

人工衛星搭載用 GPS 受信機

Spaceborne GPS Receiver System

前田 裕昭
MAEDA Hiroaki五日市 敦
ITSUKAICHI Atsushi内田 千秋
UCHIDA Chiaki

1998年4月に、宇宙開発事業団(NASDA)は、世界で初めてのランデブドッキング用GPS(Global Positioning System)相対航法システムの実験に成功した。これは、ETS-VII(技術試験衛星VII型)に搭載されているもので、当社が開発した2台のGPS受信機のデータを使用してその相対位置と相対速度をリアルタイムで計算・出力するものである。このデータは、無人でのランデブドッキング実験に使用される。

このGPS相対航法システムは94年に日本で初めて人工衛星に搭載されたGPS受信機、96年に行われた日本版スペースシャトル実験用の差分型GPS航法システムの開発に続くもので、当社ではさらに衛星群プロジェクトに向けた次世代のGPS受信機の開発を開始している。

In April 1998, we successfully verified a global positioning system (GPS) relative navigation system used for the unmanned rendezvous of the Engineering Test Satellite VII (ETS-VII) in space. This system, which outputs relative navigation results between two GPS receivers on two spacecraft, was the first such system to be developed in the world.

This paper describes the GPS relative navigation system and its flight data. The first spaceborne GPS receiver system in Japan, and a differential GPS system for an automatic landing system, are also described.

1 まえがき

98年4月現在、地上高度2万kmの上空を、27個のGPS衛星が、約12時間かけて地球を周回している。これらのGPS衛星は、航法信号(以下、GPS信号と略記)を地球へ向けて送信しており、われわれはその信号を受信する機器(以下、GPS受信機と略記)を搭載することで、自分自身の位置・速度・時刻を正確に知ることができる。自動車の装備品としての地位を確立したカーナビゲーションシステムも、その中核にはGPS受信機が使われている。

当社では、86年から人工衛星に搭載するためのGPS受信機の研究・開発を進めてきた。それまで多くの人手に頼ってきた人工衛星の運用管制の省力化のためには、GPS受信機の自律性が不可欠であるとの判断があったからである。

その後、日本で初めての人工衛星搭載用のGPS受信機を開発した。このGPS受信機は、NASDAのOREX(Orbital Re-Entry Experiment:大気圏再突入実験)衛星に搭載されて94年2月に打ち上げられ、軌道上での飛翔(しょう)データを取得することができた(衛星そのものは、後に“流星”と名付けられた)。また、航空機の精密進入・自動着陸用として開発した差分型GPS航法システムは、NASDAのAL-FLEX(Automatic Landing FLight EXperiment)実験に使用された。このシステムは、GPS信号と似た信号(擬似衛星信号の意味で“シュードライト信号”と呼ばれる)を送信するシュードライト地上局を含んでおり、自動着陸実験機に

搭載されたGPS受信機はGPS信号と、シュードライト地上局からのシュードライト信号との差分をとりながら、精度の高い航法結果を出力する。

その後開発したGPS相対航法システムは、ETS-VIIIに搭載された。このシステムは、二つの宇宙機に搭載したGPS受信機で観測したデータの相互の関係から、二つの宇宙機間の相対位置・相対速度を求めるもので、宇宙でのランデブドッキングで使用するために開発したものである。これは、98年4月に、世界で初めての“軌道上でのGPS相対航法”を行って、その有用性が確かめられている。

2 人工衛星搭載用 GPS 受信機

人工衛星搭載用のGPS受信機について、基本構成、要求される機能とそれらの関連、また人工衛星に特有の困難さなどについて次に示す。

2.1 GPS 受信機の基本構成

GPS受信機の基本構成を図1に示す。その基本構成は地上用GPS受信機と変わりなく、それぞれ五つに分類される。

- (1) アンテナ 1.575 GHzを中心とした2 MHzの帯域をもつGPS信号を受信する。
- (2) アナログ部 受信したGPS信号を増幅するとともに、中間周波数信号帯域にダウンコンバートする。また、ダウンコンバートのために、水晶発振器からの基準信号を使用したローカル信号を生成する。

