

## 高周波可聴音を用いた屋内測位に関する検討

岩崎 改, 五百蔵 重典<sup>†1</sup>

屋内での測位は、屋外での測位より要求される精度が高い。しかし、現状よく用いられる電波を用いた測位方法では、3m から 10m 程度の測位精度である。そこで、我々は、高周波の音波（以下、可聴音）を用いた屋内測位手法を提案する。本提案システムでは、4 個以上のスピーカから異なる周波数の可聴音を発音する。その可聴音を、スマートフォンに内蔵されたマイクで録音して、フーリエ解析する。その後、フーリエ解析の結果から受信時間の差を求めて測距する。本システムの利用者は、特別な機器を用意する必要が無く、スマートフォンを所持していれば、測位システムを利用できる。また、スマートフォンで測距に必要な計算をするため、サーバとの通信が必要なく、電波の使用を制限される場所でも測距できる。加えて、システムは測位結果を知らないため、プライバシーを確保できる。評価実験では、平均誤差 5cm 程度の測距に成功しているため、最終的には、10cm から 20cm 程度の精度での測位が可能だと考えている。

### Study on Indoor Positioning using High-Frequency Audible Sound

KAI IWASAKI, SHIGENORI IOROI<sup>†1</sup>

#### 1. はじめに

屋内測位をすることにより、屋内で誘導するアプリケーションなどに利用することができる。日本に限らず複雑な建築物は世界中にあり、そのような建築物内をスムーズに移動できることは、便利である。

特に、大型のショッピングモールや、複雑な駅の構内は、迷うことが多い。都心の駅は、増改築を繰り返し、複雑さを増している。構内図が設置されている場合もあるが、まず構内図を探すのが手間である。また、構内図がある場所でしか自分の位置を知ることができないため、継続的なナビゲーションができない。こういった複雑な建築物では、構内を案内する職員がおり、複雑な建築物内でのナビゲーションには需要があるということの意味している。

また、インドア Google マップ<sup>1)</sup>のように、屋内の地図を提供するサービスは既に存在しており、これらのアプリケーションに位置を提供する事ができれば、屋内ナビゲーションシステムを実現できる。

屋内では建物の外壁などに GPS の電波が影響を受けるため、GPS による測位では十分な測位精度が出ない。また、屋内では、屋外の道路や広場よりも細かい通路や部屋で分かれている。そのため、屋外で実用的な測位精度があっても、屋内では通用しない場合が多く、屋内での測位には屋外での測位より高精度な測位精度が要求される。

屋内測位の方式で Wi-Fi<sup>2)</sup>や Bluetooth<sup>3)</sup>などのスマートフォンに搭載されたセンサを用いて測位する方法もあるが、測距精度が 10m 程度であるため、我々が求めている精度で

測位できない。また、実用的な屋内測位システムでも、測位するために必要な装置や準備に多くの費用がかかってしまうなど、広く普及しているものはない。

#### 2. 関連研究

##### 2.1 超音波による屋内測位

超音波による屋内測位<sup>4)</sup>は、測位対象が発信する超音波を、天井に取り付けられた複数の超音波受信機が、超音波を受信する時間の差を用いて、逆 GPS 法で測位する。測位誤差が 3cm 程度の高精度な屋内測位ができる。また、電波を使用しないため、電波が使用できない病院や、電波干渉の激しい場所でのナビゲーションが実現できる。

しかし、測位対象が超音波を発音しなければならないため、利用者は、超音波を発信するための特殊な装置を入手する必要がある。そのため、超音波の代わりにスマートフォンから非可聴音を発信する研究<sup>5)</sup>も行われている。

また、複数の測位対象が同時に超音波を発信すると、複数の音が衝突して正常に測位することができない。そのため、複数の測位対象を測位するためには、超音波の発信時間を超音波発信機に通知する仕組みが必要である。この研究では、クライアントは、赤外線通信で ID を受信した時のみ超音波を発信することで、複数のクライアントを識別している。

さらに、測位対象の位置をシステムが計算して特定するため、利用者は、インターネットや無線通信を使用して測位結果をサーバから取得する必要がある。また、システムが測位結果を知ることができるため、プライバシーを必要とするアプリケーションでの利用には適さない面がある。

