

Seminar - Collective navigation of a multi-robot system in an unknown environment

Gregor Germerodt

Hochschule Trier - Trier University of Applied Sciences

E-Mail: grgr3403@hochschule-trier.de

Themensteller und Betreuer: Prof. Dr. Jürgen Graf

Cognitive Systems and Robotics

Abstract—Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. Test [1]

I. INTRODUCTION

Multi-Roboter systems, such as autonomous robots collaborating in a swarm, offer applications in unknown environments like mapping, exploration, or rescue missions [1]. To ensure collision-free paths, this work addresses collective navigation under limited sensor and communication ranges. To enhance system robustness, a nature-inspired swarm behavior is applied, based on three simple rules: cohesion, separation, and alignment [4]. While global motion planning assumes an initial map with static obstacles, this work focuses on local motion planning that can dynamically respond to environmental changes. Instead of Simultaneous Localization And Mapping (SLAM), a decentralized, potential field-based navigation approach (virtual force field in which robots are attracted or repelled) is used, relying solely on local sensor data and communication with neighboring robots. This enables the robots to make early decisions to avoid collisions while ensuring the system's scalability and flexibility.

II. THEORETICAL BACKGROUND

Im betrachteten Multi-Roboter-System werden die Roboter als Punktmassen (d.h. ohne räumliche Ausdehnung, nur durch Position und Massepunkt) in einer zweidimensionalen Umgebung modelliert. Die Systemdynamik basiert auf potenzialfeldbasierten Kräften, wobei nur die Position und Geschwindigkeit jedes Roboters i betrachtet werden, $(p_i, v_i) \in \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2$. Die Bewegungsdynamik jedes Roboters i wird durch folgende Differentialgleichungen beschrieben:

$$\dot{p}_i = v_i \quad (1)$$

$$\dot{v}_i = u_i \quad (2)$$

Die Position des Roboters ändert sich also mit seiner Geschwindigkeit (1) und diese wiederum durch eine Steuerkraft (2). Jeder Roboter kann nur mit benachbarten Robotern innerhalb eines festen Kommunikationsradius r_c bidirektional interagieren. Die zeitabhängige und ungerichtete Nachbarschaft ist definiert durch

$$\mathcal{N}_i^\alpha = \{j \in \mathcal{V} \mid \|p_j - p_i\| < r_c\} \quad (3)$$

mit $\mathcal{V} = \{1, \dots, N\}$, $N \in \mathbb{N}$, die Menge aller Roboter. Um Schwarmverhalten zu erzeugen, werden zwischen zwei Robotern Distanzwerte berechnet, welche Abweichungsenergie, den Grad der Interaktion und Verbundenheit bestimmen.

Die Steuerkraft u_i eines Roboters i wird über die Gleichung

$$u_i = u_i^\alpha + u_i^\beta + u_i^\gamma \quad (4)$$

berechnet, wobei u_i^α für Schwarmverhalten, u_i^β für Hindernisvermeidung und u_i^γ für Navigation sorgt. Das Schwarmverhalten u_i^α setzt sich aus Abstands- und Geschwindigkeitsanpassungen zu Nachbarn sowie deren Wirkstärke in Abhängigkeit vom Abstand zusammen.

Die Hindernisvermeidung u_i^β wird definiert durch die Hindernispunkte die ein Roboter erkennt, wie stark er von ihnen abgestoßen wird und wie diese Abstoßungskraft in Abhängigkeit vom Abstand berechnet wird. Die Steuerkraft für die Navigation u_i^γ sorgt für eine Anziehung des Roboters zum Ziel.

A. The problem statement

Viele bestehende Navigationsansätze für Multi-Roboter-Systeme basieren auf künstlichen Potenzialfeldern, bei denen Roboter von Zielpunkten angezogen und von Hindernissen abgestoßen werden. Ein zentrales Problem dieser Methoden sind jedoch lokale Minima, in denen sich Anziehungs- und Abstoßungskräfte ausgleichen und Roboter feststecken. Besonders in Umgebungen mit konkaven oder labyrinthartigen Strukturen können herkömmliche Verfahren nicht zuverlässig entkommen und alternative Ansätze wie kamerabasierte Hinderniserkennung stoßen unter schwierigen Umweltbedingungen an ihre Grenzen. Für Einzelroboter existieren bereits verschiedene Strategien, um lokale Minima zu überwinden, deren Erfolg hängt jedoch stark von der Hinderniskonfiguration ab. Die Herausforderung für Multi-Roboter-Systeme liegt darin, kollisionsfrei und effizient in unbekannten und komplexen Umgebungen zu navigieren, trotz begrenzter Sensor- und Kommunikationsreichweiten. Hierzu sind kooperative und dezentrale Entscheidungsmechanismen erforderlich, um spontane und sichere Gruppenmanöver zu ermöglichen. Für diese Studie gingen die Autoren von keinem Rauschen (noise) aus.

