

無線通信網を用いた屋内向け測位方式

北須賀 輝明[†] 中西 恒夫^{†,††,†††} 福田 晃^{†,†††}

来たるべきユビキタスコンピューティング社会の基盤として、測位技術は必要不可欠なものである。GPSなどの屋外向け測位技術は確立されているものの、屋内利用できる測位技術は建物に専用設備を設置するなど導入、維持ともに高コストなものしか存在しない。一方で、無線LANなどの無線通信網が急速に普及しており、無線LANを用いた測位技術も一部で研究されている。本稿では、あらゆる機器が無線通信網で相互接続されている環境において、低コストかつより高精度な測位を実現することを目的として、無線LANなどの無線通信網を用いた測位方式を提案する。無線を使った測位では精度低下が問題となる。本稿では複数の無線端末の測位を同時に行う方式による高精度化手法を提案する。提案方式をシミュレーションで評価し、端末間の距離測定誤差20%、基準局9台、無線端末数20台の場合で、従来方式と比較して40%の測位精度の向上がみられた。

Indoor Location Sensing Technique Using Wireless Network

TERUAKI KITASUKA,[†] TSUNEO NAKANISHI^{†,††,†††}
and AKIRA FUKUDA^{†,†††}

Location sensing technology is very important for the infrastructure of ubiquitous computing environment. Outdoor location sensing technology such as GPS is already developed and widely used. For indoor location sensing, there are technologies. But these technologies cost too much for installing and maintaining. On the other hand, personal wireless network is widely used such as Wireless LAN (IEEE802.11b/a). There are a few research of location sensing using Wireless LAN. In this paper, we propose a location sensing technique using wireless network. Our technique will provide a low cost and high precision location sensing infrastructure. The precision of location sensing with wireless network is not good usually. Our proposed technique improve the precision, if they sense the location of multiple hosts simultaneously. Simulation results show 40% improvement of precision in a case of 9 reference hosts, 20 mobile hosts and 20% error of distance measurement.

1. 背景と目的

本稿では、無線通信網を用いた測位方式を提案する。本方式は主に屋内での利用を対象とし、無線LANやBluetooth、UWB(Ultra Wideband)などの無線デバイスを搭載した機器間で通信することで、機器の位置を特定することを目的とする。

測位に対するニーズは大きく、屋外ではGPS¹⁾による測位がカーナビゲーション、航空、船舶などで広く用いられ、不可欠なインフラストラクチャとなっている。また、携帯電話では米国FCC E911要求などに

基づき、GPSやE-OTD(Enhanced Observed Time Difference²⁾)などを用いた測位が行われている。国内の携帯電話でもGPSを搭載したのも普及している。これらに対し、屋内での高精度な測位システムは普及していないのが現状である。

屋内での測位は、超音波や赤外線などを用いたシステムが研究・開発され、ユビキタスコンピューティングに関する研究施設や、倉庫などの特定用途で導入されている。代表例として超音波を使ったActiveBat^{3),4)}があげられる。しかしこれらは、天井に超音波受信機を設置するなど導入・維持コストが高く、そのため広く普及は困難と考えられる。

一方で、無線LAN(IEEE802.11b/a⁵⁾)、Bluetoothの普及は目覚ましいものがあり、これらを測位に利用できれば広く普及するものと考えられる。また、測位に適したUWB(Ultra Wideband)も商用化に向けた動きが始まっており、この普及も待たれるところである。

屋内での位置情報の利用シーンとして、不特定多数

[†] 九州大学大学院システム情報科学研究院
Graduate School of Information Science and Electrical
Engineering, Kyushu University

^{††} 九州大学システムLSI研究センター
System LSI Research Center, Kyushu University

^{†††} 九州大学情報基盤センター
Computing and Communications Center, Kyushu University

が出入りするスペースでの利用を考える．このようなスペースの例として，駅，空港，博物館，図書館などの公共スペースや，デパート，イベント会場などの商用スペースがあげられる．これらの空間で位置情報を提供することにより次のような応用が考えられる．

- 道案内

たとえば，トイレ，改札，売店，出入口，連絡通路，公衆電話など従来は案内板や掲示によって案内していた場所への誘導をはじめとして，ホットスポットのアクセスポイントへの誘導などといった利用人数が比較的少数のサービスについても，サービス場所への誘導が可能となり，きめ細やかな道案内の提供が可能となる．また人の出入りの激しい都心部では，市街地での道案内が屋内，屋外を問わず必要と考える．
- 待ち合わせ

知人との待ち合わせ時に，市街地の人込みのなかで相手を探すのは困難であるが，互いの位置情報が交換できれば容易に待ち合わせをすることが可能となる．
- 動線（人の流れ）の解析

商用スペースの運営者が利用者の動きを捕捉・解析することで，利用者の動線をとらえ空間設計にフィードバックをかけることが可能となる．

2. 関連研究

屋内での測位技術は広く普及しているものはないのが現状である．ここでは，GPSを用いた屋外での測位技術，携帯電話で用いられている測位技術，屋内で研究用や特定用途で用いられている測位技術について述べる⁶⁾．

屋外での測位技術としてGPSが広く普及している．GPSは地上約2万kmにある24基の衛星からの電波を用いて，地上で三角測量を行うことで緯度，経度，高度を得る衛星測位システムである．しかしながら，屋内では衛星からの電波を受信できないため，GPSは一般に屋内で使用できない．

