

## 都市部における GPS の実測評価及び測位の検討

柳原徳久（日立製作所）、渡邊正彦（日立産機システム）

都市部における測位技術の開発課題の探索を目的に、実測により GPS の測位状況を定量的に評価し、以下の問題が発生することを明らかにした。都市部では（１）建物などによる GPS 信号の遮蔽により測位率が約 50%と低くなる。（２）利用可能な衛星が制限され、衛星配置が悪くなることにより測位誤差が最大で約 280m と増大する。（３）建物などでの電波の反射（マルチパス）により測位誤差が最大で約 45m と増大する。これらの問題を解決するには擬似衛星、準天頂衛星などによる補完システムが必要である。

### Experimental Evaluation of GPS and Study on Positioning in Urban Areas

Norihisa Yanagihara (Hitachi)

Masahiko Watanabe (Hitachi Industrial Equipment Systems)

To explore positioning problems in urban areas, the GPS experiment was conducted in a city and the positioning was quantitatively evaluated. The following problems were revealed by the experiment. (1) The rate of positioning becomes low by about 50% because the GPS signal was covered by the buildings, etc. (2) The positioning error increases by up to about 280m because of poor satellite signal availability. (3) The reflection of the electric wave on buildings, etc (multipass) causes the positioning error increase by up to about 45m. The complement system such as the false satellite, the satellite arranged at the zenith, etc. is required to solve these problems.

#### 1. 緒言

日本では、米国の GPS (Global Positioning System) を利用した位置案内システムが、カーナビゲーション、携帯情報端末、携帯電話などに用いられている。特にカーナビゲーションは広く普及しており、装着率も年々増加している。カーナビゲーションでは、GPS で測位された位置と地図を照合すること（マップマッチング）により自車位置を特定している。その精度は、FM 電波や中波により D-GPS (デファレンシャル GPS) の補正情報を受信できる都市部で数 m、単独測位となる郊

外で 10m 程度である。単独測位の精度は、2000 年 5 月に米国が S/A (Selective Availability: 意図的精度劣化) を解除して大幅に向上した。しかしながら、都市部においては GPS 衛星からの電波がビル、高架道路などで遮蔽されることが多く、測位に十分な数の衛星が捕捉できず測位が不可能となる場合が多い。これを解決する技術開発が必要であるが、現実の都市環境で測位状況を明確に把握した例は少なく、都市部においてどのような問題がどの程度あるかを把握することが重要である。

測位状況を把握するには測位可能範囲、測位誤差を数値的に明確にする必要がある。また、測位できない原因としてGPS信号の遮蔽やマルチパス、干渉などがあり、それらを数値化することによりその状況を把握することができる。そこで、都市部における測位状況を把握するため、測位可能範囲、測位誤差について渋谷で行なった実験データをもとに解析したものである。但し、GPS信号の遮蔽やマルチパス、干渉などの数値化に関しては今回の実験結果だけでは解析できない。今後さらに検討を進める予定である。

本報告では、都市部においてGPS受信機を搭載した車両を走行させて測位実験を行ない、測位可能範囲、測位誤差を数値的に評価し、都市部における測位の問題を明確にした。

## 2. 都市部における測位実験

### 2. 1 実験装置

実験装置ではD-GPS受信機、慣性航法機器及び高感度GPS受信機を使用した。これらの実験装置の構成を図2.1に示す。図2.1に示す実験装置のパソコンは記録用として用いた。

D-GPS受信機は海上保安庁が運用している全国27のD-GPS局から送信された補正情報を受信する中波ビーコンと、L1帯(1575.4MHz)のGPS受信機(G12、ASHTECH社)から構成されたもの(BR2G、ASHTECH社)であり、GPS信号と補正情報をもとに精度2~3mで測位が可能なものである。

また、高い建物がよくある都市部において有効ではないかと最近注目を集めている受信感度が高い高感度GPS受信機(EPSON社開発品)も合わせて使用し、その有効性を評価した。この受信感度は-155dBmであり、通常のGPS受信機の受信感度は約-130dBmであることから、約25dBm改善されているものである。

