

正規化した最小2乗法による高精度位置検出の検討

渋谷 昭範[†] 中津川 征士[†] 久保田 周治^{††} 梅比良 正弘[†]

近年、移動通信サービスは、ユーザ位置に関連した情報を扱うサービスの基盤として期待されている。筆者らは、無線システムの資源を利用することによって屋内利用を実現するシステムのうち、端末への導入が容易な受信信号強度を用いた技術に着目し、研究を進めている。

本稿では、従来の位置検出計算に用いられている最小2乗法を、受信信号強度から推定する伝搬距離で正規化することによって実現できる高精度な位置検出計算方法を提案する。また、計算機シミュレーションによって、提案方式が従来方式と比較して累積95%検出誤差を38%改善できることを明らかにする。更に、受信レベル変動・基地局数・伝搬定数による検出精度への影響を評価し、様々な環境下での提案方式の優位性を明らかにする。

Highly Accurate Position Detection Using Normalized Least Square Method

Akinori SHIBUYA, Masashi NAKATSUGAWA, Shuji KUBOTA, and Masahiro UMEHIRA

Mobile communication services are now expected as an infrastructure of information services relating to the user position. We have focused on the technologies to detect positions indoor by means of received signal strength, because they can be introduced into the terminal without significant changes.

In this paper, we propose a novel detection method using the normalized Least Square Method by each propagation distance calculated from received signal strength. Moreover, the computer simulation clarified that the proposed method can improve the detection error of 95% cumulative probability by 38% in comparison with a conventional method. Furthermore, we have evaluated the influence on the detection accuracy by the variations, the number of base stations, and the propagation constant. The results confirm that the proposed method is superior to the conventional method under various environments.

1. はじめに

2000年には、移動通信サービスの加入者数は、固定電話サービスの加入者数を越え、更なる増加を続けている[1]。また、これまでの音声通信を中心とした利用から、データ通信を中心とした利用へのパラダイムシフトが急速に進んでいる[2]。並行して、データを取り扱う移動通信端末の高機能化も急速に進んでおり、iモードに代表されるように、単体でインターネットにアクセスできる機能等を搭載した移動通信端末が爆発的に普及している[3][4]。そのため、移動通信サービスは、その巨大な市場性とパーソナルな利用形態によって、Eコマース等の新たなビジネスインフラとして最も注目されている分野の一つといえる。

移動通信サービスは、「いつでも」「どこでも」「だれとでも」通信が行えることを目標として発

展してきた。そして、上述のようなデータ通信の普及に伴い「どこでも」という期待は、ユーザの位置に関連した情報を扱うコンテンツ配信、歩行者ナビゲーション等の新しいサービスへと発展していく可能性がある。この発展は、ユビキタス・コンピューティングという概念の一端といえるであろう[5]-[7]。

このようなサービスの具体例として、徘徊する高齢者等の位置把握、メンテナンス・スタッフやタクシーの配置管理、高齢者・障害者を含めた歩行者の支援が考えられ、一部は既実現されている[8][9]。一方、アメリカの連邦通信委員会(FCC)は、Enhanced 911(E911)規制の発布によって、移動通信事業者に対して加入者が緊急通報する際にその位置を検出し交換手に提供する機能の追加を義務付けている[10][11]。更に、この潮流は世界中に広がる可能性があると考えられる。これらの位置情報に関するサービスの実現には、広い適用領域においてユーザの位置を正確に検出する技術が重要となり、それらの開発に大きな期待

[†] 日本電信電話株式会社 NTT 未来ねっと研究所
NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation

^{††} 日本電信電話株式会社 NTT 先端技術総合研究所
NTT Science and Core Technology Laboratory Group, NTT Corporation

