

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760760

研究課題名(和文)超小型衛星のための国際ネットワーク軌道決定システムの構築および観測実験

研究課題名(英文)Construction and Experiments of International Orbit Determination Network System for Micro and Nano Satellites

研究代表者

坂本 祐二(Sakamoto, Yuji)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50431523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、超小型衛星の開発が世界的に活発化し、災害監視、理学観測など実用的ツールとして発展しつつある。一方で、軌道を決定する能力の不足により、追跡管制が十分に実現できない事例が発生しており、運用技術の向上が求められている。本課題では簡易軌道決定システムに必要な技術要素を提案し、国際的なネットワーク軌道決定システムの実験を通して、実現性を評価した。半年以上の運用実験を実施して、無人運用でも安定性を維持することを実証した。本課題で開発したデータ集録装置および運用解析ソフトウェアを世界中で使用することで、定期的に衛星軌道を公開し共有できるシステムを実現可能である。

研究成果の概要(英文)：In these ten years, the development of micro and nano satellites were activated in the world, and they are growing as practical platforms for disaster monitor or scientific observations. On the other hand, the ability of orbit determination in university ground stations is not matured. The satellite tracking for communication are not sufficiently achieved, and the improvement of operation technique are demanded. In this research, technical elements required for low-cost orbit determination were proposed, and the system was verified through the experiments of international orbit determination network system. The sequential unmanned operation experiment in more than half year was successful, and the stability and reliability of system was verified. By using the data acquisition hardware and the operation analysis software for ground stations in the world, the system of analyzing satellite orbits and sharing the information at any time will be realized.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：超小型人工衛星 衛星地上局 軌道決定 ネットワークソフトウェア 国際情報交換(インドネシア・ドイツ) 国際情報交換(スウェーデン)

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置づけ ... 近年、教育機関や中小企業による超小型衛星開発が世界的に活発化している。超小型衛星は質量 1~50kg 程度の衛星で、従来の数トンクラス的大型衛星よりも低予算かつ短期間で開発することが可能である。国内では 2002 年に千葉工業大学の鯨生態観測衛星 WEOS が打ち上げられて以降、これまで計 18 機(2010 年 10 月時点)の超小型衛星が打ち上げられている。海外においても日本同様にこの 10 年間で活動が活発化しており、単なる技術実証や観測実験にとどまらず、災害監視や生活インフラとしての実用的ツールとして導入する事例が増えてきている。

低コスト衛星開発および運用は今後もますます活発化していくことは確実である。その一方で、様々な技術的課題も明らかになってきた。特に低コスト化は従来の衛星開発で実施していた一部の作業を省略することで実現されているため、過度な低コスト化でミッションや地上観測に不具合を生じることも多く、適正な低コスト化手法を各機関で探究しているのが現状である。

宇宙空間で動作する衛星を開発する技術が蓄積される一方で、低コストに観測する技術に関しては課題が多い。特に 2010 年 5 月に国内で打ち上げられた鹿児島大学衛星「KSAT」および NPO 法人 UNISEC による深宇宙探査機「UNITEC-1」に関して、打ち上げ後に十分な軌道決定(位置・速度の決定)が実施できない事態が発生した。軌道が決定できなければ、衛星と電波回線を確立することが出来なくなる。地球周回衛星の場合、米国機関 USSTRATCOM (United States Strategic Command) が観測した軌道が一般公開されており、独自の軌道決定システムを持たない運用機関はこの軌道情報を元に追跡管制する。KSAT もこの情報を利用する計画であったが、軌道情報の更新間隔が 4 日間空くことも多く、大気抵抗により軌道が変わりやすい高度 300km の衛星にとっては実用上問題があった。そして軌道が特定できずに衛星と通信が確立できない期間の方が多くなるという結果になった。また UNITEC-1 に関しては、深宇宙軌道であるため USSTRATCOM の情報を使用出来ず、衛星送信機のドップラ周波数を観測することにより軌道決定を実施する予定であったが技術的に成熟しておらず、運用開始までに軌道決定処理および結果配信システムを確立できなかった。

