

スマートフォンの内蔵マイクを用いた屋内測位方式の提案 Proposal of the indoor positioning system using a microphone of smartphone

岩崎 改 五百蔵 重典[†]
Kai Iwasaki Shigenori Irooi

1. はじめに

屋内では、GPS の電波が建物の天井や外壁などに影響を受けるため、GPS による測位精度は屋外よりも悪くなる。しかし、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ため、屋内では屋外よりも高い測位精度が求められる。これらの現状を踏まえて電波を用いた屋内測位方式や、超音波を用いた屋内測位方式^{[1][2]}が提案されている。電波を用いた屋内測位方式には、WiFi 設備を利用した屋内測位方式^[3]がある。既存の設備を利用できるため設置費用を抑えることができ、3m から 10m 程度の精度で測位できる。超音波を用いた方式^{[1][2]}は、数 cm の精度を得ることができるが、超音波の設備を設置しなければならない。加えて測位対象は、超音波を受信する専用のデバイスを持たなければならないという制約がある。

平成 24 年度末には、日本におけるスマートフォンの普及率は 49.5%^[4]となっており、日本の全人口の半分近くがスマートフォンを所持している。また、その普及率は、今後も高くなることが予想される。そのため、スマートフォンに標準搭載されているセンサを用いた測位方法を確立すれば、スマートフォンを持つ多くの人が気軽に屋内測位を使用したアプリケーションを利用できる。都心などの人口密度が高い地域を始めとして、複雑な建物は全国に存在する。このような建物の構内では、屋内ナビゲーションがあると便利である。

そこで我々は、クライアントがスマートフォンを持っていることを仮定した屋内測位方式を提案する。本提案測位方式では、屋内の地図を提供しているサービスと連携することで、屋内でのナビゲーションに利用できると考えている。そして、電波の使用を制限される場所でも利用できるように、病院などの電波の仕様が制限される場所でのナビゲーションにも利用できる。また、10cm 程度の誤差での測位を目指しているため、屋内ナビゲーションだけでなく、車椅子などの移動体の誘導にも利用できると考えている。さらに、設置費用が安いいため気軽に設置できるという特徴から、小規模な測位にも利用しやすい。例えば、大型の掲示板などに測位システムを設置して、スマートフォンを、その掲示板にかざすと、掲示板に位置に応じた情報を提供するシステムの構築などに利用できると考えている。

2. 音波を用いた測位方式の研究

音波を用いた測位方式には、超音波を使用した測位方式と 20kHz 付近の聞こえ難い音波を用いた測位方式がある。聞こえ難い音波を用いた測位方式には測位対象が発信した音を複数のマイクで受信する方式^[5]と、複数のスピーカが発信した音を測位対象が受信する方式の研究^[6]がある。

聞こえ難い音波を用いた測位方式は、両方とも測位対象と複数の音波を受信、または、送信する位置までの距離の

差を用いて測位計算を行う。

2.1 測位対象が音波を発信する方式

測位対象が音波を発信する方式は、測位対象が発信する音波を天井などに設置された複数のマイクで受信する。マイクは異なる位置に設置されているため、測位対象からの音波が各マイクに到達する時刻に差が出る。この差を用いて測位計算をする。測位対象が音波を発信する測位方式の概要図を図 1 に示す。

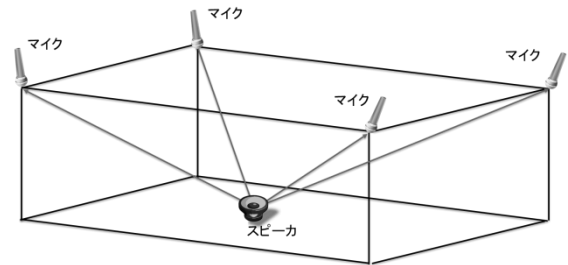


図 1：測位対象が音波を発信する方式

測位対象が音波を発信する方式は、超音波を用いた測位方式の研究と聞こえ難い音波を用いた測位方式の研究^[5]があり、超音波を用いた測位方式では、測位対象が超音波を発信する必要がある。超音波を発信するには、超音波発信機が必要である。対して、聞こえ難い周波数の音波は、音波発信機としてスマートフォンを利用できる利点がある。なお、受信と発信が GPS とは逆であるが、測位計算方法は GPS と同様の測位計算である。