上記D-GPS受信機及び高感度GPS受信機は、捕捉衛星数が4つ以上である場合三次元測位を行ない、捕捉衛星数が3である場合高さが変化しないものとして二次元の測位を行なう。

これらのGPS受信機とは別に、実験に使用した車両には、GPS受信機、ジャイロ、車速エンコーダを組み合わせた車載用の慣性航法機器が搭載されている。本機器は、現状のカーナビと同様にGPS受信機の出力を初期値として用い、ジャイロと車速エンコーダから計算される走行方向と走行距離を用いて補完し、位置を特定する。この機器による位置精度は、初期値として用いるGPS測位精度、GPS測位の頻度に依存するが、現状のカーナビの実力から一般的には10m程度の精度はあると考えられる。尚、本機器ではカーナビが採用しているマップマッチング(検出した車両位置を地図の道路に再配置する)は行なっていない。

実験においては、測位誤差評価の基準となる走行位置の真値を求めるために、精度3cmと高い精度を持つ測量用の高精度GPSも搭載し、補正情報としてVRS方式(Virtual Reference Station: 実在する複数の基準点の観測データから、測定地点のごく近傍にあたかも基準点があるかのような状態を作り出し、このデータをもとに観測地点の測位に対して補正を行なう技術)を利用したが、都市部においてほとんど測位ができなかった。これは、高精度な測位に必要な衛星数(6個以上)が捕捉できなかったためである。

このため、慣性航法機器による位置を車両の位置の基準として使用した。

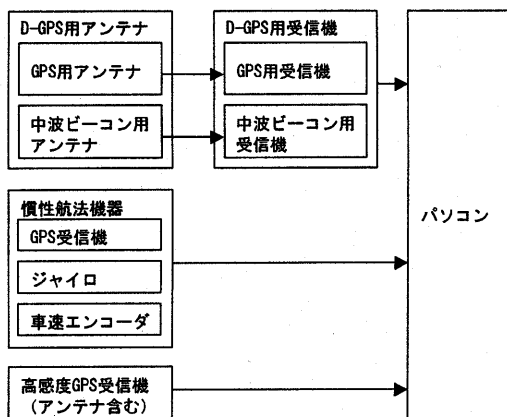


図 2.1 実験装置の構成

図 2.2 に実験に用いた車の概観を、図 2.3～図 2.5 に受信アンテナの設置状況を示す。図 2.6 は走行経路を地図（（株）アルプス社製のプロアトラスを使用）に示したものである。場所は渋谷駅周辺であり、ルートは、JR 原宿駅から都道 305 号線を南下し、首都高速道路下の玉川通りと六本木通りを往復して、都道 305 号線を北上し、JR 山の手線西の通りを往復するルートである。測位時刻は 2002 年 12 月 13 日 7:10～7:53 である。



図 2.2 実験に用いた車の概観



図 2.3 車の上に設置された D-GPS 用アンテナ



図 2.4 車の上に設置された慣性航法機器の GPS 受信機のアンテナ



図 2.5 車に設置された高感度 GPS 受信機

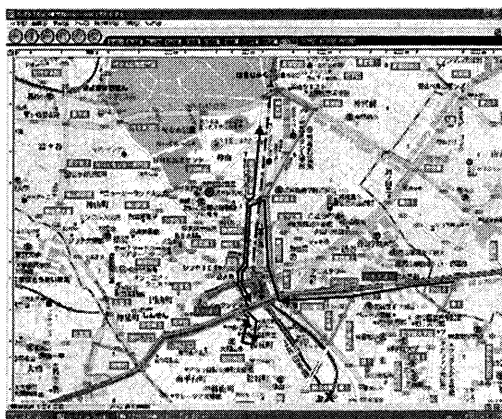


図 2.6 測位実験での走行経路

## 2. 2 D-GPS 方式による測位結果

D-GPS 方式による測位結果を図 2.7～図 2.9 に示す。図 2.7 は D-GPS 受信機から出力される測位結果（経度、緯度）を地図（（株）アルプス社製のプロアトラスを使用）に記載したものであり、図 2.8 は時刻に関する捕捉衛星数の変化を、図

