

無線 LAN と IC タグの測位への利用と 屋内外のシームレス測位

キーワード：測位
屋内
無線 LAN
IC タグ

地理情報解析研究室 主任研究官

神 谷 泉

無線 LAN と IC タグの測位への利用と屋内外のシームレス測位

1. はじめに

国土地理院は、誰もが簡単にかつ必要な精度で自己の位置を知ることができる社会を目指している(国土地理院, 2004a, b). 自己の位置を知ること, すなわち測位は, 我々が暮らす実世界と, GIS 等のモデルにより生成される仮想世界の融合に不可欠である. すなわち, 自己の位置, できれば位置と方向を知れば, モデルに蓄積された情報から自分に関係の深い情報を生成し, わかりやすい形で表現することができる.

一方, ネットワーク上には種々の情報が存在し, モバイル環境でもアクセス可能である. しかし, これらの情報の多くは, GIS のように系統だって整理されておらず, 有効利用するためには, 情報を適切に選択する必要がある. モバイル環境においては, デイスクトップ環境と比べユーザーインターフェースが貧弱なため, ユーザーの状況(コンテキスト)に応じてユーザー端末等のエージェントが情報を自動的に選択することが望ましい. モバイル環境においては, 位置が最も重要なコンテキストの一つであり, 測位は, ユビキタス情報社会を実現するための重要な要素の一つである.

屋外においては, GPS が支配的な測位技術として確立しており, 単独測位から RTK (リアルタイムキネマティック) まで, 広範な精度要求をカバーしている. 都市部においては, GPS 衛星が建物によって掩蔽され, 十分機能しない場合もあるが, Galileo, 準天頂衛星などの測位衛星の配備と, 周波数帯の追加による搬送波測位の初期化時間の短縮により, 状況は改善されると予想される(神谷, 小白井, 2004).

一方, 屋内においては, 無線 LAN, ブルートゥース, 可視光線・赤外線カメラ, 超音波などのさまざまな機器を用いた測位方法が提案されているが, GPS のような支配的な測位技術がなく, 公衆サービスも存在しない. このような状況の下, 屋内測位の一般への普及を考慮すると, 携帯電話等の汎用のユーザー端末がサポートする可能性のあるデバイスを使用した測位方法が有効であると考えられる. 国土地理院では, 無線 LAN を使用した測位(無線 LAN 測位), IC タグを使用した測位, 及びこれらの測位方法と GPS と併用して屋内外のシームレス測位の試験を行ったので, これらを紹介する.

2. 無線 LAN 測位の基礎実験

屋内外のシームレス測位の前に, 無線 LAN 測位の性質を明らかにするため, 無線 LAN 測位の基礎実験を行った.

2.1 無線 LAN 測位の概要

無線 LAN 測位には, 電波の到達時間差を使用する方法(荻野ほか, 2003; 松沢, 2003)と, 電界強度を使用する方法があるが, ここでは, 電波の到達時間差を使用する方法を採用した. 無線 LAN 測位では, 測位機能を組み込んだ複数のアクセスポイント(AP: Access Point; 固定して設置)と, 通常の無線 LAN 機器(MS: Mobile Station; 移動体)を使用して, MS の位置を計測する(図-1). マスター AP は MS に応答要求を送信し, MS は応答を返信する. スレーブ AP はこれらの信号を傍受し, その到達時刻差(Δt)を計測する. 前者の到達時刻の観測値はマスター AP - MS 間の遅延①, MS 内の遅延②, MS - スレーブ AP 間の遅延③, スレーブ AP の時計の誤差⑤からなり, 後者の観測値はマスター AP - スレーブ AP 間の遅延④(既知), スレーブ AP の時計の誤差⑤からなる. したがって, 計算可能な量 $\Delta t' \equiv \Delta t + ④ = ① + ② + ③$ は, スレーブ AP に依存しない未知量(①+②) + MS - スレーブ AP 間の遅延時間③となり, GPS の擬似距離と同じ形式となる. 従って, 3 個のスレーブ AP で 2 次元測位, 4 個のスレーブ AP で 3 次元測位が可能である.

