

Seminararbeit

**Multi-Robot Routing under Limited
Communication Range**

Alejandro R. Mosteo, Luis Montano and Michail G. Lagoudakis

Eric Lacher

8. Februar 2010

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|----------------------------------------------|-----------|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 2 | Formalisierung des Problems | 4 |
| 2.1 | Multi Robot Routing | 4 |
| 2.2 | Team Aufgabe | 4 |
| 2.3 | Kostenfunktionen | 4 |
| 2.4 | Minimierungsproblem | 5 |
| 3 | Eingeschränkte Kommunikation | 6 |
| 3.1 | Problemstellung | 6 |
| 3.2 | Lösung | 6 |
| 4 | Clusterbildung und Aufgabenverteilung | 8 |
| 4.1 | Greedy-Verteilung | 8 |
| 4.2 | TSP Verteilung | 8 |
| 4.3 | Verteilung im Uhrzeigersinn | 8 |
| 4.4 | Auktionsbasierte Verteilung | 8 |
| 5 | Simulation | 10 |
| 5.1 | Simulationsumgebung | 10 |
| 5.2 | Simulationsergebnisse | 10 |
| 6 | Einschränkungen | 11 |
| 7 | Fazit | 12 |
| | Literatur | 14 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | <i>Robot Path Cost</i> und <i>Cumulative Target Path Cost</i> | 4 |
| 2 | Bildung von Ketten | 6 |
| 3 | Spanner-Graph | 7 |
| 4 | S-Cluster | 7 |
| 5 | Simulationsergebnisse | 11 |
| 6 | Bewegungen während der Simulation | 12 |

1 Einleitung

Der Begriff *Multi Robot Routing* beschreibt das Problem, ein Team von mobilen Robotern so auf einem Gelände zu bewegen, dass sie alle vorgegebenen (Orts-)Ziele unter Minimierung von Kosten erreichen und damit die Teamaufgabe effizient erfüllen.

Erschwert wird dieses Vorhaben durch die Tatsache, dass sich die Funkreichweite der einzelnen Roboter meist nicht über das gesamte zur Verfügung stehende Gelände erstreckt. Unter diesem Gesichtspunkt ist ein Vorgehen, bei dem sich die Roboter gegenseitig unterstützen und zum Beispiel durch Bildung von Ketten ein Multi-Hop Routing zur Steigerung der Reichweite ermöglichen, dringende Voraussetzung. Dabei gilt es eine Strategie zu finden bei der eine effiziente Verteilung der Aufgaben auf die Roboterverbände (Cluster) stattfindet. Ausserdem muss sichergestellt werden, dass weder zu viele, noch zu wenige Roboter einer bestimmten Aufgabe zugewiesen werden (Cluster).

Die Arbeit unter dem Titel *Multi-Robot Routing under Limited Communication Range*[4] von Mosteo, Montano und Lagoudakis hat diese Problemstellung zum Inhalt. Zuerst wird das *Multi Robot Routing* formal erläutert, um eine Lösungsstrategie entwickeln zu können. Danach wird diese Aufgabe auf die Vermeidung von Kommunikationsabbrüchen durch begrenzte Funkreichweite erweitert und grundlegende Konzepte zur Bewältigung dieser Aufgabe aufgezeigt. Darauf basierend werden vier Algorithmen zur Aufgabenverteilung vorgestellt, die im letzten Abschnitt in einer Simulation miteinander verglichen werden. Diese Ausarbeitung wird der Struktur des Papers folgen und eine schrittweise Heranführung zum, von Mosteo et al. entwickelten, Algorithmus sowie dessen vier Varianten darstellen.

Hinweis: Diese Arbeit beruht auf der Version des Papers, das auf der Autorensseite¹ verfügbar ist und minimale Abweichungen zu dem auf der Seminarseite angebotenen aufweist.

¹<http://www.mosteo.com>

2 Formalisierung des Problems

2.1 Multi Robot Routing

Multi Robot Routing kann interpretiert werden als das Problem, eine Menge $R = \{r_1, \dots, r_n\}$ von n Robotern auf einem zweidimensionalen Areal so zu bewegen, dass alle Ziele $T = \{t_1, \dots, t_m\}$ von jeweils *genau einem* Roboter besucht werden.

