

〈一般研究課題〉 少数基地局による反射波を用いた TDOA  
位置推定技術の研究

助成研究者 中京大学 上林 真司



## 少数基地局による反射波を用いたTDOA位置推定技術の研究

上林 真司  
(中京大学)

### A Study of TDOA Positioning with a Few Base Stations Using Reflected Waves

Shinji Uebayashi  
(Chukyo University)

#### Abstract :

The time difference of arrival (TDOA) positioning scheme with a few base stations (BSs) (one BS at minimum) is proposed. Synchronization among BSs is generally necessary in TDOA scheme, but there is no synchronization problem in the proposed scheme for one BS. The estimated position error is evaluated by computer simulation. The feasibility of the proposed scheme is established based on experiments with one BS in a non-line-of-sight (NLOS) environment. The estimation error of a substantiative experiment was 6.1 cm.

#### 1. はじめに

近年、携帯電話、スマートフォン、WLANなど、移動端末が普及すると共に、様々なロケーションサービス(位置情報に基づくサービス)が開発されている。カーナビゲーションは今や標準装備品であり、目当てのレストランや観光地もスマートフォンが案内してくれる。人の位置情報のビッグデータから、人の流れを解析しビジネスに利用する試みも始まっている。ビル影で見えない人の動きを検出し、事故防止に利用する研究もある。無線機を人以外のモノに装着し、モノの位置情報を利用するシステムも今後の拡大が予想される。工場内の自由移動ロボットは、自分の位置を自律的に検知できる必要がある。レスキューロボットが高度化すれば、簡易にテンポラリに災害現場での位置検出を可能にする技術が必要になろう。輸送物(商品、宅配便など)の位置を正確に把握

できれば、各種の物流管理の効率化が期待できる。ロケーションサービスの普及に伴い、移動端末の位置を正確に推定する技術が重要になってきている。

位置推定技術の最近の重要な課題は、見通し外(NLOS: non-line-of sight)位置推定と、反射波対策である。位置推定技術普及の観点では、簡易で安価な位置推定システムの実現が、もう1つの重要なポイントである。被災地においては、迅速な被災者の位置推定、レスキューロボット、レスキュー隊員の位置追跡が重要であるが、そのためには、簡易で迅速に構築できる位置推定システムが必須である。

UWB(ultra wide band)信号は、広帯域のため伝搬時間の測定精度が高く、高精度の位置推定が可能である。NLOS環境における、UWB信号を用いた位置推定技術の研究が数多く報告されている<sup>(1)~(7)</sup>。P. Meissner<sup>(1),(2)</sup>等は、1基地局による屋内位置推定法を開発した。彼等は、周辺の壁などの障害物からの反射波を用いて位置推定を実現している。そのため、事前に周辺の障害物の配置(場所、大きさ、向き等)が既知でなければならない。我々<sup>(3)</sup>も、反射波を用いたTOA (time of arrival) 位置推定法を開発した。両者の位置推定法はよく似ているが、Meissner等は1基地局による位置推定という点に焦点を当てているのに対し、我々は、NLOS環境における位置推定という点に注目して検討している。

本論文では我々は、文献[3]においてTOA法で実現した少数基地局によるNLOS位置推定を、TDOA (time difference of arrival) 法に適用し、TDOA法においても少数基地局(最少は1基地局)でNLOS位置推定が可能なることを示す。TOA法では、移動局(MS: mobile station)は、送信機能と受信機能が共に必要になるが、TDOA法では、MSは送信機能のみで位置推定が可能である。その代わりに、一般にTDOA法では、MSが送信した信号を各基地局(BS: base station)が受信する時間差を正確に測定するため、BS間の高精度の同期が必要になる。しかし、1BSで位置推定を実現する提案法では、BS間同期は不要である(BSは1局しか存在しない)。従って、提案する位置推定法は、大変簡易な位置推定法といえることができる。但し、事前にBSの鏡像の位置を把握しておく必要がある。更に、受信した反射波がどのパスの反射波かを同定する必要がある。提案する位置推定法はこのあいまいさから、位置推定精度が劣化する可能性がある。

本論文では、反射波のパスを同定する方法を提案し、UWB信号の反射波を用いた1基地局によるTDOA位置推定法を提案する。2章では提案方法を説明する。3章では、計算機シミュレーションにより、遅延時間測定誤差を考慮して位置推定誤差を評価する。4章では、NLOS環境における2次元の実験により提案方法の実現性を検証する。5章はまとめである。

