

無線ネットワークにより相互接続したマイクロホンアレイを用いた音源位置推定手法の実装

細川 侑嗣[†] 小南 大智^{††} 合原 一究^{†††} 村田 正幸^{†††}

[†] 大阪大学 基礎工学部情報科学科 〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

^{††} 大阪大学 大学院経済学研究科 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-7

^{†††} 筑波大学システム情報工学研究科 〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

^{††††} 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †{y-hosokawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp,
†††aihara@cs.tsukuba.ac.jp

あらまし 近年、生物の優れた機能や行動などに注目したバイオミメティクスに関する研究が増えている。我々は生物の音声コミュニケーションのモデル化および情報通信分野への応用を目指しており、現在、モデル解析のための音源位置推定システムを構築している。本稿ではマイクロホンアレイにより計測した音声到来方向を用いた位置推定手法を提案する。提案手法を実装したシステムを用いた実験によりシステムの推定精度を示す。

キーワード 音源位置推定、無線ネットワーク、音声到来方向、ニホンアマガエル

Implementation of an Acoustic Localization Method using a Wireless Microphone-Array Network

Yushi HOSOKAWA[†], Daichi KOMINAMI^{††}, Ikkyu AIHARA^{†††}, and Masayuki
MURATA^{††††}

[†] School of Engineering Science, Osaka University

^{††} Graduate School of Economics, Osaka University

^{†††} Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

^{††††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

E-mail: †{y-hosokawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp,
†††aihara@cs.tsukuba.ac.jp

Abstract There have been many researches on biomimetics focusing on excellent functions and behaviors of creatures. Our research group tries to make a mathematical model of acoustic communication of creatures and to apply it to information and communication technology. In this paper, we propose an acoustic localization method using the direction of arrival of an incoming signal for analyzing acoustic communication of creatures. We implement the method using microphone arrays inter-connecting by a wireless network, and show its estimation accuracy through actual experiments.

Key words Acoustic localization, wireless network, DOA, Japanese tree frog

1. はじめに

生物の振る舞いに着想を得ることで新たな技術を創り出す、バイオミメティクスに注目が集まっている。この

ような学際的な研究進歩の背景には、様々な実験技術の開発とコンピュータ性能の向上によって、生物システムの数学的モデル化に関する数多くの研究が可能になったことがある。我々は情報通信技術の分野において、生物

の自律分散的な振る舞いに着目し、ロボストで適応性のある制御技術へと応用してきた [1]。個体の自律的動作から生じる協調的な社会的行動は群知能と呼ばれ、ネットワーク制御に群知能の知見を応用した研究も多くなされている [2]。

現在我々は、生物同士のコミュニケーション、特に音声コミュニケーションに着目している。生物の音声コミュニケーションは多くの動物に見られ、群れの生存に関わる重要な戦略が潜んでいると考えられる。これを明らかにするためには、どの個体がいつ、どこで、どのようなシグナルで互いにコミュニケーションを取っているかを観測することが重要になる。しかしながら、生物の多くは野外環境に生息し、中にはその発見が難しいものもある。

音を利用した位置推定は、生物が聴覚を獲得して以来用いてきた技術であり、現代ではマイクロホンによる録音が可能となったことで、音声信号を利用した位置推定を工学的に扱うことが可能となった。音源位置推定に関する研究はこれまでに様々になされており、マイクロホンに音源からの音が到着した時刻 (Time of Arrival; TOA) を利用した手法、複数のマイクロホンにおける TOA の差 (Time Difference of Arrival; TDOA) を利用した手法、音源からの音の到来方向 (Direction of Arrival; DOA) を利用した手法などが有名である [3]。我々はこれまでに、TDOA を用いた音源位置推定手法を提案し、屋内での位置推定実験により、その推定精度を示してきた [4]。

過去の我々の手法も含めて、これまでに提案されてきた多くの手法では、それぞれのマイクロホンの正確な位置が既知であり、また、それぞれのマイクロホンによって十分な音圧を録音可能な領域 (集音領域) が、互いに重複していることが前提とされている。屋外環境での生物の位置推定を考慮すると、観測の対象となる領域は生物がいるであろう位置によって変化し、機器を設置可能な場所は状況によっては制限される。そのため、既存手法での前提が必ずしも成り立たない状況が考えられる。本稿では、これらの前提が成立するようにマイクロホンを設置し、その上で位置推定を行う手法を提案する。

