



Dr. Ansgar Bredendfeld, Thilo Weigel

Kickende Computer

Blick in das Innenleben von Fußballrobotern

2050 sollen humanoide Roboter den amtierenden Fußball-Weltmeister vom Platz fegen wie einst Deep Blue den Schach-Weltmeister Garry Kasparov. Noch erinnern die kickenden Computer aber eher an den tonnenförmigen R2D2 als an den graziilen C3PO. Ein Blick unter die Haube zeigt Grenzen und Möglichkeiten der Fußball-Automaten von heute.

Entschlossen bewegt sich der Spieler auf den Ball zu, bringt ihn vorsichtig unter Kontrolle, sprintet vorwärts, umdribbelt einen Gegner und schießt den Ball schließlich unhaltbar am gegnerischen Torwart vorbei ins lange Eck. Könnte der Roboter hören, würde er den Applaus von den bis auf den letzten Platz belegten Tribünen registrieren.

Aber Roboter sind einsame Spieler - nachdem ihnen der Startpfiff per Funk übermittelt worden ist, sind die elektronischen Kicker vollkommen auf sich alleine gestellt. 'Wo bin

ich?', 'Wo sind Ball, Gegen- und Mitspieler?', 'Was soll ich tun?' - ständig aufs Neue muss der Roboter hierauf Antworten finden und in die Tat umsetzen. Die zum Zuschauen verdammten Entwickler bangen mit ihren Schützlingen, ob sich die rasenden Roboter tatsächlich so verhalten wie vorgesehen. Denn durch ihre Sensoren nehmen die Roboter die Welt fundamental anders wahr als wir Menschen und verblüffen daher oft durch unvorhergesehen elegante Spielzüge oder aber auch durch Verhaltensweisen, die bei Entwicklern und Zuschau-

ern auf völliges Unverständnis stoßen.

Fortschrittlicher Wettbewerb

Nach dem Abpfiff stehen die Entwickler verschiedener Teams oft noch lange beieinander und tauschen Erfahrungen aus. Die Wettkampfatmosphäre hat sich verflüchtigt und das Interesse an der Forschung steht wieder im Vordergrund. Die Wissenschaftler aus aller Welt arbeiten während eines Turniers oft bis spät in die Nacht an ihren Robotern. Denn nur selten bietet sich die

Gelegenheit, ihre Systeme im Wettkampf zu erproben und mit anderen Teams zu vergleichen.

Und hierin liegt genau der Sinn und Zweck des 'Robot Soccer World Cup': die Grundlagenforschung im Überlappungsbereich von Künstlicher Intelligenz und Robotik zu stimulieren, den direkten Vergleich alternativer Forschungsansätze zu ermöglichen und vor allem den wissenschaftlichen Fortschritt transparent und für jedermann zugänglich zu machen. Die RoboCup-Weltmeisterschaft, die in diesem Jahr vom 19. bis zum 25. Juni im japanischen Fukuoka stattfindet, ist immer verbunden mit einem wissenschaftlichen Symposium, auf dem die Forscher ihre neuesten Verfahren und Ergebnisse vorstellen. Die Atmosphäre ist allerdings sehr viel kooperativer als bei der menschlichen Fußballweltmeisterschaft: Auch wenn RoboCup ein Wettbewerb ist, werden Erfahrungen, Ersatzteile und selbst Ergebnisse bereitwillig ausgetauscht.

Die Middle Size League des RoboCup ist ein besonders effizientes Demonstrationsszenario für autonome Roboterteams. Im Unterschied zu anderen RoboCup-Ligen haben die Roboter alle Sensoren an Bord und nehmen auch einen Laptop oder ganze PCs huckepack. Sie müssen vollständig autonom und ohne externe Hilfe wahrnehmen und agieren. Aus diesem Grund gilt diese Liga auch als die 'Königsklasse': Drei Feldspieler und ein Torwart pro Team treten auf einem zehn mal fünf Meter großen Feld gegeneinander an.

Das CS-Freiburg-Team - dreimal Weltmeister in der Middle Size League - verwendet beispielsweise als Basis die Pioneer-I-Roboter von ActiveMedia. Ab Werk ausgerüstet mit Fahrwerk, Motorcontroller und Abstandssensoren auf Ultraschallbasis, wurden diese Roboter in den Freiburger Labors allerdings mit Kamerasystem, Laserscanner und Kickmechanismus erweitert und im Laufe der Jahre stetig optimiert, so dass nur noch das Gehäuse an den ursprünglichen Robotern erinnert.

Die AIS-Robots des Fraunhofer Instituts für Autonome Intelligente System (AIS) in Sankt Augustin sind hingegen eine

komplette Eigenentwicklung - seit 1998, und mittlerweile schon in der sechsten Generation -, die nunmehr auch kommerziell erhältlich ist. Die stetige Weiterentwicklung der Komponenten hat von dem Ursprungsmodell lediglich das nackte Aluminiumchassis übrig gelassen: Räder, Batteriesystem, Spannungsversorgung, Motorcontroller, Abstandssensoren, Kameras und Bord-PC wurden seit dem ersten Modell grundlegend überarbeitet.

