

スマートフォンの非可聴音を用いた測位システムの開発と実現性の確認

村田翔太郎^{†1} 屋良朝克^{†1} 金田一将^{†2}
五百蔵重典^{†1,2} 田中 博^{†1,2}

筆者らはナビゲーション, ロボットの自動走行などへの適用を目標に 10cm 以下の測位誤差を実現できる超音波を用いた屋内測位システムを開発してきたが, 測位対象に専用の超音波送信機を所持・装着する必要があり, 一般ユーザ利用展開への課題になっていた。そこで, 一般に広く普及し, 携帯性も高いスマートフォンを送信機として利用するシステムの検討を行った。しかし, スマートフォンから超音波は発生できないため, 発生可能な非可聴音を用いて同様の屋内測位システムの開発に着手した。まず, スマートフォンから非可聴音を発生させるプログラムを作成し, その動作を確認した。次に非可聴音に対応する受信機を試作し, 送信信号取得に必要な検波閾値の決定と測位計算に用いるタイマカウント値の取得実験を行った。それらを踏まえて測位実験の環境を構築し, 測位実験を行った。その結果, 非可聴音で高い測位精度が得られることと, フィルタを用いることで騒音環境でも測位が可能であることを確認し, スマートフォンを用いた測位システム実現の見通しを得た。

Development of positioning system using non-audible sound from smartphone and feasibility verification

SHOTARO MURATA^{†1} CHOKATSU YARA^{†1} KAZUMASA KANETA^{†2}
SHIGENORI IOROI^{†1,2} HIROSHI TANAKA^{†1,2}

1. はじめに

屋外では GPS が広く普及し, 多くのサービスシステムやアプリケーションが開発, 商用化され大きな市場を形成している。屋内での位置情報もナビゲーションやエリアに応じた情報提供, 人の動線把握, 搬送車両の移動制御などの観点から要求されている。その適用領域と要求精度を図 1 に示す。

屋外での位置情報は 10m 程度の測位精度で十分な場合が多いが, 屋内では通路幅などの状況に応じて屋外よりも高い精度が求められると考えられる。この要求に対して, IMES¹⁾や無線 LAN の電波強度を用いた方法²⁾や慣性センサ

を用いたデッドレコニング³⁾など多くの検討がされているが, センチメートルレベルでの精度の測位は困難なようである。筆者らは, 屋内における室内入口や商品棚などへのナビゲーション, ロボットの自動走行などへの適用を目標に 10cm 以下の測位誤差を実現できる超音波測位システムを開発し, 実験により精度を確認してきた⁴⁾。しかし, この超音波測位システムは測位対象が専用の超音波送信機を所持する必要があり, 一般ユーザへの利用展開の課題になっていた。そこで, 一般に広く普及し, 携帯性も高く, 内蔵スピーカを搭載しているスマートフォンに着目し, スマートフォンを送信機として用いる屋内測位システムの実現性を検討した。

スマートフォンは基本的に音源再生のサンプリングレートが 44.1kHz となっており⁵⁾, 発生可能な周波数はサンプリング定理により半分の 22.05kHz 以下であり, 超音波屋内測位システムで用いている 40kHz の超音波を発生させることはできない。そこで, 人間には聞き取りにくい 17kHz の非可聴音を測位に用いる。また, 超音波を用いた手法で使用している超音波受信機は非可聴音に対応していないため, 非可聴音に対応する受信機を試作した⁶⁾。なお, 同じく非可聴音とスマートフォンを用いた屋内測位システムが公表されているが⁷⁾, それとは受信と送信側が反対の構成であることに差異がある。本報告では, 試作した受信機の評価とそれを用いた測位実験の結果について報告する。

