

屋内位置情報サービスを実現する UWB を用いた測距・測位技術

次世代近接無線の候補の1つである超広帯域無線通信システムを用いて、屋内の位置検出のための高精度な測距・測位を実現した。本技術の適用により、携帯端末を利用した屋内位置情報サービスや新アプリケーションの提供が可能となる。

USA 研究所 Chia-Chin Chong

Ismail Guvenc

わたなべ ふじお
渡辺 富士雄

いなむら ひろし
稲村 浩

1. まえがき

超広帯域無線通信 (UWB: Ultra Wide Band)^{*1}システムは、2002年2月米国連邦通信委員会 (FCC: Federal Communications Commission) により市販の通信機への応用が認められたことで、日本を含む世界各国で UWB用の周波数帯域の開放、通信方式に関する標準化や規格策定などが進んでおり、次世代近接無線システムの1つとして注目されている[1]~[3]。

UWBは、W-CDMAシステムと比較すると100倍以上の帯域を使用し、さらに伝送速度は、近接無線の代表格である Bluetooth[®]^{*2}と比較して100倍以上であることから、UWB固有の特長を活かし、さまざまな汎用アプリケーションへの応用が検討されている。

本稿では、UWBの技術的利点である、到来波の時間軸分解能が高いことを利用した、高精度の測距推定法と測位推定法について解説する。

2. LBS を利用したアプリケーション

セルラシステム、無線 LAN、センサネットワークを利用した位置情報サービス (LBS: Location Based Service) 技術が注目されており、ドコモを含めた各国の携帯電話事業者は、ユーザ・エクスペリエンス^{*3}向上の付加価値サービスとして、さまざまな LBSを提供している。ドコモは、iモードまたは PC を利用して、探索対象者の居場所を地図で確認する「イマドコサーチ」を提供している。また GPS (Global Positioning System) を利用し、現在位置の確認、周辺情報の検索、目的地を指定

してのルート検索やナビゲーションなどのアプリケーションも提供しており、今後ますます位置情報を基にした新 LBS の提供が期待される。

米国においても同様に、Verizon Wireless社の提供する「VZ Navigator^{*4}」、Sprint Nextel Corp.が提供する「Family Locator」、AT&T Mobility LLCによる「TeleNav[®]^{*5}」シリーズのような代表的なサービスがあり、車両追跡やジオ・フェンス (Geo-Fencing) と呼ばれる遠隔操作による車両停止や現場作業員のタイムカードなど、さまざまな LBS が提供されている。

さらに、近年位置情報を利用したさまざまな新アプリケーションとして、広告、ソーシャルネットワーキングサービス^{*6}、セキュリティや在庫管理などが挙げられる。また、位置情報は緊急呼サービス (110, 119)

*1 超広帯域無線通信 (UWB) : 500MHz以上の広い周波数帯域に拡散して送受信を行う無線通信方式。

*2 Bluetooth[®] : 米国 Bluetooth SIG Inc. の登録商標。

*3 ユーザ・エクスペリエンス : ユーザによる製品やサービスなどの使用体験。

*4 VZ Navigator : 米国 Verizon Wireless 社における米国商標。

*5 TeleNav[®] : 米国 TeleNav, Inc. における米国登録商標。

*6 ソーシャルネットワーキングサービス : 友人、知人など、人と人とのコミュニケーションを促進するサービス。

にとっても重要な役割を果たしており、日常生活にLBSは欠かせないものとなってきている。

LBSを利用した携帯端末におけるアプリケーション応用例を図1に示す。位置情報を利用した広告配信サービスの例では、ユーザがショッピングモールに入ったとき、本日のセールスやディスカウントクーポンの携帯端末への配信が可能となる(図1(a))。位置情報を利用することで、ショッピングモールにいるユーザのみを対象としていた効率的かつ効果的な集客効果が期待できる。また、位置情報を利用したセキュリティ管理のアプリケーション応用例として、ユーザのパスワードとユーザが所持する携帯端末の位置情報を使った二重のセキュリティ管理が可能となる。認証機能を備えた携帯端末を所持した正規ユーザのみがコンピュータへログイン可能であり、正規ユ

