

# マイクロホンアレイとスピーカをもつ柔軟索状ロボットのための 動的スピーカ選択による姿勢推定の高速化

坂東宜昭<sup>1</sup>  
Yoshiaki Bando

糸山克寿<sup>1</sup>  
Katsutoshi Itoyama

昆陽雅司<sup>2</sup>  
Masashi Konyo

田所諭<sup>2</sup>  
Satoshi Tadokoro

中臺一博<sup>3</sup>  
Kazuhiro Nakadai

吉井和佳<sup>1</sup>  
Kazuyoshi Yoshii

奥乃博<sup>4</sup>  
Hiroshi G. Okuno

1 京都大学 大学院情報学研究科 2 東北大学 大学院情報科学研究科

3 東京工業大学 大学院情報理工学研究科, (株)ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン

4 早稲田大学 理工学術院

## Abstract

レスキューロボットの一つである柔軟索状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が、柔軟な本体の制御、姿勢推定が難しいという課題がある。本稿では柔軟索状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た姿勢推定を行う。従来、ロボット上のスピーカの再生順は端から順番に鳴らしていたが、推定姿勢の収束に時間を要することや精度が低下する問題があった。そこで、次に鳴らすべきスピーカを強化学習によりオンラインで決定する問題に取り組み、エントロピー最小化基準による動的スピーカ選択法を Unscented 変換による近似を用いて開発した。ロボットの姿勢から幾何的に観測を生成する数値実験による評価を行い、従来の順番にスピーカを鳴らす場合に比べて最大 67%の収束高速化と 50%の精度向上化がなされることを確認した。

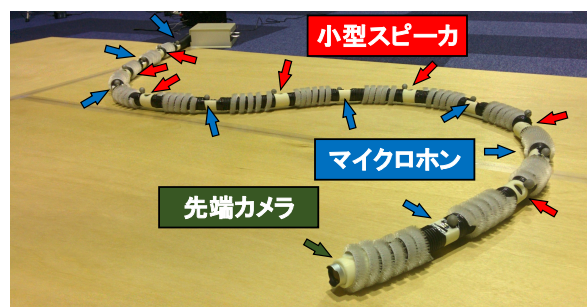


Figure 1: マイクロホンアレイとスピーカをもつプロトタイプ・柔軟索状ロボット

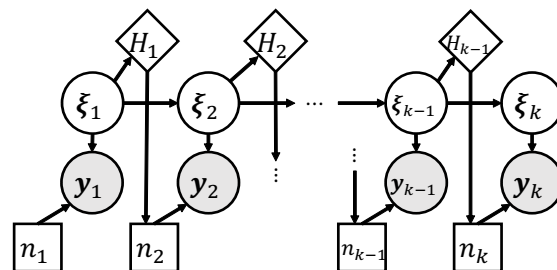


Figure 2: 動的スピーカ選択のためのダイナミック決定ネットワーク

## 1 はじめに

柔軟索状ロボット [Kitagawa et al., 2003; Hatazaki et al., 2007; Namari et al., 2012] はレスキューロボットの一つで、細く長い筒体を持ち、瓦礫内の探索といった人や動物が侵入できない環境の探索 [Ohno et al., 2011; Nagatani et al., 2011; Voyles et al., 2012; Baiocchi et al., 2013] のために開発されている。リモートオペレータはロボットに搭載された駆動機構を用いて柔軟索状ロボットを探索対象へ移動させることができる。例えば、Active Hose-II [Kitagawa et al., 2003] は小型の車輪を用いて、Active Scope Camera (ASC) [Namari et al., 2012] は表面に接着された繊毛を振

動させることで瓦礫内を進む。また、ASC はアメリカでの実際の災害現場での適用例も報告されている [Tadokoro et al., 2009]。

柔軟に形状変化する本ロボットの姿勢制御では、姿勢推定が不可欠である。既存の内界センサによる姿勢推定法 [Ishikura et al., 2012] は加速度センサとジャイロセンサの値を積分して姿勢を推定する積分型計測法である。このような姿勢の変化率から現在の姿勢を推定する手法は、長時間の運用では誤差が蓄積するという問題がある。また、GPS や曲げセンサといった、過去の姿勢に依存しない従来の非積分型計測法では、屋内や長い筒体で精度が低下するという問題があった。

これまで我々は非積分型計測法として、音を用いた柔軟索状ロボットの姿勢推定法を開発してきた [Bando et al., 2013]. 柔軟索状ロボットにマイクロホンと小型スピーカを装着し (Figure 1), 小型スピーカから発する試験音の各マイクロホンへの到達時間差を用いてマイクロホンと小型スピーカの位置関係を推定する. 本手法で使用する到達時間差は, 現在のマイクロホンと小型スピーカの位置関係にのみ依存するため, 累積誤差の問題を回避できる. また, ロボット上のマイクロホンアレイは, 音源定位や分離といった声による被災者発見への応用が期待できる. 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, ロボット聴覚ソフトウェア 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.