携帯電話では，GPSやE-OTDなどの測位技術が用いられている．GPSを用いる場合，携帯電話の低消費電力化と測位にかかる時間の短縮を目的として，測位計算を基地局で行うA-GPS(Assisted GPS)方式が用いられている．E-OTD(Enhanced Observed Time Difference)では，携帯電話が複数の基地局からの時刻を受信して，時刻のずれによる三角測量で位置を計測する．このほかに携帯電話からの電波を複数の基地局側で受信し，その時間差から測位を行う

TDOA(Time Difference of Arrival)や，複数の基地局で携帯電話の方角を測定し，方角から携帯電話の位置を計測するAOA(Angle of Arrival)などの方式がある²⁾．

屋内での測位方式は，主に超音波を用いたものと無線を用いたものに分類される．超音波を用いた測位としてActiveBatやShinらの研究⁷⁾があげられる．測位はいずれも三角測量で行い，その精度は3cmから10cmと高精度である．ただし，天井にセンサを設置し，センサをサーバに接続するなど設備の導入コストの点で不利である．測位の手順は，(1) 測位対象の人やものに超音波発信機を持たせ，(2) 天井などに取り付けられた複数の超音波受信機で超音波を受信し，(3) 音速を基に発信機と受信機の距離を測定し，(4) あらかじめ与えられた受信機の位置から，発信機の位置を測定する．

一方，本研究と同様に無線を用いた屋内向け測位方式として，RADAR⁸⁾や小川らの研究⁹⁾があげられる．ともに無線LANを用いた測位方式である．本研究では複数の対象物の測位を同時に行うことで測位精度の向上を図っているが，これらの研究では1つ1つの対象物について単独で測位を行うことしか考慮されていないという点で，本研究と大きく異なる．両研究とも無線LAN基地局で無線端末の出す電波の受信電界強度を測定することで位置を計測する仕組みを採用し，事前に位置と受信電界強度の関係を学習させる方式としている．RADARでは学習方式とともに，学習不要の無線伝播モデル化方式も提案している．

これら2研究は実環境での評価を行っている点で，本研究より先行している．それぞれの実験環境と測位精度は，RADARの場合，複数の部屋と廊下からなる43.5m × 22.5mのフロアに3基の基地局を設置し，学習方式で平均誤差2~3m，モデル化方式で平均誤差4.3mの結果を得ている．小川らの研究では位置の表現方法として座標による表現ではなく，エリア名による表現を採用しており，測位精度はエリア名の正解率で表される．25m × 13mの居室を5つのエリアに分割し，居室内に3~5基の基地局を設置して実験した結果，70%の場所で正しくエリアを特定できている．これらの結果を本研究の結果と単純に比較することは，評価方法の違い(実環境とシミュレーション)があるため難しい．しかしながら，本研究で提案している方式と同様に複数の対象物の測位を同時に行うことがこれら2研究の方式に適用することで，上記結果を改善できると考えられる．

3. 測位方式

本稿で提案する無線通信網を用いた測位方式の詳細を述べる．三角測量を行って，無線端末の位置を特定する．

3.1 特徴

本方式の特徴は次の2点である．

- (1) 測位対象が密集しているほど測位精度が向上する．
- (2) 基準点が疎であっても測位精度の低下が少ない．

通常，三角測量は複数の基準点からの距離を用いて計測点の測位を行う．すなわち基準局を基準点，無線端末を計測点とすると，基準局と無線端末間の距離をもちいて測位を行う．本方式では，基準局と無線端末間の距離のみでなく，無線端末間の距離も利用してきめ細かく相互補完的に三角測量を行う．これにより，上記2点の特徴を持たせることができる．

特徴(1)が有効な例として，市街地の人込みの中や会議場，展示会会場など多くの人が集まる場所で待ち合わせをする場合を考える．まず測位手段がない場合を考えると，人込みが疎であるか密であるかによって待ち合わせの難しさは大きく異なる．すなわち，人が非常に多数いる混み合った場所では待ち合わせ相手を視覚によって発見することは難しく，人がある程度少なければ容易であるといえる．提案方式では人が多く存在する場所，つまり測位対象が密集している場所ではより高精度に測位を行うことが可能であり，視覚に頼る待ち合わせが難しい状況でより正確に互いの位置を知ることが可能であるといえる．一方で人が少ない場所においては，ユーザ自身が視覚的に判断することで測位精度の低下をカバーすることが容易であると考えられる．このことは基準点の疎密にかかわらず有効である．

特徴(2)が有効な例として，商用スペースの動線解析を考える．動線解析では，運営者が利用者の動きを追跡するという利用形態を想定しているが，その場合に精度良く追跡したい場所もあれば，精度をそれほど要求しない場所も存在すると考えられる．提案方式では，基準点の密度を運営者自身が調節することが可能であり，コストの点で有利と考える．

また，提供されるサービスが増え多様化していくにたがって，サービス提供者と基準局を設置する位置情報提供者が同一でない場合も頻繁に発生すると考えられる．仮に基準点が疎な場所であっても，サービス提供者自身がサービス地点周辺に無線端末を数台増設することで，その周囲の測位精度を簡便に向上させる

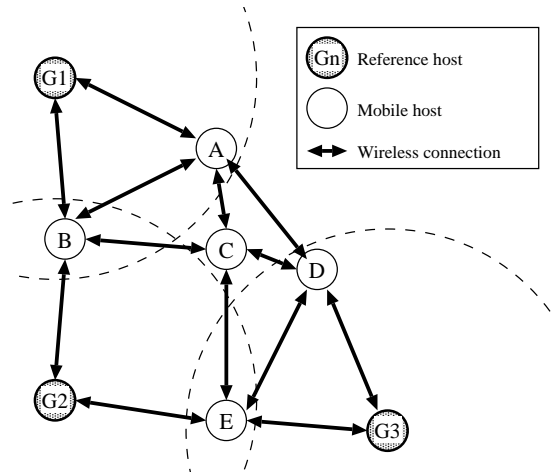


図1 システム構成．G1, G2, G3は基準局，A, B, C, D, Eは無線端末を表す

Fig. 1 System organization. G1, G2 and G3 are reference hosts. A, B, C, D and E are mobile host.