提案手法の基本的なアイデアは、複数のマイクロホンを互いに近い位置において、それらに囲まれる領域の外側に存在する音源の位置を推定するというものである。マイクロホンを互いに近い位置に置くことで、マイクロホンの相対的な座標を正確に取得可能であり、設置や携行も容易となる。さらに、各マイクロホンによる集音領域が重複する面積を確保しやすい点も利点である。図 1 は、集音領域の重複する領域を位置推定可能領域と考え、その面積を評価したものである。図 1(a) のように四つのマイクロホンを一辺が d m の正方形の頂点に置いた状況を想定する。各マイクロホンの集音領域はマイクロホンを中心とした半径 r の円で表されることとする。また、位置推定可能領域は、四つ全てのマイクロホンの集音領域が重複する領域であることとする。 $r = 10$ m とし

たときの、 d と位置推定可能領域との関係が、図 1(b) の “overlapped area” である。既存の位置推定手法ではマイクロホンで囲んだ領域の内側を位置推定の対象領域とすることが多く、その領域の面積は d に対して “square area” に示すように変化する。ただし、“square area” が “overlapped area” よりも大きいときは、実際の位置推定可能領域は “overlapped area” が上限であるため、図の灰色で着色した部分で表される。

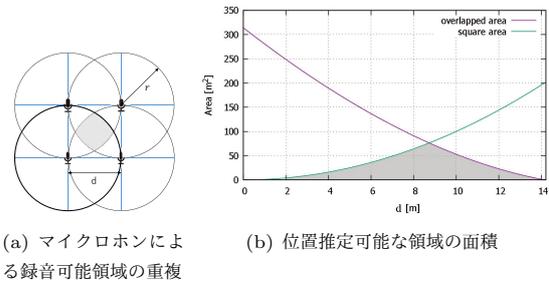


図 1 位置推定可能領域

既存手法ではマイクロホンによって囲まれた領域の外側を位置推定の対象とはしておらず、本稿ではこの領域を対象とする新たな位置推定手法を提案する。提案手法について、実機を用いた実験によってその性能を明らかにする。ここで、位置推定システムの性能要件は、観測対象によって決まるため、2. において、我々が観測対象とするニホンアマガエルの特徴と、提案手法に必要な性能要件を述べる。3. で我々の提案手法を示し、4. において実装方法を説明する。5. では、実機実験の結果を示し、最後に 6. にまとめと今後の課題を述べる。

2. 観測対象と位置推定システムの性能要件

ニホンアマガエルの体長は 2.0 ~ 4.5 cm 程度であり、水田や森林に生息する。ニホンアマガエルは春が繁殖期であり、繁殖期では夕方から 0 時頃までの間、広告音と呼ばれる、オスがメスに自分の存在を知らせる鳴き声を発する。ニホンアマガエルは、1 匹のニホンアマガエルが鳴きだすと、それに合わせて鳴き始める (コーラス)。その際、2 ~ 4 匹程度の少数のニホンアマガエルがそれぞれが同時に鳴かないように逆同期して鳴くことが知られている [5]。またこのとき、互いに 0.5 m 以上離れて鳴くことが多い。ニホンアマガエルは水中や水上ではあまり鳴かず、また、鳴いている間は移動をせず、一度合唱を始めると、5 分以上コーラスを続けることも多い。ニホンアマガエルの一回の広告音は 0.1 s から 0.2 s ほどの長さであり、その基本周波数は約 2,000 Hz である。

a) 想定する環境

ニホンアマガエルが生息し、活発に鳴いている春～夏季の田圃を想定する。田圃の一辺は長くても 20 m 程度であり、田圃の周りには多くの場合、背の高い木はないが草が生い茂っている。田圃には水が張られており、畔

