

# Realisierung einer Hindernisvermeidung und globaler Navigationsaufgaben mittels Fuzzy-Algorithmen für den Miniaturroboter Khepera

Sören Hader<sup>1</sup>, Klaus Debes<sup>2</sup>, Volker Stephan<sup>3</sup>

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Neuroinformatik, 98684 Ilmenau

## Zusammenfassung

*Fuzzy Control bietet eine Reihe von intelligenten und effizienten Methoden, zur Navigation eines mobilen Miniaturroboters. In diesem Artikel wird ein vollständig fuzzy-basierter Regler beschrieben, der als Ziel die Anfahrt von vorgegebenen Zielen in einer unbekanntem Umgebung hat. Neben der Auswertung der sensorischen Entfernungswerte werden auch die visuellen Informationen für die Aktionsauswahl berücksichtigt. Zur Vereinfachung des Problems wurde eine hierarchische Reglerstruktur entwickelt. Zum Vergleich wurde der Fuzzy-Regler mit verschiedenen neuronalen Ansätzen anhand von zwei Problemstellungen getestet. Dabei erwies sich das Aufstellen von Fuzzy-Inferenzsystemen als vorteilhaft, da vorhandenes a-priori Wissen sofort in Form von Regeln einfließen kann und kein langwieriger Lernprozeß notwendig ist.*

**Schlüsselwörter:** *Fuzzy Control, Mobile Roboter, Fuzzy-Bildverarbeitung, Neuronale Netze*

## 1 Einleitung

Mit der Erstellung von Fuzzy-Algorithmen zur Navigation des Miniaturroboters KHEPERA soll der effiziente Entwurf und das robuste Verhalten eines Fuzzy-Reglers demonstriert werden. Dabei wird auf die folgenden zwei Aspekte besonders eingegangen: die Integration verschiedener Sensoriken und das vollständig fuzzy-basierte Grundprinzip des Reglers. Ersteres bezieht sich auf die technische Ausstattung des zur Verfügung stehenden Experimentierroboters KHEPERA (s. Abb. 1), der über eine Farbkamera, 8 Infrarot-Sensoren und 2 separat angetriebene Räder mit Encodern für die Wegmessung verfügt. Um ein autonomes Verhalten des Miniaturroboters zu erreichen, muß dieser fähig sein, seine Umwelt zu erfassen, die sensorischen Informationen zu interpretieren, und eine Route zum Zielort zu planen, welche Kollisionen mit Hindernissen vermeidet [10].

Die Anwendung von Fuzzy Control zur Hindernisvermeidung von mobilen Robotern ist sehr verbreitet [4, 7, 10]. Die Vorteile liegen in der schnellen und effizienten Arbeitsweise des Reglers, da vorhandenes Wissen in Form von Regeln genutzt werden kann. Gegenüber den Neuronalen Netzen ist der mathematische Aufwand eher gering.

Grundlage der oben genannten Fuzzy-Verfahren ist die Auswertung der Entfernungswerte, die von Infrarot- oder Ultraschallsensoren gemessen werden. Durch die begrenzte Reichweite der Sensoren ist das Verhalten des mobilen Roboters relativ kurzsichtig, notwendige Ausweichmanöver erfolgen erst in geringer Entfernung zum Hindernis. Dieser Beitrag stellt eine Möglichkeit vor, wie man aus den visuellen Informationen über ein Inferenzsystem ausführbare Aktionen für den Roboter extrahiert. Es ist eine Ergänzung zu den bisherigen Arbeiten und kein universeller Ansatz zur Hindernisvermeidung.

---

<sup>1</sup>E-mail: soeren.hader@rz.tu-ilmenau.de

<sup>2</sup>E-mail: klaus.debes@informatik.tu-ilmenau.de

<sup>3</sup>E-mail: vstephan@informatik.tu-ilmenau.de

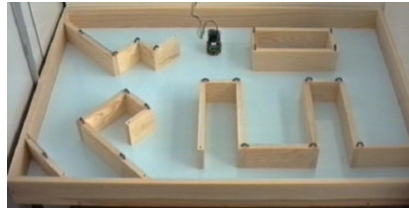


Abbildung 1: Miniaturroboter KHEPERA im Hindernisparcours.

