

無線を使った位置検出

小野 昌之
福永 茂

福井 潔
原 晋介

柳原 健太郎
北山 研一

人間の生活環境の中にコンピュータチップとネットワークが組み込まれ、その場所や存在を意識することなくサービスが利用可能となるユビキタスコンピューティング社会が、実現に向けて歩み始めている¹⁾。

各種センサを駆使して、実空間に存在する人や物に関する状況を認識するユビキタスコンピューティングはコンテキストの認知であり¹⁾、人や物の位置検出はコンテキスト認知における必須技術の一つと言える。

位置検出には、カーナビゲーションや携帯電話で使われているGPSを始めとして、無線、RFID、超音波等を利用した技術が既に存在するが、ユビキタスコンピューティングで必要とされる屋外、屋内、地下を問わず全ての空間をカバーでき、かつ高い位置精度を提供できる万能な位置検出技術はまだない。そこで我々は来るべくユビキタスコンピューティング社会に備えて、屋外でも屋内でも使え、かつ安価で高精度な位置検出技術をZigBeeTM*1) ²⁾を用いて開発している。

本稿では、まず既存の位置検出技術について概説し、次に無線ノードだけで容易に位置検出ができ、位置検出インフラの低コスト化を狙った新しい位置検出方式について述べる。そして地下街で実施した本位置検出方式の評価実験について報告する。

位置検出技術

人や物の位置を検出する技術に求められる要件には、位置精度だけでなく、位置検出を行うための装置の大きさ、消費電力、装置のコスト、装置の設置条件、位置検出可能な領域カバー率、位置検出対象の連続追跡率がある。また対象となる人や物のIDを位置と同時に取得可能かどうかも重要な要件である。これらに対し、無線、超音波、画像解析、圧力センサ、方位センサ等の技術を利用したさまざまな位置検出方式が存在するが、どこでも位置がわかり、多様な用途で使える高精度で万能な位置検出方式はない。

こうした中で、我々は屋内、地下、見通しのきかない場所でも連続して対象を追跡できる無線を利用した位置検

出方式に着目している。無線を利用した位置検出システムは既にいくつか存在する。位置検出方式別に分類したものを表1に示す。

表1 無線を使った位置検出方式

位置検出方式	技術要素	利用システム例
Cell-ID方式	基地局でアンシエーションした端末を発見	・初期のPHS
電波到達時間差方式 TDOA(Time Difference of Arrival)	基地局で電波の到達時間を測定し三辺測量	・GPS方式やCDMA方式の携帯電話 ・WiFi端末位置検出
電波受信強度方式 RSSI(Received Signal Strength Indicator)	基地局で電波強度を測定し三辺測量	・PHS ・Bluetooth端末位置検出

障害物のない見通しの良い屋外では、TDOA、RSSIどちらの位置検出方式も、精度±1m程度で位置検出可能である。しかし屋内では、マルチパスフェージング（遅延波による電界強度の変動）の影響³⁾を大きく受けるため、位置精度は低下してしまう。そこでこの位置精度の低下を防ぐ技術開発に各社注力している。

TDOAの一部の製品では、乱れた電波の波形から直接波を正確に抽出でき、また各無線ノードへの電波到達時間の差をナノ秒オーダーで計測できるコストの高い専用装置を利用している。また、RSSIの一部の製品では、事前キャリブレーションによるサイトサーベイデータを利用した補正を行っている。しかし設置物の配置変更等、環境が変わるたびに人手による再キャリブレーションが必要のため、簡便さに欠ける。

我々は、こうしたマルチパスフェージングの影響に対し、無線ノードの低コスト、小型、省電力、手軽さ、および高い位置精度（±1m程度）を目標に、新しい位置検出方式を提案している。

受信電波強度を用いた位置検出方式

当社ではユビキタスセンサネットワークの実験プラットフォームとして、無線ノードを開発している⁴⁾。本稿で報告する位置検出方式の評価には、この無線ノードを利用している。

*1) ZigBeeはKoninklijke Philips Electronics N.V.の商標です。

無線ノードは、IEEE802.15.4準拠の2.4GHz無線LSIを搭載している。IEEE802.15.4は、ユビキタスセンサネットワークの標準無線方式として期待されているZigBee™の物理層および制御層に採用されている方式である。IEEE802.15.4は、受信電波強度などにより受信品質を上位レイヤに通知する機能を持っており、後で述べる位置検出方式では、この機能を利用している。また、無線ノードは技術基準適合証明・工事設計認証を取得しており、どこでも無線を利用した実験を行うことができる。無線ノードの仕様を表2に示す。

