

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Konstruktion, der Bau und die Adaptivität von autonomen Gehmaschinen ist eine Aufgabe, die vielfältige und komplexe Problemstellungen bietet. Die Wechselwirkungen zwischen der Maschine und der kontrollierenden Software bergen verschiedene Möglichkeiten, sowohl für technische Probleme als auch für elegante Lösungen.

Diese Arbeit stellt eine Reihe von Gehmaschinen vor, die sukzessive verbessert und an ihre Umwelt angepaßt worden sind. Von dem stark am natürlichen Vorbild, der Stabheuschrecke *Carausius morosus*, ausgerichteten Modell TARRY I über den aus den Erkenntnissen des Vorgängers stark verbesserten TARRY II bis hin zur Gehmaschine TARRY IIA, die informationsautonom gebaut werden konnte. Bei den entwickelten Robotern ist das Hauptaugenmerk auf eine möglichst einfache Konstruktion gelegt worden. Die hohe Elastizität der Mechanismen wurde zugunsten eines geringen Gewichts in Kauf genommen. Die Maschinen und die implementierten Kommunikationsmechanismen sind dabei so aufgebaut, daß sie die Implementation anderer Kontrollmechanismen ermöglichen und unterstützen. Diese gesamte Entwicklung wird komplettiert durch den Einsatz einer Kopie von TARRY II zur experimentellen Überprüfung alternativer Koordinationsstrategien an der Universität Bielefeld.

Zusammen mit der Konstruktion ist die Sensorik der Roboter weiter verbessert worden. Dabei wurden zum einen die vorhandenen Sensoren optimiert, zum anderen wurde der Umfang der zur Verfügung stehenden Informationen erweitert, beispielsweise durch Einführung der Dehnungsmeßstreifen zur Belastungsmessung und des Accelerometers zur Messung der Inklination.

Die Berechnung der Gangmuster erfolgt mit Hilfe der am Fachgebiet Mechanik der Gerhard-Mercator-Universität entwickelten Bibliothek WALKINGLIB. Hiermit ist es möglich, für beliebige Maschinen mit mindestens zwei symmetrischen Beinpaaren analytisch korrekte Gelenkwinkelverläufe zu erzeugen. Um die notwendigen Rechenzeiten zu optimieren, werden neuronale Netzwerke trainiert, die bei einer reduzierten Anzahl von Parametern die Gelenkwinkel in einem Bruchteil der Zeit mit guter Genauigkeit approximieren.

Die Aufgabe der WALKINGLIB und der neuronalen Netze ist es, eine möglichst genaue und schnelle Berechnung der Gangmuster zu gewährleisten. Diese Berechnungen dienen als Basis für die adaptive Bewegungskoordination. Die autonome Bewegung in unbekanntem, unstrukturiertem Gelände bringt ein hohes Maß an Ungenauigkeiten mit sich, die durch die große Elastizität der verwendeten Roboter noch verstärkt wird. Als Möglichkeiten, trotz dieser Unsicherheiten eine autonome Fortbewegung zu ermöglichen, werden Reflexe und planende Module vorgestellt. Diese sind in der Lage, mit lokalen und globalen Reaktionen die Eingangsparameter der neuronalen Netzwerke der Situation entsprechend anzupassen. Die Reflexe stellen eine *ad-hoc* Reaktion auf bestimmte Reize dar und implementieren damit die

Fähigkeit zur unmittelbaren adaptiven Reaktion auf bestimmte Ereignisse. Beispiele hierfür sind das verfrühte oder verspätete Aufsetzen eines Fußes, die Kollision mit einem Hindernis oder das Anpassen der Körperneigung. Die planenden Module dienen dazu, vorhandene Informationen zu speichern, zu kombinieren und auszuwerten, beispielsweise mit einem internen Modell der Maschine. Dadurch ist es möglich, vorausschauende Aktionen zu implementieren, wie dies unter anderem mit der lokalen Umgebungskarte gezeigt worden ist.

Die Funktionsfähigkeit der einzelnen Elemente und ihrer Kombinationen sind in unterschiedlichen Experimenten und Demonstrationen während der Weiterentwicklung der Gehmaschinen erprobt und verbessert worden. Einige exemplarische Versuche sind in dieser Arbeit dokumentiert worden, um eine Vorstellung der realen Maschinen und ihrer Leistungsfähigkeit zu vermitteln.

Die Vorbilder aus der Natur und die Ergebnisse während der Entwicklung zeigen, daß zur erfolgreichen Adaption an die Umgebung weniger eine hohe „Rechenkapazität“ als viel mehr die günstige Kombination und Nutzung von Körperbau, Sensorik und Adaptionstrategie entscheidend ist. Die vorgestellten Maschinen und Methoden haben dabei bewiesen, daß sie in der Lage sind, ein breites Spektrum verschiedener Umgebungen und Hindernisformen erfolgreich zu bewältigen.

Zur weiteren Verbesserung dieser Fähigkeiten der TARRY Gehmaschinen bieten sich folgende Arbeitsfelder an:

- Umstellung der Gehmaschine TARRY IIA auf einen optionalen Betrieb mit Akkumulatoren zur Erreichung von Energieautonomie,
- Ausbau der Strategie zur Verhinderung von Kollisionen mit großen Hindernissen, beispielsweise durch Kopplung mit der FINDPATH Bibliothek [Bus99] zur globalen Bahnplanung, und
- Einbau zusätzlicher Sensorik, beispielsweise zur Erkennung und Ortsbestimmung von Kollisionen.

Als wichtigste Weiterentwicklung kann allerdings die fortschreitende Nutzung und Kombination der Signale zur Verfügung stehender und hinzuzufügender Sensoren gesehen werden. Insbesondere durch den Einsatz von TARRY als kostengünstige und einfach zu nutzende Plattform für unterschiedliche Strategien sind hier weitere Erkenntnisse zu erwarten.