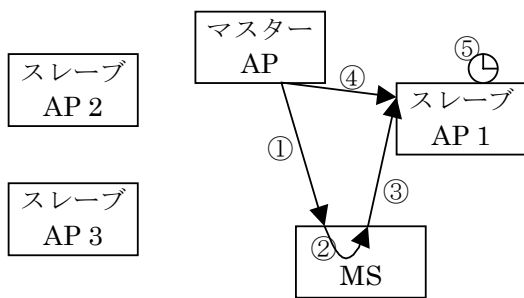


図-1 無線 LAN 測位の原理

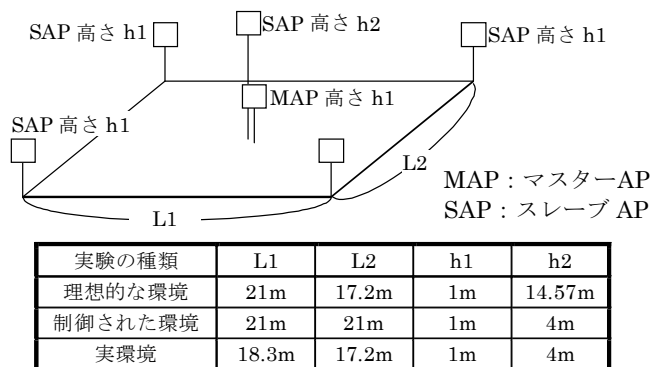


図-2 AP の配置

2.2 実験の共通事項

スレーブ AP は、対象範囲の 4 隅と中央の高所の計 5 個を使用した。マスター AP は、中央のスレーブ AP の直下に配置した (図-2)。

同一の条件で無線 LAN による測位を 50 回連続して行い、その誤差の平均を算出した。原則としてスレーブ AP で囲まれた範囲内の複数の場所で上記の測位を行い、上記の平均の 67% 値をもって、測位精度を評価した。

2.3 理想的な環境での実験

マルチパス等の影響がない場合の無線 LAN 測位の到達可能な精度を知るため、アンテナ間を同軸ケーブルで結んで測位する実験を行った。簡単のため、各スレーブ AP の擬似距離が等しくなるよう、ケーブルを配線した。このため、配線に相当する AP の 3 次元的配置が、実環境では実現困難なほど良好である。また、MS は、マスター AP と同じ場所に配置したことに相当し、他の実験と異なり、1ヶ所に相当する配線でのみ計測を行った。

異なる AP 間の擬似距離の差の RMSE は 0.34 m、特定の AP 間の擬似距離のばらつき (50 回の計測の標準偏差) は、1.6mm 以内であった。

平面位置の RMSE は 0.27 m、高さの RSME は 0.27 m であった。

2.4 制御された環境での実験

マルチパス、雑音の影響等を調べるため、なるべくこれらが少ないグラウンドにおいて測位実験を行った (図-3)。



図-3 グラウンドでの測位実験 (左から AP, MS, 全景)

MSが静止した状態の平面位置の測位精度は0.85 mであった（MSの高さ2 mの場合、以下同様）。高さ方向に関しては、解析における高さの制限（0 m～5 m）内に収まったものは66%であった。制限内（-2 m～+3 m）を±2.5 m以内と読み替え、正規分布を仮定すると（以下同様）、67%値は2.55 mと推測される。

直線上をMSを持ったオペレータが歩き、MSを移動させた場合の進行方向と垂直な水平方向の精度は0.94 mであった（進行方向は、真値がわからないため、評価不能）。両方向の精度が等しいと仮定すると、水平精度1.33 mである。高さの制限内に収まったものは47%であり、67%値は3.84 mと推測される。

誤差の空間相関を把握するため、0.5 m間隔でMSを直交する2つの直線上に設置し、測位した（MSの高さは1 m）。隣接する設置間の誤差の自己相関係数は、0.22, 0.29であった。

雑音源として、同一周波数帯を使用している電子レンジを設置してみたが、精度の低下は認められなかった。

ステンレスの遮蔽板と反射板を加え（図-4）、マルチパスが擬似距離に与える影響を調べた（反射実験）。スレーブ AP4の擬似距離-スレーブ AP1は、表-1のとおりであった。ここで、理論値は、遮蔽板がない場合は直達波の行路差、ある場合はAP4は直達波を、AP1は反射板による反射波を受信したと仮定した行路差（図-4の矢印）である。

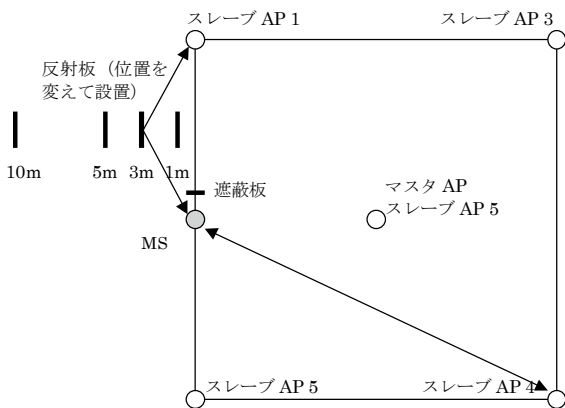


図-4 反射実験での機材の配置

表-1 反射実験の擬似距離の差（単位 m）

反射板	なし	1m	3m	5m	10m
遮蔽板	なし	なし	なし	なし	なし
計測値	10.87	10.81	12.19	10.08	12.03
理論値	12.98	12.98	12.98	12.98	12.98
差	-2.11	-2.17	-0.79	-2.90	-0.95
反射板		1 m	3 m	5 m	10m
遮蔽板		あり	あり	あり	あり
計測値		10.66	9.00	9.51	9.39
理論値		12.79	11.39	8.98	0.89
差		-2.13	-2.39	0.53	8.5