2.9は捕捉衛星数の比率を示したものである。

図 2.7 では測位結果を矢印で示しており、矢印がないところは測位できなかったことを示している。ここで、測位率は測位できた時間の割合と定義する。実験で使用した GPS 受信機では捕捉衛星数が3の場合二次元の測位を行なう。このため、測位率は捕捉衛星数が3以上の割合である。

図 2.9 から D-GPS 方式（単独測位方式も同様）の測位率を求めると 51%である。これは建物が遮蔽物となってGPS信号が受信機に届かないことが原因である。このように都市部では建物などの遮蔽により低くなる測位率を向上することが課題である。

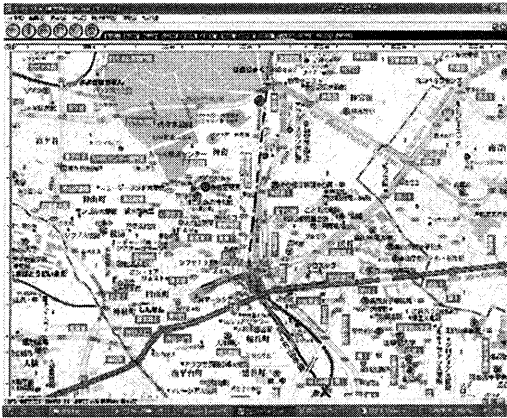


図 2.7 D-GPS 方式による測位結果

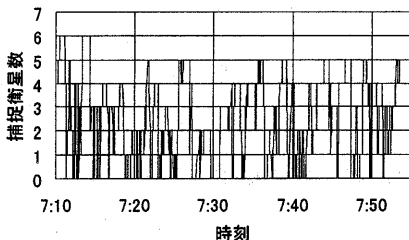


図 2.8 時刻に関する捕捉衛星数の変化 (D-GPS 方式)

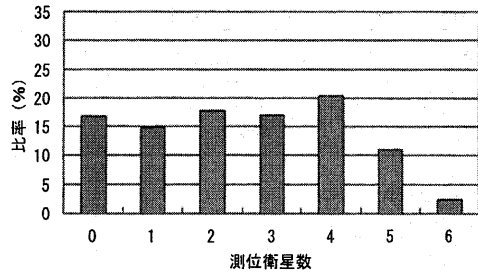


図 2.9 捕捉衛星数の比率 (D-GPS 方式)

次に、測位誤差について考察する。測位の基準としては、安定して測位結果が得られた慣性航法の位置特定結果との差を求めることにする。但し、比較時の時刻には最大 1 s の誤差を生ずる可能性があり、移動中は進行方向に大きな誤差を生じる恐れがあるため、停止したときの 25 点のデータを用いることにする。

25 点における D-GPS 方式の測位結果と慣性航法方式の位置特定結果の差、考察に必要な HDOP (horizontal dilution of precision、GPS 衛星の配置による水平方向の精度低下率) 値及び捕捉衛星数を図 2.10 に示す。25 点での測位では受信機の測位モードから、補正情報を受信し D-GPS 方式の測位が実行されていることを確認している。

D-GPS 受信機において海上保安庁中波ビーコン D-GPS の測位精度の性能値は 2~3m である。慣性航法の精度は初期値として使う GPS の測位精度にジャイロ及び車速エンコードによる補完精度を足し合せたものである。正確な位置特定精度は明確にできないが、図 2.11 に示す慣性航法の位置特定結果（機器から出力される経度、緯度を地図上に表示したもの）において大きい通りで道の左側を走行していることを見ると、その誤差は 10m 以下であると考えられる。