<sup>†1</sup> 神奈川工科大学 情報学部 情報工学科  
Kanagawa Institute of Technology

### 3. 解決策

我々は、屋内測位に必要な測位精度として、屋内ナビゲーションのためには 1m 以下、物の場所を示すためには垂直方向も含め 10cm 以下が必要であると考えている。そして、システムの設置コスト及びクライアント機器の購入コストも抑えたいと考えている。

我々が提案する測位方法では、屋内に設置された 4 個以上のスピーカから異なる周波数の音を発音する。この音を、Android 端末に内蔵されたマイクで録音する。そして、Android 端末内で、4 音に分解する。これから得られた 4 音の受信時間の差を用いて測位する（概要図を図 1）。測位に用いる計算方法は、GPS の方式と同じである。

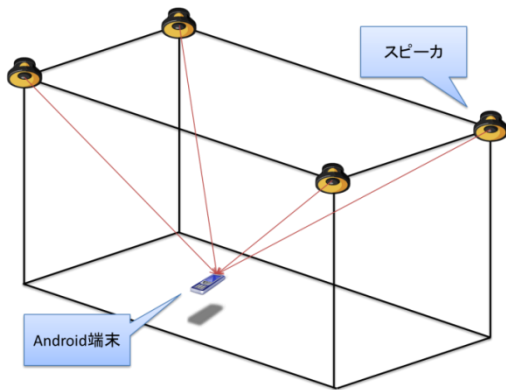


図 1：測位方法の概要

Android 端末は、広く普及しており、多くの人が持っているため、誰でも特別なものを用意せずに使用することができる。また、発音装置は、容易に作成することができ、本実験に使用した装置は 5,000 円程度で製作可能である。

フーリエ解析などの測距に必要な計算は、全て Android 端末で行うため、インターネット環境や無線通信が必要ない。また、システムは、測位対象の位置を知らないまま測位対象を測位することができるため、プライベートな空間でも測位することができる。さらに、スピーカから発音された音を測位対象がそれぞれ受信するため、複数人を同時に測位することが可能である。加えて、音波を用いて測位するため、病院などの電波を制限される場所でも使用可能である。

#### 3.1 発音側の仕組み

使用しているマイコンは、制御機と発音機の両方に Microchip の PIC16F628A を使用している。発音機構は、動作の内容から「制御器」と「発音機」に分けられる。制御機と発音機のブロック図を図 2 に示す。

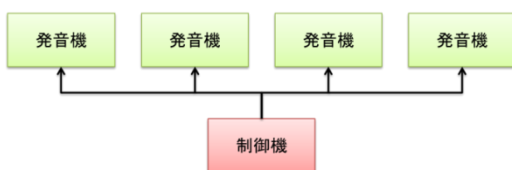


図 2：発音機構

本実験では、一定周期で特定の周波数の「発音」「消音」を繰り返さなければならない。マイコンは、リアルタイム性に優れており、複数のスピーカから同時に発音する機能を容易に実現でき、制御機に接続できる発音機の数に制限はないため、スピーカを 4 個以上接続したい場合にも対応できる。また、可聴音を用いた測位をする際に、専用のパソコンを用意する必要がない。

#### 3.1.1 制御機

制御器は、発音機に対して、発音を開始する時間を通知するために存在する。本測位方法では、スピーカから発音された異なる周波数の音の受信時間の差を利用して測位を行う。そのため、スピーカから発音される時間に差があると、測位結果に影響を及ぼしてしまう。従って、全ての発音機から、同時に音を出すことが重要である。そのため、発音機が同時に発音を開始する仕組みが必要である。制御器は、一定周期で発音機に対して外部割込み信号を送信する。これにより、発音時間の差を最小限に抑えることができる。また、差は蓄積しない。

発音時間の誤差は、各装置間で最大 1us 程度であることをオシロスコープによって確認した。音速に変換すると、0.34mm となり、本提案システムの測距には影響がない誤差と言える。

