自己位置推定のための散策型ロボットによる電子タグ埋設位置推定*

千 田 陽 介^{*1}, 財 部 修 平^{*2}
木 室 義 彦^{*3}, 長 谷 川 勉^{*4}

Localization of Unknown Placed RFID Tags Using Nomadic Robots

Yosuke SENTA^{*5}, Shuhei TAKARABE,
Yoshihiko KIMURO and Tsutomu HASEGAWA^{*5} Institute of Systems & Information Technologies/KYUSHU,
2-1-22 Momochihama, Sawara-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 814-0001 Japan

Self-localization of the mobile robot using RFID system generally requires a lookup table which relates the ID of each tag with its position. However, it is tedious for a human worker to manually build the table. This paper proposes a method to automatically build the lookup table by a simple mobile robot without global position measurement function. Given the small number of RFID tags with their accurate position data, the method successfully build the lookup table for many other RFID tags whose position is unknown in advance.

Key Words: RFID Tag, Positioning, Moving Robot, Measurement, Localization

1. は じ め に

移動ロボットの自己位置推定に電子タグ (以下“タグ”) システムを用いる研究が為されている。最もシンプルな方法は、タグが埋設された床面上をタグリーダー (以下“リーダー”) を持ったロボットが走行し、読取れたタグの埋設位置を自己位置とするものである⁽¹⁾。しかしタグが読取れる範囲はある程度の広がりがあるため、この方法は十分な精度が得られない。そのため、レーザやカメラなど他のセンサと併用するもの⁽²⁾⁽³⁾、リーダーを複数用いるもの⁽⁴⁾、複数のタグを同時に読取る特殊なリーダーを用いるもの⁽⁵⁾、ロボットやリーダーを移動させるもの^{(6)~(8)}など、様々な手法が研究されている。いずれの手法でも、ロボットはタグの埋設位置をあらかじめ知っておく必要がある。これには、タグ ID と埋設位置の対応を表す参照テーブルを用いる方法⁽¹⁾、タグ自身に埋設位置を格納しておく方法⁽⁴⁾⁽⁶⁾、機械学習を用いて教師データの中に組み込む方法⁽⁷⁾⁽⁸⁾などがある。このうち、参照テーブルを用いる方法とタグに位置を格納する方法は、データを間接的に引き出すか直接的に引き出すかの違いのみで、ほとんど同じである。また、機械学習を用いる方法も、参照テーブルを用いてシミュレーションで教師データを作ることが

できる⁽⁸⁾。そのため、タグを用いたロボットの自己位置推定では、参照テーブルが非常に重要となる。

一方、タグシステムは生産、物流、医療、観光、展示、介護、福祉など、様々な分野で利用されてきている。このため、ロボット管理者以外の者も環境内にタグを埋設していくと予想される。タグの通信規格は ISO14443, 15693, 18000 などによって標準化されているため、第三者が埋設したタグも読取ることができる。ロボットの自己位置推定において、これらのタグも利用することが出来れば、位置推定精度の向上やタグ設置コストの低減が期待できる。しかし、これら第三者が埋設したタグは埋設位置が不明である。これらのタグを利用するためには、環境内のタグを探り当て参照テーブルに登録しなければならない。

この作業を人手で行うことは非現実的であり、自動化が必要である。筆者らは、この自動化に関して

- i. タグ探索専用のロボットを少数作る。
- ii. このロボットで環境内のタグの埋設位置を正確に推定させ、参照テーブルを得る。
- iii. i. 以外の多数のロボットが ii. の参照テーブルを活用して自己位置推定を行う。

というシナリオで解決可能と考えている。しかし、利用頻度が低い i. の専用ロボットを作ることはコストパフォーマンスが悪い。また、タグの埋設位置を正確に推定するには時間がかかるため、作業中のロボットが邪魔になることも予想される。そこで筆者らは、清掃