ーザが席から離れた場合、携帯端末の位置がコンピュータから離れたことを認識し、コンピュータは自動的にロックがかけられるなどのセキュリティシステムが考えられている。ただし、これらの位置情報を利用したアプリケーションは、どのような無線環境下にあっても、携帯端末の正確な位置情報を把握することが重要な鍵となる。

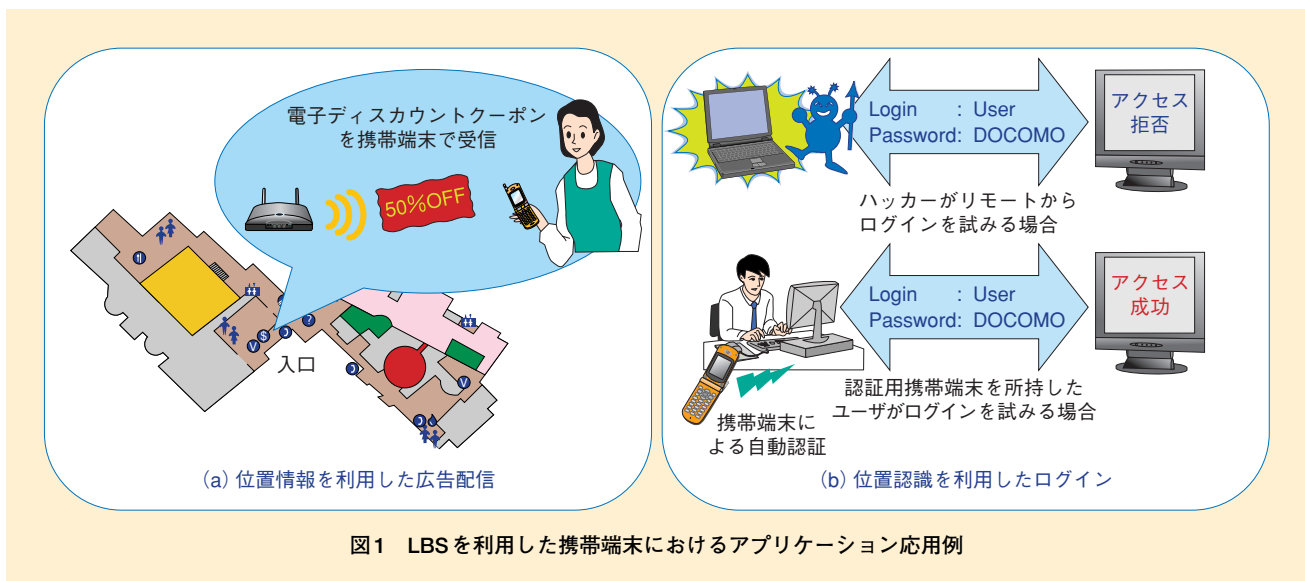
3. 技術的課題

屋外における位置検出は、GPSの利用が周辺基地局からの受信信号強度(RSS: Received Signal Strength)を測定することにより、現在位置を推定している。GPSは、GPS衛星に搭載された原子時計からの時刻データ、衛星の軌道情報などを基に、GPS受信機内部の時計の補正を行いつつ、送信と受信の時間差から測位を行っている。さらに、基地局のよ

うな位置が既知である端末(以下、位置既知端末)を利用する場合は、3つ以上の位置既知端末からの信号を携帯端末で受信することで、位置検出を行っている。ただし、どちらの位置検出法も送信機間の通信状態が見通し(LOS: Line Of Sight)または見通し外(NLOS: Non-Line Of Sight)かにより、測位精度は大きく揺らぐ。

LBSに対応する位置検出の技術的課題は、位置既知端末と携帯端末間の通信状態がNLOSの場合であっても、効率的かつ高精度の測距・測位を実現することである。特に屋内ではGPS信号が到達しないことから、屋内位置検出には携帯端末に搭載が期待される無線LANやUWBを利用することが望ましい。

無線LANではRSSを利用した位置検出、UWBでは信号到来時間(TOA: Time Of Arrival)^{*7}を利用し



*7 信号到来時間 (TOA) : 送信機から送信された電波が受信機に到達するまでの時間。

た位置検出が行われている。無線 LAN や UWB を利用することで、屋内における測距精度は、1~10m とかなり高い精度を達成できる。特に UWB は、NLOS やマルチパス^{*8}環境において、遅延して到達する到来波を時間軸上で個々に識別できるという、到来波の時間軸分解能が高いことと障害物への電波の浸透性が高いことから、無線 LAN と比較してさらに精度の高い測距・測位を実現できる。