このことから D-GPS 方式が実力通りの性能を発揮していれば、D-GPS の測位結果と慣性航法の位置特定結果の差は最大で 12~13m 程度であると考えられる。しかし、図 2.10 に示す実測結果を見

ると、D-GPS 方式の測位を行なっているにもかかわらず、20m を超える値を示す場合がある。この原因としてDOP 値の低下とマルチパスが考えられる。

DOP 値の低下に関しては時刻 7:49:29 で HDOP と慣性航法との差に相関があることから、誤差要因の一つと考えられる。このときの誤差は D-GPS 方式の測位結果と慣性航法の位置特定結果の差 292m から慣性航法の誤差約 10m を引いた約 280m である。

また、マルチパスに関しては時刻 7:13:30、7:44:00 で HDOP の値が小さく、捕捉衛星数が 5 以上あるにもかかわらず、慣性航法との差が 40m 以上である。このことから、誤差要因として DOP 値の低下以外にマルチパスもあると考えられる。時刻 7:13:30 での誤差は D-GPS 方式の測位結果と慣性航法の位置特定結果の差 54m から慣性航法の誤差約 10m を引いた約 45m である。

以上のことから、都市部での測位において以下の 3 つの問題がある。(1) 測位率が約 50% と低いこと、(2) DOP 値の低下により測位誤差が大きいところで約 280m と増大すること、(3) マルチパスにより測位誤差が大きいところで約 45m と増大することである。よって、都市部における測位の課題として、(1) 3 つ以上の GPS 信号を受信できないビル影でも測位できるようにすること、(2) 建物などの影響である限られた方向からしか GPS 信号が受信できない (DOP 値が低下した) ときでも測位精度を落とさず測位できるようにすること、(3) GPS 信号が建物などに反射したときでも測位精度を低下させないようにすることがある。

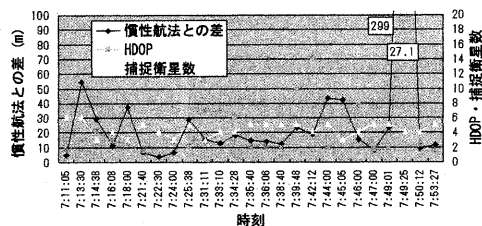


図 2.10 慣性航法との差、HDOP 及び捕捉衛星数 (D-GPS 方式)

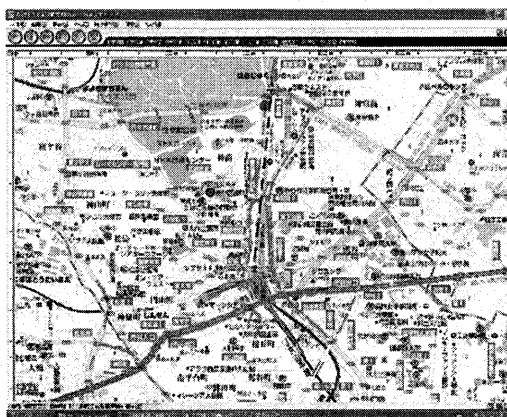


図 2.11 慣性航法による位置特定結果

## 2. 3 高感度 GPS 方式による測位結果

高感度 GPS 方式による測位結果を図 2.12～図 2.14 に示す。図 2.12 は高感度 GPS 受信機から出力される測位結果 (経度、緯度) を地図 (株) アルプス社製のプロアトラスを使用) 上に記載したものであり、図 2.13 は時刻に関する捕捉衛星数を、図 2.14 は捕捉衛星数の比率を示したものである。図 2.12 では測位結果を図 2.7 と同様に矢印で示した。図 2.13 では捕捉衛星数が 0 の場合は表示していない。図 2.14 より測位率は 71% であり、図 2.5 に示す高感度 GPS 受信機の設置場所 (車のフロントガラス内側) が図 2.3 に示す D-GPS 用アンテナの設置場所 (車の上部) に比べて設置条件が悪いにもかかわらず、D-GPS 方式より 4 割向上した。このことから高感度 GPS 方式は都市部での測位可能領域の拡大に有効であることが確かめられた。

