

無線センサネットワークにおける自律分散型位置推定 アルゴリズムに関する一検討

金子 賢治[†] 柏原 豊[†] 河野 隆二[†]

[†] 横浜国立大学大学院工学府〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

E-mail: †{kenji,yutaka}@kohnolab.dnj.ynu.ac.jp, ††kohno@ynu.ac.jp

あらまし 無線センサネットワークにおいては、個々のセンサノードの位置情報を知ることが必要不可欠である。しかし、広範囲にわたって存在するセンサノードのすべてについて測位をおこなうためには、多数の位置基準ノードが多数必要となる。そこで本論文では、自律分散型の位置推定アルゴリズムについての検討を行う。本論文で検討するアルゴリズムは、センサノードの位置推定を再帰的に行うことで、少数の位置基準ノードで位置推定を行う。また、問題点の一つである、NLOS (Non-Line of Sight) 伝搬路による測位精度の劣化への対策法を提案する。提案方式は、二段階の測位処理をおこなう。一段階目では、位置基準ノードの座標と測位対象であるセンサノードの推定位置および距離の観測値を利用して、各センサノードの位置推定精度を評価する値を導入し、その値をセンサノード間で比較することでNLOS環境の影響を受けているかどうかを判断する。二段階目では、NLOS環境の影響下にあると判断されたセンサノードについて、位置基準を変更して再測位をおこなう。これらの二段階の操作を繰り返し適用することでNLOS環境への対策をおこなう。計算機シミュレーションを用いて性能解析を行い、提案方式が従来方式と比較して高精度でロバストな測位が実現されることを示す。

キーワード センサネットワーク, 位置推定, NLOS, 累積誤差

A Study on Fully-distributed localization algorithm in wireless sensor networks

Kenji KANEKO[†], Yutaka KASHIWABARA[†], and Ryuji KOHNO[†]

[†] Graduate School of Engineering, Yokohama National University 79-5

Tokiwadai, Hodogaya, Yokohama, Kanagawa, 240-8501, Japan,

E-mail: †{kenji,yutaka}@kohnolab.dnj.ynu.ac.jp, ††kohno@ynu.ac.jp

Abstract For various kinds of applications in wireless sensor network, the positional information of each sensor node is essential. However, a lot of reference nodes is needed to geolocate the sensor nodes distributing widely. It is not preferable in the view of introducing the system. In this paper, we consider automatical distributed geolocation algorithm. The algorithm we consider geolocate the sensor nodes recursively, which enables us to geolocate sensor nodes by few reference nodes. And, we propose some novel techniques to combat the problems, accumulation of error and signal caused by NLOS (Non Line of Sight) propagation channel. The proposed technique divided into two step. In the first step, it is determined that the sensor nodes once geolocated is under NLOS or not by comparing the metrics value among sensor nodes which In the second step, the sensor node under NLOS regeolocated by different combination of reference nodes. Then, these step is applied iteratively. Some computer simulations show the proposed technique can achieve robust and precise estimation compared with conventional systems.

Key words sensor network, location estimation, NLOS, accumulative error

1. ま え が き

近年、通信機能とデータルーティング機能を備えたセンサ

ノードによって構築されるセンサネットワークが大きな注目を浴びている [1]。無線センサネットワークでは、2次元・3次元に配置された多数のセンサの情報を集めて統合的に処理するこ

とが求められるため、対象物あるいはセンサの位置情報を知ることが非常に重要である [2], [3].

位置推定法としてよく知られているものに、GPS(Global Positioning System)があるが、GPSは屋外等の見通し通信での利用を前提としているため、屋内のセンサネットワークでは使用できない。本稿では屋内での位置推定を研究対象とし、無線センサネットワークによって測位を行うアルゴリズムを検討する。

屋内環境において、すべてのエリアで精度よく測位を実現しようとする場合、多数の位置基準となるノードを配置する必要がある。これは、システムを導入する際のコストや、システム自体のスケーラビリティなどの点から好ましくない。

このような背景をもとに、測位に必要な数の位置基準ノードを通信範囲に確保することができないために、従来では測位をおこなうことができなかったセンサノードについて、過去に測位が行われたセンサノードを新たに位置基準として利用することで測位を可能にする、Iterative Multilateration に関する研究がおこなわれてきた [4]~[6].

