

航法用GPS受信機の開発

(株)光電製作所 技術1部 藤野 輝久
 技術1部 小林 研一 (現ポジション(株)商品部部長)
 技術1部 古谷 俊雄
 技術1部 和智 英機
 技術1部 竹原 正彦

当社では、1986年以来GPSプロジェクトチームによってGPS航法装置を積極的に開発してきたが、1988年の半ば試作機の開発に成功し、評価テストでも十分満足な結果が得られた。主な特徴としては、新しい理論に基づくマイクロストリップアンテナ、多チャンネル形の信号処理用LSI、推定位置入力が不用の直接位置計算方式等が挙げられる。
 この論文では、GPS航法装置KGP-900の概要並びに試作機の評価テストの結果について述べる。

1. まえがき

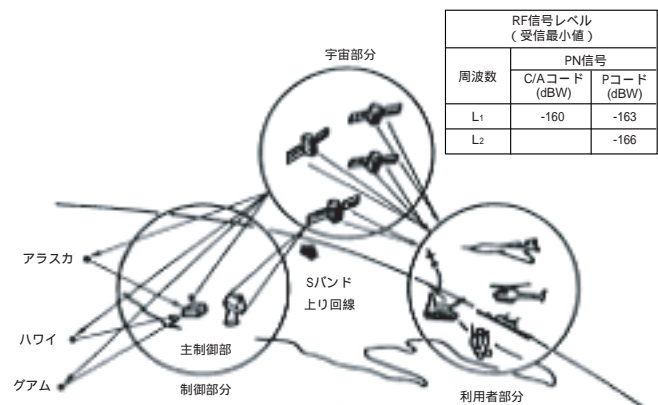
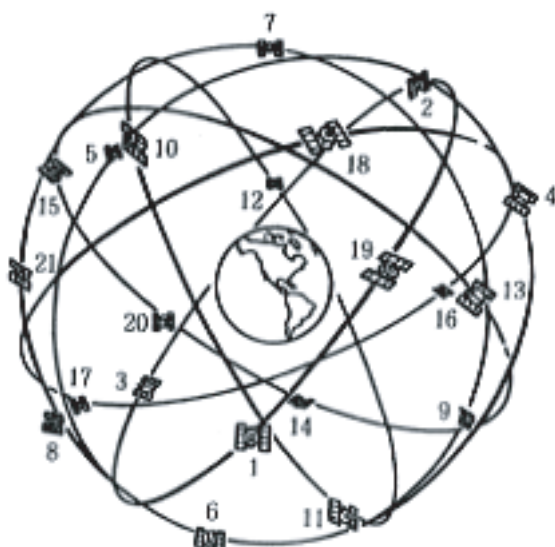
GPS (Global Positioning System) は、図1に示すように地球上約21,000kmの上空で、約11時間58分の周期を持つ21+3個(予備用)のGPS衛星を利用する全世界測位システムである。

地球局は、図2に示すようにGPS衛星を制御する主局、5つのモニタ局及び3つのアップリンク用局、並びに利用者のGPS受信機より構成される。

1 - 1 GPS衛星の構成

GPS衛星は、受信者向けにLバンドの周波数帯の1575.42MHz (L₁) と、電離層の伝搬遅延の補正用として1227.6MHz (L₂) の2周波の信号を送信している。

この衛星の送信方法は、直接拡散方式を用いたスペクトラム拡散通信である。直接拡散方式は搬送波の位相を180°位相変調を行い、信号を拡散する方式である。



GPSは、搬送波を擬似ランダム雑音(PN)コードでスペクトラム拡散を行っている。このPNコードで変調した信号は、雑音的性質を持つため、同コードで同期を取ることによってのみ復元(逆拡散)することができ、他の異なるコードの場合では逆に雑音として処理される。GPSは2つのPNコードの信号を使用しているが、それらは一般にPコード及びC/Aコードと呼ばれている。Pコードは精測定(precision)又は秘密保護(Protect)の意味とされる。C/Aコードは、明瞭及び捕捉(Clear and Acquisition)又は、粗測定及び捕捉(Coarse and Acquire)の意味といわれる。