## 2 Hierarchischer Fuzzy-Regler

Um die oben genannten Leistungen für ein autonomes Verhalten des Miniaturroboter KHEPERA zu realisieren, eignet sich eine hierarchische Reglerstruktur, in der jede Reglerstufe für eine separate Aufgabe zuständig ist [4, 10]. Der Hauptgedanke besteht darin, daß komplexe Verhaltensstrukturen nur auf Grundlage von einfacheren Strukturen zu realisieren sind. Der vorgestellte Fuzzy-Regler unterteilt sich in 3 Stufen (s. Abb. 2), wobei die Komplexität der erbrachten Leistungen von unten nach oben steigt.

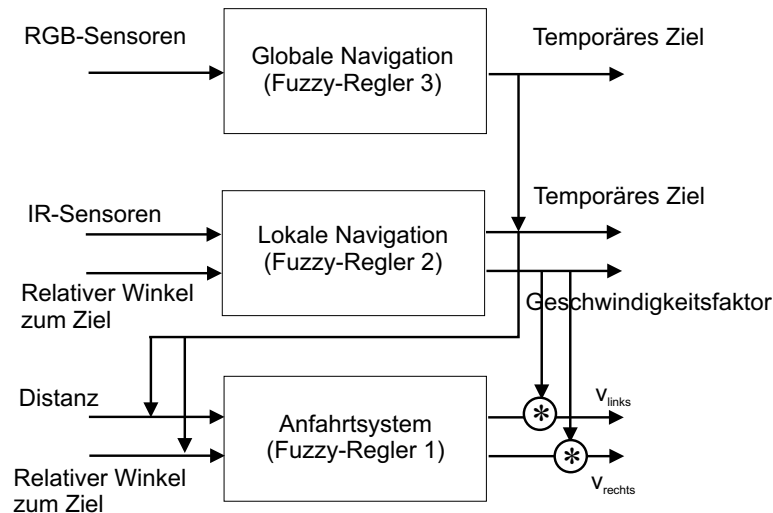


Abbildung 2: Steuerarchitektur des Fuzzy-Reglers.

### 2.1 Anfahrtsystem (Fuzzy-Regler 1)

Das Anfahrtsystem bildet die unterste Stufe des Gesamtreglers, es hat einzig die Aufgabe, ein vorgegebenes Ziel auf kurzem Weg zu erreichen. Dabei soll nicht auf Hindernisse geachtet werden, die von den IR-Sensoren und der Farbkamera erfaßt werden, was Aufgabe der beiden oberen Reglerstufen ist. Die Lage des zu erreichenden Zielortes, welche als Abstand und Richtung bezüglich der momentanen Fahrriichtung vorliegen, ist der Input des Anfahrtsystems, als Output werden die Drehgeschwindigkeiten für die beiden Antriebsmotoren berechnet. Die Positionsrechnung des Roboters erfolgt durch Integration der Drehgeschwindigkeiten der beiden Antriebsräder, welche durch die internen Odometriesensoren erfaßt werden. Das Anfahren von Zielkoordinaten ist die grundlegende Fähigkeit des Roboters und bildet das Fundament der gesamten Reglerstruktur. Ohne größeren Aufwand kann ein Fuzzy-Inferenzsystem für die direkte Zielfahrt erstellt werden.

Ein Sugeno-Regler, welcher eine Variante des Mamdani-Reglers darstellt, generiert die motorischen Aktionen. Dieser Reglertyp hat den Vorteil, daß die Zugehörigkeitsfunktionen

der Ausgangswerte als Singletons vorliegen und sich so die Defuzzifizierung als gewichtete Summe vereinfachen läßt. Die *Centre of Maximum*-Defuzzifikation hat kontinuierliche Änderungen des Ausgangs zur Folge und führt somit zu einem weicherem Lenkverhalten.