4. 屋内位置検出技術

屋内位置検出に有効な UWB に注目し、TOA を利用した測距技術、線形最小二乗法を用いた測位技術およびその精度劣化軽減法を検討した。

4.1 TOA ベース測距推定法

測距には主に4つの技術が検討されており[4]~[6]、信号到来角度 (AOA : Angle Of Arrival)^{*9}、RSS、TOA を利用した測距推定法と、その組合せのハイブリッド型による測距推定法がある。UWB は、到来波の時間軸分解能が優れているため、TOA ベース測距推定法を用いることで、センチメートル単位での測距が達成できる。

TOA ベース測距推定法は、送信機から送信された到来波の第一到来波を正確に認識することで、送受信間の時間差から端末間の距離を算出することができるが、マルチパスや障害物透過時の伝搬速度の変化といった、さまざまな影響や通信環境によ

り、第一到来波が必ずしももっとも強い RSS の波とは限らないため、その検出は非常に難しい。

TOA ベース測距推定法は、主に UWB-IR (Impulse Radio)^{*10} で検討されているが[7][8]、OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ベースの UWB では、精度の高い測距が十分検討されていなかった。理由として、OFDM はマルチパス低減のためにガードインターバル^{*11}を挿入しているように、精度の高い同期タイミングを必要としない方式であり、測距には不向きなためである。

しかし、近年 UWB-MB (Multi-Band)-OFDM^{*12} が、ISO (International Organization for Standardization) などの国際標準化機関により UWB の国際標準として採用され、さらに、WiMedia Alliance^{*13} の UWB-MB-OFDM が、次世代家電、モバイルおよびコンピュータアプリケーション用の高速近接無線規格として、Bluetooth SIG (Special Interest Group)^{*14} と USB Implementers Forum により選定されたため、UWB-MB-OFDM の実用化が始まった。そこで、筆者らは UWB-MB-OFDM に着目し、本手法に適用可能な高精度の TOA ベース測距推定法を提案した。

現在 OFDM システムにおいて検討されている TOA ベース測距推定法は、無線チャンネルを一定間隔ごとの一律なマルチパスと仮定している[9][10]。しかし、実際の無線チャネ

ルの到来波遅延は連続的に変化しているため、前述の仮定を用いると、TOA ベース測距推定の精度は、受信側のサンプル間隔に依存してしまう。そこで本提案では、連続する到来波遅延を考慮し、受信信号を周波数軸から時間軸へ変換するときのチャンネル推定により生じる第一到来波の漏れ電力を最小とすることで、第一到来波検出の精度を上げる手法を提案した。また受信機に変更が必要ないことから、本提案は標準規格に準拠している。

本提案の UWB-MB-OFDM における第一到来波検出は、2ステップ構成により第一到来波の検出を行い測距推定を行う (図2)。

ステップ①：

図2(a)に示すように周波数軸から見た OFDM 受信信号では、第一到来波の検出ができないため、最小二乗チャンネル推定 (Least Squares Channel Estimation)^{*15}を用いることで、時間軸から見た OFDM 受信信号へ変換する。ただし、この変換において漏れ電力が生じる[11]。

ステップ②：

漏れ電力を最小とするために、最小二乗チャンネル推定後に得られる第一到来波遅延時間結果を変化させる。漏れ電力が最小となった時点で、第一到来波を推定し、その送受信の遅延時間を測距推定として使用する。

第一到来波推定と漏れ電力の影響

*8 マルチパス：送信機から送信された電波が、建物や地形などの障害物によって反射・回折し、複数の経路を通じて受信機に到達する現象。
*9 信号到来角度 (AOA)：送信機から送信された電波の、受信機からみた到来方位角のことで、一般的には2つ以上のアンテナで受信した電波の到達時間差により

測定する。
*10 UWB-IR：1ns以下という非常に短い時間幅のパルスを送信して情報伝達し、帯域幅が500MHz以上の広帯域を使用する通信手法。
*11 ガードインターバル：マルチパスによる信号がお互いに干渉しないことを確実にするため、データを伝送する際に信号に

