

ホースの伸び縮みによるマイク位置の変化を許容する マイクロホンアレイを用いたホース型ロボットの姿勢推定

Posture Estimation of Hose-shaped Robot Using Microphone Array Localization

坂東宜昭¹
Yoshiaki Bando

大塚琢馬¹
Takuma Otsuka

糸山克寿¹
Katutoshi Itoyama

中村圭佑²
Keisuke Nakamura

昆陽雅司³
Masashi Konyo

田所諭³
Satoshi Tadokoro

中臺一博^{2,4}
Kazuhiro Nakadai

奥乃博¹
Hiroshi G. Okuno

1 京都大学 大学院情報学研究所 2 ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン
3 東北大学 大学院情報科学研究科 4 東京工業大学 大学院情報理工学研究所

Abstract

レスキューロボットの一つであるホース型ロボットは細長い形状を生かし、災害現場で人の進入が難しい狭い空間へ進入し探索できるという利点があるものの、柔軟な本体の制御、姿勢推定が難しいという課題がある。本論文ではホース型ロボットにマイクロホンアレイと小型スピーカを装着し、音の到達時間差を利用し、姿勢推定を行う。ここで、隣り合うマイクロホンと小型スピーカ間の距離は一定であると仮定すると、ホースの湾曲や伸縮により精度が低下することがある。本論文では、マイクロホンの位置と小型スピーカへの距離を同時推定する問題に取り組み、Unscented Kalman Filter を用いたオンライン推定法を開発した。モックアップロボットを用いた実録音データで姿勢推定を評価し、マイクロホンと小型スピーカ間距離を一定とした場合と比較して姿勢推定が84%抑制されることを確認した。

1 はじめに

災害現場でのレスキューロボットによる、人では探索が危険な場所や困難な場所の探索が期待されている[Akin et al., 2013]. 例えば、汚染物質や倒壊の危険が存在する建築物内の探索にはクローラ型のロボット[Nagatani et al., 2011][Birk and Pathak, 2006]や、地上からの探索が困難であれば無人飛行機型のロボット[Onosato et al., 2006]が適用されるなど、状況に応じて様々な形態のレスキューロボットが開発されている。レスキューロボットの設計開発の指針としてRobin Murphyは、アメリカでの5つの災害における9つのレスキューロボットの適応事例から

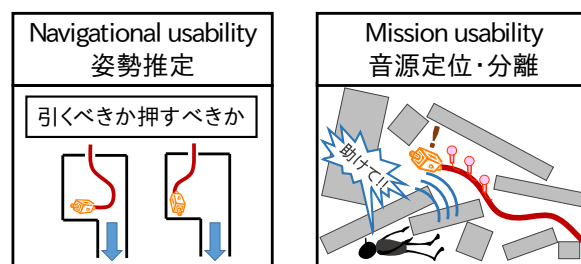


Figure 1: ホース型ロボットにマイクロホンアレイと小型スピーカを装着し、姿勢推定と音源定位・分離機能を同時に実現する。

navigational usability と mission usability が不可欠であると指摘している [Murphy, 2010]. 前者は、ロボットの航行能力についての有用性を指し、推進機構や、操縦に必要な情報収集能力の欠如が問題点である。後者は各種センサデータとリモートオペレータへの情報提供についての有用性を指し、データの統合方法、センサシステムの欠陥、オペレータへの提示方法が問題点である。

レスキューロボットの一つであるホース型ロボットは、細長く、ロボット体表と環境との接地面での摩擦を利用して推進できるため、リモートオペレータによる狭い隙間の探索が可能である。リモートオペレータは、先端のカメラから情報を収集し、手元のホースの抜き差しと先端のアクチュエータを用いて目的の方向へロボットを推進させる。例えば、タイミングベルトと小型車輪を用いた Active-Hose [Kitagawa et al., 2003]や、絨毛の振動を用いた Active Scope Camera (ASC) [Namari et al., 2012]などが報告されている。

ホース型ロボットの navigational usability と mission usability を向上させるためには以下の2つの機能 (Fig. 1) の実現が不可欠である。

