

平成 25 年度  
学士学位論文

# チャープ信号の到達時間差を用いた位置 推定

Estimation scheme of indoor positioning using  
difference of times which chirp signals arrive

1140348 田中 拓斗

指導教員 福本 昌弘

2014 年 3 月 6 日

高知工科大学 情報学群

# 要 旨

## チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定

田中 拓斗

近年、スマートフォンを含む携帯端末には全地球測位システム (GPS: Global Positioning System) が標準的に搭載され、屋外における位置情報の取得は容易にできるようになっている。そのため、人間や物の位置情報を用いて、その場所特有のサービスを受けることのできる位置情報サービス (LBS: Local Based Services) が発展してきている。特に大規模集客施設における携帯端末によるナビゲーションシステムの需要は高まっている。しかしながら屋内や地下街では GPS の電波を適切に受信することができず、有効な精度を持った位置推定を行うことができない。そのため、屋内や地下街における位置情報の取得について多くの研究がなされている。屋内における既存の位置推定方式としては RFID や無線 LAN の電波受信強度、電波の到達時間や到来方向を用いた位置推定方式が提案されている。ただし、これらの位置推定方式では専用デバイスの設置コストや有効な位置推定精度が確保できない等の問題が残っている。

そこで本研究では、屋内や地下街において専用デバイスが必要とならない位置推定方式を提案する。提案方式では、屋内には音響設備が既に設置されており、利用者が所持しているスマートフォンでの利用を想定し、スピーカーと単一のマイクロホンを用いる。各スピーカーからチャープ信号を出力し、マイクロホンに入力される音からそれぞれのチャープ信号の到達時間差を推定する。それぞれのチャープ信号の到達時間差からマイクロホンの位置を推定する。実際に提案方式による位置推定実験を行った結果、多少の誤差は生じるが位置推定は可能であることを確認した。また、反射音の影響により誤差が生じたことを確認した。

キーワード 相互相関関数, 到達時間差, チャープ信号, 位置推定

# Abstract

Estimation scheme of indoor positioning using difference of times which chirp signals arrive

TANAKA Takuto

In recent years, the acquisition of position information becomes easier in outdoor because GPS(Global Positioning System) is mounted on the portable terminal including the smartphone. Therefore, LBS(Local Based Services) which services to us in the unique position by using position information of human and object has been developed. Especially, demand of navigation system with the portable terminal in large customer attracting facility is increasing. However, it is impossible to estimate position with a valid accuracy because GPS signals can not be received properly. For this reason, it has been studied for estimation scheme of positioning indoor and underground city. The estimation scheme of indoor positioning using RSSI(Received Signal Strength Indication) scheme, TOA(Time Of Arrival) scheme and AOA(Angle Of Arrival) scheme is proposed. These estimation scheme of indoor positioning have two problems. First, these estimation scheme need device dedicated to estimate position. Second, these estimation scheme do not have a valid accuracy.

In this paper, an estimation scheme of indoor positioning without device dedicated to estimate position indoor and underground city is proposed. Proposed estimation scheme presupposes that audio-visual equipment is already installed and the user has a smartphone. Therefore, proposed estimation scheme uses speakers and a microphone. Each speaker output are chirp signal. First, proposed estimation scheme estimates the

difference of times which each chirp signal arrive. Next, proposed estimation scheme estimates the position of the microphone from the difference of times which each chirp signal arrive. The result of proposed estimation scheme showed that proposed estimation scheme is able to estimate the position of the microphone. However, the estimated position was off from the proper position of the microphone under the influence of reflected sound.

***key words*** cross-correlation, TDOA, chirp-signal, localization

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景と目的	1
1.2	構成	2
第 2 章	位置推定方式	3
2.1	Range-Based 方式	3
2.1.1	受信電界強度方式	3
2.1.2	到来方向方式	4
2.1.3	到着時間方式	5
2.1.4	到着時間差方式	5
2.2	Range-Free 方式	6
2.3	屋内位置推定の問題点	6
第 3 章	チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定	8
3.1	チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定	8
3.1.1	複数音源の到達時間差による位置推定	9
3.1.2	相互相関関数	11
3.1.3	チャープ信号	13
3.2	解決できる問題	18
第 4 章	受聴位置推定実験	19
4.1	実験方法	19
4.2	位置推定結果	22
4.3	評価	24
4.4	適応フィルタを用いた位置推定	33

## 目次

4.4.1	システム同定 . . . . .	33
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>35</b>
5.1	本論文のまとめ . . . . .	35
5.2	今後の課題 . . . . .	35
	謝辞	<b>37</b>
	参考文献	<b>38</b>

# 目次

2.1	電信電界強度方式, 到着時間方式 . . . . .	4
2.2	到来方向方式 . . . . .	5
3.1	システム構成図 . . . . .	8
3.2	同時に出力した音の到達時間の違い . . . . .	9
3.3	3つの送信機間の到着時間差による双曲線と推定位置 . . . . .	10
3.4	出力された音と受音された音 . . . . .	12
3.5	チャープ信号 1 . . . . .	14
3.6	チャープ信号 2 . . . . .	15
3.7	チャープ信号 3 . . . . .	15
3.8	チャープ信号 4 . . . . .	16
3.9	チャープ信号 5 . . . . .	16
3.10	チャープ信号の自己相関関数 . . . . .	17
3.11	チャープ信号の自己相関関数 (前半) . . . . .	17
3.12	チャープ信号の相互相関関数 . . . . .	18
4.1	スピーカーとマイクロホンの配置 ( $6.6 \times 6.0\text{m}^2$ ) . . . . .	20
4.2	スピーカーとマイクロホンの配置 ( $2.7 \times 2.7\text{m}^2$ ) . . . . .	20
4.3	スピーカーとマイクロホンの配置 ( $1.5 \times 1.5\text{m}^2$ ) . . . . .	21
4.4	スピーカーとマイクロホンの配置 ( $1.5 \times 1.5\text{m}^2$ , 吸音材) . . . . .	21
4.5	受聴位置推定実験に用いたチャープ信号の周波数変化 . . . . .	22
4.6	受聴位置推定実験 Mc1 . . . . .	25
4.7	受聴位置推定実験 Mc2 . . . . .	25
4.8	受聴位置推定実験 Mc3 . . . . .	26

## 目次

4.9 受聴位置推定実験 Mc4 . . . . .	26
4.10 受聴位置推定実験 Mc5 . . . . .	27
4.11 受聴位置推定実験 Mc6 . . . . .	27
4.12 受聴位置推定実験 Mc7 . . . . .	28
4.13 受聴位置推定実験 Mc8 . . . . .	28
4.14 受聴位置推定実験 Mc9 . . . . .	29
4.15 受聴位置推定実験 Mc10 . . . . .	29
4.16 受聴位置推定実験 Mc11 . . . . .	30
4.17 受聴位置推定実験 Mc12 . . . . .	30
4.18 受聴位置推定実験 Mc13 . . . . .	31
4.19 受聴位置推定実験 Mc14 . . . . .	31
4.20 受聴位置推定実験 Mc15 . . . . .	32
4.21 受聴位置推定実験 Mc16 . . . . .	32
4.22 システム同定 . . . . .	34

# 表目次

2.1	受信機を音響設備, 送信機を携帯端末のマイクロホンとしたときの問題点 . . .	7
3.1	チャープ信号 . . . . .	14
4.1	受聴位置推定実験に用いた機材 . . . . .	22
4.2	マイクロホンの位置と推定位置 . . . . .	23
4.3	マイクロホンの位置と推定位置の誤差 . . . . .	24

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 背景と目的

近年、スマートフォンを含む携帯端末には全地球測位システム (GPS: Global Positioning System) が標準的に搭載され、屋外における位置情報の取得は容易にできるようになっている。そのため、人間や物の位置情報を用いて、その場所特有のサービスを受けることのできる位置情報サービス (LBS: Local Based Services) が発展してきている。特に大規模集客施設における携帯端末によるナビゲーションシステムの需要は高まっている。しかしながら屋内や地下街では GPS の電波を適切に受信することができず、有効な精度を持った位置推定を行うことができない。そのため、屋内や地下街における位置情報の取得について多くの研究がなされている。屋内における既存の位置推定方式としては RFID や無線 LAN の電波受信強度、電波の到達時間や到来方向を用いた位置推定方式が提案されている。ただし、これらの位置推定方式では専用デバイスの設置コストや有効な位置推定精度が確保できない等の問題点が残っている。

そこで本研究では、屋内や地下街において専用デバイスを必要としない位置推定方式を提案する。提案方式では、屋内には音響設備が既に設置されているとし、利用者が所持しているスマートフォンでの利用を想定し、スピーカーと単一マイクロホンを用いる。マイクロホンに入力される音を用いて、各スピーカーから出力された音の到達時間差を推定し、到達時間差と各スピーカーの設置位置からマイクロホンの位置を推定する。また、各スピーカーからはチャープ信号を出力することで、音の到達時間差の推定精度を向上させる。実際に提案方式による位置推定実験を行い、どの程度の誤差で位置推定が可能かどうかを確認する。

## 1.2 構成

### 1.2 構成

本論文の構成について述べる.

第 2 章では, 既存の位置推定方式について述べる. また既存の屋内位置推定方式では解決することができない問題を挙げる.

第 3 章では, 提案する位置推定方式として, チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定について述べる. また, その際に必要となる技術である相互相関関数, チャープ信号について述べる.

第 4 章では, 提案方式による位置推定実験を行い, その結果について評価をする.

第 5 章では, 4 章の結果から本論文の結論を述べる.

## 第 2 章

# 位置推定方式

本章では、屋内位置推定方式について述べる。屋内位置推定において、人間や物の位置推定を行うためには、電波や音波を送信または受信できる端末や装置を持っている必要がある。ここでは、位置推定の対象は受信機を持っていることとし、送信機からの信号を受信することにより位置推定を行っているとする。既存の屋内位置推定方式は、Range-Based 方式と Range-Free 方式に大別することができる。また、Range-Based 方式の中でもさらに、受信電界強度方式、到来方向方式、到達時間方式、到達時間差方式の 4 つに分けることができる。それぞれの位置推定方式について説明を行い、最後に屋内位置推定におけるそれぞれの問題点を挙げる。

### 2.1 Range-Based 方式

Range-Based 方式は、各送信機の位置情報が既知である状態で、受信機の位置を推定する方式である。Range-Based 方式の位置推定には受信電界強度方式、到来方向方式、到着時間方式、到着時間差方式がある [1, 2, 3, 4]。

#### 2.1.1 受信電界強度方式

受信電界強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) 方式は、複数の送信機から出力された信号を受信機で受信し、その受信強度から各送信機までの距離を推定する。受信機から各送信機への距離を推定することで、それぞれの送信機から距離を半径とする円または球を構成し、その交点から受信機の位置を推定することができる。受信電界強度方式では、位

## 2.1 Range-Based 方式

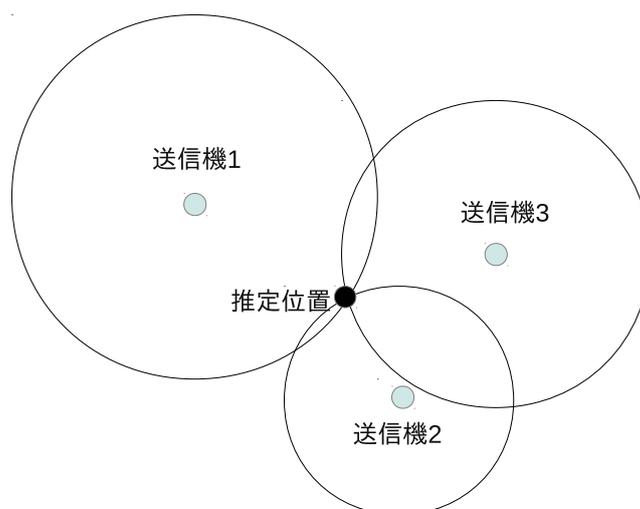


図 2.1 電信電界強度方式, 到着時間方式

位置推定を行う環境において, 事前に信号の伝播環境を調査しておく必要がある. そのためには様々な距離に対して受信強度を計測し, 得られた測定データをもとに近似曲線を求め, 距離減衰モデルを決定する必要がある. 距離減衰モデルから受信強度を距離に変換するため, 位置推定は距離減衰モデルの近似精度に大きく依存する.

### 2.1.2 到来方向方式

到来方向 (AOA: Angle of Arrival) 方式は, 複数の送信機から出力された信号を受信機のアレーアンテナを用い, 到来方向を計測する. 2つの送信機からの到来方向が正確に計測できれば, 受信機からそれぞれの送信機への到来方向への直線を引くことができ, それぞれの直線の交点が受信機の位置と推定することができる. 到来方向方式ではアレーアンテナを用いるため装置が大きく複雑になる. そのため, 利用環境によっては困難な手法である. しかし, 到来方向の計測精度がよければ, 2つの送信機からの信号のみで3次元空間の位置推定を高精度で行うことができる.

