

(17) 音響反射を利用した屋内土木作業環境における 移動ロボットの自己位置推定法

土屋 充志¹・水谷 孝一²・若槻 尚斗³・海老原 格³

¹ 学生会員 筑波大学 大学院理工情報生命学術院 システム情報工学研究群 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: tsuchiya@aclab.esys.tsukuba.ac.jp

² 正会員 筑波大学 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: mizutani@iit.tsukuba.ac.jp

³ 非会員 筑波大学 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

本論文では全周放射型スピーカーによる反射音の到来時間とロボットの移動速度から自己位置を推定する手法を提案する。音響センサーによる Time-of-flight 計測で得た反射経路の距離とロボットの移動速度、1 ステップ前に推定された自己位置を入力とし、拡張カルマンフィルターをもちいることで現在の自己位置を推定するアルゴリズムを構築した。この仕組みは反射経路のモデルに二次までの反射を想定することで、一回の測定から得られる情報量を最大限活用する点にある。提案手法をシミュレーション環境内で実装し、提案手法の精度を評価した。また、距離計測におけるの誤差の標準偏差が 0.3 m 程度であれば自己位置の誤差は最大で 0.1 m 程度であり実際の環境においても十分利用可能な精度が確認できた。

Key Words: omnidirectional loudspeaker, self-localization, robot, Kalman Filter

1. 序論

近年の日本の社会インフラの老朽化に伴い、社会インフラ用ロボットの開発、導入が推進されている¹⁾。特にトンネルや地下での作業は労働者に大きな負担となりロボットなどによる作業軽減や効率化が求められる。土木作業にロボットを導入するには特定の空間でロボットが自己位置を把握する能力が不可欠である。ロボットの自己位置推定には様々なセンサーやアルゴリズムが提案されているが土木環境特有の大きな問題が二つあり、それらは解決されていない。一つは GPS の信号が利用できないことである。多くの場合は GPS 信号を利用し自己位置推定を行うがトンネルや地下、室内など作業現場において必ずしも GPS の電波を利用できるとは限らない。GPS を利用せずに自己位置推定を行う手法として電波や音を発する送信機もしくはそれらを受信できる受信機を環境に設置し、それらが通信を行うことで自己位置を推定する手法がある^{2~4)}。この手法はあらかじめ環境に装置を設置する必要があり土木作業のような常に構造が変化する場合、その都度設置しなおす必要がある。通常の建築作業をしながらビーコンの設置作業に加え、その情報をロボットに教示するのは作業

者の工数を増加させるため土木環境に適した手法ではない。もう一つの問題点として施工状況によっては粉塵などが非常に多く存在することである。自己位置推定に用いる代表的なセンサーとして光の到来時間を用いる Light detection and ranging (LiDAR) がある⁵⁾。このセンサーは広範囲の距離を高い精度で計測できることから屋内や屋外で広く使われている。しかし、霧や粉塵などが存在すると光が拡散するためセンサーの測定精度が悪化する。トンネルや地下での作業では粉塵が多く発生し屋内に充満した環境になるため LiDAR のみの計測手法では不安定である。このような状況において音を利用した手法は効果的と考えられ、現存するセンサーやシステムの補助的な役割として有効と考えられる。現在、ロボットに設置のみで利用が可能な全方位スピーカーを利用した測距センサーと推定手法が提案されている⁶⁾。このセンサーは単一のスピーカーとマイクロフォンのみで全方位の距離を測定することができる。しかし、位置を単一に特定するには至っておらず改良の余地が必要であった。本研究ではこのセンサーを利用し、さらにロボットの移動速度を組み合わせた自己位置推定のアルゴリズムを提案する。

