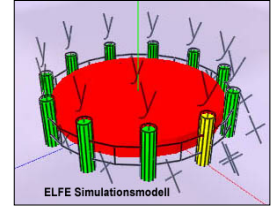


### Automatische Generierung von Bewegungsmustern für reale Roboter mit Evolutionären Algorithmen

Diplomarbeit, vorgelegt von Maurice Hüllein



#### Aufgabenstellung

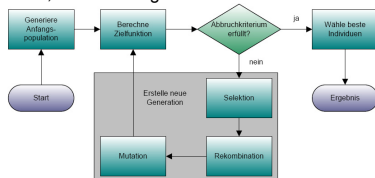
Ziel der Arbeit ist die Untersuchung einer automatischen Erzeugung von Bewegungsmustern für gegebene Roboter morphologien am Beispiel des ELFE-Laufroboters. Hierzu ist der Stand der Forschung auf dem Gebiet des maschinellen Lernens sensorimotorischer Rückkopplungen mit Gütefunktional, die möglichen Repräsentationen von Bewegungsmustern und deren Lernalgorithmen im Überblick darzustellen. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Untersuchung der Anwendung von Evolutionären Algorithmen, insbesondere Genetischem Programmieren auf die Problemstellung. Die gewonnenen Erkenntnisse sind in ein prototypisches System mit einem realen Roboter umzusetzen. Hierbei ist auf Modularisierung und die Möglichkeit zur Weiterentwicklung Wert zu legen. Wenn möglich, sollten Hypothesen über den Evolutionsverlauf am realen System aus einer Simulation abgeleitet und im Experiment evaluiert werden.

#### Der ELFE Roboter

Die ELFE ist ein elfbeiniger, autonomer Schreitroboter, der bewusst für das Testen automatisch generierter Steuerprogramme entworfen worden ist. Jedes Bein ist in gleichmäßigen Abständen am runden Körper des Roboters befestigt und erlaubt nur die Drehung um eine Achse. Die Steuerung wird von einem Mikrocontroller, dem AKSEN-Board übernommen, welches Programme eines reduzierten C-Compilers ausführen kann. Durch die Morphologie der ELFE gestaltet es sich sehr schwierig, komplexe Bewegungsmuster, etwa ein Laufmuster, intuitiv als Steuersequenzen zu beschreiben: Da einige Beine stets quer zur Laufrichtung stehen und nicht geschwungen werden können, ist bsp. ein klassischer Ansatz, wie der Tripodengang von Insekten, nicht umsetzbar.

#### Genetische Programmierung

Die Genetische Programmierung (GP) ist eine Form der Evolutionären Algorithmen (EA). Hierbei steht eine Population von Programmen nach dem Darwinschen Prinzip des "Überleben des fittesten Individuums" in gegenseitiger Konkurrenz: Eine globale Fitnessfunktion bestimmt die Güte der Programme in Hinsicht auf die Problemstellung und somit ihre Wahrscheinlichkeit, für die folgende Generation übernommen zu werden. Dabei kommen zusätzlich genetische Operatoren, wie geschlechtliche Fortpflanzung (Rekombination) oder zufällige Veränderung (Mutation) zum Einsatz. Durch die Kombination stochastischer und gerichtete Suchmethoden verbindet alle EA, dass kein umfassendes Wissen über die Anwendungsdomäne vorausgesetzt wird. Es reicht, eine Fitnessfunktion zu definieren, welche das gewünschte Ziel ausdrückt.

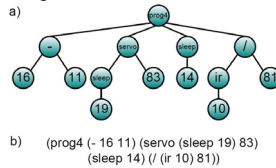


Grundlegender Ablauf eines EA (identisch mit GP)

Die GP erweitert dieses Konzept um zwei Aspekte: Die Individuen sind in Form und Größe nicht eingeschränkt und entwickeln sich im Zuge der Evolution mit. Zudem handelt es sich bei ihnen nicht um passive Kodierungen einer Lösung, sondern um aktive Programme, die einen eigenen Steuerungsfluss besitzen.

#### Darstellung von Bewegungsmustern

Bewegungsmuster können auf vielfältige Weise repräsentiert werden. Es existieren erfolgreiche Versuche zur Steuerung von Schreit-, Kriech- und Springrobotern u.a. mit Hilfe von Neuronalen Netzen, Endlichen Automaten und Trig. Funktionen. Das Ziel bei der Auswahl einer Darstellungsform muss es somit sein, den Ansprüchen des Versuches zu genügen und verschiedene Aspekte wie Flexibilität, Transparenz und Effizienz gegeneinander abzuwägen.

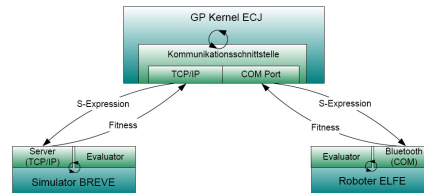


GP-Individuum als a) Syntaxbaum und b) S-Expression

Die Steuerprogramme für die ELFE wurden in der klassischen Form der GP dargestellt, dem Syntaxbaum. Dabei werden mathematische Ausdrücke und Befehle zur Ansteuerung von Sensorik und Aktorik des Roboters in eine hierarchische Baumstruktur gegliedert und ausgehend vom Wurzelknoten abgearbeitet. Die eigentliche Bewegung des Roboters entsteht als Seiteneffekt bei der Auswertung der Knoten zur Stellung eines Servomotors.