Die Vielfalt der Roboter in der Middle-Size League ist groß. Die Spanne reicht von quirligen Kleinen, die schon einmal von einem kräftigen Schuss aus der Bahn gebracht werden, bis zu unbeirrbar Großen, die bis an die Grenzen der geltenden Dimensions- und Gewichtsbeschränkungen gehen - Schwergewichte, die bei Ausfällen oder nach einem Foul von zwei Betreuern vom Feld getragen werden müssen wie die Boliden des CFT Philips, die Gewinner der GermanOpen 2002.

Antrieb und Sensoren

So groß die Vielfalt der Robotertypen auch ist - in ihrem grundsätzlichen Aufbau gibt es große Gemeinsamkeiten: So bewegen sich alle bisher auf Wettbewerben aufgetretenen Roboter auf Rädern fort. Das Spektrum reicht vom konventionellen Zweiradantrieb mit Stützrollen über trickreich lenkbare Einzelräder bis hin zu omnidirektionalen Antrieben, mit denen ein Roboter in jedem Moment in jede beliebige Richtung fahren kann. Bei diesen holonomen Antrieben besteht die Radlauffläche selbst wieder

aus Rollen, deren Achsen senkrecht zur Radachse stehen und dadurch eine Seitwärtsbewegung des Rades ermöglichen. Ein sehr flexibler Antrieb, der aber durch seine Anfälligkeit zum Durchdrehen der Räder die exakte Positionierung des Roboters erschwert und keine brauchbaren Odometriedaten liefert, das heißt von der Drehzahlmessung der Räder kann nicht zuverlässig auf die tatsächlich zurückgelegte Strecke geschlossen werden. Beim Systementwurf des Roboters müssen derartige Nachteile durch geeignete Sensoren und Kontrollmechanismen kompensiert werden.

Fast alle Teams verwenden als Hauptsensor eine oder mehrere Kameras. Die Vielfalt reicht von starr montierten, schwenkbaren (pan) oder dreh- und kippbaren Kameras (pan/tilt) bis zu omnidirektionalen Kamerasystemen. Letzteres verschafft auch dem Torwart der AIS-Robots mit einem speziell geformten Spiegel eine 360 Grad-Rundumsicht auf das Spielfeld. Je nach Form bildet der Spiegel das Spiegelscheitern um den Roboter mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung und Verzerrung auf den CCD-Chip der Kamera ab. Die entstehende Bildverzerrung kann durch geeignete Bildtransformationen wieder herausgerechnet werden. Den vergrößerten Blickwinkel muss ein solcher Roboter aber mit einer gegenüber herkömmlichen Kamerasystemen deutlich verringerten Ortsauflösung bezahlen.

Nur wenige Teams stützen sich ausschließlich auf eine kamerabasierte Erfassung ihrer Umwelt. Andere Abstandssensoren unterschiedlichster Typen kommen zusätzlich zum Einsatz. Gängig sind Ultraschallsensoren, die auch schon als Einparkhilfe manche Stoßstange eines PKWs zieren, oder Infrarotsensoren, die die Laufzeit und Phase eines Laserimpulses messen, der von einem Hindernis reflektiert wird. Mit der Laufzeitmessung erreicht man ohne Probleme eine Reichweite von zehn Metern bei einer Messgenauigkeit von einem Zentimeter.

Da die Fußballroboter natürlich auch kicken sollen, kommt den mechanischen Schussvorrichtungen eine besondere Rolle zu. Gerade an dieser Komponente können Teams mit me-



Finale der RoboCup German Open 2002: CFT Philips besiegt CS Freiburg mit 5:2 nach Elfmeterschießen.

chatronischen Vorlieben ihrer Phantasie freien Lauf lassen. Die Spanne reicht von simplen starren oder beweglichen Führungen mit erstaunlich einfallreich ausgewählten haftenden Oberflächen bis hin zu elektronisch geregelten pneumatischen Vorrichtungen, die in der Lage sind, den Ball gezielt in eine bestimmte Richtung zu schießen. Novum auf der letzten RoboCup German Open 2002 in Paderborn war die Schussvorrichtung des Newcomers CFT Philips, die in der Lage ist, den Ball auf bisher unübliche sechs Meter pro Sekunde zu beschleunigen. Da macht schon mal ein unbefestigtes Tor einen Satz nach hinten.

Um Sensorik und Aktorik eines Fußballroboters zu kontrollieren, verfügt jeder Fußballroboter über mindestens einen Bordrechner - üblicherweise Notebooks oder Desktop-PCs, auf denen eher Linux- als Microsoft-Betriebssysteme zu finden sind. Die Ansteuerung der Motoren und die Schnittstelle zu den Sensoren wird häufig durch spezielle Mikrocontroller übernommen, eingebettete Systeme, die über serielle Schnittstellen oder wie bei den AIS-Robots über den schnelleren CAN-Bus mit dem Bord-PC verbunden sind. Der CAN-Bus erlaubt eine Datenübertragungsrate von maximal 1 MBit pro Sekunde und ist extrem zuverlässig.

Zur Kommunikation mit ihren Mannschaftskameraden verwenden die Maschinen in der Regel ein Funknetzwerk (IEEE802.11b). Während der Wettbewerbe kann dieser Funkverkehr allerdings aufgrund von

Überlastung auch schon mal völlig zusammenbrechen. Derart widrige Bedingungen werden bei der Konzeption der Kooperationsmechanismen aber berücksichtigt, damit die Roboter auch bei Funkstille weiterhin zielgerichtet und teamorientiert handeln können.