2.2 Team Aufgabe

Sei $\mathcal{A} = \{A_1, \dots, A_n\}$ eine Partition der Zielmenge T , g eine Bewertungsfunktion der Einzelleistung eines Roboters und f eine Funktion zur Bewertung der Teamleistung. Dann kann die Teamaufgabe nun formalisiert werden als

$$TA = \min_{\mathcal{A}} f\left(g(r_1, A_1), \dots, g(r_n, A_n)\right) \quad (1)$$

2.3 Kostenfunktionen

Nun werden zwei Funktionen definiert (siehe Abb. 1):

- $RPC^2(r_i, A_i)$: Die Kosten für den Gesamtweg den ein Roboter r_i vom Anfangsort zurücklegt um alle Ziele in A_i zu erreichen.
- $CTPC^3(r_i, A_i)$: Die Summe aller Wegekosten *vom Anfangsort* bis zu den Zielen in A_i für r_i .

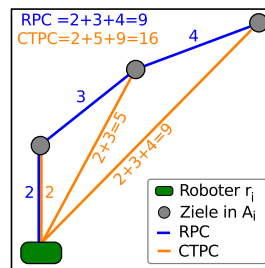


Abbildung 1: *Robot Path Cost* und *Cumulative Target Path Cost*

²Robot Path Cost

³Cumulative Target Path Cost

2.4 Minimierungsproblem

Setzt man in der Teamaufgabe (Formel 1) für f und g entsprechende Funktionen ein, so bekommt man die in Tabelle 1 aufgezählten, von Kostenfunktionen abhängigen Interpretationen der TA . Das Finden einer geeigneten Partition der Ziele und damit die Zuweisung an die einzelnen Roboter unter Minimierung einer der drei Funktionen ist die Aufgabe eines *Multi Robot Routing* Algorithmus. Wie Lagoudakis et al. in ihrer Arbeit *Auction-based Multi Robot Routing*[1] zeigen konnten ist dies ein NP-schweres Problem.

| f | g | TA | Kürzel | Bezeichnung |
|--------------------|--------|--------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------|
| \sum | RPC | $\min_{\mathcal{A}} \sum_j RPC(r_j, A_j)$ | MinSum | Zurückgelegte Gesamtdistanz |
| max | RPC | $\min_{\mathcal{A}} \max_j RPC(r_j, A_j)$ | MinMax | Missionsdauer |
| $\frac{1}{m} \sum$ | $CTPC$ | $\min_{\mathcal{A}} \frac{1}{m} \sum_j CTCP(r_j, A_j)$ | MinAve | \emptyset Zeit zum Erreichen der Ziele |

Tabelle 1: verschiedene Interpretationen der Teamaufgabe

3 Eingeschränkte Kommunikation

3.1 Problemstellung

Eine, laut den Verfassern in vielen Arbeiten zu diesem Themenkomplex vernachlässigte Problematik ist die eingeschränkte Funkreichweite der Roboter. Ist der Durchmesser des Geländes größer als die Funkreichweite, ist eine direkte Kommunikation zwischen allen Robotern meist nicht möglich. Da die Aufgaben aber nicht von den Robotern einzeln sondern im Team gelöst werden sollen, ist das Wissen um den Status der anderen und das Übermitteln von Nachrichten unumgänglich. Daher müssen Strategien entwickelt werden die Kommunikation trotz mangelnder Reichweite aufrechtzuerhalten.

3.2 Lösung

Dies wird hier erreicht, indem die Roboter Ketten bilden (Abb. 2), bei denen sich die Glieder nie weiter von ihren Nachbarn entfernen als es ihre Funkreichweite zulässt. Diese Ketten sind in der

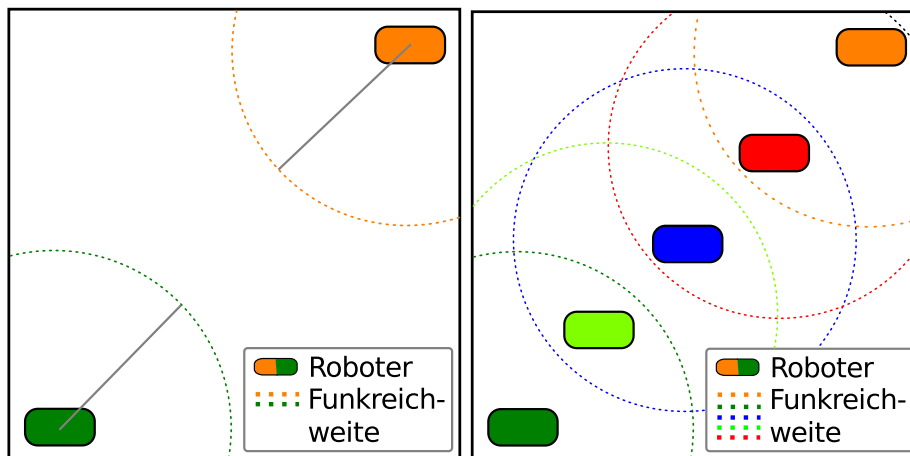


Abbildung 2: Überwinden zu grosser Strecken (links) mittels Kettenbildung (rechts)