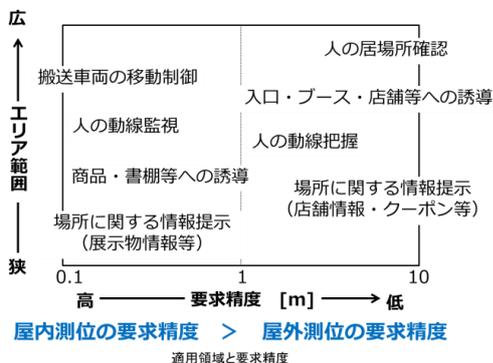


図 1 屋内測位の適用領域と要求精度

^{†1} 神奈川工科大学大学院 工学研究科 情報工学専攻
Kanagawa Institute of Technology, Graduate School of Information & Computer Sciences

^{†2} 神奈川工科大学 情報学部 情報工学科
Kanagawa Institute of Technology, Department of Information & Computer Sciences

2. 測位の基本原理

本測位システムの測位原理を図2に示す。スマートフォンが発生させた送信信号を4つ以上のマイクセンサで受信し、その伝搬時間差を用いて測位対象の位置を求める。送信信号には周波数 17kHz, High 400 μsec, Low 35msec の非可聴音パーストを使用する。本測位システムで用いている手法では送受信機間の時刻同期は行わず、受信機間の時刻同期のみ行うため、簡単な構成で実現が可能である。

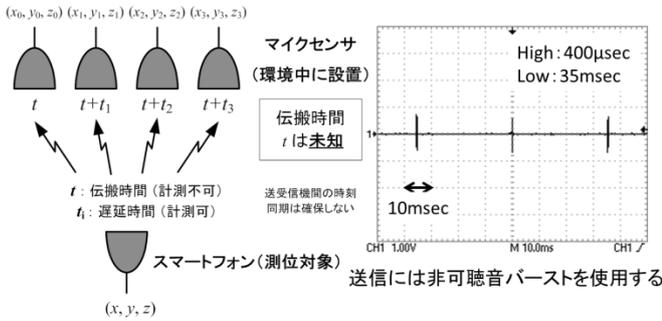


図2 測位の基本原理

送受信機間で同期を行わないため、非可聴音の伝搬時間は測定不能であり、送受信機間の距離は直接算出できず、三辺測量は適用できない。しかし、受信機間で時刻同期を確保しているため各マイクセンサ間の伝搬時間差は計測可能であり、以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2} &= ct \\ \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2} &= c(t+t_1) \\ \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2} &= c(t+t_2) \\ \sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2} &= c(t+t_3) \end{aligned} \quad \dots(1)$$

ここで、送信機から超音波を最初に受信したセンサ間の伝搬時間 t と測位対象となる送信機の位置 (x, y, z) は未知の値である。一方、各マイクセンサ間の受信時間差 t_i は計測可能であり、音速 c は室温から求められる。また、各マイクセンサの設置位置 (x_i, y_i, z_i) は既知の値である。したがって、 t_i を計測して式(1)の非線形連立方程式を解くことによって、測位対象となるスマートフォンの位置を求めることができる。本方式では、三辺測量と異なり t が加わって未知数が4つとなることから、測位計算のためには最低4個のセンサが必要となる。このため、三辺測量と比べてセンサの設置個数が増加するが、送受信機間の時刻同期が不要であるため、各装置の構成はより単純化することができる。

3. システムの設計と構成

3.1 測位システムの構成

屋内測位の基本原理を適用した測位システムの構成を

図3に示す。本システムは測位対象となるスマートフォンの非可聴音送信機、環境中に設置して非可聴音を受信する非可聴音受信機、システム全体の制御と測位計算を行う測位計算PCの3つで構成される。非可聴音受信機は天井に設置し、配線負荷を減らすためカスケード接続で電源供給およびデータ通信を行えるようしている。

