

# Controller für Autonome Roboterschwärme

Ausarbeitung zum Thema:

Distributed deformable configuration control for multi-robot systems with low-cost platform  
von Seoung Kyu Lee

Fakultät für Mathematik und Informatik, Institut für Informatik  
Forschungsseminar Parallelverarbeitung, Wintersemester 2022/23

Autor: Ferris Kleier

Matrikelnummer: 3732130

Datum: 14. Februar 2023

## 1 Einleitung

Die Arbeit beschäftigt sich mit dem Erkennen und Ausweichen von Hindernissen eines autonomen Roboterschwarms. Diese Roboter können ihre Umgebung nicht selber wahrnehmen, sondern tasten Hindernisse als Netz ab. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Controller in Form eines Automaten zu entwickeln, durch welchen die Roboter Umgehungsstrategien anwenden und sich ohne Verbindungsabbrüche im Raum bewegen können. Der Schwarm  $G$  agiert dabei dezentral, das heißt es gibt weder eine zentrale Steuereinheit, noch GPS oder Kartensysteme, mit denen sich der Schwarm orientiert. Dieses Vorgehen kann kostengünstig und effizient umgesetzt werden, da auch einzelne Roboter ausfallen können, ohne, dass der gesamte Schwarm ausfällt.

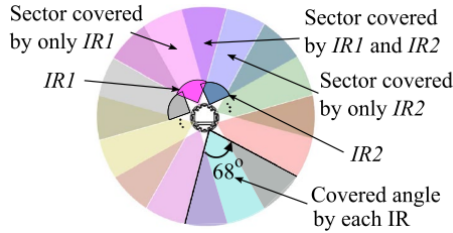
## 2 Der Roboter

Diese Arbeit behandelt einen Roboterschwarm im zweidimensionalen Raum. Dabei hat sich der Autor für den R-One entschieden. Dieser besitzt 8 Infrarot-Sensoren zur Ermittlung von Nachbarn, zwei Räder um sich auf dem Boden fortzubewegen, einen Prozessor, Speicher und einen Akku. Da die Infrarot-Sensoren ab einem Meter stark an Genauigkeit abnehmen, werden die Roboter einen Abstand von weniger als einen Meter einhalten. Die Sensoren eines Roboters  $R_i$  teilen nun den umliegenden Raum in 16 Teile auf, um die Nachbarn anhand ihrer Lage und Ausrichtung zu  $R_i$  zu speichern. In der Abbildung sieht man, wie die Sensoren den Raum aufteilen. Nachbarn eines Roboters  $R_i$  werden nun nach folgender Formel gespeichert:

$$q_j^i = (x_j^i, y_j^i, \theta_j^i) = (d_{ij} \cos(b_j^i), d_{ij} \sin(b_j^i), b_j^i + \pi - o_j^i)$$

Diese Formel speichert die Koordinaten und Ausrichtung eines Nachbarn, ausgehend von  $R_i$  als Ursprung eines Koordinatensystems.  $x$  und  $y$  bilden dabei die Koordinaten im Raum und  $\theta$  die Ausrichtung. Man kann die Position eines Nachbarn auch durch  $d$ ,  $b$  und  $o$  speichern, wobei diese Formel einen Kreis um  $R_i$  mit Radius  $d$  zieht, der Nachbar dann an

der Stelle  $b$  auf dem Kreis liegt und  $o$  die Ausrichtung zu  $R_i$  angibt. Im zweiten Verfahren werden alle Werte in Grad gemessen. Die Ausrichtung eines Nachbarn zu  $R_i$  ermittelt sich übrigens daraus, welche Sensoren ausgehend vom 'Kopf' des Roboters angesprochen werden. Die Roboter erkennen so den Winkel der Ausrichtung durch Abgleichen der ID ihrer Sensoren.



Die Roboter tauschen nun ständig im Millisekundentakt ihre Nachbarn aus und speichern diese als Array. Als nächstes betrachten wir, wie mehrere solcher Roboter einen Schwarm bilden.

