

システム技術開発調査研究

16-R-1

# 移動体用高精度位置標定システム に関する調査研究報告書 (要旨)

平成17年3月

財団法人 機械システム振興協会  
委託先 (財) 日本自動車研究所



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

## 序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人 機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、経済産業省のご指導のもとに、機械システムの開発等に関する補助事業、新機械システム普及促進補助事業等を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長 放送大学 副学長 中島尚正 氏）を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を民間の調査機関等の協力を得て実施しております。

この「移動体用高精度位置標定システムに関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が財団法人日本自動車研究所に委託して実施した調査研究の成果であります。

今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いです。

平成17年3月

財団法人機械システム振興協会

## はじめに

昭和 56 年に、カーナビゲーションシステムが世界で初めて実用化された。このシステムは移動体用位置標定システムのさきがけとなった。この時点で、GPS はアメリカの軍事用位置標定システムとして既に運用されていたが、この GPS を利用したカーナビゲーションシステムは平成 2 年に実用化された。以降、カーナビゲーションシステムは慣性航法をベースに GPS の位置情報で補正する方式が大部分になり、累計出荷台数 1700 万台を超え、4 台に 1 台の割合で装着されるまでに普及した。

GPS による位置標定技術は、電子基準点等による位置補正や準天頂衛星等による衛星数の補完等、精度向上が図られている。移動体（自動車）をはじめとして、この GPS による高精度位置標定技術は多くの分野で利用される可能性があり、将来のカーナビゲーションシステムの市場規模を考えても相当大きな市場になると考えられている。

平成 8 年に、ITS 関係（当時）5 省庁で策定した『高度道路交通システム（ITS）の全体構想』において、ナビゲーションシステムの高度化が 9 開発分野の先頭にあげられたが、移動体（自動車）の位置標定は、ナビゲーションシステムの高度化に留まらず、大部分の ITS サービス実現の基盤技術になっている。

前年度から始まった本調査研究では、移動体用高精度位置標定システムへの実現を目標に GPS による測位データから移動体（自動車）の位置精度の実力値、高精度化実現への課題及び高精度化への研究開発の方向性を明らかにすることを目指すものである。

前年度の調査研究の結果、マルチパスの影響もなく、GPS 衛星を十分捕捉できるオープンエリアでは高精度を達成できるが、その他のマルチパスの影響のあるエリア、GPS 衛星を十分捕捉できないエリアにおいては、目標から程遠いことが判明した。

それゆえ、本年度の調査研究では、マルチパス軽減方式、GPS 補完方式を採り上げ、現状の実力値を実験により明らかにすること及びインフラと車載システム双方の多くの測位方式を調査し、これらの方式の最適な組合せ等から高精度化への研究開発の枠組みを見出すことを目標に研究を行なった。

前年度に引き続いて、本調査研究にあたっては、移動体用高精度位置標定システム委員会（委員長：森川 博之 東京大学 助教授）を設置し、学識経験者、自動車・車両部品メーカ、情報通信機器メーカ及びコンサルティング会社等の委員との議論をもとに検討を行った。この場を借りて、多数の関係者のご指導とご協力に心より感謝を申し上げる次第である。

平成 17 年 3 月

財団法人 日本自動車研究所

## 目 次

1. 調査研究の目的 .....	1
2. 実施体制 .....	2
3. 調査研究成果の要約 .....	7
第1章 調査研究の方法.....	9
1.1 調査研究全体の方法.....	9
1.2 前年度調査研究の方法とまとめ.....	10
1.3 本年度調査研究の方法.....	12
第2章 位置精度改善の評価実験.....	14
2.1 評価実験の目的と計画.....	14
2.2 結果および今後の課題.....	15
第3章 位置精度改善方式の調査、検討.....	18
3.1 GPS 補完方式の調査、検討.....	18
3.2 マルチパス軽減方式の調査、検討.....	52
3.3 位置精度改善方式の比較検討.....	56
第4章 移動体用高精度位置標定システムの検討.....	64
4.1 位置精度改善方式の組合せ検討.....	64
4.2 高精度化へのフレームワーク.....	66
4.3 移動体用高精度位置標定システム.....	67
4 調査研究の今後の課題及び展開.....	69

## 1. 調査研究の目的

GPSによる高精度位置標定技術は多くの分野で利用される可能性がある。中でも移動体（自動車）への利用は、その中核を成すものであり、運転支援システム等多くのITSサービスへの利用が想定されている。

現状のカーナビにおける経路誘導サービスに用いられている位置標定はGPS測位方式、慣性航法、デジタル地図及びマップマッチングによって実現されている。精度は数10メートルといわれており、精度の多くは測位方式であるGPS測位方式と慣性航法とに起因しており、運転支援システム等の将来のITSサービスを実現するためには、位置標定技術の精度と信頼性レベルの向上が不可欠である。

そのためには、GPSだけでなくGPS補完方式やマルチパス軽減方式等の様々な測位方式を組合せた利用方式の総合的検討も求められる。本調査研究は前年度の結果をベースに、移動体用高精度位置標定システムの最適化について検討し、今後の最適化検討への方向性、枠組み（フレームワーク）を提案し、ITSの発展に資することを目的とする。

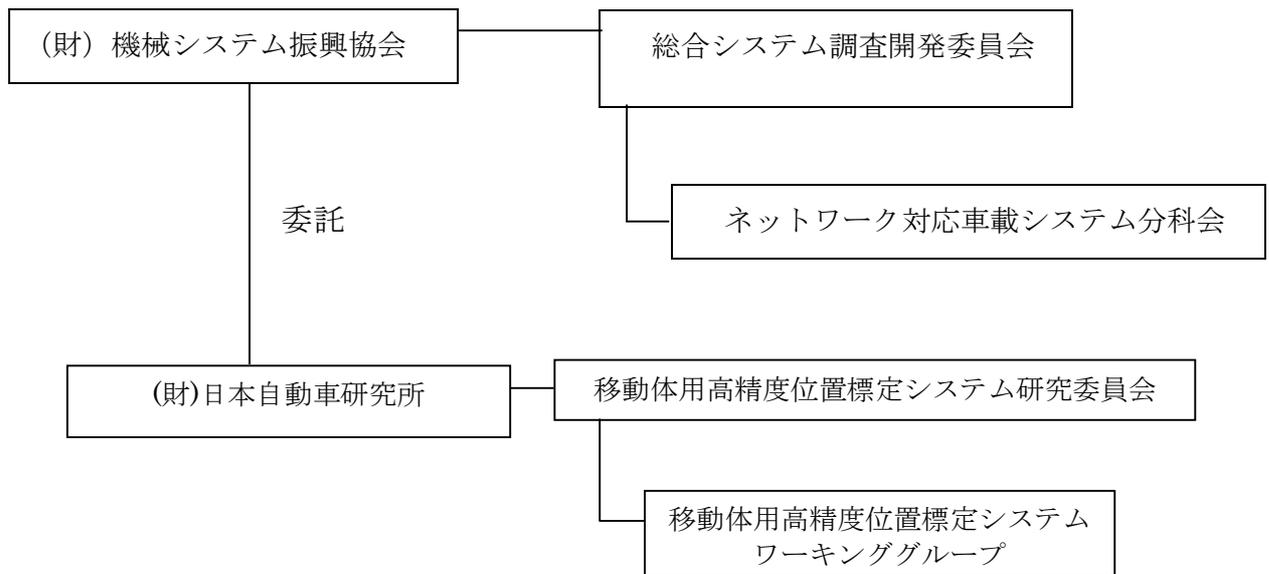
尚、前年度の調査研究において、マルチパスの影響もなく、捕捉衛星数の十分なオープンエリアでは、GPS測位だけでも目標精度0.5mを達成できるが、マルチパスの影響のあるエリア、捕捉衛星数の不十分なエリアでは目標から程遠いという課題も明らかになっており、このエリアごとの課題解決のための対策を検討していくのが本年度調査研究の目標でもある。

(GPS:Global Positioning System)

## 2. 実施体制

(財) 機械システム振興協会から委託を受けた調査研究をすすめるにあたって、以下に示す実施体制で推進した。

(財) 日本自動車研究所に、「移動体用高精度位置標定システム研究委員会」を設置した。さらに左記委員会の作業班として「移動体用高精度位置標定システムワーキンググループ」を設置し実施した。



総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	放送大学 副学長	中 島 尚 正
委 員	政策研究大学院大学 政策研究科 教授	藤 正 巖
委 員	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学 大学院工学系研究科 助教授	藤 岡 健 彦
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 コーディネータ	太 田 公 廣
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 シニアリサーチャー	志 村 洋 文

## ネットワーク対応車載システム分科会 委 員 名 簿

(順不同・敬称略)

委員長	吉 本 堅 一	防衛大学校 システム工学群機械工学科 教授
委 員	相 田 仁	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授
委 員	赤 松 幹 之	独立行政法人産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門 行動モデリンググループ 研究グループ長
委 員	板 橋 秀 一	筑波大学 電子情報工学系 教授
委 員	佐 藤 春 樹	慶応義塾大学 理工学部 システム工学科 教授
委 員	津 川 定 之	名城大学理工学部情報科学科 教授
委 員	寺 田 一 薫	東京海洋大学海洋工学部 流通情報工学科 教授

## 移動体用高精度位置標定システム研究委員会 委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	森川 博之	東京大学 新領域創成科学研究所 助教授
委員	川添 利洋	日本無線株式会社 研究開発部 電波研究グループ
委員	荒井 修	古野電気株式会社 技術研究所 研究部 第四研究室
委員	池田 朋広	株式会社三菱総合研究所 ITS事業部
委員	柏原 正信	三菱電機株式会社 自動車機器開発センター 開発第二部 主席技師
委員	木暮 吉行	パイオニア株式会社 MEC事業企画部 渉外担当部長
委員	坂本 規博	社団法人日本航空宇宙工業会 技術部部長
委員	佐々木 雅広	松下電器産業株式会社 パナソニックオートモーティブシステムズ社 R&Dセンター 先端技術開発グループ
委員	佐藤 英夫	株式会社野村総合研究所 社会情報コンサルティング部 主席コンサルタント
委員	清水 真	株式会社アクアキャスト 代表取締役社長
委員	下垣 豊	株式会社日立製作所 衛星利用ITインフラ推進本部 市場開拓部
委員	中野 信一	川崎重工業株式会社 システム技術開発センター
委員	中村 一雄	株式会社デンソー ITS開発部 開発2室 主任部員
委員	山田 哲志	日本無線株式会社 通信機器技術部 ITS技術グループ
委員	小川 政行	株式会社トヨタマップマスター 企画開発部 部長
委員	石井 真	測位衛星技術株式会社 戦略営業部 取締役営業部長
委員	茶珎 俊一	測位衛星技術株式会社 国際営業技術部 チーフマネジャー
事務局	高橋 寿平	財団法人 日本自動車研究所 ITSセンター 企画グループ 主席研究員
事務局	醍醐 英治	財団法人 日本自動車研究所 ITSセンター 企画グループ 主任研究員

## 位置標定技術研究WG 委員名簿

(順不同・敬称略)

主査	川添 利洋	日本無線株式会社 研究開発部 電波研究グループ
委員	荒井 修	古野電気株式会社 技術研究所 研究部 第四研究室
委員	池田 朋広	株式会社三菱総合研究所 ITS事業部
委員	柏原 正信	三菱電機株式会社 自動車機器開発センター 開発第二部 主席技師
委員	木暮 吉行	パイオニア株式会社 MEC事業企画部 渉外担当部長
委員	坂本 規博	社団法人日本航空宇宙工業会 技術部部長
委員	佐々木 雅広	松下電器産業株式会社 パナソニックオートモティブシステムズ社 技術グループ 第一設計チーム
委員	佐藤 英夫	株式会社野村総合研究所 社会情報コンサルティング部 主席コンサルタント
委員	清水 真	株式会社アクアキャスト 代表取締役社長
委員	下垣 豊	株式会社日立製作所 衛星利用ITインフラ推進本部 市場開拓部
委員	中野 信一	川崎重工業株式会社 システム技術開発センター
委員	中村 一雄	株式会社デンソー ITS開発部 開発2室 主任部員
委員	山田 哲志	日本無線株式会社 通信機器技術部 ITS技術グループ
委員	小川 政行	株式会社トヨタマップマスター 企画開発部 部長
委員	石井 真	測位衛星技術株式会社 戦略営業部 取締役営業部長
委員	茶塚 俊一	測位衛星技術株式会社 国際営業技術部 チーフマネージャー
事務局	高橋 寿平	財団法人 日本自動車研究所 ITSセンター 企画グループ 主席研究員
事務局	醍醐 英治	財団法人 日本自動車研究所 ITSセンター 企画グループ 主任研究員

### 3. 調査研究成果の要約

移動体（自動車）にとっての位置標定は、絶対位置の標定が可能なGPS測位が中心となるが、いつでも、どこでもGPS測位ができるわけではない。そこで、本研究では、GPSの状態を、GPSの見えるところ、見えないところ、見えてもGPS測位データが信頼できないところの三つの場合に分けて、それぞれの高精度化方策をどのように整備していくかについての方向性を検討した。

具体的には、以下に示す位置精度改善の評価実験、位置精度改善方式の調査、移動体用高精度位置標定システムの検討の項目を検討し、移動体にとって最適な高精度化研究の方向性を明らかにした。

#### (1) 位置精度改善の評価実験

前年度の研究において、オープンエリアのようなGPSの見えるところでは、GPS測位だけで、目標精度0.5m（この目標精度は、移動体の位置精度評価法を検討する上で目安とすべき値であり、移動体においてGPS測位の限界精度ともいえる値）を実現できるが、市街地、高層ビル街では、実現できていない。

そこで、市街地や高層ビル街のようなGPSの見えないところと見えてもGPS測位データが信頼できないところにおける高精度位置標定を実現するため、慣性航法（GPS補完方式の1種で、走行方向を検出するジャイロ、走行距離を検出する車速センサにより逐次的に走行軌跡を算出する方式）、マルチパス軽減方式（精度劣化の原因を反射波と考え、その反射波による影響を軽減する方式）を採り上げ、現状の実力値を測定した。

本研究では、移動体の位置精度評価法に、汎用性のある方式として、GPS衛星からの信号を溜め込んで後で測位データを計算する後処理ワイドレーン法を採用した。

この後処理ワイドレーン法を使用した位置精度評価法を用いて、マルチパス軽減方式と慣性航法の位置精度の実力値を実験により測定し、以下の知見を得た。

- ① 本研究で使用した後処理ワイドレーン法は、精度も良く、適用範囲も広く、今後の移動体用高精度位置精度評価法として利用できる可能性がある。
- ② マルチパス軽減方式は、精度改善の1例を示すことができた。
- ③ 慣性航法は、その測位性能から目標精度を維持する範囲と条件を求める手法について、1例を示すことができた。

#### (2) 位置精度改善方式の調査

自動車用で実用化されている方式またはフィージビリティが検証されている測位方式を中心に、高精度化の可能性のある測位方式の組合せをみつける視点から調査し、現状を把握した。

- ① マルチパス軽減方式（反射波の影響を軽減する8方式）
- ② GPS補完方式（GPSを補完する5方式）
  - ・慣性航法
  - ・白線検知（車載カメラでの白線検出により自車位置を検出する方式）
  - ・擬似衛星（地上局を設置し、GPSと同様の信号を送信する方式）
  - ・路側機（路側機からの電波を受信した時に、自車位置を測位する方式）、
  - ・レーンマーカ（道路に埋設されたレーンマーカから得られる信号よりレーンマーカからの自車位置を測位する方式）

### (3) 移動体用高精度位置標定システムの検討

高精度化の可能性のある測位方式の組合せについて検討し、今後の高精度化検討への方向性、枠組み（フレームワーク）を提案した。

- ① GPS の見えるところでは、GPS 測位だけで目標精度を実現できる。しかしながら、単独測位では目標精度を実現できないため、ディファレンシャル補正（GPS 測位をしている基準局での位置補正データを得て、車両における GPS 測位の位置データを補正する）は必要であり、目標精度を実現するには、基準局が車両から 10km 以内にあることが前提となる。

電子基準点は、全国で 1,200 箇所あり、10km 以内という条件は既に成立している。尚、この電子基準点の補正データは、Virtual Reference Station（以降 VRS）- 補正としてインターネット経由で利用できる。

この GPS と電子基準点による VRS 補正の組合せを、GPS+VRS 補正 と表現し、GPS の見えるところにおける目標精度の実現のための GPS 測位方式として移動体用高精度位置標定システムには必要不可欠なものとする。

- ② 捕捉衛星数の不十分なエリア、反射波の影響のあるエリアでは、擬似衛星または路車間の位置標定により目標精度を実現できる。それゆえ、以下の組合せの 3 システムを高精度化への研究の方向性として提案した。

尚、GPS+VRS 補正は、上記①の理由により、インフラのすべてに加えた。

- ・車載システム：慣性航法

- ・インフラ：GPS+VRS 補正+擬似衛星

  - GPS+VRS 補正+路車間の位置標定

  - GPS+VRS 補正+擬似衛星+路車間の位置標定

- ③ エリアを軸とする高精度化へのフレームワークの検討により、対策の必要な GPS の見えないところと見えても GPS 測位データを信頼できないところの二つのエリアにおいて、GPS 測位を一切利用（擬似衛星は、GPS 関連方式の一つ）せずに、路車間の位置標定という一つの対策で高精度化を実現できる可能性があるため、

「GPS+VRS 補正+慣性航法+路車間の位置標定」システムを第 1 候補として示した。

## 第1章 調査研究の方法

### 1.1 調査研究全体の方法

移動体における位置標定システムで最も精度と信頼性が確保されているものは、現時点で、カーナビゲーションシステムに用いられている方式である。この方式は、慣性航法システムを主体にして、時々GPS から得られる絶対位置座標により、慣性航法で推定した位置を補正する方式が取られている。一方、GPS そのものの測位精度も D-GPS や新たな衛星システムの打ち上げ等により近年急速に向上しつつあり、特定の ITS サービスについては慣性航法やマップマッチング（測位データから、走行中の道路が地図上のどの道路かを特定する手法）によらず GPS による測位だけで実現することへの期待も高まっている。また、今後の ITS サービスにおいては、プローブシステムにおけるように情報の発生位置が求められたり、地図を使ったサービスである LBS (Location Based Service) のように位置に依存してサービスが求められる等のように絶対位置情報が望まれる場合が多い。

そのため、2年間に亘る本調査研究の基本的な方針は、絶対位置の標定が可能な GPS 測位を中心に据えて、検討を進めることにした。

ここで、GPS 測位については、GPS 衛星が捕捉できない場所が必ず存在するため、あらゆる場所で一定の精度と信頼性で位置標定を行うには、様々な方法の組合せが不可欠である。そのため、本調査研究では次ページの図にも示すように、GPS の状態を次の3つの場合に分けて、それぞれに対する位置標定精度を向上させるための技術課題を検討することにした。

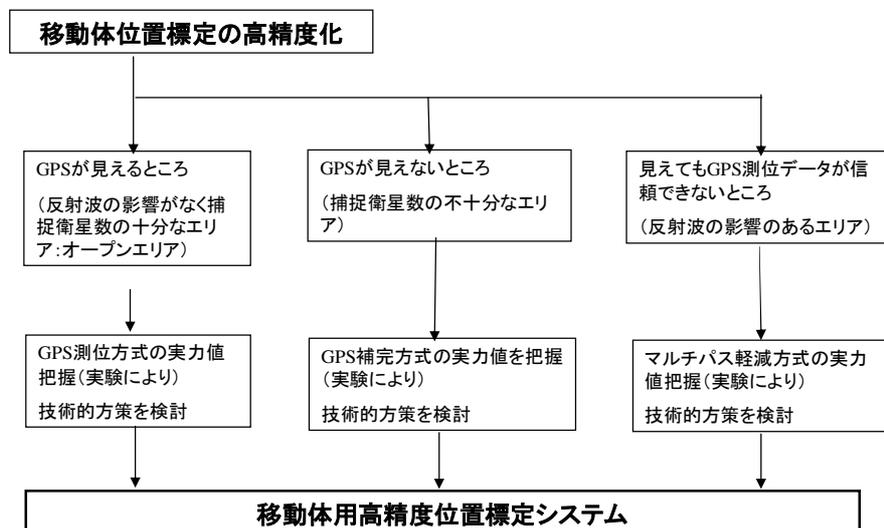
- ・ GPS の見えるところ
- ・ GPS の見えないところ
- ・ GPS が見えても、GPS 測位データが信頼できないところ

調査研究の当初に当っては、先ず、GPS 測位の実力値を把握することから開始した。この段階では、先ず精度評価法を確立する必要があり、そのための目標精度を定めた。この目標値は、関連 ITS サービス市場の大きさと技術的実現性の観点からの絶対位置標定精度の限界として定めたものである。

