To appear in *Proc. AMS-2000*, Springer-Verlag, 2000. (C)Springer-Verlag.

CS Freiburg: Architektur und Aktionsauswahl im Roboterfußball*

Jens-Steffen Gutmann,** Bernhard Nebel, Christian Reetz

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Informatik
Am Flughafen 17, D-79110 Freiburg
⟨*Nachname*⟩@informatik.uni-freiburg.de

Zusammenfassung Roboterfußball ist ein wissenschaftliches anspruchsvolles Forschungsproblem, das erfordert, Probleme aus den Bereichen Robotik, Künstliche Intelligenz und Multi-Agenten-Systeme zu lösen und die Lösungen in einem System zu integrieren, um ein erfolgreiches Roboterfußballteam zu kreieren. In diesem Papier beschreiben wir die Schlüsselkomponenten des *CS Freiburg* Teams. Dabei fokussieren wir auf die Selbstlokalisation und Objekterkennungsmethoden und die Integration aller Information in ein globales Weltmodell. Basierend auf diesem Weltmodell werden dann Aktionsselektion, Pfadplanung und Kooperation realisiert. Das resultierende System ist äußerst erfolgreich und hat bisher lediglich ein Spiel in einem Wettbewerb verloren.

1 Einleitung

Ein junges, aber schnell an Popularität gewinnendes Problem in Bereich der autonomen mobilen Robotik ist der Roboterfußball. Die *Robot World Cup Initiative (RoboCup)* wurde von einer Gruppe japanischer Forscher ins Leben gerufen mit dem Ziel, die Forschung in Künstliche Intelligenz und Robotik voranzubringen, indem ein Problem benutzt wird, bei dem zum einen eine große Menge von Technologien integriert und untersucht werden kann [9], zum anderen die Aufgabenstellung einfach kommunizierbar ist und einfach Wettbewerbe durchgeführt werden können.

Dabei wird eine Unterteilung in die RoboCup-Ligen Simulationsliga (virtuelle Fußballspieler spielen auf einem simulierten Fußballfeld), Liga der kleinen Roboter (bis zu fünf Roboter pro Team spielen auf einem Feld der Größe einer Tischtennisplatte), Liga der mittelgroßen Roboter (bis zu vier Roboter pro Team treten auf einem etwa 8 auf 5 Meter großen Spielfeld an) und Liga der Roboter mit Beinen vorgenommen. Das in diesem Papier vorgestellte *CS Freiburg* Team tritt in der Klasse der mittelgroßen Roboter an.

Während die meisten Teams in dieser Klasse als hauptsächlichen Sensor ein Videosystem verwenden, um Ball, Spieler und Tore zu erkennen, verwendet das *CS Freiburg*

* Diese Arbeit wurde unterstützt von der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* (DFG), der *Medien- und Filmgesellschaft Baden-Württemberg mbH* (MFG) und der *SICK AG*, welche Laserscanner zur Verfügung stellte.

** Neue Anschrift: Zentralabteilung Technik, Intelligente Autonome Systeme, Siemens AG, 81730 München.

Team hierfür Laserscanner. Aus den Daten des Scanners werden die eigene Position und die Positionen anderer Spieler extrahiert und zusammen mit der Ballposition, welche durch Daten einer Videokamera bestimmt wird, in einem Weltmodell verwaltet. Das Weltmodell dient als zentraler Baustein für die gesamte Steuerung des Roboters, d.h. Aktionen werden aufgrund verschiedener Situationen (z.B. Ball sichtbar oder nicht sichtbar) ausgewählt.

2 Hardware-Komponenten

Da unsere Arbeitsgruppe nicht spezialisiert ist im Entwurf von Roboterplattformen, wurden handelsübliche Roboter vom Typ *Pioneer-I* benutzt. Die Basisversion des *Pioneer-I* ist jedoch kaum in der Lage guten Fußball zu spielen, da Sensoren und Effektoren hierfür nicht ausreichend sind. Aus diesem Grund wurden eine Reihe zusätzlicher Komponenten auf den Robotern angebracht (siehe Abb. 1).

Abbildung1. Drei der vier Fußballspieler des *CS Freiburg*.