* 原稿受付 2008 年 4 月 2 日。

^{*1} 正員, (財)九州システム情報技術研究所 (☎ 814-0001 福岡市早良区百道浜 2-1-22)。^{*2} 九州大学大学院システム情報科学研究院 (☎ 819-0385 福岡市西区元岡 744)。^{*3} (財)九州システム情報技術研究所。^{*4} 正員, 九州大学システム情報科学研究院。

E-mail: senta@isit.or.jp

環境内を満遍無く移動するロボットの中には、センサを多数搭載し自己位置推定の機能を持つものもある。筆者らは、既にそのような自己位置推定可能な高機能ロボットを利用してタグの埋設位置推定を行う研究を行った⁽⁹⁾。しかし市販の家庭用掃除ロボットのように自己位置推定機能を持たない低機能なロボットも存在する。本論文は、このような低機能ロボットが、ロボット管理者が埋設した少数の位置既知のタグを手がかりに、第三者が埋設したタグの参照テーブルを作る手法について述べるものである。

2.1 タグ探索ロボット タグの位置推定を行う

2.2 電子タグシステムの特性とタグ間距離の計測

タグには、電池を内蔵し自ら電波を発するアクティブ型と、リーダから電力を供給されて応答するパッシブ型がある。環境内に長期間タグを埋め込む場合、メンテナンス性からパッシブ型が選択されることが多い。そこで本論文でも、パッシブ型のタグを採用した。筆者らは既の実験で用いるパッシブ型システム (TI 社 RI-K3A-001A, 133.2kHz) について特性評価を行い、特定の条件下では「一定周期で読取りを試みるリーダと床面上のタグが、水平投影面で 91.5mm 以内に近付くと、確実にそのタグの ID を読取ることができる」というシミュレーション用タグモデルを得ている⁽⁷⁾。すなわち、リーダは半径 $R = 91.5\text{mm}$ 以内にタグが

The diagram shows a robot's trajectory as a dashed line with arrows. Two circular regions represent the 'Readable Range' of Tag A and Tag B. The robot's position at the time of measurement is indicated by a point on the trajectory. Distances are labeled as follows: $\bar{l}_b$ is the total distance from the start point S to the robot; D is the distance between the two tags; $\bar{l}_a$ is the distance from S to Tag A; l_b is the distance from Tag A to the robot; R is the radius of the readable range of Tag A; L is the distance from Tag A to the robot along the trajectory; S is the starting point; T_V is a point on the trajectory; V is the direction of the trajectory; and 'Tag A' and 'Tag B' label their respective positions.

Fig. 1 Measuring of distance between tags

ダグ探索ロボットは、直進動作中にタグ A の応答範囲に入るとタグ A が検知できる。また、その時のエンコーダのカウント値から、任意の位置 S からの距離 l_a を得ることができる。ただし、タグ読取り周期 T がロボットの移動速度 V に対し十分小さいと、図 1 のように S からタグ A の応答範囲までの距離は、 l_a , $l_a + TV$, $l_a + 2TV$, ... と複数得られてしまう。そこでこれらの平均 $\bar{l}_a$ を S とタグ A との距離とする。同じ直線運動中にタグ B に関しても S との距離 $\bar{l}_b$ が得られると、これらの差からタグ AB 間の距離 D を求めることができる。

Fig. 2 Histograms of measured tag's distance

このタグ間距離 D は、二つのタグに対するロボットの進入角や、 T と S との関係からなる初期条件に依存する。ロボットは散策によって、異なった進入角のタグ間距離 D を幾つも得る。図 2 は、距離 L 離れたタグの計測距離 D のヒストグラム (母数 10,000) で、ランダムな進入角や初期条件を用いてシミュレーションで