付ける冗長部。
*12 UWB-MB-OFDM：帯域幅を528MHz単位で14のサブバンドに分割、バンドグループ内のサブキャリアを次々と周波数ホッピングして通信する手法。

の関係を示すため、IEEE 802.15.3a (Institute of Electrical and Electronics Engineers 802.15.3a) 標準の LOS チャネルモデルを用いたシミュレーション

結果を図3に示す。

図3(a)は、漏れ電力が大きい場合に推定した第一到来波と実際の第一到来波との誤差を示しており、図3

(b)は、漏れ電力を最小にした状態で推定した第一到来波が、実際の第一到来波に非常に近くなることを示している。そこで図3(a)(b)を比較すると、最小二乗チャネル推定を用いた信号変換において、漏れ電力の振幅が急激に変化する値を検出することで、正確な第一到来波を推定することが可能であることが分かった。

提案方式と、一般的によく使われる SAGE (Space Alternating Generalized Expectation maximization) アルゴリズム^{*16}を計算機シミュレーションにより比較検討し、その結果を図4に示す。異なる SNR (Signal to Noise Ratio)^{*17}値に対して、TOA ベース測距推定の誤りを累積分布にて示した。本提案は、SNRが20dBと高い場合、TOAによる測距推定の誤差(90%値)が0.4nsつまり12cm程度に収まることを示している。