## 2. 反射波を用いたTDOA位置推定法

簡単のため、2次元モデルにより提案方法のアルゴリズムを説明するが、本アルゴリズムを3次元に拡張することは容易である。図1は、金属平面で囲まれた2m×3mの部屋を示す。図の原点の位置にBS(受信機)を置き、部屋の中の任意の位置( $x, y$ )にMS(送信機)を配置する。図に示すように、部屋の各面を、A, B, C, D面とする。

MSはUWBパルス信号を送信し、BSはその信号を直接受信する。BSは、C面及びD面で反射した反射波も受信する。直接波の伝搬路長を $d$ とする。C面で反射した反射波の伝搬路長 $d_c$ は、BSのC面に関する鏡像BS<sub>c</sub>(4, 0)とMSの間の距離に等しい。同様に、 $d_b$ は、MSとBS<sub>b</sub>(0, 6)の間の距離に

等しい。A面とC面で反射する場合のBSの鏡像BS<sub>CA</sub>は、BS<sub>C</sub>のA面に関する鏡像になる。A面とC面で反射する反射波の伝搬路長は、MSとBS<sub>CA</sub>間の距離 $d_{CA}$ になる。図1は、反射回数が2回以下の全ての反射波を示す。

MSがパルス信号を送信すると、BSは $t=d/c$ 後に直接波を受信し、 $t_c=d_c/c$ 後にC面による反射波、 $t_D=d_D/c$ 後にD面による反射波を受信する。ここで、 $c$ は光速である。図2は、反射回数が1回以下のときのBSの受信信号波形の一例である。

BSは、MSの送信時間が分からないので、 $t$ 、 $t_c$ 、 $t_D$ を測定することはできないが、受信時間差 $\tau_c=t_c-t$ 、 $\tau_D=t_D-t$ を測定することはできる。2回反射まで考慮すると、BSは合計6個の信号を受信し、5個の受信時間差を測定できる。これらの受信信号は、それぞれ、BS、BS<sub>C</sub>、BS<sub>D</sub>、BS<sub>CA</sub>、BS<sub>CD</sub>(又はBS<sub>DC</sub>)、BS<sub>DB</sub>の基地局が受信した信号とみなせるので、TDOA法によりMSの位置を推定することが可能である。

TDOA法は、3基地局以上の受信信号が得られれば位置推定が可能のため、本位置推定法では、直接波が受信できなくても(NLOS環境であっても)、3波以上の反射波を受信できれば、MSの位置を推定することが可能である。

図1の場合には、BSは最大6個の信号を受信するが、どの信号がどの伝搬路の信号か(どの反射面で反射した信号か)を識別することはできない。3章では、このあいまいさを解消する方法を説明し、計算機シミュレーションにより最終的な位置推定精度を評価する。

### 3. 計算機シミュレーション

#### A. 基地局の鏡像

本節では、基地局の鏡像の位置の決定方法を説明する。まず、BSから見通しのある反射面を抽出する。図1の場合には、C面とD面が抽出される。C面に関するBSの鏡像BS<sub>C</sub>の位置は、C面についてBSと面対称の場所である。同様にBS<sub>D</sub>の位置は、D面についてBSと面対称の位置である。