Auf jeden Roboter wurde ein Laserscanner mit einem $180°$-Sichtfeld, $0.5°$ Winkelauflösung und 1cm Entfernungsauflösung, sowie eine Videokamera, die für Ballerkennung und -verfolgung eingesetzt wird, montiert. Um alle lokalen Informationen zu verarbeiten, wurde jeder Roboter mit einem kleinen Notebook, auf dem das *RT-Linux*-Betriebssystem [1] installiert wurde, ausgerüstet. Der Roboter selbst wird über das *Saphira*-System [10] gesteuert. Um schließlich Kommunikation mit einem Rechner außerhalb des Spielfeldes zu ermöglichen, wurde ein drahtloses Funk-Ethernet verwendet.

In der Basisversion des *Pioneer-I*-Roboters gibt es keine sehr effektiven Möglichkeiten, um mit einem Ball umzugehen, ihn auf dem Feld zielgerichtet zu bewegen oder ins gegnerische Tor zu schießen. Aus diesem Grunde wurden flexible Federn für die Ballführung an der Vorderseite angebracht und ein Schussmechanismus aus Teilen des

Märklin Metallbaukasten entwickelt [7]. Da der Kickmechanismus relativ schwach ist, wird gegenwärtig in Zusammenarbeit mit der Ausbildungswerkstatt der SICK AG ein neuer und stärkerer Schussapparat entwickelt.

3 Allgemeine Architektur

Die Roboter sind im Wesentlichen autonome Roboter-Fußballspieler. Jeder Spieler ist mit Sensoren, Effektoren und einem Computer ausgestattet und besitzt ein *Wahrnehmungsmodul*, welches ein lokales Weltmodell erstellt und verwaltet (siehe Abbildung 2). Aufgrund des beobachteten Zustandes im Weltmodell und den durch Funk übertragenen Intentionen der Mitspieler entscheidet das *verhaltensbasierte Steuerungsmodul*, welches Verhalten aktiviert wird. Sofern das ausgewählte Verhalten den Roboter an einen bestimmten Punkt im Spielfeld bewegen möchte, wird das *Pfadplanungsmodul* benutzt, das einen kollisionsfreien Weg zum Zielpunkt berechnet.

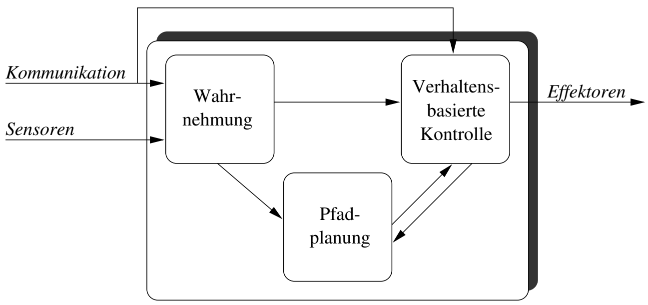

Abbildung2. Spielerarchitektur

Um die Fußballspieler zu initialisieren, zu starten und zu stoppen, und um den Zustand aller Agenten zu überwachen, wird eine drahtlose Ethernet-Verbindung zwischen den On-Board-Computern und einem Rechner außerhalb des Spielfeldes eingesetzt. Der Computer außerhalb des Spielfeldes und die Funkverbindung werden außerdem dazu verwendet, eine *globale Sensorintegration* zu verwirklichen, welche ein *globales Weltmodell* erstellt und verwaltet. Dieses Weltmodell wird regelmäßig an alle Spieler versandt und diese können dadurch ihre lokale Sicht der Welt erweitern.

4 Selbstlokalisierung

Die Entwicklung des *CS Freiburg* Teams begann unter der Hypothese, dass es von großem Vorteil ist, wenn jeder der Spieler genau weiß, wo er sich auf dem Spielfeld befindet. Ausgehend von unseren Erfahrungen mit verschiedenen Selbstlokalisierungsmethoden [4,5] wurde eine neue, schnelle und robuste Methode entwickelt. Die für das *CS Freiburg* RoboCup-Team entwickelte Scan-Matching-Methode extrahiert Liniensegmente aus den Laserdaten und überdeckt diese mit einem apriori Linienmodell des Fußballfeldes, wobei nur Scanlinien berücksichtig werden, die signifikant länger als die Ausmaße eines Roboters sind. Die hierdurch bestimmte Roboterposition wird durch Einsatz eines Kalman-Filters mit den Positionsdaten der Odometrie fusioniert. In mehreren Experimenten wurde dieses Verfahren mit anderen Scan-Matching-Methode verglichen und festgestellt, dass das linienbasierte Verfahren schneller und robuster als punktbasierte Verfahren ist, wobei die Genauigkeit der bestimmten Positionen im Mittel gleich ist [6].

