

機関番号：13101
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560349
 研究課題名(和文) 高精度無線局位置推定のためのブラインドアレーキャリブレーション
 研究課題名(英文) Blind array calibration for precise location estimation of wireless terminal
 研究代表者
 山田 寛喜 (YAMADA HIROYOSHI)
 新潟大学・自然科学系・教授
 研究者番号：20251788

研究成果の概要(和文)：

屋内における正確な無線端末位置推定技術はユビキタスネットワークにおけるコンテキストウェアネス実現のための必須の要素技術である。本研究では、アレーアンテナによる高精度な端末方位/位置推定のための必須技術であるアレーキャリブレーション(誤差校正)に関して、弱い拘束条件を課したブラインド校正手法を、更に参照信号を用いた手法として、仮想アレーによる拡張校正手法およびマルチパス環境下での校正手法を考案し、その定量的な特性を明らかにした。さらに、屋内マルチパス環境における新たな位置推定手法を提案し、その精度を示した。

研究成果の概要(英文)：

Precise indoor wireless terminal location estimation is necessary to provide context awareness service in Ubiquitous network. For the terminal location estimation, array antenna is often adopted. In this research, we have proposed several key algorithms for antenna array calibration. For a blind calibration technique, we develop iterative method with Hermitian condition of the calibration matrix, which estimate the calibration matrix as well as direction-of-arrival of the incident waves. Two new calibration methods with reference calibration waves, the extended calibration method by using virtual array and the method in multipath environment, have also proposed. Availability of these methods is evaluated numerically and experimentally. In addition, a terminal location estimation algorithm in the multipath environments has proposed, which utilize reflected waves in the room as well as direct wave(s).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：アンテナ電波伝搬工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：アレーアンテナ, アレーキャリブレーション, 到来方向推定, 位置推定

1. 研究開始当初の背景

無線端末位置推定法として、今日まで様々な手法が提案されており、MIMO やスマート

フォンの普及に伴うマルチアンテナ(アレー)化は、アレー到来方向/位置推定の応用の可能性・必要性を益々高めるものといえる。高分解能到来方向推定の実現には、アレー素

子の相互結合，受信機利得のばらつきを含めた総合的なシステムのキャリブレーションが不可欠である。しかしながら現状では、

- 一般的に用いられている電波暗室での事前システムキャリブレーションは、設置場所の影響，経年変化に対応できない。
- アクセスポイントなどのマスプロダクトに対する個体差を踏まえた事前キャリブレーションは困難。

という問題を抱えており，その解決が高精度無線端末位置推定，さらにはユビキタスネットワークにおけるコンテキストウェアネス実現の鍵であった。その解決に寄与することが，本研究に着手した第一の動機である。

加えて，キャリブレーションおよび位置推定時のマルチパス信号情報の活用はできないか，という点も大きい。MIMO通信の研究に伴い，古くはやっかいな問題であったマルチパス伝搬が通信容量増加に活用されている。しかしながら，このマルチパス情報を位置推定などのアプリケーションに利用するには未だ至っていない。マルチパス情報の更なる活用への先鞭を付けることは，当該研究分野の発展に大きく寄与できるものと言える。

2. 研究の目的

本研究では，特にアレーによる電波到来方向／端末位置推定の実用化・普及を阻む上述の問題点をブラインドキャリブレーション手法の開発により解決することを目的とした。これは到来方向／位置が既知の参照波を用いないキャリブレーション手法である。

本研究によりブラインド手法が確立されれば，実際のシステム運用時に蓄積された信号による総合的なシステムのキャリブレーションが実現される。すなわち，事前キャリブレーションが不要となる。具体的には，以下の3つを当初の検討課題とした。

- ブラインドアレーキャリブレーション法の実験的検証
- 仮想アレーの概念を導入したアレーキャリブレーション法の適用可能性
- 送信マルチアンテナに適した自動キャリブレーション処理

