

電波到来方向推定による車両／歩行者位置検出システム

渡部 智宏 金子 富
浜口 雅春

ETCに代表されるITS通信には電波が利用されている。この電波の発信元の位置を特定する技術（電波到来方向推定技術）をITS路側インフラに搭載すれば、車両の走行車線検出や安全運転支援において、電波を発信する車両や歩行者の位置情報を使用したシステムを構築することが可能になる。路側インフラで測位を実施するシステムは、車両や歩行者側に測位手段を必要としないため、システム利用者への追加コストが最小限で済む。

本稿では試作した到来方向推定装置を用いて歩行者の測位実験を行った結果と、一般的に測位に用いられるGPSとの性能を比較し、電波到来方向推定によるITS分野での測位の有用性について考察する。

差は受信信号の遅延になって現れるため、各素子で受信される電波の遅延量がわかれば θ を推定することが可能になる。

今回の実験では高い推定精度が得られるMUSIC法¹⁾を使用する。

電波到来方向の推定精度

MUSIC法を実装した電波到来方向推定装置（写真1）を試作し、暗室において精度の確認を行った。

電波到来方向推定とアレイアンテナ

電波到来方向推定は、アレイアンテナにより受信された電波がどの方位から発信されたかを推定する技術である。アレイアンテナとは、複数のアンテナ素子がある一定の規則で配列したものである。

例えば図1のようなN個の素子を等間隔dで一直線上に並べたアレイアンテナ（等間隔リニアアレイアンテナ）について考える。

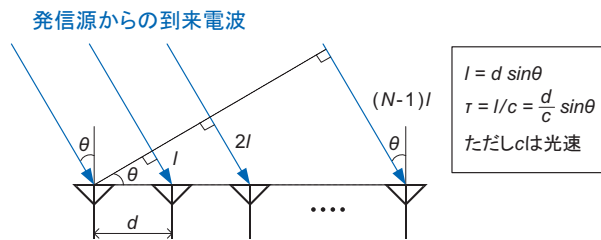


図1 アレイアンテナと受信信号

図1ではアレイアンテナに方位 θ からの電波が到来している。電波の発信源とアレイアンテナの距離が十分離れていれば到来電波は平面波と考えることができ、電波の経路差は $d \sin \theta$ の整数倍で表すことができる。経路



写真1 到来方向推定装置（左がアンテナ、右が本体）

表1に装置の仕様を示す。

表1 到来方向推定装置仕様

項目	仕様	備考
実験周波数	5.8GHz	ITS FORUM RC-005 に準拠 ²⁾
変調方式	OFDM	
周波数帯域	10MHz	
送信電力	10mW/MHz	
アンテナ	8素子リニアアレイ	素子間隔25mm
スナップショット数	4096	サンプル周波数40MHz

図2は暗室において実施した確認実験の結果である。

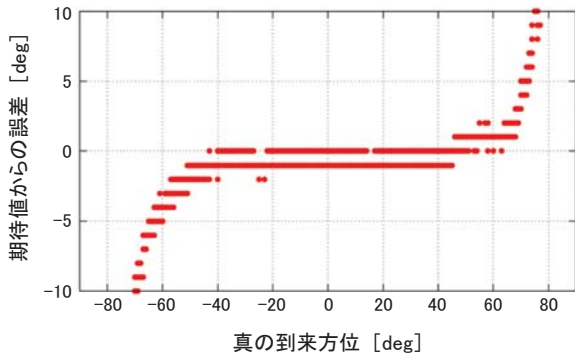


図2 実験結果

実験では、到来方向が $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の範囲では誤差が $-2^{\circ} \sim 0^{\circ}$ という結果になった。実験時のアンテナ設置誤差を想定すれば、これにより装置の方位推定精度は $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の範囲で 1° 程度と考えられる。

電波到来方向推定を使用した測位

複数の到来方向推定装置を使用すれば送信源の位置を特定することが可能である。

図3のように到来方向推定装置P1、P2を距離Dだけ離して設置した場合、送信源Sの位置はP1における到来方向推定結果 θ_1 、P2における到来方向推定結果 θ_2 を用いて式(1)のように記述できる。

