

## 自律分散技術による群ロボットの操作支援に関する研究

### Multi-Vehicle Operation Support System based on Autonomous decentralized Technology

○古川和貴\*, 末永貴俊\*

○Kazuki Furukawa\*, Takatoshi Suenaga\*

\*仙台高等専門学校

\*National Institute of Technology, Sendai.

キーワード： 自律移動ロボット (Autonomous mobile robot), 自律分散技術 (Autonomous decentralized technology), 自己位置推定 (Localization), 経路計画 (Path planning) RFID(Radio Frequency Identification)

連絡先： 〒 989-3128 仙台市青葉区愛子中央 4-16-1

末永貴俊, Tel.: 022-391-5531, E-mail: sue@sendai-nct.ac.jp

#### 1. はじめに

近年, お掃除ロボットのルンバなど, 人間の作業を補助・代替し, 人の負担を軽減してくれる自律移動ロボットが増加している. 一般家庭など人や物が介在する環境で動作するロボットの場合, 自己位置・姿勢の計測と周辺環境に介在する障害物の認識に基づいた正確な移動制御が重要となってくる. ロボットは動作環境中を移動してタスクをこなしていくので, 人がロボットにタスクを伝達する際に任意の位置へ移動するように指示したり, ロボットの現在位置情報を人にフィードバックするなどの機会があるため, 動作環境における位置情報を人とロボットで同じように認識する必要がある. 現状のロボットの持つ限定されたセンシング能力のもとでは, 知覚は局所的であり, 誤差を含んでしまうことや将来的にロボットのタスクの増加や構造の複雑化による作業効率の低下が考えられる. そこ

で, 自律分散技術を用いたロボット群を用いることで作業を分散させ, 1台あたりの負荷を軽減し, 耐故障性・柔軟性だけでなく, 作業効率も向上できると期待されている<sup>1)</sup>. しかし, 基本的にロボットはそれぞれ独自の座標系で環境認識を行うが, ロボット群での自己位置認識, 情報共有は座標系を一致しないと困難である. 自律分散技術において, 各ロボットでの座標変換は非効率で拡張性に乏しい.

本研究では, 人が生活するような屋内環境での動作を想定した自律分散技術によるロボット群において, ランドマークとしてRFID(Radio Frequency Identification)による共通座標の構築を行う. ロボット同士で障害物と自己位置情報を共有することによって, 信頼性の高い環境認識から適切な移動制御を目指す. RFIDを用いた自律移動ロボットの研究として, 朴らによるRFIDを用いた自律移動ロボットのナビゲーション

ン手法<sup>2)</sup>や小鷹らによる RFID を用いた姿勢推定手法<sup>3)</sup>などが提案されているが<sup>4, 5, 6)</sup>, ロボット単体の動作を想定していて, 障害物が存在する環境を考慮していないため, 障害物回避を可能とする経路計画や自律分散技術として強みを発揮するロボット間での障害物情報共有が必要と考える. そのため, 自律分散技術によるロボット群の自律移動のために, RFID を用いた自己位置・姿勢推定に加え, 障害物情報共有と経路計画手法を提案し, シミュレーションとロボット実機においてこれらの有効性を検証した.

## 2. アルゴリズム

### 2.1 共有座標による自己位置・姿勢推定

RFID は電磁誘導による非接触での通信を可能とした技術で, リーダ/ライタとアンテナで構成される「RFID リーダ」と, IC チップとアンテナで構成される「RFID タグ」(以下「リーダ」, 「タグ」と記述) の組み合わせで使用する. タグは電源が不要なパッシブ型を使用するため, 安価であり半永久的に使用可能となる. リーダとタグは数 cm 以下の距離でのみデータ通信が可能のため, 検知した際は正確な位置情報として扱うことができる.

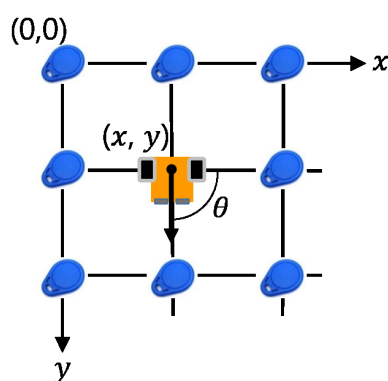


Fig. 1 RFID による座標構築.

