

卒業論文 2011 年度 (平成 23 年度)

FRAPPE:複数周波数帯を用いた携帯端末における位置測定  
手法の研究

指導教員

慶應義塾大学環境情報学部

徳田 英幸

村井 純

楠本 博之

中村 修

高汐 一紀

Van Meter, Rodney D

植原 啓介

三次 仁

中澤 仁

武田 圭史

慶應義塾大学 環境情報学部

西條 晃平

*grohey@ht.sfc.keio.ac.jp*

## 卒業論文要旨 2011 年度 (平成 23 年度)

### FRAPPE:複数周波数帯を用いた携帯端末における位置測定手法の研究

位置情報は人や物の最も基礎的な情報である。人や行動検知や物の管理、特定の場所固有の情報を得るためにこれらの位置情報は非常に重要性の高い情報である。精度が高く、高速で、かつ信頼性の高い位置情報取得手法への需要が問わず非常に高まっている。またこれらの位置情報を基とした位置情報サービス(LBS:Location Based Services)も屋内外に問わず多く提案されている。またこれらの LBS の普及に伴って多くの位置情報取得手法が提案されているが、その多くは高価なものや、特殊なセンサや発振器を用いており、ユーザの行動範囲を網羅する様なシステムの構築は膨大なコストが掛かることとなり、現実的な運用は困難であると言える。これらの背景のもと、環境への依存性の低いシステムの構築が求められている。

本論文では屋内環境において、複数のユーザが特別な端末やセンサを使用せず、既存の携帯電話端末で精度の高い高速な位置情報取得手法及びシステム「FRAPPE」を提案し、実装を行う。FRAPPE システムではユーザが普段持ち歩いている携帯電話端末のマイクとスピーカを用いて、音声シグナルをそれぞれの端末が受信することにより、それぞれの端末の発した音声シグナルと対する端末が発したシグナルの時間差の差を求めことで位置測定を可能としている。また、音声シグナルに複数の周波数帯域を用いることにより、高速かつ、精度の高いシグナル検出を可能とした。また、複数のユーザが同時にシステムを使用した際に大きく誤差が生じてしまい、音声シグナルが重なる例外が起こってしまった場合にも正しく対処する事ができた。

評価実験においては 80cm 四方に配置した端末の実寸法と測定結果の平均誤差は 3.216cm となり、非常に高精度な測定が実現されていると言える。また、処理速度の比較において従来の手法の 39% の処理速度を実現した。

録音中にシグナル発信を行うと、測定データが欠落してしまう問題について今後、問題が生じている箇所の特定とその解決手法の提案を行い、携帯端末を統一する事が課題としてあげられる。

本論文では以上の FRAPPE システムの具体的な設計及び実装、実際にミーティングルームに於いてこの手法に対する性能評価実験を行った結果と考察を述べる。

#### キーワード

ローカライゼーション, 携帯端末, 音声シグナル解析, FFT, ユビキタスコンピューティング

慶應義塾大学 環境情報学部

西條 晃平

## **Abstract of Bachelor's Thesis Academic Year 2011**

Location information one of the most basic information of a person or an object. Location information is also important when you need information about one specific places' data by detecting an action in space. Therefore, when acquiring the location information of one place, accurate, high speed, and reliable technique is regardless of whether you are outside or indoor.

In recent years, researchers have been proposing locational information service based on location information (LBS:Location Based Services). However, many techniques on acquiring the positional information are being suggested these days, most of them uses special or costly sensors and oscillators. Thus, a system which is environment-dependent and works in a particular range from one user was far from being realized in the real world.

In this thesis proposes and implements a system named "FRAPPE" which does not use special terminal units or sensors, instead uses existing mobile phones to acquire positional information with high accuracy and high speed. FRAPPE system enables a user to acquire other user' s positional information by using existing mobile phones' microphone and speakers.

This is done by calculating the time lag between the sound signals which were sent and received from the mobile phones. In addition, by using plural numbers of frequency bands on the sound signals, it made it possible to detect the signals in a high speed and accurate way. When plural users use the system at the same time, a large margin of error occurred. I have made the system so that it could cope with this exception. In the evaluation test, the system calculated distance and the real distance between mobile phones placed 80cm far from each other' s margin of error was only 3.216cm which we can say that it is an accurate measurement. Also, the speed compared to existing systems, I have realized the system to be 39% as fast.

A problem about this system is when sending the signal while recording the sound, the measurement data lacks. I will have to determine where the problem is occurring, find a solution to the problem, and unite all the mobile phones. In this paper I will propose the concrete way of how I made the system, the result and the investigation of when I used the system in a meeting room.

### **Keywords**

**Localization, Mobile Phone, Acoustic Signal, FFT, Ubiquitous Computing**

**Kohei Saijo**

**Faculty of Environment and Information Studies  
Keio University**

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	本研究の背景	2
1.2	本研究の目的	3
1.3	本論文の構成	4
<b>第 2 章</b>	<b>問題設定とアプローチ</b>	<b>5</b>
2.1	位置情報の取得手法の分類と比較	6
2.1.1	受信信号強度 (RSS : Received Signal Strength)	6
2.1.2	信号到来角度 (AOA : Angle Of Arrival)	7
2.1.3	信号到来時間 (TOA : Time Of Arrival)	7
2.1.4	測距手法の分類	7
2.2	音声を用いた TOA 方式の既存研究	8
2.3	シナリオ	9
2.4	機能要件	11
<b>第 3 章</b>	<b>複数の周波数帯を用いた端末間距離測定手法の提案</b>	<b>12</b>
3.1	研究のアプローチ概要	13
3.2	音声シグナルを用いた位置測定	13
3.2.1	問題点の整理	16
3.3	複数周波数帯を用いた相互音声シグナル交換	16
3.3.1	複数周波数帯を用いる有効性	17
3.3.2	音声シグナルの選定	17
3.3.3	欠損シグナルの補完	18
3.3.4	マルチパスエフェクト	20
3.4	高速フーリエ変換と自己相関を用いたシグナル検出アルゴリズム	20
<b>第 4 章</b>	<b>設計</b>	<b>22</b>
4.1	FRAPPE の設計概要	23
4.1.1	システム設計	23
4.2	FRAPPE システムの動作概要	24
4.2.1	通信モジュールの設計	24
4.2.2	音声シグナル交換プロトコル	25
4.2.3	アクチュエートモジュールの設計	26

4.2.4	センスモジュールの設計 . . . . .	26
4.2.5	計算モジュールの設計 . . . . .	27
<b>第 5 章</b>	<b>実装</b>	<b>28</b>
5.1	FRAPPE システムの実装概要 . . . . .	29
5.2	実装環境 . . . . .	29
5.2.1	音声シグナル交換プロトコルの実装 . . . . .	30
<b>第 6 章</b>	<b>評価</b>	<b>35</b>
6.1	評価概要 . . . . .	36
6.1.1	評価環境 . . . . .	36
6.1.2	評価項目 . . . . .	37
6.2	精度評価 . . . . .	37
6.3	速度評価 . . . . .	39
6.3.1	実験環境 . . . . .	39
6.3.2	評価軸 . . . . .	40
6.4	考察 . . . . .	41
6.5	本章のまとめ . . . . .	42
<b>第 7 章</b>	<b>結論</b>	<b>43</b>
7.1	本研究のまとめ . . . . .	44
7.2	今後の課題と展望 . . . . .	44
<b>参考文献</b>		<b>46</b>

# 目次

1.1	位置情報サービスの例	2
2.1	受信信号強度方式	6
2.2	信号到来角度方式による測距	7
2.3	信号到来時間方式による測距	7
2.4	測距手法の特性分布	8
2.5	シナリオにおける想定環境	10
3.1	Beep Beep アルゴリズムにおける双方向センシング手順	14
3.2	Beep Beep 音声交換手順	15
3.3	正弦波	18
3.4	三角波	18
3.5	ノコギリ波	18
3.6	短形波	18
3.7	チャープ波 (線形)	18
3.8	チャープ波 (指数)	18
3.9	線形チャープ音の周波数スペクトル	18
3.10	欠損データの補完手法	19
3.11	欠損データの補完手法	19
3.12	マルチパス効果による残像出現現象	20
3.13	窓掛け	21
4.1	システム構成	23
4.2	シグナル音声交換プロトコル手順	25
4.3	周波数帯域の輪番	25
4.4	ばねモデルレイアウト (初期状態)	27
4.5	ばねモデルレイアウト (完成状態)	27
5.1	Google Nexus One	29
5.2	Nexus S	29
5.3	周波数特性	30
6.1	実験環境のレイアウト図	36

6.2	携帯端末の配置図 . . . . .	38
6.3	FFT のみにおける位置測定精度 . . . . .	39
6.4	自己相関を使用した位置測定精度 (TestCase1) . . . . .	39
6.5	自己相関を使用した位置測定精度 (TestCase2) . . . . .	40
6.6	FRAPPE と BeepBeep の処理時間比較 . . . . .	41

# 表目次

5.1	実装環境 . . . . .	29
5.2	リーダー端末における測定対象端末の情報 . . . . .	31
6.1	評価実験端末 . . . . .	37
6.2	精度結果 . . . . .	38
6.3	実装環境 . . . . .	40
6.4	実装環境 . . . . .	41

# 第 1 章

## 序論

本章では、まず位置情報の利用可能性とその重要性について概要を述べる。次に屋外/屋内環境における位置取得手法について整理し、本研究の問題意識について述べる。最後に本論文の各章の構成を整理する。

## 1.1 本研究の背景

人や物の位置情報は、空間においてその行動を検知し、場所固有の情報を得るために非常に重要な情報である。これらの位置情報は最も基礎的な情報であるため、精度が高く、高速で、かつ信頼性の高い位置情報取得手法が求められている。これらの位置情報を基とした位置情報サービス (LBS:Location Based Services) も同様に多数提案されている。例えば以下のようなサービスが挙げられる。

- ナビゲーション [1]
- 人や物のトラッキング [2][3]
- 緊急時の居場所通知 [4]
- 交通情報 [5]
- ライフログGING・ソーシャルネットワーク [6]

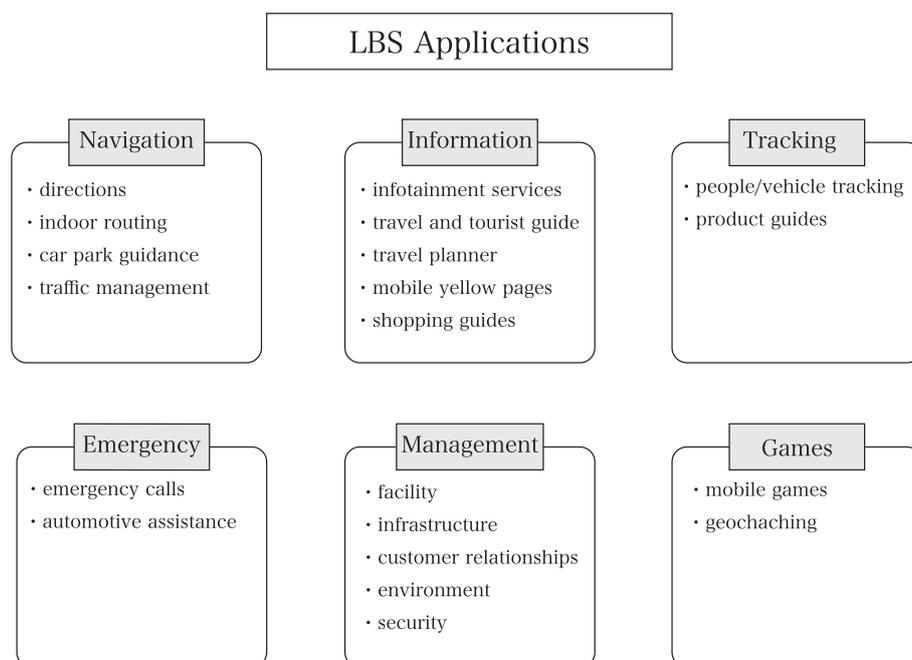


図 1.1 位置情報サービスの例

これらの例に見られるように位置情報は我々の生活に密着したサービスに応用され、今後もこうしたサービスが増えることが期待されている。また近年の携帯端末の性能向上により、GPSなどに代表される位置情報取得機能が搭載された機種が普及し、位置情報へのアクセシビリティが向上している。加えて、多くの携帯電話端末がプログラマブルになり、比較的経験の浅い開発者でも容易に位置情報を取得することが可能となった事から先に挙げたようなLBSを開発することへの敷居は下がつつあり、LBSは今後更に増加することが予想できる。

LBSの普及に伴って多くの位置情報取得手法が提案されている。屋外における位置情報システムとして、最も手軽で信頼性の高いシステムであるGPS(Global Positioning System)が挙げられる。GPSは専用の衛

星4基以上からの信号を30秒に1回それぞれから受信することによって信号の到達時間のずれによって座標が決定する。これにより遮蔽物のない開けた場所では約数メートル程度の精度で端末の位置を特定することが可能である。しかし、建物が多く立ち並ぶ地域では衛星4基からの信号を捉えることは容易ではない。現に高層ビルが立ち並ぶ日本の都市部においては携帯端末のGPSセンサでは正しく位置が取得できない事が多く見受けられる。また電波の反射により、衛星からの直接波より長い経路を通過して観測されてしまうマルチパスエフェクトと呼ばれる現象が生じている。これによりGPS信号の搬送波位相の遅れや受信強度への変動が生じ、精度の低下や取得までの所要時間が長くなっている。

屋内における位置測定手法も同様に多く研究されており、ActiveBat[7]やCricket[8]等では環境に設置した超音波センサとユーザが携帯する小型のビーコン発信ノードにより高精度な3次元位置情報を取得することができる。しかし、これらの位置情報システムは非常に高精度ではあるものの、現段階では環境に特別なセンサを用いており、そのほとんどが非常に高価なため、一般的な環境に導入するにはコストが高く現実的ではない。また、環境のスペースによる制限から大きくて重いセンサを設置できないこと、設置時にキャリブレーションを行わなければならないこと、開発者がセンサの値を取得する為に仕様を学習しなければならないことなどの原因により、一般的な導入は困難である。環境への依存性を低く保つためにはユーザが普段から携帯している市販の端末のみを用いて高精度な屋内位置情報を取得できることが最も望ましい。