が寄せられている。

移動通信端末の位置を検出する技術は、主に2種類に分類される。その1つは、図1の右上に示すように高精度な位置検出を提供できるGPS(グローバル位置情報システム)を利用したシステムである[12]。しかし、これらのシステムは人工衛星を用いているため、その信号が地下街・高層ビル街等において遮断されてしまい、位置が検出できない可能性がある。更に、これらのシステムでは、上述のような環境において位置検出を実現することは理論的に不可能である。一方、受信信号強度や到来波方向などの無線システムの資源を利用することによって屋内での位置検出を実現するシステムが考えられる。我が国で実用化されている代表的なシステムとして、PHS等のマイクロセル・システムの特徴を活かした位置検出技術がある[13]-[15]。GPSと比較すると、その位置検出精度は高くないため、現在PHSシステムが提供可能な検出精度では、様々なコンテンツやサービスの提供が困難であるという問題を抱えている。しかし、これを高精度化することによってGPSでは提供が困難なエリアでのサービスの実施が可能になると考え、我々は無線システムの資源を活用する位置検出システムの高精度化を目指す。

無線システムの資源を活用する位置検出技術として、主に(AoA: Angle of Arrival), 到来時間(ToA: Time of Arrival), 到来時差(TDoA: Time Difference of Arrival), 若しくは、受信信号強度(RSS: Received Signal Strength)測定を用いた方法が提案されている[16]。確かに、ToAやTDoA等の方式による精度と比べてRSS方式による検出精度は低い。しかし、RSS方式は、一般的な無線通信端末に対してハードウェアの追加を必要と

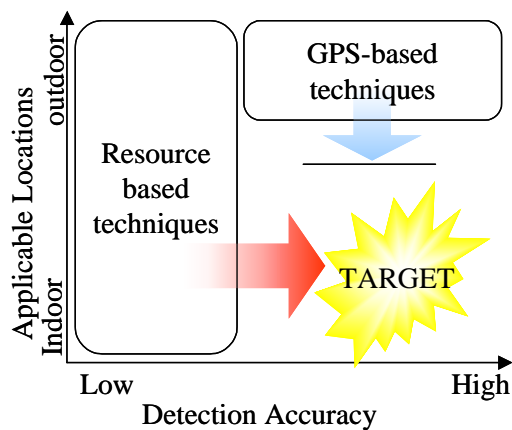


図1 位置検出技術の適用範囲

しないため、ネットワークへの最小限の変更だけで全ての端末に導入できる利点がある。

また、CDMAの特徴を用いて高精度な位置検出を提供する技術が報告されており[17][18]、次世代移動通信システム等への導入が期待されている。しかし、数年後においても、PDCやPHSを中心とした非CDMAシステムは、第3世代システムに代表されるCDMAシステムと共存していると予想される[19]。そのため、これらの非CDMAシステムにおいても位置情報サービスを提供するために、RSS方式を用いた高精度位置検出技術を検討することは重要であると考えられる。

本稿では、位置検出において最小2乗法を用いる場合の問題点を指摘して、その問題点を解決し、高精度な位置検出を実現できる新たな位置検出計算方法を提案する。更に、計算機シミュレーションを用いて、提案方式が従来方式と比較して高精度な位置検出を実現できることを示す。また、様々な環境においても、提案方式が高い位置検出精度を提供できることを確認したので、それらの結果を報告する。

2. 従来方式

2.1 最小2乗法

これまで、前述のRSS方式の代表的システムであるPHSによる位置検出は、接続可能な基地局の位置を移動局の位置とするセルベースであった[20]が、複数の基地局からの信号を用いた位置検出によって、その検出精度の向上を実現している[13]。

一般に、複数の基地局を用いた位置検出を実施するために最小2乗法を用いる[21][22]。最小2乗法では、求めるパラメータを変化させ、2乗誤差の最小値を求めることによって、最適なパラメータの組み合わせを求める。位置検出に用いる場合、既知である基地局の位置 (x_k, y_k) と誤差を含む送受信局間の推定伝搬距離 d_k を複数用いて、式(1)で示される任意の推定位置 (X, Y) に対する評価関数 F の値を求める。その推定位置を順次変化させ、評価関数 F を最も小さくする位置 (X, Y) を導出することによって、移動局の位置を決定する。評価関数は、式(2)で示される基地局の位置と移動局の推定位置との間の幾何学的距離 D_k と受信信号強度から求められる推定伝搬距離 d_k との差の2乗和であり、 n は全基地局数である。