従来はロボット上のスピーカは端から順番に繰り返して鳴らして姿勢推定を行っていた. しかし, ロボットの姿勢やマイクロホンの個数によって, 推定姿勢の収束に時間を要することや精度が低下する問題があった. そこで本研究では, 次に鳴らすべきスピーカを強化学習によりオンラインで決定する手法を開発し, 姿勢推定の収束高速化と安定化を行う.

オンライン強化学習による行動最適化手法として, アクティブ・ビジョンによる位置推定法が提案されている [Czarnetzki et al., 2011]. この手法は, ロボカップでのロボットの位置推定のための手法で, ロボット位置の事後分布のエントロピーが最も小さくなる行動を選択する. 本手法はエントロピーと事後分布の計算に Particle Filter [Arunlampalam et al., 2002] によるモンテカルロ積分を使用しており, 柔軟索状ロボットの姿勢のような高次元状態空間への適応は, 計算量の観点から困難である [Ishikura et al., 2012]. 提案法では, 事後分布とエントロピーの計算を Unscented 変換 [Julier, 2002] により計算量を削減してスピーカ選択へ応用する.

本稿の構成は以下のとおりである. 第 2 章では音を用いた柔軟索状ロボットの姿勢推定法について述べる. 第 3 章では, ロボットの姿勢から幾何的に計算した到達時間差を用いる数値実験による評価を行い, 提案法により収束速度と精度が向上することを確認する. 第 4 章でまとめる.

## 2 柔軟索状ロボットのマイクロホンアレイを用いた姿勢推定

Figure 3 に示すように, 本稿では柔軟索状ロボットに, マイクロホンと小型スピーカを交互に間隔  $l$  だけ離して装着する. 各マイクロホンと小型スピーカは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. ここで,  $M, N$  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.  $\text{mic}_m, \text{src}_n$  の各座標を, それぞれ  $\mathbf{u}_{m,k}, \mathbf{v}_{n,k} \in \mathbb{R}^2$  とする.  $k$  は観測のインデックスであ

Table 1: 各記号の意味

記号	意味
$M$	マイクロホンの個数
$N$	小型スピーカの個数 ( $N = M - 1$ )
$C$	音速
$k$	観測のインデックス
$\text{mic}_m$	$m$ 番目のマイクロホン ( $1 \leq m \leq M$ )
$\text{src}_n$	$n$ 番目のスピーカ ( $1 \leq n \leq N$ )
$\mathbf{u}_m$	$\text{mic}_m$ の座標 $\in \mathbb{R}^2$
$\mathbf{v}_n$	$\text{src}_n$ の座標 $\in \mathbb{R}^2$
$\boldsymbol{\xi}_k$	ロボットの姿勢 $\in \mathbb{R}^{M+N-2}$
$\mathbf{y}_k$	$k$ 番目の観測 $\in \mathbb{R}^{M-1}$
$\tau_{m_1, m_2}^n$	スピーカ $\text{src}_n$ 再生時のマイクロホン $\text{mic}_{m_1}, \text{mic}_{m_2}$ 間の到達時間差 $\in \mathbb{R}$

る. 本稿で用いる表記を Table 1 にまとめた.

本稿で扱う姿勢推定は次の手続きを繰り返し逐次実行する (Algorithm 1). まず 1) 小型スピーカ  $\text{src}_{n_k}$  から試験音を再生し, 2) 試験音の録音から試験音の各マイクロホンへの到達時間差  $\tau_{m_1 \rightarrow m_2, k}^{n_k}$  を推定する. 3) 得られた到達時間差から姿勢を表すマイクロホンと小型スピーカの座標  $\mathbf{u}_{m,k}, \mathbf{v}_{n,k}$  を推定する. そして 4) 次に再生すべきスピーカ  $\text{src}_{n_{k+1}}$  をエントロピー最小基準で選択する.