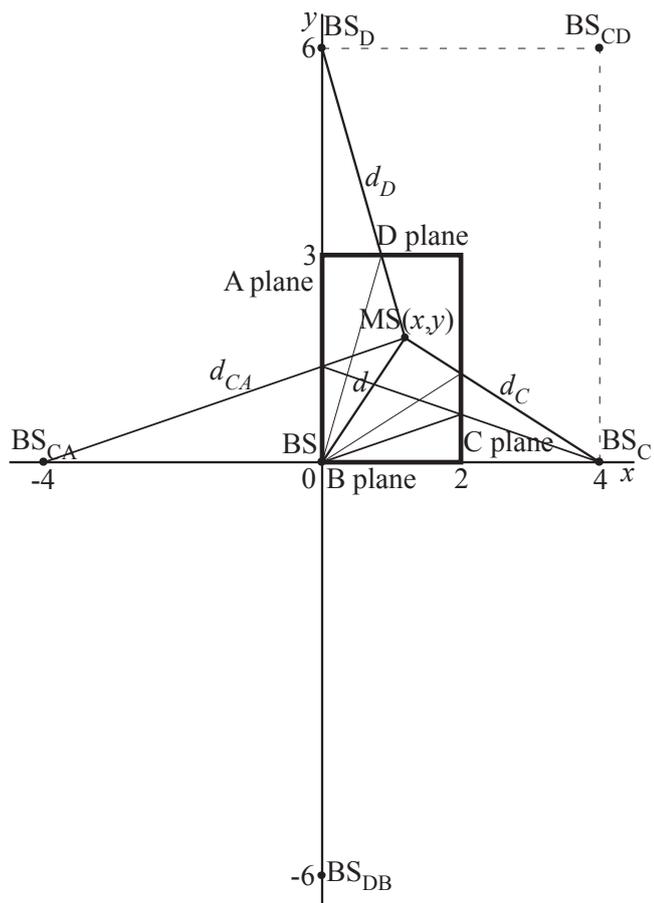


Figure 1. Configuration of MS, BS and mirror image BSs

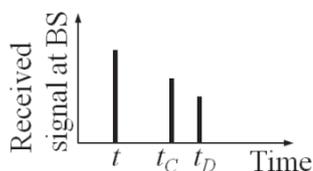


Figure 2. Example of received signals at BS.

2回反射に対応する鏡像の位置は、BS<sub>C</sub>、BS<sub>D</sub>の位置から決定する。各鏡像基地局(例えばBS<sub>C</sub>)から見通しのある反射面を抽出する。BS<sub>C</sub>の場合は、A面とD面が抽出される。鏡像基地局(BS<sub>CA</sub>、BS<sub>CD</sub>)の位置は、それぞれ、A面、D面についてBS<sub>C</sub>と面対称の位置である。

## B. 伝搬路の同定

本節では、各受信パルスがどの伝搬路の信号かを同定する方法(図1の場合の6個の受信信号のそれぞれがどの反射面で反射した信号かを決定する方法)を説明する。受信信号は、1個の直接受信信号、2個(C面、D面)の1回反射信号、3個(C-A面、C-D面(又はD-C面)、D-B面)の2回反射信号である。従って、伝搬路の同定は、各受信信号の(鏡像)基地局の同定と等価である。

6個の(鏡像)基地局をBS<sub>0</sub>、BS<sub>1</sub>、……、BS<sub>5</sub>(BS<sub>0</sub>は実際の基地局、BS<sub>1</sub>～BS<sub>5</sub>は鏡像基地局)とする。また、6個の受信パルス信号を、受信時刻の早い順にR<sub>0</sub>、R<sub>1</sub>、……、R<sub>5</sub>とする。問題は、R<sub>0</sub>、R<sub>1</sub>、……、R<sub>5</sub>とBS<sub>0</sub>、BS<sub>1</sub>、……、BS<sub>5</sub>の対応を決定することである。最初の受信信号が、直接波(BS<sub>0</sub>の受信信号)であることは間違いない。残りの5個の受信信号と5個の鏡像基地局の組合せの数は、5!=120通りである。鏡像基地局と受信信号の1つの組合せを仮定すると、各鏡像基地局の受信時刻と実基地局BS<sub>0</sub>の受信時刻の時間差を決定できる。即ち、 $\tau_1=t_1-t_0$ 、 $\tau_2=t_2-t_0$ 、……、 $\tau_5=t_5-t_0$ を決定できる。従って、TDOA法によってMSの候補位置を決定できる。TDOAのアルゴリズムはどれを使っても良い。本論文では、Chan等<sup>(8)</sup>の双曲線位置推定法を採用した。この計算法を使えば、繰り返し計算を行うことなく、陽解を導出できる。

MSの候補位置が決まると、実際の基地局と各鏡像基地局のパルス信号受信時間差を計算できる。この計算した受信時間差 $\tau_{1e}$ 、 $\tau_{2e}$ 、……、 $\tau_{5e}$ と、実際に測定された受信時間差 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、……、 $\tau_5$ の差異の積算Eを計算する。

$$E = \sum_{i=1}^5 |\tau_{ie} - \tau_i| \quad \cdots \cdots (1)$$

受信パルスと(鏡像)基地局の全ての組み合わせについてEを計算し、Eが最小となる組合せのときのMSの推定位置を最終的な推定位置とする。

もし、時間推定に誤差が含まれなければ、正しい組合せを決定でき、正確にMSの位置を推定することができる。次節では、時間推定誤差がある場合の位置推定誤差を計算機シミュレーションにより評価する。