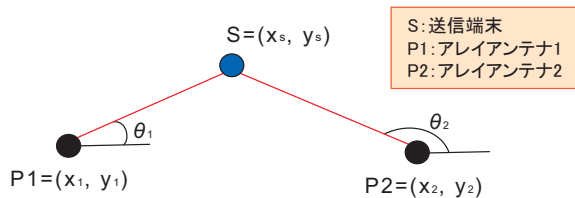


図3 到来方向推定による測位

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -x_1 \sin\theta_1 + y_1 \cos\theta_1 \\ -x_2 \sin\theta_2 + y_2 \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2台の試作装置の推定結果に対して式(1)を適用した測位実験を行った。

到来方向推定装置のアレイアンテナを図4のように30m離して高さ5mの位置に設置した。なお、今回の実験では歩行者は自身が遮蔽にならないように送信端末を頭上に掲げて歩行した。

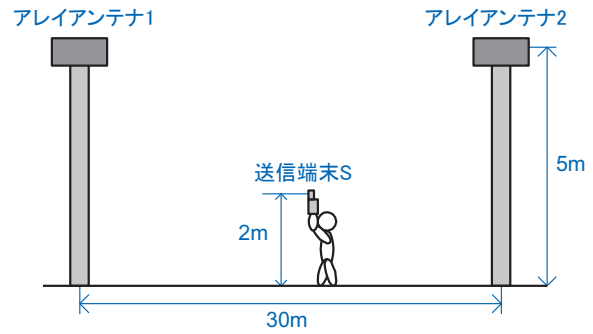


図4 送信端末とアレイアンテナの高さの関係

送信端末を持つ歩行者が図5に示す縦30m横30mの領域を5m間隔でジグザグに歩行した。ただし測定場所には歩行の障害となるフェンスが存在しこれを回避しているためその部分のみ直線的な軌道から外れている。

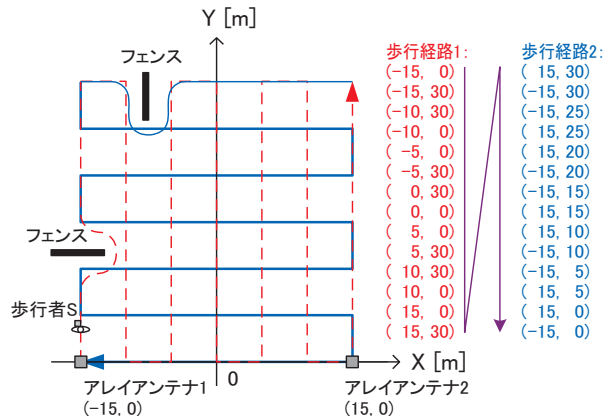


図5 座標系と歩行軌跡

測位結果を図6に示す。

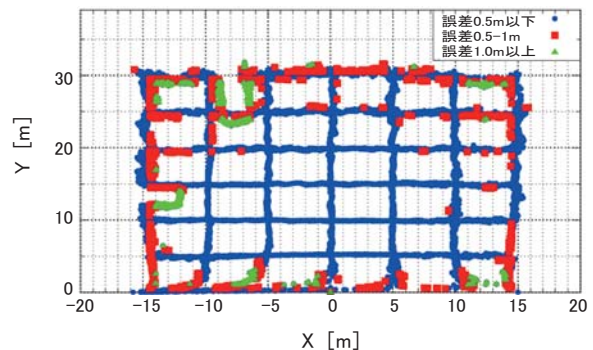


図6 到来方向推定による測位結果

$Y < 10$ mの領域では歩行軌跡が直線ではなく曲がって見えるが、これはアレイアンテナと送信端末の高さの

差による影響が見えているためである。式(1)に高さの影響を加えてシミュレーションを行った結果を図7に示す。なお 到来方向推定誤差 $<0.5^\circ$ としている。