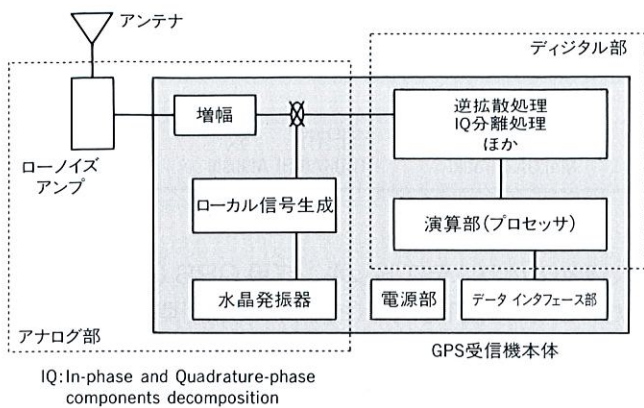


図1. GPS受信機の基本構成 アンテナ、信号の周波数変換を行うアナログ部、受信信号の復調や航法演算を行うデジタル部などから構成されている。

Generic block diagram of spaceborne GPS receiver

- (3) デジタル部 現在のGPS信号受信技術ではデジタル部の果たす役割は大きい。GPS信号を高速で離散化/量子化し、GPS信号を追尾して、最終的には位置・速度・時刻(以下、航法結果と称呼)を計算する。
- (4) インタフェース部 GPS受信機が計算した航法結果を外へ出力したり、GPS受信機へ対するコマンドを受信する。
- (5) その他 GPS受信機内部のすべてのクロックの基準信号となる高安定水晶発振器、電源部などがある。

2.2 機能

GPS受信機の主要機能の関連を図2に示す。人工衛星搭載用としての特徴は、人工衛星の軌道伝搬機能が入っている点である。

- (1) GPS衛星選択 現在飛行中の場所で受信できると思われるGPS衛星を選択する。これは、地球の影に隠れていないか、また、人工衛星に設置されているGPSアンテナの覆域内にあるかどうかで判断する。
- (2) PRN(擬似ランダムノイズ)コードサーチ 選択さ

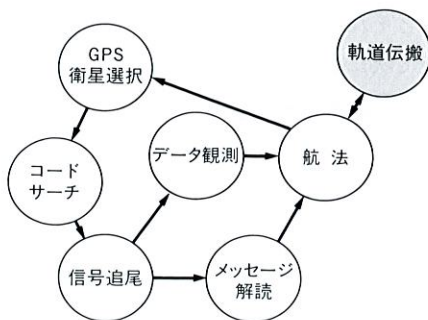


図2. GPS受信機の機能系統 七つの主要機能からなる。人工衛星搭載用として特徴的なのは、軌道伝搬・航法機能がある点である。

Functional block diagram of spaceborne GPS receiver

れたGPS衛星が出力するGPS信号に含まれているPRNコード位相に対して、GPS受信機が生成するレプリカ(複製)のPRNコードの位相が合う場所を捜す。これを、PRNコードサーチと呼ぶ。

- (3) GPS信号追尾 受信した信号に含まれるPRNコード位相と搬送波位相に対して、GPS受信機が生成するPRNコードレプリカと搬送波レプリカのそれぞれの位相を合わせるように、レプリカの生成を制御する。これにより、GPS信号の追尾受信が行われる。
- (4) GPSメッセージ解読 GPS信号に含まれるGPSメッセージを復調・解読する。GPSメッセージには、GPS衛星の軌道データや動作状況を示すヘルス情報が含まれている。
- (5) GPSデータの観測 GPS信号の追尾受信の過程で、GPS衛星との距離およびGPS衛星との相対速度を観測できる。この観測データは、航法に使用される。
- (6) 軌道伝搬 地球重力(場合によっては大気抵抗による加速度)を計算しながら、積分により人工衛星の軌道を伝搬する。
- (7) 航法 GPS受信機が地球上のどこにあるか、すなわち位置・速度・時刻などを計算することを“航法”と呼ぶ。通常のGPS受信機は、観測データから最小二乗法で航法を行う。人工衛星用のGPS受信機は、地球重力などのダイナミクスを正確に把握した軌道伝搬を行えることから、カルマンフィルタ法による航法を行うことができる。このカルマンフィルタによると、最小二乗法よりは、高精度の航法結果を出力できる。