2.5 実環境での実験

体育館に家具を配置して、オフィス環境を模した空間を作成し、測位を行った。3次元測位を行うためには、スレーブ APを3次的に配置する必要があり、体育館を選定した。

MSが静止した状態での水平方向の測位精度は、2.30 mであった。高さの制限内に収まったのは41%であり、67%値は4.57 mと推測される。

MSを移動させた場合の進行方向と垂直な水平方向の精度は2.35 mであり、水平精度3.32 mに相当する。高さの制限内に収まったものは57%であり、67%値は3.10 mと推測される。

2.6 考察とまとめ

得られた測位精度を表-2にまとめた。

同軸ケーブルを用いた理想的な環境では無線LANの測位精度は実環境より1桁高かった。これと実環境との違いは、①マルチパス、②雑音、③機器の幾何学的な配置である。このうち、雑音に関し

ては、代表的な雑音源である電子レンジが測位精度に影響を与えなかった。従って、無線 LAN 測位の精度は、マルチパスと機器の幾何学的配置の影響が大きいと推測される。

表-2 無線 LAN 測位の精度のまとめ

条件	静止		移動	
	水平	高さ	水平	高さ
同軸ケーブル	0.27m	0.27m		
屋外 (グラウンド)	0.85m	2.55m	1.33m	3.84m
屋内 (体育館)	2.30m	4.57m	3.32m	3.10m

マルチパスの影響に関しては、単純な反射板を設置した実験においても、理論値との乖離が大きく、影響を予測することは困難である。

実環境における無線 LAN 測位の平面位置精度として、2.3 m という値を得たが、より遮蔽と反射が多い環境では、精度が低下すると予想される。

実環境における高さの静止測位精度は 4.57 m であり、床、天井が電波を透過する材質であっても、高さによる階層判断は困難と予想される。

3. 無線 LAN 測位と GPS を用いたシームレス測位

3.1 実験の概要

国土地理院の地図と測量の科学館のロビー内外において、ロビー内に設置した AP による無線 LAN 測位と、GPS を組み合わせたハイブリッド測位の実験を行った (図-5)。測位に用いた機器は、海上保安庁の中波ビーコンを用いた DGPS 受信機、精度は劣るが屋内でもある程度測位可能な高感度 GPS 受信機、無線 LAN 測位の対象となる無線 LAN 機能を有する PDA である。図-6 に示すように、これらの機器をポールにつけて、徒歩で移動し、測位を試みた。なお、基礎実験の結果を踏まえ、無線 LAN 測位は 2 次元で行ったため、以下の記述は、DGPS の受信モードの説明を除き、全て 2 次元測位に関するものである。

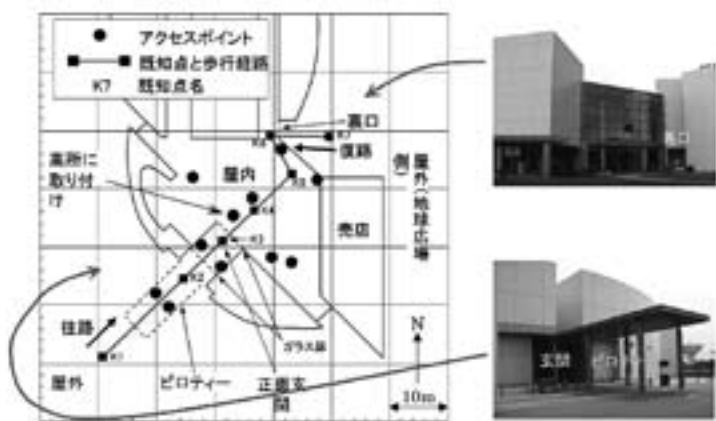


図-5 実験場所



図-6 測位風景

図-5 の■印は、既知点であり、これを結ぶ折線上を徒歩で移動した。●印は、AP を示す。実験サイトは複雑な構造であり、これをカバーするために 11 個の AP を配置した。

正面玄関は、天井と両脇が壁で囲まれ、屋内方向と屋外方向に 2 つの自動ガラス扉がある狭隘な空

間である。その外側のピロティーは、天井のみがある開放的な空間である（図-5の下の写真）。反対側の裏口（「地球広場」側の出入り口、図-5の上の写真）は、このような複雑な構造はないが、西側、南側、北側の一部に建物がある。いずれも、GPS測位が困難な場所である。

APと既知点は、国家基準点から多角測量で取り付け観測を行い、UTM座標を決めた。無線LAN測位の計算処理はローカル座標で行い、後でUTM座標に変換した。

移動経路は、図-5の左下の正面玄関から入り右上の裏口に抜け、折り返して出発点に戻るものである。以下、この往復を1セット、1セットの前半を往路、後半を復路、1セット中の往路または復路をパスと呼ぶ。この実験を、通常の歩行速度（平均2.9 km/s、以下「常速」と略記）とゆっくりとした歩行速度（平均1.3 km/s、以下「微速」と略記）で各3セット行った（計6セット12パス）。