Hardware und Software

Die Hardware des Roboters ist allerdings nur ein Aspekt des technischen Gesamtsystems Fußballroboter. Der oftmals schwierigere Teil ist das Softwaresystem, das ihn in die Lage versetzen muss, autonom auf der Grundlage seiner Sensorinformationen zielgerichtet Aktionen im Team auszuführen - und dies in einer hochdynamischen Umgebung, in der er in Echtzeit reagieren beziehungsweise reagieren muss und ihm zusätzlich gegnerische Roboter das Leben schwer machen.



Fußball-Roboter des CS Freiburg: Nur das Gehäuse erinnert noch an einen Pioneer-Roboter.



Feldspieler der AIS-Robots aus Sankt Augustin



Die Kamera eines FU-Fighters wird vor dem Spiel kalibriert.

Bevor ein Roboter zur Tat schreitet, stellt sich ihm eine wichtige Frage, an die menschliche Fußballspieler gewöhnlich nicht viele Gedanken verschwenden. Wo auf dem Spielfeld befinde ich mich eigentlich? Sicherlich wird die Beantwortung dieser Frage durch die markante Farbgebung der Spielumgebung vereinfacht. Der Ball ist rot, die Tore sind gelb oder blau und an den Ecken des Spielfeldes stehen in diesem Jahr unübersehbare gelb-blau gestreifte Zylinder. Alle Schritte in der Bildverarbeitung - von der Farbsegmentierung über die Erkennung gleichfarbiger Flächen (Blobs) und der Transformation der Bildregionen zu Positionen auf dem Feld - müssen in wenigen Millisekunden ausgeführt werden. Je schneller der Roboter fährt, desto schwieriger wird diese Aufgabe, da dann zusätzlich berücksichtigt werden muss, dass sich der Roboter seit der Aufnahme des Bildes beträchtlich fortbewegt hat. Erschwerend kommt hinzu, dass die Farbsegmentierung sehr stark von den Beleuchtungsverhältnissen auf dem Spielfeld abhängt - häufig ein Grund, warum vor einem Spiel der ein oder andere Entwickler vor seinem Roboter liegt, um die Bildverarbeitung zu kalibrieren.

Sollen eine detektierte Farbfläche oder Linie zur Selbstlokalisierung des Roboters verwendet werden, muss ihre Lage im Bild in eine Koordinate relativ zum Roboter umgerechnet werden. Die schwenkbare Kamera des AIS-Robots wird beispielsweise so gesteuert, dass die rote Fläche, die den Ball

darstellt, stets in der Mitte des Kamerabildes erscheint. Nun kann aus der Position der unteren Kante mit Hilfe einer Entfernungstabelle eine Balldistanz geschätzt werden. Der Winkel zum Ball ergibt sich durch Auslesen eines Winkelcodierers, der an der schwenkbaren Kamera montiert ist.

Neben Kameras werden Laserscanner zur Selbstlokalisierung eingesetzt. Das CS-Freiburg-Team hat beispielsweise ein Verfahren entwickelt, bei dem Linien, die aus den Messpunkten eines Laserscans gewonnen werden, mit den Linien eines Spielfeldmodells in Deckung gebracht werden. Aus der Überdeckung kann der Spieler dann auf die Position schließen, an der er sich mit großer Wahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt der Scanaufnahme befunden hat. Andere Spieler können danach sehr leicht geortet werden: Alle Messpunkte, die nicht auf den Linien liegen, werden als andere Roboter interpretiert. Vor allem mit Banden als Spielfeldbegrenzung konnte mit diesem Verfahren die Position und Orientierung des Roboters sehr exakt und zuverlässig bestimmt werden. Da nach neuen Spielregeln aber mittlerweile ohne Banden gespielt wird, ist die Selbstlokalisierung mit Laserscannern nun wieder eine Herausforderung.

Statistik gegen Rauschen

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der so genannten Pose (Position und Orientierung) des Roboters ist die so genannte Markov-Lokalisierung, die grundsätzlich mit Daten verschiedener Sensoren umgehen kann. Hierbei wird für jede

Roboter-Fußball-Links

www.robocup.org - Die RoboCup Federation veranstaltet seit fünf Jahren jährliche RoboCup-Weltmeisterschaften, bisher in Nagoya (1997), Paris (1998), Stockholm (1999), Melbourne (2000) und Seattle (2001).

www.fira.net - zur RoboCup Federation konkurrierender Dachverband, der sich eher auf kleinere Roboter konzentriert.

www.robocup.de - Der AK RoboCup ist ein Arbeitskreis der Gesellschaft für Informatik (GI), in dem die deutschen RoboCup-Aktivitäten zusammengeführt werden. Hier findet sich auch eine Liste der deutschen RoboCup-Aktivitäten an Universitäten und in Forschungseinrichtungen.

www.ais.fraunhofer.de/dfg-robocup - Im Schwerpunktprogramm 'Kooperierende Teams mobiler Roboter

in dynamischen Umgebungen' werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft seit Juni 2001 14 wissenschaftliche Projekte im Themenfeld des RoboCup gefördert.

www.robocup-german-open.de - Der offene Deutsche RoboCup-Wettbewerb, der erstmalig 2001 und im April 2002 zum zweiten Mal in Paderborn stattgefunden hat.

www.robocup2002.org - RoboCup-Weltmeisterschaft 2002, die vom 19. bis zum 25. Juni in Fukuoka, Japan, stattfindet.