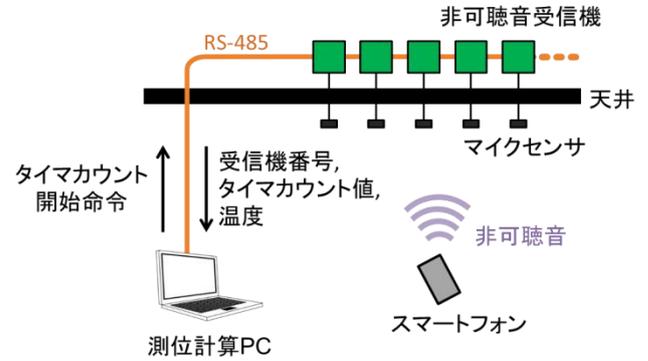


図3 測位システムの構成

3.2 測位システムのシーケンス

測位システムのシーケンスを図4に示す。測位計算PCからタイマカウント開始命令を各受信機に送信し、受信機内のタイマカウント値をリセットした後にタイマカウントのインクリメントを開始する。測位対象のスマートフォンから非可聴音を発信し、受信した受信機がそのタイミングでタイマカウントを停止させる。タイマカウント開始命令から一定時間後に測位計算PCが各受信機にリクエストを送信する。リクエストを受けた受信機がタイマカウント値を取得し、受信機番号とタイマカウント値、温度を測位計算PCに返す。

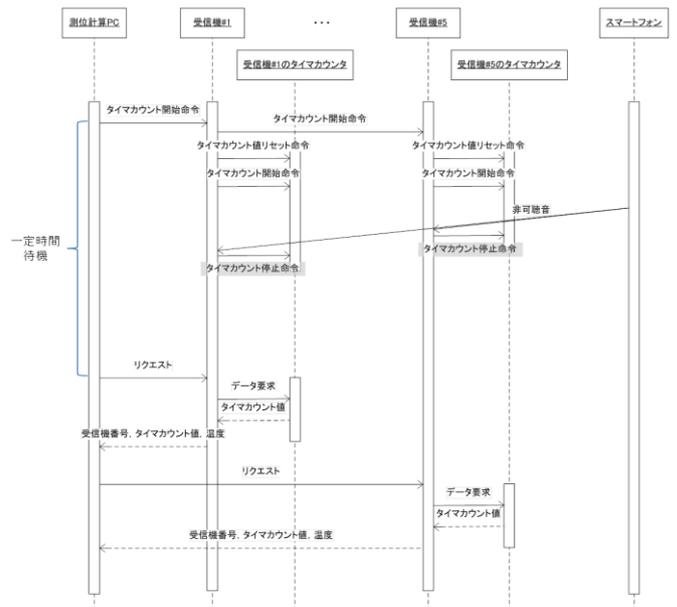


図4 測位システムのシーケンス

4. 受信機と送信機

4.1 非可聴音受信機

非可聴音受信機の構成を図5に示す。非可聴音受信機はマイクセンサと信号検知のための各種回路、データ取得やRS-485通信を行うマイコンで構成される。信号検知のための回路は、マイクセンサからの入力を増幅させるプリアンプ、バンドパスフィルタで中心周波数帯域の外の周波数を減衰させ、中心周波数帯域の抽出を行うフィルタ回路、利得調整を行うAGCアンプ、信号の検波を行う検波回路を搭載する。マイコンには立ち上がり検出するコンパレータ、伝搬時間差取得のためのタイマカウンタ、立ち上がりのタイミングでタイマカウンタからタイマカウント値を取得するキャプチャの機能を実装する。

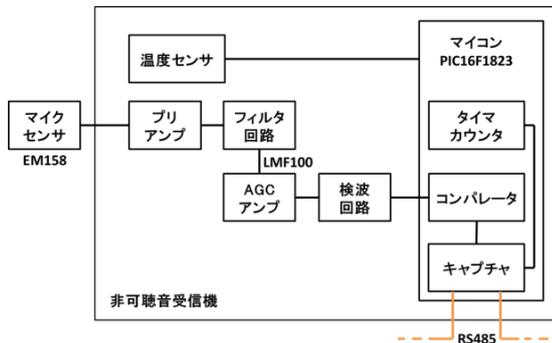


図5 非可聴音受信機の構成

この構成で既存の超音波受信機を元に試作した非可聴音受信機の概観を図6に示す。温度センサを内蔵し、マイクセンサを付け替え可能にするためマイクセンサコネクタを搭載している。各所にテストポイントとフィルタの有無や検波回路の構成を選択できるジャンパとフィルタの中心周波数、Q値などの調整が行える可変抵抗を搭載している。マイコンはPIC16F1823を使用し、内部タイマカウンタは2MHzで動作している。

