

高精度軌道決定技術

Technology of Precise Orbit Determination

あらまし

富士通は1971年以来、日本における人工衛星の軌道決定システムの大半を開発し、その技術は各方面から高い評価を受けている。1990年代中ごろになると人工衛星による地球観測の高精度化・高度化に伴い、軌道決定精度に関して、従来のシステムでは実現し得ない高い精度が要求された。本要求に対し、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）（当時、宇宙開発事業団）様はGPSおよび衛星レーザ測距（SLR）を使用する高精度軌道決定システム（GUTS）の整備を企画し、その中核を成す軌道決定部分を富士通が開発した。富士通は、GUTSの運用も担当し、その中でシステムの改良を続け、高い軌道決定精度の維持・向上に努めている。

本稿では、GUTSの概要、富士通が担当した軌道決定にかかわるコア技術、現時点でのシステムの達成精度について紹介する。また、GUTSで培った技術をベースとした高精度測位実験システムの概要を紹介する。

Abstract

Since 1971, most domestic orbit determination systems have been developed by Fujitsu and its technology is highly evaluated by people involved in the field. In the mid-1990s, with the increased precision and sophistication of satellite Earth observations there was a need for greater accuracy in determining orbits that could not be provided by conventional systems. Thus, an independent administrative agency: the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA; formerly known as the National Space Development Agency of Japan) has planned the development of a Global and high accuracy Trajectory determination System (GUTS), which uses GPS and satellite laser ranging (SLR) technology. Fujitsu developed the core technology for this and operated the system. Furthermore, Fujitsu has been engaged in the operation of GUTS and is committed to maintaining and improving the precision of orbit determination technology through continuous improvement of this system.

This paper introduces the overview of the GUTS, core technologies related to orbit determination developed by Fujitsu and the current situation with regards to derived precision of orbit determination. It also describes the overview of a precise positioning experiment system based on our experience of using the core technology of GUTS.



片桐征治（かたぎり せいじ）
科学システムソリューション統括部
所属
現在、高精度軌道決定システムの運用と実験に従事。



山本洋介（やまもと ようすけ）
科学システムソリューション統括部
所属
現在、準天頂測位実験システムの開発に従事。

ま え が き

日本の宇宙開発機関で打ち上げられた人工衛星は、追跡管制と呼ばれる業務のもとに運用されている。追跡管制とは、軌道上の人工衛星に搭載された機器の動作状況を把握し、人工衛星を適切に制御し、所定の軌道に保持することである。このためには人工衛星の位置を正確に把握し、地上のアンテナで人工衛星との通信路を確保しなくてはならない。

本稿で述べる軌道決定とは、人工衛星の運動（位置と速度）を正確に把握するための技術である。富士通は1971年以来、日本の主要な宇宙機関において軌道決定システムを担当してきた。1990年代初頭までは、高度1000 km程度以下の人工衛星の位置精度に対する要求は数100 m～1 kmのオーダーであり、富士通が納入したシステムは、この要求に答えてきた。

1990年代中ごろになると、人工衛星による地球観測ミッションは高度化・高精度化を推進し、環境観測技術衛星（ADEOS-II：Advanced Earth Observing Satellite-II）、陸域観測技術衛星（ALOS：Advanced Land Observing Satellite）では、マルチスペクトルによる地表の光学観測・資源探査、および電波による昼夜を問わない観測を高精度に実施することとなった。軌道決定システムの位置決定精度に対する要求は、ADEOS-IIで10 m以下、ALOSでは1 m以下となり、これまでの技術では達成不可能になった。このような要求に対して、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）（当時の宇宙開発事業団）様は、米国で実証されたGPS（Global Positioning System）データを利用した高精度軌道決定システム（GUTS：Global and high accuracy Trajectory determination System）^{(1),(2)}を構築することを決定し、概念検討を開始した。富士通は、この検討に参加し、GUTSの構築を通して高精度軌道決定技術を蓄積した。

本稿では、GUTSの構築を通して富士通が培ってきた技術について、高精度軌道決定技術の概要、GUTSの概要、GUTSのコア技術、高精度軌道決定の達成精度、高精度測位実験システムへの展開という構成で紹介する。

