

Master-Thesis

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (M. Sc.)

Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes

im Studiengang Praktische Informatik
der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Schwarmroboter (vorläufiger Arbeitstitel)

vorgelegt von

Sven Manier

betreut und begutachtet von

Prof. Dr. Markus Esch

Prof. Dr. Martina Lehser

Saarbrücken, 10. 05. 2018

Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ich erkläre hiermit weiterhin, dass die vorgelegte Arbeit zuvor weder von mir noch von einer anderen Person an dieser oder einer anderen Hochschule eingereicht wurde.

Darüber hinaus ist mir bekannt, dass die Unrichtigkeit dieser Erklärung eine Benotung der Arbeit mit der Note „nicht ausreichend“ zur Folge hat und einen Ausschluss von der Erbringung weiterer Prüfungsleistungen zur Folge haben kann.

Saarbrücken, 10. 05. 2018

Sven Manier

Zusammenfassung

Lorem Ipsum

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung	2
1.3	Aufbau der Thesis	2
2	Grundlagen	5
2.1	Selbstorganisation	5
2.2	Schwarmverhalten	6
2.2.1	Abgrenzung: Abgesprochene Bewegung	6
2.2.2	Steuern eines Schwarms	7
3	Ergebnisse	9
	Abkürzungsverzeichnis	11

1 Einleitung

Diese Thesis wird im Rahmen eines Informatik-Studiengangs mit dem Abschluss eines Master of Science geschrieben. Worum es genau geht und welche Bedingungen ich voraussetze wird im folgenden Kapitel beschrieben.

1.1 Motivation

Schaut man in die Natur sieht man sehr häufig, dass sich Tiere in riesigen Gruppen organisieren die sich meist ohne zentralen Koordinator bewegen. Bei Fischeschwärmen handelt jedes Individuum vollkommen autonom und nur anhand dessen was es in seiner (unmittelbaren) Umgebung erkennen kann. Dennoch können komplexe Handlungen wie die Flucht vor einem Räuber oder die gemeinsame Wanderung zu einem neuen Futterort koordiniert werden. In manchen Herden dagegen besteht ein 'Schwarm' aus Untergruppen, welche zwar einen Anführer haben, der die Richtung für seine Gruppe angibt, diese Führer sich jedoch am Rest der Herde orientieren und somit ein Schwarmverhalten entsteht, bei dem die Akteure aus koordinierten Einzelgruppen und nicht aus einzelnen Tieren bestehen. Ebenso wird es bei Vögeln vorgefunden, welche durch ihre Koordination in einer energiesparenden Formation fliegen können. Solch ein Schwarmverhalten hat den großen Vorteil, dass jeder Akteur nur für seine eigene Bewegung verantwortlich ist. Der Denkaufwand verteilt sich auf alle Mitglieder und die, meist langsame, Kommunikation untereinander wird auf ein Minimum reduziert.

Man fing früh an dieses Verhalten zu studieren und es auf Roboter anzuwenden zu wollen. Schwärme von Robotern können in vielerlei Hinsicht eingesetzt werden, darunter Sensornetzwerke die dynamisch einen bestimmten Raum überwachen oder Arbeitsroboter die ohne weiteres Zutun bestimmte Tätigkeiten wie Transport übernehmen. Zentrale Systeme mit Koordinator können dafür allerdings schnell unzulänglich werden. Ein großer Nachteil ist schon dadurch gegeben, dass es diesen einen Koordinator geben muss. Fällt er wegen einem technischen Defekt aus, steht der Schwarm still. Baut man einen Backup-Koordinator hat man einen vielfach erhöhten Aufwand beim Design der Schwarm-Architektur, einen größeren Aufwand in der Kommunikation, da der Backup mit einbezogen werden muss, und letztlich auch einen höheren Preis, weil der rechenstarke Computer gleich mehrmals gebaut werden muss. Auch die Reichweite des zentralen Koordinators kann dem Schwarm schnell zum Verhängnis werden. Hat ein Schwarm beispielsweise die Aufgabe ein Gebiet zu erkunden um später eine Karte aus den Sensordaten zu erstellen, muss der Koordinator entweder stets in Reichweite aller Roboter sein um mit ihnen kommunizieren zu können oder er muss die Kommunikation durch teures Flooding im Kommunikationsnetz aufrecht erhalten. Bei der Koordination von Drohnen kann allein die Erreichbarkeit zu einem sehr realen Problem werden, da der Koordinator aufgrund seiner Rechenleistung ein vielfaches der Arbeiter wiegen wird. Dies führt zu beträchtlich steigenden Kosten für die Motoren und den Akku des Koordinators, beeinflusst aber auch sein Verhalten, da er deutlich träger ist als die anderen. Wer das Bild eines Fischeschwarms vor Augen hat, wird vermutlich auch direkt an die Anzahl der Mitglieder des Schwarms denken müssen. Zentrale Systeme sind nur schwer skalierbar und müssen von Anfang an für die jeweilige Größe konzipiert werden.

