

シミュレーションによる超音波測位システムの 測位誤差要因の検証

屋良朝克^{†1} 五百蔵重典^{†1} 田中 博^{†1}

筆者らは高精度な測位を実現させるため、電波などを用いたものより細かく測距分解能とれる超音波を用いた測位システムを構築した。その測位システムの測位精度は、水平方向で 30mm、垂直方向で 150mm 程度の測位が可能であり、電波を用いたものより高精度である。しかし、現在使用しているマイコンの動作周波数による測距分解能から、シミュレーション上では、水平方向 0.21mm、垂直方向 0.72mm で測位が可能である事が分かった。本論文では、実際に発生している測位誤差要因の検証を行うため、超音波センサの取り付け誤差による影響、受信機と送信機の口径の寸法による影響、マイコンの水晶発振器の発振誤差による影響、温度測定誤差による影響を検証し、検証した測距誤差原因による測位誤差をシミュレーションにより検証する。

Verification of Positioning Error Factor of Ultrasonic Positioning System by Simulation

CHOKATSU YARA^{†1} SHIGENORI IOROI^{†1} HIROSHI TANAKA^{†1}

1. はじめに

GPS を利用したサービスは様々あり、ユーザの現在位置を提示するだけでなく、ユーザの動線把握を行うなどしてビジネス展開に利用するものや、現在位置から目的地までのナビゲーションを行うなど、我々の身近なところでも利用されている。しかし、屋内での利用は GPS の信号が建物の壁などに遮蔽されてしまうという観点から難しい。屋内での位置情報の利用は、商用利用にとどまらず、屋内での子供や老人の見守りや、オフィス内の人の位置に応じた空調管理、災害時のビル内での避難誘導など人々の安全や災害対策などへの期待もできる。そのため、屋内での測位システムの開発が盛んに進められており、実用的な屋内測位システムの実現を見越した屋内地図制作¹⁾、ナビゲーションシステムの構築なども進められている。

現在提案されている屋内測位システムとして、Wi-Fi の電波を用いた測位(AOA, TOA, RSS, Fingerprinting)、GPS 互換信号を用いた測位(IMES)、超音波などの音波を用いた測位、RFID タグを用いた測位、スマートフォン内蔵のモーションセンサを用いた測位などがある。しかし、これらの測位は、測位精度面、コスト面などに問題があるため、現状では、超音波や非可聴音などの音波を利用した測位、スマホ内蔵のセンサを利用したデッドレコニングと屋内地図情報を用いたマップマッチングを組み合わせた測位システム²⁾が、コスト面や測位精度の観点から屋内測位手法と

して有力になりつつあると思われる。この測位システムは、測位誤差 300mm 程度と比較的高精度で測位でき、ユーザのスマートフォンを利用しているため、特別なハードなどを不要とした構成としている。

筆者らは、視覚障害者へのナビゲーション、電動車いすの自動走行、高齢者の見守りなど、主に、福祉支援に適用するための測位システムの構築を目的とし、超音波測位システムを構築³⁾した。この測位システムは、コスト面では不利であるが、音波を利用しているため水平方向で 100mm 以下の高精度な測位が可能である。視覚障害者を商店などで特定の商品へナビゲーションするためには、健常者と比べ、高精度な測位が必要となり、電動車いすの自動走行の際にも安全面の観点から高精度が必要になることは明らかである。筆者らが構築した超音波測位システムは、水平方向 30mm、垂直方向 300mm 程度の測位精度で、水平方向での測位精度は、従来の測位システムと比較して高精度であるが、垂直方向の測位への利用は難しいのが現状である。

筆者らは、測位システムの測位精度向上のため、測位システムで発生している測位誤差要因を取り除き、より高精度な精度な測位システムの実現のため、誤差要因の検討を行った。

本論文では、超音波センサの取り付け誤差による影響、受信機と送信機の口径の寸法による影響、水晶発振器の発振誤差による影響、温度測定誤差による影響を検証し、検証した測距誤差要因による測位誤差をシミュレーションにより検証する。

^{†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. 関連研究

非可聴音や超音波などの音波を用いた測位システムは、伝搬速度の関係から、電波を用いた測位システムより高精度で測位することが容易である。そのため、数多くの測位システムが提案されている。ここでは、高精度で測位可能な音波を利用した関連技術について述べる。