高精度軌道決定技術の概要

本章では、高精度軌道決定技術について、はじめに、身近な例（カーナビ）について触れる。続いて

高精度軌道決定技術がその発展形であることを説明し、さらに高精度な軌道の精度検証手段について説明する。

● GPS衛星の利用による位置測定

GPS衛星を利用した位置測定の身近な例としてはカーナビがある。カーナビでは、GPS衛星から送信された電波（測位信号）を車載のGPSアンテナで受信し、自動車の位置などを計算する。計算に使用する観測データは擬似距離といい、GPS電波に含まれる衛星時刻と車載GPS受信機の時刻の差に光速を掛けて計算する。一般にGPS衛星とGPS受信機の時計はずれているため、算出される距離は実際の距離ではなく、「擬似」距離と呼ばれる。GPS衛星の位置と時計誤差はGPS衛星から放送されているため、カーナビの位置測定では四つの未知変数（自動車の3次元位置と時計誤差）を計算することになり、同時に最低4衛星の測位信号を受信する必要がある。

地球観測衛星のような高度1000 km程度以下を周回している人工衛星も、GPS衛星の高度（20 000 km）から見れば、幾何学的条件は地上と大差なく、基本的には同様の原理で位置と時計誤差を計算できる。

● 高精度軌道決定

GUTSではカーナビよりも更に高精度な位置計算を必要とするため、GPSから送信されている二つの周波数帯の電波を受信し、それぞれについて擬似距離だけでなく搬送波位相と呼ばれる、より高精度なデータも取得して計算に使用する。また、GPS衛星から放送されているGPS衛星の位置・時計誤差は精度的に不十分であるため、世界各地の地上GPS局の観測データを用いてGPS衛星の位置・時計誤差も精密に計算する。

観測データ以外では、非常に精密な衛星力学モデル・観測モデルも必要になる。GUTSは、国際地球回転・基準系事業（IERS：International Earth Rotation and Reference Systems Service）が発行している「Technical Note」の当時の最新版（IERS Conventions 1996）に準拠した力学モデル・観測モデルを導入した。これらモデルに使用される数値の中には、日々値が変化するものがあり、それらは海外のサーバから毎日取得して更新しなければならない。

● 精度検証の手段

GPSデータを使用すると高精度に人工衛星の軌道を決定することができるが、それを検証するためには同等の精度を持つ別の観測手段が必要である。衛星レーザ測距（SLR：Satellite Laser Ranging）はその手法としてよく使われる。SLRは、短いパルス幅を持つレーザを衛星に向けて照射し、そのパルスが衛星に搭載された反射器で反射されて戻ってくるまでの時間を数ピコ秒の精度で計測する。地球観測衛星のような低高度の衛星の場合、距離の測定精度は1 cm以内である。

高精度軌道決定システム（GUTS）

前章で述べたように、GUTSに必要な要素は、GPS受信機搭載衛星（ユーザ衛星）、地上GPS局、軌道決定計算機、インターネット上のデータを取得する計算機、SLR局、高精度軌道決定演算ならびに運用を行うソフトウェア群である。また、GUTSは高度に自動化されたシステムを目指しているため、観測を計画し、無人で実行し、これを監視する機能も必要になる。このようにして図-1に示すシステム全体像が出来上がった。図の中でGUTSの整備範囲

は以下に示す五つのサブシステムである。

(1) 中央監視/運用計画サブシステム

GUTSの軌道決定とSLRの運用計画を立案し、各サブシステムのステータスを監視する。

(2) GPS観測サブシステム

筑波宇宙センター（日本）、パース（オーストラリア）、サンチャゴ（チリ）、マスパロマス（スペイン領カナリア諸島）に設置されたJAXA/GPS局と、これらのデータを収集するGPS地上局管制サブシステムとから成る。