2.2 測位対象が音波を受信する方式

測位対象が音波を受信する方式は、天井などに設置された複数のスピーカから異なる周波数の音波を発信する。測位対象は、これらの音波をスマートフォンに内蔵されたマイクなどで受信する。スピーカは異なる位置に設置されているため、音波が測位対象に到達する時刻に差が出る。この差を用いて測位計算する。測位対象が音波を受信する測位方式の概要図を図 2 に示す。なお、測位計算方法は GPS と同様の測位計算である。

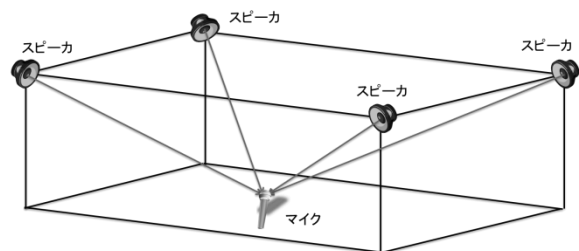


図 2：測位対象が音波を受信する方式

[†] 神奈川工科大学 情報工学専攻
Kanagawa Institute of Technology

2.3 測位方式の違いと特徴

測位対象が発信する方式と、受信する方式の主な違いと特徴を表1に示す。

測位対象が発信する方式では、複数のスピーカで音波を受信する。測位対象が複数ある場合は、どのスピーカから発信された音波であるか判別しなければならないため、複数の測位対象を区別する方法は、別途考案する必要がある。たとえば、発信する周波数を変更する方法や、発信する時間をスケジューリングする仕組みが必要である。広域化する場合は、マイクの数を増やし、広範囲に設置することで容易に実現可能である。システムが測位計算するため、クライアント側で測位結果を必要とする場合は、何らかの手段で伝達する必要がある。

測位対象が受信する方式では、複数のスピーカから音波を発信するため、測位対象が各スピーカの音を判別できるように異なる周波数の音を発信する。測位対象が複数ある場合は、それぞれの測位対象が、それぞれの場所で、それぞれ測位計算するため、測位対象を判別する必要はない。広域化する場合は、スピーカを増やす必要があるが、異なる周波数を割り当てる必要があるため、スピーカが増えると、周波数が足りなくなる場合がある。そのため、スピーカの判別方法や、他のスピーカと音が混じらないようにするなどの工夫が必要である。測位計算は、クライアント側で行うため、スタンドアロンで動作し、プライバシーを確保できる。

表1：測位方式と特徴

	測位対象が発信する	測位対象が受信する
音波の周波数	単数の周波数	複数の周波数
測位対象の区別	困難	容易
広域化	容易	困難
測位計算	システム側	クライアント側

3. 測位方法

3.1 先行の測位方式

我々の先行研究である、測位対象が音波を受信する方式は、異なる周波数の音波を同時に発信し、混じり合った状態の音波を受信している。各スピーカは異なる周波数の音波を発信しているため、スピーカが発信する特定の周波数の音波だけを抽出できれば、特定のスピーカからの音波を抽出できる。我々の先行研究⁶⁾では周波数分解方法として、フーリエ解析を連続して複数回適用する方式を採用した。フーリエ解析することにより、指定する範囲の信号に含まれる周波数成分の振幅を得ることができる。そして、特定の周波数の音波がいつ受信されたのかを知るために、フーリエ解析する範囲を少しずつ移動しながら複数回フーリエ解析を行って、周波数の振幅の変動を取得する。

次に、フーリエ解析により得られた各発信周波数の振幅の変動から立ち上がり、および、立ち下がり（以降、エッジ）を検出して受信時刻を推定する。スピーカの発信周波数と設置位置を登録しておくことで、基準となるスピーカと、それ以外のスピーカからマイクまでの距離の差が得られる。

先行の測位方式は、解析区間の移動幅を狭くすることで時間分解能を高くできる。この場合、多くのフーリエ解析を行うため計算に時間がかかるという問題が存在する。受信時刻の推定精度が高くなるが、移動幅が狭いため、解析する回数が多くなってしまふ。現在のスマートフォンは処理能力が高く、複数回フーリエ解析をするのに十分な処理能力は持っているが、電池の消費が激しくなってしまうため、好ましい状態とは言えない。