genaueren Implementierung ein Spanner-Graph (siehe Abb. 3), bei dem die Kanten höchstens so lang sind wie die Funkreichweite. Damit wird gewährleistet, dass jeder Roboter durch einen Pfad über den Spanner-Graphen per Multi-Hop Routing erreichbar bleibt.

Aus diesem Grund basiert der von Mosteo et al. eingesetzte Algorithmus auf sogenannten *Federkräften*. Damit gemeint ist ein Mechanismus, der die Roboter im Spanner Graph davor bewahrt sich zu weit voneinander zu entfernen. Um trotzdem flexibel zu bleiben werden nur die Roboter,

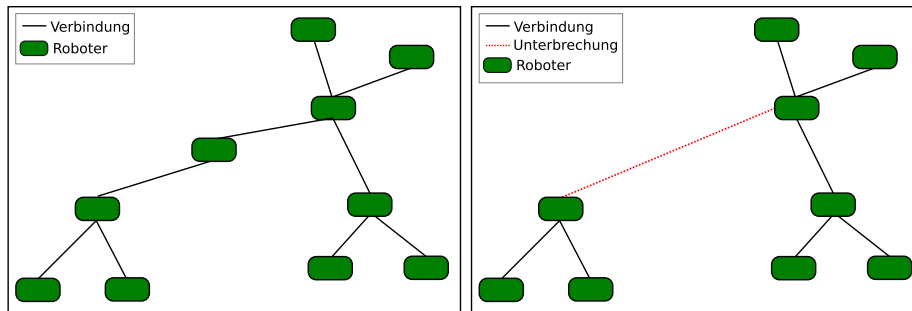


Abbildung 3: Verbundener (links) und durch zu grosse Entfernung unterbrochener Spannergraph (rechts)

deren Entfernung nicht mehr ohne Kommunikationsabbruch vergrößert werden kann, durch eine *Feder* verbunden. Dies bedeutet, dass sie sich nicht mehr voneinander weg bewegen, bis die Feder gelöst wird. Durch Federkräfte verbundene Roboter bilden einen statischen Teilgraphen, sogenannte *S-Cluster* (Abb. 4).

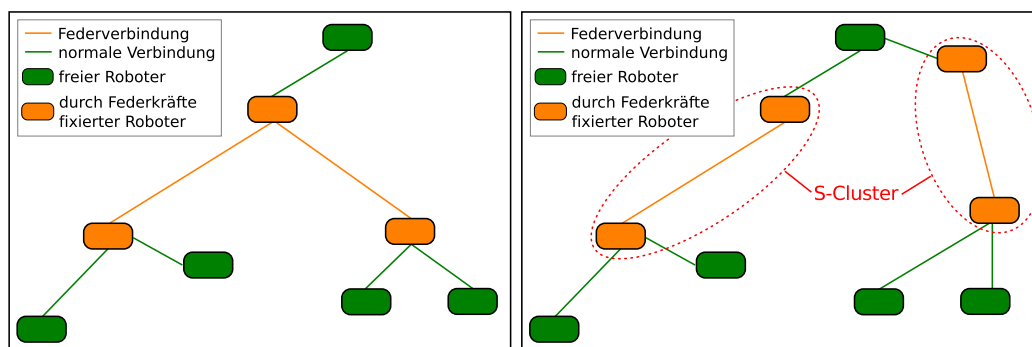


Abbildung 4: Beispiel für einen Graphen mit einem (links) bzw. zwei (rechts) S-Cluster

Anmerkung: Um trotz dieser Beschränkung eine maximale Beweglichkeit sicherzustellen und Dead-Locks durch konkurrierende Interessen zweier Cluster zu vermeiden, müssen Konzepte implementiert werden die dies verhindern. Dieser Themenkomplex wird im nächsten Kapitel **Clusterbildung und Aufgabenverteilung** näher betrachtet.