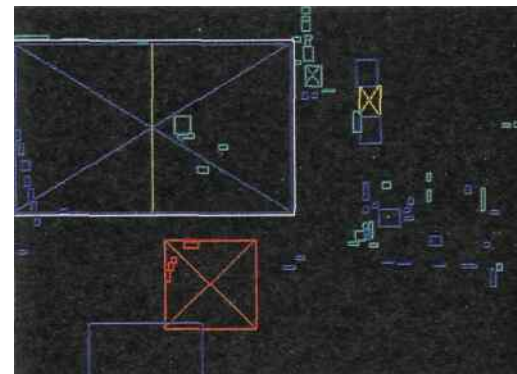
www.cs-freiburg.de - Teamseite des CS Freiburg

www.ais.fraunhofer.de/BE/robocup - Teamseite der AIS-Robots

www.informatik.uni-freiburg.de/~kiro - Kiro - der Kickerroboter der Universität Freiburg.

mögliche Pose des Roboters die Wahrscheinlichkeit geschätzt, mit der sich der Roboter an der entsprechenden Stelle auf dem Spielfeld befindet. Bei der Ausweitung der Sensorinformationen werden diese Wahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von den aktuellen Daten modifiziert. Passt eine Pose zu den aktuellen Sensoreindrücken, wird ihre Wahrscheinlichkeit erhöht, passt sie nicht, wird ihre Wahrscheinlichkeit erniedrigt. Damit derartige 'probabilistische' Verfahren aber auf einem Roboter in Echtzeit realisierbar sind, wer-

den nicht die Wahrscheinlichkeiten für alle möglichen Posen berechnet, sondern nur für ausgewählten Stichproben (Partikel). Jede Stichprobe repräsentiert eine Annahme über die Pose des Roboters. Diese wird in Abhängigkeit von der gemessenen Roboterbewegung mit einem Zufallsanteil fortgeschrieben und anschließend in Abhängigkeit der Sensordaten auf ihre Plausibilität hin überprüft. Fällt hierbei die Wahrscheinlichkeit eines Partikels unter einen Schwellwert, wird die zugehörige Stichprobe durch



Torszene aus Robotersicht: Deutlich sichtbar der detektierte rote Ball, das blaue Tor und der Eckpfosten. Die kleineren blauen Flächen sind Störungen, die durch Kalibrierung und Filterung vermindert werden müssen.

eine neue ersetzt. Dieses als Monte-Carlo-Lokalisation bekannte Verfahren wird auf den AIS-Robots und beim CS Freiburg eingesetzt und erlaubt selbst bei sehr verrauschten Sensordaten noch eine zuverlässige Lokalisierung der Roboter.

Die Daten von Kamera, Laserscanner und anderen Sensoren liefern alle einen Beitrag zur Gesamtwahrnehmung des Roboters. Die verschiedenen Datenquellen mit all ihren Störungen und ihrem Rauschen müssen sowohl zeitlich als auch bezüglich der Wahrnehmungen synchronisiert und fusioniert werden. Da aus der Historie der Sensoreindrücke auch die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit eines wahrgenommenen Roboters berechnet werden kann, diese Information genutzt werden, um die Positionsschätzung durch verschiedene Sensoren auf einen gemeinsamen Zeitpunkt zu projizieren. Mit einem so genannten Kalmanfilter können diese dann so fusioniert werden, dass die resultierende Schätzung mit größtmöglicher Wahrscheinlichkeit der realen Position entspricht.

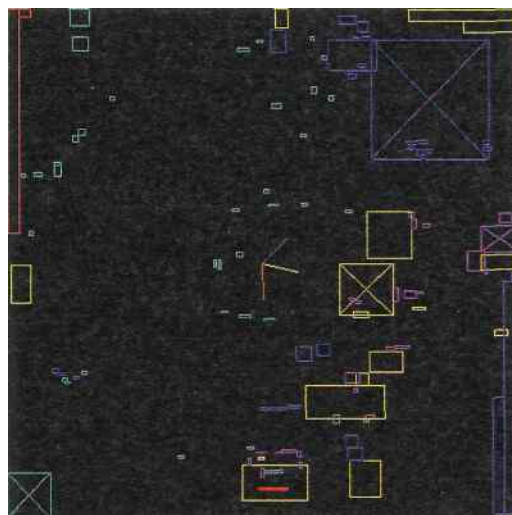
Alles unter Kontrolle

Doch wie verwendet ein Spieler nun sein gesammeltes Umgebungswissen für die Planung und Ausführung von Aktionen? Da unmöglich eine Funktion bestimmt werden kann, die in jeder beliebigen Situation direkt das erwünschte Verhalten des Roboters angibt, werden in der Regel bausteinhafte Elementarverhalten spezifiziert, aus deren Zusammenspiel sich das Gesamtverhalten eines Spielers ergeben soll. Allerdings hat jedes Team seine eigenen Vorstellungen davon, was diese Bausteine leisten können sollen. Die Beschaffenheit eines Elementarverhaltens ist zum einen eng an die verwendete Hardware geknüpft, zum anderen ist sie aber auch stark davon abhängig, wie die Verhalten später ausgewählt und zusammengesetzt werden sollen.