Fig. 3 Average error of measurement tag's distance

Fig. 4 Estimation of distance of two tags

求めたものである。この結果に対し、 D の平均 $\bar{D}$ と真値 L の差をとったものが図 3 中の Simulation Result のグラフである。これより L が小さければ小さい程、 $\bar{D}$ は真値より少なくなることが分かる。タグの読取り周期 T を無視すると、計測距離 D は図 4 のようにロボットの軌跡と垂直で、それぞれのタグを通る直線間の距離になる。ロボットの軌跡とタグ A, B との距離をそれぞれ r_a, r_b とすると、 D は次のように表すことができる。

$$D = \sqrt{L^2 - (r_a - r_b)^2} \quad (1)$$

進入角はランダムなため、 r_a, r_b は $-R \sim R$ の値を取る。すなわち計測距離の平均 D_{ave} は r_a, r_b をこの区間で積分し、積分幅で割った以下のような形に収束する。

$$\begin{aligned} D_{ave} &= \int_{-R}^R \int_{-R}^R \frac{\sqrt{L^2 - (r_a - r_b)^2}}{(2R)^2} dr_b dr_a \\ &= \frac{(2R^2 + L^2)\sqrt{L^2 - 4R^2} + 3L^2 R \sin^{-1} \frac{2R}{L} - L^3}{6R^2} \end{aligned} \quad (2)$$

図 3 で Calculation value と示されたグラフはこの式を当てはめた結果で、シミュレーション結果と似ている。

この結果を用い、タグ間距離を補正する方法も考えられる。しかし、タグの応答半径 R はタグの埋設状態や個体差に依存する値である。第三者が埋設したタグの状態は不明という考えから、今回は補正は行わない

Fig. 5 Relation between measurement tag's distance and a radius of readable range R .

こととした。またこのような埋設状態やタグの特性のバラツキによる R の誤差が、計測距離 $\bar{D}$ に与える影響について調べるため、式 (2) を用いて R をシミュレーションの標準値 (91.5mm) から ± 10 mm 変化させた時の結果を図 5 に示す。図のように R の誤差によって生じる誤差は、式 (2) によって記述される原理的な誤差と比べて小さい。さらに、この結果は両方のタグの応答半径が同様に誤差が発生した時のものであり、片方のタグのみに誤差が発生した場合はこれよりも変化が小さくなる。このことから、タグの応答半径のバラツキが計測距離に与える影響はほとんど無いことが分かる。

2.3 タグ間距離を用いた埋設位置の推定 前節ではロボットが散策することで、誤差を含むタグ間距離 $\bar{D}$ が求められることを示した。この節では、得られたタグ間距離から、誤差を吸収し各タグの位置を求める手法について述べる。以下タグ n の位置を $\mathbf{X}_n = (x_n, y_n)^T$ 、タグ m と n との計測距離を $\bar{D}_{mn}$ 、予め埋設位置が与えられたタグの集合を K 、位置が推定されたタグの集合を E (初期状態: $E = \emptyset$) と定義する。

2.3.1 未知のタグと既知のタグ間の距離が得られた場合 未知のタグ $x \notin K \cup E$ と既知のタグ $a \in K \cup E$ 間の距離 $\bar{D}_{ax}$ が得られた場合、まず以下の 2 つの条件が満たされ、タグ x の位置 $\mathbf{X}_x$ を求めることができるかを確認する。

1. 既に既知のタグと x との距離が 2 つ以上求められていること (2 つのタグを $b, c \in K \cup E$ とする)
2. $\bar{D}_{ax}, \bar{D}_{bx}, \bar{D}_{cx}, \mathbf{X}_a, \mathbf{X}_b, \mathbf{X}_c$ の誤差が、 $\mathbf{X}_x$ の推定に大きな影響を与えない関係であること

今回、2. の条件は経験的に以下のようにした。

- $\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_b, \mathbf{X}_c$ を頂点とする三角形の各角が $20^\circ \sim 160^\circ$ の範囲にあること
- $\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_b, \mathbf{X}_c$ 間それぞれの距離が、 $\bar{D}_{ax}, \bar{D}_{bx}, \bar{D}_{cx}$ それぞれの 5 倍より大きいこと

これら 1. 2. の条件が満たされていた場合は, X_a , X_b , X_c を中心とした半径 $\bar{D}_{ax}$, $\bar{D}_{bx}$, $\bar{D}_{cx}$ の円 A, B, C の交点から X_x を求める (これにより $x \in E$ となる). ただし, X_x を得るのに用いたこれらの値も計測値, 推定値であり, 誤差を含む. そのため, 3 つの円が 1 点で交わる可能性は低い. そこで, 以下のように平均を用いて X_x を計算した (図 6).

