



*Dr. Frank Kirchner
Prof. für Robotik an
Northeastern University,
Boston, USA*

Von der Küchenschabe zum Roboter

Von der Küchenschabe zum Roboter

Der Titel suggeriert bereits eine Neuheit, die seit einiger Zeit beim Bau und der Programmierung technischer Systeme immer häufiger verwendet wird.

Inspiziert durch die Natur werden Lösungen für technische Systeme gefunden und umgesetzt. Dieser Ansatz nennt sich biomimetisch oder auch bioinspiriert.

Eines der ersten Projekte, in dem wir am Fraunhofer Institut für Autonome intelligente Systeme diese Prinzipien verfolgt haben, war das sogenannte ‚Scorpion‘ Projekt.

In diesem Projekt streben wir an, einen Roboter zu konstruieren, der sich in schwierigem Gelände robust fortbewegen kann, um beispielsweise Explorationsaufgaben (Vermessung, Kartierung) auszuführen, der aber auch im Bereich Search&Rescue, derzeit aktuell durch die Ereignisse des 11. September im Gedächtnis, eingesetzt werden kann.

Ein weiteres, eher exotisches Einsatzgebiet sind fremde Planeten zur Erkundung von deren Oberfläche und Beschaffenheit, zur Entnahme von Proben und Ausbringen von Sonden.

Dies hört sich nach Science Fiction an, aber konkret ist es so, dass neben dem US-amerikanischen Verteidigungsministerium (stellvertretend durch die Defence Advanced Projects Agency DARPA) auch die NASA unser Projekt fördert und wir gemeinsame, vorbereitende Experimente durchführen werden.

Warum nun biologisch und nicht wie bisher klassisch technisch so wie im Flugzeug und Automobilbau? Die Antwort ist sehr kurz und einfach aber andererseits sehr schwer zu vermitteln. Sie lautet: Technische Systeme werden nach Parametern gebaut die sich nicht ändern und sie funktionieren, weil sich auch die Einsatzbedingungen unter denen sie eingesetzt werden nicht ändern. Insbesondere sind diese Bedingungen vorher hinreichend genau bekannt oder spezifizierbar.

Nehmen wir als Beispiel einen Flugzeugstart. Dies ist kein Wunder, obgleich jeder der schon einmal in einer 747 (mit einigen hundert Tonnen Gewicht) einen Start erlebt hat, sich dessen nicht ganz sicher war. Es ist simple Physik und diese können wir mathematisch erfassen.

Wenn wir das Startgewicht und die aerodynamischen Eigenschaften des Flugzeugkörpers insbesondere der Flügel kennen, dann können wir errechnen wieviel Startschub unsere Triebwerke erzeugen müssen und sogar wie lang unsere Startbahn sein sollte. Der Kapitän tut dies vor jedem Start. Es gibt bei dieser Berechnung nur eine Unbekannte, dies ist das Handgepäck der Passagiere.

Das Gerücht von dem Kapitän der eine ganze Gesellschaft von Sammlern antiker und wertvoller Münzen transportierte wird unter Vielfliegern gern beim Start an so manchen Erstflieger weitergegeben.

Dieser Kapitän errechnete, so wie üblich die für den Start nötigen Parameter aufgrund der standardmäßig angenommenen Werte für Gewicht der Passagiere und deren Handgepäck. Was er nicht wissen konnte, war die Tatsache, dass jeder seiner ca. 200 Passagiere im Mittel 10Kg mehr Handgepäck beförderte als angenommen, denn natürlich wollte keiner der Sammler seine guten Stücke einchecken lassen. So lag also das tatsächliche Startgewicht um ca. 2 Tonnen über dem errechneten. Die Folge war, dass der Start, Gott sei Dank, ohne schlimmeren Unfall verlief, das Flugzeug aber, entgegen allen Berechnungen fast nicht mit der Startbahnlänge ausgekommen wäre.

Solche Vorfälle werden in der Fliegerei nicht einfach unter "noch mal Glück gehabt" abgetan, sondern werden einer intensiven Untersuchung zugeführt.

Diese ergab, dass die für den normalen Betrieb des Flugzeugs zulässigen Parameter überschritten wurden und somit das Flugzeug außerhalb seiner Spezifikation betrieben wurde.

