

自律移動ロボットの自己位置推定手法に関する基礎検討

Localization Method of Autonomous Mobile Robots

○鎌形拳*, 野田茂宏*, 中正和久*, 下井信浩*

○Ken Kamagata**, Shigehiro Noda**, Kazuhisa Nakasho**, Nobuhiro Shimoi**

*秋田県立大学

**Akita Prefectural University

キーワード : 自己位置推定手法(Localization Method), 電波マーカー(Radiowave Marker),
自律移動ロボット(Autonomous Mobile Robots)

連絡先 : 〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口 84-4
秋田県立大学大学院 システム科学技術研究科 機械知能システム学専攻
鎌形拳, Tel: (0184)27-2220, Fax: (0184)27-2188, Email: m17a008@akita-pu.ac.jp

1. 緒言

近年, 災害現場において人的被害を防ぐためにロボットの運用が求められている. 東日本大震災では, レスキューロボットが災害現場に投入され様々な成果をあげている¹⁾. しかし, 遠隔操縦型のロボットでは電波や有線による通信が途絶えると操縦不能になる欠点から, 使用範囲や条件に限られる. このような問題を解決するためには, ロボット自身が判断する能力を持ち自律して作業を行う必要がある.

一般的に屋外環境で作業を実施する自律移動ロボットは, GPS を用いることで自己位置推定を行う. しかし, 測位精度は GPS 受信機の機種に依存し, 高層ビルや樹木などの障害物による電波の遮蔽や反射によって測位可能な環境が制限される等の問題がある.

また, 基準点を用いて位置推定する手法では, 赤外線²⁾や Bluetooth³⁾が利用されている. しかし, 赤外線では通信距離が短いため位置推定できる範囲に限られ, Bluetooth では電波強度と距離の関係から位置推定を行っているため精度が悪い等の問題点がある.

そこで, 本研究では位置推定の基準となる電波マーカーを用いた自律移動ロボットの自己位置推定手法を提案する. 電波マーカーを既知の点に設置し, ロボットに搭載した指向性アンテナにより電波の到来角を算出することで位置推定を行った.

2. 自己位置推定手法

2.1 提案手法の構成

本実験で用いた移動ロボットの外観及びロ

ボットに搭載したアンテナの概要を Fig. 1 に示す。また、電波マーカの外觀及び搭載したアンテナの概要を Fig. 2 に示す。電波マーカには全方位に発信するため、無指向性アンテナ(ダイポールアンテナ)を取り付けた。位置推定をするためには電波マーカの座標を定め、電波の到来角を算出する必要がある。このことから、移動ロボットには指向性アンテナ(八木・宇多アンテナ)を取り付けた。指向性アンテナを回転させ、アンテナの回転角度と電波強度の変化から到来角を算出し、算出した到来角を用いて自己位置の推定を行った。通信機器は電波法認証や機器の使いやすさを考慮した上で、個体の識別が容易な通信モジュールである TWE-Lite を使用した。通信規格は IEEE802.15.4 準拠であり、利用周波数帯は 2.4GHz、通信出力は 2.5dBm である。

