

# ニホンアマガエルの合唱情報収集のための位置推定システム

小南 大智<sup>2,a)</sup> 平野 康晴<sup>1</sup> 合原 一究<sup>3,b)</sup> 村田 正幸<sup>1,c)</sup>

**概要:** 我々の研究グループでは生物における自己組織化現象を様々なネットワーク制御手法に応用してきた。これらの手法の目的は、生物の持つ、環境変化に対する頑健性と適応性といった特徴を備えた情報ネットワークの実現である。その取り組みの一つとして、ニホンアマガエルの合唱において個体同士の発声が逆相同期する特徴を、無線通信における送信スケジューリングに応用した。ニホンアマガエルにはこの他にも、同期した合唱やサテライト行動、鳴き声の使い分けといった興味深い特徴があり、現在はこれらの行動のモデリングを行っている。このような生物の行動を解析し、モデル化するためには、発声個体が、いつ、どこで、鳴いたのかを明らかにすることが必要である。そこで我々は、ニホンアマガエルを対象とした音源位置推定手法を提案し、実装を行った。最初に、マイクロホンアレイにより収集した音声を用いることで音声の到来方向 (DOA) を計算し、複数のマイクロホンアレイへの DOA を収集する。得られた DOA を用いる音源位置推定手法により、9 m 四方の領域内の任意の場所にある単一の音源について、22 cm 以下の推定誤差で位置推定が可能であることを示した。

## Localization system for analyzing chorus of Japanese tree frogs

KOMINAMI DAICHI<sup>2,a)</sup> HIRANO YASUHARU<sup>1</sup> AIHARA IKKYU<sup>3,b)</sup> MURATA MASAYUKI<sup>1,c)</sup>

### 1. はじめに

高い拡張性や適応性をもつネットワーク制御を実現するために、生物の振る舞いに着想を得た技術が注目されている [1]。絶え間なく起こる環境の変化に対して追従、適応する生物の振る舞いの特徴の一つが自己組織化であり、各個体は周辺の個体と相互作用を及ぼしつつも利己的な振る舞いをする中で、結果的に群れ全体として何らかの協調的な現象を創発する。中でも我々は、ニホンアマガエル (以降、単にカエルとも表記する) の持つ興味深い生態に着目している。

カエルは多くの種でオスがメスを引き寄せるために鳴き声を発する。このようなカエルの鳴き声は広告音と呼ばれる。広告音には、メスの獲得以外にも、オス同士が縄張りを主張しあう役割がある [2]。ニホンアマガエルには、その広告音に関する様々な特徴がある。一つは、短時間ス



(a) 短いタイムスケール



(b) 長いタイムスケール

図 1 ニホンアマガエルの合唱ダイナミクス

ケールかつ比較的小数のカエルに着目した際に現れる、鳴き声の逆相同期である (図 1(a)) [3]。カエルのオスがメスに自身の位置を知らせるために鳴き声を発することは前述のとおりであるが、その際、複数のオスが同時に広告音を発してしまうと、メスは広告音をどの個体が発したか聞き分けづらい。そのため、ニホンアマガエルのオスはその鳴き声を逆相同期させる特性を持つと考えられている。また、オス同士のコミュニケーションにおいては、互いの縄張りを主張するものでもある。鳴き声を逆相同期させるこ

<sup>1</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科  
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan  
<sup>2</sup> 大阪大学 大学院経済学研究科  
1-7 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan  
<sup>3</sup> 筑波大学 システム情報工学研究科  
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577 Japan  
a) d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp  
b) aihara@cs.tsukuba.ac.jp  
c) murata@ist.osaka-u.ac.jp