## 2.2 Lokale Navigation (Fuzzy-Regler 2)

Die lokale Hindernisvermeidung bildet die mittlere Ebene des Fuzzy-Reglers. Bei der Hindernisvermeidung mit Fuzzy Control hat sich die Idee der Erzeugung von kurzfristigen temporären Zielen bei auftauchenden Hindernissen auf der optimalen Fahrroute durchgesetzt [2, 4, 10]. Die Methode des temporären (oder virtuellen) Zieles arbeitet sehr effektiv und korrekt. Die lokale Navigation ist in Verbindung mit der Zielfahrt in der Lage, vorgegebene Ziele in einem Hindernisparcours auf einer suboptimalen Trajektorie zu erreichen.

Mittels der 6 vorderen IR-Sensoren von KHEPERA, die paarweise zusammengefaßt sind, werden Hindernisse in sehr naher Umgebung geortet. Von den beiden Reflexionswerten die je Sensorpaar vorliegen, wird der jeweils größere gewählt<sup>4</sup>. Als zusätzliche sensorische Information wird der Führungswinkel zum realen Ziel ausgewertet. Er entscheidet darüber, ob ein Gegenstand den Roboter bei seiner Fahraktion behindert und somit eine Behinderung darstellt.

## 3 Fuzzy-Bildverarbeitung

Fuzzy-Systeme haben in der digitalen Bildverarbeitung an Bedeutung zugenommen. Die sogenannte Philosophie des Unschärfen bietet eine Reihe von Methoden und neuen Ansätzen in der Bildverarbeitung und Mustererkennung. Der Mensch liefert dabei selbst das Vorbild, da er Bilder mit einer vagen und mathematisch schwer modellierbaren Logik auffaßt und verarbeitet. Nach TIZHOOSH [9] läßt sich die Unschärfe eines Bildes wie folgt definieren; ein Bild  $X$  der Größe  $M \times N$  mit  $L$  Graustufen ist im Sinne der Fuzzy-Mengenlehre ein Array von Fuzzy-Singletons, die zu einem gewissen Grad zum Bild gehören. Diese Zugehörigkeit reflektiert die Helligkeit oder andere Eigenschaften, wie Kanten- oder Texturzugehörigkeit, die das Bild am besten charakterisieren.

Um relevante Informationen aus den Kamerabildern zu erhalten, ist eine Objektrennung der Hindernisse vom Hintergrund notwendig. Zu Experimentierzwecken wurde eine blau-türkisfarbene Tischplatte als Untergrund und gelbfarbige Holzquader als Hindernisse gewählt. Für eine helligkeitsinvariante Segmentierung bietet sich die Umwandlung vom RGB-Farbmodell in den physiologischen Farbraum an. Dieses Modell ist dem Farbsehen des Menschen aus biologischer Sicht nachempfunden worden und hat auf dem Gebiet des Maschinellen Sehens an Bedeutung gewonnen [6, 8]. Der physiologische Farbraum ist ein 3-dimensionales Modell, bestehend aus den Koordinatenachsen: Weiß-Schwarz, Blau-Gelb und Rot-Grün. Für die Fahrbahnsegmentierung wird die Bildmatrix mit den Blau-Gelb-Aktivierungen gewählt.

### 3.1 Bildsegmentierung

Wenn man ein Grauwertbild als eine unscharfe Menge definieren kann, so ist es auch möglich, die Stärke der Unschärfe anzugeben. Gemeint ist hier nicht die gegenständliche Qualität einer Aufnahme, sondern vielmehr die Zugehörigkeiten eines Pixels zu einer Menge. Ein Binärbild kann man als Spezialfall werten, da jeder Punkt eindeutig und scharf zugeordnet werden kann. Auf diese Weise können aber signifikante Information verloren gehen, d.h.