Pコードは、搬送波周波数 L_1 の $1/154$ である 10.23MHz のクロックのPNコードである。その長さは、267日続くゴールド・コード(2つのM系列のコードを排他的論理和したものを)、1週間ごとにリセットして使用される。またこのPコードは L_2 の搬送波の $1/120$ である 10.23MHz のクロックとして、 L_1 と同コード信号を L_2 にも使われている。一方C/Aコードは、10段のシフトレジスタより構成されるM系列信号の別種の2個を排他的論理和したゴールドコードであり、 1.023MHz のクロック信号として L_1 の周波数にのみ使用されている。このコードは、1,023ビットの長さを持ち、1msの時間で繰り返される。

元来C/Aコードは、Pコードの捕捉援助用のコードであるが、独自でもかなりの精度が得られるため、米国防総省より民間用測位システムとして開放された。しかしPコードは、米軍専用の使用目的であり、当分の間民間に開放されることはないであろう。

測位精度は、Pコードで約16m、C/Aコードで100m(国防省による故意的劣化を含めて)である。またC/Aコード用は、Pコード用のように2つの周波数 L_1 、 L_2 による電離層補正ができないため、衛星データの電離層パラメータから補正量を計算しなければならない。しかし補正は、最悪の場合半分もできれば良いと見積もられている。

GPS衛星は、PNコードのほか測位計算に必要な衛星の軌道データ、時刻補正パラメータ、電離層補正パラメータ、メッセージデータや全ての衛星の簡易軌道予測データを位相変調して送信している。この信号は、毎秒50ビットで変調が行われており、5つのサブフレームより構成されている。各フレームの情報量は300ビット(6秒間)であり、全体で1500ビット(30秒間)のデータを順次繰り返し送信している(図2)。

1 - 2 GPS受信機の種類

受信機は、構成上4種類に分類される。

第1は、軍用の高速移動体、例えばミサイル、ジェット機等に用いられる、4個の衛星と次の5番目の衛星の捕捉を含めた5チャンネルの受信部を持つマ

ルチ・チャンネル受信機である。この方式は、各衛星に1つの受信部があるため測位時間が早く実現でき、また各衛星からのデータを連続して収集できる。しかし反面5倍の受信部を持つために、大きくしかも高価になりがちである。

第2は、マルチ・プレクシング方式と呼ぶものであり、受信部は1つであるが、4又は5個の衛星を捕捉する信号処理部を備えているものである。この方式は、信号処理部をハード、ソフトウェアで構築することにより、集積化が可能となり、小形かつ比較的安価となりうる。また受信制御が各衛星に割り当てた信号処理部を高速で切り換え制御を行えるため、早い測位時間が実現できるとともに連続して各衛星データを収集できる。

第3は、最も簡単な1チャンネル・シーケンシャル方式で、受信部、処理部が各1個ずつで構成され、4又は5個の衛星からの受信処理を時分割で行う。この時分割処理間隔は、一般に数十ミリ秒~数秒と多種多様であり、衛星データの収集が難しく、動作が複雑となる。この方式は、船舶等の低速度体向けで、構成が簡易なため低価格、小形化に向いている。

最後は、2チャンネル方式と呼ばれ、2個の受信処理部を持つものや、受信部は1個で処理部を2個持つもの等がある。この方式は、一般に1つのチャンネルが前記の1チャンネルシーケンシャル方式と同様な時分割受信を行い、他の1チャンネルが各衛星のデータ収集や次に受信すべき衛星の捕捉等を行う。

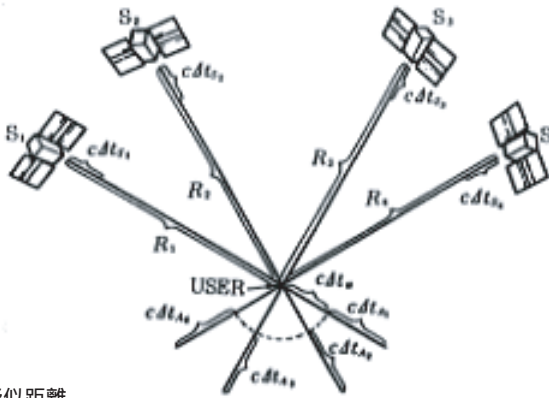
2 . 測位原理

今電波の送信点と受信点での時計が正確に一致しているとし、受信点での利用者が各送信点からの信号を受信すれば、各送信点からの伝搬時間差より正確な距離を知ることができる。これをGPSに置き換えてみると、送信点である3個の衛星からの信号を、利用者が受信した時刻の差より各衛星と利用者との距離が求まり、また衛星の送信時刻の位置が既知であれば、利用者の位置を求めることができる。しかし、衛星と正確に同期した時計を利用者側の受信機が持つことは、コスト的にも難しいため、図3に示すように利用者側では、受信機時計の各衛星時計からのずれを含めて衛星との距離を測定する。この距離は、実際の距離ではないために擬似距離と呼ばれる。