超小型衛星の開発において実際に発生した運用上の課題をふまえ、軌道決定技術に関して低コストかつ導入が簡易な観測システムの確立、および国際的なネットワーク整備に早急に取り組んでいくことが非常に有益であると考えられる。地球周回衛星は日本から可視である時間帯と、不可視である時間帯が存

在する。そのため、短い時間間隔で定期的に軌道決定結果を更新するためには、海外にも観測システムを設置して、情報を共有する構造が重要となる。

申請者は東北大学での研究活動において、東北大学衛星「SPRITE-SAT」の開発・運用、および 2 号機衛星「RISING-2」の開発に積極的に携わっている。超小型衛星開発技術に精通するとともに、国内外の研究者との交流を通じて、現在の技術的課題に関して積極的に情報を収集している。一方で 08 年度、09 年度に実施した若手研究(B)「小型地上局クラスタによる新方式 VLBI 軌道決定システムの基礎実験」の課題を通じて、衛星送信機電波のドップラ周波数を簡易な地上受信装置で観測する技術の基礎実験を実施した。ドップラ周波数を解析することで、衛星の軌道決定が可能である。この要素技術を世界的なネットワークシステムへ発展することにより、高頻度に軌道情報を更新可能な軌道決定システムを構築できると考え、本課題を提案するに至った。

2. 研究の目的

本課題では超小型衛星の簡易軌道決定システムを確立し、国際ネットワーク軌道決定システムの実験を実施する。低コストかつ導入が簡易な装置を製作し、国内外の様々な機関に導入してネットワーク運用することで、定期的に衛星軌道を世界に公開し共有できるシステムが実現する。

要素技術として衛星送信電波のドップラ周波数を計測する簡易電波受信装置の性能評価をすでに実施した。本課題で受信装置を自動稼働させてデータ収集し、優劣のばらつきが大きい観測データから最良データを抽出するアルゴリズムを実用的なレベルまで改善する。そして常に質の良い軌道決定結果を安定して導出し、即時に公開していくシステムに発展していく。

また、低コストかつ導入が簡易な装置を製作し、国内外の様々な機関に導入してネットワーク運用する。そして USSTRATCOM と同様に定期的に衛星軌道を世界に公開できるシステムの完成に必要な要素技術を実証する。

超小型衛星の研究開発において、軌道決定に関する低コスト化の確立は実例がなく、現在でも USSTRATCOM が配信する軌道情報に依存している。本課題の実現により、代替となる軌道情報配信サービスが確立するとともに、低高度軌道や深宇宙軌道など、多様化する衛星軌道にフレキシブルに対応することが可能になる。世界に先駆けてネットワークシステムを確立することにより、本分野における主導権を得る。そしてネットワークのノード局を拡大していくことで、3~5 年後には災害監視や理学観測など実用的な超小型衛星運用に多大に貢献できると考える。特にノード局に配置する装置のコストは約 50

万円程度であり、後進国を含めてあらゆる機関で導入しやすい点が特色である。

3. 研究の方法

(1) 概要

本課題では、下記の実験プラン A と実験プラン B を同時並行で進めていく。

実験プラン A ... 本課題期間ではインドネシア・ドイツ・スウェーデン等に 435MHz 帯簡易電波受信装置を設置して、日本局を交えて対象衛星を同時観測することで、国際ネットワーク軌道決定システムの実験を実施する。データ収集・処理・配信を安定して実現し、実用的であると評価を得ることを目標とする。

実験プラン B ... 衛星送信機の周波数はさまざまであるため、最終的には 435MHz 帯以外にも対応する必要がある。2GHz 以上の送信機を搭載する衛星に対して、地上局で 435MHz 帯にダウンコンバートする装置を導入し、軌道決定精度に関して評価する。プラン A と一部の機器を共有できるため、国際ネットワーク運用実験も可能である。課題期間内では技術評価までを目標とする。

東北大学が開発した 50kg 超小型衛星の例を図 1 に示す。衛星電波のドップラシフト計測を用いた軌道決定の原理を図 2 に示す。すでに開発済みの 435MHz 帯簡易電波受信装置の例を図 3、図 4 に示す。