III. SINGLE ROBOT NAVIGATION

Bevor ein Roboter im Schwarm handeln kann, muss er allein zurechtkommen. Dazu werden in diesem Abschnitt drei Methoden vorgestellt:

- Tangential Navigation, inspiriert von [32],
- Corner avoidance und
- Motion planning at obstacle extremities.

Grundsätzlich möchte sich der Roboter zum *desired goal* bewegen und achtet währenddessen in einem bestimmten Sensorradius r_{tan} auf Hindernisse. Nimmt er dabei ein Hindernis (repräsentiert durch einen Punkt $\hat{p}_{i,k}$) wahr, weicht er unter Berücksichtigung der bewegungsrichtungsabhängigen Winkel α_i und β_i und sich daraus ergebenden Rotationswinkel γ_i , die die Ausweichrichtung (Gleichungen 15 bis 17) und ein virtuelles Ziel (18) bestimmen, parallel zur Hinderniskante, also tangential aus. Über eine angepasste Steuerkraft (19 ähnlich zu 14) wird der Roboter dabei zum *virtual goal* beschleunigt. Nimmt der Roboter zwei Hindernisse (repräsentiert durch zwei Punkte $\hat{p}_{i,n}$ und $\hat{p}_{i,n90}$) wahr, die eine Ecke bilden, wendet er das *Corner Avoidance* Manöver an. Dabei wird der Rotationswinkel γ_i um einen zusätzlichen Winkel ε_i ergänzt, der sich aus den Tangentenrichtungen zu beiden Hindernispunkten relativ zum Roboter berechnet (20, 21). Über Gleichung 22 wird anschließend ein virtuelles Ziel bestimmt, das den Roboter aus der Ecke herausführt. Wenn der Roboter das Ende eines Hindernisses erreicht hat, führt er eine kreisförmige Bewegung um das Ende herum aus. Dazu merkt er sich den letzten Hindernispunkt $\hat{p}_{i,e}$, der in seinem Sensorradius registriert wurde. Anhand der Gleichung 23 und dem Winkel $\beta_{i,e}$, welcher sich durch die tangential Navigation ergab, berechnet der Roboter in gleichen Abständen virtuelle Ziele (berechnet durch Gleichung 24 und repräsentiert durch die Punkte $p_{i,v1}$ bis p_d) und rotiert um einen festen Winkel δ , bis der Winkel zwischen Bewegungs- und Zielvektor (*desired goal*) kleiner gleich δ ist (25).

IV. THE PROPOSED NAVIGATION APPROACH FOR A MULTI-ROBOT SYSTEM

Der vorgestellte Ansatz erweitert den Navigationsalgorithmus für einzelne Roboter um eine Kommunikationsschnittstelle für die kollektive Bewegungsplanung mehrerer Roboter. Der Zusammenhalt der Gruppe könnte gefährdet werden, wenn jeder Roboter sein eigenes virtuelles Ziel verfolgt. Daher werden Informationen über virtuelle Ziele und kritische Punkte (wie in Fig. 4 dargestellt) untereinander ausgetauscht. Diese Informationen werden nach Relevanz, Aktualität und dem Prinzip "Erkennung vor Kommunikation" priorisiert (erkannte Hindernisse haben dabei Vorrang vor übermittelten Informationen aus dem Kommunikationsnetzwerk). Das Kommunikationsnetzwerk besteht aus Informationspaketen, die sich in drei Typen gliedern: Orientierung, Endpunkte und Ecken.

Orientierung (Fig. 5): Enthält den Winkel θ_i zum aktuellen Ziel, den erkannten Punkt $\hat{p}_{i,k}$ auf dem Hindernis, den aktuellen Status des Roboters (Table 1) sowie den Zeitpunkt der Hinderniserkennung.

Endpunkte (Fig. 6(a)): Besteht aus dem zuletzt erkannten Punkt $\hat{p}_{i,e}$, dem Winkel $\omega_{i,e}$ zwischen dem Normalenvektor vom Roboter zum Hindernis und der x-Achse des inertialen Koordinatensystems sowie dem Zielwinkel $\theta_{i,e}$ im Moment der Endpunkterkennung.