はぬかるんでいる上に平坦な部分は少ない。本稿では単一の田圃を対象とし、棚田等、複数の田圃に渡っての推定は行わない、すなわち、鉛直方向の推定を行わないこととし、機器の設置できる場所は同一平面上であることとする。

b) システム要件

ニホンアマガエルの特徴や実際の野外での観測を考慮してシステムの設計を行う。本稿においては以下の数値を目標とする。

- 推定精度：誤差 50 cm 以下
- 推定時間：5 分以下
- 推定可能領域：20 × 20 m²

3. 提案手法

本稿では、マイクロホンアレイによって計測した DOA を用いた位置推定手法を提案する。以降に手法の詳細を説明する。

3.1 位置推定範囲の拡張

既存の位置推定手法の問題点として、実環境における携行・設置の困難さがある。既存手法の多くは、観測領域を囲むようにマイクロホンアレイを設置し、それらのマイクロホンアレイの正確な座標が利用可能であることを前提としている。しかしながら、実環境においては、各マイクロホンアレイの正確な位置の取得（あるいは任意の位置への設置）が困難である場合や、マイクロホンアレイが観測領域内の音源の DOA を推定するために十分な SN 比（信号対雑音比）を必ずしも獲得できない場合が考えられる。特に後者について、二次元平面上で位置推定が成功するためには、少なくとも二つのマイクロホンアレイの、DOA 推定可能範囲が重複する必要がある。広い領域をカバーするためにマイクロホンアレイ間の距離を大きく取ると、この重複面積は小さくなり、位置推定可能な領域が小さくなってしまふ。上述の問題に対して、マイクロホンアレイ間の距離を近づけ、その上でマイクロホンアレイにより囲まれる領域の外側に存在する音源位置を推定することで解決を図る。各マイクロホンアレイの相対位置をあらかじめ物理的に固定しておくことで、各マイクロホンアレイの座標情報を正確に取得することが可能となり、さらに、設置・携行も非常に容易となる。

3.2 位置推定手法

提案手法で用いるグリッドベースの位置推定アルゴリズム (Grid-based method [6]) について説明する。まず、観測領域を $N \times N$ 個の格子に分割し、各格子の中心座標と、計測した DOA を元に、各格子に対して幾何学的に定義されるコストを計算する。このコストが最も小さい格子の中心座標を位置推定結果とするものであり、以下の手順 (2)~(5) により位置推定を行う。

(1) 観測対象範囲を囲む四角形の範囲を位置推定対象範囲とする。

(2) 位置推定対象範囲を $N \times N$ 個の格子に分割し、各格子の中心座標を計算する。

(3) 各マイクロホンアレイと、各格子の中心との角度 Ψ を計算する。 Ψ は $(M \times N)$ の行列で、各要素 $\psi_{m,n}$ は m 番目のマイクロホンアレイの n 番目の格子への角度を表す。

(4) コスト関数 $\sum_{m=1}^M [A(\hat{\theta}_m, \psi_{m,n})]^2$ を最小化する格子 n を求める。ここで、 $A(\hat{\theta}_m, \psi_{m,n})$ はマイクロホンアレイ m において計測された DOA ($\hat{\theta}_m$) と、マイクロホンアレイ m と n 番目の格子の中心との角度 ($\psi_{m,n}$) との角距離を表す。角距離 A は文献 [6] で定義されており、 $A(X, Y) = 2 \sin^{-1}((\exp(jX) - \exp(jY))/2)$ で与えられる。

(5) 格子の 1 辺の長さが閾値よりも長ければ、(4) で求めた格子を位置推定対象範囲として (2) に戻る。そうでなければ得られた格子の中心座標を推定結果とし、位置推定を終了する。

このアルゴリズムは格子数を大きくするほど精度は上昇するが、計算コストが増加する。特にマイクロホンアレイで囲まれた範囲外の位置推定を行う場合には、マイクロホンアレイで囲まれた範囲内に音源が存在する場合に比べて、格子を小さく設定する必要がある。なぜならこの場合、各マイクロホンアレイが得る DOA は互いに近い値になり、それゆえ音源と格子の中心との距離が増加するほど、音源の存在しない別の格子が推定結果として選ばれる可能性が増えるためである。しかしながら、マイクロホンアレイで囲まれた範囲外という広い範囲を細かな格子に分割し、コストを計算する際には計算時間が問題となる。