Grundsätzlich verfügen die meisten Teams über Elementarverhalten, mit denen sich ein Roboter etwa auf dem Spielfeld positioniert, den Ball sucht, zum Ball fährt, mit dem Ball dribbelt oder den Ball schießt. Da Fouls im RoboCup rigoros mit gelben



Das Spielfeld aus Sicht des AIS-Torwartes: links das Kamerabild, im rechten Teil das gleiche Bild nach der Erkennung der gelben, blauen und roten Farbflächen.



oder gar roten Karten geahndet werden, muss das Verhaltensrepertoire auch reflexartige Handlungen, zum Beispiel zur Hindernisvermeidung, umfassen. Gerade die Kopplung von erwünschten und unbedingt auszuführenden Aktionen schafft aber oft Probleme. Zappelt ein Spieler aufgeregt auf der Stelle herum, so leidet er nicht unbedingt an defekter Hardware: Er könnte auch durchaus gerade an dem Versuch scheitern, gleichzeitig zum Ball fahren und einem Hindernis ausweichen zu wollen. Dies wäre zum Beispiel der Fall, wenn 'Fahre zum Ball' immer versuchte, den Roboter in Richtung Ball auszurichten, während 'Vermeide-Hindernis' den Roboter stets in eine andere Richtung drehen wollte, um einem anderen Roboter ausweichen zu können.

Das Problem derartig oszillierenden Verhaltens wird in der Regel gelöst, indem man Verhaltensweisen mit einer gewissen Persistenz ausstattet, die sicherstellt, dass eine Aktion für eine bestimmte Mindestdauer ausgeführt wird. Da der Spieler in dieser Zeitspanne zwar seine Reflexe beibehält, aber sonst nur bedingt auf sich ändernde Umgebungsbedingungen - etwa eine veränderte Ballposition - reagiert, opfert man hiermit ein wenig Reaktionsgeschwindigkeit des Roboters - was bei wenigen Sekunden aber nicht allzu sehr ins Gewicht fällt.

Gerade das sichere Navigieren auf dem Spielfeld stellt eine wichtige Fähigkeit eines Spielers dar. Aus diesem Grund

haben viele Teams Pfadplaner entwickelt, die explizit einen sicheren Weg zur Zielposition berechnen. Um kollisionsfrei zum Ball zu gelangen, können die Spieler solcher Teams einfach einen Pfad planen und abfahren, allerdings müssen die Pfade neu geplant werden, wenn sich insbesondere durch schnelle Bewegungen anderer Roboter die Voraussetzungen geändert haben.

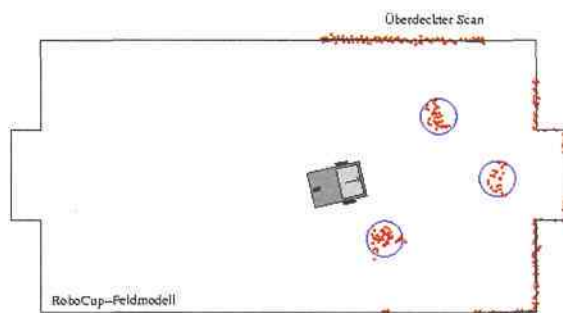
Reaktion und Planung

Es existiert eine Vielzahl verschiedener Methoden zur Pfadplanung. Die von den CS-Freiburg-Robotern verwendete Potenzialfeldmethode ordnet den Spielfeldrändern und erkannten Hindernissen eine abstoßende und der Zielposition eine anziehende Kraft zu. Folgt der Roboter in dem resultierenden Kraftfeld nun stets der anziehenden Kraft, so gelangt er ohne Kollisionen zu seinem Ziel. Eine Erweiterung des Verfahrens stellt sicher, dass der Roboter immer zum Ziel findet und sich nicht in 'Sackgassen' verläuft.

Wie entscheidet nun ein Spieler, welche Elementarverhalten

er in einer bestimmten Situation aktivieren soll? Auch auf diese Frage gibt es so viele Antworten wie RoboCup-Teams. Grundsätzlich unterscheiden sich die verschiedenen Aktionsauswahlverfahren in dem Anteil ihrer reaktiven und deliberativen (also stärker 'überlegenden') Komponenten. Stark reaktiv ausgerichtete Teams, wie beispielsweise der letztjährige Vizeweltmeister 'Osaka Trackies' fallen auf Turnieren in der Regel durch ihre ungeheuer schnelle, aber auch sehr nervös wirkende Spielweise auf. Rein reaktiv funktionierende Spieler schauen weder in die Vergangenheit noch berücksichtigen sie Erwartungen über die Zukunft: bei der Aktionsauswahl zählt für sie einzig ihr aktueller Sensoreindruck. Ein einfaches reaktives Kontrollprogramm würde so beispielsweise immer genau dann einen Schuss auf ein Tor auslösen, wenn der wahrgenommene Ball und das wahrgenommene Tor in einer Flucht vor dem Roboter liegen. Durch die unmittelbare Kopplung von Wahrnehmung und Aktion sind reaktive Spieler bezüglich ihrer Reakti-

Spieler-Erkennung durch Linienüberdeckung bei den Freiburger Fußballrobotern



RoboCup-Ligen

Humanoid League: Roboter auf zwei Beinen - diese Liga hat in diesem Jahr Premiere. Man begnügt sich allerdings noch mit der Demonstration grundlegender Fähigkeiten. Denn selbst das scheinbar triviale Geradeauslaufen, ohne das Gleichgewicht zu verlieren, stellt für einen Roboter eine enorme Leistung dar.

