

超音波センサを用いた屋内測位システム における測位エリア拡大の検討

羽田 昂史† 須永 光† 秋山 征己†
五百蔵 重典†† 田中 博††

我々は、屋内環境での人や移動体の測位という観点で、100mm程度の精度を要求条件とし、超音波を用いた測位システムについて検討している。超音波を利用する意義として、超音波の方が電波を用いる方式に比べて超音波の伝搬時間差が大きくなるため、マイコンでのマルチパスの影響除去が容易であるということが挙げられる。他にも電波法の制約を受けないという利点がある。

本研究では、より広域での測位を効率的に行うため、受信センサの設置間隔を広げる必要がある。そこで、1つの受信センサで超音波を受信できる領域を拡大することが望ましい。1つの受信センサで超音波を受信できる範囲を広げるため、複数の受信センサを球状に配置した物を1つの受信センサと構成することで、受信センサの視野角を拡大し受信エリアの広域化を図った。この球状に配置したセンサによる受信エリアの拡大の効果を実験的に検証し、設置間隔を求めた。また、球状に配置したセンサを用いた場合での測位精度検証実験を行い、球状センサが測位精度に劣化を与えないことを確認した。

Investigation of Area Expansion for Indoor Positioning System by Ultrasonic Wave

TAKASHI HADA† HIKARU SUNAGA†
MASAKI AKIYAMA† SIGENORI IROI††
HIROSHI TANAKA††

We have investigated indoor positioning system by ultrasonic signal, whose positioning accuracy is within 100 mm that is applicable for position detection of moving objects such as a person and goods trolley in a plants etc. The system by ultrasonic signal has

several merits, for example, the multi path effects can be easily removed because of its slow propagation velocity and it can avoid the radio regulations.

The technique for expanding positioning area has been investigated in this study. The prototypes of receiving unit that has multi ultrasonic sensors attached on the hemisphere are composed and their effects for expanding the area of detecting ultrasonic signal were evaluated. The validity of the proposed method was confirmed by the positioning experiments that clarified the positioning area and positioning accuracy.

1. はじめに

屋外での位置情報取得手段としてはGPSがあり、精度やカバーエリアの観点から確立したシステムとなっている。対して、屋内の位置情報取得手段としては電波を用いたもの、可視光を用いたもの、超音波を用いたものなどが研究をされているが、未だ確立したシステムはないのが現状である¹⁾。そこで我々は、測位精度が100mm程度で行える超音波を用いた測位システムの開発を行っている²⁾。超音波を用いた測位の利点として、屋内環境におけるマルチパスの影響を受けやすい電波を用いた方式に比べ、高精度で有ることや電波法の制約を受けないことが挙げられる。

超音波を用いた屋内測位システムには、Cricket³⁾、Active Bat⁴⁾やZPS-3D⁵⁾等がある。これらのシステムは基本的に送受信部間の同期を前提としており、音波と電波の伝搬時間差から距離を算出し3辺測量の原理によって測位を行っている。我々のシステムは時刻同期を必要とせず、超音波の伝搬時間差をもとに測位計算を行っている。

本報告では、測位可能エリアの拡大を目的とし、受信センサの設置間隔を広げる手法を検討した。設置間隔を広げるため、一つの受信チャンネルが超音波を受信できる範囲を広げることを考えた。そこで、複数の受信センサを球状に配置し、それを一つの受信センサとみなすことで視野角を拡大し受信エリアの拡大を図った。さらに、この球状に配置したセンサを用いた時の測位精度への影響を確認した。

2. システムイメージと測位方式

2.1 システム適用イメージ

我々が開発している超音波を用いた測位システムの適用イメージを図1に示す。超音波の受信センサと赤外線送信装置を天井などの周辺環境に設置する。超音波送信部を測位対象である人の頭や移動体の上に取り付ける。赤外線送信装置から赤外線IDを送信する。超音波送信部は赤外線を受信し、対応したIDを受信した場合のみ超音波を発信する²⁾。超音波を天井に取り付けられた複数の受信センサで受信し、超音波の受信時間差を用いて測位計算を行い測位対象の位置を算出する。