---

<sup>4</sup>Je größer die empfangene Reflexionsleistung ist, desto näher befindet sich der Gegenstand zum Sensor.

die Verschärfung eines Bildes ist häufig nur bis zu einem gewissen Grad sinnvoll. Es existieren eine Reihe von Methoden, um das Maß der Unschärfe zu bestimmen, eine davon ist der **Lineare Index der Unschärfe**, kurz **LIdU** [9]. Hierbei wird die Unschärfe als Abstand zwischen einer Fuzzy-Menge und ihrem Komplement verstanden ( $\mu_{mn}$  ist die Grauwertzugehörigkeit).

$$\gamma_l = \frac{2}{MN} \sum_m \sum_n \min(\mu_{mn}, 1 - \mu_{mn}) \quad (1)$$

Je kleiner der LIdU eines Bildes ist, um so besser lassen sich die Pixel in Klassen aufteilen. Die gewünschte Hindernisdetektion erfolgt durch eine pixelweise Zuordnung in die Klassen *free* und *wall*. Mit Hilfe der S-Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_x$  wird eine unscharfe Klassenzugehörigkeit definiert [9]:

$$\mu_x(g_{mn}) = \begin{cases} 0, & g_{mn} \leq A \\ 2 \left[ \frac{g_{mn}-A}{2\Delta} \right]^2, & A \leq g_{mn} \leq B \\ 1 - 2 \left[ \frac{g_{mn}-C}{2\Delta} \right]^2, & B \leq g_{mn} \leq C \\ 1, & g_{mn} \geq C. \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{mit } B = \frac{A+C}{2}, \quad \Delta = B - A = C - B.$$

Die Größe  $\Delta > 0$  bezeichnet man als Bandbreite der Funktion. Die Zugehörigkeit an der Stelle B, welche als Crossover-Punkt bezeichnet wird, beträgt 0.5, was einer maximalen Unschärfe gleichkommt. Sie repräsentiert einen Schwellwert für die Objekt-Hintergrund-Trennung. Wenn man  $\mu_x$  über das gesamte Histogramm schiebt und an jeder Position den LIdU ermittelt, erhält man im Normalfall ein (lokales) Minimum<sup>5</sup>, welches identisch mit der Entscheidungsschwelle für die Binarisierung ist.



Abbildung 3: Links: LIdU über die gesamte untere Bildhälfte mit dem lokalen Minimum  $\eta = 42$ . Mitte: Transformiertes Kamerabild im Blau-Gelb-Farbband. Rechts: Das binarisierte Bild. Der freie Bereich auf der rechten Seite ist klar erkennbar, wegen auftretender Abschattungseffekte sind die Ränder zu den Hindernissen zerfranst.

### 3.2 Globale Navigation (Fuzzy-Regler 3)

Nach jeder Aktion wird die momentane Umweltsituation erfaßt und spezifiziert. Durch eine geschickte Kachelung des binarisierten Kamerabildes wird der hochdimensionale Eingangsvektor der obersten Reglerstufe auf ein vertretbares Maß reduziert. Als erstes wird die untere Bildregion horizontal so in Bänder zerlegt, daß die Höhe, auf die reale Umwelt übertragen,

<sup>5</sup>Bei zwei oder mehreren lokalen Minima sollte der Parameter  $\Delta$  vergrößert werden. Wenn kein Minimum vorliegt, wird  $\Delta$  verringert.

