die Berechnung der Handlungsmerkmale ist nur angerissen worden. Die Semantik der Argumente wie die Geschwindigkeit einer Fahrt muß bestimmt und eventuell gelernt werden.

Im Gegensatz zu den zu den intervallbasierenden Wahrnehmungsmerkmalen existiert für die zeitpunktorientierten Wahrnehmungsmerkmale noch keine Repräsentation. Die bisherigen Ergebnisse lassen aber erwarten, daß eine solche Repräsentation gefunden werden kann.

Die operationalen Begriffe sind nicht richtungsinvariant. Die Repräsentation sollte es z.B. ermöglichen, daß nicht explizit zwischen rechts und links an einem Gegenstand vorbeifahren unterschieden werden muß.

Zunächst ist aber das erste Ziel, anhand von Beispielen, die durch Fahrten von PRIAMOS erstellt werden, Lernverfahren auf die dargestellte Ebene der Repräsentation operationaler Begriffe anzusetzen, und mit den gelernten Regeln die Anwendbarkeit der Begriffe zu untersuchen.

Literatur

[Agre und Chapman, 1990] Agre, P. E. und Chapman, D. (1990). What Are Plans for? In Maes, P., Hrsg., *Designing Autonomous Agents*, Seiten 17 – 34. MIT Press.

[Allen, 1984] Allen, J. F. (1984). Toward a General Theory of Action and Time. *Artificial Intelligence*, 23:123–154.

[Cohen, 1991] Cohen, W. W. (1991). Grammatically Biased Learning: Learning Horn Theories Using an Explicit Antecedent Description Language. Technical report, AT & T Bell Laboratories. (submitted to AIJ).

[Cohen, 1993] Cohen, W. W. (1993). Rapid Prototyping of ILP Systems Using Explicit Bias. Submitted to the 1993 IJCAI workshop on ILP.

[Dillmann, 1993] Dillmann, R. (1993). Entwicklungstendenzen und Anwendungen symbolischer Lernverfahren in der Robotik. In Herzog, O., Christaller, T., und Schütt, D., Hrsg., *Grundlagen und Anwendungen der Künstlichen Intelligenz – 17. Fachtagung für KI*, Informatik aktuell, Seiten 28 – 43, Berlin. Springer-Verlag.

[Dillmann et al., 1993] Dillmann, R., Kreuziger, J., und Wallner, F. (1993). PRIAMOS – An Experimental Platform for Reflexive Navigation. In Groen, Hirose, und Thorpe, Hrsg., *IAS-3: Intelligent Autonomous Systems*, Kapitel 18, Seiten 174 – 183. IOS Press.

[Fikes et al., 1972] Fikes, R. E., Hart, P. E., und Nisson, N. J. (1972). Learning and Executing Generalized Robot Plans. *Artificial Intelligence*, 3(4):251 – 288.

[Kietz und Wrobel, 1992] Kietz, J.-U. und Wrobel, S. (1992). Controlling the Complexity of Learning in Logic through Syntactic and Task-Oriented Models. In Muggleton, S., Hrsg., *Inductive Logic Programming*, Kapitel 16, Seiten 335 – 360. Academic Press, London. Also available as Arbeitspapiere der GMD No. 503, 1991.

[Klingspor, 1994] Klingspor, V. (1994). GRDT: Enhancing Model-Based Learning for Its Application in Robot Navigation. LS-8 Report 5, Universität Dortmund, Lehrstuhl Informatik VIII, D-44221 Dortmund.

[Morik und Rieger, 1993] Morik, K. und Rieger, A. (1993). Learning Action-oriented Perceptual Features for Robot Navigation. In Giordana, A., Hrsg., *Workshop notes: Learning Robots of the ECML-93*. Also available as Research Report 3, Univ. Dortmund, Informatik VIII, D-44221 Dortmund.