† 神奈川工科大学 大学院 情報工学専攻

Kanagawa Institute of Technology Information & Computer Sciences

†† 神奈川工科大学 情報工学科

Kanagawa Institute of Technology Department of Information & Computer Sciences

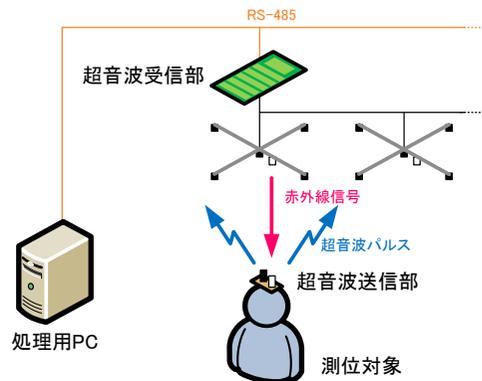


図1 システムイメージ

2.2 測位方式

超音波を用いた測位方式には二つの方式がある。送信部と受信部間の時刻同期を確保している同期方式、時刻同期を確保しない非同期方式である。我々の試作したシステムで用いた非同期方式での送信部と受信部の関係を図2に示す。

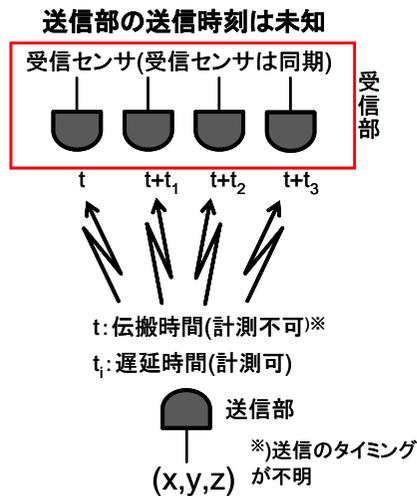


図2 測位方式

同期方式では超音波の送信時刻を受信部が把握しているため、超音波の伝搬時間が計測可能である。この伝搬時間から送信部と各受信センサ間の距離を算出できる。そのため、3辺測量により測位計算を行うことができる。

非同期方式では送信部と受信部を同期させていないため、送信部と受信部の距離を計測できず3辺測量を行うことが出来ない。しかし、受信センサ同士は同期しているので、伝搬遅延時間は計測が可能である。そのため、送信部と受信部の同期を必要とせず、伝搬遅延時間を用いて測位計算を行える逆GPS法⁶⁾を適用している。逆GPS法を用いた測位計算式を以下に示す。

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

tは最初に超音波を受信部が受信するまでの伝搬時間。またt₁, t₂, t₃はtからの各受信部が受信するまでの遅延時間である。遅延時間は計測することができるため、未知数は送信部の位置(x, y, z)の他にtが加わった4つとなる。そのため、最低4つの受信部が位置算出に必要となる。

2.3 超音波測位システムの構成

試作した超音波測位システムの基本構成を図3に示す。超音波受信部はマイコン(ルネサスH8/3052F), FPGA (Altera Cyclone II EP2C8), 赤外線送信用のPIC16F648A, 受信回路, サーミスタから成っている。受信回路はアンプとコンパレータから構成しており、受信した超音波の信号をアンプで増幅し、ローパスフィルタでノイズを除去したあとコンパレータで閾値と比較を行い電圧が閾値以上なら超音波を受信したと判断する。FPGAでは処理用PCから受信カウント開始命令を受信すると、FPGA内のタイマカウンタを動作させる。また、同時にPIC16F648を通して赤外線を送信する。受信センサが超音波を受信するとFPGA内のカウント値を保存する。現在の回路ではFPGA1台に70チャンネル分の受信回路を収容できる構成である。

超音波送信部は赤外線受信モジュール, PIC10F222, ドライバ回路, 超音波送信センサから成っている。赤外線受信モジュールで赤外線を受信すると, PIC10F222で40kHzの超音波を400μs間発信する信号を生成し, ドライバ回路を通して超音波を送信するものとした。

