

自律分散型屋内測位システムの実装と評価

平澤 一樹† 南 正輝† 横山 成昭† 水町 守志† 森川 博之‡ 青山 友紀‡

†芝浦工業大学
‡東京大学

概要

ユビキタスコンピューティング環境においてコンテキストウェアなサービスを提供するためには、ユーザやデバイスの屋内位置情報が重要となる。これまで筆者らは、多数の測位用デバイスを分散させ、そのうちの必要最低限のデバイスを位置基準として手動設定するだけで、容易に屋内位置情報の取得可能な空間を構築できる自律分散型屋内測位システムについて研究を行ってきた。本稿ではシステムのデザイン、測位アルゴリズム、およびそれに付随する高精度化技術について述べるとともに、実装と評価結果についても報告する。

Implementation and Evaluation of a Distributed Ultrasonic Positioning System

Kazuki HIRASAWA †
Moriyuki MIZUMACHI †

Masateru MINAMI †
Hiroyuki MORIKAWA ‡

Shigeaki YOKOYAMA †
Tomonori AOYAMA ‡

†Shibaura Institute of Technology
‡The University of Tokyo

Abstract

Obtaining indoor location information is one of the essential technologies for enriching various ubiquitous computing applications. Although many indoor location systems have been proposed until now, no system has come into widespread use in an actual environment. To deploy indoor locating systems beyond laboratory use, we believe that the configuration cost of the system should be reduced. In this paper, we introduce a distributed ultrasonic positioning system which enables us to locate various indoor objects with lower manual configuration cost.

1. はじめに

ユビキタスコンピューティング環境では、センサネットワークなどを利用し、実空間情報に基づいて様々な状況に適應するサービスが期待されている。これまでに多くの実空間情報を利用したアプリケーションが開発されてきた。しかし、実空間の情報は人の動きや物の位置に左右される。このため、人や物の位置情報はユビキタスコンピューティングのアプリケーションにとってきわめて重要となる。

現在、屋外での測位にはGPSが使用され、容易に位置情報を取得できるようになってきている。しかし、屋内ではGPS衛星からの信号を受信することが困難なため、屋内でGPSを使用するのは難しい。そのため、ユビキタスコンピューティングの分野における位置情報の研究は主として屋内環境に注目されてきた。

これまでに赤外線を使用したActive Badge[1]、電波強度を使用したRADAR[2]、SpotON[3]、あるいは超音波を用いたActive Bat[4]やCricket[5]など多くの屋内測位システムが研究されてきた。しかし、赤外線や電波を用いた測位システムでは、屋内環境における外乱の影響を受けてしまうため、超

音波を用いたシステムよりも精度の面で劣ってしまう。このため、筆者らは超音波を用いた測位システムに着目している。

超音波を用いた屋内位置測位システムの代表的なものには、前述のActive BatやCricketなどがある。しかしながらこれらのシステムは、位置基準となるセンサを多数天井に配置し、正確な位置を設定しておく必要がある。そのため、このようなシステムを大規模なオフィスビルなどに適用した場合、設置コストや労力が無視できない。そこで、筆者らはこれまで、必要最低限の位置基準の正確な位置を設定するだけで屋内位置情報の取得可能な空間を構築できるシステムとして、自律分散型屋内測位システムの研究を行ってきた。本研究では文献[6]におけるIterative Multilaterationのアイデアを、超音波を用いた屋内測位システムに適用する。

本稿では、まず2.においてIterative Multilaterationを用いた測位原理とそれを実現するためのハードウェア構成、および測位アルゴリズムについて述べる。次いで3.ではシステムにおいてより高精度に測位をする手法を示す。最後に4.で実装したシステムを用いた測位精度の評価を行う。

2. システム構成と測位アルゴリズム

2.1 測位原理

図1に Iterative Multilateration の動作を示す。Iterative Multilateration は位置が未決定のノードが自身の位置を決定することにより位置基準として動作可能になることで再帰的に測位していく手法である。

今、初期状態において、ノード A, B, C は位置を手動設定されたノードとし、その他のノード D, E は位置が未決定のノードであるような状況を考える。ノード D はノード A, B, C を位置基準とし、自身とそれぞれの位置基準ノード間の距離を測定することで位置を決定する。ノード D は、一度位置を決定すると位置基準として動作可能になる。ここで、ノード E は遮蔽物によりノード C からの距離を遮蔽物により測定できないため、ノード A, B とすでに位置が決定し、位置基準として動作可能なノード D を位置基準とし、自身とそれぞれの位置基準ノード間の距離を測定し、位置を決定する。このように Iterative Multilateration を用いることで、必要最低限のノードの位置を正確に設定するだけで未決定のノードの位置を決定していくことが可能となる。