パスの始点で、DGPSがDGPSモードになり、高感度GPSが測位できることを確認した後、移動を開始した。データは1秒間隔で取得した。既知点を通過した時刻を記録し、既知を内挿して真値とした。

3.2 単体の測位結果の概要

無線LAN測位は、大誤差・欠測が少ないが、ばらつきが大きかった。平均2乗誤差は6.4 m、最大誤差23.8 mであった。平均2乗誤差、最大誤差のパス間の差は小さい。無線LANの測位計算はマージンを加えたAPの存在範囲内で行われるが、APから離れている正面玄関側では、誤差が大きい。

DGPSは、屋内では測位できない。また、屋内から屋外に出てもすぐには測位できず、常速の往路では、すべてのパスで最後まで測位できなかった。平均2乗誤差は11.5 m、最大誤差40.8 mであった。平均2乗誤差、最大誤差のパス間の差は大きく、常速3回目復路では、最大誤差が169.8 mであった。屋内外の境界付近では、データがばらつく、あるいは真値とは異なる場所で安定している場合がある。これらの部分を除くと、精度は3つの測位手法の中で最も高い。

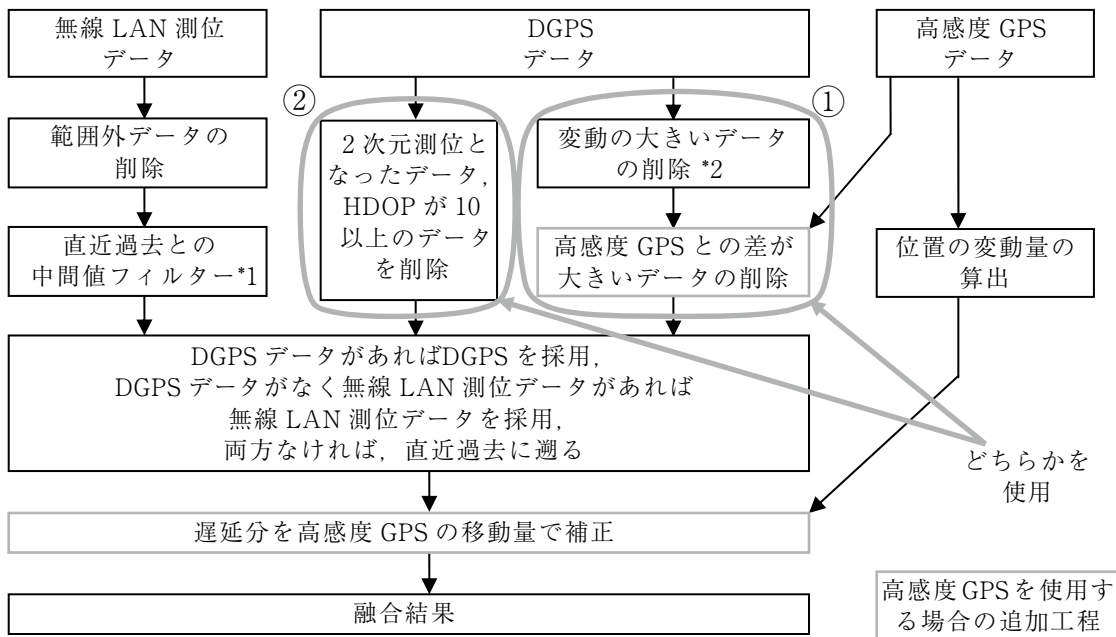
DGPSがDGPSモードとなった場合と、単独測位モードとなった場合を比較すると、わずかに単独測位モードの方が精度が高かった。誤差が極端に大きかった常速3回目復路と微速3回目復路では、すべてDGPSモードであった。一方、DGPSの測位精度とHDOPの間には正の相関があり、フィッティングの結果は、3次元測位（捕捉衛星数4以上）のDGPSモードで $RMSE=0.95HDOP$ 、3次元測位の単独測位モードで $RMSE=1.54HDOP$ 、2次元測位（捕捉衛星数3）のDGPSモードで $RMSE=2.27HDOP$ 、2次元測位のDGPSモードで $RMSE=3.10HDOP$ であった。

高感度GPSは、一部欠測はあるものの、屋内でも測位可能であった。平均2乗誤差は30.5 m、最大誤差47.0 mであった。屋外でも屋内でも、精度は同程度であった。平均2乗誤差、最大誤差のパス間の差は中程度であった。平均2乗誤差が大きいわりには、最大誤差は小さい。測位結果は、屋内では常に、屋外でもしばしば真値と離れた場所で安定しており、微速2回目復路では最大誤差が102.8 mであった。座標の変化は概ね緩やかだが、不連続に変化する場合もある。