ことが可能であることもこれらの特徴をうまく利用した例としてあげられる．

基準点が疎な場合の具体例として，図1の無線端末Aを考える．無線端末Aが直接通信可能な基準局はG1のみであるが，直接通信可能な無線端末としてB, C, Dがある．そこでAの位置測定にG1の位置のみではなく，B, C, Dの測定位置も用いることで，より高精度に測位を行うことが可能になる．一方，基準局G1のみを用いた無線端末Aの測位を考えると，G1以外にAの測位に利用できるホストはなく，Aの位置はG1の周囲であることしかわからないため，非常に精度が低下する．

3.2 システム構成と測位手順

次のシステム構成とする．

- 基準局はGPSなどの測位手段を備え，自身の位置情報を所有している．
- 無線端末は移動することが可能で，自身の位置情報は所有していない．
- 各ホスト(基準局と無線端末)は，周囲の直接通信可能なホストとの距離を測定する機能を持つ．
- 基準局，無線端末のいずれか1台が測位サーバとなる．測位サーバは，基準局と端末間，基準局と基準局間，端末と端末間の距離を集計し，あわせて基準局の位置情報を集計し，これらを用いて端末の測位を行う．

基準局は，具体例として無線LANのアクセスポイントを想定している．ただし位置情報を所有していれば，必ずしもアクセスポイントである必要はなく，また移動してもよい．

- 測位サーバと基準局間、および測位サーバと無線端末間の通信は、アドホックネットワークルーティングプロトコルなどの既存のマルチホップ通信プロトコルを用いるものとする。

本稿では端末間（基準局も含む）の距離を測定する方法は既存のものを使うこととし、3.4節で距離測定の誤差について考察するにとどめる。

測位の手順を述べる。

- (1) 基準局および無線端末の中から測位サーバを選出する。サーバの選出方法は本稿ではふれない。
- (2) それぞれの基準局および無線端末は、無線到達範囲内にある直接通信可能な基準局および無線端末との距離を測定し、測定した距離を測位サーバに通知する。
- (3) それぞれの基準局は、自らの位置情報を測位サーバに通知する。
- (4) 測位サーバは後述するアルゴリズムにしたがって、各無線端末の測位を行い、測位結果を各無線端末に通知する。

無線端末が移動すると、基準局や無線端末はそれを距離の変化として感知し、距離の変化を測位サーバに通知する。測位サーバは通知を受けて、再度測位を行い結果を各無線端末に通知する。測位サーバとの通信はマルチホップ通信プロトコルを用いる。

測位サーバでの測位アルゴリズムを説明する前に、測位アルゴリズムで用いる評価関数を述べる。測位サーバでは、次の情報を基に無線端末の位置を推定する。

- 基準局の位置
 - 通信可能なホスト（基準局と無線端末）間の距離
- ここで、基準局数を M 、無線端末数を m 、基準局数と無線端末数の合計を $n = m + M$ とし、各基準局を $h_i (m \leq i < n)$ 、各無線端末を $h_i (0 \leq i < m)$ で表す。基準局と無線端末をまとめてホストと呼び、ホスト h_i の位置を p_i と表す。

無線到達距離（電波の届く最大距離）を d_{\max} とし、直接通信可能なホスト h_i, h_j 間で、無線の受信電界強度を基に求めた測定距離を $d_{i,j}$ とする ($d_{i,j} < d_{\max}$)。後述の測位アルゴリズムで直接通信が不可能なホスト間についても測定距離 $d_{i,j}$ を使用できるように、 $d_{i,j}$ を次のように拡張する。

$$d_{i,j} = \begin{cases} \text{測定距離} & \text{if } h_i \text{ と } h_j \text{ が直接通信可能,} \\ d_{\max+} & \text{if } h_i \text{ と } h_j \text{ が直接通信不可能.} \end{cases} \quad (1)$$

ただし $d_{\max+} = \max(|p_i - p_j|, d_{\max})$ と定義する。 $d_{\max+}$ をこのように定義することで、後述の測位アルゴリズムにおいて、通信不可能なホスト同士が d_{\max} より近づくことを防ぐ効果を与える。

これらの記号を用いて測位問題を整理すると、基準局の位置リスト $\{p_i \mid m \leq i < n\}$ とホスト間の測定距離のリスト $\{d_{i,j} \mid 0 \leq i, j < n; i \neq j\}$ から、無線端末の位置リスト $\{p_i \mid 0 \leq i < m\}$ を求める問題といえる。これを式で表すと次のように表現できる。任意のホスト $h_i, h_j (0 \leq i, j < n)$ について、

$$|p_i - p_j| \simeq d_{i,j} \quad (2)$$

を満たす $\{p_i \mid 0 \leq i < m\}$ を求める問題と定式化される。ただし、 $|p_i - p_j|$ は p_i と p_j から求められるユークリッド距離とし、 \simeq は両辺の差が十分に小さい値であることを意味することとする。