Und genau dies ist der Standardfall bei Anwendungen, wie ich sie vorher beschrieben habe und für die wir unsere Systeme konstruieren müssen.

Oft ist es sogar so, dass uns die Randbedingungen unter denen diese Systeme arbeiten und funktionieren sollen, im Voraus gänzlich unbekannt sind. Das beste Beispiel dafür ist sicherlich der Einsatz von Robotern auf dem Mars.

Jeder Ingenieur wird bestätigen, dass man verlässliche Systeme nicht bauen kann, wenn man keine Spezifikationen für diese angeben kann.

Was also verspricht man sich davon, beim Bau von solchen Systemen auf die Natur zu schauen? Im Wesentlichen ist es der Aspekt der Adaptivität, also der Fähigkeit, das eigene Verhalten an die von der Umwelt vorgegebenen Merkmale anzupassen. Biologische Systeme, so nennen wir gerne Tiere, die als Beispiele fungieren können, zeigen ein erstaunlich stabiles Verhalten und hohe Leistungsfähigkeit unter einer großen Bandbreite verschiedenster Umweltbedingungen.

Kommen wir damit zu dem System, das ich Ihnen heute besonders gerne vorstellen möchte, dem autonomen Roboter ‚Scorpion‘:

Zu den Anforderungen hinsichtlich der Mobilität der DARPA bzw. NASA für dieses System gehörten unter anderen die folgenden: Es sollte

- 1) In den verschiedensten natürlichen Umgebungen stabile, robuste Fortbewegung zeigen. Dazu gehörten unter anderem die Fortbewegung außerhalb von Gebäuden auf glattem geradem Untergrund aus Beton, Gras, Sand, Waldboden wie auch Teppich, Linoleum und Fliesenböden im Inneren von Gebäuden.
- 2) Die Überwindung von schwierigem Gelände (meist außerhalb von Gebäuden) umfasste matschige, sumpfige Untergründe, steinige Untergründe mit Steinen verschiedenster Größe (von wenigen cm, bis zur doppelten Größe des Roboters) aber auch natürliche Wälder und Buschvegetationen mit eingestreuten Ästen und Baumstämmen.
- 3) Ebenso war Fortbewegung in Bereichen menschlicher Ansiedlungen, wie Dörfern und Städten mit Bordsteinkanten, Haustreppen, Eisenbahnschienen etc. Und in Bereichen industrieller Anlagen mit Röhrensystemen, Gittern (z.B. von Abwasserschächten) und innerhalb von Kanal-Rohrleitungssystemen gefordert.

Was die Anforderungen an Energieautarkie, Sensorik, Kommunikation und der Beständigkeit gegen Hitze, Kälte und anderer Umwelteinflüsse angeht, möchte ich hier gar nichts weiter ausführen, da es den Rahmen des Vortrags sprengen würde.

Es genügen aber auch allein die Anforderungen an die Mobilität dieses Systems um sich klar zu machen, dass ein Standard-Rad- oder Kettenfahrzeug dieses nicht erfüllen kann. Zumindest nicht ohne dass es während des Einsatzes umgerüstet wird, was nach Definition nicht möglich ist. Im Falle eines Marsroboters ist es klar, dass man nicht mal schnell die Reifen wechseln kann, aber auch ein Helfer beim Rettungseinsatz an den Trümmern des World Trade Centers kann sich große Umbauarbeiten an seinen Hilfsmitteln nicht leisten.

Ausgehend von diesen Anforderungen haben wir uns relativ schnell für ein System entschieden, das sich auf Beinen statt auf Rädern oder Ketten fortbewegt. Beine sind universelle Mobilitätshilfen, die quer durch das Reich der natürlichen, biologischen, landgebundenen Systeme eingesetzt werden.

- 1) Beine können zum Klettern eingesetzt werden
- 2) Man kann sie zum Abstützen und Aufrichten (verlängern der Reichweite) einsetzen
- 3) Sie können zum Springen benutzt werden
- 4) Man kann sich mit ihnen festhalten
- 5) Man kann sie sogar als Räder verwenden

Beine als Räder? Genau! Unser Roboter heißt nicht von Ungefähr ‚Scorpion‘. Bevor wir anfangen dieses System zu konstruieren haben wir im Bereich der bebeinten Systeme lange recherchiert. Die meisten bisherigen Roboter auf Beinen fallen in die Klasse der 6-Beiner, der Hexapoden, und ihre Inspiration gründet sich auf das biologische Vorbild der Heuschrecke. Skorpione jedoch gehören zur Familie der Spinnentiere und besitzen acht Beine - sogenannte Octapoden. Diese Tiere sind Jäger, perfekte Überlebenskünstler, darauf angewiesen Ihre Beute zu jagen und zu überwältigen. Daraus ergeben sich eine Reihe von Eigenschaften, die unser Roboter auch haben sollte.