$$F(X, Y) = \sum_{k=1}^n (D_k - d_k)^2 \quad (1)$$

$$D_k = \sqrt{(X - x_k)^2 + (Y - y_k)^2} \quad (2)$$

$F(X, Y)$ を評価し, 目的とする (X, Y) を導出する手段として, 一定ステップの格子点の座標を順に用いる方法, 遺伝的アルゴリズムを用いた方法, ニュートン法を用いた方法等が考えられ, システムの要求に合わせて実装することができる。

2.2 推定伝搬距離 d_k

受信レベルを用いた位置検出では, 式(3)に示す距離 d に対する伝搬損失式の逆関数(式4)を求め, 受信レベルから送受信間距離 d を推定する。

$$L_p = 10 \cdot \alpha \cdot \log(d) + C \quad (3)$$

$$d = 10^{\frac{L_p - C}{10 \cdot \alpha}} \quad (4)$$

この時, α は伝搬定数であり距離減衰の傾きを示すパラメータである。 C は送受信アンテナの高さ等から求められる補正係数である。推定伝搬距離を求めるために, 奥村・秦式等の近似式を用いる報告もあるが[21][22], 本報告では位置検出アルゴリズムの提案と評価を目的としているため, 詳細な係数の全てを補正係数 C として扱い, 式(3)及び(4)の簡易なモデルを用いて検討を行う。

実際の受信信号強度は, 距離による減衰の上に重畳する形式で, 短区間中央値変動のような場所による変動やフェージングのようなマルチパスによる変動を含んでいる[23]。そのため, それらの変動を ΔL_p とすると, 式(3)は以下のように表される。

$$L_p = 10 \cdot \alpha \cdot \log(d) + C + \Delta L_p \quad (5)$$

すなわち, 式(5)のように変動を含んだ受信信号強度に対して, 式(4)を用いて伝搬距離を推定することになる。この時, 変動 ΔL_p によって生じる推定距離の誤差を Δd , その誤差を含む推定距離を d' とすると, 式(6)のように表される。

$$d' = d + \Delta d = d \times 10^{\frac{\Delta L_p}{10 \cdot \alpha}} \quad (6)$$

更に誤差 Δd について式(6)を変形すると,

$$\Delta d = d \times \left(10^{\frac{\Delta L_p}{10 \cdot \alpha}} - 1 \right) \quad (7)$$

と表すことができる。式(7)は, 送受信間距離 d が大きくなるに従い, 誤差 Δd が増大するという誤差の距離依存性を示している。これが, 最小2乗法によって位置検出計算を行う際の問題点である。次章において, この問題点に対する改善方法を提案する。

3. 提案方式

前章で述べた送受信間距離 d と推定距離の誤

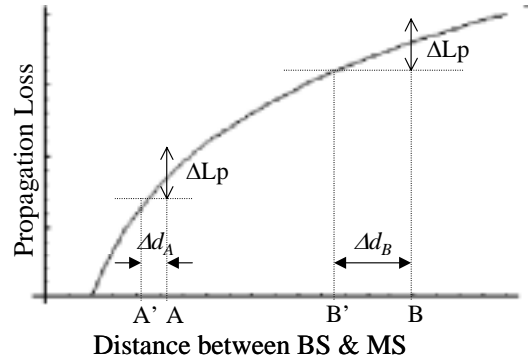


図2 受信信号強度の変動と推定伝搬距離誤差の関係

差 Δd の関係は, 遠方の基地局よりも, 近傍の基地局からの受信信号強度が, 高い信頼性の情報を含んでいることを意味する。ここで情報とは受信信号強度から換算した推定伝搬距離を意味している。その信頼性について, 図2を用いて説明する。横軸は, 基地局と移動局間の伝搬距離, 縦軸は信号強度の減衰量を示している。伝搬距離が比較的長いB地点において, 受信信号強度が ΔL_p 変動すると, 距離推定式に導入した結果は B' 地点となる。しかし, 基地局と移動局が比較的近い距離にあるA地点において, 同じ ΔL_p だけ受信信号強度が変動した時, 距離推定の結果は A' 地点となる。すなわち, 同じ ΔL の受信信号変動量にも関わらず, Δd_A と Δd_B の異なる誤差を導出してしまっている。これは, 受信信号強度が距離減衰に対して短区間中央値変動や瞬時変動を重畳した値であるため, 常に起こりうる問題である。