この目標設定に基いて、現在の主な測位技術の実力値と目標までの差異の実態を実験によって確認した、

これらの知見や机上調査の結果をもとに、それぞれの3つの場合に留意しながら、今後の ITS サービスの基盤となし得る、移動体用高精度位置標定システムを整備するための技術的方策を検討した。

## 研究全体の方法



### 1.2 前年度調査研究の方法とまとめ

前年度は、様々な地域での位置精度の実力値を把握するために、位置精度を実測した。そのため、位置精度目標値の設定、GPS 測位の位置精度実力値の把握、を検討した。

#### (1) 位置精度目標値の設定

位置精度目標値を市場規模と技術的実現性を視点に設定した。(精度 0.5m)

##### ・市場規模

高精度位置情報を要する 45 個の新規サービスを、要求位置精度レベル (4 グループ : 5cm 以下, 25cm 以下, 25cm~1m, 1m~3m) を横軸に、市場規模のポテンシャル (3 グループ : 歩行者用機器, 乗用車用車載機, 業務用車載機) を縦軸にして整理し、グループ分けした。これを図 1 に示す。

精度 0.5m は、要求位置精度レベルでは、25cm~1m, 1m~3m, 市場規模では歩行者用機器と乗用車用車載機の大半と業務用車載機の一部をカバーしており、サービスの内容としては情報提供の大部分と警告の一部分をカバーしている。

##### ・技術的実現性

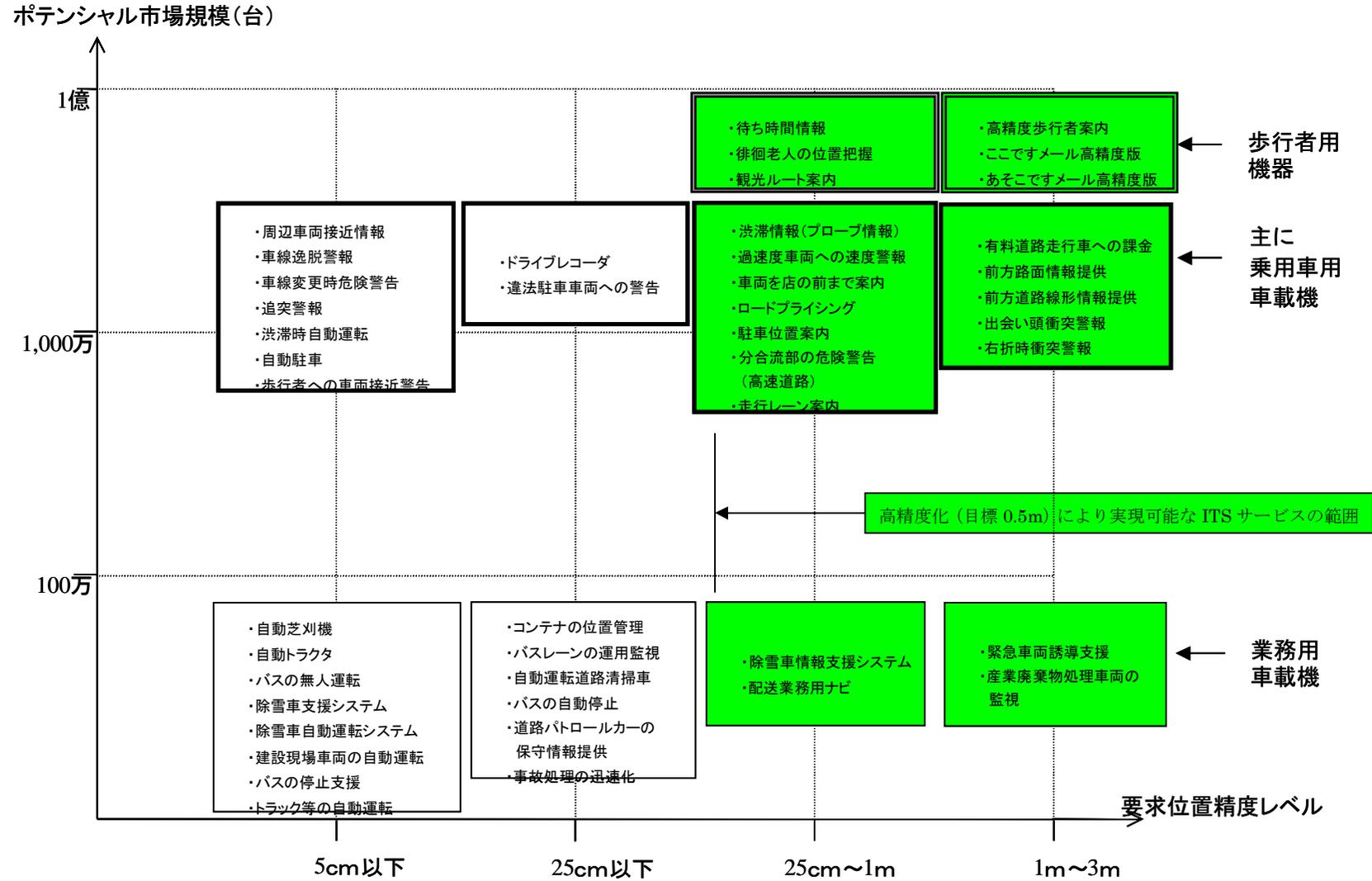
移動体の位置精度評価法を検討する上での目安とすべき値であり、GPS 測位による絶対位置標定の限界と考えられる 0.5m 精度レベルを高精度化の最大限の目標の目安として定めたものでもある。

#### (2) GPS 測位の位置精度実力値の把握

RTK-GPS+光ファイバジャイロ+車速センサを位置精度評価法の位置基準 (リファレンス) とする評価法を使用した。

実測した位置精度実力値 (測位できたデータを統計的に処理し、平均+標準偏差を求めた) を 2 ページ後の表に示す。

図1. 目標精度と新規サービスの位置付



	GPS 単独測位	GPS+D 補正	RTK-GPS
テストコース (オープンエリア)	2.4m	0.56m	0.19m
市街地	9.4m	4.9m	4.7m
高層ビル街	43.8m	10.6m	32.0m

GPS 単独測位：C/A コードから測位する方式

GPS+D 補正：GPS 測位している基準局での位置補正データを得て、車両側で得られた GPS 測位データを補正する方式

Real Time Kinematic(以降、RTK)-GPS：搬送波位相から測位する方式

(実験を通して得られた知見)

- ・ RTK-GPS は、GPS 衛星の捕捉を外してから復帰するまでの時間が長く、自動車用としては課題がある。
- ・ エリアの分類として反射波の影響のあるエリア、捕捉衛星数の不十分なエリアを取り上げ、各エリア毎の測位方式の対応を検討すべきである。
- ・ テストコースのようなオープン（反射波の影響がなく、捕捉衛星数の十分な）エリアでは、GPS+補正でも目標を達成できる。

### 1.3 本年度調査研究の方法

前年度は、様々な地域での位置精度の実力値を把握するために、GPS 測位方式のみでの位置精度を実測した。この結果、反射波の影響のあるエリアと捕捉衛星数の不十分なエリアでは、位置精度改善が必要であることが判明したため、本年度研究は次の手順で実施した。

#### (1) 位置精度改善方式の評価実験

前年度の結果より、エリアを以下のように分類して、現状を把握し、目標精度を実現する走行範囲、走行条件等を明確にするための実験を実施する。

1. 反射波の影響のあるエリア
  - ：マルチパス軽減方式による精度改善検討
2. 捕捉衛星数の不十分なエリア
  - ：慣性航法による精度改善検討

#### (2) 位置精度改善方式の調査

自動車用で実用化されている方式またはフェージビリティが検証されている測位方式を中心に高精度化の可能性のある測位方式の組合せを見つける視点から調査した。

- ・ 5種類の GPS 補完方式：慣性航法，白線検知，擬似衛星，路側機，レーンマーカ
- ・ マルチパス軽減方式

(3) 移動体用高精度位置標定システムの検討

(1)における実験データを踏まえて、かつ、(2)における調査結果を織り込みながら、移動体用高精度位置標定システムを検討し、測位技術の整備の方向と一連の研究フレームワークをまとめる。

## 第2章 位置精度改善の評価実験

### 2.1 評価実験の目的と計画

移動体の位置を求め、得られた位置情報をアプリケーションとして応用していきたい場所は、現実として市街地である場合が多い。しかしながら、GPSにとって市街地は建物や架橋、高架等により衛星の信号を受信することが困難な場所が多く、位置の精度を論じる前に測位が行えないというジレンマがある。

本調査研究では、GPSが受信困難な、かつ現実の受信環境により近い状況で、これらの課題を解決する手法の一つとしてGPS補完方式を採り上げ、これらを含む位置標定システムによる移動体位置精度の実力値、位置精度の評価手法等を明らかにすることを目的とした。また捕捉衛星数の少ないエリアとマルチパスの影響の大きいエリアにおける位置精度改善の可能性と方法についても検討を行なった。

上記の目的を満たすために、本実験では3箇所のテストフィールドを設定した。

- ・つくばテストコース
- ・東京海洋大学構内
- ・市街地

これらの場所で行う実験について、その目的を以下の表1にまとめる。

表1 各実験場所における実験目的

実験場所の設定	実験の目的
JARI つくばテストコース (GPS 衛星直接波信号のみを十分に捕捉でき、かつ、平坦で十分長い直線距離が得られる理想的エリア)	東京海洋大学での実験で、リファレンスとして扱う測位方法 1.後処理ワイドレーン法 の位置精度を実測する。また、 2.慣性航法 については、位置精度を確保する条件（走行時間、走行距離等）を明らかにする。
東京海洋大学 (安全に実験可能であり、GPS 衛星直接波信号が十分には得られないポイント及び反射波が存在するエリア)	GPS 補完及びマルチパス軽減方式の改善効果を下記条件①～③で定量的に評価する。 ①GPS 衛星直接波信号が十分には得られないポイント ②反射波が得られるポイント
市街地	GPS 補完及びマルチパス軽減方式の改善効果を確認する。 特に、マルチパスによる位置精度劣化は数10m～数100mであり、確認は可能と考えられる。

## 2.2 結果および今後の課題

本実験において、得られた結果についてまとめる。

今回行った実験では、つくばテストコース～構内～市街地において、位置測位のリファレンスを後処理ワイドレーン法による解を用いた。しかしながら、全てにおいて後処理ワイドレーン法によってリファレンスデータが得られていないことから、以下のようにリファレンスを設定した。

- ① 後処理ワイドレーン法によるリファレンス
- ② 後処理ワイドレーン法で解が得られなかった区間を直線的に車速パルスで補完したものと①との合成

これにより評価対象エリアにおいて全データの精度比較が行えるようになった。移動体の位置評価を行う上で、この手法は有効である。

### (1) つくばテストコース

今回、移動体の位置評価を行うにあたり、そのリファレンスとして後処理ワイドレーン解析法による位置の算出を導入した。

この方式の精度がどの程度あるのかを実測するため、GPS 衛星の受信環境が理想的な実験場所として、つくばテストコースを選定した。

後処理ワイドレーン法の評価にあたっては、現在もっとも高精度かつリアルタイム性があり、公共的な測量にも導入され実績のある RTK-GPS を使用した。この RTK-GPS で得られる時時刻刻の位置結果と、後処理ワイドレーンによって得られた測位結果を評価した。

結果、RTK-GPS を基準とした時の後処理ワイドレーン法による位置の誤差は 2cm～3cm で一致しており、また走行速度 (10km/h および 40km/h) の違いにおいてもドラスティックな差は生じなかった。

今回 RTK-GPS に使用した GPS 受信機の RTK-GPS 測定精度が 1cm+2ppm (公称値) (2次元) 程度であることから、後処理ワイドレーン法の結果は、数 cm 以内であることが明らかになった。東京海洋大学～市街地におけるリファレンスとして有意であることがわかった。

また、IMU の基礎試験としておこなった実験においては、直線および回転の 2 種を行った。リファレンスとの差において、直線部分では速度 10km/h の方が若干優位な結果が得られた。通常走行時間が長いものほどジャイロのドリフトが加味されてくるため、低速度の方が誤差が増大すると考えられたが、本実験で使用したジャイロが地磁気センサーを内蔵している機種であることから、この補正効果が影響しているものと考えられる。

回転部分においてはリファレンスを設けず、周回の始点と終点においての誤差を検討をおこない、始点時と終点時の方位の差から方位の時間変化量を割り出した場合におよそ±0.3度以内で一致していることから、有意な結果が得られた。

## (2) 東京海洋大学

東京海洋大学構内においては、つくばでの実験を踏まえ、より市街地に近い環境で実験を行った。

まず、通常の移動体測位に最も近いC/Aコード（1周波）による測位では、後処理ワイドレーン法による結果をリファレンスとして、その位置誤差が平均1.6m程度で求めることができた。また、マルチパスが想定される区間であることから、Pコードを利用して移動体の位置を求めたところ、同様にして平均1.9m程度の誤差を求めることができています。

後処理ワイドレーン法+車速パルス補完によるリファレンスを持ちいて、C/AコードおよびPコードの位置精度を評価した場合、C/Aコード測位では誤差の平均値が約10m、Pコード測位では約6.3mとなり、Pコードの方が精度良く結果が得られている。厳密にはPコードのサンプル数がC/Aコードと比較して少ないために、PコードがC/Aコードに比べてマルチパスに強いと断言はできない。

また、今回東京海洋大学の走行コース選定においては、実際に実験を行ったところ、あまりにも衛星の受信環境が厳しかったこと、また構造物が走行コースに対して数メートル程度と近距離であったために、近距離のマルチパス誤差がそのまま測位誤差に残留している可能性などが考えられる。

これらについては今後の課題とし、より定量的な計測が行える実験場所の選定が必要であると考えます。

## (3) 市街地

市街地においては、A1～A3の3区間において検討を行った。リファレンス値には、後処理ワイドレーン法による結果と、車速パルスによる直線補完した結果とを合成し、これをリファレンスとして用いた。

A1区間においては、C/Aコードによる測位誤差は約8m、Pコードによる測位誤差は約3mであった。

A2区間においては、C/Aコードによる測位誤差は約6m、Pコードによる測位誤差は約8mであった。

A3区間においては、C/Aコードによる測位誤差は約14m、Pコードでは約7mであった。

概ね、C/Aコードの測位率は高くサンプル数としても充分であったが、構造物や周囲の環境の影響を受けて測位が大きく劣化する状況が顕著であった。一方、Pコードの測位率が低かったため、東京大学構内と同じくデータ点数が少なかった。このため、市街地にお

る結果としては、一見してPコードの方が測位精度が改善しているように見えるが、評価するデータの重なり部分が異なるために、厳密且つ定量的な評価とは言い難く、あくまでも「定性的」にPコードの方が測位精度を向上させる可能性が示唆されたと考える。

また、市街地におけるIMU補完の評価については、同じくA1～A3区間において、個々の区間開始ポイントを初期値として、IMUで外挿した座標値とリファレンスとを比較した。各区間とも走行してから数百m程度までは位置を安定して求められていることがわかったが、それ以降走行距離長くなると方位がドリフトしていくことがわかった。これらは信号において停止する、金属構造物を潜るといったポイントをトリガーに、方位がずれてゆくことから、本実験で使用したジャイロに内蔵された地磁気センサーが影響を受けている可能性が高いと考えられる。

今後の課題として、L5を想定した擬似的実験の必要性を挙げる。

今回マルチパス環境下においてC/AコードよりもPコードを用いる方が測位精度を向上させることが可能であるとの想定をおこない、実験をおこなった。しかしながら、Pコードの受信率が悪く、正しい評価が行えなかった。実際、ICD-GPS-200（GPSの規格書）で定義されているPコードの信号強度は、-163dBW（-133dB）、C/Aコードは-160dBW（-130dB）である。これからみて、Pコードの信号強度はC/Aコードのものと比較して、約半分の強度である。

GPSシミュレータを利用することにより、この信号レベルをシミュレーションし、模擬的な実験が可能である。また、現在、将来のL5対応のGPSシミュレータも発売されており、これを用いた実験も可能であり、理想環境における有意なデータとなることを提案する。

### 第3章 位置精度改善方式の調査、検討

#### 3.1 GPS 補完方式の調査、検討

##### 3.1.1 自立航法

###### 1. 自立航法システム

車両の走行軌跡を算出し、初期位置からの相対的な位置を検出する方式として、自立航法システムがある。初期位置が絶対位置で与えられる場合や、GPS 受信機を併用したハイブリッド航法の場合は絶対位置を検出することができる。主にカーナビゲーション等で移動体の現在位置および進行方向を把握する場合に用いられる。

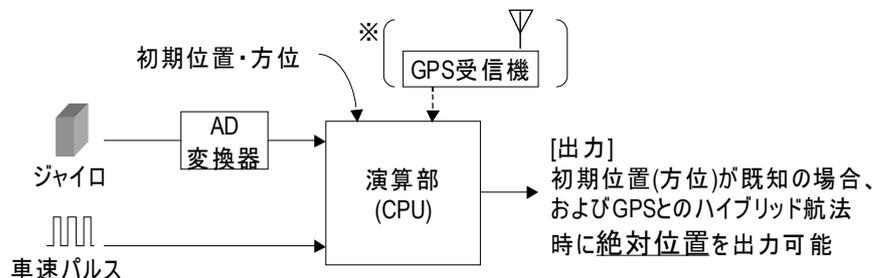


図 1. 自立航法システムの構成例 (※は GPS ハイブリッド航法時の例)

図 1. に自立航法システムの構成の一例を示す。

自立航法システムはジャイロ、車速パルス等の自立センサと、センサ入力から車両の走行軌跡を算出する演算部から構成される。GPS ハイブリッド航法システムの場合は、さらに GPS 受信機がシステムに含まれる。

ジャイロセンサでは車両のヨーレートに応じた電圧が出力され、これを AD 変換器にてデジタルデータに変換後、演算部で読み取り・各種補正を行い車両のヨーレートを検出する。一方車速パルス (19 ページ参照) を演算部でカウントし車両の移動量を検出する。

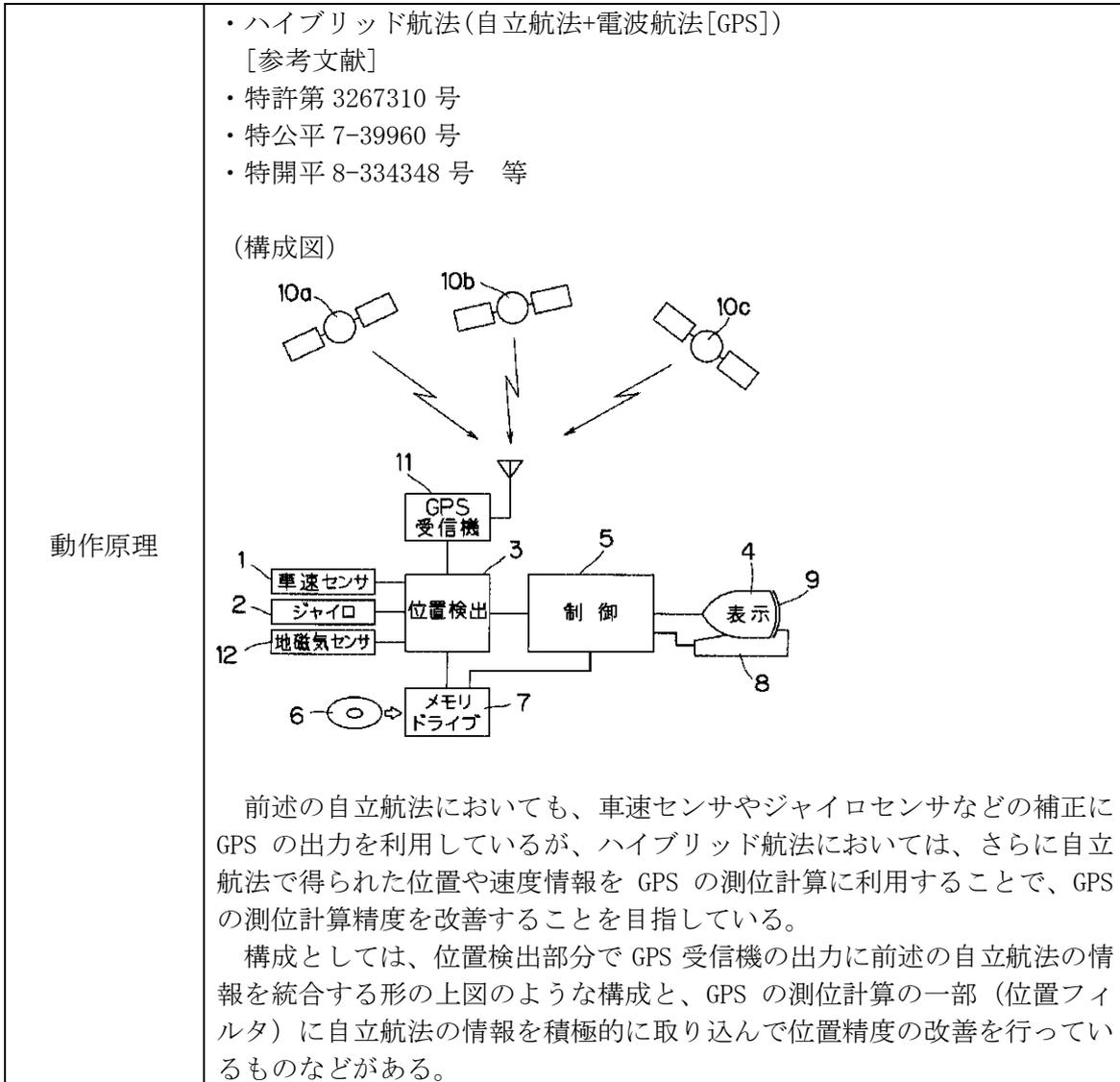
これら自立センサデータを元に逐次計算することにより車両の走行軌跡を算出する (19 ページ参照)。初期位置 (走行開始点) が未知である場合は初期位置からの相対軌跡のみしか算出できないが、初期位置 (および初期方位) が絶対位置 (および方位) で与えられる場合は、各地点での絶対位置 (および方位) を算出することができる。また GPS 受信機を利用した GPS ハイブリッド航法時では、(GPS から絶対位置、方位が検出できるため) 初期位置・方位の設定がなくとも、絶対位置・方位を算出することができる。