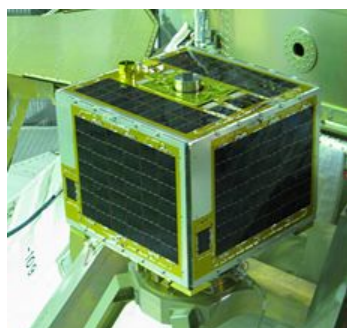


図 1 超小型衛星の例
(東北大学 SPRITE-SAT)

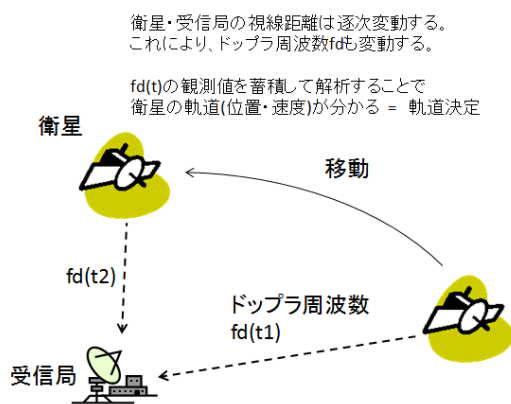


図 2 ドップラ周波数による軌道決定

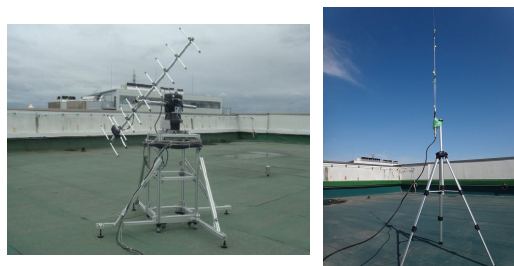


図 3 435MHz 簡易電波受信装置(屋外装置)



図 4 2285MHz 電波受信アンテナ(データ受信および電波周波数計測用)

4. 研究成果

(1) H23 年度の成果

東北大学には 435MHz 帯簡易電波受信装置(アンテナ、指向制御モータ、タワー、データ解析装置)を設置している。H23 年度はハードウェアの機能改善を実施し、受信ノイズの低減、および可搬性の向上に取り組んだ。一方で、インドネシア・バンドゥン工科大学に同型のデータ解析装置を構成して、実衛星の短期観測実験を実施した。これにより、データ解析の全自動化、およびネットワーク情報収集のためのソフトウェア開発を実施した。また、ドイツ・シュトゥットガルト大学も交えて H24 年度以降に実施するネットワーク観測実験を計画し、現地担当者とのシステム構成に関して議論し、合意を得た。

(2) H24 年度の成果

H24 年度は従来の駆動型アンテナではなく、固定式のモバイルアンテナを採用することで、ハードウェアトラブルを起こしやすい駆動系の排除に成功した。一方で、全方位からの地上電波が混信する短所があるため、衛星電波以外の不良データの除去を実現する解析ソフトウェアの作成に注力した。このアンテナを使用して、7 月上旬にはドイツにて観測実験を行い、日本の無人局を遠隔モニタすることによる 2 局同時観測実験を成功させた。データ解析の結果、単独局と比較して精度の高い軌道決定結果が得られることを確認した。

(3) H25 年度の成果

S 帯信号(2285GHz)を UHF 帯信号(435MHz)にダウンコンバートする装置 2 式を製作し、東北大学(仙台市)とスウェーデンの既存地上局(各 2.4m 口径 S 帯受信設備)に配置しての世界 2 局同時観測システムの構築に注力し

た。2013年10月より半年間の長期稼働を開始し、安定して無人運用可能なシステムの構築を達成した。この過程で、運用解析ソフトウェアの安定性は格段に向上した。本課題で開発したシステム(集録装置および運用解析ソフトウェア)を使用し、各施設・各機関の状況に応じてアンテナ方式(小型モバイルアンテナ、60cm口径S帯アンテナ、2.4m口径S帯アンテナ)を選択することで、国際的ネットワーク軌道決定システムが実現可能であることを明確化した。最終年度の活動に関する解析結果の公表および対外発表は平成26年度以降に実施する。