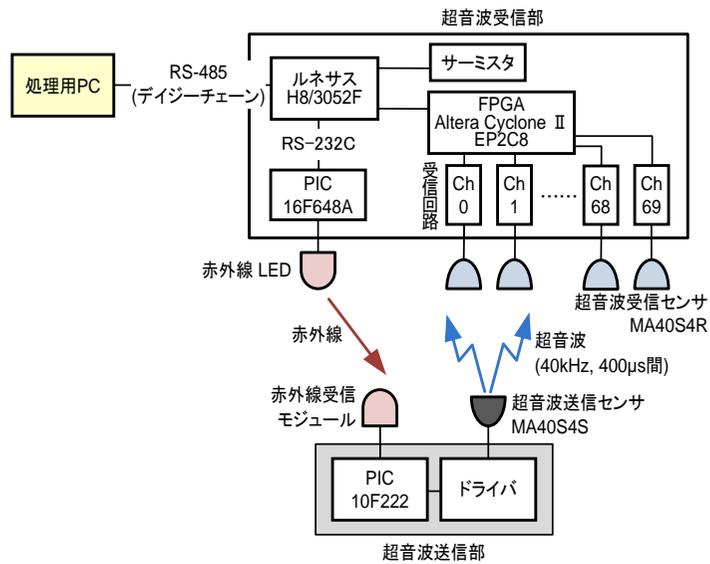


図3 システム構成

3. 受信エリアの拡大

3.1 受信エリア拡大の検討

測位を行えるエリアを効率的に広げるためには、受信センサの設置間隔を広げることが一つの解である。設置間隔を広げるために一つの受信センサで超音波の受信できる範囲を広げる必要がある。そこで、受信センサを球状に複数取り付け、一つのセンサとして構成することで、受信センサの視野角を拡大し受信エリアの拡大を図った。球状に配置したセンサを用いた時の受信判断として、取り付けられたセンサの1つ以上が超音波を受信したとき受信とする。

3.2 受信センサの個数と受信エリア

球状の複数のセンサを取り付けることを考える時、センサの取り付け個数や設定角度が重要となる。センサの取り付け角度は、超音波の受信に用いているセンサの受信角度が製品仕様により 80° であるため、超音波の受信領域に不感領域が生じないように余裕を持たせ 60° で取り付けることとした。受信センサの個数は3個の場合、4個の場合を実験的に比較することとした。試作した球状センサを図4に示す。

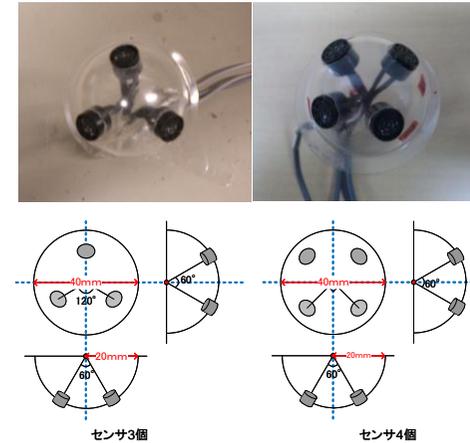


図4 球状センサ

球状に取り付けるセンサ個数の選定するため、床から受信センサまでの高さ 2000mm の時の単体センサ、球状センサ(3個)、球状センサ(4個)の受信エリアの比較を行った。受信センサを固定し、超音波送信部を床に置き 250mm 間隔のグリッドで動かしていき、どのエリアまで受信できるかを判定した。この時の実験結果を図5に示す。

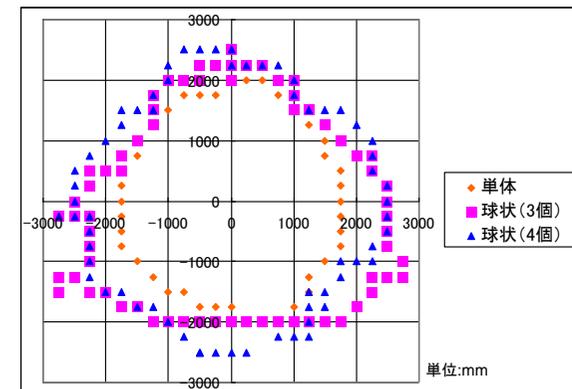


図5 センサ個数と受信エリア

単体センサに比べ、球状センサの 3 個、4 個の場合ともに受信エリアが広がっていることが確認できる。単体センサの受信エリアと面積比を比べた場合、3 個の球状センサでは 1.55 倍、4 個の球状センサでは 1.71 倍広げることが出来た。この結果から、より広がっている 4 個の受信センサを用いた球状センサを使用することにした。