タグに内蔵された ID と動作環境の座標を対応させ, ロボットにとってのランドマークとして利用する. タグは Fig.1 のように動作環境全体

を二次元空間のメッシュと考えると節点となる床面部分に設置する. ロボットは移動中にタグを読み取ることで, ロボットは自己位置情報を獲得する. タグは全てのロボットにとって共通の座標となる. これによって自律分散的なロボット群の動作において適切な位置情報共有が可能となり, 人とロボットの位置情報の共通認識が容易になると考えた.

姿勢推定は, タグの検知による自己位置の履歴から推定を行う. 動作環境に配置したタグで作成した  $xy$  座標において, ロボットの姿勢  $\theta(t)$  は現在のロボットの座標  $(x(t), y(t))$  と直前の座標  $(x(t-1), y(t-1))$  から求めることができる. ただし, ここでの  $x$  と  $y$  は  $x(t) - x(t-1)$ ,  $y(t) - y(t-1)$  を意味するものとする.

$$\theta(t) = \begin{cases} \tan^{-1} \left( \frac{y(t) - y(t-1)}{x(t) - x(t-1)} \right) & x > 0 \\ \tan^{-1} \left( \frac{y(t) - y(t-1)}{x(t) - x(t-1)} \right) + \pi & x < 0, y \geq 0 \\ \tan^{-1} \left( \frac{y(t) - y(t-1)}{x(t) - x(t-1)} \right) - \pi & x < 0, y < 0 \\ \frac{\pi}{2} & x = 0, y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & x = 0, y < 0 \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 グラフ構造を用いた障害物情報共有

各ロボットが検知した障害物情報を, ロボット同士で共有できるような地図を用意して, 自分では観測できない場所にいるロボットが検知した障害物情報の取得ができれば, より適切な移動制御が実現できると考えた. そこで, 動作環境に配置したタグをノード, タグ間をエッジとした重み付きグラフとして考えロボット同士の共有地図とする. ロボットは動作中に障害物を検知したら, 現在の自己位置・姿勢と障害物との距離から障害物の位置を推定して適当なエッジのコストを変更する.

また, 自律分散技術によるロボット間の通信では自律性・柔軟性を保つために, ブロードキャストな非同期通信をすることになる. このよ

うな通信手法を基にした自律分散的な情報共有方法として、マルチエージェントシステムなどでよく利用されている FA/C 法 (Functionally Accurate/Cooperative method) による、階層的な知識共有を基にした「分散型黑板システム」を利用する<sup>7)</sup>。

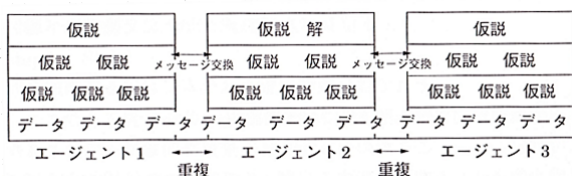


Fig. 2 FA/C 法による分散型黑板システム.

FA/C 法による分散型黑板システムは自身が獲得したデータから推定した状態・結果を各エージェントが黑板と称する共通利用が可能なデータベース等へ書き込み、参照するシステムである。各エージェントが獲得したセンサデータ等は、低いレイヤーのデータとして扱う。このデータは矛盾している可能性があるが、データを基にして得た仮説を、中間レベルとしてエージェント間で通信を行う。そして、ロボット同士で仮説を統合して、上位レベルとして尤度を高めることで正しい解を導出する。これを障害物情報の共有に対して使用することで、障害物情報の信頼性を高めることができると考えた。

本研究では、超音波センサで検知した障害物情報と各ロボットの位置情報の共有を行う。障害物情報は各ロボットが推定した障害物の位置から適当なエッジのコストを変更し、他のロボットへ障害物情報を伝達する。変更するエッジコストのみを通信するので、通信データ量が少なく済むことができる。

ロボットの位置情報の共有は、ロボット同士がロボットと障害物の区別や衝突防止のために重要である。ロボットはタグを検知する毎に自己位置・姿勢情報を他のロボットに伝達する。位置・姿勢情報より、同じエッジ上もしくは同じタグに向かって走行しないようにエッジコスト