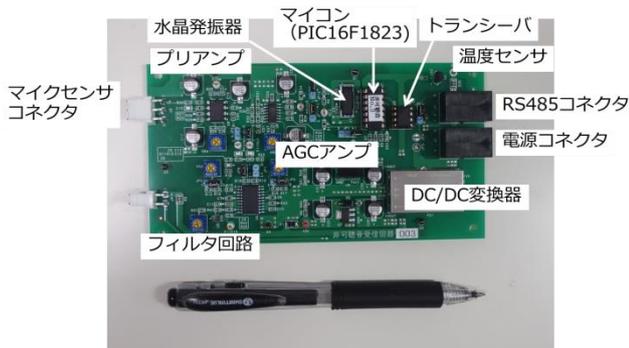


図6 試作した非可聴音受信機

4.2 スマートフォンからの非可聴音の発生

スマートフォンからの非可聴音発生はWAVEファイルを生成、再生して行っている。WAVEファイルはヘッダ部とデータ部で構成され、データ部の要素数は時間軸、データ

値は振幅値にあたる。以下の式で指定した周波数の正弦波を再現する。

$$S(n) = A \sin\left(\frac{2\pi fn}{f_s}\right) \quad \dots(2)$$

振幅値 S は、最大振幅値 A 、指定周波数 f 、要素番号 n 、サンプリングレート f_s を与えることで求まる。本実験ではビット数 16bit、サンプリングレートを 44.1kHz で設定し、最大振幅値を 16bit の最大値 32767 とした。

設定した周波数の音がスマートフォンから発生していることを確認するため、スマートフォンの音声出力端子の出力をFFTで測定した結果を図7に示す。各設定において指定した周波数の出力値が最も高くなっており、指定した周波数の音を発生できていることを確認した。

次に、指定した間隔と時間音が発生を確認するため、スマートフォンの音声出力端子の出力を取得した結果を図8に示す。設定は High 400 μ sec, Low 35msecで行い、出力結果から指定した間隔・時間正弦波を発生できていることを確認した。

実験に使用するスマートフォンは出力特性が良好だった Sony Ericsson の Xperia SO-01C を選定した。

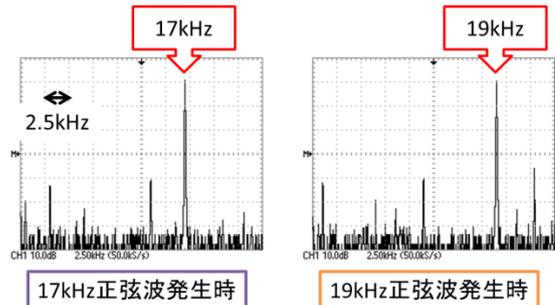


図7 指定周波数発生の確認

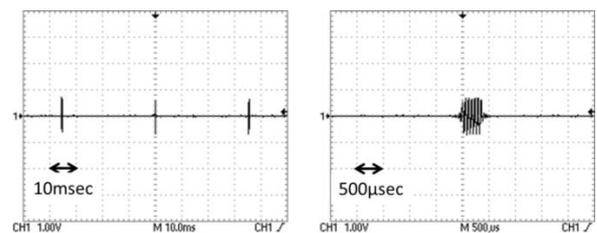


図8 指定間隔・時間正弦波発生の確認

5. 実験と評価

5.1 閾値の決定

非可聴音受信機のコンパレータの検出閾値決定と騒音環境におけるフィルタ効果確認するために受信実験を行った。静穏時と騒音時の両環境で測位できる検出閾値調査のため、静穏時と騒音時の2パターン、フィルタ効果を確認するため、フィルタの有無の2パターン、計4パターンで検波回路の出力を見る。静穏時は比較的静かな研究室(騒