4 Clusterbildung und Aufgabenverteilung

Der Anforderung, möglichst wenig gegensätzliche intercluster-Interessen zu generieren wird man gerecht, indem die Aufgabenverteilung so gestaltet wird, dass die gleichzeitig bearbeiteten Ziele möglichst benachbart sind. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit mit vielen, sich nicht gegenseitig behindernden Robotern zu arbeiten. In dem dieser Arbeit zugrunde liegenden Paper werden vier Algorithmen zur Aufgabenverteilung und Clusterbildung vorgeschlagen und miteinander verglichen.

4.1 Greedy-Verteilung

Bei der Greedy-Verteilung wird einem Roboter dasjenige Ziel zugewiesen, welches sich am nächsten zu ihm befindet. Allen Robotern, die sich mit diesem in einem S-Cluster befinden wird ebenfalls dieses Ziel zugewiesen, so daß sie gemeinsam darauf hin arbeiten.

4.2 TSP Verteilung

Die TSP Verteilung basiert auf dem *Traveling Salesman* Verfahren. Es gibt einen globalen TSP-Plan der eine vorberechnete Abarbeitungsreihenfolge festlegt. Nun wird jedem S-Cluster ein Ziel nach diesem Plan vergeben. Ist ein Ziel abgearbeitet, so wird dem nun freien S-Cluster das nächste Ziel des TSP-Plans zugewiesen.

4.3 Verteilung im Uhrzeigersinn

Bei dieser Strategie werden die Ziele im Uhrzeigersinn bezüglich des Geländemittelpunkts an die S-Cluster vergeben. Dies stellt sicher, dass die nacheinander oder gleichzeitig abgearbeiteten Ziele örtlich sehr nahe beieinander liegen, und die Cluster sich nicht durch konträre Interessen gegenseitig behindern.

4.4 Auktionsbasierte Verteilung

Diese Verteilungsstrategie versucht die Anzahl der benötigten Roboter N für eine bestimmte Aufgabe zu schätzen und sicherzustellen, dass die benötigte Zahl zur Verfügung steht. Die Schätzung basiert auf der Entfernung eines Ziels zum Geländemittelpunkt d und der Funkreichweite L , so dass die minimal benötigte Menge an Robotern mit $N = \lfloor \frac{d}{L} \rfloor + 1$ angegeben werden kann. Ist das Ziel also 5 LE^4 vom Mittelpunkt entfernt, und liegt die Funkreichweite bei 2LE , so wird die Zahl der für dieses Ziel benötigten Roboter auf $N = \lfloor \frac{5}{2} \rfloor + 1 = 3$ approximiert. Nun werden die Aufgaben nach steigendem Aufwand in Runden verteilt:

⁴Längeneinheiten

1. $N = 1$
In der ersten Runde werden die Ziele vergeben, die nur einen Roboter benötigen. Bei n Robotern können hier maximal $\frac{n}{1} = n$ Ziele gleichzeitig verarbeitet werden.
2. $N = 2$
In der zweiten Runde werden die Ziele vergeben, die genau zwei Roboter erfordern. Bei n Robotern können also maximal $\frac{n}{2}$ Ziele gleichzeitig verarbeitet werden.
- ...
- n . $N = n$
In der letzten Runde werden die Ziele vergeben die alle Roboter zur Bewältigung der Distanz erfordern. Hierbei kann jeweils nur ein Ziel ($\frac{n}{N} = 1$) gleichzeitig verarbeitet werden.

5 Simulation

5.1 Simulationsumgebung

Die Simulationen basieren auf dem *Player/Stage robot simulator*⁵. Es wurden 8 Roboter mit insgesamt 100 zufällig über das Gelände verteilten Zielen simuliert. Der Durchmesser des Geländes betrug 24 LE.

Es wurden vier Werte für die Funkreichweite simuliert:

- (a) $L = \infty$: Direkter Funkkontakt mit allen Beteiligten Robotern (keine Federn).
- (b) $L = 8LE$: Es werden höchstens 3 Roboter für ein Ziel benötigt.
- (c) $L = 4LE$: Es werden höchstens 6 Roboter für ein Ziel benötigt.
- (d) $L = 3LE$: Es werden alle 8 Roboter für ein Ziel benötigt.