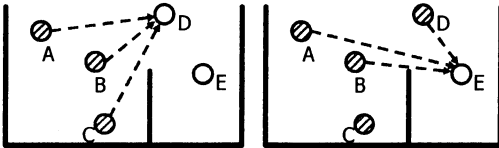


図1. 測位原理

2.2 ハードウェア構成

Iterative Multilateration を用いた測位システムを実際に動作させるために実装した DOLPHIN ノードを図2に示す。本システムにおける距離の測定には、無線により同期をとり、超音波の伝搬遅延時間を測定する TOA(Time-of-Arrival)の手法を用いている。そのため、DOLPHIN ノードには送受信機能を持った無線モジュールと送受信兼用の5つの超音波センサおよび制御・計算を行う CPU が備えられている。5つの超音波センサは、あらゆる方向へ超音波を送出できるように水平面に4つ、垂直面に1つ配置され(図3)、アナログ信号処理回路に接続される。アナログ信号処理回路が CPU に受信の有無を表すデジタル値と受信強度を表す値を出力する。また、実装した DOLPHIN ノードに用いたワンチップマイコンは USB インターフェイスを搭載しており、PDA やノートパソコンに接続することで、電源供給や測位情報を引き出すことも可能となっている。

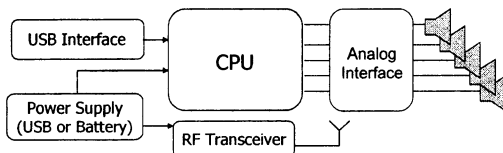


図2. ハードウェア構成



図3. 実装したノード

2.3 測位アルゴリズム

Iterative Multilateration を実装したハードウェア上で動作させるために、筆者らは自律分散型測位アルゴリズムを設計した。なお、本アルゴリズムは Iterative Multilateration に加え、ブートストラップおよび障害回避の機能も備えるアルゴリズムとなっている。本アルゴリズムでは、図4に示すように本システム内のノードは、時刻同期ノード、超音波送出ノード、および受信ノードの役割を後述する測位アルゴリズムに従って演じながら動作する。

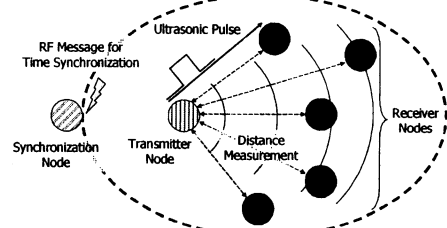


図4. 各ノードの役割

測位アルゴリズムにおいて、時刻同期ノードおよび超音波送出ノードは、位置が決定し位置基準として動作可能なノード群からそれぞれ1つのノードが選択され、その他のノードはすべて受信ノードとなる。各測位サイクルでは、時刻同期ノードから無線により超音波送出ノードの ID を指定したメッセージを送信する。そのメッセージを受信したそれぞれのノードは、メッセージに含まれる ID と自身の ID を比較する。一致した場合は、超音波送出ノードとして超音波パルスを送出し、一致しない場合は、受信ノードとなり、CPU に内蔵されたカウンタを動作させ、超音波の到来を待つ。超音波送出ノードより送出された超音波を受信ノードが受信した場合、内部カウンタを停止し、カウント値と音速によりノードまでの距離を算出する。超音波を受信できなかったノードはカウンタのオーバーフローにより受信動作を停止し、その測定を無効とする。この動作が繰り返され、ある受信ノードが測位に十分な数(3次元での測位なら4つ)の異なる超音波送出ノードからの超音波を受信できた場合、その受信ノードは測位方程式を解いて自身の位置を決定できる。

上記の仕組みを自律分散制御で行うため、本システムでは表1に示すリスト、メッセージおよびタイマを用いる。

表1. リスト、メッセージおよびタイマ

Item	Node_List	Description
List	Node ID	位置基準となりうるノードのノード情報を登録するリスト。リストには以下に示す情報が格納される。
	Node Priority	
	Node Position	
RF Messages	SYNC_MSG	距離測定の時刻同期に用いられる。メッセージには選択された超音波送出ノードのIDが含まれる。
	LOC_MSG	超音波送出ノードの位置を周囲に通知する。メッセージには超音波送出ノードのIDおよび座標が含まれる。
	ID_MSG	位置が決定し、位置基準として動作可能になったことを周囲に通知する。メッセージにはIDが含まれる。
Timers	ADVERTISEMENT_TIMER	位置基準として動作可能である場合に動作し、一定時間自身側の SYNC_MSG を受信しないとタイマは終了する。
	RECOVERY_TIMER	位置基準として動作可能であり、他のノード情報を保持している場合に動作し、一定時間 SYNC_MSG を受信しないとタイマは終了する。