ここで式 (2) で両辺を等号ではなく差が小さいとしたのは、ホスト間の測定距離 $d_{i,j}$ に誤差が含まれているためである。ホスト間の実際の距離を $D_{i,j}$ 、距離測定の誤差を $e_{i,j}$ で表すと、測定距離は $d_{i,j} = D_{i,j} + e_{i,j}$ と表すことができる。ここで式 (2) から誤差成分 $e_{i,j}$ を取り除くと、

$$|p_i - p_j| = d_{i,j} - e_{i,j} = D_{i,j} \quad (3)$$

と表すことができる。この誤差 $e_{i,j}$ の傾向は距離測定の方法によって異なる。本稿で想定している無線の受信電界強度を用いた距離測定は、距離が遠くなるほど誤差が大きくなる傾向にある。距離測定における誤差は3.4節で述べる。

3.3 測位アルゴリズム

測位アルゴリズムは測位サーバで実行するアルゴリズムである。基準局の位置、ホスト（基準局および無線端末）間の距離から、無線端末の位置を求める。実用上、実時間で簡便に無線端末位置を求めることが求められるため、最小二乗法などによる最適解を求めることはしない。

以下に最急降下法を用いた測位アルゴリズムを述べる。

- (1) 無線端末位置 $p_i (0 \leq i < m)$ の初期値を決定する。
 - (a) すべての無線端末の初期化済フラグを未初期化 (*false*) とする。すべての基準局の同フラグは初期化済 (*true*) とする。

$$f_i = \begin{cases} \textit{false} & (0 \leq i < m \text{ の場合}) \\ \textit{true} & (m \leq i < n \text{ の場合}) \end{cases}$$
 - (b) $f_i = \textit{false}$ であるホスト h_i のうち次の条件を満たすホストを探し、その初期値

p_i を決定する .

条件 : 初期値が決定しているホストと直接通信可能なホストであること . すなわちホスト h_i について , $d_{i,j} < d_{\max}$ かつ $f_j = true$ を満たす h_j が存在すること . 初期値は

$$p_i = \left(\sum_{j \in L_i} p_j \right) \cdot \frac{1}{|L_i|}$$

とする . ただし , $L_i = \{j \mid d_{i,j} < d_{\max} \text{ かつ } f_j = true\}$ となる最大の集合とし , $|L_i|$ は L_i の要素数とする . 同時に初期化済フラグをセットする .

$$f_i = true$$

- (c) (1)-(b) の条件を満たす p_i ($0 \leq i < m$) が存在しなくなるまで (1)-(b) を繰り返す . (1)-(b) の条件を満たす p_i が存在しなくなった時点において初期値が決定していないホストは , 測位不可能なホストである .

- (2) 無線端末位置を収束するまで修正する .

- (a) 各 p_i ($0 \leq i < m$) について , 修正量 Δ_i を求める .

$$\Delta_i = \sum_{j \in L} \mathbf{u}_{i,j} \cdot (d_{i,j} - l_{i,j}) \cdot \alpha + \sum_{j \in K} \mathbf{u}_{i,j} \cdot (d_{\max+} - l_{i,j}) \cdot \alpha$$

ただし , $l_{i,j}$, $\mathbf{u}_{i,j}$, L , K はそれぞれユークリッド距離 $l_{i,j} = |p_i - p_j|$, 単位長ベクトル $\mathbf{u}_{i,j} = (p_i - p_j)/l_{i,j}$, $L = \{j \mid d_{i,j} < d_{\max}\}$, $K = \{j \mid d_{i,j} = d_{\max+}\}$ である . α は収束スピードを与えるパラメータで実験的に 0.1 から 0.05 程度の適切な値とする .

- (b) 各 p_i ($0 \leq i < m$) に修正量 Δ_i を加える .

$$p_i \leftarrow p_i + \Delta_i$$

- (c) 収束判定 . 修正量の最大値が一定値 γ を下回るまで (2)-(a) , (b) を繰り返す .

3.4 距離測定誤差の影響

ホスト間の距離測定は , 現在広く利用可能な無線 LAN (802.11a/b) や Bluetooth を用いて , 無線の受信電界強度で測定することを想定している . 無線の受信電界強度を用いた距離測定は誤差が大きい . 本節では , 既存の電波伝播モデルを概観し , 距離測定の誤差の性質について述べる . また , 誤差の性質から 4 章で

述べるシミュレーションの際に与える誤差の理由づけを行う .

無線 LAN (802.11a/b) や Bluetooth はマルチパス・フェージングの影響を強く受ける . マルチパス・フェージング (multipath fading) とは電波の減衰や反射 , 回折によって , 受信電界強度にばらつきが出る現象で , 特に屋内においては壁や床 , 家具などの構造物が多いため顕著に発生する . すなわち屋内の環境においては受信電界強度を電波の伝播モデルに基づいて数学的に与えることが困難である . よって , 受信電界強度から距離を求めようとする際に , マルチパス・フェージングの影響による誤差が避けられないのが現状である .

電波伝搬モデルとして , 理想的な自由空間モデル (free space propagation model) , 地面での反射のみを考慮した 2 波モデル (two-ray ground reflection model) が基本的なモデルとしてあげられる¹⁰⁾ . それぞれ受信電界強度 $P_r(d)$ は次の式で表される .

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} , \quad P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L}$$

ただし , d は送信受信器間の距離 , P_t は送信電力 , G_t , G_r はそれぞれ送信 , 受信のアンテナ利得 , λ は波長 , L はシステム損失 , h_t , h_r はそれぞれ送信アンテナ , 受信アンテナの地上高である . また , 2 波モデルは距離が $d_c = (4\pi h_t h_r)/\lambda$ 以上離れているときに実用的な値を得られることが分かっており , それ以下の距離では自由空間モデルを採用する . これらのモデルでは距離の二乗あるいは四乗で受信電界強度が減少することが分かる .