今、衛星 i 番目までの擬似距離を \tilde{R}_i とすると、

$$\tilde{R}_i = R_i + c \cdot t_{Ai} + c(t_u - t_{si}) \quad (i=1, \dots, 4) \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 R_i は真の距離、 t_{Ai} は電離層・対流圏による伝搬遅延、 t_{si} は各衛星の時計オフセットである。また c は、真空中における電磁波の伝搬速度で、 t_{Ai} の遅延量のうち電離層遅延は、衛星データのパラメータを、また対流圏遅延は



疑似距離

$$\tilde{R}_i = R_i + c \cdot t_{A_i} + c \cdot (t_u - t_{S_i}) \quad (i=1, \dots, 4) \quad (1)$$

図3 疑似距離

仮想モデルを使用して求められる。よって受信機では、利用者の3次元位置 x 、 y 、 z のほかに受信機時計のオフセット t_u を未知数として、4個の衛星からの疑似距離を測定し、4個の連立方程式を解くことにより利用者の位置 x 、 y 、 z 及び t_u を求める。
(1)式を直角座標系 (x 、 y 、 z) で表すと、

$$\tilde{R}_1 = \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2} + c \cdot (t_{A_1} - t_{S_1}) + c \cdot t_u \quad (2)$$

$$\tilde{R}_2 = \sqrt{(x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2 + (z - Z_2)^2} + c \cdot (t_{A_2} - t_{S_2}) + c \cdot t_u \quad (3)$$

$$\tilde{R}_3 = \sqrt{(x - X_3)^2 + (y - Y_3)^2 + (z - Z_3)^2} + c \cdot (t_{A_3} - t_{S_3}) + c \cdot t_u \quad (4)$$

$$\tilde{R}_4 = \sqrt{(x - X_4)^2 + (y - Y_4)^2 + (z - Z_4)^2} + c \cdot (t_{A_4} - t_{S_4}) + c \cdot t_u \quad (5)$$

ところで X_i 、 Y_i 、 Z_i ($i=1, \dots, 4$) は衛星の位置であり、各衛星からの軌道データより計算される既知の値である。同様にして、衛星からの信号のドップラー周波数すなわち疑似距離の変化率を測定すれば、利用者の3次元速度及び受信機時計のオフセット変化率すなわち周波数ずれを求めることもできる。また利用者は、海上の船舶のように高さが既知であることが多い。この場合(2)~(5)式の未知数のうち例えば z 成分が定数であるのと等価となるため3個の衛星から疑似距離を測定すれば良いことになる。

3. 航法用のGPS受信機

3-1 本装置の概要

本装置は、GPS衛星から送信される1575.42MHz (L_1)のC/Aコードを受信する5チャンネル・マルチプレクシング方式のGPS受信機である。5チャンネルの信号処理部は、ハード、ソフトウェアで構築されており、大規模なセミカスタムLSI化により小形・

小電力化を図っている。5チャンネル型の優位性は、もちろんのこと、電源を入力するだけで自動的にしかも推定位置入力無しで測位できることである。また4衛星が受信不能時には、自動的に3衛星による2次元測位を行う。

本装置は、表示に大型LCDを採用して一度に10種類のデータ表示を可能にした。例えば、緯度、経度、時間、PDOP値(衛星の位置による幾何学的誤差発散度)、高さ、使用衛星、速度、針路、目的地方位、距離、所要時間等である。

3-2 本装置の構成

3-2-1 アンテナ部

アンテナ部は、マイクロストリップ円偏波アンテナ、RF増幅部、周波数変換部より構成される。衛星の電波を仰角5°以上の範囲より受波するため、アンテナの指向特性は、ほぼ球面状であることが望ましい。普通のマイクロストリップアンテナは、半球状の指向特性が得にくく、一般に天頂から仰角5°までに約10dB以上の減衰を生じる。特に仰角の低い衛星を受信する場合、S/N比の劣化を起こす。例えば船舶におけるローリング時に問題がある。