RoboCup-Rescue: Hier widmet man sich in der Simulation bereits dem, was die realen Roboter von morgen einmal leisten sollen: in Katastrophengebieten Feuer löschen, Aufräumarbeiten durchführen und Menschen evakuieren.

Simulation League: Hier kämpfen in einer simulierten Umgebung elf Programme pro Team um den virtuellen Ball. Da keine störanfällige Hardware erwartet werden muss und die virtuellen Spieler über Fähigkeiten verfügen, von denen die realen Roboter momentan noch träumen, hat sich bereits eine beeindruckende strategische Spielkultur entwickelt: Abseitsfallen und Doppelpässe sind keine Seltenheit und selbstständig ler-

nende Systeme sind hier schon Realität.

SONY-Legged League: In dieser Liga stehen sich hochgezüchtete AIBO-Roboter gegenüber. Auf vier Beinen umhertapsend erkennen sie den Ball mit einer im Kopf integrierten Kamera, stupsen den Ball vorwärts und schießen schon einmal ein Tor, indem sie gezielt alle Viere von sich strecken und sich auf den Ball fallen lassen. Da alle Teams die exakt gleiche Hardware verwenden, ist die Software für Bildverarbeitung und Bewegungskontrolle spielentscheidend.

Small-Size League: Vier Roboter pro Team treten auf einem Feld von etwa der Größe einer Tischtennisplatte gegeneinander an. Bedingt durch die geringen Ausmaße der Roboter (die Grundfläche darf maximal achtzehn Quadratzentimeter betragen) haben diese in der Regel keine eigenen Sensoren, sondern werden von einem Rechner am Spielfeldrand gesteuert, der die Daten einer über dem Spielfeld angebrachten Kamera aus-

wertet. Wieselflink ergattern sie sich den Ball, stoppen ihn mit einer schnell rotierenden Walze, spielen sich Pässe zu oder kicken den Ball mit ihren Schußvorrichtungen in Richtung des gegnerischen Tores. Oft geschieht das so schnell, dass der menschliche Beobachter Schwierigkeiten hat, den Geschehnissen auf dem Feld zu folgen.

Junior League: Jugendliche können erste Erfahrungen mit Robotern machen. Beispielsweise mit Teilen des 'Lego-Mindstorm Baukastens' werden hier eigene künstliche Kicker, Sumo-Ringer oder tanzende Figuren gebaut und für die Wettkämpfe programmiert. Fußballspielende Roboter dieser Kategorie werden zunehmend auch in der universitären Lehre und zur Gewinnung von Nachwuchs für technische Studiengänge eingesetzt.

Middle-Size League: Die Königsklasse des RoboCup. Auf einem fünf mal zehn Meter großem Feld spielen jeweils vier vollkommen autonom agierende Roboter gegeneinander.

lichkeit sie ihr Ziel erreicht, und für jedes Ziel wird dessen Dringlichkeit bewertet. Das Ziel, Tore zu erzielen, wird beispielsweise höher bewertet als das Ziel, elegant zu spielen. Ausgehend von den Zielen lässt man nun 'Aktivierung' durch das Netzwerk fließen, wobei von dringlichen Zielen mehr Aktivierung als von weniger wichtigen Zielen ausgeht und eine Kante um so mehr Aktivierung weiterleitet, je höher die Erfolgswahrscheinlichkeit der zugehörigen Aktion ist. Die 'beste' Aktion für den Spieler ist dann diejenige Aktion, die die meiste Aktivierung erhalten hat und deren sämtliche Vorbedingungen erfüllt sind. Ein solcher Wahrnehmungs-Aktions-Zyklus ist in weniger als 100 Millisekunden abgeschlossen.

Entscheidungen

Auf den AIS-Robots kommt dagegen die 'Dual-Dynamics-Architektur' zum Einsatz. Wie bei fast allen Kontrollarchitekturen existieren auch hier Elementarverhalten, die bereits einen Controller für die Aktuatoren enthalten, der das Verhalten umsetzt (target dynamics). Die Aktionsauswahl unterscheidet sich jedoch von den 'erweiterten Verhaltensnetzwerken': Jedes Elementarverhalten besitzt eine Aktivierungsdynamik (activation dynamics), mit der es in Abhängigkeit der Sensoreindrücke und der Aktivierungen anderer Verhalten aktiviert oder deaktiviert wird. Die Aktivierungsdynamik wird durch eine Differenzialgleichung formuliert und ist so gewählt, dass sich durch Parameterwahl fließende Übergänge zwischen Deaktivierung und voller Aktivierung gezielt einstellen lassen - die AIS-Roboter benötigen für einen Wahrnehmungs-Aktions-Zyklus 33 Millisekunden.

Bei den erweiterten Verhaltensnetzwerken des CS Freiburg werden die Antriebsräder von dem Regelalgorithmus (Controller) des gerade ausgewählten Elementarverhaltens gesteuert. Der Controller berechnet die Geschwindigkeitsanweisungen für die beiden Räder. Für komplexere Elementarverhalten ist der Entwurf dieser Controller für sich genommen allerdings eine schwierige Aufgabe.