しかしながら, 従来の最小2乗法の評価関数は, 受信信号の変動に対する推定距離の誤差への影響を考慮することなく, 信頼性に距離依存性がある各項を平等に累算してしまっている。

そこで, 式(8)に示すような基地局と移動局間の伝搬距離 d_k によって評価関数 F の各項を正規化する方法によって, その距離依存性を排除する方法を提案する。

$$F(X, Y) = \sum_{k=1}^n \left(\frac{D_k - d_k}{d_k} \right)^2 \quad (8)$$

提案方式は, 送受信間距離が短い位置に存在する基地局から送信された信号の情報を重視して, 移動局から遠方に位置する基地局から送信された信号からの情報に対して, 小さな重みを付けることによって, 各基地局から得られる情報の信頼性を均一化して評価する特徴がある。図3は, 情報源に対する重み付けの概念について, グラデーションを用いて表しており, 移動局の近傍に位置する基地局は, より濃厚なグラデーションで色付けられている。

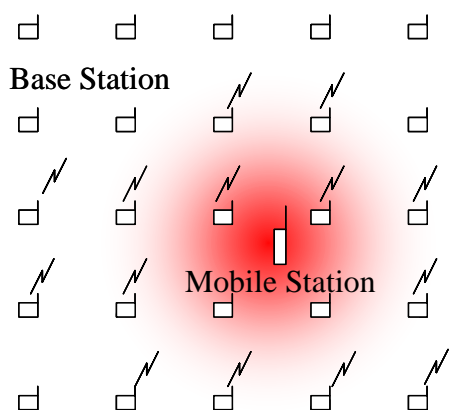


図3 提案方式の特長を示す概念図

また、実際の計算では、予め正確な伝搬距離 d を用いて正規化することは困難であるため、受信信号強度から算出した推定伝搬距離 d' を用いて各項の正規化を行う。

4. 計算機シミュレーション評価

提案方式による位置検出精度を計算シミュレーションによって評価した。まず、基本的な環境における提案方式による検出精度の改善について示し、その後、複数の環境パラメータを変化させることによって、様々な環境における提案方式の有効性を示す。

想定したシミュレーション環境では、図4のような19個の六角セルを構成するように基地局を配置し、灰色の正方形の範囲内にユーザをランダムに配置させる。位置検出計算は、計算範囲の制限によって結果が歪んでしまうことを排除するためにユーザを配置する範囲より広く与え、点線で囲まれた正方形の範囲で実施する。今回、一定ステップの格子点の座標を順に用いる方法を採用した。

また、1つの基地局から信号を複数回受信し、

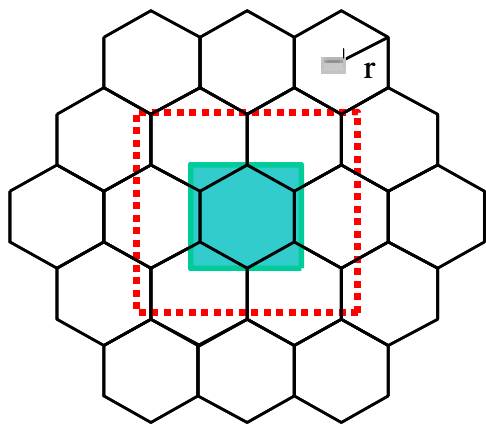


図4 シミュレーション環境

表1 基本シミュレーション条件

| | |
|---|-----|
| Real Propagation Constant α | 2.0 |
| Assumed Propagation Constant α_p | 2.0 |
| Standard Deviation of Short-term Variations σ (dB) | 4.0 |
| Cell Radius (m) | 50 |
| Number of BS | 19 |