位置情報はLBSだけではなく、WSN(Wireless Sensor Network)の分野においても非常に重要な情報である。[9]センサ技術の進歩により今後超小型のセンサノードが日用品に取り付けられるようになると、ノードの位置情報管理により、所有物のトラッキング[10]やユーザの状態や行動に基づいたアクチュエーションを行うシステム[11]が実現する。正確なセンサノードの位置情報を管理することはこれらのシステムの精度や頑健性を高めるために大きく貢献できる。通常これらのセンサノードには必要最小限のセンサ・アクチュエータセットのみが搭載されているため、既存の位置情報取得手法で使用されるような高性能なセンサは搭載されない場合が多い。マイクやスピーカのような既存の端末に搭載されているインフラのみを使用して高精度な位置測定が実現できれば、より多くのアプリケーションの実現やプラットフォームの精度向上が期待できる。

## 1.2 本研究の目的

位置情報取得技術ではそれぞれに精度・環境への依存性等に特徴があり、要求に適した手法を随時選択することが要求される。例えば屋外においてはカーナビゲーションが考えられるが、この例では数メートルの誤差まで許容出来る場合が多い。しかし、工場や部屋などの屋内での人・物の位置管理や屋内における、より粒度の細かい動線管理や位置の測定を行うシステムでは数センチメートル単位の高い精度が必要とされる。

また、制度の高い位置測定が、より高速で信頼性の高いものである場合、定期的に情報を取得することにより測定対象の移動を検知することが可能である。本論文では移動することの多い「人」をターゲットとし、屋内環境において、複数のユーザが特別な端末やセンサを使用せず、既存の携帯電話端末で精度の高い位置情報取得手法を提案することを目的とする。

ただし、環境への依存性を排除するため、環境の絶対的な情報は設定しない事とし、「屋内環境における位置情報」は「ユーザ間の相対位置関係」と同義であることとする。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。第2章では既存の屋内位置情報取得手法について述べ、複数ユーザの存在する環境における相対距離の測定機構に求められる要件を整理し、本論文で提案するアプローチについて述べる。第3章では、複数端末間の同時距離取得手法について、複数周波数帯を用いる有効性とシグナルの検出アルゴリズムの比較と提案を行う。第4章では、第3章で述べた手法とアルゴリズムに加えて参加端末の発見機構や相対位置の計算機構の設計を含めた本システムの全体設計について述べる。第5章では第4章で述べた設計について具体的な実装について述べる。第6章では本論文のアプローチを定性的に評価し、既存研究との比較と考察を行う。第7章で本研究の結論を示し、本論文をしめくくる。

## 第2章

# 問題設定とアプローチ

本章では，既存の位置情報取得手法について手法ごとに分類して説明する．論文で想定するシナリオを挙げ，シナリオを通して導き出される問題点を整理し，本研究における機能要件について説明する．

## 2.1 位置情報の取得手法の分類と比較

位置情報の取得手法はこれまでに様々な提案がされている。これらは大きく二種類に分類すると屋外での使用を目的としたものと屋内での使用を目的としているものに分けることができる。

屋外における位置測定技術ではグローバル・ポジショニング・システム (GPS: Global Positioning System) などの位置情報を基とした測定手法や広域無線を用いた位置測定 [12]、更に飛行体から光を照射して行う位置測定 [13] など様々手法が提案されている。基本的な GPS 技術を用いた場合、10m 程度の即位精度を得ることができる。しかし、屋内では GPS や携帯電話の電波塔を利用した位置情報取得手法では衛生の電波信号を直接捉えられない為、位置推定精度が低下する。

本論文で対象としている環境はミーティングルーム内における研究室メンバの位置測定である為、これらの屋外における位置情報システムは利用することができない。屋内における位置情報取得手法について説明する。

位置情報に求められる検出精度は、アプリケーションによって千差万別である。ユーザの場所を把握し、最適な空調管理を行う室内空調最適化システムでは数 m の誤差を許容出来る場合があるが、本シナリオで上げたケースでは隣のユーザとの距離の差別化を十分な精度で行う為には少なくとも数 cm の精度が必要である。

屋内での位置情報は各測位対象間の距離測定の結果に対し、一つ以上の対象の絶対位置を指定することで、残りの対象の位置情報を特定することができる。測距には次に示す 3 つの技術が検討されている。

### 2.1.1 受信信号強度 (RSS : Received Signal Strength)

RSS に基づいた距離測定手法はターゲットから発せられた信号である音波や電波が、距離に応じて減衰することを利用した手法である。電波信号の強度から距離を正確に算出する為には、その環境に於ける距離減衰のモデル化が必要である。

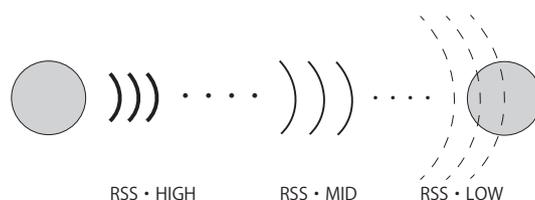


図 2.1 受信信号強度方式

RSS を用いた位置測定手法として、光・電波を用いた手法が挙げられる。光、電波はどちらも光速に近い高速な信号を用いた手法であり、信号の干渉や到達誤差、Bluetooth、Wifi、RFID などの通信における RSS を用いた手法が提案されている。 [14]

無線の RSS を用いた手法もいくつか提案されており、数 cm の誤差で位置取得ができるが、環境内に 3 つ以上のアクセスポイントを設置することが前提であるなど、環境への依存性が非常に高い。Wifi の電波強度を使用する手法ではアクセスポイントの数により測定精度に大きく影響が生じることから、誤差を多く含んだ RSS が認識され、ユーザの位置情報を正確に知るためにはこの手法では十分な精度が得られない。

### 2.1.2 信号到来角度 (AOA : Angle Of Arrival)

AOA を利用距離測定手法はターゲットから発せられた信号である音波や電波が、受信ノードから見てどの方向から受信されたかを測定することを利用した位置検出技術である。しかし、到来方向の推定には指向性のマイクやアンテナ、アレーアンテナ等特殊な装置を用いる必要があるため、他の手法に比べてコストが増してしまう。

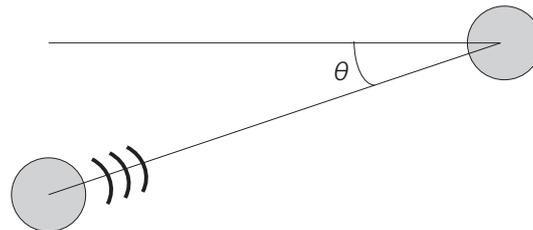


図 2.2 信号到来角度方式による測距

### 2.1.3 信号到来時間 (TOA : Time Of Arrival)

TOA を用いた距離測定手法はターゲットから発せられた信号である音波や電波が、ターゲットと各ノードの距離に応じて異なる時刻に到来することを利用した位置検出技術である。この手法では送信機から送信された到来波の内、最も早く到達した第一到来波を認識することにより、送受信の時間差から端末間の距離を算出する。TOA ベース測距推定法を用いることにより、数センチメートル単位での測距を達成することができる。しかし、通常信号が到来した時間をローカルクロックにより管理する為、ノード間で正確な時刻同期が必要となる。

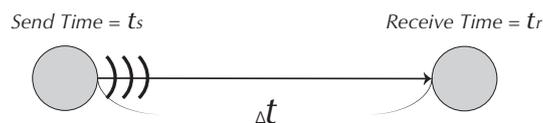


図 2.3 信号到来時間方式による測距

TOA を用いた手法では UWB、広域 CDMA、音波、超音波等を用いた手法 [15] が提案されている。音波を用いた位置情報システムでは可聴音を用いた手法と超音波を用いた手法に分類され、音波は先に述べた光や電波と比べ波が伝わる速度が遅く、距離による到達時間差を観測することが容易である。よって、音の TOA を用いた手法では音声到達時刻をミリ秒単位で計測できた場合、その誤差は数センチメートルとなり、容易に高精度な位置計測ができる。超音波を用いた手法では高周波数帯域における指向性と波長の短さを利用し、非常に精度の高い距離測定を行うことができる。

### 2.1.4 測距手法の分類

屋内における測距手法を整理すると図 2.4 のように整理することができる。

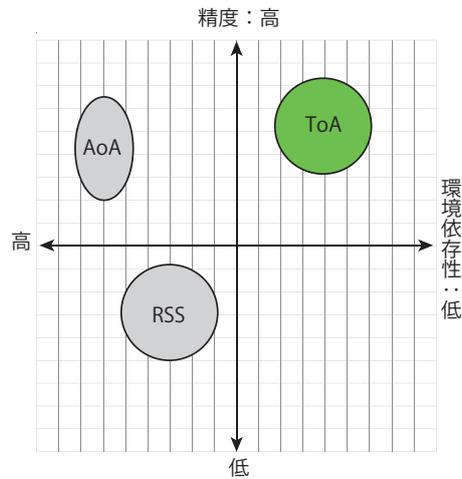


図 2.4 測距手法の特性分布

それぞれの手法についてその特徴を述べた。RSS を用いた位置測定手法ではシグナルを発信するためのシグナル発信機や RSS を取得するために簡易ではあるものの、特殊なインフラを必要とするものが見られた。また電波の減衰は一定ではなく、電波の反射や遮蔽物により大きく結果が異なるため精度の面ではあまり高くない結果が得られた。しかしながら、RSS では無線の可搬性を用いて屋内から屋外まで一定の精度で位置情報を取得できる。

AOA を用いた位置測定手法では、TOA に比べ、少ない数のシグナル発信源を用いて位置情報が取得できるメリットがある。精度に関しては TOA と同等に高い。しかし、シグナルの発振器が必要であることに加え、受信センサがマイクアレイなどの特殊度の高い物が多く環境への依存度が高いことが大きな欠点である。

最後に TOA を用いた手法では、位置座標を得るためにシグナルの発信源が3つ以上必要であることを除き、精度は AOA を用いた手法と同等に高く、マイクとスピーカだけを用いた測定ができるなど、環境への依存度は非常に低い事が挙げられる。次節では先に述べた位置取得方法として最も環境依存性の低い、音声を用いた TOA 方式の研究についてフォーカスを当て、詳しく説明する。

## 2.2 音声を用いた TOA 方式の既存研究

音声を用いた既存の研究事例を上げ、それぞれの手法の特徴と本論文との相違点について述べる。

### ● 環境音声を用いた位置検出手法

環境音を利用してノードの位置を特定する手法として Indoor Localization Without Infrastructure. Using the Acoustic Background Spectrum.[16] が挙げられる。この手法では環境の構造や環境内のオブジェクトによってビーコンへの反射音が異なる事に注目し、これらの類似性を比較検証することで、ノードがどの環境に設置されているかを特定することができる。

環境音スペクトル (ABS : Acoustic Background Spectrum) と呼ばれる事前に録音されたフィンガープリントに基づいた位置推定を行う。ABS は録音されたデータのスペクトル密度を時間軸で切り分け、高音域をカットしたものをマグニチュード順にソートしたものである。このシステムの評価では 33 部屋の中から 1 部屋を見つけ出す精度は Wifi による補正を同時に用いた場合 69% となっており、Wifi の

みの場合の 30% をから改善が見られたとされている。特に優れている点としてあげられるのは Wi-Fi 環境が使用不可能な屋内の場所においてもノードの位置を 50% の確率で特定することが可能である点である。しかしこの手法で特定できるのは部屋単位の環境のみであり、本論文が対象としている精度は得られない。

- **TOA 一般型レンジベース (Range-based) 位置検出技術**

TOA はターゲットから発せられた信号である音波や電波がターゲットと各ノードの距離に応じて異なる時間に到来することを利用した位置検出技術である。この種類の位置検出手法では端末同士の高性能な時刻同期が必要とするため、不確定要素の多い一般用途の端末における利用は大幅に制限される。また、到達時刻の粒度として非常に細かい粒度の管理が必要とされるため、微細な時刻管理が望めない端末での TOA を用いた手法の利用は端末間の距離が十分に離れている環境に特化している。

- **Beep Beep(Twoway)**

BeepBeep[17] は従来の TOA 型ではシグナルの送信が一度の送信につき一方向の音波通信であるのに対し、Beep Beep 方式ではシグナルの送信が一度に 2 方向から相互に送信される、Two-way 送信を用いており、携帯端末の録音機能としてサポートされているサンプリングレートによるサンプル数を用いることにより、時刻の正確さを実現している。また、これらの 2 信号の到達時間差 (TDOA: Time Difference Of Arrival) を交換し合うことにより、2 端末間での正確な距離測定を実現している。

実験結果によると、4 メートル以内の環境では 95 % の確率で 5 センチメートル以内の誤差を実現しており、非常に高精度な位置測定が実現されている。しかし、端末間距離が 4 メートルを超えると急激に精度が低下し、端末間距離が 5 メートルの時点で測定が全くできなくなってしまう。また、音声シグナルの干渉を防ぐために音声シグナル間では 1 秒間のインターバルを必要としていることから、端末の数が増加することにより、位置測定にかかる時間が非常に長くなってしまふ欠点がある。

- **On the Feasibility of Real-Time Phone-to-Phone 3D Localization**

Beep Beep のアルゴリズムを相対 3D 位置測定に拡張する試みとして [18] が挙げられる。

この手法では既存のスマートフォン端末を利用し、TOA 方式の音声シグナルと出力レベルに基づいた位置推定を提案している。各携帯端末には 2 つのマイクと、1 つのスピーカ、WiFi などの通信モジュールを搭載していることを前提としており、加速度センサと地磁気センサによって音を用いた位置測定手法の精度を補助している。これらのセンサは最新のスマートフォンでは予め搭載してあり、3D への展開に際してハードウェアの変更を必要としない。