音レベル 39~41dB), 騒音時は雑踏を想定した利用者の多い時間帯の食堂(騒音レベル 79~83dB)を実験場所を選んだ。発生周波数 17kHz, フィルタの中心周波数 17kHz, Q=4とし, スマートフォン-マイクセンサ間距離 1m で受信実験を行った結果を図 9 に示す。

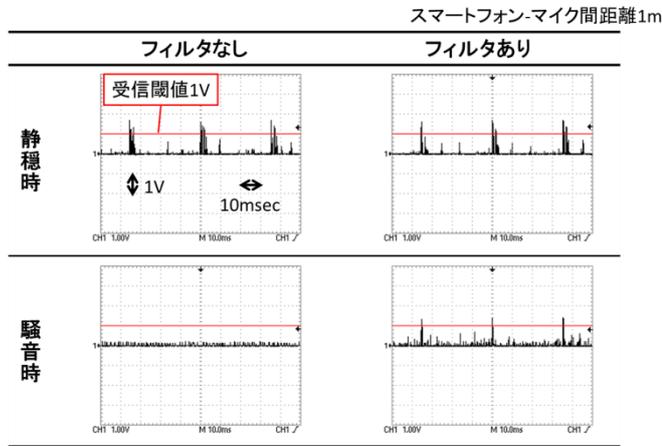


図 9 検波回路の出力

フィルタがある場合の静穏時, 騒音時において, バースト信号の出力レベルが 1.4V を超えることを確認した。また, マルチパスやノイズの出力レベルが 0.8V 以下であることを確認し, 出力レベルの変動を考慮に入れ, コンパレータの検出閾値を 1.0V に決定した。

次に, フィルタの有無による信号出力, ノイズの違いを見た時, 静穏時ではフィルタの有無による大きな違いは見られなかった。騒音時にはフィルタがない場合, 出力レベルが全体的に低くなりバースト信号の検出が困難になることが分かった。これは検波回路にダイオードと平滑コンデンサを採用しているため, 出力レベルが飽和し, 一定した状態では出力がなくなることが原因である。しかし, フィルタがある場合, ノイズが抑えられ信号との差が明確になり, バースト信号の検出が可能なレベルになることが分かった。よって, 騒音時におけるバースト信号検出にフィルタが有効であることを確認した。

5.2 タイマカウント値取得実験

測位に必要なタイマカウント値の取得実験として, 複数の距離でタイマカウント値の取得実験を行った。その実験構成を図 10 に示す。スマートフォンのスピーカの位置を原点(0,0)とし, スマートフォンの垂直方向を x 軸, 平行方向を y 軸とした。マイクセンサは x 軸 600mm 地点からスマートフォンの反対方向に 200mm 間隔で配置し, スマートフォンからのバースト音を遮らないように y 軸方向に 50mm 間隔を開けた。

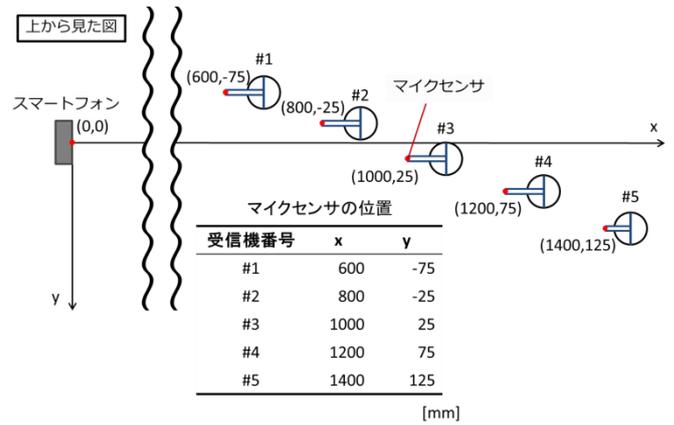


図 10 タイマカウント値取得実験構成

この構成で静穏時と騒音時のタイマカウント値取得を行い, 以下の式から求まるタイマカウント値の理論値と実測値の平均値を比較し, タイマカウント値が正常に取得できるか確認する。