2. 原理

本システムは図-1 に示すような屋内土木作業環境で自己位置推定を行うロボットを想定する。図-2 に示すようにロボットの車輪に搭載されたロータリーエンコーダーから得られる移動速度 v, ϕ と全周放射型スピーカーとマイクロフォンによる Time-of-flight 計測から得られた全方位の距離情報 d をもとにロボットの自己位置 x, y, ϕ の推定を行う。自己位置の推定は音響的な反射パスの予測、自己位置の予測と自己位置の推定を繰り返すことで逐次的に行われるシステムである。この予測と推定にロボットはあらかじめ作成したロボットの動的モデルと音響センサーの観測モデルを参照することになる。以下でロボットの動的モデルと音響センサーの観測モデルについて詳細を述べる。

(1) ロボットの動的モデル

まずは、ロボットの動的モデルを示す。ロボットは差動二輪駆動であり、式(1)のように表される。

$$\alpha_{n+1} = f(\alpha_n) + \epsilon, \quad (1)$$

$$f(\alpha_n) = \begin{bmatrix} x_n + v_n \Delta t \cos(\phi_n) \\ y_n + v_n \Delta t \sin(\phi_n) \\ \phi_n + \Delta t \phi_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\alpha_n = [x_n \ y_n \ \phi_n]^T, \quad (3)$$

$$\epsilon = [\epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_\phi]^T, \quad (4)$$

ϵ_n は状態変数 α_n に対するモデル誤差である。 Δt は計測周期、 n は離散時間ステップである。

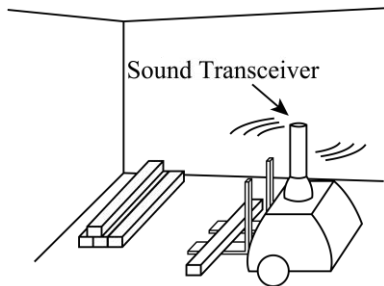


図-1 屋内土木環境でロボットが動作する様子

(2) 音響センサーの観測モデル

スピーカーから音を放出し、マイクロフォンに到達するまでの経路を考える。この際に床や天井で反射する経路は考慮しない。スピーカーとマイクロフォンは xy 平面において同一の座標に存在し、二次までの反射を考慮すると図-3 のように鏡像音源を考えることで経路を算出できる。全ての反射経路における距離は観測モデル

$$d_n = h(\alpha_n) + \omega, \quad (5)$$

$$h(\alpha_n) = \begin{bmatrix} |(I - R_1)S| \\ \vdots \\ |(I - R_M)S| \\ |(I - R_2 R_1)S| \\ \vdots \\ |(I - R_M R_1)S| \\ |(I - R_1 R_2)S| \\ \vdots \\ |(I - R_{M-1} R_M)S| \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_{M^2}]^T, \quad (7)$$

$$R_i = \frac{1}{a_i^2 + b_i^2} \begin{bmatrix} -(a_i^2 - b_i^2) & -2a_i b_i & -2c_i a_i \\ -2a_i b_i & a_i^2 - b_i^2 & -2b_i c_i \\ 0 & 0 & a_i^2 + b_i^2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$S = [x_n \ y_n \ 1]^T, \quad (9)$$

で表される。 I は単位行列である。 M は壁の枚数である。 ω_n は観測変数 d_n に対するモデル誤差である。 R_i は壁面 l_i に対して鏡像となる音源の座標を計算する線形変換で