それらの平均値を計算に用いる受信信号強度として扱う。そのため、短区間中央値変動による誤差に着目し、実際の距離減衰と推定した距離減衰の差は無視して評価した。

短区間中央値変動量、基地局数、伝搬距離特性の3つをパラメータとして、検出誤差の評価を行った。基本シミュレーション条件を表1に示す。

図5に、基本パラメータの環境下における従来方式と提案方式の位置検出結果の累積確率分布を示している。図から全ての累積確率において、提案方式が、従来方式と比較して高精度な検出精度を実現できていることが分かる。表2に、累積確率95%・67%における検出誤差とその改善率を示す。これらの値はE-911規制において検出精度の基準として指定されている。提案方式が、基本パラメータの環境下で、それぞれの累積確率に対して38%・43%の改善を達成できることを明らかにした。図5では、一例として基本パラメータの環境下における提案方式の優位性を示した。以降は、各パラメータを変化させることによって、それらの変化に対する提案方式の高精度化検出

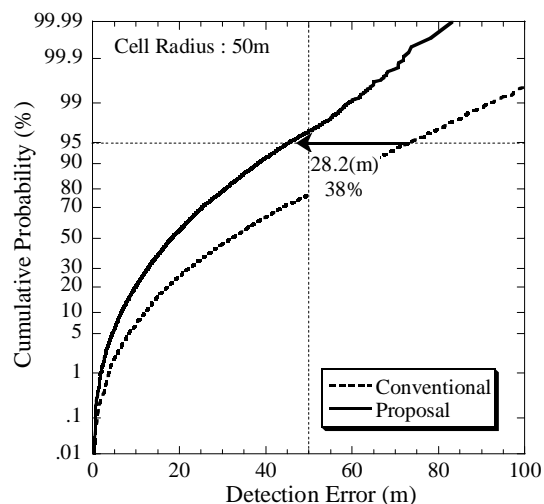


図5 基本パラメータ環境下における提案方式と従来方式の検出誤差の累積密度関数

表2 基本パラメータ環境下における提案方式と従来方式の位置検出誤差

| | Proposal (m) | Conventional (m) | Improvement |
|-----|--------------|------------------|-------------|
| 95% | 45.4 | 73.6 | 38% |
| 67% | 24.1 | 41.9 | 43% |