Fig. 6 Geometry of tag's layout

1. 円 A と B との交点 $P_{ab,1}$, $P_{ab,2}$ を求める. ここで円 A, B が交わらない場合 ($|X_a - X_b| > \bar{D}_{ax} + \bar{D}_{bx}$) は, X_a , X_b を結ぶ線分と, 円 A, B それぞれとの交点の中点を共に $P_{ab,1}$, $P_{ab,2}$ とする. この点は以下の式で計算できる.

$$X_a + \frac{X_b - X_a}{2} \left(1 - \frac{\bar{D}_{ax} + \bar{D}_{bx}}{|X_b - X_a|} \right) \quad (3)$$

2. 同様に円 A と C の交点 $P_{ac,1}$, $P_{ac,2}$, 円 B と C の交点 $P_{bc,1}$, $P_{bc,2}$ を求める.
3. $i, j, k = 1, 2$ の組合せ (8 通り) に対し, 以下の値を求める.

$$L_{i,j,k} = |P_{ab,i} - P_{bc,j}| + |P_{bc,j} - P_{ac,k}| + |P_{ac,k} - P_{ab,i}| \quad (4)$$

4. $L_{i,j,k}$ が一番小さかった i, j, k を用いて,

$$X_x = \frac{P_{ab,i} + P_{bc,j} + P_{ac,k}}{3} \quad (5)$$

とする.

2.3.2 既知のタグ間距離が追加, 更新された場合
ロボットの散策により, 既知のタグ $i, j \in K \cup E$ が追加, 更新された場合, 図 7 (a) のようにタグ i, j 間に自然長 $\bar{D}_{ij}$ の仮想的なバネが, $|X_i - X_j|$ に伸縮されて接続していると考え, 静的な釣合いの位置を求める. ここでは単純に, すべての $i \in E$ に対し, 以下のような運動方程式を解き, タグ X_i を収束させた (同図 (b)).

$$F_i = \sum_{j \in K \cup E} k(l_{i,j} - |X_i - X_j|) \frac{X_i - X_j}{|X_i - X_j|} = m\ddot{X}_i + c\dot{X}_i \quad (6)$$

(a) Optimization by static equilibrium

(b) solving by dynamics simulation

Fig. 7 Statics model for optimization of tag position

ここで, m はタグの仮想的な質量, k はバネ定数, c は粘性摩擦係数である.

2.3.3 未知のタグ間の距離が得られた場合 未知のタグ $x, y \notin K \cup E$ 間の距離 $\bar{D}_{xy}$ が得られた場合, タグ位置の推定は行わない. この $\bar{D}_{xy}$ は保存しておき, 後にタグ x もしくは y の位置が 2.3.1 節の方法で既知になるまで待ち, その時に未知の方のタグの位置推定に使う.

3. シミュレーションと実機による検証

3.1 シミュレーション条件 提案手法を検証するため, シミュレーションシステムを構築した. 図 8 に部屋のモデルを示す. 12 畳 (19.44m²) の部屋の中にタグを 30cm 間隔で 216 個配置している. 原理上この配置はランダムでもかまわないが, 真値とのずれやその傾向を容易に知る目的で格子状としている.

Fig. 8 Tag layout for simulation

ロボットの動きは文献⁽¹⁰⁾を参考に 0.3m/s の散策動作とした. 図 9 は軌跡の一例である. また同文献に従い, 一回の清掃作業でロボットが進む道程は 900m とした. 一方, タグ読取り周期 T や, タグの応答半径 R は実機に合わせ $T = 0.1s$, $R = 91.5mm$ とした.

