

# Elektronische Ordnungskräfte

## *Bibliotheksroboter bekämpfen Chaos im Regal*

Roboter in der kontrollierten Umgebung industrieller Produktionsstraßen sind inzwischen fast ein alter Hut: Einmal auf die jeweils aktuelle Aufgabe programmiert, erledigen sie mit unermüdlicher Präzision Schweiß-, Lackier- oder Montagearbeiten, bis der Strom ausfällt. Inzwischen rücken zunehmend intelligente Systeme in den Fokus des wissenschaftlichen Interesses. Diese technischen Helfer können weit mehr: Sie finden sich in unbekanntem Terrain zurecht, sind mobil und bei der Lösung ihrer Aufgaben flexibel. Als stumme und effiziente Helfer sollen sie zum Beispiel Ordnung in Bibliotheken schaffen.



**Abbildung 1:**

ER1-Roboter von Evolution Robotics mit einer vorwärtsgerichteten Kamera am oberen Ausleger und der zusätzlichen seitwärts gerichteten Kamera.

Wer beruflich oder privat öfter mit Büchereien zu tun hat, weiß, wie es geht: Man ermittelt per Titel-, Autoren- oder Schlagwortsuche das gewünschte Buch und notiert sich die Standortsignatur. Dann sucht man in der entsprechenden Abteilung das richtige Regalfach und trägt das gewünschte Buch zur Ausleihe. Soviel zur Theorie.

In der Praxis ist die Suche leider oft genug erfolglos: Das gewünschte Buch ist nicht da, obwohl es nicht als ausgeliehen verbucht ist. Der Grund: Das gesuchte Werk wurde falsch einsortiert – aus Nachlässigkeit oder weil sich ein unfreundlicher Kommilitone wieder einmal in einer verschwiegenen Ecke seinen ganz privaten „stillen“ Semesterapparat angelegt hat. Bei viel genutzten Bibliotheken wird die Effizienz des Systems dadurch

im Laufe nur eines Tages deutlich gestört. Für das Personal bedeutet es viel Arbeit, regelmäßig alle Regale nach falsch einsortierten Büchern abzusuchen und diese wieder an die richtige Stelle zurückzubringen.

Zur Unterstützung der Bibliotheksmitarbeiter war es daher für das Team um Josef Pauli das Ziel, ein intelligentes Robotersystem zu entwickeln und zum Einsatz zu bringen, das sich selbständig in der Bibliothek zurechtfindet und Regal für Regal die Signaturen abliest, um auf diese Weise falsch einsortierte Bücher zu entdecken.

Dabei sollte für den Einsatz des Systems so wenig wie möglich an der Bibliothek geändert werden müssen – insbesondere sollte es weder notwendig sein, einen maschinenlesbaren Grundriss der Bibliothek anzufertigen, noch sollten sämtliche Bücher mit maschinenlesbaren Etiketten (zum Beispiel Strichcode oder RFID) versehen werden müssen.

### **G**ruppenarbeit

Zur Umsetzung des Vorhabens wurde ein Team von vier Robotern der Firma *Evolution Robotics* eingesetzt: Drei ER1-Modelle für die Inspektion der Regale und ein Scorpion-Roboter für die Erstellung eines Grundrisses der Bibliothek. Der ER1 (Abbildung 1) ist ein fahrender Roboter, der sich auf zwei Antriebsrädern und einem Stützrad vorwärts bewegt. Den Körper bildet ein beliebig konfigurierbares System von Steckbauteilen, welches die beiden Motoren für den Antrieb, ein Notebook zur Steuerung sowie einen 12V-Akku trägt.

Seine Umgebung nimmt der ER1 mit Hilfe einer vorwärtsgerichteten Kamera wahr. Sie liefert pro

Sekunde dreißig Bilder mit einer Auflösung von 320 x 240 Pixeln. Der Anschluss an das Notebook erfolgt mittels USB.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Vorrichtung entwickelt, um die ER1-Roboter mit einer weiteren, seitwärts gerichteten Kamera auszustatten. Zum Einsatz kam eine uEye-USB-Kamera von IDS, die rechtwinklig zur Fahrtrichtung befestigt ist. Sie kann Büchersignaturen mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixeln bei bis zu dreißig Bildern pro Sekunde aufnehmen.