## C. 誤差評価

図1の構成における提案法の位置推定誤差を評価する。例として、MSが、(0.6, 1.2)に存在するとする。受信パルスの時間差の測定誤差は、標準偏差0.1ns。(距離の測定誤差3cmに相当)、0.333ns。(距離の測定誤差10cm)、1.0ns。(距離の測定誤差30cm)の正規分布とする。筆者等<sup>(9)</sup>の電波暗室内の理想的環境におけるハイバンドUWB無線機(7.25-10.25GHz)を用いた距離測定実験では、測定誤差の標準偏差は1.06cmであった。実際にはBSの設置誤差など様々な誤差要因が想定されるため、計算機シミュレーションでは、距離測定誤差の標準偏差を3～30cmとした。図3は、1,000回の計算機シミュレーションの推定位置の分布を示す。

図4は、距離測定誤差の標準偏差と位置推定誤差の平均値の関係を示す。距離測定誤差の標準偏差が小さい(5cm以下の)領域では、位置推定計算時の丸め誤差の影響の方が大きく、位置推定誤差

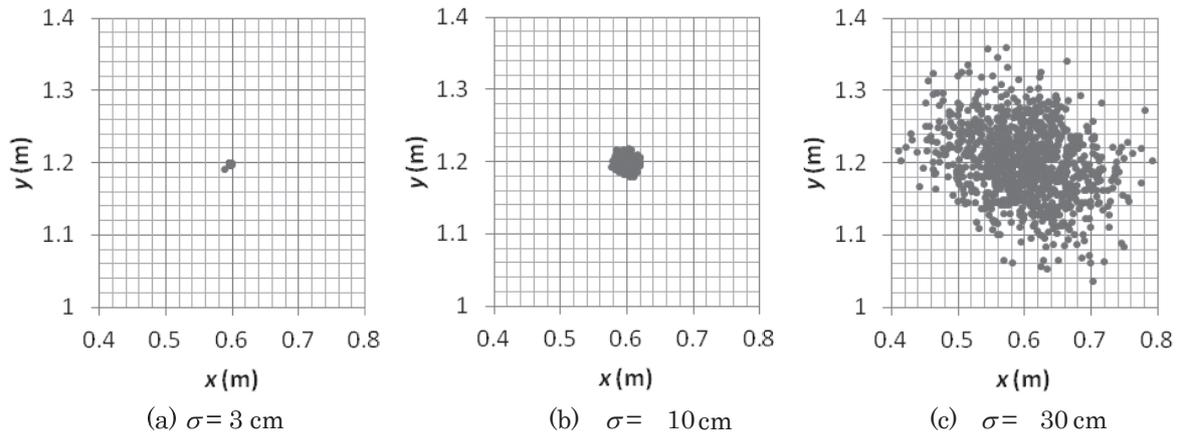


Figure 3. Distribution of estimated positions.

は距離測定誤差の影響をほとんど受けない。距離測定誤差の標準偏差が50cm以下の場合、1,000回の計算機シミュレーションでは伝搬路の同定誤りは発生しなかった。距離測定誤差の標準偏差が50cm以上になると伝搬路の同定誤りが発生し、位置推定誤差が大きくなるが、統計的に極端な精度の劣化は発生しなかった。

#### 4. 実証実験

提案方法の実現性を実験により検証した。図5は、実験系の構成を示す。2.4m×3.0mの部屋の中に0.5m×1.2mの障害物を配置する。部屋の壁面は全て金属平面とする。障害物の長方形の長辺は金属平面、短辺は電波吸収体とする。金属平面は、図5に示すように、A面からF面とする。受信機(BS)を原点に配置し、送信機(MS)は長方形の部屋の中の任意の位置(x, y)に配置する。図6は、実験環境の写真である(BSとMSが見えるように一部の金属面を外した)。

位置推定を実施する前に、まず鏡像基地局の位置を特定する。BSから見通しのある反射面は、C、D、E面なので、1回反射の鏡像基地局(BS<sub>C</sub>、BS<sub>D</sub>、BS<sub>E</sub>)の位置は図5に示すように決定できる。BS<sub>C</sub>からC面を通して見通しのある反射面はA、D、F面なので、C面を使う2回反射の鏡像基地局(BS<sub>CA</sub>、BS<sub>CD</sub>、BS<sub>CF</sub>)の位置は図5に示すように決定できる。同様にBS<sub>DB</sub>、BS<sub>DC</sub>(BS<sub>CD</sub>と同じ位置)、BS<sub>DE</sub>、BS<sub>EA</sub>、BS<sub>ED</sub>(BS<sub>DE</sub>と同じ位置)を決定できる(図5参照)。