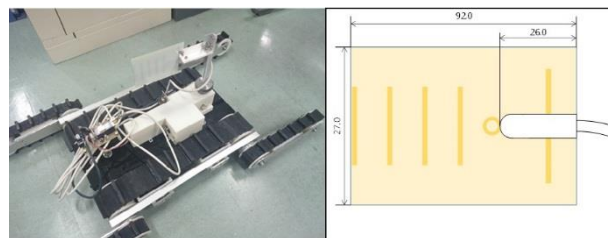


Fig. 1 移動ロボット

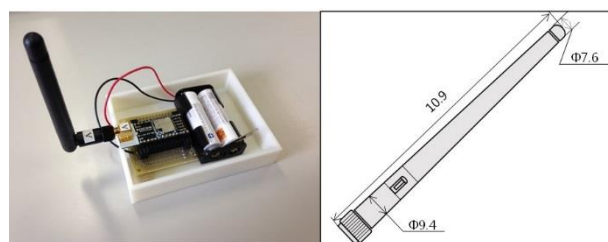


Fig. 2 電波マーカ

2.2 到来角の算出手順

位置推定をするためには移動ロボットがあらかじめ位置を定めた電波マーカから発信された電波の到来角を算出する必要がある。指向性アンテナを回転させながら電波マーカの電波強度(RSSI)を測定して、その測定データを X 軸は回転角、Y 軸は電波強度となるようにプロットし、そのデータの特徴から到来角を算出する。到来角の算出には取得したデータのうち、メインローブのみを扱い、メインローブの切り取りは、電波強度が一番大きな値を示した回転角を基準に行った。具体的には、電波強度が最大値を示した回転角の中央の角から $\pm 70\text{deg}$ の範囲を切り取った。そして、メインローブの特徴を最小二乗法により二次関数で近似し、その関数において Y 軸の最大値をとる X 軸(回転角)の値を到来角とした。

2.3 自己位置推定の処理手順

自己位置推定の概要として、あらかじめ位置

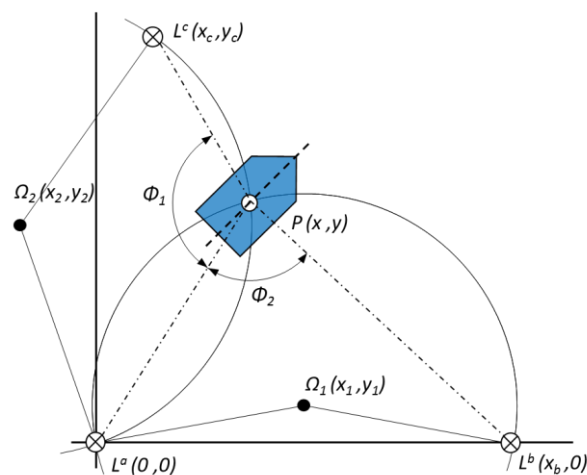


Fig. 3 電波マーカを用いた自己位置推定

を定めた電波マーカから発信された電波の到来角を用いて位置推定を行う。3つの電波マーカ L^a , L^b , L^c が存在する座標系を Fig. 3 のように定義する。 L^a を原点として、直線 $L^a - L^b$ を基準としている。座標系における電波マーカ L^a , L^b , L^c の座標はそれぞれ $(0,0)$, $(x_b,0)$, (x_c,y_c) となる。そして、指向性アンテナを用いて3つの電波マーカの到来角を算出し、電波マーカ L^a , L^b , L^c と移動ロボット P がなす角度 $\angle L^a P L^c = \phi_1$, $\angle L^a P L^b = \phi_2$ を求める。ここで、ロボットの座標 $P(x,y)$ は指向性アンテナを

回転させる軸の中心とする．三角形 L^aPL^b と三角形 L^aPL^c の外接円の中心 Ω_1, Ω_2 の座標をそれぞれ $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ とすると，算出した電波マーカーと移動ロボット P がなす角度 Φ_1, Φ_2 を用いて次のように表すことができる．

$$x_1 = \frac{x_b}{2}, \quad y_1 = \frac{x_b \cot \Phi_2}{2} \quad (1)$$

$$x_2 = \frac{x_c + y_c \cot \Phi_1}{2}, \quad (2)$$

$$y_2 = \frac{y_c + x_c \cot \Phi_1}{2}$$

よって，ロボットの座標 $P(x, y)$ を外接円の中心 Ω_1, Ω_2 の座標を用いて表すと，

$$x = \frac{2(y_1 - y_2)(x_2 y_1 - x_1 y_2)}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3)$$

$$y = \frac{2(x_1 - x_2)(x_1 y_2 - x_2 y_1)}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (4)$$