次に、慣性航法の位置特定結果との差及び捕捉衛星数を図 2.15 に示す。図 2.10 及び図 2.15 において慣性航法との差が50m以上のもの(7:13:30、7:49:25、7:50:12)は省き、D-GPS 方式と高感度 GPS 方式での平均を求めると、18m と 32m となる。このように高感度 GPS 方式の方が誤差が倍程度大きくなる原因としては、高感度 GPS 受信機の設置場所が D-GPS のそれに比べて悪いことや D-GPS 方式で使用する補正情報を用いていないこと、建物に反射した GPS 信号の電波(マルチパス)を受信することが考えられる。

このように高感度 GPS 方式は建物に反射した電波などの弱い電波を受信可能であるため、多くの GPS 信号が受信でき、測位可能な領域を拡大させる特徴がある。一方、反射波を受信した場合には受信機内で計算した各 GPS 衛星と受信機との距離に誤差を生じ、測位精度が悪くなる欠点がある。

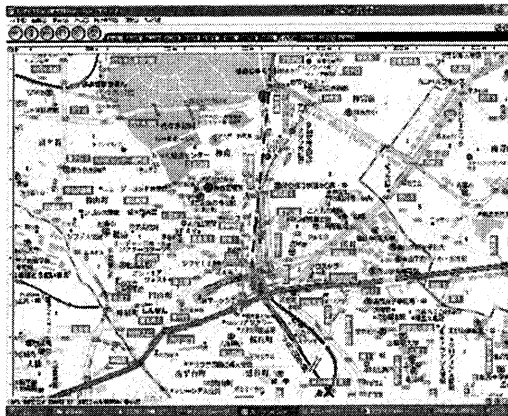


図 2.12 高感度 GPS 方式による測位結果

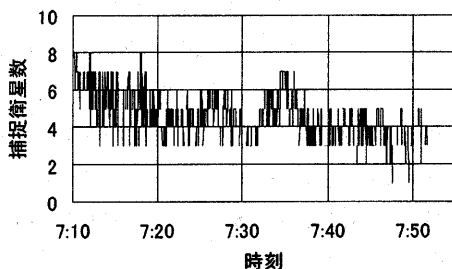


図 2.13 時刻に関する捕捉衛星数の変化  
(高感度 GPS)

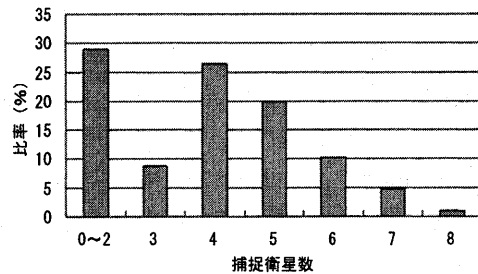


図 2.14 捕捉衛星数の比率(高感度 GPS 方式)

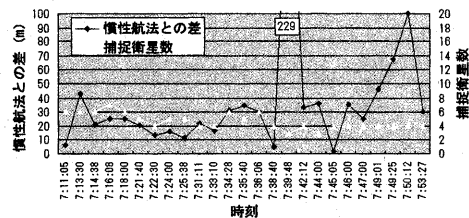


図 2.15 慣性航法との差及び捕捉衛星数  
(高感度 GPS 方式)

### 3. 都市部における測位の検討

2. 2で述べたように、都市部での測位において以下の3つの課題がある。(1) 3つ以上の GPS 信号を受信できないビル影でも測位できるようにすること、(2) 建物などの影響である限られた方向からしか GPS 信号が受信できない(DOP 値が低下した)ときでも測位精度を落とさず測位できるようにすること、(3) GPS 信号が建物などに反射したときでも測位精度を低下させないようにすることである。

まず、(1)の課題を解決する方法として高感度で GPS 信号を受信する方法と真上付近に新たな GPS 信号を送信する衛星を打ち上げる方法がある。前者の方法として高感度 GPS 方式があり、これは GPS 信号が直接受信できない場合建物に反射した