#### 3.1.2 発音機

発音機は、それぞれ発音する周波数が割り当てられており、割り込みが発生すると、割り当てられた周波数を一定時間発音した後、消音する。発音機は、スピーカを搭載していないので、コネクタにスピーカを接続して使用する。なお、4 節の実験では、発音と消音を 256ms の周期で繰り返す。発音機を図 3 に示す。

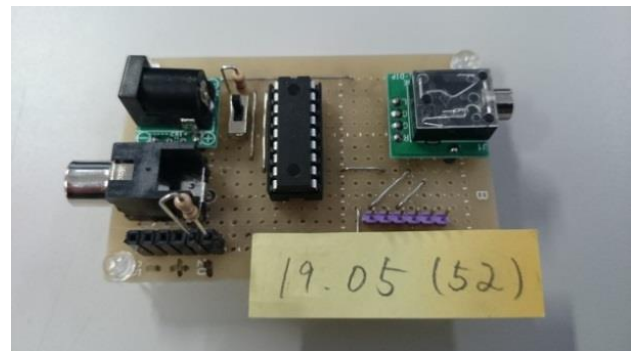


図 3：発音機

#### 3.2 受信側の仕組み

#### 3.3 発音周波数の決定

本実験では可聴音を用いて測距を行う。人間が不快に思う音は極力使用したくないため、本実験では、人間が聞き取りにくい可聴音を使用する。一般的には、20kHz 以上が非可聴音とされているが、16kHz 以上は聞き取りにくい。

そして、Android に内蔵されたマイクで録音することができる、という条件を満たしている必要がある。そのため、Android 端末に内蔵されたマイクで録音できる最高周波数

を調べる。実験は、指定した特定の周波数を発音する専用の装置を組み立て、その装置から発音した音を Android 端末に内蔵されたマイクで録音し、振幅を観察する。

標本化周波数 44.1kHz、分解能 16bit で録音する。表中で示されているバージョンは使用機種 of Android のバージョンである。結果を表 1 に示す。

表 1：録音可能最高周波数

機種名	モデル	ver.	周波数
GALAXY SII	SC-02C	2.3.3	22kHz
GALAXY SII LTE	SC-03D	2.3.6	21kHz
GALAXY NEXUS	SC-04D	4.2	21kHz
NEXUS 5	LG-D821	4.4.2	21kHz

標本化周波数が 44.1kHz であるため、標本化定理より、標本可能最高周波数は 22.05kHz となる。そのため、標本可能最高周波数以下の周波数であれば、ほとんどの Android 端末で高周波数帯の音を録音できることが判明した。また、機種による録音可能最高周波数には、殆ど差がないことが判明した。

22kHz でも全く録音できなかったわけではなく、実験に用いた全ての機種で録音することはできたが、他の高周波数帯の音に比べて振幅が狭いため、本実験では 22kHz 帯の音を使用しない。

### 3.3.1 フーリエ解析

本測位方式では、各スピーカから発音された異なる周波数の音の受信時間の差を Android 端末上で計算して求める。受信した 4 音をそれぞれ分けるためには、Android 端末上で時分割フーリエ解析を行わなければならない。また、受信時刻を知るために、時分割フーリエ解析は、時間分解能に応じて複数回を行わなければならない。そのため、フーリエ解析の計算時間を確認する。実験に用いる Android 端末の仕様を表 2 に示す。

表 2：Android 端末の仕様

機種	GALAXY NEXUS
モデル	SC-04D
OS	Android 4.0
RAM	1GB
CPU	Texas Instruments OMAP4460 デュアルコア 1.2GHz

フーリエ幅は、フーリエ解析に使用するデータの数である。また、シフト幅は、録音データに対してフーリエ解析を行う範囲を移動するデータの個数である。なお、フーリエ解析には、CERN の Colt<sup>6)</sup> (科学技術計算ライブラリ) をマルチスレッド化した Parallel Colt<sup>7)</sup> を使用した。