(3) SLR観測サブシステム

種子島のJAXA/SLR局と、これを遠隔操作するSLR局管制サブシステムから成る。

(4) 軌道決定サブシステム

GPS/SLRデータを使用して、人工衛星の軌道を高精度に決定・評価する。

(5) 外部インタフェースサブシステム

軌道決定に必要な各種データをインターネットおよび筑波宇宙センター内の他システムから受信するほか、衛星の高精度軌道情報をユーザに配布する。

● 概念検討段階における技術獲得

富士通はGUTSに関して、1994年の概念検討段

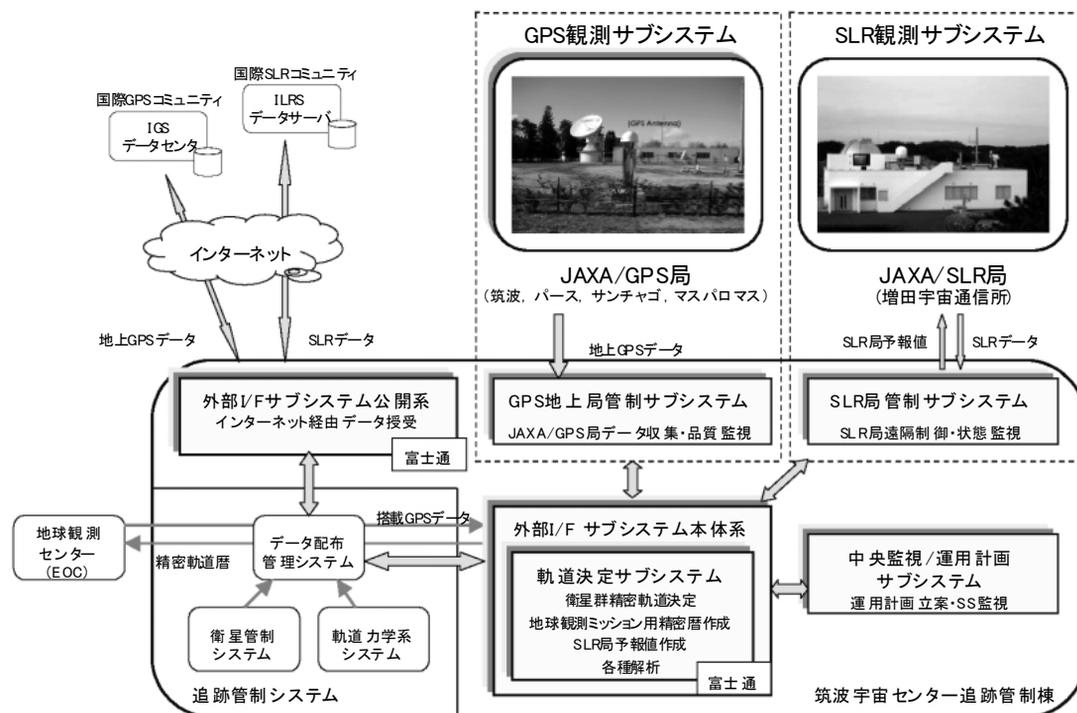


図-1 高精度軌道決定システム（GUTS）の構成
Fig.1-GUTS configuration.

階から参画している。概念検討段階では前章で述べた基本技術調査のため、最新文献^③の調査、米国ジェット推進研究所（JPL）への訪問などを行って高精度軌道決定技術の蓄積を行った。また、1996年からは既存の軌道決定システム（NOCS2）を改良して、SLRデータを利用した軌道決定実験を実施することで、SLRに関する各種モデル検証を行って、SLRによる軌道決定技術を蓄積してきた。

● 富士通担当のサブシステム

前節で述べた概念検討段階を経て、富士通は、1997年より軌道決定サブシステムと外部インタフェースサブシステムを開発し、2000年にリリースした。

軌道決定サブシステムは、Windows PCのクライアントとUNIXの計算サーバ、データ蓄積サーバから構成されるクライアント/サーバ構成をとった。クライアントはユーザインタフェースアプリケーションを具備する。計算サーバは、大きな行列演算を伴う高精度軌道決定に対応するため、マルチCPUによる並列処理を行っている。データ蓄積サーバのファイル管理系は、解析利用を重視したポータビリティを有し、管理者権限がなくても、解析利用者が必要に応じて構築可能としている。

外部インタフェースサブシステムは、インターネット上の各種サーバから軌道決定に必要な各種データを取得している。外部インタフェースにおける不要なポートは徹底的に閉じ、富士通のノウハウを生かした各種セキュリティ対策を行っている。

GUTSのコア技術

本章では、富士通が修得しているGUTSのコア技術について説明する。コア技術は六つあり、観測データ準備、基本軌道決定、軌道生成、観測量理論値計算、観測残差棄却、バッチシーケンシャルフィルタ/スモータである。

(1) 観測データ準備

観測データ準備では地上GPS局、ユーザ衛星のGPS受信機から取得したGPS観測データ、SLR局で取得したSLRデータの前処理を行う。前処理アルゴリズムは表-1のものが実装されている。