- 1) Er sollte schnell sein können
- 2) Er sollte sich omnidirektional bewegen, ohne dabei an Vorwärtsgeschwindigkeit einzubüßen
- 3) Er sollte klettern können
- 4) Er sollte seine Laufhöhe verändern können ohne anhalten zu müssen
- 5) Er sollte sich in einer Vielzahl von Umgebungen stabil und zügig fortbewegen können

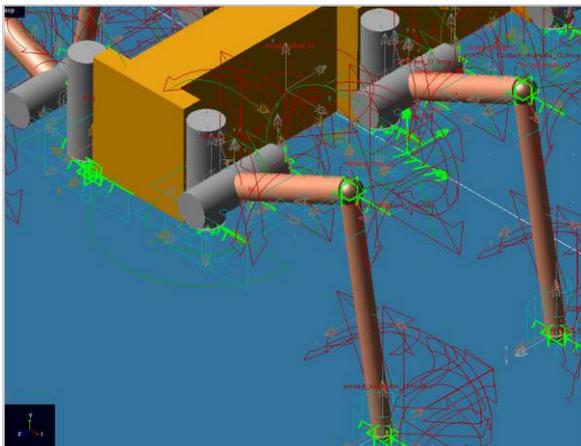
Alle diese Eigenschaften haben Skorpione, deswegen war dieses Lebewesen für uns das richtige Modell.

Der Skorpion (das Lebewesen) bezieht diese Leistung aus drei wichtigen Eigenschaften hinsichtlich seiner Konstruktion und Steuerung

- 1) Die Anordnung und Längenverhältnisse der Beine an einem flexiblen Körper
- 2) Sein einfaches aber effizientes Steuerungsprogramm

Betrachten wir uns zunächst die Beine, also die Aktuatoren des Roboters:

Obwohl wir heute noch nicht in der Lage waren, alle sieben Freiheitsgrade des Beines eines echten Skorpions zu imitieren, so haben wir doch auch bei der Realisierung von nur 3 Freiheitsgraden einen Aktuator entwickeln können, der sehr flexibel und dabei leistungsfähig ist.



Sein Design ist so ausgelegt, dass äußere Einflüsse wie, Staub und Regen etc. nicht die empfindlichen mechanischen und elektrischen Komponenten beschädigen können. Insbesondere für einen Roboter mit Beinen, der in natürlichen Umgebungen, quasi über Stock und Stein laufen muss ist dies sehr wichtig, da ständig die Gefahr besteht, ja es teilweise sogar gewünscht ist, dass der Roboter mit einem oder mehreren seiner Beine irgendwo anschlägt oder hängen bleibt. Das Problem bei diesem (geschlossenen) Design bestand nun darin, einerseits die Leistungsfähigkeit zu erreichen, die notwendig ist um den Roboter vorwärts zu bewegen und natürlich aufrichten zu können und andererseits nicht zu schwer zu werden. Ein optimales Verhältnis von Gewicht des Beines zu der Leistungsfähigkeit drückt sich in dem Wert aus, das Wievielfache seines Eigengewichts so ein Aktuator in der Lage ist zu stemmen. Der bisherige Rekord lag bei 1:6 und war an einem System realisiert, das nicht auf die Geschlossenheit (also die Kapselung der empfindlichen Teile) achten musste. In dem hier vorliegenden Ansatz konnten wir, trotz Kapselung, ein Verhältnis von 1:9 erreichen. Wir hoffen, dass in der Zukunft noch bessere Werte erreicht werden können. Anlass für diese Vermutung ist die kürzliche Entwicklung eines Aluminiumschaumes durch ein Fraunhofer Institut in den USA. Dieser Schaum besitzt bei gleicher Festigkeit nur ein Viertel der Dichte. Die Verwendung neuer, ihrerseits auf biologische Vorbilder gerichtete Materialien, spielt eine wesentliche Rolle bei unserem Ansatz. So imitiert dieser Aluminiumschaum, durch seine porige Struktur viel besser die Beschaffenheit von Knochen als die bisherigen Vollmaterialien. Nur durch diese Struktur ist es möglich, dass in der Natur Lebewesen entstehen konnten, die in der Lage waren, ihr eigenes Körpergewicht aus eigenen Kraft in die Luft zu erheben.