となる．

3. 電波到来角の精度検証実験

3.1 実験概要

提案した到来角算出手法の精度を検証するための実験を行った．算出した到来角から求めた移動ロボットと電波マーカーがなす角が自己位置推定の精度に影響を大きく及ぼす．本実験では到来角の算出精度検証方法として移動ロボットと2つの電波マーカーがなす角の精度を検証した．実験内容として，最初に移動ロボットの指向性アンテナを360deg回転させながら電波強度を測定し，到来角算出の可能性を確認した．その後，提案手法により到来角を算出し，移動ロボットと2つの電波マーカーがなす角を求め，その精度を検証した．移動ロボットの位置を P ，電波マーカーの位置を L^1, L^2 とすると，移動ロボットと電波マーカーの距離を $PL^1 = PL^2$ ，移動ロボットと電波マーカーのなす角度が $\angle L^1PL^2 = 90\text{deg}$ となるように配置し

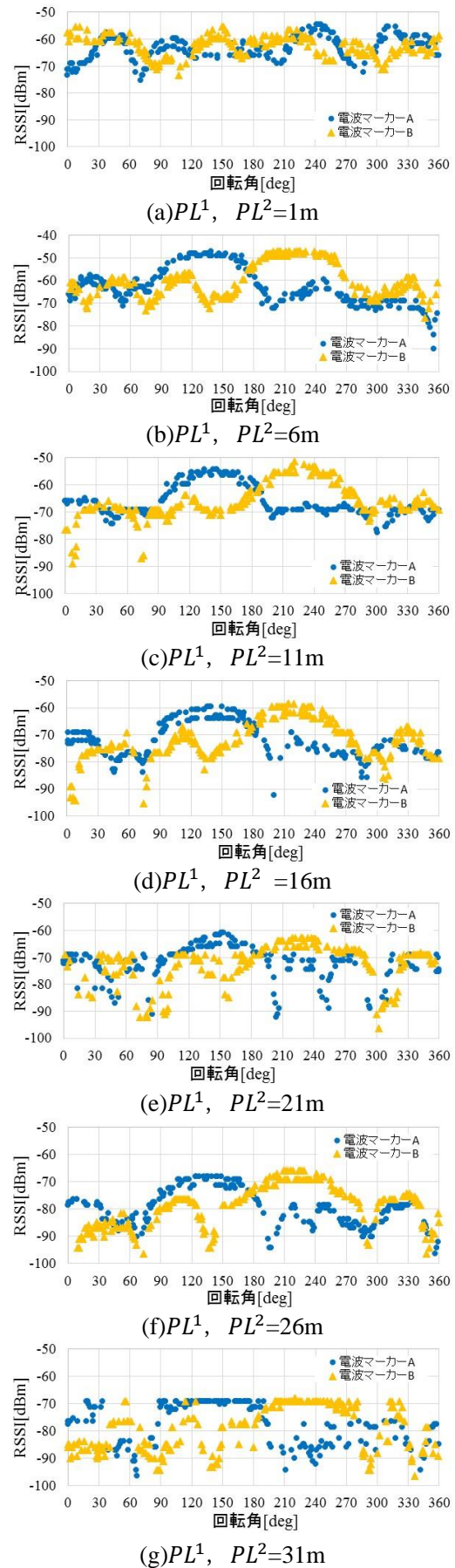


Fig. 4 電波強度と回転角の関係

た. 測定は移動ロボットと電波マーカの距離 PL^1 , PL^2 が 1, 6, 11, 16, 21, 26, 31m の場合において 5 回ずつ行った.

3.2 電波強度の測定結果

電波強度と回転角の関係を Fig. 4 に示す. 移動ロボットと電波マーカの距離が 1m のとき, Fig. 4(a) に示すように電波強度が約 $-70 \sim -50\text{dBm}$ の間で大きな変化が無く推移しており, メインローブを確認できなかった. また, 移動ロボットと電波マーカの距離が 6~26m のときは Fig. 4(b)~(f) に示す通りはっきりとメインローブを確認することができた. しかし, Fig. 4(g) に示す通り距離が 31m のときに取得できたデータからはメインローブを確認することは困難だった. 以上の結果から, 移動ロボットと電波マーカの距離が 6~26m の場合において到来角の算出が可能であることを確認できた. そこで, 距離が 6~26m のときの到来角を算出し 2 つの電波マーカと移動ロボットがなす角を求め, 精度を検証した.