## 2.1 Range-Based 方式

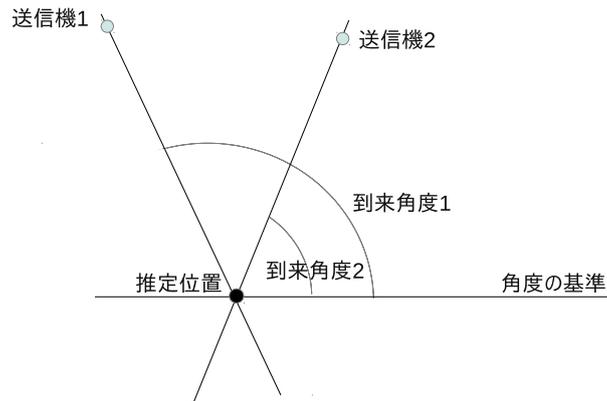


図 2.2 到来方向方式

### 2.1.3 到着時間方式

到着時間 (TOA: Time of Arrival) 方式は、複数の送信機から出力された信号を受信機で受信し、その到着時間を計測する。それぞれの送信機から出力された信号の到着時間と信号の伝達速度から、各送信機から受信機までの距離を推定することができる。そのため、距離を推定する方法は異なるが、位置推定は電信電界強度と同様に位置を推定する。それぞれの送信機から距離を半径とする円または球を構成し、その交点から受信機の位置を推定することができる。到着時間方式では各送信機から出力された信号が受信機に届くまでの時間を正確に計測しなければいけないため、各送信機と受信機の時刻同期を行う必要がある。

### 2.1.4 到着時間差方式

到着時間差 (TDOA: Time Difference of Arrival) 方式は、複数の送信機から出力された信号を受信機で受信し、その到着時間の差分を計測する。2つの送信機から出力された信号の到着時間差を用いれば、それぞれの送信機を焦点とする双曲線または双曲面を描くことができ、到着時間差からその一方に絞ることができる。また、別の送信機に対しても同様に双曲線または双曲面を描く。その交点に受信機が存在すると推定できる。各送信機から受信機との到着時間差を正確に計測しなければいけないため、各送信機の時刻同期を行う必要がある。

## 2.2 Range-Free 方式

Range-Free 方式は、それぞれの送信機や受信機のネットワークトポロジ情報のみを利用して位置推定を行う方式である。そのため、送信機や受信機の一部だけの位置情報が既知の場合でも位置推定を行うことができる。しかし、Range-Based 方式に比べ、一般的に位置推定精度は落ちる。Range-Free 方式としては、隣接ノードの移動履歴情報を用いた位置推定が挙げられる [6]。

## 2.3 屋内位置推定の問題点

屋内施設において、送信機として利用することのできる設備は音響設備や無線 LAN などが挙げられる。その中でも最も利用されていると考えられるのは音響設備である。また、送信機として音響設備を利用した場合、利用者の位置推定を行う際に、携帯端末のマイクロホンを受信機として利用することができる。この条件で位置推定を行うと、それぞれの推定方式では、表 2.1 のような問題点が挙げられる。RSSI 方式では対象となる信号以外の信号が多く含まれているため、信号強度を適切に測定することが困難である。AOA 方式では、受信機となる携帯端末に信号の到来方向を測定するため、マイクロホンアレーを取り付ける必要があり、実用的ではない。TOA 方式では、屋内施設のスピーカーと携帯端末の時間同期を取る必要がある。しかし、時間同期をとるために特別な装置が必要になると考えられるため、実用的ではない。そこで本研究では、屋内施設で利用できる位置推定方式として、屋内施設の音響設備と携帯端末のマイクロホンを想定した、複数スピーカーと単一マイクロホンを使用した、TDOA 方式の位置推定方式を提案する。

## 2.3 屋内位置推定の問題点

表 2.1 受信機を音響設備, 送信機を携帯端末のマイクロホンとしたときの問題点

	問題点
RSSI	音声信号においては 目的の信号以外の信号が多数含まれている可能性が高いため、 信号強度が適切に測定することが困難である
AOA	受信機に到来角度を測定する特別な装置が必要となる
TOA	送信機と受信機の時刻同期を行うことが困難である
Range-Free	Range-Based 方式に比べ、位置推定精度が落ちる

# 第3章

## チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定

本章では、提案する位置推定方式について説明する。また、位置推定方式に必要となる相互相関関数とチャープ信号について説明する。さらに、提案する位置推定方式を用いることで解決できる問題について述べる。

### 3.1 チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定

提案する位置推定方式では、複数の音源から同時に出力される音が、それぞれの音について受聴点に到達する時間を推定し、各音源から出力されたの音の到達時間差から、受聴点の位置を推定する。提案システムのシステム構成図は図 3.1 となる。

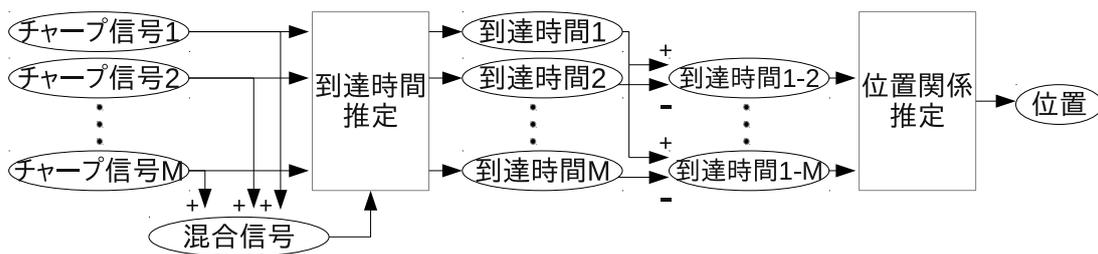


図 3.1 システム構成図

### 3.1 チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定

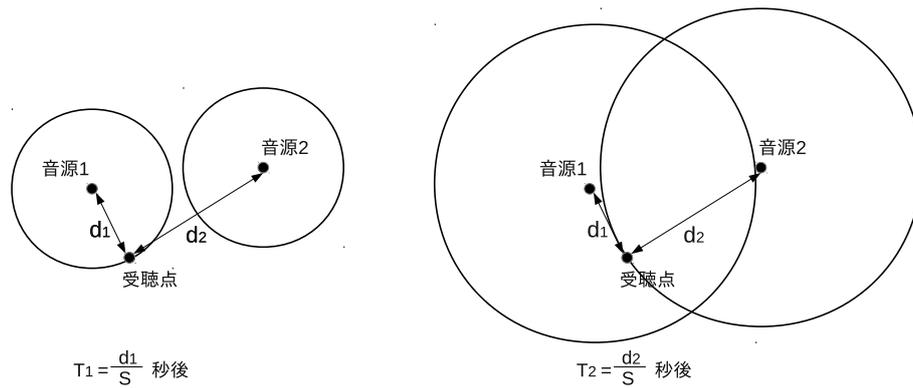


図 3.2 同時に出力した音の到達時間の違い

#### 3.1.1 複数音源の到達時間差による位置推定

音は 1 気圧の空气中を,

$$S = 331.5 + 0.6 \times c$$

で求められる  $S[\text{m/sec}]$  で伝わる. ここで  $c$  は摂氏温度である. ある音源から出力された音は音源と受聴点との距離  $d[\text{m}]$  が, 到達までの時間  $T[\text{sec}]$  を決定する. 音速を  $S$  としたとき, 到達までの時間  $T$  は,

$$T = \frac{d}{S}$$

で計算することができる. また, 複数の音源から同時に出力されたそれぞれの音は, 各音源と受聴点の距離によって, 到達までの時間に差があることを図 3.2 に示す. 複数の音源から同時に出力された音の到達時間差を利用することで受聴点の位置を推定することができる.

ここで音源 1, 音源 2, 音源 3 それぞれから出力される音が受聴点に到達した時間を  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  とする. このとき音源 1 と音源 2 から出力される音の到達時間差  $T_{1-2}$ , 音源 1 と音源 3 から出力される音の到達時間差  $T_{1-3}$  は, それぞれ,

$$T_{1-2} = T_1 - T_2$$

$$T_{1-3} = T_1 - T_3$$

となる. 音源 1 と受聴点の距離  $d_1$ , 音源 2 と受聴点の距離  $d_2$  の関係式は

$$d_1 - d_2 = S \times T_{1-2}$$

### 3.1 チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定

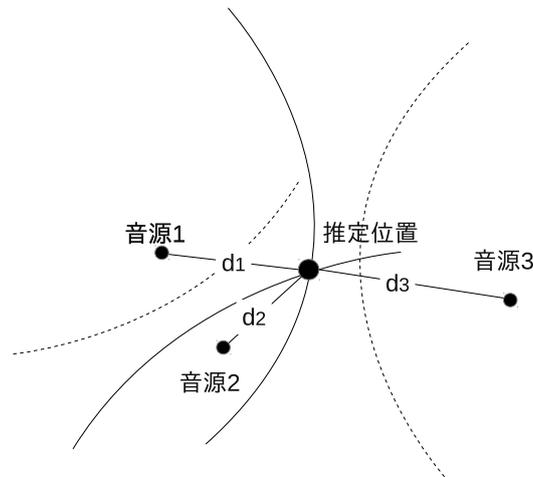


図 3.3 3つの送信機間の到着時間差による双曲線と推定位置

となる。受聴点から音源 1 までの距離  $d_1$  は、受聴点から音源 2 までの距離  $d_2$  よりも  $S \times T_{1-2}[\text{m}]$  遠い位置にあることがわかる。図 3.3 のような平面上において、音源 1 と音源 2 からの距離の差が  $|d_1 - d_2|$  である点の軌跡を描くと、音源 1 と音源 2 を焦点とする双曲線となる。また、 $d_1 - d_2$  の符号により、どちらの音源に近いかがわかるため、双曲線の一方に絞ることができ、その曲線上に受聴点が存在することが言える。音源 1 と音源 3 の場合も同様にして、図 3.3 のように音源 1 と音源 3 を焦点とする双曲線の一方に絞ることができ、それぞれの曲線の交点上に受聴点があると推定できる。よって、平面上では 3 つの音源を用いることで位置推定が可能となる。また、音源の数を増やすことで、同様に各音源間に曲線を描くことができる。このとき到達時間が正確に推定することができれば、すべての曲線は 1 点で交わる。1 点で交わらなかったとき、到達時間が正確に推定することができなかったと考えられ、各交点の重心を取ることで位置推定の精度を向上させることができると考えられる。

3次元空間の場合、2つの音源の距離差が一定となるような点の軌跡を描くと曲面となる。同様にして別の曲面を描くと、その曲面の交点は円となる。そのため、3次元空間上では3つの音源では位置を推定することはできない。もうひとつの曲面を描くことで3次元空間上においても位置推定が可能となる。よって、3次元空間では4つの音源を用いることで位置推定が可能となる。

### 3.1 チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定

#### 3.1.2 相互相関関数

各音源から出力された音が、それぞれ受聴点に到達した時間がわかれば、到達時間差を用いて受聴点の位置が推定できる。そこで、各音源から出力された音が受聴点に到達した時間を推定する必要がある。到達した時間を推定するために相互相関関数を用いる。ある音源から出力された音と受聴点で受信された音は図 3.4 のようになる。ここで受信された音は、出力された音の位相をずらしたものと類似していることがわかる。出力された音に類似した音の受信された時間がわかれば、出力された音の到達時間がわかることになる。そのため、受信した信号をどのくらいずらせば出力信号と類似しているかを示す尺度が必要となる。相互相関関数は類似性を示す尺度として用いることができる。類似性を示す 2 つの信号をそれぞれ、 $a = \{a_0, a_1, \dots, a_{N-1}\}$ ,  $b = \{b_0, b_1, \dots, b_{N-1}\}$  とすると、相互相関関数  $R_{ab}[T]$  は、

$$R_{ab}[T] = \sum_{n=0}^{N-1} a[n-T]b[n]$$

によって定義される [7]。ここで  $N$  は信号長である。相互相関関数  $R_{ab}[T]$  は、信号  $a[n]$  を  $T$  サンプル分だけずらした信号  $a[n-T]$  と信号  $b[n]$  の類似性を表しており、相互相関関数の絶対値  $|R_{ab}[T]|$  が 0 に近いほど類似性が低いことを表している。そのため、 $|R_{ab}[T_{max}]|$  が最大値とき、 $T_{max}$  サンプル分ずれた信号  $a$  と信号  $b$  は最も類似していることになる。出力された音を信号  $a$ 、受信された音を信号  $b$  とすると、 $|R_{ab}[T_{max}]|$  が最大となるとき、サンプル  $T_{max}$  ずれたときに信号  $a$  が到達したと考えることができる。