フーリエ幅の広さは、周波数分解能に影響する。フーリエ幅が 32 以下になると周波数分解能が 1378Hz 以下となる。

すると、発音周波数は、1378Hz 以上の間隔を必要とするため、最高周波数の 21kHz から 4 個の発音周波数を割り当てても、最低周波数は、15.49kHz となるため、人間の耳に聞こえる可能性が高い。そのため、フーリエ幅 64 以上が好ましい。

シフト幅は、距離分解能に比例する。シフト幅が 32 以上になると、時間分解能が低くなり、音速に変換すると 24cm 以上になるため、シフト幅は、32 以下が好ましい。

フーリエ幅とシフト幅を変化させた場合のフーリエ解析に必要な所要時間を表 3 に示す。

表 3 フーリエ解析の所要時間 [ms]

		シフト幅				
		32	16	8	4	2
フーリエ幅	64	157	285	499	957	1996
	128	237	389	830	1940	3500
	256	459	796	1654	3605	12545
	512	817	1624	3104	12409	26683

発音周波数は、フーリエ解析によって離散化される。具体的には、フーリエ幅が 512 で、発音周波数が 20kHz だった場合、19.98kHz と 20.03kHz に離散する。そのため、フーリエ幅を 64 にすると、周波数分解能は 345Hz であるが、前述のとおり、発音周波数に最近の 2 周波数に離散されるため、1 音の発音周波数を分別するために要する周波数の幅は 690Hz となる。

フーリエ幅が 512 の場合、シフト幅を 2 にすると、時間分解能は 45us で、音速に変換すると 1.54cm となり、計算時間は 1.996 秒であるため、高精度で低速な測距ができる。そして、シフト幅を 32 にすると、時間分解能は 726us で、音速に変換すると、24.77cm となり、計算時間は、0.157 秒であるため、低精度で高速な測距ができる。

この結果から、十分実時間で処理できると言える。また、利用者の Android 端末で計算を行うため、これらのパラメータは、シフト幅を狭くして「精度優先」、広くして「速度優先」など、利用目的に合わせてユーザが自由に変更できる。

なお、現段階では、発音周波数には 1kHz の間隔があるためフーリエ幅は 64 でも問題なく分別できるが、実験の成功を確実にするために、フーリエ幅を 512 で測距精度の評価実験を行っている。今後は、受信開始時間を判定できる範囲で周波数分解能を荒くして、フーリエ幅をどれだけ狭くすることができるかを確認する必要があると考えている。

### 3.3.2 周波数選択

フーリエ解析の結果は X：時間 Y：振幅 Z：周波数とする 3 次元データが得られる。図 4 は、18kHz と 20kHz を発音している状態で録音したデータの発音開始付近を時分割フーリエ解析した結果である。右側のスパイクが 18kHz、

左側のスパイクが 20kHz である。実際には、周波数軸に広がりがあるが、低周波数帯のグラフを省略してある。

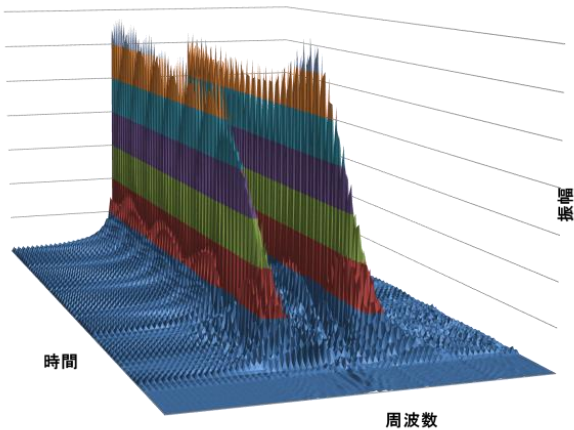


図 4：2 音のフーリエ解析結果

以降に示すフーリエ解析結果は、特定周波数の振幅と時間の平面、周波数軸に垂直な断面を示す。

Android 端末でフーリエ解析した結果から、各発音機から発音された周波数を選択して受信時間の差を確認するために、オシロスコープで調べた発音機の周波数のフーリエ解析結果を見ると、発音機は、256ms 周期で発音、消音を繰り返しているため、フーリエ解析結果は、矩形波のようになるはずであるが、図 5 に示すように、想定している波形が得られなかった。