本装置のアンテナは、マイクロストリップアンテナ

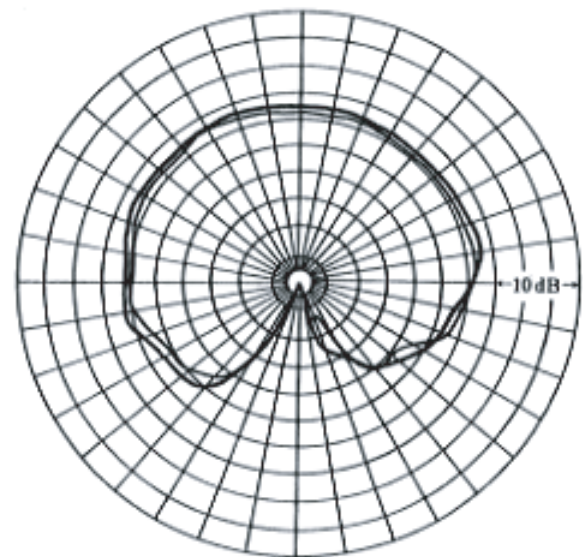


図5 アンテナの指向特性
(細線の特性曲線は太線に対しアンテナを90°傾けた場合)

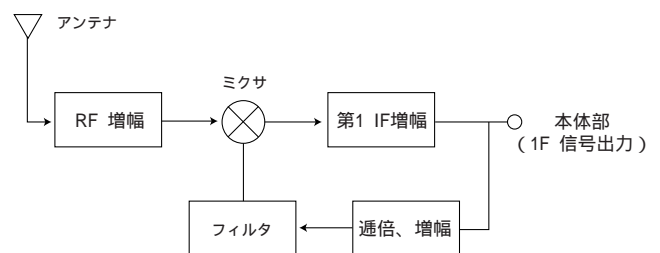


図5 アンテナ部の構成

ナに非励振素子を付加して、ほぼ半球状の指向特性を確保しており、天頂方向で約2dBicの利得、軸比は1dB、水平方向は約3dB以内の低下で収まっている（図4）。

アンテナで受波された衛星信号は、RF増幅部で増幅され、本体部より供給される第1局発信号の通倍信号と混合されて第1IF信号に変換される。IF信号は、所定の増幅を得てケーブルを介して本体部に送られる。このように衛星信号を低い周波数のIF信号に変換しているため、ケーブルは高価な低損失ケーブルの必要性はない。50m以上に及び長さまで使用を確保している。アンテナ部の構成を図5に示す。

3 - 2 - 2 受信部

受信部は、主に第1、第2増幅部、PLLシンセサイザ部及びA/D変換器より構成される。その構成を図6に示す。

アンテナ部より供給された第1IF信号は、本体受信部のIF増幅部で約2MHzに帯域制限される。この第1IF信号は、PLLシンセサイザ部からの第2局発信号と混合され第2IF信号に変換される。第2IF増幅部で所定のレベルに増幅された信号は、A/D変換器を介してデジタル信号となり信号処理部に供給される。

PLLシンセサイザ部は、基準発信器に同期した第1、第2局発信号や信号処理部用のクロック信号の発生を行う。このシンセサイザ部は、位相比較器、低域フィルター、分周器、VCOから構成されている。

3 - 2 - 3 信号処理部

信号処理部は、主にハードウェアのカスタムLSI、処理専用のCPUより構成され、5個の異なる衛星の並列処理が行えるように、5チャンネル分が内蔵されている。この処理部は、CPUの管理下に置かれ、5個の衛星のC/Aコード番号の割り当て、コードの捕捉・追尾、ドップラー変化を伴う搬送波（キャリア）信号の捕捉・追尾、擬似距離の測定等を行う。この信号処理部の構成を図7に示す。

初期時に航法処理部から信号処理部に対し、受信可能な衛星番号の指定が行われ、各チャンネルのコード発生部は、指定された衛星のC/Aコードの発生を行う。発生されたコード信号は、A/D変換された受信信号と相関がとられる。この相関出力は、コード位相検出部に入力され、そこでコードの進み遅れが検出され、CPUを介してコード位相を制御するコードNCO（数値制御発信器）が動作する。これらの動作を行うことで、衛星のコードと一致がとられ、

