

Handout zum Vortrag: „Bewegungssteuerung von hexapoden Insekten / Robotern“ von Thorsten Reinhard

Abstrakt Die Bewegungssteuerung bei Insekten ist hierarchisch und modular. Das Gehirn übernimmt die globale Taktvorgabe und die Zentralen Mustergeneratoren (ZMG) in Verbindung mit Ganglien die lokale Beincoordination. Die Mustervorgabe des ZMG wird durch Sensorrückkopplung unterstützt. Die globale Beincoordination wird durch Regeln zur Koordination realisiert, wobei benachbarte Ganglien und ZMG Informationen über den aktuellen Zustand von Beinen austauschen. Diese Erkenntnisse wurden 1994 zur Entwicklung der ersten Bewegungssteuerung für Roboter nach biologischem Vorbild genutzt. Wenig später wurde mit WALKNET eine weitere Bewegungssteuerung entwickelt, welche künstliche Neuronale Netze einsetzt und im sechsbeinigen Laufroboter Tarry II erste gelungene Gehversuche für sich verzeichnete.



Abb.1 Stabheuschrecke
(*Carausius morosus*)

I. Motivation Ziel unserer Untersuchung ist das Lernen aus der Natur. Indem wir uns die Realisierungen aus der Natur anschauen und verstehen, wollen wir Rückschlüsse auf die Konstruktion der Bewegungssteuerung hexapoder Roboter ziehen. Mit Bewegungssteuerung beziehen wir uns auf die Steuerung des Laufens. Laufen verzeichnet einige Positiva gegenüber dem Fahren auf Rädern für sich, vor allem Geländegängigkeit, Steigvermögen, Manövrierfähigkeit, geringe Transportkosten und Multifunktionalität des Beines. Unser Ziel ist die stabile und robuste Gestaltung einer Bewegungssteuerung für einen Laufroboter mit genau sechs Beinen, die minimale Anzahl Beine, die man zur Realisierung von „schnellem“ statisch stabilen Laufen benötigt. Die Untersuchungen beziehen sich, bis auf wenige Ausnahmen, auf die Stabheuschrecke (*Carausius morosus*, siehe Abb.1), deren Laufverhalten sehr gut, auf Grund ihrer Morphologie (Beine liegen frei) zu untersuchen ist. Eine im Vergleich zu anderen Lebewesen geringe neuronale Komplexität macht die Stabheuschrecke zu einem gut geeigneten Versuchsobjekt.

Einsatzgebiete von hexapoden Robotern könnten sich im Rettungswesen, Militär, in Forst- und Landwirtschaft sowie bei Erkundungen im Weltraum ergeben.

II. Bewegungssteuerung bei hexapoden Insekten Untersuchungen ergaben eine hierarchische und modulare Bewegungssteuerung, die das Zentrale Nervensystem (ZNS) des Insekts in zwei funktionale Einheiten gliedert. Das Gehirn übernimmt die globale Taktvorgabe, indem es die Bewegung initiiert, beendet, Richtung und Geschwindigkeit vorgibt. Die lokale Beincoordination wird durch eine Ganglienkette an der Unterseite des Insekts übernommen. Für jedes Beinpaar

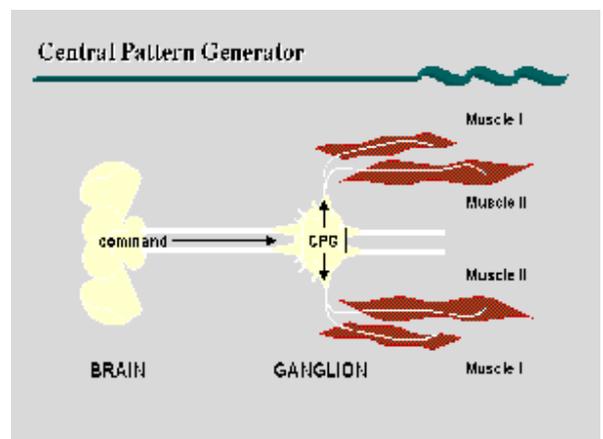


Abb.2 Das Zusammenspiel von ZMG, Ganglion und Muskeln

gibt es ein Ganglion. Ein Ganglion ist eine Ansammlung von Motorneuronen, welche die Steuereinheiten der Gelenke und somit die Muskeln des Beines ansteuern. Eine Rückkopplung von lokaler zur globalen Beincoordination wird nicht benötigt.

