

移動体（作業車両等）への RTK-GPS 適用化技術の開発

平 城 正 隆*

現在、我が国においては GPS (Global Positioning System (全地球測位システム)) による測位利用が拡大し、カーナビゲーションをはじめ、交通分野、測量、防災、国土管理等、幅広い分野で利用されており、今後の社会・経済活動における不可欠なサービスとして、さらなる利用と需要の拡大が見込まれる。しかしながら、GPS 単独の測位により得られる精度は、現状では十分なものではなく、さらに、日本は都市部のビルや山間部等、電波を安定して受信できない地域や時間が多く存在する。また、測位精度の信頼性も保証されていない課題があり、必ずしも、いつでも・どこでも高精度の測位情報が享受できない状況にある。今般、常に日本の天頂付近に位置する準天頂衛星システムの研究開発をにらみ、移動体（作業車両等）への RTK-GPS（リアルタイムキネマティック法による GPS 測量）適用化について検討したので、その概要を紹介する。これらの技術開発により、リアルタイムかつ高精度な位置情報が広域に配信可能となり、例えば、カーナビ、歩行者ナビ等へ技術を適用することで、さらなる利便性の向上が期待できる。

1. はじめに

準天頂衛星は、仰角 70° ～ 80° 付近（準天頂）を通過する軌道を持つ衛星で、軌道上を 3 機の衛星が周回することにより、常に日本の準天頂に衛星を配置し、GPS 衛星との相互運用により地上における位置特定可能地域の拡大と測位精度の時間的安定性が向上することが理論上確認されている。本研究は、以下の問題点を考慮しつつ、準天頂衛星、GPS 等を利用し、都市部や山間部においてもパトロールカーや工事作業車両等の中低速移動体が連続した高精度測位を可能となる技術開発を目指す。

1.1 現状の GPS 測位の問題点

(1) 測位性能

- ・測位精度 (Accuracy) が悪い。

GPS 利用で十数 m の誤差となり、さらに、建物・構造物からの反射波（マルチパス）で精度が劣化する。

- ・継続性 (Continuity) が悪い。

高精度測位 (RTK-GPS) を開始するまでに時間がかかる（数分～十数分）。遮蔽物等による頻繁な中断（サイクルスリップ）により、継続的に安定した測位ができない。

- ・測位利用率 (Availability) が悪い。

都市部、山岳部で測位できない場所が多い。

(2) 受信機の価格・使い勝手

RTK-GPS 受信機は、欧米で先行して開発されたことによる特許や知的所有権等のため、新規参入が難しく、かつ、高価であることが普及を妨げている。

(3) 補正情報の通信手段

- ・基準局からの距離に制約がある（10km 以内）。
- ・主に携帯電話が使われているが、使い勝手が悪い。

1.2 目標精度等

(1) 対象 作業用車両等の中低速車両及び歩行者



図-1 準天頂衛星の概要

* 国土交通省国土技術政策総合研究所高度情報化研究センター情報基盤研究室主任研究官

- (2) 目標精度 20cm
 - ・土木・建設、道路管理、走行支援等、多くの分野で 20cm 以下の位置精度が要求されている。
 - ・道路台帳 1/500 に対応する。
- (3) RTK-GPS 初期化時間 1 秒
移動体では、瞬時に初期化する必要がある。

1.3 検討内容

平成 15 年度は、衛星測位の限界を補完するための位置特定を組み合わせた技術、高精度衛星測位を実現するためのマルチパス除去手法、RTK-GPS 初期化の高速化及びサイクルスリップ抑制の各技術の動向と課題を取り纏めた。以下にこれらの概要を述べる（図-2 に技術開発の

利用イメージを示す）。

2. 位置特定技術に関する組み合わせ手法の検討

2.1 衛星測位を補完する複合技術

(1) 自律航法測位

表-1 に、衛星測位を補完する自律航法測位方式の分類と課題を示す。

(2) GPS/INS 複合技術

推測航法や慣性航法は、どの方式も程度の差こそあれ誤差が累積し、比較的長い距離や時間を走行する場合、精度維持が難しい。このため通常、電波航法と慣性航法を組み合わせることで相互に補完しながら信頼性の高い測位が