高感度GPSで求めた移動量と真の移動量間の相関係数は、X座標で0.13、Y座標で0.21であった（ともに、危険率1%の両側検定で有意）。また、異常値に左右されにくいスピアマンの順位相関係数（ある時刻の真の移動量が、全時刻の真の移動量の中で何番目にあたるかという順位を計算して、真の移動量の順位と高感度GPSで求めた移動量の順位間の相関係数を求めたもの）は、X座標で0.38、Y座標で0.40であった（ともに、危険率1%の両側検定で有意）。DGPSによる移動量と真の移動量の間には、弱い正の相関がある。

3.3 シームレス測位のアルゴリズム

上記の単体の測位結果を考慮し、以下の2つの測位方法を考案した。



*1 $\text{median}(r(t-4), r(t-3), r(t-2), r(t-1), r(t))$
 ここで、 $r(t)$ は、時刻 t の測位結果

*2 $|r(t-3)-r(t-2)| > \text{一定値}$ または
 $|r(t-2)-r(t-1)| > \text{一定値}$ または
 $|r(t-1)-r(t)| > \text{一定値}$ の場合削除

図-7 シームレス測位のアルゴリズム (DGPS と無線 LAN を切り替える方法)

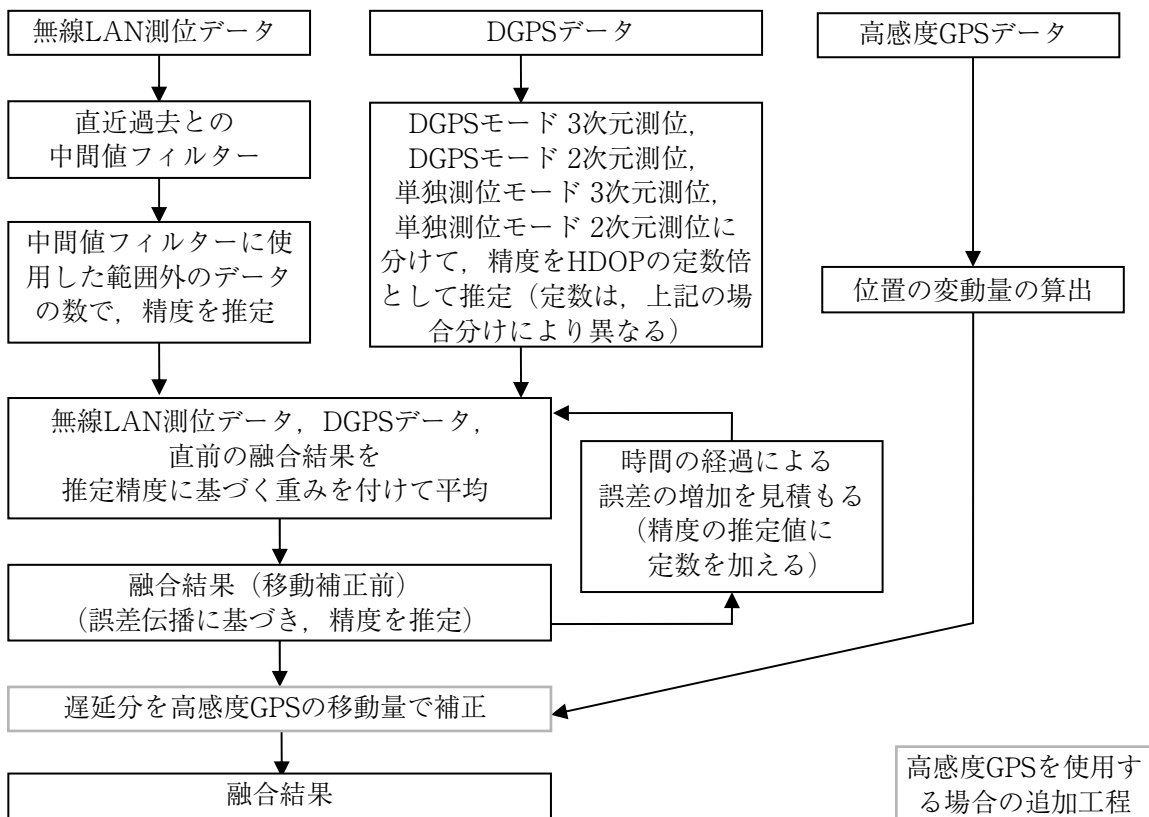


図-8 シームレス測位のアルゴリズム (重みつき平均を用いる方法)

DGPS と無線 LAN を切り替える方法（図－7）は、DGPS の測位結果が有効と判断した場合はこれを、DGPS の測位結果が無効で無線 LAN 側の結果が有効であれば無線 LAN 測位の結果を、ともに無効の場合は直近過去の測位結果を採用するものである。高感度 GPS を併用する場合は、直近過去の測位結果を用いる等の理由により生じる遅延を、この間の高感度 GPS の移動量（測位結果の差）を用いて補正する。また、高感度 GPS は、DGPS データの有効性の判定にも使用できる。

重みつき平均を用いる方法（図－8）では、無線 LAN 測位、DGPS 測位、直前の測位結果の精度を推定し、推定された精度に基づき、これらを加重平均し、最終的な測位結果とする。DGPS と無線 LAN を切り替える方法と同様に、高感度 GPS による遅延の補正を行うことができる。

