空機に対する衛星利用の二つの柱である GPS を中心とする航法衛星と航空管制用航空衛星の動向について述べた。昨年来航空衛星に関する動きが急に活発になっており、時宜を得た国際標準化が ICAO において達成され、衛星利用による洋上管制の近代化と、その実現による最短航空路による安全な運航が実現する日はそう遠い夢ではなくなっている。また航空衛星 (ETS-V) 実験計画をもつ日本がこの分野で国際貢献を果たしていくことが期待される。

最後に本解説執筆の機会に恵まれたこと、ならびにご指導いただく上司各位に深謝する。この拙文が何かのお役に立てば幸いである。

参考文献

- 1) Intrim Report of Special Committee-155, RTCA Paper 543-85/SC-155-157, Nov. 6, 1985.
- 2) たとえば初期のものでは, Global Positioning System, Papers Published in NAVIGATION, The Institute of Navigation, Vol. I, 1980; Vol. II, 1984.

- 3) 尾原弘晃, 坂田克己, 山内 顯: GPS を利用した宇宙基地フリーフライヤの軌道決定, 日本航空宇宙学会誌, 34 (1986), pp. 38-45.
- 4) Yakushenkov, A.: Development of Satellite Navigation System for USSR Merchant Marine, Conference of Royal Institute of Navigation, London, 1984.
- 5) The Promise of NAVSAT for Civil Navigation, IEE Conference Publication, No. 222, 7-9 June, 1983.
- 6) Höfgen, G.: The Global Radio Navigation System, Fifth International Conference of International Association of the Institute of Navigation in Tokyo, 1985.
- 7) Global Positioning System as a Sole Means for Civil Aviation, IEEE Plans, 1984.
- 8) とくに Differential GPS の標準化に関し, Differential GPS Standards, SEA Technology, March, 1985.
- 9) Space Based Radar Application to Air Traffic Control, RTCA Paper 590-85/SC-155-163, 1985.
- 10) たとえば, 長谷良裕ほか: EST-V を用いた移動体衛星実験システム, SANE-31 電子通信学会, 1985.
- 11) たとえば, 石出 明ほか: ETS-V を用いた航行援助実験計画 (その 3), 電子航法研究所研究発表会, 1986, 5.
- 12) Aviation Satellite System (Part I) Aircraft Installation Provisions ARINC Characteristic 741, ARINC News letter, Feb. 21, 1986.

—特 集—

GPS を利用したハイブリッド航法システム*1

田 辺 徹*2・張 替 正 敏*3

Key Words: Hybrid Navigation, Avionics, Filter

1. はじめに

衛星を使った電波航法である GPS は、全世界で常時高精度な 3 次元航法が可能であることから、次世代の航空機、地球近傍の人工衛星の航法を担うものとして近年注目されてきている。本稿ではこの GPS を利用したハイブリッド航法システムの解説として、はじめに航法システムをハイブリッド化する目的について述べ、次にその具体的な構成法を当研究室および海外での研究成果を引用しながら説明する。ここではとくに航空機、人工衛星の航法に応用するとの立場から

著者紹介

田辺 徹 (正会員)

昭和 36 年東京大学工学部航空学科卒業。昭和 42 年同大学院博士課程修了。東京大学工学部航空学科教授。軌道、航法、制御および航空宇宙機器の研究、教育に従事。工学博士。日本ロケット協会、計測自動制御学会各会員。IFAC 宇宙委員会委員、IAF 国内委員会委員。

張替 正敏 (学生会員)

昭和 34 年生。奈良県出身。昭和 57 年東京大学工学部航空学科卒業。昭和 59 年同大学院修士課程修了。同年同大学院博士課程進学。現在に至る。航空機、人工衛星の航法、制御、フライト・マネージメント・システムの研究に従事。

*1 昭和 61 年 5 月 28 日原稿受理 Hybrid Navigation System with GPS

*2 東京大学工学部航空学科 Toru TANABE

*3 東京大学大学院 Masatoshi HARIGAE

GPS を使ったハイブリッド航法システムの適切な構成法について考え、その特徴と性能を解説する。最後にハイブリッド航法システムでは将来主流となると考えられるデジタル型の GPS レシーバーについて言及し、当研究室で開発したレシーバーを例として取り上げその構成と利点について述べる。