$$CNT_i = \frac{D_i}{ct_{res}} \quad \dots(3)$$

タイマカウント値の理論値 CNT は, スマートフォン-マイクセンサ間距離 D , 音速 c , タイマカウント分解能 t_{res} を与えることで求まる。発生周波数 17kHz, フィルタの中心周波数 17kHz, Q=4とし, 取得間隔 300msec で 1000 回タイマカウント値を取得, 静穏時は研究室(騒音レベル 39~41dB), 騒音時は食堂(騒音レベル 79~83dB)を実験場所に選定し, 実験を行った。なお, 取得したタイマカウントのうち, スマートフォンと受信機の位置関係を無視した値や明らかに突出した値はマルチパスやノイズと判断し, 異常値として測位計算時に除いている。静穏時と騒音時でタイマカウント値取得した結果を表 1 に示す。受信機#1はスマートフォン-マイク間距離が最も短く, タイマカウント値が常に最小値となるため受信機#1を基準値とする。

表 1 タイマカウント値取得実験結果

受信機番号	#1	#2	#3	#4	#5
静穏時(39~41dB)					
タイマカウント値の差(理論値)		1140	2304	3480	4663
タイマカウント値の差(実測平均値)		1138.2	2271.4	3426.4	4598.2
標準偏差	基準値	7.7	7.6	7.1	6.9
タイマカウント値誤差		1.8	32.6	53.6	64.8
測距誤差[mm]		0.3	5.6	9.2	11.1
騒音時(79~83dB)					
タイマカウント値の差(理論値)		1140	2304	3480	4663
タイマカウント値の差(実測平均値)		1148.6	2303.6	3521.2	4753
標準偏差	基準値	43.5	58.6	90	73.2
タイマカウント値誤差		8.6	0.4	41.2	90
測距誤差[mm]		1.5	0.1	7.1	15.5

静穏時, 騒音時の各距離において理論値と実測平均値の差は小さく, 正常にタイマカウント値が受信できていることを確認した。また, タイマカウント値誤差は距離が離れるほど大きくなる傾向にあることが分かった。静穏時には各距離の標準偏差が 10 以下であり, ばらつきが非常に少な

いが、騒音時では標準偏差が大きく、ばらつきが大きくなることが分かった。

測距誤差は測距値と実際の距離の差である。測距値は音速とタイマカウント値、タイマカウント分解能を掛けて求まる。測距誤差はタイマカウント値誤差に比例する。測距誤差を見た時、約 600~1200mm の距離であれば静穏時、騒音時で 10mm 以下、約 1400mm の距離であっても 16mm 以下の誤差で測距できることが分かった。

5.3 測位実験

簡易的な測位システムの構築を行い、静的な測位実験を行った。その実験構成を図 11 に示す。フレームの天井の四隅と中央の計 5 箇所にマイクセンサを垂直床向きに設置し、その真下に送信地点を設け、スマートフォンをスピーカが天井に向くように設置する。マイクセンサの高さは一定にしないことで誤差を小さくする工夫を加えている。送信地点における高さはスマートフォンの厚さを表している。

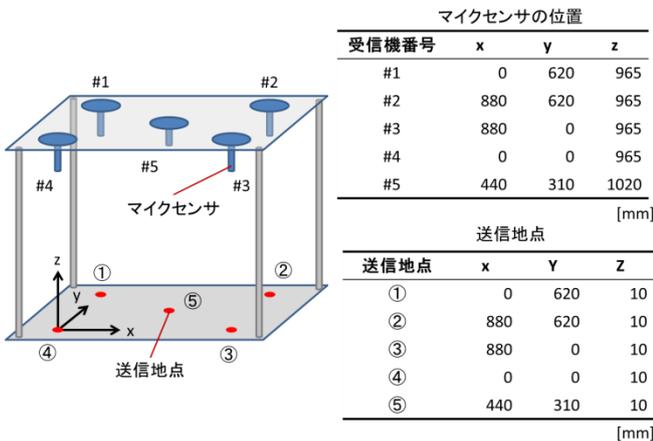


図 11 測位実験構成

この構成に基づいて図 12 に示す実験環境を用意した。スチール製のフレームと天井と床に見立てたアクリル板で小さな測位環境を再現している。マイクセンサは天井に設置し、その上に受信機を置いている。