### 3 Der Schwarm

Wie bereits erwähnt sind Graphenalgorithmen für die Kommunikation innerhalb des Schwarms essentiell. Wir befassen uns jetzt erst einmal mit der 'Sicht' eines Roboters  $R_i$  auf den Schwarm. Ein einzelner Roboter kennt nicht den gesamten Schwarm, sondern nur seine eigene 2-Hop-Nachbarschaft. Logischerweise erfasst  $R_i$  seine 1-Hop-Nachbarn durch die Sensoren und den einfachen Austausch im Signalradius von einem Meter. Die 2-Hop-Nachbarn werden bei jedem Anpingen eines Nachbarn von diesem Nachbarn  $R_j$  (wir nennen den 'Nachbarn' im Weiteren  $R_j$ ) nun als Array seiner eigenen 1-Hop-Nachbarn mit übertragen. So erhält  $R_i$  seine 2-Hop-Nachbarschaft und aktualisiert diese ebenfalls ständig durch Abgleich mit Nachbarn im Kommunikationsradius. Der Schwarm ist also ein Zusammenschluss von subjektiven 2-Hop-Nachbarschaften eines jeden Roboters. Die Kommunikation im Schwarm erfolgt mittels verteilter Breitensuche, welche wir gleich betrachten.

### 4 Der Controller

Folgende Gleichung bildet das Herzstück der Arbeit, den eigentlichen Controller:

$$u_i^\alpha = \sum_{R_j \in N_i^1} \phi_\alpha(\|q_j^i\|_\sigma) n_{ij}^i + \sum_{R_j \in N_i^1} p_j^i$$

Diese Gleichung, die Alpha-Control, ist nur ein Teil einer Summe mehrerer Controls. Da die anderen beiden (Beta- und Gamma-Control) jedoch auf zentralisierten Methoden beruhen, werden diese für die Arbeit nicht betrachtet. Die Alpha-Control gibt einfach ausgedrückt die Distanz und Ausrichtung zwischen Robotern an, die eingehalten werden muss, um aus dem Schwarm ein Dreieck-Gitter mit gewünschter Größe zu machen, ähnlich wie ein Netz

oder eine künstliche Kraft. Sie bestimmt also, wie 'straff' dieses Netz sein soll. Ist es zu straff, reißt die Verbindung zwischen Robotern eventuell ab. Ist es zu schwach, stoßen Roboter mit hoher Wahrscheinlichkeit ineinander. Im Optimum konvergieren beide Teiler dieser Gleichung gegen Null, wenn der Schwarm perfekt ausgerichtet ist. Der erste Teil der Gleichung ist dabei die tatsächliche Kraft im Schwarm, der zweite Teil die Ausrichtung der Roboter im Schwarm. Ziel ist es nun, dass jeder Roboter seine Werte durch Bewegung von oder zum Nachbarn so anpasst, dass die Alpha-Control optimal wird. Für die Action-Function  $\phi_\alpha(z)$  reicht es zu wissen, dass diese mittels Parameter eingestellt werden kann, um die Stärke im Schwarm zu definieren, ähnlich wie die Stärke eines Elektromagneten.

## 5 Aufgabe des Schwarms

Die Aufgabe des Schwarms ist es nun die Alpha-Control im Optimum zu halten, aber auch Hindernissen auszuweichen und eine interne Verbindung beizubehalten. Um die Alpha-Control umzusetzen gibt es zwei Werte: das Paarweise Potential für den ersten Teil der Alpha-Control und das Laplace Potential für den zweiten Teil. Das **Paarweise Potential**  $\eta_i^q$  gibt an, zu welchem Grad die Kanten in einem Dreieck-Gitter dem gewünschten, definierten Abstand der jeweiligen Roboter  $R_i$  entsprechen. Für diese Arbeit wurde  $d_{desire} = 0.74m$  gewählt, damit die Roboter in ihrem Kommunikationsradius von einem Meter bleiben. Das **Laplace Potential**  $\eta_i^\theta$  gibt an, zu welchem Grad die Roboter eines Schwarms  $G$  in dieselbe Richtung ausgerichtet sind. Im Idealfall konvergieren beide diese Werte gegen Null. Wenn beide Potentiale also gleich Null sind, haben die Roboter im Schwarm den perfekten Abstand zueinander und sind alle in dieselbe Richtung ausgerichtet. Mit diesen beiden Potentialen kann man nun die Hauptaufgaben des Schwarms definieren. Diese lauten folgendermaßen:

1. Nach dem Ausweichen sollte jeder Roboter  $R_i$  in einem Hindernisfreien Raum sein
2. Nach dem Ausweichen sollte der Schwarm  $G$  seine Ausgangsposition einnehmen
3. Während des Ausweichens sollte der Schwarm  $G$  die interne Verbindung beibehalten
4. Nach dem Ausweichen sollte der Schwarm  $G$  nicht mehr dem Hindernis zugewandt sein

Wichtig für die Erkennung von Hindernissen und der Kommunikation im Schwarm sind außerdem lokale Gelenkpunkte und die verteilte Breitensuche.

### 5.1 Lokaler Gelenkpunkt

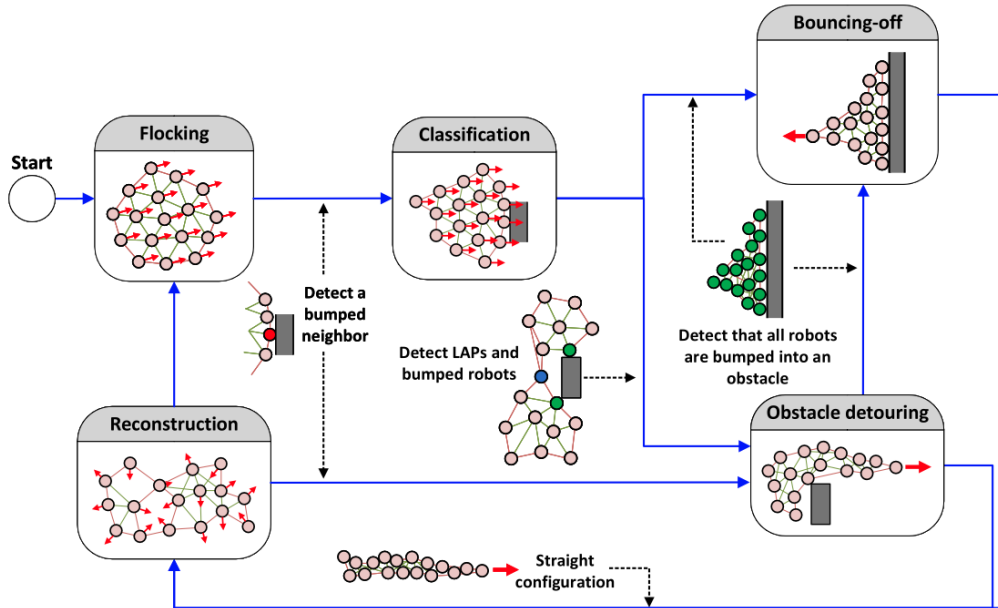
Ein Gelenkpunkt ist ein Knoten in einem Graph, durch dessen Entfernung mindestens zwei Teilgraphen entstehen. Ein Roboter  $R_i$  ist ein Gelenkpunkt, wenn es in der lokalen 1-Hop-Nachbarschaft zwei oder mehr Nachbarn gibt, die nicht untereinander, also nur mit  $R_i$  verbunden sind. Für diese Nachbarschaft  $N_i$  ist dieser Roboter ein lokaler Gelenkpunkt. Lokale Gelenkpunkte sind wichtig zum Abtasten von Objekten und durch dessen Entfernung könnten zwei Teilschwärme entstehen.

## 5.2 Verteilte Breitensuche

Die Verteilte Breitensuche von Li et al. und McLurkin ist ein Algorithmus, um einen Baum in einem Graphen von einer Wurzel aus aufzuspannen. Jeder Wurzelknoten  $R_0$  setzt dabei seinen initialen Hop auf Null und produziert eine Nachricht mit initialem Zeitstempel Null, welche mit jedem Hop um eins erhöht wird. Die Empfänger  $R_i$  setzen ihren Hop für die nächste Nachricht nun um eins höher als empfangen und schicken diese an alle Nachbarn  $R_j$ . Die Nachbarn speichern nur die Sender mit geringster Distanz und der Schwarm  $G$  baut so einen Baum auf. Durch diese Struktur können nun Nachrichten im Schwarm versendet werden oder auch anhand der Anzahl der Hops die Entgernung von Robotern bestimmt werden.

