

1 Einführung

Der Mensch hat sich im Laufe seiner Entwicklung eine immer größere Mobilität ermöglicht. Neben der Entwicklung der mechanischen Fortbewegungsmittel war insbesondere der Bau von einfachen Wegen, die Verlegung von Eisenbahnschienen und der Bau von Straßen, Brücken, Kanälen und Autobahnen dafür verantwortlich. Die Verwendung von Fahrzeugen, die einen präparierten Fahrweg benötigen, stößt allerdings in vielen Fällen an Grenzen. Oft ist es wirtschaftlich oder ökologisch nicht sinnvoll oder möglich, die notwendige Infrastruktur zu errichten. Dies ist in der Regel der Fall, wenn das Ziel nur selten oder im Extremfall auch nur einmalig erreicht werden soll, oder wenn andere Faktoren wie hohe laterale Schäden dagegen sprechen. Dies ist zum Beispiel bei Forst- oder Gebirgsarbeiten der Fall. Zusätzlich ist in vielen Fällen die Zeit, die notwendig ist, einen entsprechenden Weg vorzubereiten, nicht vorhanden. Diese Situation tritt beispielsweise bei Unfällen oder Naturkatastrophen auf. Herkömmliche landgestützte Fortbewegungsmittel die keine vorbereiteten Wege benötigen, wie Kettenfahrzeuge, sind auch nur begrenzt geländegängig und widersprechen regelmäßig den ökologischen Anforderungen, da sie den Fahrweg sehr stark verdichten und schädigen.

Als Abhilfe bieten sich gehende Mechanismen an. Die Natur hat eindrucksvoll gezeigt, daß gehende Lebewesen praktisch jeden Punkt auf den Landmassen der Erde erreichen können. Die gehende Fortbewegung zeichnet sich durch ihre extrem große Flexibilität aus. Kleinere Unebenheiten werden direkt ausgeglichen, Hindernisse können umgangen, überstiegen oder erklommen werden. Da lediglich diskrete Aufstandspunkte für die Lokomotion notwendig sind, sind die Anforderungen an den Untergrund weitaus geringer als bei rollenden Fahrzeugen, die kontinuierliche Verhältnisse verlangen.

Die erhöhte Flexibilität von Gehmaschinen wird allerdings durch eine deutlich erschwerte Steuerung erkauft. Die komplexen Mechanismen müssen, um die oben beschriebenen Vorteile bieten zu können, über eine hohe Anzahl an mechanischen Freiheitsgraden verfügen.

Um auf mittelfristige Sicht eine wirtschaftliche Nutzung solcher Maschinen zu ermöglichen, ist es notwendig, eine hinreichend einfache Bedienung zu garantieren. Dies bedeutet, daß die Maschine in der Lage sein muß, sich in unbekanntem Gelände praktisch autonom fortzubewegen. Das Wort autonom leitet sich ab vom griechischen *αὐτόνομος* das in [Ben90] als

„nach eigenen Gesetzen lebend, nach eigener Wahl, unabhängig, bes. politisch selbständig“

interpretiert wird.

Die Maschine muß also auf die groben Vorgaben eines Bedieners, der beispielsweise eine Richtung oder einen Zielpunkt angibt, reagieren, indem sie die dazu notwendige Gelenkkoordination und Überwindung eventueller Hindernisse selbständig übernimmt. Ebenso muß die Maschine in der Lage sein, gefährliche Situationen, beispielsweise Instabilität, zu erkennen und zu verhindern oder zumindest darauf hinzuweisen.

Um all diese Anforderungen zu erfüllen, bietet es sich an, bei der Entwicklung solcher Maschinen Vorbilder aus der Natur als Modell zu verwenden. Im Verlaufe der Evolution haben sich dort Verhaltensweisen entwickelt, die die oben angesprochenen erforderlichen Eigenschaften beinhalten.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Maschinen sind Sechsbeiner. Als Modell diente die Stabheuschrecke *Carausius morosus*. Insbesondere stellen sechsbeinige Mechanismen einen guten Kompromiß aus statischer Stabilität während der Bewegung und dem notwendigen Koordinationsaufwand, der sich aus der Anzahl der Gelenke ergibt, dar.