表2 無線仕様

周波数帯	2.4GHz
伝送速度	250kbit/s
変調方式	OQPSK
拡散方式	DSSS(2Mchip/s, 32倍拡散)
アンテナ	1/4波長モノポールアンテナ
送信電力	最大0dBm(1mW)

本稿で述べる位置検出方式は、位置が予めわかっている無線ノードの情報に基づいて移動する無線タグの位置を検出するものである^{*2), 5)}。本位置検出方式の実験システム構成を図1に示す。

まず、無線タグが信号を發し、各無線ノードでその信号の受信電波強度を測定する。測定した各受信電波強度は、位置検出サーバに集められ、提案方式による位置検出アルゴリズムにより無線タグの位置を検出する。

既存の受信電波強度を用いた位置検出方式の多くは、受信電波強度が距離に反比例して減衰する性質（距離減衰）を利用して無線タグと無線ノードの距離を推定し、複数の無線ノードからの推定距離により無線タグの位置を検

出している。しかし、実環境では、受信電波強度はノード間の距離だけではなくマルチパスフェージングなどの影響も受けるため、実際に測定した受信電波強度は距離が同じ場合でも位置や測定した時間によって大きく異なる場合がある。一方、無線伝搬特性が受信電波強度に与える影響は確率分布を用いてモデル化できることが知られており³⁾、この確率モデルから統計的推測を行うことにより無線タグの位置を検出することができると考えられる。そこで、提案方式では、実環境における無線伝搬特性を確率モデル化し、最尤法を用いて統計的推測を行う位置検出アルゴリズムにより、無線タグの位置を高精度で検出する。

提案方式では、位置検出システムを移動させる前に、実環境における無線伝搬特性を確率モデル化する必要がある。このため、まず無線タグ・無線ノード間の距離を変えながら受信電波強度を測定し、無線タグ・無線ノード間距離と受信電波強度の関係を得る。環境が頻繁に変わる場合、設置した無線ノードの間で測定し関係を得ることもできる。次に、無線伝搬特性を考慮して実伝搬環境のモデル化を行い、無線タグからの距離 r における受信電波強度 P の条件付確率密度関数 $p(P/r)$ を得る。これまでの研究を通じて、実伝搬環境の受信電波強度は指数分布でモデル化でき、条件付確率密度関数 $p(P/r)$ は、次式で表すことができることが判っている。

$$p(P/r) = 1/\Lambda(r) \exp(-P/\Lambda(r)) \quad (1)$$

$$\Lambda(r) = Cr^{-\alpha} \quad (2)$$

ここで、 $\Lambda(r)$ は距離 r における平均受信電波強度を示しており、 C および減衰係数 α は伝搬環境のモデル化時に決まるパラメータである。

位置検出サーバは、この確率モデルを用いて最尤法による統計的推測を行うことにより、無線タグの位置を検出する。まず、無線タグの位置を $\theta = (x, y)$ 、各無線ノードから送信されてきた受信電波強度を $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ と表し、無線タグの位置が θ であると仮定したときに、各無線ノードの受信電波強度が P である確率を考える。この確率は条件付確率密度関数 $p(P/\theta)$ で表現することができる。無線タグと各無線ノード間の伝搬路が独立であると考えると、 $p(P/\theta)$ は次式のように無線タグの各位置での条件付確率密度関数の積で表すことができる。

$$p(P/\theta) = p(P_1/r_1) p(P_2/r_2) \dots p(P_n/r_n) \quad (3)$$

ここで、 r_i は、無線タグの位置を θ とした時の無線タグから受信電波強度 P_i を測定した無線ノードまでの距離である。式 (3) を無線タグの位置 θ の関数とみなした関数 $L(\theta) := p(P/\theta)$ を尤度関数とし、 $L(\theta)$ を最大にす

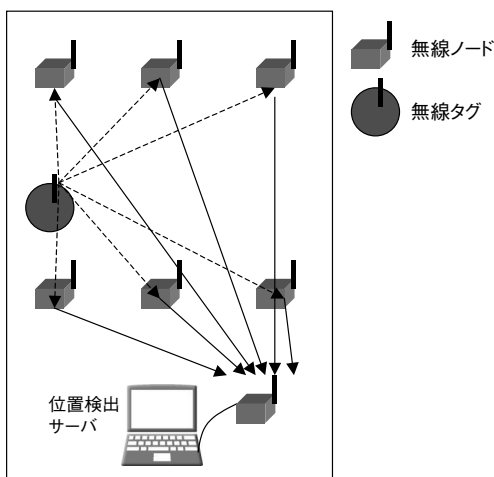


図1 位置検出方式の実験システム構成

*2) 本研究は大阪大学との共同研究である。

る θ が無線タグの推定位置である。

屋内評価実験

我々は、2005年1月、国土交通省の「自律的移動支援プロジェクト神戸プレ実証実験」の一環として、神戸市「さんちかタウン」地下街にて本位置検出方式の屋内評価実験を行った。地下街の天井に、無線ノードを縦5m、横1.5m間隔でメッシュ状に15個配置し、無線ノード側のアンテナ傾斜角を水平に、無線タグ側を垂直にセットし、図2に示すような形で実験を行った。