### Algorithm 1 マイク位置の逐次推定

- 1: 最初に再生するスピーカ  $\text{src}_{n_1}$  を  $\text{src}_1$  と設定
- 2: **for**  $k \in 1, 2, 3, \dots$  **do**
- 3:   スピーカ  $\text{src}_{n_k}$  から試験音を再生
- 4:    $M$  チャネルマイクロホンアレイで録音
- 5:   試験音の到達時間差から姿勢の事後分布を推定
- 6:   エントロピー最小基準でスピーカ  $\text{src}_{n_{k+1}}$  を決定
- 7: **end for**

以下に本稿で扱う問題設定を示す.

入力:  $\text{src}_{n_k}$  で再生した試験音の各マイクロホン間での到達時間差  $\tau_{m_1 \rightarrow m_2, k}^{n_k}$   
出力: ロボット上のマイクロホンと小型スピーカの座標  $\mathbf{u}_{m,k}, \mathbf{v}_{n,k}$ , および次に鳴らすスピーカ番号  $n_{k+1}$

ただし, 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元信号である. 到達時間差はマイクロホンと小型スピーカの相対的な位置関係を表すので, 出力はロボット上のマイクロホンと小型スピーカの相対位置  $\mathbf{u}_{m,k}, \mathbf{v}_{n,k}$  である. また, 一般性を失わずに  $\mathbf{u}_{1,k}, \mathbf{v}_{1,k}$  を既知とする.

マイクロホンと音源の位置を同時推定する関連研究に, 補助関数法による手法 [Ono et al., 2009] と EKF-SLAM による手法 [Miura et al., 2011] がある. 前者はオフラインで

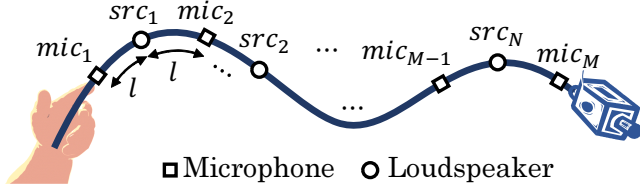


Figure 3: ロボット上のマイクロホンと小型スピーカの配置

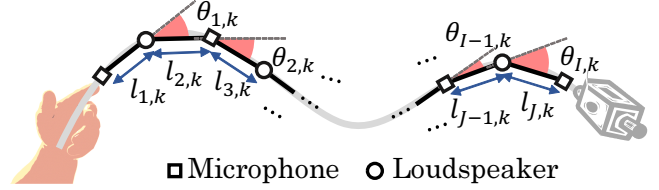


Figure 4: 姿勢のモデル

動作することを前提としておりロボットの姿勢推定には適さない．後者はオンライン手法だが運動モデルが既知の単一音源を仮定している．瓦礫中では音源の移動は困難であり，静止した1音源ではマイク位置推定できないため，本問題には適さない．ロボット上に配置された複数個の音源を仮定し，提案法はEKF-SLAM法を改良したロボットの姿勢を表す状態空間モデルを用いたオンライン推定を実現する．

## 2.1 姿勢と観測のモデル

Figure 4 に示すように，柔軟索状ロボットの姿勢を表す状態変数  $\xi_k$  は，隣り合うマイクロホンと小型スピーカ間を線分で結んだリンクモデルで近似する．よって姿勢  $\xi_k$  は，各ノード間の角度  $\theta_{i,k}$  ( $1 \leq i \leq N + M - 2$ ) からなる  $N + M - 2$  次元ベクトルで表現する．

$$\xi_k = [\theta_{1,k}, \dots, \theta_{N+M-2,k}]^T \quad (1)$$

各マイクロホンと小型スピーカの座標  $\mathbf{u}_{m,k}$ ,  $\mathbf{v}_{n,k}$  は  $\mathbf{x}_{i,k}$  を  $[\mathbf{u}_{1,k}, \mathbf{v}_{1,k}, \dots, \mathbf{u}_{M-1,k}, \mathbf{v}_{N,k}, \mathbf{u}_{M,k}]$  の  $i$  番目の要素として次のように計算される．

$$\mathbf{x}_{i,k} = \mathbf{x}_{i-1,k} + l_{i,k} \times [\cos(\sum_{i'=1}^{i-1} \theta_{i',k}), \sin(\sum_{i'=1}^{i-1} \theta_{i',k})] \quad (2)$$