(2) 基本軌道決定

人工衛星の軌道推定は非線形問題・多変数推定であるが、計算時間を短縮するため線形化を行って

る。線形化すると初期値との差分を推定することになるために、初期値が解から離れていると収束性が悪いばかりか、誤った収束点に陥る可能性がある。そのため、初期値はできるだけ真値に近い状態にする必要がある。基本軌道決定は、GPS衛星から放送されているGPS衛星位置、ALOSなどの衛星に搭載されているGPS受信機の航法結果（衛星の位置）をもとに、各衛星の真値に近い初期軌道を得るためのアルゴリズムである。

(3) 軌道生成

表-2に示す各種力学モデルを加味し、人工衛星の軌道を数値積分によって精密に計算する。先に述べ

表-1 前処理アルゴリズム一覧

アルゴリズム	説明
キャリアスムージング	測定誤差の多い擬似距離データの誤差を低減
サイクルスリップ検出・補正	搬送波位相の飛びを検出し、可能な限り補正
電離層補正	電離層フリー線形結合と呼ばれる観測量を計算することにより、電離層による電波伝搬遅延の影響を除去
仰角位相特性補正★	GPSアンテナの位相特性の仰角依存性を補正
DCB補正★	GPSデータに含まれるGPS送信機固有のバイアス成分を補正
品質チェック★	各GPS局の品質をチェックし軌道決定に使用する最適局構成を決定

★GUTSを運用する中で逐次拡張

表-2 力学モデル一覧

モデル	説明
地球重力ポテンシャル★	地球内部の不均一な密度分布のモデル
他天体重力	太陽、月、全惑星の重力
潮汐	潮汐効果による地球重力ポテンシャルの変動（固体地球潮汐、海洋潮汐、極運動による潮汐がある）
太陽輻射圧	太陽光子が衛星筐体に当たって発生する加速度の効果 GPS衛星：GPS専用モデル★ ユーザ衛星：球+多面体モデル
地球輻射圧	地球アルベド、地球赤外放射によって発生する加速度の効果 GPS衛星：GPS専用モデル★ ユーザ衛星：球+多面体モデル
大気抵抗	大気分子が衛星筐体に当たって発生する加速度の効果 低高度衛星に作用 ユーザ衛星：球+多面体モデル
相対論効果	相対論による衛星加速度の変動（3種のモデルを考慮）
経験的加速度	人工衛星の周回周期に依存したモデル化できない加速度
衛星姿勢	GPS衛星、ユーザ衛星の姿勢を考慮

★GUTSを運用する中で逐次拡張

表-3 観測モデル一覧

モデル	説明
バイアス	擬似距離、搬送波位相、SLRバイアス考慮
衛星姿勢	GPS衛星、ユーザ衛星の姿勢を考慮
重心位置変動	衛星運用に伴う重心位置変動を考慮
対流圏遅延*	対流圏による電波の伝搬遅延の効果（天頂遅延量と仰角マッピング関数を考慮）
対流圏勾配*	地上GPS局近傍の気圧・湿度分布を考慮した対流圏遅延モデル
位相/光学中心オフセット	衛星重心または地上GPS局基点とGPSアンテナ/レーザ反射器との間の座標のオフセット
潮汐*	固体地球潮汐、海洋荷重潮汐、極運動による潮汐、この三つによる局位置の変動 ※システムリリース時はIERS Conventions 1996準拠であったが現在はIERS Conventions 2003準拠
プレート運動	プレート運動による地上GPS局、SLR局位置変動の考慮
極運動	地球の自転軸の変動（IAU1980準拠）
時計誤差	衛星と地上GPS局の時計誤差
相対論効果	信号伝播時間、時計の刻み、離心率の効果
位相回転補正*	右旋偏波のGPS信号を人工衛星や地上のGPS受信機で受信すると、受信面が回転するため位相が遅退することの補正

★GUTSを運用する中で逐次拡張

たように初期値としての軌道生成の精度が人工衛星の軌道決定精度に大きくかかわっている。

(4) 観測量理論値計算

GPS観測量（擬似距離・搬送波位相）、SLR観測量（レーザ光往復時間）にかかわる各種観測モデルを考慮して観測量理論値を計算し、推定で必要となる観測残差（観測データと理論値の差）を作成する。理論値計算で使用される観測モデルを表-3に示す。

(5) 観測残差棄却

GPSデータはディファレンシャルGPS(注1)でよく用いられる2重差、SLRデータは観測残差の形状から異常データを判定・棄却するロジックを導入している。これらは運用において実データを分析し、考案したアルゴリズムであり、システムの自動化に大きく貢献している。