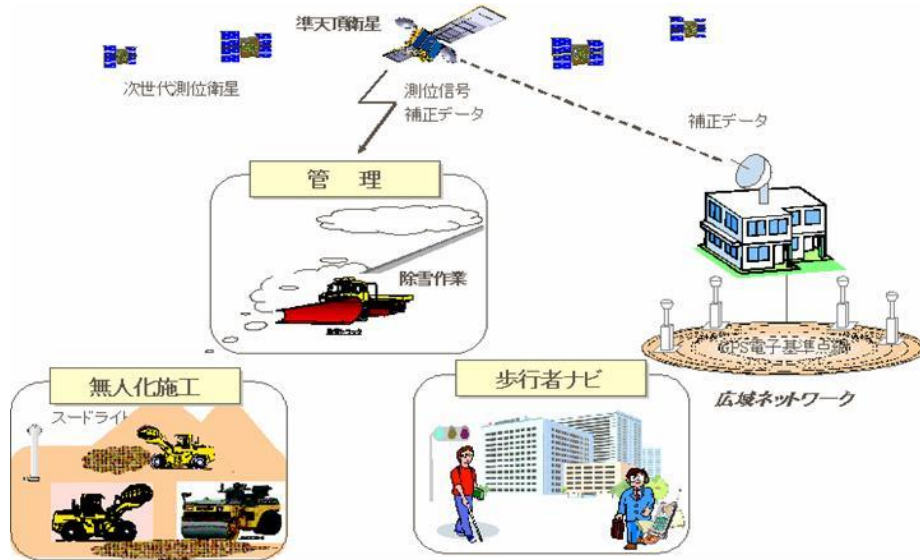


図-2 利用イメージ

表-1 自律航法測位方式の分類と課題

大分類と概要	方式の分類と概要	精度	課題等
推測航法 走行距離と進行方位から逐次的に移動変位を積算して 2 次元の相対位置を求める。	ジャイロ方式 方位ジャイロによる進行方位変化と車速センサによる走行距離を測定し単位時間ごとの変化量を求める。	移動距離の 1%程度が限界である。誤差 20cm 以下の許容時間は 1.8 秒 (注 1)。	タイヤの空気圧やスリップなどで移動距離とともに誤差が累積する。
	車輪速差方式 ABS で車輪の左右両輪の回転から走行距離と進行方位変化量を同時に求める。	同上	同上
	マップマッチング併用方式 最も近いデジタル道路地図上に変位する	1~2m (縮尺 1/2500 の場合)	車両位置は最新地図と地図精度に依存する
慣性航法装置 3 軸ジャイロと 3 軸加速度計から運動力学的に 3 次元相対位置を求める。	従来型の航法レベルのリングレーザジャイロ (RLG)、光ファイバジャイロ (FOG) を用いる。	誤差 20cm 以下の許容時間は 50~60 秒 (注 2)。	誤差は時間経過に依存する。RLG、FOG の技術進歩は飽和している。
	最新の半導体技術を用いた MEMS ジャイロを用いる。	誤差 20cm 以下の許容時間は数秒 (注 3)。	現状の性能では不十分であるが、価格も含め急速に進歩している。

注1) 時速 40km の一定速度とする。
 注2) ジャイロバイアス 1° /h とする。
 注3) ジャイロバイアス 10° /h とする。

実現されている。

INS は、50~100Hz の連続的なデータを出力するため、どの瞬間においても常に安定して位置と姿勢を検出できるが、その位置誤差は時間とともに累積する。一方、GPS の測位間隔は離散的なデータとなる。その精度は、INS のように時間に依存することはないが、電波環境や衛星の配置・組み合わせにより時間的なばらつきが大きく、頻繁に測位不能となる。

GPS と INS のそれぞれの欠点を相互に補うのが図-3 に示す GPS/INS 複合技術である。つまり、GPS 電波が走行中に建物等の陰になり測位できなくなる又は測位精度が著しく劣化する場合、INS の長所である自立測位で補完し、逆に、INS の欠点である誤差の増大を GPS で補正する方式である。

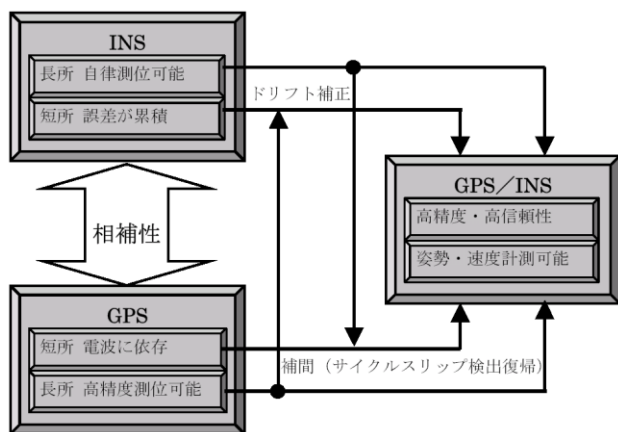


図-3 GPS/INS 複合技術

この複合システムにおいて、高い精度の GPS 観測値を用いることで、カルマンフィルタにより INS の誤差状態を予測し補正する。その一方、データレートが高い INS 測定は、GPS データ更新間の位置・姿勢情報を正確に提供することができる。また、INS から得られる実時間速度と位置情報は、搬送波位相 GPS 測位における整数値アンビギュイティの高速決定やサイクルスリップ検出・復帰等に利用できる。

(3) GPS/INS/車速センサ複合技術

前項の GPS/INS 複合技術において、個々のシステムの欠点を補うことができたとしても、通常の運用下においてはかなりの制約がある。INS 誤差は時間とともに急激に増加するため、GPS の信号を喪失している時間が長くなると、純慣性航法となり十分な結果を得ることができなくなる。

そのため、一般に陸上車両では図-4 に示すように、車両の速度を観測データとしたカルマンフィルタにより、INS の角速度誤差、加速度誤差、及び速度・位置誤差を推定・補正する GPS/INS/車速センサ複合技術が利用されている。

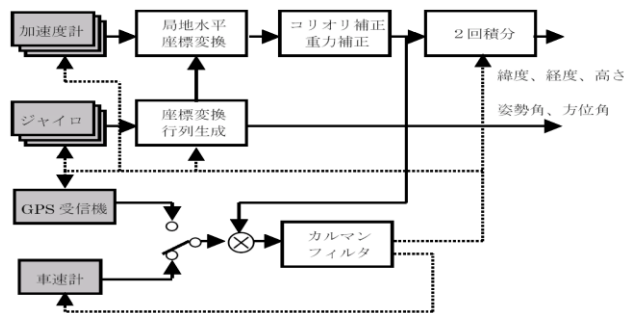


図-4 GPS/INS/車速センサ複合技術

(4) GPS/INS/PL 複合技術

しかしながら、GPS/INS/車速センサ複合技術においても走行距離が長くなるにつれて、INS のドリフト誤差が増大する。GPS 遮断状態が INS の許容レベルよりも長く続く場合、INS の測位誤差が大きく増加してしまい、整数値アンビギュイティを復帰させることは非常に難しくなる。これらの欠点に対処するため、擬似衛星 (PL:PseudoLite) を利用した GPS/PL/INS の複合補完手法が考えられる。

適切な位置に配置された擬似衛星は、このような許容範囲を超える誤差が発生する前に GPS/INS 複合システムに適切な補正情報を与えることができる。このような方法で、様々なアプリケーションに対応して利用率、信頼性、完全性、精度等を向上させることが可能となる。

ここで、以上の複合技術の効果を整理するため、車両走行場面を想定し、GPS 衛星、準天頂衛星および擬似衛星を含めた可視衛星数と INS の役割について、表-2 にまとめる。