超音波を利用した測位システムとして、NEC製のSmartCoordinator⁴⁾、古河機械金属株式会社製のZPS-3D⁵⁾などがある。これらのシステムは、測位対象となるロボットやユーザの手首などに超音波を発信するタグを取り付け、タグなどから送信される超音波を受信し、測位を行う。3次元方向の測位が可能であり、測位精度は100mm以内と高精度な測位システムとなっている。40KHz帯の周波数を使用しており、電波でタグをコントロールし、超音波発信のタイミングを指示する。看護師の動線把握や店舗や工場などで来店者、作業者の安全管理強化や工場のピッキングなどの目的で利用されている。

近年では、スマートフォンの普及により、スマートフォン内蔵センサを用いた測位とスマートフォンのマイクروفオンやスピーカーを利用した非可聴音、超音波に近い高周波の音波を用いた測位を組み合わせた手法のサービス展開が進められている。一般に普及しているスマートフォン内蔵のスピーカー、マイクروفオンなどを利用することにより、専用ハードが不要となり、それによるコスト削減、その他内蔵センサを利用できることによる高精度かつ低コストな測位システムが構築できる利点がある。このスマートフォンの非可聴音や超音波を利用した測位として、スマポ⁶⁾、SONICNAUT²⁾、AISLE⁷⁾などがある。

スマポは、スマートフォン内蔵のマイクروفオンが位置情報を含んだ音波を受信することで、ある一定の範囲内にいることを検知する。店舗などの来店の際に来店ポイントを付加する目的で利用されており、店舗などが店内放送で利用しているあらかじめ設置された一般的なスピーカーが利用でき、店内BGMと一緒に位置情報の発信ができるためコスト負担が少ないという利点がある。しかし、測位精度は、位置情報発信源の間隔に依存するため、音波を利用した測位システムと比較して精度は低い。

SONICNAUT、AISLEは、スマートフォン内でPDR、マップマッチング、音波測位を組み合わせた測位システムで、高精度かつ低コストな測位システムを構築している。測位精度は、SONICNAUTで300mm程度、AISLEはスマポ同様の測位原理のため、1m～数m程度の測位精度である。電波を用いた測位に比べると高精度であるが、超音波を用いた測位システムに比べると測位精度は低い。

筆者らも同様に、スマートフォンの17KHzの周波数帯の非可聴音を用いた測位システムを開発⁸⁾しており、静的、動的な測位において測位が可能である事を確認している。

3. 筆者らの構築した測位システム

3.1 測位原理

筆者らが構築した超音波測位システムの測位原理を図1に示す。超音波を4点以上受信し、音波の到達時間差を求めることで伝搬時間 t 、測位対象の x 、 y 、 z を算出する。受信機同士は、時刻同期を行っているが、受信機と送信機の時刻同期を行っていないため、送受信機間の伝搬時間は直接測定できない、しかし、各受信機に到達する音波の伝搬時間差(t_i :遅延時間)は計測可能であり、最低4つの受信点があれば測位可能となる。また、すべての受信点を使用して測位しており、受信点数が向上すると一般に測位精度が大きく向上する。

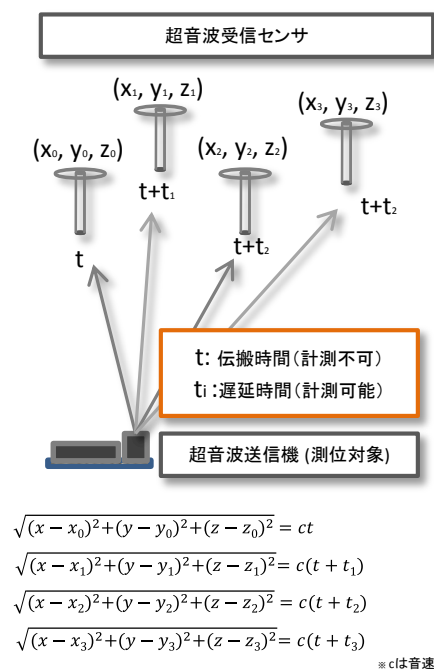


図1 構築した測位システムの測位原理

3.2 システム構成

筆者らが構築した超音波測位システムは、天井に多数の超音波受信センサ、天井裏に受信センサと対になっている超音波受信ユニットがあり、4点以上の受信センサが超音波を受信することにより、測位対象を測位することができる。測位システムの構成を図2に示す。測位対象となるユーザやロボットなどは、超音波送信機を帽子やブレスレットなどに搭載して所持する。測位方式は、送信機と受信機の位置関係がGPSと逆であるため、逆GPS法と呼ばれており、この測位方式の特徴はGPSと同様に、送信機と受信機の時刻同期が不要である点やユーザ識別が可能である点などが挙げられる。