とは、縄張りを主張する面でも有用である。もう一つは、長時間スケールかつ群れとしてカエルに着目した際に現れる、合唱の同期性である。カエルは多くの個体が広告音を発することで合唱を行う。これは鳴くことにより生じる、ヘビをはじめとした天敵に狙われるリスクを分散させるためと考えられている。この際、多くの個体が鳴く合唱状態と、すべての個体が鳴きやむ休止状態とを遷移する特徴が見られる (図 1(b))。休止状態中にいずれかの個体が鳴き始めると、他の個体もつられたように鳴き始めて合唱状態となり、数分間鳴き続けたのち再び休止状態に戻る。

これらの特性は、ニホンアマガエルの合唱を解析することによって明らかにされてきた [4]。文献 [5] では、ニホンアマガエルをはじめとした、様々なカエルの鳴き声と位置を記録、解析するシステムを提案している。このシステムでは、特定周波数の音圧値が一定以上になると LED が発光するデバイスを多数を使用する。このデバイスをカエルがいるフィールドに一定間隔で配置し、その発光の様子をビデオカメラで撮影、映像を解析することでカエルの位置と鳴き声を記録する。設置間隔に応じた精度で位置と鳴き声の関係を取得することが可能である一方で、カエルの生息する付近にデバイスを比較的密に配置しなければならない、カメラで録画可能な範囲しか記録することができないなどの課題を持っている。そのため我々は、設置の制約が少なく、より広範囲をカバーできる音源位置推定システムの構築を目指している。音を利用した位置推定技術は、他の生物の調査にも有用であり、また、ロボット聴覚など他分野でも注目されている。

我々はこれらのニホンアマガエルの持つ生態を無線センサーネットワークに応用した、自律分散型のネットワーク制御の実現を検討している。特に、ニホンアマガエルによる、逆相同期した広告音の発声と同期した合唱が、無線センサーネットワークの通信スケジューリングに有用であると考えている。そのためには、カエルの合唱の詳細なモデル化が必要であり、どの個体がいづ、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、カエル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。従来の位置推定技術は、観測対象が発信機や受信機を備えていることを前提としたものが多く、生物の位置推定においては観測対象に発信器や受信器といった観測機器をあらかじめ装着することが難しい。そのため、観測対象が出力する情報を用いた位置推定を行う必要がある。カエルの鳴き声は大きく、一度鳴き始めると移動せずに一定の周期で数十秒～数分間鳴き続けることが知られている [6]。このような習性から、本稿ではカエルの発声音を対象に、数分程度で音源の位置を推定可能なシステムの提案・実装を行う。

## 2. ニホンアマガエルの位置推定

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 (図 2)。ニホンアマガエルは春の繁殖期に水田や池などの止水域に集まる。繁殖期は夕方から 0 時頃までの間、広告音と呼ばれる、オスがメスに自分の



図 2 田んぼの畔で鳴くニホンアマガエル

存在を知らせる鳴き声を発する。多くのカエルは、1 匹のカエルが鳴きだすと、それに合わせて鳴き始める (合唱)。その際、互いに近くにいる少数のカエル同士は、それぞれが同時に鳴かないように逆相同期して鳴くことが知られている [3]。また、ニホンアマガエルは鳴いている間は移動をせず、一度合唱を始めると、5 分以上合唱を続けることも多い。

本稿では、カエルが生息し、活発に鳴いている環境として春の田んぼを想定する。田んぼ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ことが多く、田んぼには水が張られている。田んぼの畔はぬかるんでいる上に平坦な部分は少ない。そのため、小さく軽い機器を用いることが望ましい。単一の田んぼを観測領域とし、棚田等、複数の田んぼ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、機器は同一平面上に設置する。カエルは逆相同期して発声する性質があるが、まれに複数のカエルが同時に鳴くことがあるため、複数音源を対象とした位置推定について考慮する必要がある。また、極端に近い位置に複数個体がいる際、鳴くのは一匹である性質から、誤差が 50 cm 程度で推定できれば十分に個体識別が可能だと考えられる。