**観測モデル** 観測モデル  $p(\mathbf{y}_k | \xi_k)$  は，小型スピーカ  $\text{src}_n$  が再生時のマイクロホン  $\text{mic}_{m_1}, \text{mic}_{m_2}$  間の到達時間差  $\tau_{m_1 \rightarrow m_2}^n(\xi_k)$  を用いて次のように表現する．

$$p(\mathbf{y}_k | \xi_k, n_k) = \mathcal{N}(\mathbf{y}_k | \mathbf{T}_{n_k}(\xi_k), \mathbf{R}_k) \quad (3)$$

$$\mathbf{T}_{n_k}(\xi_k) = [\tau_{n_k \rightarrow 1}^n(\xi_k), \dots, \tau_{n_k \rightarrow n-1}^n(\xi_k), \tau_{n_k \rightarrow n+1}^n(\xi_k), \dots, \tau_{n_k \rightarrow M}^n(\xi_k)]^T \quad (4)$$

ただし  $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^{N-1}$ ,  $\mathbf{R}_k \in \mathbb{R}^{N-1 \times N-1}$  はそれぞれ，観測ベクトルと観測誤差を表す共分散行列である．

到達時間差  $\tau_{m_1 \rightarrow m_2}^n(\xi_k)$  はロボット上のマイクロホンと小型スピーカの座標から次のように定義する．

$$\tau_{m_1 \rightarrow m_2}^n(\xi_k) = \frac{D^{n,m_2}(\xi_k) - D^{n,m_1}(\xi_k)}{C} \quad (5)$$

ここで  $D^{n,m}(\xi_k)$  は  $\text{src}_n$  と  $\text{mic}_m$  間の距離を表し， $C$  は音速を表す．

**状態更新モデル** 状態更新モデル  $p(\xi_k | \xi_{k-1})$  は，ランダムウォークで表現する．

$$q(\xi_k | \xi_{k-1}) = \mathcal{N}(\xi_k | \xi_{k-1}, \mathbf{Q}_k) \quad (6)$$

ただし  $\mathbf{Q}_k \in \mathbb{R}^{L \times L}$  はモデル誤差を表す共分散行列である．

## 2.2 推論アルゴリズム

本手法では，姿勢推定と次のスピーカの選択を Figure 2 に基づき，以下のステップで行う (Algorithm 2)．まず，Unscented Kalman Filter [Wan et al., 2000] を用いて現在の観測  $\mathbf{y}_k$  と事後分布  $p(\xi_k | \mathbf{y}_{1:k}, n_{1:k})$  を推定する．次に，時刻  $k+1$  の姿勢の予測分布  $p(\xi_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k}, n_{1:k})$  を計算する．最後に，すべてのスピーカ  $n_{k+1}$  について，エントロピー  $E[H(\xi_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k}, n_{1:k+1})]$  を計算し，これが最小となるスピーカを次に鳴らすスピーカとして選択する．

### Algorithm 2 マイク位置の逐次推定

- 1: 現在の観測から姿勢の事後分布  $p(\xi_k | \mathbf{y}_{1:k}, n_{1:k})$  を計算
- 2: 次の時刻の姿勢の予測分布  $p(\xi_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k}, n_{1:k})$  を計算
- 3: **for**  $n_{k+1} \in 1, \dots, N$  **do**
- 4: エントロピー  $E[H(\xi_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k}, n_{1:k+1})]$  を計算
- 5: **end for**
- 6:  $E[H(\xi_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k}, n_{1:k+1})]$  が最小となる  $n_{k+1}$  を選択

**Unscented 変換** 提案法ではすべての分布をガウス分布で近似し，Unscented 変換 [Julier, 2002] による計算量削減を行う．従来法では事後分布とエントロピーの計算に Particle Filter によるモンテカルロ積分を行っているが，柔軟索状ロボットの姿勢のような高次元状態空間への適用は，計算量の観点から困難である [Ishikura et al., 2012]．Unscented 変換は単峰性の確率分布に従う確率変数に任意の非線形変換を施した後の確率分布の平均と分散を求める手法で，変換前分布の平均と分散が既知と仮定することにより，少ないサンプルで効率的な分布推定を行う．

変換前分布の確率変数を  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^L$ ，その平均と分散を  $\boldsymbol{\mu}_x, \boldsymbol{\Sigma}_x$  としたときの，非線形変換  $f$  によって変換された  $f(\mathbf{x})$  の分布を Unscented 変換により推定する方法を述べる．まず， $2L + 1$  個のシグマ点  $\boldsymbol{\chi}_0, \dots, \boldsymbol{\chi}_{2L}$  と呼ばれる