またこの研究では端末の移動を反映するために簡易な時刻同期を行っており、Extended Kalman Filter の適応により、精度を向上させている。評価実験では、直線、折り返した直線、波線などの動作線に対し、90% の確率で 13.9 センチメートル以内の推定を可能としており、50% の確率で 4.9 センチメートルの精度を実現している。

この手法では音声シグナルの干渉を防ぐために特性の違う 2 種類の音声シグナルを用いているが、2 端末間の位置測定のみを対象としており、複数の端末に対して距離測定を行うことが不可能である。

## 2.3 シナリオ

以下では、本論文で想定する問題点を 5 つの項目に絞り、具体的なシナリオを用いて説明する。そこから導き出される問題点を次節で整理し、機能要件を設定する。シナリオで利用される環境は次の図 2.5 のとおりで

ある。



図 2.5 シナリオにおける想定環境

#### 1. 位置情報の取得

花子の所属する研究室では週に 2 回の定例ミーティングを行い、研究成果の共有や議論を行なっている。ある日花子はミーティングのログを取る係になったが、まだ新人の花子は先輩の名前が分からず席の順番だけでログを取ることにした。後日それぞれのログデータを送ろうとしたものの、誰が何処に座っていたかを忘れてしまい、ログデータを手渡すことが出来なかった。そこで花子はミーティングで自動的にユーザの位置を特定し、ログデータを送信することのできるシステムを作ることにした。

#### 2. 環境への依存性

花子はまず Wifi を使って位置情報を特定する方法を考えた。しかし、アクセスポイントが一つしか設置されていない研究室のミーティングルームでは席順を考慮する為に十分な精度を得ることができなかった。次に花子はミーティングルームに設置されている超音波センサを使用する方法を思い付き、次回のミーティングでは参加者に発信器を持ってきてもらうことにした。暫くの間花子は高精度なシステムに満足していたが、時間が経つとメンバはタグを持ちだすのが煩わしくなり、タグを持って来なくなってしまった。その結果次第にデータの欠損が目立ち始め、システムが機能しなくなってしまった。ある日ミーティングルームが既に重要な会議で使用されており、急遽別の部屋で研究室のミーティングを行うことになった。しかし、その部屋にはいつも使用している超音波センサが設置されておらず、花子のシステムが使えない状況に陥ってしまった。

#### 3. 端末の多様性

花子は暫くして、研究室のメンバが持っている携帯電話に注目し、相対位置情報が取得できるシステムを考えることにした。しかし、研究室ではメンバの好みが異なることから様々な機種を所持しており、統一的に使用することのできる機能は僅かだった。そこで花子は携帯電話なら必ず搭載されている機能として着信音を鳴らすためのスピーカと通話の際に使用するマイクを利用することとした。

#### 4. 同時性

音を使用した位置情報システムを実装した花子は早速ミーティングで使用したところ、10 人いるメン

バ間では相対的な位置情報を取り合うまでの音声交換手順に長い時間を要することが問題となった。この時間を無理に縮めようとしたところ、複数人の音が干渉してしまい、うまく位置情報を取得することができなくなってしまった。この為、花子は次に複数人で使用できる音声シグナルを基とした位置情報システムを組み立てる必要があった。

## 5. 速度

次の会議では何人かのメンバが動き回りながら議論することとなった。この時動いている人をトラッキングするためには位置情報の取得を行ってから次の位置情報取得までのラグを縮めることが重要だと考えた。これまで使ってきたシステムは音声交換の長さと同様に距離を決定するまでの演算処理にも長く時間がかかっていたことに注目し、携帯端末の処理速度を十分に考慮した最低限の演算処理と位置推定機構を実装することとした。

## 2.4 機能要件

前に述べたシナリオのそれぞれに対して、複数人数の同時位置測定手法に求められる機能要件を述べる。

### 1. 環境への非依存性

シナリオ2において、花子はWiFiのアクセスポイントの設置数や設置センサ等の特定の環境のみで使用するのことができるインフラストラクチャに依存しない手法を選択する必要があった。高精度な位置検出を実現する為には超音波センサによるセンシングは非常に有用性が高いが、すべての部屋に特殊なセンサを設置するには導入コストが非常に高くなることから現実的にはこれらの環境構築は非常に困難だといえる。

また位置計測対象の研究室メンバに対し特殊なデバイスを持ち歩くよう指定することはユーザにとって負荷となる。ユーザが普段より持ち歩いている携帯電話端末を用いる方法が考えられるが、それらが必ず共通して持つ機能のみで完結する必要がある。このように携帯端末本体には外部からの物理的変更を加えないことと、環境インフラストラクチャへの依存性を最小限に抑える機構が必要であるといえる。

### 2. 距離推定における例外安全性

複数人の席順を正確に判別するためには数センチメートルの精度を保つ必要がある。このように屋内環境において位置情報を利用するシステムでは高い精度を要求される場合が多い。これらのシステムにおいて十分な精度を継続的に保つには、人数が増える事によるシグナルの干渉や、試行環境にの影響によるシグナルの不到達などを正しく例外として検知し、管理することが必要とされる。これらのシステムの例外に対する安全性を例外安全性として定義すると、本研究において位置推定を高精度で実現すべき状況では例外安全性を十分に満たすことが重要だといえる。また、これらの例外処理についても適切に処理される必要があるため、十分に議論されるべきである。

### 3. 距離測定における応答性

シナリオ5において花子は研究室メンバの移動を検知する必要があった。移動を十分な精度で検知するためには、距離測定から次の距離測定までの処理の応答性が問題となる。以上に挙げた機能要件を満たすためには音声解析を伴う演算処理が必要とされる。Android, iPhoneに代表される携帯電話端末上でこれらの処理を行うには比較的処理能力の低い端末を使用した場合にも十分な応答性を満たす機構が必要となる。

## 第3章

# 複数の周波数帯を用いた端末間距離測定手法の提案

本章では2章で述べた機能要件を満たすため、複数の周波数帯を用いることによる同時端末間距離測定手法を提案し、既存研究との差分について詳しく述べる。

## 3.1 研究のアプローチ概要

本節では前章で述べた機能要件を満たすため、本論文におけるアプローチを次に示す。

### 1. 音声シグナルを用いた測距手法 (機能要件 1)

環境への依存性を低減するためには、前章で述べた既存の位置測定手法で使用されていた超音波センサや赤外線センサ、無線信号の発信装置などの利用を避ける必要がある。同様の理由により、ユーザに発振器などの荒端な端末をもたせることや、特別な送受信装置の取り付けは避ける必要がある。

本研究ではユーザが使用する携帯電話端末に着目し、通話機能として本体に設けられたマイクと着信を知らせるためのスピーカを使用し、携帯電話端末間で音声シグナルの交換によって距離測定を実現する。また、位置測定対象端末の特定や音声シグナルの交換に必要な情報は既存の携帯電話端末に搭載されている 3G 回線、WiFi 機能、Bluetooth、RFID などに代表される通信手段のみを用いることで携帯端末そのものには物理的な変更を全く加えずに距離測定を実現する。

### 2. 複数周波数帯を用いた相互音声シグナル交換 (機能要件 2)

アプローチ 1 で述べた手法では測距対象となる端末の完全な時刻同期は保証されていない。機能要件 2 で述べたように複数のユーザ間で相対距離関係の取得を行った場合、時刻の誤差によりそれぞれの端末から発せられた音声シグナルに重複が生じてしまい、互いに干渉してしまう可能性がある。また障害物やノイズ等の環境条件により十分な入力を得られない場合も同様に音声シグナルが検出されない問題が生じることとなる。従来の手法ではシグナルが検出されなかった場合どの端末から発せられた音が欠落したかを知る方法は存在しない。これらの問題を的確に検出し、最小限のリカバリーを行うことはシステムの例外安全性を高める上で非常に重要である。

本論文では以上の問題に対するアプローチとして音声シグナルに使用する音声の周波数帯域をそれぞれの端末によって分類し、受信側の端末でスペクトル解析を行うことで音声シグナルの切り分けを行う手法を提案する。これにより音声シグナルの干渉エラー検出や、不到達エラー検出などの例外検出が容易なシグナル交換手法を提案する。

### 3. 高速フーリエ変換と自己相関を用いたシグナル検出アルゴリズム (機能要件 3)

音声を用いた距離測定手法では処理の大部分が音声解析部のオーバーヘッドによるものである。本研究におけるシナリオでは携帯電話端末のような処理性能の限られたデバイスを用いてこれらの処理を行う必要があるため、機能要件 3 で述べた応答性を高めるためには処理の適応範囲を最小化し、より高速なアルゴリズムを使用することが必要条件である。

本研究では音声シグナル検出部の高速化手法として高速フーリエ変換を用いたピーク領域の検出を行う。これにより、ピーク領域の出現範囲を最小限に特定することが可能となり、その後検出範囲に対して自己相関を求めることにより、詳細なピークを検出することが可能となる。2 段階の処理を用いることにより、システムの保証性を保つことと同時に処理の高速化を実現する。

## 3.2 音声シグナルを用いた位置測定

本研究では Beep Beep の距離測定アルゴリズムを基礎とし、複数台の端末が参加する環境下でも測定距離の信頼性・保障性を保つ為の手法を提案する。よって本節では Beep Beep の距離測定アルゴリズムについて

述べる。

Beep Beep は関連研究で述べたように COTS(COTS:Commercial Off The Shelf) 機器を利用した双方向音声シグナルによる距離測定手法である。このアルゴリズムの最も大きな利点として、機器が厳密な時刻同期を必要としないことが挙げられる。これにより端末内におけるソフトウェアの遅延に対して耐性が高く、従来では時刻同期の誤差によって引き起こされていた精度の低下は Beep Beep アルゴリズムでは考慮しなくても良い。

それぞれの機器は1つのマイクと1つスピーカーが搭載されていることを前提とし、その他に WiFi や 3G,Bluetooth といった何らかの無線通信手段が搭載されているものとする。BeepBeep の距離測定アルゴリズム (図 3.1) では音声の到達時刻 (TOA:Time Of Arrival) を用いており、端末 A と端末 B とが相互に音声シグナルを交換し合うことで距離を推定している。その詳細な手順を次に示す。

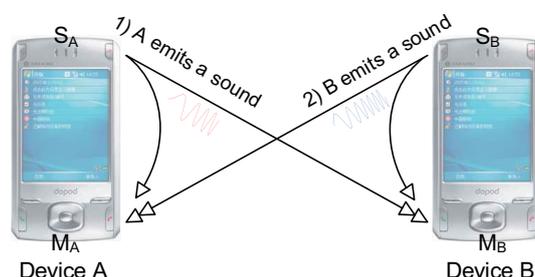


図 3.1 Beep Beep アルゴリズムにおける双方向センシング手順

ある環境において端末 A にと端末 B があると仮定する。この手法ではそれぞれの端末が相手の端末との距離を取得することができる。距離を完全に取得し終えるまでの手順は次の4つの行程に分けられる。

#### 1. 初期設定段階

距離測定の手順は初期設定から始められる。端末 A, B はそれぞれ初期メッセージを送信し、測定対象となる端末を認識する。その後端末は録音を開始し、初期設定段階を終了する。

#### 2. 音声シグナルの交換段階

端末 A, B は決定されたタイミングでそれぞれ音声シグナルを発する。同時に各端末はそれぞれの端末に搭載されたマイクより録音し、自分が発した音声シグナルと相手により発された音声シグナルの両方を録音する。手順は図 3.1 に表す通りであり、SpeakerA から発された音声シグナルは microphoneA と相手の端末の microphoneB で録音され、SpeakerB から発したシグナルも同様に microphoneB と microphoneA の両方で録音される。双方が音声シグナルを受信し終わると両端末は録音を停止する。

#### 3. 音声シグナル検出段階

録音されたデータはそれぞれ携帯端末のプロセッサにより処理され、録音された生データの中から、音声シグナルとなる部分を検出する。検出した2つのシグナルの到着時間の差 (ETOA : Elapsed Time Of Arrival) を計測し、それをネットワーク経由で相手端末と交換する。

#### 4. ETOA に基づいた距離計算段階

交換された音声シグナルの ETOA を比較することにより、音の速度と端末のスピーカ、マイクの位置より、2 端末間の距離が計算される。

端末 A を  $M_A$ 、端末 B を  $M_B$  とした時、先に述べた音声シグナル交換の手順は図 3.2 のように表すことが

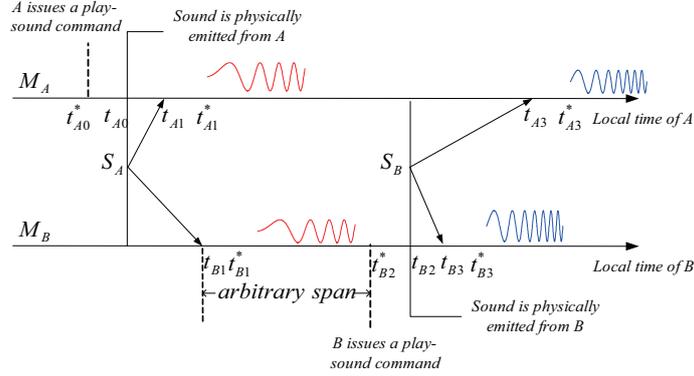


図 3.2 Beep Beep 音声交換手順

できる。2つのタイムラインが示されており、それぞれ、上段が端末 A、下段が端末 B のローカルタイムを表している。  $t_{A0}^*$  は端末 A が自機が搭載しているスピーカに対してシグナルの発信を要求した時刻である。しかし、物理的にスピーカから音が発せられる時間は、OS の処理による遅延が発生するため  $t_{A0}$  の時刻となる。音声シグナルがそれぞれ端末 A、端末 B に到来する時刻は  $t_{A1}, t_{B1}$  となる。先と同じく、アプリケーションがシグナルデータを実際に受信する時刻は  $t_{A1}^*, t_{B1}^*$  となる。端末 B のシグナル発生時も同じく、  $t_{B2}^*, t_{B2}$  はそれぞれ端末 B が音声発信命令を行った時間と、実際に音声が発せられた時間を表す。そして端末 B から発せられた音声シグナルは  $t_{A3}$  と  $t_{B3}$  において端末 A、端末 B のマイクへ到達し、  $t_{A3}^*$  と  $t_{B3}^*$  においてアプリケーションが音声シグナルの到来を認識する。