2.3 人工衛星搭載用GPS受信機としての困難さ

人工衛星用としての困難さは、他の機器と同様に、宇宙で遭遇する放射線への耐性が要求されている点につきる。それ以外に、GPS受信機を人工衛星用とする点の困難さは下記の点にある。

- (1) 相対速度 自身が高速で飛行している。そのため、地上に設置されたGPS受信機と比較すると、相対速度のレンジが広く、その変化率も大きい。具体的には、地上の約5倍の±10 km/sの相対速度の範囲を考慮しなくてはならない。
- (2) GPS衛星の切替え 同様に、自身が高速で飛行しているため、可視である頭上のGPS衛星の切替わりが早い。
- (3) TTFF GPS受信機を起動してから、最初の航法結果を出力するまでの時間をTTFF(Time To First Fix)と呼ぶ。前述したように相対速度範囲の広さや、相対速度の変化率が大きいこと、またGPS衛星が頻繁に切り換わることで、TTFFを短くすることには困難な点が多い。一方で、早いTTFFを望むプロジェクトも多く、解決しなくてはならない点の一つである。

3 今までのGPS受信機の変遷

3.1 OREX用GPS受信機

OREX プロジェクトは、日本版スペースシャトルとなるHOPE (H-II Orbiting PlanE) の、大気圏再突入時の挙動を知るための実験で、94年2月に打ち上げられた。このプロジェクトに、日本で初めての人工衛星用GPS受信機を搭載した。軌道上でのGPS信号捕捉(そく)などについて、その後のプロジェクトへ反映できる貴重なデータを取得することができた。図3に、OREXの打上げから南太平洋へ着水するまでの動作概要を示す。

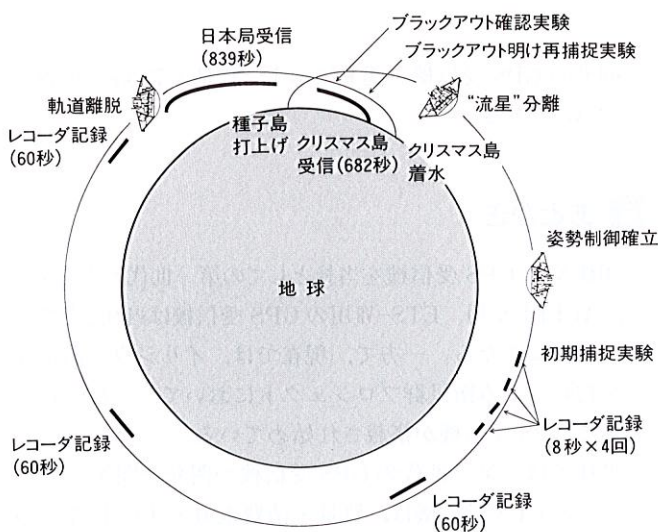


図3. OREX用GPS受信機の軌道上での動作概要 打上げから着水までの約7,000秒の間に、初期捕捉実験・航法実験が行われた。

Outline of GPS receiver experiment in OREX Project

3.2 差分型GPS航法システム

このシステムは、ALFLEXプロジェクトで採用された。ALFLEXプロジェクトは、HOPEの無人自動着陸のための実験で、96年6月から8月にかけてオーストラリアで行われた。図4に、ALFLEXが滑走路に向けて無人飛行を開始したときの状況を示す。

このシステムは、地上に設置された送信局と、ALFLEXに搭載されたGPS受信機からなる。GPS信号には誤差が含まれているので、地上局ではその誤差の大きさを推定する。推定された誤差は、地上局からGPS受信機へ向けて送信される。GPS受信機では、シュードライト信号を受信して解読することで、GPS信号に含まれる誤差を補正して、高精度の航法結果を外部へ提供することができる。