また、フーリエ解析は設定した幅のデータを用いて解析を行う。高速フーリエ解析では2の累乗個のデータを用いる。そのため、図3に示すように振幅の変動が鈍ってしまうという問題があり、音波の受信時刻の推定を正確に行うことができない。しかし、エッジの鈍りを回避するためにデータの数を減らすと周波数分解能が低くなる為、周波数分解を適切に行えなくなってしまう。

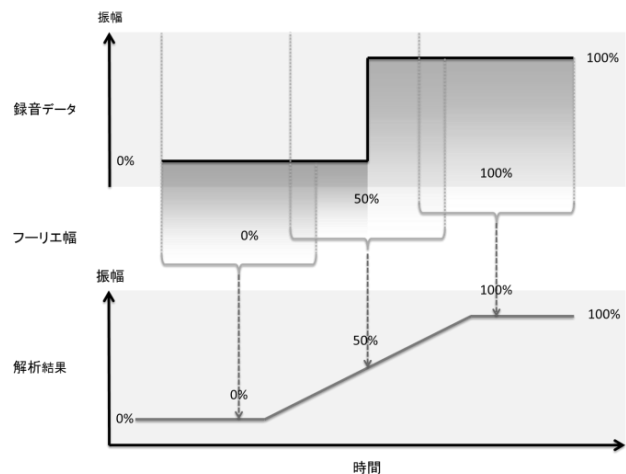


図3：エッジが鈍るイメージ

先行の測位方式では、測距実験を行ったところ平均誤差4.81cm、標準偏差3.33cmであった。先行の測位方式での測距実験の詳細を表2に示す。測距結果には値が大きく外れた結果が16%±1%含まれており、外れ値を除外することで標準偏差を小さくする工夫がなされている。また本実験では、2音の場合のみを扱っている。

表2：先行の測位方式での測距実験

実際距離[cm]	20	40	60	80	100
平均	16.98	37.19	64.66	83.73	104.12
誤差	3.98	4.82	3.89	2.37	5.94
標準偏差	3.06	5.71	4.93	4.83	3.94

先行の測距方式では、音量の差が大きすぎると誤差が大きくなるという問題が発生した。

発信機の発信時刻の誤差は、オシロスコープにより測距に影響が無いことを確認した。また、プログラムにより生成した理想的な音量の異なる受信波形を受信時刻推定プログラムに入力すると、正確な受信時刻が出力されることを確認した。これらのことから、音波が発信してから、受信するまでの間に問題が発生していると考え、調査を進めた結果、各スピーカから発信される音波の音量に差がありすぎると、他の周波数の音波がノイズとなって、S/N比が劣化

し、測距に失敗したと考えられる。これは、GPS における遠近問題と同様の問題である。

4. 提案システム

我々の従来研究により、複数の周波数の音波を同時に発音すると遠近問題により測距に失敗することが判明した。そこで、異なる周波数の音波を同時に発音せずに順番に発音する方式(TDM 方式)を提案する

また、我々の従来研究では、周波数分解の方法として複数回フーリエ解析を適用する方式を採用していたが、CPU 負荷が高く解析に時間が掛かる為、IIR フィルタによる音の分離を試みる。

4.1 発信

4.1.1 発信機構

本測位方式では、発信間隔の誤差は測距の誤差となるため、特定の周波数の音を正確な時刻に発信することが必要不可欠である。そのため、発信機を制作する。発信機構は、制御機と発信機によって構成される。制御機は発信機に対して発信開始信号を発信する。発信開始信号を受信した発信機は、発信を開始することで、複数の発信機から発信するタイミングを同期する。これにより、発信時刻の誤差を 5 μ s 以内に抑えた。音速に変換すると 1.70mm 程度であるため、測距には殆ど影響が無いと思われる。