原因を究明した所、発音機が出力する信号の周波数と、Android 端末が録音したデータをフーリエ解析で分類される周波数が、実験のたびに微妙にずれていることが判明した。これは、スピーカ、マイク、および、マイコンのクロックが、温度や湿度などの環境変化の影響を受けているのではないかと考えている。

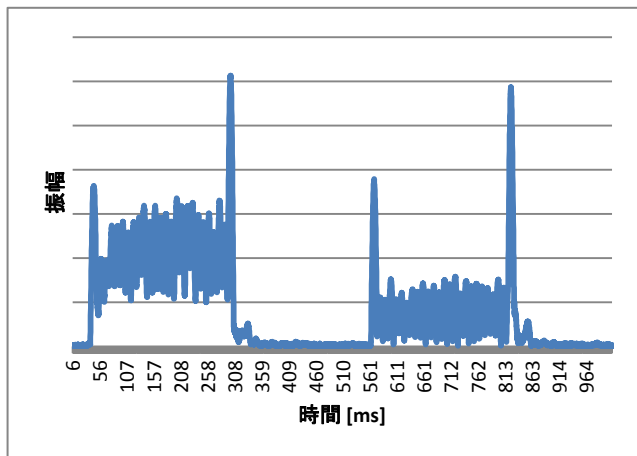


図 5：適正周波数自動検出機能実装前

この問題を解決するために、固定の発音周波数を解析するのではなく、与えられた発音周波数の近傍でピーク値を出している発音周波数を検知する方法を考案し、実装する。結果を図 6 に示す。

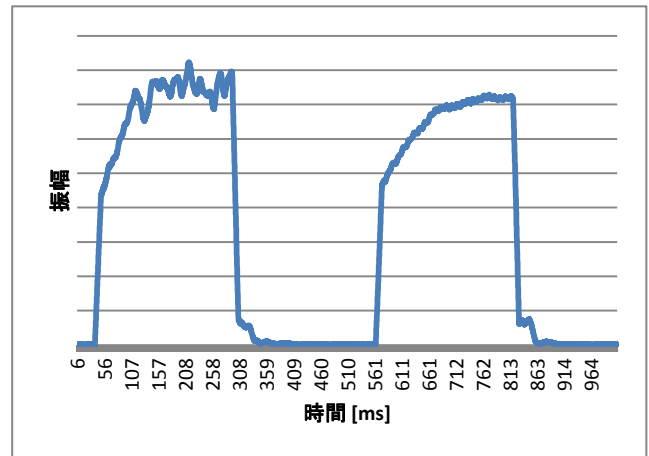


図 6：適正周波数自動検出機能実装後

解析周波数の自動調整により、発音周波数に微妙な差があっても適正周波数を自動的に検出できる。

## 4. 実験

### 4.1 測距

測距のために、受信終了時間の差を用いることを検討したが、図 7 に示す余韻のような波形を示しており、受信開始時間よりも正確な受信終了時間の判定が難しい。余韻を消すために、別の周波数の音を発音して、余韻を相殺する方法も検討したが、仕組みが複雑になるため、现阶段では、受信終了時間を用いる方法は行わない。

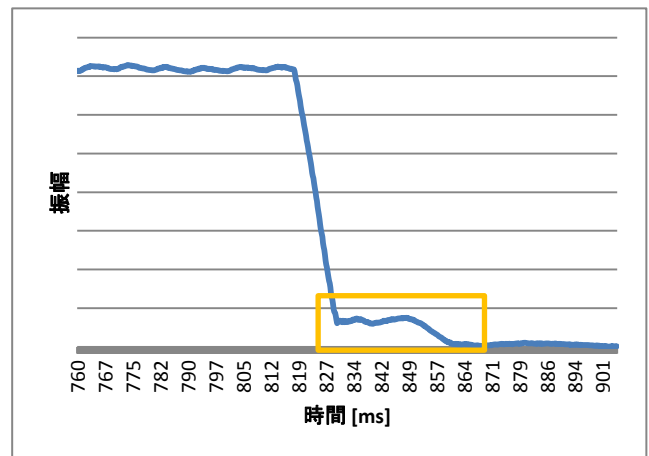


図 7：受信終了付近の波形

### 4.2 受信音開始時間の推定

スピーカと Android 端末との距離が異なると、受信音量も異なるため、受信開始時間を受信音量が一定の閾値を超えたかどうかで判定すると、測距できる範囲が狭くなってしまう。そのため、録音した各周波数の音の振幅が異なる場合でも、正確に受信時間を判定できる方法が必要となる。また、フーリエ解析には一定の幅のサンプルを用いるため、図 8 に示す通り、時間軸における特定周波数の振幅の変動が鈍る。