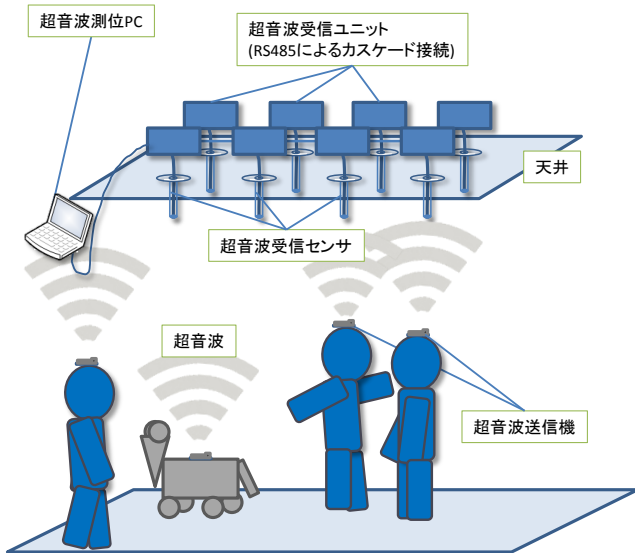


図 2 測位システムの構成

3.3 実験による測位精度の検証

本測位システムの測位精度を測定するため、測位精度を検証する実験を行った。構築した測位システムの測位精度検証実験の実験環境を図 3 に示す。検証実験環境は、本学情報学部棟に構築した超音波測位エリアの一部を利用して行った。送信機は、(600, 895)の位置から(1200, 2495)の範囲まで 50mm の格子間隔で移動させていき、各箇所です 5 回ずつ測位した。また、測位が可能であるかを判定するため、測位成功の基準として、測位結果の x, y 座標値の距離誤差が 100mm 以内である場合のみ測位成功とした。

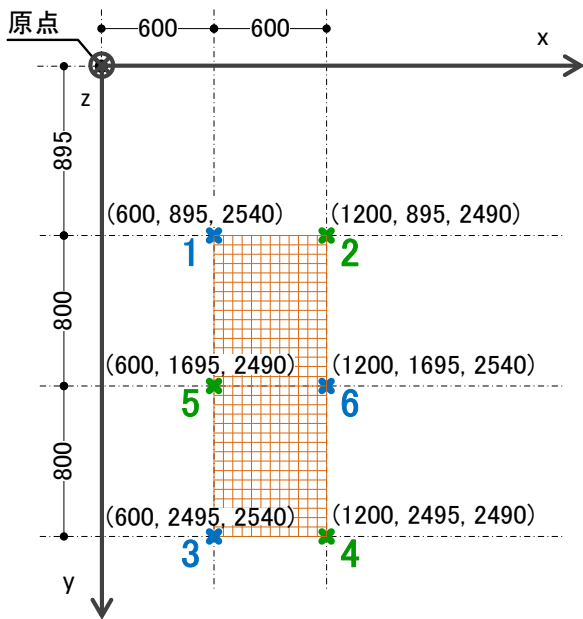


図 3 測位精度検証実験環境

検証実験によって得られた水平方向の測位精度を表 1、

垂直方向の測位精度を表 2 に示す。検証実験結果から本測位システムの測位精度は、受信点 6 点を使用する、6 点測位において、水平方向では 32.91mm、垂直方向では、131.66mm であることが明らかとなった。また、4 点測位においては、大きく測位精度が低下しており、測位成功率も 5、6 点測位に比べて大きく低下していることが明らかとなった。5 点以上で測位した場合の測位精度は、電波を用いた他の測位システムと比べて比較的高精度と言えるが、本測位システムで使用しているマイコンの周波数は 2MHz であり、測距分解能は、音速を 340m/s と仮定して、0.17mm となる。この測距分解能から、現状の測位精度より高精度で測位が可能であると推察できる。そのため、シミュレーションにより本測位システムの本来の測位精度を検証する。

表 1 水平方向の測位精度【mm】

平面方向	平均	標準偏差	最大値	測位成功率
4 点測位	63.15	27.63	120.50	55 (12.8%)
5 点測位	35.40	9.89	107.84	426 (99.5%)
6 点測位	32.91	6.78	75.34	412 (96.3%)