しかし、Iterative Multilateration では、位置情報に誤差を含むノードを基準として利用するため、それらを基準にして測位が行われたセンサノードの位置推定精度はさらに劣化してしまう、累積誤差問題が存在する。また、測位精度を劣化させる原因として、直接波が届かず、反射波または回折波のみが検出される、NLOS 伝搬路に起因する誤差が存在する。

論文 [4] では、累積誤差の影響を回避しつつ、通信回数などの観点から効率よく各センサノードの測位をおこなうかについての検討がなされている。また、論文 [5] では、超音波を利用するセンサ端末の実装が成されており、測位がおこなわれたセンサノードについて、位置基準ノードの信頼度にもとづいて重み付けされた評価値による累積誤差の改善と、トランデュースアレイを用い、反射波と回折波の検出をおこなうことで、NLOS 環境へのアプローチがなされている。

上記の研究は、どちらも超音波の伝搬時間によってセンサノード間の距離を算出することで測位をおこなっている。一方、近年 UWB や無線 LAN のように広帯域な通信方式の普及が見込まれる中で、その占有帯域の大きさを有効に利用するためにも、これらの端末で構成されるネットワークを想定した測位方式を検討することが有意義であると考えられる [7].

これらの端末では、上記のような、トランデュースアレイなどの装置を用いて反射波の検出をおこなう NLOS 環境への対策を想定することは、端末にかかるコストの点から好ましくない。よって、本論文では測定距離と推定位置情報のみを利用して NLOS 伝搬の対策を行う方式を提案する。

提案方式では、位置基準ノードの座標と各センサノードの推定位置および観測値を利用して、各センサノードを評価する値を導入し、測位がなされたセンサノード間での相対的な信頼度にもとづき、NLOS 環境の影響を受けているかを判断する。NLOS 環境の影響下にあると判断したセンサノードは、基準として利用するノードの組み合わせを変更して再び測位をおこなう。この信頼度にもとづく判定をおこない、基準を変更して再

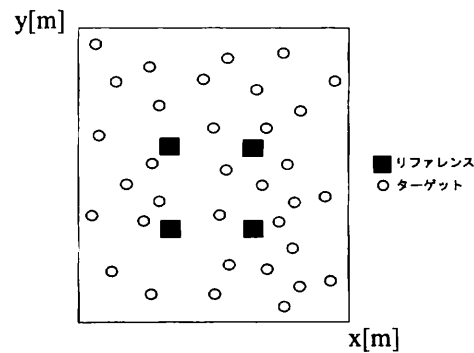


図 1 システムモデル. 座標未知のターゲット N 個と、座標既知のリファレンス m 個 ($m=4$)

び測位をおこなうプロセスを、あらかじめ定められた条件をみたすまで繰り返す。

2章では、具体的なシステムモデル、測位手順についての記述をおこなう。次に、3章において、提案方式である NLOS 伝搬への対策の手順について述べる。4章では、計算機シミュレーションを用いて提案方式の性能解析を行い、提案手法により高精度でロバストな測位が実現されることを示す。その後、5章で結論とする。

2. システムモデル

2.1 測位方式

無線センサネットワークでの測位アプリケーションを検討するにあたって、想定するシステムモデルを図 1 に示す。本稿では、座標が未知のセンサノードを“ターゲット”、座標が既知のセンサノードを“リファレンス”と呼ぶものとし、特にそれらの区別をする必要がない場合は“ノード”と記述する。また、簡易のため測位空間を 2次元ネットワークと仮定して議論を進め、各ターゲットの移動は起こらないものとする。

測位にあたっては、ターゲットからの信号の送受信時刻とリファレンスでの信号処理時間を利用して測位を行う TWR (TOA-Two-Way Ranging) 方式を採用する。ターゲットからの信号を、リファレンス i が時刻 t_i で受信したとする。ターゲットの送信時刻を T_t 、受信時刻を T_r 、処理時間を δT とする。LOS (Line-of Sight) 環境においては、リファレンス・ターゲット間の距離は次式のように表すことが可能である。

$$d_i = \frac{c}{2}(T_r - T_t - \delta T) \quad (1)$$

ここで、 c は光速、 d_i はリファレンス・ターゲット間の実距離を表す。各ターゲットは、測位に必要な数のリファレンスとの距離情報を得た後、測位演算により、自身の位置情報を取得する。

2.2 測位手順

本章では、測位手順を述べるにあたり必要な用語の定義と前提条件について記述した後、具体的な測位手順について述べる。

以下では、位置座標などのデータを受け渡しするのに必要となる MAC およびルーティングのプロトコル制御は、既存の方式 (例えば MAC 制御に関しては LEACH (Low Energy