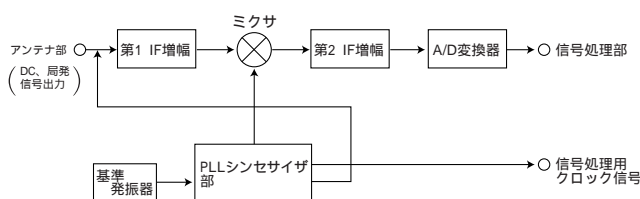


図6 受信部の構成

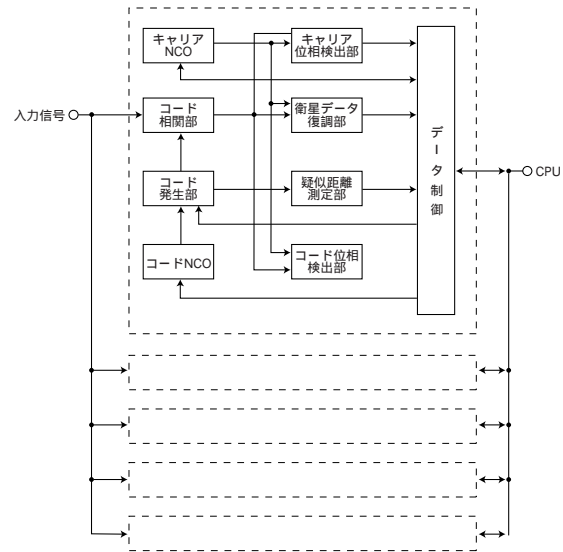


図7 信号処理部の構成

捕捉が完了し追尾動作に入る。

これに並行して動作するキャリア位相検出部は、コード相関による逆拡散された信号とキャリアNCO出力との位相比較が行われ、衛星と利用者の相対速度によるドップラーシフトしたキャリア周波数の検出をし、追尾動作を行う。これらのコード、キャリア信号の追尾動作を完了すると、衛星データの復調が行われる。衛星データは、50ビット/秒の位相変調された信号であり、データ復調部で上記検出されたキャリア信号により、位相検波され、信号の復調が行われる。また受信した衛星のコード位相時刻と受信機内の時刻との差を計ることにより利用者とその衛星間の擬似距離が求まる。一方CPUは、これらの制御のほかにはキャリア周波数の変化より擬似距離変化率や受信信号のS/N値の計算も行う。この信号処理部で計測された擬似距離、擬似距離変化率、復調データ、衛星時刻、信号のS/N値は、航法処理部へ出力される。逆に航法処理部より信号処理部へは、捕捉すべき衛星の番号の指定のほか、キャリア信号の周波数予測値等が入力される。

3 - 2 - 4 航法処理部

航法処理部は、主にCPU部より成り、各種の計算ルーチンのソフトウェア処理を行う。

信号処理部より各種のデータが入力されると、最初に受信した衛星の復調データの解読が行われる。この衛星データには、衛星の軌道データ（エフェメリス・データ）、時計補正パラメータ、電離層補正パラメータ、GPS時間、衛星の健康状態及び全衛星の簡易軌道暦（アルマナック・データ）等が含まれている。各衛星のエフェメリス・データより軌道計算が行われ、地球中心直交座標系上の各衛星位置が求められる。一方擬似距離、擬似距離変化率データ