## 6 Der Phasenübergangsautomat

Damit der Schwarm ein koordiniertes Manöver ausführen kann, um einem Objekt auszuweichen, hat sich der Autor für einen Phasenübergangsautomaten entschieden. Ein Phasenübergangsautomat (im Weiteren als PTM für Phase Transition Machine) wechselt ihren Zustand nur, wenn eine spezifische Nachricht von einem Roboter den gesamten Schwarm erreicht hat. Da wir die verteilte Breitensuche als Kommunikationsmittel verwenden, wechselt der Automat also erst den Zustand, wenn ein Baum mit einer Nachricht aufgespannt wurde.



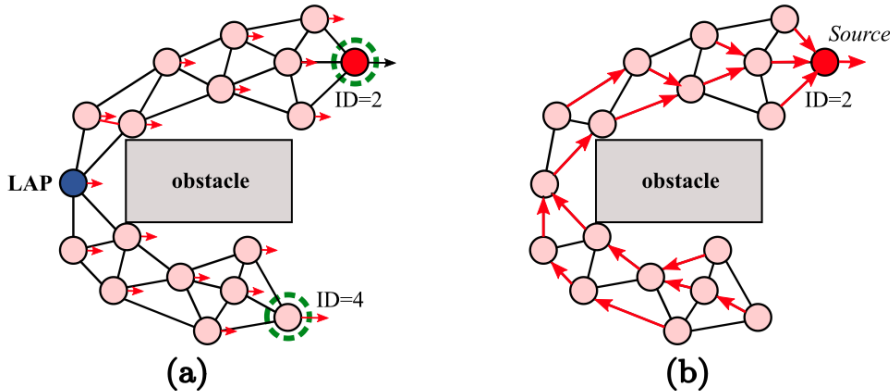
### 6.1 Zustand: Classification

Die Ausgangssituation ist, dass der Schwarm 'flockt', sich also einfach im Raum bewegt und perfekt ausgerichtet ist. Wenn ein Roboter nun kollidiert und kein Nachbar als Hindernis fest-

gestellt werden konnte, geht der Schwarm in den Classification Zustand über. Der Schwarm tastet nun nach und nach die Größe des Hindernisses ab, indem geprüft wird, ob noch Roboter existieren, die nicht kollidiert sind. Sind alle Roboter kollidiert geht der Schwarm über in den Bouncing-off Zustand. Wurde ein Weg ohne weitere Kollisionen gefunden geht der Schwarm in den Obstacle Detouring Zustand über. Der lokale Gelenkpunkt spielt hier eine Rolle in der Ermittlung der Größe eines Hindernisses, da ein LGP zwischen zwei kollidierten Nachbarn ein Indikator für eine 'Map'-Größe ist. Die Kommunikation im Schwarm ist kostengünstig, da nur zwei Werte übermittelt werden: isLGP, also ob ein Roboter ein lokaler Gelenkpunkt ist, und ob ein Roboter kollidiert ist.

## 6.2 Zustand: Obstacle Detouring

Um einem Hindernis auszuweichen muss eine Route um oder vom Hindernis weg gefunden werden. Dafür prüft sich zuerst jeder Roboter selbst, ob er am weitesten vorne im Schwarm ist, um dann als neuer Lead den Schwarm vom Hindernis weg zu führen. Zwei Kriterien müssen dafür erfüllt sein: Ein Lead darf selber nicht kollidiert sein und keinen Nachbarn vor sich haben. Das funktioniert wieder einfach mittels verteilter Breitensuche. Da diese die Anzahl der Hops zur Root angibt, kann einfach ermittelt werden, welcher Roboter am weitesten weg von einem LGP ist, um so einen Scheitel um das Objekt zu ziehen (siehe Abbildung (a)). Wenn mehrere Roboter den höchsten Hop zum LGP haben, wird derjenige mit der kleineren ID gewählt. In einer Eltern-Kind-Beziehung folgen nun alle Roboter dem neuen Lead (b).