(4) 発表論文の概要(雑誌論文)

本論文では、図3、図4に示すような大学構内の地上局を使用して、ドップラ周波数のみを使用した簡易軌道決定システムを構築し、実衛星観測により決定精度を評価する。軌道決定手法は既存のものであるが、実際の観測および性能評価を既存の大学地上局で実施した実績は他の研究では言及されていない。特別な衛星側搭載機器は不要であり、ドップラ周波数はすべてのLEO衛星から取得可能である。データ通信用として既存の地上局を保有する多くの大学等機関が、容易に本手法を採用して試してみることが可能であることが本手法の長所である。

図3に示す簡易的な電波受信装置は、受信ゲイン11.6dBiの10素子の八木アンテナ(Diamond Antenna A430S10R)および方位角・仰角制御用のアンテナローター(YAESU G-5500)で構成する。仰角0度時の外形は高さ1.2m、幅1.5mで、理論上風速50m/sまで耐えられる。

140/435MHz帯の送受信機(ICOM IC-910D)を使用して電波を受信する。小田らが提案した手法(2008年)では、受信機が出力するCW音声をPCのサウンドカードで計測し、汎用ソフトでFFT解析を実行することで、衛星電波のドップラシフト量を計測可能である。これは周波数をダウンコンバートしても、ドップラシフト分はそのまま残るためである。この手法で、スペクトラムアナライザを使用せずに周波数計測が可能になる。

使用した商用トランシーバは周波数安定度が 3×10^{-6} である。これは436MHzの電波に対して温度変化や時間経過で1308Hzの偏差が起こりうることを示す。本実験では安定度 1×10^{-8} のOCXOを外部入力して安定度を改善した。温度が安定した環境で436MHzの信号を10分間計測した結果では、外部OCXOを使用しない場合は約5Hzの変動、使用する場合は0.1Hz未満の変動であることを確認した。PCでのFFT解析にはAlberto氏によるフリーウェアのSpectran Version 2.0(Special UNITEC-1 Version)を使用している。このプログラムにより、ピーク値マーカの周波数と信号レベルを逐次記録することが出来る。解像度設定を1.3Hzに設定して使用した。

UHF帯電波による軌道決定の対象として、東京工業大学が開発したキューブサットCUTE-1を観測する。CW専用のビーコン電波(436.8375MHz, 0.1W)を観測する。周波数計測結果の一例を図5に示す。これはトランシーバの周波数設定とFFT解析の結果を統合し、不良データを除去した結果である。解析には2010/12/16~12/23の約7日間で合計8パスを実観測したデータを使用した。2パス~5パスを使用した「オーバーラップ解析」の結果を図6に示す。この結果から、本手順が実観測において有効であり、角度誤差で0.3deg未満、距離誤差で4km未満を達成できることを確認した。