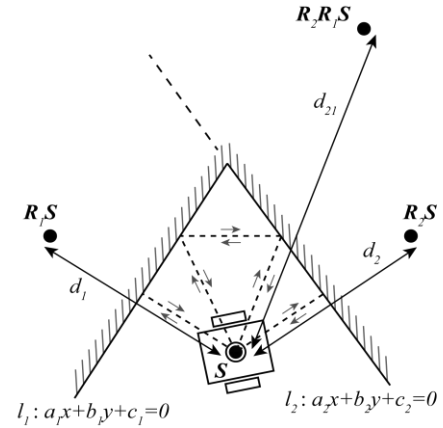


図-3 反射経路の幾何学的な外観図

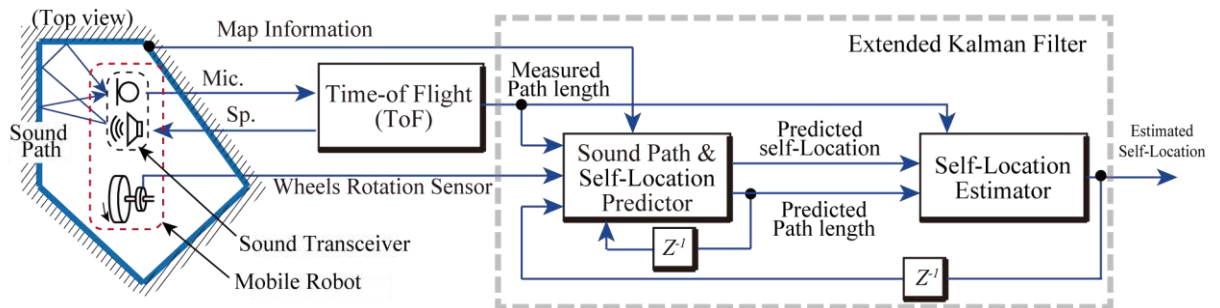


図-2 システムの概要図

ある。式(6) はすべての壁に対して二次までの反射の組み合わせを考慮したものである。しかし、実際には壁とロボットの位置関係やセンサーの測定可能距離によって、測定不可能な条件も存在する。また、センサーの測定値は距離情報のみでどの壁からの反射かを特定する情報はない。よって実際の観測値を式(5)のモデルに対してそのまま参照することは不可能である。そこで、実際の観測値に対して $\mathbf{h}(\alpha_n)$ から適切な要素を選び順序を並び替えた $\hat{\mathbf{h}}(\alpha_n)$ を考える。ここでの適切な要素とは実際の観測値 $\bar{d}_n$ と $n-1$ までの情報とモデルから予測された予測値 $d_{n|n-1}$ のL2 ノルムが最小になるような $d_{n|n-1}$ の予測に用いた $\mathbf{h}(\alpha_n)$ の要素である。なお、 $\bar{d}_n$ の要素数に対して $d_{n|n-1}$ の要素数は大きいものとする。上記の操作を式(10)に示す。

$$\mathbf{q} = \arg \min_{k_l \in \{1, 2, \dots, M^2\}} \left\{ (\bar{d}_{1n} - d_{k_{1n|n-1}})^2 + (\bar{d}_{2n} - d_{k_{2n|n-1}})^2 + \dots + (\bar{d}_{Ln} - d_{k_{Ln|n-1}})^2 \right\}, \quad (10)$$

$$\text{subject to : } k_1 \neq k_2 \neq \dots \neq k_L, \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{h}}(\alpha_n) = [h_{q_1} \ h_{q_2} \ \dots \ h_{q_L}], \quad (12)$$

$$\hat{\omega}_n = [\omega_{q_1} \ \omega_{q_2} \ \dots \ \omega_{q_L}], \quad (13)$$

L は観測された壁の枚数である。この問題は 0-1 混合整数線形計画法に帰結して解くことができる。

(3) 拡張カルマンフィルタ

式(1), (9)のモデルと式(10)の最適化を組み合わせ、自己位置を拡張カルマンフィルタによって推定する。拡張カルマンフィルタは以下の式で実装される。

$$\mathbf{F} = \left. \frac{\partial \hat{\mathbf{h}}}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=\alpha_{n|n}} \mathbf{P}_{n|n-1} \left. \frac{\partial \hat{\mathbf{h}}}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=\alpha_{n|n}}^T + \mathbf{E}, \quad (14)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}_{n|n-1} \left. \frac{\partial \hat{\mathbf{h}}}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=\alpha_{n|n}}^T + \hat{\mathbf{W}}, \quad (15)$$

$$\alpha_{n|n} = \alpha_{n|n-1} + \mathbf{K} (\bar{d}_n - \hat{\mathbf{h}}(\alpha_{n|n-1})), \quad (16)$$

$$\mathbf{P}_{n|n} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K} \left. \frac{\partial \hat{\mathbf{h}}}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=\alpha_{n|n}} \right) \mathbf{P}_{n|n-1}, \quad (17)$$

$$\alpha_{n+1|n} = \mathbf{f}(\alpha_{n|n}), \quad (18)$$

$$\mathbf{P}_{n+1|n} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=\alpha_{n|n}} \mathbf{P}_{n|n} \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=\alpha_{n|n}}^T + \mathbf{E}, \quad (19)$$