この環境を用いて静穏時と騒音時の測位を行い、その精度を確認する。静穏時は比較的静かな研究室（騒音レベル 32~37dB）、騒音時は雑踏を想定した利用者の多い時間帯の食堂（騒音レベル 74~83dB）を実験場所を選定した。発生周波数 17kHz、フィルタの中心周波数 17kHz、Q=4 とし、取得間隔 300msec で 500 回タイマカウント値を取得、測位を行う。なお、取得した測位値が明らかに測位範囲を超えている場合、タイマカウント値の取得に成功した受信機数が 4 未満の場合、測位失敗としている。その実験結果を表 2 に、静穏時と騒音時の座標的な測位結果をそれぞれ図 13 と図 14 に示す。なお、表 2 における平面内の誤差は送信位置と計測値の差から三平方の定理で求めている。

静穏時において平面内の平均誤差は最小で 4.4mm、最大

で 17.9mm、標準偏差は最小で 2.6mm、最大で 36.2mm となり、誤差とばらつきが小さく、非可聴音でも高い測位精度が得られることを確認した。静穏時の測位結果を示した図 13 では最も誤差の小さかった送信地点⑤の測定値がマイクセンサ位置のマーカに隠れてしまったため、拡大図を加えている。騒音時において平面内の平均誤差は最小で 45.7mm、最大で 85.7mm、平面標準偏差は最小で 69.5mm、最大で 135.3mm となり、静穏時に比べて誤差とばらつきが大きくなったものの、騒音環境であっても理想的な送受信位置ならば誤差とばらつきを抑えられ、誤差 50mm 以下の測位精度が得られることを確認した。

両環境においてマイクセンサ 4 点の中央の真下である送信地点⑤が最も誤差が小さくなっており、この場所が理想的な測位位置に近いと思われる。高さの平均誤差、標準偏差は平面よりも大きくなったが、屋内測位において高さ情報が要求されるケースは少ないため、平面よりも誤差、ばらつきが与える影響は小さいと思われる。

また、測位成功率は静穏時の各送信位置で約 80% のとなり、騒音時では送信位置によって 50% 以下と低い成功率となった。しかし、送信位置①のように約 70% と静穏時に近い測位成功率得られるケースもあった。なお、騒音時の結果から、測位成功率と誤差・ばらつきの関連性は薄いことが分かった。

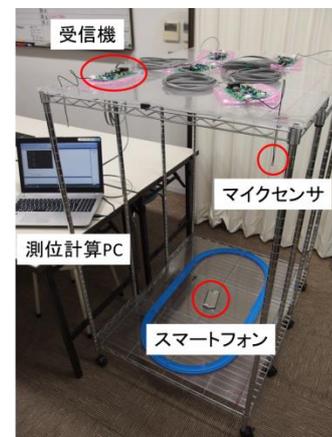


図 12 測位実験環境

表 2 測位実験結果

送信位置	①	②	③	④	⑤	平均値
静穏時 (32~37dB)						
平面平均誤差	17.9	17.5	13.9	11.5	4.4	13.1
高さ平均誤差	10.8	15.0	10.4	9.1	7.6	10.6
平面標準偏差	30.5	36.2	19.2	34.5	2.6	24.6
高さ標準偏差	19.1	28.9	12.4	27.1	33.6	24.2
計測成功率	418/500	403/500	394/500	407/500	398/500	
騒音時 (74~83dB)						
平面平均誤差	69.4	85.7	67.9	82.4	45.7	70.2
高さ平均誤差	111.1	137.3	96.8	163.8	77.7	117.3
平面標準偏差	84.9	70.5	69.5	91.2	135.3	90.3
高さ標準偏差	124.4	110.8	107.6	213.3	101.6	131.5
計測成功率	361/500	266/500	227/500	143/500	294/500	

[mm]