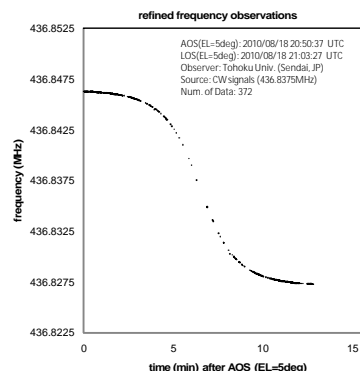


図5 前処理終了時の周波数波形例

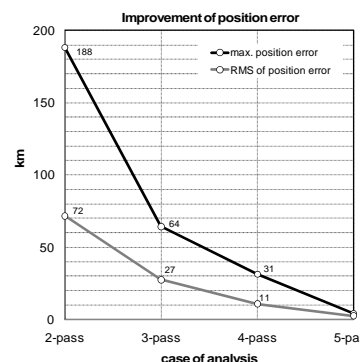


図6 UHF電波による軌道決定結果

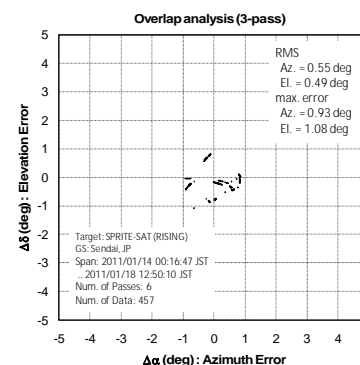


図7 S帯電波による軌道決定結果

S帯電波による軌道決定の対象として、東北大学が開発したSPRITE-SAT(RISING)を観測する。現在は変調なしのCW電波(2285MHz, 0.1W)を発信している。口径2.4mのパラボラアンテナを使用した電波受信では半値幅は ± 2.2 degであり、この半値幅未満の軌道決定

精度であれば、継続的な衛星追跡が可能となる。UHF 帯測定系を活用するために、受信 RF 信号を 436MHz にダウンコンバートして計測する。解析対象のデータは 2011/01/14 ~ 01/18 の約 5 日間で合計 6 パスである。図 7 に示すように、3 パス分のデータを解析した結果、角度誤差で 1.1deg 未満、距離誤差で 40km 未満を達成できることを確認した。

(5) 発表論文の概要 (雑誌論文)

雑誌論文の成果を活用して、国際的なネットワーク整備に早急に取り組んでいく。地球周回衛星は日本から可視である時間帯と、不可視である時間帯が存在する。そのため、短い時間間隔で定期的に軌道決定結果を更新するためには、海外にも観測システムを設置して、情報を共有する構造が重要となる。最終的に、USSTRATCOM と同様に定期的に衛星軌道を世界に公開できるシステムの完成を目標とする。本論文では、これまでの手動観測・解析の経験を踏まえて開発した自動処理システムの仕組み、および実衛星を観測したケーススタディ結果を示す。また、2012 年 7 月に実施した、東北大学および Stuttgart 大学(ドイツ)での同時観測実験および成果に関して紹介する。

ドップラ周波数測定のために、これまで 3 タイプのアンテナを使用した(図 3, 図 4)。図 3 右は受信ゲイン 7.6dBi, 全長 1.58m のモバイルアンテナ(5/8 3段 C-Load ノンラジアル方式)で、最も簡易なアンテナである。アンテナローテータを搭載しないため、ハードウェア故障のリスクが少なく、今後のネットワーク型観測において、一番推奨される方式である。また可搬性に優れるため、2012 年 7 月に実施したドイツでの観測実験では、このアンテナおよびカメラ用三脚をスーツケースに収納して、現地で使用し、周波数測定に成功した。室内装置もトランシーバ、計測用 PC, OXC0 ボックスのみで良く、すべてスーツケースに収納できる。電源とインターネット接続が利用可能であれば、世界中の至るところで観測デモを実施できる。

新しい観測データを取得したら、独自の仕組みで TLE を算出して公開できる自動解析システムを構築する。この情報を従来の公開軌道情報(TLE: Two Line Elements)と区別して、TU-TLE (Tohoku Univ. TLE) と定義する。観測ごとに TLE を更新できる仕組みがあれば、極軌道衛星で 1 日 4 回の更新が可能になる。更新頻度が増加することにより、軌道生成誤差の拡大を抑制することが可能になる。発表論文には、軌道解析の詳細手順を記述している。

まず単独局による観測・解析を実施した。本実験では、2 つの衛星(CUTE-1, KKS-1)を対象として軌道解析を自動実行させて、TU-TLE を最新パスを観測するたびに更新する。表 1 に解析結果を示す。CUTE-1 の場合、位置誤差が 10.6km (RMS), Azimuth が 0.33 deg (RMS),

Elevation が 0.18 deg (RMS)である。また KKS-1 の場合、位置誤差が 6.2 km (RMS), Azimuth が 0.24 deg (RMS), Elevation が 0.13 deg (RMS)である。これらの結果から、継続的な追跡用途では、半値幅 1deg 以上の衛星に対応可能であると評価できる。