また，上記の遂行において，解決すべき以下の新たな課題が生じた。

- マルチパス環境下におけるアレーキャリブレーション手法の開発
- 屋内マルチパス環境における無線端末位置推定手法の開発

これらの5項目の解決・改良を目的とし，研究を実施した。

3. 研究の方法

(1) ブラインドアレーキャリブレーション法関連：

ブラインドキャリブレーション手法の根幹をなす手法は，代表者の先行研究により，開発された手法である。これは，ICA(独立成分分析)法を利用した手法であり，それにより，直近の複数の取得データから，マルチパス波の混入していない信号データを取り出し，十分な校正用信号データセットを構築するところに特徴がある。

一般にブラインド(教師信号／既知の参照信号無し)キャリブレーション手法のほとんどは，精度の良い校正行列推定を実現するため何らかの制約が加えられている。提案手法では，各アンテナ素子のアナログ系のばらつき(利得／位相)に関しては，内部校正回路などで補正されることを想定し，素子間相互結合の補正のみに着目し，その条件下で，最も拘束の弱い物理条件である「校正行列はエルミート行列」であるという拘束のみを用いた反復手法としている点に特徴がある。

このキャリブレーション手法では，ICAによる分離信号の精度と所要スナップショット数，到来波数，アレー素子数の関係が未解明であった。ここでは，それらの点を計算機シミュレーションにより定量評価し，キャリブレーションに適した信号選択規範を解明する。また，反復推定を伴うブラインド手法においては，初期値の選択により，精度・収束特性の改善が可能となる。数値計算モデルや申請者等の簡易構成手法の併用効果についても検証し，実験により，その有効性を示すことを目的とした。

(2) 仮想アレーを用いたアレーキャリブレーション法関連：

アレーアンテナを用いた無線LANアクセスポイント(例えば，IEEE 802.11n)等では，アレーの周囲に存在する金属物体との結合が発生する。この様な場合，素子次元の校正行列(すなわち，N素子の場合， $N \times N$ 行列)による，全到来方向角度に対して高い補正効果を示す校正行列の実現は困難となる。その問題点を解決するため，アンテナ以外の仮想点(仮想素子)との結合を含めた $N \times M$ 校正行列($M > N$)を用いた手法が，本研究で開発した仮想アレーによるキャリブレーション法である。

この仮想アレーの配置とその効果については，ほとんど解析されていない。ここでは，理論・シミュレーション・実証実験による定量的な検討を行い，地板などのアンテナ治具のあるアレーアンテナに関して，効果的な仮想アレー配置とその校正精度を明らかにすることを目的とした。

(3) 送信マルチアンテナ/マルチパスキャリア
ブレイク処理関連:

アレー校正は、実運用環境（オンサイト）で校正されることが望ましい。一般に、屋内電波伝搬環境は、多数のマルチパスが存在するレイリー、あるいは仲上ライク伝搬となる。すなわち、アレーに入射する信号はコヒーレントマルチパス波であり、通常のキャリブレーション手法は適用できない。

ここでは、マルチパス環境下で素波・合成波の信号/雑音部分空間の特徴を解析し、その到来方法情報のみを用いた校正手法を開発する。一般にマルチパスコヒーレント波の特徴（信号部分空間）は、到来方向のみならず、素波の位相関係依存性を有する。そのため、校正アルゴリズムの開発が困難であった。そこで、マルチパスコヒーレント波の雑音部分空間と、その素波が直交することに着目した校正手法の開発を試みることを目的とした。

(4) 屋内マルチパス環境における無線端末位置推定手法:

前出の(1)~(3)の要素技術を組み合わせることにより、マルチパスコヒーレント環境下での高精度なアレー校正手法が実現されるものといえる。しかしながら、端末の位置推定自体に関しては、要求されるシステムやその位置推定精度に未だ多くの問題点がある。センサネットワークによる推定では、多数のセンサが必要となるばかりでなく、センサ間の情報伝達が必要であり、推定システムが大規模になるばかりでなく、制御も複雑となる。アレーアンテナ単体での推定では、マルチパスリッチになるほど、位置推定精度が劣化する問題がある。

システム上、後者が好ましいことは言うまでもない。この研究では、マルチパス波の情報を利用した端末位置推定精度改善手法を考案し、レイトレース法による電波伝搬シミュレーションにより、その改善精度を明らかにすることを目的とした。