図5に自律分散型測位アルゴリズムにおけるブートストラップ処理を示す。初期状態において、それぞれノード内のノードリストにはどのノードのノード情報も登録されていない。後述する測位アルゴリズムにおいて、超音波送出ノードはノードリストに登録されているノードの中から選択される。そのため、測位アルゴリズムを開始する前に、存在しているノードをノードリストに登録する必要がある。今、図5に示すようにノード A, B および C が初期ノード(手動で位置が設定されたノード)であるとし、ノード A, B, C の順に動作

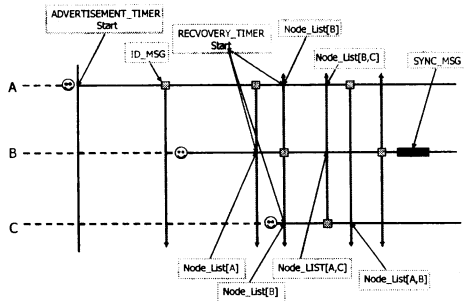


図 5. ブートストラップ処理

を開始したとする。ノード A が動作を開始すると、ADVERTISEMENT_TIMER が動作を開始する。ここではノード A は他のノード情報を保持していないため RECOVERY_TIMER は動作しない。ADVERTISEMENT_TIMER は動作期間内に自身宛ての SYNC_MSG を受信するごとにリセットされるが、受信しなかった場合、自身が他のノードに認識されないとして ID_MSG を送信し自身の存在を周囲に通知する。ここでは、ノード A しか存在しないため、ノード A はADVERTISEMENT_TIMER の期限が切れるたびに ID_MSG を送信する動作を繰り返す。次にノード B が動作を開始すると、ノード B はノード A と同様にADVERTISEMENT_TIMER を動作させる。その後、ノード A のADVERTISEMENT_TIMER の期限が切れた場合、ノード A は ID_MSG を送信する。ノード B はノード A からの ID_MSG を受信すると、自身のノードリストにノード A のノード情報を登録する。これにより、ノード B は他のノード情報を保持することになるため、RECOVERY_TIMER を開始させる。さらにその後ノード C が動作を開始すると同様の動作を繰り返し、ノード A、B、および C はそれぞれの存在を認識する。その後、ノード B の RECOVERY_TIMER が期限切れとなった場合を考える。RECOVERY_TIMER は動作期間内に SYNC_MSG を受信するごとにリセットされるが、受信しなかった場合、システムが停止していると判断して自身が時刻同期ノードとなり SYNC_MSG を送信する。したがって、ノード B は時刻同期ノードとなり、自身のノードリストに登録されているノードの中からランダムにノードを選び、そのノードの ID を含んだ SYNC_MSG を送信することでブートストラップ処理が完了する。

ブートストラップ処理が完了すると、システムは測位動作に入る。図 6 に測位アルゴリズムを示す。

今、ノード A、B、C を初期ノード、ノード D、E を位置が未決定のノードとする。ここで、図 6 に示すようにノード A が時刻同期ノードとして動作した場合を考える。ノード A は超音波送出ノードを選択し、SYNC_MSG を送信する。超音波送信ノードはノードリストに登録された ID の中からランダムに選択される。ここでは、ノード B が選択されたとする。SYNC_MSG を受信したノード B はメッセージに含まれる ID と自身の ID を比較し、一致していることを判断すると超音波パルスを送出する。また、SYNC_MSG を受信したその他のノードはメッセージに含まれる ID と自身の ID が一致してないと判断すると、CPU の内部カウンタを動作させ、超音波の到来を待つ。ここではノード D は超音波を受信し、ノード E は遮蔽物等の影響で受信できない状況を考える。超音波を受信したノード D は超音波の受信と同時に内部カウンタを停止させ、カウンタ値と音速によりノード B までの距離を算出する。超音波を受信できなかったノード E はカウンタの