1 Einleitung

Schwarmverhalten zeichnet sich dadurch aus, dass die einzelnen Mitglieder des Schwarms ihre Bewegung selbst koordinieren. Dabei wird sich entweder nur nach der Bewegung der anderen gerichtet oder es werden sehr lokal Informationen ausgetauscht. Die Rechenleistung wird auf alle Mitglieder gleichmäßig aufgeteilt und jeder ist nur für sich selbst verantwortlich. Durch die lokale Kommunikation stellt die Größe oder Ausbreitung des Schwarms kein Hindernis dar, da ein Roboter nur Verbindung zu seinen nächsten Nachbarn braucht und auch auf teures Flooding verzichtet werden kann. Die Größenordnung des Schwarms spielt dabei auch eine untergeordnete Rolle, da ein Roboter aufgrund des lokalen Informationsaustauschs ohnehin nur wenige Kommunikationspartner hat. Ebenfalls ist solch ein Schwarm ausfallsicherer da eine ausgefallene Einheit (egal welche) letztlich nur sich selbst stoppt.

1.2 Aufgabenstellung

In dieser Thesis befasse ich mich mit der Thematik einen Roboterschwarm dafür nutzen zu können Transportaufträge zu bearbeiten. Ein Auftrag wird an beliebig viele Roboter eines Schwarms verteilt, woraufhin diese selbstständig eine Untergruppe bilden, die für die Ausführung des Auftrages zuständig ist. Da die zu transportierenden Objekte beliebiger Größe und Form sein können, gilt es unter Umständen eine Formation zu bilden und diese bis zum Ende des Auftrags einzuhalten. Dabei gilt es Kollisionen mit anderen Objekten zu vermeiden und selbstständig navigieren zu können. Eine eventuell benötigte Karte ist zunächst voreingestellt, wird im späteren Verlauf aber, von bereits im System der Roboter vorhandenen Funktionen, selbstständig erstellt werden.

Hauptgegenstand dieser Thesis ist die Erarbeitung des Konzepts und die Umsetzung der Koordination bzw. des Verhaltens der Roboter als Algorithmus, sodass dieser produktiv eingesetzt werden kann. Eine Implementierung findet prototypisch auf den Robotern selbst oder einer Simulation dieser statt und dient vor allem dazu, festzustellen ob die theoretischen Überlegungen auch in der Praxis angewendet werden können.

Rahmenbedingungen

Ich gehe bei dieser Arbeit davon aus, dass der Roboterschwarm aus AGVs (Autonomous Guided Vehicles) besteht, welche aktuell an der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes entwickelt werden. Diese Roboter bieten bereits eine Vielzahl an Technik und (Software-)Funktionen, welche alle uneingeschränkt genutzt werden können. Die AGVs und ihre Fähigkeiten werden in einem späteren Kapitel genauer vorgestellt.

Ebenfalls gehe ich davon aus, dass der Transportauftrag nicht erst verteilt werden muss. Beim Start des Systems wissen die jeweiligen Roboter bereits von ihrem Auftrag und müssen allenfalls noch ihre Gruppe selbstständig zusammenfinden.