Bei der Dual Dynamics Architektur der AIS-Robots wer-

onsgeschwindigkeit nicht zu überbieten.

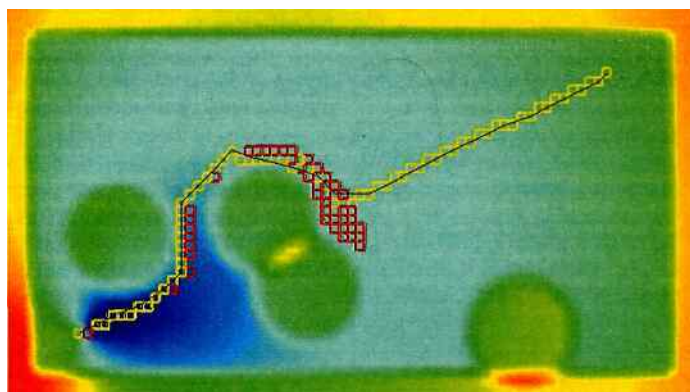
Deliberative Architekturen hingegen zeichnen sich durch die explizite Speicherung von Umgebungswissen aus und berücksichtigen bei der Aktionsauswahl zusätzlich zu den Sensoreindrücken Erwartungen über die Effekte von Aktionen. Deliberativ ausgerichteten Teams at-

testiert man bedingt durch den Einsatz von Pfadplanern oft eine vorausschauendere und ruhigere Spielweise, die in machen Fällen aber auch Spritzigkeit vermissen lässt. Um die Vorteile beider Prinzipien zu vereinen, ohne deren Nachteile in Kauf zu nehmen, werden derzeit oft Mischformen mit reaktiven und deliberativen Anteilen erforscht

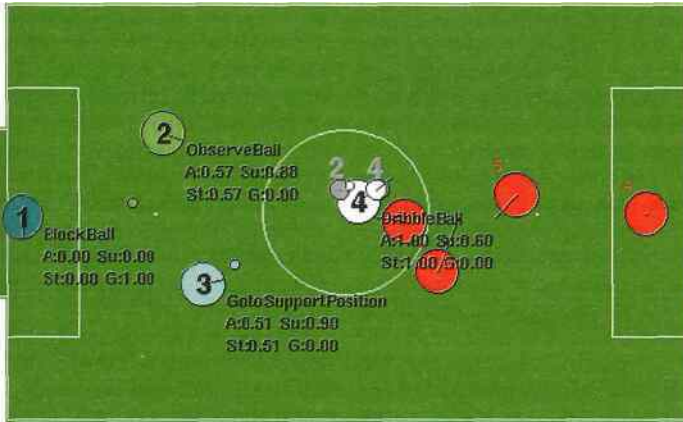
und untersucht, wie beide Anteile effektiv miteinander kombiniert werden können.

Die Roboter des CS Freiburg verwenden zur Aktionsauswahl ein 'Erweitertes Verhaltensnetzwerk', das jeweils bestimmt, welches der Elementarverhalten den Roboter kontrollieren soll. Aktionen werden in diesem Netzwerk als Knoten repräsentiert, die über Kanten mit Vorbedingungen, anderen Aktionen oder mit ausdrücklichen Zielen verbunden sind. In dem Netzwerk wird also ausgedrückt, wann es überhaupt erst Sinn macht, eine Aktion auszuführen, und welche Effekte eine Aktion hat. Zum Beispiel ist im Freiburger Netzwerk die Aktion 'Fahre zum Ball' über eine Kante mit der Vorbedingung 'Roboter in Ballbesitz' des 'Kicke Ball'-Verhaltens verbunden. Dieses ist wiederum über eine Kante mit dem Ziel 'Tore erzielen' verbunden.

Für jede Aktion ist spezifiziert, mit welcher Wahrschein-



Potenzialfeld zur Pfadplanung: Der Pfad führt sicher an Hindernissen vorbei.



Das globale Weltmodell der Freiburger Roboter: Die wahrgenommenen gegnerischen Roboter sind rot gezeichnet. Der Spieler mit der Angreiferrolle ist weiß, der 'Libero' hellgrün und der 'den Angreifer unterstützende Spieler' türkis markiert. Die kleinen farbigen Punkte zeigen, zu welcher Position ein Spieler mit der entsprechenden Rolle fahren möchte.

den die Geschwindigkeiten für die Räder auf andere Weise ermittelt: Ein Elementarverhalten wird hier nicht exklusiv ausgewählt, sondern alle aktivierten Verhalten leisten mit ihren jeweiligen Controllern einen Beitrag zu einem Gesamtverhalten. Die Stärke, mit der ein Controller das Gesamtverhalten beeinflusst, wird durch die Aktivierungsstärke des jeweiligen Elementarverhaltens bestimmt. Durch die Überlagerung der Controllerbeiträge verschiedener Elementarverhalten ergeben sich Geschwindigkeitsanweisungen für die Räder, die zu sehr weichen und natürlich wirkenden Roboterbewegungen führen.