2.2 衛星測位を補完する地上側設備

車両走行位置の特定手段と精度について、ITS の AHS の展開段階とともに、図-5 にまとめる。

AHS の提供するサービスには、走行中の車線からのみ出しを未然に防止する車線逸脱防止支援サービス、車線の一定範囲内を自動的に走行する車線保持サービス等がある。

これらのサービスを提供するに際し、必要となる車線内の走行位置を数cmの精度で検知する手段として、技術

表-2 GPS、準天頂衛星、擬似衛星およびINSの役割

	車両走行シーン	GPS衛星	準天頂衛星 (1機)	擬似衛星 (1機)	INS
①	可視GPS衛星数≥5 上空が開けている場所	GPS衛星のみで測位可能	GPS衛星の幾何学的配置を補強して精度向上	GPS衛星の幾何学的配置を補強して精度向上	断続的な衛星測位の中断に対して、INS測位で補完する。アンビギュイティ決定等に活用。またこの間に、INSドリフトを補正する。
②	可視GPS衛星数=4 両側に低層建物、樹木等	GPS衛星、準天頂衛星を合わせて測位可能		GPS衛星の幾何学的配置を補強して精度向上	衛星測位の中断に対して、INS測位で補完する。アンビギュイティ決定等に活用。またこの間に、INSドリフトを補正する。
③	可視GPS衛星数=3 両側に中層建物、狭窄山間部	GPS衛星、準天頂衛星、擬似衛星を合わせて測位可能			衛星測位の中断に対して、INS測位で補完する。アンビギュイティ決定等に活用。またこの間に、INSドリフトを補正する。
④	可視GPS衛星数≤2 両側に高層建物、高架下	衛星測位不可			ドリフト補正されたINSにより測位可能
⑤	可視GPS衛星なし トンネル内	衛星測位不可			ドリフト補正されたINSにより測位可能

注1) RTK-GPS測位を想定し、必要な衛星数は5とする。
 注2) 車両走行中は上記①～⑤のシーンが動的に変化する。
 注3) 擬似衛星とINSは必ずしも必須ではない。利用要件によって決まる。
 注4) 擬似衛星の役割は、衛星測位を補強するとともに、自律航法測位が長く続く箇所に設置して、確実にINSドリフトを補正する。
 注5) 上空視界の悪い建設現場では、②又は③が想定される。さらに悪い環境では必要に応じて擬似衛星を増やす。

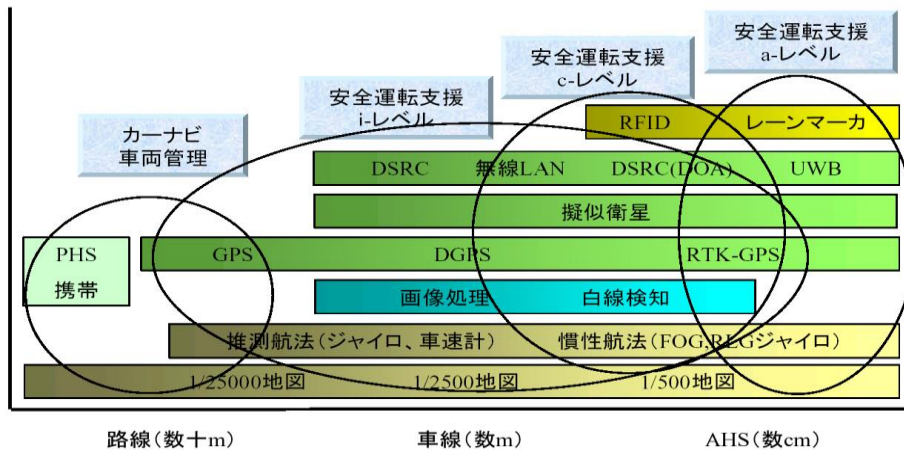


図-5 車両走行位置の特定手段と精度

的にはレーンマーカが有力視されている。道路の車線中央等に埋設したレーンマーカを車両に搭載した検出器で検出し、マーカとの横位置を検知することにより、車線内の走行位置を高精度で特定する方式である。

衛星測位を補完する手段を考えた場合、車載側設備として想定されるものにデジタル道路地図と自律航法センサがあり、数mの精度であればカーナビゲーションで既に確立され、広く普及している。これらは連続して移動体の位置を特定する技術といえる。

一方、擬似衛星、DSRC、レーンマーカ等の地上側設備は、道路及び周辺の適切な箇所に敷設され、離散的な基準位置を提供することによりGPS測位や自律航法測位による連続位置特定を補完する技術といえる。

表-3にこの基点（基準）情報を提供できる各種地上設備の比較を示す。

移動体の高精度連続測位を実現するためには、基点となる場所で位置補正情報を環境に左右されずに確実に提供できることが要件となる。また、これに加え、1m以下の精度要件を考慮すると、擬似衛星、UWB、レーンマーカ、DSRC+DOA等が想定される手段となる。

UWBによる測位については、非常に幅の狭いパルス信号の伝搬時間を測定することで数cmの位置検出が可能とされているが、他の無線システムへの干渉、マルチパス等の技術的な問題や法的問題等、実用化のためには多くの課題がある。DSRCについては、ETCの展開と相俟って普及の可能性が出てきており、DOAと組み合わせるこ

表—3 衛星測位補完用地上設備の比較

技術	方式概要	精度	課題
擬似衛星	GPS と組み合わせ 4 衛星からの距離により、3 次元位置を特定する	数 10cm	開発段階 高価
無線 LAN	3 つ以上の基地局からの距離により位置を特定する。	数 m	精度改善には要仕様変更 高速移動体には不向き
UWB	3 つ以上の基地局からの距離により位置を特定する。	数 10cm	研究段階
レーンマーカ	路面敷設マーカをセンサで検出して位置を検知する。	数 cm	設置、保守費用が膨大 車載側機器の普及が困難
RFID	タグの情報をリーダーで取得して位置を検知する。	数 10cm	高速移動体には不向き 通信距離に制約がある
白線検知	カメラ画像を処理して白線、形状を検知	数 10cm	悪環境下での認識が困難 (降雨、霧)
DSRC	情報提供ビーコンの無線ゾーンを狭小化	数 m	高価
DOA	端末からの電波の方向と距離を基地局で計算	数 m	高価
DSRC+DOA	方向と距離から高精度に位置を検出する。	数 10cm	研究段階

とで、その精度は数十 cm まで高まるとされている。しかし、未だ実験段階であり実用化にはまだ時間がかかると予想される。

レーンマーカは、電池等の電源が不要であり、鉄橋を含めた全道路構造に設置可能である。検出器も微弱無線出力で動作するため、低消費電力で乗用車から大型車まで車種を問わず対応可能であり、また、降雨、冠水、霧、降雪、積雪、凍結等の気象環境下でも安定した検出精度を備えている。