1) navigational usability: 姿勢推定 ホース型ロボット

が瓦礫の隙間などに進入すると、リモートオペレータはその姿勢を視認できない。狭い隙間ではホースがたわむことがあり、押すのか引くのかわからず、ロボットの進入に支障をきたすことがある。

2) mission usability: 音源定位・分離 従来のホース型ロボットには被災者発見と位置推定のため、先端にビデオカメラと単一マイクロホンが搭載されている。瓦礫などの隙間は暗く遮蔽物が多いため、ビデオカメラのみで被災者を発見することは困難である。音は暗闇でも伝わり、また遮蔽物を回りこむため、被災者の音声を定位・分離できれば、被災者の位置や健康状態の把握が可能となり mission usability の向上に寄与する。特に音源定位にはマイクロホンの位置が必要であり、ホース型ロボットではマイクロホンの位置関係が変化するため、音源定位のためにもロボットの姿勢推定が不可欠である。遠隔地の音源方向提示による聴覚アウェアネスの有効性は、HARK [Nakadai et al., 2010] を用いたテレプレゼンスロボットの開発 [Mizumoto et al., 2011] でも指摘されている。

Navigational usability としてホース型ロボットの姿勢推定法が開発されてきたが、累積誤差の問題があった [Ishikura et al., 2012]。Ishikura らは、ロボットの姿勢を動的柔軟モデルとして表現し、加速度センサとジャイロセンサにより姿勢を推定した。また、Ishikura らは 3.0[m] の ASC を用いて、推定開始後 35[s] 時点で先端位置の誤差が 0.2[m] 程度となる姿勢推定法を実現した。この手法のセンサ情報は加速度と角速度であり、現在の姿勢は過去の姿勢との差分として得る。そのため累積誤差が蓄積し、ロボットの運用時間の増加すれば姿勢推定の誤差が増加する問題がある。

Navigational usability と mission usability としてマイクロホンアレイを用いた姿勢推定法を開発する。ホース型ロボットにマイクロホンアレイと小型スピーカを搭載する。小型スピーカから試験音を発し、マイクロホン間の到達時間差を手がかりに、ロボットの姿勢を推定する。到達時間差には、現在のマイクロホン位置と音源位置に関する情報が含まれるので累積誤差を修正できる。また、小型スピーカは被災者の呼びかけに、マイクロホンアレイは音源定位・分離に使用できる。本論文では、内界センサによる姿勢推定の欠点を補うために、3.0[m] 以上のホース型ロボットで先端位置の誤差が 0.2[m] 以下となる姿勢推定法の開発を目指す。

本論文の構成は以下のとおりである。第 2 章では音による姿勢推定法開発のために、従来法のマイクロホンアレイ位置推定法問題点を述べ、本論文の立場を明らかにする。第 3 章では音を用いたホース型ロボットの姿勢推定法について述べる。第 4 章では、モックアップロボットを用いた実録音データによる実験から本手法が従来法より誤差が強く抑制されることを確認する。第 5 章でまとめる。

2 マイクロホンアレイ位置推定の関連研究

音の到達時間差を用いた姿勢推定法の開発のため、音を用いたマイクロホン位置推定に関する従来法を概観する。

Ono ら [Ono et al., 2009] は、音源からの直接音到達時間の差から、音源位置と各マイクロホンの位置、録音開始時刻を推定する Blind Alignment 問題を定義し、補助関数法による解法を示した。この手法はオフライン処理を想定しており、ロボットの姿勢推定のような逐次的にマイクロホン位置を推定する問題には不向きである。

Miura ら [Miura et al., 2011] は、Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) に基づくオンラインマイクロホン位置推定法として、ロボット周囲を旋回しながら拍手する人のように、既知の移動モデルに従う音源を 1 つ仮定し、音源とマイクロホンの位置と録音開始時刻を同時に推定した。この手法では状態空間モデルを用いて観測に含まれる誤差を考慮している。しかし、瓦礫内で移動する音源を使うことはできず、静止音源 1 つだけでは推定できない。