Lokale Beincoordination Ein Zentraler Mustergenerator (ZMG) für jedes Bein generiert dabei das zyklische Bewegungsverhalten eines Beines, indem er die Motorneuronen in den Ganglien entsprechend alternierend ansteuert, ohne auf einen externen Taktgeber angewiesen zu sein (siehe Abb. 2). Zu den ZMG und Ganglien bestehen Sensorrückkopplungen sowie Verbindungen einzelner Ganglien und ZMGen untereinander. Damit wird die lokale Koordination eines Beines vom ZMG, dem Ganglion und den Sensoren des Beines bestimmt.

Eine zyklische Bewegung besteht aus einer Stemmphase, wobei das Bein den Körper abstützt und ihn bei der Vorwärtsbewegung nach vorne stemmt und aus einer Schwingphase, bei der das Bein eine kreisförmige Bewegung nach vorne macht und wieder in die Stemmphase übergeht.

Der Übergang zwischen Stemm- und Schwingphase ist abhängig von Beinposition, Beinbelastung und dem Zustand anderer Beine.

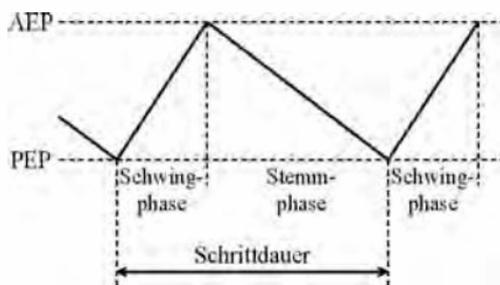


Abb.3 Merkmale des Schrittzklus eines Einzelbeins

Globale Beincoordination Für die globale Beincoordination hat Cruse einige Koordinationsregeln zwischen den Beinen erkannt. Bei der Koordination spielt das am weitesten hinten liegende Bein (HEL - hintere Extremlage) und das am weitesten vorne liegende Bein (VEL - vordere Extremlage) eine entscheidende Rolle. In HEL geht das Bein von der Stemm- in die Schwingphase über, in analog von der Schwing- in die Stemmphase.

Mechanismen der Beincoordination Die erste Regel zur globalen Beincoordination vermeidet, dass zwei benachbarte Beine sich gleichzeitig in der Schwingphase befinden. Falls ein Bein seine Schwingphase noch nicht beendet hat, wird die Schwingphase des davorliegenden Beines gehemmt, indem durch Modifikation der HEL die Stemmphase verlängert wird.

Durch die zweite Regel wird garantiert, dass bei der Beendigung der Schwingphase eines Beines das gegenüberliegende und das vordere Bein in die Schwingphase übergehen.

Regel drei sorgt für, dass wenn ein Bein von der Stemmphase in die Schwingphase übergeht, das jeweils hintere Bein durch eine entsprechende Position in die Stemmphase übergehen kann.

Um ein Bein beim Finden von Fußpunkten zu unterstützen, setzt sich das Hinterbein nach der Schwingphase an die Position der HEL des Vorderbeines. Für die Vorderbeine gilt entsprechendes bezüglich der Antennen (Regel 4).

Weitere Mechanismen zur Wiederherstellung bei Störungen und zur Auslösung von Reflexen sind noch von Bedeutung, beispielsweise korrigierende Reflexbewegungen bei „Überschwingen“ der Platzierung des hinteren Fußes (Regel 6).

Gangarten Bei der Stabheuschrecke wurden im Wesentlichen zwei Gangarten beobachtet: Die tripode und die tetrapode Gangart. Bei der tripoden Gangart sind immer das hintere und vordere Bein einer Körperseite in der Schwingphase, während auf der gegenüberliegenden Seite sich nur das mittlere Bein in der Schwingphase befindet. Die tripode Gangart wird vorwiegend beim schnellen Laufen unter wenig Last angewandt.