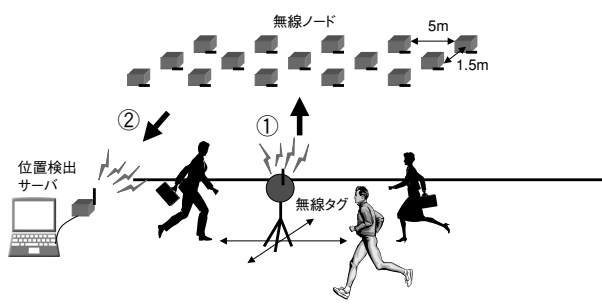


図2 地下街システム構成

本実験における無線タグが発信した電波の距離減衰を図3に示す。減衰係数 α は、1.93である。一般的に、都市圏でのセルラ無線の減衰係数は2.7~3.5、陰になる都市圏セルラ無線は、3~5である。実験を実施した環境は一分間に100人以上の往来があるため、安定した定在波が存在できず、結果的に自由空間（減衰係数2.0）に近い減衰となっている。

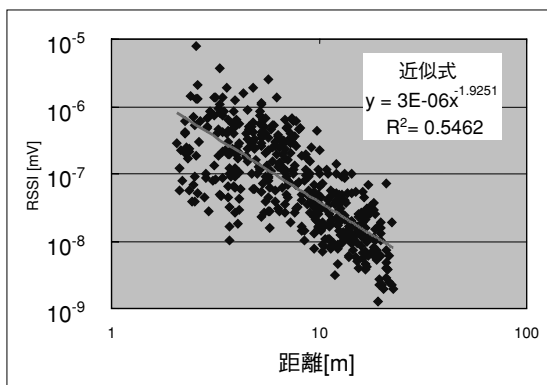


図3 距離減衰

また受信電波強度測定値の変動分布と指数分布との相関係数は図4に示すように0.92となり、実験環境の受信電波強度は、式(2)で示す指数分布で近似できることを確認した。

無線タグを任意の位置に設置し、各設置点において1秒間隔で100回測定を行った。推定結果の誤差を10cm単位で分類し、その誤差範囲に推定結果が何回入ったかをカウントする方法で、ある1つの設置点についてまとめた結果を図5（系列名「屋内評価実験」）に示す。設置位置と推定結果平均値との差異は1.80m、その標準偏差は1.18であった。

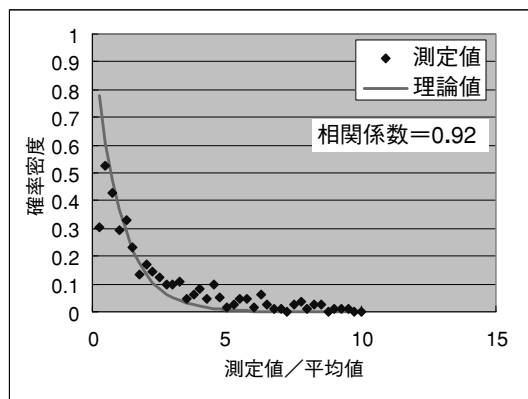


図4 RSSI変動分布

本位置検出方式の性能改善

図5の屋内評価実験の系列を見ると、地下街での誤差の分布はピークがある訳ではなく、また標準偏差も大きいことがわかる。そこで、その原因を実験データから考察し、改善を試みる。

100回の電波強度値の分析から、無線ノード・無線タグ間の距離から予想される電波強度と測定値とが、大きく異なる無線ノードが存在すること、また歩行者の移動等の影響により、1秒ごとの測定値も大きく変動していることがわかった。本位置検出は無線タグが発信した一つの電波を使って位置を検出するものであるため、電波強度の変動は推定結果に大きく影響を与えてしまう。そこでこの影響を低減するために、電波強度値の時間変動まで加味した改善が有効かどうかをシミュレーションで確認する。

特定の時間長の中に測定された受信電波強度の平均値処理を全ての無線ノードで行い、その値を元に条件付確率密度関数の積をとる本方式で位置検出した結果を改善1とし、また測定された受信電波強度値の中から最大値、最小値を除いた平均値処理を全ての無線ノードで行い、その値を用いて本方式で位置検出した結果を改善2とし、シミュレーションした結果を図5に示す。

