

無線 LAN を用いた屋内向け測位方式 WiPS の予備評価

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

来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、屋内で利用できる測位技術は広く普及していない。無線 LAN を通信と同時に測位にも用いることができれば、低コストかつ簡便な測位として広く普及するものとする。本稿では、筆者らが提案している無線 LAN を用いた測位方式 WiPS の実装に先立ち、実環境における受信電界強度と距離の関係を調査し、その結果を述べる。無線 LAN アクセスポイントとノート PC を用いて、室内 (48 平米) と廊下 (約 30m) で調査した。受信電界強度と距離の関係を各実験ごとに線形近似した場合の距離測定誤差は、最もよい結果を得られた実験で平均誤差 2.5m、全実験の平均誤差は 6m という結果を得た。

Preliminary Evaluation of Wireless LAN based Indoor Positioning System WiPS

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 a few technologies. If location sensing technology which use Wireless LAN infrastructure is developed, it will be used widely and can be a popular way. In this paper, we show the preliminary experiment result of our proposed location sensing technique WiPS. In the experiment we examine the relationship between signal strength and distance. A Wireless LAN access point and a notebook PC with built-in Wireless LAN adapter is used in our lab room (48m²) and corridor (30m long) for the experiment. We derive approximated linear function in each situation. When the function is used to derive distance, the total average of error is 6.0m. In a best situation, 2.5m average of error is achieved.

1. 背景と目的

本稿では、無線 LAN を用いた測位方式 WiPS (Wireless LAN based indoor Positioning System) を提案し、その予備評価結果を報告する。

WiPS は広く普及している無線 LAN を用いて位置情報を提供する仕組みである。主として屋内を対象として、無線 LAN 端末を持つ人や無線 LAN アクセスポイント、無線 LAN 内蔵プリンタなどの測位を行う。

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 要求などにに基づき、GPS や E-OTD (enhanced observed time difference)²⁾ などを用いた測位が行われている。国内では GPS を搭載した携帯電話も普及している。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、そのため広く普及するのは困難と考える。

一方で、無線 LAN (IEEE802.11b/a)、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

[†]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

れば、通信と測位が同時に提供できるため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、不特定多数が入り出す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:

従来は案内板や掲示によって案内していた目的地への誘導をはじめとして、対象者が比較的少数であるような道案内についても、きめ細やかな情報提供が可能となる。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。

- 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、利用者の動線を捉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。

- 待ち合わせ:

知人との待ち合わせ時に、市街地の人ご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。

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⁵⁾。

屋外での測位技術として広く普及している 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。衛星からの電波を受信できない屋内では一般に使用できない。

携帯電話では A-GPS (Assisted GPS) や E-OTD などの測位技術が用いられている。A-GPS は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 GPS である。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。この他にも基地局側で受信時刻を用いる TDOA(Time Differ-

ence of Arrival) や、基地局で測定した方角を用いる AOA(Angle of Arrival) などの方式がある²⁾。

屋内での測位は、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⁶⁾ が挙げられる。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、天井などにセンサーを設置するなど設備の導入コストの点で不利である。測位対象の人やものに付属する超音波発信機の出す超音波を天井などの複数の超音波受信機で受信し、三角測量で位置を特定する。

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、RADAR⁷⁾ や小川らの研究⁸⁾ が挙げられる。共に本研究と同様に無線 LAN を用いた測位方式である。いずれも無線 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 では学習方式と共に、学習不要の無線伝播モデル化方式も提案している。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 台の基地局を設置し、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 台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。

3. WiPS の仕組み

無線 LAN を用いた屋内向け測位方式 WiPS は無線 LAN の受信電界強度から無線端末間の距離を計測し、測位を行う。しかしながらマルチパスフェージングの影響から、受信電界強度と無線端末間の距離の関係は線形とはいえない。この影響を削減すべく WiPS の基本的な仕組みを次のようにする^{10),11)}。

- アクセスポイントなど位置が既知である一部の無線機器の位置を測位基準とする。
- 受信電界強度を用いて無線機器間の距離を計測する。
- 無線機器間の距離と測位基準を測位サーバに集計し、複数の無線機器の位置を相互補完しながら推測する。
- 距離を計測する際に、測位基準となる無線機器との距離だけでなく周囲のすべての無線機器との距離