ここで、音源が複数個あるときのことを考える。各音源から出力される音をそれぞれ、 $s_1, s_2, \dots, s_M$  とし、 $s_m = \{s_{m,0}, s_{m,1}, \dots, s_{m,(N-1)}\}$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) とする。ここで  $M$  は音源の数である。各音源から同時に出力された音は、それぞれの音源と受聴点の距離によって、受信されるまでの時間が異なる。各音源から出力された音が受信されるまでのサンプルのずれを、それぞれ  $T_1, T_2, \dots, T_M$  とすると、受聴点で受信される混合音声  $x$  は、

$$x = \{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$$

$$x_n = \{s_{1,(n-T_1)} + s_{2,(n-T_2)} + \dots + s_{M,(n-T_M)}\} \quad (n = 0, 1, \dots, N-1)$$

### 3.1 チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定

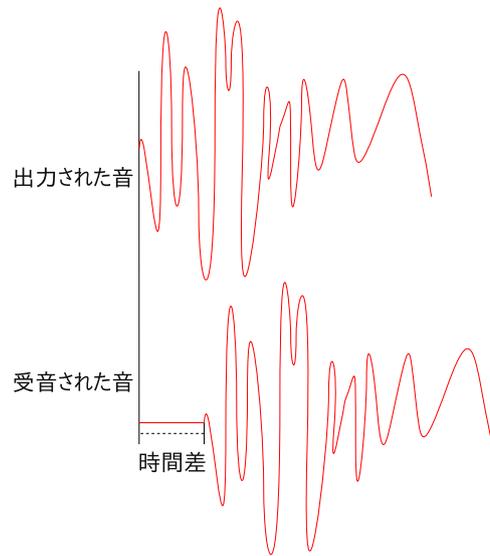


図 3.4 出力された音と受信された音

となる. この混合音声  $x$  とそれぞれ音源から出力された音  $s_m$  の相互相関関数  $R_{xs_m}[T]$  は,

$$\begin{aligned}
 R_{xs_m}[T] &= \sum_{n=0}^{N-1} x[n-T]s_m[n] \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} (s_1[n-T_1-T] + s_2[n-T_2-T] + \cdots + s_M[n-T_M-T])s_m[n] \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} s_1[n-T_1-T]s_m[n] \\
 &+ \sum_{n=0}^{N-1} s_2[n-T_2-T]s_m[n] \\
 &\quad \vdots \\
 &+ \sum_{n=0}^{N-1} s_m[n-T_m-T]s_m[n] \\
 &\quad \vdots \\
 &+ \sum_{n=0}^{N-1} s_M[n-T_M-T]s_m[n] \\
 &= \sum_{k=1}^M R_{s_k s_m}[T_k + T]
 \end{aligned}$$

となる. 相互相関関数  $R_{xs_m}[T]$  は,  $s_m$  自身との相互相関関数  $R_{s_m s_m}[T_m + T]$  と他の音源

### 3.1 チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定

$s_l(l \neq m)$  との相互相関関数  $R_{s_l s_m}[T_l + T]$  の和となっている。自身との相互相関関数を自己相関関数という。自己相関関数  $R_{s_m s_m}[T_m + T]$  は  $T = -T_m$  のとき、同じ信号の類似性を示すため最大値をとる。そのため、それぞれの音源から出力された音との相互相関関数  $R_{s_l s_m}[T_l + T]$  の絶対値  $|R_{s_l s_m}[T_l + T]|$  が自己相関関数  $R_{s_m s_m}[T]$  と比べて十分小さければ、 $T_m$  サンプル分ずれて到達していることがわかり、混合音声の場合でも適切に到達時間を推定することができる。

#### 3.1.3 チャープ信号

相互相関関数によって、音  $s_m$  の到達時間が推定するには、 $s_m$  の自己相関関数  $R_{s_m s_m}[T]$  が鋭いピークを持ち、それぞれの音源から出力される音の相互相関関数の絶対値  $|R_{s_l s_m}[T]|(l \neq m)$  が自己相関関数  $R_{s_m s_m}[T]$  と比べて十分に小さければ、音  $s_m$  の到達時間が推定できることがわかった。そのため、それぞれの音源から出力された音の自己相関関数が鋭いピークを持ち、それぞれの音源から出力された音との相互相関関数の絶対値が、自己相関関数と比べて小さい音の組み合わせを見つけることが必要である。そこで複数のチャープ信号を用いる。

チャープ信号  $s[n]$  は、時間とともに周波数が変化する信号であり、

$$s[n] = \sin(2\pi(f_0 + \frac{f_1 - f_0}{2N}n)n) \quad (0 \leq n \leq N - 1)$$

で求まる。 $f_0, f_1, N$  は、それぞれ初期周波数、終了周波数、信号長である。ここで初期周波数と終了周波数の差分が  $f_1 - f_0$  で表されており、チャープ帯域幅という。例えば、表 3.1 のようなチャープ信号、図 3.5、図 3.6、図 3.7、図 3.8、図 3.9 があるとする。このとき、初期周波数が等しく、チャープ帯域幅が 10Hz, 20Hz, 30Hz となるそれぞれのチャープ信号の自己相関関数は図 3.10、図 3.11 となる。図 3.11 は図 3.10 の前半部分を拡大した図である。図 3.11 のように、チャープ信号のチャープ帯域幅が大きくなるにつれて、自己相関関数はピークは鋭くなっている [5]。またチャープ帯域幅が等しく、初期周波数が 10Hz, 50Hz, 90Hz となるそれぞれのチャープ信号の相互相関関数は図 3.12 となる。また図 3.10、図 3.12 のように、初

### 3.1 チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定

期周波数が異なれば、相互相関関数の絶対値は自己相関関数に比べて十分に小さくなること  
がわかる。よって、各音源から異なるチャープ信号を出力することで、混合音声からそれぞ  
れのチャープ信号が到達した時間を適切に推定することが可能となる。

表 3.1 チャープ信号

	初期周波数	終了周波数	チャープ帯域幅
チャープ信号 1	10Hz	20Hz	10Hz
チャープ信号 2	10Hz	30Hz	20Hz
チャープ信号 3	10Hz	40Hz	30Hz
チャープ信号 4	50Hz	60Hz	10Hz
チャープ信号 5	90Hz	100Hz	10Hz