しかしながら、レーンマーカは路面に敷設することが条件となる。仮に 4 m 間隔で敷設するにしても、すべての一般道へ展開するには施工や管理に関わる費用が膨大となることが予想される。また、車載センサを車両に搭載することも自動車側のコスト高を誘発するとの自動車メーカーの意見もあり、積極的には展開が難しい状況にある。従って、レーンマーカは衛星測位が不可能なトンネルや地下、あるいは専用レーンにおける自動走行、除雪地域の道路等、特定地域での利用には有効であり、現実性があると思われる。

以上の理由から、衛星測位を補完する地上側設備として、擬似衛星を有力な候補と考える。

2.3 擬似衛星補完技術

(1) 擬似衛星技術の特徴

擬似衛星とは、GPS の補完として地上に置かれた送信機である。擬似衛星は、コードの位相及び搬送波の位相を GPS 衛星信号と同じタイミングでほぼ同じフォーマットのデータ成分を含む信号を送信する。GPS の受信

機は、この信号を捕捉し、航法アルゴリズムに使用されるコードの位相の擬似距離又は搬送波の位相の測定値を求める。主な相違点は、擬似衛星が高精度な原子時計はもっていないこと、かつ、擬似衛星の位置が固定されていることである。

擬似衛星は、GPS 衛星との併用測位により測位の信頼性、精度等を改善することが目的であることから、送信周波数としては通常 L1 又は L2 の周波数帯を用いる。このため、GPS 信号との干渉をいかに避けるかが大きな課題であり、種々の方式が提案されてきている。表—4 にこれまで提案された種々の方式を示す。

最近の擬似衛星システムでは、干渉の少ない C/A コードを選択すること、周波数のオフセット量を選択すること及びパルス化のパターンを選択することによって干渉の問題を改善している。

表—4 擬似衛星の各種方式

	CDMA	FDMA	TDMA	空間隔離
①	異なる Gold 符号	—	—	なし
②	異なる Gold 符号	—	パルス化	なし
③	長い符号	L2 L1±15MHz	パルス化	なし
④	異なる Gold 符号	—	パルス化	>30km
⑤	異なる Gold 符号	L1±ΔF ΔF>30kHz	パルス化	—

(2) 実用化に向けた問題点

擬似衛星に関する課題を表-5にまとめて示す。

①に関しては、種々の方式があり、用途に応じて使い分ければ良いと考える。

②は、擬似衛星の大きな課題であり、種々の方式が提案され軽減されているが受信機側だけでは対応に限界がある。擬似衛星の設置条件を検討する必要がある。

③は、擬似衛星だけの問題ではなく、GPS に関わる問題である。擬似衛星の場合、設置場所等の環境によって対応ができる可能性がある。

④は、GPS 衛星が見えれば GPS 信号による同期が良いが、屋内等であればネットワーク（有線）での同期を検討する必要がある。

⑤は、擬似衛星を整備する場合の重要な課題である。設置、保守をいかに容易にするか検討が必要である。

⑥については、擬似衛星は単なる送信機であり、量産すれば非常に安価に製作できると考えられる。受信機についても、ソフトウェア変更で対応できる測位方式とすれば現状の受信機と同等の価格で製作できると考えられる。

擬似衛星にかかわる問題のほとんどは、GPS 衛星とは異なり、地上すなわち非常に近い距離に設置するということによるものである。前述したように、技術的な課題については種々の検討がなされており、解決がなされていくものと考えられる。

3. 高精度衛星測位の技術課題

3.1 マルチパス誤差低減技術

DGPS 測位と RTK-GPS 測位においては、単独測位において大きな誤差要因である衛星の時計誤差、軌道誤差、電波伝搬経路の電離層誤差及び対流圏誤差が除去され、残る大きな誤差は受信機雑音とマルチパス誤差となる。

移動体においては、信号の反射位置が常に高速で変化し、適切なモデルを利用することが難しい。安価な GPS 受信機を用いたカーナビゲーションやマンナビゲーションでは、高性能なマルチパス削減アルゴリズムが搭載されていないため、特に都市部においてはマルチパスが十数 m にも及ぶ。このように、マルチパスは、これらの分野では最も重要な技術課題となっている。

(1) アンテナ技術

表-6にマルチパス低減用アンテナ方式をまとめる。

現在実用化されている高精度測位用マルチパス削減アンテナは、性能重視で設計されたマイクロ・ストリップ

表-5 擬似衛星の課題

課題	内容	検討項目
① 測位方式	基地局を用いる相対測位方式	基地局を用いない単独測位方式の開発
② 遠近問題	GPS 電波との干渉、電波の強さ	出力調整（パルス化）、配置アルゴリズム
③ マルチパス	電波の反射	アンテナ指向性（配置）、反射防止、受信機改良
④ 時刻同期	GPS との時刻同期、擬似衛星間の同期	シンクロライト（GPS 同期）、ネットワークによる同期
⑤ 保守、管理	設置座標の設定、保守、管理	地図 DB 参照など、ネットワークによる管理
⑥ コスト	低廉化	機器開発、LSI 化

表-6 マルチパス低減用アンテナ方式

低減方式	特徴	関連する特許	備考、課題
チョークリング方式	同心円状 1/4 波長深さのグラウンド板にて反射波を削減する。	米国特許登録番号: 6278407 (2001 年 8 月)、国内は未公開	現在市販されている。形状が大きく、製造コストが高い。
ピンホイール方式	12 個のスパイラル素子と円形スロット素子にて、基板上の表面波及び基板端での回折・反射を削減し、位相中心の安定度を高める。ロープロファイルである。	米国特許登録番号: 6,452,560 (2002 年 9 月)、6,445,354 (2002 年 9 月)、国内は未公開	現在市販されている。
円環ショートリング方式	円環状のショートリングにより基板上の表面波を削減する。ロープロファイルである。	国内、米国共未公開	研究開発中。
円形パッチ・円環パッチアレー方式	円形パッチと円環パッチとを組み合わせ、且つ夫々 4 点給電することにより、反射波である左旋偏波分を削減する。ロープロファイルである。	米国特許登録番号: 6597316 国内は未公開	市販されているか不明。

プ・アンテナ(MSA)である。これは、誘電率が比較的低い大型のもので、主に二周波用で幾つかの特許がある。また、マルチパス削減に優れた高精度測位用途のものとして、チョークリンググラウンド板を使用したアンテナやピンホイールアンテナ等があり、これらはアンテナの大きさと製造コストの点から、測量用 GPS 等の比較的小規模の市場にのみ市販されている。また、それぞれ特許があり海外製品である。