MSを(2.1, 1.3)に配置したときの受信パルスの測定について説明する。この場合、BSはMSからの直接波を受信できない(NLOS環境である)。BSは、C面、D面の1回反射波と、C面-F面の2回反射波の3波を受信する。図7はBSの受信信号をオシロスコープで観測した波形である。図7に示すように、受信パルスを順にR<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>とする。R<sub>1</sub>とR<sub>2</sub>の受信時間差は4.1ns。(伝搬距離差1.23m)、R<sub>1</sub>とR<sub>3</sub>の受信時間差は7.4ns。(伝搬距離差2.22m)である。

この受信時間差(伝搬距離差)を用いて、提案手法によりMSの位置推定を行う。10個の(鏡像)基地局から、R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>に対応する3個を選ぶ選び方は、10×9×8=720通りである。全ての場合に

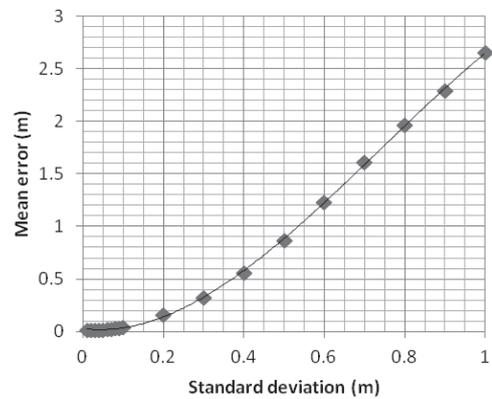


Figure 4. Mean error of estimated positions vs. standard deviation of measured distance.

ついて、TDOA法によりMSの位置を推定し、測定値との差が最小となる推定位置を最終的な推定位置とする。

$R_1$ が $BS_C$ の受信信号、 $R_2$ が $BS_{CF}$ の受信信号、 $R_3$ が $BS_D$ の受信信号とすると受信時間差と測定値の差が最小になり、MSの推定位置は(2.16, 1.29)になる。伝搬路は正しく同定され、位置推定誤差は6.1cmであった。誤差要因は、BS、MS、反射板の配置場所の誤差、及びBSにおける受信パルスの時間差測定誤差である。

## 5. まとめ

筆者等は、以前の研究において、反射波を用いることにより、NLOS環境において少ない基地局(最少は1基地局)でTOA位置推定が可能であることを示した。本論文では、この手法をTDOA位置推定に適用し、TDOA法でも1基地局でNLOS環境における位置推定が可能であることを、計算機シミュレーション及び実証実験により示した。TOA法ではMSは送信機能と受信機能が両方必要だが、TDOA法ではMSは送信機能のみで良い。TDOA法は、一般にBS間の同期が必要だが、1基地局のみで位置推定を行う提案法では、基地局間同期の問題が発生しない。即ち、提案手法は極めて簡易な位置推定法といえる。

提案手法では、位置推定エリアの障害物の情報(鏡像基地局の位置の情報)が必要である。また、受信信号と伝搬路の関係が不明のためあいまいさが増加する。本論文で筆者は、各受信信号の伝搬路を決定する方法を提案し、受信時間差の測定値に誤差が含まれる場合の位置推定精度を計算機シミュレーションにより評価した。2m×3mの位置推定エリアにおいて、伝搬距離測定誤差の標準偏差が50cm以下のとき、1,000