さらに建物の壁のみを考慮した WAF (Wall attenuation factor) model⁸⁾ は次式で表される .

$$P_r(d)[dBm] = P(d_0) - 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) - \begin{cases} n \times W & n < C \\ C \times W & n \geq C \end{cases}$$

ただし , $P(d_0)$ はある距離 d_0 における受信電力値であり , d は送受信アンテナの距離 , n は送受信アンテナ間の直線上にある壁 (遮蔽物) の個数で , C は遮蔽物が受信電界強度に与える影響の最大個数 , W は壁 (遮蔽物) あたりの減衰係数である .

このように受信電界強度はその環境に応じて距離あたりの減衰の仕方が異なる . ただし距離が伸びるに従って , 減衰が緩やかになる点は共通しており , 距離

2.4 GHz 帯を使う 802.11 b , Bluetooth を 1 メートルの地上高で使用する場合は $d_c = (4\pi h_t h_r)/\lambda$ はおよそ 100 メートルとなる . $\lambda = 0.125$ メートル .

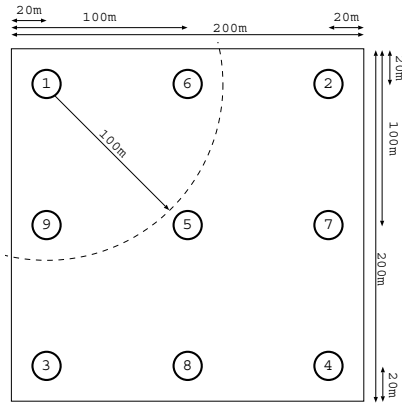


図 2 シミュレーション環境
Fig. 2 Simulation environment.

が増加するとともに距離測定の誤差も増加する傾向にあるといえる．そこで 4 章の評価において，シミュレーション時に与える誤差は距離に比例して増加することとする．

また，今後商用利用が可能になる UWB (Ultra Wideband) は，マルチパス・フェージングの影響が少なく，より高精度な距離測定が可能である．高精度な距離測定が可能になれば，本方式による測位精度をより向上させることが可能になる．

4. 評価

シミュレーションによる評価を行い，基準点のみを用いた従来の測位方式と比較する．

4.1 評価方法

次の環境を想定して，3.3 節で述べたアルゴリズムによるシミュレーションを行った (図 2 参照) ．

- 200 m 四方の平面に，基準局と無線端末を配置して，シミュレーションする．
- 無線の到達距離は 100 m とする．図 2 では，ホスト 1 の無線到達距離を点線の円で表している．
- ホスト間の通信は遅延なく行われるものとみなし，測位サーバに基準局の位置と各ホスト間の距離が受信されているものとする．
- 基準局の配置は規則的であると仮定し，基準局の台数は 4 台，5 台，または 9 台とする．4 台の場合は平面上の四隅の角から (20 m , 20 m) の位置に配置した (図 2 の丸 1 ~ 4 の基準局) ．5 台の場合は 4 台の基準局に加えて中央に 1 台追加する (図中丸 1 ~ 5) ．9 台の場合は基準局 5 台の配置に加えて各辺の中心から 20 m 内側に 1 台ずつ配置し，3 × 3 の格子状に 9 台を配置する (図中丸

表 1 シミュレーション環境での基準局のカバー率
Table 1 Coverage ratio of reference hosts in the simulation environment.

通信可能 基準局数	基準局数		
	4	5	9
0	1.81%	0.00%	0.00%
1	74.10%	23.07%	0.03%
2	24.08%	53.04%	4.37%
3	0.00%	23.88%	20.79%
4	0.00%	0.00%	54.55%
5 以上	0.00%	0.00%	20.23%

1 ~ 9) ．

- 無線端末数を 5, 10, 15, 20, …, 50 と変化させ，各無線端末の位置は一様分布の乱数で配置する．
- ホスト間の距離の測定誤差がない場合とある場合の 2 通りのシミュレーションを行う．誤差がある場合は，距離 100 m あたりの誤差が ±10 m 以内に収まる確立が 68.27% ，±20 m 以内に収まる確立が 95.45% となる正規分布の誤差を与える．
- 各条件で 100 回ずつシミュレーションを行う．

基準局の配置と数について，事前に考察しておく．基地局数 4 台の場合は，シミュレーション平面のほとんどの場所で従来方式での三角測量が不可能であり，基地局が疎な場合の本方式の有効性を確認するのが目的である．基地局数 9 台の場合はほぼ全域で従来方式での三角測量が可能であり，距離測定の誤差があっても本方式で測位精度が向上することを示すのが目的である．

表 1 に基準局がどの程度の範囲をカバーしているかを表す．表 1 は図 2 の環境において，1 台の無線端末をランダムに配置した場合に，無線端末が何台の基準局と直接通信可能かという確率を示している．たとえば，基準局数 4 台のときに 1 台の基準局としか通信できない確率は 74.10% である．基準局数 4 台ではシミュレーション平面 200 m × 200 m のどこに無線端末を配置しても 3 台以上との距離測定が不可能で，三角測量が不可能となる．そのため，本方式による測位は可能であるが，従来方式での三角測位は不可能である．基準局数 5 台では，23.88% の場所で三角測量が可能である．基準局数 9 台では，95.6% の場所で三角測量が可能である．