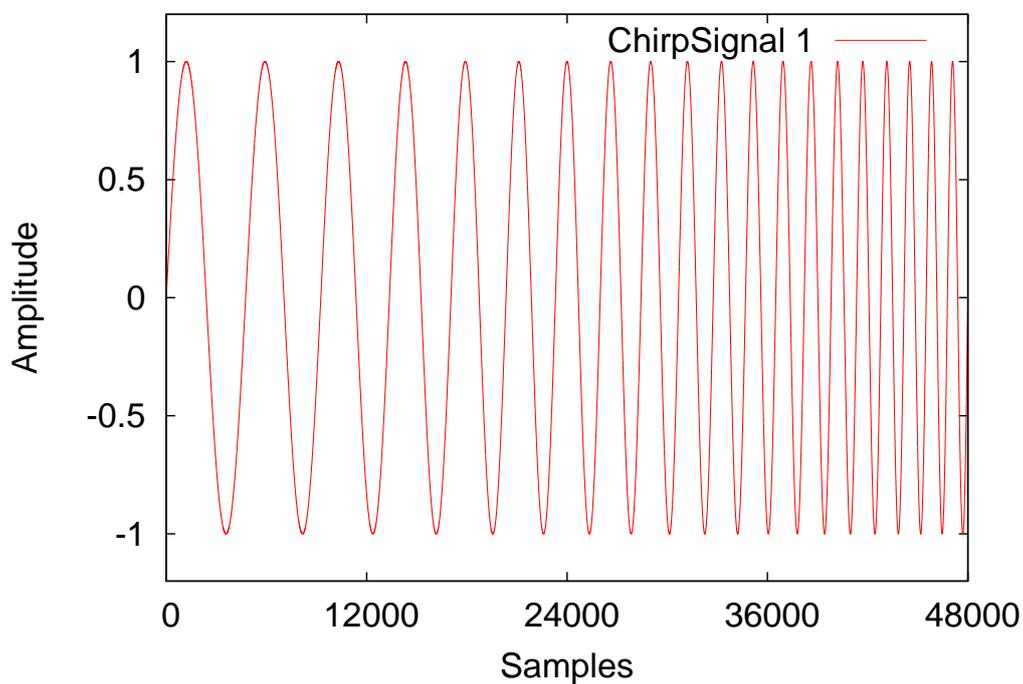


図 3.5 チャープ信号 1

### 3.1 チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定

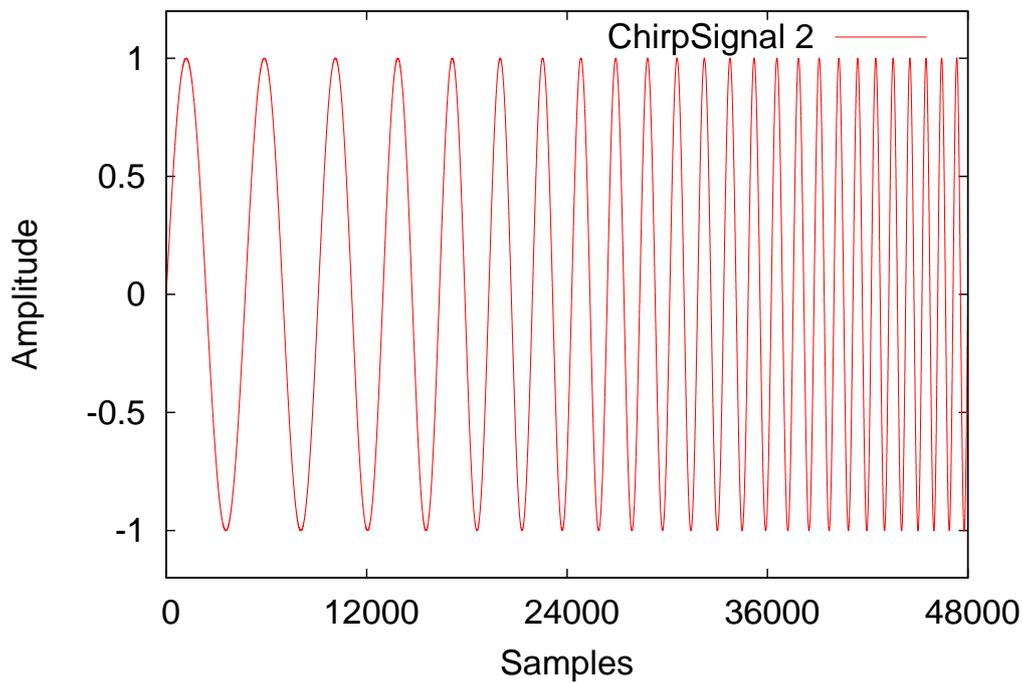


図 3.6 チャープ信号 2

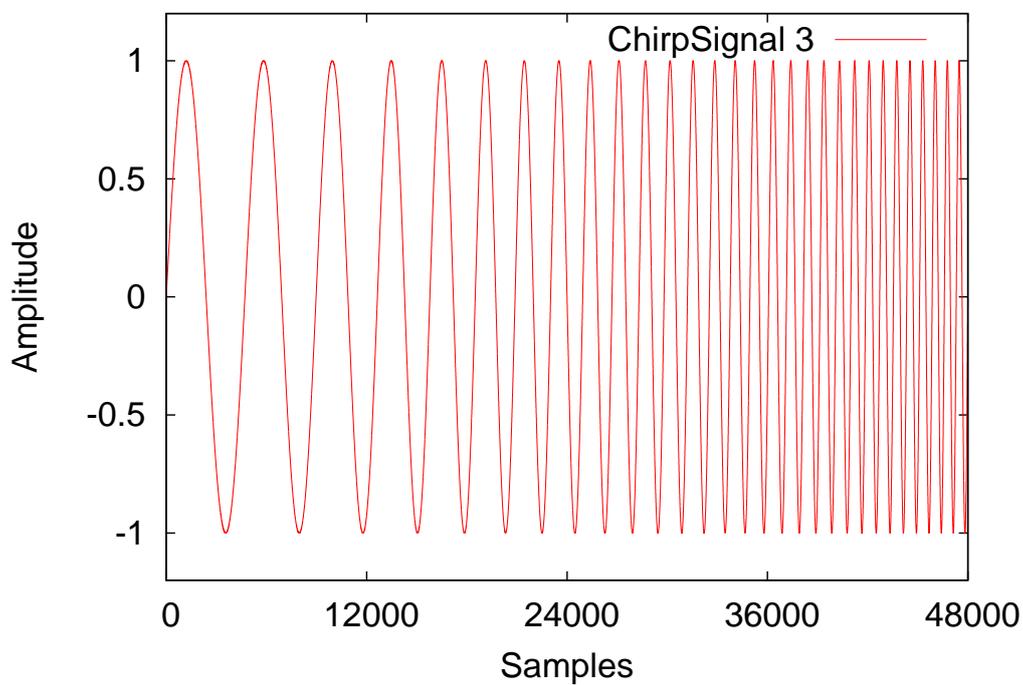


図 3.7 チャープ信号 3

### 3.1 チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定

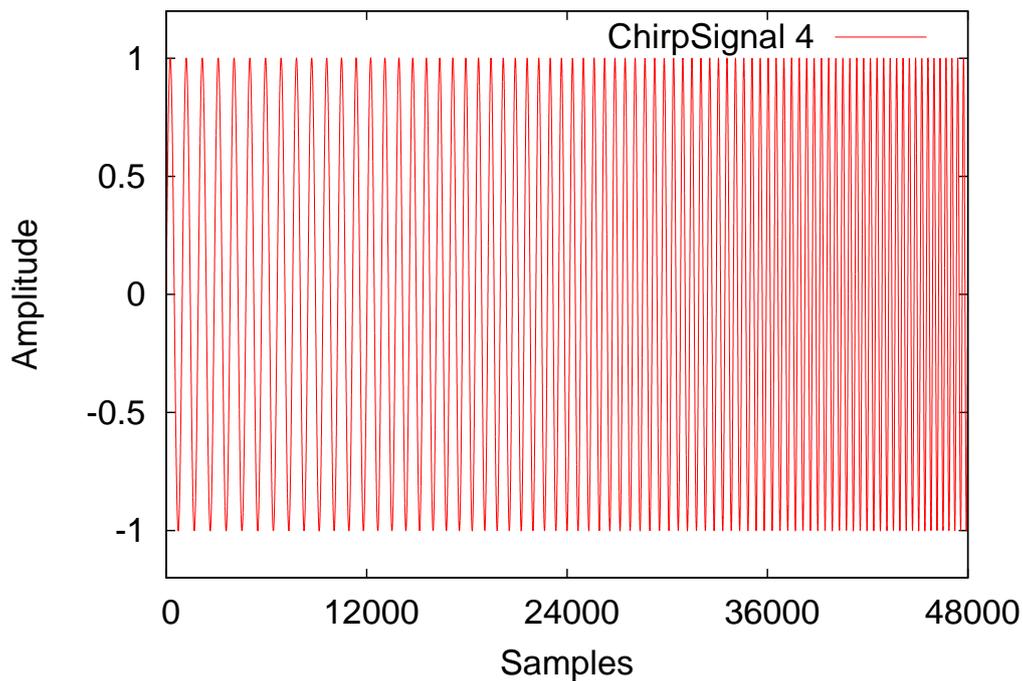


図 3.8 チャープ信号 4

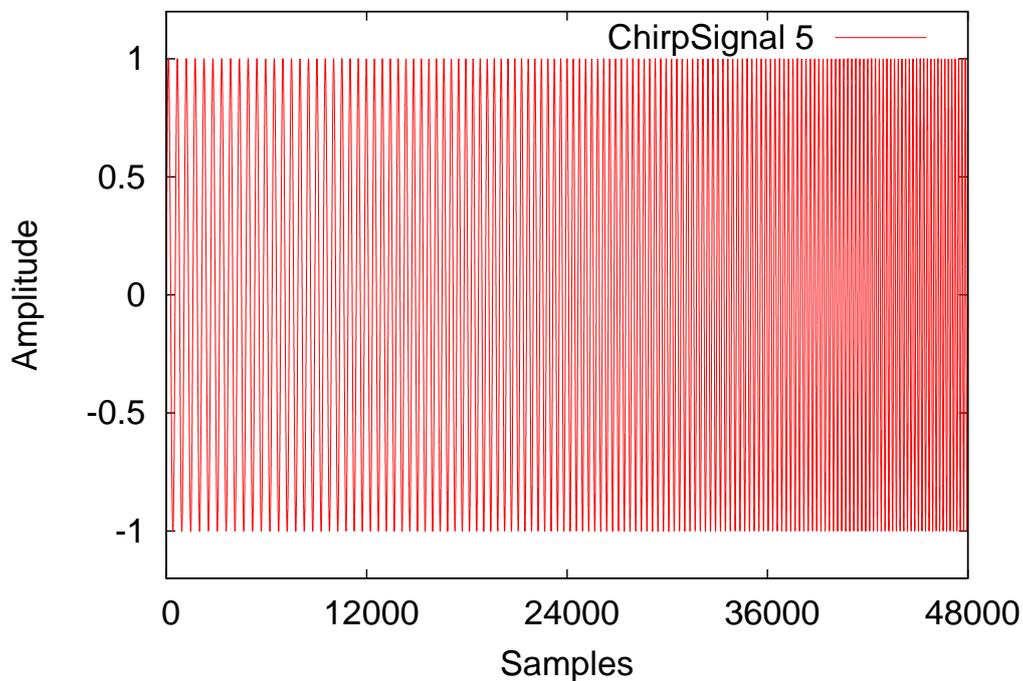


図 3.9 チャープ信号 5

### 3.1 チャープ信号の到達時間差を用いた位置推定

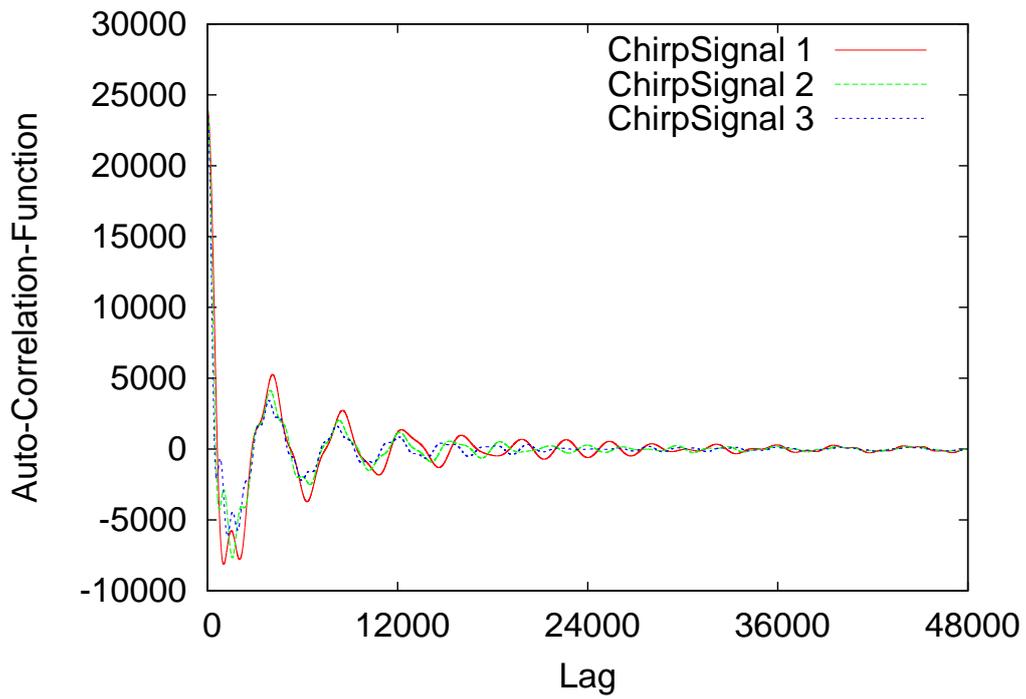


図 3.10 チャープ信号の自己相関関数

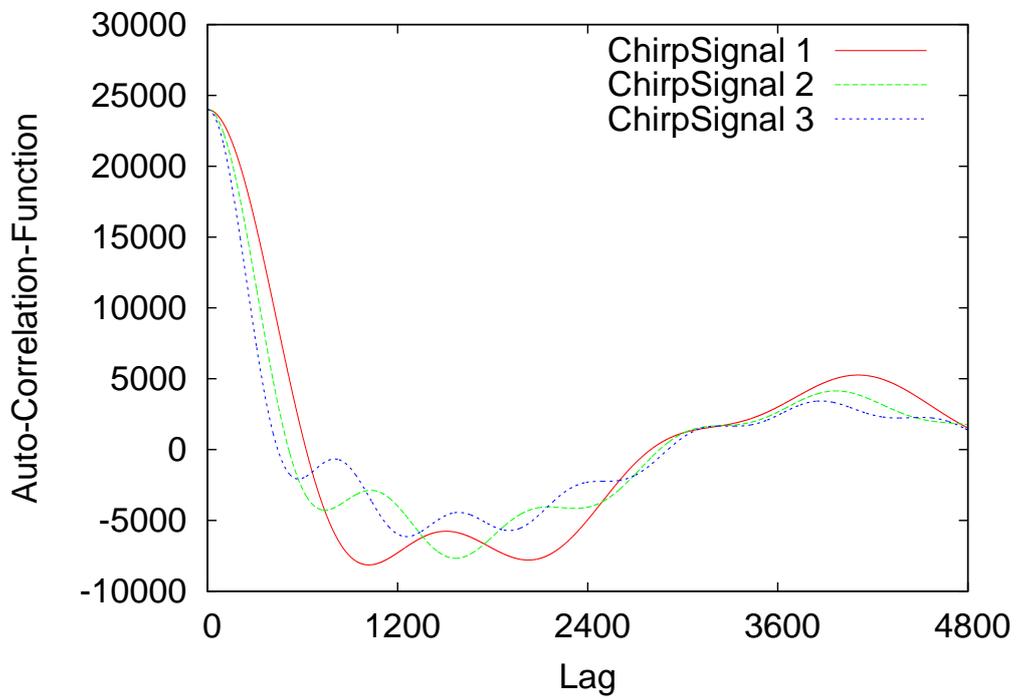


図 3.11 チャープ信号の自己相関関数 (前半)

### 3.2 解決できる問題

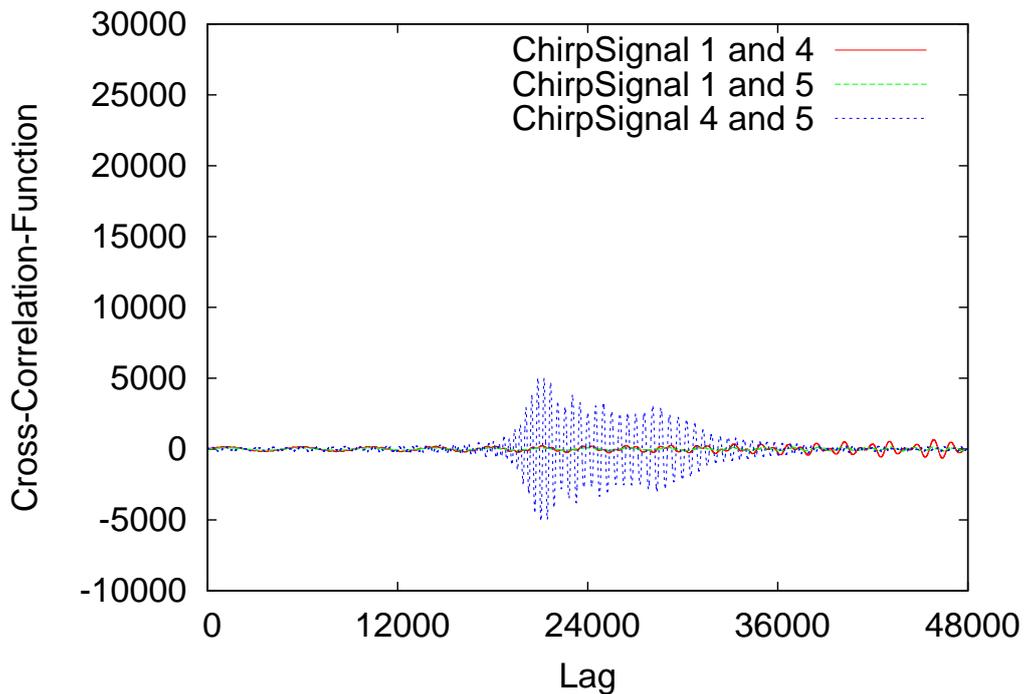


図 3.12 チャープ信号の相互相関関数

### 3.2 解決できる問題

提案方式では、屋内の設備において、送信機として利用することのできる設備の中でも、既に設置されていると考えられる音響設備での利用を想定して、スピーカーを用いて位置推定を行う。また、音響設備を送信機として利用する場合、受信機として携帯端末のマイクロホンを利用することができる。これらの送信機や受信機は特別に用意することなく、利用できると考えられる。また、送信信号としてチャープ信号を用いる。チャープ信号の初期周波数、終了周波数は自由に選ぶことができるため、人間の聴覚特性を考慮して非可聴音域の周波数帯域を選ぶことで、人間には知覚できない信号で位置推定を行うことができると考えられる。よって、提案方式では屋内位置推定において、特別な機器を使用しないため設置コストがかからず、利用者に特別な機器を持たせる必要がなく、人間には知覚できない音を用いることができるため、容易に導入できる屋内位置推定と考えられる。