3.3 電波到来角の精度検証結果

提案手法で算出した到来角を用いて移動ロボットと電波マーカのなす角 $\angle L^1 PL^2$ を求めた. その平均値と標準偏差を Table 1 に示す. $\angle L^1 PL^2$ の平均値はそれぞれの距離において $83 \sim 90\text{deg}$ の間をとっており, 真値である 90deg の付近を示した. この結果から, 到来角を真値に近い値で算出することが可能であることを確認できた. また, 21m, 26m の標準偏差が特に大きくなっており, 距離が長くなると移動ロボットと電波マーカのなす角度の精度が悪くなることがわかった. 原因として, 距離が長くなるとメインローブにおける電波強度の最大値と最小値の差が小さくなり, メインローブの頂点を見つけるのが難しくなるからだと考えられる.

4. 自己位置推定実験

提案した自己位置推定手法の精度を検証するための実験を行った. 3 つの電波マーカを一辺 20m の正三角形を形作るように座標 (0, 0), (20, 0), (10, 17.25) に配置した. 移動ロボットを座標 (4, 4) から 4m 間隔で基準点の位置決めし, それぞれ 5 回ずつ位置推定を行った.

位置推定結果の平均値と標準偏差を Table 2 に, 位置推定結果の平均値を Fig. 5 に示す. Fig. 5 では, 基準点とその基準点における位置推定結果の平均値を点線で結んでおり, 3 つの電波マーカも点線で結んでいる. 位置推定結果の平均と標準偏差が基準点の場所によって大きく異なることが確認できた. つまり位置推定精度は基準点と電波マーカの位置関係に大き

Table 1 ロボットと電波マーカがなす角

電波マーカ 一の距離[m]	$\angle L^1 PL^2$ の平均 [deg]	標準偏差 [deg]
6	87.5	2.0
11	86.9	1.3
16	83.3	1.6
21	89.4	4.0
26	85.3	4.1

Table 2 位置推定結果の平均値と標準偏差

基準点	位置推定の平均		標準偏差	
	X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]
(4, 4)	5.8	6.5	0.9	1.1
(4, 8)	2.7	4.7	1.9	3.1
(4, 12)	5.2	7.38	0.3	1.9
(4, 16)	0.7	1.6	1.0	1.8
(8, 4)	7.5	2.1	0.5	0.3
(8, 8)	5.6	5.6	0.3	0.4
(8, 12)	6.8	7.1	0.7	1.5
(8, 16)	8.7	14.2	6.5	7.1
(12, 4)	11.1	2.5	0.5	0.3
(12, 8)	10.9	6.3	1.0	1.3
(12, 12)	10.9	5.9	1.1	1.5
(12, 16)	13.5	5.9	8.5	8.4
(16, 4)	13.5	6.0	1.7	2.0
(16, 8)	11.8	14.6	3.9	7.5
(16, 12)	16.3	9.9	0.9	1.5
(16, 16)	7.1	-6.2	7.8	4.3