2. ハイブリッド航法システムの目的

航法系をハイブリッド化する目的はとくに航法機器を多数搭載することによって冗長度が増し信頼性が向上するといったものではなく、ハイブリッド化された航法機器が互いに相手が必要とする情報を供給し合うことによって全体として性能が向上することにある。とくに、相補的な情報交換によってハイブリッド航法システムではシステムがクローズ化し各センサーの誤差を推定、除去できる。各システムの使用条件が緩和され全体として低価格化が可能になる。異なる機器からの情報により耐故障性のある信頼度の高いシステムができる、等の性能の向上が期待できる。たとえば GPS はそれ自身常時 3 次元航法情報を供給することができるが、慣性航法システム (INS) とハイブリッド化し、GPS-INS 間で情報の交換を行うことによって姿勢情報を供給することができる。高ダイナミクス下でレシーバーが GPS 信号をトラッキングする際に INS 情報を使って信号の捕捉ミス (ロックロス) を防ぎ航法精度の安定化を図ることができる。レシーバーの初期化、GPS 信号の再捕捉 (ロックオン) がスムーズに行える等の性能の改善が得られる。さらにハイブリッド化の対象となった INS 側でも欠点といわれてきたドリフト・エラーを GPS からの精度のよい航法

情報を使用することによって推定、除去でき低価格の加速度計、ジャイロを使用しても長時間の航法を行うことができるなどハイブリッド化によって GPS、INS 双方の航法機器の欠点が除去される。このようにハイブリッド化はたんに冗長度を増すように行うのではなく、結果全体としての性能の向上が期待できるように機器の組合せ、構成を考える必要がある。以下、具体的に航空機、人工衛星の航法に応用するとの立場から GPS を利用したハイブリッド航法システムの構成を考え、その特徴と性能を明らかにする。

3. GPS のハイブリッド航法システムへの応用

航空機、人工衛星の航法に利用されるハイブリッド・システムとして GPS との組合せの対象には相補的な情報が得られるものとして慣性航法システム、光学システム (スター・トラッカー、地球センサー、地表観測センサー)、その他マグネティック・コンパスなどが考えられるが、なかでも GPS、INS、そしてスター・トラッカーを用途に合わせうまく組み合わせたものが適当であると考えられる。これは GPS は長時間精度の高い 3 次元航法情報を供給できること、INS はドリフトはあるが高ダイナミクス下でも応答性がよく広帯域の 6 次元航法情報が供給できること、スター・トラッカーは低ダイナミクス下であれば精度の高い姿勢情報が供給できることと、それぞれのシステムが他にない特徴をもっているからである。

3.1 航空機へのハイブリッド・システムの応用^{1,2)}
 マニューバーを行ったり、ガスト中を飛行したりして、高ダイナミクス下にあるような航空機の航法システムとしては、GPS と INS を組み合わせたハイブ

第1図 GPS-INS ハイブリッド航法システムの構成

第1表 GPS-INS ハイブリッド航法システムと
GPS 単独による航法システムの性能比較

システム	GPS-INS ハイブリッド	GPS 単独
位置誤差 (RSS)	6.0 m	7.5 m
速度誤差 (RSS)	0.08 m/s	0.28 m/s
姿勢誤差 (N)	0.03°	—
(E)	0.02°	—
(D)	0.30°	—
時計バイアス	2.5 m	3.0 m
時計ドリフト	0.04 m/s	0.06 m/s

注：直線飛行する航空機をトラッキングしたシミュレーション結果

姿勢誤差のうち、Down軸まわりは収束しないため50秒後の結果を示す。

ジャイロ・バイアスは $10^\circ/\text{h}$ 、加速度計バイアスは 10^{-4}m/s^2 。

リッド・システムが適している。このシステムの構成は第1図のようになっており、まずGPSから出力されたシュード・レンジとレンジ・レートのデータは、INSの航法誤差のダイナミクスをもつ航法フィルター（通常は拡張カルマン・フィルターが使われる）に送られINSのドリフト・エラーの発散を抑え、加速度計およびジャイロのバイアス誤差を推定、除去するのに使用される。この結果、比較的低精度の加速度計、ジャイロを使ったINSでもドリフト・エラーの発散なしで長時間航法を続けることができるようになる。第2表¹⁾に定常状態に入ったときのGPS-INS ハイブリッド航法システムの航法誤差をGPS 単独によるものと比較して示してある。