Ecken (Fig. 6(b)): Umfasst den Zielwinkel beim Eintritt ($\theta_{i,\text{ent}}$) und Austritt ($\theta_{i,\text{ex}}$) aus der Ecke sowie den Eckpunkt $\hat{p}_{i,c}$, der als Schnittpunkt zweier Linien berechnet wird.

Bevor ein Roboter eine Aktion anhand der gegebenen Orientierungsinformationen aus dem Kommunikationsnetzwerk ausführt, berechnet er eine Relevanz-Funktion rel , welche im Intervall $] -\infty, 10]$ liegt. Dabei steht $\text{rel} = 10$ für eine sehr relevante und $\text{rel} \leq 0$ für eine zu ignorierende Information. Unterschieden wird dabei wie folgt:

- **Alter der Information:** Die Gleichung

$$\text{rel}_t = 10 - \frac{10 \cdot (t_k - \hat{t}^c)}{d_t} \quad (5)$$

bestimmt: je älter die Information, desto unwichtiger ist sie, mit t_k gleich aktuelle Zeit, \hat{t}^c gleich Registrierungszeit der Information von einem anderen Roboter und $d_t \in \mathbb{R}$ eine Konstante, die die Dauer beschreibt, in der Information positive Relevanz haben kann.

- **Distanz vom Hindernis:** Sollte das Hindernis in Bewegungsrichtung liegen, so ermittelt sich rel_{dist} mit

$$\text{rel}_{\text{dist}} = 10 - \frac{10 \cdot \|\hat{p}^c - p_i\|}{d_x} \quad (6)$$

mit $d_x \in \mathbb{R}$ die maximale Distanz, die durch $\|\hat{p}^c - p_i\|$ für eine positive Relevanz erforderlich ist. Liegt es dahinter, dann mit

$$\text{rel}_{\text{dist}} = - \frac{10 \cdot \|\hat{p}^c - p_i\|}{d_x} \quad (7)$$

und sollten keine Orientierungsinformationen gegeben sein, so ist $\text{rel}_{\text{dist}} = 0$.

- **Relevanz der Orientierung basierend auf dem vorherigen Zeitschritt:** Jeder Roboter erwartet für jeden Zeitschritt nur kleine Änderungen in der tangentialen Navigation. Die Gleichung

$$\text{rel}_{\text{exp}} = 10 - \frac{10 \cdot |\theta_i(t_k) - \theta^c|}{d_\theta} \quad (8)$$

beschreibt die Relevanz der erwarteten Orientierung, wobei $|\theta_i(t_k) - \theta^c|$ der Vergleich mit der aktuellen Zielorientierung und der neuen Orientierung ist und d_θ die maximal erlaubte Winkeldifferenz für eine positive Relevanz ist.

- **Auswertung des Senders:**

$$\text{rel}_o = \begin{cases} 10, & \text{wenn direkt gesendet} \\ 0, & \text{wenn nur weitergeleitet} \end{cases} \quad (9)$$

- **Auswertung anhand des Status:**

$$\text{rel}_{\text{type}} = \begin{cases} 10, & \text{falls Status } c = 4 \text{ oder } 3 \\ 5, & \text{falls Status } c = 1 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (10)$$

Die endgültige Relevanz ergibt sich aus der Gleichung

$$\text{rel}_n = \frac{c_{\text{type}} \cdot \text{rel}_{\text{type}} + c_o \cdot \text{rel}_o + c_{\text{exp}} \cdot \text{rel}_{\text{exp}} + c_{\text{dist}} \cdot \text{rel}_{\text{dist}} + c_t \cdot \text{rel}_t}{c_{\text{type}} + c_o + c_{\text{exp}} + c_{\text{dist}} + c_t} \quad (11)$$

wobei die maximale Relevanz durch

$$\text{rel}_{\max} = \underset{\text{rel}_n \in \mathcal{R}_i}{\text{argmax}}(\text{rel}_n) \quad (12)$$

berechnet wird.

Ein Informationspaket ist für einen Roboter schließlich relevant, wenn die Bedingung

$$\text{rel}_n \geq 0.95 \cdot \text{rel}_{\max} \quad (13)$$

erfüllt ist und passt daraufhin seine Bewegungsrichtung für den nächsten Zeitschritt an. Sollten mehrere Informationspakete diese Bedingung erfüllen, wird der Mittelwert daraus bestimmt.