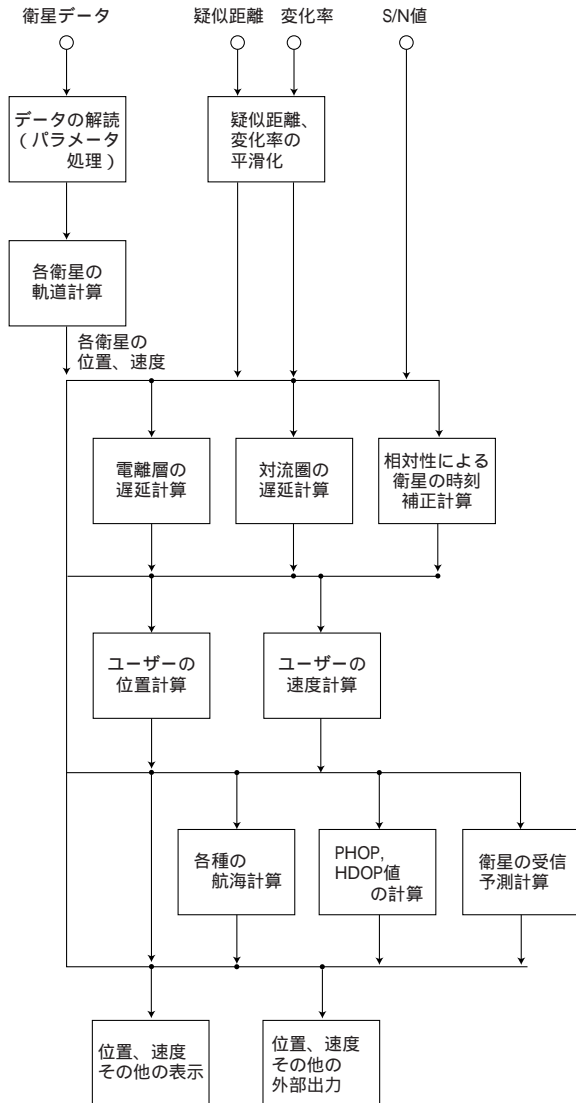


図8 航法処理の流れ図

は、平滑化処理が行われる。

これらの処理データは、利用者の位置、速度を求める計算データとなる。図8は、航法処理の簡単な流れ図である。位置計算の方式は、従来の型の繰返し演算法ではなく、直接的に解く独自の演算法を採用している。この方式の利点は、従来型のように初期位置設定（約±1°の精度で位置を入力）がなく、また計算処理時間が短いことである。まずこの位置計算に入る前に、各種の補正計算が行われる。それらは、衛星の時刻補正、電離層の遅延補正、対流圏の遅延補正、相対性理論による衛星の時刻補正等である。また利用者位置が求まると、疑似距離変化率より利用者の対地速度の計算も行われる。

このほか位置計算に使用する4個の衛星の幾何学的配置による精度の劣化係数（PDOP、または3衛星の場合はHDOP）値の計算、衛星の受信予測計算、航海に必要な各種の航海計算、世界各地の測地系変換等も並行して行われる。

4 . KGP-900 GPS航法装置

本装置の外観を図9に示す。

4 - 1 主要性能

測位精度（PDOP 3の時）

位置（3次元）30m（RMS）（C/Aコード使用）

速度（2次元）0.1kt（C/Aコード使用）

但し、システム完成時にC/Aコードの精度劣化が行われる場合には異なることがある。

受信周波数 1575.42MHz ± 1MHz
（C/Aコード）

受信感度 - 130dBm以下

受信処理方式 デジタル5チャンネル多重受信方式

信号の捕捉・追尾 マイクロプロセッサによる完全自動制御

アンテナ マイクロストリップ形アンテナ

表示方式 大型LCD表示(バックライト付)
一度に10種のデータ表示可能

キーボード フラットキーパネル型

演算表示機能

- 1)位置（緯度、経度、高度）
- 2)速度、方位
- 3)時刻、日付（無停電時計内蔵）
- 4)受信衛星の状況（仰角、方位角、S/N値）
- 5)受信衛星のPDOP（又はHDOP）
- 6)衛星の予報による測位時間
- 7)目的地方位、距離
- 8)平均速度、平均方位
- 9)経過時間、目的地所要時間
- 10)航路偏差
- 11)潮流の流向・流速の計算（但し外部インターフェース使用時）



図9 KGP-900 GPS航法装置

記憶機能

- 1)一時記憶 20点
- 2)通常記憶 100点

警報機能

- 1)目的地到着
- 2)航路偏差
- 3)離錨
- 4)境界線

補正機能

- 1)世界の各種の測地系の自動計算及び手動補正
- 2)ジオイド高及び地磁気の自動及び手動補正
データ出力

NMEA-0182、 - 0183、 LR-717フォーマット

電源

DC11-40V 15W以下

AC100/115V 200/230V

ACの場合には電源整流器PS-003Aのオプションが必要。

5 . 測位実験

5 - 1 固定点測位

山梨県上野原町にある上野原事業所内の寮屋上での測位実験結果を示す。この場合は、工場敷地内に三角測量で求めた正確な位置が示されていて、寮屋上のアンテナ位置は、北緯 $35^{\circ}38.280'$ 、東経 $139^{\circ}06.388'$ 、高さ295mである。本開発によるGPS航法装置は、各種の測地系を内蔵しており、WGS-84の測地系から東京測地系に変換して測位を行っている。この場合での4衛星による3次元測位、3衛星による2次元測位の実施例を示す。3衛星での測位時には高さの入力が必要であり、高さ(標高)を295mとした。図10は、高さを入力しての2次元測位の分布図であり、航法用の平滑化フィルタは、「断」の状態を示す。この時のHDOP値は3~4であり、また使用衛星番号は3、6及び12である。図11は、図10の2次元測位分布のフィルタを「接」にした状態を示している。この