一方、ドリフト・エラーを除去された後のINSからは広帯域の6次元情報が得られる。この情報はGPS レシーバーに適当な形に変えて送られ高ダイナミックス下でのレシーバーのロックロスなどを防ぐのに役立つ。第2図¹⁾はガスト中を飛行するボーイング747をGPS 単独による航法システムとGPS-INS ハイブリッド航法システムでトラッキングしたシミュレーション結果で実線が実際の飛行経路などを示し、点線はそれぞれのシステムでトラッキングした結果を示している。ハイブリッド・システムの方はINSからの広帯域の情報を利用することができるので機体の動きによく追従しているが、GPS 単独のほうはGPSからの情報が精度は良くても電波航法ゆえ低帯域性のためトラッキングの性能は良くなく最終的にはレシーバーのロックロスを起こしている。

GPSをこのようにハイブリッド化して航空機の航法システムとして用いるという研究は海外でも広く行われている。とくにGPSの高精度情報を使ってINSのドリフト・エラーを抑えようとするものが多く³⁻⁷⁾GPS側にも情報を送ることを考えたものとしては、INS情報を速度情報の形で送っているもの^{8,9)}、さらにカルマン・フィルターと一体化させたもの¹⁰⁾がある。当研究室では両者の特徴をうまく組み合わせ耐故障、耐ノイズ性能を飛躍的に向上させた構成法を提案している^{11,12)}。

3.2 人工衛星へのハイブリッド・システムの応用^{13,14)}

宇宙空間では姿勢情報を得るのに恒星が使

第2図(a) GPS-INS ハイブリッド航法システムによる
ガスト中を飛行する航空機のトラッキング例
上のグラフは位置、下のグラフは速度のトラッキング例

第2図(b) GPS 単独のシステムによるガスト中を飛行
する航空機のトラッキング例
上のグラフは位置、下のグラフは速度のトラッキング例

えるためスター・センサを INS 以外にハイブリッド化の対象として使用することができる。そこで、従来のような低ダイナミックスの人工衛星では、GPS とスター・トラッカーを組み合わせ、位置・速度情報は GPS レシーバーから、姿勢情報はスター・トラッカーから得るという組合せが適当であると考えられる。GPS とスター・トラッカーとを組み合わせたハイブリッド・システムの構成を第 3 図に示す。このシステムでは航法フィルター部には衛星のダイナミックスを適当な微分方程式で仮定しておき、GPS とスター・トラッカーからの情報を観測量としてアップデートしながら 6 次元航法情報を出力する。この際、位置・速度関係の変数と姿勢関係の変数を分離させてアルゴリズムを組んでおくと、航法性能を落とすことなしに計算量を減らすことができる。スター・トラッカーのかわりに従来からある太陽センサ、地球センサの出力を姿勢情報としてハイブリッド・システムに利用することも可能であるが、これらは精度上、使用可能時間に制限がある(衛星、地球、太陽の位置関係による)などからスター・トラッカーに比べると性能が落ちる。

一方、テレオペレーターのように自ら積極的にマニューパーを行うような将来型の人工衛星では、GPS、スター・トラッカーのような低帯域の情報だけではトラッキングの性能が落ちる。また、GPS レシーバーのアンテナがマニューパーの結果、GPS 衛星とは逆を向き信号入力が一時的に途絶えた後の再ロックオンに時間がかかるなど問題があるため、さらに INS を追加

した GPS-INS-STAR のハイブリッド・システムが適当であると考えられる。構成は第 4 図のようになっており、これは前述の GPS-INS システム、GPS-INS-STAR システムを組み合わせた形になっており、それぞれのシステムで得られる利点はあわせて兼ね備えている。第 5 図にヨー・マニューパーする人工衛星をトラッキングした結果を INS を加えたハイブリッド・システムと INS なしのシステムの場合を、ヨー角推定誤差を例として比較して示す。前者のほうが高ダイナミックス下でも安定した航法情報が出力できることがわかる。