表 2 垂直方向の測位精度【mm】

三次元	平均	標準偏差	最大値	測位成功率
4 点測位	370.88	231.03	886.94	55 (12.8%)
5 点測位	113.64	45.54	265.77	426 (99.5%)
6 点測位	131.66	39.02	315.54	412 (96.3%)

3.4 シミュレーションによる測位精度の検証

本測位システムの本来の測位誤差を検証するため、シミュレーションでの測位精度検証を行った。水平方向の測位精度を表 3、垂直方向の測位精度を表 4 に示す。シミュレーションの際の環境は図 3 と同様に 50mm 格子上に測位を行い、測位成功判定は、x, y 座標値の距離誤差が 100mm 以内である時、測位成功、100mm 以上の場合は、測位失敗とした。タイマカウントに使用しているマイコンの周波数、使用する受信機などは、3-3 節での測位精度検証実験と同様の環境になるようにし、シミュレーションを行った。

シミュレーション結果から、本測位システムは 6 点測位において、水平方向 0.21mm、垂直方向は、0.72mm の精度で測位が可能である事が明らかとなった。この結果から筆者らの測位システムの本来の最大測位精度は、1mm 以下であることがわかり、本測位システムの測位精度検証結果と比較して、大きく異なることが確認できた。そのため、この測位誤差要因の追究と検証を行うこととした。

表 3 水平方向の測位精度

平面方向	平均	標準偏差	最大値	測位成功数
4点測位	11.22	16.41	90.73	291 (67.8%)
5点測位	0.29	0.19	0.98	429 (100%)
6点測位	0.21	0.12	0.58	429 (100%)

表 4 垂直方向の測位精度

平面方向	平均	標準偏差	最大値	測位成功数
4点測位	64.09	96.26	690.8	291 (67.8%)
5点測位	1.06	0.73	3.35	429 (100%)
6点測位	0.72	0.48	2.34	429 (100%)

4. 測位誤差要因検証

4.1 静的な測位誤差要因の検証

静的な測位誤差要因として、受信センサの設置誤差による影響と送受信部の口径の寸法による影響が挙げられる。静的な測位誤差要因が与える測位誤差のイメージを図 4 示す。受信センサは、専用の治具を用いて設置したが、人の手による取り付けであるため、数ミリ程度の取り付け誤差が発生していると考えられる。そのため、レーザーレンジファインダーや鉄定規などを用いて受信センサの設置誤差の測定を行った。測定結果から、本測位システムでは 2～5mm の設置誤差が発生していることが確認できた。

また、送受信部の口径の寸法は 10mm であり、送信部の中央から送信される音波と送信部の端から送信される音波では、水平方向に 5mm 程度の位置誤差が発生する。さらに、受信センサの口径も同様に 10mm であるため、それらの合計から水平方向で 10mm の位置誤差が発生していると考えられる。

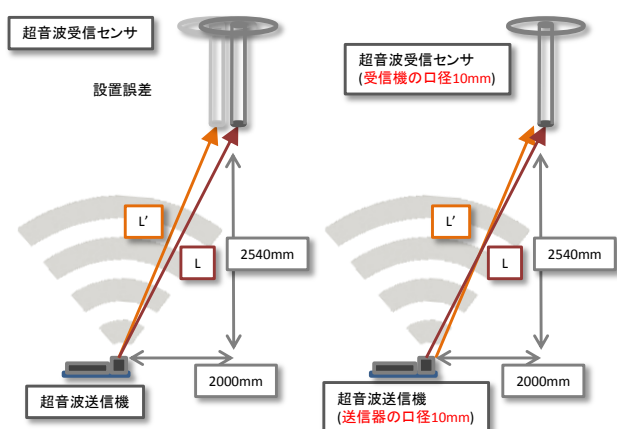


図 4 設置誤差及び送受信部の口径の影響による測位誤差

4.2 水晶発振器の発振誤差の測定

測位システムで使用している水晶発振器の発振周波数に

誤差が生じた場合、測距の際に使用している測距に誤差が発生する。そのため、水晶発振器の発振誤差をオシロスコープで測定し、発振誤差の検証を行った。発振誤差の検証では、4 個の受信機を用い、それぞれの発振周波数を 100 回取得し、平均と標準偏差を算出した。水晶発振器の発振誤差の測定結果を表 5 に示す。