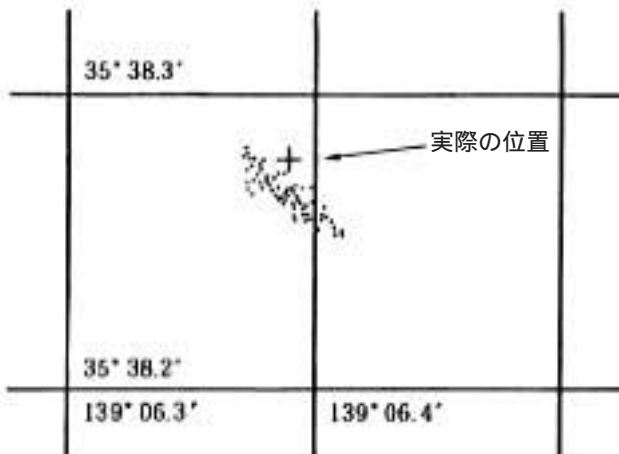


図10 2次元測位分布図(フィルタ「断」)

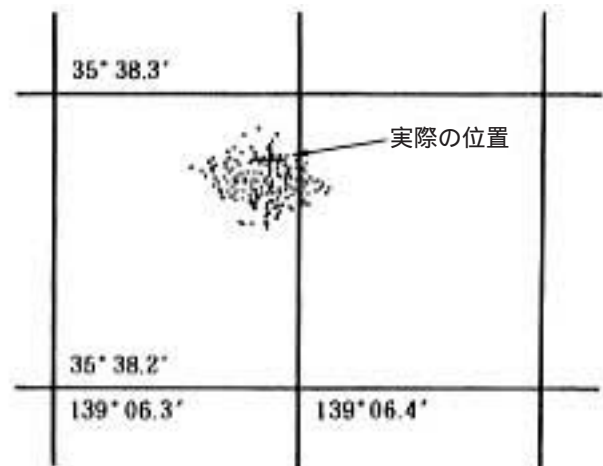


図12 3次元測位分布図(フィルタ「断」)

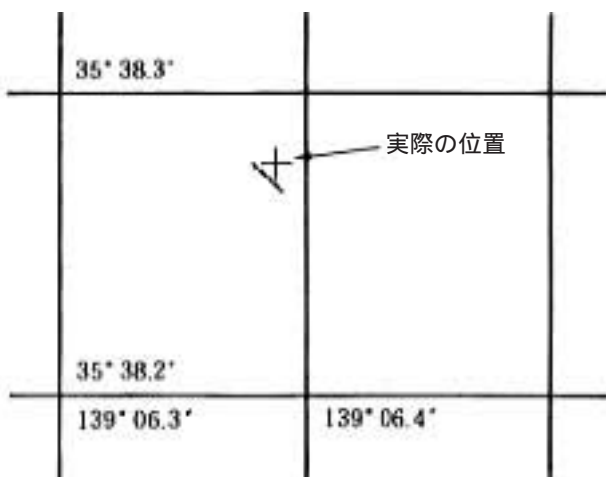


図11 2次元測位分布図(フィルタ「接」)

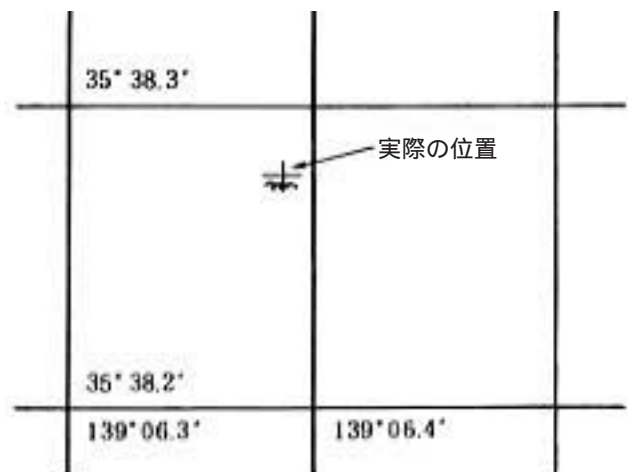


図13 3次元測位分布図(フィルタ「接」)



図14 走行実験による測位結果
 (国土地理院発行1:25,000地形図「四天木」に測位データを太線で記載した)