## 第 4 章

# 受聴位置推定実験

提案方式による位置推定の受聴位置推定実験について説明する。また、受聴位置推定実験の実験結果を示し、実験結果をまとめ、その結果について評価する。

### 4.1 実験方法

提案方式による受聴位置推定実験の方法について説明する。受聴位置推定実験は、 $6.6 \times 6.0\text{m}^2$ 、 $2.7 \times 2.7\text{m}^2$ 、 $1.5 \times 1.5\text{m}^2$  の広さの場所で行った。それぞれ図 4.1, 図 4.2, 図 4.3, 図 4.4 のようにパソコンとオーディオインタフェース, スピーカー, マイクロホンを接続した。スピーカーの振動板の中心を点音源の座標とし、周波数変化の異なる 1 秒のチャープ信号をそれぞれのスピーカーから同時に出力した。マイクロホンに入力された音声から、マイクロホンの位置を推定する。このとき、スピーカーの出力とマイクロホンの入力の同期は取れていない。それぞれの図 4.1 から図 4.4 の  $Mc$  はマイクロホンの位置を表し、 $Mc$  の後ろの数字は実験の番号を表している。 $Sp_i (i = 1, 2, 3)$  はスピーカーの位置を表している。また、スピーカー 1 からスピーカー 2 を結ぶ直線を  $x$  軸とし、スピーカー 1 からスピーカー 3 を結ぶ直線を  $y$  軸としたとき、座標は  $(x, y)$  で表している。今回の受聴位置推定実験では録音のサンプリング周波数を  $48\text{kHz}$ 、音速を  $340\text{m/s}$  とする。また、受聴位置推定実験には表 4.1 の機材、図 4.5 となるような 1 秒のチャープ信号を用いた。

## 4.1 実験方法

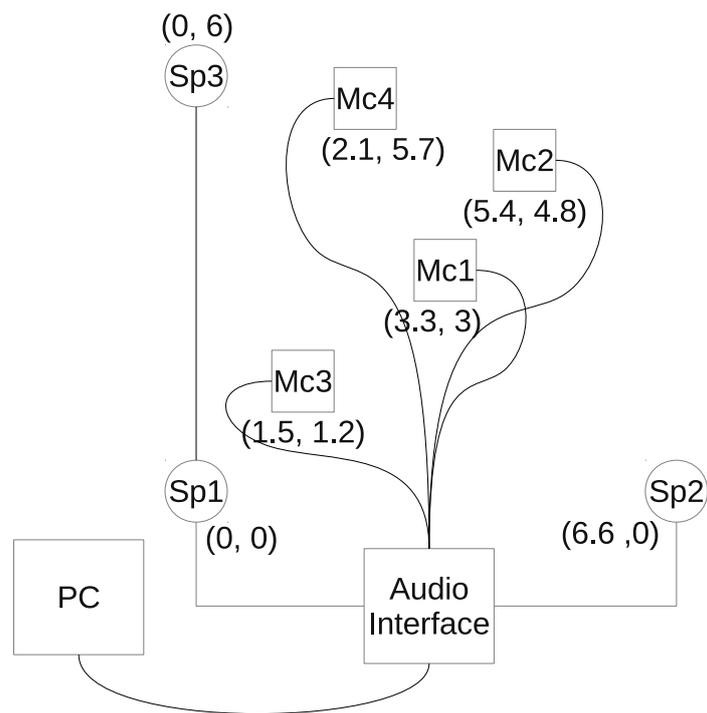


図 4.1 スピーカーとマイクロホンの配置 ( $6.6 \times 6.0\text{m}^2$ )

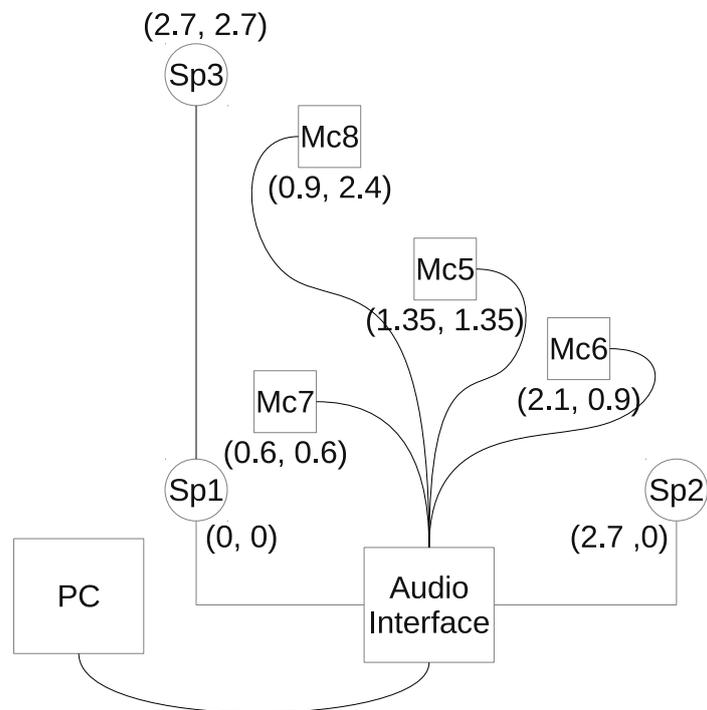


図 4.2 スピーカーとマイクロホンの配置 ( $2.7 \times 2.7\text{m}^2$ )

#### 4.1 実験方法

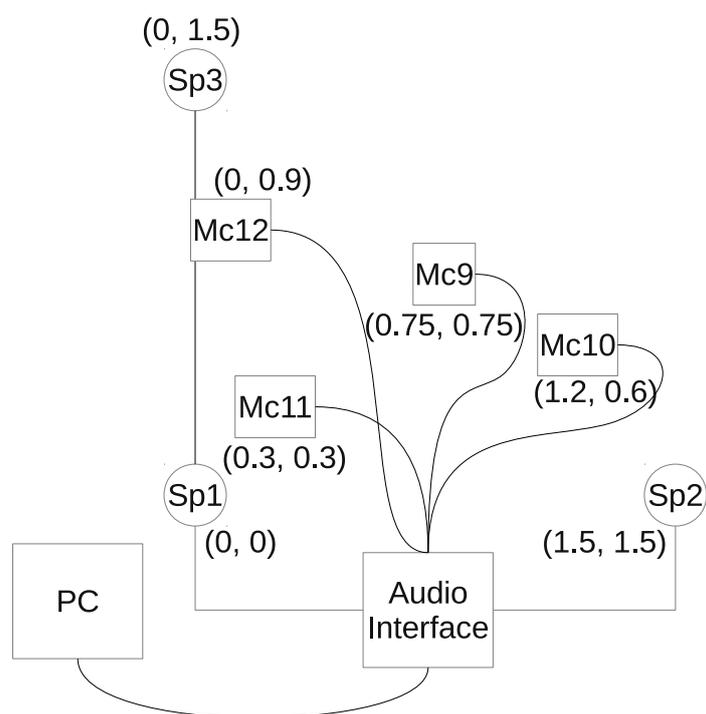


図 4.3 スピーカーとマイクロホンの配置 ( $1.5 \times 1.5\text{m}^2$ )

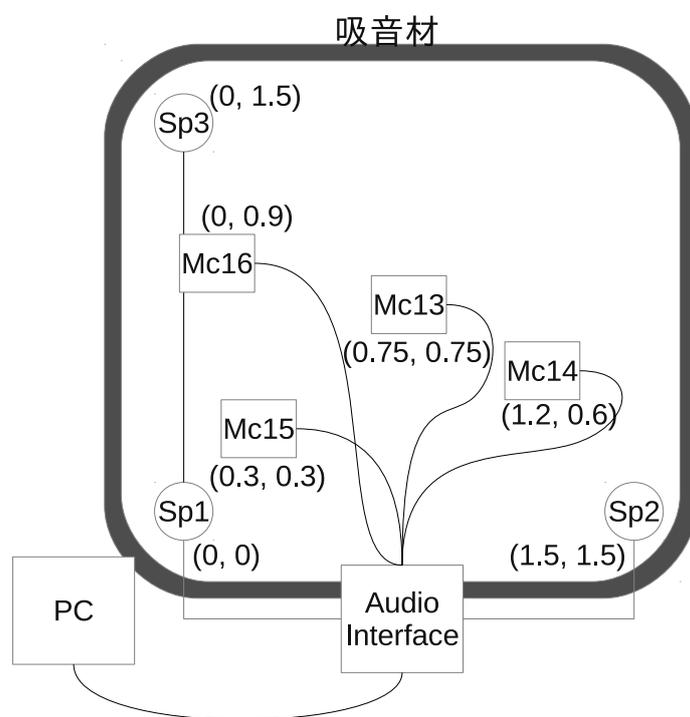


図 4.4 スピーカーとマイクロホンの配置 ( $1.5 \times 1.5\text{m}^2$ , 吸音材)

## 4.2 位置推定結果

表 4.1 受聴位置推定実験に用いた機材

PC	ThinkPad X60
マイクロホン	SHURE SM94
オーディオインタフェース	Roland UA-101
スピーカー	Roland MA-7A

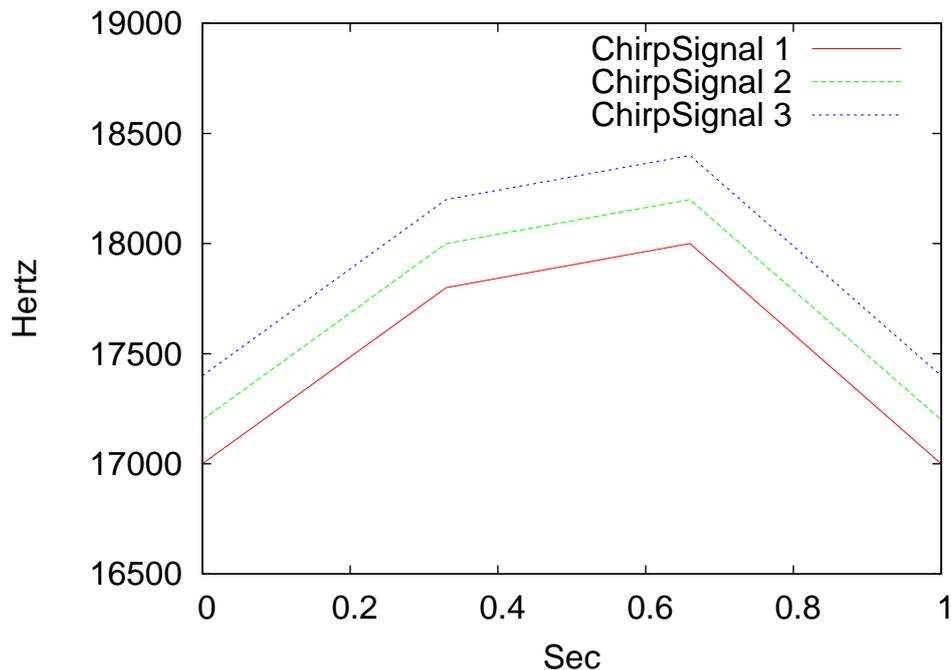


図 4.5 受聴位置推定実験に用いたチャープ信号の周波数変化

## 4.2 位置推定結果

実際の受聴位置推定実験を行った結果を示す。受聴位置推定実験はそれぞれの場所で4回ずつ行った。実際のマイクロホンの位置と推定した位置は表 4.2 となった。また、 $6.6 \times 6.0\text{m}^2$  の場所での実験の結果は図 4.6 から図 4.9、 $2.7 \times 2.7\text{m}^2$  の場所での実験の結果は図 4.10 から図 4.13、 $1.5 \times 1.5\text{m}^2$  の場所での実験の結果は図 4.14 から図 4.17、 $1.5 \times 1.5\text{m}^2$  の場所で吸音材を用いた実験の結果は図 4.18 から図 4.21 に示す。それぞれの図 4.6 から図 4.21 は、横軸を  $x$ 、縦軸を  $y$  とした図である。speaker1,2 はスピーカー 1 とスピーカー 2 の到達時間