3.3 送受信距離と受信エリア

超音波は指向性と到達距離の関係から送受信間距離により受信エリアの広さが変わってくる。そこで、距離による受信センサの設置間隔を求めるため、距離ごとで、どの程度受信エリアが変わるかを検証した。検証した距離は一般的なビルなどの建物での天井の高さを想定し、高さ 500mm~2500cm の間を 500mm 間隔で受信エリアの計測を行った。3.2 節で得られた結果から、単体センサと球状センサ (4 個) の高さごとの受信エリアの比較を行うことにした。表 1 に実験結果と受信センサ 4 つを正方形に配置した時に求められる設置間隔をまとめた。設置間隔を図 6 に示す。4 つの受信センサを正方形に配置することを考えた時、対角線上のセンサを受信エリアの半径 r 内に設置することにより、測位を行うために必要な 4 つの受信センサを同時に受信できることになる。このときの受信センサ間の 1 辺の長さ x を設置間隔とする。表 1 の設置間隔は外接円の半径と上記の考え方により求めた結果である。

表 1 受信エリア

距離	外接円の半径		設置間隔	
	単体	球状	単体	球状
500	800	1800	571.4	1285.7
1000	1300	2200	928.6	1571.4
1500	1500	2500	1071.4	1785.7
2000	1700	2700	1214.3	1928.6
2500	1800	2800	1285.7	2000.0

単位:mm

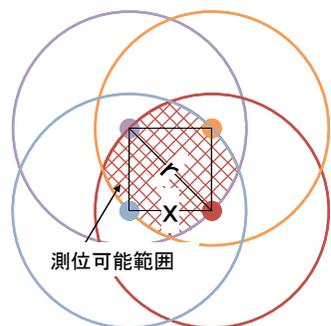


図 6 設置間隔

また、高さごとの受信エリアを図 7、図 8 に示す。図中の上部の点(0,0,0)が受信センサの設置位置となっている。

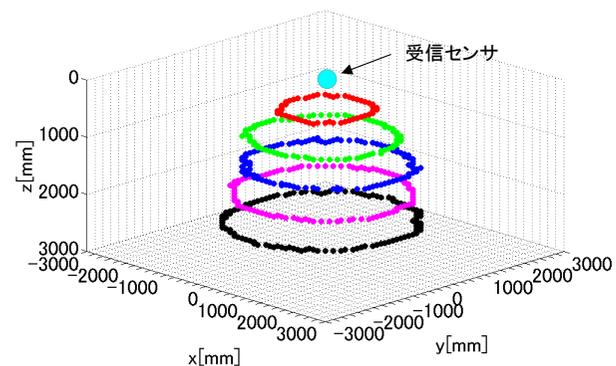


図 7 高さを受信エリアの関係(単体)

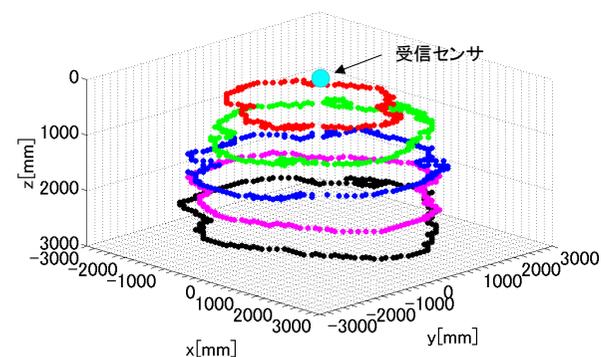


図 8 高さを受信エリアの関係(球状 4 個)

受信できる範囲を外接円で比較した場合、単体センサに比べ球状センサは高さ 500mm 以外の時は 1.5 倍程度のエリア拡大を行うことが出来た。500mm の時のみ、2 倍程度広がった理由として、送受信間の距離が近い為、微弱な信号を取得できたからだと考えられる。また、単体センサ、球状センサともに 1500mm の高さまでは広がっているが、2000mm と 2500mm ではほぼ同じような広さとなった。これは、送信センサの出力が距離を経るごとに低下するため、受信できなくなったためだと考えられる。