サンプル点を生成する

$$\chi_0 = \boldsymbol{\mu}_x \quad (7)$$

$$\chi_i = \boldsymbol{\mu}_x + (\sqrt{(\alpha^2 L) \boldsymbol{\Sigma}_x})_i \quad \text{for } i = 1, \dots, L \quad (8)$$

$$\chi_{i+L} = \boldsymbol{\mu}_x - (\sqrt{(\alpha^2 L) \boldsymbol{\Sigma}_x})_i \quad \text{for } i = 1, \dots, L \quad (9)$$

ただし、 $\sqrt{\cdot}$  は行列の平方根、 $(\cdot)_i$  は行列の  $i$  番目の列、 $\alpha$  はスケーリングパラメータを表す。次にシグマ点に非線形変換  $f$  を施し、変換後のシグマ点  $\mathbf{Z}_0, \dots, \mathbf{Z}_{2L+1}$  を得る。

$$\mathbf{Z}_i = f(\chi_i) \quad \text{for } i = 0, \dots, L \quad (10)$$

得られたサンプル点を用いて、変換後分布の平均  $\boldsymbol{\mu}_z$  と分散  $\boldsymbol{\Sigma}_z$  は以下のように推定される。

$$\boldsymbol{\mu}_z = \sum_{i=0}^{2L} w_i^m \mathbf{Z}_i \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_z = \sum_{i=0}^{2L} w_i^c (\mathbf{Z}_i - \boldsymbol{\mu}_z)(\mathbf{Z}_i - \boldsymbol{\mu}_z)^T \quad (12)$$

$$w_i^m = \begin{cases} (\alpha - 1)^2 L / (\alpha^2 L) & \text{if } i = 0 \\ 1 / \{2(\alpha^2 L)\} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$w_i^c = \begin{cases} (\alpha - 1)^2 L / (\alpha^2 L) + 1 - \alpha^2 + \beta & \text{if } i = 0 \\ 1 / \{2(\alpha^2 L)\} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

ただし、 $\beta$  はスケーリングパラメータである。

**エントロピーの計算** スピーカ選択のコスト関数であるエントロピー  $E[H(\boldsymbol{\xi}_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k}, n_{1:k+1})]$  の定義とその計算法について述べる。 $E[H(\boldsymbol{\xi}_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k}, n_{1:k+1})]$  は以下のように定義される。

$$E[H(X | \mathbf{y}_{1:k}, n_{1:k+1})] = \int p(\mathbf{y}_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k}) H(\boldsymbol{\xi}_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k+1}, n_{k+1}) d\mathbf{y}_{k+1} \quad (15)$$

ただし  $H(X)$  は  $H(X) = -\int p(X) \log(p(X))$  で定義されるエントロピー関数である。

以上より  $E[H(\boldsymbol{\xi}_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k}, n_{1:k+1})]$  は、 $p(\mathbf{y}_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k})$  の平均と分散に、 $f$  を以下のように定義して Unscented 変換を行うことで得る。

$$f(\mathbf{y}_{k+1}) = H(\boldsymbol{\xi}_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k+1}, n_{1:k+1}) \quad (16)$$

計算に必要な  $p(\boldsymbol{\xi}_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k+1}, n_{1:k+1})$  は、Unscented Kalman Filter を用いて計算する。また、 $H(\boldsymbol{\xi}_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k+1}, n_{1:k+1})$  は  $p(\boldsymbol{\xi}_{k+1} | \mathbf{y}_{1:k+1}, n_{1:k+1})$  がガウス分布 (平均  $\boldsymbol{\mu}$ , 分散  $\boldsymbol{\Sigma}$ ) と仮定し、以下として計算する。

$$H(\mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})) = \frac{1}{2} (1 + \ln(2\pi)) + \frac{1}{2} \ln|\boldsymbol{\Sigma}'| \quad (17)$$

ただし、 $\boldsymbol{\Sigma}'$  は Unscented 変換による誤差を軽減するための  $\boldsymbol{\Sigma}$  の対角成分以外を 0 とした共分散行列である。