を一時的に上げて経路計画することで、ロボット同士による衝突を避ける。

### 2.3 グラフ構造を用いた経路計画手法

ロボットの移動制御は、目的地点となる座標を与えられたとき、現在の位置から目的の位置までどのような経路で走行すべきかを決めた上で移動制御が決まる。適切な移動制御のためには現在の位置から目的の位置まで最短距離でかつ障害物に当たらないような経路を計画することが望ましい。そこで、RFID による重み付きグラフを利用してグラフ理論における最短経路問題として最適な経路計画を行う。重み付きグラフとした共有地図での経路計画において、動作環境上のどこに障害物が存在するか完全に把握していないので、走行中に障害物を発見する可能性がある。このような場合にも適宜経路を再計画する必要があることを想定する。

本研究では、グラフ探索アルゴリズムの一つである A\* アルゴリズムを用いて経路を計画する。A\* アルゴリズムはスタート地点から現在の位置、そして目的の位置までのコストの推定値を利用したアルゴリズムであり、探索における効率評価のための評価関数  $f(m)$  は以下のように表せる。

$$f(m) = g(n) + h(m) + cost(n, m) \quad (2)$$

$f(m)$ : スタートノードからゴールノードまでの推定最少コスト,  $g(n)$ : スタートノードからロボットがいるノード  $n$  までの最少コスト,  $h(m)$ : ノード  $n$  に隣接するノード  $m$  からゴールノードまでの推定最少コスト,  $cost(n, m)$ : ノード  $n, m$  間のコストとなる。この評価式により現在の位置から目的の位置までのコストが最も低い経路を通ろうとするため、障害物が存在するなどのエッジコストの高い経路は避けることができる。実際には、最短経路と考えられる隣接ノードに向かってロボットが走行するため、障害物があるエッジ ( $cost(n, m) = \infty$ ) は枝狩りされるよう

になっている。また  $h(m)$  の評価において、ロボットの動作について考慮すると、超信地旋回の回数は少なく回転角度も小さい方が望ましいためマンハッタン距離で求める。本来の A\* アルゴリズムは完全性があり、必ず解を求めることができるが、自律移動ロボットの経路計画においては障害物の配置によっては目的地点までたどり着くことが出来ないため完全性がない。このアルゴリズムによって、なるべくゴールへ向かうように走行する経路を計画することになる。そのため、未知環境での経路計画では Fig.3 のように障害物を検知する毎に経路を再計画するため、最適ではない経路となる可能性があるが、動作環境の障害物の位置が分かっていたら最適経路が得られることが保証される。

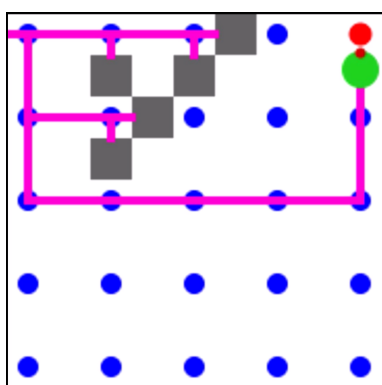


Fig. 3 ロボット単体でのシミュレーション。

### 3. シミュレーション

タグと障害物を配置した動作環境において、自己位置・姿勢推定、経路計画、障害物認識によって適切な移動が行えるか有用性を示すためシミュレーションで検証した。まずはロボット単体で自己位置・姿勢推定、経路計画、障害物認識の有用性を確認した。

緑がロボット本体、ロボット内にある小さな赤がロボットの姿勢、青がタグ、赤がゴールとなる RFID タグ、灰色が障害物、紫がロボットが走行した軌跡を表している。スタートは図中左上のタグで、図中右上のゴールに向かって進

んでいくものの、障害物を検知したために、迂回するように経路を再計画し、最終的にゴールへ辿り着いていることが分かる。

次にロボット複数台での検証をおこなった。動作環境は Fig.4 のようにタグとロボット、障害物を設置した。シミュレーション上で動作環境 (Fig.4) を再現し検証を行う。Fig.5 と Fig.6 でシミュレーションにおける様子を示す。オレンジと黄緑がロボットが走行した軌跡を表している。動作環境は  $6 \times 6$  でタグを 20cm 間隔で配置しており、タグの座標について横軸を  $x$  軸、縦軸を  $y$  軸、図中左上のタグをゴールとした。