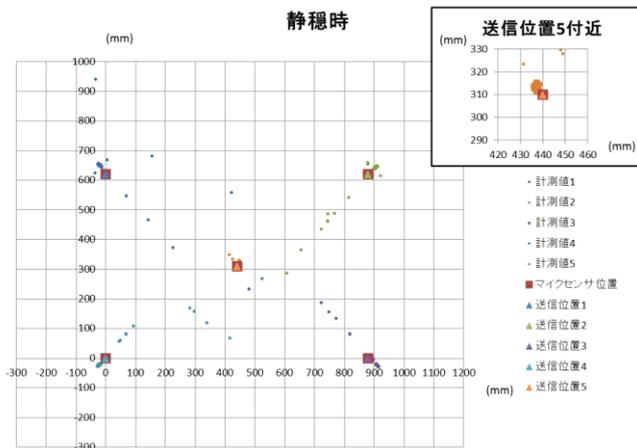


図 13 静穏時の測位結果

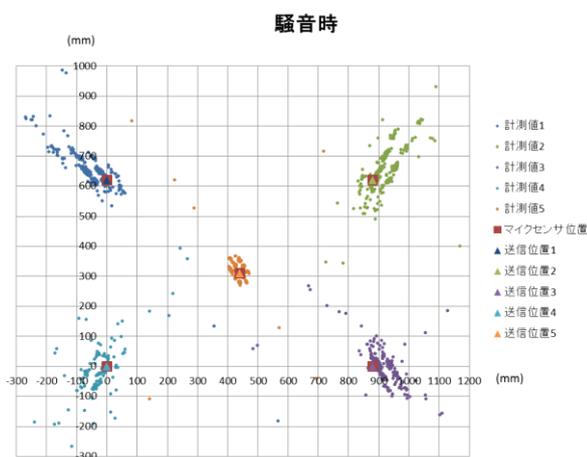


図 14 騒音時の測位結果

6. まとめ

スマートフォンを送信機として用いるため、スマートフォンから発生可能な非可聴音を用いて屋内測位を行うシステムを検討、開発し、検波閾値決定、カウント値取得実験の後に測位実験、評価を行った。その結果、静穏時において高い測位精度が得られることと騒音時においてもフィルタを用い、理想的な送受信位置で測位を行うことで誤差 50mm 以下の精度が得られることを確認した。これらの結果からスマートフォンを用いた測位システム実現の見通しを得た。

今後は、移動体にスマートフォンを装着し、移動体の位置を追跡する動的な測位実験を予定し、その実験環境の構築、実験結果の評価を行う。また、アナログ処理をデジタル処理に切り替え、デジタル処理によるフィルタリングや多ユーザ収納のためにユーザ識別を行う手法を検討し、開発を行う。

謝辞

本研究は文部科学省科学技術研究費基盤(C)課題番号 24500219 の補助を得て行った。

参考文献

- 1) 村田正秋, 瀬川爾郎, 鳥本幸幸: IMES の技術動向: シームレス三次元測位・航法の新技术, 電子情報通信学会誌, ISN-09135693, Vol.95, No.2, pp.119-124(2014).
- 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, page.1845-1855(2009).
- 3) 興侶正克, 大隈隆史, 石川智也, 藤田武志: 装着型自蔵センサモジュールを用いた歩行者の位置・方位計測技術, 電子情報通信学会誌, Vol.92, No.4, pp.268-275(2009).
- 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システムの構成と検証実験, 測位航法学会論文誌, Vol.3, No.1, pp.1-8(2012).
- 5) Google: Supported Media Formats , Android Developers, 入手先 (<http://developer.android.com/guide/appendix/media-formats.html>) (参照 2013-11-19).
- 6) 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, 平成 26 年度 測位航法学会 全国大会(オンライン), 入手先 (<http://www.gnss-pnt.org/taikai26/yoko26/murata.pdf>) (参照 2014-5-16).
- 7) 大谷晃司: [MWC2014] 非可聴音で屋内の位置測定、エムティアーアイが展示・デモ, ITPro(オンライン), 入手先 (<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20140227/540046/>) (参照 2014-5-16).