図5の比較からわかるように誤差、標準偏差共に小さくなり、本改善手法は効果の高いことがわかった。本改善

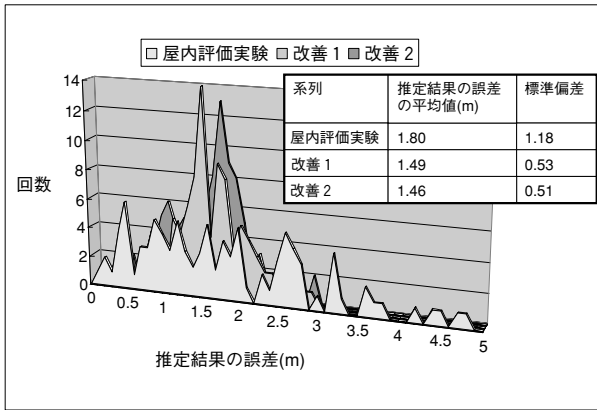


図5 推定結果

手法でリアルタイムな位置検出を実現するには微小時間での連続した電波強度の測定が必要である。今後10ms間隔程度の連続電波送出実験による測定を行い、本改善手法の検証を実施することを考えている。

我々はZigBee™による低コストで小型な無線ノードを使って、目標の位置精度±1mに近いところまで達成しつつある。また本方式は、配置物の移動等により環境が変化しても、設置済の無線ノード間で互いに電波強度を測定することによって、その環境の無線伝搬特性を自動的に求めることができるため、手軽な位置検出方式であると言える。しかし、現行のZigBee™には省電力通信モードがないため、無線ノードの長時間の電池駆動は難しく、常時電源を必要とする。また展示会場のような広い空間では、都合の良い所に無線ノードの設置場所、電源を確保できるとは限らないなど、設置面に関してはまだお手軽とは言えない。

位置精度の向上のみならず、これらの課題を解消する位置検出方式の更なる技術開発を今後も進めていきたいと考えている。

用途について

これまでの成果を元に本位置検出方式の適用可能な用途について少し触れる。

人の位置情報を使ったサービスの中で、要求される位置精度で分類し、まとめたものを表3に示す。システムが

表3 用途例と要求される位置精度

高い位置精度を要求するもの (±1m程度)	低い位置精度でもよいもの (±2~3m程度)
<ul style="list-style-type: none"> ・セミナー等での着座顧客特定 ・陳列商品単位の立止り人数計測 ・視覚障害者移動支援等 	<ul style="list-style-type: none"> ・歩行者ナビゲーション ・緊急時の自位置通報 ・お年寄り、子供の第三者検索等

人の所在を知る用途や、人と物の位置関係を知るような用途では、高い位置精度が要求される。しかし、人が人の所在を知るような用途では、位置精度がたとえ±2~3mだとしてもそれほど困らない。

このことから、まずは人が人の所在を知る用途をターゲットに本位置検出方式の実用化検討をしていきたい。

まとめ

無線ノードだけで容易に位置測定ができ、位置検出インフラの低コスト化を狙った新しい位置検出方式について紹介した。また地下街における位置検出実験を通じ、性能の確認と改善の可能性について報告した。今後は、無線ノード間隔の拡大と省電力化による設置条件の緩和および位置検出精度向上に向けて、引き続き大阪大学と共同して取り組んでいくつもりである。◆◆

参考文献

- 1) 徳田英幸：“ユビキタスサービスとネットワーク社会の到来に向けて”，情報処理学会誌，45巻9号，pp.900-906，2004年9月
- 2) ZigBee Alliance，<http://www.zigbee.org>
- 3) 奥村義久，進士昌明：“移動通信の基礎”，社団法人電子情報通信学会，pp.61-77，1986年
- 4) 福永茂，他：“ユビキタスセンサネットワークの開発”，沖テクニカルレビュー200号，Vol.71 No.4，pp.25-29，2004年10月
- 5) 高島雅弘，他：“ZigBeeを用いた屋内位置推定方式”，信学総大，A-21-9，2005年3月

筆者紹介

- 小野昌之：Masayuki Ono. 情報通信事業グループ インキュベーション本部
 福井澤：Kiyoshi Fukui. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ
 柳原健太郎：Kentaro Yanagihara. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ
 福永茂：Shigeru Fukunaga. 研究開発本部 ユビキタスシステムラボラトリ
 原晋介：Shinsuke Hara. 大阪大学大学院工学研究科助教授
 北山研一：Ken_ichi Kitayama. 大阪大学大学院工学研究科教授