$\mathbf{E}$, $\hat{\mathbf{W}}$ は ϵ , $\hat{\omega}$ の分散共分散行列である。

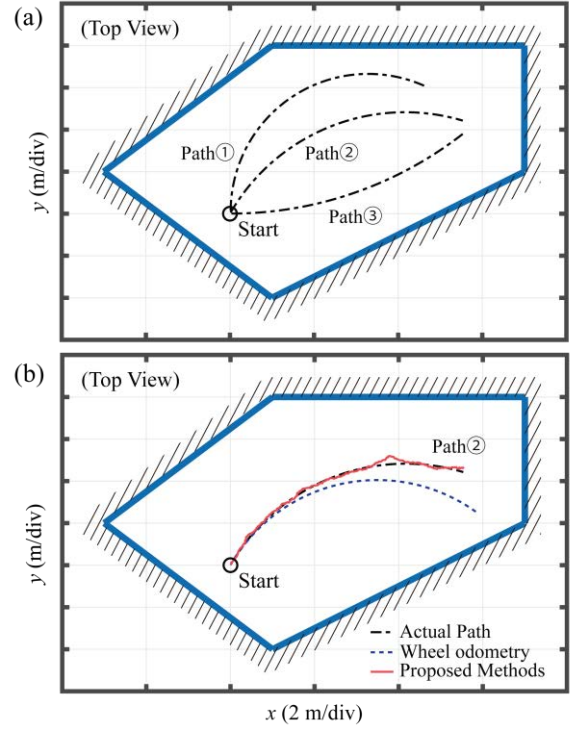


図-4 (a) シミュレーションで利用する経路, (b) Path②でのシミュレーション結果

3. シミュレーション

(1) シミュレーション条件

コンピュータ上でロボットを動作させ、その時の速度入力 v , ϕ と音響センサーから得られた距離 d から自己位置の推定を試みる。実際には車輪と床の間でスリップが生じるためロータリーエンコーダーで得た回転数には誤差が発生する。シミュレーションでは式(20), (21)によってスリップの効果を再現した。

$$\omega_R = \hat{\omega}_R - \omega_{SR} \quad (20)$$

$$\omega_L = \hat{\omega}_L - \omega_{SL} \quad (21)$$

ω_R , ω_L は右車輪と左車輪の角速度である。 $\hat{\omega}_R$, $\hat{\omega}_L$ は右車輪と左車輪の制御角速度である。 ω_{SR} , ω_{SL} は右車輪と左車輪の単位時間当たりのスリップ角である。また、音響センサーによる Time-of-flight 計測で得られた距離の誤差は正規分布 $N(0, \sigma_d^2)$ に従うと仮定する。さらに、音響センサーによる Time-of-flight 計測では音圧の減衰や信号処理における窓サイズで計測可能な距離が決定される。よって、シミュレーションでも d_{th} 以上の反射経路は測定できないものとして行う。また、図-4(a)に示したマップと経路で計算を行った。

(2) シミュレーション結果

図-4(b)にシミュレーションの結果を示す。ホイールオドメトリによって推定された経路はスリップの誤差の累積によって実際の経路からそれているのに対し、提案

表-1 反射の回数による真値との誤差(m) (ーは計算不能, それぞれ5回平均)