そこで、マイクロホンアレイで囲まれた範囲外を対象として位置推定を行う場合には、初めに音源の存在する方向を推定することとする。これにより、精度を向上しながら計算量の削減が可能である。

a) 単一音源の場合

まず、音源が単一の場合について説明を行う。位置推定手法は以下の三つのステップからなる。

Step 1. 観測領域を $N \times N$ 個の格子に分割する

Step 2. コストを計算する格子を決定する

Step 3. Step 2. で選ばれた格子の中でコストが最小となるものを求め、その中心座標を位置推定結果とする

Step 1. では、あらかじめ観測領域を $N \times N$ 個の格子に分割する。格子の集合を P とし、各格子の中心の座標をあらかじめ計算しておく。この際の格子数は、所望の推定精度に応じて設定する。Step 2. において、探索する格子を決定するために、全マイクロホンアレイの重心から音源に向かう角度を推定する。マイクロホンアレイの重心から、この推定角方向に引いた半直線と交差する格子のみを、Step 3. におけるコスト計算の対象とする。概要を図 2 に示す。

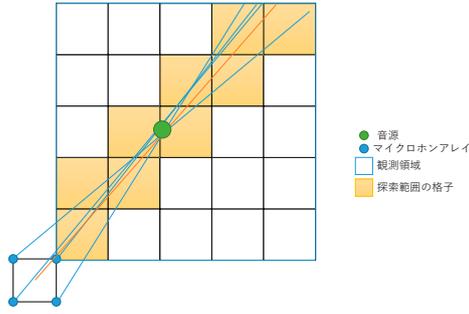


図2 探索範囲の限定

全マイクロホンアレイの重心から音源が存在する角度を推定するために、まず、各マイクロホンアレイから得た DOA と、重心から角度 i に引いたベクトルとの角距離 A の二乗和をコスト ($C_{angle}(i)$) とする (式 (1))。コストが最小となる i^* を推定結果とする。

$$C_{angle}(i) = \sum_{m=1}^M [A(\hat{\theta}_m, i)]^2 \quad (1)$$

$$i^* = \arg \min_{0 \leq i < 2\pi} (C_{angle}(i)) \quad (2)$$

ただし、 $\hat{\theta}$ は $M \times 1$ のベクトルであり、その m 番目の要素 $\hat{\theta}_m$ は、マイクロホンアレイ m が取得した DOA である。また、 $0 \leq i < 2\pi$ であり、 i の粒度については実装に依存する。

推定の対象である格子の集合を P' とするとき、 P' の j 番目の要素に対するコスト $C_{cell}(j)$ を計算し、コストが最小となるような j^* を求め、その中心座標を推定結果とする。

$$C_{cell}(j) = \sum_{m=1}^M [A(\hat{\theta}_m^{(j)}, \theta_m(p^{(j)}))]^2 \quad (3)$$

$$j^* = \arg \min_{j \in P'} (C_{cell}(j)) \quad (4)$$

ここで、 $\theta_m(p^{(j)})$ は、 P' の j 番目の要素に対応する格子の中心座標とマイクロホンアレイ m がなす角度である。

b) 複数音源の場合

音源が複数個存在する場合には、マイクの数と音源の数の積だけ DOA が得られる。さらに、音源が存在する格子の組み合わせ全てについて得られた DOA を元にコストを計算する必要がある。この際の格子の組み合わせ数は非常に大きく、計算量が膨大となる。そこで、本手法では以下の四つのステップからなるヒューリスティックを用いる。ここで、音源の数を S 、マイクロホンアレイの数を M とする。

Step 1. $S \times M$ 個の DOA から重複なく M 個の DOA を選択するときのすべての組み合わせ K を生成する

Step 2. 全ての $k \in K$ を用いて、単一音源の場合の位置

推定を行う

Step 3. Step 2. において最小となる $C_{cell}(k^*)$ を求め、 k^* を用いた際の推定結果を位置推定結果とする

Step 4. k^* を求めた後に、 k^* に含まれる DOA を持つ組を K から除き、Step 2. に戻る

以上の処理を K が空集合になるまで続けることで、複数音源の位置推定を行う。

4. システム実装

この章では、提案手法の実装について述べる。本稿において実装したシステムは、無線機器に接続したマイクロホンアレイと位置推定用サーバによって構成される。以降でシステムを構成する機器と実装方法について詳細を述べる。