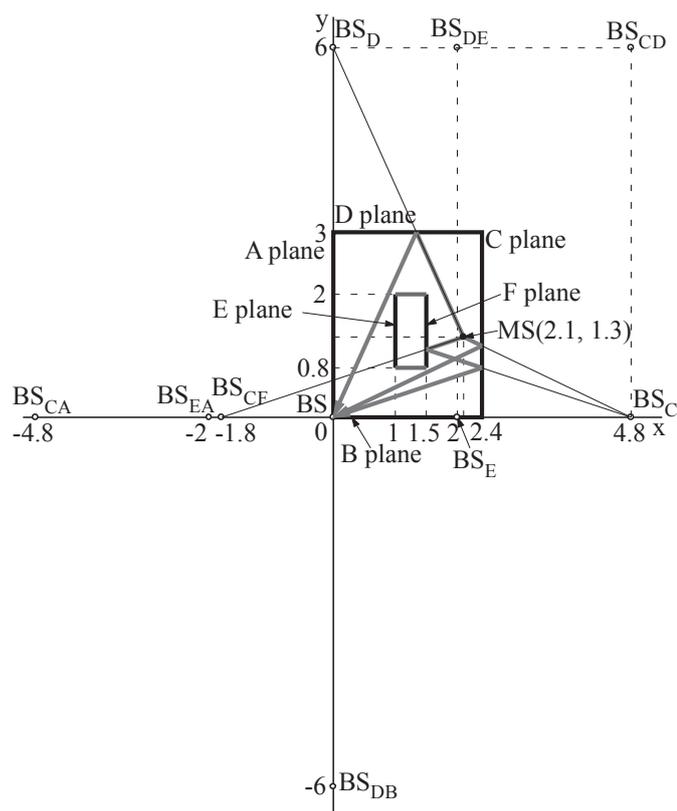


Figure 5. Experiment system.

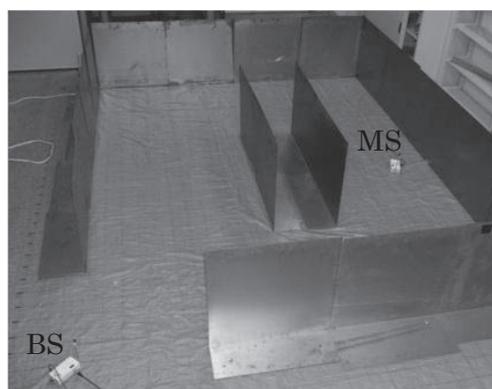


Figure 6. Experimental layout.

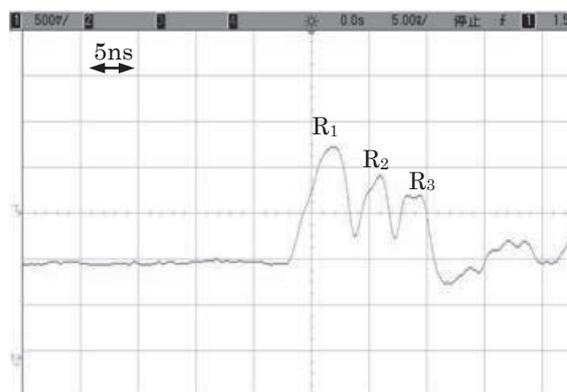


Figure 7. Received signal at BS.

回の計算機シミュレーションでは、伝搬路の同定が誤ることは無かった。伝搬距離測定誤差の標準偏差が50cm以上のときは、伝搬路の同定を誤ることがあるが、統計的に著しい位置推定精度の劣化は見られなかった。

NLOS環境における1基地局による位置推定実験を実施し、その実現性を実証した。位置推定誤差は6.1cmであった。

## 文献

- (1) P. Meissner, C. Steiner, and K. Witrisal, "UWB Positioning with Virtual Anchors and Floor Plan Information", Proc. IEEE WPNC, pp.150-156, 2010.
- (2) K. Witrisal, and P. Meissner, "Performance Bounds for Multipath-assisted Indoor Navigation and Tracking (MINT)", Proc. IEEE. ICC, pp.4321-4325, 2012.
- (3) M. Shimizu, T. Fujiwara, and S. Uebayashi, "Study of TOA positioning using UWB reflected waves," Proc. IEEE VTC, pp.1-5, May 2012.
- (4) S. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A. F. Molisch, H. V. Poor, and Z. Sahinoglu, "Localization via ultra-wideband radios," IEEE Signal Processing Mag., vol.39, pp.70-84, Jul. 2005.
- (5) F. Evennou, F. Marx, and S. Nacivet, "An experimental TDOA UWB location system for NLOS environment," Proc. IEEE VTC, pp.420-423, Sep. 2005.
- (6) J. Xu, M. Ma, and C. L. Law, "Position estimation using UWB TDOA measurements," Proc. IEEE UWB, pp.605-610, Sep. 2006.
- (7) J. Kietlinski-Zalenski, T. Yamazato, and M. Katayama., "Experimental validation of TOA UWB positioning with two receivers using known indoor features," Proc. IEEE PLANS, pp.505-509, May 2010.
- (8) Y. T. Chan and K. C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," IEEE Trans.Signal Processing, vol.42, no.8, pp.1905-1915, Aug. 1994.
- (9) M. Shimizu, T. Fujiwara, and S. Uebayashi, "A study for TOA positioning applying UWB reflected waves," IEICE General Conf., p.596, Mar. 2011.