$d_{x,y}$  を端末 x のスピーカから端末 y のマイクまでの距離とすると、式 3.1 が得られる。

$$\begin{aligned}
 d_{A,A} &= c \cdot (t_{A1} - t_{A0}) \\
 d_{A,B} &= c \cdot (t_{B1} - t_{A0}) \\
 d_{B,A} &= c \cdot (t_{A3} - t_{B2}) \\
 d_{B,B} &= c \cdot (t_{B3} - t_{B2})
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

この時  $c$  は空気中を伝わる音の速さとする。端末間の距離  $D$  は式 3.2 のようにして求めることができる。

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{1}{2} \cdot (d_{A,B} + d_{B,A}) \\
 &= \frac{c}{2} \cdot ((t_{B1} - t_{A0}) - (t_{A3} - t_{B2})) \\
 &= \frac{c}{2} \cdot (t_{B1} - t_{B2} + t_{B3} + t_{A3} - t_{A0} + t_{A1} + t_{A1}) \\
 &= \frac{c}{2} \cdot ((t_{A3} - t_{A1}) - (t_{B3} - t_{B1}) + (t_{B3} - t_{B2}) + (t_{A1} - t_{A0})) \\
 &= \frac{c}{2} \cdot ((t_{A3} - t_{A1}) - (t_{B3} - t_{B1})) + d_{B,B} + d_{A,A}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

典型的なコンピュータシステムにおいて完全に正確な受信時刻を得ることは構造上非常に困難であると言える。これらの誤差はソフトウェアとハードウェアの両方から生じ、ある事象の起こった時刻を予測するためには大きな労力が必要となる。BeepBeep 方式では 2 方向センシングによって得られた ETOA はそれぞれのマ

イクに搭載されている AnalogDigital コンバータによるサンプル数を時間軸の基本単位とするため、サンプリングレートが統一されている環境下においては携帯電話端末におけるソフトウェア内部の時計は ETOA の比較において全く関与しない。従って A/D コンバータの精度が保証されている以上非常に高い精度でシグナルの検出が実験される。

### 3.2.1 問題点の整理

以上に挙げた手法により、音声シグナルを利用することで、既存の携帯端末のマイクとスピーカ、WiFi(もしくは 3G)のみを用いた距離測定が実現した。

これまで 2 台の携帯端末を使用した距離測定手法についてのみ述べて来たが第 2 章のシナリオで述べたように複数の距離測定対象のユーザが存在する環境下では、以下のような問題が生じることが考えられる。

- 音声シグナルの重なり・不到達

時刻同期を行わない手法では端末の音声発生時間を正確に制御することができないため、複数台の端末の距離を同時に測定する場合には音声が一部重なってしまう可能性がある。そのため、すべての端末において同じ音で使用されている BeepBeep の手法では音声シグナルの重なりによりシグナル検出の精度の低下が生じてしまう。また、試行環境の条件により、シグナルが空いた端末に到達しなかった場合にどの端末からのシグナルが到達しないのかを正確に知ることができないため、こうした例外に対する安全性では BeepBeep の手法では最適な対応を行うことが難しいと考えられる。

- 音声シグナル交換時間

複数の端末間で距離を測定する手法において最もシンプルな方法として、全ての組み合わせの距離測定を行う事があげられる。任意の二端末間の距離測定を参加する端末を  $N$  とすると、 $\frac{N(N-3)}{2}$  回繰り返すことでそれぞれの相対位置関係を取得することができる。しかし、十分に音声シグナルを区別する為にはそれぞれの交換プロセスに対して、前の試行から十分な待ち時間を設定する必要があるため、シグナルからシグナルまでのインターバルを 1 秒と設定している BeepBeep の例では 6 人のユーザがいた場合少なくともシグナルの交換プロセスに 9 秒かかることとなり、9 秒分のデータを携帯端末で処理することとなるため大きく無駄が生じてしまう。

以上に挙げた問題点を解決するため、本章では、それぞれの問題点に対して、その解決策となるアプローチを詳しく述べ、その妥当性及び必要性について事前実験を用いて議論し、まとめる。

### 3.3 複数周波数帯を用いた相互音声シグナル交換

はじめに、音声シグナルの重なりや受信時のシグナルによる端末特定手法として、複数の周波数帯を用いた音声シグナル交換手法を提案する。既存研究では単一の音声シグナルを使用しており、音声シグナル間での区別ができないことを述べた。本研究では事前に音声シグナルの周波数帯域を各端末で分けることにより、シグナルの重なりを十分な精度で検知し、正しく例外に対して処理を行う事を可能とする。

また、音声シグナルの重なり具合を予測することにより、次回の計測から、音声シグナル間のインターバルを調整し、交換の際の待ち時間を最小化することで、シグナル交換にかかる時間を最短にする手法を提案する。

### 3.3.1 複数周波数帯を用いる有効性

従来の手法では録音された音声データに対し、もとの発信された音声データとの相関を求めることにより、音声シグナルを検出していた。しかし、この手法では単一の音声シグナルを利用する限り、シグナルを切り分けるには時間軸に十分なインターバルを設けなければならない。

通常、音波はそれぞれ低周波数域から高周波数域までの周波数を複数伴った波である。自然界においてこれらの波は日常的に混合された波として存在している。空气中を伝う音声シグナルは音声シグナルそのものの成分と、その他の音（ノイズ）の成分で構成されていることがわかる。これに対し、フーリエ変換という各周波数成分に分解する手法を用いることで、ある時間の音をサンプルして、その周波数分布をスペクトルとして得ることができる。

一度音声データが録音されれば、シグナルの検出ポイントから次のシグナルまでのサンプル数を ETOA として正確に記録することが可能である。しかし注意すべき点としてこの手法においては高精度のシグナル検出を実現しない限り、センシングとは関係のない手順において誤差が生じることとなり、距離測定における精度に大きな障害をもたらす事が問題点としてあげられる。

通常、音波は複数の音波が重なり合って構成されている。ノイズを含めた音声シグナルはそれぞれ

これまで既存研究ではチャープ音を用いられてきたが、すべて統一されたシグナルを使用していたためすべての周波数帯を一つのシグナルパターンが占有していたこととなる。一これでは

複数周波数帯を用いることにより、音声シグナルに重なりが生じた場合でもその周波数帯スペクトルに分解することができる上、予め決めておいた周波数帯のスペクトルに関して増幅を行うことにより、検出の精度を向上させることができる。

### 3.3.2 音声シグナルの選定

保証性の高い音声交換を行うためには周囲の環境に左右されにくい音声の選定が必須である。同じ周波数のシグナルを用いる場合でも波形の形状によってその検出精度や波形の再現精度には大きく差が生じる。図 3.3 に表した正弦波は半径  $r$ (単位円) の円周上を一定の角速度  $\omega$  で回転する点の動きを  $y$  軸に投影した波形であり、式 3.3 で表される。これは物体や空気の単一の振動によって作り出される最も基本的な波形である。しかし実際の音は正弦波であるとは限らず、高さや低さを感じるは波の周波性を持っており、その音の高さはその周期によって決定する。このように周期が同じ、つまり周波数が同じであっても音声の波形による特性の違いが大きく見られることがわかる。

$$y(t) = \sin \omega_0 t \quad (3.3)$$

同じ 2000Hz の音声シグナルについて複数の波形を次に示す。図 3.3 に示したのは純音と呼ばれる基本的な正弦波の例である。特定の周波数に対して最も大きなエネルギーを加えるため、周波数が限定される場合には有効であるといえる。図 3.4 に示したのは 2 つのレベルを直線的に移動する波形であり、波形が直線で結ばれた三角形の形になる。図 3.5 に表した波形は三角波のうち片方の辺が垂直に落ちる波形である。三角波が奇数倍の周波数を含んでいるのに対し、ノコギリ波では整数倍の周波数を含んでいる。図 3.6 は 2 つのレベルを瞬間的に移動する事を繰り返す波形であり、理論的には複数の周波を含むため、伝達する中で信号のひずみを評価する目的で使用されている。

また、周波数を線形・指数増加的似変化する正弦波としてチャープ波が知られている。図 3.7 では線形、図 3.8 では指数的な変化を行うものを示した。また、多次元関数的に周波数が増加するものもある。

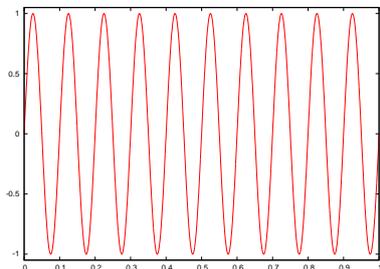


図 3.3 正弦波

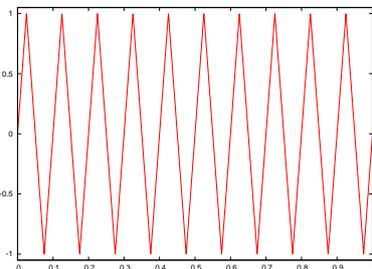


図 3.4 三角波

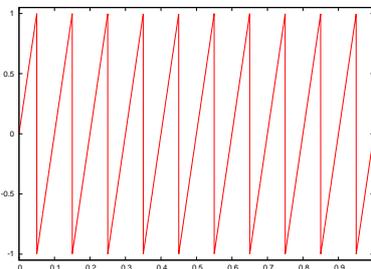


図 3.5 ノコギリ波

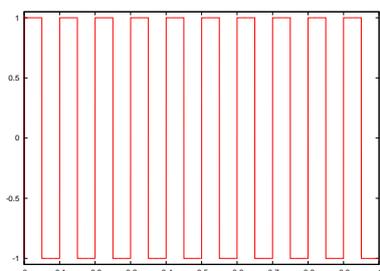


図 3.6 矩形波

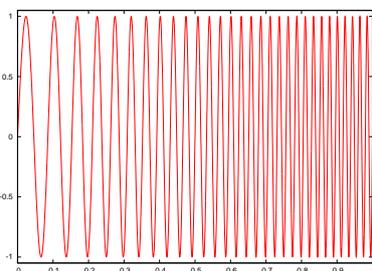


図 3.7 チャープ波 (線形)

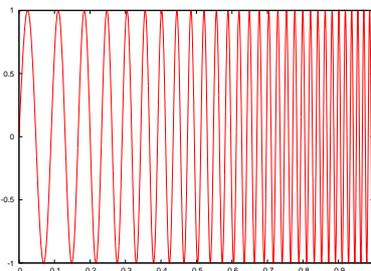


図 3.8 チャープ波 (指数)

### 3.3.3 欠損シグナルの補完

先に述べた音声シグナルでは線形チャープ音を利用している。この時の周波数特性を図 3.9 に表す。

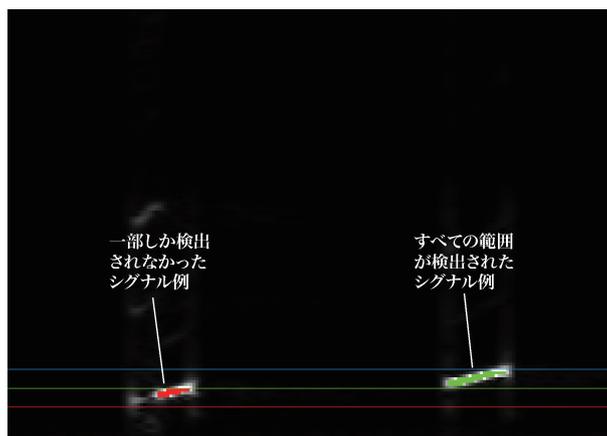


図 3.9 線形チャープ音の周波数スペクトル

図 3.9 のような線形の周波数特性を応用すると欠損データの保管を行うことができる。シグナルが試行環境

において一部欠損してしまった場合、以下のように補完することができる。

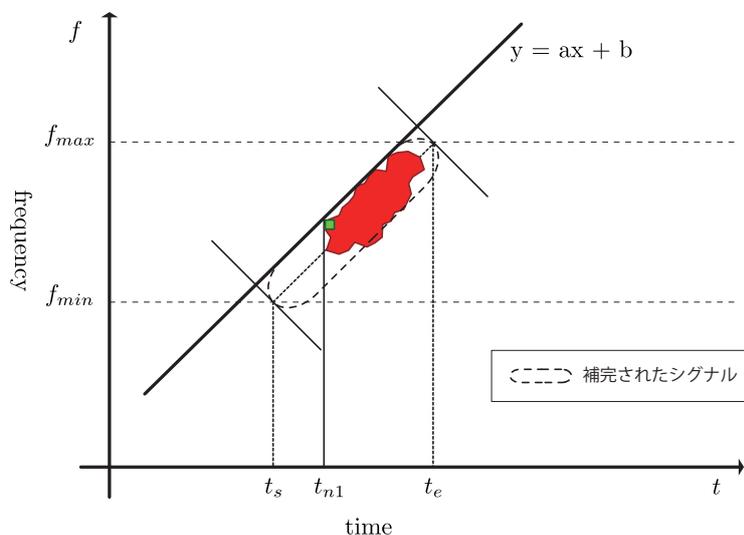


図 3.10 欠損データの補完手法

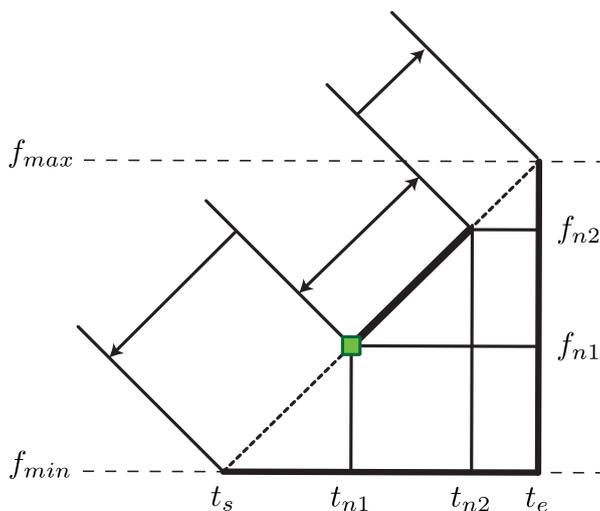


図 3.11 欠損データの補完手法

また、本アルゴリズムでは、複数のピークが検出された場合の例外処理を行うことができるため、マルチパスに影響を受けないシグナル開始位置の特定が可能である。しかし、本手法における FFT は従来のサンプリングレートよりも十分に低いサンプリングレートで解析が行われるため、FFT のみの位置推定ではシステムの要求する精度を満たすことができない。つまり、欠損シグナルの補正はのちの自己相関関数の精度を保証するものであり、これだけで測定を行うものではないと言える。

