

局所的通信システムにおけるデバイス間の 相対位置推定アルゴリズムの開発

新井義和（ソフトウェア情報学部、准教授）、佐藤 亮（ソフトウェア情報学部、学生）

<要旨>

著者らが開発している空間的にシームレスな局所的通信システムでは、送受信機が常に回転しており、信号を受信した方向は、その信号を送信した周囲のロボットが存在する方向を表す。また、個々のロボットが自らの移動方向および移動速度を送信情報に加えて送信することによって、移動ベクトルを交換することができる。本研究では、それらの時系列情報に基づいて周囲のロボットの相対位置を推定するアルゴリズムの開発を目指す。

1 研究の概要

複数台のロボットが自律的に協調作業を行う場合、ロボット同士の衝突回避が重要な課題となる。効率的に衝突回避を実現するためには、周囲のロボットの現在位置や移動速度ベクトルを取得し、相手の行動を考慮することが望ましい [1]。奥村らはレーザレンジファインダを用いて得られた距離情報から、障害物の移動速度ベクトルを推定して衝突回避を実現している [2]。しかし、移動速度ベクトルは、推定するより通信で直接情報を交換した方が高い精度が期待できる。これに対して、著者らはロボット間の局所的通信によって周囲のロボットの移動速度ベクトルおよびその存在方向を認識手法を提案している [3]。

著者らは、図 1 に示すように、赤外線発光素子および受光素子をモータで回転することによって空間的にシームレスな局所的通信システムを開発している。従来は、おおよそ楕円形の指向性を持つ複数の素子を放射状に配置して全周方向の指向性を確保していたが、それらの素子間には、わずかに指向性の谷間が発生し、連続的な通信が不可能であった。これに対して、図 1 の通信システムでは、あらゆる方向に等距離の通信可能範囲を確保することが可能となる。図 2 に同通信システムの試作機を示す。本システムでは、土台の上にモータが設置され、モータのロータに送信機が固定されており、モータの回転が直接送信機に伝達される。さらに、送信機が減速機の入力軸に、減速機の出力軸が受信機にそれぞれ固定されており、モータの回転が減速機で減速された後に受信機に伝達される。結果として、送信機と受信機は減速機の減速比に応じて異なる速度で回転する。

本システムでは、送受信機が常に回転していることから、信号を受信した方向は、その信号を送信した周囲のロボットが存在する相対的な方向（以下、ロボットの存在方向）として認識できる。同時に、ロボット同士が接近して互いの通信可能範囲に入ると、通信によってロボット間で互いの移動速度ベクトル情報を直接交換することができる。しかし、本システムでは、ロボット間の距

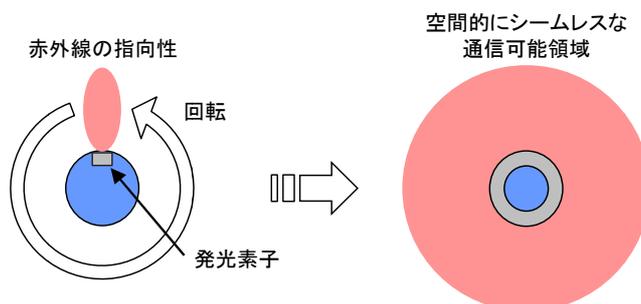


図 1：空間的にシームレスな局所的通信システムの概念

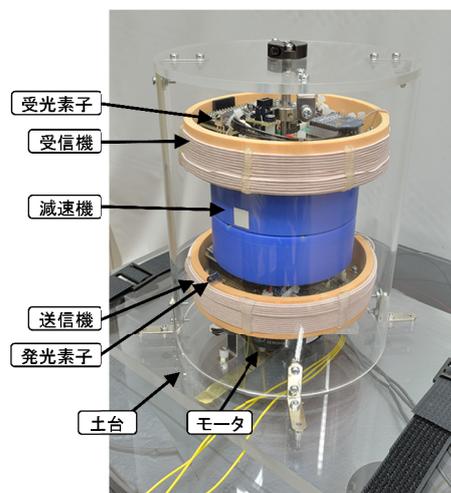


図 2：試作システム

離を計測することができず、同ロボット間の相対位置を推定するには至っていなかった。一方、信号を受信した方向は、ロータリエンコーダによって検知した受信時の受光素子の向きに基づいて、ロボットの周囲の空間を方向分解能が示す角度ごとに区切った離散的な方向として認識される。方向分解能は任意に設定することができるが、それは通信速度とトレードオフの関係にあり、やみくもに高い分解能を設定することはできない。したがって、より速い通信速度を確保するために、アプリケーションに応じた適切な方向分解能を設定する必要がある。