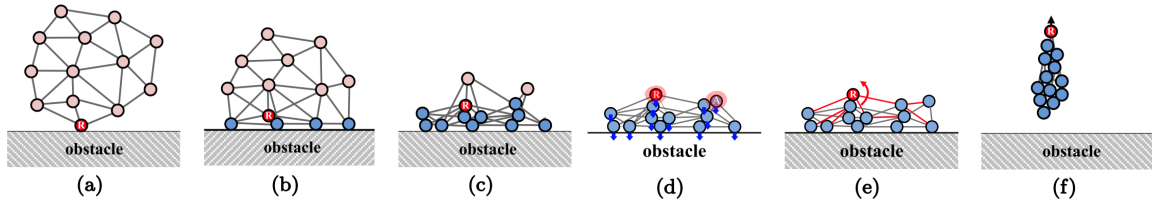


Dabei gilt es den maximalen Baumwinkel, also den größten Winkel innerhalb vom Schwarm, minimal zu halten. Wenn ein vordefinierter Threshold für den maximalen Baumwinkel unterschritten wurde – der Schwarm also eine längliche Formation eingenommen hat – und kein Roboter mehr kollidiert ist, geht der Schwarm in den Reconstruction Zustand über.

## 6.3 Zustand: Bouncing-off

Wie wir bereits wissen wird sich der Schwarm von einem Hindernis oder einer Wand abstoßen, wenn alle Roboter kollidiert sind. Das Vorgehen ist relativ simpel und kann der folgenden

Abbildung entnommen werden.



Von Schritt (a) zu Schritt (d) sehen wir, wie alle Roboter kollidieren, der Schwarm befindet sich ab dem Zeitpunkt zwischen (d) und (e) also im Bouncing-off Zustand. Der Schwarm wählt nun ähnlich wie im Detouring Zustand den Roboter aus, der am weitesten hinten im Schwarm ist. Das Kriterium, dass dieser Kandidat nicht kollidiert sein darf, entfällt logischerweise. Dieser neue Lead dreht sich nun vom Hindernis weg und die anderen Roboter folgen wieder in einer Eltern-Kind-Beziehung. Wurde der maximale Baumwinkel wieder unterschritten und ist kein Roboter mehr kollidiert, geht der Schwarm auch hier in den Reconstruction Zustand über.

## 6.4 Zustand: Reconstruction

Ziel des Reconstruction Zustandes ist es, dass der Schwarm sich auffächert und die Werte für das Laplace Potential und das Paarweises Potential minimiert, um den Schwarm optimal auszurichten. Wie man in der Übersicht der PTM sieht, kann es aber weiterhin vorkommen, dass Roboter kollidieren, etwa weil das Hindernis noch nicht weit genug weg ist oder schon ein neues Hindernis auftaucht. Dann entsteht eine Schleife zwischen Obstacle Detouring und Reconstruction. Wenn das Hindernis jedoch weit genug weg ist und der Schwarm durch Anpassung der Ausrichtung und des Abstandes zwischen den Robotern die beiden Werte ausreichend minimiert hat, ist der Schwarm perfekt ausgerichtet und geht in den Flocking Zustand über, wo er sich weiter im Raum bewegt. Die Aufgabe, einem Hindernis auszuweichen, wurde erfüllt.

## 7 Schluss

Der Autor dieser Arbeit hat die Funktion dieses Controllers durch Simulation geprüft und konnte feststellen, dass der Schwarm eine interne Verbindung aufrecht erhält und alle vier Kriterien der Aufgabe erfüllt werden konnten. Auch wenn die Dauer des Manövers und die Effizienz mit steigender Anzahl an Robotern abnimmt, konnte eine Möglichkeit gefunden werden einen autonomen Schwarm so agieren zu lassen, dass er ohne zentralisierte Methoden überleben kann. Anwendungsgebiete für dieses Vorgehen finden sich vor allem in der Erkundung von Terrain, das in der manuellen Erkundung durch Menschen oder sensible zentralisierte Schwärme viel zu teuer wäre, so etwa in der Antarktis. Mit entsprechender Hardware ausgestattet könnte ein solcher Schwarm im Flug in Bergungsmissionen während Überflutungen oder anderen Szenarien eingesetzt werden.