Weiterhin prüft ein Roboter seine Distanz zu den übermittelten Hindernispunkten mit

$$d_s \leq \|p_i - \hat{p}_e^c\| \leq R_{\text{rel}} \quad (14)$$

und sieht diese Punkte dann als seine eigenen Hindernispunkte an, sollte sie innerhalb der maximalen Distanz $R_{\text{rel}} \in \mathbb{R}$ liegen.

V. COLLECTIVE NAVIGATION USING SHARED INFORMATION

In diesem Abschnitt wird erklärt, wie die Verfahren eines einzelnen Roboters auf ein Multi-Roboter-System adaptiert werden können. Dazu sind 7 Status definiert, in dem sich ein Roboter befinden kann, wobei sich jeder zum Start im Status 0 befindet (Erklärungen und Abhängigkeiten in Appendix A).

A. Collective tangential navigation

Die kollektive tangentielle Navigation umfasst die Status 1, 4 und 5. Erkennt ein Roboter ein Hindernis innerhalb seiner Wahrnehmungsreichweite r_{tan} , so leitet er, wie beim Einzelroboter, die tangentielle Navigation ein. Diese Aktion wird als Status 1 bezeichnet. Die dabei ermittelten Informationen werden an benachbarte Roboter weitergeleitet (Algorithmus 2). Da die Steuergröße u_i^α gemäß Gleichung 8 dazu führen kann, dass sich Roboter durch Abstoßung senkrecht zum Hindernis voneinander entfernen und so unbeabsichtigt ein Wechsel von Status 0 auf 1 ausgelöst werden könnte, wird eine Ignoranz-Bedingung (Bedingung 36) eingeführt. Dadurch können Roboter Hindernisse ignorieren. Wird ein Roboter durch neue Informationen aus dem Kommunikationsnetzwerk in eine ungünstige Ausrichtung gebracht und erfüllt dabei Bedingung 37, so wechselt er in den Status 4 (Algorithmus 5), um seine Ausrichtung zu korrigieren. Berechnet ein Roboter aufgrund empfangener Informationen ein virtuelles Ziel mittels Gleichung 38, befindet er sich im Status 5 (Algorithmus 6). Um zu verhindern, dass Roboter Hindernisendpunkte zu spät erkennen, wenn diese nur von anderen benachbarten Robotern erfasst wurden, wird eine Distanzabschätzung mit einer Fallunterscheidung (Bedingung 39) vorgenommen. Damit kann der Roboter anhand der Entfernung zum Hindernis oder zu einer projizierten Position seine Zielausrichtung rechtzeitig anpassen und so Verzögerungen im Bewegungsablauf vermeiden.

B. Collective corner avoidance

Nähert sich ein Roboter einer Ecke, kann er sie, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, umfahren und dabei zusätzlich Informationen aus dem Kommunikationsnetzwerk nutzen. Diese Aktion wird als Status 3 bezeichnet. Damit dabei keine möglichen Durchgänge (z. B. zwischen zwei Hindernissen) übersehen werden, prüft der Roboter zuvor die Bedingung 40. Nur wenn diese erfüllt ist, wird die Ecke als solche erkannt. Anschließend definiert der Roboter ein neues virtuelles Ziel und wechselt in Status 4, um sich neu auszurichten. Gleichzeitig sendet er Informationen über die erkannte Ecke an die benachbarten Roboter. Werden die Bedingungen 40 jedoch nicht erfüllt, verbleibt der Roboter zunächst im Wartezustand (Status 6). In diesem Zustand überwacht er das Kommunikationsnetzwerk seiner Nachbarn. Wird dabei eine Information mit Status 3 oder 4 als relevant eingestuft, übernimmt der Roboter sie und verlässt den Wartezustand. Gibt es stattdessen relevante Informationen mit Status 1 oder 2, passt er sich entsprechend an und folgt entweder der Tangentialnavigation oder dem Manöver an einem Hindernisendpunkt.