自立航法システムでは、過去の位置を元に逐次計算により現在の位置を算出するため、センサ誤差および演算誤差の蓄積により、位置精度が劣化する。このため、GPS 受信機など絶対位置・方位を検出できるセンサを併用して利用する場合が多い。

基本構成例

<p>動作原理</p>	<p>「ジャイロ+車速パルス」を利用した自立航法は下図のように構成され、ジャイロで得られる車両のヨーレート(角速度)と、車速パルスから得られる車両の走行速度から、それぞれ単位時間あたりの進行方位変化量<math>\Delta\theta_i</math>および移動距離<math>\Delta L_i</math>を算出し、既知の位置<math>(x_{i-1}, y_{i-1})</math>・方位<math>\theta_{i-1}</math>と併せて下式を用いて現在位置及び方位を算出する。 (構成図)</p> $\begin{cases} \theta_i = \theta_{i-1} + \Delta\theta_i \\ x_i = x_{i-1} + \Delta L_i \sin \theta_i \\ y_i = y_{i-1} + \Delta L_i \cos \theta_i \end{cases} \quad \dots \text{(数式 1)}$
<p>位置精度</p>	<p>初期位置・方位が既知の場合は、絶対位置を出力可能 また以下の要因により、位置精度は大きく変化する</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・角速度検出誤差 (ジャイロゼロ点オフセット、感度誤差等)</li> <li>・車速検出誤差 (タイヤ径の変化、スリップ等)</li> <li>・過去の位置を元に演算するため、上記誤差の蓄積</li> </ul>
<p>開発状況</p>	<p>カーナビ等で量産されている</p>
<p>コスト</p>	<p>15,000円程度(市販カーナビのアドオン型自立航法ユニット)</p>
<p>長所/短所</p>	<p>[長所]:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ システムがシンプルかつ安価</li> <li>・ インフラが不要</li> <li>・ 電波障害等の影響を受けない</li> </ul> <p>[短所]:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 過去の位置を用いて演算するため、移動距離および時間経過とともに誤差が蓄積、増大する</li> <li>・ 初期位置および方位の設定が必要</li> </ul>

## 2. 応用例(GPS ハイブリッド航法)



位置精度	<p>GPS の位置計算は、基本的な位置計算が独立しているため、個々の位置計算の誤差が積算されないという特長があるが、電波を利用しているという基本原理から、市街地など電波の反射が多い場所で位置誤差が大きくなったり、大きな位置の飛びが発生したりする場合がある。また、トンネルなど衛星の電波が受信できないエリアでは、位置計算そのものを行うことができなくなる。自立航法は位置の変位を積算していくという基本原理から、この位置計算で発生する誤差が積算してしまうため、長距離の移動では大きな位置の誤差が発生してしまう場合があるが、一回一回の位置計算における変位量は非常に正確に計算できるという特徴がある。また、移動体内部だけの情報で位置計算を行う方式であるため、基本的には外部の環境に左右されずに位置の計算を継続することが可能である。</p> <p>ハイブリッド航法では、このように相反する特性を持つ GPS と自立航法を組み合わせることで、GPS の電波が受信できないエリアにおける位置計算の継続、電波の反射による GPS の測位計算の乱れの検出/補正、2D 測位の連続による高度変化による誤差の補正などが可能となり、総合的な位置精度の改善を行うことが可能である。</p>
開発状況	<p>GPS 受信機に自立航法を組み合わせることで、GPS が測位できない状況をカバーする受信機タイプの製品その他、カーナビゲーションの構成の一部として GPS と自立航法を組み合わせることでハイブリッド航法を実現しているものもある。</p>
コスト	<p>GPS 受信機+自立航法</p> <p>自立航法の処理を GPS 受信機の CPU で行う場合は、ジャイロセンサーやその出力を取り込む A/D などの追加コストのみで構成できる。</p>
長所/短所	<p>「長所」</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・GPS が受信できない場所でも位置計算が継続できる。</li> <li>・自立航法の情報を利用することで、マルチパスなど DGPS で除去できない受信機固有の誤差を除去できる。</li> <li>・測位計算に自立航法の情報を取り込むことで、個々の測位計算のばらつきを抑え、GPS の測位計算精度を改善することができる。</li> </ul> <p>「短所」</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・GPS 受信機の測位計算が自立航法の誤差の影響を受ける場合がある。 (長時間の GPS 測位計算の中断からの復帰処理など)</li> </ul>

### 3. 補足情報

一般的に自立センサは、自車の進行方向を検出する方位センサ（ジャイロセンサ）と、移動量を検出する距離センサ（車速パルス）とで構成されている。これらのセンサの情報（方位、移動量）を組み合わせることによって、単位時間あたりの移動量を積算し、相対位置検出を行う。

方位センサとして代表的なものは、地磁気センサとジャイロセンサがある。

絶対方位を得るセンサ	・地磁気センサ
相対方位を得るセンサ	・振動ジャイロ ・ガスレートジャイロ ・光ファイバージャイロ

このうち、地磁気センサは絶対方位を得ることができるが、外部に存在する磁気の影響を受けやすいという問題点があり、車への取り付けが難しく、カーナビでの使用を困難にしている。

ジャイロセンサーは角速度を検出するもので、これを積分することで角度の変化量を得ることができる。これだけで絶対的な方位を得る事はできないが、GPS等と組み合わせをすることにより、方位センサとして利用することができる。

カーナビが開発された初期段階では、ガスレートジャイロや光ファイバージャイロなどが使用されたが、ガスレートジャイロは温める必要があり、ウォームアップに時間がかかり、また光ファイバーは精度が求めやすいが高価であるため、実用化がむずかしい。

現在、振動ジャイロが広く普及している。これは価格が安く、小型化されているためである。

#### 振動ジャイロ

価格が安い、小型である、精度のよいものが得られるようになったことにより現在、広く使われている。一定速度で運動する物体が回転すると、その進行方向と垂直な方向にコリオリ力が発生し、進行方向ベクトルと合成したベクトルが発生する。その合成ベクトルを測定することで角速度の大きさを把握する。

この角速度を電圧などの電気量で検出・把握するものがジャイロである。

原理は金属音叉部を振動させ、それと垂直方向に発生するコリオリ力の検出を行う。

$$\text{角度変化量} = (\text{出力電圧} - \text{中心電圧}) \times \text{感度}$$

検出素子を振動させて角速度を求めるため、外部からの振動を受けやすいという問題点がある。また、実際のジャイロセンサでは、中心電圧や感度が、固体・設置角・温度特性の影響を受けるので補正を行う必要がある。

#### 車速パルス

移動量を検出する方法（距離センサ）としては、車に装備されている車速パルスが用いら

れている。

車速パルスは車の車軸（ドライブシャフト）の回転に応じて出力され、スピードメーターなどに使用されている信号である。ドライブシャフトの回転数は J I S (JISD5601) で決められており、637 回転/km である。

車速パルスは、日本車の場合、4 パルスと 2 パルス（車軸の 1 回転あたり）が多く使われている。代表的な 4 パルスの場合、1 パルスの走行距離は約 40cm である。1 パルスあたりの走行距離は、タイヤの磨耗や空気圧の変化によって変化するため、GPS 等で得られた速度と車速パルスから得られる速度を比較することで、常に補正を行ないながら移動速度の計算を行っている。

この車速パルス数をカウントすることで、移動距離を測定する。

### 3.1.2 白線検知システム

車両の「自車位置」検出方法のうち、道路との相対的な自車位置を検出する方式として、カメラで撮影した前方画像より道路上の白線を検出し、自車両と白線間の相対位置を検出する白線検出方式がある。主に道路上の走行レーンを認識し、走行車線からの逸脱を検出するために用いることがある。本稿では、車両前方の撮像画像より白線を認識、検出する方式について記載するが、他の方法として車両の後方画像を撮影し白線を検出する方式もある。

#### 1：白線検知システムの構成例

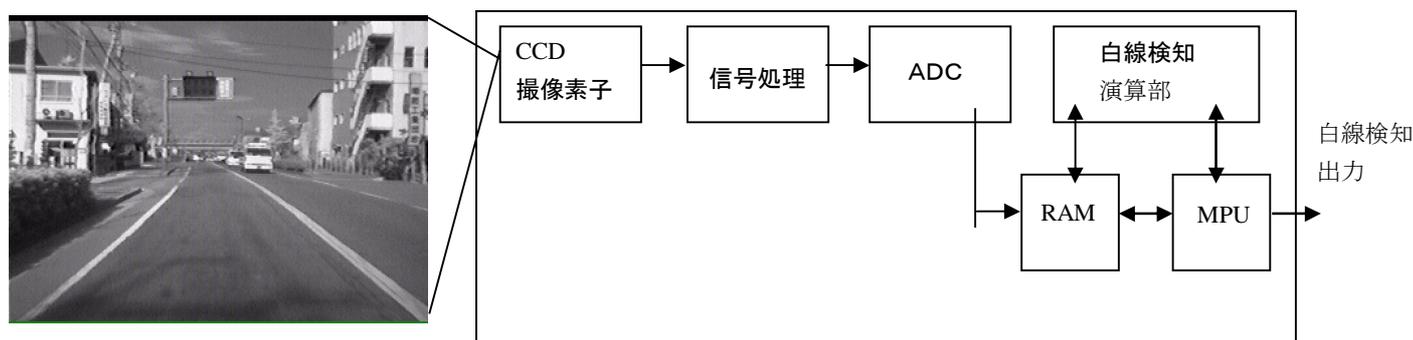


図1 白線検知システム構成図

図1に白線検知システムの一構成例を示す。

白線検知システムは車体の中心線上に取り付けられた CCD 撮像素子、撮像画像の信号処理部、各画素の輝度をデジタル信号に変換する ADC、このデジタル変換された画素信号を撮影画面毎に記憶するための RAM、及び白線を検出（認識）するための白線検知演算部で構成されている。

#### 2：白線検知システムの動作原理

図1に示した白線検知システムをもとに動作原理を紹介する。

CCD 撮像素子は撮影画面の横方向の中央が車両の中心線上に、また撮影画面の縦方向の中央が水平線になるように取り付けられている。撮影された画像は 1 フレーム毎に信号処理され、ADC によって画素の輝度情報がデジタル信号に変換された後 RAM に蓄積される。

白線検知演算部の処理内容を図2に示す。白線検知演算部は RAM に蓄積された画像の輝度情報の変化を検出ラインに沿って検定し、輝度変化の内容および幅から白線を推定する。図2に示す検出ラインを車両近傍から車両前方に順次移動し白線と推定した部位の連続性などより白線を確定（認識）する。

撮像画面の横方向の中央が車両の中心線であることより、白線との相対的な位置関係を検出することが出来る。

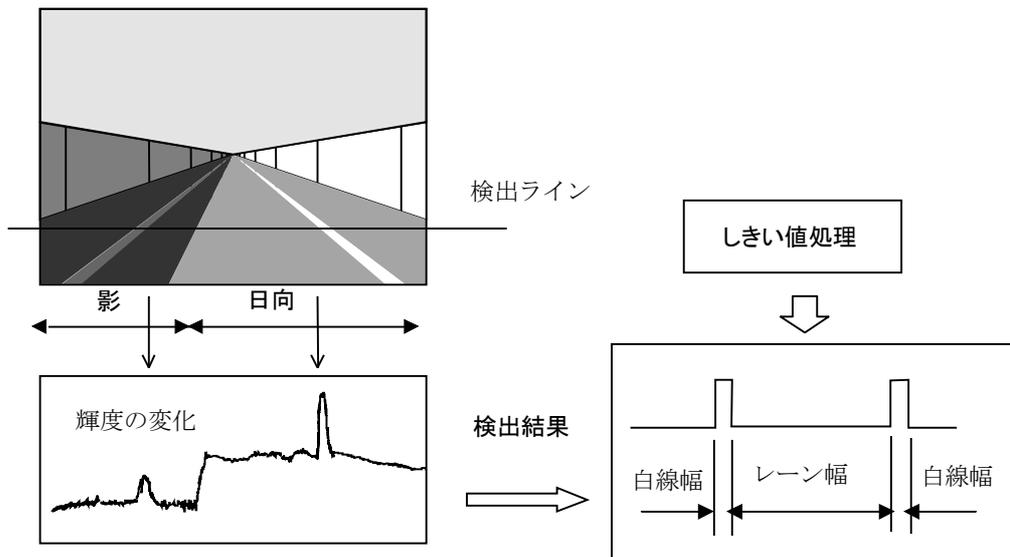


図 2 白線検知演算部の処理

3：白線検知システムの位置検出精度

白線検知システムの検出精度について公開された記述は見当たらないが、白線の幅が識別できる程度の検出精度と想定できる。白線のペイント幅は約 15cm であることから、検出精度を 10cm 程度と推定し、概略性能を表 1 に纏めた。但し撮像素子の光軸は車両中心よりずれていないものとする。

項目	内容
検出対象	道路上の白線により区分されたレーン内の自車位置
検出精度	10cm 程度 (推定)
検出値更新周期	100ms 以下
座標の検出	不可 (相対値の検出)
耐候性 耐環境性	積雪、雨天等、白線の認識状態の良否により検出性能に影響がある 光学的な外乱 (木漏れ日、トンネルの入口、出口) により認識率が低下する 場合がある

表 1 白線検知システムの概略性能

4：白線検知システムの特徴

撮像素子 (車載カメラ) を使用した白線検知システムの特徴を以下に示す。

1) 長所

- ・道路上にペイントされた白線に対する相対的な自車位置検出システムであり、道路地図の精度、GPS 等を使用した自車位置の検出精度に影響を受けない

- ・トンネル内、山間部、市街地など地形的な影響を受けない
- ・連続した白線、破線状の白線、連続した鋸などの検出が可能
- ・位置検出精度は良好
- ・応答性は良好

## 2) 短所

- ・絶対座標の位置検出は不可能
- ・光学的センサー利用のため耐候性が低い、雨天、積雪、夜間の検出は難しい

## 5 : 開発状況

白線検知システムは既に多数の車両に搭載され実用に供されている。搭載されている車両の一例を以下に示す。

- |          |        |                |
|----------|--------|----------------|
| 1) 日産自動車 | シーマ    | レーンキープサポートシステム |
| 2) ホンダ   | アコード   | レーンキープアシストシステム |
| 3) トヨタ   | クラウンMJ | レーンキープアシスト     |

等である。

### 3.1.3 擬似衛星技術

#### 1 概要

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。GPS の開発段階（1970 年代）において、GPS の試験を行うためまだ打ち上げられていない衛星の代用として擬似衛星を使用した。擬似衛星の無線信号発生は GPS 衛星と等価である。擬似衛星はコード位相、搬送波位相とも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 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位相の擬似距離または搬送波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、擬似衛星の位置が固定されていることである。

擬似衛星による測位の改善効果としては以下の 3 つがある。

- ・ 擬似衛星の追加によって配置が改善され測位精度が向上する。(Accuracy)
- ・ 擬似衛星の信号に補正情報、インテグリティ情報を入れることによって、測位精度の向上、インテグリティ警告の送信が可能になる。(Accuracy & Integrity)
- ・ 擬似衛星の追加によって測位可能範囲、時間が拡大する。(Availability)

このように、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り、一般の GPS 受信機で受信可能なシステムが現実的であることから、送信周波数としては通常 L1 または L2 の周波数帯を用いる。このために 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た。

この擬似衛星を導入する際の長所・短所は以下の通りである。

#### (1) 長所

- ・ GPS 信号と互換性があるため、併用が可能である。
- ・ 様々な GPS 関連アプリケーションを利用できる。

#### (2) 短所

- ・ 地上側インフラ（送信機）が必要であり、維持管理を伴う。
- ・ 干渉を避ける方式により受信機ハードウェアの変更が必要となる。

#### 2 送受信機の構成・信号

図 2-1 は非常に簡単な擬似衛星（送信機）のブロック図を示す。基準信号 (TCXO) の出力に位相同期をしたマイクロ波の発信器は L1 搬送波を発生する。この TCXO はまた C/A コード発生器を統制し、その出力は搬送波を変調する。アンテナから送信される前に、信号はフィルタを通される。これは割り当てられた L1 周波数帯域幅の外側の放射を減少し、他の無線に干渉を与えないためである。これらの回路は、小さなプリント基板に収まり簡単な低電力の擬似衛星を製造できる。Stanford 大学で設計され、組み立てられた擬似衛星は約 -10dBm または 0.1mW の信号電力である。多くの応用に必要とされる信号レベルは低く、増幅は不要である。例えば、標準の 9V アルカリ電池で約 14 時間連続動作可能な擬似衛星が容易に製作できる。

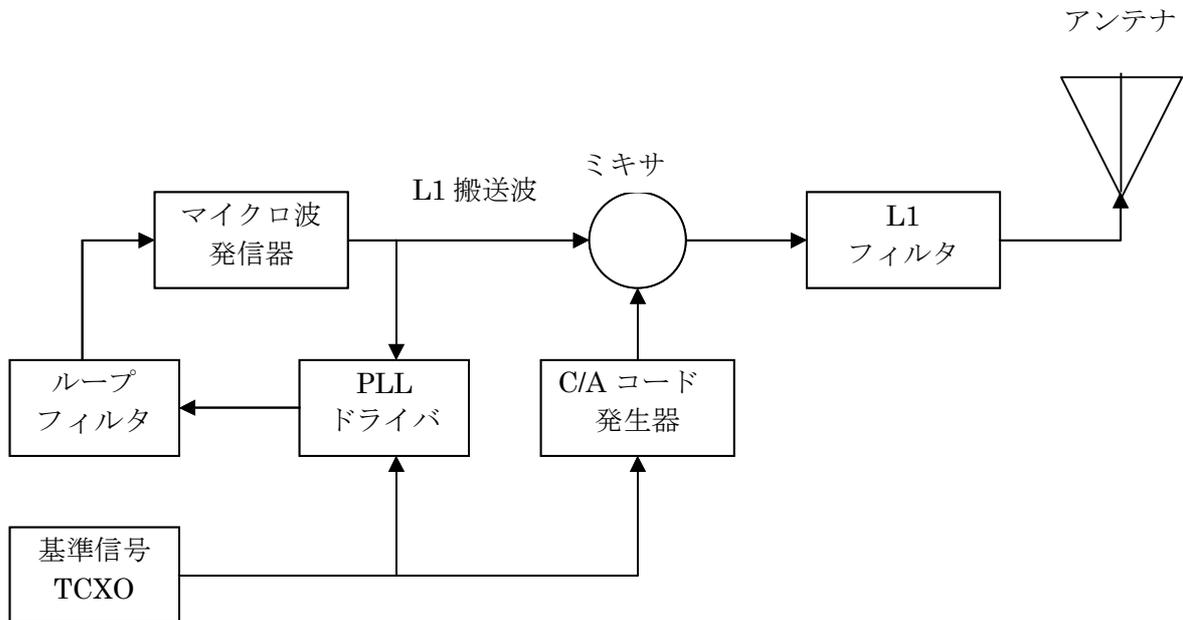


図 2-1 擬似衛星送信機の構成

受信機の構成は、擬似衛星が GPS と等価な信号を送信することから通常の GPS 受信機と同様である。構成例を図 2-2 に示す。

GPS 受信機では、先ず RF 部で周波数を装置内で処理できる周波数にダウンコンバートする。次に ADC 部でアナログ信号をデジタル信号に変換する。そして、キャリアとドップラーを除去した後、受信した信号と各衛星の C/A コードを比較し、その一致の度合いから電波強度を計算するとともに、ナビゲーション・データを求め出力する。このデータを基に測位演算を行う。