Bei langsameren Laufen unter viel Last wendet die Stabheuschrecke die tetrapode Gangart an, wobei sich zu jeder Zeit vier Beine auf dem Boden befinden und die Beine auf beiden Seiten wellenförmig in die Schwingphase übergehen.

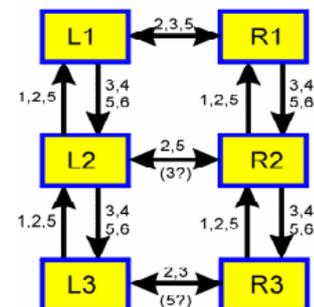


Abb.4 Beincoordination auf der linken (L1-L3) und rechten (R1-R3) Körperseite

Kurvenlaufen Beim Kurvenlaufen zeichnen sich die Beine im Kurvenäußeren durch eine höhere Geschwindigkeit, die Beine im Kurveninneren durch niedrigere Geschwindigkeit aus. Diese Charakteristik erreicht die Stabheuschrecke durch eine Anpassung der Schrittlänge durch Modulation der VEL und HEL, wobei die Beininkoordination stets beibehalten wird.

Einfluss von Sensoren Die Stabheuschrecke besitzt eine sehr große und redundante Anzahl von inneren und äußeren Sensoren an ihren Beinen. Sensorische Rückkopplungen bestimmen das zeitliche Verhalten der Bewegungsphasen mit. Sensoren identifizieren die VEL und HEL und zeigen an, wenn ein Bein den Körper nicht mehr zu stützen braucht und somit in die Schwingphase übergehen kann. Damit haben die Sensoren der Beine eine wesentliche Rolle bei der globalen und lokalen Beininkoordination inne.

Bei Mechanismen der Fußpunktsuche und Hinderniserkennung bzw. -vermeidung wird ebenfalls auf die Dienste der Sensoren vertraut. Taktile Sensoren der beiden Vorderbeine helfen dem Insekt, Fußpunkte zu finden beziehungsweise Hindernisse zu erkennen und zu umgehen.

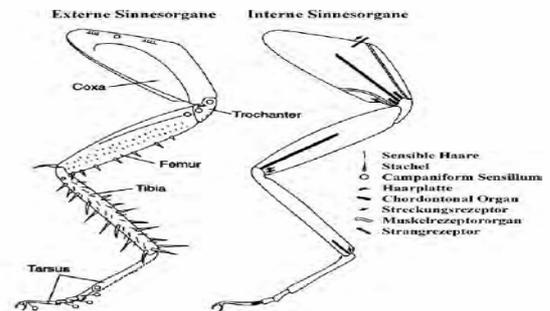


Abb.5 Externe und interne Sensoren am Bein der Stabheuschrecke

Zudem garantieren Sensorrückkopplungen der Gelenkwinkel in der Stemmphase jedes einzelnen Beines die Einhaltung einer bestimmten Körperhöhe.

Beobachtet wurde auch eine Modulation der Sensoreinflüsse. Bestimmte Sensordaten spielen nur in bestimmten Bewegungsphasen eine mitentscheidende Rolle, in anderen Phasen können sie dagegen völlig ignoriert werden. Am Ende der Schwingphase sind beispielsweise einige taktile Sensoren der Vorderbeine aktiv, die der Hinderniserkennung und Fußpunktsuche dienen, im restlichen Bewegungszyklus werden die Sensordaten nicht verwandt. Entsprechende Modulationen wurden auch bei Motorneuronen festgestellt. Damit ist auch klar, dass das Neuronale Netz des Insektes nicht statisch, sondern dynamisch ist.

Wenn es auch im ersten Augenblick kontraproduktiv erscheint, so kann es auch vorkommen, dass ein Insekt seine Sensoren komplett ignoriert, wie beim Schnellgehen der Schabe. Da der Sensordatenfluss zu langsam wäre, um bei hoher Geschwindigkeit der Schabe den Bewegungszyklus zu beeinflussen, wird auf Sensorrückkopplung verzichtet und so der Schabe schnelleres Fluchtverhalten ermöglicht. Der ZMG bestimmt damit überwiegend das Laufverhalten.