さらに、シュードライト信号の処理過程で地上局との距離を求めることができるが、これはまさにGPS衛星が地上に設置されているのと同じ効果をもたらすことから、地上

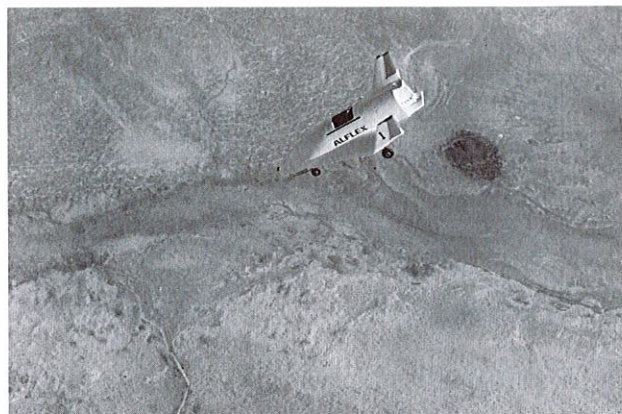


図4. 飛行中のALFLEX (写真提供:宇宙開発事業団) ALFLEXが滑走路に向けて、無人飛行を開始したときの状況を示す。

Flying ALFLEX plane

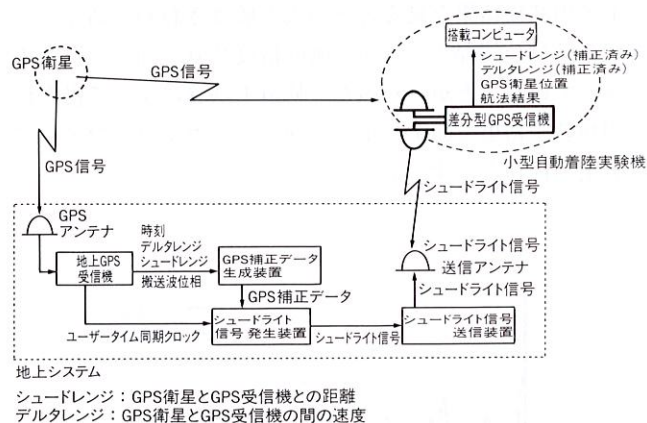


図5. シュードライト差分型システムの構成 シュードライト地上局とGPS受信機で構成される。

Configuration of Pseudolite Differential GPS System

局のことをシュードライト地上局と呼ぶ。このシステムの構成を図5に示す。

3.3 GPS相対航法システム

98年4月2日に、ETS-VIIに搭載されているGPS相対航法システムの軌道上での試験が終了した。ETS-VIIは、目標となるターゲット衛星と主体的に動くチェイサ衛星の二つの衛星からなり、チェイサ衛星がターゲット衛星を相手にして無人ランデブドッキングの軌道上実験を行う。そのなかでGPS相対航法システムは、ターゲット衛星に対するチェイサ衛星の相対的な位置・速度を計測するものである。

このシステムの構成を図6に示す。このシステムでは、ターゲット衛星に搭載されているGPS受信機からのデータと、チェイサ衛星に搭載されているGPS受信機のデータの差分をチェイサGPS受信機自身がカルマンフィルタで処理する。これにより、ターゲット衛星とチェイサ衛星の間の相対位置・相対速度を提供する。

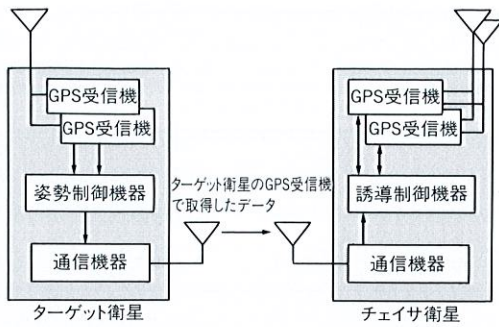


図6. GPS 相対航法システムの構成 ターゲット衛星のGPS 受信機からのデータを受け取って、チェイサ衛星のGPS 受信機が相対航法を行う。

Configuration of GPS relative navigation system

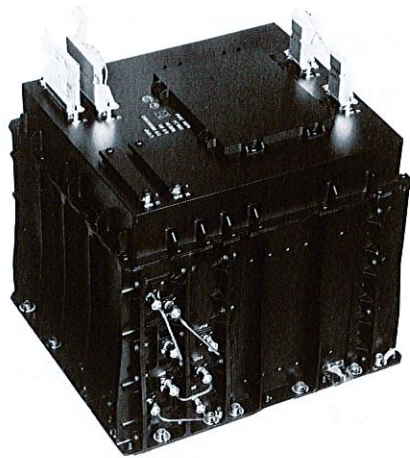


図8. 人工衛星用GPS 受信機(第二世代) 約25 cm立方である。熱の放射を良くするために、黒色に塗られている。

Second-generation GPS receiver used for ETS-VII

精度要求は、位置で26 m、速度で6 cm/sであった。軌道上での試験結果を見るとその実力値はきわめて高く、その収束値は位置精度で2 m、速度精度で0.2 cm/s程度まで達していることがわかった。軌道上試験によって得られた相対航法結果を図7に示す。図7は、カルマンフィルタの収束過程のようすである。