従来手法で三角測量が不可能な無線端末の扱いは次のように仮定する．基準局 2 台のみと直接通信可能な無線端末は，この基準局 2 台を結ぶ直線上に無線端末があるものとして扱い，基準局との距離の比で無線端末の測定位置を決定する．また，直接通信可能な基準局が 1 台のみの無線端末は，測定位置を基準局と同位

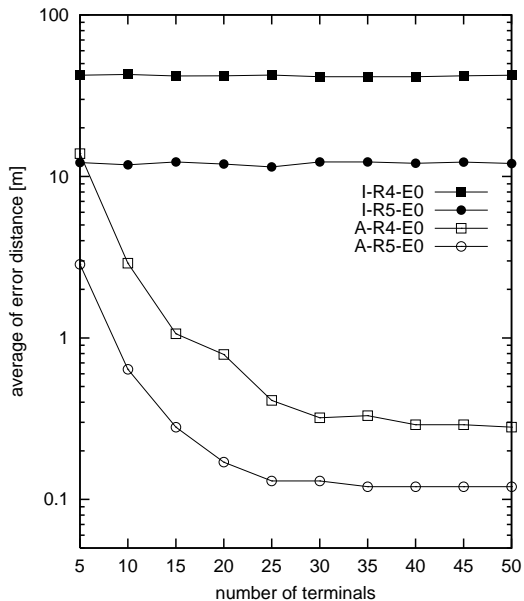


図3 評価結果 (距離測定誤差なし)

Iは従来方式, Aは本方式. -Rn- は基準局 n 台

Fig. 3 Simulation results in the cases of error-free distance measurement. I- means the result of ordinary method, A- means proposed method and -Rn- means the case of n reference host.

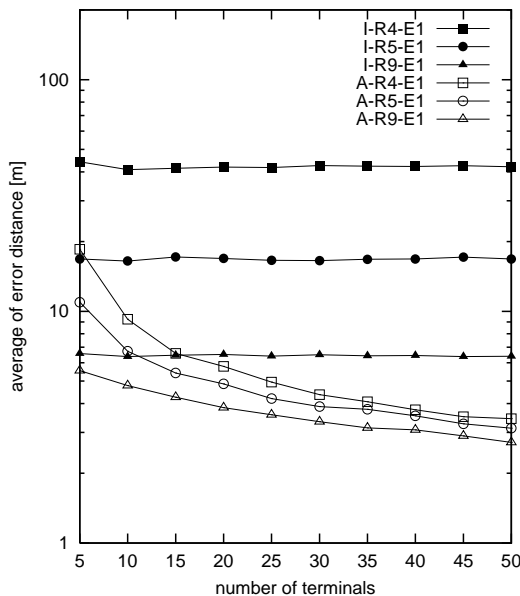


図4 評価結果 (距離測定誤差あり)

Iは従来方式, Aは本方式. -Rn- は基準局 n 台

Fig. 4 Simulation results in the cases that distance measurement has probabilistic error. I- means the result of ordinary method, A- means proposed method and -Rn- shows the case of n reference host.

置とする。基準局が 0 台の場合は誤差の統計を取る目的から、シミュレーション平面の原点 (左上) を無線端末の計測位置と仮定することとする。

4.2 評価結果

まずホスト間の測定距離に誤差が含まれない理想的な環境での結果について述べ、その後、誤差を加えたより現実に近い環境での結果について述べる。

図 3 に、ホスト間の測定距離に誤差が含まれない理想的な環境での評価結果を示す。基準局数が少なく、エリア全体をきちんとカバーできない場合に、本方式が有効であることを示す実験である。

グラフは無線端末の測位誤差の平均値であり、無線端末数を増加させたときの誤差平均の変化を表している。測位誤差は、実際の位置と測位結果位置の直線距離とした。横軸を無線端末数、縦軸は対数軸で、測位誤差の平均値である。グラフ中 I- で始まるものが従来方式、A- で始まるものが本方式の結果であり、-R4-, -R5- はそれぞれ基準局が 4 台、5 台のときの結果を表している。たとえば I-R4-E0 は基準局 4 台のときの従来方式、A-R4-E0 は基準局 4 台の本方式を表す。基準局 9 台の場合は従来方式、本方式とも誤差が 0.05 m 以下であり、グラフには記載していない。

従来方式 (図 3: I-R4-E0, I-R5-E0) では、基準局

数が同じであれば無線端末数の増減によって、測位誤差の変化はなく、平均誤差は基準局 4 台のとき 42.0 m、5 台のとき 12.0 m である。この 2 環境では三角測量できない無線端末数が支配的であり、誤差が非常に大きい。基準局 5 台の結果が、4 台の結果よりよいのは、三角測量可能な無線端末が 1/4 程度あることと、2 基準局での測位を行う無線端末が増加したことによる。

本方式 (図 3: A-R4-E0, A-R5-E0) では、基準局 4, 5 台のとき無線端末数の増加とともに、平均誤差は減少している。基準局 4 台の場合、無線端末 5 台で平均誤差は 14 m、無線端末 25 台以上では、誤差平均は 0.5 m 以下を達成している。基準局 5 台の場合、無線端末 5 台で平均誤差は 2.9 m、無線端末 20 台以上では、平均誤差は 0.20 m 以下となっている。基準局 9 台の場合は誤差 0.05 m 以下である (グラフ省略)。

図 4 に、ホスト間の距離測定に誤差が含まれている場合の実験結果を示す。本方式によって距離測定誤差があっても、無線端末数の増加とともに測位誤差が少なくなることを示す実験である。図 3 と同様にグラフの横軸は無線端末数で、縦軸は対数軸で測位誤差の平均を表す。I-Rn-E1, A-Rn-E1 はそれぞれ基準局 n 台のときの従来方式と本方式の結果である。