一方、日本が得意とするカーナビゲーション用の GPS では、低コストと小型化を追求し実現している。ほとんどが高誘電率の超小型セラミックアンテナであり、性能よりも安価で使いよさを追求したものである。

カーナビゲーションにおいても、最近では位置精度と受信感度向上の機運が高まり、マルチパス除去が課題として挙げられている。カーナビゲーションでは、残念ながらアンテナでのマルチパス削減よりも推測航法とマップマッチング技術との併用により、現実的なマルチパスを削減する方法が取られる傾向がある。しかしながら、受信機側だけの受信感度向上とマルチパス削減にはおのずと限界があり、今後はアンテナへの依存度が大きくなり、マルチパス削減のためのアンテナ開発が注目されることが予想される。また、上記のような方式では数 10cm

レベルの高精度測位には不十分であるため、特に高精度測位分野ではアンテナそのものの性能向上が必要である。

マルチパスを低減して高精度測位を実現するには、アンテナのマルチパス性能が大きく影響する。マルチパスを低減した高性能アンテナは、現状では結果的にすべて高価で形状も大きい。これは小型化とともに軸比、前後比等が低下し損失も増大するためである。ここでも、量産用超小型アンテナを得意とする国内企業では、市場が小さいために十分な開発投資を行わず、米国など海外の企業が開発したアンテナが高精度測位分野で使われている。高精度測位が移動体で利用される多くの局面では、小型化が必須とされることを十分考慮する必要がある。

(2) 関連処理技術

関連処理技術の方式を表 7 にまとめる。

マルチパス方式の多くは、信号サンプリング周期あるいはスペーシング幅を 1 チップから 0.1 チップ程度にしてマルチパスの信号の影響を追尾点近傍に制限している。このため、IF 信号の帯域幅を広くしなければならないが、IF 信号の広帯域化により雑音に弱くなる。すなわち S/N 劣化や追尾能力低下も招きかねない。

一方、次世代衛星の信号においては、コードのチップレートが早くなる場合があるが、これはマルチパス削減

表 7 関連処理技術の方式

方式	概要	特徴	備考
Narrow Correlator	相関波形の追尾点近傍部分の間隔 (スペーシング幅) を短くすることで相関処理感度をもたせる。C/A コードの 1 チップを 0.1 チップにすることで P コードと同等精度となる。	コードマルチパスのみ。スペーシング幅の平方根に比例して向上する。	特許 (各社)
MET Multipath Elimination Technology	2 つの相関器で Early と Late の傾きを計算する ELS (Early Late Slope) 技術の一つ。	0.1 チップ Narrow Correlator より 25~50%改善	特許 (NovAtel)
MEDLL Multipath Estimation Delay Lock Loop	多数の相関器で相関波形の形状を決定し、直接波と反射波のパラメータ (振幅、遅延、位相) を最尤推定法で同時に推定する。	0.1 チップ Narrow Correlator より 70%改善、多くの相関波形のサンプルが必要。	特許 (NovAtel)
Strobe Correlator	2 つの Narrow Correlator の線形結合からレプリカ相関波形をつくる。	コードマルチパスのみ。	特許 (Ashtech)
Enhanced Strobe Correlator	モデルに依存せず、パラメータも推定しない。コリレータの煩雑さやノイズ上昇を抑える。	コード、搬送波位相マルチパスを対象。リアルタイム性があり移動体に適用可	特許 (Ashtech)
Gated Correlator	受信信号をゲートにより相関をとることで、マルチパス信号の影響を追尾点近傍に制限する。	コード、搬送波位相マルチパスを対象。	特許
HRC High Resolution Correlator	Gated Correlator に相当する結果を得るため、複数相関器を利用して、かなり狭い自己相関関数をつくるように線形結合をつくる。		特許
MMT Multipath Mitigation Technology	信号圧縮処理後で相関波形の形状を決定し、直接波と反射波のパラメータ (振幅、遅延、位相) を最尤推定法で同時に推定する。	コード、搬送波位相マルチパスを削減。近代化 GPS 信号形式に対応。リアルタイム性は課題	特許

に関してはマルチパスの距離制限（追尾点近傍）やナロースペーシングと同等の効果をもつ一方、追尾範囲は狭くなる。このように、信号雑音比、すなわち測位精度や信号追尾能力とマルチパスのトレードオフが方式により異なり、特に市街地での高精度測位実現においてはクリティカルになる。

(3) コードマルチパスと搬送波位相マルチパス

マルチパス低減技術には、コードマルチパス誤差と同時に搬送波位相マルチパス誤差を削減する関連処理方式がある。これまで開発されてきた関連器の多くは、数 m のコードマルチパス誤差を低減することに焦点が絞られてきた。

今後、コードマルチパスを低減するアルゴリズムを開発し広く公開することで、これまで特許で守られ非常に高価な高性能 GPS 受信機に限られていた技術が、カーナビゲーションや GPS 機能付き携帯電話によるパーソナルナビゲーションに利用可能となり、我が国の準天頂衛星システムを利用した位置情報産業に大きく貢献することも考えられる。

また、コードマルチパス誤差を低減することで、コード測位精度が向上し、整数値アンビギュイティの探索範囲を絞り込むことができる。これにより、整数値アンビギュイティ決定確率を高め、収束時間を短くすることに確実に貢献することになる。

RTK-GPS 測位におけるマルチパス誤差は、高々 1~2cm 程度であり、移動体に適用する上で精度的には全く問題ないが、この誤差により、整数値アンビギュイティの決定やサイクルスリップの検出・補正に影響を与える可能性がある。実際、アンビギュイティ決定の多くのアルゴリズムの数学モデルにおいては、搬送波位相マルチパス誤差は将来削減されるものとして無視されている場合が多い。

しかしながら、高精度な RTK-GPS 測位の継続性を確保するためには、搬送波位相のマルチパス誤差を削減することが重要であり、コードマルチパス誤差と搬送波位相マルチパス誤差の両方を削減する関連処理方式を開発する必要がある。

3.2 RTK-GPS 初期化時間の高速化アルゴリズムの検討

(1) アンビギュイティ決定の前提条件

搬送波位相観測データから高精度な位置座標を連続して得るためには、その前に整数値アンビギュイティが決定されていなければならない。アンビギュイティを初期化しなければ成らない場面として、次の 2 つの場合がある。