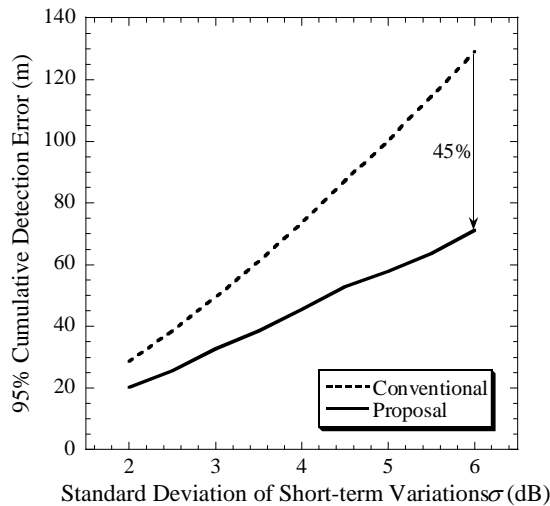


図6 受信信号強度の短区間中央値変動の標準偏差 σ による95%累積位置検出誤差への影響

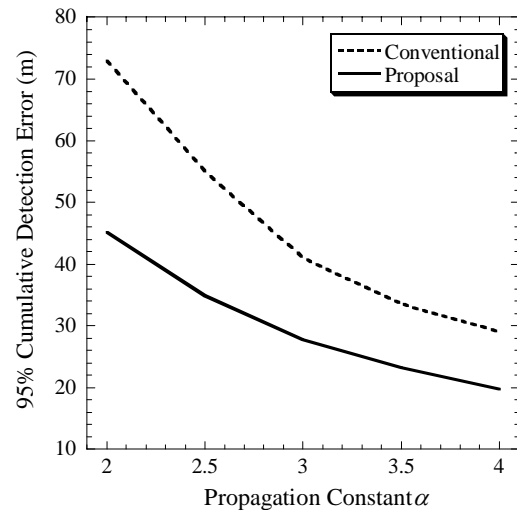


図8 伝搬定数 α による95%累積位置検出誤差への影響

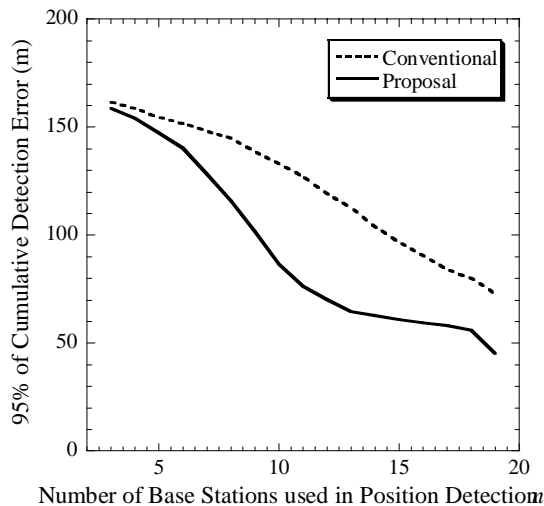


図7 基地局数 n による95%累積位置検出誤差への影響

結果への影響を評価する。

図6に短区間中央値変動量による検出誤差の累積95%値をプロットした。変動の標準偏差に関わらず、提案方式が従来方式より高精度な検出を実現していることが分かる。また、その改善効果は、 σ の増大に従い、より顕著になっており、 $\sigma = 6.0$ において、45%の改善を実現している。提案方式は、変動誤差によって生じる推定距離の誤差の信頼性を均一化する点に特長があるので、信頼性にばらつきがある従来方式と比較した時、その推定伝搬距離誤差を引き起こす受信信号強度の変動の偏差が大きい環境で、特に大幅な検出精度の改善がみられたと考える。

図7は、基地局数による検出誤差への影響を

示している。従来方式・提案方式ともに、基地局数の増加に伴い検出誤差が改善されている。基地局数が極めて少ない環境では、従来方式と提案方式との差は大きくないが、提案方式が、従来方式と比較して常に高精度な位置検出を提供できることが分かる。これは、基地局数の増加に伴い、移動局から遠方に位置する基地局から送信される信号を用いる確率が増加し、信頼性の低い推定伝搬距離を用いて位置検出計算を行うため、提案方式の効果が顕著に現れたと考える。

図8では、距離特性を与える伝搬定数 α と検出誤差の関係を示している。提案方式は、伝搬定数 α に関わらず従来方式の検出精度よりも高精度な結果を導き出しており、有効に作用していることが分かる。また、提案方式は、伝搬定数 α が小さいほど改善効果を発揮することが分かった。伝搬定数 α が小さい時、受信信号強度は緩慢に減衰する。式(3)から、 α の減少に従い一定の受信信号強度の変動 ΔL に対する Δd の距離依存性は強くなることになることが分かる。この特徴により、特に、伝搬定数が小さい場合、提案方式が高精度な検出結果を導出したと考える。

5. まとめ

本報告では、受信信号強度を用いた位置検出において、従来の最小2乗法の評価関数に用いる推定伝搬距離の信頼性が伝搬距離に依存しているにも関わらず、その評価式が推定伝搬距離を含む項を均一に扱う問題点を指摘した。

その問題点である距離依存性を排除するために、評価関数の各項を推定伝搬距離で正規化した最小2乗法による位置検出計算方式を提案した。

計算機シミュレーションによって、従来方式と

比較して，提案方式による位置検出が，95%累積検出誤差は 38%の改善を達成でき，高精度な位置検出を実現できることを明らかにした。更に，受信レベル変動・基地局数・伝搬定数による提案方式の検出精度への影響を評価し，様々な環境下で，提案方式が，従来方式よりも高精度な位置検出が実現でき，実用性に優れていることを確認した。