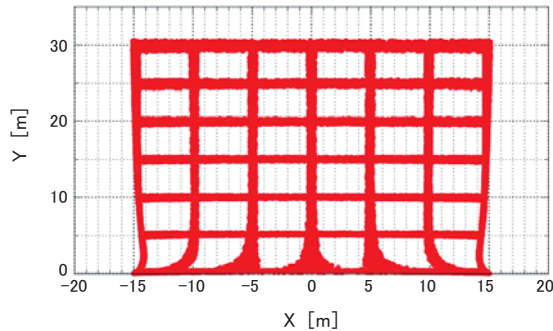


図7 シミュレーション結果

実験結果と重ね合わせると図8のようになり、 $Y < 10m$ の領域がシミュレーションと同様に歪んでいることが確認できる。

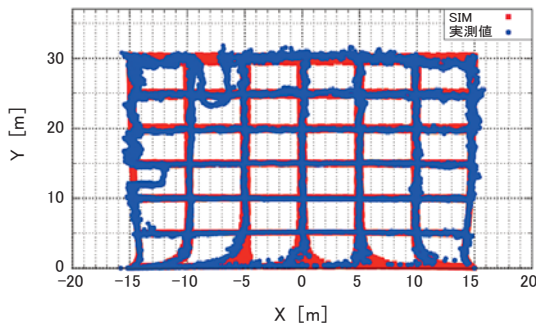


図8 実測結果 vs シミュレーション

実験結果の測位精度について、以下に考察する。今回の実験では、フェンスをよけて歩行した部分を無視して考えれば縦30m横30mの領域内の広い範囲で $\pm 1m$ 以内の精度を確保しており、 $\pm 0.5m$ 以内のエリアも一定の領域を確保できた。

一方で、 $Y=30m$ 付近では精度の劣化がみられた。シミュレーション結果でも同様の傾向が得られているが、これは送信端末とアレイアンテナからの距離が離れたことが原因であると推測している。

一般に方位から位置を推定する場合、測位対象が遠いほど到来方向推定誤差の影響が大きくなるため、アレイアンテナから離れた場所の測位精度を高くすることは困難である。

しかしながら、アレイアンテナの設置数を増やせば精度の高い領域を拡張することは容易である。したがって、

今回のように比較的小さい領域でも高い精度を達成できれば広い領域の高精度測位を可能にできると考えられる。

GPSによる測位実験

図5と同じ軌跡を、GPSを装備して歩行した結果を図9に示す。なお、GPSアンテナは頭上に保持して歩行した。

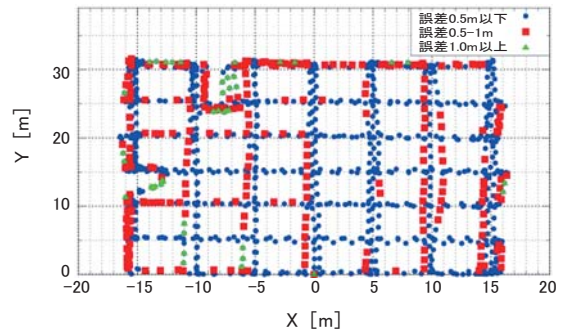


図9 GPSによる測位結果

表2 GPS装置の仕様+測定条件

項目	条件	備考
使用装置	EVK-5T	u-blox社 LEA-5Tを搭載
測位モード	DGPSモード	DGPSモードになってから20分以上経過後に使用(アンテナは開けたエリアで三脚上に放置)
プラットフォームモデル	pedestrian	歩行者として使用するため設定

測定はDGPSモードに入ったことを確認後に実施した。装置がDGPSモードに入ると、特定の衛星から送られる補正情報を使用してDGPS (Differential GPS) 処理を実施する。DGPSは衛星軌道やクロック誤差などの測位に必要なパラメータの誤差に対する補正を行うことで測位結果を改善する技術である。

GPSの測定結果をみると、比較的バラツキは少ないが歩行軌跡にオフセットがついており、 $\pm 0.5m$ 以上の誤差になる場所が到来方向推定を用いた場合に比べ多かった。これは、DGPSで誤差をとりきれなかったか、GPSモジュールが内部で測位結果に対して実施しているなんらかの平滑化処理の影響であると推測している。また、GPSの測位周期が1秒であるため、プロットの間隔も大きくなった。これは測位結果を得るのに最大で1秒の遅延が発生することを意味する。