3.4 結果

表－3 に、シームレス測位のアルゴリズムの適用結果を示す。この値は、各パスの平均 2 乗誤差を計算し、12 パスの平均を採ったものである。

表－3 シームレス測位のアルゴリズムの適用結果

方 法	高感度 GPS	測位精度
DGPS と無線 LAN を切り替える方法 ①	使用しない	5.3m
	使用する	4.1m
DGPS と無線 LAN を切り替える方法 ②	使用しない	3.8m
	使用する	3.7m
重みつき平均を用いる方法	使用しない	3.6m
	使用する	3.6m
(参考) 個別の測位手法の精度	無線 LAN 測位	6.4m
	DGPS	11.5m
	高感度 GPS	30.5m

3.5 考察とまとめ

DGPS と無線 LAN 測位を用いて、屋内外のシームレス測位を実現した。試みた融合方法は、いずれも個別の測位手法の精度を上回ったが、重み付き平均を用いる方法が最善であった。融合の過程で生ずる遅延を補正する等の目的で高感度 GPS を併用することが有効である場合があった。

DGPS と無線 LAN を切り替える方式では、①と記載した方法の精度が高く、重み付き平均を用いる方法と同程度あった。これは、DGPS の有効性の判定に、HDOP と 2 次元測位か否かを用いるものであった。HDOP は、全ての衛星が配備された状態では、上空視界の良否に強く影響される。衛星の捕捉数が 3 となる場合（2 次元測位となる場合）も同様に、上空視界の良否に強く影響される。また、重みつき平均を用いる方法では、2 次元測位か 3 次元測位か、DGPS モードか単独測位かで場合分けを行った後に、HDOP 用いて DGPS の精度を推定する。以上、上空視界が制限される都市域での DGPS の精度を推定する上で、上空視界と関係する HDOP 及び 2 次元測位となったか否か（あるいは衛星捕捉数）は有用な指標である。

4. 無線 LAN 測位、GPS、IC タグを用いたシームレス測位

4.1 概要

無線 LAN 測位と GPS を用いたシームレス測位では、概ね屋内では無線 LAN 測位が、屋外では概ね GPS が良好な測位結果を出力していたが、被験者が屋内にいるのか屋外にいるのか機械的に判別する手段がなく、これを補うために各種のアルゴリズムを導入した。建物の入り口に複数の IC タグ

を設置し、被験者が IC タグリーダーを保持すれば、建物への出入りを判別することができ、どちらの測位手法を用いるかを決定することができる。

また、無線 LAN 測位においては、測位の対象となる場所の形状が複雑な場合、複数のエリアに分割し、そのエリアに関係する AP のみを用いることが望ましい。IC タグを利用すれば、被験者がどのエリアにいるか、機械的に判別することができる。

さらに、測位の対象となる場所が複雑であると、無線 LAN 測位でも GPS でも適切な測位結果が期待できない場所が存在する。このような場所に IC タグを設置し、その IC タグを読んだならば、IC タグの位置を測位結果とすること（スポット的な測位への利用）で、測位精度が向上すること期待される。

このような3つの目的のため、無線 LAN 測位と GPS を用いたシームレス測位に IC タグを追加した測位実験を試みた。この実験では、全ての処理をリアルタイムで行い、測位結果を無線 LAN を介して被験者の持つ PC の地図上に表示できるようにした。実験場所は、図-5と同様であるが、無線 LAN 測位の有効範囲外である屋外部分のパスを延長した。

4.2 結果

実験の結果得られた測位精度は、表-4のとおりである。

表-4 無線 LAN 測位、GPS、IC タグを用いたシームレス測位の精度

条件	A	B	C	D	E
無線 LAN 測位のエリア分け	エリアを分けない			2つに分けて IC タグで切り替え	
無線 LAN 測位と GPS の切り替え方法	GPS データで 切り替え		IC タグで 切り替え	GPS データで 切り替え	IC タグで 切り替え
IC タグの位置の利用	×	○	○	○	○
1 回目	5.0m	4.3m	4.4m	2.8m	2.8m
2 回目	4.5m	3.6m	3.6m	3.0m	2.6m
3 回目	6.7m	5.0m	3.1m	2.8m	2.8m
平均	5.4m	4.3m	3.7m	2.9m	2.7m

4.3 まとめと考察

表-4の条件 A と B を比較すると、IC タグのスポット的な測位への利用が、精度の向上に寄与していることがわかる。同様に B と C、あるいは D と E を比較すると IC タグによる GPS と無線 LAN 測位の切り替えが、また、B と D、あるいは C と E を比較すると IC タグによる無線 LAN 測位のエリアの切り替えが精度の向上に寄与していることがわかる。以上、無線 LAN 測位と GPS によるシームレス測位に、IC タグを併用することの効果は確かめられた。