電波を受信することにより測位できるようにするものである。但し、2. 3で述べたように測位精度が低下してしまう。後者の方法には 2008 年打ち上げを予定している準天頂衛星がある。

次に、(1) と (2) の課題を解決する方法として擬似衛星 [1]、[2] がある。擬似衛星は建物に設置し、擬似的な GPS 信号を出力することにより、受信機で捕捉できる GPS 信号の数の増加と、GPS 衛星間の視野角を広くすることができる。これらにより測位率の増加と精度の向上を図るものである。

最後に、(3) の課題を解決する方法としてマルチパスを除去する技術 [2]、[4] がある。以上の課題と解決方法をまとめた結果を表 3.1 に示す。

表 3.1 都市部における測位の課題と解決方法

| 課題                       | 対策                  |
|--------------------------|---------------------|
| (1) 測位率の向上               | 高感度 GPS 方式<br>準天頂衛星 |
| (2) DOP 値の低下時における測位精度の向上 | 擬似衛星                |
| (3) 反射波の受信時における測位精度の向上   | マルチパス除去             |

位置情報を用いたアプリケーションとしてカーナビゲーション、ITS (Intelligent Transport System、高度道路交通システム)、人ナビゲーション、測量などがある。これらはいずれも 10m 以内の精度が必要なアプリケーションであり、擬似衛星、準天頂衛星及びマルチパス除去技術が必要となる。一方、数十 m 程度の測位精度で良いアプリケーションに関しては高感度 GPS 方式を用いることができる。

#### 4. まとめ

都市部における測位技術の開発課題の探索を目的に、GPS の測位実験を行ない、その結果をもとに都市部における測位状況を定量的に評価した結果、以下の結論を得た。

- (1) 都市部での GPS の測位において以下の 3 つの問題が発生することが明らかになった。① 建物の遮蔽などにより捕捉衛星数が不足、測位率約 50% と低くなる。② 利用可能な衛星が制限され、衛星の配置が悪くなることにより測位誤差が最大で約 280m と増大する。③ 建物などでの電波の反射 (マルチパス) により測位誤差が最大で約 45m と増大する。
- (2) 高感度 GPS 方式では都市部における測位率が約 70% と一般的な感度の GPS 受信機に比べて測位率が向上する特徴がある。一方、マルチパスの影響を受けやすく測位精度が低下する欠点がある。
- (3) 10m 以内の測位精度が必要なアプリケーションに関しては擬似衛星、準天頂衛星などの補完システム及び受信機でのマルチパス除去技術などが重要となると考えられる。一方、比較的測位精度が求められないアプリケーションに関しては高感度 GPS 方式を用いることができる。

#### 謝辞

なお、本研究は国土交通省国土技術政策総合研究所の委託を受けて実施したものである。高度道路交通システム研究室をはじめとする関係各位に御礼申し上げる。また、東京大学空間情報科学研究センター柴崎教授の協力を得て実施したものである。柴崎教授始め研究室各位に御礼申し上げる。

#### 参考文献

- [1] 重松文治: GPS の世界を広げるスードライト

- (Pseudolites: 疑似衛星)、測量、Vol. 51、  
No. 12、pp. 15-22 (2002. 12) .
- [2] 川口星也：スードライト疑似衛星信号発生  
器、建設機械、Vol. 37、No. 1、pp. 62-63  
(2001. 1) .
- [3] 久保信明、安田明生：単独測位におけるマ  
ルチパスの評価と精度改善方法、電子通信情  
報学会論文誌 B、Vol. J84-B、No. 12、  
pp. 2123-2131 (2001. 12) .
- [4] 田嶋裕久、福島荘之介、横山尚志：航法シ  
ステムのマルチパス検出に関する一考察、電  
子通信情報学会論文誌 B、Vol. J84-B、No. 4、  
pp. 794-800 (2001. 4) .