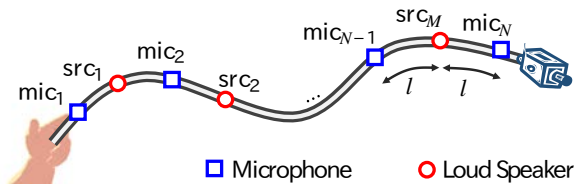
我々はこれまで、複数の小型スピーカをホース上に装着し、ホースの形状制約を用いた状態空間モデルを用いて、スピーカから再生する試験音の到達時間差を手がかりとしたオンライン姿勢推定法を開発してきた [Bando et al., 2013]。しかし、この手法は隣り合うマイクロホンと小型スピーカ間の距離は一定であると仮定し、ホースの湾曲や伸縮により精度が低下することがあった。本論文では、マイクロホンと小型スピーカ間距離を状態変数に追加し、姿勢と同時にオンライン推定する。

3 音によるホース型ロボットの姿勢推定

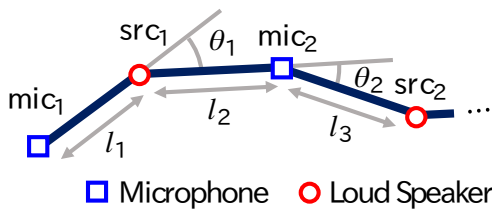
Figure 2(a) に提案法でのマイクロホンと小型スピーカの配置を示す。マイクロホンと小型スピーカは交互にホース上で等間隔 l だけ離して配置する。各マイクロホンと小型スピーカをそれぞれ、手元から順に $\text{mic}_1, \text{src}_1, \dots, \text{src}_N, \text{mic}_M$ とする。ただし、 M, N はそれぞれマイクロホンと小型スピーカの個数を表し、 $N = M - 1$ である。本論文ではロボットの姿勢は二次元平面上での曲線で表現されるとし、 $\text{mic}_i, \text{src}_j$ の各座標は、 $\mathbf{x}_{\text{mic}_i}, \mathbf{x}_{\text{src}_j} \in \mathbb{R}^2$ とする。Table 1 に本論文で使用する記号の意味を列挙する

以下に本論文が扱う問題設定を述べる。

- | | |
|----|---|
| 入力 | 試験音 $H(\omega)$ を録音した M チャンネル同期音響信号 $\{S_{\text{mic}_1}(\omega), \dots, S_{\text{mic}_M}(\omega)\}$ |
| 出力 | ロボット姿勢 $\mathbf{x}_{\text{mic}_i}, \mathbf{x}_{\text{src}_j}$ |
| 仮定 | (1) 推定中ロボットは静止。
(2) 再生スピーカの番号 j は既知。
(3) $\mathbf{x}_{\text{mic}_1}$ と $\mathbf{x}_{\text{src}_1}$ は既知。 |



(a) マイクロホンとスピーカの配置



(b) 姿勢モデル

Figure 2: ホース型ロボットのマイクロホンと小型スピーカの配置, および, 姿勢モデル.

Algorithm 1 マイク位置の逐次推定

```

for  $j = 1 \rightarrow N$  do
    試験音  $H(\omega)$  を小型スピーカ  $\text{src}_j$  から再生
     $M$  チャンネルマイクロホンアレイで録音
    試験音の到達時間差  $\tau_{\text{mic}_{i_1} \rightarrow \text{mic}_{i_2}}^{\text{src}_j}$  を計算
     $\tau_{\text{mic}_{i_1} \rightarrow \text{mic}_{i_2}}^{\text{src}_j}$  を UKF に入力
    事後確率最大となるように姿勢  $\xi_k$  を更新
end for

```

入力は到達時間差を得るために使用される．ここで，試験音とは到達時間差推定のために小型スピーカで再生する源信号である．出力は，マイクロホンと小型スピーカの二次元座標であり，仮定 (1) は問題の簡単化のために設定する．仮定 (2) により，複数の小型スピーカを同じ小型スピーカと混同しない．仮定 (3) により，推定姿勢の回転と平行移動が制限される．