また、本提案方式はOFDMを採用しているため、複数周波数にお

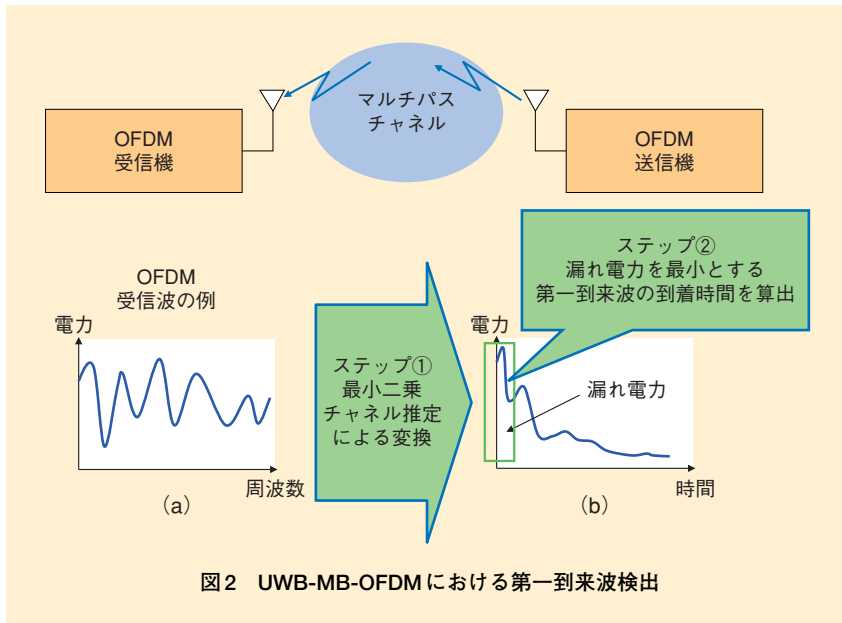


図2 UWB-MB-OFDMにおける第一到来波検出

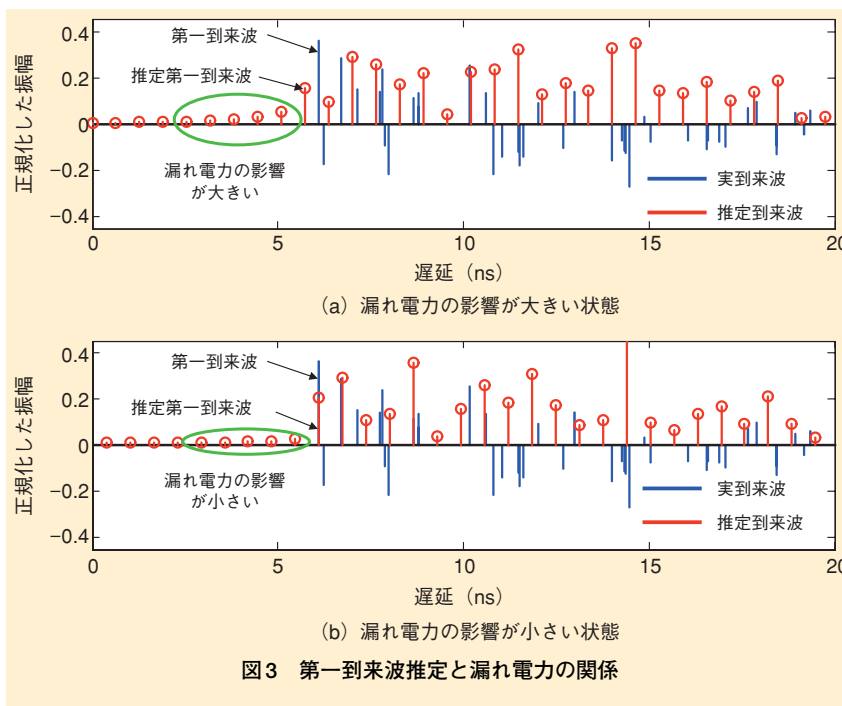


図3 第一到来波推定と漏れ電力の関係

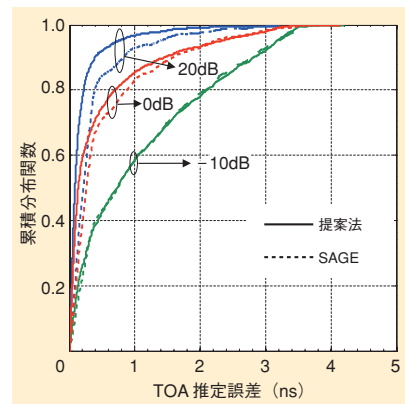


図4 異なるSNRにおけるTOA推定誤差と累積分布の関係

* 13 WiMedia Alliance：無線マルチメディアと相互接続性の普及促進を図ることを目的とした非営利業界団体。代表的な無線システムとしてWiMedia UWBがある。
* 14 Bluetooth SIG：近接無線システムの代表であるBluetoothの規格策定や認証を行う非営利業界団体。

* 15 最小二乗チャネル推定：本稿では、受信信号に線形処理を施し、周波数軸から時間軸へ変換することによりチャネル推定を行う手法。

* 16 SAGE アルゴリズム：広帯域信号の高分解能パラメータ推定法。
* 17 SNR：無線通信における雑音の電力に対する所望波の電力の比。

る信号をコヒーレント^{*18}で統合することで、さらにTOA測距推定の精度を上げることが可能であり、狭帯域システムからの干渉に強いことも分かっている[11].

4.2 TOA ベース測位推定法

位置検出のための測位推定法にはさまざまなアルゴリズムがある[12]. ただし、位置が既知である端末と位置が未知である端末間距離が、4.1節で記述した手法などを利用し、推定できることが条件となる。ここでは、位置既知端末は屋内UWBアクセスポイント (UWB-AP)、位置が未知である端末は携帯端末を想定しており、携帯端末と各屋内UWB-AP間の測距推定値を測位推定演算システムへ送り、各測距推定値を基に、携帯端末の測位推定を行うことを示している(図5).

もっとも一般的な測位推定アルゴリズムは、非線形最小二乗法(NLS: Non-linear Least Squares)^{*19}を使うが、非線形最小二乗法は携帯端末の位置を絞り込むため、補正を繰り返すことで、演算量が膨大になってしまう。そこで、1つの位置既知端末UWB-APを参照端末としてランダムに選択し、携帯端末との測距測定値を利用し、簡素化した線形測位推定法(LLS: Linear Least Squares location estimation)が提案されている[13]. さらに測位推定精度を上げるため、筆者らは位置既知端末UWB-APから携帯端末までの