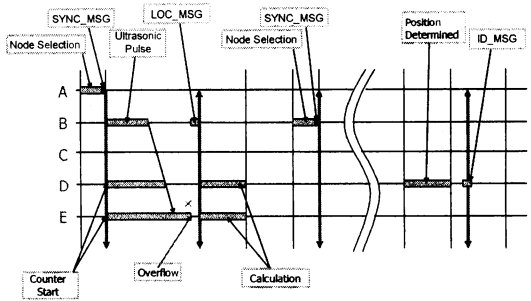


図 6. 測位アルゴリズム

オーバーフローを検出し、受信動作を終了する。次に、超音波を送出したノード B は、自身の位置を LOC_MSG で周囲に通知する。この後、ノード D または E が、測位に十分な数 (3 次元での測位なら 4 つ以上) の距離測定を行えた場合、測位方程式を解き、自身の位置を決定する。さらにそのノードは ID_MSG を送信し、自身が位置基準として動作可能になったことを周囲に通知する。以上が本システムの 1 サイクルである。次のサイクルでは、前サイクルで超音波送出ノードであったノード B が時刻同期ノードとなり、上述した動作で測位を行う。何サイクルか後に、ノード D の位置が決定された場合、ノード D は ID_MSG により自身のノード情報を通知し、新たな位置基準として動作するようになる。

なお、本システムは多数のノードがメッセージの交換によ

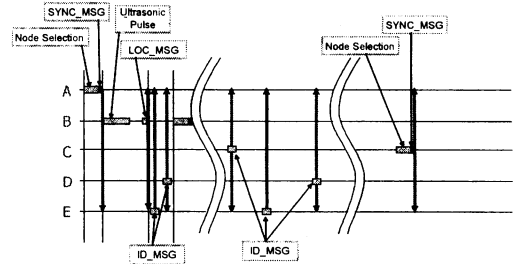


図 7. 復旧動作

り分散アルゴリズムで動作するため、ノードの動作停止や通信障害によるアルゴリズム停止を防止する手段が必要となる。図 7 に復旧動作を示す。図 7 に示すように本システムでは、ADVERTISEMENT_TIMER と RECOVERY_TIMER を用いて障害発生時にアルゴリズムの復旧が可能となっている。

まず、位置基準として動作可能であるノードが、自身宛ての SYNC_MSG が一定時間送信されない場合を考える。これはメッセージ衝突などの通信障害により、ID_MSG が周囲のノードに到達されなかった場合に生じる。本システムにおいて、ノードは位置基準として動作可能になるとADVERTISEMENT_TIMER の動作を開始させる。ADVERTISEMENT_TIMER は自身宛ての SYNC_MSG を受信するごとにリセットされるが、一定時間受信しなかった場合、周囲に自身の存在が知られていないとして再度 ID_MSG により、位置基準として動作可能であることを通知する。

一方、SYNC_MSG が一定時間どのノードからも送信されない場合を考える。SYNC_MSG が送信されないことは、時刻同期ノードとなるべきノードが障害を発生している場合、もしくは超音波送出ノードがノード障害を発生している場合である。本システムにおいてノードは位置基準として動作可能であり、他のノード情報を自身のノードリストに登録している場合 RECOVERY_TIMER の動作を開始させる。RECOVERY_TIMER は SYNC_MSG を受信するたびにリセ

ットされるが、一定時間 SYNC_MSG を受信しなかった場合、システムが停止していると認識し、自身が時刻同期ノードとなり SYNC_MSG を送信し、システムを復旧させる。

なお、筆者らは、上述のアルゴリズムを実装した 24 個の DOLPHIN ノードを用いて、動作の確認を行っている。

3. 高精度化手法

実際に実装した自律分散型屋内測位システムを使用する場合、システム全体の精度を低下させる諸問題（誤差蓄積問題と NLOS 信号問題）が生ずる。以下ではそれぞれの問題とそれにより発生する測位誤差の軽減法について述べる。

3.1 誤差の伝搬と蓄積

2.3 で述べたアルゴリズムは Iterative Multilateration の直接的な実現方法であり、これをそのまま動作させた場合、時間の経過と共にシステム全体の位置精度が劣化していく問題が発生する。本システムは無線による同期で、超音波を用いて距離を測定し、位置を決定していく。しかし、超音波での距離測定には通常数 mm の誤差が生じる。そのため、測定した距離に誤差が生じることで、測位結果に測距誤差が伝播する。また、位置基準となるノードに位置誤差が生じていた場合にも同様に、測位結果に位置誤差が伝播する。