- ・ GPS 受信機の電源投入後

- ・ GPS 衛星からの電波が建物等で遮断された後

また、アンビギュイティの決定可否とその時間は、次の状況に大きく依存する。

- ・ 上空視界と連続して電波を受信できる衛星数
- ・ 一周波受信機か二周波受信機か
- ・ 基準局と移動局の基線長
- ・ 電離層の状態

これまで、RTK-GPS 測位は海上や空中等、周囲が開けている地上でのみ利用されてきている。従って、このようなアプリケーションで利用されることが前提となっているため、メーカーのカタログや論文などで紹介されている各種アルゴリズムによる初期化時間は、衛星数が連続して十分に確保できる周囲に電波を遮るものが何もない All in View 環境で記述されていることに注意が必要である。

(2) アンビギュイティ決定アルゴリズム

最新のアンビギュイティ決定アルゴリズムでは、多くの場合、まず最小二乗法やカルマンフィルタにより実数解を求め、その後に統計的検定などにより探索空間から整数解を厳密に決定している。また、これらの処理に伴う計算負荷と処理結果の精度はほとんど同等である。

アンビギュイティ決定法として、これまで初期値を擬似距離測位で求めてから、二周波搬送波位相で導出されるワイドレーンを用いて整数解を探索する方法が有効であった。しかしながらこの方法を用いた場合、衛星数が確保できる場合においても、再フィックスまで数 10 秒程度の時間を要するのが実状である。

移動体においては、整数値アンビギュイティの決定は少なくとも数エポックで決定される必要がある。

(3) 解決方向

準天頂衛星等が利用できる 2010 年以降における衛星測位システム環境は、近代化 GPS 信号の L2C は 24 機、L5 は 14 機、そして Galileo 信号は 30 機となる。今後は、近代化 GPS の L1、L2、L5 帯の信号を組み合わせたワイドレーンを用いてアンビギュイティを高速決定するアルゴリズムが重要になると考える。

また、準天頂衛星システムを想定し、天頂方向に必ず GPS 衛星が存在することを前提としたアルゴリズムも有効である。アンビギュイティを決定する方法として、継続した測位解を得るために比較的仰角の高い 4 つの主衛星を選んで測位する方法があるが、一旦主衛星を選んで整数解を得た後、長時間に渡って天頂に主衛星が留まるため、安定した整数解を継続して得ることが可能になる。

移動体におけるアンビギュイティの決定において、GPS

測量の後処理で利用されているような整数解の複数候補から時間をかけて真の解を求めることは重要ではなく、瞬間に位置決定することが必須である。従って、実数解でも高い信頼度を有すれば運用上の問題はないと思われる。

加えて、複合補完技術に INS のデータを用いることで、アンビギュイティ探索範囲が狭まり瞬時に検定することが可能である。また、比較的上空が開けている地域においては、地上の移動体から見た地上擬似衛星は、その相対的な位置関係は急激に変化するため、短時間に候補解の中から真の解を決定できることが予想される。

3.3 サイクルスリップ抑制手法の検討

RTK-GPS 受信機を車両に搭載して走行した場合、実験において確認もしているが、移動中の建物や樹木による電波遮断によって、頻繁にサイクルスリップが発生する。また、建設工事現場においては、トラックなどの他の建設機械による電波遮断だけでなく、ドリルや掘削機等によるパルス性の雑音により、搬送波再生回路の追尾ループ外れが多く発生することが予想される。

サイクルスリップの検出・復帰は、RTK-GPS による移動体高精度測位を継続するためには解決しなければならない重要な課題である。

(1) 移動体への適用要件

これまでに研究開発されている手法の大多数は、後処理解析において、多くのエポック観測データを用いて如何に自動的にサイクルスリップを検出し修復するかに重点が置かれていた。また、これらの統計的推測処理による手法では、サイクルスリップの数と各変化量、電離層遅延やマルチパス誤差の程度によって、その性能が大きく左右されている。

サイクルスリップの検出復帰手法を移動体に適用するには、下記の要件が求められる。

- ・高精度測位に対する信頼性を向上させるため、未検出と誤警報の確率が極めて小さく、正確な変化量の推定ができること
- ・できる限り衛星測位を継続するため、数エポックの観測データで検出でき、速やかに復帰できること
- ・実現方式や処理手順が容易に高速化できること

検出率については、十分な搬送波観測データが得られる場合のみの検出率ではなく、長い衛星電波遮断後に電波が受信できた直後のサイクルスリップ検出等、性能や信頼性を含めて考える必要がある。また、移動体の場合、森林の中を走行する場合等、短時間に複数衛星からのサイクルスリップが同時に頻発することが予想され、ロバ

スト性も重要な課題である。

(2) 解決方向

これまでの調査結果とリアルタイム性の観点から、移動体に適用可能な有望な手法として、以下が挙げられる。

- ・ドブラ周波数を用いて次のエポックの位相積算値を予測し、観測値と比較する方法
- ・電波瞬断などの入力信号変動による搬送波追尾ループ外れを極力抑制し、耐性を高める方法
- ・INS など他の支援センサから計算される予測値と観測値を比較・検定する方法

アンビギュイティ決定手法と同様に、近代化 GPS の L1、L2、L5 帯の信号の組み合わせや準天頂衛星の存在を前提としたアルゴリズムが考えられ、多くの衛星、周波数、信号により移動体のダイナミクスを推定し、多周波のドブラ周波数を用いてサイクルスリップの検出率を向上させることができると予想される。

調査結果によれば、GPS 観測データと INS データを組み合わせ、高い信頼性でサイクルスリップを検出・復帰させる手法がある程度成功している。今後の発展性を考えた場合、マイクロマシンニングの技術による MEMS ジャイロの性能が 0.1deg/h~1deg/h となり、かつ、GPS 受信機本体の価格より大きく下がれば経済性的問題もなくなり、最も有望な技術となると考えられる。

加えて、サイクルスリップの検出手順において、二重差をとる幾何学フリー結合やその他の観測データの導出量には、マルチパス誤差が必ず含まれている。また、INS データを用いてサイクルスリップを検出する方法の数学モデルにおいても、マルチパス誤差は解決されていることが前提となっており、どの手法を採用するにしても、サイクルスリップを確実に検出・復帰させる上でマルチパス誤差を低減することは必須条件となると思われる。