Bei der Beobachtung und Analyse der Bewegungsabläufe der Vorbilder aus der Natur steht die technische Nutzung der Maschine im Vordergrund. Eine sogenannte *Biomimikry*, die die Verhaltensweisen eines Tieres lediglich nachahmt, ohne deren Nutzen zu erkennen oder zu hinterfragen wäre kontraproduktiv. Wie schon in einer Arbeit von PIEKENBROCK [Pie96] angemerkt, ist zu fordern, daß

„... die Ergebnisse der biologischen Forschung als Anregung genommen werden. Die Implementierung muß jedoch berücksichtigen, daß die Steuerung für eine *technische* Laufmaschine geeignet sein muß, die über eine andere Antriebstechnik und Sensorik verfügt als eine Stabheuschrecke.“

Um die bisher verfolgten Lösungsansätze für diese Problematik darzustellen, sollen die grundsätzlichen bisher verwendeten Möglichkeiten zur Bewegungskoordination bei Gehmaschinen im folgenden Abschnitt exemplarisch präsentiert werden.

1.1 Einordnung existierender Koordinationsmechanismen

Bei der Bewegungskoordination von Gehmaschinen greifen verschiedene Probleme ineinander. Neben der Konstruktion und Verschaltung der Maschinenstruktur, der Aktoren und der Sensoren sind die eigentlichen Koordinationsaufgaben zu lösen. Dies beinhaltet zuallererst die Ansteuerung der Aktoren und die Meßwerterfassung der Sensorik. Auf diesen Funktionen aufsetzend folgt die eigentliche Bewegungskoordination.

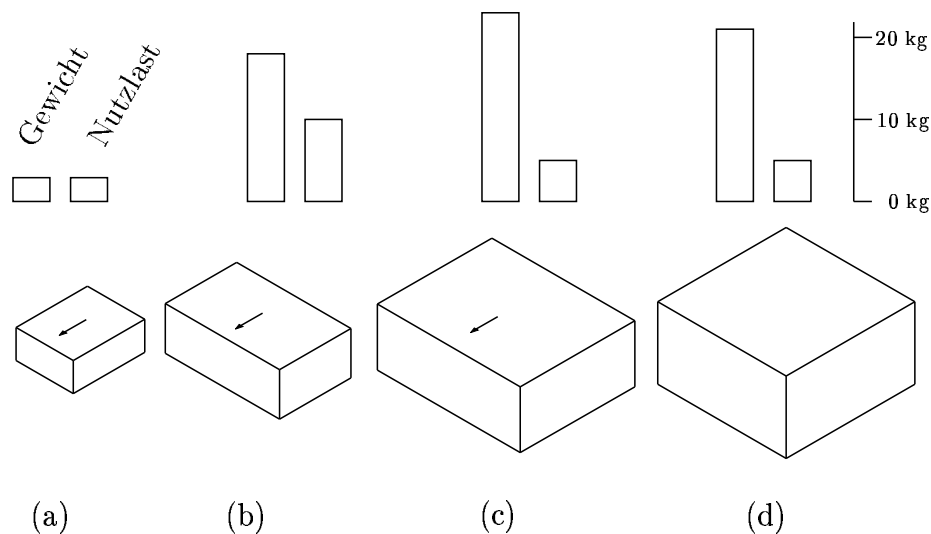


Abbildung 1: Gewicht, Nutzlast und Ausmaße der Maschinen (a) TARRY II, (b) LAURON III, (c) TUM und (d) KATHARINA im Vergleich

Für alle Elemente dieses Zusammenspiels sind verschiedene Ansätze möglich und auch gebräuchlich. Die Palette der eingesetzten Strategien reicht dabei von Konzepten aus der klassischen Robotik bis hin zu stark biologisch inspirierten Modellen. Dazwischen treten etliche Mischformen auf.