今、図 8(a) に示すようなシナリオを考える。今、初期状態でノード A~D を初期ノード、ノード E, F を位置が未決定のノードとする。ノード E, F はノード A~D のそれぞれと自身の距離を測定し、自身の位置を決定できるとする。ノード E, F は位置が決定することにより、位置基準として動作可能となる。しかし、E, F の位置には測距誤差により位置誤差が生じる。さらに本システムは、再帰的に測位されるアルゴリズムであるので、ノード E, F が位置基準として動作可能になることでノード E はノード F を、ノード F はノード E を用いた測位が可能になる。ここで、ノード F がノード E を用いて測位をした場合を考える。ノード E を用いた測位では、ノード E の位置誤差が伝搬してしまい、ノード A~D を用いた測位よりノード F の位置誤差は大きくなってしまふ(図 8(b))。また、ノード F がノード E を用いて測位した後、ノード E がノード F を用いて測位するとノード F の誤差を蓄積し、ノード E の位置誤差はさらに大きくなってしまふ(図 8(c))。このように、ノード E, F 間で誤差の蓄積が発生し、時間経過と共に測位結果には全く信頼のおけないものとなってしまふ。ここでは、2つの未決定ノードを想定しているが、未決

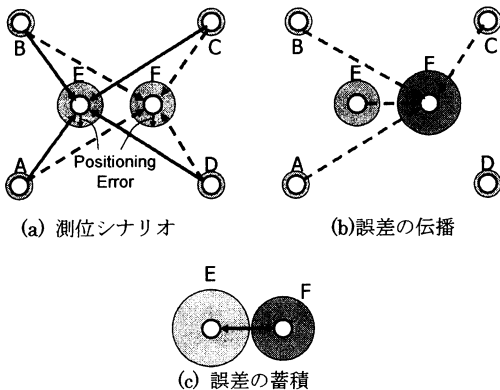


図 8. 誤差蓄積問題

定ノードの数が多くなるにつれてこの問題は深刻なものとな

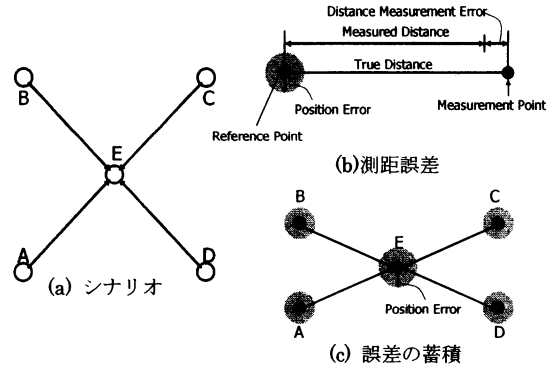


図 9. 位置基準選択アルゴリズム

ってくる。

このような誤差の蓄積を軽減し、できるだけ高精度に位置決定をできるようにするため、位置基準の精度を評価するパラメータを導入し、測位を行いたいノードが位置基準を選択する際に、評価値に基づいて選択を行う基準選択アルゴリズムを考案した。本アルゴリズムでは、あるノードの位置が新たに決定されたとき、そのノードがどのくらいの精度を持つかによって、ノードに評価値を与える。今、図 9(a) のように新しく位置を決定するノード E が、4 つのノード A~D を用いて位置を決定する場合を考える。E の位置を決定する際、E と位置基準となる 4 つのノード A~D 間の真の距離は、図 9(b) に示すように測定された距離、測距誤差と位置基準となるノードの位置誤差の和であるからノード E の位置精度には測距誤差と位置基準のノード位置誤差が伝播する(図 9(c))。それゆえ、ノード E の位置精度 P_{precE} は、A~D の位置精度を $P_{precA} \sim P_{precD}$ 、測距誤差を R_d で一定であると仮定し、4 点からの距離測定が、互いに無相関であるならば、GPS における DOP(Dilution of Precision) の概念と重み付きの誤差伝播の法則から

$$P_{precE} = \sqrt{PDOP^2 \times (P_{precA}^2 + \sqrt{4}R_d)^2 \cdots} \quad (1)$$

$$P_{prec}^2 = \frac{w_A P_{precA}^2 + w_B P_{precB}^2 + w_C P_{precC}^2 + w_D P_{precD}^2}{\sqrt{w_A + w_B + w_C + w_D}}$$

と表現できる。PDOP(Position Dilution of Precision) は基準として用いる 4 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、測距および位置基準の測位結果がどの程度に拡大されて反映されるかを表している。また、重み $w_A \sim w_D$ は位置基準となるノード A~D の位置精度により

$$w_A : w_B : w_C : w_D = \frac{1}{P_{precA}^2} : \frac{1}{P_{precB}^2} : \frac{1}{P_{precC}^2} : \frac{1}{P_{precD}^2}$$