konstant ist. Jedes Band wird auch vertikal gekachelt, wobei die Kachelbreite dem Radius des Roboters entsprechen soll. Wenn zwei benachbarte Kacheln hindernisfrei sind, so kann KHEPERA diesen Bereich ohne Kollision durchfahren. Zu einer Verbesserung der Genauigkeit kommt man, wenn sich die Kacheln seitlich überlappen. Die globale Navigation besteht wiederum aus mehreren Fuzzy-Systemen, die jede für ein bestimmtes Band zuständig ist und unabhängig voneinander ein temporäres Ziel generieren, wovon eines durch einen übergeordnetes System ausgewählt wird. Jede Kachel bildet einen Fuzzy-Input, der zwischen 0 und 1 liegt und das Verhältnis der als *free* klassifizierten Pixel zur Gesamtheit ausdrückt. Im Zusammenhang mit der lokalen Navigation ist darauf zu achten, daß die Entscheidungen, welche aufgrund der IR-Sensoren getroffen worden, eine höhere Priorität besitzen, als die der globalen Navigation, da zuerst Hindernisse in sehr geringer Entfernung beachtet werden müssen.

#### 4 Ergebnisse

In mehreren Testreihen wurde die Leistungsfähigkeit der erstellten Fuzzy-Regler mit alternativen Lösungen aus der Neuroinformatik verglichen, um eine Art Benchmark für die verschiedenen Regler zu erhalten. Als Vergleichskriterien dienen die Anzahl der Kollisionen und Zeitschritte, sowie der qualitative Verlauf der Trajektorie. Auf einem Rundkurs wurde ein modifizierter Fuzzy-Regler mit einem Q-learning Algorithmus [1], der seine eigenen Aktionen anhand des resultierenden Erfolges (Reinforcement) bewertet, und einem Neuronalen Netz mit der bekannten ALVINN-Architektur [3] getestet. Letzteres ist ein überwachtes Lernverfahren, der das Verhalten eines menschlichen Vorbildes adaptiert. Während die neuronalen Vertreter an einem ähnlichen Parcours trainiert wurden, mußte die Regelbasis auf die Besonderheiten der Bahn angepaßt werden. Als einziges Programm konnte das Fuzzy-System den Parcours fehlerfrei umrunden, während dagegen das ALVINN-Netz erst durch Modifikationen kollisionsfrei lief und Q-learning sich einige Male in einer Endlossequenz von Links- und Rechtsdrehungen verfang (s. Abb. 4). Als zweiter Test sollte ein farblich markierter Holzquader aus einer Anzahl von Objekten angefahren werden. Zwischen der Startposition und den Objekten wurde ein niedriges Hindernis aufgestellt. Neben der entwickelten Anwendung wurde ebenfalls das ALVINN-Netz getestet. Wie schon beim Rundkurs konnte das Fuzzy-System in seiner Leistungsfähigkeit überzeugen, da es in allen Testversuchen das Ziel fand. Im Gegensatz dazu erreichte das Neuronale Netz nur in der Hälfte aller Fälle das Ziel (s. Abb. 4).

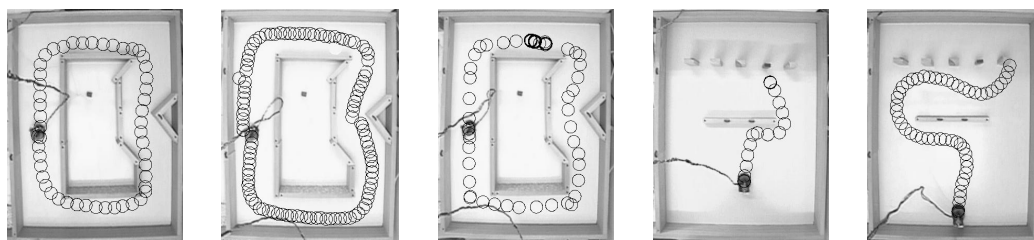


Abbildung 4: Trajektorien von KHEPERA im Rundkurs (1-3): Fuzzy Control, ALVINN, Q-learning. Anfahren roter Objekte (4-5): Fuzzy Control, ALVINN