Kooperation

Auch beim Roboterfußball gilt: Ein Team von Individualisten hat es schwer. Zu stark ist mittlerweile die Konkurrenz geworden, als dass es sich ein Team erlauben könnte, die Spieler ohne jeglichen Koordinations- oder Kooperationsmechanismus auf das Feld zu schicken. Im einfachsten Fall stellen die Spieler lediglich sicher, dass sie sich bei ihren Aktionen nicht gegenseitig stören - vor allem nicht einen angreifenden Teamkameraden. Erst eine Funkverbindung ermöglicht aber die explizite Kooperation der Spieler.

Häufig helfen sich die Spieler eines Teams, indem sie sich wichtige Sensorwahrnehmungen mitteilen und so fehlende Informationen ergänzen. Besonders bei der Erkennung des

Balls ist dies von großem Vorteil, da ein Spieler auch dann sinnvoll agieren kann, wenn er den Ball selbst gar nicht sieht. Bei dem CS-Freiburg-Team werden zudem alle Informationen von einem zentralen Server gesammelt und in ein konsistentes 'globales Weltmodell' integriert. Auch hier wird ein Kaiman-Filter verwendet, um die Wahrnehmungen verschiedener Spieler bezüglich des gleichen Objekts zu fusionieren und damit den Spielern eine optimale Auswertung des Gruppenwissens zur Verfügung zu stellen.

Bei immer mehr Teams setzt sich eine Organisation der Spieler in Rollen durch. Wie beim richtigen Fußball ist mit jeder Rolle eine bestimmte Aufgabe verknüpft, jedoch sind die Rollen beim Roboterfußball oft

Kicker-Roboter der Universität Freiburg: Am Krökel-Tisch kann der Roboter den Menschen auch jetzt schon besiegen.



nicht statisch, sondern werden je nach Situation dynamisch neu verteilt. Ein Spieler des CS Freiburg schätzt hierzu für jede mögliche Rolle, wie sehr er dem Team in dieser Rolle momentan nützen würde. Diese Einschätzungen kommunizieren und vergleichen die Spieler untereinander. Jeder Spieler wählt nun selbstständig diejenige Rolle für sich aus, mit der er beiträgt, den Gesamtnutzen für das Team zu maximieren. Ein Spieler, der nach eigener Einschätzung dem Team am besten in der Angreiferrolle dienen würde, könnte so beispielsweise die Verteidigerrolle einnehmen, falls sich ein Mitspieler für einen noch besser geeigneten Angreifer hält.

Ausblick

Vor wenigen Jahren wurde es bei den ersten Wettbewerben in der 'Königsklasse' des RoboCup bereits als Teilerfolg angesehen, wenn die Roboter sich überhaupt bewegten. Mittlerweile ist der Entwicklungsstand so weit, dass akzeptable und auch spannende Aktionen auf dem RoboCup-Spielfeld zu beobachten sind. Dennoch ist die Liste offener Forschungsfragen lang.

Heute müssen die Kontrollprogramme der Roboter noch von Hand programmiert und parametrisiert werden. Ziel ist aber, die Roboter durch den Einsatz von Lernverfahren eigenständig die zum Fußballspiel notwendigen Fertigkeiten erlernen zu lassen. Der erste kleine

Schritt auf diesem Weg ist das automatisierte Kalibrieren der optimalen Parameter, die in der Bildverarbeitung, der Sensorfusion, der Selbstlokalisierung und der Abstimmung der Verhaltensaktivierungen in praktischen Versuchen mühsam ermittelt werden müssen. Das Freiburger Team hat sogar erste erfolgreiche Versuche durchgeführt, in denen die Roboter mit in der Simulation erlernten Verhaltensweisen auf dem realen Spielfeld Tore erzielten.

Das kontrollierte Zusammenspiel der Roboter (Pässe, Flanken) steht heute noch am Anfang. Wenn es in Zukunft allerdings gelingt, schnellere Roboter mit präziseren Ballführungen und Schussvorrichtungen zu konstruieren, und wenn die Roboter das Verhalten der Mitspieler durch Beobachtung vorherzusagen können, wird man diesem Ziel näher kommen können. Dann wird man auch in der Lage sein, gelernte Kooperationsstrategien, die heute schon in der Simulationsliga erprobt werden, auf die Middle-Size Roboter zu übertragen.

Ob allerdings wirklich im Jahre 2050 die Menschen gegen die Roboter verlieren werden, wie es sich die RoboCup Federation als Vision auf ihre Fahnen geschrieben hat, bleibt abzuwarten. Wer in der Zwischenzeit schon mal gegen einen Roboter Fußball spielen möchte, muss sich mit der Tischfußball-Variante begnügen: KiRo heißt der vollkommen selbstständig spielende Kicker-Roboter der Universität Freiburg. Und man muss sich anstrengen - denn KiRo spielt bereits so gut wie menschliche Fortgeschrittene. Bei der Entwicklung des automatischen Tischfußballspielers standen die Roboter des CS Freiburg Pate: Viele der beim RoboCup eingesetzten Verfahren und Ideen kommen nun auch KiRo zugute. (wst)

Dr. Ansgar Bredenfeld leitet das Team Behavior Engineering am Fraunhofer Institut für Autonome Intelligente Systeme (AIS), Sankt Augustin (bredenfeld@ais.fraunhofer.de)

Thilo Weigel ist Doktorand am Lehrstuhl für Grundlagen der Künstlichen Intelligenz an der Universität Freiburg (weigel@informatik.uni-freiburg.de) 