として求められる値である。

ここで、システム開始時に手動で設定する初期設定ノードの信頼度の信頼度を 100[%] として、反復が進むにつれて順次信頼度が低下していくようにし、さらに、ノードが許容されるある一定以上の誤差 P_{th} を含む場合には信頼性がゼロとなるようなノードの評価式として、

$$\begin{cases} R_N = (1 - P_{precX} / P_{th}) \times 100[\%] \cdots \cdots (2) \\ R_N = 0 \quad (P_{precX} > P_{th}) \end{cases}$$

を定義し、式(2)により E の信頼度を決定する。この信頼度の値を用い、信頼度の高い 4 つの位置基準を選んで測位することで、誤差の伝播・蓄積の影響を軽減する。

3.2 NLOS (No-Line-of-Sight) 信号問題

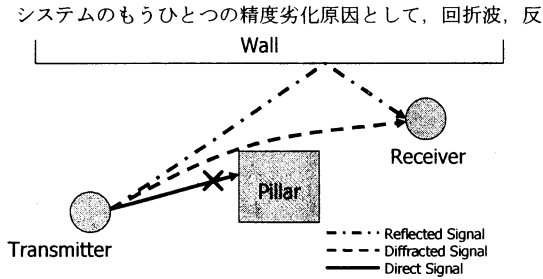


図 10. NLOS 信号

射波の NLOS 信号問題がある。NLOS 信号は、障害物に対し反射、または回りこんで受信機に到達するため、直接到達するよりも伝播時間が長い。そのため、測定される距離に誤差が生じてしまう。したがって、位置の決定したノードが位置基準として動作し測位を行う本システムでは、NLOS 信号はシステム全体に深刻な影響を与えてしまう。そこで、測位精度を向上させるために NLOS 信号を判定し、その影響を除去する必要がある。

一般に、回折は遮蔽物となる物体の厚さが波長より小さい場合に起こる。本システムで使用する超音波は 40kHz であり、波長は約 9mm である。そのため、実環境で運用した場合壁や柱そのものにより回折が起こることはないと考えられるが、柱の角などにより回折が起こる可能性がある。ここで、図 10 に示すような状況を考える。図 10 に示すように直接波は遮蔽物により受信機に到達せず、回折波または反射波のみが受信機に到達したとする。反射波は後述するような方法で判定をすることが可能であるが回折波の判定は難しい。しかしながら、図 10 から分かるように回折波の場合は反射波に比べて発生する誤差が誤差が比較的小さい。そこで、本システムでは反射波に焦点をあて、反射した NLOS 信号の影響の除去について述べる。

反射による NLOS 信号は、図 10 に示すように、直接波の経路に遮蔽物となる堅い物が置かれて直接到達せず、反射波のみ到達するような状況で起こる。前述したように反射波のみの信号は測位精度に大きな影響を与える。そこで筆者らは、まず Active Bat と同様の手法で反射波の判定、除去を行うことを考えた。この手法は、反射した超音波の強度が、直接到達した超音波の強度よりも減衰すると仮定し、あらかじめ測定した直接波の距離による減衰モデルと比較を行い、判定・除去を行う方法である。

図 11 にこの手法の評価結果を示す。図 11 に示すように NLOS 信号の除去を行わなかった場合は、測位された位置は真値から離れた位置で測位されてしまっている。しかし、除

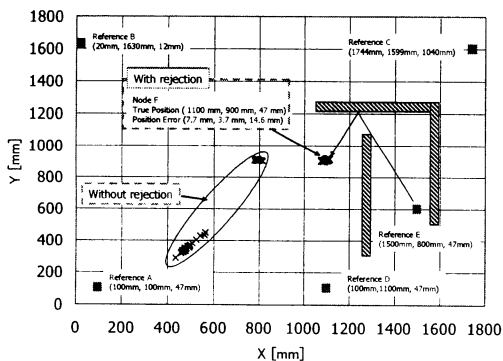


図 11. 評価結果

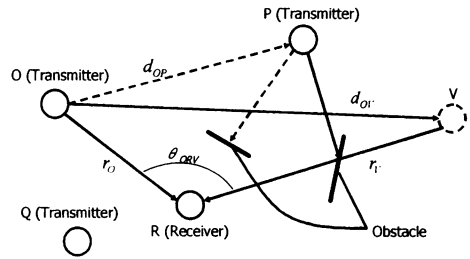


図 12. 幾何学的判定

去を行った場合には真値に近い位置に値で測位されていることがわかる。

しかし、反射した超音波は干渉することで、受信する位置によって強度に大きな変化が現れてしまう。そのため、上述した超音波の受信強度を利用した手法で、すべての反射波の影響を除去することはできない。反射波の影響を除去するためには更なる手法が必要であると考えられる。