#### Architektur des Systems

Das ursprüngliche Ziel war es, ein hybrides System zu entwerfen, welches die Steuerungsprogramme nicht nur auf der ELFE sondern auch innerhalb einer Simulation austestet. Aufgrund des Umfangs der Aufgabe konnte allerdings nur der Evolutionskreislauf mit dem Simulationssystem demonstriert werden, die Arbeit mit dem realen Roboter wurde hingegen für künftige Versuche vorbereitet.



Architektur des Systems. Der Part des realen ELFE-Roboters konnte nur im Ansatz realisiert werden.

Als GP-Kernel wurde das frei verfügbare Framework ECJ gewählt, welches sich durch eine hohe Flexibilität und einfache Erweiterbarkeit auszeichnet. Es erschafft die Initialpopulation, unterwirft die Individuen dem Evolutionszyklus und protokolliert die Ergebnisse. Da die Auswertung nicht im Kernel stattfindet kann, werden die Individuen als S-Expression über TCP/IP an den Simulator oder über eine serielle Bluetooth-Schnittstelle an den Roboter verschickt.

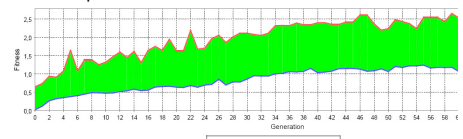
Die Modellierung der ELFE wurde über das Simulationssystem BREVE realisiert. Es ermöglicht, beliebige 3D-Modelle anhand der Skriptsprache steve zu erschaffen und in einer physikalisch simulierten Welt frei zu kontrollieren. Darüber hinaus können beliebige Zusatzmodule in Form von C-Bibliotheken eingebunden werden. Auf diese Weise entstand ein Server zur Kommunikation mit dem GP-Kernel sowie ein GP-Evaluator, welcher die Interpretation der Steuerindividuen übernimmt und auch für den Einsatz auf dem AKSEN-Board des realen Roboters entworfen wurde.

#### Schwerpunkt Simulationssystem

Die Arbeit mit BREVE wurde bewusst vorgezogen, um die Vorteile einer Simulation frühzeitig nutzen zu können: Die künstliche Evolution mit einem Roboter gestaltet sich extrem zeitintensiv. Eine Simulation hingegen erlaubt eine Skalierung der Zeit und somit eine Beschleunigung der Experimente. Zudem kann so die mechanische Belastung empfindlicher Bauteile (z. B. Servos) auf ein Minimum reduziert werden. BREVE zeigte sich jedoch als sehr fehleranfällig und in weiten Teilen unausgereift, so dass die Entwicklung für den Simulator nur mit hohem Aufwand möglich war und die Arbeit mit dem realen Roboter nicht vollendet werden konnte.

#### Experimente

Um die Funktionstauglichkeit des Systems zu testen, wurde zunächst eine recht einfache Aufgabe formuliert: Der Roboter sollte versuchen, aus einer liegenden Position aufzustehen, so dass alle Beine einen Winkel von 90° einnehmen. Als Fitness diente die Summe aller Abweichungen der Beinstellungen vom idealen Wert. Es zeigte sich, dass bereits nach 15 Generationen mit 100 Individuen die Aufgabe nahezu optimal gelöst wurde. Dies entsprach einer Evolutionszeit von etwa 20 min.



Fitnessverlauf der Evolution zum Erlernen des Laufmusters

Im zweiten Experiment sollte das Ziel der Arbeit erfüllt werden. Die ELFE sollte in der Lage sein, sich möglichst weit vom Startort zu entfernen. Hierzu wurde das Steuerprogramm drei mal wiederholt und die resultierende Entfernung als Fitness gemessen.

Die Evolution wurde nach etwa 40 Stunden mit einem vielversprechenden Ergebnis abgebrochen: Der Roboter hatte gelernt, sich mit einem frohsähnlichen Hüpfen fortzubewegen. Dazu benutzte er zum Abstoßen zwei parallel stehende Beine und ein drittes, um nicht vorne überzukippen. Die restlichen Beine hingegen wurden angewinkelt. Zusätzlich war zu beobachten, wie der Roboter nach jedem Sprung eine Korrektur der Richtung vornahm und so einen vorteilhaften, geraden Kurs beibehielt.

#### Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit hat erfolgreich nachweisen können, dass es möglich ist, mittels GP komplexe Bewegungsmuster für die Morphologie der ELFE zu generieren. Dabei war es nicht notwendig, genaues Wissen über das Prozessmodell des Roboters zu besitzen und im Algorithmus zu modellieren. Weiterhin ist die Basis für ein hybrides Evolutionssystem geschaffen worden, welches die erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Simulator BREVE demonstriert und leicht auf den realen Roboter erweitert werden kann.

Die Schließung des Evolutionszyklus mit dem realen Roboter müsste in einer weiterführenden Arbeit behandelt werden. Hierzu wäre es zunächst notwendig, eine Methode zur Messung der Fitness auf der ELFE zu entwickeln. Anhand eines Vergleichs könnte dann entschieden werden, ob das Simulationsmodell den realen Roboter genau genug nachbildet, um eine hybride Evolution zu ermöglichen. Desweiteren könnte genauer untersucht werden, in wie fern der Einsatz der IR-Sensorik die Qualität und das adaptive Verhalten der Laufmuster verbessert.