Da die Selbstlokalisation mittlerweile so genau und robust ist, musste an ihr nicht mehr gearbeitet werden. Allerdings haben wir, nachdem wir Ende 1998 neue, genauere und schnellere Scanner von SICK zur Verfügung gestellt bekommen hatten, die Schnittstelle zum Scanner verbessert. Wir lesen die Scans jetzt mit einer Datenrate von 35 bis 40 Scans pro Sekunde ein und vergeben Echtzeit-Zeitstempel, die mikrosekundengenau sind [3].

5 Erstellung lokaler und globaler Weltmodelle

Nachdem das Selbstlokalisierungsmodul einen Scan überdeckt hat, werden alle Scanpunkte, die zur Spielfeldumrandung gehören, entfernt und die verbleibenden Punkte in Cluster aufgeteilt. Für jeden Cluster wird der Schwerpunkt berechnet und als ungefähre Position eines Roboters interpretiert. Diesem Ansatz ist aufgrund der verschiedenen Formen der Roboter ein systematischer Fehler inhärent, den man jedoch in den meisten Fällen ignorieren kann.

Falls die Kamera ein Objekt einer bestimmten Farbe erkennt, so liefert des Bildverarbeitungssystem die Pixelkoordinaten des Objektzentrums zusammen mit dessen Breite, Höhe und Größe. Aus diesen Daten wird die relative Ballposition bezüglich des Roboterkoordinatensystems berechnet, indem Pixelkoordinaten auf Polarkoordinaten (Abstand und Winkel zum Roboter) abgebildet werden. Die Abbildungsfunktion wird in einem Kalibrierungsschritt für einen Satz von vorgegebenen Positionen gelernt und für alle anderen Pixelkoordinaten wird interpoliert [16]. Um die Robustheit, Zuverlässigkeit und Reichweite der Ballerkennung zu verbessern, werden außerdem weitere Schritte, wie Konturerkennung und Plausibilitätsüberprüfungen vorgenommen [15].

Aus der geschätzten Position des Spielers, der Positionen der anderen Objekte und des Balls – sofern sichtbar – konstruiert der Fußballagent sein eigenes *lokales Weltmodell*. Durch Verwalten einer Historie der Positionen aller Objekte können Orientierung und Geschwindigkeit der Objekte bestimmt werden. Ein Kalman-Filter wird eingesetzt, um Rauschen in den Sensorbeobachtungen zu reduzieren. Position, Orientierung und Geschwindigkeit werden an das Modul der *globalen Sensorintegration* geschickt, das ein globales Weltmodell aufbaut, das an alle Spieler verschickt wird.

Das globale Weltmodell wird aus den zeitgestempelten Daten die jeder Spieler an die globale Sensorintegration schickt, generiert. Durch diese Schätzungen ist es einfach Freund und Gegner zu unterscheiden. Zu wissen wer und wo die eigenen Mitspieler sind, ist natürlich sehr hilfreich, um ein kooperatives Spiel zu ermöglichen. Eine andere Information, die sehr hilfreich ist, ist die globale Ballposition. Das Bildverarbeitungssystem kann den Ball nur bis zu einer Entfernung von 3–4 Metern erkennen. Die globale

Ballposition zu wissen, selbst wenn der Ball nicht direkt sichtbar ist, ermöglicht dem Spieler seine Kamera in Richtung des Balles zu drehen, was eine Suche nach dem Ball durch Herumdrehen vermeidet. Dies ist insbesondere für den Torwart wichtig, der sonst möglicherweise einen Ball zu seiner linken übersieht, da er vielleicht gerade zu seiner rechten nach ihm sucht.

Zur Verbesserung der Ballpositionsschätzung im Team wurde für RoboCup'99 eine wesentlich robustere globale Fusion der Ballbeobachtungen entwickelt, die auf einer Kombination von Markov-Lokalisierung für eine hohe Robustheit und Kalman-Filterung für eine hohe Genauigkeit beruht [2].