そこで筆者らは、幾何学的に NLOS 信号を判定する方法を考案した。今、図 12 のような状況を考える。図 12 に示すようにノード R が位置基準ノード O およびノード P との距離を測定したとする。ここではノード O からは直接波を受信できるが、ノード P からは障害物のために反射された NLOS 信号を受信してしまう。これをそのまま使用し、一測位を行うと測位結果に大きな誤差を生じてしまう。そこで、受信した超音波の中に反射波が存在するかどうかの判定を行う。ここで、ノード R が超音波の到来方向がわかると仮定すると、ノード O およびノード P からの超音波の到来角の差 θ_{ORV} を得ることができる。それにより、ノード R から見ると、ノード P がノード V の位置に見えるように見える。そこでまず、ノード O とノード V の距離 d_{OV} を算出する。 d_{OV} はノード R とノード O および P からの測定距離を r_O 、 r_P とすると

$$d_{OV} = \sqrt{r_O^2 + r_P^2 - 2r_O r_P \cos \theta_{ORV}}$$

と算出できる。さらに、ノード R は LOC_MSG によりノード O とノード P のノード情報を取得することにより、ノード OP 間の真の距離 d_{OP} を算出できる。以上により得た d_{OV} と d_{OP} を比較することにより反射波の存在を確認することが可能である。しかし、ここでは反射波の存在は判定可能であるが、ノード O およびノード P のどちらからの超音波が反射波であるか判定できない。そこでさらに、ノード Q からも距離を測定し、同様の判定を行うことでどちらからの超音波が反射波であるかを判定することが可能となる。

本実装ノードでは、方向検出精度が低いため、現状では十分な成果を得ることはできていない。そのため、より高い精度で到来方向を検出できるモジュールの開発、評価は今後の課題である。

4. 結果

自律分散型屋内位置測位システムの評価として、理想的な環境における誤差伝播評価と実空間に 24 個のノードを配置し評価を行う 2 つの実測を行った。

まず、本システムの初期的な評価を行うとして、横 1.65[m] × 縦 1.8[m] × 高さ 1.05[m] の空間において、初期ノードを 4 つ、位置が未決定のノードを 6 つ配置する。4 つの初期ノードはそれらのノードのつくる立方体の体積が最大となるように空間内の四隅に配置し、そのときの Iterative Multilateration のみと位置基準選択アルゴリズムを導入した測位アルゴリズムについて X, Y, Z の各軸の位置誤差を実測し、比較を行った。図 13 に評価結果を示す。図 13 より原始

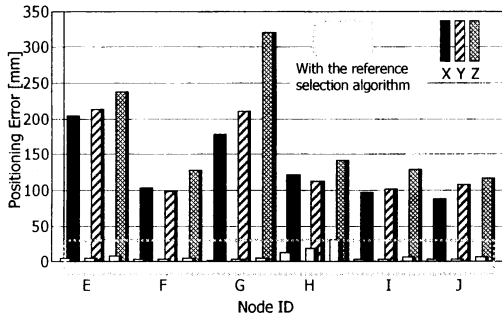


図 13. 誤差伝播評価

的な Iterative Multilateration を用いた測位アルゴリズムのみの場合、最大で 30cm の位置誤差が生じていることがわかる。これは、先に述べた誤差が蓄積するという問題による影響と見ることが出来る。一方、位置基準選択アルゴリズムを導入した測位アルゴリズムの場合には位置誤差が大幅に軽減され、最大で 5cm 程度に収まっている。