ID	位置	リーダー
1	(x1,y1)	1
2	(x2,y2)	1
4	(x4,y4)	0

図2 各ノードが保持するテーブルの例

Adaptive Clustering Hierarchy), ルーティングに関しては DSR (Dynamic Source Routing) などが適用されていることを前提とし, 検討の対象とはしない, また, 各ノード間での各種データをやり取りする際の通信において, 誤りは起こらないものとする。

各ノードは固有の ID を有しておりノード i が自身の通信範囲内にあるノードの ID とその位置情報, リーダノードとなったことがあるかを記録したものを T(Location Table) と呼ぶこととする。その例を図2に示す。図2のリーダーノードの欄について, 1, 0 の数値はそれぞれ, リーダを経験済み, リーダを経験していないことを表す。

ターゲットの測位が始まる前に, 各ノードは自身の ID をブロードキャストする。これにより, 各ノードは自身の通信範囲内にあるターゲットおよびリファレンスを把握し, LT に記録がされているものとする。次に, 具体的な手順についての記述をおこなう。

1. リーダノードを中心に形成されるピコネットワークでの動作
 - 1-(a) リーダノードはクラスタ内の各リファレンスから, Table を受け取り, その中からリファレンスで測位を行えるターゲットを判断する
 - 1-(b) リーダノードはクラスタ内の各リファレンスから, Table を受け取り, その中からアンカーで測位を行えるターゲットを判断する
 - 1-(c) 各リーダーノードは, ターゲット i がクラスタ内のリファレンスで測位を行えると判断した場合, ターゲット i にリファレンスと測距を行うよう指令を出す
 - 1-(d) ターゲット i はそれぞれのリファレンスと TWR により距離を測定する
 - 1-(e) 位置を推定するのに必要な情報が集まったら, ターゲット i は測位演算を行い, 自身の位置情報をブロードキャストする
 - 1-(f) ターゲット i が存在しなくなるまで, 1-(c) ~1-(e) を繰り返しおこなう

次に, リーダを変更する際の動作について記述する。

2. リーダノードの変更
 - 2-(a) リーダノード x はクラスタ内のリファレンスの中から次のリーダーを指定する
 - 2-(b) x の通信範囲内の端末はそれらを受信し, x がリーダーを終えたことを記録する
 - 2-(c) 新しいリーダーノード y は自身の通信範囲内に存在するリファレンス同士でクラスタを新しく形成し, 1-(b)~1-(f) の動作をおこなう

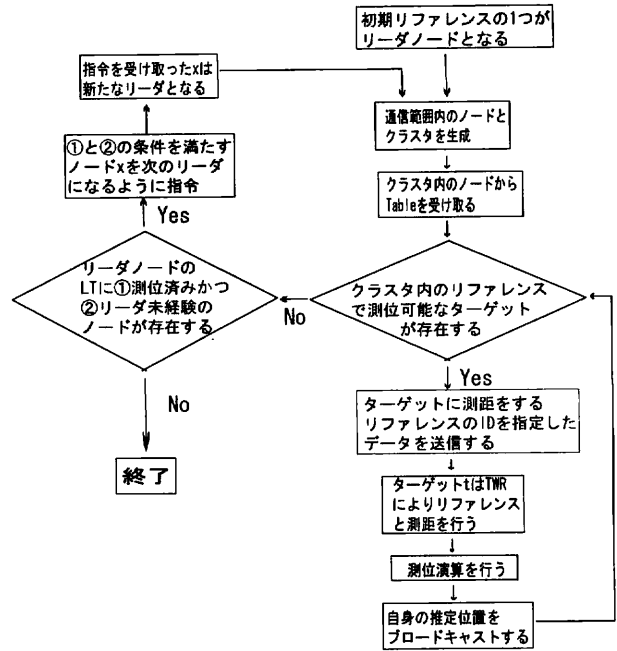


図3 測位アルゴリズムのフローチャート

上記1, 2の動作をリファレンスであり, かつリーダーノードの役割をおこなったものが存在しなくなるまで繰り返す。

以上の測位手順をフローチャートで表したものを図3に示す。

3. 提案手法

この章では, 扱う問題について記述をおこない, その後, 提案手法の記述する。

3.1 累積誤差問題

2.2で記述されたとおり, 想定する測位システムでは, リファレンスの通信範囲内に存在しないターゲットは, 位置推定が行われたターゲットをリファレンスとして利用する。このとき, 位置座標に誤差を含むものを基準として使用するために, 誤差が蓄積してしまう。ここでは, それを累積誤差問題と呼ぶ。数式により以下のように表される [5]。リファレンス1~3でターゲット A の位置推定が行われるとすると, ターゲット A の位置誤差 σ_{pA}^2 は次のように表される。