## 4.2 位置推定結果

表 4.2 マイクロホンの位置と推定位置

	マイクロホンの位置		推定位置	
	x 軸	y 軸	x 軸	y 軸
Mc1	3.300m	3.000m	3.300m	3.000m
Mc2	5.400m	4.800m	5.235m	4.756m
Mc3	1.500m	1.200m	1.446m	1.299m
Mc4	2.100m	5.700m	2.208m	5.997m
Mc5	1.350m	1.350m	1.320m	1.310m
Mc6	2.100m	0.900m	2.044m	1.037m
Mc7	0.600m	0.600m	0.504m	0.539m
Mc8	0.900m	2.400m	1.019m	2.698m
Mc9	0.750m	0.750m	0.776m	0.832m
Mc10	1.200m	0.600m	位置推定不可能	
Mc11	0.300m	0.300m	0.370m	0.391m
Mc12	0.000m	0.900m	0.343m	1.171m
Mc13	0.750m	0.750m	0.776m	0.832m
Mc14	1.200m	0.600m	1.316m	0.621m
Mc15	0.300m	0.300m	0.344m	0.389m
Mc16	0.000m	0.900m	0.072m	0.741m

差により推定したマイクロホンの位置であり, speaker1,3 はスピーカー 1 とスピーカー 3 の到達時間差により推定したマイクロホンの位置である。また, microphone は実際にマイクロホンを置いた位置である。

## 4.3 評価

表 4.3 マイクロホンの位置と推定位置の誤差

	$6.6 \times 6.0\text{m}^2$	$2.7 \times 2.7\text{m}^2$	$1.5 \times 1.5\text{m}^2$	$1.5 \times 1.5\text{m}^2$ (吸音材あり)
平均誤差	0.148m	0.274m	0.212m	0.117m
最大誤差	0.306m	0.606m	0.437m	0.175m

## 4.3 評価

それぞれの場所での実験の結果から、3つのスピーカーから同時に出力されたチャープ信号の到達時間差を用いることで、単一のマイクロホンで平面上の位置を推定することが可能であることを確認した。また、実際のマイクロホンの位置と推定した位置の誤差はそれぞれ表 4.3 のようになっている。 $6.6 \times 6.0\text{m}^2$  の場所での平均誤差 0.148m と比べて、 $2.7 \times 2.7\text{m}^2$  の場所と  $1.5 \times 1.5\text{m}^2$  の場所での平均誤差はそれぞれ 0.274m, 0.212m となっており、誤差が大きくなっている。さらに、 $1.5 \times 1.5\text{m}^2$  の場所で行った実験 Mc10 では、スピーカー 1 とスピーカー 3 から出力された音の到達時間差から計算した距離差が実際のスピーカー間の距離より大きくなった。そのため、曲線を描くことができず位置推定が不可能となった。今回実験を行った場所では、測定範囲が狭くなるほど壁までの距離が近くなっていた。また、 $2.7 \times 2.7\text{m}^2$ ,  $1.5 \times 1.5\text{m}^2$  の場所の壁や床の材質は音をよく反射する材質であった。そのため、壁や床などによって反射した音がマイクロホンに到達し、到達時間が正確に推定することができなかったと考えることができる。そこで、反射音の影響を軽減させるために  $1.5 \times 1.5\text{m}^2$  と同じ場所で吸音材を用いて実験を行った。その結果は平均誤差が 0.117m となった。吸音材を用いなかった場合の結果と比べると、平均誤差は 0.095m 小さくなっている。これらの結果から、反射音の影響を取り除くことができれば誤差を小さくすることができ、安定した位置推定が行えることがわかる。そのため、反射音の影響に左右されないシステムを構成する必要がある。