### 3.3.4 マルチパスエフェクト

電波を使った通信において物体に対する電波の反射は懸念すべき点である。図 3.12 ではマルチパス効果による残像が観測されている。この例では残像のほうがピークが小さいが、場合により本来のシグナルよりも大きくなってしまふ場合があるため、最も早く到達した十分に大きいピークを実際のシグナルとして定義する。

しかし、音声シグナルに同じ音を使用した場合、マルチパス効果による残像が次のシグナルに多重に重なってしまう場合がある。これではシグナルの正確な検出が行われず、システムの精度低下を導く結果となる。これを防ぐためには音が減衰し切るまで十分な時間を待つか、種類の違うシグナルを送る手法が考えられる。音の反射は壁、天井、床だけではなくその他環境に存在するあらゆる物体により引き起こされる。従って環境の変化によりその影響度合いは全く違い、減衰までの十分な時間をどのように定義するかは非常に難しい問題となる。

音は空気中を伝わる場合ともに跳ね返った場合にそれぞれ一定分だけ減衰する。よって同じシグナルを使用する BeepBeep ではこれらのマルチパス効果を最小限に留める為に上で述べただけの時間を最小のインターバルとして待つ必要がある。これでは人数が多くなり、インターバルの時間が長くなってしまうと、処理する音声の長さが次第に長くなり、距離測定から次の距離測定までの時間に無駄が生じることとなる。

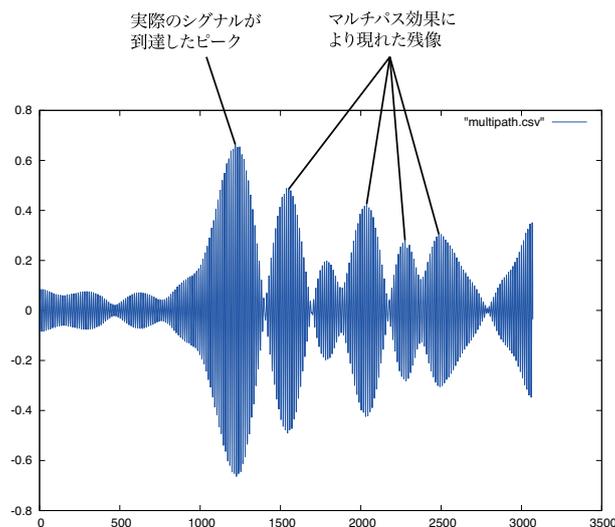


図 3.12 マルチパス効果による残像出現現象

## 3.4 高速フーリエ変換と自己相関を用いたシグナル検出アルゴリズム

すべての周期信号は基本周波数の正弦波、余弦波とその整数倍の周波数を持つ正弦波、余弦波の重ね合わせとして表現することができる。従って全ての複合音は  $a_0$  が直流成分、 $a_k$ ,  $b_k$  を正弦波、余弦波の係数とした時、式 3.4 で表すことができる。

$$y(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega_0 t + b_k \sin k\omega_0 t) \quad (3.4)$$

これにより、録音した音声波形データは正弦波と余弦波の成分に分けることができる。こうした変換をフーリエ級数展開と呼ぶ。フーリエ級数展開では時間的に連続な信号を基本周波数とその倍数の成分の大きさの数字列で表したことになる。今日このような解析はコンピュータによって行われるため、解析の対象となる信号も連続信号ではなく、時系列と呼ばれる離散的なデータである。また実際の音の信号を解析する場合、信号の周期を正確に取り出し、解析することは実際に容易ではない。

実用的な手法として音の信号を時系列として取り込み、その中から解析したい部分のデータを切り出す方法が挙げられる。切り出したデータの長さを周期とみなしてその周期の成す基本周波数とその倍数の成分の係数としてスペクトルを求める。つまりこの方法では、切り出した波形が周期的につらな信号として解析が行われることになる。

しかし、このような周期信号は一般的には不連続につながるため、不連続部分が高い周波数の成分として扱われてしまう。そこで図 3.13 に示したような窓掛けと呼ばれる処理によって波形の接続部分を滑らかに変形してから解析する。

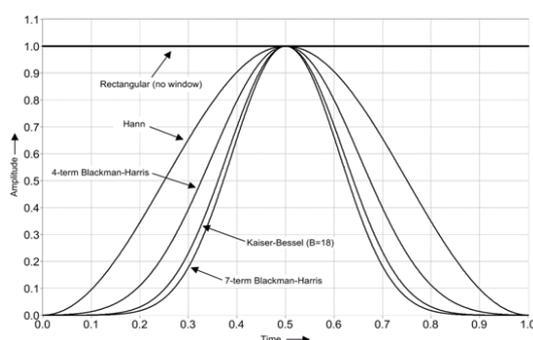


図 3.13 窓掛け

このように時系列データを周波数のデータ、すなわちスペクトルに変換することを離散フーリエ変換 (DFT: Discrete Fourier Transform) という。離散フーリエ変換は時間に対する離散的なデータを周波数に対する離散的なデータに変換する手法だと考えることができる。

またこの離散フーリエ変換を高速化する手法が開発されており、周期とみなすデータ数を 2 のべき乗に選んだ場合にのみ、高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transform) を利用することができる。

本研究では録音データを 2 の 9 乗に当たる 512 サンプルに区切り、この高速フーリエ変換を用いてスペクトル解析を行う。

## 第 4 章

# 設計

前章では複数周波数帯を用いた距離測定手法について詳しく述べた。本章では複数周波数帯を用いた屋内の高速相対位置測定システム FRAPPE の設計について述べる。

## 4.1 FRAPPE の設計概要

FRAPPE は (Multi-FRequency Band Acoustic Phone-to-Phone Position Estimation System) は複数周波数帯を用いた屋内の高速相対位置測定システムである。本システムは屋内環境において、環境へのセンサ設置を必要としない高速な携帯電話端末間の距離測定を可能とする。

本システムはまず、測定対象端末の登録を行う。登録された端末はそれぞれ固有の周波数帯域と音声シグナルの発音時間を決定し、その後測定対象となる端末がすべて発音するまで録音を続ける。録音されたデータは各端末で処理され、音声シグナル解析を行った後、それぞれのシグナルと自分の発したシグナルとの経過時間 (ETOA:Elapsed Time Of Arrival) を各端末間で交換し、最後にそれぞれの位置をばねモデルを使ったレイアウト手法によって可視化する。また、機能要件に対するアプローチはすべてソフトウェアによって解決されており、ハードウェアには全く変更を加えずに利用でき、既存のオペレーティングシステムで動作する設計となっている。本システムは完全にアプリケーション層における実装であり、アプリケーションとしてインストールすることですぐにでも実用することができる。

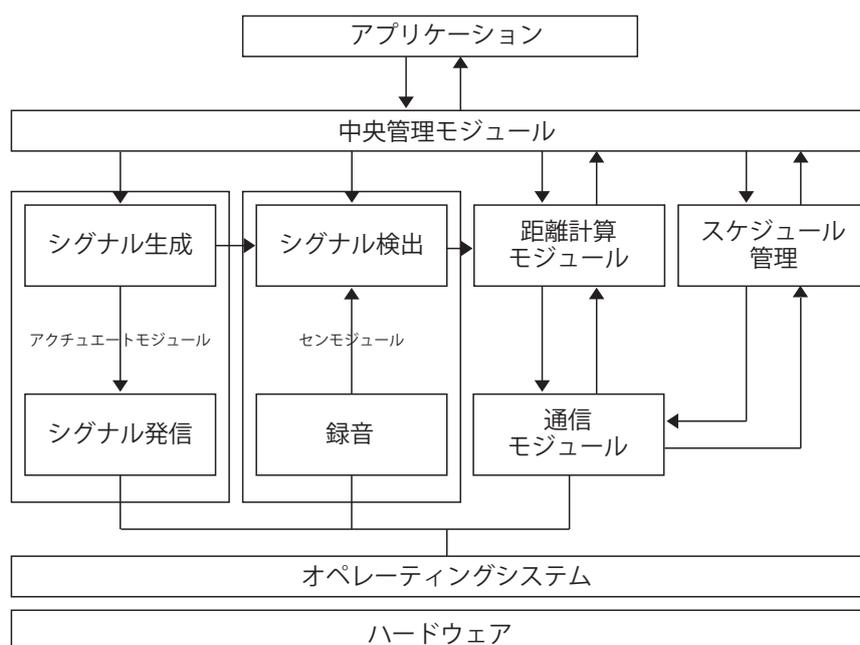


図 4.1 システム構成

### 4.1.1 システム設計

本システムの構成を図 4.1 に示す。距離測定のために必要となる情報を携帯端末間で通信する「通信モジュール」、音声シグナルを生成し、発信を行う「アクチュエートモジュール」、信号を録音しシグナル検出を行う「センサモジュール」、そして、各端末の ETOA 情報を交換し距離の測定の計算を行う「計算モジュール」

ル」とそれらを管理する「中央管理モジュール」の5つのモジュールにより構成されている。

「通信モジュール」は携帯電話端末が使用しているいずれかの通信プロトコルを介して、他の端末との通信を確立する。測定対象となる携帯電話端末のリストを生成した後、それぞれに固有の周波数帯を割り当てる。割り当てられた情報は全参加端末に通知される。「アクチュエートモジュール」では決定された周波数帯に基づいた音声シグナルの生成を行い、音声シグナルが書き込まれたバッファは OS へと渡される。同時に「センサモジュール」では連続的に録音されたすべてのデータをローカルのバッファに保存し、発信端末の特定とシグナル検出を行う。その後「計算モジュール」により軽量化された ETOA 情報の共有が行われ、それを用いて各端末との距離を計算する。また計算された距離情報より、各端末の位置関係を推測するため、同計算モジュールにより、ばねモデルを用いた位置関係の推定が行われる。

中でもアクチュエートモジュール、センサモジュールはそれぞれ実際の携帯端末に搭載されているスピーカ、マイクと密接な関係を持っており、携帯端末のオペレーティングシステムにより提供されたインタフェースからそれぞれ音声シグナルの発信と録音を行っている。中央管理モジュールではすべてのモジュールの管理を行っており、距離測定手順の管理やイベントハンドリングを行っている。アクチュエートモジュールの音声シグナル生成機構で生成された音声シグナルデータは同時にシグナル検出アルゴリズムへも渡され、録音されたデータの中からシグナルを検出する際に使用される。録音データに対してテンプレートとなる音声シグナルを比較することにより自分が発したシグナルと他が発したシグナルを検出する。計算モジュールでは他の ETOA を受信した後、式 4.1 に表した簡易な式により求められる。

$$D = \frac{c}{2 \cdot f_s} \cdot ((n_{A2} - n_{A1}) - (n_{B2} - n_{B1})) + K \quad (4.1)$$

このとき  $f_s$  はサンプリングレートを表し、携帯端末 A, B のシグナルが到達したサンプル数を  $n_{A1}, n_{A2}, n_{B1}, n_{B2}$  とする。

## 4.2 FRAPPE システムの動作概要

本システムを構成する5つのソフトウェアモジュールの動作概要を詳しく説明する。

### 4.2.1 通信モジュールの設計

携帯電話端末には、こんにち複数の無線通信プロトコルが実装されている。例えば、イヤホンやスピーカなどの周辺機器を接続するために搭載されている Bluetooth や、電子マネーなどで使用される RFID、その他データ通信のための WiMax, WiFi, 3G などが挙げられる。本システムではこれらの通信規格のうち、屋内環境において高速で保証性の高い WiFi を用いる。通信モジュールは測定対象となる他の端末との通信を請け負う。

#### 参加端末決定プロトコルの設計

環境内にユーザが複数いる場合相対位置測定に参加する端末を効率的に決定し、管理する必要がある。本システムではこれらの参加対象端末に対し、参加端末決定のためのプロトコルを設計する。

はじめに、測定を希望するユーザはそれぞれの所持している携帯電話端末でシステムを起動する。システムは起動と同時に端末情報をブロードキャストし、他の端末からの応答があるまで待機する。相手端末から返答があれば、本体の参加端末リストへ追加して記憶する。次に IP アドレスを比較し IP アドレスを元にリー

リーダー端末を決定する。リーダー端末は参加端末が固有に持つ周波数帯やその他距離測定の手順に必要な情報を他の参加端末に共有する。このとき、既にリーダーが存在している場合には新しく参加した端末に対して、リーダー端末から必要な情報が返信される。

環境内にユーザグループが複数存在し、それぞれのユーザグループを識別したい場合には、新しく参加を希望した端末がどのグループとして扱われるかを判別する必要がある。この場合、本システムでは端末の所属するグループを新規で作成し、自分を新たなリーダー端末として設定する。新規グループのリーダー端末は既存グループのリーダー端末に、新たなグループの作成を通知し、その結果と比較して異なるグループ ID を決定する。その後新規で追加される端末に関して、複数のリーダーからの応答があった場合どちらのグループに所属するかを選択し、再度各リーダー端末へ通知される。