3.1 手法概要: マイクロホン位置のオンライン推定

提案法では，ホース型ロボットの姿勢を音の到達時間差を手がかりとし，Unscented Kalman Filter (UKF) [Julier et al., 1997] を用いて推定する．本オンライン推定法では Algorithm 1 に示すように，1) 各小型スピーカから順に試験音を再生し，2) 試験音の各マイクへの到達時間差を推定し，3) 得られた到達時間差から 3.3 節で述べる姿勢モデルの事後確率が最大となるように姿勢を更新する．以降では試験音の各マイクへの到達時間差推定法，姿勢を表す状態空間モデルについて述べる．

3.2 到達時間差推定

ホース型ロボットの試験音の到達時間差推定の課題は以下の 3 つである．

1. 外部雑音の対処: 実環境では試験音以外に常に雑音が存在する．

Table 1: 記号の定義

記号	意味
M	マイクロホンの数
N	小型スピーカの数 ($N = M - 1$)
C	音速
l	ホース上のマイクロホンと小型スピーカの間隔
ω	周波数
k	観測回数
mic_i	i 番目のマイクロホン ($1 \leq i \leq M$)
src_j	j 番目の小型スピーカ ($1 \leq j \leq N$)
$\mathbf{x}_{\text{mic}_i}$	mic_i の座標 (\mathbb{R}^2)
$\mathbf{x}_{\text{src}_j}$	src_j の座標 (\mathbb{R}^2)
ξ_k	k 回目の観測時の姿勢 ($\mathbb{R}^{2(M+N)-3}$)
$\theta_{m,k}$	各頂点の角度 ($\theta_m \in \mathbb{R}, 1 \leq m \leq N + M - 2$)
$l_{n,k}$	各頂点間距離 ($l_n \in \mathbb{R}, 1 \leq n \leq M + N - 1$)
\mathbf{y}_k^j	j 番目の小型スピーカ再生時の観測 ($\mathbb{R}^{(N^2+N)/2+M-1}$)
$H(\omega)$	試験音の音響信号
S_{mic_i}	mic_i で観測した音響信号

2. 残響・反射の対処: ホース型ロボットが進入する狭い空間は試験音の残響や反射が発生する．
3. 直接音が取れない場合の対処: ロボットが湾曲した通路を進入したとき，マイクロホンと小型スピーカを結ぶ直線上に障害物が存在すると直接音の到達時間差が得られない．

特に 1, 2) はどのような室内でも起こりうるため，先に解決する必要がある．提案法では，外部雑音と残響・反射への対応のために，それぞれ以下の方法で解決する．

1. 外部雑音の対処: 試験音に信号対雑音比が高い Time Stretched Pulse (TSP) [Suzuki et al., 1995] を試験音として用いる．自己相関が小さく，エネルギーの大きい試験音を利用すると，到達時間差計測の上でノイズの影響を受けづらい．Miura らのマイク位置推定 [Miura et al., 2011] では，拍手の到達時間差を計測していたが，拍手などのインパルス音は自己相関が小さい．しかし，小型スピーカではインパルス音を大きなエネルギーで再生することが困難である．TSP はインパルスのエネルギーを時間で分散させた信号で，小型スピーカでもエネルギーを確保できる．長さ L の TSP は以下で定義される

$$H(\omega) = \begin{cases} \exp(j2\pi\omega^2/L^2), & 0 \leq \omega \leq L/2 \\ H(L - \omega), & L/2 \leq \omega \leq L \end{cases}$$

2. 残響と反射の対処: 残響に頑健な到達時間差推定法である GCC-PHAT [Zhang et al., 2008] を使用し，直接音のピークを抽出する．各チャンネルごとに TSP と相関係数を計算し，反射音のピークは直接音より後になるので，閾値以上となるピークの内最初に出現するピークを直接音の