4. 研究成果

ここでは、前出の各項目に於いて得られた成果とその学術的な意義、国内外におけるインパクトについて列記する。

(1) この研究で開発したブラインドアレーキャリブレーション手法は、ICAを用いて独立な素波を分離し、それらを（到来方向が未知な）校正用信号として利用する点に特徴がある。すなわち、過去の分離信号を組み合わせるキャリブレーションを可能とする手法である。通常のブラインドキャリブレーション手法は、現時点の観測信号のみによる到来方向推定/校正行列推定を行うため、N 素子

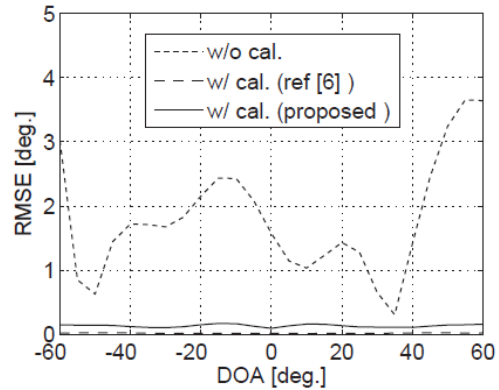


図1. ブラインドキャリブレーション手法による DOA 推定精度

アレーの場合、校正用信号は最大で $N-1$ が限界であった。この研究により開発された手法では、容易に過去のデータと組み合わせることができる。すなわち、素子数の制約を超えた参照信号を利用することができる。これは未知パラメータの多いブラインド校正の制度改善に大きく寄与するものであり、その有効性を示したことの学術的な意義は大きい。

図1の w/ cal. (Proposed) が提案手法による校正を施した4素子ダイポール等間隔リニアアレーの DOA (到来方向) 推定の計算機シミュレーション結果である。同図の “w/ cal. (ref[6])” は既知信号（教師有り）を用いた校正結果である。また、w/o cal. は校正無しの場合の誤差である。この結果から分かるように開発した手法は既知信号を用いた校正手法と、ほぼ同等の校正精度を実現している。僅かな誤差の増加は、ICA 自体の信号分離誤差によるものである。

その影響を定量的に評価した結果が図2である。同図ではスナップショット数 (N_s 値)、参照データ数に対する校正行列誤差を表している。校正行列の各要素の推定誤差を -20dB 程度に抑えるには、1000 スナップショット程度必要であることが分かる。また、参照信号数は素子数の2倍程度（すなわち8）で十分であることを明らかにした。

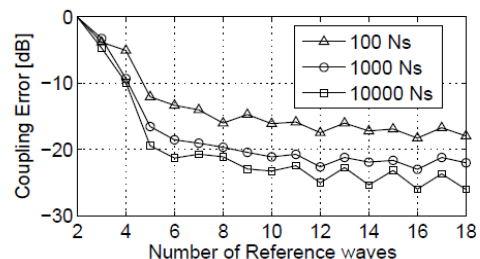


図2. 参照信号数に対する校正行列推定誤差

(2) 通常のアレーキャリブレーション手法は素子数次元の校正行列を補正行列とするため、筐体などとの結合が生じている場合は、誤差の角度依存性を十分に補正できない問題があった。その体を改善するため、素子数以外の点に仮想点（仮想素子）を配したアレー校正手法を開発した。この手法のコンセプトは、任意形状のアレーのモードベクトルを他の形状（例えばリニアアレー）に変換する手法と類似しているが、提案アルゴリズムは、行列のカトリ・ラオ積変換を利用し、雑音部分空間との直交性に帰着している点に特徴がある。このカトリ・ラオ積に着目したアレー信号処理手法は、最近、数多く提案されているが、ここでの成果は、その極めて初期に提案されたものの1つである。