C. Collective motion at obstacle extremities

Erkennt ein Roboter den Endpunkt eines Hindernisses, folgt er virtuellen Zielpositionen auf einem kreisförmigen Pfad (Status 2), wie in Abschnitt 3.3 beschrieben. Jeder Roboter legt individuelle Ziele auf diesem Pfad fest und teilt Informationen zum Endpunkt in seinem Netzwerk. Nach Erhalt der Endpunktdaten prüft ein Roboter seine Position durch orthogonale Projektion auf eine virtuelle Startlinie (Fig. 11(a)), bevor er die Kreisbewegung beginnt. Sollte der Roboter diese Startlinie noch nicht erreicht haben (Bedingung 42), setzt er weitere tangentielle Ziele und passt seine Geschwindigkeit an die Mindestgeschwindigkeit für die Kreisbewegung an (Gleichung 43 und 44). Erreicht er die Startlinie, beginnt die Kreisbewegung entsprechend des in Abschnitt 3.3 vorgestellten Schemas. Während der Bewegung stellt eine Komponente aus Gleichung 8 sicher, dass der Roboter sein Ziel auf dem kreisförmigen Pfad erreicht. Überschreitet ein Roboter sein virtuelles Ziel (geprüft über eine Winkelbedingung), wird eine neue Zielposition berechnet. Die Roboter bewegen sich auf individuellen Kreisbahnen mit unterschiedlichen Radien, wodurch innere Kreise kürzere Wege bedeuten. Der Geschwindigkeitskonsens basiert bei der Kreisbewegung auf gleichen Winkelgeschwindigkeiten. Dafür wird eine minimale Winkelgeschwindigkeit (45) festgelegt und die Steuergröße aus Gleichung 8 für eine angepasste Steuergröße aus Gleichung 46 und 47 ersetzt. Dadurch können die Roboter gleichförmig das Hindernisende umkreisen.

Conditional Braking

Wenn mehrere Roboter einer Gruppe eine kreisförmige Bewegung um ein Hindernis ausführen, können durch unterschiedliche Zeitpunkte beim Verlassen der Kreisbahn Geschwindigkeitsunterschiede entstehen, die zum Auseinanderreißen der Gruppe führen. Um dies zu verhindern, werden Roboter, die das Hindernis bereits passiert haben, abgebremst.

Dieses Abbremsen bleibt solange aktiv, bis der letzte Roboter der Gruppe die Kreisbahn verlassen hat.

Zur Bestimmung dieses letzten Roboters wird ein neues Koordinatensystem definiert, dessen Ursprung im Endpunkt des Hindernisses liegt. In diesem System wird die Position jedes Roboters auf die x-Achse projiziert. Anhand dieser projizierten Positionen und über Gleichung 53 betrachten die Roboter ihre Nachbarschaft und identifizieren den Roboter, der am weitesten hinten liegt.

Über eine Gossip-ähnliche¹ Kommunikation wird die gesamte Gruppe über diesen Kandidaten informiert, bis alle Roboter den globalen hintersten Roboter ermittelt haben. Sobald dieser Roboter seine Kreisbewegung beendet hat, sendet er ein Reset-Signal, um das Bremsen der restlichen Roboter aufzuheben und die Gruppenbewegung wieder zu synchronisieren.

Watchdog timer

Fällt die Geschwindigkeit eines Roboters unter einen definierten Schwellenwert, aktiviert er einen selbstüberwachenden Mechanismus, den *Watchdog Timer*. Dabei speichert der Roboter seine aktuelle Position und den aktuellen Zeitpunkt. Der Timer wird wieder deaktiviert, sobald sich der Roboter innerhalb der folgenden Zeitschritte um mehr als einen festgelegten Schwellenwert bewegt (Roboter nimmt an einen möglichen Deadlock (ausweglose Situation) verlassen zu haben). Bewegt sich der Roboter jedoch über einen Zeitraum von 15 Sekunden kaum und wurde der Timer nicht deaktiviert, wechselt er automatisch in Status 0 und bewegt sich in Richtung *desired goal*. Diese Maßnahme kann zwar zu einer Fragmentierung der Gruppe führen, stellt jedoch sicher, dass jeder Roboter das *desired goal* erreicht.

VI. SIMULATION RESULTS

Die Simulationsergebnisse werden anhand von zwei Szenarien dargestellt: einem mit einem Zickzack-Hindernis und einem mit einem Korridor mit Hindernissen. In beiden Fällen werden zwölf Roboter zufällig innerhalb eines Startbereichs positioniert, jeweils ohne Anfangsgeschwindigkeit. Zusätzlich wird ein gewünschtes Ziel (als rotes Kreuz markiert) definiert.

Die Roboter werden in den Abbildungen als schwarze Dreiecke dargestellt. Ihre Bewegung wird durch eine bunte Linie hinter den Dreiecken visualisiert, die Bewegungsrichtung entspricht der Ausrichtung der Dreiecksspitze. Die schwarzen Linien zwischen den Robotern zeigen das aktive Kommunikationsnetzwerk an. Die Abbildungen geben Momentaufnahmen zu bestimmten Zeitpunkten bzw. bei relevanten Ereignissen während der Simulation wieder.