検証結果から、測位システムで発生している発振誤差は平均中、最大で 0.003(MHz)であることが明らかとなった。

表 5 発振周波数の平均と標準偏差

	平均 (MHz)	標準偏差
受信機 1	7.998	0.038
受信機 2	8.000	0.043
受信機 3	7.997	0.042
受信機 4	7.999	0.040

4.3 温度測定誤差の測定

本測位システムは音速の算出のため、超音波受信ユニットに内蔵している温度センサから気温の取得を行っている。音速は、1℃の温度差で 0.61m/s 変化するため、温度を正確に取得できない場合、測位精度に大きく影響を及ぼす可能性があり。これまで検証してきた測距誤差に比べると大きな測距誤差になる可能性がある。また、筆者らの測位システムは、温度センサを内蔵した受信ユニットを天井裏に配置しており、その関係上、天井裏の温度を利用して測位している。しかし、実際は、廊下の気温を利用して音速を算出すべきであり、天井裏と廊下に気温差がある場合、測位精度が低下する恐れがある。そのため、廊下と天井裏の気温差の測定を行った。

測定方法は、天井裏にある超音波受信ユニットに内蔵されている温度センサを利用して、天井裏に配置されているすべての受信ユニットの温度センサ (34 個) から温度を取得し、300 回の平均を求めた。また、廊下の気温は、予備の超音波受信ユニット (5 個) を利用し、同様に 300 回の平均気温を求めた。求めた温度差の平均を表 6 に示す。この結果から廊下と天井裏の気温差は、0.25～0.95℃であることが明らかとなった。

表 6 廊下と天井裏の温度差検証結果 (平均)

日付	廊下	天井裏	気温差
2014/04/23	22.39℃	22.64℃	0.25℃
2014/05/05	23.10℃	22.15℃	0.95℃

5. シミュレーションによる測位誤差検証

これまで検証してきた測位誤差要因が、測位精度にどのような影響を与えるかを検証するため、各測位誤差要因か

表 7 測位誤差検証シミュレーションパラメータ

測位誤差要因		平均	標準偏差	備考
気温差	天井裏の気温	23.10℃	0.86	2014/05/05 の気温を利用 (気温差は 0.95℃) 同上
	廊下の気温	22.15℃	1.10	
送受信部の口径の寸法		10mm	0	静的な誤差であるため標準偏差は 0
受信センサの設置誤差		2.5mm	1.0	2~5mm の範囲で設置誤差を発生させる
水晶発振誤差の発振周波数		7.99MHz	0.04	8MHz を使用 (0.01MHz の誤差)

表 8 シミュレーションによる測位誤差検証結果 【単位: mm】

測位誤差要因	測位誤差 (平均)	測位誤差 (標準偏差)	2 次元距離誤差	3 次元距離誤差
天井裏と廊下の気温差	(0.13, 0.02, 4.89)	(0.27, 0.21, 7.04)	0.31	7.02
送受信部の口径の影響	(5.02, 5.28, -0.51)	(5.96, 4.93, 27.42)	9.56	24.98
受信センサの設置誤差	(1.02, 1.22, -0.17)	(1.66, 1.47, 7.99)	2.40	6.93
水晶発振器の発振誤差	(0.06, -0.01, 2.09)	(0.46, 0.29, 15.34)	0.44	12.34
すべての測距誤差要因の合計	(6.61, 6.36, 7.90)	(4.59, 3.64, 27.34)	10.21	26.25

ら、測位誤差をシミュレーションした。この時のシミュレーションパラメータを表 7 に示す。ここで、シミュレーションパラメータは、4 章での検証結果を利用する。測位誤差要因となるパラメータの平均値と標準偏差から正規乱数を発生させ、超音波測位シミュレーションを行う。シミュレーション環境条件は、3-3 節の環境と同様とし、測位結果の x, y, z の各平均と標準偏差、2 次元距離誤差、3 次元距離誤差を算出した。また、タイマカウント値の変動は、測位システムで発生しているタイマカウント値の標準偏差から取得した値である。シミュレーション結果を表 8、測位

結果をプロットしたものを図 5 示す。シミュレーション結果から、各測距誤差要因をすべて含めた測位誤差は水平方向で 10.21mm、垂直方向で 26.25mm であることを確認した。測位システムの実際の測位精度は水平方向 33mm 程度、垂直方向 132mm 程度であるため、現状では、すべての誤差要因が検証できていないことが明らかとなった。