Fig. 9 Sample of robot's trajectory

Fig. 10 Initial layout of already-known tags

3.2 シミュレーション結果 実験は図 10 に示す 2 つの初期状態で行った。図 (a) は部屋の各角に、(b) は部屋の角の畳一枚分の上に位置既知のタグを配置したものである。この部屋を一回清掃 (900m 散策) した時の結果を図 11 に示す。この図は隣接するタグを直線で結んで表示しており、各交点がタグ推定位置となっている。タグは等間隔に配置されているため、推定誤差は格子の歪みとなって現れる。既知のタグを含むテーブルとしての誤差 (真値との距離) の平均、最大及び標準偏差は (a) が 5.86mm, 76.26mm, 6.20mm, (b) が 15.85mm, 43.54mm, 8.35mm であった。これより既知のタグを広い範囲に配置した (a) の方が精度が良いことが分かる。また、狭い範囲に密集して配置した (b) でも、かなりの精度でタグ位置を推定できており、特に既知のタグから一回の直進で到達できない部屋の左上側や右中央側部分の下隅領域のタグも計測されていることが分かる。この (b) の結果は、タグを設置したマットを用意し、それを部屋の角に一時的に置くことで、環境内のタグの位置を計測することが可能なことを示している。

ところで、タグの位置推定は一回の清掃作業 (900m) で終える必要は無い。毎日の清掃作業を通じてタグ間距離を蓄積し、推定することもできる。そこで散策距離と、得られた参照テーブルの大きさ、および参照テ

(a) Result on Fig. 10 (a) condition

(b) Result on Fig. 10 (b) condition

Fig. 11 Obtained lookup table by simulation

ブルの平均誤差の関係を調べた。シミュレーションを 5 回行って得た参照テーブル 5 個の平均、最大、最小を図 12 示す。この関係は部屋の広さに依存するが、図 8 に示した部屋では、およそ 1800m、2 回の清掃で収束することが分かる。また (a) の配置に比べ (b) は、参照テーブルのバラツキが大きいことも見て取れる。これは、散策距離をさらに伸ばすと改善される考えられるが、運用上は、タグ設置マット以外に数個のタグを遠隔地に配置した方が効果的と思われる。

3.3 誤差モデルの導入 前節では、ロボット自体の距離計測や直進性は誤差が無いと仮定していた。しかし実際は、床のうねりやロボットの寸法誤差等により、ロボットの直進性や計測距離には誤差が含まれると予想される。これらの誤差がタグ埋設位置推定にどのような影響を与えるか調べるため、ロボットにタイヤ径を起因とした誤差モデルを導入し、図 10 (a) を初期状態として、散策距離 1800m でシミュレーションを行った。

直進性誤差は、左右のタイヤ径のズレによって一定の曲率 R で前進すると仮定した。軌道の一例を図 13 に示す。得られた参照テーブルの平均誤差と曲率との

(a) on Fig. 10 (a) condition

(b) on Fig. 10 (b) condition

Fig. 12 Relation between nomadizing distance of robot and tag localization

Fig. 13 Sample of robot's trajectory with curvature=0.1

関係を図 14 に示す。これより、曲率が $0.1(1/m)$ 以下では、ほとんど影響が無いことが分かる。安価なロボットでも、左右の駆動輪に搭載されているエンコーダとキャリブレーションによって、 $0.1(1/m)$ も誤差が

Fig. 14 Relation between tag localization and curvature of robot trajectory

Fig. 15 Relation between tag localization and measurement error factor of distance

発生することはない、直進誤差の影響は無いと言える。ただし、この結果も部屋の広さに依存するため、部屋が十分に広いと、この曲率が問題になる可能性はある。これは、ある値以上のタグ間距離を無視する処理をすることで改善できる。