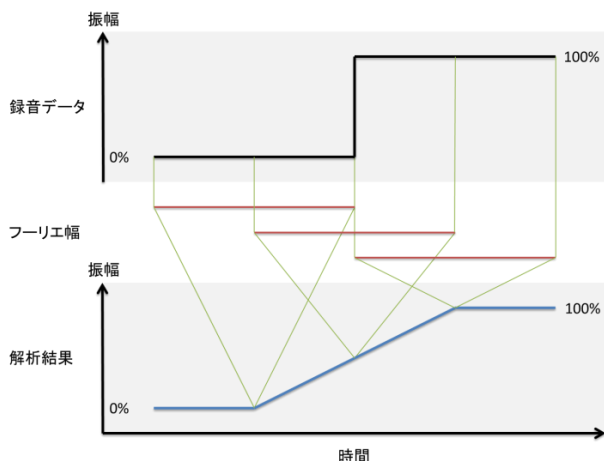


図 8：時分割フーリエ解析した時の振れ幅の変動

これは、フーリエ幅を狭くすることで解決することができるが、フーリエ幅を狭くすると、周波数分解能が荒くなり、発音する音の周波数の間隔を広くする必要がある。すると、発音できる周波数が減るため、設置できるスピーカの数も減る。

また、フーリエ解析に用いるデータには、一定の幅があるため、フーリエ解析に用いるデータが受信している圏内に全て収まるまで、線形に増加する。そのため、受信開始時間直後の振幅は、限りなく 0 に近く、ノイズの影響を受けやすい。このことから、受信開始時間の推定が必要だと考えた。

受信開始時間の推定方法は、フーリエ解析結果が線形に増加し、その増加の傾きが一定であることに注目して、音の鳴り始めを類推することを試みる。まず、時間の経過方向に、以前の点よりも値の小さい点を削除したものを図 9 に示す。

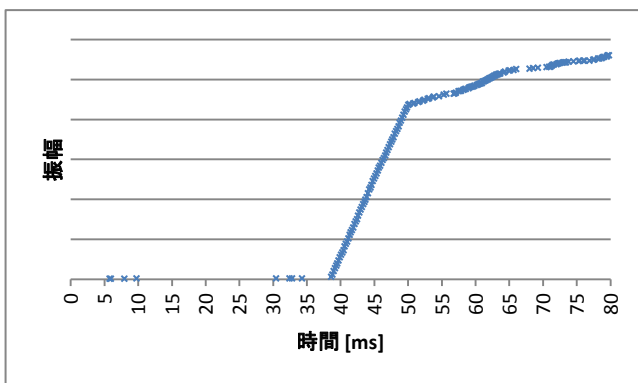


図 9：条件に適合するサンプル

受信開始付近の直線を求めるために、ノイズの影響を受ける小さい値の点を削除する。そして、小さい値として除外されなかった最初の点から、振幅が線形に増加する間隔を経過した地点以降の点を削除する。線形に増加する範囲は、 $\text{fft\_width} / \text{shift\_width}$  で求める。これらの条件を満たした点を元に受信開始付近の直線を求める。