Der Scorpion-Roboter (Abbildung 2) basiert auf dem gleichen Stecksystem wie der ER1, ist aber deutlich robuster verarbeitet. Die verwendete Kamera hat ein Weitwinkelobjektiv zur Abbildung eines großen Sichtfeldes und liefert ebenfalls dreißig Mal pro Sekunde Bilder mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixeln. Zusätzlich zur Kamera verfügt der Scorpion über drei weitere Arten von Sensoren. Zum Ersten können über einen gefederten, mechanischen Sensor Kollisionen mit anderen Objekten erkannt werden. Zum Zweiten ermöglichen zwanzig Infrarotsensoren eine kontaktlose Untersuchung der näheren Umgebung auf Hindernisse. Und zum Dritten sind die Motoren mit einem Odometrie-sensor ausgestattet, der dabei hilft, die von den Motoren ausgeführten Bewegungen zu überwachen und dadurch Daten zur Positionsbestimmung zu ermitteln.

## Geschichtete Software-Komponenten

Zur Steuerung des Zusammenspiels wird die Framework-Plattform ERSP (Evolution Robotics Software Development Platform) eingesetzt. Sie ist ebenfalls ein Produkt von *Evolution Robotics* und hilft dabei, die Software für komplexe Robotersysteme in drei Schichten zu gliedern:

- HAL (hardware abstraction layer):  
Hier sind Treiber zur Anbindung der Software an die Roboter-Hardware angesiedelt.
- BEL (behavior execution layer):  
Hier wird die Funktionalität durch Behavior-Komponenten gekapselt, welche dann zu Netzwerken zusammengeschaltet werden. Jedes Behavior-Netz realisiert dabei einen Regelkreis, welcher z.B. basierend auf dem Kamerabild den Roboter steuert.
- TEL (task execution layer):  
Mit dieser Schicht können komplexe, serielle oder parallele Abläufe realisiert werden.

Für jede der drei Schichten wird bereits eine Palette von vorgefertigten Modulen mitgeliefert – angefangen bei Treibern für die Hardware des

Roboters über diverse Basisbausteine für Behavior-Netze bis hin zu vorgegebenen Tasks.

## Aufgaben des Roboter-Teams

Die Aufgabenstellung wurde in fünf Teilbereiche zerlegt. Jeder dieser Bereiche wurde in eine ERSP-Task-Komponente gekapselt, so dass er unabhängig von anderen Systembestandteilen bearbeitet und getestet werden konnte. Darüber hinaus konnten die einzelnen Komponenten mit geringem Aufwand zu einem komplexeren System zusammengesetzt werden.

### ➤ Kartenerstellung

Der Scorpion-Roboter erstellt mit Hilfe seiner Sensoren eine Karte der Bibliothek und vermisst einzelne Regale.

### ➤ Wegplanung

Auf der Grundlage dieser Karte werden für die ER1-Roboter Wege geplant, um die Bibliothek Regal für Regal abzufahren.

### ➤ Ausrichtung

Hat ein Roboter ein Regal erreicht, muss er parallel zu diesem ausgerichtet werden.

### ➤ Abstandsregelung

Beim Abfahren des Regals kommt es darauf an, einen gleichmäßigen Abstand einzuhalten.

### ➤ Bucherkennung

Schließlich müssen die Bilder der seitwärts gerichteten Kamera ausgewertet und die darauf zu sehenden Bücher erkannt werden.