ニホンアマガエルの位置推定を行う既存のシステムとして、音声可視化装置であるカエルホタル [7] を用いたものがある。カエルホタルは、個々のカエルの発声タイミングおよび空間配置を計測するために作成された装置であり、マイクロホン・LED などから構成される電子回路である。動作としては、周囲で鳴った音の、特定周波数における音量に応じた輝度で LED が明滅する。カエルホタルを観測領域に配置し、その映像を録画することで、計測を行うことができる。カエルホタルを利用した位置推定システムは非常に直観的であり、位置推定精度も台数を増やすことで高くすることができる。一方で野外環境において課題となるのは、その敷設である。様々な障害物や天候、地形等の要因があるため、想定通りに機器を配置することは必ずしも保証できず、数十台の機器を敷設する準備コストも大きい。また、台数が増えると機器調整のコストも増え、例えば、着目する周波数帯を設定するための可変抵抗の調整には時間を要する。

機器の設置コストや、調整コストを考慮すると、少数の機器によるシステムであること、機器の設置位置にある程度の自由がきくこと、機器の調整を容易に行えること、正

確にカエルの位置を把握できることがシステムに求められる要件といえる。これらを満足するために、マイクロホンアレイと無線ネットワークを組み合わせたシステムを提案する。マイクロホンアレイを用いることで、音源から発生する音の到来方向 (direction of arrival; DOA) を比較的正確に推定することが可能であり、複数のマイクロホンアレイにより取得した DOA を無線通信により計算機に収集し、計算機によって位置推定を行う。無線ネットワークでは端末同士が互いに無線通信範囲に存在すれば互いに通信を行えるため、敷設のコストが軽減される。

実環境での運用を考えると、既存の音源位置推定手法で前提とする、マイクロホンアレイつき無線端末 (端末) の理想的な配置についても、困難な状況が起こりうる。特に、既存手法では、端末で囲まれた範囲内に音源があることが前提とされることが多いが、必ずしも、この前提を満たすことができるとは限らない。また、観測範囲を囲むような配置が可能であったとしても、屋外では端末の自己位置を正確に得ることが困難である点、音源からの距離が離れていると、全ての端末がその音源の DOA を取得できるとは限らない点が問題となる。そこで我々は、端末同士を比較的近い位置に設置し、それらが囲む範囲の外に音源がある場合を対象として位置推定を行う。

### 3. 位置推定手法と実装

音源位置を推定する手法のうち、比較の実用的なものは大きく二つに大別できる。一つは TDOA (Time Difference of Arrival) を用いた手法、もう一つは DOA (Direction of Arrival) を用いた手法である [8]。TDOA とは、任意の二つのマイクロホンにおける音の到着時間差である。この到着時間差から、焦点をマイクロホンの位置、距離差を (到着時間差 × 音速) とした双曲線が得られる。どちらのマイクロホンに先に音が届いたのかが分かるため、双曲線のうち一本は無視して良い。音源は、残った曲線の交点に存在すると推定できる。DOA は、音声の到着角を示すものであり、複数のマイクロホンアレイが得た DOA を元に引いた半直線の交点を得ることで、音源位置を推定することができる。

これらの手法はいずれも、曲線、あるいは直線の交点を求めることで推定位置を得る。しかし、様々なノイズの影響により、これらの線は誤差を含んでおり、必ずしもすべての線の交わる点が見られるとは限らない。また、音源が複数ある場合、観測された音声かどの音源からのものか判断できない問題もある。文献 [9] では DOA を利用した、複数音源に対する位置推定手法を提案している。文献 [9] では、観測範囲をグリッド状に分割し、各マイクロホンアレイから音源に向かう角度と、各マイクロホンアレイから各グリッド内のセルの中心へ向かう角度との差を調べることで位置推定を行う。この手法について、次節で詳細を述べる。