1.3 Aufbau der Thesis

Zunächst werde ich im Kapitel Grundlagen und Hintergründe auf notwendige Grundlagen zum Thema Schwarmverhalten eingehen. Darunter verschiedene Definitionen, Abgrenzungen und Einstiege in für Schwarmverhalten wichtige Themen. Danach folgt eine Analyse der Aufgabenstellung im Detail. Es wird darauf eingegangen welche Probleme sich bei der Aufgabenstellung auftun und die es zu lösen gilt und welche Fähigkeiten bei den Robotern genau gefordert werden. Im darauf folgenden Kapitel wird bereits vorhandene Forschung zum Thema Schwarmverhalten untersucht. Diese Forschung wird sich nicht ausschließlich um den Bereich der Roboter-Technik drehen, zumal es für das

behandelte Thema noch keine ausreichende Literatur gibt. Die Forschung wird darauf geprüft, welche Themenbereiche meiner Thesis bereits abgedeckt werden und welche noch offen sind. Als nächstes folgen die Kapitel der Konzeption und der Implementierung. In diesen wird das Konzept für die Roboter zunächst theoretisch, dann praktisch entwickelt werden wird. Erkenntnisse aus der prototypischen Entwicklung werden wieder zurück in das Konzept fließen und es verbessern. Am Ende der Thesis findet eine Evaluation der erreichten Ziele statt und, sollten einige nicht erreicht worden sein, eine Erläuterung woran es gelegen hat. Außerdem wird es einen Überblick darüber geben, was mit mehr Zeit und Ressourcen noch hätte erreicht werden können, bzw. wo man Ansetzen könnte um die Entwicklung weiterzuführen.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden einige grundlegende Begriffe erklärt und voneinander abgegrenzt, welche für das Verständnis dieser Thesis wichtig sind und sonst für Verwirrung sorgen könnten.

2.1 Selbstorganisation

Als Selbstorganisation bezeichnet man Prozesse, bei denen aus einer ungeordneten Menge mit Hilfe von lokaler Kommunikation ein global geordnetes System entsteht. Es entsteht oft durch zufälliges Verhalten, welches positives Feedback bekommt. In der Robotik versteht man unter Selbstorganisation Gruppen von Systemen die eigenständig, ohne zentralen Anführer arbeiten können.

Zentrale Systeme

Normale Systeme sind heterogen aufgebaut. Zentralisierte Systeme mit Robotern bestehen grundsätzlich aus einer zentralen Einheit, welche als das Rechenzentrum dient und mehreren Robotern die die Arbeiter darstellen. In der Praxis kommen schließlich noch viele weitere Systeme hinzu die unter Anderem der Ausfallsicherheit und Informationsaufzeichnung dienen. Die zentrale Einheit bekommt von den Arbeitern Informationen wie Sensorwerte zu gesendet, die zentrale Einheit berechnet daraufhin das weitere vorgehen und die Aktionen für die einzelnen Arbeiter und sendet sie diesen schließlich zu. Solche zentralisierten Systeme sind wenig skalierbar und sehr kompliziert in der Implementierung, da die additionalen Systeme eingebunden werden müssen. Auch die Komplexität der Nachrichten innerhalb des Netzwerks nimmt zu, da letztlich nicht nur von/zu der zentralen Einheit kommuniziert werden muss, sondern auch die Kommunikation zu Backup, Datenbanken und anderen Hilfssystemen integriert und ausgeführt werden muss.

Selbstorganisierte Systeme

Systeme mit Selbstorganisation sind homogen aufgebaut. Jede Einheit ist für sich selbst verantwortlich und muss, gegeben der Abwesenheit der zentralen Steuereinheit, gezwungenmaßen selbst entscheiden was sie zu tun hat. Durch den homogenen Aufbau und die fehlenden Hilfssysteme gibt es keinen Grund für unterschiedliche Programme/ Algorithmen welche aufeinander abgestimmt werden müssen, sondern man braucht nur ein einziges Programm, welches auf jedem Roboter gleichermaßen eingespielt wird und sich nur durch den darunterliegenden Hardware-Layer und einer einzigartigen Identifizierung von den andere unterscheidet. Entscheidungen werden entweder für sich selbst oder in Gruppen mithilfe verteilter Algorithmen getroffen. Innerhalb von Abstimmungen oder kleineren Tätigkeiten kann es zur Bildung von Hierarchien und der Erstellung von Anführern kommen, diese Konstrukte sind aber meist wieder verworfen, sobald die entsprechende Abstimmung oder auszuführende Tätigkeit erledigt wurde. Dadurch dass jede Einheit für sich selbst rechnet und keine permanente Kommunikation zu einer zentralen Stelle notwendig ist, lassen sich homogene Gruppen besser skalieren, wenn auch die Algorithmen für die Kommunikation insgesamt aufwendiger sind.