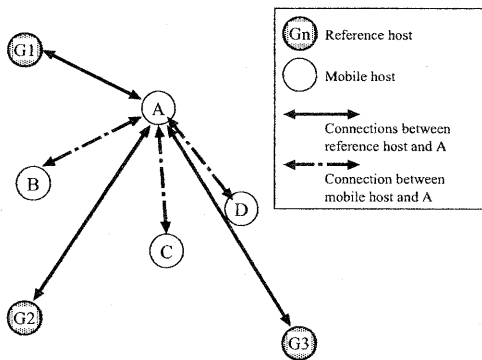


図1 WiPSの仕組み。
無線端末 A の位置を特定する際、従来は基地局との位置関係のみを計測していたが、本方式では無線端末間での位置関係も計測する

離を計測することにより測位精度の向上を図る。上記の仕組みを導入した結果 WiPS は次のような特徴を備える。

- 空間あたりの無線機器の台数が増加するにしたがって測位精度が向上する。
- 基準となる無線機器の台数が少なくてもある程度の測位精度を確保できる。

この特徴は図1の無線端末 A の測位を例に考えると、従来方式では位置の基準となる基地局と無線機器の相対位置のみに着目していた(図1実線)。本方式では無線機器間の相対位置にも着目する(図1破線)ことによって測位精度の向上を目指す。

これまでに、これらの特徴についてシミュレーションによって評価した¹¹⁾。シミュレーションの結果、機器間の距離測定に $\pm 20\%$ 程度の誤差が含まれている場合でも無線機器の台数に応じて 3m から 5m 精度での測位が可能であることがわかった。シミュレーション条件として、無線端末間の距離測定の誤差が大きいことが予想されることから距離測定の誤差を大きめにとり、距離あたりの誤差が $\pm 20\%$ 以内に収まる確立が 95.5% となる正規分布とした。その他のシミュレーション条件としては、200m \times 200m 平面に無線送信半径 100m の無線機器を配置し、位置の基準となる無線端末 4, 5 ないし 9 台を規則的に配置した上、位置を測定する無線端末を 5 台から 50 台ランダムに配置して行った。

4. 実験

4.1 実験環境

今回の実験では WiPS を実装するに先立ち、2 点間での無線 LAN の受信電界強度を測定することす

る。一方に市販のアクセスポイント、他方にノート PC を利用して、双方で受信電界強度を測定し、距離と受信電界強度の関係を調査する。

実験で用いた実験環境は次のとおりである。

- 無線 LAN アクセスポイント
メルコ社製 AirStation WLA-L11G (ファームウェア Ver.2.31, 無線部ファームウェア WLI-PCM-L11G Ver.6.14)
- 無線 LAN 内蔵ノート PC
IBM 社製 ThinkPad s30(2639-4WJ, 内蔵無線 LAN: IBM Gold Card, Primary ファームウェア Ver.4.04)

受信電界強度は ThinkPad 付属の IBM Wireless LAN Client Manager Ver.1.49 の Link Test 機能を用いて測定した。LinkTest 機能はノート PC での受信電界強度に加えて、アクセスポイントでの受信電界強度も同時に測定することができる。測定値は 1 秒間隔で得られ、1 秒間に 4 回計測した値の平均値である。測定可能なパラメータは、信号レベル [dBm], 雑音レベル [dBm], S/N 比 [dB] であり、今回は信号レベルを分析する。

測定環境を図2に示す。約 48 平米の部屋とその部屋につながる廊下において、部屋内に無線 LAN 基地局を固定点に設置し、ノート PC は各地点に三脚をつかって床から 1m の高さで設置した。アクセスポイントの場所は図2に示す場所に固定とし、ノート PC は図2の A1 から A5 および C10 から C35 の計 16 地点に設置して計測した。測定時間は各地点で 1 時間である。A1 から A5 の 5 地点はアクセスポイントと同室内で、アクセスポイントからの距離がおおよそ 1m から 5m までの 1m おきの 5 地点である。A3, A4, A5 においてはその左右に高さ 75cm の机もしくは高さ 140cm の棚があり測定環境としては好ましいとはいえない状況であった。一方 C10 から C35 の 11 地点はいずれも直接波の届かない廊下で、反射波によって通信を行っているものと考えられる。廊下はアクセスポイントのある部屋から木製のドアでつながっており、部屋と廊下との間の壁は 20cm のコンクリート壁である。図2にあるように、アクセスポイントのある部屋にはドアが 3 つあり、うち二つは隣の部屋に通じる。隣の部屋からさらに廊下に通じるドアも存在する。ドアはいずれも木製であり、電波の透過率は高いと考えられる。