#### 3.1 グリッド分割を用いた位置推定手法

前述の通り、文献 [9] では観測範囲を  $N$  個のセルを持つ

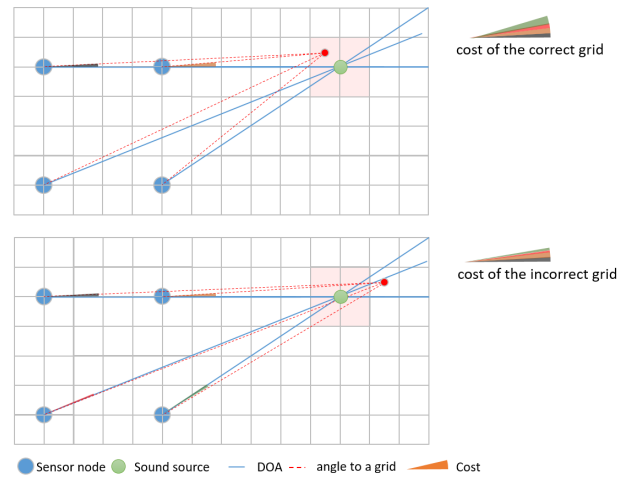


図 3 角距離を用いた推定が誤る場合

グリッドに分割し、音源を含むセルを探索する。二つの角度  $(X, Y)$  の角距離  $A(X, Y)$  を式 (1) のように定義し、全てのマイクロホンについて、音源となす角、グリッドの中心となす角の角距離の二乗を計算し、その総和  $C$  が最も小さいセルを推定結果とする。

$$A(X, Y) = 2 \sin^{-1} \frac{|\exp(jX) - \exp(jY)|}{2} \quad (1)$$

この手法の精度はセルのサイズに依存し、セルを細かくするほど高精度となるが、計算量が増加する。計算量を抑えるため、はじめは大きなセルサイズを用いて位置推定を行い、推定結果として得られた範囲をより細かいサイズのセルに分割して、位置推定を行う再帰的手法を提案している。

複数音源の場合、各端末で収集した DOA がどの音源からのものか判断できない。この問題を解決するために、以下の手順で推定を行う。ただし、音源個数  $S$  は、各端末が検知した DOA の内、最大の値とする。

- (1) 端末数を  $M$ 、端末  $i$  で計測した DOA を  $K_i$  とするとき、各端末から一つずつ DOA を選択する際の組み合わせ数は  $\prod_{i=1}^M K_i$  であり、その DOA 組の集合  $J$  を得る
- (2) すべての  $j (j \in J)$  について、コスト  $C$  を計算し、最小のコストを持つ DOA の組み合わせ  $j^*$  を選び、音源の位置として、 $j^*$  によって求まるセルを選択する
- (3)  $J$  から、先ほど選んだ  $j^*$  に含まれる DOA を含む DOA 組を全て除く

(4) (2)~(4)、を  $S$  個の推定結果が得られるまで繰り返す  
 この手法を、端末で囲まれた範囲外に拡張する場合、推定誤差が増加する。これは、端末で囲まれた範囲内であれば、音源に近いセルほど角距離が小さくなることが保証されるが、その範囲外ではこの保証が無いためである (図 3)。前述の再帰的手法を用いること無く、初めからより細かい粒度のセルを用いて推定を行えば、上記の保証が満たされる確率が高くなるが、計算量が非常に大きくなり、実時間内での推定は困難である。

#### 3.2 提案手法

提案手法の基本的なアイデアは、端末間の距離を小さく



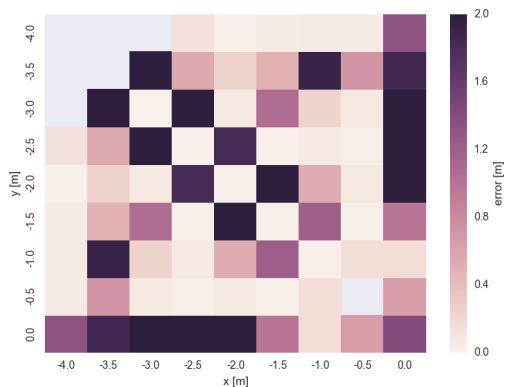


図 4 グリッド分割を用いた位置推定手法による推定結果

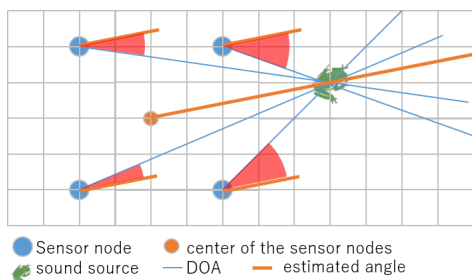


図 5 到着角の推定

することで、それぞれの端末で音を取得できる領域を重複させることである。これにより、各端末で得られた DOA の交点上に音源が存在する可能性が高くなる。また、近年では QZSS により、GPS でも高い精度 (10 cm オーダ) で位置情報が得られることが話題になっているが、GPS を搭載していない場合には屋外で得ることの難しい端末の自己位置も、本手法では容易に計測できる。しかしながら、既存手法の多くは、端末によって囲まれた範囲内に音源があることを前提としており、その範囲外に音源が存在することは考慮されていない。実際に文献 [9] の手法を用いて、一辺 1 m の正方形の各頂点に四端末を設置し、端末に囲まれる範囲外について位置推定を行った結果が図 4 である。図の詳細については次章で述べるが、音源から得られた DOA が正確な場合においても、最大で 2.0 m 程度の誤差を含んでいることが示されている。

3.1 の最後に述べた通り、セルをより細かくすることで、式 (1) で定義される角距離が小さいセルほど、音源に近くなる。その一方で計算量が増加することが問題となる。そこで、グリッド分割を行う前に、音源の存在する方向を推定することで、探索するセル数を削減する。図 5 に示すように、音源の方向を推定するために、各端末の重心座標を  $g$  とし、各端末から得た DOA と、 $g$  を始点とした角度  $x$  の半直線との角距離の二乗和を求める。この総和が最も小さい方向を推定角とする。

$x$  の粒度を小さくするほど計算量が増加するため、はじめは  $\pi/4$  等の粗い粒度で  $x$  を推定し、その後、より細かい粒度で推定する再帰的な方法を用いる。

次に、 $g$  から推定角方向へ引いた半直線と交わるセルを求める。セルの個数を  $N$  とすると、探索するセルの数は



図 6 Raspberry pi 2 B+ と TAMAGO-03

高々  $\sqrt{N}$  個である。その各セルに対して、文献 [9] で定義されている角距離の二乗和を計算し、最もその和が小さいセルの中心座標を推定結果とする。複数音源を考慮する場合は、到着角の推定について、文献 [9] と同様に、集合  $J$  を求め、 $S$  個の到着角を求める。その後のセルの決定は上記の方法により行う。

## 4. 性能評価

### 4.1 使用する機器とシステム構成

システムを構成する機器として、無線通信端末、マイクロホンアレイ、位置推定を行う計算機がある。我々が実装したシステムでは、無線通信端末として、Raspberry-Pi 2 を、マイクロホンアレイとして、8 チャンネルのマイクロホンを持つ TAMAGO-03 (System in Frontier Inc.) (図 6) を、位置推定用の計算機としてワークステーション (Xeon E5-2600, 16GB RAM) を用いた。

マイクロホンアレイによって得た音声に対する DOA の取得について、我々の実装においては、MUSIC 法 [10] を用いている。MUSIC 法は、信号の空間相関行列の固有ベクトルが持つ性質を用いて、マイクロホンアレイに届いた音の到着角を得る手法である。MUSIC 法では、空間の音声の伝達特性を示すステアリングベクトルが必要であり、実験前に、このステアリングベクトルを一定角度ごとに取得しておく必要がある。TAMAGO-03 用のステアリングベクトルは、Honda Research Institute Japan Audition for Robots with Kyoto University (HARK) [11] から取得できるものを利用しており、角度の粒度は  $\pi/36$  である。

### 4.2 評価環境

四つの端末を正方形領域の頂点上に配置する。正方形の一辺として、0.5 m と 1.0 m の二つの場合を評価する。ここで、各マイクロホンアレイが音声を観測可能な範囲

表 1 単一音源の位置を推定した際の誤差 (計測誤差無し)

設置間隔 [m]	0.5	1.0
平均誤差 [m]	0.173	0.177
RMSE [m]	0.251	0.223

を 5.0 m と設定しており、全てのマイクロホンアレイから DOA を得ることができた場合のみ、位置推定の実行が可能とする。四端末の中心座標を原点とし、四端末がなす正方形の辺が、x 軸あるいは y 軸と平行になるよう設置する。予備実験として、マイクロホンアレイから 5.0 m 程度離れた位置にスピーカーを設置し、流した音声について Raspberry Pi 上で MUSIC 法により角度を計算した。0.5 秒の音声を用いた推定に 30 秒程度の時間を要し、誤差無く正しい角度が得られた。ただし、以下の評価では、角度の計測結果に誤差がない場合、ある場合のそれぞれについてシミュレーションを行った。DOA 計測に誤差を含む場合として、正しい角度に対して正規分布に従う誤差  $e$  を追加した。ここで、ステアリングベクトルにおける角度の粒度が  $\pi/36$  であるため、 $e$  は以下で与えることとした。ただし、 $N(0, 1)$  は平均 0、分散 1 の正規分布である。

$$e = \frac{\pi}{36} * [r + 0.5], \quad r \sim N(0, 1) \quad (2)$$

#### 4.3 評価結果

本節に評価結果を示す。対頂角が  $(-9, -9)$ ,  $(0, 0)$  である正方形領域を観測範囲とし、観測範囲全体を、一辺 0.5 m のセルに分割し、格子の各交点上に音源を配置する。各音源について、一つずつ音を発生させ、それぞれの場合について位置推定を行った。観測領域については、対称性を考慮して単一の象限のみを対象とした。

位置推定における、探索セルの一辺の長さは 0.2 m としている。図 7 に各音源位置に対する推定誤差を示す。x, y はそれぞれ座標を示し、各座標での色の濃さによって誤差の値を示している。また、表 1 に、図 7 における各セルでの誤差の平均と平均二乗誤差 (RMSE) を示している。平均二乗誤差は、真の位置と推定位置との距離について二乗平均を計算し、その平方を取った値である。

前章で示した、グリッド分割を用いた位置推定手法の結果 (図 4) と比較して、図 7 に示す提案手法では推定誤差がより抑えられている。図におけるグレーで示すセルは、マイクロホンアレイの音声観測可能範囲の制限により、複数のマイクロホンアレイからの DOA が得られない領域である。マイクロホンアレイ間の距離が短いほど、観測可能範囲が重複するため、結果的に推定結果が得られる範囲も広がる。一方で、誤差のばらつきについてはマイクロホンアレイ間の距離が長いほうが抑えられている。精度に関しては、両結果において、マイクロホンアレイからの距離が離れるほど、大きな誤差を含む可能性が高いことが分かる。また、平均誤差は 20 cm 以下であり、システムに求めた要件を十分満たしている。実行時間に関しては一度の推定で 30 秒程度であり、要件を満たしていると言える。

図 8 では、DOA の計測に誤差  $e$  を含む場合の結果を示している。また、表 2 に、図 8 における各セルでの誤差の

表 2 単一音源の位置を推定した際の誤差 (計測誤差あり)

設置間隔 [m]	0.5	1.0
平均誤差 [m]	0.40	0.213
RMSE [m]	1.701	0.972

平均と RMSE を示している。DOA の計測に誤差を含む場合については、各セルについて 30 回の計測と位置推定を行い、得られた 30 個の推定結果の重心を最終的な推定位置としている。

DOA の計測誤差が無い場合と比較すると、推定誤差は増加している。しかしながら、複数回の推定結果の重心を取ることで、DOA の計測に誤差を含んでいたとしても、誤差のない場合に近い精度で音源の位置を推定することができている。DOA に誤差の無い場合と異なり、マイクロホンアレイ間の距離が長いほど、平均誤差が抑えられていることが分かる。マイクロホンアレイ間の距離が短いほど、角距離の二乗和に基づくセルの探索において、最小値に近い値を持つセルの数が増加するため、誤差に対する耐性が低い。一方で、マイクロホンアレイ間の距離を長くすると、位置推定が可能な領域が減少する。想定環境や要件に応じて、マイクロホンアレイ間の距離は適切に決定する必要がある。誤差の値については、設置間隔を 1.0 m としたときには平均で 21.3 cm であり、システムに求めた要件を十分満たしているといえる。実行時間に関しては、各セルに音源がある場合について 30 回の計算を行っており、およそ 15 分を要することとなる。この点の改善は今後の課題であり、DOA の計測誤差と、要求される推定精度に応じて、適切な回数の位置推定を行う必要がある。

#### 5. おわりに

本稿では、マイクロホンアレイを無線通信機器によって接続した音源位置推定システムを提案し、その性能を評価した。既存の手法では推定が困難な領域に音源がある場合にも、DOA の計測に誤差のない場合は 20 cm 以下の誤差で音源の位置を推定することができた。この推定に要する時間は一分程度である。また、DOA の計測に誤差を含む場合についても、22 cm 以下の誤差で音源の位置を推定することができた。ただし、この際推定に要する時間は 10 分以上であり、システムのさらなる改善が必要であると考えている。

ページの都合上掲載できなかったが、複数の音源が存在する場合についても我々の提案手法は対応可能であることを確認できている。ただし、音源位置を推定するために要する時間が非常に大きいことも確認している。今後の課題は、リアルタイム性を向上すること、及び、実環境での位置推定結果を示し、提案したシステムの実用可能性を示すことである。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費挑戦的萌芽研究 3380000 によるものである。ここに記して謝意を表す。

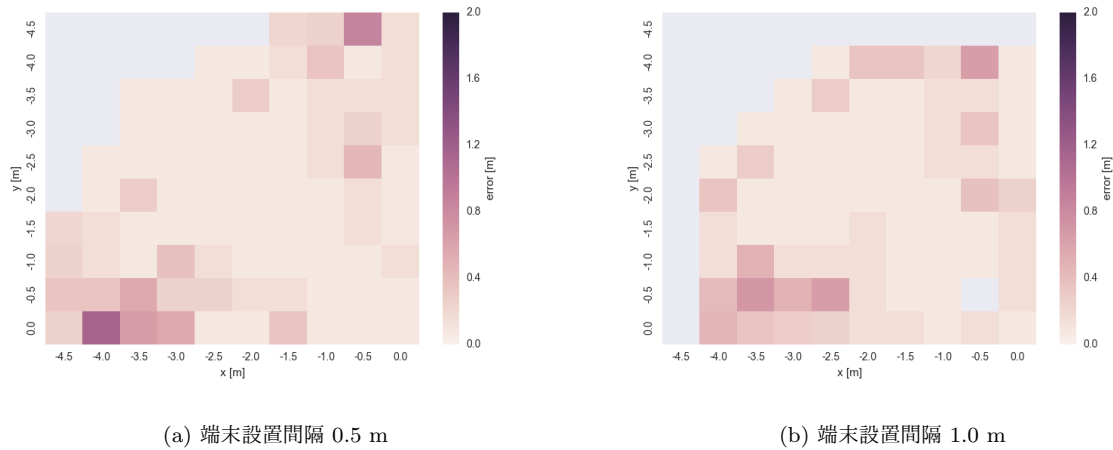


図 7 単一音源の位置を推定した際の誤差 (計測誤差無し)

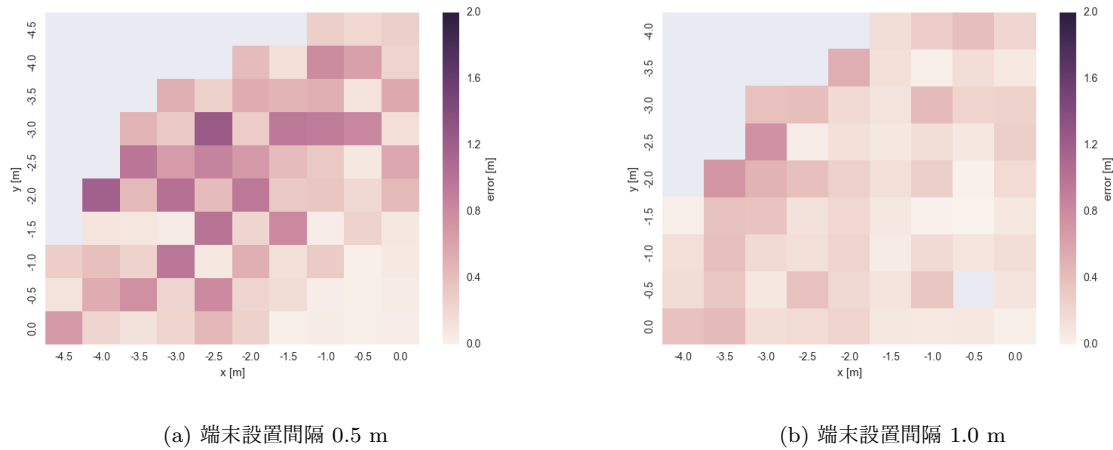


図 8 単一音源の位置を推定した際の誤差 (計測誤差あり)

参考文献

[1] Kitano, H.: Biological robustness, *Nature Reviews Genetics*, Vol. 5, No. 11, pp. 826–837 (2004).

[2] Wells, K. D.: *The ecology and behavior of amphibians*, University of Chicago Press (2010).

[3] Aihara, I., Mizumoto, T., Otsuka, T., Awano, H., Nagira, K., Okuno, H. G. and Aihara, K.: Spatio-temporal dynamics in collective frog choruses examined by mathematical modeling and field observations, *Scientific reports*, Vol. 4, No. 3891, pp. 1–8 (2014).

[4] Aihara, I., Kominami, D., Hirano, Y. and Murata, M.: Autonomous distributed control methods for wireless sensor networks based on nonlinear dynamics of frog choruses, *Technical Report of IEICE (IN2016-155)*, Vol. 116, No. 485, pp. 347–352 (2017).

[5] Mizumoto, T., Aihara, I., Otsuka, T., Takeda, R., Aihara, K. and Okuno, H. G.: Sound imaging of nocturnal animal calls in their natural habitat, *Journal of Comparative Physiology A*, Vol. 197, No. 9, pp. 915–921 (2011).

[6] 前田 憲男, 松井 正文: 日本カエル図鑑, 文一総合出版 (1999).

[7] 合原 一究, 粟野 皓光, 水本 武志, 坂東 宜昭, 大塚 琢馬, 柳楽 浩平, 奥乃博: 振動子モデルと音声可視化システムを用いたアマガエルの合唱法則の解析, 人工知能学会研究会資料 (SIG-Challenge-B303-09) (2014).

[8] Saric, Z. M., Kukulj, D. D. and Teslic, N. D.: Acoustic source localization in wireless sensor network, *Circuits, Systems and Signal Processing*, Vol. 29, No. 5, pp. 837–856 (2010).

[9] Griffin, A., Alexandridis, A., Pavlidi, D. and Mouchtaris, A.: Real-time localization of multiple audio sources in a wireless acoustic sensor network, *Proceedings of the 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp. 306–310 (2014).

[10] Schmidt, R.: Multiple emitter location and signal parameter estimation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 34, No. 3, pp. 276 – 280 (1986).

[11] HARK: <http://www.hark.jp/wiki.cgi>.