4.1 使用機器とシステム構成

マイクロホンアレイとして株式会社システムインフロンティアのたまご型マイクアレイ (TAMAGO-03) を使用する。TAMAGO-03 は 8 チャンネルのマイクロホンアレイであり、音声信号をサンプリング周波数 16 kHz、音の振幅情報を 24 bit でデジタル信号に変換できる。他の機器とのインタフェースとして USB 端子を備えている。

マイクロホンアレイと位置推定用サーバを無線接続するために、無線ノードとして Raspberry Pi Foundation 社の Raspberry Pi 3 Model B を TAMAGO-03 に接続して利用する。Raspberry Pi 3 Model B には 4 コアの CPU が搭載され、クロック周波数は 1.2 GHz である。また、RAM のサイズは 1 GB である。無線 LAN アダプタとして IEEE 802.11b/g/n (2.4GHz) が標準搭載されており、実装するシステムにおいては、全端末と位置推定用サーバがアドホックネットワークを構成する。

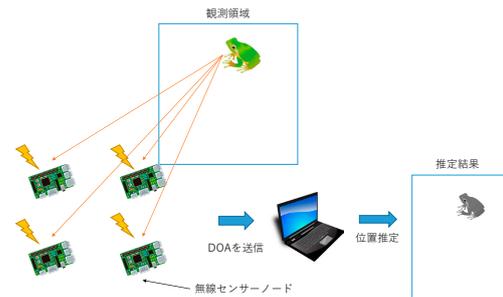


図3 位置推定システムの概要

システムの概要を図3に示す。音源の位置推定は以下の順序で実施される。

(1) マイクロホンアレイは T s 間録音を行い、wav ファイルに出力する

(2) マイクロホンアレイは wav ファイルから Δs ごとに音源の DOA を推定する

(3) マイクロホンアレイは推定した DOA を位置推定用サーバに送信する

(4) 位置推定用サーバは各マイクロホンアレイから届いた DOA を元に位置推定を行い結果を出力する

4.2 無線ノードの実装

無線ノードの計算処理は以下の順で行われる。

- (1) 音声データの取得
- (2) 音声データからの DOA 推定
- (3) 推定結果の送信

無線ノードは位置推定システムの起動時に、位置推定用サーバと ntp を用いた時刻同期を行う。その後 T_s の間、16 kHz での音声サンプリングを開始する。 T は録音する音声長であり、任意に設定可能である。wav ファイルの作成が完了すると、それを入力とし DOA の推定を開始する。DOA の推定方法として、MUSIC (Multiple Signal Classification) [7] を用いた。MUSIC では、使用するマイクロホンアレイの信号伝達特性を事前に計測した、ステアリングベクトルが必要となる。ステアリングベクトルの作成には、無響室などのノイズの少ない環境下で、自動ターンテーブルなどを用いて厳密に計測を行う必要がある。本実装における TAMAGO-03 のステアリングベクトルについては、HARK [8] で公開されているものを用いた。HARK で公開されているステアリングベクトルを用いる場合には、推定の最小単位が 5° となるため、文献 [9] の補間法を用いて精度を 1° 単位に向上している。

録音した音声には無音の区間が含まれることもあるため、wav ファイルの先頭から Δ ごとに、音圧値の二乗和を計算し、その値が閾値よりも高い場合に DOA の推定を行う。推定結果は、逐次テキストファイルに書き込む。 T_s 間の音声全ての DOA 推定が終わると、直ちに位置推定用サーバに DOA を記録したテキストファイルを送信する。

4.3 位置推定用サーバの実装

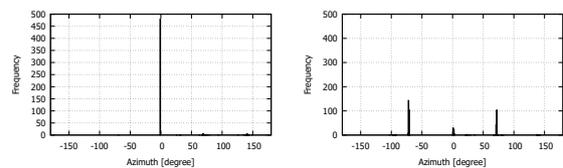
位置推定用サーバの処理は以下の順序で行われる。

- (1) DOA の推定結果の取得
- (2) 推定結果を入力として位置推定を実施
- (3) 位置推定結果の出力

無線ノードから T_s 間の音声の DOA 推定結果が位置推定用サーバに届く。この際、DOA は真値に対して大きな誤差を含む場合がある。そこで、各マイクロホンアレイについて、DOA の最頻値を求め、それを位置推定の入力として与えることとする。最後に位置推定結果をテキストファイルに出力する。