Dabei finden auch in Deutschland alle praktisch eingesetzten Methoden Verwendung. Anhand der sechsbeinigen Gehmaschinen KATHARINA, TUM und LAURON sollen die einzelnen Koordinationsprinzipien kurz angesprochen werden. Damit wird es möglich sein, das im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellte Konzept zur Steuerung der Gehmaschine TARRY besser einzuordnen.

Die äußere Form der beschriebenen Maschinen ist in zwei der drei Fälle insektenartig. Lediglich für KATHARINA, die mit den Methoden der klassischen Robotik arbeitet, wurde auch eine entsprechende äußere Form gewählt. Dieser Sechsheiner hat einen rotationssymmetrischen Aufbau und findet damit kein entsprechendes Gegenstück in der Natur. Bedingt durch diese Konstruktion hat die Maschine keine Vorzugs- oder Vorwärtsrichtung.

Die Ausmaße der Maschinen, deren Eigengewicht und Tragfähigkeit nach [Ber01] werden in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Beim Vergleich ist zu beachten, daß die vertretenen Maschinen unterschiedliche Stadien der Energie- und Prozessorautonomie repräsentieren. Das Verhältnis von Eigengewicht zu Nutzlast dient nur der Übersicht und kann nicht direkt zwischen den Maschinen verglichen werden.

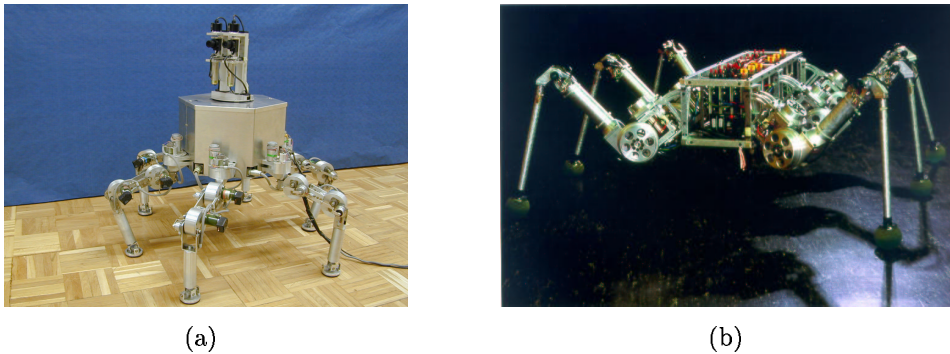


Abbildung 2: Die Gehmaschinen KATHARINA (a) und TUM (b)

1.1.1 Katharina

Wie oben erwähnt, handelt es sich bei der Gehmaschine KATHARINA um eine Konstruktion aus dem Bereich der klassischen Robotik. Die Maschine ist am Fraunhofer Institut in Magdeburg in der Arbeitsgruppe von Dr. Schmucker entwickelt worden, wobei einzelne Konzepte auf Arbeiten an der Gehmaschine MASHA [DGG⁺83] zurückgehen. KATHARINA ist konzipiert, um mit einem montierten Werkzeug zum Einsatzort zu gelangen und dort bestimmte Arbeiten durchzuführen [SSI96]. Die sechs Beine mit je drei Freiheitsgraden sind gleichmäßig am Korpus des sechskantigen prismatischen Grundkörpers angebracht.

Die Koordination der Beine erfolgt über eine hierarchische Organisation von Microcontrollern, bei der ein zentraler Controller die sechs Beincontroller steuert. Jedes Bein enthält einen 3-Komponenten Kraftsensor, mit dessen Hilfe eine Krafrückführung erreicht wird.

Zum Aufgabenspektrum der Gehmaschine KATHARINA gehört nicht, sich in unbekanntem Gelände autonom zu bewegen. Daher sind auch keine speziellen Mechanismen zur Hinderniserkennung etc. vorhanden. Vielmehr soll, unter anderem mit der Hilfe der am Körper angebrachten Stereokamera, eine Plattform zur Verfügung gestellt werden, die es einem Operator erlaubt, die Maschine zu einem Arbeitsort zu manövrieren und dort einzusetzen. Dies schließt durch die Kraftregelung auch den Einsatz auf nachgiebigen Untergründen mit ein.