$$\sigma_{pA} = PDOP^2 \times \sigma_{URE} \quad (2)$$

と表すことが出来る。ここで, PDOP (Position Dilution of Precision) は, GPS で用いられる概念であり, 基準として用いる3つのノードの幾何学的配置のみによって決まる値であり, 測距誤差がどの程度に拡大されるかを表すパラメータである。また, σ_{URE} は User Equivalent Range Error と呼ばれる値であり, 下記のように表される。

$$\sigma_{URE}^2 = \sqrt{(\sigma_A^2)^2 + (\sigma_B^2)^2 + (\sigma_C^2)^2} \quad (3)$$

ここで, $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$ はターゲット A とリファレンス1~3

までの測距誤差を表す、今、 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = (\sigma_p^2 + \sigma_r^2)$ であると仮定すると、ターゲット A の位置誤差 σ_{pA}^2 は

$$\sigma_{pA}^2 = PDOP^2 \times \sqrt{3}(\sigma_p^2 + \sigma_r^2) \quad (4)$$

ここで、 σ_p^2 はリファレンスの位置誤差の分散であり、 σ_r は測定誤差の分散を表し、ハードウェアに依存する値である。論文 [5] においては、累積誤差への対策として以下の対策がなされている。リファレンス 1~3 の位置誤差の分散をそれぞれ $\sigma_{p1}^2 \sim \sigma_{p3}^2$ として、その重み付き平均二乗誤差により σ_{pA}^2 を求める。求められた σ_{pA}^2 を用いて

$$\begin{cases} A_E = 1 - \frac{\sigma_{pA}^2}{\sigma_{th}^2} & (\sigma_{pA}^2 < \sigma_{th}^2) \\ A_E = 0 & (\sigma_{pA}^2 > \sigma_{th}^2) \end{cases} \quad (5)$$

以下ではこの評価値の導入を、従来法として扱うものとする。

3.2 伝搬環境モデル

ターゲット i とリファレンス m の間の TWR による観測値を、真の距離 d_{im} にガウシアンノイズ d_n が加わったものとしてモデル化する。

$$\hat{d}_{im} = d_{im} + d_n \quad (6)$$

NLOS 環境である場合には式 (7) のように表される。

$$\hat{d}_{im} = d_{im} + d_N + d_n \quad (7)$$

d_n はクロックオフセットや受信器内雑音等に代表されるガウシアンノイズであり、 d_N は見通し外伝搬路に起因した遅延である。この d_N は、時変の伝搬路において不定期に付加される正のバイアスとして定義される。

3.3 NLOS 対策のための測位アルゴリズム

3.2 で述べた手順について、 I 個のターゲットの位置推定を終えたのち、以下の手順を適用する。このとき、使用する記号について以下のように定義する。

$$\theta_i = [\hat{x}_i, \hat{y}_i] \quad (8)$$

$$\mathbf{d}_i^j = [d_{i1}^j, d_{i2}^j, \dots, d_{iE}^j] \quad (j = 1, \dots, C_i) \quad (9)$$

$$\mathbf{d}_{est_i}^j = [d_{est_{i1}}^j, d_{est_{i2}}^j, \dots, d_{est_{iE}}^j] \quad (j = 1, \dots, C_i) \quad (10)$$

$$C_i = R_i C_E \quad (11)$$

θ_i はターゲット i の推定座標であり、 \mathbf{d}_i^j はターゲット i の j 回目の位置推定におけるリファレンス・ターゲット間の観測値を表す。また、 $\mathbf{d}_{est_i}^j$ はターゲット i の推定座標とリファレンスの位置座標から計算してえられる逆算距離であり、リファレンス k の座標が $\theta_k = [x_k, y_k]$ である場合、例えば $d_{est_{ik}}$ は次式で求められる。

$$d_{est_{ik}} = \sqrt{(\hat{x}_i - x_k)^2 + (\hat{y}_i - y_k)^2} \quad (12)$$

なお、式 (9), (10) における d_{in}^j や $d_{est_{in}}^j$ などの i の後ろに添えられた数値 n は、リファレンスの ID ではなく、 j 回目の測位において使用した n 個目のリファレンスであることを表す。 C_i はターゲット i が基準として選択可能な組み合わせのパターンであり、定数 R_i はターゲット i の基準の候補となるリファレ