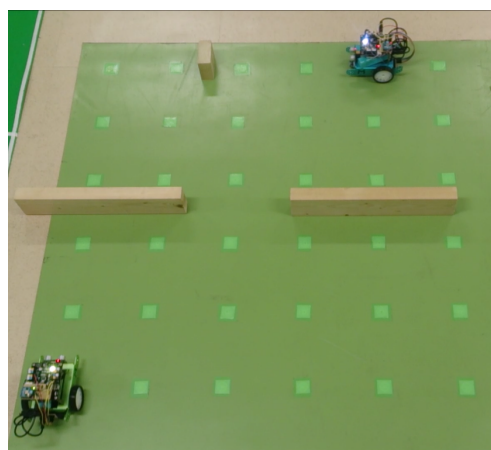


Fig. 4 実機実験での動作環境。

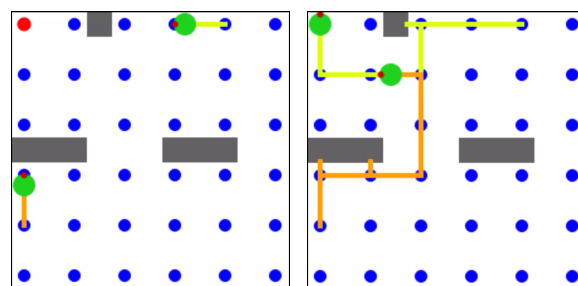


Fig. 5 スタート時. Fig. 6 ゴール到達時。

Fig.5 はシミュレーションにおける初期配置が示してある。どちらのロボットも、最短経路で走行しようとした場合に障害物が存在するため、障害物を検知しエッジコストの変更による経路の再計画が必要となる。障害物情報の共有がおこなえているかという検証として、Fig.1 のように、左上のタグを原点とした動作環境とし

て考えると、オレンジの軌跡を描くロボットは、黄緑の軌跡を描くロボットが検出した障害物情報が共有出来ていれば経路を再計画する回数を少なく走行することが出来ると考えた。シミュレーションの結果、Fig.6に示した、オレンジの軌跡を描くロボットは黄緑の軌跡を描くロボットが検出した障害物情報を受け取って、より適切な移動制御がおこなわれていることが確認できる。

## 4. 実験

### 4.1 ロボットの構成

提案手法による自律移動ロボット実機での動作検証として以下の構成で実験をおこなった。実験にあたって、自律分散技術によるアプローチの上で構成を行うため、使用するロボットは高性能なロボット単体ではなく単純なロボットを複数台利用し、その協調によって作業をこなすためのデバイスを選択した。

ロボット同士が情報を伝達・共有するための「通信デバイス」と、ロボットが単独で自分の位置や移動距離を把握するための「ランドマークデバイス」をロボットに組み込んだ。ロボットの構成を Fig.7 で示し、詳細を以下に示す。

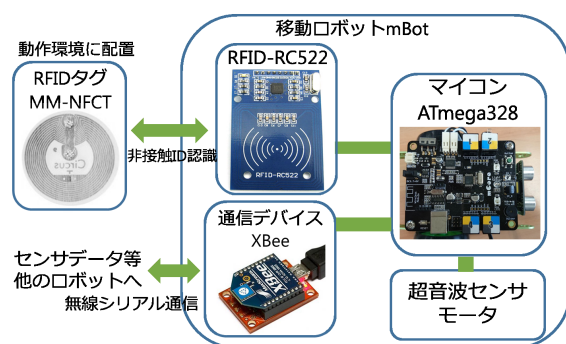


Fig. 7 ロボットの構成.

### 4.2 ロボット実機での実験

次に、提案したアルゴリズムを実装し、ロボット単体では獲得できない障害物を情報共有によ

て取得し、より適切な移動制御を行えることを検証した。自律移動アルゴリズムを以下に示す。

#### 1) 自律移動ロボットの移動

ロボットは、タグを探索しながらフィールド上を移動する。同様に、ロボット前方に搭載している超音波センサで前方に障害物が無いかを調べる。障害物を検知した場合、2.2節で説明した通り障害物情報を共有する。ロボットは自分の大きさと障害物までの距離を比較して衝突しそうなになったら姿勢を反転させて、直前のタグまで引き返す。

#### 2) タグの検知

タグはロボットからのID要求を受信すると、自身のID情報を自律移動ロボットへ返信する。ロボットは、タグのID情報を受信することで、タグの存在を認識できる。もしタグからIDを受信できなかった場合、自律移動ロボットはタグの存在を検知できないため、1の動作を続ける。