本研究では、開発した局所的通信のシステムのみを用いて周囲のロボットの相対位置を推定することを目指して、ロボット間の距離情報を用いずに、同システムによって得られる周囲のロボットの移動速度ベクトルおよび存在方向の時系列情報に基づいた推定手法を提案する。同時に、得られるロボットの存在方向が離散的であるがために発生する誤差を考慮し、算出される推定位置の精度についての検証を行う。

2 研究の内容

まず、周囲のロボットの移動速度ベクトルおよび存在方向の時系列情報に基づいてその相対位置推を推定する手法について検討する。

時刻 $t-1$ におけるロボット A の位置を原点とした座標系における同ロボットと周囲ロボット B との位置関係を図 3 に示す。時刻 t におけるロボット X の位置を P_{At} 、移動距離を d_{At} 、移動方向を θ_{At} 、移動ベクトルを $m_{At}(d_{At}, \theta_{At})$ とする。ただし、 $X = A, B$ である。移動ベクトルは移動速度ベクトルに通信間隔を乗ずることによって算出される。また、時刻 t のロボット A を基準とす

るロボット B の相対的な存在方向を ϕ_t とする。このとき、時刻 t までに得られる時系列の各情報に基づいて、時刻 t のロボット B の位置 $P_{Bt}(x_{Bt}, y_{Bt})$ は式 (1) のように求められる。この式から、提案する相対位置推定手法は、ロボット A を基準として、時系列上でロボット B が同一の方向に存在してはならないという制約条件が得られる。

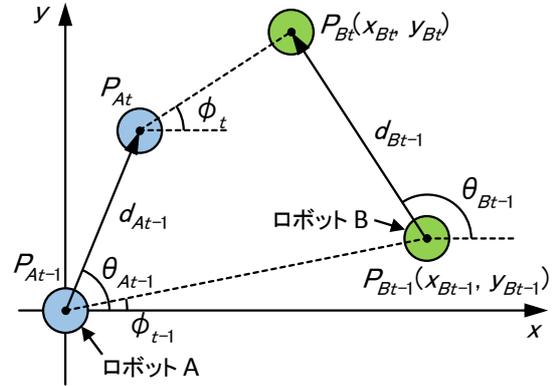


図 3 : 2 台のロボット間の位置関係

$$P_{Bt} = \left(\frac{d_{Bt-1} \cos \phi_t \sin(\theta_{Bt-1} - \phi_{t-1}) - d_{At-1} \cos \phi_{t-1} \sin(\theta_{At-1} - \phi_t)}{\sin(\phi_t - \phi_{t-1})}, \frac{d_{Bt-1} \sin \phi_t \sin(\theta_{Bt-1} - \phi_{t-1}) - d_{At-1} \sin \phi_{t-1} \sin(\theta_{At-1} - \phi_t)}{\sin(\phi_t - \phi_{t-1})} \right) \dots (1)$$

提案手法では、認識される周囲のロボットの存在方向は離散的であり、その量子化誤差は方向分解能に依存する。方向分解能の変化によって量子化誤差にともなう周囲ロボットの位置推定誤差がどのように変化するかを知ることで、位置推定誤差の許容範囲内でより高速な通信速度を得ることが可能となる。本研究では、方向分解能に対する位置推定誤差を検証するために、シミュレータを開発する。

3 これまで得られた研究の成果

本研究で開発したシミュレータと同シミュレータを用いた周囲のロボットの自己位置推定の精度の検証について述べる。

3.1 シミュレータ

図 4 に開発したシミュレータの GUI 画面を示す。本シミュレータでは、ロボット A, B の 2 台のロボットが 2 次元平面を移動し、一定時間間隔毎のそれぞれのロボットの真の位置がプロットされ、それらを直線で結ぶことによってその軌跡が示されている。同時に、同じタイミングで推定されたロボット A を基準としたロボット B

の相対位置がプロットされている。

3.1.1 誤差楕円

2 次元平面上における移動ロボットの移動誤差や位置推定誤差を表現する場合、その誤差は 2 つの軸に対して異なる傾向を示す。このような誤差を統一的に表現する手法として誤差楕円が用いられる。楕円には長さの異なる直行した半径が存在する。それらの半径としてそれぞれの軸における誤差を当てはめて楕円を描くことにより、その大きさや傾きから誤差の傾向を視覚的に捉えることが可能となる。図 4 にはロボット B の相対位置推定の誤差楕円が描かれておりそれぞれの推定位置が誤差楕円の中に収まっていることが確認できる。

3.1.2 誤差楕円の算出

誤差楕円の算出手順を以下に示す。

(i) 存在位置のサンプル点の算出

- (1) 周囲ロボットの存在方向が認識されたとき、実際の存在方向は方向分解能に応じて区切られた区間のいずれかにある。移動前後の存在方向が示す区間をその幅の $1/20$ の角度でそれぞれ刻み、それらを存在方向のサンプル点とする。