ンスの数、 E は測位を行う際に使用する基準の数である。ターゲット i が選択可能なリファレンスの C_i 通りの組み合わせについて、 j 回目の測位に選択する組み合わせを c_i^j と表すものとする。以下では、 R_i の上限を 8 とし、 $E = 4$ とする。また、簡易化のために、図 1 における N 個のターゲットのうち、システムの動作が開始してから最初の I 個のターゲットまでの測位を終えた場合に対応した記述をおこなう。第一段階として次のように I 個のターゲットの中から NLOS 環境下にあるものを判定する。推定座標 θ_i および観測値から、対象とする I 個の各ターゲットについて、以下の値を計算する。

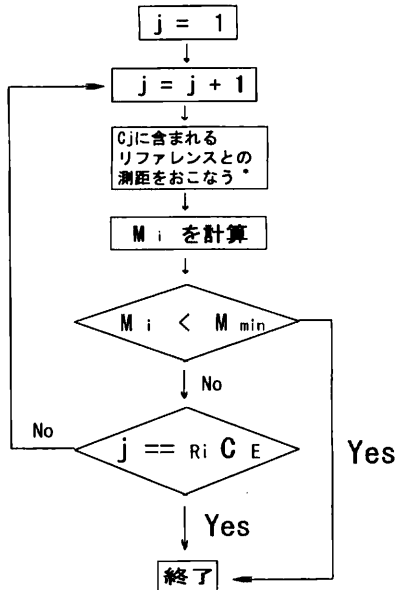
$$M_i = [\mathbf{d}_{ent_i} - \mathbf{d}_i]^T [\mathbf{d}_{ent_i} - \mathbf{d}_i] \quad (i = 1, \dots, I) \quad (13)$$

式 (15) の M_i は、ターゲット i の推定座標の信頼度を表す値であり、一般に観測値が NLOS 環境に起因する誤差の影響を強く受けるほど、その値が大きくなる。 I 個のターゲットの中からこの M_i が最小となるものを求め、これを I 個の中で、最も信頼度の高い推定座標であると仮定する。また、その値を M_{min} とする。そして、残りの $I - 1$ 個のターゲットについては NLOS 環境の影響を受けていると判断し、それぞれ順に、次の動作をおこなう。通信範囲内のリファレンスから、基準として使用する組み合わせ c_i^j を選択し、TWR による測距をおこなった後 (以前に取得した観測値があれば、そちらを使用する)、測位演算をおこない、式 (14) より M_i を計算する。これを第二段階の処理とする。この第二段階での再測位をおこなった後、再び第一段階での判定をおこない、 $M_i < M_{min}$ (条件 1) を満たせば終了する。この、第一段階の判定と第二段階における再測位を繰り返し適用することで NLOS 環境の影響を低減する。最終的な推定座標として、条件 1 を満たした際の推定座標 θ_i^j とする。また、測位の回数 j が組み合わせの数の上限 C_i に到達した場合は、そこで終了とする (条件 2)。この場合、最終的な推定座標として、 M_i^j ($j = 1, \dots, C_i$) が最小値をとったときの θ_i^j に決定する。なお、リファレンスとのリンクが少ないために、組み合わせを変更する際に十分な数のリファレンスを確保できないターゲットについては、上記の手順は適用されない。以上の手順を、フローチャートで記述したものを、図 4 に示す。

4. 計算機シミュレーションによる性能評価

従来法としてノード選択を行わなかった場合と、提案方式であるノード選択を用いた場合での測位精度の比較をおこなう。測位フィールドは、X 軸 5[m]、Y 軸 50[m] とし、初期のリファレンス数は 6 とした。各リファレンスを $[x, y] = [0, 0], [0, 3], [0, 5], [5, 0], [5, 3], [5, 5]$ に配置する。

測位対象であるターゲットはこの 5×50 [m] で囲まれたエリア内に一様に分布させ、通信可能距離はリファレンス、ターゲットともに 10[m] とした。リファレンス・ターゲット間での距離測定においては式 (6) で表されるような LOS 環境と式 (7) で表されるような NLOS 環境にて、多辺測量を用いた測位を実行した。計算機シミュレーションにおいて、観測値に含まれる AWGN 成分 d_n の分散値を $\sigma^2 = 0.3$ とし、NLOS 伝搬路