ピークとして抽出する． $\text{mic}_{i_1}, \text{mic}_{i_2}$ 間の試験音 $H(\omega)$ の到達時間差 $\tau_{\text{mic}_{i_1} \rightarrow i_2}^{\text{src}_j}$ は録音信号 $S_{\text{mic}_{i_1}}(\omega), S_{\text{mic}_{i_2}}(\omega)$ から次のように計算する．まず， $S_{\text{mic}_{i_1}}(\omega)$ および， $S_{\text{mic}_{i_2}}(\omega)$ と $H(\omega)$ 間の時間ずれ τ における相関係数を計算する．

$$R_{\text{mic}_{i_1}}(\tau) = \int \frac{G_{\text{mic}_{i_1}}(\omega)}{|G_{\text{mic}_{i_1}}(\omega)|} e^{j2\pi\omega\tau} d\omega$$

$$R_{\text{mic}_{i_2}}(\tau) = \int \frac{G_{\text{mic}_{i_2}}(\omega)}{|G_{\text{mic}_{i_2}}(\omega)|} e^{j2\pi\omega\tau} d\omega$$

ここで， $G_{\text{mic}_{i_1}}(\omega), G_{\text{mic}_{i_2}}(\omega)$ はそれぞれ， $H(\omega)$ と $S_{\text{mic}_{i_1}}, S_{\text{mic}_{i_2}}$ とのクロススペクトルである．次に，閾値を超える相関係数のうち最初のピークとなる τ を選択し， $\text{mic}_{i_1}, \text{mic}_{i_2}$ 間のピークの差を計算して到達時間差を得る．

3.3 姿勢の定式化

Figure 2(b) にホースの姿勢モデルを示す．ロボットの姿勢は，マイクロホンと小型スピーカを頂点とする区分線形曲線により近似する．ホースの姿勢を表す状態変数 ξ_k は，各頂点の角度 $\theta_{m,k}$ ($1 \leq m \leq M+N-2$) と隣り合うマイクロホンと小型スピーカ間の距離 $l_{n,k}$ ($1 \leq n \leq M+N-1$) からなる $2(M+N)-3$ 次元ベクトルである

$$\xi_k = \begin{bmatrix} [\theta_{1,k}, \theta_{2,k}, \dots, \theta_{N+M-2,k}]^T \\ [l_{1,k}, l_{2,k}, \dots, l_{N+M-1,k}]^T \end{bmatrix}.$$

各マイクロホンと小型スピーカの座標は手元側のマイクロホンとスピーカの座標 $\mathbf{x}_{\text{mic}_1}, \mathbf{x}_{\text{src}_1}$ を用いて再帰的に計算される

$$\mathbf{x}_{\text{mic}_{i,k}} = \mathbf{x}_{2 \times i, k}^*, \quad \mathbf{x}_{\text{src}_{j,k}} = \mathbf{x}_{2 \times j+1, k}^*$$

$$\mathbf{x}_{i,k}^* = \mathbf{x}_{i-1, k}^* + l_{i,k} \times [\cos(\theta_{i,k}^*), \sin(\theta_{i,k}^*)]$$

$$\theta_{i,k}^* = \sum_{m=1}^{i-1} \theta_{m,k}, \quad \mathbf{x}_{2,k}^* = \mathbf{x}_{\text{src}_{1,k}}, \quad \mathbf{x}_{1,k}^* = \mathbf{x}_{\text{mic}_{1,k}}.$$

状態遷移モデル 状態遷移はランダムウォークで表現する

$$p(\xi_k | \xi_{k-1}) \sim \mathcal{N}(\xi_k - \xi_{k-1}, \mathbf{Q})$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_{q_\theta}^2 \mathbf{I}_{M+N-2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sigma_{q_l}^2 \mathbf{I}_{M+N-1} \end{bmatrix}.$$

ただし， $\sigma_{q_\theta}, \sigma_{q_l}$ はランダムウォークの標準偏差を表す．

観測モデル 観測変数 $\mathbf{y}_t^j \in \mathbb{R}^{(N^2+N)/2+M-1}$ は (1) j 番目の小型スピーカが再生時の到達時間差と (2) 隣接するマイクロホンと小型スピーカ間の距離 l_n ($1 \leq M+N-1$) とする．本モデルでは l_n が可変となるので，各頂点は 2 次元平面上で自由な位置を取りうる．観測として l_n を与え l_n の存在範囲に制限を加えることで，推定値の発散を抑制する．姿勢推定時に正解の l_n は得られないので，ホース上の配置間隔 l を観測値として推定する．