## 5 Zusammenfassung

Die Untersuchungen von Fuzzy-Algorithmen am Miniaturroboter KHEPERA bestätigten die Annahme, daß man mit Hilfe der Fuzzy-Logik in der Lage ist, menschliches Expertenwissen auf eine konkrete Anwendung zu übertragen. Es ist gelungen, ein System zu entwerfen, welches in seinen Komponenten weitgehend fuzzy-basiert ist, angefangen von der Einordnung der Sensorwerte bis zur Bildsegmentierung. Der notwendige Programmier- und Rechenaufwand hielt sich dabei in Grenzen, auch bei der Kamerabildauswertung, die durch ihre hochdimensionalen Inputs gekennzeichnet ist. Besonders die Anwendung der Fuzzy-Bildverarbeitung war ein Anliegen dieses Projektes, welches im Rahmen einer Studienjahresarbeit an der TU Ilmenau lief [2]. Dieser noch relativ unbekanntes Forschungszweig hat in den letzten Jahren an Bedeutung zugenommen.

Das Aufstellen der Fuzzy-Inferenzsysteme ist sehr zeitsparend gegenüber dem Lernaufwand von Neuronalen Netzen. Das vorhandene a-priori Wissen kann sofort als Regelbasis übersetzt werden und ist jederzeit veränderbar und interpretierbar. Die Ergebnisse in den Benchmarktests bestätigten die Korrektheit und Leistungsfähigkeit des Reglers. Diese Erfolge sind aber verbunden mit dem Kompromiß der Nichtlernbarkeit, eine automatisierte Optimierung des Algorithmus ist in der Praxis sehr aufwendig. Deshalb könnte eine Verknüpfung von Fuzzy Control mit den Lernparadigmen der Neuroinformatik in der Zukunft eine Verbesserung bewirken.

## Literatur

- [1] Gross H.-M., Boehme H.-J., Stephan V.: *Sensory-based Robot Navigation using Self-organizing Networks and Q-learning*. World Congress on Neural Networks 96, San Diego, 94-99, 1996.
- [2] Hader S.: *Realisierung einer Hindernisvermeidung und globaler Navigationsaufgaben mittels Fuzzy-Algorithmen für den Miniaturroboter Khepera*. TU Ilmenau, Fachgebiet Neuroinformatik, Studienarbeit, 1998.
- [3] Krabbes M., Boehme H.-J., Stephan V., Gross H.-M.: *Extension of the ALVINN-Architecture for Robust Visual Guidance of a Miniature Robot*. Proceedings of EU-ROBOT'97, Brescia, Italy, 8-14, 1997.
- [4] Kühn T., Wernstedt J.: *Entwurf einer Fuzzy-Steuerung für den mobilen Miniroboter Khepera*. Praktikum Fuzzy und Neuro Control, Fachgebiet Systemanalyse, TU Ilmenau, 1997.
- [5] Nauck D., Klawonn F., Kruse R.: *Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme*. Computational Intelligence, 2.Auflage Vieweg-Verlag, 1996.
- [6] Pomierski T., Groß H.-M.: *Biological neural architecture for chromatic adaptation resulting in constant color sensations*. In ICNN-96: Proc. of the ICNN-96, 734-739, Washington DC: IEEE, 1996.
- [7] Reignier R.: *Fuzzy logic techniques for mobile robot obstacle avoidance*. Robotics and Autonomous Systems 12, 143-153, 1994.
- [8] Stephan V., Groß H.-M., Heinze A.: *Extraktion handlungsrelevanter Merkmale aus Farbbildern zur Navigation eines mobilen Roboters*. Nationaler Farbworkshop, TU Ilmenau, 1997.
- [9] Tizhoosh H.R.: *Fuzzy-Bildverarbeitung*. Einführung in Theorie und Praxis, Springer-Verlag, 1998.
- [10] Xu W.L., Tso S.K., Fung Y.H.: *Fuzzy reactive control of a mobile robot incorporating a real/virtual target switching strategy*. Robotics and Autonomous Systems 23, 171-186, 1998.