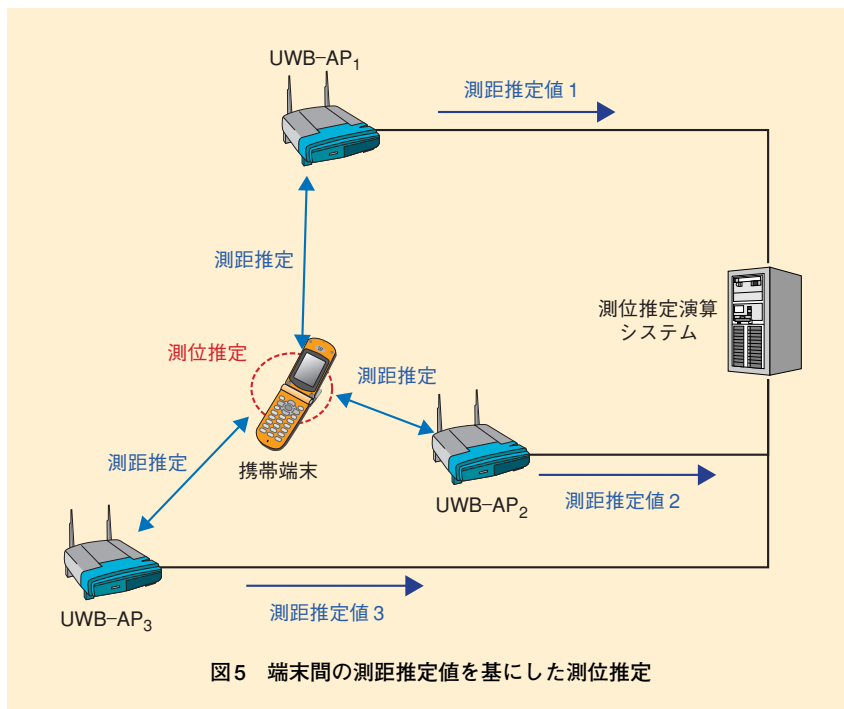


図5 端末間の測距推定値を基にした測位推定

距離がもっとも短いUWB-APを選択する、線形最小二乗参照測位推定法(LLS-RS: LLS Reference Selection)を提案した。本提案の測位推定を行うプロセスである非線形式から線形式へ、さらに線形最小二乗法を使い測位推定を行う概略を図6に示す[14].

計算機シミュレーションにより、本提案推定手法の評価を行った結果を図7に示した。平均的な位置検出精度が、従来の線形最小二乗測位推定法と比較して、よりクラマー・ラオの理論限界(CRLB: Cramer-Rao Lower Bound)^{*20}である測位推定理論限界値に近づいていることが分かる。

4.3 NLOS判定による誤差軽減

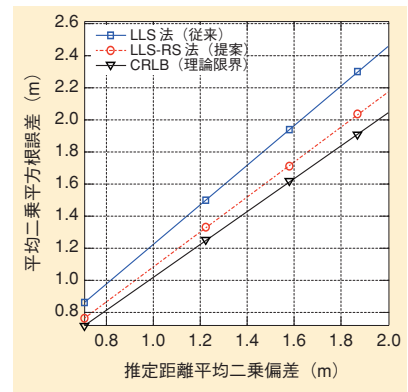
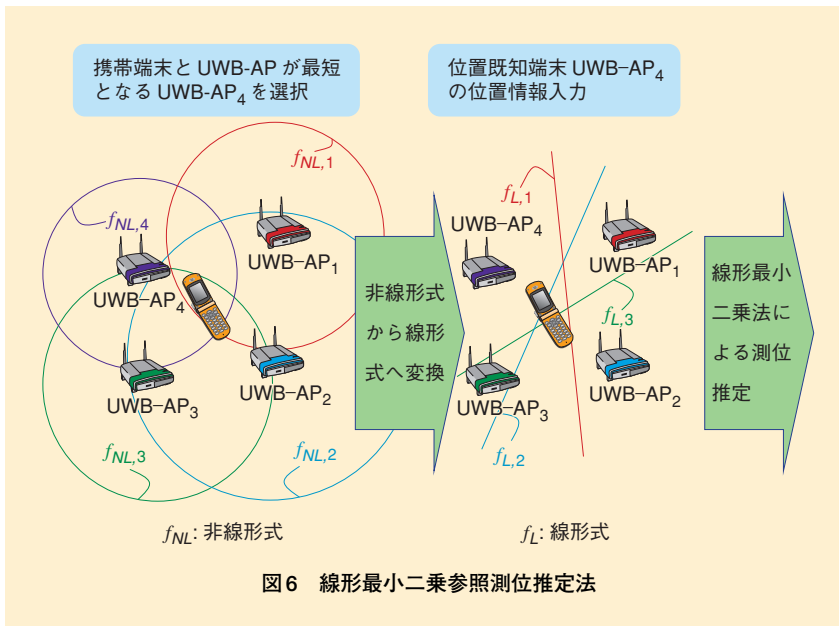
TOAベース測距推定法により、第一到来波から端末間距離推定を行ったとしても、2地点間の通信環境がNLOSの場合は、測距精度に影響を与える可能性があり、結果的に測位精度を下げる要因となる。そこで測位推定において、NLOSによる測位精度への影響を軽減するさまざまな技術が提案されている。