6 Steuerung und Kooperation

Die Entscheidungen eines Fußballagenten basieren hauptsächlich auf der augenblicklichen Situation seines lokalen Weltmodells. Um jedoch ein kooperatives Teamverhalten zu verwirklichen, werden die tatsächlichen Entscheidungen auch aufgrund einer *Rollenzuteilung* und durch Austausch der Intentionen der Spieler getroffen.

6.1 Aktionsauswahl

Im 98'er Team wurde die Aktionsauswahl durch wenige, hierarchisierte Regeln vorgenommen. Dies führte dazu, daß selbst kleine Veränderungen am Auswahlsystem mit großer Sorgfalt vorgenommen und getestet werden mussten, da sich jede Modifikation einer Regel auf nachstehende Regeln auswirkte. Aus diesem Grund wurde die Aktionswahl grundlegend überarbeitet und verfeinert, wobei das Hauptziel war, die Aktionsauswahl modularer zu gestalten [13]. Statt Situationsanalyse, Durchführung und Ablaufkontrolle einer Aktion getrennt zu modellieren, werden diese Elemente, ähnlich wie bei *Verhaltens-Netzwerken* [12], in s.g. *Aktions-Modulen* zusammengefasst. Diese sind untereinander nicht hierarchisiert und stehen über einen *Aktivierungsfaktor* miteinander im Wettbewerb um die Ausführung ihrer zugehörigen Grundfertigkeiten.

Das folgende Schema zeigt den Aufbau eines *Aktions-Moduls*:

`defmodule` *Name*	
`precondition-set`	$\{p_1, \ldots, p_n\}$
`invariant-set`	$\{p'_1, \ldots, p'_m\}$
`activation`	$f_{Name}(s)$
`control-function`	$Control_{Name}$
`action`	$[b_1, \ldots, b_k]$

Ein Modul besteht zunächst aus einer Liste von Vorbedingungen bzw. Invarianten, die zur Auswahl bzw. während der Ausführung der Aktion erfüllt sein müssen. Diese Listen setzen sich aus Prädikaten zusammen, die entweder direkt aus dem Weltmodell (z.B. **InFrontOfOpponentsGoal(*Object*)**), durch eine erweiterte Auswertung (**NotOccludedByObject(*Ball*)**) oder durch Kommunikation mit Mitspielern (**TeammateGetsBall**) gewonnen werden. Zur Bestimmung komplexer Prädikate wird eine Potentialfeldmethode eingesetzt [14], die einer Spielfeldkoordinate einen reellen Wert zuordnet

($g : \mathbf{R}^2 \rightarrow [0,1]$), der eine bestimmte Eigenschaft der jeweiligen Position repräsentieren soll. Die entsprechenden Prädikate (mit kontinuierlichem Wertebereich) können aus dieser Darstellung direkt „abgelesen“ werden. Abbildung 3 zeigt eine Darstellung des Potentialfelds für das Prädikat **NotOccludedByObject(*Ball*)**.

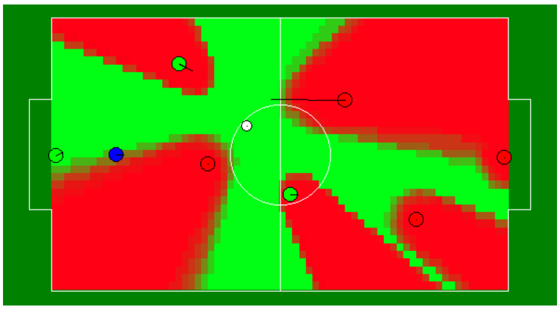

Abbildung3. Das Potentialfeld $g_{ballview}$

Die Aktivierungsfunktion ($f(s) \in [0,1]$) bestimmt den Nutzen der betreffenden Aktion in der Situation s. Der eigentliche Auswahlalgorithmus beschränkt sich somit darauf, das Modul mit dem größten Wert der Aktivierungsfunktion zu bestimmen.