5. 電子タグテープの試作

前節の無線 LAN 測位、GPS、IC タグを用いたシームレス測位、あるいは国土交通省の自律移動支援プロジェクト（国土交通省、2007）では、IC タグを使用した測位の有用性が示された。しかし、前者の実験では、一般的な利用を考慮して腰の高さにアンテナを付けたが、免許が必要な高出力リーダーと大型アンテナを使用した。後者の実験では、すぐに実用化できる方法として、IC タグリーダーのアンテナを白杖の先端に付けて使用した。携帯端末で広く利用可能となるよう、手に持った位置で実用的な大きさの機器とするためには、自らの電源で電波を送信するアクティブ型の電子タグを使用する必要がある（神谷ほか、2007）。また、位置のわかった電子タグを容易に配置できるようにする

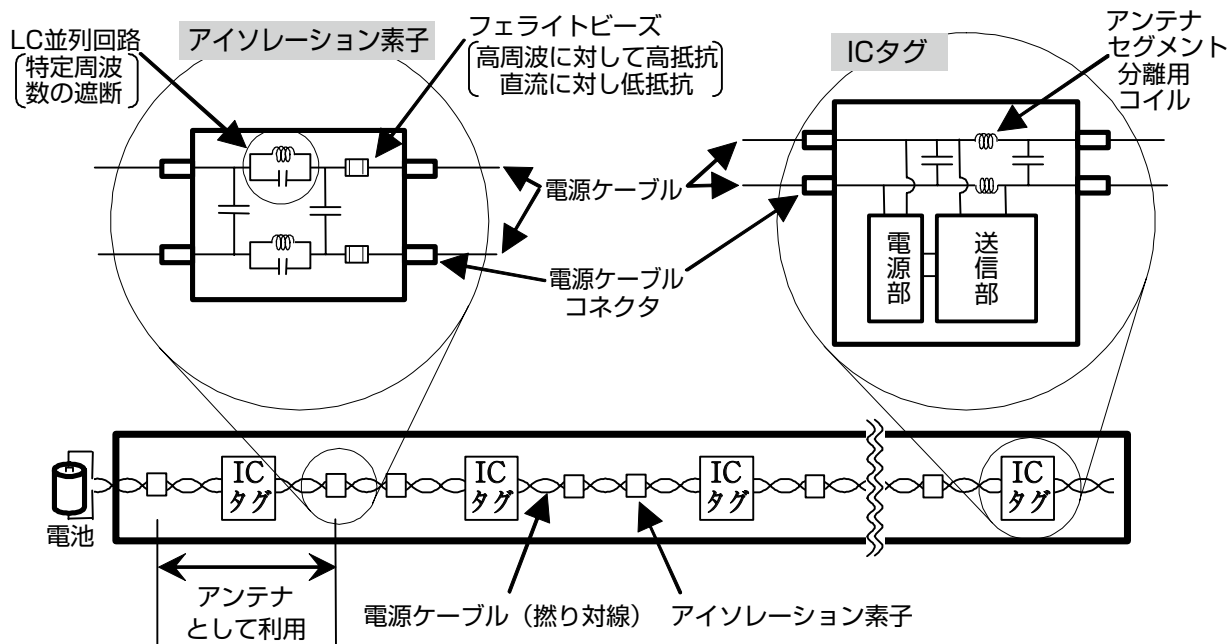


図-9 電子タグテープの構成図

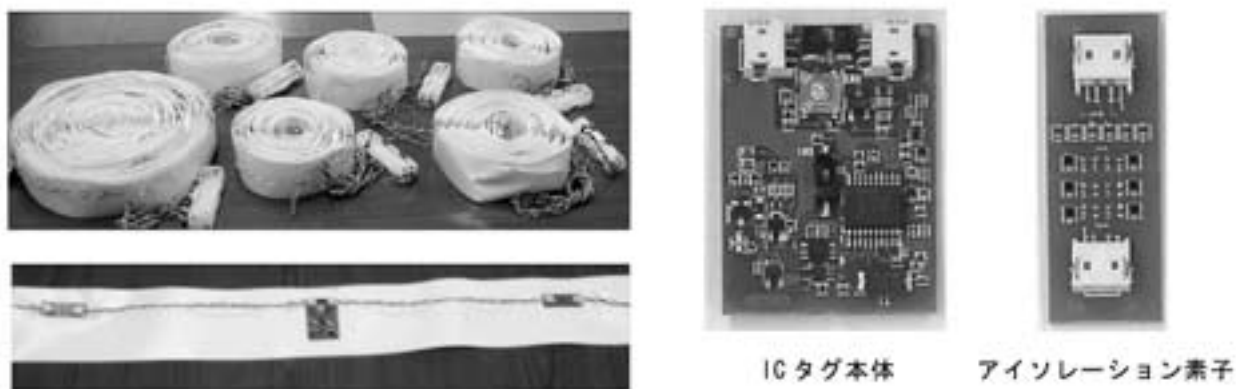
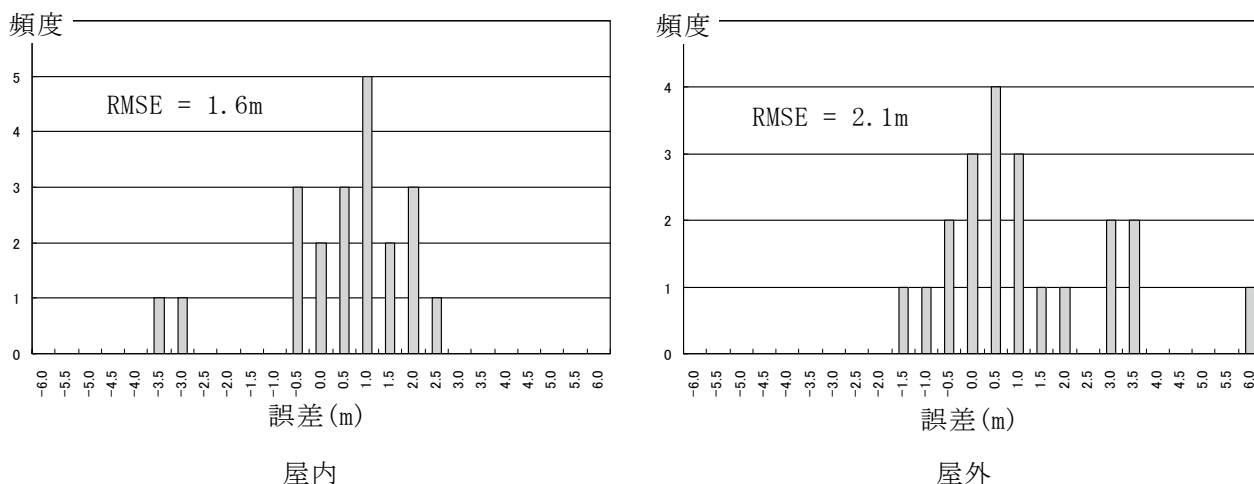


図-10 試作された電子タグテープ

ことが望ましい。この問題を解決するために、アクティブ型の電子タグを一定間隔で配置し、巻き取り可能な電子タグテープを試作した(図-9, 図-10)。

アクティブ型の電子タグを環境中に配置した場合、タグに内蔵された電池の交換が問題となる。そこで、試作品は、テープの端に設けた電池から電源ケーブルを通じて全ての電子タグに給電しており、電池の交換を容易にしている。電源ケーブルは、撚り対線で構成し、アイソレーション素子が挿入されており、アイソレーション素子に挟まれた電源ケーブルが、ダイポールアンテナとして機能するようになっている。試作品は、300MHz帯を使用したが、タグの大きさに制限されることなく1/2波長(50cm)のアンテナを作成できた。また、タグに電池を内蔵しないので、タグを薄くでき、突起がなく巻き取りやすいテープを作成できる。