Bei der Konzeption und der Steuerung der Maschine werden die Konzepte der klassischen Robotik auf einen Sechsbäuer angewendet. Die verwendeten Methoden zielen darauf ab, die Krafrückführung und Positionierung auf diese speziellen Gegebenheiten anzuwenden. Dies erfordert insbesondere die Bestimmung von physikalischen Parametern der Maschine, wie beispielsweise Massen und Steifigkeiten. Diese Parameter sind notwendig, um die Gleichungssysteme, die sich aus den regelungstechnischen Aspekten der Kraftadaptivität ergeben, zu lösen. Der rechnerische Aufwand

bei Anwendung dieser Methode ist hoch. Die Maschine ist aber allein mit diesem Verfahren nicht in der Lage, wirklich autonom in unbekanntem Gelände zu agieren.

1.1.2 TUM

Dem Ansatz von KATHARINA steht das Konzept der Gehmaschine TUM des Instituts B für Mechanik der Technischen Universität München gegenüber, die in der Arbeitsgruppe von Prof. Pfeiffer entstanden ist. Hier wird ein weitgehend der Stabheuschrecke *Carausius morosus* (siehe auch Kapitel 2) nachempfunderer Roboter mit Hilfe dezentraler, der Biologie entlehnter, Mechanismen gesteuert.

Die dreisegmentigen Beine, deren Segmente alle die gleiche Länge haben, sind in der gleichen Orientierung wie bei der Stabheuschrecke am Zentralkörper angebracht. Die Längenverhältnisse der einzelnen Segmente stimmen annähernd mit denen des Vorbilds überein. Die Hüftbreiten der Maschine sind für alle drei Beinpaare identisch. Die Maschine wird angetrieben von Gleichstrommotoren, die teilweise mit „Harmonic Drive“-Getrieben untersetzt werden. Das dritte Segment der Beine ist jeweils mit Dehnungsmeßstreifen ausgestattet. Die Enden dieser Segmente besitzen einen Kontaktsensor, um das Aufsetzen der Beine feststellen zu können.

Der stark an das Beispiel aus der Biologie angelehnte Aufbau der Maschine geht mit einem entsprechend biologisch motivierten Koordinationsansatz einher. Dessen Mechanismen stützen sich dabei auf die in [CBD⁺95] gegebenen Regeln, die die Kommunikation zwischen den Einzelbeinen und deren excitatorischen (anregende) und inhibitorischen (dämpfende) Wirkung bestimmen. Diese Regeln sind in Abbildung 3 dargestellt.

Die Architektur dieses Systems, die ursprünglich in drei Schichten [Wei93] geplant und danach auf vier Schichten [SP98] erweitert wurde, sieht eine starke Autonomie der einzelnen Beine vor. Durch den Austausch von Informationen zwischen den contralateralen und ipsilateralen Beinen wird ein Großteil der notwendigen Kontrolle bereits in den unteren Ebenen veranlaßt. Die oberste, vierte Ebene, dient lediglich dazu, die Vorwärtsgeschwindigkeiten des Zentralkörpers und die Drehgeschwindigkeit um die Hochachse, beispielsweise durch die Unterstützung eines Kamerasystems, vorzugeben.

Dieser sehr biologische Ansatz hat den Vorteil, einen Großteil der Koordinationsaufgaben in den unteren Schichten der Kontrollarchitektur zu bearbeiten. Es stellt sich aber die Frage, ob es möglich und sinnvoll ist, für Gangarten, die zwar nicht in der Natur beobachtet werden, die aber dennoch erwünscht sind, ebensolche Regeln selber zu entwerfen.

Ebenso berücksichtigt dieser Ansatz nur wenig, daß Verhaltensweisen, die für das ähnlich organisierte Vorbild sinnvoll oder akzeptabel sind, für Maschinen keine geeignete Lösung darstellen. In Fragen der Kippstabilität etc. wird eine Instanz sinnvoll, die zentrale Vorgaben für alle Beine machen kann.