Neben der Frage der Materialien und der Konstruktion ist aber auch die Steuerung sehr wichtig. Auch in der Natur passieren keine Wunder, so ist auch hier keine Steuerung ohne sensorische Information möglich. Jedoch, vergleicht man beispielsweise die Fülle an sensorische Information, die unserem zentralen Nervensystem zu jeder Zeit zur Verfügung steht um z.B. in uns Menschen das stabile Laufen zu ermöglichen, so würde, selbst wenn wir alle diese Sensoren nachbauen könnten, die schiere Menge an Kabeln, die wir ziehen müssten um diese Informationen erfassen zu können, damit sie von dem ‚Nervensystem‘ des Roboters, also dem eingebauten Computer, ausgewertet werden können, die dicke eines menschlichen Unterarms aufweisen. Das Gewicht dieser Kabel, für ein einzelnes Bein, wäre schwerer als der ganze Roboter. Auch hier zeigt uns die Natur einen Weg. Statt jeden Sensor einzeln mit dem zentralen Nervensystem zu verbinden, werden 2 Wege beschritten

1) Intelligente Vorverarbeitung auf lokaler Ebene

Dies bedeutet nicht nur Filterung und Glättung, sondern direkte Einbettung in lokale Kontrollschleifen, so dass diese Information auf höheren Ebenen der Verarbeitung nicht mehr benötigt wird, weil ganze makroskopische Funktionen bereits lokal erledigt werden. So geschieht z.B.: die Kontrolle unserer Schreitbewegung (das Laufen) nicht in unserem Gehirn sondern vollständig, und sogar in Abwesenheit eines Gehirns nachgewiesen, auf der Ebene des Rückenmarks. Jemand der dies eindrucksvoll nachgewiesen hat war z.B. der berühmte Seeräuber Störtebecker, der auf diese Weise, zumindest der Legende nach, das Leben seiner Mannschaft retten konnte. Natürlich gibt es auch heute noch eine Fülle von Beispielen für Menschen die ohne große Hirntätigkeit herumlaufen, wobei ich mir aber nicht sicher bin, ob diese dabei irgend jemand retten wollen...?

Dennoch haben wir dieses Prinzip in unserem Roboter übernommen und deswegen einen eigenen kleinen Computer in jedes Bein eingebaut, der vollständig verantwortlich ist für die lokalen Bewegungen dieses einen Beines und sich dabei über Kommunikationsleitungen (zwei) mit den Nachbarcomputern in den anderen Beinen verständigt.

- 2) Bündelung und Kodierung von mehreren Signalquellen in einer Leitung
Lokale Autonomie ist wichtig, aber ohne höhere Kontrolle geht es letztlich doch nicht. Immer wenn schwierige Bewegungen, z.B. beim Klettern oder beim Greifen eines Objektes gefordert sind, ist unser Gehirn massiv einbezogen. Deswegen müssen Informationen aus den Gliedmaßen auch an den höheren Instanzen vorliegen. Um diese aber effizient dorthin zu transportieren bedienen sich biologische Nervensysteme eines genialen Tricks. Sie benutzen eine Leitung um verschiedenste Information zu transportieren. Zum einen geschieht dies durch sogenannte Sensorfusion also Konvergenz sensorischer Informationen an einem Punkt, wo sie integriert und dann weitergeleitet wird, zum anderen durch das Prinzip der frequenzmodulierten Informationsverarbeitung. Bei diesem Prinzip ist lediglich die zeitliche Aufeinanderfolge von singulären Reizen ausschlaggebend, nicht aber deren Stärke. Mithilfe dieses Prinzips können also beliebige sensorische Eindrücke, die mit vielen unterschiedlichen Stärken und Intensitäten erfasst wurden, qualitativ korrekt und in einem einheitlichen Koordinatensystem weitergeleitet werden.