4. 測位実験と評価

4.1 測位実験

球状センサの測位精度への影響について確認するため、単体センサを用いたときの精度比較実験を行った。精度比較実験の構成を図9に示す。フレーム治具に超音波センサを取り付け天井に設置する。受信センサの設置位置は図中の表のとおりである。

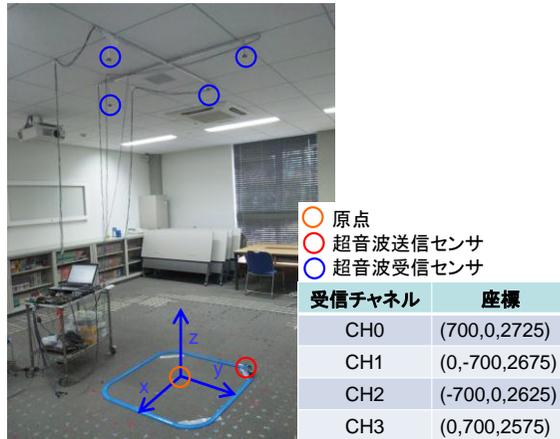


図9 実験構成

球状センサを用いて測位を行う時の構成を図10に示す。一つの球状センサに受信センサを4個取り付け、それぞれの受信センサをFPGAの受信チャンネルと接続する。各受信センサにはそれぞれ座標値を設定し、それを用いて測位計算を行う。

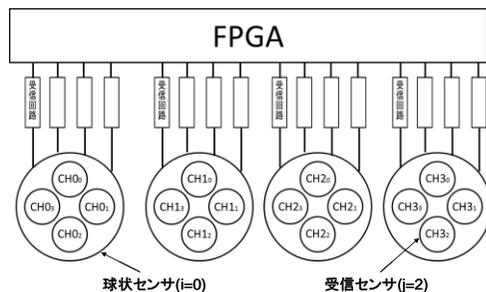


図10 球状センサを用いたシステム構成

球状センサを用いた時の測位計算式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \sqrt{(x-x_{ij})^2+(y-y_{ij})^2+(z-z_{ij})^2} &= ct \\ \sqrt{(x-x_{ij})^2+(y-y_{ij})^2+(z-z_{ij})^2} &= c(t+t_1) \\ \sqrt{(x-x_{ij})^2+(y-y_{ij})^2+(z-z_{ij})^2} &= c(t+t_2) \\ \sqrt{(x-x_{ij})^2+(y-y_{ij})^2+(z-z_{ij})^2} &= c(t+t_3) \end{aligned} \quad (2)$$

上式において球状センサを $i(i=0, 1, 2, \dots)$ 、球状センサ内で最初に受信したセンサを $j(j=0 \sim 3)$ とし、その座標値を (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) としている。

4.2 固定点の測位

超音波の送信部を原点(0, 0, 0)と各受信センサの真下に設置した時の測位を行った。静止物体の測位結果を表2に示す。単体センサ、球状センサを用いて測位を行った時、おおむね誤差 100mm 以内で測位できていることが分かる。両者を比較した時有意な差はなく、提案手法により測位領域の拡大が出来ることを確認した。

表2 実験結果

	単体			球状		
	結果	誤差	標準偏差	出力	誤差	標準偏差
位置A	□					
X=0	3.6	3.6	3.6	48.3	48.3	6.4
Y=0	-18.5	18.5	4.5	-70.3	70.3	10.1
Z=50	50.1	0.1	0.0	50.6	0.6	0.1
位置B						
X=0	12.8	12.8	3.4	-32.8	32.8	8.6
Y=700	819.1	119.1	11.0	690.8	9.2	7.1
Z=50	56.4	6.4	0.4	50.5	0.5	0.1
位置C						
X=0	-19.4	19.4	4.4	-20.7	20.7	6.3
Y=-700	-777.1	77.1	2.8	-754.3	54.3	5.6
Z=50	59.4	9.4	0.1	58.8	8.8	0.2
位置D						
X=700	777.6	77.6	7.2	742.4	42.4	5.1
Y=0	21.0	21.0	1.2	-28.1	28.1	6.3
Z=50	59.0	9.0	0.3	55.0	5.0	0.2
位置E						
X=-700	-763.8	63.8	6.5	-713.4	13.4	3.1
Y=0	9.2	9.2	0.3	6.3	6.3	4.8
Z=50	55.0	5.0	0.2	53.0	3.0	0.1