### 4.3 評価

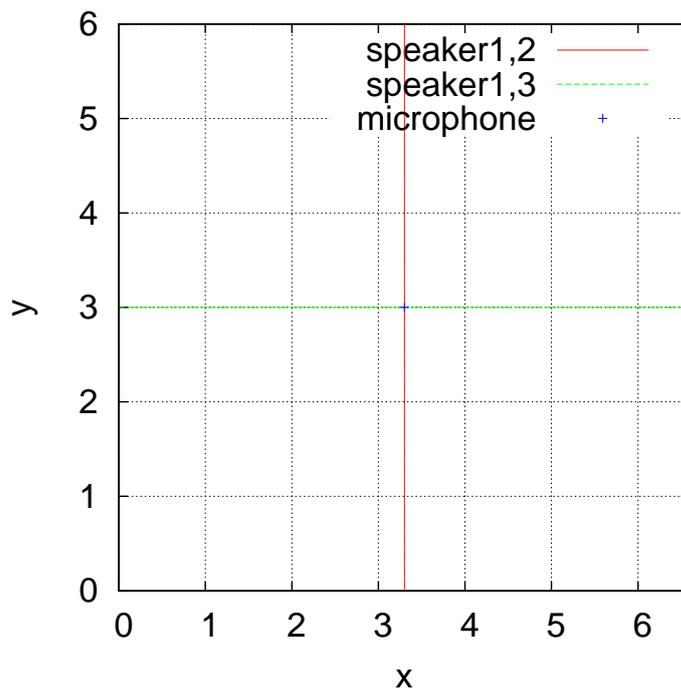


図 4.6 受聴位置推定実験 Mc1

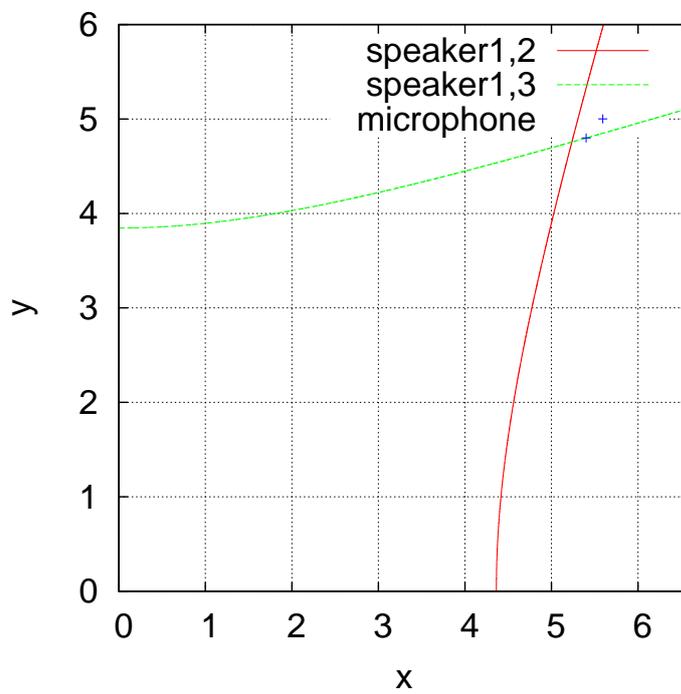


図 4.7 受聴位置推定実験 Mc2

### 4.3 評価

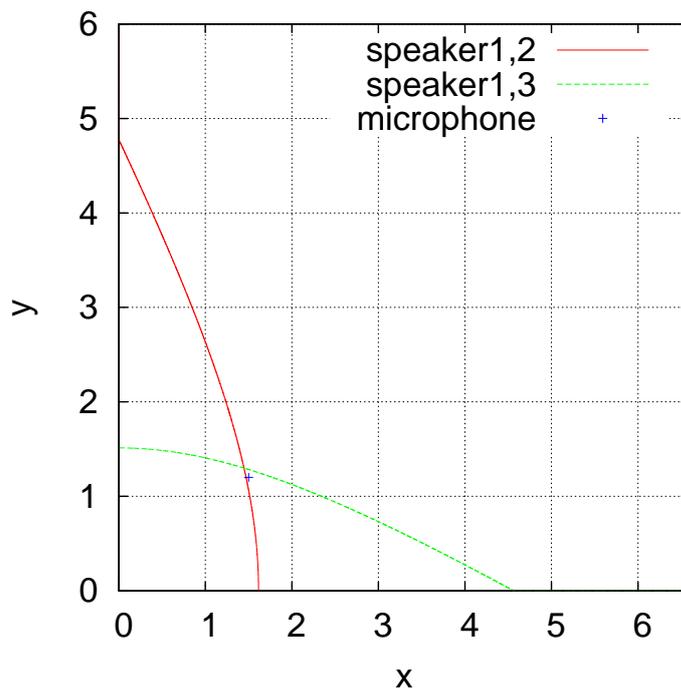


図 4.8 受聴位置推定実験 Mc3

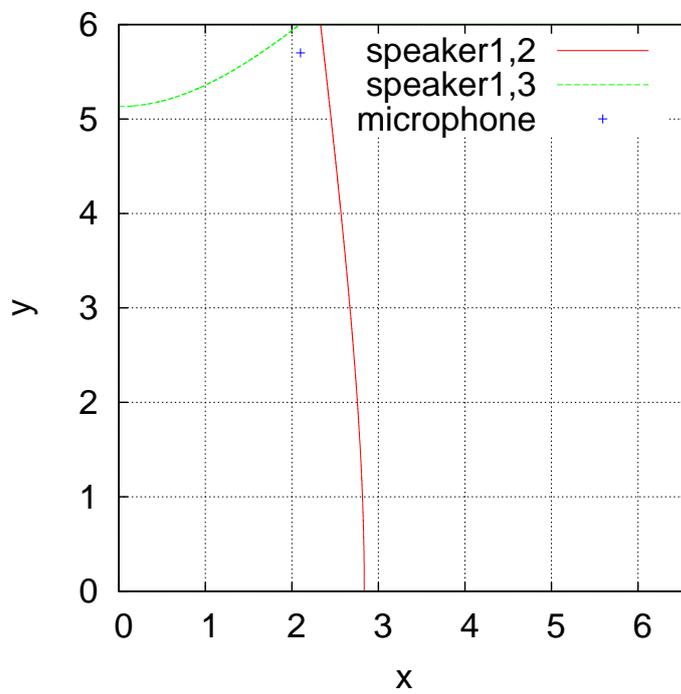


図 4.9 受聴位置推定実験 Mc4

### 4.3 評価

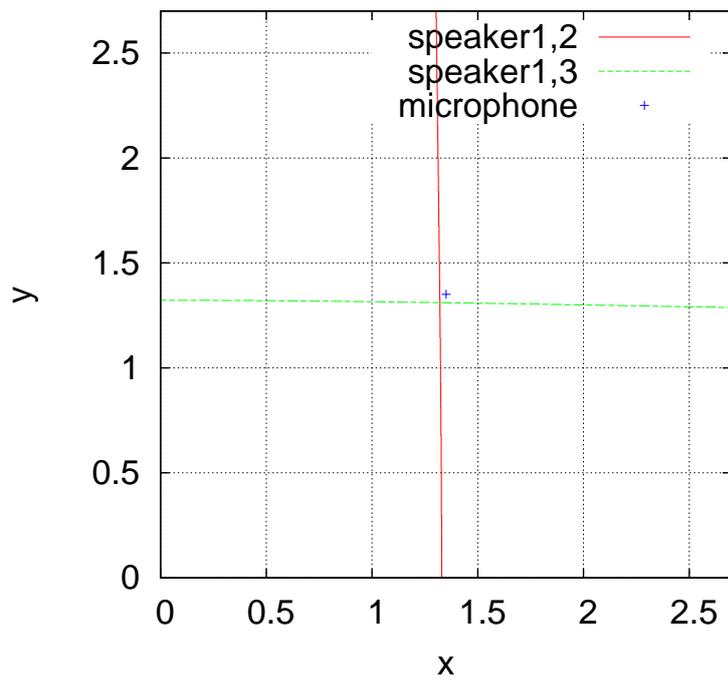


図 4.10 受聴位置推定実験 Mc5

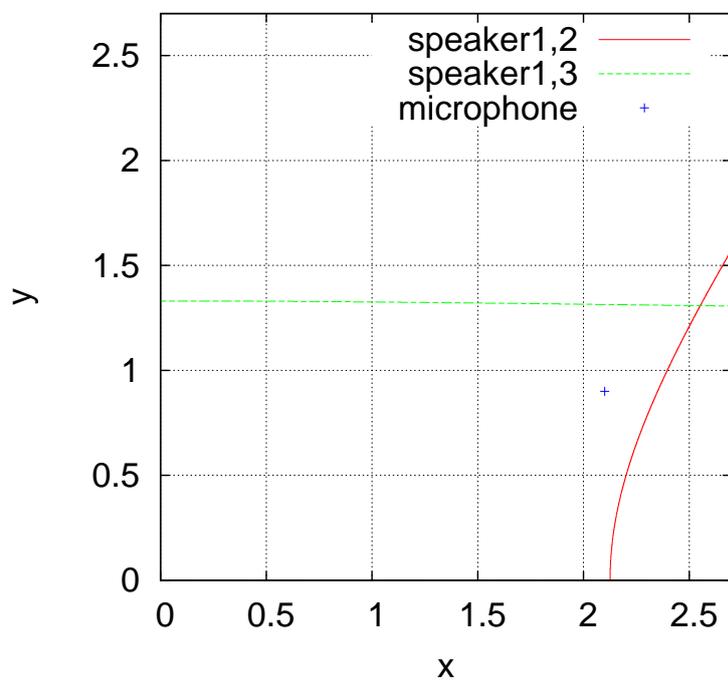


図 4.11 受聴位置推定実験 Mc6

### 4.3 評価

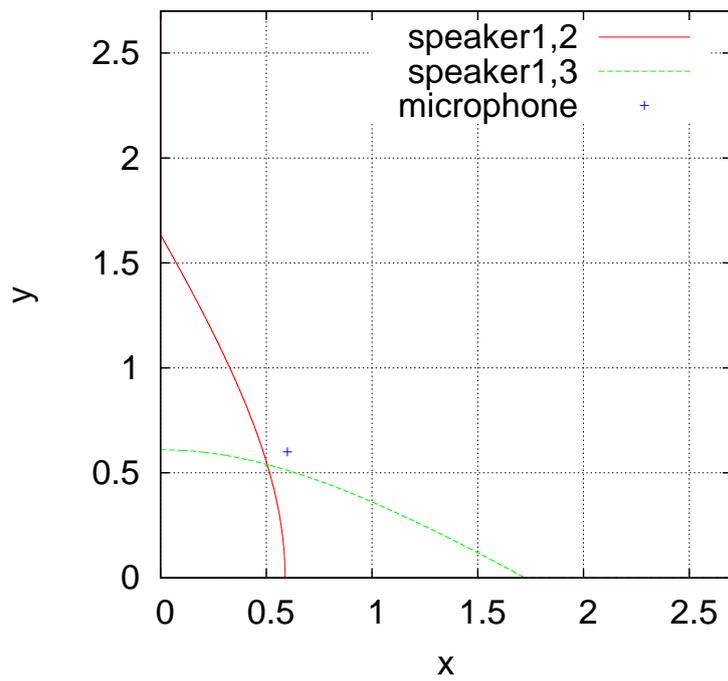


図 4.12 受聴位置推定実験 Mc7

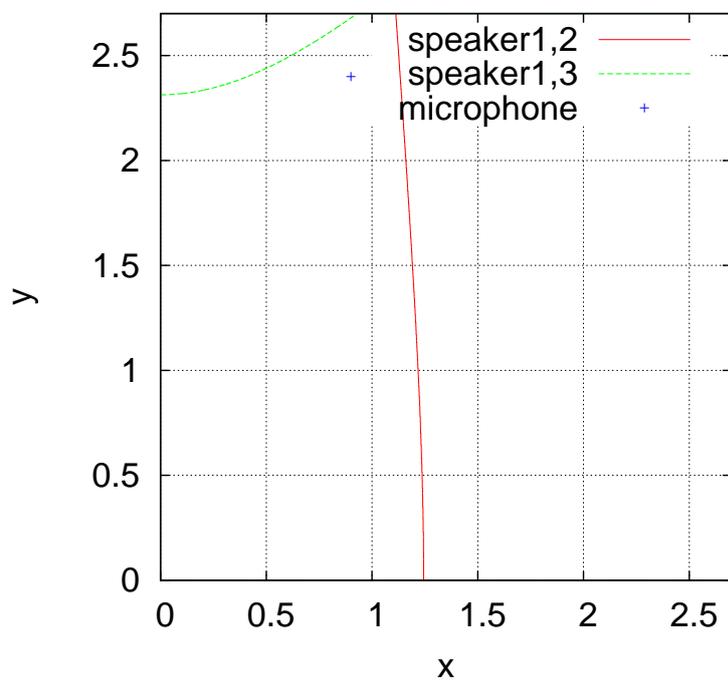


図 4.13 受聴位置推定実験 Mc8

### 4.3 評価

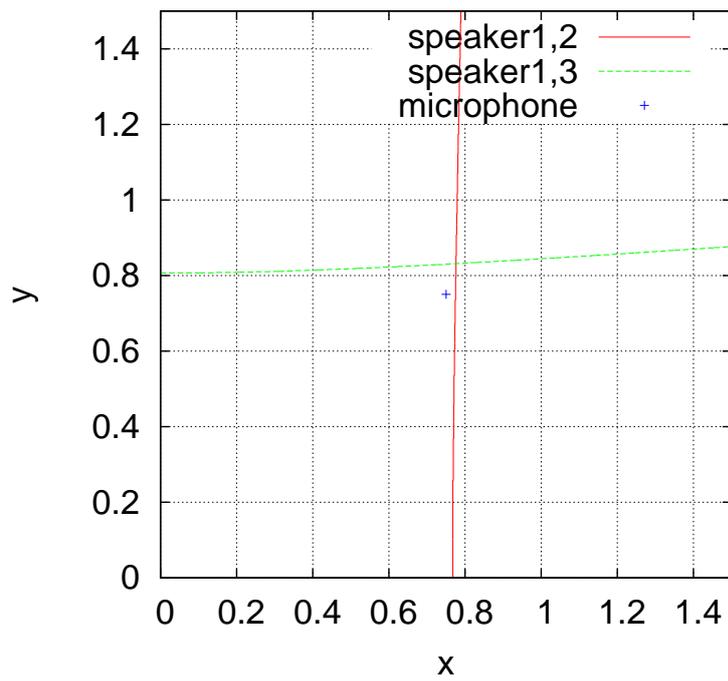


図 4.14 受聴位置推定実験 Mc9

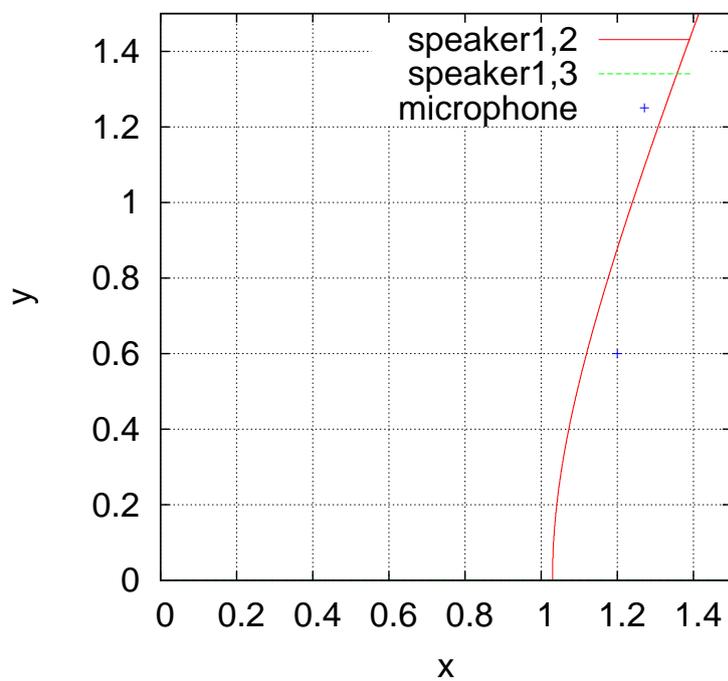


図 4.15 受聴位置推定実験 Mc10

### 4.3 評価

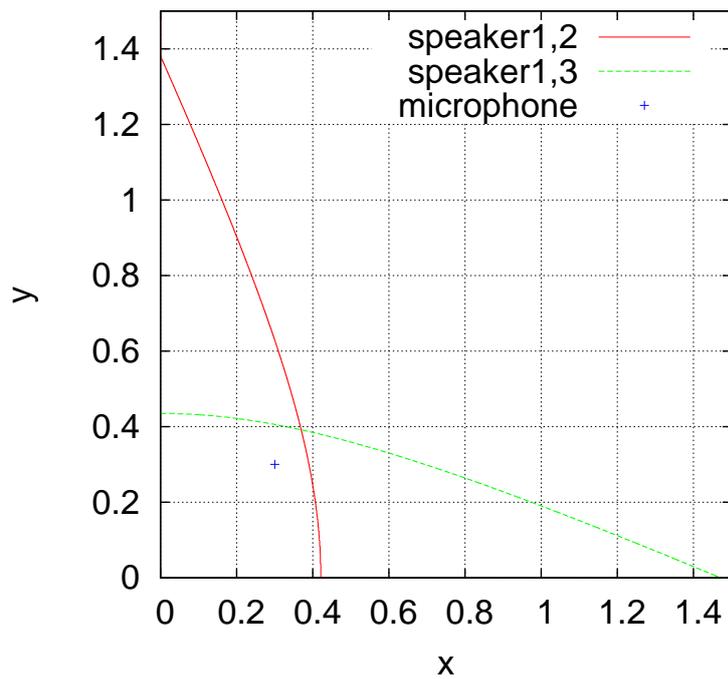


図 4.16 受聴位置推定実験 Mc11

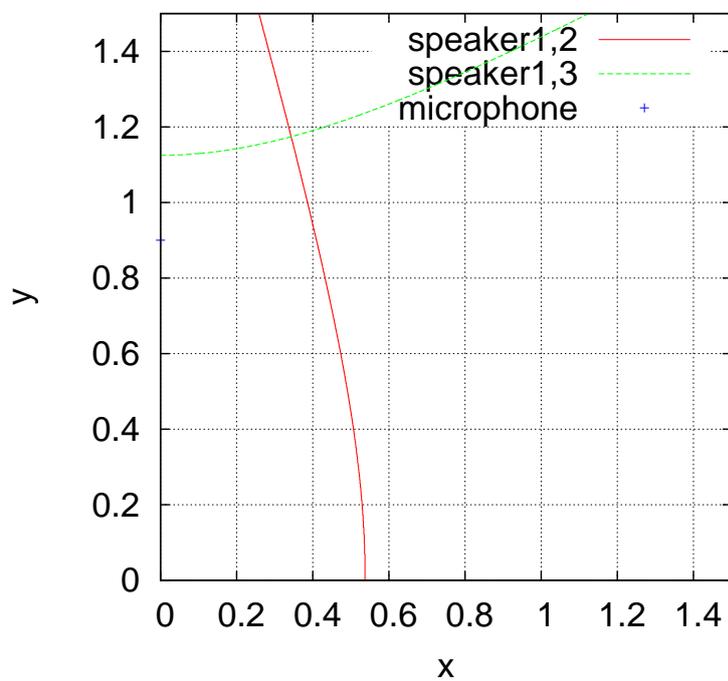


図 4.17 受聴位置推定実験 Mc12

### 4.3 評価

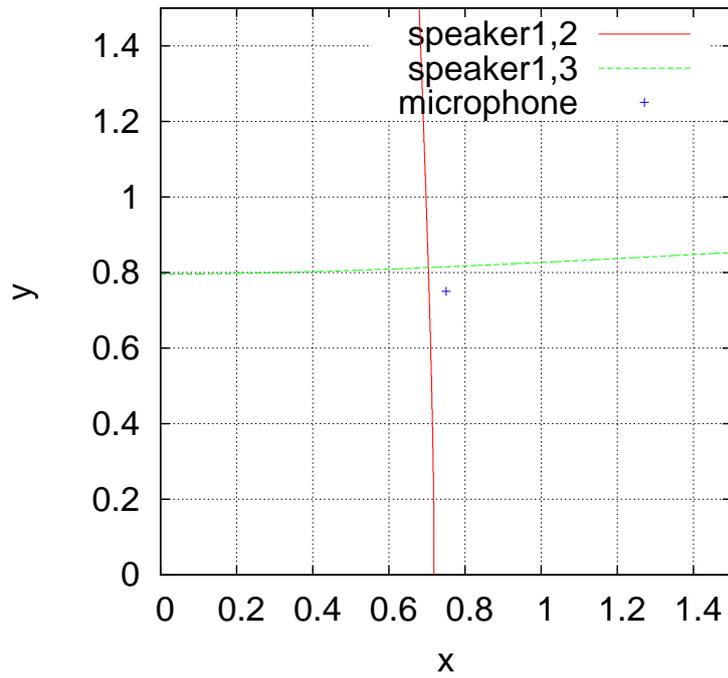


図 4.18 受聴位置推定実験 Mc13

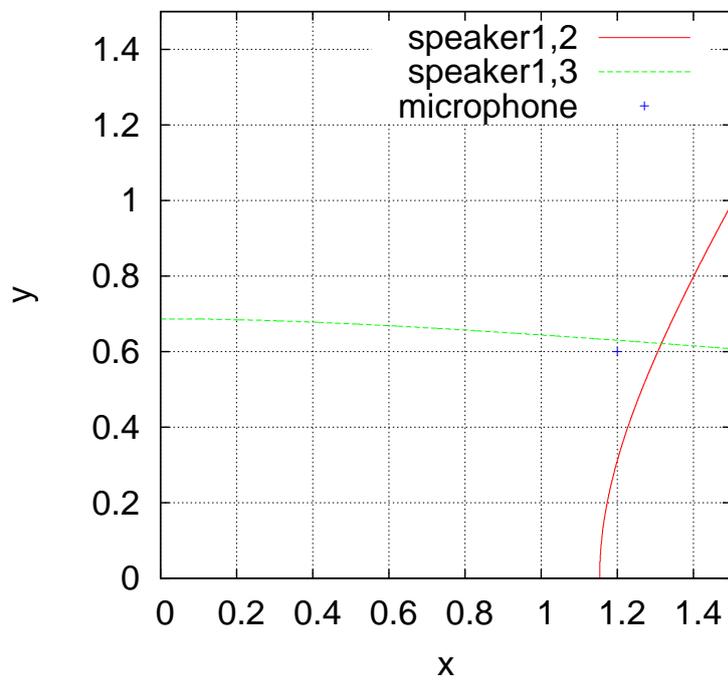


図 4.19 受聴位置推定実験 Mc14

### 4.3 評価

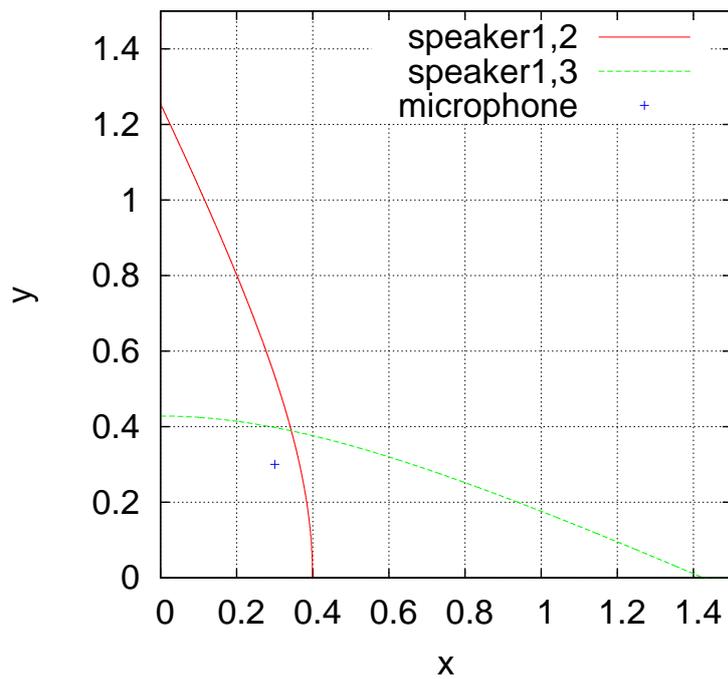


図 4.20 受聴位置推定実験 Mc15

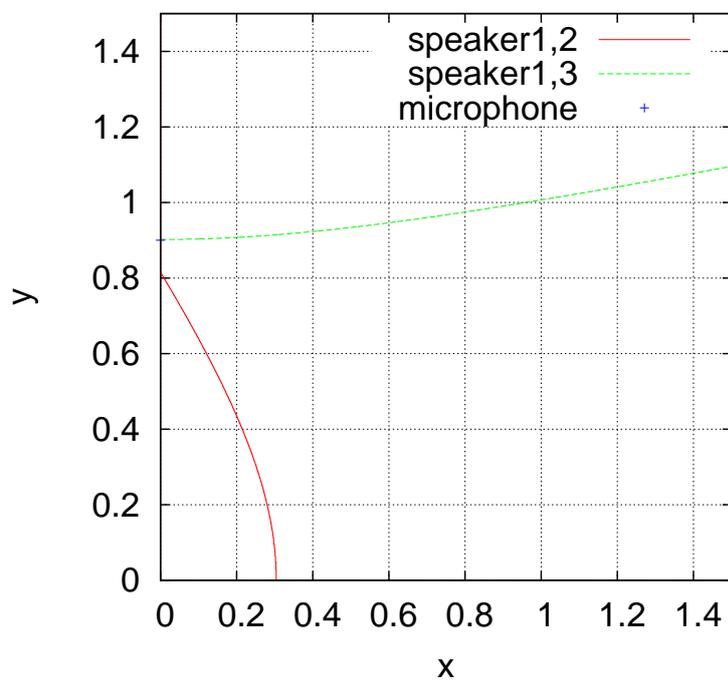


図 4.21 受聴位置推定実験 Mc16

## 4.4 適応フィルタを用いた位置推定

### 4.4 適応フィルタを用いた位置推定

提案方式では、反射音の影響により位置推定時の誤差が大きくなった。そこで、適応フィルタを用いて反射音の影響に左右されないシステムを構成する必要がある。

#### 4.4.1 システム同定

スピーカから出力された送信信号が未知の伝送路を通過した後、マイクロホンに受信されたとする。受信信号  $x_t$  は、

$$x_t = - \sum_{n=1}^{p-1} h_n x_{t-n} + d_t \epsilon_t$$

とする。ここで、 $h_n$  は伝送路の特性を決めるインパルス応答、 $\epsilon_t$  は分散  $\sigma_\epsilon^2$  の観測雑音で  $x_{t-n}$  ( $n = 1, 2, \dots, p-1$ ) と無相関とする。受信信号  $x_t$  と送信信号  $d_t$  からインパルス応答  $h_n$  を推定することを、システム同定という。フィルタ係数を  $w_n$ 、出力を  $y_t$  とする  $p$  次のフィルタ

$$y_t = \sum_{n=0}^{p-1} w_n x_{t-n}$$

を構成する。このとき、フィルタ出力  $y_t$  とシステム出力  $d_t$  との誤差は、

$$e_t = d_t - y_t = -\epsilon_t + \sum_{n=0}^{p-1} (h_n - w_n) x_{t-n}$$

と表される。したがって、

$$E[e_t^2] = \sigma_\epsilon^2 + \sum_{n=0}^{p-1} \sum_{m=0}^{p-1} (h_n - w_n)(h_m - w_m) E[x_{t-n} x_{t-m}]$$

となる。右辺第2項は非負で、 $w_n = h_n$  ( $n = 0, 1, \dots, p-1$ ) のとき0となる。したがって、 $E[e_t^2]$  が最小となるフィルタ係数  $w_n$  を決めると、そのときのフィルタ係数の値からインパルス応答が推定できる。さらに、 $h_n$  が時間変化する場合は、適応フィルタを用いることでその変化に追従させることができる。また、直接音は反射音よりも音のエネルギーは大きいと考えられるため、推定したインパルス応答の係数列からピーク値を探すことで直接音の到達時

#### 4.4 適応フィルタを用いた位置推定

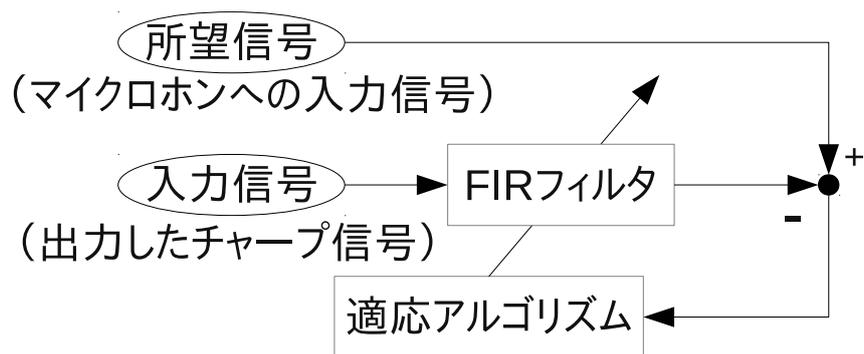


図 4.22 システム同定

間を推定することができる。しかし、適応フィルタを用いてインパルス応答を推定するためにはスピーカーとマイクロホンの同期が必要となるため提案方式にそのまま使うことはできない。そこで、スマートホンの内部時計を用いて、マイクロホンとスピーカーの同期を行う。事前に GPS を用いて時刻同期を行っておき、どの時刻に音を出力するかを決定しておくことで、マイクロホンとスピーカーの同期が取れるため、適応フィルタを用いることができる。これらの方法により、適応フィルタを用いることで反射音の影響に左右されないシステムを構成することができると考えられる。