$$p(\mathbf{y}_k^j | \xi_k) = \mathcal{N}(g(\xi_k), \mathbf{R}_k)$$

$$g(\xi_k) = \begin{bmatrix} \left[\tau_{\text{mic}_{i_1} \rightarrow i_2}^{\text{src}_j} = \frac{D_k^{i_2, j} - D_k^{i_1, j}}{C} \mid \begin{array}{l} i_1 = 1, \dots, N \\ i_2 = i_1 + 1, \dots, N \end{array} \right]^T \\ [l_n \mid n = 1, \dots, M+N-2]^T \end{bmatrix}$$

$$D_k^{i,j} = |\mathbf{x}_{\text{mic}_i} - \mathbf{x}_{\text{src}_j}|$$

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} \sigma_{r_\tau}^2 \mathbf{I}_{(N^2-N)/2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \text{diag}(\sigma_{r_{l_1, k}}^2, \dots, \sigma_{r_{l_{M+N-1}, k}}^2) \end{bmatrix}$$

ここで， C は音速を表し， v_k は観測誤差を表す確率変数である． v_k のうちマイクロホン・小型スピーカ間距離 l_n の分散 σ_{l_n} は姿勢が大きく曲がりくねるほど大きな分散をもつと考えられるので以下のように与える

$$\sigma_{r_{l_n, k}} = a \times \frac{|\theta_{n,k}| + |\theta_{n+1,k}|}{2} + b.$$

4 姿勢推定精度の評価実験

実験ではモックアップロボットによる実録音を用いて提案手法と，従来手法としてマイクロホン・小型スピーカ間距離が一定の手法[Bando et al., 2013]との比較を行う．

4.1 モックアップロボットの仕様

ホースにマイクロホンと小型スピーカだけを装着した推進機能のないモックアップを構築した．本体のホースはポリプロピレン製のコルゲートチューブ (内径 15[mm]) である．表面には $l = 0.25$ [m] 間隔で，小型スピーカとマイクロホンを交互に配置した．小型スピーカには，直径 20[mm] の磁気小型スピーカを用いた (Fig. 4(a))．マイクロホンには，デジタル MEMS マイク (12[mm]×12[mm])，Fig. 4(b)) を使用した．マイクロホンの数 M は $M = 8$ ，両端のマイクロホン間のホースの長さは 3.5[m] である．

4.2 実験設定

Figure 4(c) のように，実験は高さ約 1[m] の壁を設置した実験室に，モックアップを配置して行った．実験室の残響時間 (RT_{60}) は 800[ms] である．正解の姿勢はモーションキャプチャシステムである NaturalPoint, Inc 製の OptiTrack を用いてマイクロホンと小型スピーカの位置を計測して作成した．試験音には TSP 信号 (1.0[s]) を用い，各小型スピーカから 8 回ずつ再生して録音した．A/D 変換器は，株式会社 システムインフロンティア製の RASP-ZX を用い，録音は HARK を用いて 16kHz, 24bit でサンプリングを行った．カルマンフィルタの初期値として， θ_m には正解データに正規分布に従う誤差 (標準偏差: σ_{ini}) から与え， l_n には 0.25[m] を与えた．ランダムウォークのパラメータ $\sigma_{q_\theta}, \sigma_{q_l}$ はそれぞれ 0.001[rad], 1.0[mm] を，観測誤差のパラメータ σ_τ, a, b は 0.4[ms], 0.283, 0.001[deg] を与えた．これらの値は実験的に定めた． σ_{ini} は 15, 30, 45 [deg] の三種とし，それぞれ 64 回の異なる初期値による推定結果について先端位置の誤差を評価した．