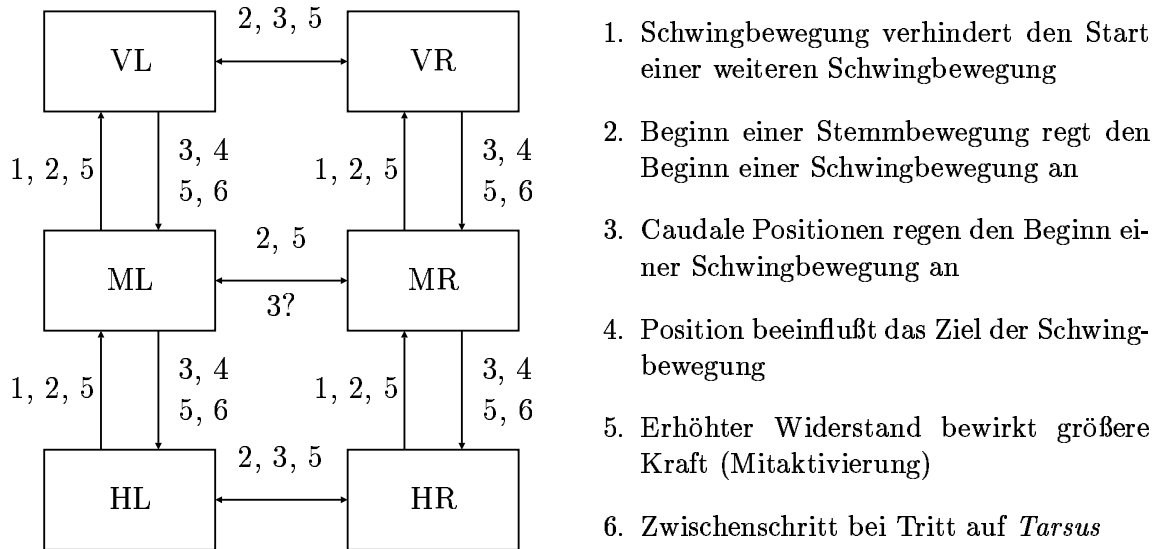


Abbildung 3: Koordinationsmechanismen zwischen den Beinen der Stabheuschrecke (VL $\hat{=}$ Vorne Links, ...)

1.1.3 Lauron

Die Gehmaschine LAURON II wurde am Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe als Nachfolger von LAURON [Ber94] konzipiert. Im Zuge weiterer Verbesserungen durch die Arbeitsgruppe um Prof. Dillmann ist diese Maschine dann zu LAURON III weiterentwickelt worden.

Ebenso wie der Schreitroboter TUM verfügt LAURON III über sechs bis auf die Symmetrie identische Beine mit jeweils drei Segmenten. Die Längenverhältnisse entsprechen mit 1:4:5 nicht den Verhältnissen der Stabheuschrecke. Die Beine sind um 30° gegenüber der Horizontalen nach unten geneigt am Körper befestigt. Die Vorder- und Hinterbeine sind zusätzlich um jeweils 30° bezüglich der Längsachse nach vorne- bzw. hinten gedreht. Damit entsprechen die Drehungen nur sehr grob den Verhältnissen der Stabheuschrecke und sind hauptsächlich auf leichte Montage hin optimiert.

Die Steuerungsarchitektur dieser Gehmaschine hat im Verlauf der letzten Jahr sehr große Veränderungen erfahren. Die Maschinen LAURON und LAURON II wurden als Plattform zur Untersuchung verschiedener Methoden, wie Reinforcement-Verfahren, Q-Lernen und Backpropagation-Training eingesetzt. Dabei bestand keine konsistente Verbindung zwischen den einzelnen Verfahren. Die entscheidenden Impulse brachten insbesondere die größere Sensorausstattung und die mechanische Verbesserung von LAURON zu LAURON II.