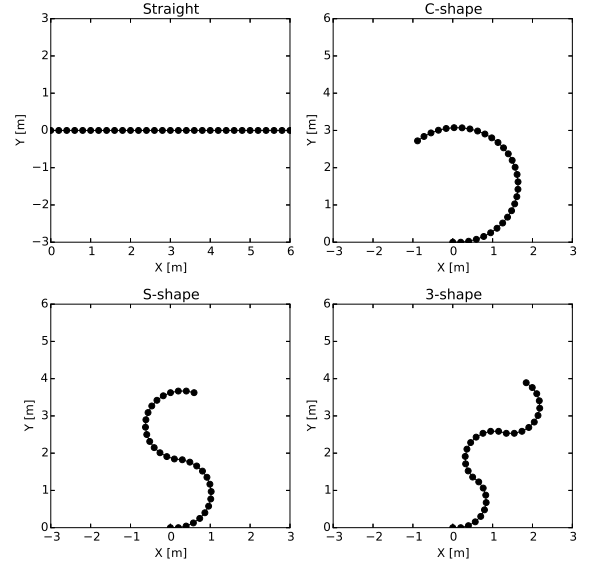


Figure 5: 実験で用いた姿勢 (マイク数:16). それぞれ直線, C字, S字, 3の字を表す。

### 3 実験

実験ではロボットの姿勢から幾何的に計算した到達時間差を用いる数値実験による評価を行う。本実験では、スピーカの再生順について 1) 順番 (従来法), 2) ランダム, 3) 提案法の 3 種を比較する。

#### 3.1 実験設定

マイク・スピーカ間隔が 20 cm の柔軟索状ロボットを想定し、以下の条件において、姿勢推定の収束速度と姿勢推定精度を評価した。

- スピーカ選択法: 順番 (従来), ランダム, 提案法
- 姿勢: 直線, C字, S字, 3の字 (Figure 5)
- マイク数: 8, 16, 24 個 (それぞれ 2.8, 6, 9.2 m)

また、状態変数の初期値  $\boldsymbol{\xi}_0$  は、正解データを平均として標準偏差  $2\pi / (N + M - 2)$  rad の正規分布からサンプリングした。その他パラメータは実験的に与え、すべての試行において同じパラメータを使用した。

10 種の異なる初期値を用いて姿勢推定し、その先端位置誤差を評価した。先端位置誤差は、正解データと推定姿勢の手元側のマイクロホンと小型スピーカの座標  $\mathbf{u}_{1,k}, \mathbf{v}_{1,k}$  を一致させたときの、先端のマイクロホン  $\text{mic}_M$  の位置誤差である。

#### 3.2 結果

Figure 6 に各観測ごとの推定結果の先端位置誤差を示す。まず従来の順番にスピーカを鳴らした場合には、マイク数が増えると、マイク数回の周期で先端位置誤差が振動している。一方で、ランダムや提案法の鳴らし方では、振動が抑圧されている。Figure 7 に各条件での先端位置