Die Bewertung fand anhand der vorgestellten Metriken *MinMax*, *MinAve* und *MinSum* statt

5.2 Simulationsergebnisse

Die Autoren setzten viel Hoffnung in die auktionenbasierte Zielvergabe. Diese Hoffnung wurde nicht bestätigt. In allen Messungen gab es ähnliche relative Werte (für $L \neq \infty$): Am effizientesten, was sowohl die benötigte Durchschnitts- und Gesamtzeit als auch die Summe der zurückgelegte Strecke betrifft, war die Vergabe im Uhrzeigersinn. Danach folgten die Vergabe nach dem Traveling Salesman und dem Greedy Prinzip. Die auktionenbasierten Verfahren waren abgeschlagen, teilweise 80% über den Werten der anderen, egal ob der Algorithmus versuchte *MinMax*, *MinAve* oder *MinSum* zu minimieren.

Je kleiner L gewählt wurde, desto besser konnte dieses Verhalten beobachtet werden. Für $L = \infty$, also ohne eingeschränkte Kommunikationsreichweite, schnitten die auktionenbasierten Vergabeverfahren allerdings am besten ab. Da der Fokus des Papers jedoch die begrenzte Reichweite war bleibt dies nebensächlich.

⁵<http://playerstage.sourceforge.net/>

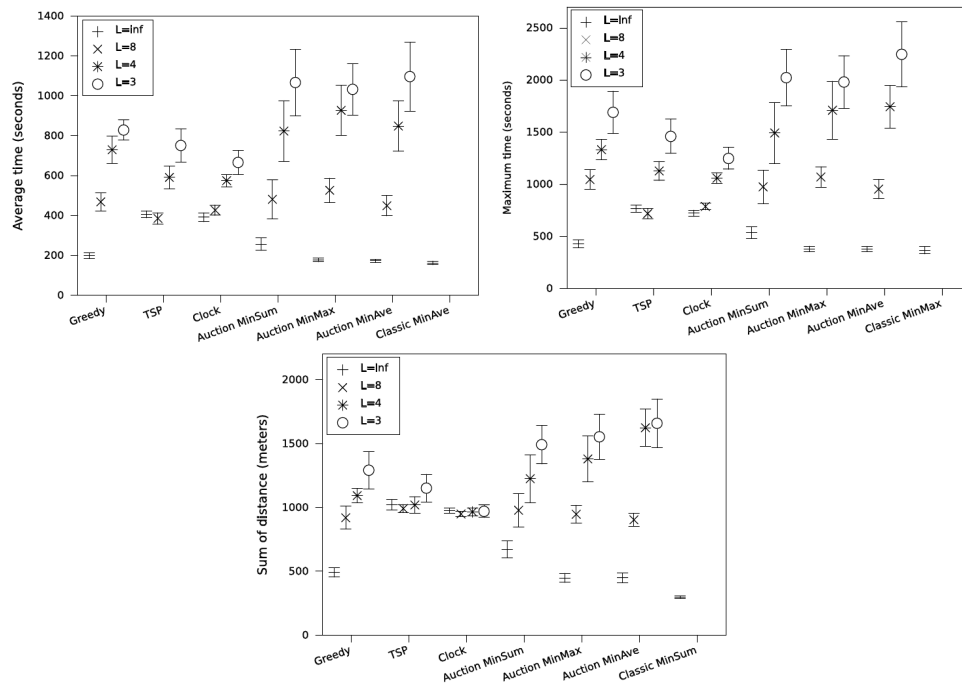


Abbildung 5: Simulationsergebnis nach verschiedenen Metriken und Parametern
Quelle: Paper

6 Einschränkungen

Der hier vorgestellte Algorithmus und die gemachten Simulationen sind beschränkt auf ein barrierefreies Gelände. In einem Folgepaper[3] wird dieser Umstand thematisiert und ein erweiterter Ansatz, der diese Beschränkung aufhebt, vorgestellt. Dabei war die parallele Bearbeitung von Zielen jedoch noch nicht möglich, was eine weitere Arbeit[2] zur Folge hatte.

Des Weiteren geht der Algorithmus von identischen Robotern mit identischer Funkreichweite aus, was die Kostenfunktionen notwendigen Roboter für ein Ziel im Auction-Based Verfahren (Kapitel 4.4). Das Generieren der S-Cluster mittels Federkräften geschieht individuell und automatisiert anhand der ermittelten Verbindungsstärke.