また、温度測定誤差による測位誤差、水晶発振器の発振誤差による測位誤差は、水平方向の測位誤差に対して、垂直方向の測位誤差に大きく影響していることや、受信センサの設置誤差の影響による測位誤差や送受信部の口径の寸法による影響など静的な誤差要因が水平方向、垂直方向に拘わらず測位誤差大きく影響していることが、今回のシミュレーション結果から明らかとなった。このことから、現状の測位システムで発生している垂直方向の誤差 (132mm 程度の誤差) 原因が温度測定誤差や、廊下と天井裏の気温差による誤差が大きく影響している可能性があり、これらの誤差要因を取り除くことで、垂直方向の測位精度を大きく向上できると期待できる。

6. まとめ

本論文では、筆者らの測位システムで発生している測位誤差原因の追究のため、超音波センサの取り付け誤差による影響、受信機と送信機の口径の寸法による影響、マイコンの水晶発振器の発振誤差による影響、温度測定誤差による影響を検証し、検証した測距誤差原因による測位誤差をシミュレーションにより検証した。その結果、すべての測距誤差要因を含めた場合、水平方向で 10.21mm、垂直方向 26.25mm の測位誤差になることを確認した。実際の測位シ

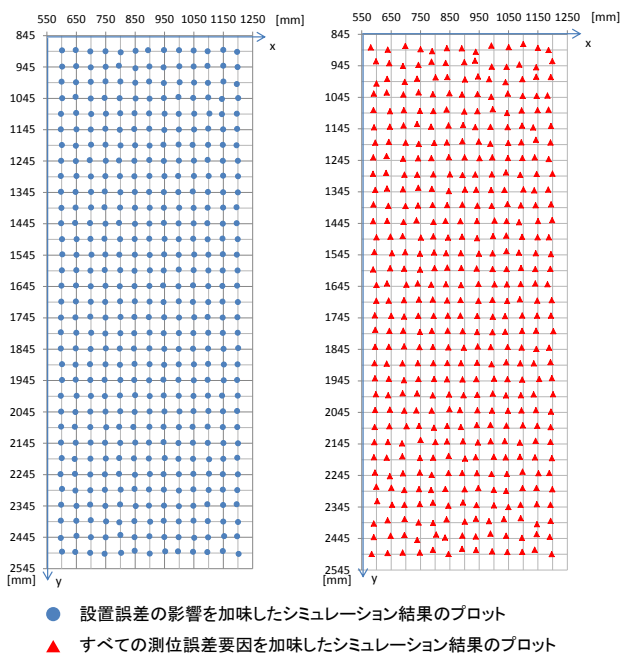


図 5 誤差要因を加味したシミュレーションの測位結果

システムでは、水平方向 33mm、垂直方向 132mm 程度発生していることから、すべての測位誤差要因は検証できていないことが明らかであり、そのため、今後も測位誤差要因の究明を進めていく必要がある。

また、今回のシミュレーションで廊下と天井裏の気温差による測位誤差や、水晶発振器の発振誤差による測位誤差は、垂直方向に大きく影響を与えることが明らかとなり、受信センサの設置誤差による測位誤差要因などの静的な測位誤差要因は、水平、垂直に拘わらず大きく測位誤差に影響を与えることが明らかとなった。このことから、垂直方向の測位誤差を解消するためには、温度差による誤差原因を取り除くことや、より高精度な水晶発振器を使用することが測位精度の向上になる可能性があるという知見が得られた。

参考文献

- 1) Google Maps インドアマップ概要
<<https://www.google.com/maps/about/partners/indoormaps/>>
- 2) SONICNAUT<<http://www.sonicnaut.jp/>>
- 3) 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).
- 4) 超音波 3D 位置管理システム SmartCoordinator, NEC
<<http://jpn.nec.com/engsl/pro/smartcoordinator/>>
- 5) ロケーションシステム ZPS-3D, 古河機械金属株式会社
<http://www.furukawakk.jp/products/ZPS_2.html>
- 6) スマボ<<http://www.smapo.jp/>>
- 7) 吉澤 菜津子, 遠藤 貴裕, 永見 健一, 屋内位置情報における推定技術の開発と新しいサービスの展開について, 野口 健一郎, 大谷 真: OSI の実現とその課題, Intec Tech J, No.13, pp.44-51, 2013.
- 8) 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施策とその評価,
<<http://www.gnss-pnt.org/taikai26/yoko26/murata.pdf>>