Die mittlerweile auf LAURON III implementierte Architektur ist komplett in algorithmischer Form programmiert. Sie beruht auf einer Gesamtarchitektur, die es

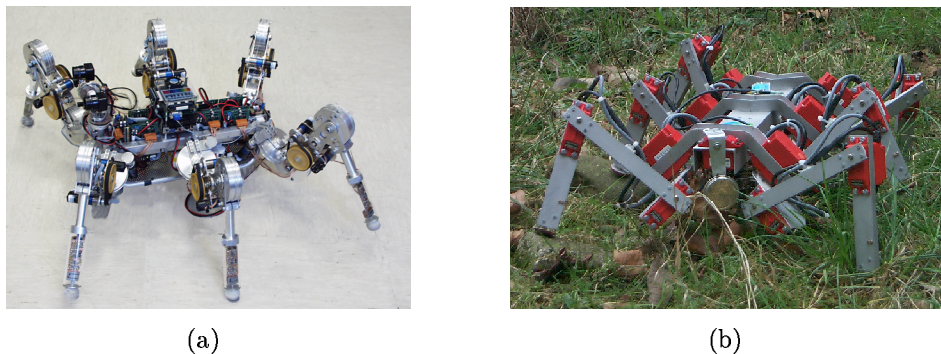


Abbildung 4: Die Gehmaschinen Lauron (a) und Tarry II (b)

ermöglichen soll, alle am Forschungszentrum Informatik verwendeten Gehmaschinen mit einem einheitlichen Softwareframework kontrollieren zu können. Insgesamt ist ein Ansatz realisiert worden, der große Ähnlichkeiten mit dem in dieser und in früheren Arbeiten, wie [FGLK98], [FGKL99] und [FBG⁺00a], entwickelten Koordinationskonzept hat. In einem hierarchischen Gesamtsystem wird den Beinen so viel Autonomie wie möglich gewährt. Allerdings existiert eine übergeordnete Ebene, die es ermöglicht, globale Aufgaben, wie beispielsweise Stabilisierung, wahrzunehmen und dabei die einzelnen Beine aus den höheren Schichten heraus gezielt zu beeinflussen.

1.1.4 Zusammenfassung der Koordinationsmechanismen

Methoden, denen eine genaue analytische Kontrolle zugrundeliegt, stoßen durch die hohe Zahl der Freiheitsgrade und die Komplexität der möglichen Umgebungen schnell an ihre Grenzen und sind praktisch kaum zu beherrschen.

Der diese Probleme vermeidende Ansatz besteht in der Nutzung einer dem Vorbild eines realen Insektes ähnlichen, extrem dezentralisierten Kontrolle, basierend auf Regeln und einfacher Kommunikation. Dieser Ansatz findet seine Schranken an der Erweiterbarkeit und der teilweise technisch notwendigen zentralen Kontrolle.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß hierarchische Mechanismen, die einen Teil der Aufgaben in untere Schichten delegieren können, die beste Kombination von Kontrolle und Beherrschbarkeit sowie Flexibilität zu bieten scheinen. Aus diesem Grunde ist auch für die Gehmaschine TARRY ein entsprechender Ansatz verfolgt worden, der in dieser Arbeit vorgestellt wird.

1.1.5 Weitere existierende Gehmaschinen

Durch die freie Zusammensetzung verschiedener Aspekte der dargestellten Methoden sind beliebig viele Kombinationen möglich. Wie sich später zeigen wird, ist aber

auch das Zusammenspiel der Maschine und der Kontrollmechanismen von entscheidender Bedeutung, was die Anzahl der Kombinationen noch erhöht. Die oben kurz vorgestellten Projekte haben bereits eine breite Auswahl gezeigt.

Daneben gibt es eine Vielzahl weiterer Gruppen, die an ähnlichen Projekten arbeiten. Die unterschiedlichen Zielsetzungen, die den gebauten Maschinen und den implementierten Methoden zugrunde liegen, führen allerdings dazu, daß praktisch kein direkter Vergleich möglich ist. Daher sollen hier lediglich einige ausgesuchte Verweise auf weitere aktuelle Projekte gegeben werden, um die TARRY Roboter vor diesem Hintergrund besser einordnen zu können.