## Kartenerstellung

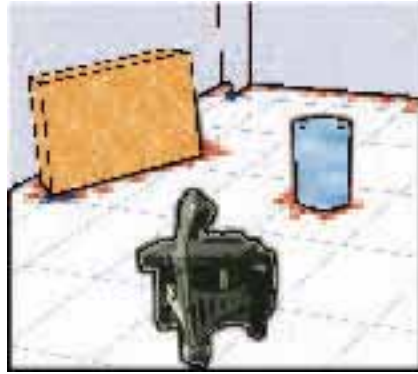
Für die Kartenerstellung fährt der Scorpion-Roboter die Umgebung nach einem Zufallsschema ab und nutzt dabei die Komponentengruppe vSLAM (visual simultaneous localization and map building) aus dem ERSP-Framework. Mit Hilfe von visuellen Merkmalen (SIFT - scale invariant feature transform) erkennt der Roboter Objekte und ermittelt deren Lage und Orientierung auf der Karte. Die Karte ist ein zweidimensionales Muster, in dem jedem Punkt die Angabe „besetzt“ oder „frei“ zugeordnet ist, gegebenenfalls mit zugehörigen Wahrscheinlichkeiten. Ein Beispiel findet sich in Abbildung 3.

Mit Hilfe der Infrarotsensoren können Objekte im Nahbereich abgetastet und deren Umrisse ermittelt werden. Hierzu fährt der Roboter um das Objekt herum und sammelt mit den Infrarot-



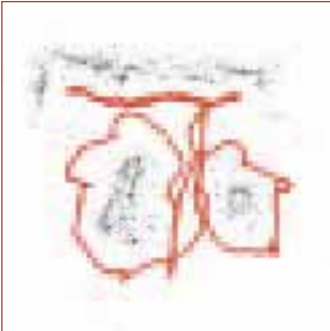
Abbildung 2:  
Scorpion-Roboter von Evolution Robotics.





**Abbildung 4:**

Den Boden der Skizze bildet eine durch das vSLAM-Modul erstellte Karte einer Testumgebung mit zwei Hindernissen. Sterne in der Karte zeigen an, dass der Roboter ein Hindernis entdeckt hat. Bei roten Sternen erfolgte die Messung mit Hilfe der Infrarotsensoren, bei blauen Sternen mit Hilfe des mechanischen Sensors. Zur Feststellung, welche Bereiche des Raumes potenziell hindernisfrei sind, werden visuelle Hinweise (SIFT) herangezogen. Somit werden in der Karte Informationen von drei verschiedenen Sensoren fusioniert.



**Abbildung 3:**

Karte einer Testumgebung, erstellt durch Akkumulation der Daten von Infrarotsensoren. Der Weg des Roboters zur Erstellung der Karte ist als durchgehende rote Linie dargestellt.

sensoren so viele Entfernungsinformationen wie möglich. Diese werden zum einen dazu genutzt, den weiteren Weg des Roboters zu planen, zum anderen dazu, ein Modell des Objektes (zum Beispiel ein Rechteck) an das reale Objekt – ein Regal – anzupassen. Ein Beispiel für die mit dieser Methode ermittelten Informationen ist in Abbildung 4 zu sehen. Das Szenario besteht aus drei Objekten: ein rechteckiges Regal (links), ein rundes Hindernis (rechts) sowie ein Teil der Wand (oben).

## Wegplanung und Navigation

Die ermittelte Karte wird mit Hilfe eines so genannten Quadrees in freie und belegte Rechtecke zerlegt (Abbildung 5). Hierzu wird ein über die Karte gelegtes Rechteck wiederholt solange in vier kleinere Rechtecke aufgeteilt, bis jedes Rechteck nur noch vollständig belegt beziehungsweise frei ist. Es entsteht eine baumartige Struktur aus ineinander geschachtelten Rechtecken – der Quadtree.

Anschließend wird ein Graph aufgebaut, der die Mittelpunkte aller Rechtecke mit freien Zellen als Knoten und die Verbindung zwischen den Mittelpunkten benachbarter Rechtecke als Kanten enthält (Abbildung 6). Ein kürzester Weg kann dann mit dem Dijkstra-Algorithmus oder dem A\*-Algorithmus gesucht werden. Es ergibt sich eine Folge von rechteckigen Feldern des Quadrees, durch die ein möglichst kurzer Weg geplant werden muss. Hierzu wird ein zweidimensional wirkender so genannter Sweep-Algorithmus verwendet.