図 9 に示した頂点から、条件を満たす点のみを抽出して、受信開始付近の直線を求めたものを図 10 に示す。特徴点

から近似直線を求め、近似直線の X 軸との交点を発音開始時間とした。

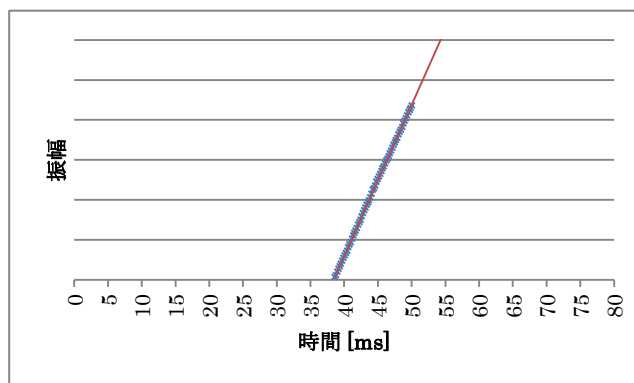


図 10：特徴点と近似直線

発音開始時間推定方法により求めた各周波数の発音開始時間の差から距離の差を求める式を数式 1 に示す。

$$\frac{\text{shift\_width} \times \text{distance} \times \text{sound\_speed}}{\text{sampling\_rate}}$$

数式 1：差から距離を求める

$\text{distance}$ には、前述の受信開始時間推定方法により推定した各周波数の受信開始時間の差を代入する。

音速は、大気の状態によって変化するが、今回の実験では、国際標準大気海面上気温での音速 (340.29m/s) を代入して計算する。

#### 4.3 測距精度

測距精度を計測するために、4.2 節の受信開始時間推定方法を用いて、異なる 2 音の周波数の音を受信した時間の差から、距離の差を算出するプログラムを実装した。

標準化周波数 44.1kHz で録音したデータをフーリエ幅 512、シフト幅 8 で解析した結果から、受信開始時間の推定をして、測距を行う。実験は、図 11 のように、20cm から 120cm の間を 20cm の間隔で、8 回ずつ計測を行う。

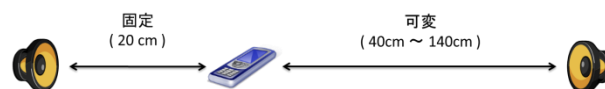


図 11：実験環境

計測結果の平均値を図 12 に示す。

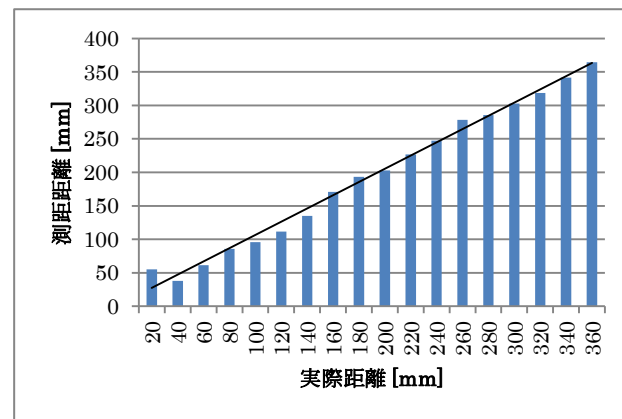


図 12：計測結果

20cm以下の測距は、誤差が大きく、測距が成功しているとは言えない。20cm以下の計測が失敗する原因は、現在調査中である。また、380cm以上の測距も試みたが、受信音量が低いため、今回は測距できなかった。しかし、音量を上げることで十分、測距可能であると思われる。

40cm以上であれば、概ね線形に増加している。詳細を表4に示す。

表 4：計測結果詳細

実際距離[cm]	平均[cm]	誤差[cm]	標準偏差
20	55.08	35.08	14.17
40	38.06	-1.94	8.08
60	61.32	1.32	6.42
80	85.88	5.88	9.07
100	95.82	-4.18	10.06
120	111.64	-8.36	5.98
140	135.10	-4.90	8.63
160	171.01	11.01	15.51
180	193.09	13.09	5.69
200	202.93	2.93	12.09
220	226.88	6.88	10.74
240	247.34	7.34	25.95
260	278.32	18.32	10.04
280	285.72	5.72	15.75
300	302.66	2.66	14.31
320	318.38	-1.62	8.78
340	341.50	1.50	8.78
360	364.45	4.45	77.08
平均		4.96	14.84