TDM 方式では順番に発信する必要があるため、発信機にスピーカの数と番号を設定して、発信開始信号を受信しても自分の番でなければ発信しない。

発信機を図 4 に示す。発信機は安価な部品で構成されており、発信機の 1 個の部品代は、スピーカも含めて千円程度である。

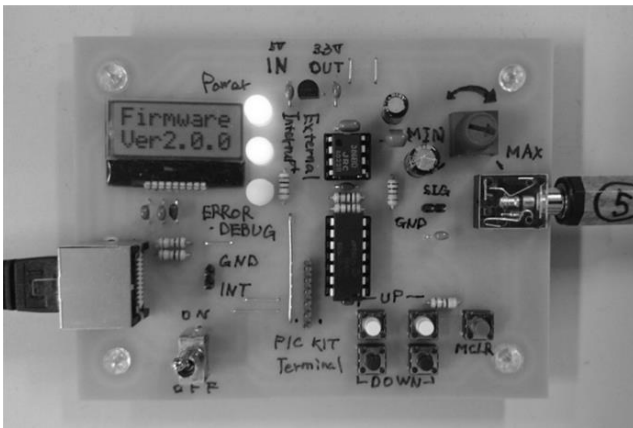


図 4：発信機

4.1.2 発信方法

本研究では、異なる周波数の音波を別々の時間に発信する時分割多重化(TDM)方式を採用する。TDM 方式では、複数の音波が混じらないように異なる時刻に順番に発信する。なお、どのスピーカから到達した音波かを判別するために、各スピーカからは異なる周波数の音波を発信する。

発信間隔は想定される測距対象の位置の中で測距対象と各スピーカとの距離の差が最大となる長さを考慮して決定する。例えば、発信間隔が 32ms の場合は、その間に音波は 10.89m 進む。音が鳴り終わって、次の音が鳴り始める

までの間隔は、発信間隔の半分の 16ms であるから、スピーカとの距離の差が 5.45m 以上ある場合は、音波がマイクに到達する時点で音波が混じり合ってしまうため測距できない問題が発生する。ただし、発信間隔が短ければ、ある時間間隔で受信時刻を推定するために必要なエッジを多く得られる。また、受信波形が短いため解析時間も少なくて済むため、発信間隔はできるだけ短く設定する。

なお、実験では、発信時間、および、消音時間は同間隔に設定している。つまり、デューティー比は 1:1 である。ただし、TDM 方式の場合は、順番に発信するため、デューティー比は“1:スピーカの数”となる。

4.2 受信時刻推定

我々は標本化周波数を 44.1kHz に設定して実験を行っているため、標本化定理により受信可能な最高周波数は 22kHz である。そして、16kHz 以下の音は成人でも殆どの人に聞こえてしまうため、17kHz 以上の音を使用する。これらの制約により使用できる周波数が限られているため、スピーカ(発信周波数)を増やすほど発信する周波数の間隔が狭くなる。現状では通過域幅を 400Hz に設定して実験を行っているが、発信周波数の間隔を狭くする(スピーカを増やす)場合は、この通過域幅を狭くする必要がある。また、遮断特性を良くするために、次数を増やす、または、第一種チェビシェフ特性のフィルタの採用を検討する。などの対策が必要になると思われる。

この問題を解決するために、新しく提案する受信時刻推定方法では IIR (Infinite Impulse Response) フィルタを採用する。IIR フィルタは計算時間が早く、時間分解能が低下しないという利点もある。バンドパスフィルタの設計には Scilab を用いた。IIR フィルタの設計に用いるパラメータを表 3 に示す。阻止域のリップルを小さくしたいためバターワース特性のフィルタを設計する。

表 3：IIR フィルタのパラメータ

次数	5 次
特性	バターワース
通過域幅	400 [Hz]

本測位方式では、特定のスピーカからの音波を、いつ受信したかを高精度で推定する必要がある。この受信時刻推定における時間軸の単位は無く、44.1kHz の標本化周波数で受信した場合は、秒に変換すると 1/44100[sec]となる。標本周期の間に音波が進む距離は 77mm である。つまり、受信時刻推定に 1 サンプルの誤差があった場合は 77mm の測距誤差となる。

受信波形の例を図 5 に示す。このままではどのパートがどのスピーカから発信されたものか分からない。そのため、受信時刻推定は、受信した波形に対して発信周波数と同数のバンドパスフィルタを適用する。これにより、混じり合った複数の周波数の音波から、特定のスピーカから発信された音波だけを抽出できる。

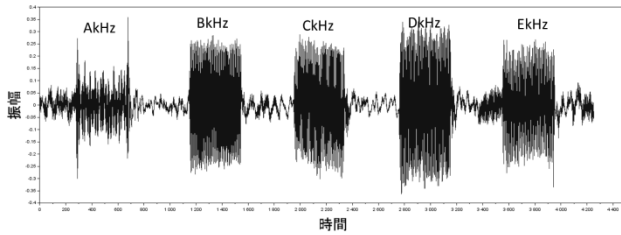


図 5：受信波形

バンドパスフィルタの周波数応答と、17kHz から 21kHz までの音を 1kHz 間隔に設定して、それぞれ別のスピーカから発信した音波をスマートフォンに内蔵されたマイクで受信し、フーリエ解析したものを図 6 に示す。フーリエ解析結果の発信周波数のピークが、どれもバンドパスフィルタの通過域に収まっており、発信周波数の誤差が許容範囲内であることが確認できる。また、バンドパスフィルタの通過域に別の周波数の成分が混じっていないため、特定のスピーカから発信された音波のみを抽出できる。