単位:mm

4.3 移動体の測位

4.2 節の実験結果より精度を確保できたため移動体での測位を行うことにした。本実験では、固定したレール上を走行する模型列車の移動軌跡を測定した。実験結果を図 11 と図 12 に示す。

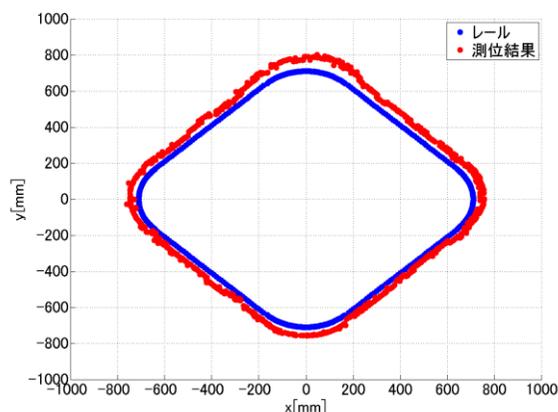


図 11 移動体測位結果(単体)

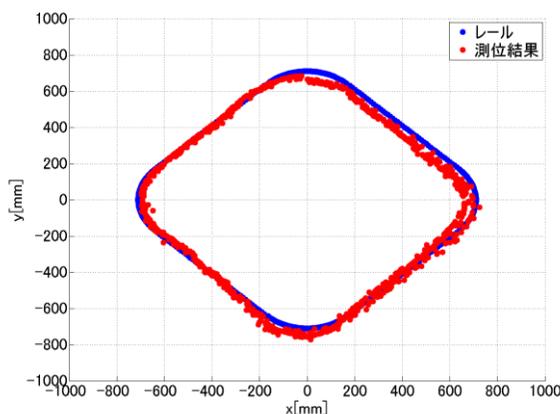


図 12 移動体測位結果(球状)

両者を比較したところ有意な差がないことを確認できた。この結果から、球状センサを用いても従来の単体センサと同等の精度で測位を行えることが確認できた。

5. まとめ

本報告では、超音波センサを用いた測位において測位可能エリアを拡大するための検討を行った。球状に超音波センサを複数取り付けただけを用いることで、超音波の受信エリアの拡大を図る方法について検討した。そして、球状センサを用いた測位でも単体センサと同等の精度を得ることが出来、球状センサにより測位エリアを 1.5 倍程度広げることが出来た。今後の課題として、球状センサを用いた時、FPGA の受信チャンネルを多く占有してしまうため、球状センサの各受信回路から得られる受信波形を合成したものを FPGA に取り込むことで受信チャンネル数の削減が可能であるかを検討する。その後、廊下に本提案システムを設置し、屋内ナビゲーションのための基本プラットフォームとしての実現を目指す。

参考文献

- 1) 別所 正弘, 小林 真輔, 越塚 登, 坂村 健, “ユビキタスコンピューティングと屋内環境の位置認識”, 信学会論文誌, Vol.92, No.4, pp.249-255(2009).
- 2) 秋山 征己, 羽田 昂史, 須永 光, 五百蔵 重典, 田中 博, “超音波を用いた屋内測位システムにおける広域化と複数対象識別法の検討と実証”, 電気学会 IS 研究会, IS-10-59, pp.49-54(2010).
- 3) N. Priyantha, A. Miu, H. Balakrishnan and S. Teller, “The Cricket Compass for Context-aware Mobile Applications”, Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2001), pp.1–14, Rome, Italy, July 16–21 2001.
- 4) A. Ward, A. Jones and A. Hopper, “A New Location Technique for the Active Office,” IEEE Personal Communications, Vol. 4, No. 5, pp. 42-47, October 1997.
- 5) 古河機械金属株式会社 <http://www.furukawakk.jp/products/ZPS_1.html>
- 6) 本間裕介, 森谷潤一郎, 長谷川孝明, “可超音波及び超音波を用いた逆 GPS 方式位置特定システムの比較実験”, 信学会論文誌, Vol.J91-A, No.1, pp.139-142(2008).