(6) バッチシーケンシャルフィルタ/スモータ

高精度軌道決定で推定するパラメータは、人工衛星の位置・速度・時計誤差に加え、表-2、表-3のモデルに含まれる各種係数があり、全部で1000パラメータ程度になる。推定処理は基本的に配列計算であり、計算の負荷を軽減するため、バッチシーケンシャル

(注1) 位置が正確に分かっている地点と位置を計測したい地点にGPS受信機を設置し、各受信機で取得したデータの差分から2地点の相対位置を精密に計測する手法。

フィルタ/スモータ、シュードエポックという技術を使用している。

高精度軌道決定の達成精度

富士通は、2000年10月のGUTSの初期リリースから、同システムを使用した高精度軌道決定運用ならびに実験業務を担当し、現在に至っている。高精度軌道決定運用では、ALOSに対し要求精度内で安定稼働を実現し、地球観測画像処理などに貢献している。一方、高精度軌道決定実験では、GPS衛星をはじめ、ADEOS-II、SAC-C、ALOS、GRACE-Bなどの人工衛星の高精度軌道決定技術を修得するとともに、世界の研究者が年々改良している表-1～表-3に示す各種アルゴリズム・モデルの動向を調査し、システムに反映することで、さらなる高精度化を目指してきた。

GPS衛星の達成精度のゴールは、GPS衛星の精密位置を公開しているIGS（International Global Navigation Satellite System Service：国際全地球航法衛星システム事業）解析センターの公表値との差が定常的に5 cm RMS(注2)以内になることである。GUTS実験を開始した当初、その差は30 cm RMSであった。その後、推定パラメータのチューニングや新アルゴリズムの追加によって、現時点では目標に到達しつつある。

低高度衛星の達成精度は、ADEOS-IIが40 cm RMS(4)、ALOSが30 cm P-P(注3)(5)、GRACE-Bが4 cm RMS(6)程度となっている。GUTSを構築する発端となったADEOS-IIとALOSに関しては要求精度をはるかに凌駕する精度を達成した。ALOSは、複雑な衛星形状、質量変化、定常的な姿勢制御（ヨーステアリング）を正しくモデル化することが課題であったが、これらを克服して最終的に上記の精度を達成した。

高精度測位実験システムの概要

1997年3月の宇宙開発委員会において、国内でもGPSと同等の衛星測位技術を開発することが決定された。日本が目指す衛星測位技術は、GPS測位システムを補強・補完する形で、アジア・オセアニア