So wie die Informationsverarbeitung bei allen Lebewesen also auch den Skorpionen optimal auf seine Funktion abgestimmt ist, ist dies auch seine Biometrie, also die Anordnung, Größe und Gewichte seiner Gliedmaßen. Ein wichtiges Kriterium bei den Skorpionen ist dabei die kreisförmige Anordnung der Beine um den zentralen Körper des Tieres herum. Aus dieser Anordnung gewinnt das Tier einerseits Stabilität gegen äußere Einflüsse, also z.B. Wind und andere Stöße, die es in seiner Lage verändern könnten, zum anderen erlaubt es dem Tier, sich flexibel in alle Richtungen zu bewegen. Bei einem Kurvenlauf z.B., bei dem ja normalerweise die äußeren Beine eine längere Strecke zurücklegen müssen als die inneren, was energetisch ungünstig ist, wird dieser Nachteil durch die annähernd kreisförmige Anordnung der Beine (hier ist es tatsächlich eine Ellipse) fast wettgemacht. Natürlich haben wir in den diversen Prototypen des Roboters dieses Prinzip übernommen.

Lassen sie mich jetzt auf meine Behauptung zurückkommen, dass Beine auch als Räder aufgefasst werden können. Wie ich bereits sagte erfolgt die Kontrolle der mechanischen, gleichförmig, rhythmischen Laufbewegung nicht über unser Gehirn (bzw. dem Anteil der in unserem Kopf steckt), sondern über das Rückenmark. Hier sitzen Gruppen von Neuronen, also Nervenzellverbände, die rhythmische Signale an unsere Beinmuskulatur senden und die stereotypen Laufbewegungen erzeugen. Im Falle von Mehrfüßlern, wie den Skorpionen, geht man davon aus, dass jedes Bein eine eigene solche Neuronengruppe besitzt, die zunächst einmal unabhängig voneinander das jeweilige Bein in einem ewigen Rhythmus von Schwing- und Stemmphase kontrollieren. Im Unterschied zu einem Rad, das natürlich zu jedem Zeitpunkt Kontakt mit dem Boden hat und über den entsprechenden Abtrieb für eine kontinuierliche Vorwärtsbewegung sorgt, muss ein Bein (ein einzelnes Bein) stets vom Boden abheben, nach vorn schwingen und dann nach hinten stemmen. Der kontinuierliche Vorwärtstrieb wird also regelmäßig unterbrochen, dennoch erreichen auch Lebewesen mit Beinen eine kontinuierliche Vorwärtsgeschwindigkeit. Diese wird durch die unterschiedlichen Aufsetzzeitpunkte der verschiedenen Beine, oder Beinpaare, erreicht. Im Mittel über alle Beine betrachtet ist somit immer eine Gruppe von Beinen mit dem nach vorn schwingen beschäftigt während die andere Gruppe sich nach hinten stemmt. Da dies über alle Beine mit einem leichten Zeitversatz geschieht, wird so ein kontinuierlicher Vorwärtsschub realisiert, der das Tier oder den Menschen gleichmäßig nach vorn bewegt.

Nur bei sehr langsamem Laufen kann man die Übergänge erkennen, je schneller ein Beinssystem jedoch wird, desto weniger ist dieser Übergang oder Schrittwechsel sichtbar. Dies geht soweit, dass bei sehr schneller Fortbewegung auf Beinen eine Dynamik erreicht werden kann, die den ganzen Organismus in eine Flugphase überführt und der Boden nur noch kurzzeitig mit impulsförmiger Entladung berührt wird. Dieses Phänomen kennen wir vom Galopp bei Pferden.

Skorpione jedoch galoppieren nicht. Dennoch würden wir gerne diese Eigenschaften in unseren Robotern integrieren.

Darin wird ein wichtiger Punkt des biomimetischen Ansatzes deutlich. Wir versuchen nicht, biologische Systeme exakt zu kopieren, sondern benutzen sie zur Inspiration um mit den technologischen Mitteln, die derzeit verfügbar sind, bessere technische Systeme zu erzeugen. Dabei scheuen wir dann auch nicht davor zurück, in unsere technischen Systeme Prinzipien einzubauen die in dem biologischen Vorbildern gar nicht enthalten sind, wie z.B. die galoppierenden Skorpione. Wenn sie so wollen, ist dies eine Fortführung der Evolution auf technische Systeme, und es gibt keinen Grund, warum künstliche Skorpione nicht galoppieren sollten.