## 4.2.2 音声シグナル交換プロトコル

本節では環境内に存在する端末が他の端末を認識し、自機が発する周波数帯とそのタイミングを決定する手順を詳しく説明する。

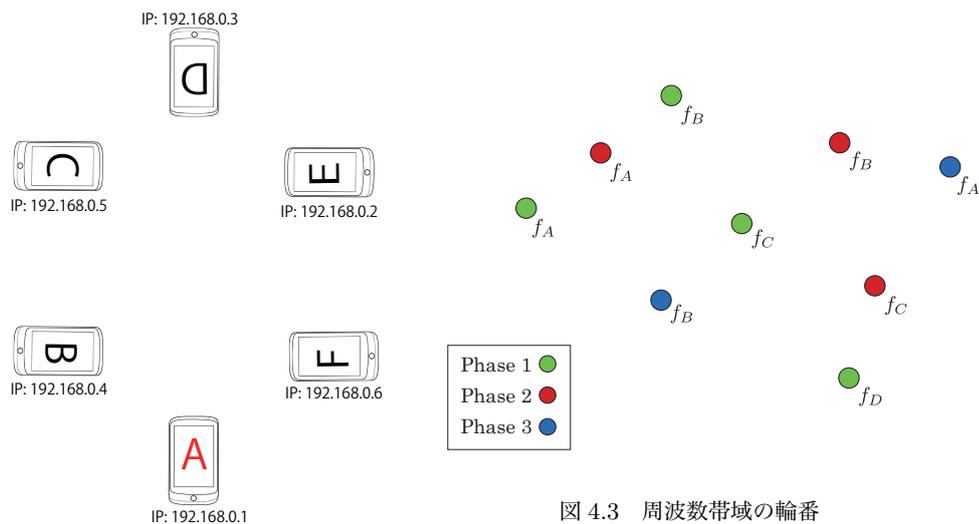


図 4.3 周波数帯域の輪番

図 4.2 シグナル音声交換プロトコル手順

環境内には WiFi によるネットワークがあることを前提とし、想定される環境の例を図 4.2 に示した。音声シグナルの交換は以下の手順で行われる。距離測定対象となる端末で FRAPPE システムを起動する。起動された端末は所属しているネットワークに対して初期メッセージをブロードキャストする。本プロトコルにおいて、周波数帯、発信フェーズを管理するのはリーダー端末のみであるため、初期メッセージに対して返信するのはリーダー端末のみとする。既に起動しているリーダー端末がいる場合、新規に登録された端末に対して周波数帯と、シグナルを発信するタイミングの情報が返信される。このとき、既に起動しているリーダー端末が発見出来なかった場合、初期メッセージを送信した端末は返信がないことを確認して自機をリーダー端末とし、新規端末が登録されるまで待機する。

環境内にある端末は複数のグループを形成することが可能である。従って、新規に参加を希望する端末は、

自分を新たなリーダー端末に設定し、新規リーダーの保持しているリストを新規グループとして設定する事があできる。よって、初期メッセージに対して複数のリーダー端末からの返答がある場合、新規参加端末はどちらのリーダー端末の居るグループへ参加するかを選択し、参加グループ側のリーダー端末へ通知する必要がある。このようにして環境内において複数のグループが形成された場合でもユーザグループを切り分けて管理することが可能となる。

このようにして決定された情報を基に各端末は音声の録音を開始し、予め決定された時刻になると指定された周波数帯の音声シグナルを発する。

#### 4.2.3 アクチュエートモジュールの設計

端末間で交換される音声シグナルは、前に述べた参加端末決定プロトコルにより決定された周波数帯を用いて生成される。アクチュエートモジュールではこの音声シグナルの生成を行い、音声シグナルが書き込まれたバッファは OS へと渡される。

携帯端末の演算リソースを最大限活用するためには録音されるデータを可能な限り短縮し、音声解析にかけられる範囲を最小限に留めることが求められている。従って、アクチュエートモジュールではスケジュール管理機構により決定された時刻に基づいて音声の発音を行う必要がある。

発信するデータは次に説明するシグナル生成機構により生成され、できるだけ決められた時間に発信するよう管理が行われた後、OS に対して発信要求が行われる。この段階で携帯端末に搭載されているスピーカから音声シグナルが発せられることとなる。

##### シグナル生成機構

本システムではチャープ音と呼ばれる周波数が指数的に増加していくシグナルが使用され、ここで生成されたデータはオペレーティングシステムへ送られる。同時に次のセンシングモジュールへも送られ、シグナルを解析する段階において使用される。

#### 4.2.4 センスモジュールの設計

自分を含めたすべての音声シグナルはセンスモジュールにより、録音され、一連の音声データとしてシグナル検出機構へと送り込まれる。はじめにシグナルが存在する位置を音圧を捜査することにより見極め、検出範囲内にのみ音声解析処理を行う。

##### 高速フーリエ変換による発信端末の特定

検知されたシグナルはすぐさま高速フーリエ変換にかけられ、シグナル内にどの周波数帯のスペクトルが含まれていたかを検知する。これにより、事前に登録しておいた各相手端末の周波数から対応する端末を割り出すことが可能である。

また、この処理により、シグナルの重なりや欠損などのエラーを検知することができ、次のピーク解析におけるエラーを最小限に留めることができる。

### 相互相関によるピーク解析

音声のピークはアクチュエートモジュールのシグナル生成機構より渡されたテンプレートデータと録音されたデータとを順に比較していくことにより、検出される。

### 4.2.5 計算モジュールの設計

計算モジュールではセンスモジュールより送信された ETOA 情報を他の ETOA 情報と比較することにより、自機と他の測距対象端末間の距離を計算する。最後に、端末間距離は全員で共有され、最終的な相対位置関係へと変換される。

### ばねモデルを用いた相対位置推定

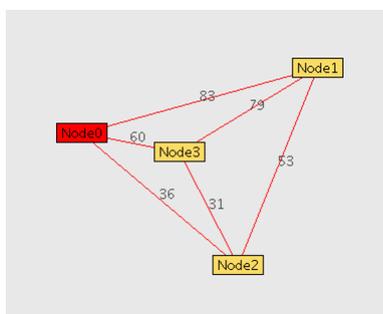


図 4.4 ばねモデルレイアウト (初期状態)

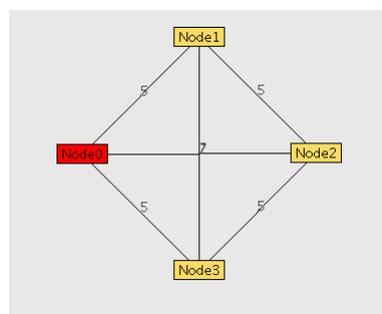


図 4.5 ばねモデルレイアウト (完成状態)

各ノード間の距離測定が完了した後、各ノードに対しての距離情報を元として相対位置の推定が行われる。位置情報には誤差が含まれるため、計算式による位置推定は不確定要素の多さに起因して処理系が複雑になってしまう。そこで本システムではばねモデルを用いた位置座標推測手法を提案する。ばねモデルはグラフのレイアウトに用いられる手法であり、仮想空間内に配置した各ノード間にばねの特性を持った線を実装することにより、伸縮運動を繰り返した後に最も均衡の取れた配置に収束するアルゴリズムである。本システムでは各端末をノードに、各端末間の測定された距離をノード間の線に設定することで初期状態のランダムなレイアウトから自分を中心とした位置座標を求める手法を提案する。

ばねモデルの特性上、測定された距離情報の誤差はばねの働きにより分散し、他のノードで吸収することができる。これにより柔軟に測定誤差を平滑化する働きが期待される。また、連続して距離を計測する場合は、端末間の抵抗を通常よりも少し大きく設定することにより、前回の計測結果のレイアウトを残しつつ次の計測結果推定に移行できることから、処理速度の低減に加え、フィルター効果を得ることができる。

## 第 5 章

# 実装

前章で説明した複数周波数帯を用いた高速相対位置測定システム FRAPPE を用いて、ミーティングルームにおける席順の推定システムの実装を行い、その実装について詳しく述べる。

## 5.1 FRAPPE システムの実装概要

本研究では室内空間の例としてミーティングルームを設定し、前章で述べたシステム設計を元に FRAPPE システムの具体的な実装を行った。本システムの利用対象となるユーザは WiFi に接続している Android 端末を保持しており、それらのスピーカとマイクから音声シグナルの送受信を行う。リーダーとなる端末がアプリケーションを起動し終えた後に参加端末を起動し、それぞれがシグナルを発した後に解析結果が端末の画面に表示される。

## 5.2 実装環境

本アプリケーションの実装に用いた端末を以下の図 5.1 と図 5.2 に示した。実装には 2 台の Android 端末を使用し、関連研究で使用されていた携帯端末と同じものとその系列でどうスペックのものを使用している。



図 5.1 Google Nexus One

図 5.2 Nexus S

表 5.1 実装環境

項目	説明	
端末名	Google Nexus One	Nexus S
OS	Android 2.3.7	Android 2.3.4
CPU	Qualcomm Snapdragon QSD8250 1GHz	1GHz Cortex A8
RAM	512MB	512MB
Network	3G/GSM/Wi-Fi/Bluetooth	3G/GSM/Wi-Fi/Bluetooth

携帯端末を 2 台使用した理由として録音データの歪が原因となっている。今回実装環境に挙げた Android 端末の他に異なるメーカー製の端末も複数検証したが、録音を行なっている際に他スレッドで音声の発音を行うと、発音を行う間の録音データに歪が生じることが確認された。毎回歪む程度が異なることや、機能を制限しながらの録音実験においても同じ結果が得られたことから、本実装では FRAPPE の作動する端末と録音だけ

を請け負う端末の2つに分けることとした。

## 5.2.1 音声シグナル交換プロトコルの実装

### 周波数帯域の設定

Android 端末で発信・録音に用いられる一般的なサンプリングレートは 44.1kHz である。本手法では同じく 44.1kHz を使用し、シグナルの送受信を行う。この場合理論上約 22kHz までの周波数帯をそれぞれの周波数帯の成分に分割し、シグナルの存在する一を特定することができる。

しかし、一般的に携帯電話のマイクは通常人の声 (100Hz ~ 2kHz) に入力のパークが出るように特性が最適化されている事が多い。これにより、一様の音量で発したチャープ音をスペクトル解析すると図 6.3 に表したように、特定の周波数帯でむらが生じていることがわかる。こうしたハードウェア的なばらつきを排除するため、本手法で用いる音声シグナルは人の声の周波数に当たる 2kHz よりも高い周波数帯を選定し、かつ高周波数帯の音声に見られる指向性と SN 比の効率の悪さを排除する為、2kHz ~ 5kHz までの周波数帯域を使用することとした。

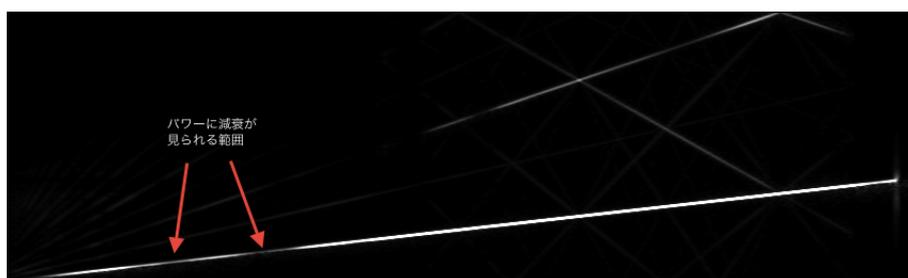


図 5.3 周波数特性

### 通信

FRAPPE における情報伝達はその可読性の高さによる管理の簡単さを実現する為に XML 形式で行う事とし、統一された通信の実現を目的としている。メッセージは大きく分けて UDP と TCP の 2 種類の方式により送受信される。UDP は主にブロードキャストを目的とし、自分の参加を知らせる初期メッセージで使用される。また、TCP は、各端末の情報を送受信するための返答メッセージと後に交換される ETOA パケットの送受信に使用される。本手法の実装において、通信における遅延は大きな障害とはならないため、UDP に比べてより通信の耐故障性に優れた TCP を主に使用している。

初期メッセージ

```
1 <Message>
2   <Device>
3     <Name>Qrohey</Name>
4     <IPAddress>192.168.0.3</IPAddress>
5   </Device>
6 </Message>
```

5.2.1 に表したのはプログラムの起動時に送信される初期メッセージの一例である。初期メッセージは UDP によるブロードキャスト方式で届けられ、既にリーダー端末として設定されている端末はこの初期メッセージに返信する形で測定参加要求とみなす。また、一定時間このメッセージに返答がない場合、端末は再送を行い、更に返信のない場合自身をリーダー端末として設定する。

このとき、初期メッセージに含まれる情報は端末:Device に対して任意に決定された端末名:Name とその IP アドレス:IPAddress が記載されている。以上の情報によりリーダー端末では情報の重複や欠損がないか確認し、自身の持つ参加端末のリストへと登録を行う。

表 5.2 リーダー端末における測定対象端末の情報

端末 ID	端末タイプ	IP アドレス	最低周波数	最高周波数	相対再生時間	フェーズ
1	Leader	192.168.0.1	2583Hz	2842Hz	1000	1
2	Normal	192.168.0.2	3100Hz	3359Hz	1100	1
3	Normal	192.168.0.3	3617Hz	3875Hz	1200	1
4	Normal	192.168.0.4	4134Hz	4392Hz	1300	1
5	Normal	192.168.0.5	2583Hz	2842Hz	1400	2
6	Normal	192.168.0.6	3100Hz	3359Hz	1500	2

表 5.2 にリーダー端末における参加端末のリストを示した。はじめにリーダー端末として設定された端末は自身の情報を参加端末リストの先頭へと登録する。この時登録される情報として、端末タイプ、IP アドレス、チャープ音の開始時に発される最低周波数、チャープ音の終了時に発される最高周波数、リーダー端末から設定される相対的な待ち時間を表す相対再生時間、そして最後に周波数を再度利用するためのフェーズである。

端末タイプは Leader と Normal の 2 つに分けられ、リーダー端末と通常の参加端末を表している。また、それぞれの端末の IP アドレスは返信メッセージや ETOA メッセージを送受信する際に使用され、これにより、各端末の位置情報と結びつけが行われる。

第 4 章の設計において、本手法で利用する音声シグナルにチャープ音を利用することを述べた。最低周波数と最高周波数はこのチャープ音の開始と終了時の周波数を表し、使用される周波数を端末ごとに分離することによりスペクトル解析後の周波数による端末の特定が可能としている。