(注2) Root Mean Squareの略。二乗平均平方根のこと。

(注3) Peak-to-Peakの略。誤差の分布が正規分布であれば、RMSの6倍相当である。

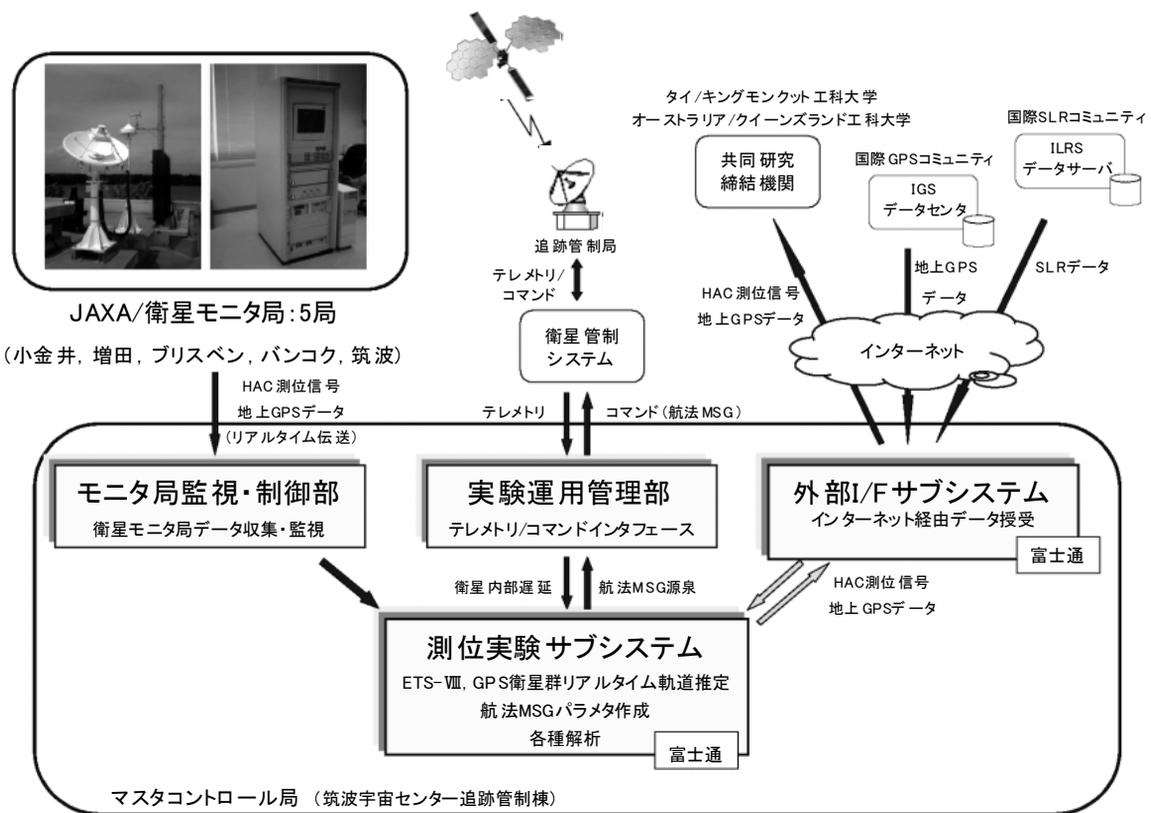


図-2 HAC実験地上システム
Fig.2-HAC experiment ground system.

ア地域において測位信号の利用可能時間帯を向上させるものである。そのための人工衛星の軌道として、静止軌道や準天頂軌道がある。衛星測位システムに必要なコア技術は、衛星搭載用原子時計、衛星群時刻管理技術、高精度軌道時刻決定技術の三つである。後半の二つについては、GUTSで基本的な技術修得がなされているが、測位システムとするには、オフラインではなくリアルタイムに軌道と時計を推定し、その情報を衛星にアップロードし、測位信号に重畳して測位ユーザに届ける必要がある。

富士通は、GUTSで培った技術を活用し、衛星測位の実験システムであるETS-VIII/HAC実験地上システム（図-2）の開発を担当し、1999年から開発を開始し、2003年にリリースしている。また、実用的な衛星測位システムとなる準天頂測位実験システムの測位部分についても担当し、現在開発に着手したところである。

む す び

本稿では、GUTSの構築・運用・実験業務を通し

て富士通が培った高精度軌道決定技術について紹介した。

富士通は高精度軌道決定関連システムにおいて、システム整備の計画段階から運用までを担当してきた。GUTSは軌道力学系コア技術なしには整備・運用できないものであり、この技術を他社に先んじて獲得してきたことが大きい。この中でお客様と一緒に問題や課題の解決を図っていくことにより、お客様の信頼を得てきた。とくにGPS利用技術や測位システム運用技術については、お客様と密接に課題の解決を図ってきており、現在進行中の準天頂測位システムや、宇宙VLBI衛星（ASTRO-G）の軌道力学系のシステム開発に加え、今後もいっそうお客様と密な関係を維持していく。

最後に、本稿に記載した高精度軌道決定技術の修得に当たっては、宇宙航空研究開発機構・統合追跡ネットワーク技術部の方々に多大なご指導・ご協力をいただいたことに感謝申し上げます。

参考文献

- (1) S. Katagiri et al. : Overview of the NASDA's precise orbit determination software. Proc. of the Twenty-second International Symposium on Space Technology and Science, Vol. 1, p.1157-1162, 2000.
- (2) 片桐征治 ほか : GPS衛星を用いた人工衛星の高精度軌道決定システムの開発. 電子情報通信学会論文誌「通信 : B」, Vol. J84-B, No.12, p.2187-2195 (2001).
- (3) S. C. Wu et al. : Automated precision orbit determination for TOPEX/POSEIDON with GPS. AAS 93-576, p.183-194, 1993.
- (4) S. Nakamura et al. : Precise Orbit Determination for ADEOS-II. 19th International Symposium on Space Flight Dynamics, 2006.
- (5) R. Nakamura et al. : PRECISE ORBIT DETERMINATION FOR ALOS. 20th International Symposium on Space Flight Dynamics, 2007.
- (6) N. Kudo et al. : Precise Orbit Determination for GRACE-B. 19th International Symposium on Space Flight Dynamics, 2006.