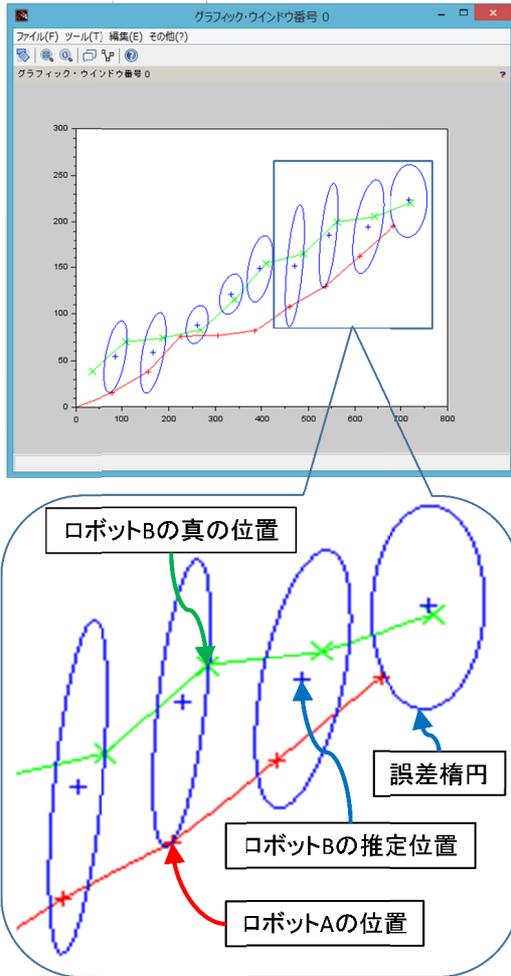


図4：シミュレータ

(2) 個々の存在方向のサンプル点と移動ベクトル情報に基づいて式 (1) から存在位置のサンプル点を算出する。

(ii) 分布中心の算出

(i) で得られたすべての存在位置のサンプル点の x , y 座標それぞれの平均値を分布中心として算出する。運用時には、この分布中心を周囲ロボットの推定位置とする。

(iii) 楕円半径・傾きの算出

- (1) 分布中心に対する各存在位置のサンプル点の標準偏差 σ_x , σ_y を求める。
- (2) 誤差楕円は存在位置の 99.7 [%] の信頼区間を表すこととし、標準偏差 σ_x , σ_y の 3 倍の大きさを楕円の半径として算出する。
- (3) 分布中心と各存在位置のサンプル点から共分散行列 Cov を算出する。
- (4) Cov から固有値、固有ベクトルを導出する。
- (5) 固有値の大きな方の固有ベクトル (v_x , v_y) から得られる $\tan^{-1} \frac{v_y}{v_x}$ を誤差楕円の傾きとする。

3.2 相対位置推定精度の検証実験

方向分解能を変化させながら、ロボット A, B が初期位置から 9 ステップ移動する試行を 100 回行い、そのときの平均値から推定位置の誤差楕円を求めることで提案手法における周囲ロボットの相対位置推定の精度を検証する。

3.2.1 実験環境

本実験では 2 台のロボットが同一の環境内で等速度で走行している。ただし、ロボットの大きさを考慮していない。このとき、方向分解能について 5 [度] から 45 [度] の間を 5 [度] 間隔で変化させたときの相対位置の推定誤差の変化を観測する。誤差としては、誤差楕円の長/短軸半径ならびにロボット B の位置の推定値と真値の方向誤差および距離誤差を指標とする。図 5 に示すようにロボット A に対するロボット B の真の位置の方向を ϕ 、距離を ρ とし、同様に推定位置の方向を ϕ' 、距離を ρ' とするとき、方向誤差 e_ϕ および距離誤差 e_ρ をそれぞれ式 (2), (3) のように求める。