5. 実験結果

4. で実装したシステムを用いて位置推定実験を行い、精度を調査した。以降では N を 100、 i の粒度を 0.05 rad としている。3. で述べたように、位置推定には DOA を用いているため、位置推定可能領域はマイクロホンアレイの集音領域に依存する。そのため、まず屋外環境における DOA 推定実験を行った。その後、提案手法を用い



(a) 音源-マイクロホン距離 1 m (b) 音源-マイクロホン距離 21 m

図 4 DOA 推定結果のヒストグラム

た屋外環境での位置推定実験を行った。

5.1 屋外環境における DOA 推定

a) 実験環境

音源-マイクロホン間の距離と DOA 推定の結果との関係を詳細に調べるために実験を行った。周囲に障害物のないグラウンドにおいて、マイクロホンアレイを一つ設置し、音源の位置をマイクロホンアレイから 1 m 離すごとに DOA の推定を行った。音声としてニホンアマガエルの広告音を用いた。これを 5 分間録音し、0.5 s ごとに DOA の推定を行う。音源音圧は 80 dB、真の角度は 0° に設定し、推定結果のヒストグラムにおいて、真の角度 $\pm 1^\circ$ が最頻となるような音源-マイクロホンアレイ間の最大距離を、DOA 推定可能距離とする。

b) 実験結果

今回の実験では、DOA 推定可能距離は 20 m となった。図 4 は、音源とマイクロホンとの距離が 1, 21 m の場合の MUSIC 法による推定結果をヒストグラムとして作成した結果である。図から分かるように、ノイズが特定の角度から到達する場合には真の角度と全く異なる角度に推定結果が現れる。そのため、DOA の推定結果を単に平均・分散で評価することは不適切であると考えられる。そこで、DOA の推定精度を評価するための指標として、推定結果の中で、真の角度に一致した結果の割合、および絶対誤差が 1° 以下となる割合を評価する（絶対誤差の 1° は、人による設置の誤差と考えて設定した）。

評価結果を図 5 に示す。横軸を音源-マイクロホンアレイ間の距離としており、縦軸はその角度に推定された割合を表している。推定精度が低くなる点は、設置誤差が原因と考えられ、こういった落ち込みはサンプル数を増やしたとしても避けるのは難しいと考えられる。

前述のとおり、音源とマイクロホンとの距離が 1~20 m の範囲では DOA 推定の結果の最頻値が音源とマイクロホンとの真の角度 $\pm 1^\circ$ の範囲に含まれた。またその割合は図 5 に示すように音源とマイクロホンが近いほど高い傾向がみられる。

5.2 屋外環境における位置推定

a) 実験環境

位置推定実験は、地面が $20 \times 20 \text{ cm}^2$ のタイルで敷き詰められている場所で実施した。観測領域を $4 \times 20 \text{ m}^2$ とした。四つのマイクロホンアレイを一辺 0.9 m の正方形の四隅に設置した。それぞれの座標を (0.9, -0.9)、(0.9, 0)、(0, 0)、(0, -0.9) とする。観測領域の四隅の座

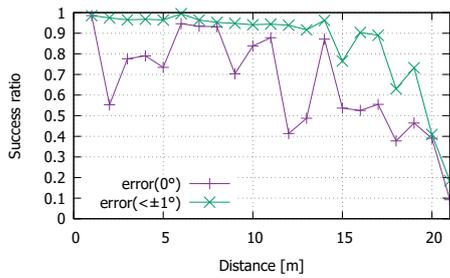


図5 音源-マイクロホン間距離と DOA 推定精度

表1 実験結果 (単位はすべて [m])

音源座標	推定結果	誤差
(0, 4)	(0.02, 4.44)	0.44
(0, 8)	(0.02, 8.28)	0.28
(0, 12)	(0.02, 0.12)	11.88
(0, 16)	(0.02, 0.12)	15.88
(0, 20)	(0.02, 0.12)	19.88
(4, 4)	(2.46, 2.76)	1.98
(4, 8)	(2.33, 5.16)	3.29
(4, 12)	(3.98, 15)	3.00
(4, 16)	(3.98, 20.52)	4.52
(4, 20)	(3.98, 23.64)	3.64