# 第5章

## 結論

### 5.1 本論文のまとめ

本研究では、屋内や地下街において専用デバイスを必要としない位置推定法として、複数スピーカーとマイクロホンを用いた位置推定方式を提案した。提案した方式では、それぞれのスピーカーから出力されたチャープ信号がマイクロホンに到達する時間差を用いて位置推定を行った。今回の位置推定実験では、3つのスピーカーと単一のマイクロホンを用いて、平面上でのマイクロホンの位置を推定することが可能であることを確認した。また壁や床が音を反響しやすい場所では、反射音の影響により到達時間が正確に推定できなくなっていることも確認した。そのため、このような場所では位置推定の誤差が大きくなる、また場合によっては位置推定が不可能となることも確認した。これらの問題に対して、適応フィルタを用いることで反射音の影響に左右されない位置推定法について考察した。

### 5.2 今後の課題

今回の実験では、3つのスピーカーとマイクロホンを用いた平面上での位置推定を行った。しかし、スピーカーの個数を増やすことで3次元上の位置推定が可能であると考えられる。そこで、3次元上の位置推定が可能であるかを確かめる必要がある。また、今回の実験では床や壁による反射音の影響を考慮していなかったため、到達時間をより正確に推定することができなかった。そこで、録音した信号に適応フィルタを用いることで反射音の影響に左右されず到達時間を推定することができれば、反響しやすい場所においても位置推定の誤差を小

## 5.2 今後の課題

さくすることができ、安定した位置推定を行うことができるようになると考えられる。そこで、適応フィルタを用いるために、スピーカーとマイクロホンの同期が必要となる。スピーカーとマイクロホンの同期には、事前に GPS を用いて時刻同期された内部時計を用いることで、同期が可能である。適応フィルタを用いることで反射音の影響に左右されない位置推定が可能となると考えられる。しかし、今回は適応フィルタを用いた位置推定の実験を行っていない。そのため、反響しやすい場所での実験を行い、反射音の影響に左右されない位置推定が可能であるかを確かめる必要がある。

# 謝辞

本研究を行うにあたって、終始親切にご指導してくださった、情報学群 福本昌弘教授に深く感謝し、厚くお礼申し上げます。研究室に配属されてから2年間、福本昌弘教授には輪講や卒業研究等のご指導を頂き、大変お世話になりました。計画性のない私のために、卒業研究の進捗に気をかけて頂いたにも関わらず、週次報告はほんの数回だけの提出になってしまいました。深く反省しています。

本卒業研究の副査をして頂いた情報学群 島村和典教授、浜村昌則教授にも深く感謝致します。

梗概や卒業論文の添削、発表練習に付き合っていたいただいた福富英次氏にも深く感謝致します。私が口癖のように「お腹がすいた」と言えば、何度も食事に連れて行ってくださり、有難うございます。

同研究室で2年間苦楽を共にした4年生である浅尾将司氏、岡崎健士氏、小田信貴氏、横田優佳氏、若林諒氏にも感謝致します。事ある毎に研究室に泊まり、共に課題に取り組んだ日々のことは忘れることはありません。また、卒業研究の実験を何度も手伝わせてしまいました。深くお詫びします。

また、何一つ先輩らしいこともせず、餅つきなどのイベントをまかせっきりにしてしまい、同研究室の3年生にはご迷惑かけたこと、深くお詫びします。冷凍庫に置いてあった特大鏡餅は広いスペースをとっていたので、誠に勝手ながら捨てさせて頂きました。何の連絡もなく捨ててしまい申し訳ありません。

最後に、私の大学生活を支えてくださった家族をはじめとする、関わりのあったみなさんにご迷惑をおかけしたことをお詫びすると共に、深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] 立石 和也, 井家上 哲史, “RSSI 方式における減衰定数の位置推定時決定手法,” 電子情報通信学会技術研究報告, USN, Vol.107, No.294, 2007.
- [2] 川上 俊, 池田 昇平, 大槻 知明, “繰り返し AOA 推定に基づく複数サブアレーデータを共有した位置推定法,” 電子情報通信学会技術報告, RCS, Vol.109, No.105, 2009.
- [3] 福田 一隆, 岡本 英二, “センサネットワークにおける TOA 位置推定方式の NLOS 判定性能向上に関する検討,” 電子情報通信学会研究報告, USN, Vol.111, No.263, 2011.
- [4] 谷口 健太郎, 河野 隆二, “TDOA 型センサネットワークにおける階層型粒子フィルタを用いた位置推定法,” 電子情報通信学会論文誌, A, Vol.J89-A, No.12, 2006.
- [5] 田邊 将之, 山村 拓也, 大久保 寛, 田川 憲男, “チャープ信号を用いた生体高調波画像化法における非線形成分抽出法の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, US, Vol.110, No.91, 2010.
- [6] 野村 崇志, 梅津 高朗, 山口 弘純, 東野 輝夫, “隣接ノードの移動履歴情報を用いたアドホックネットワーク上の位置推定手法,” 電子情報通信学会技術研究報告, MoMuC, Vol.107, No.517, 2008.
- [7] 眞溪歩, “デジタル信号処理工学,” 昭晃堂, 2004.
- [8] 飯國 洋二, “適応信号処理アルゴリズム,” 培風館, 2000.