図 5 の波形に 18kHz を中心周波数とするバンドパスフィルタを適用した波形を図 7 に示す。17kHz から 1kHz 間隔の周波数を発信しているため、2 個目のバースト波を抽出できていることが確認できる。

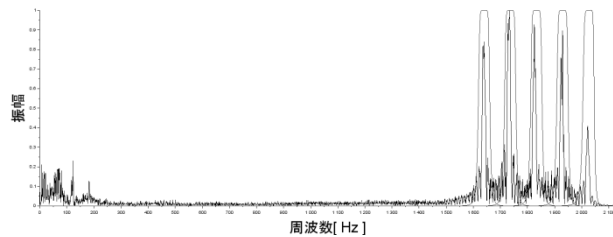


図 6：バンドパスフィルタの周波数応答

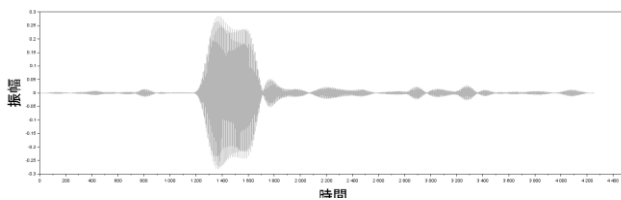


図 7：バンドパスフィルタを適用した例

次に、特定の周波数の音波を抽出した波形に対してヒルベルト変換を適用する。バンドパスフィルタを通過した波形は、元の信号に含まれるバンドパスフィルタの通過域の周波数の振幅が含まれているため、抽出した周波数で振動している。この振動の振幅の変化に着目して受信時刻を推定するため、包絡線検波を行う。包絡線検波を適用した例を図 8 に示す。包絡線検波をすることにより、エッジの検出が容易になる。

次に包絡線を微分する。包絡線を微分することで、振幅の変化量が分かる。この変化量を微分した時に傾きが 0 となる点、つまり、変化量が最も大きくなる時刻を受信時刻とする。包絡線を微分したものを図 9 に示す。点で示されているのが、包絡線の傾きが最も大きくなる点（包絡線を

2 回微分した時に傾きが 0 となる点）である。この点を受信時刻とする。

次に、最初に到達した音波を基準として、それ以外の周波数の音波が到達する時刻の差を求める。ただし、このままの状態では、順番に発信しているため、その分基準となる周波数の音波より遅く到達するため、この発信間隔の差を取り除く必要がある。

ただし、発信間隔は事前に測位対象に知らせることができない。これは、マイコンのクロックが周囲の環境に影響されて変動する場合があるためである。ただし、急激な変化はなく、音波の受信データから逆算できるため、発信間隔は、実測により求める。特定のスピーカから発信された音波に着目すると、ある受信時刻と次の受信時刻の間隔は、そのスピーカとマイクの距離に関係なく常に等間隔である。そのため、特定のスピーカから発信された音波の、ある受信時刻と次の受信時刻の間隔をスピーカの数で割ると発信間隔が求められる。

なお、回折波の影響も考えられるが、音波は電波に比べて減衰しやすいため回折した音波の振幅は殆ど無くなり、受信されないか、受信されたとしても直接波の振幅と比べてかなり小さいのでノイズとして判別することは容易である。