Beim Abfahren des ermittelten Weges muss sichergestellt sein, dass der Roboter auf neue Hindernisse reagieren kann, die in der vorherigen Berechnung noch nicht berücksichtigt werden konnten – zum Beispiel auf Besucher der Bibliothek. Dabei ergibt sich ein Problem: Anders als die für die Kartenerstellung verwendeten Scorpion-Roboter haben die ER1-Modelle keine Infrarot-Sensoren für die Entfernungsmessung. Um Hindernisse trotzdem zu lokalisieren,

wird mit Hilfe einer optischen Merkmalsverfolgung die durch die 2D-Projektion entstehende Bewegungsparallaxe genutzt, um eine Entfernungsabschätzung zu den gesichteten Objekten zu erhalten.

## Kontrollierte Bildgewinnung

Angekommen an einem Regal, muss der Roboter derart positioniert werden, dass die Seitwärtskamera die ersten Bücher im Regal sieht. Hierzu wird eine zweistufige, visuell-basierte Regelung eingesetzt, die die Bilder der vorwärtsgerichteten Kamera als Grundlage hat.

Zunächst dient die vertikale Kante an der Ecke des Regals als Orientierungspunkt. Durch Vorwärtsbewegung und Korrektur der Ausrichtung wird diese Gerade im Bild zentriert. Sobald sie eine bestimmte Länge und damit der Roboter einen definierten Abstand zum Regal erreicht hat, endet die erste Stufe.

In der zweiten Stufe dient der Verlauf der Berandungsgeraden des Regals als Merkmal zur Ausrichtung des Roboters. Nach Abschluss der zweiten Stufe steht der Roboter mit einem Abstand von 30 cm parallel zum Regal.

Zum Einlesen der Bücher-Signaturen eines Regals muss der Roboter in gleich bleibendem Abstand an diesem entlangfahren. Dies wird erneut durch eine visuell-basierte Regelung bewerkstelligt – dieses Mal mit Hilfe der seitwärts gerichteten Kamera. Als visuelles Merkmal dient die Gerade, die durch die Oberseite des Regalbrettes gebildet wird. Sowohl deren Winkel als auch die Position im Bild werden genutzt, um den Roboter während seiner Bewegung immer wieder geringfügig neu auszurichten.

Schließlich muss das Ende des Regals mit der seitwärts gerichteten Kamera erkannt werden, da die vorwärtsgerichtete Kamera das Regal schon vorher nicht mehr sehen kann. Ausgenutzt wird dabei der Unterschied der Grauerthistogramme



von Büchern, Regal und Hintergrund. Dazu wird das Bild nach einem einfachen Verfahren segmentiert und die einzelnen Segmente werden einer der drei Klassen zugeordnet. Aus der Kombination der Segmentklassen lässt sich sodann eine Wahrscheinlichkeit dafür ableiten, ob noch das Regal oder doch bereits der Hintergrund jenseits des Regalendes zu sehen ist.

## Buchererkennung

Während der Vorbeifahrt am Regal nimmt die seitwärts gerichtete Kamera Bilder der Bücher im Regal auf. Dazu wird das Kamerabild in rechteckige Segmente zerlegt, deren Länge, Breite und Ausrichtung bestimmten Kriterien entsprechen und potenziell jeweils ein Buch enthalten (Abbildung 7).

Basierend auf verschiedenen Analyseverfahren wird jedes Segment durch visuelle Merkmale beschrieben: Länge und Breite des Buches, Histogramme, dominante Farben des Buchrückens, markante Grauwertecken.

Im Hinblick auf die Erkennung von Büchern werden vorab in einer SQL-Datenbank merkmalsbasierte Beschreibungen von relevanten Büchern abgelegt. In der Anwendungsphase erfolgt dann ein Vergleich zwischen Datenbankeinträgen und aus den Bildern extrahierten Beschreibungen, wobei eine einfache Nächster-Nachbar-Klassifikation zum Einsatz kommt.