Im ersten Szenario (Abbildung 13) zeigen sich folgende Abläufe:

- (a): Erkennung eines Hindernisses und Beginn der tangentialen Navigation
- (b): Erkennung eines Eckpunktes und Ausführung des *corner avoidance maneuvers*

- (c) und (d): Erkennung eines Endpunktes und Einleitung der kreisförmigen Bewegung um das Hindernis
- (e): Annäherung der Roboter an das Hindernis zur Optimierung der Navigation mithilfe von Gleichung 39
- (f): Erreichen des gewünschten Zielpunkts

Im zweiten Szenario (Abbildung 15) kommen dieselben Verfahren zum Einsatz. Der Unterschied liegt lediglich darin, dass die Roboter hier durch einen Korridor mit Hindernissen navigieren müssen.

Guideline for parameter choice

Die Parameter der Relevanzfunktion (Gleichung 32) sollten in Abhängigkeit des jeweiligen Szenarios gewählt werden. Ein globales Verhalten des Multi-Roboter-Systems, bei dem alle Roboter nahezu gleichzeitig identische Aktionen ausführen, ist dabei für kleinere Systeme mit sechs bis zwölf Robotern geeignet, wenn deren Verteilung im Verhältnis zu den Hindernissen gering ist. In diesem Fall sollten die Relevanz der Zeit des Informationspakets (*relt*) und der Relevanz des Aktionsstatus (*reltype*) höher gewichtet werden als die übrigen Werte, damit Roboter gleichartig und möglichst synchron auf aktuelle Ereignisse im Kommunikationsnetzwerk reagieren.

Bei steigender Anzahl von Robotern oder einer dichteren Hinderniskonstellations kann ein solches globales Verhalten jedoch problematisch sein, da einzelne Roboter gleichzeitig mehrere relevante Informationspakete erhalten könnten. In diesen Situationen sollten Roboter stärker auf ihre eigene Position und lokale Informationen achten. Dazu werden die Relevanz des Abstands zum Hindernis (*reldist*), die Relevanz der erwarteten Orientierung für die nächste Aktion (*relexp*) sowie die Relevanz des Senders der Information (*relo*) höher gewichtet als *relt* und *reltype*.

Die Effekte dieser unterschiedlichen Gewichtungen zeigen sich in den folgenden Abbildungen:

- Abbildung 16 zeigt ein *squeezing maneuver*, bei dem sich die Robotergruppe zwischen zwei kreisförmigen Hindernissen hindurch bewegt.
- In Abbildung 17 ist zu erkennen, wie ein halbkreisförmiges Hindernis die Gruppe aufteilt. Die Roboter korrigieren daraufhin ihre Bewegungsrichtung, indem sie ihren aktuellen Aktionsstatus überprüfen und anpassen.
- Abbildung 18 veranschaulicht, dass durch die priorisierte Hindernisvermeidung eine Fragmentierung der Gruppe auftritt. Dennoch erreichen letztlich alle Roboter das gewünschte Ziel.

VII. CONCLUSION

In dieser Arbeit wurde ein kollektives Navigationskonzept für mehrere autonome Roboter ohne Vorwissen über die Umgebung vorgestellt. Es basiert auf einer tangentialen Fluchtstrategie und dem Austausch lokaler Informationen über ein Kommunikationsnetzwerk. Künstliche Kräfte aus Potentialfeldern ermöglichen kollisionsfreie, kooperative Manöver und ein schwarmähnliches Verhalten. Durch Optimierung

¹lokaler, dezentraler und iterativer Informationsaustausch

der Parameter der Relevanzfunktion und Gewichtungsfaktoren kann der Fragmentierung von Robotergruppen entgegengewirkt werden. Sollten Roboter ihre Verbindung zu Anderen verlieren, können sie auch allein ihr Ziel erreichen. Für holonomische² Roboter ist dabei ein ausreichend großer Sicherheitsabstand und niedrige Geschwindigkeit notwendig. Künftige Arbeiten sollen sich auf eine Echtzeit-Umsetzung, verbesserte drahtlose Kommunikation und alternative Netzwerktopologien für Roboter konzentrieren.

REFERENCES

- [1] E. Olcay, F. Schuhmann, and B. Lohmann, "Collective navigation of a multi-robot system in an unknown environment," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 132, p. 103604, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889020304449>

²Position kann unabhängig der Ausrichtung geändert werden