Robot III

Die Roboter ROBOT I, ROBOT II und ROBOT III sind an der Case Western Reserve Universität in Ohio (USA) unter der Leitung von Prof. Quinn im Labor für biologisch motivierte Roboter entstanden. Bei dem fortlaufend verbesserten ROBOT handelt es sich um eine Maschine, die der Schabe *Blaberus discoidalis* nachempfunden ist. ROBOT III hat insgesamt 24 Freiheitsgrade. Dabei haben die vorderen Beine jeweils fünf, die mittleren Beine je vier und die hinteren Beine je drei Freiheitsgrade. Dies ist ein deutlicher Unterschied zum Vorgänger ROBOT II, der sechs identische Beine mit je drei Freiheitsgraden genutzt hat. Mit der Anpassung wurde den unterschiedlichen Aufgaben der einzelnen Beinpaare bei dem natürlichen Vorbild Rechnung getragen.

Die Versorgung der pneumatisch betriebenen Aktuatoren erfolgt über eine externe Quelle. Die bestehenden Maschinen werden demnächst um ROBOT IV erweitert werden. ROBOT IV soll sich vollkommen energieautonom bewegen können. Durch die Anpassung der passiven Steifigkeit der Beine soll die hierzu notwendige Verbesserung der Energieausnutzung erreicht werden[NQBF97][QNB⁺01].

Lobster

Der LOBSTER Roboter, der unter Leitung von Prof. Ayers am Marine Science Institute in Boston und East Point, Massachusetts (USA) entwickelt wird, ist nach dem Vorbild eines Hummers gebaut. Die acht Beine der Maschine sind mit jeweils drei Freiheitsgraden ausgestattet. Zur zusätzlichen Stabilisierung des Roboters dienen drei aktive Elemente, die den Scheren bzw. dem Schwanz nachgebildet und entsprechend rostral bzw. kaudal angeordnet sind. Die Bewegung der Maschine erfolgt durch antagonistische Muskelemente, die mit Hilfe einer Formgedächtnislegierung realisiert worden sind.

Ziel der Maschine ist es, die besonderen Eigenschaften des Vorbilds bei der Bewegung in flachem Wasser, auch unter Einfluss von Brandung und Strömung, zu erreichen. Dies wird vor allem von den Stabilisierungselementen unterstützt, deren Bewegungen von Beobachtungen am natürlichen Vorbild abgeleitet worden sind. Mit den angestrebten Fähigkeiten soll die Maschine insbesondere in die Lage versetzt werden, auf dem Meeresgrund auch in Küstennähe nach Minen zu suchen. Eine weitere

Besonderheit ist dabei der geplante Einsatz mehrerer LOBSTER Roboter, um große Bereiche abzusuchen. Dabei sollen die Gehmaschinen am Grund von schwimmenden Robotern unterstützt werden. Um bei der autonomen Bewegung der Mechanismen eine vollständige Abdeckung des abzusuchenden Geländes zu erreichen, sollen alle Maschinen von zentraler Stelle aus lose koordiniert werden[AWW⁺00].

RHex

Der Roboter RHEX, der von der Arbeitsgruppe von Prof. Buehler an der McGill Universität in Montreal (Kanada) gebaut worden ist, hat einige besonders bemerkenswerte Fähigkeiten. Die Maschine hat an ihrem Körper sechs Beine mit jeweils einem rotatorischen Freiheitsgrad montiert. Indem sie auf keine Weise versucht, morphologische Details eines natürlichen Vorbildes nachzubilden, hebt sie sich deutlich von den anderen hier vorgestellten Robotern ab. Durch eine sorgfältige Abstimmung der Kontrollmechanismen und der Elastizität der Beine ist die Maschine ausgesprochen geländegängig. Unter anderem ist der Sechsheiner mit einer Länge von ca. 51 cm und einem Gewicht von ca. 8 kg der erste energieautonome Sechsheiner, der dynamische Bewegungen ausführen kann und der einzige, der die Gangart „pronking“ beherrscht[MB01a]. Bei diesem Gang, der in der Regel bei Gazellen beobachtet werden kann, verlassen alle vier Beine praktisch gleichzeitig den Boden. Bei RHEX kann damit im Vergleich zu anderen Gangarten die Vorwärtsgeschwindigkeit bei geringerem Energieverbrauch erhöht werden. Zusätzlich ist die Maschine trotz der geringen Körperhöhe von ca. 13 cm in der Lage, normale Treppenstufen sowohl auf- als auch abwärts zu bewältigen[MB01b].