$$e_\phi = |\phi' - \phi| \quad \dots (2)$$

$$e_\rho = |\rho' - \rho| \quad \dots (3)$$

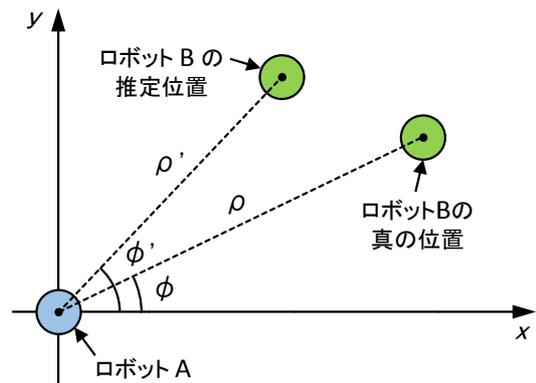
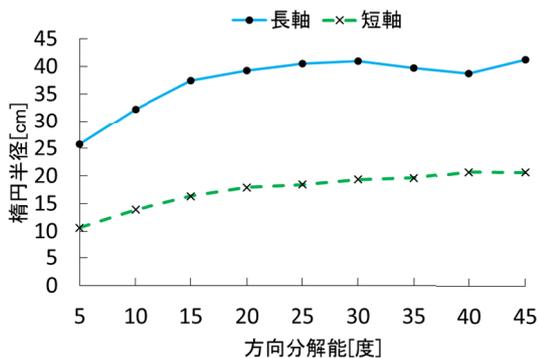


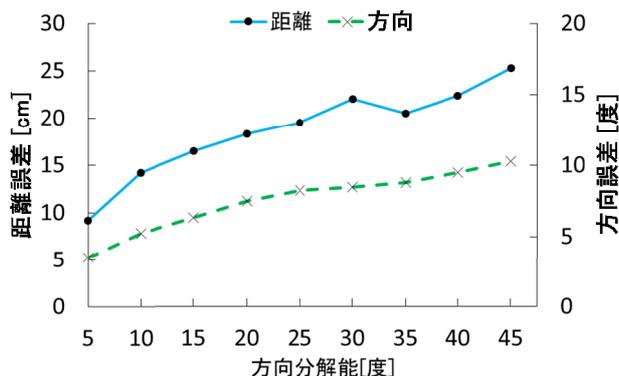
図 5：誤差パラメータ

3.2.2 実験結果

図 6(a) に方向分解能と誤差楕円の半径の関係を示す。同図から、方向分解能の大きさに応じて誤差楕円の半径の大きさが長軸、短軸ともに増加する傾向があることが分かった。同様に、同図(b) に方向分解能と真の位置に対する推定位置の誤差の関係を示す。同図から推定位置の方向誤差と距離誤差が方向分解能の大きさに応じてそれぞれ増加する結果が得られた。結果として、通信相手が存在する方向に関する情報の空間分解能を 5 [度] とした場合に、通信相手までの距離が誤差 10 [cm] 程度、その存在方向が誤差 4 [度] 程度でそれぞれ推定できることを確認した。



(a) 誤差楕円の半径の変化



(b) 相対位置の推定誤差の変化

図 6 : 方向分解能と誤差の関係

4 今後の具体的な展開

本研究で提案した相対位置推定の数式モデルで用いる通信相手が存在する方向は、その取得手段である局所的通信システムの特徴から、一定の幅のある区間として得られる。その空間分解能は送受信機の回転速度の物理的制約から、現状は 45 [度] に設定するのが限界である。その場合、推定値誤差は大きくならざるを得ない。これは、そもそもバラつきのあるデータから統計的に相対位置を推定しようとしていることに原因があると考えられ、推定位置の精度を向上するためには、より精細に通信相手の存在する方法を取得する必要がある。

この問題に対して、これまで破棄してきた赤外線を受光強度の情報を活用してその存在方向をより正確に取得する手法を検討する。すなわち、受光素子は回転していることから、受光素子が通信相手の発光素子と正対していない間は、発光素子および受光素子のそれぞれの指向性から受光強度は制限される。受光素子が発光素子に近づくにつれて受光強度は徐々に強くなり、正対した際にそのピークとなる。したがって、回転しながら受光強度のピークを検出することによって、その方向に通信相手のロボットが存在することになる。

5 論文・学会発表等の実績

佐藤 亮, 新井義和, 今井信太郎, 猪股俊光, “局所的通信システムを用いた時系列情報に基づく周囲ロボットの相対位置推定”, 情報処理学会第 78 回全国大会, pp. 3-419 – 3-420, 2016.

6 受賞・特許

なし

7 参考文献

- [1] 新井義和, 藤井輝夫, 浅間 一, 鈴木昭二, 嘉悦早人, 遠藤 勲: “群ロボット環境における局所的通信に基づく衝突回避”, 日本ロボット学会誌, vol. 19, no. 1, pp. 45-58, 2001.
- [2] 奥村 亮, 竹村 裕, 溝口 博: “LRF を用いた追従対象の速度ベクトル推定 – 一緒に散歩してくれるロボットを目指して–”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '10 講演論文集, 2A2-D2, 2010.
- [3] 菅原 誠, 新井義和, 今井信太郎, 猪股俊光: “空間的にシームレスな局所的通信システムにおける回転する送受信機の通信性能の検証”, 第 58 回自動制御連合講演会, 1G1-3, 2015.