実験結果から、平均誤差 4.96cm 程度で測距できることを確認した。しかし、標準偏差は 14.84cm 程度と大きい値になっている。

## 5. 考察

測距実験で求めた値は、ばらつきが大きい。しかし、8回程度の計測を平均すると、測距誤差は 5cm 程度になる。そのため、1回の録音で複数回にわたって受信開始時間を求めれば、計算時間は変化せずに、5cm 程度の測距誤差で測距できると考えている。

5cm 程度の測距が可能であることが判明したため、10cm から 20cm 程度の誤差で測位が可能であると考えている。この精度があれば、人間の歩幅より短い誤差なので、屋内測位に十分活用できるのではないかと考えている。

## 6. 終わりに

現段階では、測距するプログラムしか実装できていない。今後は、測位するプログラムを実装して、測位できるよう

にしたいと考えている。測位計算プログラムは、別システムの開発で作成しているため、すぐに対応可能であると考えている。

今回の実験で使用したスピーカは、音楽鑑賞のスピーカで、高周波の発音に向いていない。そのため、発音音量の不足により、音の到達距離が短いのではないかと考えている。今後は、ツイータスピーカなど高周波の発音を得意とするスピーカの使用を検討している。ツイータスピーカは、2 ウェイスピーカなどに搭載されており、高周波数帯の音を効率よく発音できる。小型のツイータスピーカは、1,000円程度で入手できるため、安価で作成可能という特性は損なわれない。また、今回の実験では、22kHzの音の受信レベルが低く、発音周波数から除外したが、受信レベルが低い原因が、マイクではなくスピーカであった可能性もある。そのため、高周波数帯の発音を得意とするスピーカを使用して、22kHzの受信レベルを再実験する必要があると考えている。

将来的には、「発音」と「消音」の周期を短くして、1回の録音で複数回受信開始時間を求めることで、測距精度を向上したり、解析所要時間を短くしたりしたいと考えている。しかし、発音時間を短くし過ぎると、マイクの振動板が十分に振動せずに、受信開始時間の判定を正常に行うことができないので、発音と消音の周期をどれだけ短くできるか確認する必要がある。

実際の環境では、他人や物など様々な遮蔽物による影響が考えられる。天井にスピーカを設置することで、人などの低い遮蔽物の影響を軽減できると考えているが、確認が必要である。

## 参考文献

- 1) Google：インドアマップ - 概要 - Google マップ, (オンライン) 入手先 <<https://www.google.co.jp/intl/ja/maps/about/partners/indormaps/>> (参照 2014-05-16).
- 2) 山田 直治, 磯田 佳典, 南 正輝, 森川 博之：プレゼンスシステム実現のための無線 LAN を用いた高角度な屋内エリア推定方式, 情報処理学会論文誌, Vol.50, No.8, pp.1845-1855(2009).
- 3) 石塚 宏紀, 上坂 大輔, 黒川 茂莉, 渡邊 孝文, 村松 茂樹, 小野 智弘：BLE シグナルと PDR によるハイブリッド屋内測位手法の基礎検討～Open Beacon Field Trial 参加における実験結果の共有～, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報, Vol.71, No.21, pp1-6(2014).
- 4) 秋山征己, 須永光, 五百蔵重典, 田中博：超音波センサを用いた広域屋内測位システムの構成と検証実験. 測位航法学会論文誌, Vol.3, No.3, pp.1-8(2012).
- 5) 村田 翔太郎, 屋良 朝克, 金田 一将, 五百蔵 重典, 田中 博：非可聴音を用いた屋内測位のための受信機の試作とその評価(オンライン), 入手先 <[www.gnss-pnt.org/taikai26/yoko26/murata.pdf](http://www.gnss-pnt.org/taikai26/yoko26/murata.pdf)> (参照 2014-05-16)
- 6) CERN：Colt - Welcome, (オンライン) 入手先 <<http://acs.lbl.gov/software/colt/>> (参照 2014-05-16)
- 7) Piotr Wendykier：Parallel Colt - Piotr Wendykier, (オンライン) 入手先 <<https://sites.google.com/site/piotrwendykier/software/parallecolt>> (参照 2014-05-16)