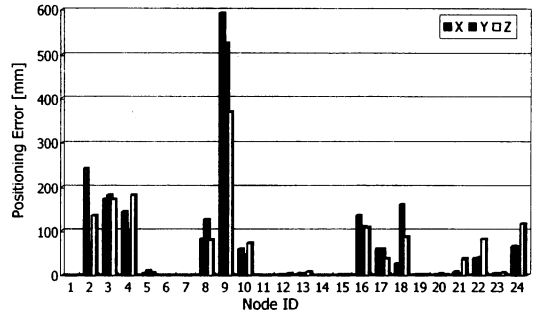
次に、実際の屋内環境における動作確認として、24 個のノードを実空間に配置し、初期ノードが 4 個、5 個、および 6 個の場合における X, Y, Z の各軸の誤差を実測した。初期ノードの配置は、4 個の場合の測定において初期ノードとして動作するノードを、それらの作る立方体の体積が最大になるように四隅に配置し、その他の 5 個、および 6 個の測定時に初期ノードとなる 2 つのノードはランダムに配置した。図 14 に測定結果を示す。図 14 に示すように、初期ノードが 4 個の場合には最大で 60cm、5 個の場合には最大で 30cm、6 個の場合には最大で 20cm と初期ノードを増やすことで大きな位置誤差の発生を抑えていることがわかる。しかし、大きな位置誤差の発生を抑えることはできたが、平均的に見た場合、位置基準が 5 個の場合より 6 個の場合のほうが、誤差が大きい。その原因は、座標を算出する際に、距離測定を行なったノードの中から信頼度の高い 4 つのみを位置基準として用いることにある。そのため、位置基準の配置による DOP が大きく影響していると考えられる。これより、実環境でシステムを運用する際には DOP をよく考慮したうえで、初期ノードを配置する必要があるといえる。

5. まとめ

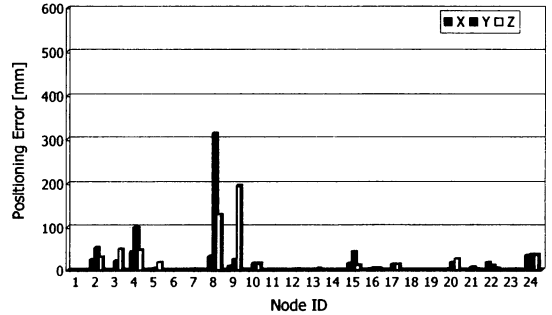
本研究では、屋内測位システムを構築する際、位置基準となるセンサの初期設定コストを削減することを目的として、Iterative Multilateration のアイデアを適用した自律分散型屋内測位システムの設計・実装・評価を行った。本研究で設計したシステムや考案した高精度化手法により、測位精度の面において屋内で使用可能であることを示した。しかし、本評価においてすべてのノードは静止していると仮定しているため、今後は移動するノードについても考えていく必要がある。また、ノードの増加に伴い発生するスケラビリティの問題についても検討を行い、より実用的なシステムを目指して開発を行う必要があると考えている。

参考文献

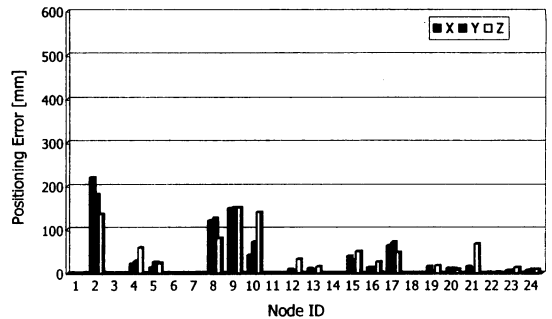
- [1]. R. Want, A. Hopper, V. Falcao and J. Gibbons, The Active Badge Location System, Trans. On Information Systems, Vol.10, No.5, Jan. 1992, pp. 42-47.
- [2]. P. Bahl and V. Padmanabhan, RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System, Proc. IEEE INFOCOMM, Mar. 2000.
- [3]. J. Hightower, C. Vakili, G. Borriello, and R. Want,



(a) 初期ノード 4 個



(b) 初期ノード 5 個



(c) 初期ノード 6 個

図 14. 実環境評価

Design and Calibration of the SpotON Ad-Hoc Location Sensing System, Unpublished, August 2001.

- [4]. A. Ward, Sensor-driven Computing, PhD thesis, University of Cambridge, 1998.
- [5]. N. Priyantha, A. Miu, H. Balakrishnan and S. Teller, The Cricket Compass for Context-Aware Mobile Applications, Proc. ACM MOBICOM, Jul. 2001
- [6]. A. Savvides, C. Han and M. Srivastava, Dynamic Fine-Grained Location in Ad-Hoc Networks of Sensors, Proc. ACM MOBICOM, Jul. 2001.
- [7]. J. Hightower and G. Borriello, Location Systems for Ubiquitous Computing, IEEE Computer, vol. 34, no. 8, Aug. 2001, pp. 57-66.