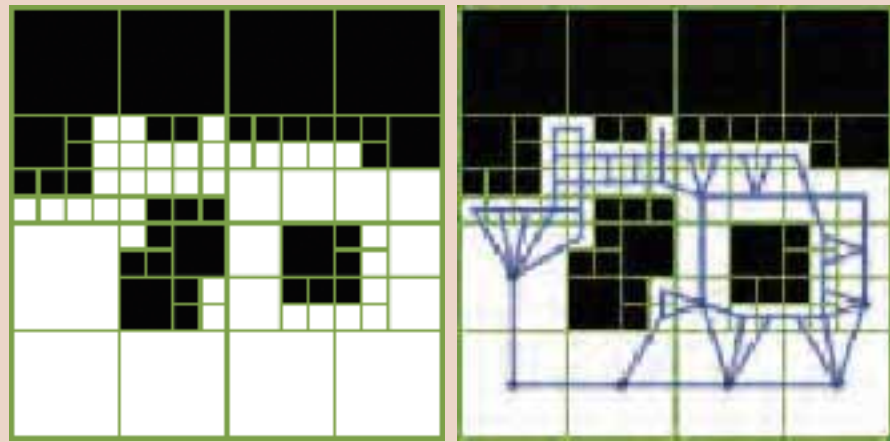
## Kontext und Perspektiven

Im Rahmen des Projektes wurde ein Robotersystem entwickelt, das in der Lage ist, eine Bibliothek selbständig auszukundschaften, Regale zu vermessen und eine Wegplanung vorzunehmen. Weitere Module sind für die Regelung der genauen Ausrichtung des Roboters sowie für Analyse, Speicherung und den Vergleich von Bildern von Büchern zuständig.

Mit dem Projekt, das Gebiete der Robotik, der Computer Vision und des maschinellen Lernens



**Abbildung 7:**  
Segmentierung zur Trennung einzelner Bücher.



**Abbildung 5 (oben links):**  
In einer Karte sind eine Wand sowie zwei Objekte (schwarz) erfasst. Mit Hilfe eines Quadrees (grün) wird die Karte in rechteckige, entweder freie oder besetzte Bereiche zerlegt.

**Abbildung 6 (oben rechts):**  
Überziehen des Quadrees mit einem Graphen. Dabei wird dem Mittelpunkt eines jeden freien Rechtecks ein Knoten zugeordnet, und die Knoten von benachbarten Rechtecken werden mit einer Kante verbunden.

verbindet, wurde eine Basis geschaffen, die es ermöglicht, weitere wissenschaftliche Herausforderungen in Angriff zu nehmen. Dazu gehört die Datenfusion, welche u. a. im Rahmen der Zusammenführung der Informationen von vier verschiedenen Sensorsystemen durch das vSLAM-Modul zur Anwendung kommt. Aber auch das Thema *kooperative Problemlösung* wurde durch die Verteilung von Aufgaben auf mehrere Roboter mit verschiedenen Eigenschaften vorbereitet.

Ziel ist es, ein flexibles System zu schaffen, welches sich durch eine automatische Adaption auf neue Umgebungen mit neuen Zielobjekten umstellen lässt. Dabei können spezielle Entwurfsmuster eine Rolle spielen, die Standardlösungen für bestimmte Probleme der Robotik, der Computer Vision, des maschinellen Lernens sowie Kombinationen hieraus anbieten.

## Kontakt

**Prof. Dr. Josef Pauli**  
Intelligente Systeme

Tel.: 02 03 / 3 79 - 37 18  
josef.pauli@uni-due.de

**Dipl.-Inform. Michael Müller**  
Tel.: 02 03 / 3 79 - 35 83  
michael\_mueller@uni-due.de

**Dipl.-Math. Anastasia Noglik**  
Tel.: 02 03 / 3 79 - 31 24  
anastasia.noglik@uni-due.de

Fax.: 0203 379 4363  
www.uni-due.de/is/