距離計測誤差は、両輪のタイヤ径が設計値と異なると仮定した。実際の前進距離 L に対し、計測距離が kL となった時の参照テーブルの平均誤差と k の関係を図 15 に示す。図のように計測距離のズレは位置推定誤差に大きな影響を及ぼす。しかし、散策を通じ位置既知のタグ同士の距離 $\bar{D}_{mn}$ も得られるため、

$$k' = \frac{\bar{D}_{mn}}{|\mathbf{X}_m - \mathbf{X}_n|} \quad (7)$$

のように、リアルタイムに校正値を得ることができる。実際にこの手法を用いて校正を行うと常に $k = 1$ と同程度の精度が得られるようになった。

なおここまでの議論では、タグの応答範囲はタグを中心とした円形になっていると仮定していた。しかし実際は環境中の金属の影響を受け、タグを中心としな

Fig. 16 Wheelchair robot

い非円形な応答範囲になることも考えられる。この場合、2.2 節で述べたタグ間距離の計測に誤差が生じ、タグの推定位置は、埋設位置でなく応答範囲の重心になる。ここでタグの位置推定の目的は自己位置推定用の参照テーブルを作ることである。参照テーブルを利用するロボットにとっては、タグの埋設位置より、応答範囲の重心を得た方が都合が良い可能性もある。ただしこの可能性は、個々のロボットに搭載されたリーダの性能差による応答範囲の重心の違いや、初めに埋設した位置既知のタグが非円形の応答範囲を持つ場合などを考慮すると、常に成り立つわけではない。

3.4 実機による検証 図 16 に示す車椅子型ロボットを用いて参照テーブルの構築実験を行った。このロボットは前面にレーザレンジセンサが搭載されており、壁との近接を検知することができる。また左右の駆動輪に取り付けられたエンコードで進行距離を 0.014mm の分解能で得ることができる。広さ $3.5 \times 3\text{m}$ の中に 250mm 間隔でタグを埋設した部屋で、タグの位置推定を行った。ただし、ロボットの大きさや安全を考慮し、壁との距離に余裕を持たせ部屋の中央 $2.25 \times 1.5\text{m}$ にある 70 個のタグのみ用いた。

2222 回の散策動作（道程およそ 5000m）を通じタグの位置推定を行った。四隅の 16 個のタグ位置を与えた時に得られた参照テーブルを図 17 に示す。図に示すように、部屋の中央部分ではほぼ格子状に正しいタグ位置が推定されている。一方車椅子ロボットが回転する壁際では誤差が大きくなっている。平均誤差と最大誤差はそれぞれ 18.1mm, 105.0mm であった。これより実機でも大まかな位置推定ができることが分かる。図 17 の中央部と周辺部とで明かな誤差の違いが見て取れることから、誤差の原因は、タグの応答半径のバラツキに起因する測定距離に対する誤差よりも、金属等の構造物の影響やロボットの動作の影響が大きいと考えられる。影響を与える要因として、床下の配管等の金属の影響で応答範囲の中心と埋設位置がずれたタグがあったこと、厚いパイルのカーペット上で実

Fig. 17 Experimental result of tag localization by using a wheelchair robot

験を行ったためタイヤにすべりが生じたこと、回転後にロボットの前輪が進行方向を向かないまま前進し蛇行したことなどが挙げられる。

今回の実験では、ほぼ様な床環境にタグを設置し実機の実験を行ったが、より広い環境ではタグの応答半径のバラツキが誤差の原因として大きく占める可能性もある。これについては、応答範囲の異なる複数種のタグを用いた実験を行うことで、検証可能と考えられる。

4. 移動ロボットの位置推定による検証

4.1 位置推定アルゴリズム 前章で得られた参照テーブルは一定の誤差が含まれる。そこで、1 章のシナリオ iii. の移動ロボットが誤差を含む参照テーブルを用いて位置推定を行うと、自己推定位置にどの程度の誤差が生じるか調べた。

Fig. 18 Self-Localization method using a rotary tag reader proposed by T.Asakawa ⁽⁶⁾.