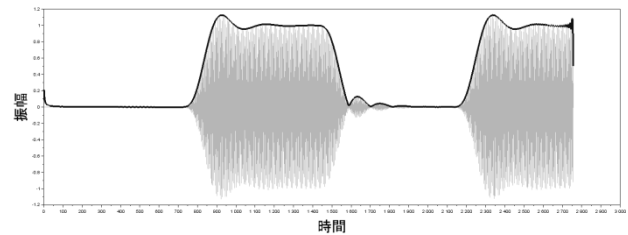


図 8：包絡線検波を適用した例

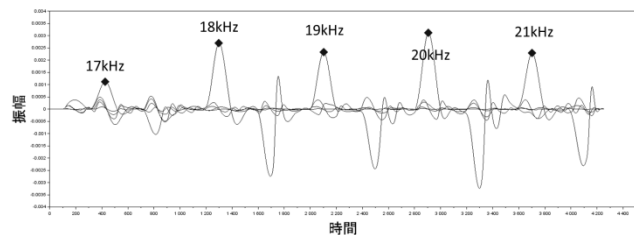


図 9：変化量

ここから、先ほど求めた発信間隔を減算することで、基準となる周波数の受信時刻と、各周波数の受信時刻の差が求められる。この受信時刻の差を用いて測位計算を行う。

図 10 では、3 個の異なる周波数の音波が等間隔で発信と消音を繰り返している。マイクで、これらの音波を受信すると、2 の周波数は、1 の周波数よりも発信してから受信されるまでの時間間隔が長く、3 の周波数は 1 の周波数よりも発信してから受信されるまでの時間間隔が短い事が分かる。ただし、発信機が音波を発信した時刻を測位対象は知らないので、この時点では測位に必要な情報は得られていない。

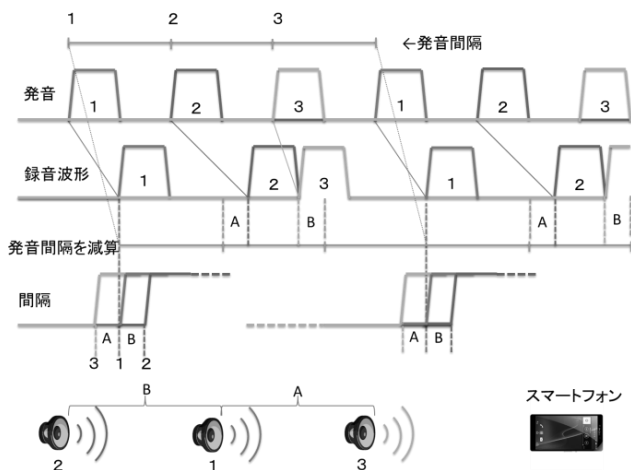


図 10：測距の流れ

各周波数の受信時刻を推定して、発信間隔の差分を減算すると、異なる周波数の音波を同時に発信した時の各周波数の音波の受信時刻の差を得ることができる。これにより周波数 3 を発信するスピーカは、基準となる周波数 1 を発信するスピーカよりも間隔 A だけスマートフォンより近い位置に在り、周波数 2 を発信するスピーカは、周波数 1 を発信するスピーカより間隔 B だけ遠い位置に在ることが分かる。なお、実際の距離を求めるには、音速を乗算する必要がある。受信時刻推定により求められた間隔は、標準化周期を基準とした間隔であるため、数式 1 により、実際の距離を求める。

数式 1：標準間隔から実際の距離を求める式

$$\frac{\text{受信間隔}}{\text{標準化周波数 [Hz]}} \times \text{音速 [cm]}$$

5. 実験

実験では、Scilab を用いて受信時刻を推定する。ただし、最終的には全てスマートフォン上で行うことを想定しているため、スマートフォンに内蔵されたマイクを用いて受信する。

5.1 測距実験

測距実験は異なる周波数の音波を発信する 2 個のスピーカを結ぶ直線上にマイクを設置して、受信時刻の差を用いて測距を行う。16kHz と 18kHz の音波を用いる。マイクから各スピーカまでの距離の差を算出する。測距実験の環境を図 11 に示す。

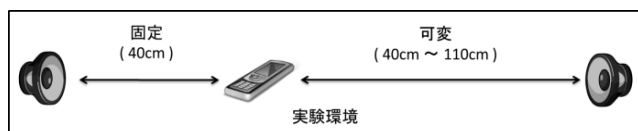


図 11：測距実験

測距実験の結果を表 4 に示す。平均誤差 1.84cm 平均標準偏差は 0.36cm であった。先行の測位方式と比較すると平均誤差は 2.97cm 向上し、標準偏差は 2.97cm 向上した。

表 4：実験結果

実際の 間隔	受信時刻 の差	測距結果 [cm]	誤差 [cm]	標準偏差 [cm]
0 cm	0.00	0.00	0.00	0.19
10 cm	16.44	12.68	2.68	0.39
20 cm	29.63	22.86	2.86	0.40
30 cm	43.00	33.18	3.18	0.34
40 cm	54.06	41.72	1.72	0.28
50 cm	65.81	50.78	0.78	0.35
60 cm	80.69	62.26	2.26	0.39
70 cm	92.31	71.23	1.23	0.53