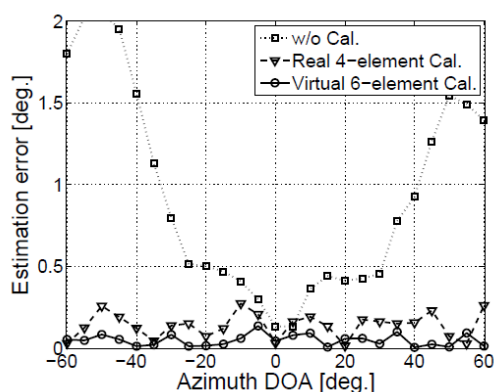


図3. 仮想アレーによる DOA 推定精度（実験）

図3が円板上の4素子モノポールアレーを用いたキャリブレーション実験結果である。校正無しの場合、円板のエッジ等の結合により、誤差が大きく、実アレー（Real-4 element Cal.）でも、誤差のばらつきが大きい。しかしながら、仮想2素子を追加した6素子校正では、その校正精度が改善されていることが分かる。一般に仮想素子は、筐体等の結合点に配置すればよい。ただし、筐体などの体積を有する場合は、結合点（領域）が広く分布し、如何に少ない仮想素子で精度の良い校正を実現するかが鍵となる。ここでは、与えられた仮想素子数の制約下で、仮想素子の最適配置を行うアダプティブなキャリブレーション法としての改良も行った。

なお、この開発当初のキャリブレーションアルゴリズムでは、多数の仮想素子時に、数値的に不安定な挙動を示すことがあった。その点に関しても、改善を施した。具体的には、アルゴリズム内の逆行列演算時に diagonal-loading という対角重みを導入した。これにより、校正精度劣化を最小限に抑えた安定性向上が可能となることを明らかにした。

(3) アレーキャリブレーションは、実運用環境下で容易に実現できることが好ましい。しかしながら、屋内や市街地での利用を想定した場合、コヒーレントマルチパス波の問題が生じる。コヒーレントマルチパス入射の場合、到来波が、複数の素波の合成波であるため、それらを用いたアレーキャリブレーションは、非常に難しく、ほとんど検討されていない。

ここでは、コヒーレントマルチパス波到来時に於いても、その雑音部分空間と素波の張る信号部分空間が直交することに着目し、前出の仮想アレーによる校正手法を応用したマルチパスキャリブレーション手法を開発した。このようなキャリブレーション手法は、他に例が無く、独創的なアプローチと言える。ここでは、基礎検討として、直接波の到来方向は既知と仮定し、2パスのマルチパス環境時の校正精度を検証した。結果の一例が図4である。

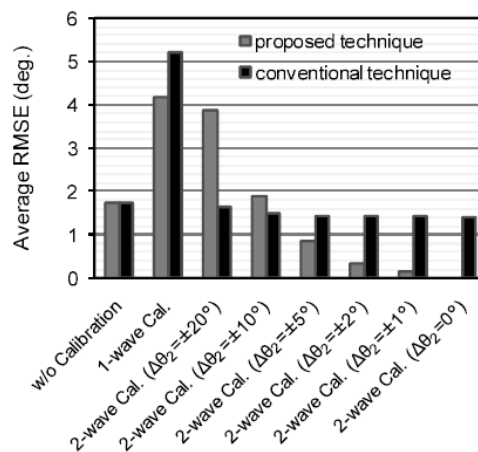


図4. マルチパス環境下でのアレー校正精度

このシミュレーションは4素子ダイポールからなる等間隔リニアアレーの到来方向推定精度を示したものであり、反射波の到来方向推定値に誤差を与えた状態での校正精度を示している。比較対象である conventional technique においては、与えられた到来方向を用いて簡易なマルチパス合成信号を推定し、その信号を校正用信号と見なした校正を行っている。このように開発された手法は反射波の到来方向推定に若干の誤差が存在する場合であっても、従来法に比べロバストな校正を実現する手法である。

(4) 屋内マルチパス環境における無線端末位置推定の精度向上が、この研究を包括する大きな目標である。本研究で主眼としたアレーキャリブレーションは、センサネットワークなどの大規模システムを用いず、アクセスポイントや基地局などアレーアンテナ単体での実現が、応用波に拡大の鍵を握る物と考

え、その精度向上に寄与すべく、目的として掲げた要素技術である。マルチパスに対処すキャリブレーション手法の研究過程に於いて、マルチパス環境下での位置推定アルゴリズムの改善方法に関して様々な知見を得た。従って、マルチパスを用いた位置推定についても検討した。