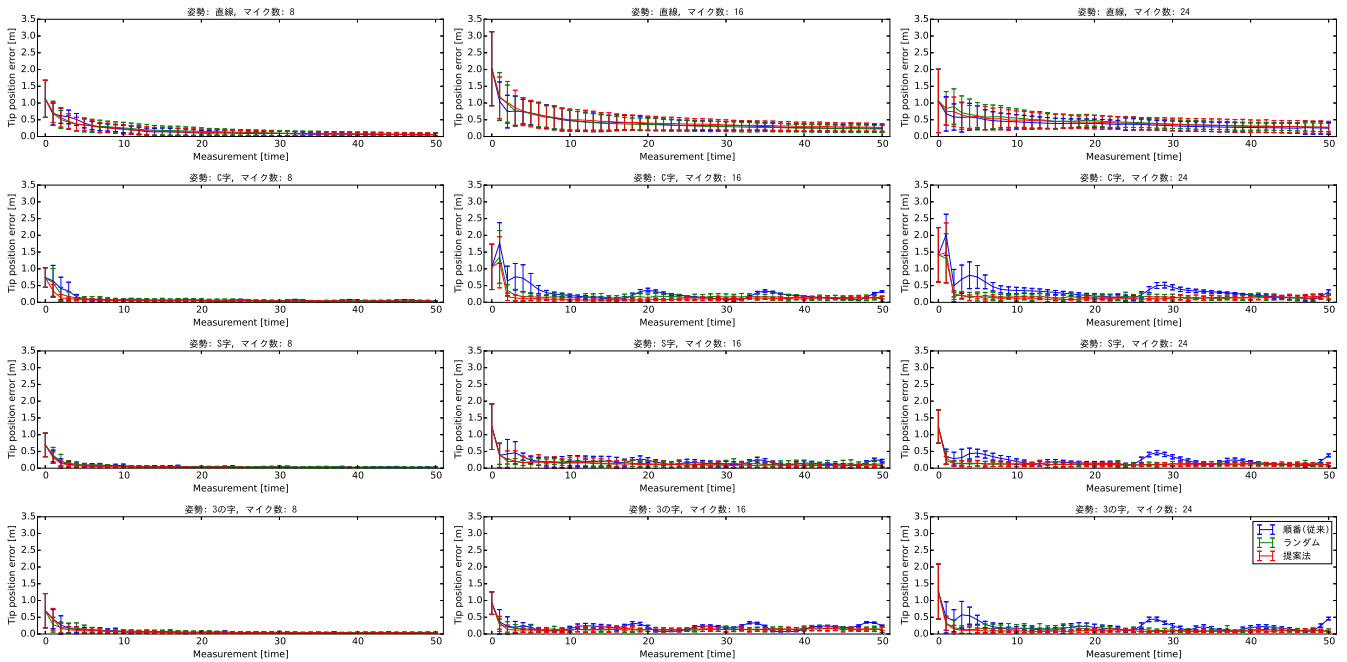


Figure 6: 姿勢推定結果の先端位置誤差。青が従来の順番にスピーカーを選択する場合、緑がランダム、赤が提案法を表す。先端位置誤差の平均と標準偏差をそれぞれ折れ線とエラーバーを示す。

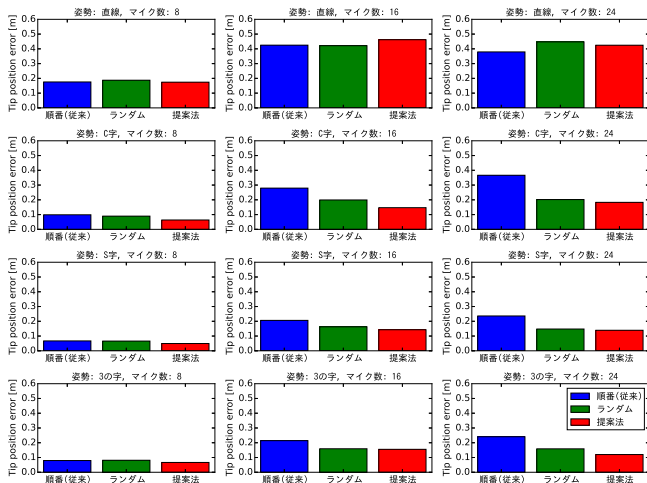


Figure 7: 姿勢推定結果の先端位置誤差の各条件での平均値。青が従来の順番にスピーカーを選択する場合、緑がランダム、赤が提案法を表す。

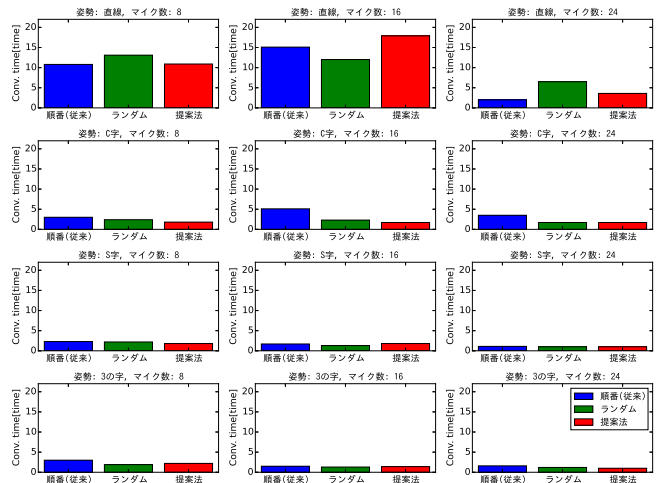


Figure 8: 姿勢推定が収束するまでに必要な観測回数の各条件での平均値。青が従来の順番にスピーカーを選択する場合、緑がランダム、赤が提案法を表す。

誤差の平均を示す。提案法はマイク数が8/16で直線の姿勢を除いたすべての場合でも最も先端位置誤差が小さい。

Figure 8 に各条件での推定姿勢が収束するまでの観測の平均回数を示す。収束判定は、先端位置誤差がロボットの全長の5%になった時点とした。全12条件8条件で、提案法が従来の順番に鳴らす場合より収束が早い。一方で、12条件中4条件で、ランダムにマイクを選択した方が提案法より早く収束しており、提案法には改善の余地がある。現在、提案法では1観測先の状態のみ予測している。オンライン強化学習による行動最適化手法として知られる partially observable Markov decision process [Thrun et al., 2005]では、複数観測先までの状態を予測し、行動決定を行う。提案法も同様に、予測する観測を増やしスピーカー選択の効率化が期待できる。

