



### 研究背景

- 生物の生態のモデル化と情報通信分野への応用
  - カエルの独特な習性
    - 鳴き声の逆同期<sup>[1]</sup>
    - 合唱の周期性
    - 異なる鳴き声の使い分け
- カエルが鳴き声により行うコミュニケーションのモデル化
  - いつ、どこで、どの個体が鳴き声を発したかを知ることが重要

↓

**カエルのコミュニケーションの記録のための  
位置推定システムを実装する**

[1] D. Sutarso, "A bio-inspired TDMA scheduling algorithm for underwater robotic swarms", in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2013

### 観測対象の特徴とシステム目標

- ニホンアマガエル
  - 体長：22 mm ~ 45 mm
  - 生態：夜行性で湿気を好む
    - 水田等浅い止水域に生息
    - 水田の畔と水面との境界で、個体同士が1 m 程度の間隔をあけて鳴く習性
      - 鳴いている数分間は移動しない
      - 一回の広告音は 0.1~0.2 [s]
      - 基本周波数は約 2,000 [Hz]

野外にて目視や映像解析で  
アマガエルの位置を特定することは困難

↓

カエルの鳴き声を利用した位置推定システムを構築  
(誤差 50 cm以内・推定時間 5 分以内を目標)

### 研究目的とアプローチ

- 野外環境における高精度な音源位置推定の実現
  - 野外環境における課題
    - 様々なノイズ音
    - 機器携行および敷設の難しさ
- 音声到来方向を用いた位置推定手法の提案と実装
  - マイクロホンアレイを利用
    - 複数のマイクロホンからなるマイクロホンアレイを利用することで、ノイズに強く高い精度での音声到来方向推定が可能
  - 機器間の接続に無線ネットワークを利用
    - 機器の携行・敷設が容易になる
  - 複数のマイクロホンアレイによって囲まれる領域の外側を高精度に推定可能な方式を提案
    - マイクロホンアレイ間の距離をより短く設定できるため、自己位置推定が不要、かつ、各マイクロホンアレイによって観測できる範囲が重複しやすくなる

### 音声到来方向推定と音源位置推定

- マイクロホンアレイによる音声到来方向 (DOA) の推定
  - MUSIC (multiple signal classification) 法<sup>[2]</sup>
    - マイクロホンの信号伝達特性と観測音声から音源到来方向を推定
- 推定された DOA を収集し、交点を推定位置とする

- 種々の誤差により、DOA の交点は一点に定まらない

↓

誤差を考慮した様々な位置推定手法が提案されている

[2] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 34, 1986.

### Grid-based method<sup>[3]</sup>

- DOA を利用した高精度・高速な位置推定手法
  - 観測領域を格子に分割し、計測した DOA を基に各格子のコストを計算し、音源が存在する格子を推定

- 位置推定対象範囲を  $N \times N$  個の正方形 (格子) に分割
- マイクロホンから各格子の中心へ向かう角度  $\varphi$  と計測した DOA  $\hat{\theta}$  との角距離  $A(\hat{\theta}, \varphi)$  を用いて定義したコスト関数  $\sum_{m=1}^M [A(\hat{\theta}_m, \varphi_{m,n})]^2$  が最小となる格子を探索
2. で得られた格子の辺長が閾値よりも大きい場合は、その格子を位置推定対象範囲に設定し、1. に戻る。閾値よりも小さい場合は格子の中心を推定位置とする。

- $A(X, Y) = 2 \sin^{-1}(\frac{\exp(jX) - \exp(jY)}{2})$
- $\hat{\theta}_m$  : マイクロホンアレイ  $m$  が計測した DOA
- $\varphi_{m,n}$  : マイクロホンアレイ  $m$  から格子  $n$  の中心へ向かう線分のなす角度
- $M$  : マイクロホンアレイの個数

[3] A. Griffin, A. Alexandridis, D. Pavlidis, 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. 206-2100, Sept. 2014.

### 提案する位置推定手法

7

■ Grid-base method の拡張

- 屋外環境で Grid-base method を用いる際の問題
  - 音源を囲むようなマイクロホンアレイの設置が必須
  - マイクロホンアレイで囲まれた領域内に限定した位置推定
- 観測領域をマイクロホンアレイで囲まれた範囲外に拡張
  - 利点: マイクロホン間距離を小さくできるため、
    - 設置が容易になる
    - マイクロホンが自己位置推定を行う必要がない
    - 各マイクロホンの集音領域の重複面積が増加する
  - 欠点: 各マイクロホンが得る DOA が互いに近い値となるため、
    - 格子が大きいと推定誤差が生じやすいため再帰的な探索だと精度が悪化

### 探索する格子数の削減

8

■ 探索する格子数の削減方法

- マイクロホンアレイの重心からの角度  $i$  と、計測した DOA  $\hat{\theta}$  との角距離  $A(\hat{\theta}, i)$  を用いて定義したコスト関数  $\sum_{m=1}^M [A(\hat{\theta}_m, i)]^2$  が最小となる角度  $i^*$  を計算
- マイクロホンアレイの重心から角度  $i^*$  の方向に向かう半直線と交わる格子集合  $P$  を導出

■  $P$  に含まれる格子に関して grid-based method と同じコスト関数を計算し、コストが最小の格子の中心を推定結果として出力

### 実装するシステムの概要

9

■ 無線ノード

- 音声のサンプリングを行い、DOA を推定
- DOA 推定結果を位置推定用サーバへ送信

■ 位置推定用サーバ

- 全結果受信後、推定位置を計算
- 推定結果の座標を出力

4. 結果出力

座標: (4, 12)  
推定座標: (3.8, 10.5)  
観測領域

無線ノード

位置推定用サーバ

1. サンプリングし DOA 推定  
2. DOA を送信  
3. 位置計算

全ての機器はアドホックネットワークにより相互接続

### 実装に使用する機器

10

■ 無線ノード

- Raspberry Pi 3 Model B

■ マイクロホンアレイ

- TAMAGO-03
  - チャンネル数: 8
  - サンプリング周波数: 16 kHz
  - AD コンバータ: 24 bit

■ 位置推定用サーバ

- Panasonic Let's note CF-SX1

機器の基本的なスペック

項目	Raspberry Pi 3 Model B	Panasonic Let's note CF-SX1
クロック周波数	1.2 GHz, 4コア	1.9 GHz, 2コア
RAM	1 GB	8 GB

無線ノードとマイクロホンアレイ

### 無線ノードの動作と実装

11

動作フロー

時刻同期

観音音声の wav ファイルへの出力

DOA 推定

推定結果の送信

実装方法

- 位置推定用サーバと ntp を用いて時刻同期 (クライアント)
- 全ノードが同時に、T 秒の間、音声を 8 チャンネル・16 kHz で 24 bit サンプリングし、wav 形式で保存
- カエルの鳴き声が含まれると考えられる 0.5 s 毎に DOA を推定
  - 音圧値の二乗和が閾値未満の場合はノイズと判断してスキップ
  - MUSIC<sup>(2)</sup> を用いた DOA 推定を実施
    - カエルの鳴き声の基本周波数を含む 1500 ~ 5000 Hz の周波数帯のみを利用
    - 推定結果の粒度は 1° 刻み
- DOA 推定結果を位置推定用サーバに送信

### 位置推定用サーバの動作と実装

12

動作フロー

時刻同期

DOA 推定結果の取得

位置推定の実行


推定結果の送信

実装方法

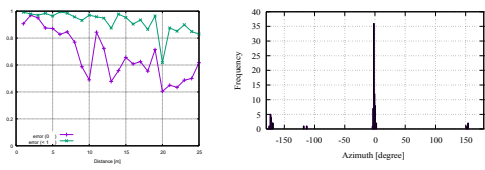
- 無線ノードと ntp を用いて時刻同期 (サーバ)
- 無線ノードから DOA 推定結果を受信
  - 各無線ノードから得られた DOA 推定結果には外れ値が含まれる場合があるため、最頻値を次の位置推定に渡す
- 提案した音源位置推定手法の実行
  - マイクロホンアレイ・観測領域の座標は所与とする
  - 格子の分割数は要求精度に合わせて事前に設定する (本発表では  $N = 100$  に設定)
- 推定結果として得られた座標を出力

### 屋外環境における DOA 推定実験 13

- マイクロホンアレイの DOA 推定可能領域の調査
  - 音源とマイクロホン間の距離と正しく DOA 推定できた割合を評価
- 実験方法
  - 周囲に障害物のないグラウンドで実施
  - スピーカーとマイクロホン間の距離を 1 m ~ 25 m の間で 1 m ずつ変化させ、DOA を推定
  - DOA 推定は 0.5 s 毎に行い、推定結果が真の値 (0°) と一致、または誤差が 1° 以内となる割合を調査
  - 音源として、二ホンアマガエルの広告音を使用し、それぞれの位置で 2 分間録音



### DOA 推定実験結果 14

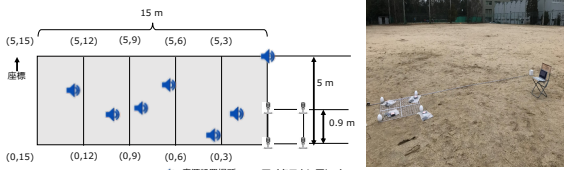


音源-マイクロホン間距離とDOA推定精度 20 m の時のヒストグラム

- ほぼ全ての音源位置において 80% 以上の割合で推定誤差が 1° 以内
- 20 m のみ 80% 未満であるが、それでも 60% 以上
- 本実験環境では、音源とマイクロホン間が 25 m 以内であれば推定結果の最頻値により誤差 1° 以内の精度で DOA が得られる

### 屋外環境における位置推定実験 15

- 実装したシステムの推定精度と計算時間を調査
- 実験方法
  - 周囲に障害物のないグラウンドで実施
  - 下図の位置にマイクロホンアレイと音源を設置
    - 音源座標はレーザー測距計を用いた三点測量で測定
  - 各音源について 30 秒録音して位置を推定



### 位置推定実験結果 16

音源位置	推定結果	誤差 [m]
(5,0)	(4.975,0.075)	0.079
(2.259,2.474)	(1.975,2.175)	0.412
(0.888,3.130)	(0.975,3.225)	0.128
(3.328,6.786)	(3.225,6.075)	0.718
(1.229,8.324)	(1.875,9.825)	1.634
(2.829,10.235)	(3.625,11.925)	1.867
(2.885,12.922)	(3.725,13.575)	1.064

- 推定精度
  - 平均誤差 0.84 m, 最大誤差 1.87 m, 最小誤差 7.9 cm
  - 目標精度に届かなかった点では、DOA 誤差が大きくなり生じている
- 計算時間
  - 各点の位置推定に約 1 分
  - ほとんどが DOA の推定に要した時間

### まとめと今後の課題 17

- まとめ
  - 無線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
  - 実装した機器を用いた位置推定実験により、最小 7.9 cm の誤差で位置を推定できることを示した
    - 一方、最大誤差は 1.87 m で、平均は 0.84 m であった
    - 精度の向上が必要だが、計算時間は目標を達成
- 今後の課題
  - 位置推定システムの性能向上
    - 位置推定精度の向上
    - 位置推定の高速化
    - 野外環境での利用を想定した利便性の向上
  - 実際の野外環境における実験