マルチパス環境下では、一般にアレーの自由度を超えた到来波が入射するため、個々の波の分離推定は不可能となる。そのような状況下での位置推定アルゴリズムの一つとして、位置指紋法が提案されている。この手法では、対象とする領域を網羅した信号データベースを事前に用意する必要がある。これが事実上のキャリブレーションといえる。マルチパス環境下では、僅かな位置の変動で受信信号が変化するため、空間に対して超密なデータベースが必要であり、端末の状態（人物の位置）による変動が位置推定に大きな影響を及ぼすことが問題であった。

この研究では、部屋の形状を既知、すなわち、凡その素波の到来方向の推定が可能であることを前提に、素波方向をデータベースとした信号部分空間型の改良手法を開発した。この手法では、実測データベースに代わり、シミュレータにより生成されたデータベースを用いるため、事前の実測は不要である。7m×9mの屋内を想定したシミュレーションで評価したところ、空間内の528点の評価ポイントの位置推定は、80%以上の確率で誤差1m以内に留まるという結果を得た。位置指紋を用いた50cmメッシュのデータベースの場合は、1m誤差の達成確率は60%であり、20%の改善が達成された(図5)。

ここでは、アレーアンテナを用いた狭帯域通信を想定したため、アレーの受信データという空間情報(=到来方向)のみが利用できるものとした検討を行ったが、無線LANで広く普及しているMIMO-OFDMなどの比較的広帯域なプロトコルを用いることを前提とすれば、伝搬遅延推定、すなわち遅延時間情報も

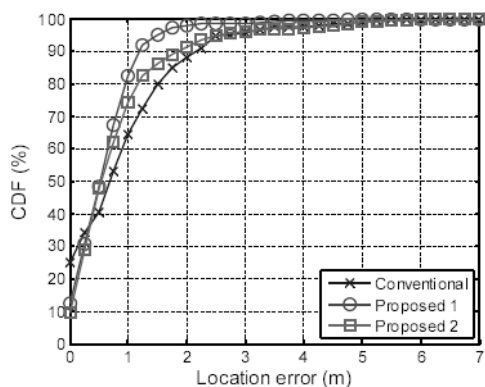


図 5. 位置指紋法および改良手法による無線端末位置推定結果例 (シミュレーション)

活用できる。このようなマルチパス反射波を活用するという着眼点は、いうまでもなく、空間情報以外の次元への拡張も可能である。

古典的な無線通信では、マルチパス波は不要波であり抑圧対象であった。しかしながらMIMOの登場により、マルチパス波は活用すべき重要な波に変わった。本研究におけるマルチパス波の活用という概念は、位置推定の精度を大きく改善する可能性を秘めている。これが、通信同様のパラダイムシフトにつながることを期待している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

- [1] H. Yamada, H. Sakai, Y. Yamaguchi, "On Array Calibration Technique for Multipath Reference Waves," IEICE Trans. Communications.採録決定(査読有)
- [2] 黒崎雄太, 山田寛喜, 西森健太郎, 辻宏之, 山口芳雄, "非同期送信アンテナ分散配置環境を想定した屋内侵入検出に関する検討", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.AP2010-136, pp.19-24, 2011年1月. (査読無)
- [3] 田仲圭, 黒崎雄太, 山田寛喜, 西森健太郎, 山口芳雄, "非同期送信アンテナ分散配置環境における屋内侵入検出実験", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.AP2010-137, pp.25-30, 2011年1月. (査読無)
- [4] 高橋善樹, 山田寛喜, 山口芳雄, "任意形状アレーにおける Root-MUSIC を用いた DOA 推定のためのアレー校正手法", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.AP2010-128, pp.61-66, 2010年12月. (査読無)
- [5] 酒井宏史, 山田寛喜, 山口芳雄, "マルチパス環境下でのアレー校正による DOA 推定精度について", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.AP2010-81, pp.43-48, 2010年10月. (査読無)
- [6] 黒崎雄太, 山田寛喜, 山口芳雄, "電波伝搬変化を利用した屋内侵入/位置検出に関する基礎検討", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.AP2010-42, pp.25-30, 2010年7月. (査読無)
- [7] H. Yamada, Y. Yamaguchi, "Array calibration by using orthogonal property between signal and noise subspace," IEICE Technical Report, vol.AP2010-21, no.5, pp.49-52, May 2010. (査読無)
- [8] 黒崎雄太, 山田寛喜, 山口芳雄, "多次元信号部分空間を用いた拡張位置指紋法による屋内無線端末位置推定", 電子情報通