宇宙空間において GPS を使うという研究はアメリカにおいて具体的に進められており、GPSPAC という名前で最初のシステムが作られその搭載実験が LANDSAT-4 において行われた¹⁵⁾。宇宙空間でのハイブリッド・システムの研究は航空機に比べると比較的少ない。

このように GPS を利用したハイブリッド・システムは航空機、宇宙用ともに有効であると考えられるが、これらを有効に複合化させるには前述したように互いに相手が必要とする情報を密に交換する必要がある。

このためには情報の交換、複合化を各信号レベルで柔軟に行う必要がある。ハイブリッド・システムには信号処理を搭載コンピュータで行うようなデジタル型の GPS レシーバーが適していると考えられる。

第 3 図 GPS-STAR ハイブリッド航法システムの構成

第4図 GPS-INS-STAR ハイブリッド航法システムの構成

第5図 ヨー・マニューバーする人工衛星のトラッキング例

GPS-STAR ハイブリッド航法システムと GPS-INS-STAR ハイブリッド航法システムのヨー角推定誤差の比較

4. デジタル型 GPS レシーバーの概要と特徴

デジタル型のレシーバーは、信号処理をコンピュータで行うため、異なった機器間との情報交換が容易でハイブリッド航法システムには適している。とくにINSを複合化する場合、その広帯域の情報を利用できるようなレシーバーは、さまざまな形でINSからのデータを取り入れ処理している。たとえば、INSからの速度情報をレシーバー内でGPS信号のドップラー・シフトを測定するコースタス・ループに取り入れるとループの非線形性によるレシーバーのロックロスやサイクル・スリップを抑えることができるが、その際コースタス・ループがアナログ回路ではなく、コンピュータ上でソフトウェアの形で組み込まれていれば、こういった信号処理が非常に容易に行うことができるわけである。

当研究室では、このようにハイブリッド・システムではデジタル型のレシーバーが主流になると考え第6図のようなGPSレシーバーを設計、製作した。これは各信号レベルで外部との情報のやり取り、統合化などが柔軟に行えるようになるべく原信号に近いところからデジタル化を行っている。アンテナから入力されたGPS信号は約50 dBのプリアンプを通ったあと、71 MHzまでダウン・コンバートされる。さらに40 dBほど増幅された信号はレシーバーのC/Aコー

第6図 デジタル型GPSレシーバーの構成

ド発生器からの信号によって逆拡散される。その後 I、Q 信号に分けられた信号はもう一度、ベース・バンド信号になるまでダウン・コンバートされる。この際残った搬送波はドップラー・シフトによるものだけ(7~7kHz)である。このレシーバーでは、この信号を A/D 変換し、これ以降の信号処理はすべてコンピュータで行う。まず、ドップラー・シフトをトラッキングし、GPS メッセージを取り出すコースタス・ループは DSP (Digital Signal Processor) と呼ばれる高速なプロセッサですべて行い、VCO、NCO などの周波数可変型の発振器は使っていない。C/A コードをトラッキングするコード・ループは 4 チャンネル共用の 8086 プロセッサで行っている。DSP と 8086 はバス・ラインを通じてデータのやり取りができ、さらに 8086 は外部とのデータの入出力 (レシーバーの液晶パネルと GPIB) を管理しており、GPS 衛星の軌道を計算したり、カルマン・フィルタを使った航法演算、また地図上に現在位置を表示したり、レシーバーの内部情報をモニターする外部コンピュータと GPIB を通じて情報のやり取りを行っている。DSP のプログラムは 8086 側の EPROM に 8086 のプログラムとを合わせて書かれており、システム立ち上げ時にバス・ラインを通じて DSP の RAM に送られている。

プログラムの変更は容易で、さらにループのゲインなどは 8086 の制御によって常時変更可能のようにプログラムされている。現在のところプログラムはそれぞれ、DSP がアセンブラ、8086 が PL/M、UX-300

第7図 デジタル型GPSレシーバーの航法結果 (固定点でのトラッキング例)

が C、PC 9801 が BASIC を使って書かれており、数値演算プロセッサは使用していない。この結果、このレシーバーは従来のものと異なり、1) 各レベルでの信号の入出力が容易、2) 信号処理をソフトウェアで

行うので複雑な回路の設計, 変更が容易, 3) レシーバーのモード設定などコントロールが容易, 4) アナログ素子が少ないためレシーバーの小型軽量化, 低価格化が期待できる, などの特徴がある.