ICタグを2m間隔で6個配置した電子タグテープを使用して、予備的な測位実験を行った。実験は、室内と屋外(グラウンド)で行った。テープを床上あるいは地上に配置し、そこから3mの位置にリー



図－11 電子タグテープを用いた測位結果の例

ダーを配置した。リーダーの位置を 0.5 m 間隔でテープと平行に移動させ、それぞれの位置において読み取ることのできた IC タグのうち、電波強度が最強の IC タグの位置をもって、測位結果とした。なお、測位結果は、電子タグテープと水平な方向における 1 次元測位として評価した。結果を図－11 に示す。

5. まとめ

無線 LAN 測位基礎的な性質を把握した。無線 LAN 測位と GPS を併用した屋内外のシームレス測位のアルゴリズムを開発した。このシームレス測位に IC タグを追加することにより、測位精度が向上することを確認した。アクティブ型の IC タグを配置した IC タグテープを試作した。

参考文献

- 荻野敦, 恒原克彦, 矢野隆, 渡辺晃司, 加藤猛, 鈴木秀哉 (2003): 無線 LAN 総合アクセスシステム (1) —位置検出システムの検討—, 2003 年電子通信学会総合大会講演論文集, 662.
- 国土交通省 (2007): 自律移動支援プロジェクト. <http://www.jiritsu-project.jp/> (accessed on April 24, 2007).
- 国土地理院 (2004a): 基本測量長期計画, 7-8.
- 国土地理院 (2004b): 国土地理院研究開発五箇年計画, 5-6.
- 神谷泉, 小白井亮一 (2004): 高精度測位技術の現状とその利用分野に関する調査, 国土地理院時報, 103, 73-88.
- 神谷泉, 小荒井衛, 松坂茂, 平井英明, 田中愛幸 (2007): IC タグの測量、測位への利用, 国土地理院時報, 112, 125-132.
- 松沢直人 (2003): 無線 LAN 測位, 第 8 回高度測位社会基盤研究フォーラム. <http://www.gnss.co.jp/forum/OPEN/lan.pdf> (accessed on April 24, 2007).