	モデル：一次反射				モデル：一次反射				モデル：一次反射+二次反射			
	信号：一次反射+二次反射				信号：一次反射				信号：一次反射+二次反射			
σ_a [m]	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.4
Path①	—	—	—	—	0.023	0.025	1.802	2.844	0.016	0.023	0.046	0.082
Path②	—	—	—	—	0.018	2.251	3.377	5.609	0.011	0.045	0.105	0.131
Path③	—	—	—	—	0.022	0.039	0.070	0.093	0.014	0.037	0.391	0.559

手法では実際の経路をなぞるように正しい位置を推定している. 表-1 には経路, モデルと信号に考慮した反射回数, σ_a を変更し 20 秒後の真値との距離を示した. 一次反射のみのモデルでは信号に二次反射までを含む場合, 計算を行うことができなかった. また, 信号を一次反射までに限定しても σ_a を大きくすると太字で示したような極端に大きな誤差が発生した.

(4) 考察

まず, モデルに考慮した反射の回数が一次の場合, 信号に二次までの反射を含めると途中で推定が不可能となった. これはモデルが想定した反射経路の数よりも信号に含まれる反射回数が多いことにより, 最適化の際の条件を満たさなくなることが原因である. また, 一次反射までのモデルと二次反射までのモデルでは二次反射のほうがより多くの特徴を捉えることが可能であり, より強力に位置を拘束できることが精度向上の要因であると考えられる. 二次反射までを考慮したモデルは音響センサーの距離の標準偏差が 0.4m になっても最大で 0.5m 程度の誤差に収まっており, ロボットの自己位置を推定するにあたってより実用的な精度を得ることができた.

4. 結論

本論文はトンネルや地下などの作業環境においてロボットが自己位置推定を行うことを目的とした. 上記のような環境では GPS 信号の利用不可, 粉塵などによる LiDAR の精度悪化という二点が自己位置推定における問題点である. そこで全方位スピーカーから発した音響反射の到来時間による距離計測とそれを生かした自己位置推定アルゴリズムによって解決を試みた. 自己位置推定

のアルゴリズムでは音響センサーによる Time-of-flight 計測で得た反射経路の距離とロボットの移動速度, 1 ステップ前に推定された自己位置を入力とし, 推定には拡張カルマンフィルターを利用した. この仕組みは反射経路のモデルに二次までの反射を想定することで, 一回の測定から得られる情報量を最大限活用する点にある. 提案手法をシミュレーション環境内で実装し, 提案手法が有効であること, かつ一次反射のみのモデルと比較したときにより優れた性能であることを確認した. 距離計測における誤差の標準偏差が 0.3 m 程度であれば自己位置の誤差は最大で 0.1 m 程度であり実際の環境においても十分利用可能と言える精度が確認できた.

参考文献

- 1) 国土交通省：建設ロボット技術に関する懇談会 提言【本文】，2013.
- 2) 川岸 卓司, 小木曾 里樹, 水谷 孝一, 善甫 啓一, 若槻 尚斗：立体構成マイクロフォンアレイを用いる UAV の飛行音推定, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol.40, No.55, 2015.
- 3) 川岸 卓司, 善甫 啓一, 水谷 孝一, 若槻 尚斗, 川村 洋平：直達音と地面反射音を利用する少素子ジオフォンアレイによる土中音源位置測定, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol. 69, No. 2, I_130-I_138, 2013.
- 4) S. Ogiso, T. Kawagishi, K. Mizutani, N. Wakatsuki, K. Zempo：Self-localization method for mobile robot using acoustic beacons, *ROBOMECH Journal*, Vol.2, No.12, 2015.
- 5) 今城 直人, 田尻 智紀, 樫木 幹司, 高田 洋吾：レーザレンジセンサを搭載した橋梁検査ロボットを用いた複雑環境場の立体地図作成, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.833, 2016.
- 6) A. Tsuchiya, K. Mizutani, N. Wakatsuki, T. Ebihara：Estimation of Distance to Wall Surface Using Omnidirectional Speaker, *Proceedings of the 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp.1168-1171, 2019.