表 1 単独局による軌道決定結果

Target	Error Evaluation of TU-TLE and NORAD TLE						
	RMS*** of freq.	position		azimuth****		elevation	
		worst	RMS	worst	RMS	worst	RMS
CUTE-1*	28 Hz	23.2 km	10.6 km	3.57 deg	0.33 deg	0.79 deg	0.18 deg
KKS-1**	26 Hz	10.4 km	6.2 km	2.02 deg	0.24 deg	0.52 deg	0.13 deg

* span = 2013/03/30 06:36 - 2013/04/01 21:44 UTC, freq. = 436.8375 MHz

** span = 2013/03/30 16:29 - 2013/04/04 15:41 UTC, freq. = 437.385 MHz

*** between real obs. and NORAD TLE estimation

**** only when el < 80deg

次に、複数局による観測実験を行う。これまで海外での観測実験を 3 回実施した。2011 年 11 月および 2012 年 2 月にバンドゥン工科大学(通称 ITB, インドネシア)で実施、および 2012 年 7 月に Stuttgart 大学の IRS 研究室で実施した。それぞれ期間は 1 週間である。これらの実験を通して、計測ソフトウェアの安定性向上に取り組み、2012 年 7 月の実験では、東北大での自動観測に加えて、同時時間帯にドイツでの観測も実施し、2 国での協調観測を成立させた。例として、2012 年 7 月 4 日 ~ 7 月 6 日に実施した CUTE-1 の観測実験結果を示す。日本では八木アンテナ追跡方式を使用し、ドイツでは指向制御を伴わないモバイルアンテナを使用した。解析結果を表 2 に示す。軌道決定は最長 2.0 日の観測データを使用している。最適軌道から算出した位置・角度計算値と、NORAD TLE に基づく位置・角度計算値の比較で評価している。一例だけの比較ではあるが、a), b) よりも、c) の方が最大誤差、RMS 誤差ともに全指標において小さくなるという効果を確認した。

表 2 複数局(日本・ドイツ)による軌道決定結果

Case*	Error Evaluation of optimum orbit and NORAD TLE						
	RMS of freq.	position		azimuth		elevation	
		worst	RMS	worst	RMS	worst	RMS
a) TUGS only	33 Hz	21.4 km	16.3 km	2.94 deg	0.51 deg	0.75 deg	0.21 deg
b) IRS only	46 Hz	16.1 km	11.6 km	2.11 deg	0.31 deg	0.60 deg	0.16 deg
c) TUGS and IRS	43 Hz	14.7 km	9.5 km	2.01 deg	0.26 deg	0.50 deg	0.12 deg

* TUGS = Tohoku Univ. (JP), IRS = IRS lab., Stuttgart Univ. (DE)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

Yuji Sakamoto, "Orbit Determination Network System for Micro and Nano Satellites Using Low-Cost Ground Stations," Transactions of the Japan

Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 査読有, 掲載決定, 2014年

Yuji Sakamoto, Akari Yoneyama, "Orbit Determination System with Reasonable Performance Using Low-Cost Ground Station for Nanosatellite Projects," Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 査読有, 10(ists28), Pf_9-Pf_14, 2012年, DOI: 10.2322/tastj.10.Pf_9

〔学会発表〕(計4件)

Yuji Sakamoto, "Orbit Determination Network System for Micro and Nano Satellites Using Low-Cost Ground Stations," 29th International Symposium on Space Technology and Science (29th ISTS), 2013年06月02日~2013年06月09日, Nagoya

Yuji Sakamoto, "International Orbit Determination Network System for Micro and Nano Satellites," UN/Japan 4th Nano-Satellite Symposium, 2012年10月10日~2012年10月13日, Nagoya

坂本祐二「超小型衛星のための国際ネットワーク軌道決定システムの構築」日本機械学会2012年度年次大会, 2012年09月09日~2012年09月12日, 金沢

Yuji Sakamoto, "Orbit Determination System with Reasonable Performance Using Low-Cost Ground Station for Nanosatellite Projects," The 28th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2011年6月8日, 那覇

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 祐二 (SAKAMOTO, YUJI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 50431523

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし