

特別研究報告

題目

無線センサーネットワークを用いた
野外環境における生物の発声位置推定システムの実装

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

平野 康晴

平成 27 年 2 月 13 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

無線センサーネットワークを用いた
野外環境における生物の発声位置推定システムの実装

平野 康晴

内容梗概

様々な生物について、そのマイクロあるいはマクロな振る舞いを観察、解析することで得られた振る舞いの数理モデルが、情報科学の分野で応用されている。このような学際的な研究が進展する背景には、生命現象の数理モデル化に関する数理生物学の研究が盛んに行われてきたことがある。生物の振る舞いの中でも、特に個体間のコミュニケーションが組織化され、集団としての振る舞いを創発するようなものは群知能と呼ばれ、特にネットワーク制御へ応用した研究も多くなされている。生物のコミュニケーションの振る舞いを知るためには、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となる。しかしながら、生物の多くは野外環境に生息し、中にはその発見自体が非常に困難なものもある。こうした中、従来用いられている位置推定技術の多くは観測対象が発信機や受信機を備えた状況を想定しており、生物を対象とした位置推定には適用できない。このような観測対象に発信機や受信機を備えることのできない状況での位置推定方法として、カメラによって生物の姿を捉えた画像情報を用いる方法や、マイクロホンによって生物の発する音（鳴き声や、移動の際に生じる音）を捉えた音声情報を用いる方法が考えられる。本報告では、ネットワーク制御への応用を考えている、カエルの動作メカニズムを調査するために、カエルを観測対象としその鳴き声を利用した位置推定システムを実装する。実装するシステムは、実環境での運用を想定し、無線センサーノードとマイクロホンを用いて実装する。音源位置推定手法としてこれまでに様々な方法が研究されているものの、それらのほとんどがシミュレーションベースの評価を行っているものである。そこで本報告では、実機を用いた実験により、実環境下における音源位置推定システムを構築する際の様々な問題を明らかにする。低ノイズ、低反響環境において、単一のアマガエル音源を用いた位置推定実験により、実装したシステムの位置推定誤差は $2 \text{ [m]} \times 2 \text{ [m]}$ のフィールドにおいて、最良の場合 12 cm 程度であることを示した。

主な用語

音源位置推定, 無線センサーネットワーク, 実装, 到着時間差, ニホンアマガエル

目次

| | | |
|-----|------------------------------|----|
| 1 | はじめに | 5 |
| 2 | 観測対象と位置推定システム要件 | 8 |
| 2.1 | ニホンアマガエルの生態的特徴 | 8 |
| 2.2 | ニホンアマガエル観測システムの要件 | 8 |
| 3 | 実装に用いる音源の位置推定手法 | 11 |
| 3.1 | 音声の到着時間差の取得 | 11 |
| 3.2 | 音声の到着時間差を用いた位置推定手法 | 13 |
| 4 | IRIS Mote を用いた位置推定システム | 15 |
| 4.1 | システムの構成の設計 | 15 |
| 4.2 | システムの実装 | 15 |
| 5 | 評価実験 | 24 |
| 5.1 | 実験手順 | 24 |
| 5.2 | 実験環境 | 26 |
| 5.3 | 実験結果 | 27 |
| 5.4 | 考察 | 28 |
| 6 | おわりに | 37 |
| | 謝辞 | 38 |
| | 参考文献 | 39 |

図目次

| | | |
|----|--|----|
| 1 | 実装システムの概要図 | 7 |
| 2 | 田んぼの畔で鳴くニホンアマガエル | 9 |
| 3 | 音声の位相差 | 12 |
| 4 | IRIS Mote とシリアル・インターフェースボード | 17 |
| 5 | MTS310 を搭載した IRIS Mote | 18 |
| 6 | 音センサーノードの動作の概要 | 18 |
| 7 | 2.4 [kHz] のサンプリングレートでサンプリングを行った波形と, そのスプライン補間 | 22 |
| 8 | 計算用サーバの動作フローチャート | 23 |
| 9 | アマガエルの広告音とウシガエルの広告音の比較 | 25 |
| 10 | 実験風景 | 26 |
| 11 | ウシガエルの推定位置の分布 [音源位置 (1,1)] | 28 |
| 12 | ウシガエルの推定位置の分布 [音源位置 (0.5,0.5)] | 29 |
| 13 | アマガエルの推定位置の分布 [音源位置 (1,1)] | 29 |
| 14 | アマガエルの推定位置の分布 [音源位置 (0.5,0.5)] | 30 |
| 15 | ウシガエルの推定位置の誤差 [音源位置 (0.5,0.5)] | 30 |
| 16 | アマガエルの広告音 | 32 |
| 17 | アマガエルの広告音 (1 サンプルブロック分) | 32 |
| 18 | アマガエルの広告音の相互相関 [スピーカー位置 (1,1)] | 33 |
| 19 | 250 [Hz] 正弦波の相互相関 [スピーカー位置 (1,1)] | 34 |
| 20 | ウシガエルの広告音の相互相関 [スピーカー位置 (1,1)] | 35 |
| 21 | アマガエルの広告音を 2,400 [Hz] でダウンサンプリングした結果 [toc 0] | 36 |
| 22 | アマガエルの広告音を 2,400 [Hz] でダウンサンプリングした結果 [toc 2] | 36 |

表目次

| | | |
|---|--|----|
| 1 | 実験用無線センサーノード (IRIS Mote) の仕様 | 16 |
| 2 | 使用した計算用サーバのスペック | 16 |
| 3 | センサーノードの配置座標 | 27 |
| 4 | 用いた測定音と観測結果 (単位は全て [m]) | 27 |

1 はじめに

様々な生物について、そのマイクロあるいはマクロな振る舞いを観察・解析することで得られた振る舞いの数理モデルが、情報科学の分野で応用されている [1, 2]. このような学際的な研究が進展する背景には、物理化学の発展や計測機器および計算機性能の向上により、生命現象の数理モデル化に関する数理生物学の研究が盛んに行われてきたことがある [3]. 生物の振る舞いの中でも、特に個体間のコミュニケーションが組織化され、集団としての振る舞いを創発するようなものは群知能と呼ばれ、従来より人工知能やロボット工学への応用が期待されてきた. 近年ではネットワーク制御に生物の振る舞いを応用した研究も多くなされている [4, 5]. アリやミツバチの採餌行動をモデル化して応用した経路制御, アリやミツバチの分業行動をモデル化して応用したタスク割り当て制御や通信チャンネル選択制御, ホタルの発光同期現象をモデル化して応用した時刻同期制御, そして我々が着目しているニホンアマガエルの逆相同期現象をモデル化して応用したアクセス制御やチャンネル割り当て制御 [4, 6] などが例としてあげられる.

生物のコミュニケーションの振る舞いを知るためには、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. また、コミュニケーションのモデル化のためには、個々の行動と個体の特徴の関係を調べる必要があり、個体位置の特定も重要となる. 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. 報告者らはニホンアマガエル（以下では単にカエルと記載する）の行動モデルに関心を持っており、その生態調査に同行したが、カエルは体が小さく、草影や小さな窪みに隠れて鳴くために発見が困難であった. 一方で、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 [7]. また、我々の注目する点の一つであるが、同時に複数のカエルが鳴くことは少なく、位相が互いにずれるように発声する特徴も持っている（逆相同期現象）. このような習性から、カエルの位置推定には音センサーを用いることが非常に有効であり、本報告ではカエルの発声を対象に、音源の位置推定を行うシステムの実装を行う.

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ものがほとんどであり、衛星信号を用いた Global Positioning System や Quasi-Zenith Satellite System, Wi-Fi の電波を用いた Wi-Fi 位置情報システム, Bluetooth Low Energy ビーコンを用いた iBeacon などの、既に実用化されている測位システムが存在する [8–10]. さらに、Beacon Navi や超広帯域無線を用いた高精度測位システムなど現在開発中であり、実用化が進められている [11, 12]. しかしながら、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ることが必要であるが、出力情報についてはあらかじめシステム設計の際に既知である必要がある. また、天候や温度、棲息環境など生物の位置推定には様々な困難さを伴うため、研

究レベルで推定手段が検討されているものの、実環境での評価はほとんど行われていない [13].

音源の位置推定には、電波などの信号を用いた既存の位置推定手法と同じアルゴリズムを用いることが可能である。音声を観測し、その音源位置を推定する手法として TDOA (Time Difference of Arrival) を用いた位置推定手法と、AOA (Angle of Arrival) を用いた位置推定手法の 2 種類に大別できる。いずれの場合もマイクロホンを持つ複数のセンサーがそれぞれ時刻同期をしている状態を前提とする。AOA を用いた位置推定手法は、各マイクロホンに音が到着した時間差を用いて到着角を求め、全てのセンサーが示す到着角を満たす場所を探すものである。一つの到着角を取得するためには、三つのマイクロホンが必要となり、到着角の交点を求めるため、六つのマイクロホンが必要となる。到着角を求める三つのマイクロホンがマイクロ秒単位の高精度で時刻同期が出来ていなければ、その到着角も正確には算出できない [14]。そのため、多くは複数のマイクロフォンをハードウェア上で並列に並べたマイクロホンアレイを用いて実装されるが、マイクロホンアレイは非常に高価である。この際、マイクロホンアレイの設置角度も正確に把握しなければならない。TDOA を用いた位置推定手法は、各マイクロホンへの音声の到着時間差を用いて、各マイクロホンを焦点とした双曲線上に推定位置がある。少なくとも三つのマイクロホンを用いると双曲線を複数得ることができ、その交点となる場所が音源の推定位置である。AOA を用いる場合、TDOA を用いる場合のいずれの場合も、マイクロホンの位置と、それぞれのマイクロホンに音声が届いた時刻を用いて位置推定を行う。本報告では、TDOA を用いた位置推定アルゴリズムを用いる。

生物に限らず、観測対象に観測機器を装着させずとも得られる情報のみを利用し、観測対象の位置をリアルタイムに推定できることは、位置推定技術において広く求められる条件の一つといえる。このような位置推定へのアプローチとして、カメラを用いた視覚情報を用いて位置推定を行う方法や、生物の発する音（鳴き声や、移動の際に生じる音）を用いて位置推定を行う方法が広く検討されている [15,16]。視覚情報を用いて位置推定を行う方法では、光の直進性から、ノイズによる影響が小さいが、一方で解像度によっては観測対象物の大きさが問題となる。また、観測環境における障害物の状況等により見通しの確保が難しいことも考えられ、カメラの設置には大きな制約が生じる。生物の発生音を用いて位置推定を行う方法は、環境音や反響といったノイズの影響が大きいことが問題となるが、音は波長が長く回折しやすいため、多少の障害物のある環境下でも利用が可能である。特に、音源の位置推定に関する研究はこれまでに様々になされているが、その評価はシミュレーション上でのものに留まっていることが多く、実用上の問題点については明らかにされていない。実環境での評価を行った研究も多数あるが、マイクロホンアレイにより音の到着角を取得可能な専用のハードウェアや、高性能の通信機器を仮定しており、実環境での準備コストが非常に大きいといえる [14]。比較的安価な無線センサーノードと音センサー（マイクロホン）を用いることで低コストでの運用が可能であるが、安価である故に低スペックであり、従来仮定されている高い性能の機器では生じ得ない問題が生じることになる。例えば、無線センサーノードの持つ CPU は数 MHz と低速なものであること、メモリや記憶領域が不十分であ

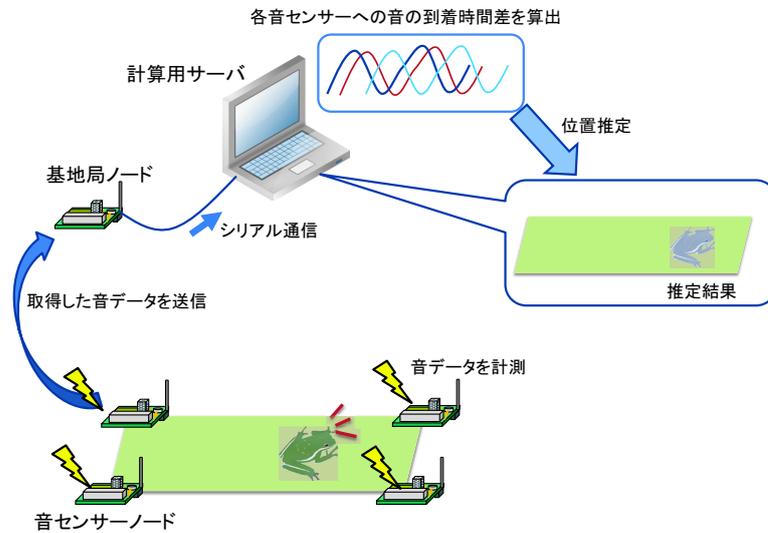


図1 実装システムの概要図

ること、通信速度が遅いこと、高いタイマー同期精度を得ることが難しいことなど、実センサーには様々な制約があり、一般的に用いられる音の到着時刻の取得を十分な精度で行うことは困難である。

本報告では、比較的安価なセンサーノードとマイクロホンを用いた音源位置推定手法の実装を行う。我々が実装するシステムの概要を図1に示す。用いるセンサーノードは、タイマー精度やマイクロホンの精度が低く、マイクロホンアレイのような高価なハードウェアを備えていない。単一のマイクロホンを持つ無線センサーノードを用いて、音源から発生された音を計測し、位置推定を行う計算機に音声ストリーミングデータを送信する。この計算機では、全マイクロホン間における音の到着時間差を取得し、これを用いて音源位置を推定する。本報告では、実センサーを用いて音源の位置推定を実装する際に生じる様々な問題を明らかにし、これまでに示されていないセンサーネットワークによる実環境下での音源位置推定性能を評価し、システムの有効性を示すとともに、アマガエルの位置検出のために十分な推定精度を獲得することを目的とする。

2 観測対象と位置推定システム要件

2.1 ニホンアマガエルの生態的特徴

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が繁殖期であり、繁殖期には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 (コーラス)。その際、少数のカエルが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おり、ニホンアマガエルもこの特徴を持つ [17]。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 分以上コーラスを続けることも多い。

ニホンアマガエルの鳴き声を実際に調査したところ、一度の鳴き声は約 0.1 秒から 0.2 秒間であり、数個体同士がこの広告音を逆相同期しながら鳴くことを確認した。水田に生息するニホンアマガエルは、田んぼの畔の水面近くの地面の上で鳴き、水中や水上では鳴かない特徴も持つ。ニホンアマガエルの広告音の基本周波数は約 2,000 [Hz] である。他の種類、ツチガエルやシュレーゲルアオガエルとは同程度の基本周波数であり、ウシガエルの 500 [Hz] に比べると、これらの種は高い周波数を持っている。一般に同種類のカエルにおいては、体長の大きい個体ほど広告音の周波数が低くなる傾向があることが知られている。

2.2 ニホンアマガエル観測システムの要件

■ 想定する環境 本報告では、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。単一の田んぼを対象とし、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。

■ 既存の位置推定方法：カエルホタル 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 [18] 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 (音センサー)・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、空間配置の計測を行う。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観測環境を構築する際に最も大きな課題となるのは、その



図2 田んぼの畔で鳴くニホンアマガエル

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が必ずしも保証できるものではなく，数十台の機器を敷設する準備コストは大きい。また，台数が増えると機器調整のコスト、例えば可変抵抗の手動調整による入力音声を光に変換する際の増幅率の調整といったコストが増える。

■ システムに求められる要件 上記の機器の準備コストや，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関係を計算機上で把握できることがシステムに求められる要件といえる。以上の検討事項を満足するためには，無線ネットワークを用いることで，音源から発生する音を複数のマイクロホンで取得し，計算機に収集することで位置の推定を行うことが一つの方法となる。1章で述べたように，音の到着時間差を用いる場合には，マイクロホンを搭載したセンサーノードを最低3台用意し，それぞれから音と時刻情報を収集できれば位置の推定を行うことが可能である。また，無線ネットワークではノード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。

文献 [18] においてカエルホタル同士の間隔を数 10 [cm] あけており，その位置推定誤差は間隔の半分程度となる。このことから，本報告で提案するシステムにおいて，目標とする推定精度も数 10 [cm] 程度とする。

■ 使用する機器に求められる性能 音声を用いた位置推定を行う際に機器に求められる性能要件を以下に示す。

タイマー精度

音源の位置推定を行うにあたっては、音速と機器のタイマー精度の関係が重要となる。乾燥空気中での音速は、 $331.5 + 0.61t$ [m/s] (t は摂氏温度) で与えられ、マイクロホンの位置と音源の位置との距離に依存して、音源から発生した音がマイクロホンへ到着するまでの時間が決まる。すなわち、二つのマイクロホン間の音の到着時間差と音速との積が、二つのマイクロホンと音源との距離差となり、位置推定はこの距離差を用いて行う。タイマー精度が悪いと、各マイクロホンが互いに近すぎる際に到着時間差を取得できない恐れがある。例えばタイマー精度が 1 [ms] である場合には、少なくとも 30 [cm] 以上機器同士が離れていなければ、常に到着時間差が 0 となる。このようにタイマー精度が各機器の配置に大きな制約となるため、カエルの位置を推定するにあたり、[μ s] 単位のタイマーが望ましい。

タイマー誤差

本報告では、音の到着時間差を用いて位置推定を行うため、音声の到着時刻の正しい値を得ることが重要である。音声の到着時刻に誤差を発生させる原因として、クロックの揺らぎによるタイマーの誤差とセンサーノード間の時刻同期誤差が考えられる。ただし、タイマー誤差については補正を行うことが可能であるため、性能要件としては考えない。

無線通信速度

ニホンアマガエルの鳴き声の基本周波数は約 2,000 [Hz] であり、サンプリングした信号から元のアナログ音声を再現するためには、標本化定理より 4,000 [Hz] での音声サンプリングが必要となる。例えば量子化ビットを 16 [bit] として、4,000 [Hz] のサンプリングレートでサンプリングした音声をリアルタイムで送信するためには、少なくとも 64 [kbps] の送信レートが必要となる。1 台の計算機に音声データを同時に集約する場合、リアルタイムで音声データを送信し続けるには、少なくとも $64 \times N$ [kbps] (N はセンサーノード数) の送信レートが必要となる。

マイクロホンの指向性・感度

カエルが鳴く位置はあらかじめ分かっていないため、無指向性のマイクロホンが望ましい。マイクロホンの感度については、観測環境により要件が異なるため、ここでは考慮しないこととする。

バッテリー

カエルのコーラスが活発になる夕方から、日没まで観測するとして、連続 6 時間以上の駆動時間が望ましい。

3 実装に用いる音源の位置推定手法

この章では、実装に用いる音源の位置推定手法について説明を行う。2章で説明したように、カエルの広告音を用いた位置推定には様々な課題が存在する。我々は準備コストや敷設コストを考慮してセンサーネットワークを用いたシステムを実装するが、個々のセンサーノードでは複雑な計算を行うことが困難であるため、本システムでは計算用サーバに音声ストリームデータを送信し、計算用サーバが音の到着時間差を用いた位置推定手法を用いることとする。一方で、ストリームデータを低スペックなセンサーノードで取得、伝送することも困難さを伴うが、本報告ではリアルタイム性を求めることとする。センサーノードは局所的なデータ処理は行わずに、取得したデータをそのまま計算用サーバに送信する。また、カエルは鳴いている間は移動しないため、本報告では、推定対象の音源は移動しないことを仮定する。

3.1 音声の到着時間差の取得

3.1.1 音声の到着時間差を用いた位置推定の概要

音声の到着時間差とは、音源が音声を発した時点から、マイクロホンに音声到達するまでに要した時間の、各マイクロホン間での差である。それぞれのマイクロホンの内部時計が完全に同期していれば、音が到着した時刻のずれが到着時間差と一致する。

平面での位置推定を仮定すると、二つのマイクロホンで受信した音声の到着時間差から、音源位置が存在する位置を一組の双曲線として得ることができる。二つのマイクロホンのうち先に音声が届いたマイクロホンを考慮することで、一組の双曲線のうち、どちらの曲線上に音源が存在するのかを特定できる。信号の到着時間差を用いた位置推定手法では、二つ以上のマイクロホンの組に対して得られた双曲線の交点を求めることで推定を行う。ただし、通常は様々な環境ノイズや機器間のタイマーの誤差などにより、全ての双曲線が一点で交わらない。このような場合の音源の推定位置は、複数の交点の重心や最尤推定法を用いることで得る。

得られた推定位置と、真の音源位置との間には、先述のノイズ等により、誤差が生じていることがほとんどである。こうした推定位置の誤差の影響を小さくするため、本報告では、音声ストリームデータを細かい期間(サンプルブロック)に分割して、各サンプルブロックごとに推定を行い、全サンプルブロックの推定位置の重心をとる。これにより、ノイズの影響を小さくすることが可能である。

3.1.2 相互相関関数を用いた到着時間差の取得

位置推定を行うためには、各センサーノードの位置(正確にはマイクロホンの位置)と、それぞれのマイクロホンに音が到着した時刻が必要となる。音源から各ノードまでの距離の差により音声の到着

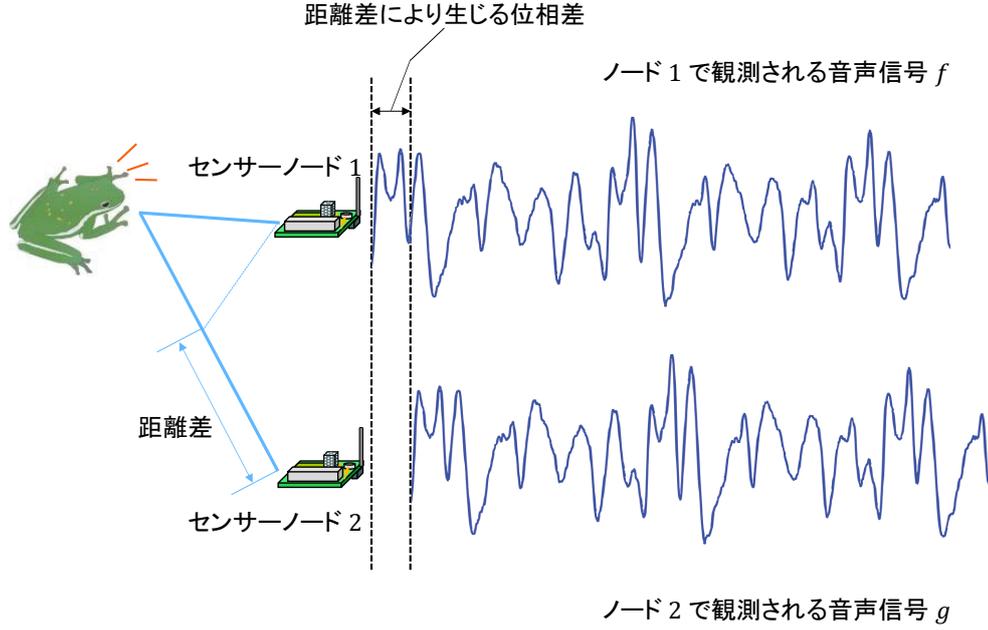


図3 音声の位相差

時刻はノードごとに異なるが、それぞれのノードにより観測された音声波形は、ノイズや反響の影響が十分小さければ、時間軸上のずれはあるものの、互いに類似した形状となる(図3)。すなわち、各センサーノードの時刻が互いに同期されていれば、センサーノード間における音声の到着時間差は、各センサーノードで観測された音声の位相差から求めることができる。二つの信号の位相差を求める一般的な方法は、二つの信号の相互相関を計算し、信号の類似度を最大とするような位相差を求める方法である。

相互相関は、二つの信号間の類似性を確認するために用いられ、その値が高いほど、二つの信号間には相関がある。二つのセンサーノードで観測された音声を正規化したデータ列 $f = \{f_0, f_1, \dots, f_{N-1}\}$, $g = \{g_0, g_1, \dots, g_{N-1}\}$ ($-1 \leq f_k, g_k \leq 1$) に対する相互相関 $\tilde{R}_n^{(fg)}$ の値は式(1)で表される。

$$\tilde{R}_n^{(fg)} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i g_{i+n}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} g_{i+n}^2}}, (-\text{MAXLAGS} \leq n \leq \text{MAXLAGS}) \quad (1)$$

本報告では、 f_k, g_k ($k \leq 0, k \geq N$) については、0で補間をする。 $\tilde{R}_n^{(fg)}$ は、 f と、 g の時間軸を n サンプルだけずらし際の畳み込み和を正規化した値である。相互相関が最大値をとるときに二つの信号に最も相関があるため、その時の n が f と g の位相差となる。つまり、位相差 lag は相互相関 $\tilde{R}_n^{(fg)}$ を用いて、

$$lag = \arg \max_n (\tilde{R}_n^{(fg)}) \quad (2)$$

と表される。 lag にサンプリングレートの逆数をかけたものが到着時間差となる。

式 (2) は、信号が一定間隔で取得できていることが前提である。しかしながら、無線センサーネットワークでは、パケットロスや、その時刻同期精度、クロック揺らぎ等により、信号を一定間隔で取得できない状況が考えられる。こうした場合には、取得できなかったデータを補間する必要がある。本報告では、よく知られている補間法の一つである、3 次スプライン補間を用いる。3 次スプライン補間を用いることで、連続な波形の取得が可能となり、相互相関の計算に応用可能となる。補間するデータ列を $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)$ とし、区間 $[x_j, x_{j+1}]$ にて補間を行う関数を $S_j(x)$ とすると、

$$S_j(x) = a_j(x - x_j)^3 + b_j(x - x_j)^2 + c_j(x - x_j) + d_j // (j = 0, 1, \dots, N - 1) \quad (3)$$

と表すことができる。各 a_j, b_j, c_j, d_j の未知数を、以下の条件を満たすように決定する。

- 全てのデータ点を通る
- それぞれの区分補間式の 1 次導関数は境界点において連続である
- それぞれの区分補間式の 2 次導関数は境界点において連続である
- $S_0''(x_0) = S_{N-1}''(x_N) = 0$

こうして求めた区分補間式を元に、データ補間を行う。

3.2 音声の到着時間差を用いた位置推定手法

まず、各マイクの組み合わせから得られた到着時間差を用いて各サンプルブロックごとに位置推定を行う。その後、各サンプルブロックごとに得られた推定位置の重心を計算し、それを推定結果とする。

位置観測センサーノードのそれぞれは時刻同期していることとする。各センサーノードごとに到着した音の到着時間差を計算することで、音源が存在する可能性がある位置を双曲線として得ることができ、これらの双曲線の交点を求めることで位置推定を行う。しかし、誤差等により一意には交点が決まらない。そのため、全ての双曲線からの距離が最も近い点を求める変数関数の最小化問題を解くことで推定位置を決定する。このような到着時間差を用いて行う位置推定問題の近似解を取得する方法が文献 [19] で提案されている。任意の二つのマイクロホン $\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_j$ とし、 $\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_j$ 間の音声の到着時間差を $T_{l,j}$ 、双曲線上の任意の点を $\mathbf{x} = (x, y)$ とすると、式 (4) で表される双曲線を得る。

$$\sqrt{(x_l - x)^2 + (y_l - y)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2} = T_{l,j} \quad (4)$$

また、この双曲線は式 (5) の形でも書き表すことができる。

$$a_{l,j}x^2 + b_{l,j}xy + c_{l,j}y^2 + d_{l,j}x + e_{l,j}y + f_{l,j} = 0 \quad (5)$$

式 (4)、式 (5) は同じ双曲線を表すため、 $a_{l,j} \sim f_{l,j}$ は、

$$a_{l,j} = -4 \left[(T_{l,j})^2 - (x_j - x_l) \right],$$

$$\begin{aligned}
b_{l,j} &= 8(x_j - x_l)(y_j - y_l), \\
c_{l,j} &= -4 \left[(T_{l,j})^2 - (y_j - y_l)^2 \right], \\
d_{l,j} &= 4 \left\{ (T_{l,j})^2 (x_j + x_l) - (x_j - x_l) \times \left[(x_j)^2 + (y_j)^2 - (x_l)^2 - (y_l)^2 \right] \right\}, \\
e_{l,j} &= 4 \left\{ (T_{l,j})^2 (y_j + y_l) - (y_j - y_l) \times \left[(x_j)^2 + (y_j)^2 - (x_l)^2 - (y_l)^2 \right] \right\}, \\
f_{l,j} &= (T_{l,j})^4 - 2(T_{l,j})^2 \left[(x_j)^2 + (y_j)^2 + (x_l)^2 + (y_l)^2 \right] + \left[(x_j)^2 + (y_j)^2 - (x_l)^2 - (y_l)^2 \right]^2.
\end{aligned}$$

となる.

ここで, ϵ を式 (6) と定義する.

$$\begin{aligned}
\epsilon(\mathbf{x}) &= \begin{bmatrix} \epsilon_{1,2}(\mathbf{x}) \\ \epsilon_{1,3}(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ \epsilon_{M-1,M}(\mathbf{x}) \end{bmatrix}, \\
\epsilon_{l,j}(\mathbf{x}) &= [a_{l,j}x^2 + b_{l,j}xy + c_{l,j}y^2 + d_{l,j}x + e_{l,j}y + f_{l,j}]
\end{aligned} \tag{6}$$

ϵ を用いて, 音源推定位置 $\hat{\mathbf{x}}_s$ は, 以下の式 (7) で表される.

$$\hat{\mathbf{x}}_s = \arg \min_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}), J(\mathbf{x}) = \epsilon(\mathbf{x})^T \epsilon(\mathbf{x}) \tag{7}$$

このコスト関数 $J(\mathbf{x})$ を反復法を用いて解くために, 式 ϵ を, 初期推定位置 $\mathbf{x}_{s,0}$ についてテイラー級数展開すると, 式 (8) が得られる.

$$\epsilon(\mathbf{x}) \simeq \epsilon(\mathbf{x}_{s,0}) + \nabla \epsilon |_{\mathbf{x}_{s,0}} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{s,0}) \tag{8}$$

ここで, $\nabla \epsilon$ は,

$$\nabla \epsilon = \begin{bmatrix} \frac{\partial \epsilon_{1,2}}{\partial x} & \frac{\partial \epsilon_{1,2}}{\partial y} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \epsilon_{M-1,M}}{\partial x} & \frac{\partial \epsilon_{M-1,M}}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{9}$$

である.

この時, 式 (7) での音源の推定位置 $\hat{\mathbf{x}}_s$ は以下の式 (10) の更新式が収束するまで計算することで推定することができる.

$$\hat{\mathbf{x}}_{s,i+1} = \hat{\mathbf{x}}_{s,i} - \nabla \epsilon^\dagger |_{\hat{\mathbf{x}}_{s,i}} \epsilon(\mathbf{x}_{s,i}) \tag{10}$$

$\nabla \epsilon^\dagger |_{\hat{\mathbf{x}}_{s,i}}$ は $\nabla \epsilon |_{\hat{\mathbf{x}}_{s,i}}$ の擬似逆行列である. $\| \hat{\mathbf{x}}_{s,i+1} - \hat{\mathbf{x}}_{s,i} \| \leq 0.01[\text{m}]$ を満たすとき, $\hat{\mathbf{x}}_s = \hat{\mathbf{x}}_{s,i+1}$ とみなし, その時の $\hat{\mathbf{x}}_s$ が推定位置である.

各サンプルブロックに対し, 式 (10) を用いて推定位置を算出する. 過去のサンプルブロックごとの推定位置との重心を取ることで, それぞれのサンプルブロックごとに含まれる到着時間差の誤差の影響を少なくできる.

4 IRIS Mote を用いた位置推定システム

4.1 システムの構成の設計

実装する位置推定システムは、1章の図1に示したように、数台の無線センサーノードと1台の計算用サーバから構成される。まずは、システムを構成する機器について詳細を述べる。

本報告で利用する無線センサーノードとして、2章で検討した要件を考慮し、Crossbow Technology社のIRIS Mote（以降IRISと記載）を用いることとする（図4）。IRISは無線センサーネットワークの実験に広く使用されており、その大きさはアンテナ部分を除くと、 $57 \times 32 \times 25$ [mm³]と比較的小さい。その主なスペックは表1の通りである[20]。また、OSとしてTinyOSを用いることとする。TinyOSはフリーのオープンソースソフトウェアであり、無線センサーネットワークをターゲットとしたプラットフォームである。計算用のサーバとして屋外での利用を考慮し、ノートパソコン(ASUS ZENBOOK UX31A)を用いることとする。そのスペックは、表2に示すとおりである。これらの機器を用いて位置推定システムの実装を行う。

3章で述べた手法に関しては、平面上での位置推定を行うために、3台以上のセンサーノードとマイクロホンの組（以降では音センサーノードと呼ぶ）が必要となる。そこで音センサーノードとして、センサー基盤MTS310をIRISに接続して用いる（図5）。MTS310はIRISのオプションとして開発されたセンサー基盤であり、光センサー、マイクロホン、圧電スピーカー、2軸加速度センサー、2軸磁気センサーを持つ。本報告ではマイクロホンのみを使用している。また、計算用サーバとセンサーノードは互いの無線通信方式の違いから、直接無線通信を行うことができない。そこで新たにセンサーノードを1台用意し、シリアル端子を介して計算用サーバとこのセンサーノード（以降では基地局ノードと記載する）を接続する。基地局ノードと音センサーノードはIEEE 802.15.4に準拠して無線通信を行い、音声データの収集を行う。基地局ノードはシリアルケーブルを介して、計算用サーバにシリアル通信を行いデータを送信する。次章の実験においては、4台の音センサーノード、1台の基地局ノード、1台の計算用サーバを用いて位置推定システムを構成する。

4.2 システムの実装

音センサーノードは観測対象の領域にそれぞれが基地局ノードと通信可能な範囲に設置され、音声信号を計測し、それを基地局ノードへ送信する。基地局ノードは、音センサーノードが計測した音声信号をもとに波形補間を行い連続した信号を復元する。復元した信号に対して相互相関を利用して各音センサーノードへの音声の到着時間差を求め、位置推定を行う。

はじめにそれぞれの機器の役割を簡単に列挙し、その後の節において各役割の実装について詳細を述

表 1 実験用無線センサーノード (IRIS Mote) の仕様

| Mote Hardware Platform | | IRIS mote |
|--------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| MCU | Chip | ATMega1281 |
| | Type | 8 MHz, 8 bit |
| | Program Memory | 128 KB |
| | SRAM | 8 KB |
| Sensor Board Interface | Type | 51 pin |
| | 10-Bit ADC | 8 channel, 0 V to 3 V input |
| | UART | 3 interfaces |
| | Other interface | DIO, I2C |
| RF Transceiver | Chip | Atmel RF230 (IEEE802.15.4; ZigBee 準拠) |
| | Radio Frequency | 2,400 MHz |
| | Max Data Rate | 250 kbps |
| | Antenna Connector | MMCX |
| Flash Data Logger Memory | Chip | AT45DB014B |
| | Connection Type | SPI |
| Default power source | Type | AA, 2x |
| | Typical capacity | 2,000 mA-hr |

表 2 使用した計算用サーバのスペック

| ZENBOOK UX31A | スペック |
|---------------|-----------------------------|
| CPU | Core i7-3517U 超低電圧版 1.9 GHz |
| メモリ | DDR3,4 GB |

べる。

音センサーノード

マイクロホンから音声ストリームデータを取得し、一定数のサンプルを取得した後に、基地局へ無線通信により送信する。

基地局ノード

各センサーノード間での時刻同期のために、基準となる時計（グローバルタイム）を管理する。



図4 IRIS Mote とシリアル・インターフェースボード

また、音センサーノードから送信されたデータ受信し、シリアル接続している計算用サーバに伝送する。

計算用サーバ

収集した音声ストリームデータを元に各ノードにおける信号の到着時間差を計算し、位置推定を行う。

4.2.1 音センサーノードの実装

音センサーノードはまず、各音センサーノード間で時刻同期を行う（時刻同期フェーズ）。これにより、各々が同期してサンプリングを開始することができる（サンプリングフェーズ）。サンプリングフェーズでは、マイクロホンの出力する電圧値を AD コンバータによりデジタル変換した値とサンプリング時刻の組を 1 サンプルとして蓄積する。最後に送信フェーズにおいて、基地局ノードに宛てて蓄積した音声データを送る（送信フェーズ）。この際、各音センサーノードからの送信パケットが基地局ノードにおいて衝突しないよう、タイムスロットをずらして送信する。送信が終了すると、再びサンプ

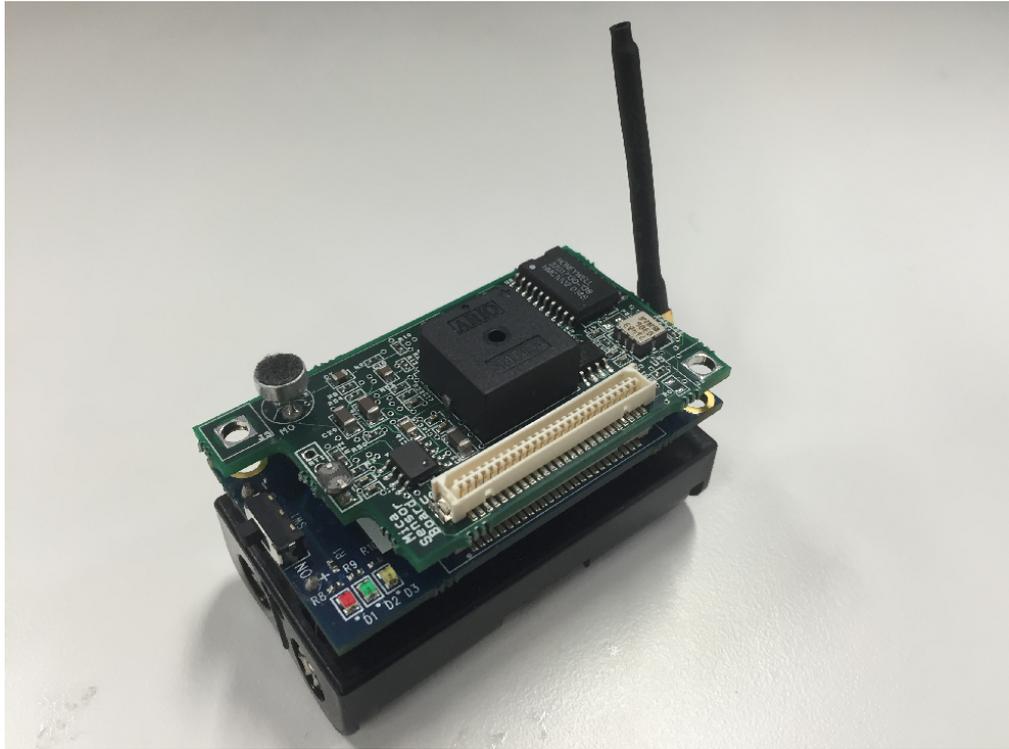


図5 MTS310 を搭載した IRIS Mote

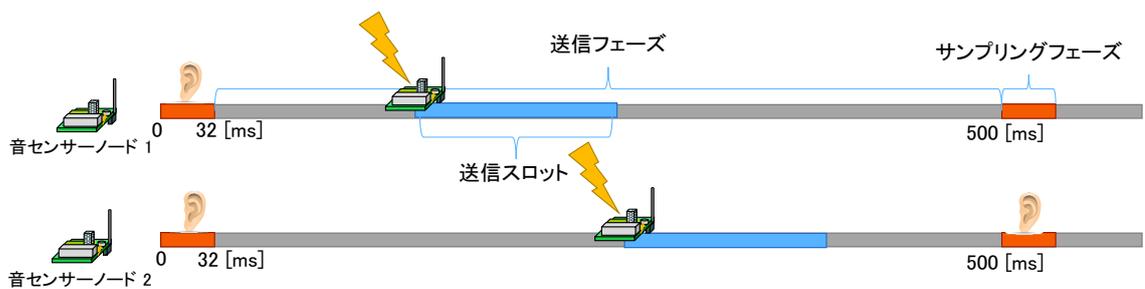


図6 音センサーノードの動作の概要

リングフェーズへ移行する。以降に各フェーズの実装について詳細を説明する。図6に、サンプリングフェーズ及び送信フェーズの動作の概要を示す。

■ 時刻同期フェーズの実装 時刻同期の方法としては様々なものがこれまでに研究されているが、ここでは基地局を基準として音センサーノードの同期を行うため、それほど複雑な方法を必要としない。ま

た、音センサーノード間でのパケット送受信処理の増加は、サンプリング可能な期間の減少につながるため、定期的に時刻同期パケットを送信しあうことで時刻同期を行う方法は採用しないこととする。本報告では最初に、基地局ノードが所持する時刻情報を全ての音センサーノードに一度だけ送ることで、低精度な時刻同期を行う。その後、教師音を用いることで、音センサー間の正確なタイマー時刻差を計算機用サーバに登録しておく。

各音センサーノードが受信した音声に関して相互相関を計算した結果には、それぞれの音センサーノード組についての音声の到着時間差と、システム時刻誤差の和が含まれる。そこで、各音センサーノードに音が到着する時刻が同一になるように音センサーノードを一か所に集め、教師音について相互相関を取ることで、各音センサーノードのシステム時刻差のみが得られる。計算用サーバは、こうして得た時刻差を記憶し、各音センサーノードからパケットを受信した際に時刻に補正をかけることで、音センサーの各組が互いに時刻同期しているようにみなすことができる。

教師音をサンプリングし、相互相関を計算する際には、音センサーノード間で観測された信号を最大でどのくらいまで位相をずらすか指定しなければならない。しかしながら、各音センサーノードの持つシステム時刻の誤差が分からない場合には、この最大値は求められない。そこで最初に、基地局ノードの時計に全ての音センサーノードの時計を大まかに合わせる。基地局ノードは全ての音センサーノードが起動した後に、各センサーノードに時刻同期パケットとして、自身のシステム時計の指す時刻（グローバルタイム）を載せたパケットをブロードキャストする。音センサーノードは時刻同期パケットを受け取ると、そのパケットに含まれていた時刻（*globalTime*）と、音センサーノードがそのパケットを受信した時刻（*receiveTime*）との差を保持し、音センサーノードは、保持している時計の時刻（*currentTime*）を基地局ノードの保持している時計の時刻（*correctedTime*）へ以下の式で変換する。

$$correctedTime = currentTime - (receiveTime - globalTime) \quad (11)$$

全ての音センサーノード間での音声の到着時間が等しくなるように、音センサーノードを一か所に集め、教師音を鳴らしそれを観測させる。各音センサーノードがサンプリングした教師音に対して、波形補間を行い、相互相関を計算すると、各音センサーノード間における到着時間差が得られる。前述のとおり、この到着時間差が各音センサーノードのシステム時刻のずれと一致する。音源の位置推定を行うために相互相関を計算する際に、こうして得られたシステム時刻差だけ補正を行うことで、各音センサーノード間でのシステム時刻が同期しているかのように見せかける。

■ **サンプリングフェーズの実装** サンプリングフェーズでは、マイクロホンの出力する電圧値とその時の時刻の組を 1 サンプルとして、一度の送信フェーズで送信するサンプルの個数分だけサンプルを蓄積する。蓄積を終えると、送信フェーズへ移行する。この際、できる限り高頻度かつ長期間サンプリングを行うことが推定精度を高めることにつながるが、一方で IRIS Mote での実装上、マイクからのデータの取得とパケットの送信を同時に行うことができない点と、通信速度が比較的低速（250 [kbps]）で

ある点が問題となる。すなわち、常に同じ周期でサンプリングすることは困難であり、一定時間サンプリングした後は、ある程度長い期間を送信に要する。また、サンプリングレートが高ければ高いほど、同じデータ量で送信することのできるサンプリング期間は短くなる。

今回の実装では、サンプルを一度取得する際にかかるシステム時間は約 410 [μ s] であり、サンプリング期間内では 2,400 [Hz] 程のサンプリングレートでサンプリングを行う。本報告では実装の容易さからサンプリングを割り込み処理で行わず、ループ内での連続処理で行っている。そのため、サンプルの取得間隔には、403 [μ s] から 545 [μ s] までの揺らぎが生じており、この点は今後の改善点である。MTS 310 の備え付ける AD コンバータでは、音の振幅情報を 10 bit の整数値に変換するため、ここでは 2 Byte のデータとして扱う。この値が真に意味するところについては、MTS310 のデータシートに記載されていなかったため、単なる整数値として以降では計算を行うが、特にこのことによって位置推定手法に影響を与えることはない。

それぞれのマイクロホンで観測した音声の波形を知るために、マイクロホンの電圧値 2 Byte とその計測時刻 4 Byte を組とした 6 Byte のデータを 1 サンプルとして、一定数の連続したサンプルデータ群（サンプルブロック）を蓄積後に送信する。TinyOS では、一つのパケットのデータフィールドのサイズは最大で 114 Byte である。そのため、一つ当たりのパケットで送信することのできるマイクロホンの電圧値と時刻の組は 19 個が上限である。一つ当たりのパケットに入るデータは 19 個分、各サンプル間の時刻差は 400 [μ s] であるため、一つのパケットで送信されるデータは最大で 7,600 [μ s] の期間のサンプリング結果となる。乾燥空気中にて音は 7,600 [μ s] 間でおおよそ 2.5 [m] 進むため、音センサーノードがそれぞれ全く同じ期間にサンプリングを行うならば、音センサーノードが互いに 2.5 [m] 以上離れている際には、音源位置によっては同じ位相を持つ波形が観測できない。また、パケットのデータ長が長くなることは、通信路の品質の悪さや衝突などによるパケットロスが増える原因となるため、必ずしも毎回 19 個分をパケットに載せることが有効であるとは限らない。しかしながら、パケットのデータ長を短くすることは、パケットの送信回数を増やすことになるため、パケット送信のためのチャネル確保等にかかる遅延の総和が大きくなる。

本報告では、1 度の送信フェーズで 10 個のサンプルを含んだパケットを 8 つ送信する。つまり、80 個の連続したサンプルをサンプルブロックとし、基地局へ送信することとする。これは実験的にうまく動作した値であり、環境ごとにチューニングの余地があると考えられる。80 個のサンプルを蓄積し終わるまでサンプリングフェーズを行い、蓄積し終わると、送信フェーズへ移行する。

■ **送信フェーズの実装** 送信フェーズでは、サンプリングフェーズで蓄積した 1 サンプルブロック分のデータを基地局ノードへ送信する。

サンプリングフェーズにて蓄積した、1 サンプルブロック分のデータにあたる 80 個のマイクロホンの電圧値とその計測時刻のサンプルを 10 個ずつ 8 つのパケットに分割して格納する。1 度の送信フェー

ズで 10 個のサンプルを含んだパケットを 8 つ送信する。IRIS は送信衝突回避の手段として、CSMA を用いており、そのキャリアセンスの回数の上限には 5 回を設定している。パケット送信時に衝突が増える場合、再送回数が増え、サンプリングフェーズへ移行できるようになる時刻が各センサーノードで同期できなくなる可能性がある。各音センサーノード間でのパケット衝突が発生しないように、各音センサーノードは 100 [ms] ずつ送信タイミングをずらして全てのパケットを送信する。ここで、衝突はほとんど起きないものと考え、基地局ノードからのデータ受信応答 (ACK) は行っていない。本報告では利用する機器数を考慮し、送信フェーズに移行してから 500 [ms] 後に、再びサンプリングフェーズを開始する。

4.2.2 基地局ノードの実装

基地局ノードは、音センサーノードの時刻同期の基準となる時間の送信と、音センサーノードが送信したパケットを受信して計算用サーバへ転送する役割を持つ。

基地局ノードの役割の一つとして、ノード全体の時刻の基準となる時計の管理がある。基地局は、一度だけ自信の現在時刻 (グローバルタイム) をパケットに乗せた時刻同期パケットをブロードキャストにより送信する。時刻同期パケットを受信した音センサーノードの動作は、4.2.1 節の通りである。

基地局ノードの二つ目の役割として、音センサーノードが送信したパケットを受信し、計算用サーバへ転送する役割がある。基地局ノードは、音センサーノードから受信したパケットをキューに保持し、順に計算機サーバに渡す。キューの長さは 92 であり、キューから溢れたデータは破棄される。

4.2.3 計算用サーバの実装

計算用サーバは、基地局ノードが受信した、全音センサーノードからの同一期間をサンプリングした 1 サンプリングブロック分のデータを受け取ると、そのデータに十分な音量の音声が含まれているかどうかを判断し、含まれているならば、そのサンプリングブロックを対象に波形補間を行い、取得した各音センサーノードの組に対する相互相関を計算し、到着時間差を算出して位置推定を行う。これまでのサンプルブロックごとの推定位置の重心を算出し、それを推定結果とする。本報告では、音源位置が単一であり、動かない仮定の下であるため、過去の全てのサンプルブロックとの重心をとる。

各音センサーノードが 1 度のサンプリングフェーズで収集し送信したデータが、計算用サーバに渡されると、計算用サーバは受け取ったサンプルブロックに閾値以上の音量の音声が含まれているかどうかを判断する。閾値以上の音量の音声が含まれていると判断されると、受け取ったサンプルブロック内の各音センサーノードからの音声信号に対して波形補間を行い、相互相関を計算しそれぞれの音センサーノード間での位相差を得る。位相差は、二つの信号をどれだけのサンプル数分ずらせば相互相関の値が最も大きくなるか、で表される。IRIS のシステム時計は、実時間では 9216/10000 であるため、得られた位相差に、10000/9216 をかけることで、到着時間差を得る。ここで、受信したサンプルブロック

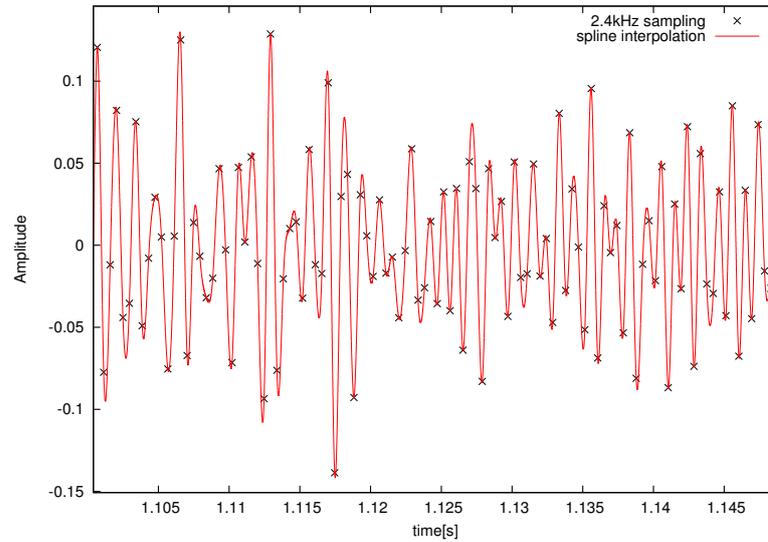


図7 2.4 [kHz] のサンプリングレートでサンプリングを行った波形と、そのスプライン補間

が教師音のものであれば、この位相差を保持しておき、位置推定時に用いる。受信したサンプルブロックが教師音でないならば、取得した各音センサーノードにおける到着時間差を用いて位置推定を行う。ここで到着時間差とは、今回受信したサンプルブロックから得られた到着時間差と、教師音から得られた到着時間差の差である。こうして得られる到着時間差を用いて推定された音源位置は、サンプリングされた音声に含まれるノイズや、サンプリング間隔の揺らぎ、波形補間による誤り等のため、推定された音源位置は、真の音源位置と異なる位置を指すことが多い。そのため、計算機は、これまでのサンプルブロックごとの推定結果の重心を算出し、それを位置推定結果とする。重心をとることで、ノイズの影響を小さくし、一つのサンプルブロックのみの場合と比べ、より正確な位置推定が可能となる。

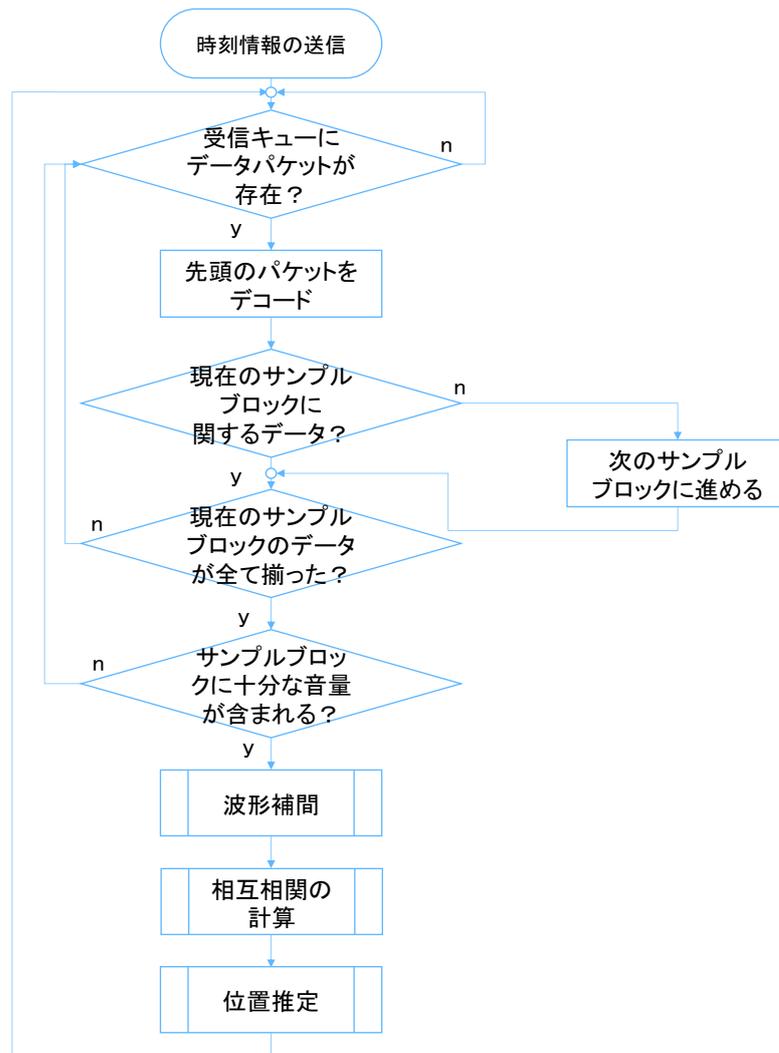


図 8 計算用サーバの動作フローチャート

5 評価実験

実装したシステムの性能を評価するために実験を行い、位置推定精度の評価を行う。本システムは屋外での利用を想定したものであるが、本報告においては屋内環境での実験を行った。あらかじめ反響等によるノイズが十分小さいことを確認しており、低ノイズ化での屋外環境でも同様の位置推定精度が得られることが期待される。実験用音源として、広告音の周波数特性が異なる 2 種類のカエルの音声データを用いた。まず最初に、基本周波数が比較的低いウシガエルの広告音の音声データを用いて位置推定実験を行う。次に、基本周波数がウシガエルよりも高いアマガエルの広告音の音声データを用いて位置推定実験を行う。

音センサーは正方形領域の各頂点に設置し、音源はその正方形領域内に設置する。このとき評価指標として、音源の真の位置と推定により得られた位置との絶対誤差、および、正方形領域の一辺の長さにより正規化した平均二乗誤差 (NRMSE) を用いる。ここで NRMSE は、真の位置と各サンプルブロックでの推定結果との誤差ではなく、最終的な推定位置と各サンプルブロックでの推定結果との誤差の二乗平均を、正方形領域の一辺の長さで割った値である。

5.1 実験手順

ウシガエルの音声データを用いた実験、アマガエルの音声データを用いた実験はそれぞれ以下の手順で行う。

1. 全音センサーノードを一箇所に集め、教師音を用いて時刻の同期を行う
2. 各センサーノードを正方形の観測領域の各頂点に配置する
3. スピーカーを所定の位置に設置し、40 秒間音声データを流す
4. 収集した各ブロック周期ごとのデータに対して波形補間を行う
5. 各音センサーノードから取得した音声信号の組に対して相互相関が最大となる位相差を計算する
6. 得られた位相差をもとに信号到着時間差を計算し、位置推定を行う

4.2.1 節に説明した方法を用いて時刻同期を行った後、各センサーノードを所定の位置へ移動する。本報告での評価実験では、4 台のセンサーノードを正方形の各頂点上に配置し位置推定を行う。この正方形内を観測領域とし、スピーカーはこの観測領域内に配置する。実験では、約 40 秒間カエルの広告音を流し、各センサーノードで音声信号のサンプリングを行い、収集したデータを受け取った計算用サーバが位置推定を行う。詳しいノードやスピーカーの配置方法は 5.2 節で述べる。

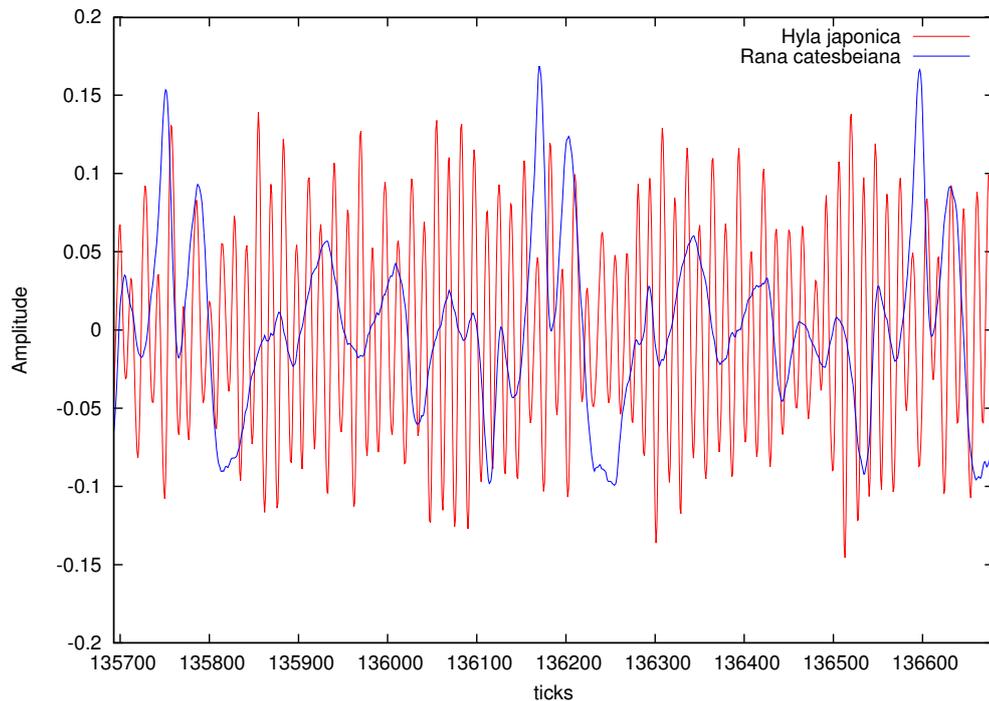


図9 アマガエルの広告音とウシガエルの広告音の比較

5.1.1 実験に用いる音源

位置推定を行うための音源として、ウシガエルの鳴き声を用いた場合、アマガエルの鳴き声を用いた場合、それぞれについての実験を行う。アマガエル及びウシガエルの広告音の波形は図9となっている。いずれのカエルの鳴き声も、音の大きさが細かく振動するが、周波数成分でみたときには非常に強い周波数帯が存在する。このような基本周波数をみると、ウシガエルの鳴き声の基本周波数は500 [Hz] 程であり、また、アマガエルの鳴き声の基本周波数は2,000 [Hz] である。鳴き声の基本周波数によって推定位置の結果にどのような違いが出るかについても実験を通して調査する。

ここで、教師音に用いる音源には、推定に用いる音源と同じものをそれぞれの実験で用いている。教師音の取得は音源と近い距離で行うため、それぞれの音センサーで音声信号が取得でき、十分に時刻同期できることが期待できる。しかしながら、この場合でも正しい位相差からの誤差が生じることも十分考えられるため、教師音の取得時の誤差によって位置推定が正しく行えないこともあり得る。本報告では、複数の教師音に対して時刻補正したそれぞれの結果を用いて位置推定を行い、得られた推定位置の重心を最終的な推定結果とすることでこの問題を解決する。



図 10 実験風景

5.2 実験環境

10 [m] × 18 [m] の静かな室内にて、センサーノードを正方形の各頂点上に配置し、音源としてスピーカーを正方形の中に置く。実験時の室温は 25 度であり、音速を 346.75 [m/s] として計算を行う。スピーカーから音声を鳴らし、各センサーノードでそれを取得する。それらを計算機に収集し、波形補間及び相互相関を計算して到着時間差を得る。得られた到着時間差を用いて位置推定を行う。2 [m] × 2 [m] の正方形の各頂点にセンサーノードを置き、表 3 のように各センサーノードの座標を設定する。 $(x, y) = (1, 1)$, および $(x, y) = (0.5, 0.5)$ の座標にスピーカーを置いた場合それぞれの位置推定結果を以降で示す。ここで、スピーカーの位置とは、スピーカーの振動板の中心とし、センサーノードの位置とは、センサーノードに搭載されているマイクロホンの位置とする。実験時の実際のシステム配置を図 10 に示す。

表 3 センサーノードの配置座標

| | 座標 [m] |
|-----------|--------|
| センサーノード 1 | (0,0) |
| センサーノード 2 | (2,0) |
| センサーノード 3 | (2,2) |
| センサーノード 4 | (0,2) |

表 4 用いた測定音と観測結果 (単位は全て [m])

| 測定音声 | 音源位置 | 推定結果 | 誤差 | 正規化平均二乗誤差 (NRMSE) | 推定位置分布 |
|-------|-----------|---------------|-------|-------------------|--------|
| ウシガエル | (1,1) | (0.947,0.940) | 0.080 | 0.236 | 図 11 |
| | (0.5,0.5) | (0.644,0.627) | 0.192 | 0.223 | 図 12 |
| アマガエル | (1,1) | (0.890,0.946) | 0.123 | 0.312 | 図 13 |
| | (0.5,0.5) | (0.824,0.672) | 0.367 | 0.419 | 図 14 |

5.3 実験結果

位置推定結果を表 4 に示す。ウシガエルの音源を用いた場合の推定誤差は、音源位置が (1, 1) の場合は 0.080 [m] であり、音源位置が (0.5, 0.5) の場合は 0.192 [m] である。音源が観測システムの中央にある場合のほうが推定精度が良いのは、それぞれのセンサーノードが取得する音声信号の形状の類似性が高くなるために、相互相関が正確に計算できていることが理由と考えられる。これはアマガエルの音源を用いた際の推定結果においても同様の結果が得られている。

各サンプルブロックごとの推定位置を、図 11～図 14 における result (simple) に示す。各図において、全てのサンプルブロックの重心の位置が result (average) である。ウシガエルについては、音源位置を変えたときに NRMSE の値がほとんど変わらないため、推定がうまく行えているものと考えられる。一方でアマガエルについては、ウシガエルよりも NRMSE の値が大きく、音源位置によっても NRMSE の値が変わっている。田んぼなどの実環境下では、観測範囲や音源位置が様々に異なるため、この点は実環境下での利用における課題となる。

また、ウシガエルの声を用いて、スピーカーを (0.5, 0.5) に置いた際に、サンプルブロックごとの推定位置の重心と音源位置との距離の誤差がサンプルブロックを計算するごとにどのように収束していくのかを図 15 に示す。ウシガエルの広告音を用いた場合には、10 個のサンプルブロックの推定位置を平均することでおおむね収束することが分かる。各サンプルブロックごとの推定に要する計算時間は

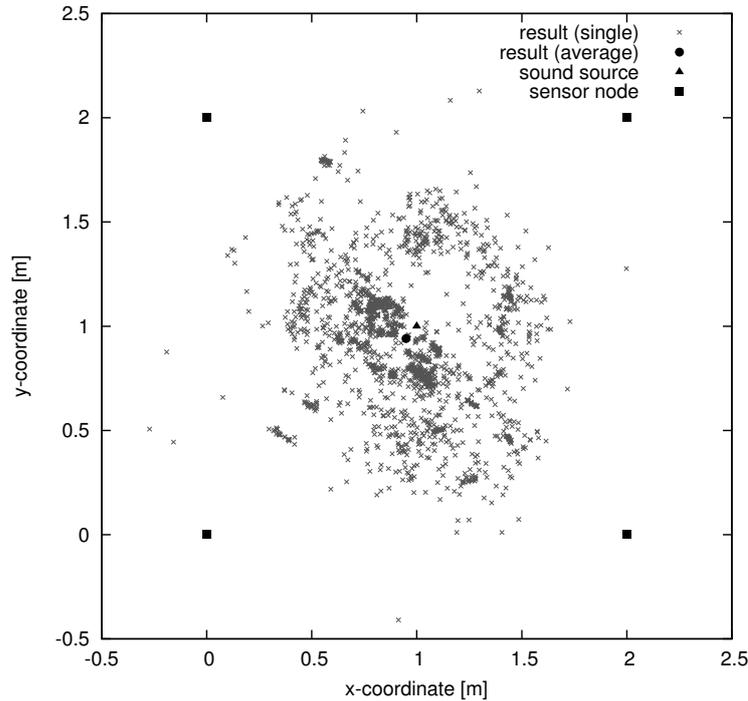


図 11 ウシガエルの推定位置の分布 [音源位置 (1,1)]

3 [s] 程度であり、30 [s] 程度で位置の推定が行えることになる。鳴いているカエルが移動する周期は 30 [s] よりも十分短いため、実環境下での利用に関して、計算速度の点では十分であるといえる。

音源の種類による結果の差として、ウシガエルの広告音を用いた時より、アマガエルの広告音を用いた方が、音源の位置によらず推定位置の精度が大きく落ちている。この原因は、各センサーノードがアマガエルの広告音を取得していても、相互相関の値を正しく取得することができていない場合があるためである。相互相関の値を正しく取得できなかった理由を次節において考察する。

5.4 考察

アマガエルの広告音を用いる場合は、ウシガエルの広告音を用いた場合と比べると誤差が大きくなった。本報告における位置推定では、各センサーノードにおける音声の到着時間差をもとに複数の双曲線方程式を導出し、全ての双曲線からの距離の総和が最小となる点を推定位置としている。そのため、位置推定結果に発生する誤差は、各センサーノードにおける音声の到着時間差に原因がある。各センサーノードにおける音声の到着時間差は相互相関を計算することで得ており、誤った到着時間差が得られているということは、真の到着時間差だけ信号をずらした場合以外で相互相関が最大値をとっているということを意味している。ここで、相互相関の計算に用いている式 (1) は、信号 f と、信号 g を n サン

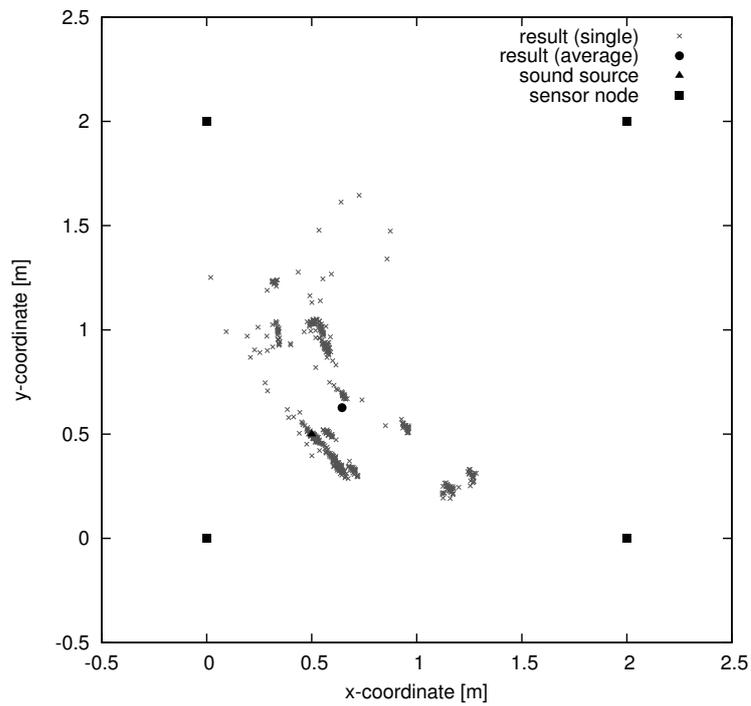


図 12 ウシガエルの推定位置の分布 [音源位置 (0.5,0.5)]

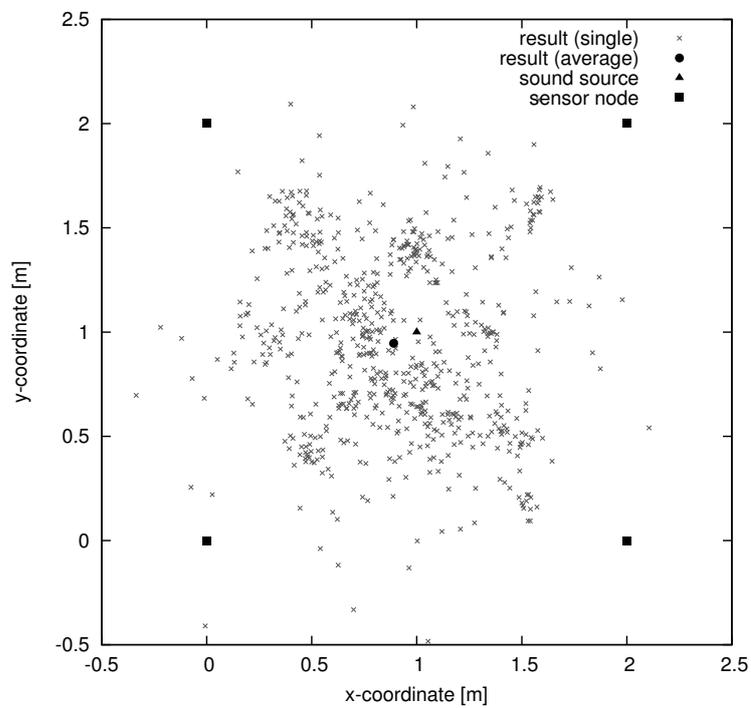


図 13 アマガエルの推定位置の分布 [音源位置 (1,1)]

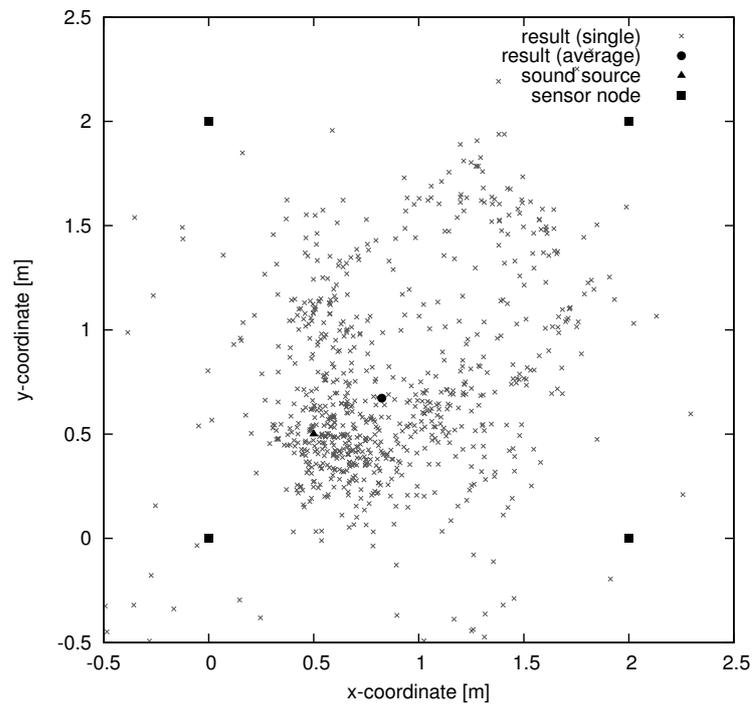


図 14 アマガエルの推定位置の分布 [音源位置 (0.5,0.5)]

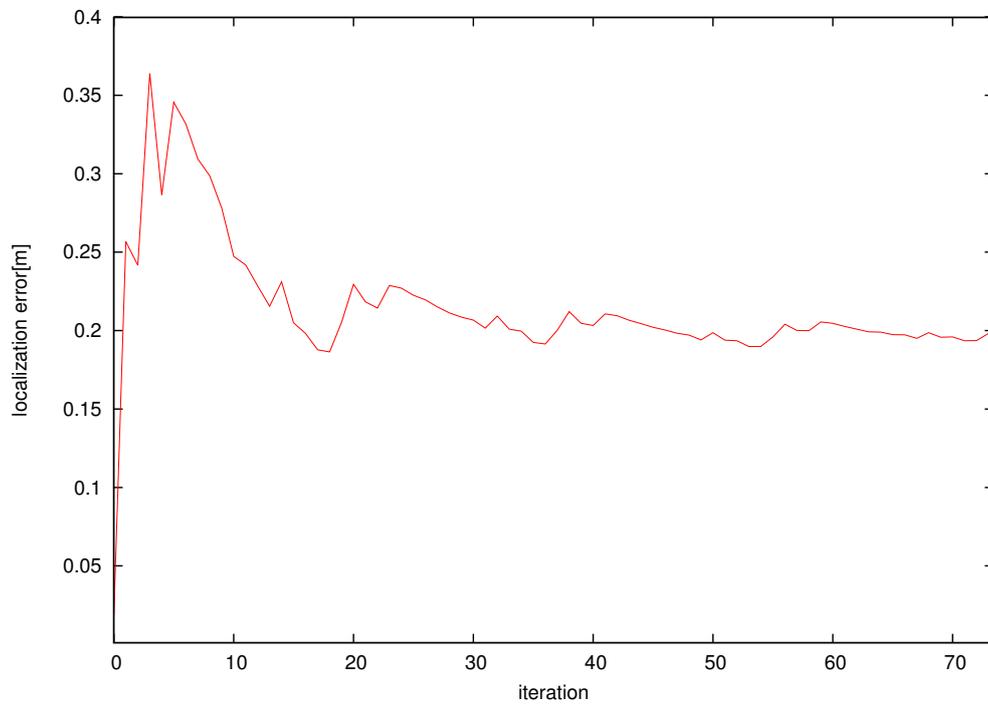


図 15 ウシガエルの推定位置の誤差 [音源位置 (0.5,0.5)]

プルだけずらした信号との内積を正規化するだけの単純なものであり、 f, g に対して一意に定まる。すなわち、各センサーノードにおける到着時間差に誤りが含まれるのは、相互相関の計算に用いる、各センサーノードでサンプリングされた音声信号が原因であると考えられる。

真の到着時間差だけ信号をずらした場合以外に相互相関が最大値を取る理由として、以下の三点が考えられる。

1. 音声波形の周期性

音声の波形が周期性を持つ場合、信号を整数周期ずらした場合にも波形の特徴が一致し、相互相関が最大となる

2. ノイズ

それぞれのセンサーノードでサンプリングした音声にノイズが大きく含まれる場合は、真の到着時間差だけ信号をずらしても波形の特徴が一致せず、相互相関の値が最大とならない可能性がある

3. サンプリングレート

サンプリングレートが不十分な場合には、波形補間を行ってもアマガエルの広告音を正しくデコードできず、真の到着時間差だけ信号をずらしても相互相関の値が最大とならない可能性がある

まず、音声波形の周期性について考察する。アマガエルの広告音の波形は、図 16 である。本報告での 1 サンプルブロックにあたる 80 サンプルでは、およそ 33,000 [μ s] の間サンプリングを行っているため、図 16 から、1 サンプルブロックで取得できる期間の波形を切り出した一例が図 17 である。

この図を見る限り、アマガエルの広告音に関して、現在のサンプリングブロックの大きさでは周期的な特徴が見られない。ここで、表 3 に示したノード配置を行い、(1,1) にスピーカーを置いた際の、アマガエルの広告音について相互相関を計算した結果 (図 18) と、周期性が見られる波形として 250 [Hz] の正弦波をスピーカーから出力した場合の相互相関を計算した結果 (図 19) を比較する。図 18, 図 19 の上図は、各センサーノードでサンプリングしたデータを元に 3 次スプライン補間を用いて波形補間を行った結果、下図は相互相関の値である。250 [Hz] の正弦波を観測した結果 19 では、相互相関の値が周期的に高くなっていることが分かるが、アマガエルの広告音で相互相関を計算した結果 18 では、それが見られない。以上より、アマガエルの音声信号を用いた場合に、相互相関が真の値よりも大きく誤ってしまう理由は、音声の周期性が原因ではないと考えられる。

次にノイズの影響についての考察を行う。図 18 の上図から分かるように、アマガエルの広告音に関して各ノードの測定波形の振幅は、0.3~1.2 程度である。一方で、図 20 に、ウシガエルの広告音について、サンプリングした音声波形と相互相関を示す。こちらの測定波形の最大振幅は、0.1 程度であり、アマガエルの場合よりも小さい。しかしながら、ウシガエルの場合の方が推定精度は高く、ノイズの影

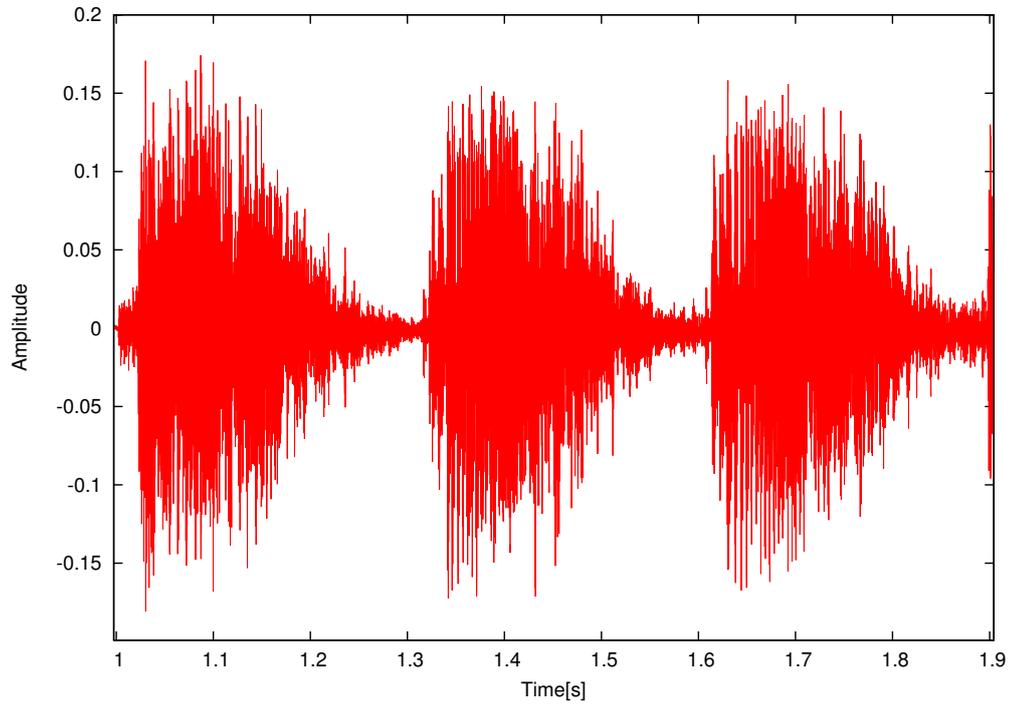


図 16 アマガエルの広告音

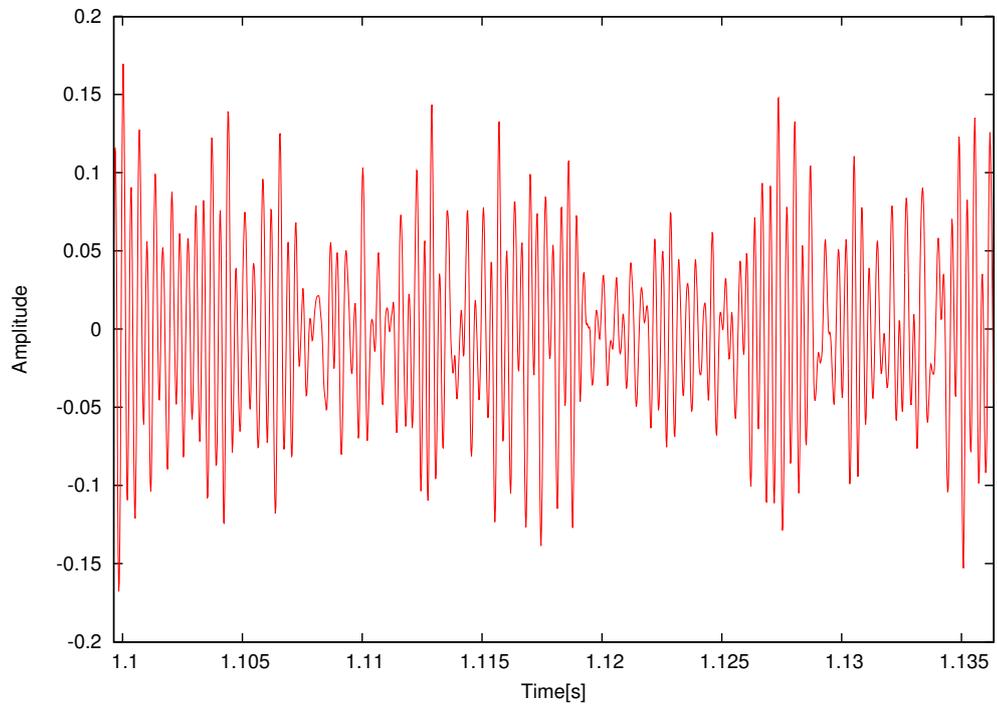


図 17 アマガエルの広告音 (1 サンプルブロック分)

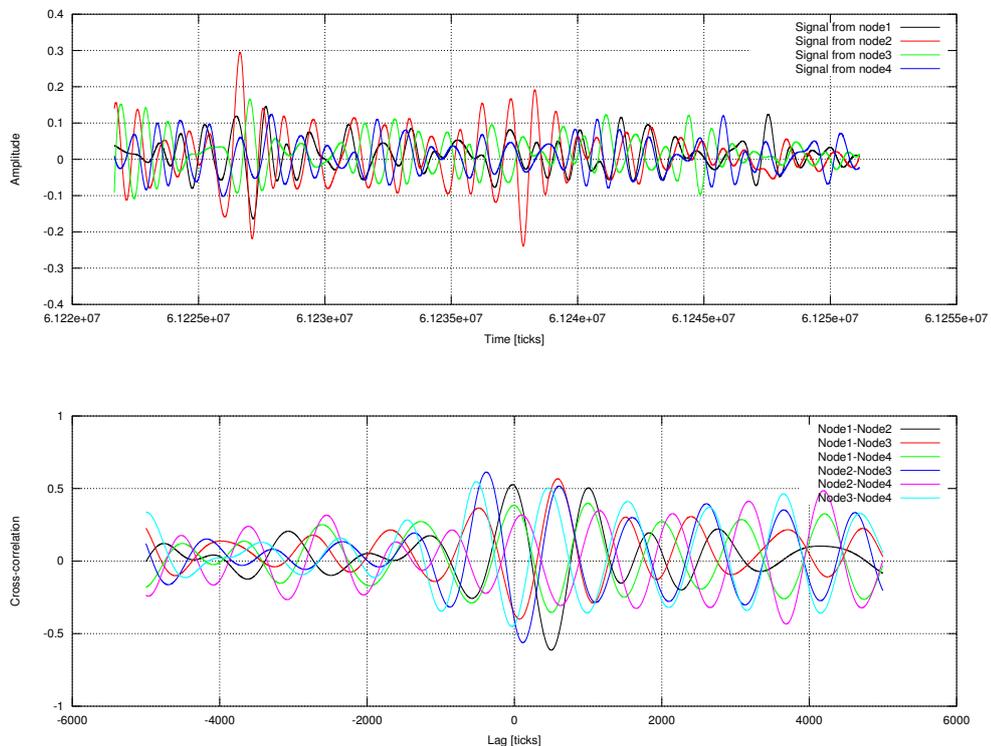


図 18 アマガエルの広告音の相互相関 [スピーカー位置 (1,1)]

響では、アマガエルの推定誤差とウシガエルの推定誤差の差は説明できない。

サンプリングレートに関して調査するため、実験に用いた音声のそれぞれの基本周波数に焦点をあてる。図 9 に、本報告で用いたウシガエルの広告音の波形と、アマガエルの広告音の波形を示す。一般に、ウシガエルの広告音の基本周波数は 500 [Hz]、アマガエルの広告音の基本周波数は 2,000 [Hz] であり、ウシガエルに比べて高い。

図 21 および図 22 に、スピーカーから出力されるアマガエルの広告音の波形 (raw wave) と、アマガエルの広告音の波形を 2,400 [Hz] でダウンサンプリングしたサンプル (downsampling wave) と、ダウンサンプリングされた信号にスプライン補間を用いて元の音声信号を復元した結果 (spline interpolation) を示す。それぞれの図では、サンプリングを開始するタイミングが異なっており、サンプリングレートが同じ場合でも復元される波形が全く異なることが分かる。

アマガエルの広告音の周波数に対して、センサーノードが 2,400 [Hz] でのサンプリングを行った際、波形の特徴を捉えられるだけのサンプルを取得できず、波形補間を行った際にももとの音声信号を復元できていないことが、相互相関の、すなわち位置推定の誤差を生じさせていると考えられる。

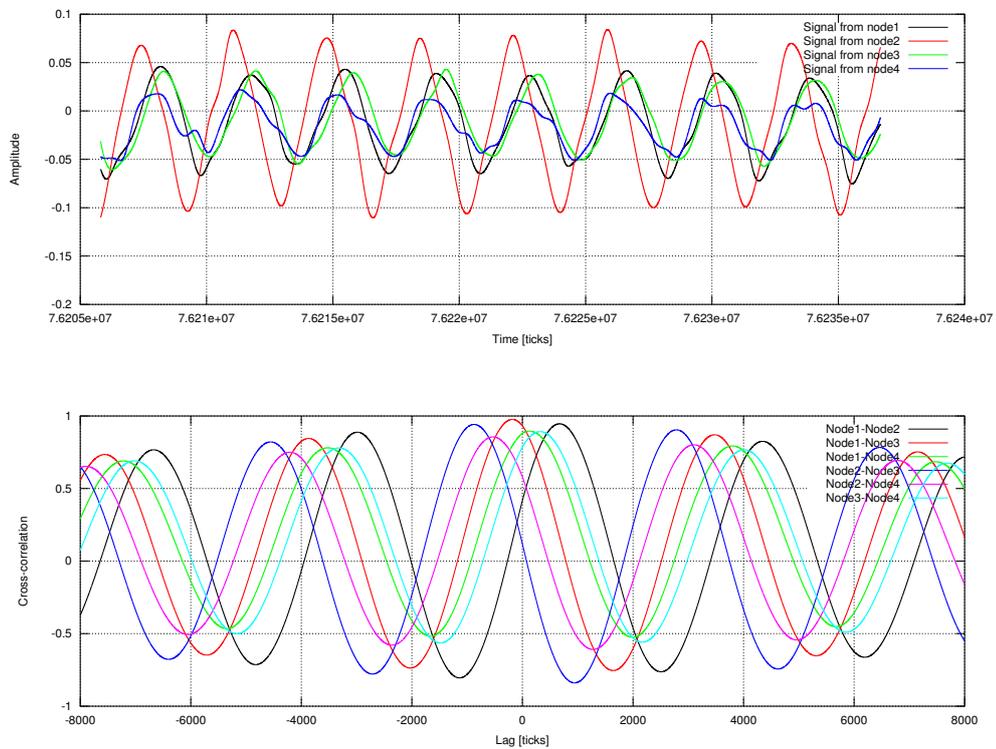


図 19 250 [Hz] 正弦波の相互相関 [スピーカー位置 (1,1)]

音声信号の基本周波数が他の周波数と比べて十分に強い成分である場合には、基本周波数を復元できるだけのサンプリングレートがあれば、位置推定を行う際には十分であると考えられる。一方で基本周波数と同程度の周波数成分が他に存在する場合には、より高い周波数成分を復元できる必要があると考えられる。以上から、音源を用いた位置推定を行う際には、位置推定対象となる音源について、周波数領域での特徴をあらかじめ知っておく必要がある。本報告で用いたアマガエルの基本周波数は 2,000 [Hz] であり、基本周波数が他の周波数と比べて十分強いと仮定した場合でも、サンプリング定理より、基本周波数の 2 倍のサンプリングレート、つまり 4,000 [Hz] のサンプリングレートが必要となる。

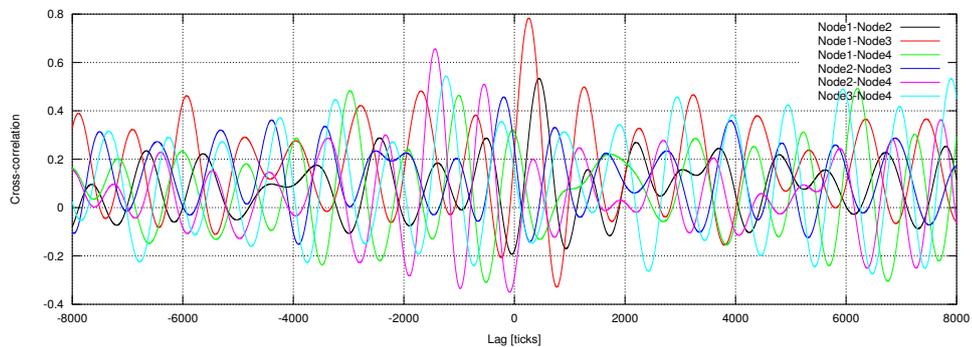
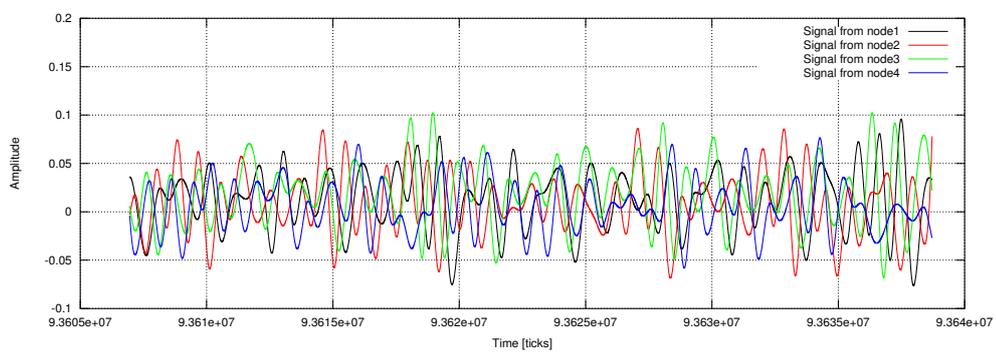


図 20 ウシガエルの広告音の相互相関 [スピーカー位置 (1,1)]

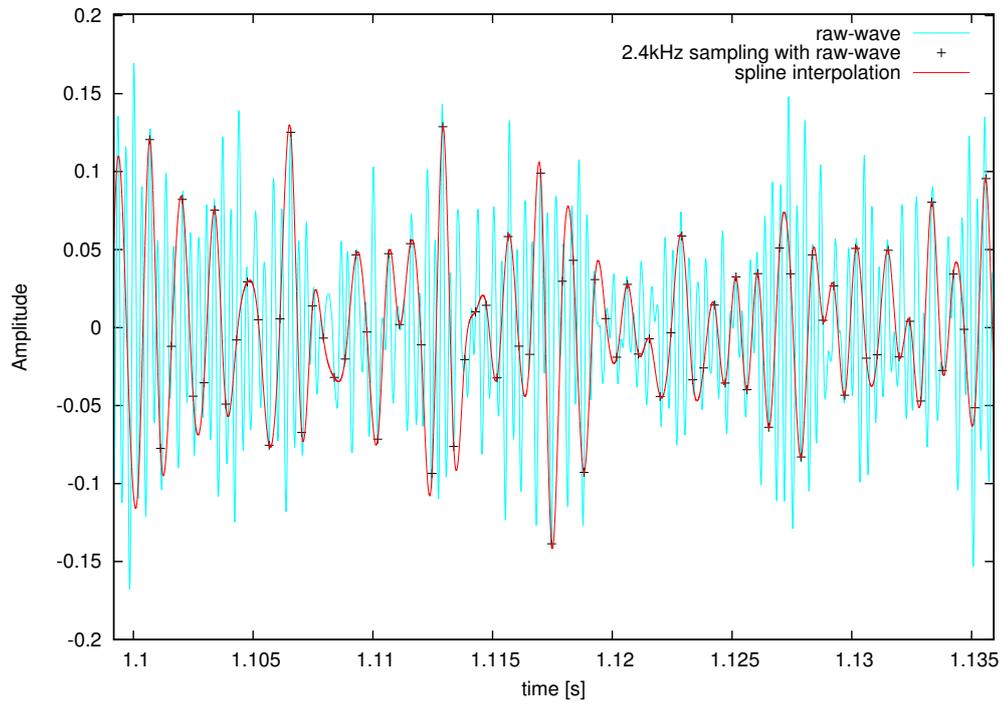


図 21 アマガエルの広告音を 2,400 [Hz] でダウンサンプリングした結果 [toc 0]

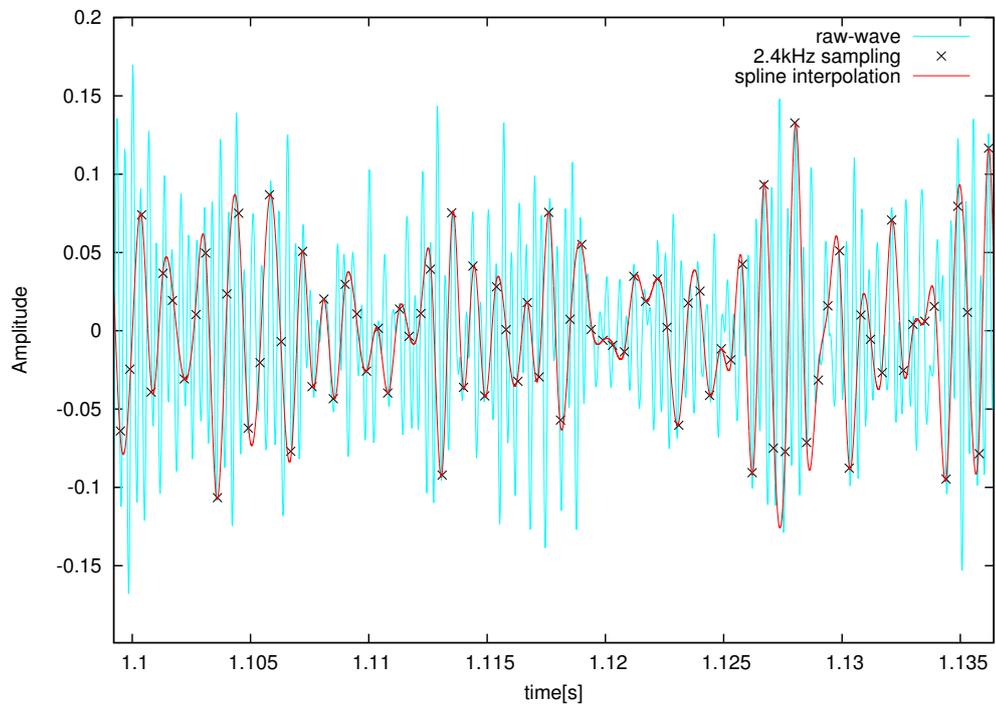


図 22 アマガエルの広告音を 2,400 [Hz] でダウンサンプリングした結果 [toc 2]

6 おわりに

本報告では、比較的安価なセンサーノードとマイクロホンを用いて音源位置推定手法の実装を行った。実機実験の結果、2 [m]×2 [m] の正方形領域内において、最も良い場合には、誤差 8 cm 程度でカエルの位置を推定できることを示した。しかしながら、音源の位置や種類によっては誤差は 37 cm にまで増加することも示した。また、観測対象となる音声波形の特徴、特に基本周波数を十分復元できる適切なサンプリングレートを用いることが音源位置の推定精度に重要であることを示した。本報告で示した位置推定結果は 2 [m] × 2 [m] の正方形領域を対象としたものであるが、発生する誤差はサンプリングレートによる部分が大きく、観測領域を大きくした場合にも誤差がさほど増加しない可能性を見出している。

今後は、アマガエルの広告音を対象とした音源位置推定システムを構築し、実際の観測実験に用いることを目指す。この場合には現状の方式ではいくつかの問題点が生まれる。本報告では観測対象となる音源が単一であることを仮定していたが、野外環境でカエルの定位を行う場合、この仮定はまず成立しない。

一般に、観測対象となる音源が複数が存在する場合に位置推定を行うには、音声信号の分離を行う必要がある。しかしながら、カエルは逆相同期して発声するという特徴と、逆相同期して鳴くカエルは互いにある程度の距離だけ離れているという特徴から、音声信号の分離を必要としない可能性がある。逆相同期して鳴くのであれば、カエルの鳴くタイミングごとの音声信号を用いて位置推定を行えば良く、得られたサンプルブロックごとの結果については統計的な分類処理が可能である。また、互いに逆相同期を行っている個体とは別の個体が鳴くことによる音声の混合については、ある程度指向性のあるマイクを用いることで解決できる。一方でカエルが逆相同期して発生する場合においても、三体以上の場合にはある二体が同相同期する可能性がある。本報告では比較的短い計算時間で位置推定を行うことができているが、ある程度の計算時間を許容するのであれば、受信信号の独立成分分析により、音源の分離は可能である。この場合、実験に用いるマイクロホン数が音源数以上であることが必要とされるが、互いに逆相同期するカエルの個体数は、幸いにも数体程度である。

使用する機器として今回は比較的安価な端末やマイクロホンを使用した。位置推定精度の向上には端末のサンプリング処理の高速化やマイクロホン感度が非常に重要である。野外環境で十分な推定精度が得られるシステムを完成させるため、位置推定アルゴリズム、使用する機材の両方の面から検討を行う。以上を今後の課題として、本報告を終える。

謝辞

本報告を終えるにあたりまして、日頃よりご指導、ご教授いただきました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に心より感謝申し上げます。ならびに本報告の作成に終始丁寧なご指導をいただきました大阪大学大学院経済学研究科の小南大智助教に深く感謝いたします。カエルの生態やその研究動向等、様々な深い知識を教えていただいた上、ニホンアマガエルの生態調査への参加に際してお世話になりました、同志社大学生命医科学研究科生態情報研究室研究員の合原一究様に厚く御礼申し上げます。本報告での実験にあたり、合原一究様には、実験用のカエルの音声データも提供していただきました。また、平素から適切なお助言を頂いた大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一准教授、大下裕一助教に厚く御礼申し上げます。最後に、日頃から様々な質問に答えていただき、多くの知識を頂きました岩井卓也氏、久世尚美氏、豊永慎也氏、藤田勇希氏、石倉秀氏をはじめとする村田研究室の方々にも深く感謝申し上げます。特に岩井卓也氏にはシステムの実装や評価実験など、研究の細部に至るまで協力して頂きました。重ねて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] S. Barbarossa and G. Scutari, “Bio-inspired sensor network design,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, pp. 26–35, May 2007.
- [2] M. Sipper, E. Sanchez, D. Mange, M. Tomassini, A. Perez-Urbe, and A. Stauffer, “A phylogenetic, ontogenetic, and epigenetic view of bio-inspired hardware systems,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 83–97, Apr. 1997.
- [3] 巖佐庸, 数理生物学入門—生物社会のダイナミクスを探る. 共立出版, Mar. 1998.
- [4] D. Sutanty and P. Levi, “A bio-inspired tdma scheduling algorithm for underwater robotic swarms,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1107–1112, Dec. 2013.
- [5] F. Dressler and O. B. Akan, “A survey on bio-inspired networking,” *Computer Networks*, vol. 54, pp. 881 – 900, Oct. 2010.
- [6] C. B. Hugo Hernández, “Frogsim: distributed graph coloring in wireless ad hoc networks,” *Telecommunication Systems*, vol. 55, pp. 211–223, Feb. 2014.
- [7] 前田 憲男, 松井 正文, 日本カエル図鑑. 文一総合出版, June 1999.
- [8] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, *Global Positioning System. Theory and Practice*. Springer, 1993.
- [9] I. Kawano, M. Mokuno, S. Kogure, and M. Kishimoto, “Japanese experimental GPS augmentation using quasi-zenith satellitesystem (QZSS),” *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*, pp. 175 – 181, Sept. 2004.
- [10] “iBeaconinsider.” <http://www.ibeacon.com/>.
- [11] “NTT DATA.” <http://www.nttdata.com/jp/ja/index.html>.
- [12] S. Gezici, Z. Tian, G. Giannakis, H. Kobayashi, A. Molisch, H. Poor, and Z. Sahinoglu, “Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, pp. 70–84, July 2005.
- [13] H. Shen, Z. Ding, S. Dasgupta, and C. Zhao, “Multiple source localization in wireless sensor networks based on time of arrival measurement,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, pp. 1938–1949, Apr. 2014.

- [14] G. Simon, M. Maróti, Á. Lédeczi, G. Balogh, B. Kusy, A. Nádas, G. Pap, J. Sallai, and K. Frampton, “Sensor network-based countersniper system,” in *Proceedings of 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 1–12, Nov. 2004.
- [15] P. Chen, P. Ahammad, C. Boyer, S.-I. Huang, L. Lin, E. Lobaton, M. Meingast, S. Oh, S. Wang, P. Yan, A. Yang, C. Yeo, L.-C. Chang, J. Tygar, and S. Sastry, “Citric: A low-bandwidth wireless camera network platform,” in *Proceedings of 2nd ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras*, pp. 1–10, Sept. 2008.
- [16] D. v. Helversenand and O. v Helversen, “Species recognition and acoustic localization in acridid grasshoppers: a behavioral approach,” in *Neuroethology and behavioral physiology*, pp. 95–107, Springer, 1983.
- [17] 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, pp. 1–8, Jan. 2014.
- [18] 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*) , Nov. 2014.
- [19] A. Canclini, E. Antonacci, A. Sarti, and S. Tubaro, “Acoustic source localization with distributed asynchronous microphone networks,” *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, vol. 21, pp. 439–443, Feb. 2013.
- [20] “MPR/MIB User’s Manual.” <http://www.xbow.jp/pdf/mpmib.pdf>.
- [21] G. Han, H. Xu, T. Q. Duong, J. Jiang, and T. Hara, “Localization algorithms of wireless sensor networks: a survey,” *Telecommunication Systems*, vol. 52, pp. 2419–2436, Apr. 2013.
- [22] 三谷政昭, やり直しのための信号数学. CQ 出版社, Oct. 2005.