#### 3) 自己位置・姿勢の推定

自律移動ロボットはタグのIDを受信すると、タグのIDと動作環境の座標を一致させて自己位置を取得する。現在の位置がゴールとなるタグならロボットは停止する。姿勢推定は式(1)より直近2つのタグの位置情報から算出する。

#### 4) 経路計画

2.3節で説明した経路計画アルゴリズムに基づき、自己位置と姿勢を推定した後に、経路計画から次に向かうべきタグを決定する。

#### 5) 対向二輪型ロボットの姿勢制御

次に向かうべきタグを決定したとき、超信地旋回と直進走行を組み合わせる現在の位置・姿勢から次のタグの方向を式(1)を用いて求める。その後、次に向かうタグの方

向を向くように回転角は式 (3) を用いて求める事ができる。回転角に従ってロボットは超信地旋回をした後、ロボットは前進運動を行う。

$$\theta_{rotation} = \theta(t+1) - \theta(t) \quad (3)$$

ただし、 $\theta_{rotation}$  は回転角、 $\theta(t+1)$  は次に向かうタグの方向角、 $\theta(t)$  は現在のロボットの姿勢角を表す。

$$\theta(t+1) = \tan^{-1} \left( \frac{y(t+1) - y(t)}{x(t+1) - x(t)} \right) \quad (4)$$

6) 以上を繰り返す。

Fig.8 のように各ロボットは障害物を検知して、経路を再計画して移動制御をおこなっていることを確認した。そして、シミュレーションと同様に (1,0)(2,0) 間の障害物情報の共有によって、自身では獲得できない障害物情報を取得して、適切な経路計画がおこなえている様子を確認することが出来た。

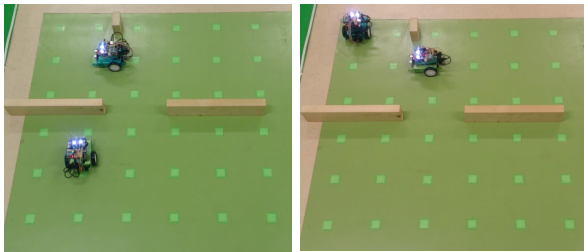


Fig. 8 ロボット実機の動作検証の様子。

## 5. おわりに

ランドマークデバイスに RFID を導入することで、頑健な位置情報取得かつロボット共通の座標系を構築して、ロボット群における障害物情報共有と障害物回避を可能とする経路計画が行えるような自律分散ロボットの協調制御を提案した。シミュレーションとロボット実機によって、提案した移動制御について動作検証を行い、目的座標を設定することで、障害物のある未知環境下において適切な移動制御が行われている

ことを確認した。現在、複数のロボットを用いた際に、障害物情報等の通信によって環境情報の共有の有用性があるかを検証している。複数台での移動制御の有用性が確認できたら、ロボット群で協調的に物体を目的地へ運搬する業務など、自律分散技術を用いたロボット群が活躍を期待される作業へ応用することが考えられる。

## 参考文献

- 1) 小林裕之, 松尾芳樹: 博士論文 自律移動ロボット群における位置情報の協調推定と共有化, 東京工業大学大学院理工学研究科 (2003)
- 2) 朴善洪, 三枝亮, 橋本周司: PassiveRFID を用いた自律移動ロボットのナビゲーション, 電子情報通信学会論文誌 A, **J90-A-12**, 901/909 (2007)
- 3) 小鷹研理, 丹羽治彦, 菅野重樹: 格子状に配置された RFID タグの床面を移動するロボットの姿勢推定, 計測自動制御学会論文集, **45-7**, 379/387 (2009)
- 4) 藤本まなと, 飯田幸雄: 学位論文 パッシブ RFID システムにおける RFID タグ位置推定に関する研究, 関西大学理工学研究科 (2015)
- 5) 鎌田一樹, 小林尚登: 修士論文 オドメトリと RFID を用いた車輪型ロボットの移動制御, 法政大学工学研究科 (2007)
- 6) 伊井佑太, 高橋泰岳, 前田 陽一郎: 学位論文 RFID リーダと IC タグテキストイルを用いた移動ロボットの自己位置同定, 福井大学工学部 (2012)
- 7) 西田豊明, その他 3 名: エージェント工学, オーム社 (2002)