III. Bewegungssteuerung von hexapoden Robotern

Konventionelle analytisch algorithmische Methoden zur Bewegungssteuerung von hexapoden Robotern sind rechenaufwendig, vor allem durch die Dynamik der Umwelt und die redundante Möglichkeiten der Realisierung einer Bewegung.

Im Widerspruch zur Natur, wurde stets von einer zentralen Bewegungssteuerung ausgegangen.

Erste Ansätze zur Realisierung einer Steuerung der Laufbewegung, nach Vorbild der Natur gab es 1994 an der TU München.

Dabei wurde eine hierarchische und modulare Steuerung realisiert. Das Modell besteht aus der Regelung einer einzelnen Beinposition, aus Einzelbeinreglern, aus Mechanismen der Beininkoordination sowie aus einer globalen Taktvorgabe.

Bei der globalen Beininkoordination wurden die Mechanismen nach Cruse zum Teil eingesetzt, wobei einzelne Beininkoordinationsmodule Informationen über gegenseitige Zustände austauschen.

Statt Neuronale Netze werden in den einzelnen Einheiten Mikroprozessoren eingesetzt. Die Bewegungssteuerung wurde in der sechsbeinigen Laufmaschine der TUM eingesetzt.

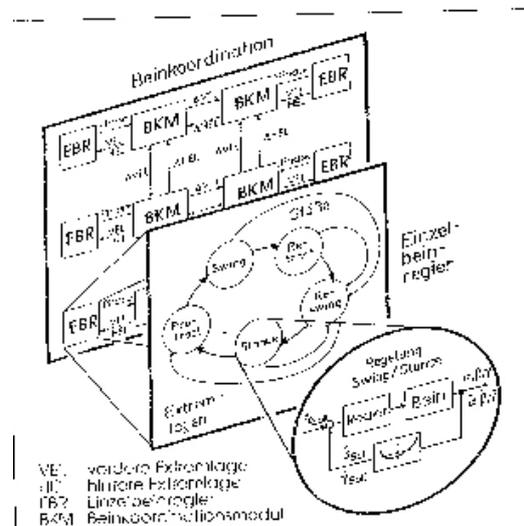


Abb.6 Die Hierarchie der Beininkoordination

WALKNET An der Universität Bielefeld wurde ein Steuerungssystem zur globalen Beincoordination und Einzelbeincoordination entwickelt, welches viele der bekannten Prinzipien von Insekten zur Bewegungssteuerung einsetzt. WALKNET beruht auf künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) und besteht im Prinzip aus drei Agenten: Je einen Agent für die Stemm- und Schwingphase sowie einen Selektor, der auf Grund Sensorinformationen zwischen den beiden Phasen wechselt. Damit übernimmt der Selektor die Aufgabe eines ZMG.

Die Ausgaben des Systems sind die Gelenkgeschwindigkeiten, als Eingabe dienen die Gelenkwinkel des Vorderbeines.

Der Agent für die Schwingphase (swing net) hat als Eingaben die aktuellen Gelenkpositionen, die gewünschten Gelenkpositionen und, um mögliche Reflexe auszulösen, Eingaben von Sensoren. Die Werte für die gewünschte Gelenkposition werden vom Agenten für die Zielposition (target net) geliefert, der auf Grund der HEL seines Vorderbeines, die entsprechenden Gelenkkoordinaten berechnet und den Tarsus exakt auf die Position setzt, in der das Vorderbein seine Stemmphase beendet hat. Diese Methode entspricht der vierten Koordinationsregel von Cruse und spart entsprechende Berechnung der Zielposition für jedes einzelne Bein.

Der Agent für die Stemmphase (stance net) übernimmt mit externen Agenten die Aufgaben der Geschwindigkeits- und Höheneinhaltung und ermöglicht Kurvenlaufen.

Geschwindigkeit, Richtung sowie Anfang und Ende einer Bewegung werden global vorgegeben.

Der Selektor entscheidet bezüglich seiner Sensordaten, die ihm Bodenkontakt und die HEL des Beines anzeigen, sowie auf Grund von vier Beinkoordinationsregeln, ob die Ausgabe des Agenten für Schwing- oder die Stemmphase aktiviert wird.