Der modulare Aufbau des Auswahlmechanismus erlaubt es nun, neue Aktionen in intuitiver und übersichtlicher Weise in ein bestehendes System zu integrieren. Weiterhin kann durch den Einsatz komplexerer Funktionen zur Ablaufkontrolle der Übergang zwischen verschiedenen Grundverhalten und Aktionen flexibler, d.h. in Abhängigkeit der momentanen Situation, gestaltet werden. Beispielsweise kann die Aktion, die einen Spieler in Ballbesitz bringen soll, langsamer und damit genauer erfolgen, falls sich kein gegnerischer Spieler in der Nähe befindet oder schneller und ungenauer, falls sich dadurch eine gute Torchance wahrnehmen lässt.

6.2 Multi-Agenten-Koordination

Würde die Aktionsauswahl aller Fußballspieler identisch sein, so würde ein „Schwarm von Robotern“ dem Ball hinterherjagen und die Spieler würden sich sehr wahrscheinlich gegenseitig behindern. Eine Möglichkeit, dieses Problem zu vermeiden, ist es, den Spielern verschiedene *Rollen* zuzuordnen.

Im ’98er Team waren diese Rollen mit fixen Kompetenzbereichen assoziiert, in denen der jeweilige Spieler sich um den Ball gekümmert hat. Im ’99er Team wurde dann die Aufstellung der Spieler flexibler gestaltet. Die Rollenverteilung (Verteidiger, Mittelfeldspieler oder Angreifer) unter den Mannschaftsmitgliedern wird dynamisch vorgenommen, indem jeder Spieler eine temporäre Grundposition auf dem Spielfeld anhand der aktuellen Spielsituation bestimmt. Eine Aktion **GoHome** sorgt dafür, das die Spieler diese Position einnehmen, falls keine andere Aktion einen höheren momentanen Nutzen besitzt. Durch den Einsatz der Kommunikation wird verhindert, dass zwei Spieler die gleiche Rolle und damit die selbe Position einnehmen wollen. Dieser Mechanismus ermöglicht es, unabhängig von der eigentlichen Aktionsauswahl, strategische Entscheidungen zu treffen und ein flexibles, kooperatives Verhalten der Agenten zu realisieren.

Sobald ein Spieler in einer guten Situation ist, um den Ball zu spielen, sendet er sogenannte *Clear-Out*-Nachrichten an alle Mitspieler. Empfängt ein Mitspieler eine solche Nachricht, so versucht er, dem angreifenden Spieler aus dem Weg zu gehen, indem er an den Spielfeldrand fährt. Dies verhindert, dass sich Spieler gegenseitig behindern. Weitere Nachrichtentypen werden eingesetzt, um z.B. abzusprechen, wer zum Ball gehen soll, oder um die Möglichkeit eines Passes vor dem Torraum – wie er im Halbfinalspiel gegen Italien beim RoboCup'99 demonstriert wurde – zu realisieren. Die Vorbedingung für die Aktivierung letzteren Schemas war dabei, dass ein direkter Torschuss nicht möglich ist.

7 Wegeplanung

Einige der oben beschriebenen Basisfähigkeiten betreffen die Bewegung des Fußballroboters zu einer Zielposition auf dem Spielfeld. Während diese Aufgabe sicherlich verhaltensbasiert realisiert werden kann, wurde ein Bewegungsplaner hierfür eingesetzt, um Probleme wie beispielsweise die Ansteuerung lokaler Minima im Konfigurationsraum zu vermeiden.

Bewegungsplanung unter dem Vorhandensein bewegter Hindernisse ist bekanntlich ein rechenzeitaufwendiges Problem [11]. Aus diesem Grund wurde das Problem der Pfadplanung mit bewegten Hindernissen approximiert, indem für die Wegesuche alle Objekte als stationär betrachtet werden. Obwohl solch eine Vorgehensweise unangemessen in einer Umgebung mit hoher Dynamik zu sein scheint, hat die Erfahrung gezeigt, dass gegnerische Spieler sehr oft als stationäre Objekte betrachtet werden können. Zudem ist die implementierte Pfadplanung so effizient (wenige Millisekunden für 4–5 Hindernisse), dass laufend neu geplant werden kann.

Während für den RoboCup'98 die Methode des *erweiterten Sichtbarkeitsgraphen* [11] verwendet wurde [18], wurde im folgenden Jahr ein auf Potentialfeldern basiertes Verfahren eingesetzt [17]. Die Gründe für diesen Wechsel waren, dass das erstere Verfahren zwar die kürzesten, aber nicht unbedingt schnellsten und sichersten Wege bestimmt.