1 章で述べたように、タグシステムを用いた位置推定は様々な手法が検討されている。ここでは浅川ら ⁽⁶⁾ が用いた回転式アンテナ（リーダ）を用いる手法を採用する。この手法は、2.2 節で述べたようにタグ ID の

Fig. 19 Geometric localization using tag directions

読取れる範囲がタグを中心とした円状になっていることを利用し、図 18 (a) のようにリーダを円運動させ、タグが読取れ出した角度 θ_r と読取れなくなった角度 θ_l を二等分する方角 θ にタグがあると考えられるものである。浅川らは正三角形にタグを配置し、三つのタグの方角 $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ から余弦定理とニュートン法を用いて自己位置を得ていた (同図 (b))。しかし本論文では、第三者が埋設したタグを利用するため、タグが正三角形に配置されていることは期待できない。そこで、図 19 のようにタグ A, B, C の推定位置を点 A, B, C, リーダの回転中心 (自己位置) を点 P とし、幾何学的に点 P の位置を得た。

まず、タグ A, B の計測角度を θ_a, θ_b とし、 $\theta_{ab} = \theta_a - \theta_b$ を定義する (ただし $0 < \theta_{ab} < \pi$)。円周角の定理により、点 P は $\angle AOB = 2\theta_{ab}$, $|AO| = |BO| = R_{ab}$ を満たす点 O を中心とする半径 R_{ab} の円周上に存在する。この 2 つの条件を満たす点は平面上に 2 点存在するが、 $0 < \theta_{ab} < \pi$ より点 O は一つに定まる。この点の座標 O_{ab} と円の半径 R_{ab} は、タグ A, B の座標 X_a, X_b を用いて以下のように表すことができる。

$$O_{ab} = \frac{1}{2} \left\{ X_b + X_a + \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \frac{X_b - X_a}{\tan \theta_{ab}} \right\} \quad (8)$$

$$R_{ab} = |O_{ab} - X_a| = |O_{ab} - X_b| \quad (9)$$

これより点 P, A, B を円周上に持つ円を得ることができる。同様にタグ C (点 C) を用いて点 P, C, A を円周上に持つ円を得ることができる。この二つの円の交点は P と A である。点 A の座標は既知のため、点 P の座標 P を得ることができる。

ただし、式 (8) より θ_{ab} が 0 や π に近いと数値誤差の影響が無視できなくなる。そこでタグ AB と AC の組合せの他に、AB と BC, AC と BC の組合せ 3 通りに対し $\theta_{ab}, \theta_{ac}, \theta_{bc}$ が $5 \sim 175^\circ$ の時に限り点 P の座標を計算し、それらの平均を取ることとした。また、リーダの円運動によって 3 個以上のタグが発見された

Fig. 20 Simulation condition of self-localization: lookup table and robot's trajectory

場合は、3 個を取り出す組合せすべてに対して同様に点 P の位置を求め、すべての平均を推定位置とした。

一方、ロボットが向いている方向 (方位) ϕ は、得られた自己位置 $P = (x_p, y_p)^T$ とタグの位置 $X_a = (x_a, y_a)^T$ 、およびそのタグの観測角度 θ_a を用いて、

$$\phi = \tan^{-1} \frac{y_p - y_a}{x_p - x_a} - \theta_a \quad (10)$$

を解いて得た。今回は発見されたタグすべてに対して方位を算出し、その平均を推定方位とした。

4.2 位置推定結果 回転式リーダによる自己推定位置は、タグの読取り周期とロボットの移動速度やリーダの回転速度の係数に依存する。また、リーダ角の分解能や回転半径の影響も受ける。しかし、ここではこれらを理想的な状態と扱い、シミュレーションで自己位置推定能力を検証した。

シミュレーションは、リーダの回転半径を 400mm, タグの応答半径を 90mm と仮定し、以下のように行った。

1. タグの埋設位置の真値を用い、ロボットの現在位置から半径 310 ~ 490mm のドーナツ状の領域にタグが存在していると、そのタグが読取れたとする。
2. 読取れたタグの検出角を真値を用いて幾何学的に求める。
3. 得られた複数のタグの検出角と参照テーブルから、前節の手法を用いて位置と方位の推定を行う。