参考文献

- [1] 総務省，“平成 13 年版情報通信白書，”p185, July 2001.
- [2] 三木哲也，篠原弘道，“アクセスネットワークの現状と将来展望，” 信学誌, Vol.84 No.2, pp.77-83, Feb. 2001.
- [3] 高木一裕，千葉耕司，“高機能 i モード携帯機特集 サービス概要，”ドコモテクニカルジャーナル，Vol.9 No.1, pp.6-9. Apr. 2001.
- [4] 矢崎英俊，平児玉功，笹原優子，堤円香，千葉耕司，“高機能 i モード携帯機特集 高機能 i モード携帯機の概要”，ドコモテクニカルジャーナル，Vol.9 No.1, pp.10-15. Feb. 2001.
- [5] Mark Weiser, “Hot Topics: Ubiquitous Computing,” IEEE Computer, Oct. 1993.
- [6] Mark Weiser, “Some computer science problems in ubiquitous computing,” Communications the ACM, Jul. 1993.
- [7] 日経 BP, “すべては，ユビキタスから始まる。”日経エレクトロニクス，日経 BP，pp.91-123, July 2001.
- [8] 建設省，“Intelligent Transport Systems HAND BOOK in Japan,” (財)道路新産業開発機構編, pp62-63. Oct.1997.
- [9] 渡辺浩亘，牧野秀夫，北条晴正，石井郁夫，“検出領域を拡大した GPS 方式徘徊老人検索システム，”信学技報 HCS97-10 Sep. 1997.
- [10] “FCC Adopts Rules to Implement Enhanced 911 for Wireless Services,” FCC News, CC Docket no.94-102, June 1996
- [11] FCC Docket No94-102, Enhanced 911 Emergency Calling systems, RM-8143, Oct.6 1999.
- [12] E. D. Kaplan, “Understanding GPS Principles and Applications,” ARETECH HOUSE, 1996.
- [13] 大野友義，山本竜治，大塚裕幸，“PHS 網を用いた高精度位置情報システムの開発，” 2000 信学ソ大，B-5-172，Sep. 2000.
- [14] 浦本，北村 “PHS 利用による簡易な位置情報取得の検討，” 1997 信学総大，B-5-138，Mar. 1997
- [15] 坂本成利，“モバイル端末と位置情報を利用した位置検索に関する研究，”中国電力技研時報，第 9 5 号，Sep. 2000.
- [16] I. Jami, M. Ali, and R.F. Ormondroyd, “Comparison of methods of locating and tracking cellular mobiles,” IEE Colloquium on Novel Method of Location and Tracking of Cellular Mobiles and Their System Applications, May 1999, pp.1/1-1/6
- [17] 日経 BP, “CDMA による位置測定技術開発位置情報を使う付加サービスに期待，” モバイルインターネット最前線，pp.121-124, Sep. 2000.
- [18] 日立製作所 “CDMA 方式を使ったロケーション技術の開発，” 報道発表資料，July. 28. 2000.
- [19] 日経 BP, “NTT ドコモ「FOMA」サービス延期の真相，“日経コミュニケーションズ，p85, May 2001.
- [20] 川上豊，加藤康之，岩田恒和，“PHS 位置情報サービス - POINTER - ，” 情処学グループウェア研報，25-3, Nov. 1997.
- [21] 松谷英之，大野友義，山本竜治，松木英生，大塚裕幸，“PHS 位置情報システムにおける高精度化アルゴリズムの提案，” 2000 信学ソ大，B-5-174, Sep. 2000.
- [22] 菊池保文，前田典彦，久保田浩司，“PHS 位置検出方法の検討，” 情処学高度交通システム研報，4 - 7，Mar. 2001.
- [21] 進士昌明(編)，“移動通信回線の伝搬，”無線通信の電波伝搬，進士昌明(編)，pp203-206，(社)電子情報通信学会，1992.