4. 研究開発課題

図一 6 に研究開発課題の関係を示す。

4.1 次世代衛星信号を用いた測位技術の研究開発

準天頂衛星や L2C、L5 信号追加 GPS 衛星等の次世代衛星信号を用いて高度な測位を実現することを目的とし、次世代 GNSS 受信機の基盤技術となるマルチパス低減、アンビギュイティ高速決定及びサイクルスリップ検出復帰の各アルゴリズムを研究開発する。

4.2 自律航法補完技術の研究開発

衛星からの信号と車載測位センサを組み合わせ、高精度測位をできる限り継続する要素技術を研究開発する。

自律航法補完システムは、RTK-GPS 受信機、中精度慣性航法システム (INS) 及び車速計 (VMS: Vehicle Motion Sensor) 等から構成される。

中精度ジャイロ (1deg/h) を内蔵する INS を用いて搬送波位相 GPS 測位の不感帯を補う一方、高精度な RTK-GPS 測位が利用できない場合のため、VMS の車速パルスを用いた INS のドリフト誤差を抑える複合航法フィルタを開発する。さらに、INS データを用いたアンビギュイティの決定、サイクルスリップの検出復帰等、要素アルゴリズムを新たに開発する。これにより、RTK-GPS 測位のサイクルスリップ発生からアンビギュイティ決定までを INS で支援されることで、移動体の位置を喪失することなく継続した測位が可能となる。

この開発は、1deg/h クラスのジャイロが近い将来 MEMS 技術で実現されることを想定して、その基盤技術を確認することを狙いとする。

4.3 地上設備補完技術の研究開発

衛星からの信号と地上側設備を組み合わせ、継続した高精度測位を実現するための技術を研究開発する。擬似衛星信号を受信可能な GPS 受信機と擬似衛星 (PL) 送信機から構成される。運用面の要件を明確にし、実現方式と要素技術アルゴリズムを開発することで、疑似衛星の妥当性を評価することを狙いとする。

4.4 統合測位技術の研究開発

前項で開発された要素技術を組み合わせ、RTK-GPS/PL/INS/VMS システムを構成する要素技術を開発する。4.2 項では、INS をセンサとして速度・位置レベルで航法フィルタを構成するが、本課題では、ジャイロ、加速度計をセンサとして、角速度、加速度レベルで航法フィルタを構成する。また、GPS 受信機側においても、信号捕捉、追尾レベルに補正データをフィードバックさせる。

4.5 高性能統合測位システムの開発と実証実験

図-7 に高性能統合測位システムの開発ステップを示す。

4.1 から 4.4 の各要素技術アルゴリズムを最適化するとともに、適宜必要な部分を抽出し高性能受信機として統合化する。さらに、ハードウェアとソフトウェアのトレードオフにより、リアルタイム性を必要とする部分を専用基板化、FPGA 化して評価する。このようにして、多様なアプリケーションに対応できるようリアルタイム性、経済性も考慮した試作システムを開発する。

加えて、試作した高性能統合受信機を車両に搭載して

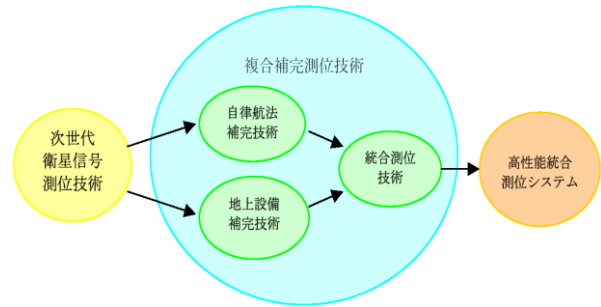


図-6 研究開発課題の関係

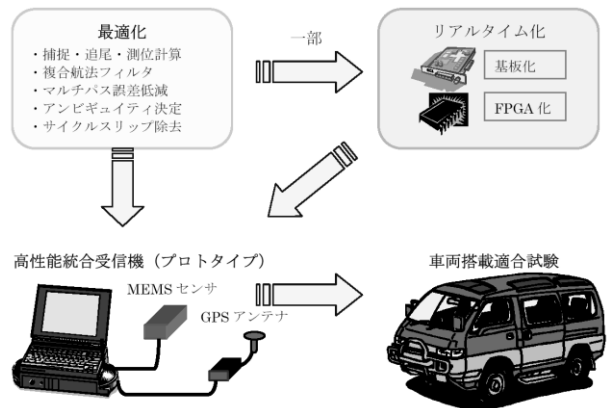


図-7 高性能統合測位システムの開発ステップ

適合性試験を実施する。

5. アウトプット（測位処理ソフトウェアと開発アルゴリズム）

研究開発アルゴリズムと開発環境ソフトウェアの一覧を表-8 に示す。また、測位処理ソフトウェアとの関連を図-8 に示す。

6. 開発環境と試験環境の構築

本研究開発を効率的に実施するためには、各研究開発課題の要素技術アルゴリズム、複合補完システムの方式、各種パラメータの閾値の妥当性、性能等を再現できる統合的なシミュレータが必要となる。これを構成するシミュレータやモデルは、システムの定義、統合、検証及び運用を共通的に支援する開発環境であり、各種のアプリケーションを評価する上でも重要なツールとなる。

なお、導入または開発にあたっては、国土地理院で開発された測位シミュレータや既存の開発ツールなどを十分に調査した上で選定する。また、信号生成シミュレータについても、所要経費や他研究機関の成果を十分考慮した上で決定する必要がある。