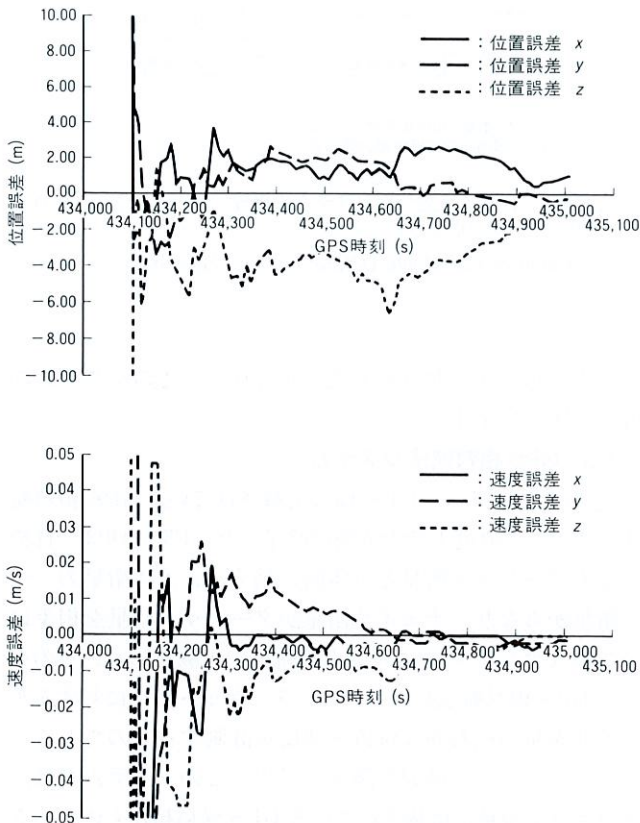


図7. GPS 相対航法システムの飛行データ(データ提供: 宇宙開発事業団) 人工衛星の進行方向をx, 進行方向右手をy, 地球方向をzとしたときの、相対航法結果の誤差である。収束に向かう過程がわかる。

Flight data of GPS relative navigation system

同型のGPS 受信機を図8に示す。質量7.75 kg、消費電力22 Wである。

5 あとがき

OREX用GPS 受信機を当社としての第一世代とするならば、ALFLEX用、ETS-VII用のGPS 受信機は当社としては第二世代にあたる。一方で、現在では、イリジウム衛星などを初めとする衛星群プロジェクトにおいて、それぞれの衛星にGPS 受信機が搭載され始めている。

当社では、第三世代のGPS 受信機の開発を開始している。このGPS 受信機は、質量・消費電力・TTFFなどのすべての性能について、第二世代を上回るものであり、今後の衛星群プロジェクトでの採用が期待される。

文献

- (1) Maeda, H. et al. A GPS Relative Navigation System for Space Use. 17th AIAA Intl. Conference. 1998.
- (2) 前田裕昭, 他. "流星" 搭載宇宙用GPS 受信機フライトデータの解析・評価. 東芝レビュー, 50, 1, 1995, p.67-70.



前田 裕昭 MAEDA Hiroaki

小向工場 宇宙機技術部主務。
人工衛星用GPS 受信機システム・GPS 受信機を使用した航法システムの開発・設計に従事。日本自動制御学会会員。
Komukai Works



五日市 敦 ITSUKAICHI Atsushi

小向工場 宇宙設計部主務。
宇宙用搭載機器の研究・開発に従事。電気通信学会会員。
Komukai Works



内田 千秋 UCHIDA Chiaki

小向工場 宇宙設計部。
宇宙用GPS 受信機の研究・開発に従事。
Komukai Works