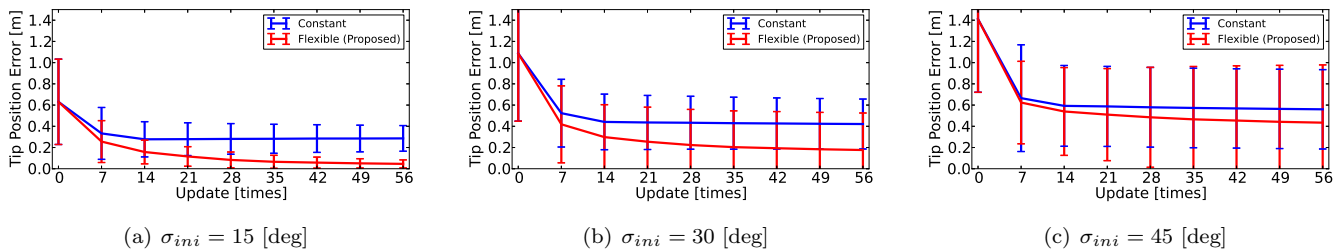


Figure 3: 姿勢推定結果の先端位置の誤差．初期値に加える誤差の標準偏差を 15[deg] から 45[deg] に変動させた．

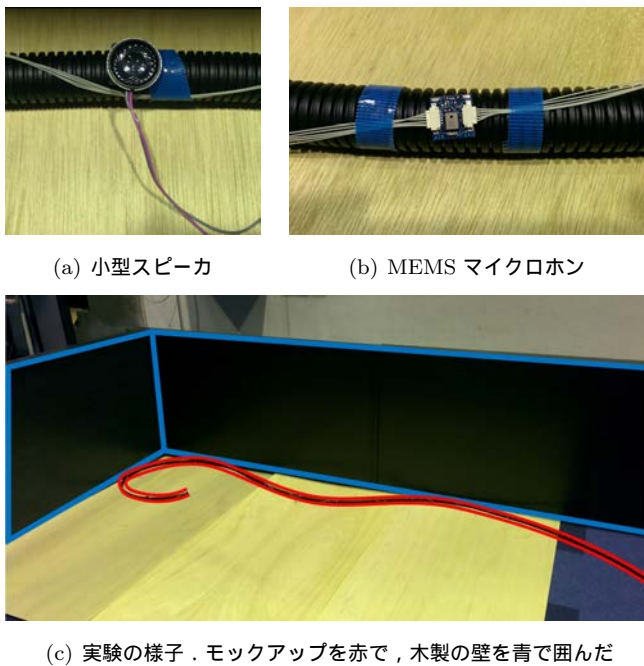


Figure 4: 実験時の写真

4.3 評価実験結果

Figure 3 に、各更新ごとの先端位置の誤差を示す．誤差の平均を折れ線で、標準偏差をエラーバーで示した．従来手法 (青) に対し提案法 (赤) の方が誤差が、初期値誤差の標準偏差 $\sigma_{ini} = 15[\text{deg}]$ のとき 84%, $30[\text{deg}]$ のとき 58%, $45[\text{deg}]$ のとき 22% 抑制された．特に従来手法では提案法に比べて 14 回目以降の更新から誤差の減少が少ない．これは、従来手法がロボットの湾曲やホース上のマイクロホンと小型スピーカの配置間隔の誤差を許容できなかったためと考えられ、提案法が有効に作用していることが分かる．

4.4 考察

内界センサを用いた手法で、Ishikura らの実験では 3[m] のホース型ロボットに対し先端位置の誤差は 0.2[m] 程度であった [Ishikura et al., 2012]．初期値誤差の標準偏差 $\sigma_{ini} = 15[\text{deg}]$ において提案法の先端位置誤差の平均は 56 回目の更新で 0.1[m] 以下で、内界センサを用いた手法より高精度な推定を実現した．また、初期値の誤差が抑制さ

れており、累積誤差の問題が解決できた．

一方、初期値誤差の標準偏差 σ_{ini} の増大と共に推定値の誤差が増大している．本論文で示したマイクロホンと小型スピーカの配置では $\text{mic}_1, \text{src}_1$ を軸として鏡対称な姿勢はすべて同じ到達時間差を観測する．このため、対称な姿勢の区別ができず提案法の状態空間は多峰性となるので、適切な初期値を与える必要があると考えられる．この対称性問題は、(1) ホース上のマイクロホンの配置を 2 列以上にして左右の弁別を可能にすることや、(2) 内界センサの情報と統合し内界センサで左右の弁別を、音によって累積誤差の軽減を行うことで、頑健性が向上すると考えられる．

5 まとめ

本論文では、ホース型ロボットの navigational usability と mission usability の向上のために、音によるホース型ロボットの姿勢推定法を述べた．改良前の手法ではホースの湾曲や伸縮により精度が低下する問題があった．また、従来の内界センサを用いた手法には、累積誤差の問題があった．提案法では、隣接するマイクロホンと小型スピーカ間の距離を推定することにより、内界センサによる手法が達成した精度以上である「3.0[m] 以上の長さのロボットで先端位置の誤差が 0.2[m] 以下」となる精度を目指した．評価実験では、 $\text{RT}_{60} = 800[\text{ms}]$ の残響のある環境下での 3.5[m] のモックアップホース型ロボットを用いて提案法を評価し、初期値誤差の標準偏差が $\sigma_{ini} = 15[\text{deg}]$ のとき、先端誤差が 4.6[cm] 程度となる精度を実現した．これは、改良前の手法にくらべ 84% 誤差を抑圧しており、目標である内界センサによる手法より良い精度を得られた．

今後の課題としては、navigational usability においては、内界センサの導入、マイクロホンの配置の検討、および、気温変化に伴う音速のゆらぎや、直接音が取得できない場合への対処など頑健性の向上が挙げられ、mission usability においては、音源定位・分離技術を利用したりモートオペレータへのマルチモーダル情報提示システムの開発などが挙げられる．

謝辞 本研究は科研費基盤 (S) No.24220006 の支援を受けた．

参考文献

- [Akin et al., 2013] H. Akin et al. Robocup rescue robot and simulation leagues. *AI Magazine*, 2013.
- [Bando et al., 2013] Y. Bando et al. Posture estimation of hose-shaped robot using microphone array localization. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 3446–3451, 2013.
- [Birk and Pathak, 2006] Andreas Birk, Kausthub Pathak, Soeren Schwertfeger, and Winai Chonnaparamutt. The iub rugbot: an intelligent, rugged mobile robot for search and rescue operations. In *2006 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, volume 10, 2006.
- [Ishikura et al., 2012] M. Ishikura et al. Shape estimation of flexible cable. In *2012 IEEE/RSJ IROS*, pages 2539–2546, 2012.
- [Julier et al., 1997] S. Julier et al. New extension of the kalman filter to nonlinear systems. In *AeroSense'97*, pages 182–193, 1997.
- [Kitagawa et al., 2003] A. Kitagawa et al. Development of small diameter active hose-ii for search and life-prolongation of victims under debris. *Journal of Robotics and Mech.*, 15(5):474–481, 2003.
- [Miura et al., 2011] H. Miura et al. Slam-based online calibration of asynchronous microphone array for robot audition. In *2011 IEEE/RSJ IROS*, pages 524–529, 2011.
- [Mizumoto et al., 2011] T. Mizumoto et al. Design and implementation of selectable sound separation on the texai telepresence system using HARK. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2130–2137, 2011.
- [Murphy, 2010] Robin R Murphy. Navigational and mission usability in rescue robots. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 28(2):142–146, 2010.
- [Nagatani et al., 2011] K. Nagatani et al. Redesign of rescue mobile robot quince. In *2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, pages 13–18, 2011.
- [Nakadai et al., 2010] K. Nakadai et al. Design and implementation of robot audition system HARK open source software for listening to three simultaneous speakers. *Advanced Robotics*, 24(5-6):739–761, 2010.
- [Namari et al., 2012] H. Namari et al. Tube-type active scope camera with high mobility and practical functionality. In *2012 IEEE/RSJ IROS*, pages 3679–3686, 2012.
- [Ono et al., 2009] N. Ono et al. Blind alignment of asynchronously recorded signals for distributed microphone array. In *WASPAA '09.*, pages 161–164, 2009.
- [Onosato et al., 2006] M. Onosato et al. Aerial robots for quick information gathering in usar. In *SICE-ICASE, 2006*, pages 3435–3438, 2006.
- [Suzuki et al., 1995] Y. Suzuki et al. An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97:1119, 1995.
- [Zhang et al., 2008] C. Zhang et al. Why does phat work well in lownoise, reverberative environments? In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008.*, pages 2565–2568, 2008.