相対再生時間はそれぞれのシグナルを発信するタイミングを決定するものである。本実装ではそれぞれの端末間でのシグナル発信インターバルは 100ms に設定し、既存研究である BeepBeep の 1sec よりも 10 分の 1 となっている。またこれらの周波数を端末が増えた場合に最利用する方法として、フェーズを設定しており、同フェーズの中では最も早く到達したシグナルを採用することにより、効率的に周波数帯域を最利用することができる。

```

/* 既に追加済みの端末は無視する */
if(leaderList.hasAddress(fromAddress)) return;

/* 新規登録端末にのプロパティを生成する */
Property property = new Property();

/* アドレスを追加する */
property.setAddress(fromAddress);

/* Node を端末に設定する TypeNORMAL */
property.setNodeType(Property.NODE_TYPE_NORMAL);

/* 次のを取得し、設定する NodeID */
int nextNodeID = leaderList.size();
property.setNodeID(nextNodeID);

/* 音声シグナルの周波数を設定する */
int freq_min = MINIMUM_FREQ +
    (FREQ_BANDWIDTH + GAP_BETWEEN_FREQS) * leaderList.size();
property.setFrequency(freq_min, freq_min + FREQ_BANDWIDTH);

/* 音声シグナルを発する時間とを設定する Phase */
prop.setScheduledTime(defaulttime + Constants.TIME_GAP * this.size());
property.setPhase(nextNodeID % NODE_NUM_IN_PHASE);

/* 新しく作ったノードのプロファイルを Leader に追加する List */
leaderList.add(property);

```

5.2.1 にリーダー端末が新規参加端末を受け付ける際の手順を示した。Property クラスはそれぞれの端末情報を管理するクラスで、このプロパティをリーダーリストに格納することでリーダー端末は参加端末の管理を行なっている。周波数帯域はそれぞれスペクトル解析をしやすいように、解析の解像度に合わせて式 5.1 に表した単位周波数の倍数を取っている。

$$44.1\text{kHz} \div 256 = 172.265625\text{Hz} \cdots \text{単位周波数} \quad (5.1)$$

また、各シグナルの周波数帯域にはそれぞれ単位周波数の倍数である GAP\_BETWEEN\_FREQS:周波数帯域同士の隙間を設定し、それぞれのシグナルが重ならないように実装されている。

```
1 <Message>
2   <Devices>
3     <Property>
4       <Name>Qrohey</Name>
5       <NodeType>Leader</NodeType>
6       <NodeID>0</NodeID>
7       <IPAddress>192.168.1.12</IPAddress>
8       <FrequencyBand>
9         <Min>30</Min>
10        <Max>33</Max>
11      </FrequencyBand>
12      <SyncDiff>0</SyncDiff>
13      <ScheduledTime>1000</ScheduledTime>
14      <Phase>1</Phase>
15    </Property>
16    <Property>
17      <Name>TEST</Name>
18      <NodeType>Normal</NodeType>
19      <NodeID>1</NodeID>
20      <IPAddress>192.168.1.13</IPAddress>
21      <FrequencyBand>
22        <Min>36</Min>
23        <Max>39</Max>
24      </FrequencyBand>
25      <SyncDiff>0</SyncDiff>
26      <ScheduledTime>1100</ScheduledTime>
27      <Phase>1</Phase>
28    </Property>
29    :
30    :
31    :
32    :
33    :
34  </Devices>
35 </Message>
```

5.2.1 にリーダー端末から各参加端末への返答メッセージの一例を記載する。先のリーダーリストに登録された Property クラスはそれぞれ<Property>から</Property>までの情報を出力するように実装されており、すべての端末からプロパティ情報を出力した後、それを 5.2.1 のように各参加端末へと返答される。

## ETOA メッセージ

```
1 <Message>
2   <NodeID>3</NodeID>
3   <ETOA>
4     <NodeID>1</NodeID>
5     <Difference>12140</Difference>
6   </ETOA>
7   <ETOA>
8     <NodeID>2</NodeID>
9     <Difference>14280</Difference>
10  </ETOA>
11  <ETOA>
12    <NodeID>4</NodeID>
13    <Difference>16740</Difference>
14  </ETOA>
15  <ETOA>
16    <NodeID>5</NodeID>
17    <Difference>18560</Difference>
18  </ETOA>
19 </Message>
```

リーダー端末が決定する各測定対象端末の情報を表 5.2 に表す。すべての端末がシグナル発信を終えた後、ETOA(Elapsed Time Of Arrival) 情報が記載された ETOA メッセージを送信する。先に受信した返答メッセージにより登録した他の参加端末の情報と ETOA で受け取ったシグナル到来の時間差より各端末との相対的な位置情報を計算することができる。

## 第 6 章

# 評価

本章では，5 章で説明した複数周波数帯を用いた音声シグナル交換手法を用いて，ミーティング環境に於ける席順検知を例とした位置測定アプリケーションを測定し，第 2 章で挙げた機能要件を基に評価軸を設け，精度と速度のそれぞれに関して評価実験を行い，その結果について考察を行う。

## 6.1 評価概要

本研究では、4,5章で説明した手法 FRAPPE を用いて、実装を行い、精度と速度について定量的に評価を行う。評価実験1では、2つのテストケースを用いて、本研究における目的を満たす為の精度を得られるかどうか評価し、実験2では、既存の手法と比較して、応答性に改善が見られているかどうか評価する。

### 6.1.1 評価環境

図 6.1 に本論文で使用した実験環境を示す。部屋の中央には約 3m x 1m のテーブルがあり、その周りを人が囲んでミーティングを行う事を想定している。通信環境として WiFi が使用可能であり、十分な通信強度が保たれている。また、室温は空調管理により摂氏 25 度に設定され、直接空調が当たらない設計となっている。評価において、アプリケーションとして挙げた、ミーティングにおける席順の検知を想定し、十分な精度、応答性が認められるかどうか評価する。

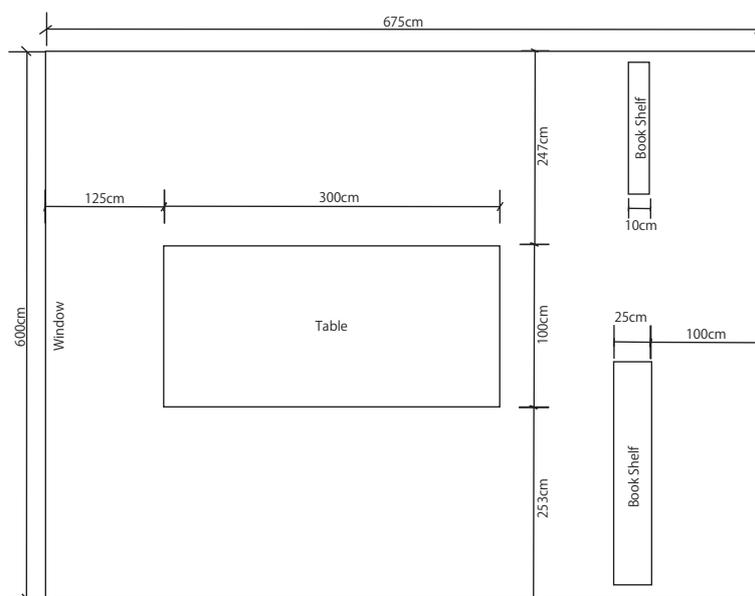


図 6.1 実験環境のレイアウト図

FRAPPE システム評価では表 6.1 で表したように Google Nexus One と Nexus S の 2 種類の携帯端末を使用した。Google Nexus One では FRAPPE システムが実装されたアプリケーションが起動し、Nexus S はパケットを受け取ると、録音して返す録音サーバが実装されている。Nexus S では録音以外の処理を一切担当せず、録音されたデータをそのまま Nexus One へと送信するものとする。これにより第 5 章で挙げた問題点について 1 端末内で処理が完結するように改善された場合をシュミレートすることができ、後に述べる評価実験において、

表 6.1 評価実験端末

項目	説明	
製品名	Google Nexus One	Nexus S
用途	FRAPPE システム主端末	録音専用機

### 6.1.2 評価項目

本研究において距離測定手法で利用する音声シグナルには複数の周波数帯域を用いることを述べた。複数の周波数帯域を利用することにより、精度の維持を行えているかどうか、測距を行う上で目的となる応答性を満たしているかを評価するため、精度と速度を評価軸としてを設定し、実験を行った。

#### 精度

本研究では屋内環境における相対位置情報の取得を目的とすることを述べた。FRAPPE システムではミーティング環境における席順の判定をゴールとし、実装を行った。席順を決定するためには十数センチメートル程の十分な精度を発揮できる必要がある。今回は4人でのミーティングを想定し、幾つかのテストケースに分けてその席順検出の精度について評価する。

#### 速度

用いた音による距離測定手法で用いられていたシグナル解析手法を追実装し、FRAPPE システムにおけるアルゴリズムとの速度比較を行う。

## 6.2 精度評価

本節では FRAPPE システムにおける精度評価の結果について詳しく述べる。

### 実験環境

精度評価実験では実験環境の中央に設置されているテーブルの上に向かい合う端末との距離が図 6.2 となるように評価対象となる携帯端末を設置した。普段実験環境でミーティングを行う際の配置としての利用ケースを2つに分け、それぞれの寸法で評価実験を行った。

- TestCase1 - 参加端末は対面の端末と 80cm となるように設置し、両隣の端末とは約 52cm 離れている状況とする。室温は 25 度で統一されている。
- TestCase2 - 参加端末を机の 4 隅に設置し、長い辺を 275cm、短い辺を 80cm となるように設置した。室温は TestCase1 と同じく 25 度で統一されている。

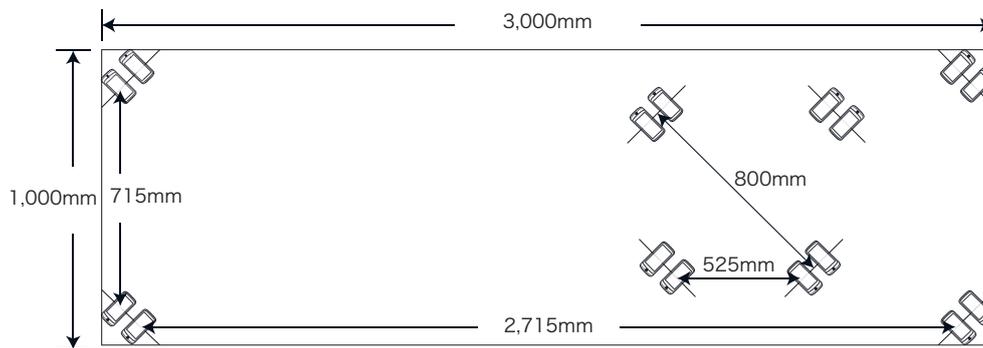


図 6.2 携帯端末の配置図

## 評価軸

本実験において、システムの精度は実際の距離と観測された距離の差を平均したものとす。また、その時の最大値、最小値についても明記し、そのばらつきによってシステム全体の精度評価とする。

## 実験手順

本実験ではミーティング状況を想定しているため、4人のユーザが本システムを使用している状況として実験を行う。

### 精度実験手順

1. 予め決められたノードの配置位置に端末を配置する。
2. リーダー端末を起動してから、順不同で他の端末を起動する。
3. 全ての端末間で距離の取得が終了し、ファイルに保存し終えた時点で実験を終了する。

## 実験結果

精度評価実験における結果を次の図 6.3 と図 6.4 に示した。

まず、図 6.3 では FFT のみによる測定結果を表している。本来 FFT での精度は最低限で良いため、65% 以上が標準化されたグラフにおいて 3 倍の精度を保っていることは非常に良い結果が得られたと言える。

図 6.4, 図 6.5 で表したのは録音データに対して TestCase1, TestCase2 のそれぞれの状況に関して自己相関を計算し、位置測定を行った場合の精度である。

表 6.2 精度結果

項目	TestCase1	TestCase2
Minimum	1.1129	-
Maximum	0.8969	-
Average	5.274%	32.04%

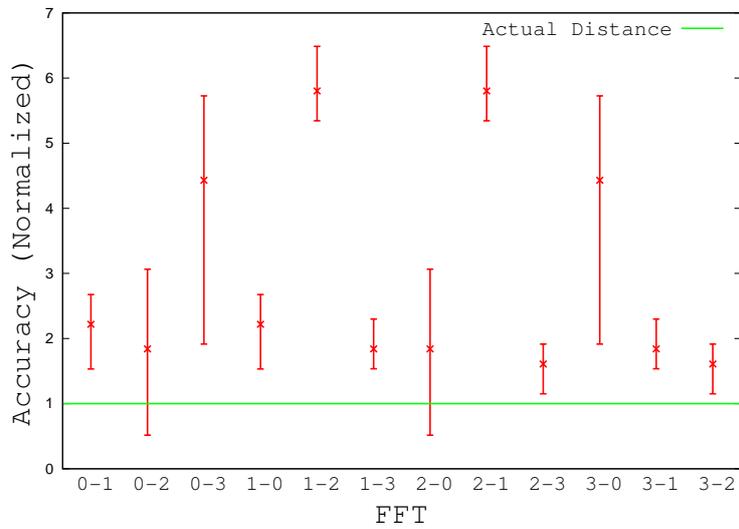


図 6.3 FFT のみにおける位置測定精度

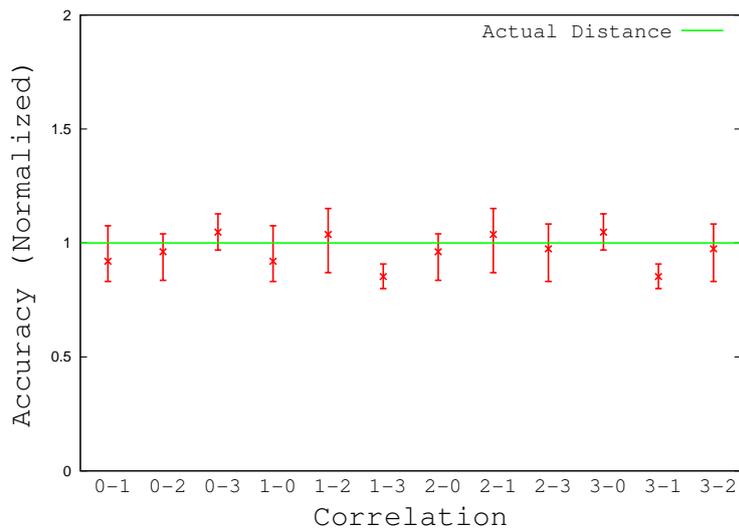


図 6.4 自己相関を使用した位置測定精度 (TestCase1)