携帯端末が移動する場合、通信環境は刻々と変化するため、LOSチャネル状態が多く現れる携帯端末が行った測距統計データと比較して、NLOSチャネル状態が多く現れる携帯端末の測距統計データは、分散が大きいことが見込める。この点に着目し、分散値の変化を利用すること

*18 コヒーレント：波長だけでなく、位相もそろっていること。

*19 非線形最小二乗法(NLS)：推定パラメータに対してモデル関数が非線形である場合、反復改良によりそのパラメータを決定する手法。

*20 クラマー・ラオの理論限界(CRLB)：不偏推定量の分散はこれより小さくならないという下限。



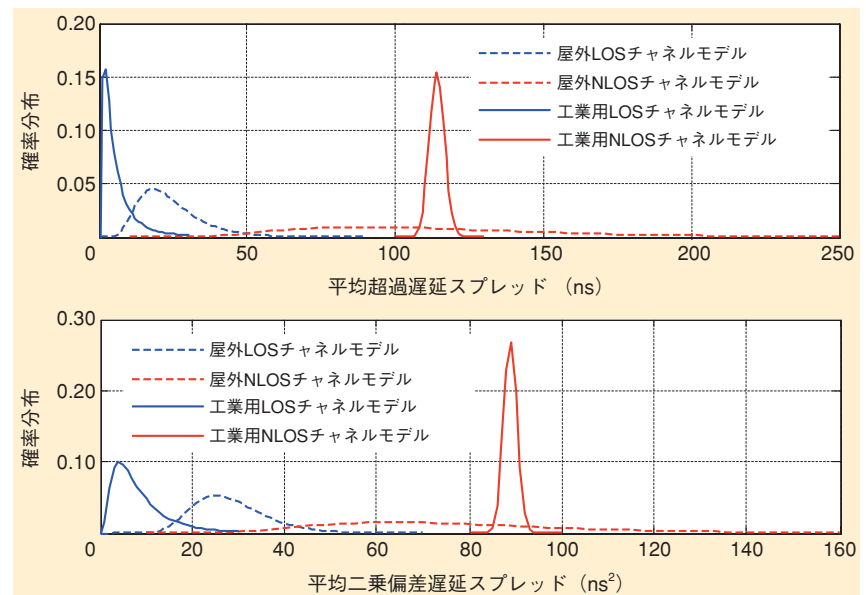
で、携帯端末の通信状態がLOSにあるか、NLOSにあるかを見極めている[15].

しかし、携帯端末が移動しない屋内通信環境では、LOSまたはNLOSにかかわらず、測距統計データには大きな変化が見られない。一方、UWBは到来波の時間的分解能が優れているため、マルチパスにより影響を受けた到来波のパス数を識別できる。到来波のパスの統計的パラメータとして、尖度^{*21} (Kurtosis), 平均超過遅延^{*22}, 平均二乗偏差 (RMS: Root Mean Squares) 遅延スプレッド^{*23}に着目し、IEEE 802.15.4a標準のチャンネルモデルから平均超過遅延スプレッド, 平均二乗偏差遅延スプレッドをそれぞれ求めると、チャンネルがLOSにあるかNLOSかどうかで異なる確率分布を示すことが分かった (図8)。この統

計的パラメータの違いを利用し、測距推定において、特定の屋内UWB-APと携帯端末との通信環境がNLOSかどうかの判定を行う手法を提案し

た[16].