擬似衛星の信号（サブフレーム）を、図 2-3 に示す。サブフレームは 250 ビットで構成されており、最初の 8 ビットがプリアンプル、次の 6 ビットがメッセージタイプ、7 ビットが配信時刻、その後の 205 ビットがデータ、最後の 24 ビットがパリティである。尚プリアンプルは、3 回分 24 ビットで一つである。

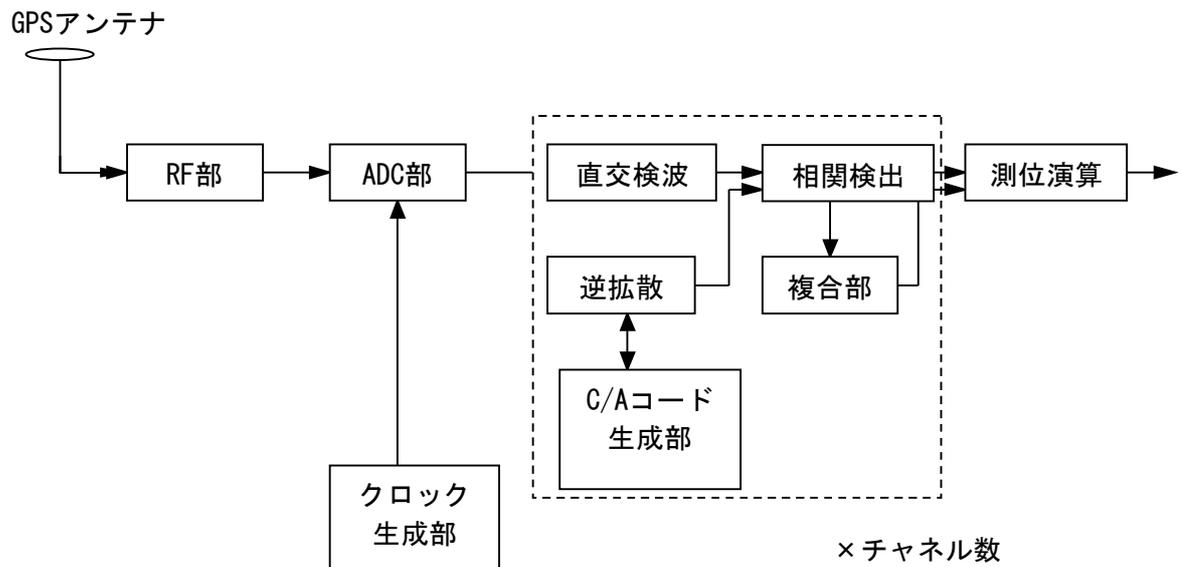
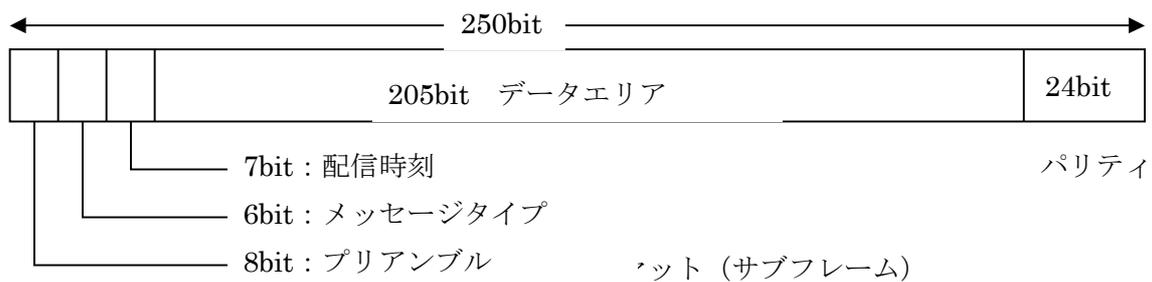


図 2-2 受信機の構成



データエリアに格納される擬似衛星のメッセージタイプを表 X. 2-1 に示す。

表 2-1 擬似衛星メッセージタイプ

メッセージタイプ	内容
40	未使用 (テスト)
41	インテグリティフラグ/擬似距離補正
42	インテグリティフラグ/位相補正
43	インテグリティフラグ/擬似衛星位置、PRN 番号
44	インテグリティフラグ/擬似衛星アルマナック
45	インテグリティフラグ/精密誘導経路
46	インテグリティフラグ/特別メッセージ
63	すべて 0

### 3 開発状況

#### (1) RTCM 標準

技術標準は 1985 年頃、RTCM SC-104 で最初のドラフトが作成され、1990 年には Version 2.0 が発行された。RTCM は基本となる方式を示し利用環境に応じた応用の考え方を示している。

システムとして擬似距離を提供する標準の他に、DGPS の補正情報の放送にも利用されている。現在は、船舶に限らず、陸・海・空など数多くの分野でこの RTCM 方式の適用性が評価され検証されている。擬似衛星のサービス範囲は、50km を目標としており、そのサービス端で GPS からの受信電力と同等となるような擬似衛星出力電力が選択されている。この基本仕様を表 3-1 に示す。

表 3-1 RTCM 標準の擬似衛星仕様

項目	内容	詳細
周波数	GPS L1	
拡散コード	C/A コード (チップレート 1.023MHz のゴールドコード)	
パルス変調	パルス幅	90.91 $\mu$ s (93 チップ)
	デューティ	1/11 (約 9%)
	パルス周期	約 1ms のランダム周期 10 パルスで 1 チップの C/A コードが再生される。
送信出力	最大 30mW	サービスエリア 50km
オプション	周波数	15MHz～20MHz のオフセット
	拡散コード	チップレート 30MHz などの高レート

## (2) RTCA 標準

民間航空機の着陸フェーズの航法支援として、RTCA, Inc (Requirement and Technical Concept for Aviation) の Special Committee-159 で審議された Local Area Augmentation System (LASS) 方式である。

1998 年に RTCA/DO-245 にシステム運用のアーキテクチャが標準化され、RTCA/DO-246 にシステムの信号形式が標準化された。民間航空機精密進入の航法支援を目標にしたシステムで、基本的には DGPS との組み合わせで用いられる。

RTCA では、サービスエリアが空港程度の範囲のシステムを Local Area Augmentation System (LASS) と呼び、特にこの方式で用いられる擬似衛星は APL (Airport Pseudolite) と呼ばれている。APL の送信信号は GPS 衛星と同一の L1 周波数であるが、航空機の受信機において GPS 衛星受信信号への干渉を避けるためデューティ約 3% でパルス化されている。また、擬似距離分解能を向上させるとともにマルチパスの影響も低減させ、さらに一般の GPS 受信機への干渉を避ける目的で C/A コードと比較して 1/10 チップ長である P コードで拡散させている。

RTCA/DO-246 の概略仕様を表 3-2 に示す。

表 3-2 RTCA 標準の擬似衛星仕様

項目	内容	詳細
周波数	GPS L1	
拡散コード	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ P コード (チップレート 10.23MHz のゴールドコード)</li> <li>・ GPS で利用していないスードライト専用コード</li> </ul>	
パルス変調	パルス幅	13.685 $\mu$ s (93 チップ)
	デューティ	約 2.7%
	周期	約 50ms (2KHz) のランダム周期
送信出力	尖頭電力	最大 4W (サービスエリア 20km)
	平均電力	約 100mW

### (3) 小型自動着陸実験用擬似衛星地上局

宇宙開発事業団（現在、宇宙航空研究開発機構：JAXA）において、宇宙往還機の着陸技術習得のために実施された小型自動着陸実験 ALFLEX(Automatic Landing Flight Experiment)用に、1996年に開発された(株)東芝製システムである。DGPS と組み合わせたシステムであり、DGPS 処理部では地上 GPS 受信機ですべての可視 GPS 衛星の信号を観測し各 GPS の擬似距離補正值を計算する。その補正情報は擬似衛星から ALFLEX に送信される。

擬似衛星では、擬似 GPS 衛星としての位置と GPS 時刻信号を DGPS 補正情報とともに送信する。擬似衛星信号の GPS 時刻同期は地上 GPS 受信機で得られた GPS 時刻同期パルスを基準にしている。信号形式は GPS 衛星と同じで C/A コードを用いているが送信周波数は GPS の L1 周波数より約 50MHz 高い周波数オフセットを持っている。これは擬似衛星から ALFLEX の着陸フェーズにおいて擬似衛星の近傍に飛来した場合、機上 DGPS 受信機への受信電力が GPS 衛星からの受信電力に比べて過大となり、擬似衛星の信号が GPS 衛星信号に干渉してしまうため同一の周波数を避けているためである。この基本仕様を表 3-3 に示す。

表 3-3 小型自動着陸実験用擬似衛星地上局の擬似衛星仕様

項目	内容
周波数	1624.21 MHz
拡散コード	1023 チップ M 系列コード
パルス変調	なし（連続波）
データレート	50, 100, 200, 250 bps
送信出力	約 10mW
占有周波数帯幅	3.78 MHz

### (4) DGPS 型擬似衛星システム

#### 1) システム構成

図 3-1 に 米国 Integri-Nautics 社製のデファレンシャルシステムの構成例を示す。図では、GPS 衛星 2 個と擬似衛星 (PL : Pseudolite) 2 個の合計 4 個の衛星からの電波により測位している。

擬似衛星は IN400 である。擬似衛星 IN400 は GPS 衛星の電波を受信して時刻の同期を取っている。基地局は、GPS 衛星および擬似衛星の電波を受けて、デファレンシャルの補正情報を生成する。また、基地局には擬似衛星の番号および位置をあらかじめ入力してあり、これらの情報も合わせて補正情報とともに送信する。基地局の受信機は IN2400 である。補正情報の送信には無線を利用している。移動局は、GPS 衛星および擬似衛星の電波と補正情報を受け取って位置の計算を行う。受信機としては基地局

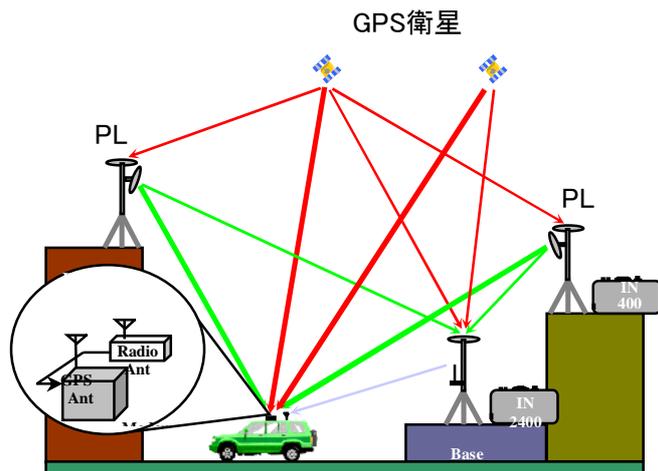


図 X. 3-1 DGPS 型擬似衛星システム構成例

と IN2400 を用いている。

擬似衛星は受信機を共通とするために GPS 衛星の電波と同じ周波数、信号を利用している。表 3-4 に主な仕様を示す。GPS 衛星との電波干渉を避けるために、デューティ約 3% 程度のパルスとしている。また GPS 衛星とは異なる衛星番号 (33、34) を割り当て区別できるようにしている。

受信機は、パルスとして埋め込まれた擬似衛星からの電波を受け取ることができる擬似衛星対応の受信機 (IN2400) を用いている。これによって、GPS 衛星と擬似衛星からの電波と基地局からの補正情報を受けて位置計算を行うことができる。

表 3-4 擬似衛星 (IN400) の主な仕様

項 目	仕 様
送信信号	GPS L1 帯 ICD200 準拠
PRN コード	全 1023 のゴールド符号
送信	連続モードおよびパルスモード
パルス周期	1kHz または 3kHz (可変デューティサイクル)
出力レベル	-40dBm~0dBm
データフォーマット	ICD200 準拠、または外部出力
出力周波数	1575. 42MHz
通信速度	50bps~1000bps
設定	RS232C インターフェースによる ROM への保存
構造	対環境性：筐体およびコネクタ部 動作温度：-30℃~70℃ 対振動特性：HMMWV (High-Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle)

## 2) 適用例

鉱山の露天掘り現場は、周囲を高い壁に囲まれているため低仰角の衛星を受信できない。そのため、擬似衛星を周囲の壁に設置して低仰角の衛星を含めて可視衛星の補完を擬似衛星で行う。この方式は作業現場に DGPS 基準局を設置し、周囲の擬似衛星信号も GPS 衛星信号同様に受信し誤差補正を行い、その DGPS 情報を作業現場の移動体に伝送することにより高精度の GPS 測位を実現する方式である。

## (5) インテグリティ・ビーコン着陸システム

米国の Integri-Nautics 社が開発したシステムである。2 式のスードライトを地上に設置して擬似衛星信号を送信し、また基準局で観測した各 GPS 衛星の搬送波位相を航空機 RTK-GPS 受信機に伝送する。機上受信機側ではその情報および擬似衛星信号の観測値を基に、搬送波位相アンビギュイティを決定し、cm 精度の航法精度を得る方式である。周波数は GPS L1 周波数であり、オプションとして数 MHz のオフセットをもつ。C/A コードまたは P コード、信号のパルス化も可能である。各種オプション仕様が設けられているが概略の仕様は、表 3-5 の通りである。

インテグリティ・ビーコンは、滑走路の末端に設置されており、キネマティック航法を

おこなっている航空機がその上を通過する際にアンビギュイティの初期化を行い、cm オーダの高精度の航法を実現させるものである。キネマティック航法は高精度な反面、マルチパスなどによりサイクルスリップが発生する可能性が高く、システムの頑強性に乏しいため、現在は国際民間航空機の航法としては採用されていない。

表 3-5 インテグリティ・ビーコン着陸システムの擬似衛星仕様

項目	内容
周波数	GPS L1 $\pm$ 1MHz 又は $\pm$ 2MHz
拡散コード	C/A コード又はP コード
パルス変調	RTCA SC-159 対応
送信出力	数Mw

(6) 地上擬似衛星を用いた精密進入援助システムの開発（電子航法研究所）

電子航法研究所（ENRI）と航空振興財団は、共同研究（2001年～2002年）により、擬似衛星の飛行実験を実施し進入パス上で特に垂直方向の測位で精度が改善されることを実証している。

電子航法研究所の空港擬似衛星（APL）の概念を図 3-4 に、仕様を表 3-6 に示す。

この LASS は、空港内に設置された基準局受信機（複数）で受信した実 GPS 衛星の擬似距離の誤差を推定し、VHF のデジタル通信（VDB:VHF Data Broadcast）で航空機に放送してコード型の DGPS を構成する。また、空港擬似衛星信号も GPS 衛星からの信号と同様な測距源として扱われる。しかし、APL では、基準局が近距離（空港内）にあることから、対流圏遅延が相殺されず、航空機側で最大の誤差要因（20NM で 10m）となっていた。

このため、RTCA は Chao のモデルを基礎として、APL の伝搬遅延モデルを提案し、基準局の地上の気象観測値（気温、気圧、相対湿度）から計算した屈折率とスケールハイト（大気の実効高）を放送して、航空機側で遅延誤差を補正する方法を提案している。電子航法研究所は、進入パス上で擬似衛星信号を受信し、実験データから搬送波位相の二重差を使い対流圏遅延量を計算し、実験値と理論モデルを比較した。この結果、実験データから推定した対流圏遅延量と RTCA モデルの残差は、擬似衛星からの斜距離に依存することがわかり、その大きさは 8NM の地点で約 0.6m ほどであることを確認している。

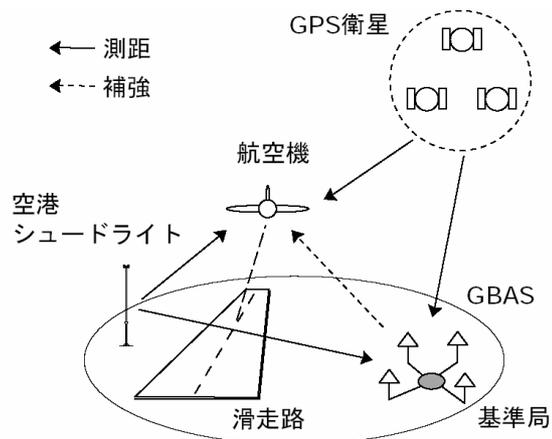


図 X.3-4 空港擬似衛星の概念  
出典：ENRI 2003 年研究発表会

表 3-6 電子航法研究所の空港擬似衛星の仕様

項目	内容	詳細
周波数	1575.42MHz (L1)	
拡散コード	C/A・Bコード	
パルス変調	パルス幅	13.685 $\mu$ sec
	デューティサイクル	平均 2.733%
	周期	1997 p/s
	パルス間隔	ランダムパターン
送信出力	尖頭電力	33dBm (2W)
設計覆域	10NM	
周波数帯域	41MHz (99%)	
変調方式(レート)	BPSK (50bit/sec)	

注 1) Bコードは、Pコードと等価な広帯域の拡散コード

### (7) 室内測位

図 3-5 は、韓国ソウル大学で実施された屋内疑似衛星測位実験の構成である。屋内あるいは構内を走行する機器類を遠隔制御する可能性を研究するとともに疑似衛星システム（送信機、アンテナ、受信機、プロトコルフォーマットなど）の開発を目指している。疑似衛星は未だ確立された技術ではなく発展途上にあり、利用環境に対する技術的挑戦が続いており、韓国では手厚いハイテク予算支援の下に産・学・官が連携して GPS 利用分野の開拓に熱心である。

この他の室内測位としては、米国 Stanford 大学はロボットの位置決め疑似衛星を使用し、1つの疑似衛星をマスタとしてタイミングデータを受信機の同期のために利用している。国内では測位衛星技術株式会社が米国の Integri-Nautics 社製の疑似衛星を利用して実験を行っている。

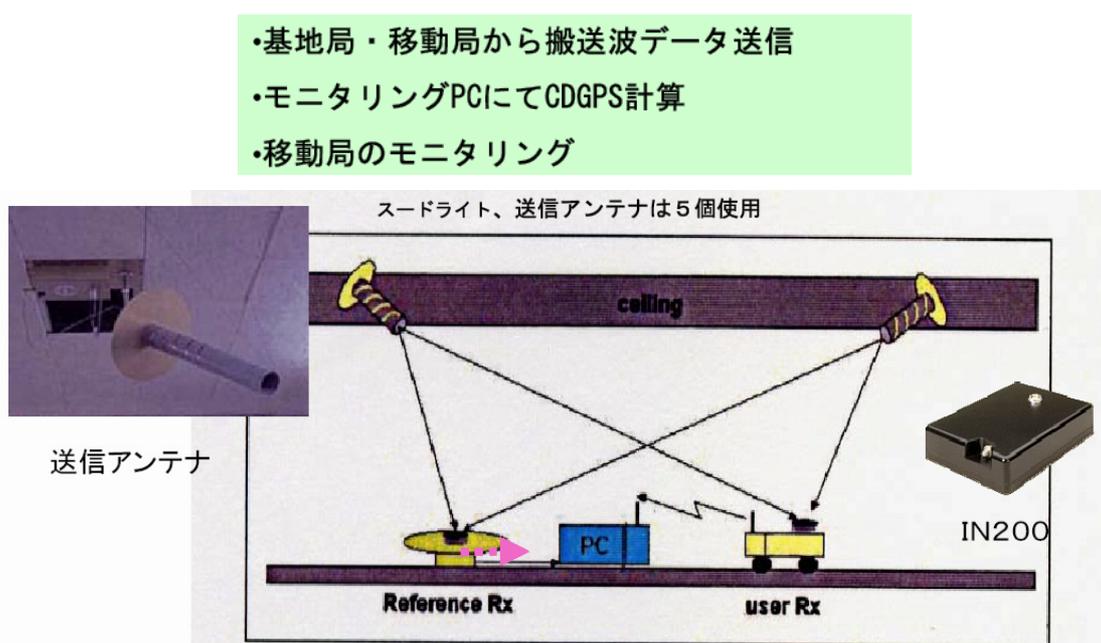


図.3-4 韓国ソウル大学の屋内疑似衛星測位実験の構成

#### 4 実用化に向けた問題点

##### 4.1 擬似衛星を導入する際の問題点

擬似 GPS 衛星として疑似衛星信号形式が GPS の信号形式とまったく同一であることは、利用者受信機を擬似衛星用に仕様変更する必要がないため便利である。しかし実際には、以下に示す各種の不都合を解決するため、GPS 信号仕様より変更する必要性が生じる。これらの変更は、利用環境によって決める必要がある。

###### (1) 遠近問題

汎用の GPS 受信機は受信電力の一定した GPS 衛星信号を受信するように設計されているため、GPS と同一周波数の擬似衛星信号電力が数 10dB も増加した場合、受信機は飽和してしまい GPS 衛星の信号を受信できなくなってしまう。これが、遠近問題という難題である。