5.2 測位実験

測距に成功したため、測位実験を行う。今回は、実験のためスピーカを床に置き、測位対象（スマートフォン）を 21kHz の音波を発信するスピーカ（中央）の真上の、床から 1m の高さに設置する。実用時はスピーカを天井などに設置することを想定しているため、実用時とは天地が逆転した状態での実験となる。しかし、測距（測位）には影響が無いと思われる。使用周波数は 17kHz から 21kHz まで 1kHz 間隔の音波を発信する。16 回計測を行う。スピーカの配置を図 12 に示す。なお、使用する周波数の内で最も低い 17kHz の音波は、殆どの成人には聞こえない周波数である。

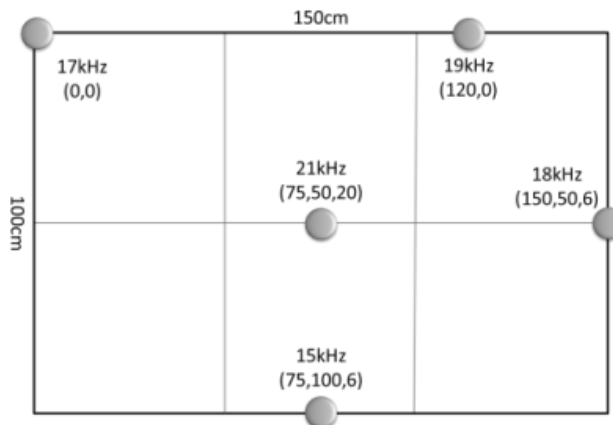


図 12：実験環境

マイクと各スピーカとの距離の差から測位計算した結果を表 5 に示す。X 軸、Y 軸および Z 軸の全ての軸において、誤差を 5cm 以内に収まっている。X 軸および Y 軸の平面での直線誤差は、平均で 3.45cm であった。また、X 軸、Y 軸および Z 軸の空間での直線誤差は、平均で 5.11cm であった。

表 5：測位実験の結果[cm]

	X	Y	Z
測位対象座標	75.00	50.00	100.00
平均座標	72.67	52.52	103.65
誤差	-2.32	2.52	3.64

6. 考察

サンプリング周波数は 44.1kHz で、これより高いサンプリング周波数に対応しているスマートフォンは少ない。音速は 340.29[m/s] で、標準化周期で音波が進む距離は 7.72mm である。そのため、測距精度は最高でも 7.72mm となる。今回の測距では平均誤差 184mm であるため、測距精度においては、限界に近い精度で測距できているのではないかと考えている。

また、測位実験では、直線誤差 50mm 程度で側位できた。しかし、X 軸および Y 軸方向の誤差に比べると、Z 軸方向の誤差が大きい。この問題の原因は、スピーカの配置にあると考え、シミュレーションにより確認した。Z 方向に広がりがないスピーカの配置での測位シミュレーションの結果を図 13 に示し、Z 方向に広がりがあるスピーカの配置での測位シミュレーションの結果を図 14 に示す。丸印は、スピーカ、バツ印はマイク、三角印は理論値から求めた測位結果である。また、マイクと理論値から求めた測位結果を結ぶ線は、測位誤差である。