平均超過遅延スプレッドが非常に大きい場合、屋内UWB-APと携帯端末間の通信状態がNLOSであると



*21 尖度: 分布が平均値の付近に密集している度合いを示す量であり、波形の尖鋭度を表す指標。
 *22 平均超過遅延: 振幅を考慮した到来波の平均到達遅延時間。
 *23 平均二乗偏差遅延スプレッド: 遅延してくる到来波の散らばり具合を表す数値。

判断し、この屋内UWB-APを除外した測位推定計算を行うことで測位精度を高めることができる。または、NLOS環境にあるUWB-APを取り入れたい場合は、測位演算において適切な重み付き最小二乗法を導入することも可能である[16]。

5. あとがき

本稿では、屋内位置検出に必要な高精度の測距・測位技術を提案し、計算機シミュレーションによる評価について解説した。今後ますます位置情報を利用した新サービスが検討される中、近接無線システムを搭載した携帯端末が、屋内通信環境において高精度の測距・測位を実現できることを示し、屋内位置情報サービスに対応できる可能性を示した。

今後、ユースケースや新アプリケーション、また測距・測位に関連する技術標準化など、動向把握を継続して行う予定である。

文 献

- [1] MBOA-SIG White Paper : "Ultrawideband: High-speed, short-range technology with far-reaching effects," Sep. 2004.
- [2] Standard ECMA-368 : "High Rate Ultra Wideband PHY and MAC."
- [3] IEEE 802.15 WPAN Low Rate Alternative PHY TG4a Std.
- [4] X. Li : "Performance study of RSS-based location estimation techniques for wireless sensor networks," IEEE MILCOM 2005, Vol. 2, pp. 1064-1068, Oct. 2005.
- [5] A. Subramanian : "UWB linear quadratic frequency domain frequency invariant beamforming and angle of arrival estimation," IEEE VTC 2007, pp. 614-618, Apr. 2007.
- [6] A. Catovic and Z. Sahinoglu : "The Cramer-Rao bounds of hybrid TOA/RSS and TDOA/RSS location estimation schemes," IEEE Commun. Letter, Vol. 8, No. 10, pp. 626-628, Oct. 2004.
- [7] D. Dardari, C.-C. Chong and M. Z. Win : "Threshold-Based Time-of-Arrival Estimators in UWB Dense Multipath Channels," IEEE Trans. Commun., Vol. 56, No. 8, pp. 1366-1378, Aug. 2008.
- [8] I. Guvenc and Z. Sahinoglu : "Threshold-Based TOA Estimation for Impulse Radio UWB Systems," IEEE ICU 2005, pp. 420-425, Sep. 2005.
- [9] C. R. Berger, Z. Tian, P. Willett and S. Zhou : "Precise Timing for Multiband OFDM in a UWB System," ICUWB 2006, pp. 269-274, Sep. 2006.
- [10] E. Saberinia and A. H. Tewfik : "Enhanced localization in wireless personal area networks," IEEE GLOBECOM 2004, Vol. 4, pp. 2429-2434, Nov. 2004.
- [11] H. Xu, C. C. Chong, I. Guvenc, F. Watanabe and L. Yang : "High-Resolution TOA Estimation with Multi-Band OFDM UWB Signals," IEEE ICC 2008 pp. 4191-4196, May 2008.
- [12] S. Gezici : "A survey on Wireless Position Estimation," Springer Wireless Personal Commun., Vol. 44, No. 3, pp. 263-282, Feb. 2008.
- [13] J. J. Caffery : "A new approach to the geometry of TOA location," in Proc. IEEE VTC, Vol. 4, pp. 1943-1949, Sep. 2000.
- [14] I. Guvenc, S. Gezici, F. Watanabe and H. Inamura : "Enhancements to Linear Least Squares Localization through Reference Selection and ML Estimation," in Proc. IEEE WCNC 2008, pp. 284-289, Apr. 2008.
- [15] M. P. Wylie and J. Holtzman : "The non-line of sight problem in mobile location estimation," in Proc. IEEE ICUPC pp. 827-831, Sep. 1996.
- [16] I. Guvenc, C.-C. Chong, F. Watanabe and H. Inamura : "NLOS Identification and Weighted Least-Squares Localization for UWB Systems Using Multipath Channel Statistics," EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Jul. 2008.