8 Erfahrungen bei Turnieren

Die empirische Performanz des *CS Freiburg* Teams ist sehr zufriedenstellend. Bei seinem ersten Auftritt im RoboCup'98 gewann das Team die Weltmeisterschaft, hatte das beste Torverhältnis (12:1) und verlor keines der Spiele. Dass diese Leistung kein Zufall war, wurde auf der Deutschen Meisterschaft *VISION-RoboCup'98* bewiesen, bei dem das Team ebenfalls ungeschlagen gewann. Die Teilnahme an RoboCup'99 war ebenfalls erfolgreich und das Team schloss mit einem Torverhältnis von 33:2 und einem sehr spannenden Halbfinalspiel gegen die Mannschaft aus Italien mit dem dritten Platz ab. Beim später stattfindenden *VISION-RoboCup'99* konnte das Team dann wieder ungeschlagen den ersten Platz erringen.

Die Schlüsselkomponenten für diesen Erfolg sind vermutlich die Selbstlokalisierungs- und Objekterkennungsmethoden, die auf Daten des Laserscanners basieren und es erlauben, genaue und zuverlässige lokale und globale Weltmodelle zu erstellen. Auf Basis dieser Weltmodelle wurde es möglich, reaktive Pfadplanung, fein justierte Verhalten und Multi-Agenten-Kooperation zu verwirklichen, was sehr hilfreich für ein gutes und erfolgreiches Spiel ist.

Literatur

1. M. Barabanov and V. Yodaiken. Introducing real-time Linux. *Linux Journal*, 34, 1997.
2. M. Dietl. Globale Sensorfusion im Roboterfußball. Studienarbeit, Universität Freiburg, 1999.
3. B. Dümler. Positionsbestimmung mit Laserscannern in Echtzeit. Studienarbeit, Universität Freiburg, 1999.
4. J.-S. Gutmann, W. Burgard, D. Fox, and K. Konolige. An experimental comparison of localization methods. In *IROS'98*, Victoria, Oct. 1998.
5. J.-S. Gutmann and C. Schlegel. Amos: Comparison of scan matching approaches for self-localization in indoor environments. In *EUROBOT'96*, pages 61–67, 1996.
6. J.-S. Gutmann, T. Weigel, and B. Nebel. Fast, accurate, and robust self-localization in polygonal environments. In *IROS'99*, Kyongju, Oct. 1999.
7. I. Herrmann. Roboter-Schussvorrichtung. Memo, Universität Freiburg, Feb. 1999.
8. H. Kitano, editor. *RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I*, volume 1395 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Springer-Verlag, 1998.
9. H. Kitano, M. Asada, Y. Kuniyoshi, I. Noda, E. Osawa, and H. Matsubara. RoboCup: A challenge problem for AI and robotics. In Kitano [8], pages 1–19.
10. K. Konolige, K. Myers, E. H. Ruspini, and A. Saffiotti. The Saphira Architecture: A Design for Autonomy. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 9:215–235, 1997.
11. J.-C. Latombe. *Robot Motion Planning*. Kluwer, Dordrecht, Holland, 1991.
12. P. Maes. Situated agents can have goals. In P. Maes, editor, *Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology to Engineering and Back*, pages 49–70. MIT Press, Cambridge, MA, 1990.
13. C. Reetz. Aktionsauswahl in dynamischen Umgebungen am Beispiel Roboterfußball. Diplomarbeit, Universität Freiburg, 1999.
14. A. Tews and G. F. Wyeth. MAPS: A system for multi-agent coordination. *Advanced Robotics*, 1999. accepted for publication.
15. M. Thiel. Roboterfußball: Zuverlässige Ballerkennung und Positionsschätzung. Diplomarbeit, Universität Freiburg, 1999.
16. A. Topor. Ballerkennung beim Roboterfußball. Studienarbeit, Universität Freiburg, Jan. 1999.
17. A. Topor. Roboterfußball: Pfadplanung in dynamischen Umgebungen. Diplomarbeit, Universität Freiburg, 1999.
18. T. Weigel. Roboter-Fußball: Selbstlokalisierung, Weltmodellierung, Pfadplanung und verhaltensbasierte Kontrolle. Diplomarbeit, Universität Freiburg, Jan. 1999.