Eine umfassende Übersicht bereits gebauter, aktueller und noch in der Entwicklung befindlicher Maschinen findet sich bei Berns [Ber01].

1.2 Inhalt und Ziel der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in insgesamt sechs Teile. Auf diese Einleitung folgt im zweiten Kapitel die Vorstellung der an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg im Fachgebiet Mechanik gebauten Gehmaschinen. Dabei wird zuerst das biologische Vorbild und die grundlegende Konstruktion der hier entwickelten Gehmaschinen vorgestellt sowie die Abweichungen der einzelnen Modelle voneinander betrachtet. Darauf folgt eine Beschreibung der verwendeten Aktorik- und Sensorik-elemente, die auf den einzelnen Maschinen in verschiedenen Kombinationen zum Einsatz kommen. Die Meßprinzipien und die Ausgangssignale der Sensoren werden beschrieben.

Das dritte Kapitel behandelt die Kommunikation der Elemente, die zum Betrieb der Gehmaschinen notwendig sind. Dies beinhaltet zum einen die Erfassung der Sensor-meßwerte mit Hilfe der beteiligten Meßkarten. Zum anderen fällt die Kommunikation der beteiligten Rechner untereinander in diesen Bereich. Diese Kommunikation ist

notwendig, da die gesamte Bewegungskoordination als verteilte Anwendung konzipiert ist. Das Schichtenmodell der Kommunikation und die verteilten Anfragen der Rechner untereinander werden behandelt.

Das vierte Kapitel erläutert die zur Bewegungskoordination eingesetzten Softwarekomponenten. Die Gangmustererzeugung mit Hilfe der Softwarebibliothek WALKINGLIB und deren Parameter werden dargestellt. Danach folgt zuerst eine kurze Einführung in die Methode der neuronalen Netze. Die Ergebnisse der analytischen und approximativen Gangmustererzeugung werden hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit und Genauigkeit miteinander verglichen.

Im fünften Kapitel wird die Koordinationssoftware selbst behandelt. Dazu werden die hier verwendeten Parameter erläutert und die einzelnen Ebenen der Software näher aufgeschlüsselt. Die Reflexreaktionen werden ebenso beschrieben wie die planenden Module, die durch Beobachtung einer virtuellen Maschine die bereits gewonnenen Informationen besser auswerten und damit die Koordination der Maschine in komplexer Umgebung deutlich verbessern. Bei beiden wird das Hauptaugenmerk auf die sinnvolle Behandlung der Ungenauigkeiten gelegt, die durch das Spiel, die Elastizität und die fehlerbehafteten Sensorsignale in die Kontrolle hineinspielen.

Das Zusammenspiel aller beschriebenen Komponenten wird im sechsten Kapitel experimentell überprüft. Dabei werden Tests der Gehmaschine in verschiedenen Umgebungen dokumentiert. Neben dem Gang in einer einfachen Umgebung wird die Behandlung verschiedener Hindernisformen dargestellt.

Das siebte Kapitel faßt die wichtigsten Ergebnisse der vorhergehenden Kapitel zusammen und bietet eine Übersicht über die Möglichkeiten und Fähigkeiten der verschiedenen Gehmaschinen und der zugehörigen Software. Im Ausblick werden die Möglichkeiten für weitere Arbeiten aufgezeigt.