距離測定の誤差は距離に比例して増加し、ホスト間

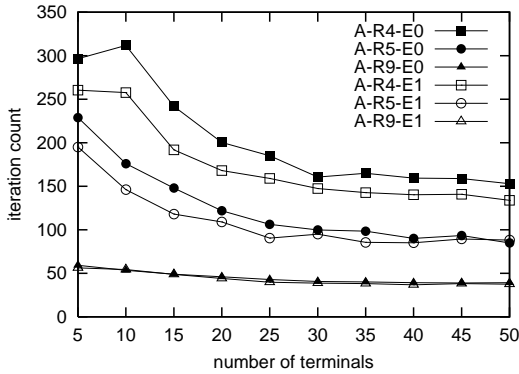


図5 収束までの繰り返し回数
-Rn- は基準局 n 台, En は距離測定誤差の有無
Fig. 5 Number of iteration until convergence.

の距離が 100 m のときの誤差が ± 20 m 以内に収まる確立が 95.45% となる正規分布とした。たとえば、ホスト間の距離が 50 m のときは誤差はこの半分となる。

従来方式(図4: I-Rn-E1)では、基準局5台および9台の場合に距離測定誤差による影響が顕著に表れている。図3の距離測定誤差がない場合と比較すると、基準局5台のときの平均誤差は12.0mから16.8mに増加している。基準局9台のときでは0.0mから6.4mに増加している。

本方式(図4: A-Rn-E1)では、無線端末数の増加とともに測位誤差が減少している。基準局9台の場合、従来方式の平均誤差は6.4mであるのに対して、本方式では無線端末数5台での平均誤差は5.6m、無線端末数20台時には3.8mであり、台数の増加にもなって減少している。また、最も測位誤差の大きい基準局4台の場合でも、無線端末15台では誤差平均が6.6mと基準局9台の従来方式と同程度の結果が得られた。無線端末数が50台のときの測位誤差は基準局数4, 5, 9台でそれぞれ3.4m, 3.1m, 2.7mである。

本方式で無線端末数の増加にもなって測位誤差が減少するのは、距離測定の誤差が距離に比例して増加するという性質に起因すると考えられる。ホスト数が増加し、密集することでホスト間の距離が短くなる傾向にある。ホスト間の距離が短くなると、距離測定の誤差も小さくなり、測位誤差も減少していくと考えられる。

図5に測位アルゴリズムの収束までの平均繰り返し回数を示す。アルゴリズム中のパラメータは $\alpha = 0.05$, $\gamma = 0.01$ としている。図中の各記号(A-Rn-Ex)は図3, 図4と同様である。全シミュレーションでの平均繰り返し回数は117回であり、基準局数が4台で距

離測定誤差なし、誤差ありのそれぞれの場合の平均繰り返し回数は203回, 174回, 同様に基準局5台では、125回, 110回, 基準局9台では、45回, 43回であった。このことから、基準局が疎である場合は繰り返し回数が増える傾向がみられる。また、無線端末台数の増加とともに繰り返し回数は減少する傾向がみられ、無線端末数5台の場合を基準とすると、50台の場合は30%から70%減少している。

4.3 考察

本節では想定したシミュレーション環境と実環境の違いについて、端末の移動と通信遅延の関係、およびスケーラビリティを考察する。

本シミュレーションでは、無線端末は移動せず、通信も無遅延で行われると仮定した。しかしながら実環境においては無線端末の移動や、通信遅延の影響によって測位精度はより低下するものと考えられる。この精度低下の程度は無線端末の移動速度と次の3つの要因の関係で変化する。要因は通信遅延、測位サーバでの処理時間、距離測定時刻のずれの3つである。移動速度が遅い状況であれば、これら3要因が大きくとも影響が少ない。距離測定時刻のずれとは、それぞれの無線端末が距離測定を行うタイミングが、端末間でずれてしまうことである。測定時刻が無線端末間で大きく異なると、移動速度の速い端末に関して距離の誤差が大きくなる。このため端末間での弱い同期が必要といえる。たとえば徒歩(80m/分=1.3m/秒)、自動車(60km/時=16.7m/秒)を想定し、仮に端末が距離測定を行ってから測位結果が端末に届くまでの時間を1秒間と仮定すると、この間に徒歩では1.3m、自動車では16.7m移動する。主に屋内での利用を想定しているものの、高速に移動する物体の測位に関しては、これらの影響を十分考慮する必要がある。

スケーラビリティについて考察する。本方式は単独の測位サーバで全無線端末の測位を行う。測位サーバの計算量は、アルゴリズムの繰り返し1回あたり計算量と繰り返し回数で決まり、繰り返し1回あたりの計算量は無線端末数 n に対して $o(n^2)$ で増加するが、収束までの繰り返し回数はシミュレーション結果から n の増加に対して減少傾向が認められる。これらから測位サーバの計算量は $o(n^2)$ を上回ることはないと推測される。実際に市街地全域や、高層ビル全体といった大規模な空間での測位を行う場合は、エリアに分割し複数の測位サーバを用いる方法を検討すべきと考える。また、各無線端末は周辺のすべての無線端末と距離測定を行う。このため無線端末の密度が高い場合、つまり各無線端末の周囲の無線端末の台数 m が多い場合は、