Ein wichtiges Grundkonzept von WALKNET ist die positive Rückkopplung, wodurch es ermöglicht wird, passive in aktive Bewegung umzusetzen. Somit initiiert Bewegung eines einzelnen Gelenks die Bewegung anderer Gelenke und die Bewegung eines einzelnen Beines die Bewegung benachbarter Beine.

WALKNET zeichnet sich durch eine große Robustheit bei Störungen aus, wobei durch die globalen Beinkoordinationsregeln garantiert ist, dass die Phasenverhältnisse der Beine wieder zur gewünschten Gangart zurückfinden. Durch die Reflexe des Agenten für die Schwingphase wird Hinderniserkennung beziehungsweise -umgehung sowie die Anpassung an verschiedene Bodenverhältnisse garantiert. (Siehe [1])

Das beschriebene System wurde im hexapoden Laufroboter Tarry II (Siehe [2]) erfolgreich eingesetzt.

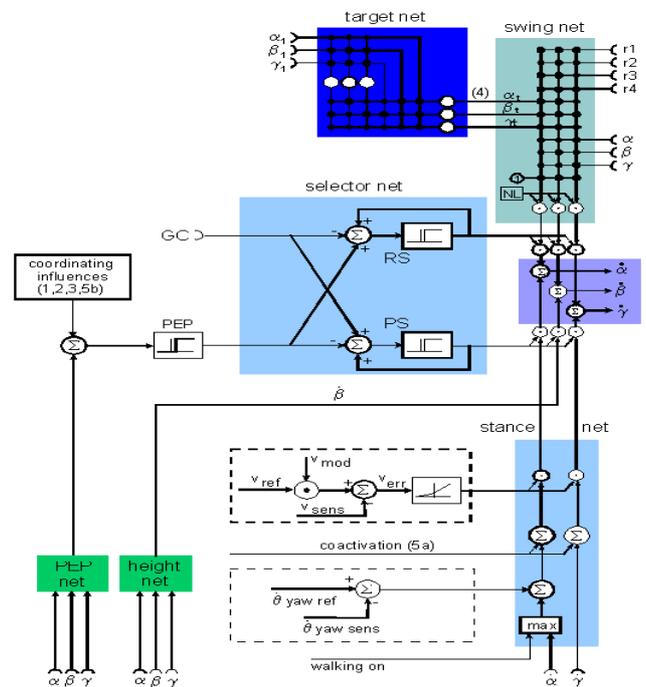


Abb.7 Systemaufbau von WALKNET

RHex Der sechsbeinige Laufroboter RHex hat das schnelle Gehen der Schabe zum biologischen Vorbild. Der RHex beruht auf einer sehr einfachen Konstruktion der Beine, mit nur einem Freiheitsgrad pro Bein und kommt ohne sensorische Rückkopplung aus. (Siehe [3])

Harvester Als Beispiel für den Einsatz eines hexapoden Laufroboters dient der Laufroboter Harvester aus Finnland, der zu Arbeiten in der Forstwirtschaft konzipiert wurde. Gesteuert durch menschliche Hand mit einem einzigen Joystick, führt das System die entsprechenden Beinbewegungen aus. (Siehe [4])

Probleme Bis heute ist die Neurophysiologie der Insekten sehr unvollständig verstanden und es zudem unklar, welche Elemente der Insekten für die gute Anpassbarkeit und Gewandtheit auf unbekanntem Terrain verantwortlich sind. Dazu sind die eingesetzten Antriebstechnologien meist zu träge und schwach, zudem auch oft zu schwer, weshalb intensiv an der Entwicklung fluidischer Muskeln und am Einsatz von Leichtbaustoffen gearbeitet wird.

IV. Referenzen Wer mehr über die vorgestellten Laufroboter oder über WALKNET erfahren will, dem sei die Recherche auf nachfolgenden Internetseiten empfohlen:

- [1] WALKNET
<http://www.uni-bielefeld.de/biologie/Kybernetik/research/walk.html>
- [2] Tarry II
<http://www.tarry.de/>
- [3] RHex
<http://www.rhex.net/>
- [4] Harvester
<http://www.plustech.fi/>
<http://www.timberjack.com/>

(letzter Zugriff jeweils 19.12.2004)

Ende