さらに後日、部屋内の環境が若干異なる状態で A1 から A5 を結ぶ直線状で約 33cm 間隔の 13 地点でも 30 分間の計測を行った。また測定の際、ノート PC

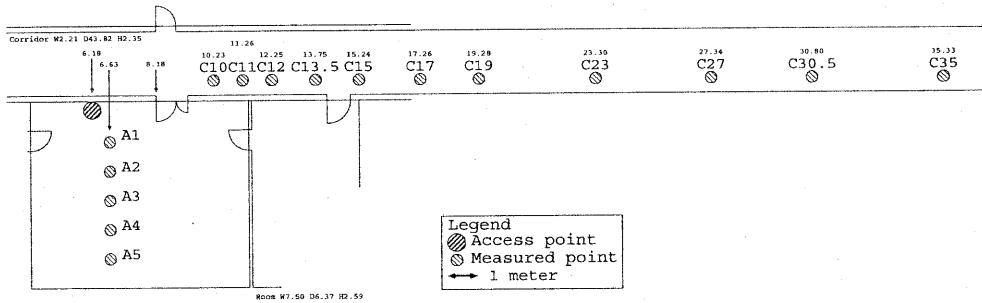


図 2 測定環境

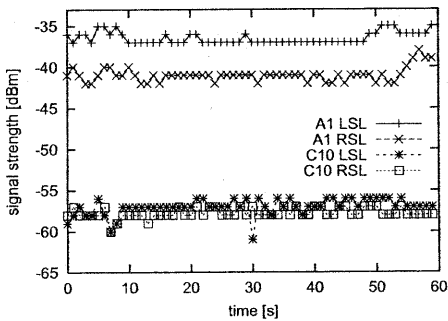


図 3 測定値 (一部抜粋)

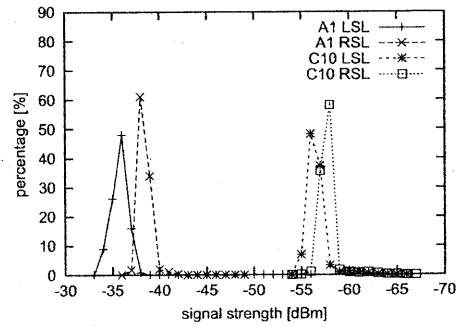


図 4 測定値のヒストグラム (一部抜粋)

およびアクセスポイントの周辺はできる限り無人として、人体の影響が少なくなるよう配慮した。

4.2 実験結果 1

図 2 の 16 地点にノート PC を設置した際の結果について述べる。まず図 3 と図 4 に A1 と C10 での測定結果の例を示す。

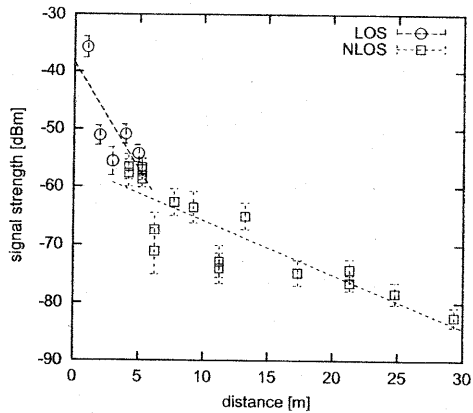
図 3 は信号レベルの変化を表したグラフである。各線は各観測地点にノート PC を設置したときの信号レベルの変化を、1 秒刻みに 60 秒間の値を示している。使用したユーティリティでは 1 秒間に 4 回測定を行い、その平均が得られる。図 3 の A1 LSL と A1 RSL はノート PC を A1 に設置した際の測定値で、ノート PC 側での測定結果を A1 LSL、アクセスポイント側での測定結果を A1 RSL に示している。A1 ではノート PC とアクセスポイントの距離はおおよそ 1m である。一方 C10 LSL と C10 RSL はノート PC を C10 に設置した際の測定値で、ノート PC とアクセスポイントの距離はおおよそ 4m である。A1 同様 C10 LSL はノート PC での測定値、C10 RSL はアクセスポイントでの測定値である。