航法結果の一例を第7図に示す. これはアンテナを当研究室の屋上に設置し (固定), 3衛星を使って航法を行った結果である.

5. さ い ご に

GPS から出力されるデータは位置および速度情報 (他に時刻情報もある) に限定され, その情報も電波航法特有の狭帯域性のため高ダイナミクス下では十分ではないといった観点から, INS およびスター・トラッカーとハイブリッド化し航空機, 人工衛星に応用する手法について解説した.

さらに今後重要であろうと思われることは, ハイブリッド化するという前提のもとでの各センサー, 機器の構成および性能の再検討があらう. たとえば慣性航法システムとハイブリッド化する GPS 受信機は GPS 単独の受信機とは異なる思想で設計する必要があるはずである. その結果, 従来の受信機とハイブリッド化させるよりも性能の向上が得られたり, 受信機の構成が簡単化するなどの利点が生じるであらう. 今後はこの方面の研究が待たれる.

参 考 文 献

- 1) 田辺 徹, 張替正敏: GPS を用いた複合慣性航法システムの構成とその特性, 第27回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 1983.
- 2) 田辺 徹, 張替正敏, 伊藤康弘: 種々の複合慣性航法システムの性能比較, 第27回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 1983.
- 3) Cox, D. B., Jr.: Integration of GPS with Inertial Navigation Systems, NAVIGATION, 25, Summer (1978), pp. 236-245.
- 4) Mcyers, K. A. and Butler, R. R.: Simulation Results for an Integrated GPS/Inertial Aircraft Navigation System, IEEE NAECON '76 Record, pp. 841-848.
- 5) Brockstein, A. J.: GPS Kalman Augmented Inertial Navigation System Performance, IEEE NAECON '76 Record, pp. 864-871.
- 6) Stuerza, M. A., Brown, A. K. and Kemp, J.: GPS/AHRS: A Synergistic Mix, IEEE NAECON '84 Record, pp. 339-348.
- 7) Kriegsman, A. K. and Stonestreet, W. M.: A Navigation Filter For an Integrated GPS/JTIDS/INS System for a Tactical Aircraft, IEEE NAECON '78 Record, pp. 316-318.
- 8) Carrol, R. W. and Mickelson, W. A.: Velocity Aiding of Non-Coherent GPS Redeiver, IEEE NAECON '77 Record, pp. 311-318.
- 9) Jones, H. L. and Macdonald, T. J.: Comparison of High Anti-Jam Design Techniques for GPS Receivers, IEEE NAECON '78 Record, pp. 39-46.
- 10) Copps, E. M., Geier, G. J., Fidler, W. C. and Grundy, P. A.: Optimal Processing of GPS Signals, NAVIGATION, 27, Fall (1980), pp. 171-182.
- 11) Tanabe, T., Harigae, M. and Koyama, H.: New Integration Scheme of GPS-INS Hybrid Navigation System for Maneuvering Spacecraft, Xth IFAC Symposium on Automatic Control in Space, 1985.
- 12) 田辺 徹, 張替正敏: GPS-INS 複合航法系における複合化の新手法及びその特性, 第28回宇宙科学技術講演会予稿集, 1984.
- 13) Tanabe, T., Harigae, M. and Koyama, H.: Autonomous GPS-INS-STAR Integrated Navigation System for Maneuvering Spacecraft, 35th IAF Congress, IAF Paper 84-375 (1984).
- 14) 田辺 徹, 小山 浩, 張替正敏, 中須賀真一: GPS-INS-STAR 複合航法系の誤差解析, 第28回宇宙科学技術講演会予稿集, 1984.
- 15) Birmingham, W. P., Miller, B. L. and Stein, W. L.: Experimental Results of Using the GPS for Landsat 4 Onboard Navigation, NAVIGATION, 30 (1983), pp. 244-251.