標はそれぞれ (0, 4)、(4, 4)、(0, 20)、(4, 20) であり、観測領域を $4 \times 4 \text{ m}^2$ の正方形で分割した際の格子の交点上に音源を設置した。音源の設定は DOA 推定実験と同様であり、無線ノードは 30 s の間録音を行う。実験環境として、DOA 推定を行った場所と異なり、近隣に建造物が存在している。

b) 実験結果

位置推定結果を表1に示す。位置推定に要した時間はおおよそ1分程度であり、ほとんどが無線ノードによる MUSIC 法の実施に要するものであった。

音源の座標が (0, 4)、(0, 8) の場合のみ位置推定結果の誤差は小さく、それ以外では比較的大きな誤差が見られる。座標 (4, 16)~(4, 20) に音源を設置した際は、DOA の推定結果がほぼ理論値に近い値が得られており、DOA 推定の誤差が位置推定の誤差に影響を与えている。ここでの誤差は、5.1 で述べたように、音源とマイクの距離が比較的離れた際に生じるものである。

一方で、座標 (0, 12)~(0, 20) に音源を設置した場合については誤差が大きく、DOA を調査した所、三つのマイクでは理論値に近い値を推定できているものの、あるマイクでの推定結果のみが理論値から 70° 程離れた結果となっていた。この原因は建造物の反響が考えられるが、解明は今後の課題である。

6. おわりに

本稿ではセンサーノードとマイクロホンアレイを用いた音源位置推定手法の提案と実装を行った。障害物の存在しない環境では、20 m 程度離れた場所から発生した音

声について、誤差 1° 程度の精度で DOA の推定が可能であることが確認できた。一方で、付近に建造物が存在する環境下では DOA の推定結果に誤差が生じ、結果として位置推定に大きな誤差が現れる場合があることを確認した。性能要件について、精度以外を満たすことが確認できたため、今後は、精度の改善を第一目標とし、屋外での使用を考慮したシステムの高速度化や利便性の向上にも取り組む。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費 挑戦的萌芽研究 16K12396 によるものである。ここに記して謝意を表す。

文献

- [1] A. Mutazono, M. Sugano, and M. Murata, "Energy Efficient Self-Organizing Control for Wireless Sensor Networks Inspired by Calling Behavior of Frogs," *Computer Communications*, vol. 35, pp. 661–669, Mar. 2012.
- [2] Z. Zhang, K. Long, J. Wang, and F. Dressler, "On Swarm Intelligence Inspired Self-Organized Networking: Its Bionic Mechanisms, Designing Principles and Optimization Approaches," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, pp. 513–537, 1st Quart 2014.
- [3] M. Cobos, F. Antonacci, A. Alexandridis, A. Mouchtaris, and B. Lee, "A Survey of Sound Source Localization Methods in Wireless Acoustic Sensor Networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2017, 2017.
- [4] Y. Hirano, T. Iwai, D. Kominami, I. Aihara, and M. Murata, "Implementation of a Sound-Source Localization Method for Calling Frog in an Outdoor Environment Using a Wireless Sensor Network," in *Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, pp. 2458–2462, 2016.
- [5] I. Aihara, T. Mizumoto, T. Otsuka, H. Awano, K. Nagira, H. G. Okuno, and K. Aihara, "Spatio-Temporal Dynamics in Collective Frog Choruses Examined by Mathematical Modeling and Field Observations," *Scientific reports*, vol. 4, Jan. 2014.
- [6] A. Griffin, A. Alexandridis, D. Pavlidi, and A. Mouchtaris, "Real-Time Localization of Multiple Audio Sources in a Wireless Acoustic Sensor Network," in *Proceedings of European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp. 306–3100, Sept. 2014.
- [7] R. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, pp. 276–280, Mar. 1986.
- [8] "HARK SaaS." <https://api.hark.jp/web/login>. available at Jan. 2018.
- [9] K. Nakamura, K. Nakadai, and H. G. Okuno, "A Real-Time Super-Resolution Robot Audition System that Improves the Robustness of Simultaneous Speech Recognition," *Advanced Robotics*, vol. 27, no. 12, pp. 933–945, 2013.