#### 4 おわりに

本稿では、柔軟索状ロボットの音を用いた姿勢推定のために、スピーカーの再生順序を強化学習により最適化するための手法を開発し、収束速度と精度の向上を確認した。ロボットの姿勢から幾何的に計算した到達時間差を用いる数値実験を行い、従来の順番にスピーカーを選択する場合より収束速度が最大67%、先端位置精度が最大50%向上することを確認した。一方で、直線型やマイク数が少ないときなどで、ランダムにスピーカーを選択する場合の方が収束速度が早いことから、提案法には改善の余地があることが分かった。

今後は予測する観測のステップ数を増やし、より効率的なスピーカー選択法を開発する。また、モンテカルロ積



分や解析的な方法によるスピーカ選択法と Unscented 変換を用いた提案法を比較し、提案法の精度と妥当性を確認する。さらに、これまで我々が開発した障害物存在下での信頼できないマイクロホンを棄却する技術[坂東 et al., 2014]と統合し、瓦礫内でも頑健で効率的な姿勢推定を実現する。

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

- [Arulampalam et al., 2002] M. Arulampalam et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian bayesian tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50(2):174–188, 2002.
- [Baiocchi et al., 2013] V. Baiocchi et al. Development of a Software to Plan UAVs Stereoscopic Flight: An Application on Post Earthquake Scenario in L’Aquila City. In *ICCSA*, pages 150–165. Springer, 2013.
- [Bando et al., 2013] Y. Bando et al. Posture estimation of hose-shaped robot using microphone array localization. In *IEEE/RSJ IROS*, pages 3446–3451, 2013.
- [Czarnetzki et al., 2011] S. Czarnetzki et al. Real-time active vision by entropy minimization applied to localization. In *RoboCup 2010: Robot Soccer World Cup XIV*, pages 266–277. Springer, 2011.
- [Hatazaki et al., 2007] K. Hatazaki et al. Active scope camera for urban search and rescue. In *IEEE/RSJ IROS*, pages 2596–2602, 2007.
- [Ishikura et al., 2012] M. Ishikura et al. Shape estimation of flexible cable. In *IEEE/RSJ IROS*, pages 2539–2546, 2012.
- [Julier, 2002] S. J. Julier. The scaled unscented transformation. In *American Control Conference*, volume 6, pages 4555–4559. IEEE, 2002.
- [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 *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. *IEEE ICRA*, pages 2130–2137, 2011.
- [Nagatani et al., 2011] K. Nagatani et al. Redesign of rescue mobile robot Quince. In *IEEE 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 *IEEE/RSJ IROS*, pages 3679–3686, 2012.
- [Ohno et al., 2011] K. Ohno et al. Robotic control vehicle for measuring radiation in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. In *IEEE SSRR*, pages 38–43, 2011.
- [Ono et al., 2009] N. Ono et al. Blind alignment of asynchronously recorded signals for distributed microphone array. In *WASPAA*, pages 161–164, 2009.
- [Tadokoro et al., 2009] Satoshi Tadokoro et al. Application of active scope camera to forensic investigation of construction accident. In *IEEE ARSO*, pages 47–50, 2009.
- [Thrun et al., 2005] S. Thrun et al. *Probabilistic robotics*. MIT Press, 2005.
- [Voyles et al., 2012] R. Voyles et al. Hexrotor UAV platform enabling dextrous interaction with structures – preliminary work. In *IEEE SSRR*, pages 1–7, 2012.
- [Wan et al., 2000] Eric A Wan et al. The unscented Kalman filter for nonlinear estimation. In *IEEE ASSPCC*, pages 153–158, 2000.
- [坂東 et al., 2014] 宜昭 坂東 et al. マイクロホンアレイの位置推定によるホース型ロボットの姿勢推定. In 情報処理学会第 76 回全国大会, 5R-7, 2014.