図 4 は、図 3 同様に A1 と C10 の 2 地点にノート PC を設置した場合の信号レベルのヒストグラムであ

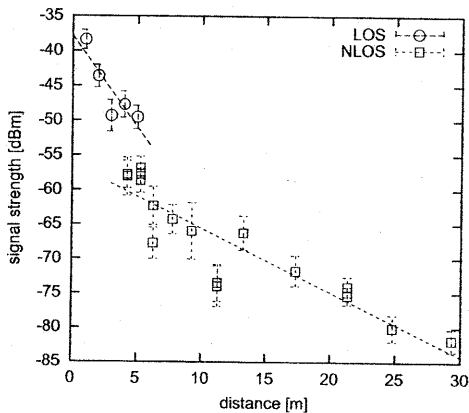
る。一秒おきに一時間計測したデータから作成している。他の地点での測定データについてもほぼ同様のばらつきとなる。このように定点で信号レベルを観測した場合にも時間と共に信号レベルがふらつくことを確認し、その分布を正規分布と仮定することとした。

図 5(a) と (b) は、距離と信号レベルの関係をグラフに表したものである。(a) はノート PC 側での受信電界強度の測定結果を、(b) はアクセスポイント側での測定結果を示している。各点は信号レベルの平均値を示しており、点から上下に伸びるバーは正規分布を仮定した場合に 95.5% の信号レベルが入る区間を示している。LOS(Line of Sight) で示す点はアクセスポイントと同室内の A1 から A5 にノート PC を設置した場合の測定結果であり、アクセスポイントとノート PC が直接視界に入っている場合の結果である。NLOS(Non-Line of Sight) で示す点は図 2 の C10 から C35 にノート PC を設置した場合の測定結果で、アクセスポイントは室内にあってノート PC が廊下であり、互いに直接の見通しが聞かない位置関係にある場合である。同一距離に 2 点以上あるデータは別の時刻にほぼ同一場所で計測した結果である。

図 5(a), (b) それぞれに破線で示した 2 直線は最小



(a) ノート PC 側での測定値平均



(b) アクセスポイント側での測定値平均

図 5 測定結果 1

二乗法を用いた近似直線である。それぞれ A1 から A5 までの結果に対する近似直線と、C10 から C35 までの結果に対する近似直線である。それぞれの直線は次式で表される。ただし、 SS は受信電界強度 [dBm]、 $dist$ はアクセスポイントとノート PC 間の距離 [m] である。

(a) ノート PC 側の近似直線:

$$SS[\text{dBm}] = -3.69 \times dist[\text{m}] - 38.46 \quad (\text{LOS})$$

$$SS[\text{dBm}] = -0.93 \times dist[\text{m}] - 56.50 \quad (\text{NLOS})$$

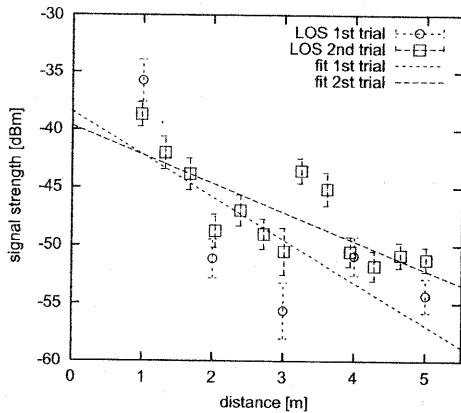
(b) アクセスポイント側の近似直線:

$$SS[\text{dBm}] = -2.63 \times dist[\text{m}] - 37.83 \quad (\text{LOS})$$

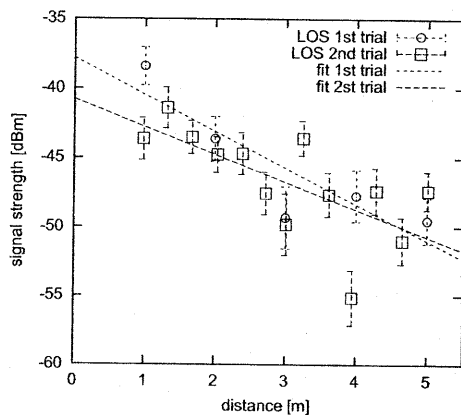
$$SS[\text{dBm}] = -0.93 \times dist[\text{m}] - 56.27 \quad (\text{NLOS})$$

4.3 実験結果 2

次に A1 から A5 を結ぶ直線上で約 33cm 間隔の 13 地点にノート PC を設置し、各 30 分間の計測を行った。図 6 の LOS 2nd trial に測定結果を示す。



(a) ノート PC 側での測定値平均



(b) アクセスポイント側での測定値平均

図 6 測定結果 2

あわせて実験結果 1 で示した A1 から A5 の各地点での測定結果も併記している (図の中 LOS 1st trial). 計測地点の距離がほぼ同一でも、計測した時間によって、値が異なる部分が確認できる (1m 地点など)。