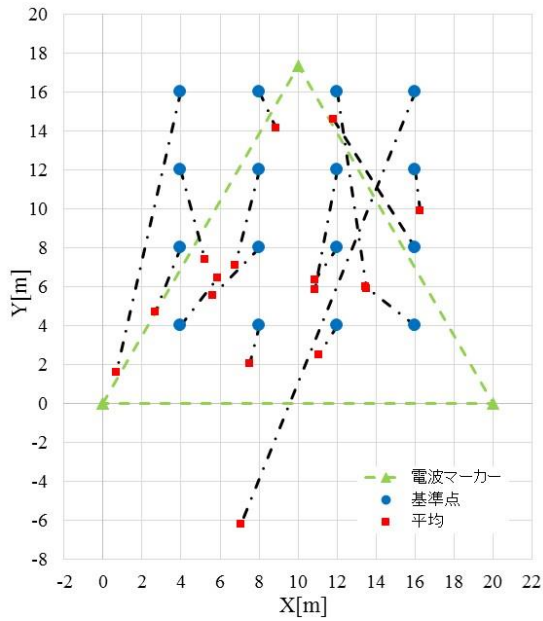
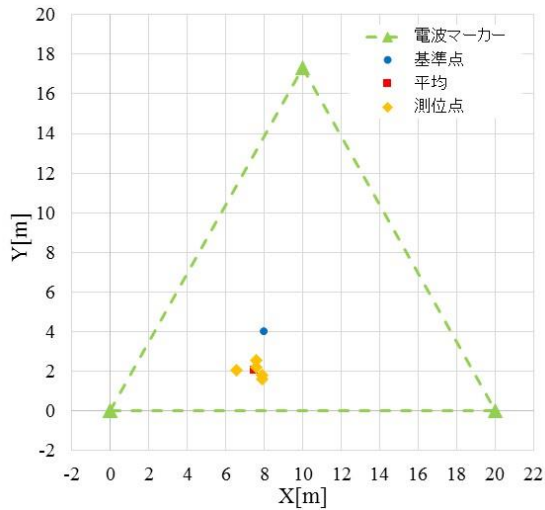
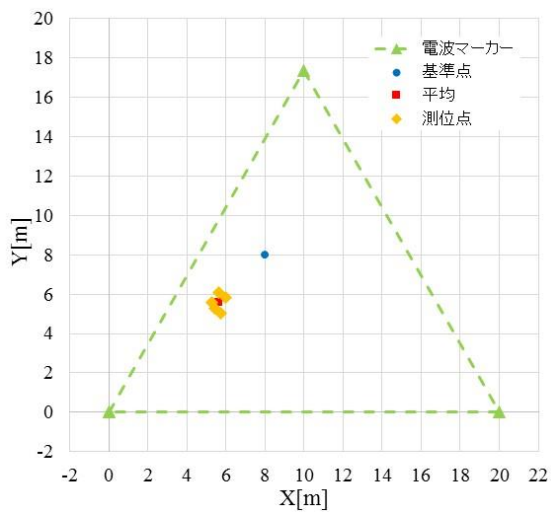


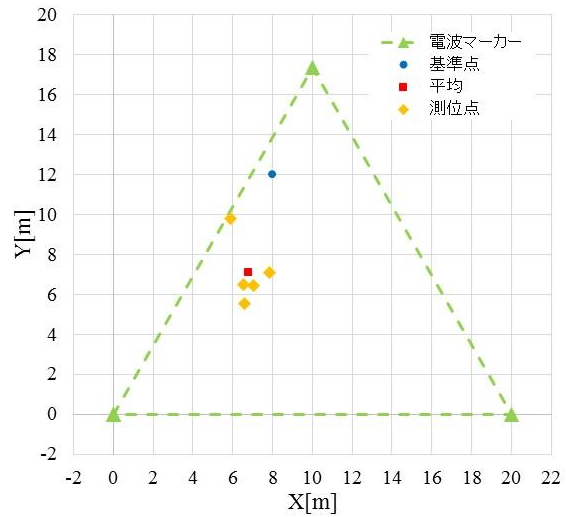
Fig. 5 自己位置推定結果の平均



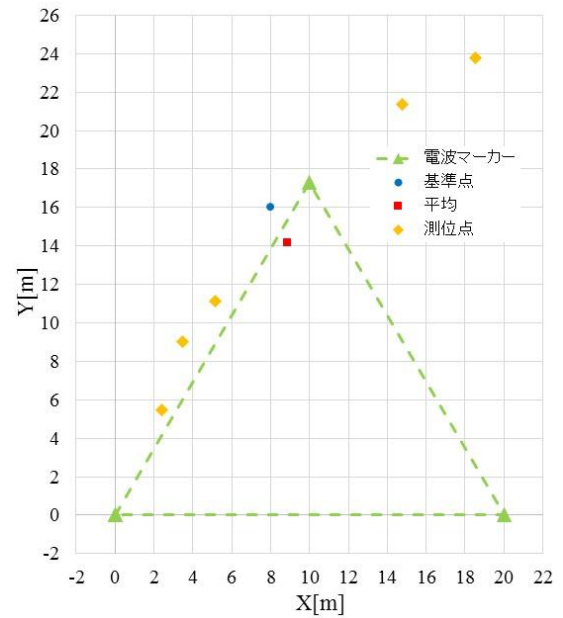
(a) (8,4)