各無線端末で行う距離測定の処理時間、処理量ともに m に比例して増加する。加えて、測位に限らず無線通信一般の問題として、無線端末が高密度になるほど無線通信の衝突の可能性が増加し、再送制御による処理時間、処理量が増加する。これらのことから、無線端末の密度についても実使用上の上限が存在すると考えられる。

5. ま と め

本稿では、無線通信網を用いた屋内向け測位方式を提案し、シミュレーションによる評価を行った。従来の三角測量に基づく手法では、基準点がある程度高密度に配置されている必要がある。また無線による距離測定は誤差が大きいため、高精度での測位には不向きと考えられている。

提案方式は、複数の無線端末が測位を行う際に、各々独立に測位を行うのではなく、無線端末間の距離を考慮して測位を行う方式である。この方式によって、

- (1) 無線端末が密集している環境では、測位に用いる距離測定の誤差がある状況でも測位誤差を縮小できること、
- (2) 基準点数が少ない場合でも、無線端末の密集度に応じた精度で測位ができること

の2点を達成できることを、シミュレーションによって定量的に示した。

今後の課題として以下のものがあげられる。

- 実環境における評価と実応用への適用。
- 測位精度をユーザへ提示する方法の検討。
- 3次元空間での測位の対応。

実環境における評価と応用例への適用として、通信遅延時間と移動速度の関係の評価や、測位サーバのスケラビリティの評価などを行うべく実環境でのシステム構築とこれらの評価を行っていく。また、待ち合わせや動線解析といった応用例への適用を行っていくことで、実用性を検証するとともに、測位アルゴリズムの改良を行っていく予定である。

測位精度は重要な情報であり、ユーザへ提示すべき情報と考える。測位精度の定量化と精度をユーザに提供する方法について検討していく。最後に、本稿では2次元平面状での測位のみを対象としているが、高さ方向を扱えるよう拡張し、3次元空間での測位を可能にしていく。高さ方向の情報としては、一般的には標高や地上高さなどの絶対的な高さが考えられるが、今後の研究では複数階からなる建物内で階かといった種類の高さ情報を検討し、測位アルゴリズムやシステム構成を検討していく。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科研費（基盤研究（B）（2）12480099 および若手研究（B）15700062）による助成を受けている。

参 考 文 献

- 1) Garmin Ltd.: About GPS, available at <http://www.garmin.com/aboutGPS/waas.html>.
- 2) RADDCOMM Wireless Consulting Services: Location Methods for E-911 Phase II, available at <http://www.raddcomm.com/E-911%20Location%20Methods.htm>.
- 3) Harter, A., Hopper, A., Steggle, P., Ward, A. and Webster, P.: The Anatomy of a Context-Aware Application, *Proc. Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM'99*, Seattle, Washington, USA, pp.59-68 (Aug. 1999).
- 4) Addelese, M., Curwen, R., Hodges, S., Newman, J., Steggle, P., Ward, A. and Hopper, A.: Implementing a Sentient Computing System, *IEEE Computer Magazine*, pp.50-56 (Aug. 2001).
- 5) ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Ed., Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (1999).
- 6) Hightower, J. and Borriello, G.: Location Systems for Ubiquitous Computing, *IEEE Computer*, pp.57-66 (Aug. 2001).
- 7) Shih, S., Minami, M., Morikawa, H. and Aoyama, T.: An Implementation and Evaluation of Indoor Ultrasonic Tracking System, 情報処理研究会報告, 2001-MBL-17, pp.1-8 (May 2001).
- 8) Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System, *Proc. IEEE Infocom 2000*, pp.775-784 (2000).
- 9) 小川智明, 吉野修一, 清水雅史: 学習機能を用いたロケーション検出方法の検討, 信学技報 NS2002-79, RCS2002-107, pp.13-18 (2002).
- 10) Fall, K. and Varadhan, K. (Ed): The ns Manual, *The VINT Project, A Collaboration between researchers at UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC* (Oct. 2001). <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

(平成 14 年 12 月 21 日受付)

(平成 15 年 4 月 17 日採録)



北須賀輝明(正会員)

1971年生。1993年京都大学工学部情報工学科卒業。1995年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。同年シャープ(株)入社。パーソナルコンピュータの開発に従事。

2001年九州大学大学院システム情報科学研究院助手。モバイルコンピューティング, 組込みシステム, 並列/分散処理, コンパイラ, 計算機アーキテクチャに研究的関心を持つ。



中西 恒夫(正会員)

1970年生。1993年大阪大学工学部通信工学科卒業。1998年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。1996年日本学術振興会特別研究員。

1998年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2002年九州大学大学院システム情報科学研究院助教授, また同大学システムLSI研究センターほかを併任。コンパイラ, 計算機アーキテクチャ, 組込みシステム, 並列/分散処理に研究的関心を持つ。ACM, IEEE Computer Society 各会員。



福田 晃(正会員)

1954年生。1977年九州大学工学部情報工学科卒業。1979年同大学院修士課程修了。同年NTT研究所入所。1983年九州大学大学院総合理工学研究科助手。1989年同大学

助教授。1994年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授。2001年より九州大学大学院システム情報科学研究院教授。工学博士。オペレーティング・システム, コンパイラ, 組込みシステム, モバイルコンピューティング, 計算機アーキテクチャ, 並列/分散処理, 性能評価等の研究に従事。本学会平成2年度研究賞, 平成5年度 Best Author 賞受賞。著書『並列オペレーティングシステム』(コロナ社), 訳書『オペレーティングシステムの概念』(共訳, 培風館)。ACM, IEEE Computer Society, 電子情報通信学会, 日本OR学会各会員。