さらに、本結果のように精度よく測位するには衛星の捕捉数を多くし、DGPSモードに入ることが必要で

あった。これは衛星配置や衛星の捕捉状態によって測位精度が変化することを意味する。

なお、今回の結果はあくまで表2のGPS装置を用いた結果であり、最新のデバイスではより高精度に測位が実施できる可能性があることを追記しておく。

車載装置の測位実験

前節では歩行者が送信端末を持ち実験を行ったが、その結果が車載器でも同様に得られるかどうかを確認するため、車両に送信端末を搭載し、測位実験を行った。アンテナは図10に示すようにETC装置を想定してフロントガラスのルームミラー前部に取り付けた。

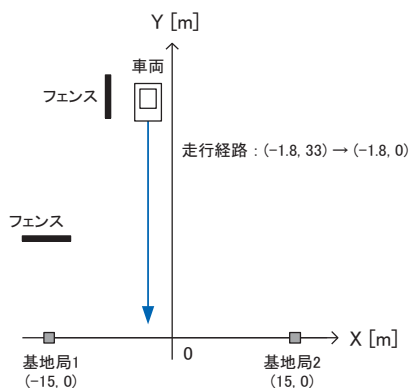


図10 車両の走行軌跡

車両の走行軌跡を図10に示す。歩行者実験と若干異なるが、車両の走行の障害となる縁石を避けたためである。測位結果を図11に示す。

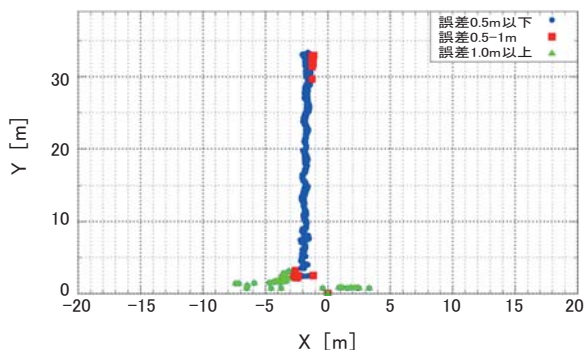


図11 測位結果

測定結果を見ると、Y=0m付近以外では歩行者端末使用時と同様精度のよい結果が得られた。Y=0m付近では誤差が大きくなっているが、これは図7のシミュレーションの傾向と同じであると考えている。

まとめ

電波到来方向推定技術をITSに適用した測位実験を実施した。結果、GPSと同等以上の測位精度が得られた。電波到来方向推定を用いた測位には、GPSに比べ次のような優位性があると考えている。

(1) 高精度の測位エリアの形成

電波到来方向推定を使用することにより、路側機設置エリア内にてGPSと同等以上の高精度な測位を実施することが可能になる。広いエリアをカバーする際は路側機設置数を増やすことで対応可能である。また、障害物等によって精度の悪いエリアが形成される場所でも、そのエリアからの見通しが良好な位置に路側機を追加することにより測位精度を向上させることができる。

(2) 測位遅延の低減

測位周期の都合上GPSでは遅延が生じる可能性があるが、測位対象となる端末の電波送信周期が短ければ測位処理による遅延を少なくすることができる。

本稿では主に実験しやすい歩行者を測定の対象としたが、今後は測位対象に車両を使用して市街地や車両渋滞時での測位精度の確認を行い、ETCなどの交通サービスへの適用可能性について検討していきたいと考えている。

また、車両はアンテナがルーフに隠れ見えなくなる後方が、歩行者は端末を持つ位置により自身が遮蔽になり精度劣化を招くことが考えられる。その影響とアレイアンテナの設置数を増加させたときにどれだけ改善できるかについて確認をしていきたい。◆◆

参考文献

- 1) 菊間信良：アダプティブアンテナ技術、第1版、p122-164、2003年 オーム社
- 2) ITS情報通信システム推進会議：5.8GHz帯を用いた車車間通信システムの実験用ガイドライン (ITS FORUM RC-005)、2.0版、2013年

筆者紹介

- 渡部智宏:Tomohiro Watanabe. 交通・防災システム事業部 無線技術研究開発部
金子 富:Yutaka Kaneko. 交通・防災システム事業部 無線技術研究開発部
浜口雅春:Masaharu Hamaguchi. 交通・防災システム事業部 無線技術研究開発部