## 6.3 速度評価

本節では FRAPPE システムにおける速度評価の結果について詳しく述べる。

### 6.3.1 実験環境

公平な処理速度比較を行うため、評価実験に使用する録音データは全く同一のものを利用することとする。また、同データはそれぞれの端末の外部ストレージに保存されており、実験の際はそれを読み込む事で録音の

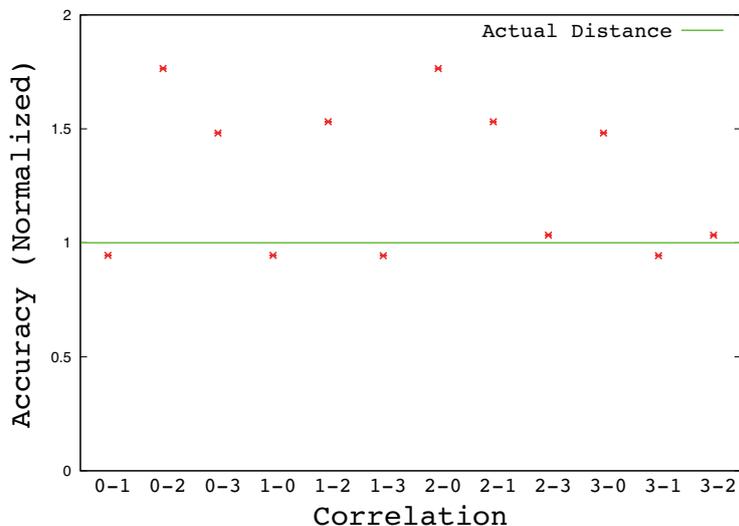


図 6.5 自己相関を使用した位置測定精度 (TestCase2)

際の差異や端末間の差異を埋めることとする。また実験には実装で用いた Android 端末の Android Nexus S 表 6.3 を使用し、同端末内に各手法を用いたアプリケーションを実装した。

表 6.3 実装環境

項目	説明
端末名	Nexus S
OS	Android 2.3.4
CPU	1GHz Cortex A8
RAM	512MB

### 6.3.2 評価軸

速度評価実験では、FRAPPE システムの採用する高速フーリエ変換と自己相関におけるシグナル解析処理と、従来の手法で提案されていた自己相関のみにおける解析手法とのシグナル解析にかかる処理時間を比較するものとする。またこのとき、相関をかける処理の後に行うピーク解析手法に関しては詳しい記述がない上、相関を求める処理に対して微々たる差であり、誤差範囲内と認められる為評価の対象外とすることとした。

### 実験手順

本実験で行う手順について以下に示す。本評価実験ではその評価の正当性に注意し、同じ端末で、同じ録音データを用い、合計 10 回繰り返したあとに、それらの平均を求めることとした。

### 速度実験手順

1. 予め決められた長さの音声信号が録音されたファイルを CSV 形式で端末に保存しておく
2. アプリケーションを起動し、通常通り測定の手順を行う
3. 録音フェーズが終了したら指定された録音ファイルを読み込む
4. 解析フェーズに移るタイミングで処理時間の測定を開始する
5. 解析が終了したら所要時間を出力して以上を 10 回繰り返し、実験を終える

## 実験結果

実験結果を図 6.6 として、FRAPPE の FFT と自己相関を合わせた手法では合計処理時間が 7028.9ms 掛かったのに対し、BeepBeep では 19535.1ms も掛かった、信号解析の部分だけで、2.78 倍の速度改善が見られたこととなる。

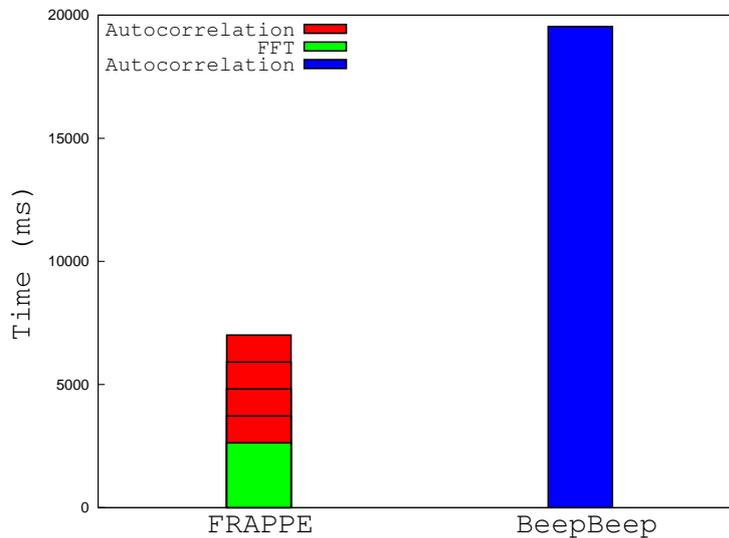


図 6.6 FRAPPE と BeepBeep の処理時間比較

表 6.4 実装環境

項目	FRAPPE	Beep Beep
FFT	2631.7ms	-
FFT Positioning	19.7ms	-
Correlation	4377.5ms	19535.1ms
Total	7028.9ms	19535.1ms

## 6.4 考察

以上で行った評価実験による考察を述べる。

精度評価の実験において、FFT のみの評価実験において予想を上回る精度が得られた。その差は 80 センチにおいて 3 倍である為、時間軸における誤差は約 7ms となっている。今後 FFT の速度が向上し、FFT における解析の精度が向上すれば十分に精度の機能要件を満たすことができると考えられる。

また、自己相関を用いた精度評価では 80x80 で平均 5.27%、80x300 では平均 32.04% という結果が得られたが、ガラス面などの一様な面に対して垂直に音声シグナルが反射した場合、同じ形状のピークが複数現れるなどして精度の著しい低下がもたらされた。今後の展望としては反射におけるシグナルの乱れ:マルチパス効果について詳しく改善を行うことで、更なる精度の向上が期待できる。

速度評価においては、既存研究である BeepBeep に対して、2.78 倍の速度改善が見られた。これは解析時における処理時間のみでの比較であるため、本手法で提案しているインターバルで実装を行った場合、システム全体としての処理時間は大幅に改善されていると言える。

## 6.5 本章のまとめ

本章では 5 章で説明したシステムを使用して実験を行い、その評価結果について示した。その上で、結果についての考察を行った。実験結果、席順の判定に十分な距離測定精度を得ることができ、速度評価においても従来の手法に比べて大幅な改善が見られた。しかし、端末が 2 つに分かれてしまうなどの問題点が残る為、今後継続して問題点の発見、解決策の提案を行なっていくことを考えている。

## 第7章

### 結論

本章では，本研究の総括として，本研究の今後課題と展望についてまとめ，その上で本論文の結論を述べる．

## 7.1 本研究のまとめ

本論文では屋内環境において、複数のユーザが特別な端末やセンサを使用せず、既存の携帯電話端末で精度の高い高速な位置情報取得手法及びシステム「FRAPPE」の提案、実装、評価を行った。

従来の手法では単一のシグナルを利用していたのに対して、本手法では複数の周波数帯域に分けた音声シグナルを使用することで、音声シグナルが重なる例外が起ってしまった場合にも正しく対処する事ができた。また、システムのプロトコル設計においてはシグナル間のインターバルを最小限に抑えることにより、大幅に録音時間を短縮することに成功した。加えてシグナル検出の処理では、同じ長さの録音データに対して、約39%の処理時間とすることができた。これにより、理論上参加台数が増えるごとに処理速度に差が出ることとなり、大きなコントリビューションであるといえる。また、先日 MIT により、FFT に比べて10倍の処理速度を達成するアルゴリズムが発表された。これにより、より高速な実行が可能となり、更に高精細なフーリエ変換を行うことにより、精度のさらなる向上と、処理速度の向上を実現できると考えられる。

評価実験においては実寸法と測定結果の平均誤差が3.216cmとなり実寸法に対して5%以内の誤差と、非常に高精度な測定が実現されたと言える。

## 7.2 今後の課題と展望

実装段階において、録音中にシグナル発信を行うと、測定データが欠落してしまう問題が生じた。今後、問題が生じている箇所の特定とその解決手法の提案を行い、携帯端末を統一する事が課題としてあげられる。

# 謝辞

本研究の機会を与えてくださり、絶えず丁寧なご指導を賜りました、慶應義塾大学環境情報学部教授徳田英幸博士に深く感謝致します。また、慶應義塾大学徳田研究室の諸先輩方には折に触れ貴重なご助言を頂き、また多くの議論の時間を割いて頂きました。特に政策メディア研究科博士課程生天目直哉氏、特別研究員伊藤友隆氏には、本論文の執筆にあたってたくさんのご指導を頂きました。また慶應義塾大学環境情報学部准教授高汐一紀博士、政策メディア研究科講師中澤仁博士には本研究を進めるにあたって多くの励ましとご指導を頂きました。ここに深い感謝の意を表します。

最後に、研究生生活を理解し、温かく見守ってくれた家族、研究の日々を家族同然に同じ時間を共に過ごした政策メディア研究科博士課程唐津豊氏、実装、論文の構成について多くの助言をくださった政策メディア研究科博士課程米川賢治氏、一緒に苦しい時を切り抜けてきた西山勇毅氏、勝治宏基氏、Nguyen Gia 氏、研究生生活を楽しくしてくれた LINK の大好きな後輩達、その他多くの友人に深く感謝し、謝辞と致します。

2012年2月14日

西條 晃平

## 参考文献

- [1] Wan Mohd. Yaakob Wan Bejuri and Mohd. Murtadha Mohamad and Maimunah Sapri. Ubiquitous positioning: A taxonomy for location determination on mobile navigation system. *CoRR*, Vol. abs/1103.5035, , 2011.
- [2] Bin Guo, Satoru Satake, and Michita Imai. Home-explorer: Ontology-based physical artifact search and hidden object detection system. *Mob. Inf. Syst.*, Vol. 4, pp. 81–103, April 2008.
- [3] R.J. Fontana, E. Richley, and J. Barney. Commercialization of an ultra wideband precision asset location system. In *Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003 IEEE Conference on*, pp. 369 – 373, nov. 2003.
- [4] Carl Fischer and Hans Gellersen. Location and navigation support for emergency responders: A survey. *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 9, pp. 38–47, 2010.
- [5] Luca D’Acierno, Armando Carten, and Bruno Montella. Estimation of urban traffic conditions using an automatic vehicle location (avl) system. *European Journal of Operational Research*, Vol. 196, No. 2, pp. 719–736, 2009.
- [6] Aiden R. Doherty and Alan F. Smeaton. Article automatically augmenting lifelog events using pervasively generated content from millions of people, 2010.
- [7] Andy Harter, Andy Hopper, Pete Steggles, Andy Ward, and Paul Webster. The anatomy of a context-aware application. *Wireless Networks*, Vol. 8, pp. 187–197, 2002. 10.1023/A:1013767926256.
- [8] Adam Smith, Hari Balakrishnan, Michel Goraczko, and Nissanka Bodhi Priyantha. Tracking moving devices with the cricket location system. In *2nd International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (Mobisys 2004)*, Boston, MA, June 2004.
- [9] N. Patwari, J.N. Ash, S. Kyperountas, III Hero, A.O., R.L. Moses, and N.S. Correal. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks. *Signal Processing Magazine, IEEE*, Vol. 22, No. 4, pp. 54 – 69, july 2005.
- [10] A. Arora, P. Dutta, S. Bapat, V. Kulathumani, H. Zhang, V. Naik, V. Mittal, H. Cao, M. Demirbas, M. Gouda, Y. Choi, T. Herman, S. Kulkarni, U. Arumugam, M. Nesterenko, A. Vora, and M. Miyashita. A line in the sand: a wireless sensor network for target detection, classification, and tracking. *Computer Networks*, Vol. 46, No. 5, pp. 605 – 634, 2004. [jce:title; Military Communications Systems and Technologies; ce:title](#).
- [11] Yanliang Liu, Shanshan Lu, and Yonghe Liu. *COAL: Context Aware Localization for high energy efficiency in wireless networks*. IEEE, 2011.
- [12] Faranak Nekoogar. *Ultra-wideband communications: fundamentals and applications*. Prentice Hall

- Press, Upper Saddle River, NJ, USA, first edition, 2005.
- [13] Radu Stoleru, Tian He, John A. Stankovic, and David Luebke. A high-accuracy, low-cost localization system for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, SenSys '05, pp. 13–26, New York, NY, USA, 2005. ACM.
  - [14] P. Tarrío, A.M. Bernardos, and J.R. Casar. An rss localization method based on parametric channel models. In *Sensor Technologies and Applications, 2007. SensorComm 2007. International Conference on*, pp. 265–270, oct. 2007.
  - [15] Naohiko Iwakiri and Takehiko Kobayashi. Ultra-wideband time-of-arrival and angle-of-arrival estimation using transformation between frequency and time domain signals. *Journal of Communications*, Vol. 3, No. 1, 2008.
  - [16] Stephen P Tarzia and Robert P Dick. Indoor localization without infrastructure using the acoustic background spectrum. *Spectrum*, No. June, pp. 155–168, 2011.
  - [17] Chunyi Peng, Guobin Shen, Yongguang Zhang, Yanlin Li, and Kun Tan. Beepbeep: a high accuracy acoustic ranging system using cots mobile devices. In *Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems*, SenSys '07, pp. 1–14, New York, NY, USA, 2007. ACM.
  - [18] Jian Qiu, David Chu, Xiangying Meng, and Thomas Moscibroda. On the feasibility of real-time phone-to-phone 3d localization. In *Proceedings of the 9th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '11, pp. 190–203, New York, NY, USA, 2011. ACM.