図 5(a), (b) それぞれに破線で示した 2 直線は最小二乗法を用いた近似直線である。濃い破線が実験 2 の 13 地点の測定値に対する近似直線、薄い破線が実験 1 の LOS (A1 から A5; 5 地点) での測定値に対する近似直線である。実験 1 の直線の式は前節 (LOS) の通りである。実験 2 の近似直線の式を次に示す。

(a) ノート PC 側の近似直線:

$$SS[\text{dBm}] = -2.50 \times dist[\text{m}] - 39.68 \quad (\text{実験 2})$$

(b) アクセスポイント側の近似直線:

$$SS[\text{dBm}] = -1.99 \times dist[\text{m}] - 40.77 \quad (\text{実験 2})$$

4.4 誤差の考察

近似直線を用いて距離測定を行うと仮定して、各地

表 1 近似直線との誤差

データセット	強度誤差平均 [dBm]	距離誤差平均 [m]
(a) ノート PC 側での測定値		
実験 1 LOS	4.54	16.77
実験 1 NLOS	3.46	3.21
実験 2 LOS	2.10	5.23
(b) アクセスポイント側での測定値		
実験 1 LOS	1.66	4.36
実験 1 NLOS	2.64	2.46
実験 2 LOS	1.97	3.92

点での受信強度から近似直線を用いて距離を算出し、実際の距離との誤差を考察する。

表 1 に前節までに求めた近似直線を基準とみなして、各地点での受信電界強度の平均誤差を示す。平均誤差とは、測定した各地点それぞれについて、その距離における近似直線上の受信電界強度と実測値との差を強度誤差とし、測定地点すべての強度誤差の平均を強度誤差平均としている。同様に、各地点の平均受信電界強度における近似直線上の距離と実測値の差を距離誤差としてその平均を距離誤差平均としている。表 1 の平均距離誤差は 2.5m から 16.8m であり、全体平均はおおよそ 6 m となる。すなわち、今回の近似直線を用いて、アクセスポイントとノート PC の距離を測定するならば、6m 程度の誤差で計測可能であるといえる。ただし、無線機器や測定日時ごとに異なる近似式を用いた場合の結果であり、一般性を持つ結果ではないことに注意されたい。また、筆者らは距離あたりの誤差を一定 ($\pm 20\%$)、すなわち距離が離れるほど誤差が大きくなるモデルを採用している¹¹⁾。しかしながら本稿では簡単のため、距離に関係なく最小二乗法によって近似直線を求めている。

5. まとめ

本稿では、無線 LAN を用いた屋内向け測位方式 WiPS の概要を述べ、その実装に先立って行った実験の結果を述べた。実験は無線 LAN アクセスポイントとノート PC を用いて、無線 LAN の受信電界強度と距離の関係について調査した。受信電界強度と距離を線形近似し測定値との誤差を求めたところ、条件付ながら平均誤差 6m 程度の精度で距離測定が可能であった。特に環境の均一な廊下においては 2.5m の誤差で距離推定が可能であった。

今後、無線 LAN を用いた屋内向け測位方式 WiPS の実現においては、アクセスポイントとノート PC 間の距離を求める際に、複数のノート PC(無線機器)で受信電界強度を同時に測定する。同時に多地点で測定した測定値を相対的に用いることで高精度に測位を

行えるよう設計を進めていく予定である。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会 科研費(基盤研究(B)(2) 12480099) および笹川科学研究助成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, *Proceedings of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM'99, Seattle, Washington, USA*, pp. 59-68, Aug. 1999.
- 4) Addelee, 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) Hightower, J. and Borriello, G.: Location Systems for Ubiquitous Computing, *IEEE Computer*, Aug. 2001, pp. 57-66.
- 6) Shih, S., Minami, M., Morikawa, H. and Aoyama, T.: An Implementation and Evaluation of Indoor Ultrasonic Tracking System, 情処研報, 2001-MBL-17, pp. 1-8, May 2001.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Fall, K. and Varadhan, K., (Editors): 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/>
- 10) 北須賀 輝明, 中西 恒夫, 福田 晃, 無線アドホックネットワークを用いた位置推定システム, 情処 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2002) シンポジウム論文集, 2002 年 7 月, pp.369-372.
- 11) 北須賀 輝明, 中西 恒夫, 福田 晃, 無線通信網を用いた屋内向け測位方式, 情処 コンピュータシステム・シンポジウム 2002 論文集, 2002 年 11 月, pp.83-90.