(b) (8,8)



(c) (8,12)



(d) (8,16)

Fig. 6 自己位置推定結果

く影響を受けていると考える。ここで、座標 (8,4), (8,8), (8,12), (8,16) の位置推定結果を Fig. 6 に示す。電波マーカがなす正三角形の内部である(8,4), (8,8)は位置推定結果が一点に集中しており基準点からの誤差も約 1.5~4m となった。また、正三角形の境界付近である(8,12)では、位置推定結果が一点に定まらず誤差が 5m 程度と大きくなった。正三角形の外部である(8,16)では、位置推定結果が分散

しており、誤差が 5m 以上となった。このことから正三角形の内部における位置推定精度は良く、正三角形から外れるほど位置推定精度が悪くなると考えられる。

本手法では到来角のみを測定対象としている。そこで到来角が同じ誤差を含んだときの位置推定精度に及ぼす影響を調べた。到来角に $\pm 5\text{deg}$ の誤差が含まれた場合の結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より位置推定をする位置によって影響が異なることが確認できる。特に電波マーカーがなす正三角形の内部では影響が小さく、正三角形から外れるほど影響が大きくなり位置推定精度が悪くなることが読み取れる。このため、本実験結果において位置推定精度が、電波マーカーのとの位置関係によって異なる原因は、提案手法で用いた数式の影響と推察される。

5. 結言

本実験の結果から提案した自己位置推定手法を用いて位置推定が可能であることを確認できた。また、移動ロボットと電波マーカーの位置関係が位置推定精度に大きく影響しており、電波マーカーがなす三角形の内部における精度が 2.5[m]、三角形の外部においては位置推定精度が 5[m]となることが検証された。このことから、配置する電波マーカーの数を増やし理想的な位置にある電波マーカーを選択することで、広範囲で精度のよい位置推定が可能になると考えられる。

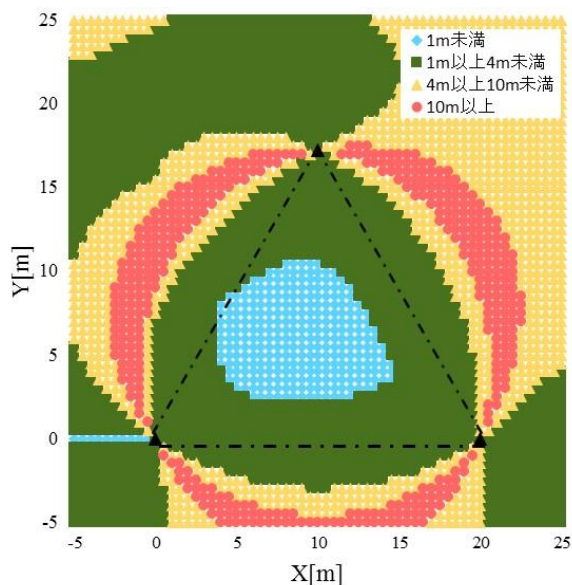


Fig. 7 誤差が位置推定精度に及ぼす影響

参考文献

- 1) 田所諭：災害ロボットの未来，電子情報通信学会誌，Vol. 96 No.10，765/767 (2013)
- 2) 滝田好宏，肥田祐司，下井信浩：赤外線追尾サーボを用いた移動ロボットの高精度軌道制御と環境認識，日本機械学会論文(C編集)，第 61 巻 590 号，209/216(1995)
- 3) 佐藤智美，小宮山哲，下田雅彦，劉渤江，横田一正：Bluetooth の電波強度を用いた位置推定方式の検討，データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム，B9-4，(2011)