表-8 研究開発アルゴリズムと開発環境ソフトウェア一覧

大項目	項目	アルゴリズムの内容	備考
次世代衛星信号測位技術	マルチパス低減	信号圧縮と動特性を利用した高速推定	
		信号解析によるマルチパス反射波自動除去	
		3次元地図支援によるマルチパス誤差改善	
	アンビギュイティ高速決定	多周波信号を用いたワイドレーン高速決定	
		準天頂衛星を基準衛星とする高速決定	
		高信頼性実数解による高速決定	
	サイクルスリップ検出・復帰	多周波信号を用いたダイナミクス改善	
信号変動にロバストな搬送波追尾ループ監視			
次世代衛星信号測位	近代化GPS衛星、準天頂衛星、擬似衛星対応のコード、搬送波位相の信号捕捉・追尾・測位手法		
自律航法補完技術	GPS/INS/VMS 複合航法フィルタ	複合航法フィルタ(ZUPT/CUPT 手法、移動アライメント手法を含む)	
	INS 支援アンビギュイティ高速決定	INS 予測値を用いた探索空間絞り込みと高速決定	
	INS 支援サイクルスリップ検出復帰	INS 予測値による決定変数導出と累積和検定	
地上設備補完技術	PL 支援アンビギュイティ決定	準天頂衛星を想定した悪条件下のアンビギュイティ決定率改善	
	PL マルチパス誤差改善	擬似衛星信号の低仰角マルチパス低減	
	PL 最適設置	周囲環境と整備効果を考慮した送信機最適運用	
統合測位技術	GPS/PL/INS 複合航法フィルタ	密結合(Tightly Coupled)複合航法フィルタ	
	PL 支援アンビギュイティ決定	衛星幾何学の変化を利用したアンビギュイティ決定	
	密結合統合サイクルスリップ抑制	慣性センサを用いた信号相関・追尾によるサイクルスリップ推定	
	PL 大気圏補正	擬似衛星大気圏遅延補正モデリング	
開発環境	信号生成シミュレータ	GPS 衛星、準天頂衛星、擬似衛星などの信号生成、補強データ生成	
	評価分析ツール	電波受信状況、測位精度、利用率のビジュアル表現	

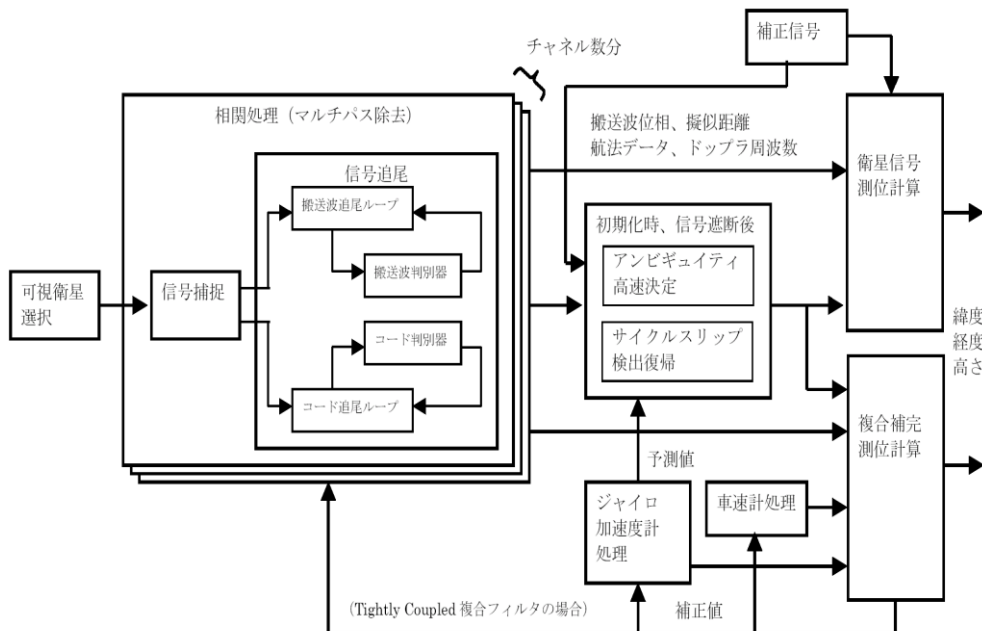


図-8 測位処理ソフトウェアの関連図

(1) 信号生成シミュレータ

衛星信号生成、補強データ生成、誤差生成モデル及び信号伝搬モデル等から構成する。

(2) 測位シミュレータ

アンテナからの RF 信号を周波数変換し、得られた IF 信号データから信号捕捉、信号追尾及び測位計算までの一連の処理を実行する。また、信号生成シミュレータで発生された現行の GPS 衛星信号、近代化 GPS の L2C、L5 信号、準天頂衛星信号、擬似衛星信号及び基準局データ、並びに補強データを取り込み、コード DGPS 測位と搬送波位相測位を実行する。

(3) 評価分析ツール

実行環境設定値、測位計算結果等を 3 次元地図上にビジュアル表示する。

7. まとめ

本検討では、高精度測位技術を陸上移動体へ適用するための問題点を抽出し、今後研究開発すべき技術課題を取り纏めた。

RTK-GPS 初期化時間を短縮しサイクルスリップを確実に検出復帰させるためには、10m 以内の建物から反射するマルチパス誤差を低減する相関器技術を開発する必要がある。

また、仰角が常に高い準天頂衛星は、近代化 GPS 信号と互換性のある多周波信号も送信するため、これらを用いたアンビグイティの高速決定やサイクルスリップのために基盤的なアルゴリズムを研究開発することも重要である。

加えて、衛星測位の限界を補完・補強する地上側設備として疑似衛星が有効であり、特に必ず天頂に存在する準天頂衛星を有効活用することで、相乗的な効果をもたらすと思われる。疑似衛星については、これまでの実証実験により、技術的な課題については解決がなされていくと考え、今後は、設置、運用、保守における課題の方が重要になる。

一方、車載側機器としてジャイロなどの自律航法技術を組み合わせることは、単に衛星測位の不感地帯を補うだけでなく、アンビグイティの探索範囲を狭めて高速決定を可能とし、またサイクルスリップの検出にも極めて有効であると思われる。さらに、高精度衛星測位により欠点であるドリフト誤差が補正できる等、衛星測位と相補的な役割を果たす有望な補完手段であると考えられる。特に半導体技術を用いた MEMS 慣性センサは、急速な技術進展が予想され、これらの利用を想定した要素技術アルゴリズムを確立することが重要である。

これらの方式やアルゴリズムを開発するための開発環境としてソフトウェア GPS 技術が有効活用できると思われ、一部の大学等で試作されている。

8. おわりに

日本の準天頂衛星システム開発プロジェクトは、平成 20 年の打ち上げを目指し、各開発要素を所管する省庁、宇宙開発機関、大学及び民間の連携により推進することとなっており、今後とも、国土交通省をはじめ、関係する方々のご協力のもと、技術開発を進めていく所存である。