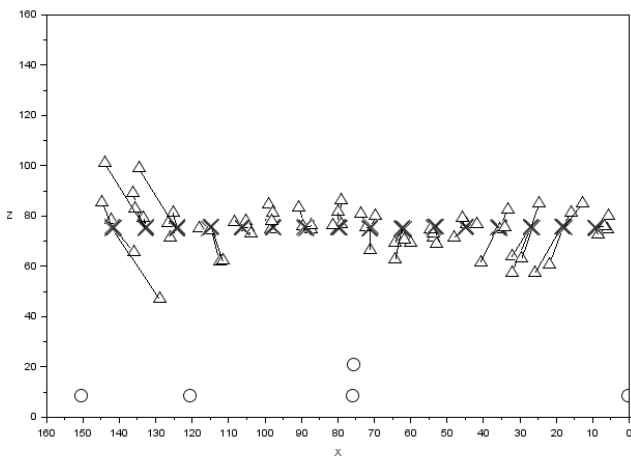


図 13：スピーカの配置が Z 方向に広がりが無い場合の測位シミュレーション

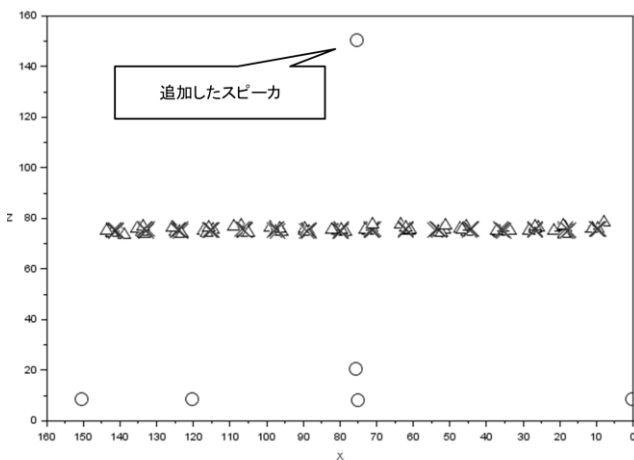


図 14：スピーカの配置が Z 方向に広がりが有る場合の測位シミュレーション

図 13 のスピーカの配置が Z 方向に広がりが無い場合は、理論値で測位計算をしても Z 軸方向の精度が悪いことが確認できる。図 14 のスピーカの配置が Z 軸方向に広がりが有る場合では、Z 軸方向に広がりが出るようにスピーカを 1 個追加することで Z 軸方向の誤差が小さくなる事が確認できる。

7. おわりに

今回の測位実験では、測位に必要な最小限のスピーカを用いて測位実験を行っているが、スピーカ、および、スマートフォンに内蔵されたマイクには指向性があるため、測位計算に必要な音量を確保するためにスピーカを測位対象が在る方向に向けなければならない場合があった。この問題を解決する為に、スピーカとの相対的な位置や角度と音量の関係について調査して、複数のスピーカを天井に設置して、広範囲での測位実験を実施したい。

また、スピーカの指向性に関しては、現状では 1 個の周波数に対して 1 個のスピーカで発信しているが、1 個の周波数を複数のスピーカで発信することで問題を解決できると考えている。ただし、同じ周波数の音波を同時に発信することによる弊害が無いことを実験で確認する必要があると考えている。

また、現状では Scilab で解析を行っているが、最終的にはスマートフォン上のアプリケーションで受信時刻の推定や測位計算などを行いたい。これにより、測位対象はスタンドアロンで測位可能な状態にできる。

今回、遠近問題を解決する為に TDM 方式を採用した。周波数帯域が有限であるために、スピーカの設置数が限られるという短所があったが、TDM 方式では別々の時間に発音するため、全てのスピーカを異なる周波数を発音する必要がない。基準となるスピーカだけ他のスピーカと異なる周波数を設定することで判別し、スピーカの発音順序を予め決めることでスピーカの設置数を増やすことができると考えている。また、高周波数な音波は録音し難いという問題があるが、この方法では使用する周波数は最低 2 個にできることから、録音し難い周波数を使わずに側位できる。そのため、音波の到達距離を伸ばすことができると考えており、この方法も今後検討していきたい。

参考文献

- [1] 秋山 征己, 須永 光, 斉木 拓実, 田中 博, "超音波屋内測位システムと走行ロボットを用いたナビゲーション模擬実験", 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol 2012, No 2 (2012)
- [2] 西田 佳史, 武田 秀明: 超音波 3 次元測位システム. *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers* 49(1), pp56-59, (2010)
- [3] 岡龍太, Tran Xuan Duc, 新井イスミル, 西尾信彦: 位置特定インフラ専用無線 LAN アクセスポイントの試作と測位精度制御の検討評価. 情報処理学会 第 73 回全国大会講演論文集 2011(1), pp275-276
- [4] 総務省: 主な情報通信機器の普及状況(世帯). 総務省のホームページ <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc243110.html> (2015/1/15 参照).
- [5] 金田 一将, 村田 翔太郎, 五百蔵 重典, 田中 博, "非可聴音を用いた屋内測位の試験結果", 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, Vol2014, No 2 (2014)
- [6] 岩崎 改, 五百蔵 重典, "高周波可聴音を用いた屋内測位に関する検討", マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2014), pp. 575-580(3B-3), (2014)