・すでに観測値を取得している場合は記録された値を使用する

図4 NLOS環境対策のフローチャート

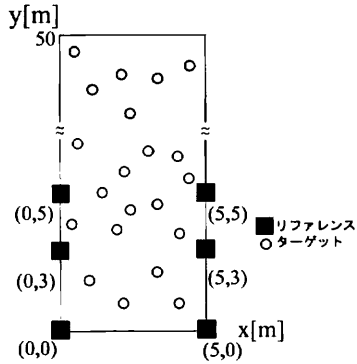


図5 シミュレーションモデル

に起因した誤差 d_n は、式 (14) の確率密度分布に従う NLOS 遅延を与えた。

$$P(\tau_n) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda \tau_n) & (\tau_n \geq 0) \\ 0 & (\tau_n \leq 0) \end{cases} \quad (14)$$

今回、 $\lambda = 3$ とした。リファレンスとターゲット間の NLOS 伝搬の発生確率は 20% とし、試行回数を 1000 回とした。以上のパラメータにより、各ターゲットの測位をおこなった際の、従来法と提案法、および LOS 環境における測位精度について比較をおこなった。グラフを図 6 に示す。

ここで、ターゲット i の測位誤差 P_i は、真の座標を $[x_i, y_i]$ として、式 (15) で定義される。

$$P_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (15)$$

図 6 における横軸の Hop 数は、各ターゲットに初期配置され

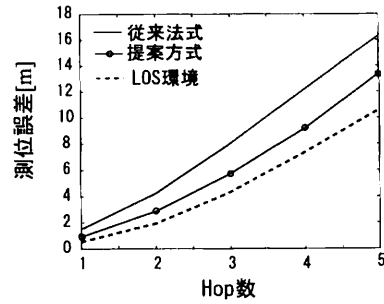


図6 従来法と提案法の測位精度特性

たリファレンスから到達するのに必要な Hop 数であり、値が大きいくほど累積誤差の影響のため測位精度が劣化する。また、縦軸はその Hop 数に存在するターゲットの測位誤差を平均化した値を表す。

図 6 において、提案法による再測位をおこなった結果、従来法と比較して測位誤差の値は低く抑えられており、LOS 環境での特性に近づいていることが確認できる。よって、提案手法により、NLOS 環境の影響を軽減できることが示された。

5. むすび

本稿では、少数の位置基準ノードで全エリアの位置推定を行うことを目的とする、自律分散型の位置推定アルゴリズムについて検討をおこなった。各端末の具体的な動作手順の記述をおこない、NLOS 環境に起因する誤差への対策の提案をおこなった。提案方式によって、従来方式と比較して NLOS 伝搬による誤差が存在する環境下においてロバストな測位が実現できることを、計算機シミュレーションにより示した。今後の課題としては、提案アルゴリズムの効率化や、実際のアプリケーションにおける測位精度の要求を満たすための、リファレンスの追加的配置に関する検討などが挙げられる。

文 献

- [1] Ian F. Akyidiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniarn, and Erdal Cayirci "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communications Magazine August 2002
- [2] 安藤 繁, 田村 陽介, 戸辺 義人, 南 正輝, "センサネットワーク技術," 東京電機大学出版局, 2005
- [3] Neal Patwari, Joshua N. Ash, Spyros Kyperountas, Alfred O. Hero III, Randolph L. Moses, and Neiyer S. Correal, "Locating the Nodes," IEEE Signal Processing Magazine, July 2005 P.54~69
- [4] A.Savvides, C.Han, M.Srivastava, "Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors," Proc.7th, MobiCom 2001, pp.166-179, Rome, Italy, July 2001.
- [5] 南 正輝, 森川 博之, 青山 友紀, "超音波を用いた自律分散型位置検出システムの設計と実装," 電子情報通信学会論文誌 A Vol.J88-A No.12 pp.1432-1441
- [6] Qicai Shi, Kyperountas. S, Correal. N.S, Feng Niu, "Performance Analysis of Relative location Estimation for Multihop Wireless Sensor Networks," IEEE JSAC Volume 23, Issue 4, April 2005 Page(s): 830 - 838
- [7] Sinan Gezici, et al. "Localization via Ultra-Wideband Radios," IEEE Signal Processing Magazine, July 2005 P.~