一方ロボットは

$$(850 \cos t + 1350, 2200 \sin t + 2700)^T \quad (11)$$

で表される楕円軌道を常に接線方向を向くよう移動させた。 $t = 1^\circ$ 毎に、図 12 (a) で得た距離 1800m の時の結果を参照テーブルに用いて自己位置推定を行った。

Fig. 21 Simulation result of self-localization by using rotary tag reader

参照テーブル (平均誤差 4.16mm, 最大誤差 16.02mm, 標準偏差 2.81mm) とロボットの軌跡を図 20 に示す。

真値と推定値に対し, 位置は距離で, 角度は差を用いて比較した結果を図 21 に示す。図のように誤差が含まれる参照テーブルを用いても, 推定位置は 10mm 以内, 推定方位は 1° 以内で自己位置推定することができた。これは, 移動ロボットの自己位置推定において十分な精度である。なお, 真値を参照テーブルに使った時の自己位置推定の結果は, 位置・角度共に常に 0 であった。

5. ま と め

環境内に埋設された配置不明のタグを位置推定する手法として, 自己位置推定機能の無い散策型ロボットを用いる方法を提案した。この手法は, 事前に知識として少数のタグの埋設位置を与え, 散策でタグ間距離を収集し, 埋設位置推定を行うものである。シミュレーション実験を行い, 本手法は平均誤差 5mm 以内でタグの位置推定ができることを示した。また, 計測ロボットの走行距離やロボットの走行誤差と, 得られるテーブルの精度の関係を明らかにした。本手法を実ロボットでも検証し, 平均誤差 18.1mm の性能が確認された。

さらに, 得られた参照テーブルを用いて, 移動ロボットの自己位置推定シミュレーションを行った結果, 位置精度 10mm 以内, 方位精度 1° 以内と実用上十分な精度が得られることを確認した。

謝 辞

本研究は文部科学省の平成 17 年度科学技術振興調整費による「科学技術連携施策群の効率的・効果的な推進」の一環として実施したものです。

文 献

- (1) Siio, I., *User Position Detection using RFID Tags*, "Information Processing Society of Japan" (ISSN:09196072), Vol.2000, No.19, (2000), pp.45-50
- (2) D.Hähnel et al., *Mapping and localization with RFID technology*, "In Proc. of the 2004 IEEE Int. Conf on Robotics & Automation", (2004) pp.1015-1020
- (3) Tsukiyama, T., *Navigation system for mobile robots using RFID tags*. "In Proc. of the 11th Int. Conf. on Advanced Robotics", (2003) pp.1130-1135
- (4) Yoshidome, T., et al, *Measurement of Location and Direction Using IC Tags Applying to Indoor Navigation*, "Proc. of the 2006 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics", (2006), 2P2-A22
- (5) Kashi, T., et al, *Autonomous Trajectory Control Using RFID Landmark*, "Proc. of the 2006 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics", (2006), 2P2-E07
- (6) Asakawa, T. et al., *A Detection System of Location and Direction Angle by a RF Tag Reader Using a Rotary Antenna*, "Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers", Series C, Vol.73, No.729, (2007), pp.222-228
- (7) Senta, Y. et al., *Self-Localization for mobile robot using RFID tags without layout information* "Jurnal of the Institute of Electrical Engineers of Japan", Vol.128-C, No.7 (2008), pp.1212-1221
- (8) Senta, Y et al., *Machine Learning Approach to Self-Localization of Mobile Robots using RFID Tag*, "Proc. of IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics", No. 136, (2007)
- (9) Takarabe, S. et al., *Self-Localization for Wheelchair robots using RFID Tags without Layout Information*, "The 25th SICE Kyushu Branch Annual Conference", 102B4, (2006), pp.77-80
- (10) Hada, Y. et al., *Evaluation of Sweeping Performance of Commercial Home Cleaning Robot*, "The 24th Annual Conference of the Robotics Society of Japan", (2006), 3E11