2.2 Schwarmverhalten

Bei Schwarmverhalten geht es darum, dass sich eine Gruppe von (meist homogenen) Einheiten ohne zentrale Kontrolle gemeinsam organisiert und eine geordnete Bewegung entsteht. Schwarmverhalten lässt sich grob auf 4 Regeln zurückführen:

1. Zusammenhang: Versuche deinen Nachbarn nahe zu sein
2. Ausrichtung: Passe deine Bewegungsrichtung deinen Nachbarn an
3. Abschottung: Vermeide Kollisionen mit deinen Nachbarn
4. Flucht: Fliehe vor Dingen, die eine potentielle Gefahr darstellen
5. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00354-007-0009-5>

Definition: Nachbarschaft Die Nachbarschaft ist definiert durch einen Kreis (im 2-dimensionalen oder eine Sphäre im 3-dimensionalen) mit fixem Radius. Einheiten innerhalb dieses Kreises sind Teil der Nachbarschaft, Einheiten außerhalb nicht.

Die Grundprinzipien von Schwarmverhalten lassen sich ohne jegliche Kommunikation umsetzen. Sie lassen sich durch reine Beobachtung der Nachbarschaft und entsprechender Reaktion auf das Verhalten der Nachbarn durchsetzen. Verfügen die Einheiten nicht über die notwendige Sensorik um die Nachbarschaft beobachten zu können, lässt sich dies aber durch entsprechende Kommunikation der eigenen Werte ausgleichen.

Kommunikation innerhalb eines Schwarm findet, wenn überhaupt, nur mit der Nachbarschaft statt. Experimente mit Drohnen innerhalb eines Vogelschwarms zeigten, dass die Reichweite der Kommunikation recht gering ist und der Informationsfluss mit der Entfernung überproportional abnimmt. Das bedeutet, Informationen werden nie vollständig weitergeben, was dazu führt dass der Fluss letztlich zum Erliegen kommt und eine Information somit nur lokal verfügbar ist. <https://academic.oup.com/beheco/article/22/6/1304/220324>

2.2.1 Bewegung innerhalb des Schwarms

Schwarmverhalten zeichnet sich dadurch aus, dass sich der Schwarm eher passiv bewegt. Beim Vicsek Model (<http://sci-hub.tw/https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.75.1226>) zum Beispiel entsteht eine koordinierte Bewegung durch Wiederholung drei simpler Schritte:

1. Berechne die durchschnittliche Ausrichtung innerhalb deiner Nachbarschaft
2. Passe deine Ausrichtung der berechneten Ausrichtung an (+ Zufallsfaktor bestimmter Größe)
3. Bewege dich um x Einheiten nach vorne

Nach einigen Iterationen dieser drei Schritte stellt sich eine kollektive Bewegung ein und der gesamte Schwarm bewegt sich in die selbe Richtung.

2.2.2 Abgrenzung: Abgesprochene Bewegung

In der kollektiven Bewegung mit zentraler Steuereinheit berechnet diese die Positionen der einzelnen Arbeiter und teilt ihnen mit wie sie sich in der nächsten Iteration auszurichten haben. Dadurch ist es leicht möglich eine Gruppe von Einheiten in eine gewollte Richtung zu lenken und die einzelnen Einheiten sowie die gesamte Gruppe dadurch zu steuern. Solch eine 'abgesprochene Bewegung' lässt sich auch dezentral realisieren. Die einzelnen Mitglieder des Schwarms können ihre Daten den anderen mitteilen und in gemeinsamen Absprachen abstimmen, wohin sich der Schwarm bewegen soll und sich dementsprechend ausrichten. Diese Absprachen erfordern viel Kommunikation und richten sich entgegen typischem Schwarmverhalten.

Im typischen Schwarmverhalten ist die Bewegung, vor allem die Ausrichtung der Bewegung, etwas dass sich, wie in Vics Modell, passiv durch Beobachtung der Nachbarschaft automatisch synchronisiert. Es gibt keinerlei Absprachen innerhalb des Schwarms wohin sich einzelne Einheiten bewegen sollen oder wohin es mit dem Schwarm im gesamten gehen soll. Entsprechend ist es schwer einen Schwarm in eine bestimmte Richtung zu steuern, da man den einzelnen Einheiten nicht einfach mitteilen kann wohin sie sich ausrichten sollen.