図 4-1 に示すように、近いエリアは擬似衛星信号が GPS 信号を妨害し、遠いエリアは擬似衛星信号が受信不能となる。

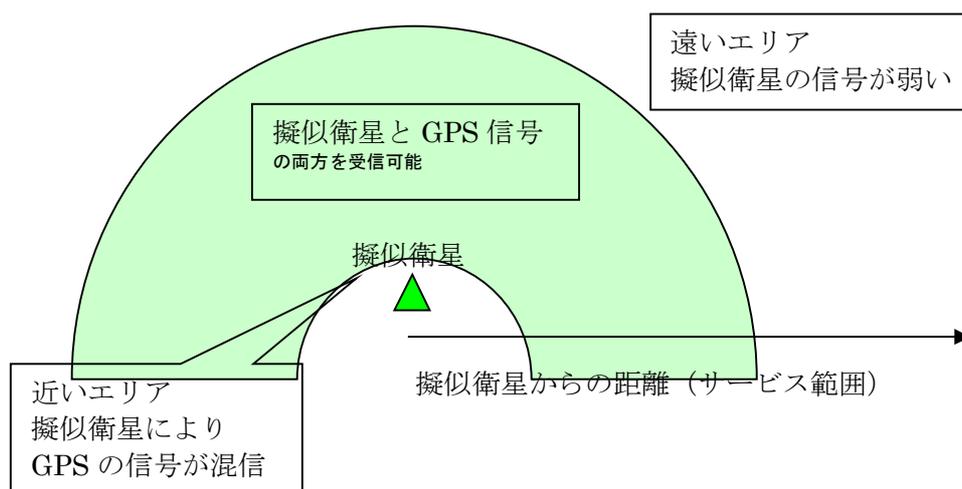


図.4-1 擬似衛星からの電波と GPS 信号からの電波の干渉

この問題に対して、以下の対策が考えられている。

###### 1) 周波数の変更

擬似衛星の周波数を GPS の L1 周波数 (1575.42MHz) よりオフセットをもたせ GPS 信号への干渉を避ける。オフセット周波数の最小値は、図 X.4-2 のように GPS 信号拡散スペクトラムの最初の零点となる点である 1.023MHz のオフセットである。利用者受信機の飽和を避けるには受信機高周波部の帯域外まで周波数オフセットを行なうことが最も効果的である。その方式が前述の ALFLEX 擬似衛星方式である。当然ながら、擬似衛星の周波数オフセットを大きくする程 GPS 信号へ

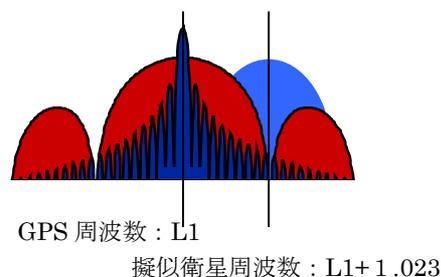


図.4-2 周波数オフセットの関係

の干渉性は少なくなるが、反面利用者受信機のハードウェア変更の程度が大きくなり高コストとなる。

#### 2) 拡散コードの変更

GPS の C/A 拡散コードは 1.023M チップ/秒のゴールドコードであり、コード間の相互相関性は-24dB である。前述の例のように 40dB や 60dB などさらに大きな非相関性を求めたい場合は、

- ・ GPS の拡散コードとは相違する系列のコードを選択する
- ・ 10.023MHz など C/A コードと大幅に異なるチップレートを選択し干渉性を緩和させる方式がある。しかしながら、GPS の拡散コードの系列との相違性を大きくする程、受信機は高価になる可能性がある。

#### 3) 信号のパルス化

GPS 受信機の搬送波追尾ループは数 Hz のゆっくりとしたものであり、ループの追従周波数より高い雑音に対しては反応が鈍感になる。従って、GPS の信号が例えば  $90\mu\text{s}$  のパルス状の擬似信号で干渉を受けても GPS 信号の受信が不可能になることはない。この方式で干渉性を避ける方式が RTCM や RTCA の方式であり、RTCM 方式のパルス幅は約  $90\mu\text{s}$  で周期は 1ms (デューティ約 90%) である。RTCA 方式はパルス幅が約  $14\mu\text{s}$  で周期は約 50ms (デューティ約 3%) である。

擬似衛星送信信号をパルス状にした場合、その繰り返し周期を一定にするとパルス繰り返し周波数にスペクトラムが立ち、その周波数に受信機がミスロックする可能性がある。従って、RTCM および RTCA 両方式もパルスの繰り返し周期をランダムにして受信機のミスロックを避けている。

#### (2) 他の GPS 受信機への干渉

擬似衛星システムのサービス範囲を何処までにするかで擬似衛星の送信電力が決まる。さらにシステムに無関係の一般の GPS 受信機利用者が擬似衛星サービス範囲の中に混在するか、あるいはサービスエリアから隔離できるのかで干渉性の度合いが異なるため、利用環境に則して方式を決定する必要がある。技術的な対策は遠近問題とまったく同じである。

#### (3) 擬似衛星信号の GPS 時刻同期

擬似衛星を用いて高精度測位を行うには、高精度で GPS 基準時刻に同期されていなければならない。しかし、そのような高安定度の基準時計は非常に高価であり、また高精度に GPS 絶対時刻を保つには複雑な制御を必要とする。

実用的価格で擬似衛星システムを実現するには、ALFLEX のように基準とした GPS 受信機の同期パルスを利用する方式と、インテグリティ・ビーコンや鉱石の露天掘りのように、擬似衛星を GPS 衛星信号のトランスポンダとする方式に大別できると考えられる。または DGPS システムに組み込む形で擬似衛星の擬似信号も一つの GPS 衛星としてその DGPS システム時刻からの時刻差を算出して、DGPS 情報として擬似衛星時刻誤差を利用者受信機に放送する方式も考えられる。

#### (4) 対流圏遅延

対流圏での遅延は、乾燥空気と水蒸気で構成される中性大気中での電波の屈折に起因する。電離層遅延量が周波数に依存するのに比べ、対流圏遅延は周波数に依存しない。また、電離層と異なり、位相速度と群速度は同じで、コードと搬送波位相の遅延量は等しい。こ

のため、GPS 信号の遅延に関しては従来から、Saastamoinen、Hopfield といった理論モデルが提案され、地上の気圧、気温、相対湿度から天頂方向の遅延量が求められてきた。また、遅延量は衛星の仰角に依存するため、いくつかのマッピング関数が提案されており、仰角に応じた遅延量が計算されている。GPS 信号の場合、天頂方向の典型的な遅延量は 2.4m ほどで、そのうちの 90%までは乾燥空気の影響、残りの 10%が水蒸気の影響であることがわかっている。また、乾燥空気の影響は緯度、高度などに依存するが安定しており、理論モデルとよく一致する。しかし、水蒸気の影響は局所的な天候に左右されやすく、モデルとは異なる場合も多いと言われる。低仰角（例えば 5 度）の遅延量は、20～30m のオーダーであり、理論モデルとの差も大きくなる。このため、測量用受信機ソフトウェアでは、マスク角を 15 度以上にして、低仰角の衛星の利用を避けている。

#### 【参考文献】

- [1] Global Positioning System: Theory and Applications, Vol. II
- [2] Pseudolites: Enhancing GPS with Ground-based Transmitters, S.Cobb & M.O' Connor, GPS World, March 1998
- [3] 衛星測位システムの動向に関する調査研究報告書、衛星測位システム協議会、2003
- [4] GPS 測量の基礎、土屋 淳、辻 宏道 著、1999.12.8、(社) 日本測量協会
- [5] 柳原、渡邊：擬似衛星（スードライト）を用いた車両位置検出の基礎検証、情報処理学会、ITS 研究会報告書、2002
- [6] 電子航法研究所、2003 年研究発表会
- [7] ION GPS PROCEEDINGS 2001～2003

### 3.1.4 路側器 (DSRC 等)

移動体が、地上側に配備された機器 (路側器) と通信を行うことにより、位置を標定するシステムについて、以下の3方式を調査した。

- (1) DSRC
- (2) VICS (光ビーコン)
- (3) VICS (電波ビーコン)

共通項として、移動体が、路側器と通信を確立した時点で、通信内容により位置を標定することができる。したがって、位置の精度は、通信範囲に依存し、範囲が狭いほど精度が向上する。また、路側器との通信による特定場所でのスポット的な位置標定であり、連続的な位置標定システムの補完 (位置リセット) 的な要素が強い。

#### (1) DSRC (Dedicated Short Range Communication)

##### ・動作原理：

スポット的に配置された小さな通信ゾーンで車両が通過する瞬間に通信を行う方式。通信領域を数mまで狭めることができるので、位置の特定が可能である。

##### ・無線周波数

5.8GHz帯

##### ・変調方式

ASKおよびQPSK

※ETCはASKですが、DSRCという意味ではQPSKも含む。

##### ・変調信号速度

1Mbps (ASK) / 4Mbps (QPSK)

##### ・占有周波数帯域の許容値

4.4MHz以下/CH

※ARIB STD-T75参照

##### ・位置精度：

約±5m (相対)

走行距離の基準位置として利用

精度は通信領域の設定に依存

##### ・開発状況：

研究中

##### ・コスト：

\_\_\_\_\_

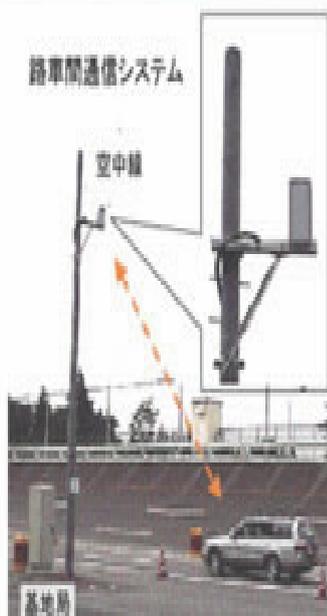
##### ・長所 (他方式に比して)：

設備を、位置標定以外の他のサービスと共用できる。(例：ETC)

##### ・短所 (他方式に比して)：

スポット的にしか位置補正できない。

## 路車間通信システムの開発成果 2. 開発目標



道路に設置された無線設備(基地局及び空中線)と車両に搭載された車載器により構成され、基地局と車載器の間を双方向に無線通信を行う。無線信号の届く範囲は30m程度に限定されており、その区域内で、情報を瞬時にやりとりする。路車間通信は、狭域通信(DSRC :Dedicated Short Range Communication)と呼ばれる。

路車間通信システムへの要求

要求項目	要求内容
通信対象	サービスゾーン内の全てのAHS車両 (自動2輪を含む車両)
車両走行速度	0~120km/h以上(自動車道) 0~70km/h以上(一般道)
情報更新周期	0.1秒以下
通信方式 (情報量)	同報通信: 最大1425バイト/0.1秒 個別通信: 100バイト/0.1秒
通信ゾーン	AHSサービス区間内(数百m) 基地局あたり3車線100m長をカバー
通信品質	ETC相当

(参考資料) AHSRA : 第7回研究報告会

### (2) VICS (光ビーコン) (Vehicle Information and Communication System)

- 動作原理 :
  - スポット的に配置された小さな通信ゾーンで車両が通過する瞬間に通信を行う方式。通信領域が約3mと極めて狭いので位置の特定が可能である。
- 位置精度 :
  - 約3.5m (相対)
  - 送信データフォーマットより、位置情報(地図)の分解能は、約1m
- 開発状況 :
  - 既に製品化(カーナビ等で利用)
  - 主要一般道に配置

約 25,000 基 (2004 年 4 月現在)

ただし、交差点の出口に設置されることが多い。

- ・コスト (車載機, インフラ等):

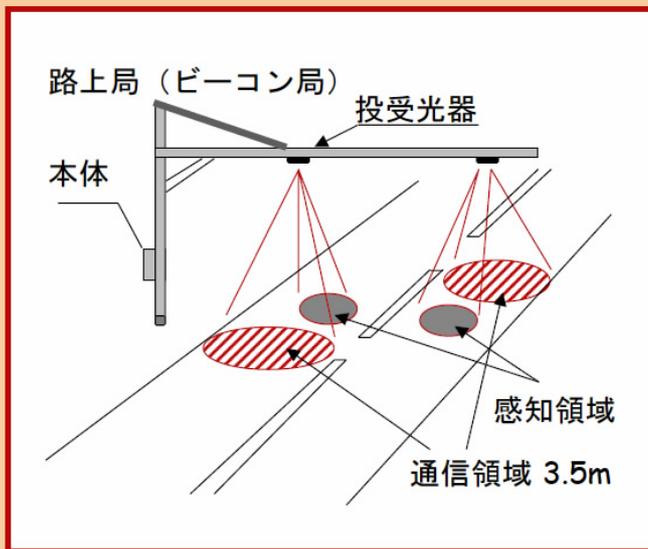
- ・長所 (他方式に比して):

既に実用化されている。

電波ビーコンと異なり、レーン毎に設置され、レーンの識別が可能。

- ・短所 (他方式に比して):

スポット的にしか位置補正できない。設置場所に制約がある。



### 光ビーコン

- ・変調方式:  
パルス振幅変調方式
- ・符号化形式:  
マンチェスタ
- ・通信可能速度:  
0~70km/h
- ・伝送速度:  
感知器→車 1Mbps  
車→感知器 64kbps
- ・伝送情報量:  
感知器→車 10kバイト  
車→感知器 256バイト

VICS: Vehicle Information & Communication System

(参考資料) JEITA 講座 IT 最前線 2002

# 光ビーコンとは

What is an Infrared beacon?

光ビーコンは、車両がビーコン直下約3.5mの受信エリアを通過した時に、前方約30kmと後方1kmのVICS情報を提供する。  
 An Infrared beacon provides VICS information about 30 km in front and 1 km behind when a vehicle passes a receiving area immediately under the beacon within about 3.5 m.

伝送速度 Transmission rate	1 Mbps 1 Mbps
サービスエリア Service area	極小ゾーンの繰返し Repetition of micro zones
1基(1局) 1 unit (1 station)	3.5m 3.5 m
情報提供繰返し Repetition of information provision	2~3回/1受信 2 to 3 times/receiving
実効情報量 Effective information amount	約10Kバイト相当/1カ所 Equivalent to about 10 Kbytes/spot
媒体 Media	赤外線 Infrared



(表示例)  
(Display example)



主に一般道に設置してあるんじゃ



(参考資料) ITS 世界会議・名古屋2004

### (3) VICS (電波ビーコン) (Vehicle Information and Communication System)

#### ・動作原理：

路上にスポット的に配置された小さな無線通信ゾーンを自動車が通過する瞬間に通信する方式。前後方向へ逆相の電波を放射しているため、ビーコン直下で打ち消し合いゼロとなるため、ビーコンの位置を特定できる。

#### ・位置精度：

約70m (相対)

ただし、電波の受信レベル検出により、精度向上可能

送信データフォーマットより、位置情報 (地図) の分解能は、約1m

#### ・開発状況：

既に製品化

高速道路に配置

約2,800基 (2004年4月現在)

#### ・コスト (車載機, インフラ等)：

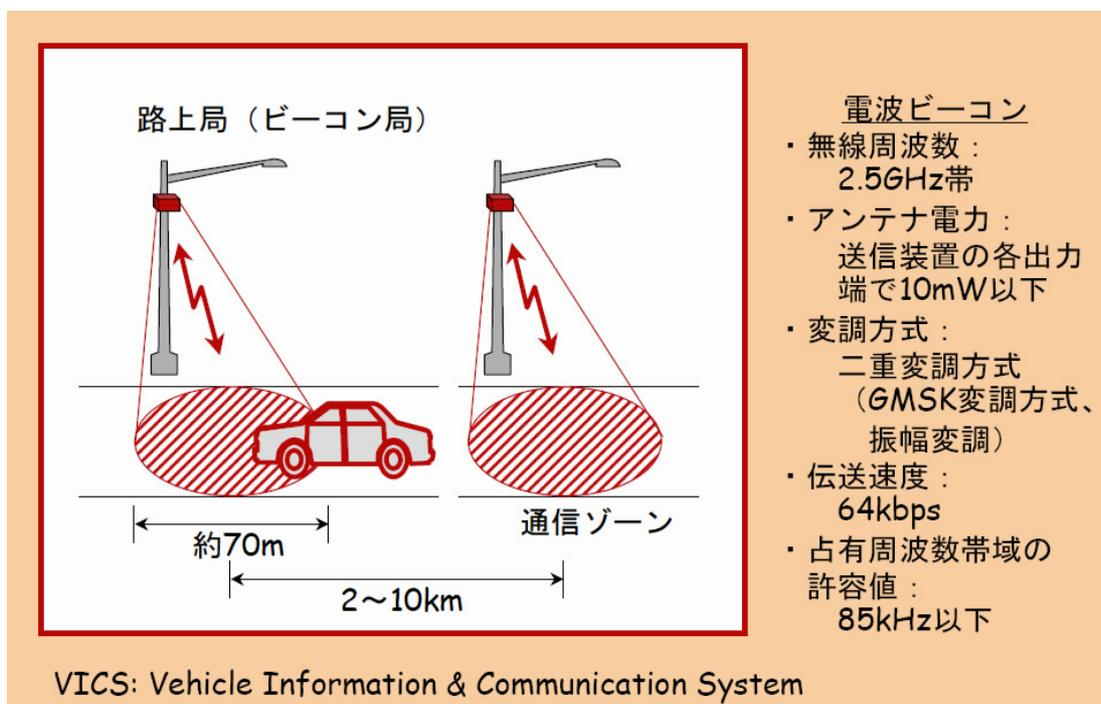
#### ・長所 (他方式に比して)：

既に実用化されている。ビーコン直下の位置検出が可能。

#### ・短所 (他方式に比して)：

スポット的 (2~10km 間隔) にしか位置補正できない。

地下など設置場所に制約がある。



(参考資料) JEITA 講座 IT 最前線 2002

# 電波ビーコンとは

What is a radio wave beacon?

電波ビーコンは、主に高速道において、車両がビーコン直下約70mの受信エリアを通過した時に、進行方向約200kmのVICS情報を提供します。

The radio wave beacon, mainly on expressways, provides VICS information for about 200 km in the traveling direction when a vehicle passes a receiving area immediately under the beacon within about 70m.

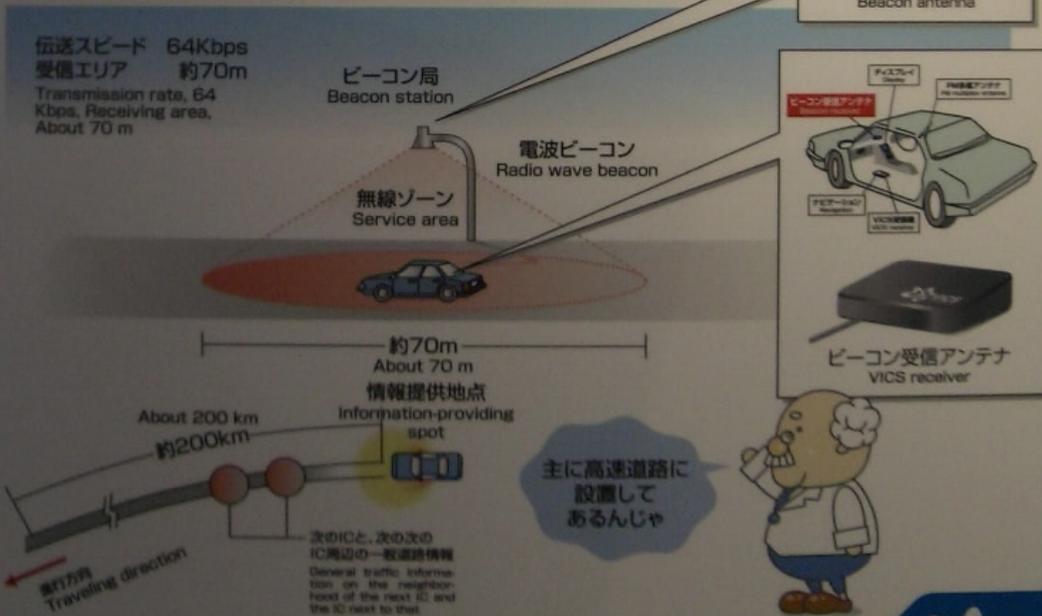
伝送速度 Transmission rate	64Kbps 64 Kbps
サービスエリア Service area	極小ゾーンの繰返し Repetition of micro zones
1基(1局) 1 unit (1 station)	60~70m 60 to 70 m
情報提供繰返し Repetition of information provision	2~3回/1受信 2 to 3 times/receiving
実効情報量 Effective volume of information	約8Kバイト相当/1カ所 Equivalent to about 8 Kbytes/spot
媒体 Media	電波(準マイクロ波) Radio transmission (quasi-microwave)



(表示例)  
(Display example)



ビーコンアンテナ  
Beacon antenna



(参考資料) ITS 世界会議・名古屋2004

### 3.1.5 レーンマーカ

本章では、レーンマーカの技術動向、コスト、長所と短所について概説する。なお、レーンマーカとは、広義には道路区画線（白線等）も意味するが、ここでは狭義の意味で、磁気等により道路上の位置を車両に情報提供する機能を有するインフラ施設を指す。

#### 1.1 技術動向

##### 1.1.1 研究開発と実用化の動向

###### (1) 研究開発の動向

レーンマーカは、自動運転をはじめとする車両の高度な位置特定、車両制御を可能とする要素技術として、国内外で研究開発が進められてきた。我が国においては、1995年に建設省土木研究所で行われた自動運転のデモンストレーション、1996年に供用前の上信越自動車道において行われたAHS（自動運転道路システム）公道実験において、磁気式のレーンマーカが用いられた。その後、技術研究組合走行支援道路システム開発機構（AHS研究組合）において、走行支援システム、特に車線逸脱を防止するシステムに用いる要素技術として研究開発が進められ、2000年に建設省土木研究所で行われたスマートクルーズ21デモ2000においてもレーンマーカを用いた走行支援システムの実験が行われている。

海外では、1980年代より米国カリフォルニア州において、磁気式レーンマーカを用いた走行支援システムの研究開発が行われてきた。また、ミネソタ州では、除雪用車両の位置特定技術として磁気テープ式レーンマーカの研究開発が行われてきた。これらは、1999年のデモ99やその後のフィールドテストなどで検証が進められている。

###### (2) 実用化の動向

レーンマーカを用いた実用化システムとしては、2001年に兵庫県淡路島の淡路ファームパークにおける施設内移動手段として整備されたIMTS（Intelligent Multimode Transit System）がある。IMTSは、2005年3月より愛知県で開催される愛・地球博の会場内移動手段としても用いられる予定である。

海外では、オランダ・スキポール空港内の駐車場とターミナルを結ぶ移動手段としてレーンマーカを用いた自動走行システムが実用化されている。

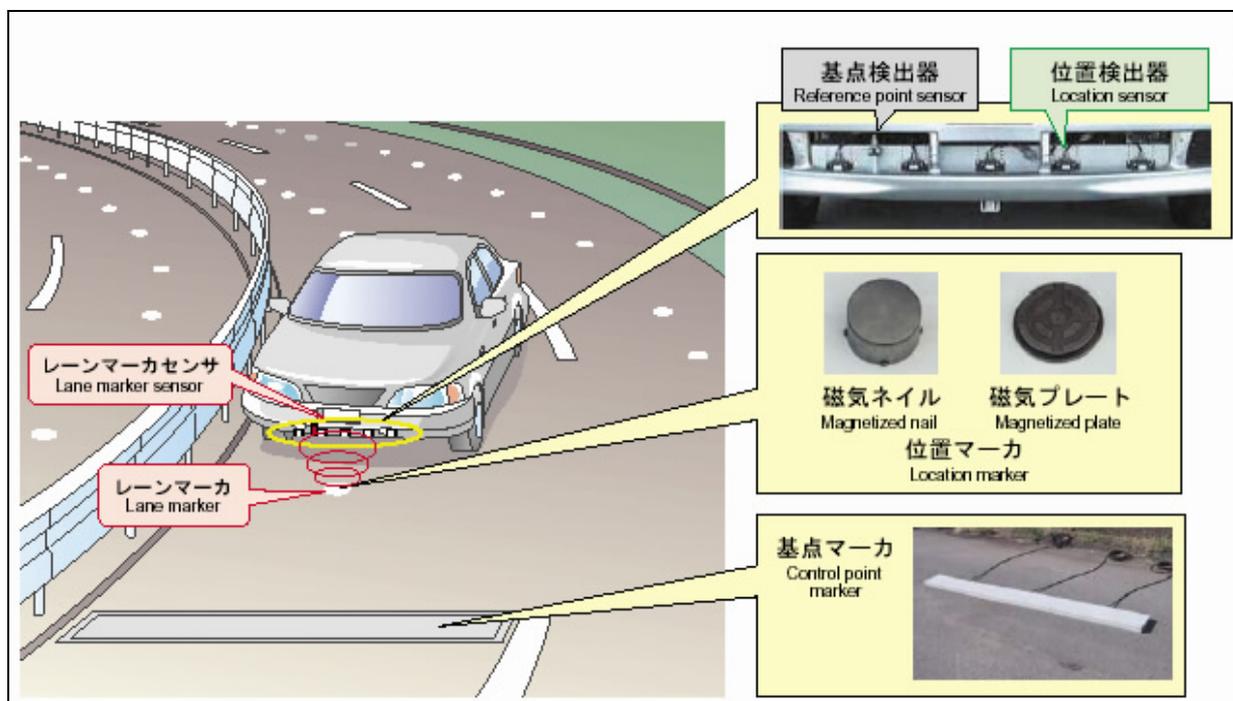
### 1.1.2 技術概要

#### (1) 技術方式の概要

レーンマーカには、車線上の横位置を提供する位置マーカ、縦方向の位置を提供する基点マーカがあり、技術方式には大きく磁気式、電波式がある。横方向の位置参照はいずれの方式もレーンマーカからのずれを検出する相対的な位置検出技術である。一方、縦方向の位置特定には、絶対位置参照も可能なM系列方式が提案されている。

表 1.1-1 レーンマーカの技術方式概要

	主な技術方式		位置検出精度	主な研究・実用化事例
横方向	磁気式	磁気ネイル・プレート	相対位置 ±50mm (2σ)	IMTS スキポール空港 AHS 研究組合 カルフォルニア PATH
		磁気テープ	相対位置	ミネソタ DOT
	電波式	平板型・円盤型	相対位置 ±50mm (2σ)	AHS 研究組合
縦方向	磁気式、電波式	M 系列	相対位置 30cm 以下 (絶対位置可)	AHS 研究組合



(出典：AHS 研究組合資料)

図 1.1-1 レーンマーカの利用イメージ

(2) 横方向検出方式の概要

ここでは、磁気マーカと電波式マーカの概要について述べる。

① 磁気マーカ

磁気式レーンマーカは、道路の舗装内または、舗装表面に磁束を発生する永久磁石を設置し、磁石が発生する磁束を車両に取り付けた複数個の磁気センサで検出することにより車両と磁石の相対的な位置を検知するシステムである。

図 1.1-2 磁気マーカ方式の構成例 (出典：AHS 研究組合資料)

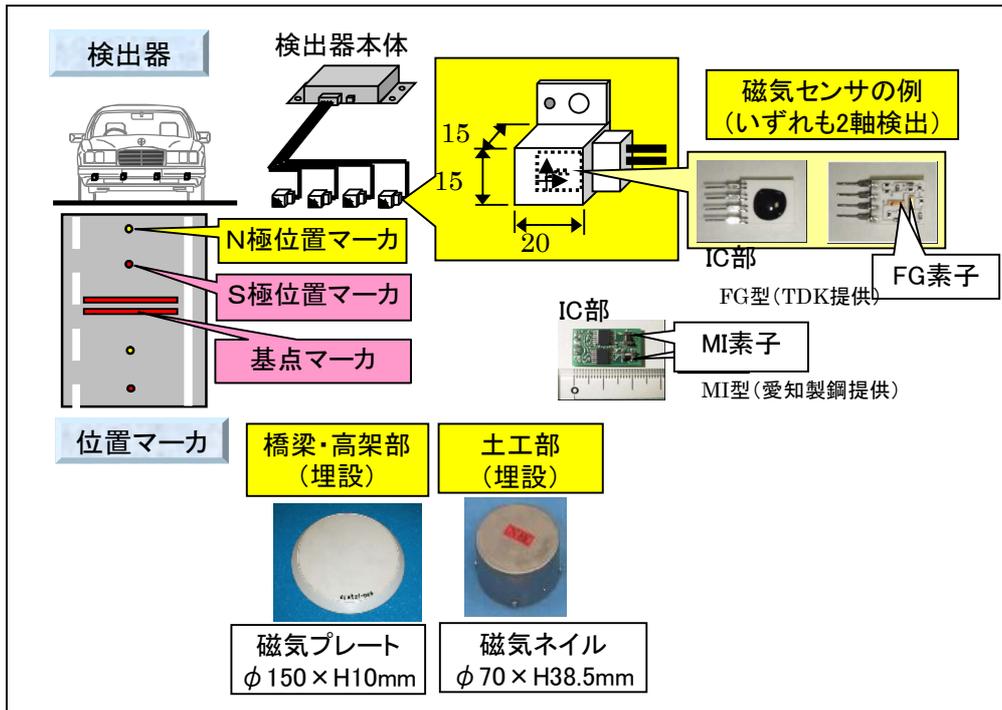


表 1.1-2 磁気マーカの技術概要（出典：AHS 研究組合資料）

項目	概要
機器仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>*磁界強度 [標準設置位置にて規定]</li> <li>170 <math>\mu</math>T 以上 (路面上 30cm)</li> <li>55 <math>\mu</math>T 以上 (路面上 50cm)</li> <li>*磁界分布 [標準設置位置にて規定]</li> <li>磁界分布特性：単峰磁界分布を有する</li> <li>位置マーカ：横方向、縦方向</li> <li>基点マーカ：縦方向</li> <li>磁界分布比率 <math>B_x/B_z</math>：(路面上 30cm)</li> <li><math>\pm 0.53 \pm 10\%</math> (横位置規定点：<math>\pm 120</math>mm)</li> <li>*マーカ上面磁極：N 極 or S 極</li> </ul>
性能仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>*横位置検出精度：<math>\pm 50</math>mm (<math>2\sigma</math>) [検出器側]</li> <li>*縦位置検出精度：<math>\pm 1</math>m (<math>2\sigma</math>) [検出器側]</li> <li>*対応可能車速：140km/h まで [検出器側]</li> <li>*検出部設置高さ：200～500mm [検出器側]</li> </ul>
設置仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>*設置位置：表層、基層</li> <li>*設置位置基準：路面下 65mm</li> <li>*設置位置：設置位置基準<math>\pm 25</math>mm</li> <li>(道路構造に対応)</li> <li>*設置精度：傾き <math>5^\circ</math>、横位置 10mm</li> </ul>

② パッシブ通倍型電波マーカ

パッシブ通倍反射型電波マーカは、車両が発信するの 2 倍の周波数の電波を規定の位相遅れで通倍反射する。車両には、複数の受信アンテナが取り付けられており、各アンテナの受信電力の比の特性より受信アンテナと電波式マーカの相対位置を検知する。

図 1.1-3 パッシブ通倍型電波マーカ方式の構成例（出典：AHS 研究組合資料）

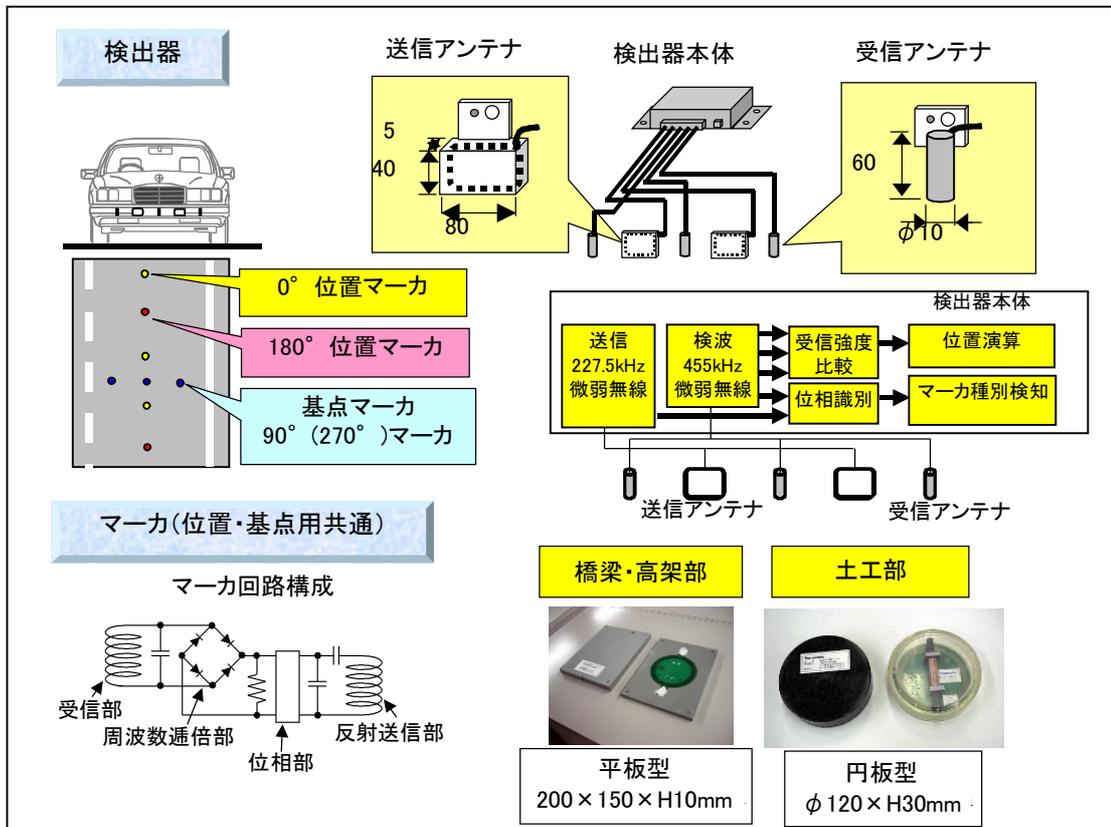


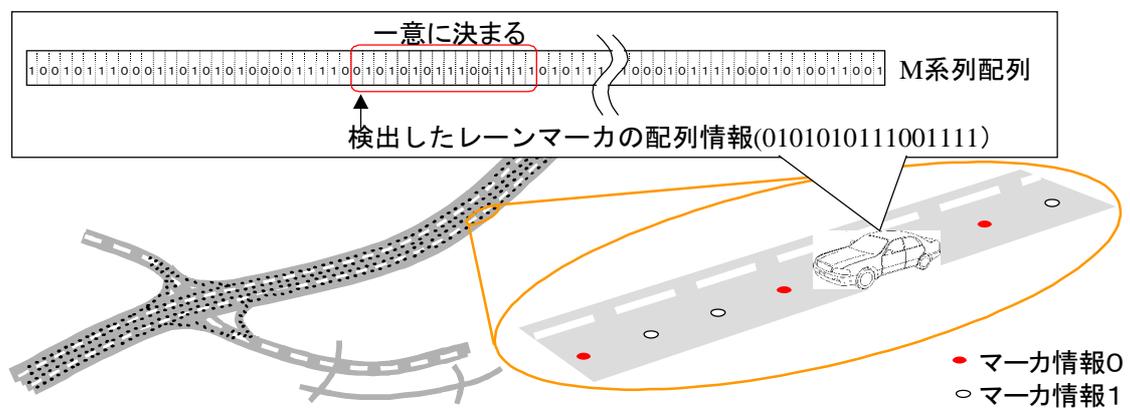
表 1.1-3 パッシブ通倍型電波マーカの概要（出典：AHS 研究組合資料）

項目	概要
機器仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>* マーカ使用周波数                     <ul style="list-style-type: none"> <li>受信周波数：227.5kHz</li> <li>反射送信周波数：455kHz</li> <li>(反射送信周波数範囲：300kHz～500kHz)</li> <li>反射送信周波数＝受信周波数×2</li> </ul> </li> <li>* マーカ検出部送信電力：微弱規格内 [検出器側につき参考性能]</li> <li>* マーカ反射送信電力：微弱規格内</li> <li>* 反射電界強度分布：基準分布で規定</li> <li>* マーカ反射位相区分数：4 以上</li> </ul>
性能仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 横位置検出精度：±50mm (2σ) [検出器側]</li> <li>* 縦位置検出精度：±1m (2σ) [検出器側]</li> <li>* 対応可能車速：140km/h まで [検出器側]</li> <li>* 検出部設置高さ：200～500mm [検出器側]</li> </ul>
設置仕様	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 設置位置：表層、基層</li> <li>* 設置位置基準：路面下 65mm</li> <li>* 設置位置：設置位置-65mm, +35mm (道路構造に対応)</li> <li>* 設置精度：傾き 5°、横位置 10mm</li> </ul>

### (3) 縦方向検出方式の概要

AHS 研究組合では、縦方向の位置を検出する方法として、M 系列符号列による方法を研究開発した。

M 系列符号列はランダムな符号列であるが、 $2n-1$  ( $n$  は 3 以上の整数) チップの符号列の中で連続する  $n$  チップの符号列は必ず一意の配列となる性質を持つ。1 ビット以上の情報を保持する位置マーカを道路上に M 系列に従い敷設することにより、一部のマーカ列の情報を解析することで車両がマーカ列全体のどの位置に車両が存在しているか認識することができる。また、基点となる符号列を認識している場合、基点からの距離として車両の絶対位置を認識することも可能である。



(出典：AHS 研究組合資料)

図 1.1-4 位置マーカの M 系列配列による測位

## 1.2 コスト

レーンマーカのコストに関する調査結果を下表に示す。整備側コストとしては、高めの見積りで約 200 万円/km/車線となる。

表 1.2-1 レーンマーカのコスト

費目		コスト	出典	
整備側コスト	初期整備	磁気マーカ 電波マーカ	(機器) 1,000 円～3,000 円/個 (敷設) 1,000 円～6,000 円/個 (小計) 2,000 円～9,000 円/個	注 1
			設置間隔 4～8m (カーブ/直線) =125～250 個/km	注 2
			(計) 25 万円/km～225 万円/km/車線	注 3
		磁気テープ	16,000 ドル/km=176 万円/km	注 4
	メンテナンス	—	常時メンテナンスは不要	注 1
利用者側コスト	車載器 (検知器のみ)	—	1 万円/台 (量産時)	注 1

(注 1) AHS 研究組合報告書 (H13-第 4 分冊 3)

(注 2) 第 5 回 AHS 研究報告会資料

(注 3) 車線幅当たりの整備は 1 列と想定。

(注 4) 位置特定技術 欧米調査概要報告 (AHS 研究組合)、換算レートは 110 円/ドル

### 1.3 長所と短所

レーンマーカの長所と短所に関する整理結果を下表に示す。レーンマーカは、位置特定精度が高く、信頼性も高いが、整備にコストを要するため、整備主体、利用主体の負担に見合った付加価値を与えられるかが実用化に向けた鍵となる。

表 1.3-1 レーンマーカの長所と短所

	精度	他の技術との組み合わせ	総括
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>高精度な位置特定が可能</li> <li>整備箇所においては、外乱要因（ビル等によるマルチパスの影響、天候・照明等による影響、交通量等による影響）を受けず信頼性は高い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>他の技術との組み合わせは必要としない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>特定箇所における高度な位置特定が必要な場合、現時点では最も精度・信頼性の高い方法といえる。</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>横方向は相対位置参照のみ。縦方向はM系列配置を行うことにより絶対位置参照も可能とされている。</li> <li>高さ方向の位置参照不可</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既存技術を活用できない分、インフラ、車載器の整備に新規コストを要する。</li> <li>縦方向の絶対位置参照を行う場合、地図データとの組み合わせが必要（新規にデータ整備が必要）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>整備にコストを要する。</li> </ul>

## 3.2 マルチパス軽減方式の調査、検討

### 3.2.1 はじめに

GPS マルチパス誤差に対する時間領域処理はここ 20 年の間積極的な調査の対象であったにもわがかわらず、理論および実際の両面においてまだわからないことは多い。実際のアプローチのほとんどは、自らの手法をはっきり明かそうとしないことが多く、受信機メーカーにより開発されている。それでも、マルチパス処理についての十分な情報が存在しているので、最近の動きを読みとることができる。本調査では、現在 GPS 受信機のアルゴリズムに導入されているもの、または研究段階にあるものを含めて、代表的な以下の技術について説明する。

- ①. 狭域相関器技術
- ②. 相関関数形状ベース手法
- ③. 改良相関器基準波形
- ④. MMT 技術

### 3.2.2 狭域相関器(Narrow Corralator)技術

(動作原理)

GPS マルチパスの影響を受信機処理により減らすための技術はまず最初に 1990 年初頭に導入され、一般的な受信機は、2 MHz の GPS 広帯域信号出力に対して波形の前後の相関器をもって、波形の鋭いピークを検出し、衛星信号の旅行時間を得て擬似距離を求める。こうした受信機のコード波形における前部 と 後部 の相関器の幅は、1 チップ間隔を用いている。しかし 1992 年に、前部相関器 と 後部相関器の幅を  $1/10$  の短い間隔にすることでマルチパスの有無に関わらず測距精度の劇的改善がもたらされると報告された。

通常の 1 チップ幅のワイドコリレータ (広域相関器) では、直接波の相互相関波形のピークはかなり丸くなり、その結果、相関関数のマルチパスが加わった合成波の傾斜面はピークの位置が大幅に変わる。短い相関器幅をもつことによって、直接波の相関関数が作る鋭いピークは、マルチパスの影響を受けた合成波でも簡単には移動しなくなる。

(開発環境)

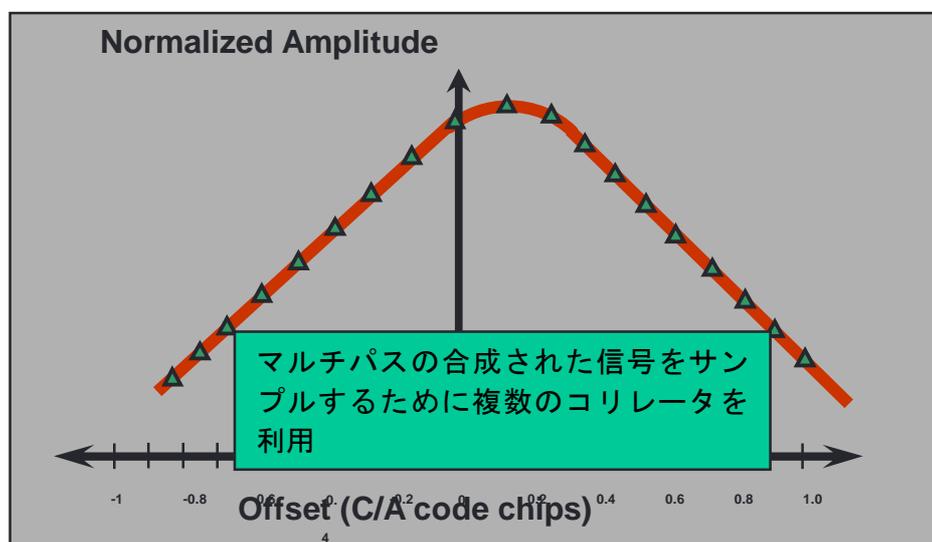
既に製品化 (ファームウェアとして搭載されている。)

### 3.2.3 相関関数形状ベース手法

複数の GPS 受信機メーカーで、相関関数の形状からマルチパスモデルのパラメータを特定しようとしている。それ自体利点はあるが、関数の形状のサンプルを得るためには波形ピーク部のみではなくその他の部位での多くの相関が必要となる。

直接波にマルチパス影響を受けた合成波の各測定形状をマッピングするので、単純なマルチパスモデルであっても 6 つの信号パラメータがあり、非常に多数の相関関数形状を処理しなければならない。

発見的に作られた形状ベースアプローチは、Early・Late 傾斜法(ELS)と呼ばれ、最大公算推定にもとづく方法はマルチパス推定遅延ロックループ (multipath-estimating delay-lock loop - MEDLL) と呼ばれる。



multipath-estimating delay-lock loop - MEDLL

(開発状況)

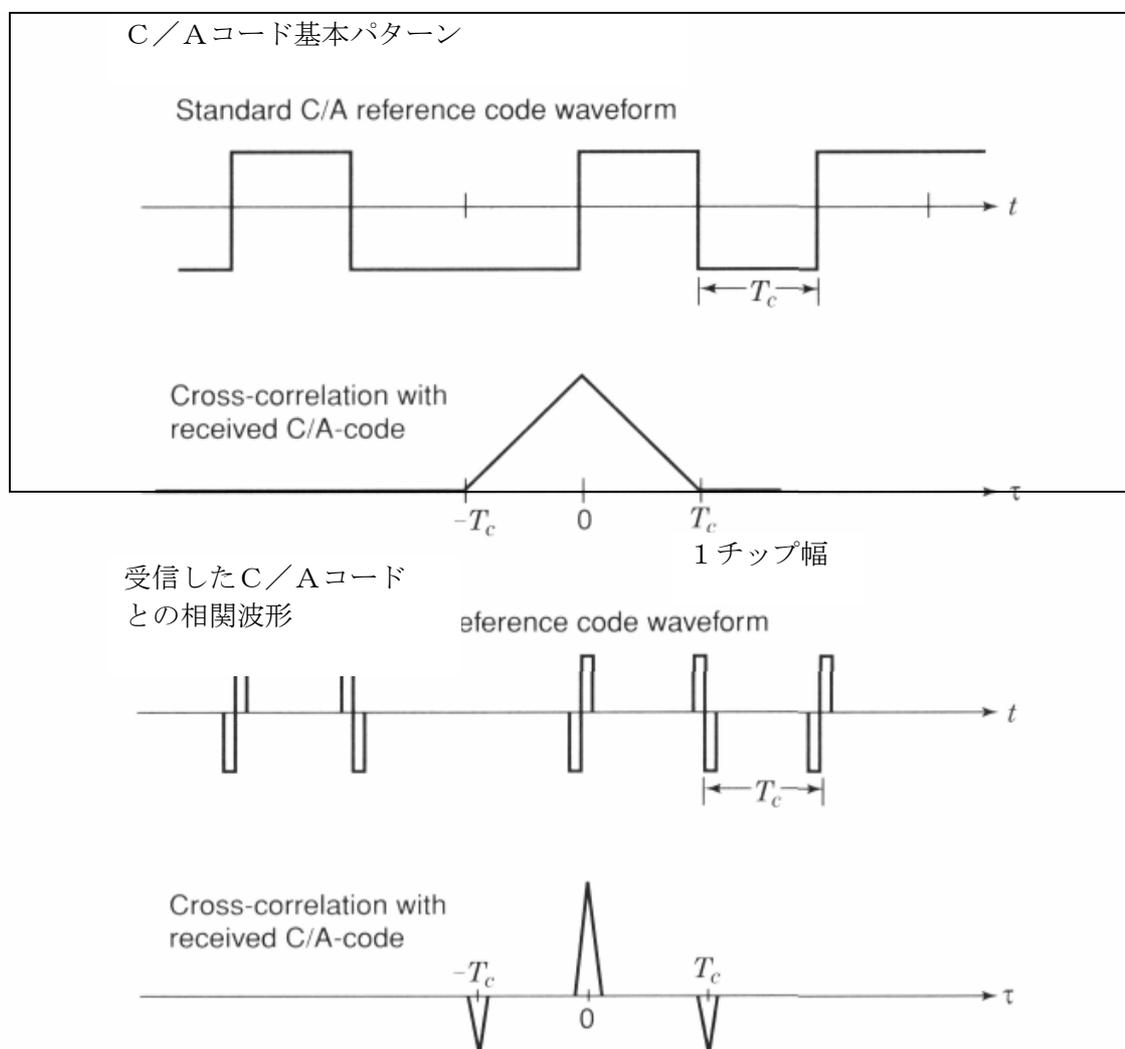
- ・既に製品化 (ファームウェアとして搭載されている。)

### 3.2.4 改良相関器基準波形

マルチパス軽減の比較的新しい手法では、相関基準 PRN コード波形を変えて、マルチパスにより生じる誤差に最初から耐性を持ったシャープな相関関数を得る手法。例えば、ストローク相関器などがある。

こうした手法は、受信信号における距離情報は主に C/A コードのパルス波形の立ち上がり部分を利用している。C/A コードの平らな部分を除いた相関器基本波形を使うことにより、相関関数はチップの幅まで狭めることができ、30~40mより大きい反射のあるマルチパスに対しほぼ影響を受けないようになる。そうした基準波形とそれに対応する相関関数の例を図に示す。

(上；通常の受信機、下がストロープ相関器)



(開発状況)

- ・既に製品化（ファームウェアとして搭載されている。）

### 3.2.5 MMT 技術

最近開発された独自の軽減手法であるマルチパス軽減技術（MMT）が受信機メーカーにより発表された。

直接波のモデルをベースにして、マルチパス影響を受けた合成波からマルチパス量を推定するアルゴリズムであり、コードおよび搬送波の双方において、理論的な性能限界に達しているようである。またその性能は信号観測時間が長くなるにつれ良くなるという利点も持っている。

(開発状況)

- ・開発～実用化段階にある。

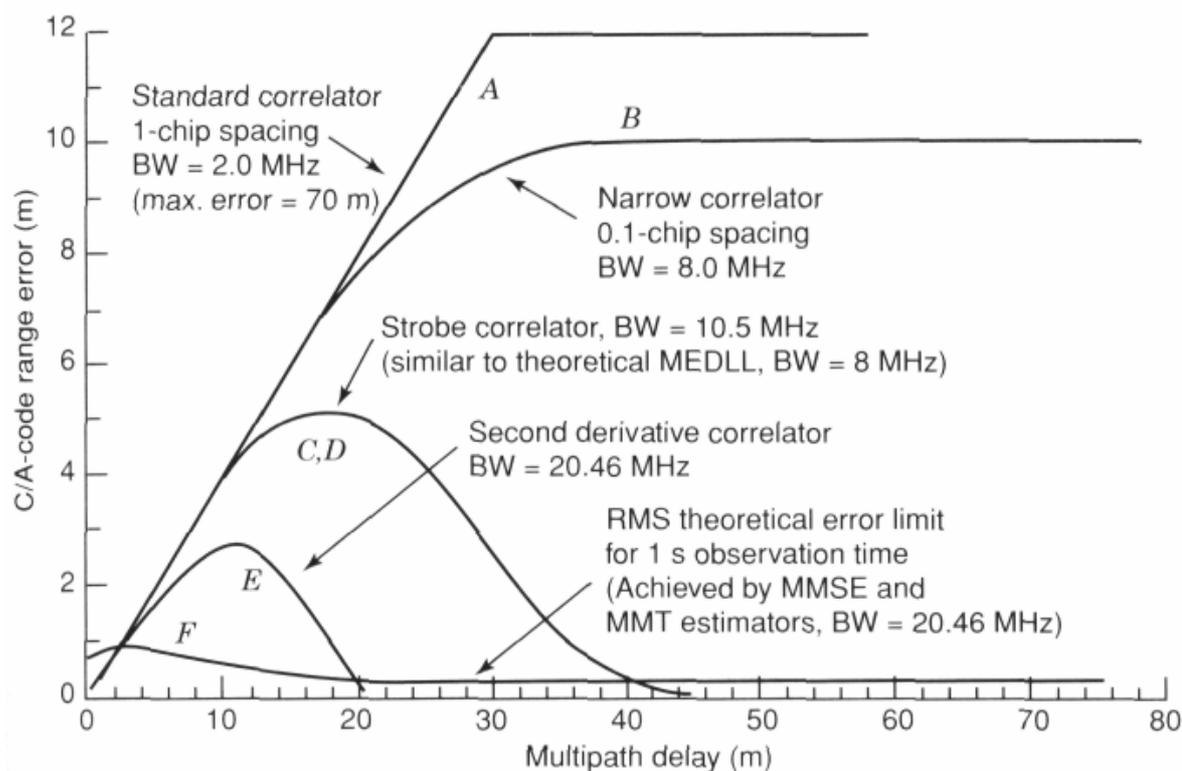
### 3.2.6 まとめ

いくつかのマルチパス軽減手法に対する代表的な C/A コード測距性能曲線を図に示す。直接波に遅れて入射してきたケースのマルチパス誤差を例にとる。最新の方法であっても、3~6mのピーク距離誤差は珍しくない。誤差は、2つの経路（直接波とマルチパス）の分離が20~30m以内である近距離マルチパスの場合に最大になる傾向がある。確かにその領域はマルチパス軽減研究で一番難しいところである。直接波・マルチパス波の分離が小さい信号からのマルチパス影響による遅延量の抽出は、条件の悪いパラメータ推定問題だからである。

ほとんどの既存マルチパス軽減アルゴリズムが悩まされている問題は、マルチパスによる遅延誤差を完全に取り除くことができず残差として残ることにある。

一方、前述の MMT アルゴリズムはこの障害を乗り越えているようである。ただし、MMT 自体が開発中であるということ、処理システム自体が重いことから移動体には不向きと思われる。

(マルチパス遅延量に対する C/A コード擬似距離に残される誤差量)



(追加) マルチパス軽減レベルの比較

	マルチパスディレイ (m)	5m	10m	20m	40m 以上
C/A コードの 擬似距離誤差 (m)	狭域相関器技術	1.5m	4m	7m	10m
	相関関数形状ベース手法	1.5m	4m	5m	1m 以下
	改良相関器基準波形				
	MMT 技術	1m 以下			0.5m 以下

### 3.3 位置精度改善方式の比較検討

GPS補完方式は、自動車用として実用化またはフェージビリティが検証された測位方式であり、高精度化の可能性のある組合せを見つける視点から長所、短所をまとめた。マルチパス軽減方式は、元々自動車用ではないため、車載化を意識して、長所、短所をまとめた。

#### 3.3.1 GPS 補完方式

位置精度改善方式のなかで、調査した5つの補完方式を比較検討した。それぞれの特徴を以下に述べる。

##### (1) 自立航法システム

インフラが不要で、シンプルで安価なシステムである。初期設定が必要であり、誤差が時間とともに増大する欠点をもつ。カーナビ等で量産されており、角速度や車速誤差により、精度は大きく変化する。GPSハイブリッド航法により、自立航法の情報とGPSの情報を統合することにより、それぞれの欠点を補ない、精度を改善できる。

##### (2) 白線検知システム

相対的な自車位置の検出が可能なシステムである。地形的な影響をうけずに、検出精度は良好である長所をもつ一方で、雨天、積雪、夜間での検出は困難である。実用化されており、精度は10cm程度である。

##### (3) 擬似衛星技術

GPSと併用して精度の改善、測位可能範囲の拡大をもたらす技術である。擬似衛星インフラが必要である。実用化にむけた問題点として、遠近問題、他のGPS受信機への干渉、擬似衛星信号のGPS時刻同期、対流圏遅延などがある。

##### (4) DSRC, VICS

路側機インフラが必要であり、スポット的に位置を検出できるシステムである。DSRCは開発中であり、5m程度の精度である。VICS(光ビーコン)はすでに実用化されており、3.5m程度の精度である。VICS(電波ビーコン)も実用化されており、精度は70m程度である。

##### (5) レーンマーカ

レーンマーカインフラを必要であり、特定箇所における高精度な位置を特定できるシステムである。横方向の精度は50mm程度であり、縦方向の精度は30cm以下である。

また、5つの補完方式の長所と短所を次の表にまとめた。

補完方式	長所	短所
(1) 自立航法システム	①システムがシンプルかつ安価	①過去の位置を用いて演算するため、移動距離および時間経過とともに誤差が蓄積、増大する
	②インフラが不要	②初期位置および方位の設定が必要
	③電波障害等の影響を受けない	③現状のままでは目標精度は達成できない
GPS ハイブリッド航法	①GPS が受信できない場所でも位置計算が継続できる。	①GPS 受信機の測位計算が自立航法の誤差の影響を受ける場合がある。 (長時間の GPS 測位計算の中断からの復帰処理など)
	②自立航法の情報を利用することで、マルチパスなど DGPS で除去できない受信機固有の誤差を除去できる。	②現状のままでは目標精度は達成できない
	③測位計算に自立航法の情報を取り込むことで、個々の測位計算のばらつきを抑え、GPS の測位計算精度を改善することができる。	
(2) 白線検知システム	①道路上にペイントされた白線に対する相対的な自車位置検出システムであり、道路地図の精度、GPS 等を使用した自車位置の検出精度に影響を受けない	①絶対座標の位置検出は不可能
	②トンネル内、山間部、市街地など地形的な影響を受けない	②光学的センサー利用のため耐候性が低い、雨天、積雪、夜間の検出は難しい
	③連続した白線、破線状の白線、連続した鋸などの検出が可能	③車両縦方向の位置検出は不可能
	④位置検出精度は良好	
	⑤応答性は良好	
(3) 擬似衛星技術	①GPS 信号と互換性があるため、併用が可能である。	①地上側インフラ (送信機) が必要であり、維持管理を伴う。
	②様々な GPS 関連アプリケーションを利用できる。	②干渉を避ける方式により受信機ハードウェアの変更が必要となる。
	③目標精度を達成できる可能性はある。	

補完方式	長所	短所
(4) DSRC	①設備を、位置標定以外の他のサービスと共用できる。(例:ETC) ②大量の情報を通信できる	①スポット的にしか位置補正できない。 ②目標精度は達成できない
VICS (光ビーコン)	①既に実用化されている。	①スポット的にしか位置補正できない。設置場所に制約がある。
	②電波ビーコンと異なり、レーン毎に設置され、レーンの識別が可能。 ③大量の情報を通信できる	②目標精度は達成できない
VICS (電波ビーコン)	①既に実用化されている。ビーコン直下の位置検出が可能。	①スポット的 (2~10km 間隔) にしか位置補正できない。
	②大量の情報を通信できる	②地下など設置場所に制約がある。 ③目標精度は達成できない
(5) レーンマーカ	①特定箇所における高度な位置特定が必要な場合、現時点では最も精度・信頼性の高い方法といえる。 ②目標精度を達成できる可能性はある。	①整備にコストを要する ②路面に埋設するマーカのための、レーンマーカ自体の位置情報を車載機に通信するには他のインフラを利用しなければならない。

### 3.3.2 マルチパス軽減方法

マルチパスの影響を軽減する方法として、アンテナのハードウェアによる方法、周期的なデータを統計的に処理する方法、受信機のプログラムによる方法がある。これらの概要を表1マルチパス軽減方法にまとめた。

受信機のプログラムによる方法については、相関器を利用する方法であり、共通事項として、マルチパスと相関器、方法の概要、チップレート等について以下にまとめた。

#### (1). マルチパスと相関器

相関器は受信機内で発生させている波形（C/Aコード）と衛星から受信した波形を比較する。各GPS衛星毎に定義されている。C/Aコードは、1023チップ（チップとは+1または-1の基本パルスのことをいう）で1ms毎に繰り返されている。GPS衛星に同期している受信機で発生させた波形と衛星から受信した波形のズレが信号の旅行時間に相当し、これを擬似距離という。実際には、波形ピークの前後の1チップ幅を持った相関器で波形のピークを検出するが、マルチパスが混入した合成波は、ピーク計測のズレを生じ、擬似距離に遅延誤差を生じさせる。これがマルチパス誤差である。相関器はチップを単位として計測するため、マルチパスのことを論ずるときには、このチップをものさしとして、論ずることが多い。

#### (2). 方法の概要

直接波のほかに反射波が合わさってくる时候を考えると、直感的に反射波は直接波が到達したあとで、少し遅れて到達し、その到達したときの波形は直接波しかない波形とくらべて、ゆがみがある。そのゆがみをできるだけ推定することによって、直接波だけが到達した波形ピークを推定することができる。このゆがみのある波形をできるだけ直接波だけの波形に近づける方法にいろいろな方法があり、この方法のことをマルチパス軽減方法という。

いずれも、相関器を利用した方法で

- ①狭相関器による方法
  - ②キャリアスムージングによる方法
  - ③相関関数の形状を利用する方法
  - ④相関関数波形の縁を利用する方法
  - ⑤左右相関関数値を利用する方法
- などがある。

#### (3). C/Aコードを使用したマルチパス軽減方法の特徴

C/Aコードの場合、1msごとに1023の+1または-1の情報が繰り返される。1023000チップ/秒で約0.0000009775秒/チップである。衛星からの電波の速度は299792458メートル/秒であるので、1チップを距離に換算すると299792458メートル×0.0000009775=約292.4メートルとなる。受信機では、通常1チップ幅の相関器をもって、波形のピークを推定し、旅行時間を計測する。マルチパスの遅延時間が、相関器のチップ幅以上の遅れは、マルチパス誤差とならない。通常、1チップ幅相関器では、1.5チップ（マルチパス波のピーク）の遅れ、つまり450m以上のマルチパスの影響は受けないとされている。

#### (4). Pコードを使用したマルチパス軽減方法の特徴

Pコードの場合、チップレートは10.23MHzであり、10230000チップ/秒で約0.00000009775秒/チップである。衛星からの電波の速度は299792458メートル/秒であるので、1チップを距離に換算すると299792458メートル X 0.00000009775 = 約29.24メートルとなる。したがって、Pコード受信機での1チップは、29.24メートルであるので、Pコードの1.5チップつまり約45m以上のマルチパス遅延誤差の影響は受けないといえ、マルチパス誤差の軽減効果が期待できる。

マルチパス軽減方法	動作原理	マルチパス除去の効果	開発状況	コスト	長所／短所
(1) アンテナのハードウェアによる方法 ①チョークリングアンテナ	地上から反射する信号を減衰させる方法。アンテナをグランドプレーンに取り付けることで、地上からの反射波の回り込みを防ぐ。さらに $1/4\lambda$ の深さのあるチョークリングを用いることで大幅に地上反射波を減衰させる。	地上面からの反射に関して有効。	実用化されている	定点観測用として実用されているが、コストは高い。	アンテナの重量が 4kg～5kg と重いため、移動体の位置標定には適さない
②利得特性による手法	GPS 信号は、右旋偏波という偏波特性を持つ。マルチパスは、一回反射で左偏波として入射してくる。アンテナ特性を右旋偏波に対応させ、上方にゲインを集中させる手法。	地上面からの反射、左旋偏波のマルチパスに関して有効。	実用化されている	高精度受信機では、実用化。やや高い。	グランドプレーンが必要な為、移動体向けの小型化に難あり。
(2) 周期的なデータを統計的に処理する方法	GPS 衛星の配置が 1 日約 4 分ごとにはやまって同じ状況が繰り返され、測位誤差は同じ状況を繰り返すことを利用する方法	定点観測で、マルチパス要因のビルや構造物との関係が一定の際は有効。	研究段階で実用化されている	条件により大幅に異なるため一概にはいえない	定点観測で有効であり、移動体の位置標定には適さない

表 1 マルチパス軽減方法

マルチパス 軽減方法	動作原理	マルチパス除 去の効果	開発状 況	コスト	長所／短所
(3) 受信機 のプログラムによる 方法 ①狭相関器 による方法	通常を受信機の相関器の幅(弁別特性)は、±1chipあるが、この手法は、0.05chipと狭くし、マルチパスを除去する方法。	0.05chipの遅延=1.5m以上のマルチパスには有効である。	—	—	相関器幅が±0.05chipと狭い為、移動体での利用には、工夫が必要。
②キャリア スムージングによる 方法	入力された搬送波の相関を計算し、相関に関する既知のマルチパスパターンに合致するものを取り去る方法	搬送波トラックができる受信機では有効。	実用化されている	現在主流の移動体用低コスト受信機と比較してややコスト高	搬送波の途切れる都市部などでは不向き

表1 マルチパス軽減方法

マルチパス軽減方法	動作原理	マルチパス除去の効果	開発状況	コスト	長所／短所
②相関関数の形状を利用する方法	多数の相関関数を配置して、その相関関数の形状からマルチパスモデルのパラメータを特定する方法。	マルチパスによって影響を受けた波形を直接計測できるので、誤差量の推定確度が高い。	WAA S基準局として実用化されている	現在、市場に出ているものは、WAA S基準局用で非常に高価。	非常に多くの相関関数形状処理が必要で、現時点では移動体評定には向かない。
③相関関数波形の縁を利用する方法	マルチパス影響を受けていない先行の相関関数値と最大値から相関関数のピーク位置を推定する方法。	短いマルチパスには、弱い長いマルチパスには有効	実用化されている	条件により大幅に異なるため一概にはいえない	基本的に移動体にも有効と考える。
④左右相関関数値を利用する方法	左右複数点で相関関数の値を求め、求めた値から近似直線を求め、その交点をピークとして計算する方法。	短いマルチパスには、弱い長いマルチパスには有効。受信環境が悪く最大値が得られない時は、悪化する。	実用化されている	条件により大幅に異なるため一概にはいえない	基本的に移動体にも有効と考える。高感度受信機には不向き。

表1 マルチパス軽減方法

## 第4章 移動体用高精度位置標定システムの検討

### 4.1 位置精度改善方式の組合せ検討

ここでは、前章の「位置精度改善方式の調査」の結果をベースに、GPS の見えないところと見えても GPS 測位データを信頼できないところについて、測位精度を向上させるために、様々な位置標定方法を組み合わせて、利用する方法について検討した。(第1章の検討方針参照)

補完のために用いる測位方式を車載システムとインフラ側に分けて、その組合せを考えてみる。ここでは、GPS と GPS 補完方式の組み合わせのみについて検討する。

補完方式の組合せを、次に示すように車載システムによる方式(3方式)を縦軸に、インフラによる方式(7方式)を横軸にしたマトリックスによって整理して検討した。

縦軸(3方式)：

- ① 慣性航法単独
- ② 白線検知単独
- ③ 慣性航法+白線検知 検討の経過は次の通りである。

横軸(7方)：(GPS+VRS 補正)はオープンエリアにおける高精度化の実現のため、すべての方式に付随するものとしている。

- ① (GPS+VRS 補正) + 擬似衛星(スードライト)
- ② (GPS+VRS 補正) + 路側機(光ビーコン, 電波ビーコン)
- ③ (GPS+VRS 補正) + レーンマーカ(AHSRA で検討していた位置マーカのことであり、R-F タグとは異なるため、レーンマーカをそのまま使う)
- ④ (GPS+VRS 補正) + 擬似衛星+路側機
- ⑤ (GPS+VRS 補正) + 擬似衛星+レーンマーカ
- ⑥ (GPS+VRS 補正) + 路側機+レーンマーカ
- ⑦ (GPS+VRS 補正) + 擬似衛星+路側機+レーンマーカ

その結果、目標精度 0.5m 実現の可能性があり、コスト的に検討する意味のある組合せは、次の3つの組み合わせのみが残った。

車載システム側： ① 慣性航法

- インフラ側：
- ① (GPS+VRS 補正) + 擬似衛星
  - ⑥ (GPS+VRS 補正) + 路側機+レーンマーカ
  - ⑦ (GPS+VRS 補正) + 擬似衛星+路側機+レーンマーカ

表 4-1 に各々の組合せのシステムの構成における必要条件、並びに高精度化を達成するために必要な条件(目標 0.5m を目指すための)を示す。

これらの検討結果から今後の検討に当たっての留意事項が明らかになった。

- (1) 高精度化で車載システム側は慣性航法が唯一の方式であり、現状のカーナビに用いられている移動体用位置標定システムをリファインする方向で高精度化を検討すべきである。
- (2) ⑥の組合せは、慣性航法に”路車間の位置標定”を加えたシステムということが

できる。この路車間の位置標定は本研究から生まれた新しいアイデアで、比較的安いインフラを利用した車載機側にコストの比重がかかったシステムとすることができる。

一方、擬似衛星のシステムはインフラ側にコストの比重がかかったシステムとすることができる。

そして、もう一つがそれを組合せたタイプである。まだ、アイデアの段階であり、3つの候補とも平行して検討していく必要がある。

表4-1. 測位方式の組合せ

インフラ	(GPS+VRS 補正) +	(GPS+VRS 補正) +	(GPS+VRS 補正) +
車載システム	擬似衛星	路側機, レーンマーカ	擬似衛星, 路側機, レーンマーカ
慣性航法	<u>課題</u> : 常に, GPS 衛星+擬似衛星 $\geq$ 4機を満たす必要があり, 擬似衛星が複数のときの測位方式, 擬似衛星の配置等の研究課題がある。	<u>構成</u> : 路側機, レーンマーカを同一地点に設置し, 路側機はレーンマーカの位置情報を通信。いわば, 路車間の位置標定機能を新規追加することになる。 <u>課題</u> : 擬似衛星に比し, 車載システム側の変更大。	<u>構成</u> : 擬似衛星の設置とは別に, 路側機, レーンマーカを同一地点に設置し, 路側機はレーンマーカの位置情報を通信 <u>課題</u> : 車載システム側の変更大も大。

上記3システムとも、反射波や反射波の影響を検出しなければならないという共通の課題がある。

(路側機+レーンマーカ)は路車間の位置標定機能と言い換えることができる。

## 4.2 高精度化へのフレームワーク

第2章の「位置精度改善方式の評価実験」で得られた知見をベースに、インフラからみた高精度化への課題と技術的方策に関して、高精度化への研究開発の枠組み（フレームワーク）を検討した。

まず、上記評価実験で得られた知見を以下に示す。

### （慣性航法）

慣性航法（高精度3軸ジャイロ（ゼロ点各軸とも $\pm 1^\circ/\text{s}$ ）+車速センサ）における実験結果より、直線走行では、走行距離に比例して誤差が増え、100m走行で誤差約1m、回転走行では、1回転（右左折4回分）で誤差約1mという結果になった。

この結果より、目標精度0.5mを維持するためには、直線走行では50m、右左折2回で1回、慣性航法は路車間の位置標定インフラを利用して位置補正する必要がある。

このための路車間の位置標定インフラの配置（例）は、捕捉衛星数の不十分なエリアと反射波の影響のあるエリアにおいて、直線道路であれば、50m間隔、交差点、曲がり角にインフラを設置する必要がある。

本研究では、路車間の位置標定インフラの配置を求める手法を提案するのが、目的であり、上記の数字は高精度3軸ジャイロを使用したときの路車間の位置標定インフラ配置の1例と考えられる。

### （マルチパス軽減方式）

マルチパス軽減方式は、実験車と建物との距離の約2倍と考えられるマルチパス誤差に対して、およそ1/5程度に軽減できる効果はあったものの、目標精度を実現するまでの軽減効果はなかった。

GPS関連企業へのヒアリング調査でも、マルチパス軽減方式は、20m以上のマルチパスに対しては、その影響を軽減できる方式が実用化されているが、20m以下のマルチパスに対しては、まだ研究中であり、現時点では目標精度までの軽減は困難である、といっている。

目標精度までの軽減が困難であれば、今後は反射波の影響のあるエリアの弁別を目標に、マルチパス軽減方式を反射波を検出する方向の研究に導くべきである。

上記の知見をベースに、高精度化への研究開発の枠組み（フレームワーク）を検討した。

インフラからみた（前節で得られた）3システムの課題と技術的方策に関して、エリアごとに、高精度化への研究開発の枠組み（フレームワーク）の視点から検討した。

高精度化へのフレームワークの概要のまとめを表4-2に示す。

縦軸：エリア

- ① オープンエリア
- ② 反射波の影響のない（捕捉衛星数の不十分な）エリア：
- ③ 反射波の影響のあるエリア：

横軸：前節の結果より以下の3種類とした。

- ① GPS+擬似衛星+VRS補正+慣性航法
- ② GPS+VRS補正+慣性航法+路車間の位置標定
- ③ GPS+擬似衛星+VRS補正+慣性航法+路車間の位置標定

表4-2より、以下のことが明らかとなった。

- (1) 高精度化へのフレームワークは、表4-2のように、エリアを軸とする表でまとめると、

各々の移動体用高精度位置標定システムの課題と技術方策を明らかにできる。

- (2) 擬似衛星が絡んだシステムは、捕捉衛星数の不十分なエリアでの対策と反射波の影響のあるエリアでの対策が異なり、システムがやや複雑になる可能性がある。
- (3) 路車間位置標定のシステムは、対策の必要なGPSの見えるところと見えてもGPS測位データを信頼できないところの二つのエリアにおいて、路車間の位置標定という一つの対策で高精度化を実現できる可能性があるため、この「GPS+VRS補正+慣性航法+路車間の位置標定」システムを中心に今後の検討を進めるべきであろうと考えられる。
- (4) 路車間位置標定のシステムは、慣性航法の性能を考慮してインフラの設置間隔を決める必要がある。

表4-2 高精度化へのフレームワーク

	GPS+擬似衛星+VRS補正+慣性航法	GPS+VRS補正+慣性航法+路車間の位置標定	GPS+擬似衛星+VRS補正+慣性航法+路車間の位置標定
オープンエリア	VRS補正に必要なインフラの電子基準点は、既に1,200箇所有り：解決済（電子基準点からの距離が10km以内であれば、精度目標達成可）		
捕捉衛星数の不十分なエリア	GPS衛星+擬似衛星≥4機の条件でGPS測位を行う。擬似衛星はGPS衛星の足りない分だけを設置。	(路側機+レーンマーカ)のインフラと協調して路車間の位置標定を行う。インフラの設置は、慣性航法の性能を考慮して決める必要がある。	GPS衛星+擬似衛星≥4機の条件でGPS測位を行う。擬似衛星はGPS衛星の足りない分だけを設置。
反射波の影響のあるエリア	GPS衛星+擬似衛星≥4機の条件でGPS測位を行う。しかしながら、反射波を切分けできない場合、擬似衛星を4機設置し、擬似衛星だけで測位する必要有り。		同左

上記3システムとも、捕捉衛星数の不十分なエリア、反射波の影響のあるエリアにおけるインフラの設置は、慣性航法の性能を考慮して決める必要がある。また、準天頂衛星は、オープンエリアと捕捉衛星数の不十分なエリアにおける高精度化に寄与できる。

対策の必要な二つのエリアにおいて、一つの対策で高精度化を実現できる可能性があるため、「GPS+VRS補正+慣性航法+路車間の位置標定」システムを中心に今後の検討を進めるべきであることが明らかになった。

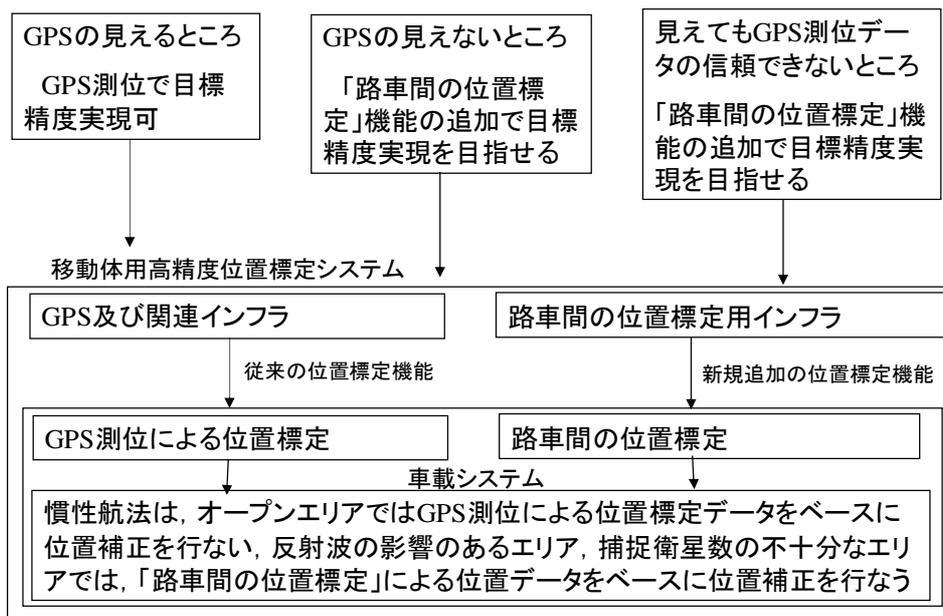
#### 4.3 移動体用高精度位置標定システム

前節までの結果より、本研究全体の成果のまとめを示す。

- ① オープンエリアでは、GPS測位で目標精度を実現可能である。
- ② 対策の必要なエリアと考えられる反射波の影響のあるエリアと捕捉衛星数の不十分なエリアにおいて、下記に示す3方式が
  - ・ GPS+VRS補正+慣性航法+路車間の位置標定
  - ・ GPS+擬似衛星+VRS補正+慣性航法
  - ・ GPS+擬似衛星+VRS補正+慣性航法+路車間の位置標定
 が候補として挙げられ、今後、平行して検討していく必要がある。

- ③ 高精度化へのフレームワークで検討した結果、現時点で強いて第1候補を選ぶとすれば、「GPS+VRS補正+慣性航法+路車間の位置標定」となり、この方式を成果のまとめの代表として提案する。  
 これにより、エリアを軸とした高精度化へのフレームワークの有用性も明らかにした。
- ④ 位置精度評価法として、後処理ワイドレーン法を利用できる可能性がある。

### 成果のまとめ



#### 4 調査研究の今後の課題及び展開

##### (1) 高精度化への重点的取り組み

上記より、高精度化への研究開発の重点的取り組みを以下のように提言する。  
「エリア別の技術的方策を検討する研究フレームワークを土台に、高精度化の研究の方向性を定めることが望ましい」

本研究全体の成果のまとめを以下に示す。

- ① オープンエリアでは、GPS 測位で目標精度を実現可能である。
- ② 対策の必要なエリアと考えられる反射波の影響のあるエリアと捕捉衛星数の不十分なエリアにおいて、下記に示す3方式が
  - ・ GPS+VRS 補正+慣性航法+路車間の位置標定
  - ・ GPS+擬似衛星+VRS 補正+慣性航法
  - ・ GPS+擬似衛星+VRS 補正+慣性航法+路車間の位置標定が候補として挙げられ、今後、平行して検討していく必要がある。
- ③ 高精度化へのフレームワークで検討した結果、現時点で強いて第1候補を選ぶとすれば、「GPS+VRS 補正+慣性航法+路車間の位置標定」となり、この方式を成果のまとめの代表として提案した。  
これにより、エリアを軸とした高精度化へのフレームワークの有用性も明らかにした。
- ④ 位置精度評価法として、後処理ワイドレーン法を利用できる可能性がある。

対策の必要なGPSの見えるところと見えてもGPS測位データを信頼できないところの二つのエリアにおいて、路車間の位置標定という一つの対策で目標精度を実現できる可能性があるため、「路車間の位置標定」を中心に検討を進めるべきである。

また、このシステムはフィージビリティが検証されており、時間と人をかければ確実に短期間で実現にこぎつけられる可能性が高く、本研究を強力に推し進める必要がある。

##### (2) 高精度化への環境整備

残された課題のひとつに、反射波が挙げられる。本調査研究では、マルチパス軽減方式に関して調査し、以下の知見を得た。

- (1) 今後は反射波の影響のあるエリアの弁別を目標に、マルチパス軽減方式を反射波の検知する方向の研究に導くべきである。
- (2) 現在、実用化しているマルチパス軽減方式の大半は、反射波のみの検出は不可能であるため、反射波の検出よりは、反射波の影響の有無を検出する方式の研究をすべきである。
- (3) 反射波の影響の有無を検出する方式は、マルチパス軽減方式の中では、統計処理方式であり、現状のカーナビにもみられるように、「GPS測位データの変化をみながら急変したら反射波の影響があるとしてGPS測位データでは位置補正しない」ような方式を研究すべきである。
- (4) それゆえ、今後、反射波の影響の量（誤差）、範囲、ITSサービスへの影響の程度、範囲等を評価しなければならない。

尚、反射波に関しては、他の技術分野でも課題になっており、連携して研究していく環境整備が求められる。

### (3) 高精度化への研究体制の確立

本調査研究は、移動体に最適な高精度位置標定システムの実現が目的であり、ITS サービスの実現が目的である。それゆえ、ITS の基盤技術として、いつでも、どこでも、誰にでも安心して使える車両位置情報サブプラットフォームの構築を通して ITS に貢献すべきであると考えられる。

元々、移動体の位置標定データは、リアルタイム性を保証するため、1回の測定値がそのまま位置データとなる。これは、測量データのように、測定回数を増やして、精度を上げることのできる固定点の位置標定とは全く異なる。

移動体における位置データは、リアルタイム性を保持したまま、信頼性レベルを上げる必要とその信頼性レベルを定義する必要がある。

信頼性レベルは、

- ・GPS 測位方式、慣性航法等の測位方式にどう影響されるか？
- ・捕捉衛星数、DOP(Dilution of Pollution) 等にどう影響されるか？
- ・反射波の影響は考慮すべきか？

等の課題を一つ一つ解決しながら、検討していく必要がある。

それゆえ、本調査研究は、高精度化を含む車両位置情報サブプラットフォームの構築に向けて、十分な研究開発体制を確立させ、位置データの信頼性レベル等の検討の方向へ展開することが必要である。

また、本調査研究は、測位方式単独での高精度化を検討してきたが、コスト的に大きな課題を抱えるような状況であり、精度とコストとの最適化検討も新たに提案する必要がある。

**表4-3 今後の研究展開の考え方**

	測位方式での高精度化検討(本研究の今後の展開)	精度とコストとの最適化検討 (今後の研究展開:提案)
方針	移動体絶対位置標定の限界である精度0.5m実現を、マップマッチング手法を利用しないで、エリア別に各種測位方式だけで検討	高精度化の最低限の条件である車線幅相当精度3mの位置情報から、マップマッチング手法も加えて、サービス実現可能な技術の組合せを検討
検討内容	精度達成のために ・慣性航法の高精度化 ・路車間の位置標定用インフラの配置 等を検討 今後の技術動向を見極める必要あり	検討対象サービス(要求精度0.5m~3m) 乗用車用:走行レーン案内等12サービス及び 業務用:除雪車情報支援等4サービスを本研究で得られた手法と枠組みを踏まえて、サービスの要求精度に応じて位置標定技術の最適な組合せを検討し、実現性を実験により検証
		上記12サービス、4サービスは図1 新規サービスの位置付け参照(p9)

上記の表 4-3 を一つの考え方としながら、今後展開を図るべきであると思われる。

—禁無断転載—

システム技術開発調査研究

16-R-1

移動体用高精度位置標定システムに関する調査研究報告書  
(要旨)

平成17年3月

作成 財団法人 機械システム振興協会  
東京都港区三田一丁目4番28号  
TEL 03-3454-1311

委託先 財団法人 日本自動車研究所  
東京都港区芝大門一丁目1番30号  
TEL 03-5733-7924