表1 固定点測位分布データから求めた平均位置並びに中心からのばらつきの偏差

		平均位置			中心からのばらつきの偏差	
		緯度	経度	高さ	緯度方向	経度方向
2次元測位 図10のデータ	HDOP =3~4	35° 28.269 (- 20.3m)	139° 6.387 (- 1.5m)	295m入力 —	± 28.3m	± 23.7m
2次元測位 図11のデータ	HDOP =3~4	35° 38.271 (- 20.3m)	139° 6.384 (- 1.5m)	295m入力 —	± 9.5m	± 9.4m
3次元測位 図12のデータ	HDOP =5~6	35° 38.272 (- 20.3m)	139° 6.384 (- 1.5m)	320m (+ 25m)	± 23.7m	± 35.3m
3次元測位 図13のデータ	HDOP =5~6	35° 28.274 (- 20.3m)	139° 6.386 (- 1.5m)	320m (+ 22m)	± 2.9m	± 10.6m

注：緯度、経度の（ ）内は、実際の位置からの偏差を示す。+方向は、それぞれ北、東を示す。

時のHDOP値、使用衛星番号は、図10の場合と同様である。

図12、13は3次元測位の分布図を示し、それぞれフィルタを「断」、「接」にした状態を示している。この時のPDOP値は5~6を示しており、また使用衛星番号は3、6、9、及び12である。

表1は、図10~13の測位分布データより求めた平均位置並びに中心からのばらつきの偏差を示している。

表1から2次元、3次元測位データの平均位置は、実際の位置よりそれぞれ20m、30mの偏差を示している。

フィルタの効果は、当然平均位置の改善はないが、ばらつきの偏差の量が約1/3に減少しているのが分かる。

また一般に絶対精度を示す2drms値は、実際の位置からの95%測定値が入る確立円又は球を示し、表1のデータでは、2次元の場合47m（フィルタ「断」）、26m（フィルタ「接」）、3次元の場合56m（フィルタ「断」）、41m（フィルタ「接」）を示している。

5 - 2 走行実験

現在打上げられている衛星の数が少ない状況下で、走行実験に適した視野の良い場所ということで、千葉県の上九十九里浜波乗り道路を選び走行実験を行った。図14は、本装置の走行実験で測位した航跡を地図上の位置にプロットした図を示す。この時の状況は、3衛星での2次元測位であり、HDOP値は10以下、使用衛星は6、9及び12である。HDOP値が10以下の悪条件の中であるために走行中の測位位置は、平均35~60mのずれを生じている。右側の速度表示は、走行時の速度状況であり走行速度は約53~58km/hを示している。

6 . あとがき

ここでは航法用GPS受信機の開発並びに評価実験等を示した。この受信機は、航海用の多くの機能を持つ船舶向けの装置であるが、自動車等の中速度下で、位置・速度において十分満足な結果が得られた。また固定点測位状況下でのrms値で30m以下を実現しており、この時の速度安定度は平均0.05kt以内を示し、実験の走行中の速度精度0.1ktを十分満足した。本装置は、5チャンネル型の特徴を十分に備えているため、衛星の速やかな捕捉が必要な小型航空機にも十分実用可能と思われる。今後のシステムの完成に伴い、船舶はもちろんのこと自動車、小型航空機等に応用分野が拡大し、ますます小形化・低価格化への要望が増大するするだろう。最近米国防総省の要請により民間用C/Aコードの劣化(SA)が決定されており、測位制度は2drmsで100mになると予想されている。今後、他の装置とのハイブリッド航法化やディファレンシャルGPSの応用化も必要となるであろう。

感謝

GPS衛星受信用アンテナの開発及び測定に関し、絶大なご指導をいただきました東洋大学工学部電気工学科の石首根孝之教授に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)Global Positioning System、The Institute of Navigation、 (1980)and (1984)
- 2)W . T . Higgins Jr . , D . C . Mossman and J . L . McClurg : Satellite Selection for the Global Positioning System (1983)
- 3)J . A . Klobuchar : Ionospheric Corrections for the Signal Frequency User of the Global Positioning System (1982)
- 4)A . H . Phillips : Geometrical Determination of PDOP、 Journal of the Institute of Navigation、 31 (1985)
- 5)西周次 : カルマンフィルターの航法への応用、 、 、 航海(1977)

出典

光電技報第5号 平成元年2月
(株)光電製作所 多摩川事業所出版