QUELLEN

2.2.3 Steuern eines Schwarms

<https://hal.elte.hu/flocking/browser/trunk/public/references/vasarhelyi/Tarcai2011.pdf?format=raw>

Möchte man einen Schwarm dazu bringen sich in eine bestimmte Richtung zu bewegen, darf man es ihm nicht kommunizieren, da es das Paradigma des Schwarmverhaltens brechen würde. Um dieses Ziel zu erreichen muss man ihn passiv beeinflussen und ihn dazu bringen seine Ausrichtung selbständig in die gewollte Richtung zu ändern.

Anführer innerhalb eines Schwarms

Eine populäre Möglichkeit einen Schwarm zu lenken ohne direkt mit ihm zu kommunizieren ist der Einsatz von Anführern ('Leader'). Diese Anführer wissen wo der Schwarm sich hinbewegen soll oder haben einen Auftrag und bewegen sich entsprechend diesem. Im Laufe der Iterationen richten sich die Einheiten immer am Durchschnitt der Nachbarschaft aus, wobei die Anführer eben dies nicht tun, sondern sich entsprechend der Aufträge ausrichten. Dadurch bildet ihre Ausrichtung eine Art Konstante innerhalb des Schwarm die sich nicht relativ zu den anderen verändert. Der Schwarm nimmt dadurch allmählich die Ausrichtung dieser Konstanten an und er bewegt sich in die Richtung die von dem Anführer (auch mehrere sind möglich) vorgegeben wird. Mit Hilfe der Technik dieser Anführer, lässt sich der Schwarm letztlich steuern ohne dass das Paradigma des Schwarmverhaltens gebrochen werden muss.

Stigmergie

<https://web.archive.org/web/20131104125931/http://www.eecs.harvard.edu/rad/courses/cs266/papers/beckealife94.pdf>

Eine besondere Form des passiven Nachrichtenaustauschs innerhalb eines Schwarm ist Stigmergie. Stigmergie beruht auf passiven Nachrichten die von Einheiten in der Umgebung platziert und von anderen Einheiten wahrgenommen werden. Ein Beispiel von Stigmergie findet man im Tierreich bei Termiten. Diese rollen ihre Schlamm-Kugeln zusammen, platzieren eine Pheromon-Spur oben drauf und lassen sie anschließend zunächst

2 Grundlagen

zufällig irgendwo in der Umgebung liegen. Termiten mögen die Pheromone von anderen Termiten sehr und sind gewillt ihre Kugeln auf denen von anderen zu platzieren, wenn diese sich nicht zu weit entfernt befinden. Je mehr Kugeln sich auf einem Haufen befinden, desto attraktiver ist dieser Haufen dafür die nächste Kugel darauf zu platzieren. Auf diese Weise bilden sich die bekannten Termiten-Hügel die wie Spitzen aus dem Boden ragen.

Diese Methode lässt sich auch auf Roboter übertragen. <https://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1> So gab es bereits erfolgreiche Experimente in denen ein Schwarm von Robotern durch Stigmergie dazu gebracht wurde einen Haufen von Frisbees zu sortieren. Dieses Verhalten ist von Ameisen als "brood sorting" bekannt und verzichtet bei der Arbeit vollkommen auf direkte Kommunikation. Die einzelnen Einheiten reagieren dabei nur auf das Umfeld, welches von anderen Einheiten stetig verändert wird und bilden so nach und nach die Frisbee-Haufen mit der entsprechenden Farbe, ohne sich untereinander absprechen zu müssen.

2.3 Phase Transitions

-

3 Ergebnisse

Lorem Ipsum

Abkürzungsverzeichnis

Anhang

Kolophon

Dieses Dokument wurde mit der L^AT_EX-Vorlage für Abschlussarbeiten an der htw saar im Bereich Informatik/Mechatronik-Sensortechnik erstellt (Version 1.0). Die Vorlage wurde von Yves Hary und André Miede entwickelt (mit freundlicher Unterstützung von Thomas Kretschmer, Helmut G. Folz und Martina Lehser). Daten: (F)10.95 – (B)426.79135pt – (H)688.5567pt