- 信学会和文論文誌 B, Vol.J93-B, no.2, pp.322-331, 2010年2月. (査読有)
- [9] 山田寛喜, "高分解能到来方向推定のためのアレーキャリブレーション手法", 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J92-B, No.9, pp.1308-1321, 2009年9月(査読有)
- [10] 黒崎雄太, 山田寛喜, 山口芳雄, "近似信号部分空間を用いた屋内無線端末位置推定に関する検討", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.AP2009-35, pp.141-146, 2009年5月. (査読無)
- [11] 内藤孝, 山田寛喜, 山口芳雄, "DOA推定のための仮想素子を用いたアレー校正手法", 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J92-B, No.1, pp.216-223, 2009年1月. (査読有)
- [12] 島田裕平, 山田寛喜, 山口芳雄, "アンテナ近傍物体の結合を考慮したブラインドアレー校正手法", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.AP2008-161, pp.67-72, 2009年1月. (査読無)
- [13] 内藤孝, 山田寛喜, 山口芳雄, "仮想アレーを用いたアレー校正手法における仮想素子位置の最適化", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.AP2008-162, pp.73-78, 2009年1月. (査読無)
- [14] 山田寛喜, "アレー信号処理手法による高分解能到来方向推定とアレー校正," (チュートリアル招待講演)電子情報通信学会第23回信号処理シンポジウム, CDROM, 2008年11月. (査読無)
- [15] 遠藤奈津美, 山田寛喜, 佐藤亮一, 山口芳雄, "送信側相関抑圧処理によるアレーアンテナを用いた屋内無線局位置推定法の精度の向上について", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.AP2008-73, pp.207-212, 2008年7月. (査読無)
- Environment", Electronic Proc. of ISAP 2009, Bangkok, Thailand, Oct.21, 2009.
- [5] H.Sakai, H.Yamada, Y.Yamaguchi, "Experimental Evaluation of Linear Array Calibration by using 2-D Virtual Array", Electronic Proc. of ISAP 2009, Bangkok, Thailand, Oct.21, 2009.
- [6] 黒崎雄太, 山田寛喜, 山口芳雄, "拡張位置指紋法を用いた MIMO 端末位置推定", 2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-203, 2009年9月18日, 新潟大学.
- [7] H.Yamada, H.Sakai, Y.Yamaguchi, "Elevation-Angle-Dependency calibration in DOA estimation with uniform linear array", Proc. 2009 Korea-Japan Joint Conference on AP/EMC/EMT (KJJC 2009), pp.59-62, May 14-15, Incheon, Korea, 2009年5月15日.
- [8] 山田寛喜, "電波伝搬と位置推定" (チュートリアル招待講演), 2009年電子情報通信学会総合大会, BP-1-5, 2009年3月17日, 愛媛大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 寛喜 (YAMADA HIROYOSHI)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号：20251788

(2) 研究分担者

山口 芳雄 (YAMAGUCHI YOSHIO)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号：50115086

[学会発表] (計 16 件)

- [1] Y. Takahashi, H. Yamada, Y. Yamaguchi, "Array Calibration Techniques for DOA Estimation with Arbitrary Array Using Root-MUSIC Algorithm" Proc. IMWS-IWPT 2001, Kyoto, Japan, May 15, 2011.
- [2] 黒崎雄太, 山田寛喜, 西森健太郎, 山口芳雄, "送信アンテナ分散配置による屋内侵入検出に関する一検討", 2010年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-34, 2010年9月16日, 大阪府立大.
- [3] H.Yamada, Y.Yamaguchi, "On Array Calibration in the Presence of Multipath Waves," Korea-Japan Technical Meeting on Antennas and Propagation, Seoul, Korea, April 23, 2010.
- [4] Y.Kurosaki, H.Yamada, Y.Yamaguchi, "Wireless Location Estimation Using Extended Fingerprinting Techniques in Indoor