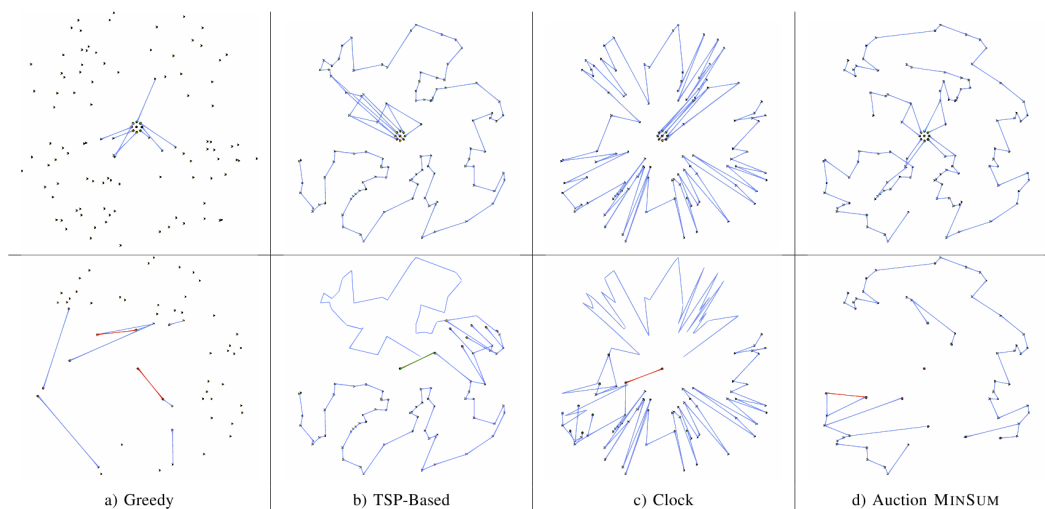


Abbildung 6: Bewegung beim Beginn und in der Mitte des Simulationsprozesses
Quelle: Paper

7 Fazit

Das Paper kann als kurze Bestandsaufnahme für *Multi Robot Routing* gesehen werden, bei dem bewährte Verfahren unter neuen Bedingungen getestet werden. Die formale Definition gibt einen schnellen Überblick und die wichtigsten Problemstellungen werden erörtert. Bereits bekannte Verfahren zur Aufgabenverteilung mussten sich unter dem Aspekt der eingeschränkten Funkreichweite beweisen.

Aus diesem Grund lag der Fokus des Papers in der Beobachtung des durch Federkräfte verbundenen Spannergraphen, der es den Robotern ermöglicht auch bei kurzer Funkreichweite mit jedem im Netzwerk integrierten Teilnehmer zu kommunizieren.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Betrachtung der auktionenbasierten Vergabeverfahren, die dann aber bei der Simulation hinter den hohen Erwartungen zurückbleiben mussten.

Betrachtet man die während der Simulation angefertigten Grafiken zum Bewegungsverhalten der Robotercluster, so kann ein Teil des Papers trotzdem als Erfolg gewertet werden. Die vorhergesagten, durch die Wahl des Algorithmus bedingten Strukturen waren gut erkennbar (Abb. 6). Die vorberechnete, kürzeste Route des TSP-Plans war ebenso grafisch nachzuvollziehen wie die schrittweise Entfernungssteigerung beim auktionenbasierten Verfahren.

Insgesamt kann gesagt werden, dass das Benutzen eines Spannergraphen zur Kommunikation in Verbindung mit dem Prinzip der *Federkräfte* sehr gut funktionierte. Durch die Wahl eines an die Situation angepassten Vergabealgorithmus bietet das Paper eine solide Basis für *Multi Robot*

Routing bei eingeschränkter Kommunikationsreichweite. Dass mit diesem Algorithmus nur barrierefreies Gelände befahren werden kann ist ein Makel, der dann aber in einem Folgepaper[3] thematisiert wurde.

Literatur

- [1] Michail G. Lagoudakis, Evangelos Markakis, David Kempe, Pinar Keskinocak, Anton J. Kleywegt, Sven Koenig, Craig A. Tovey, Adam Meyerson, and Sonal Jain. Auction-based multi-robot routing. In Thrun et al. [5], pages 343–350.
- [2] Alejandro R. Mosteo and Luis Montano. Concurrent tree traversals for improved mission performance under limited communication range. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009.
- [3] Alejandro R. Mosteo, Luis Montano, and Michail G. Lagoudakis. Guaranteed-performance multi-robot routing under limited communication range. In *International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems*, 2008.
- [4] Alejandro R. Mosteo, Luis Montano, and Michail G. Lagoudakis. Multi-robot routing under limited communication range. In *International Conference on Robotics and Automation*, 2008.
- [5] Sebastian Thrun, Gaurav S. Sukhatme, and Stefan Schaal, editors. *Robotics: Science and Systems I, June 8-11, 2005, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts*. The MIT Press, 2005.