

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 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：2012～2014

課題番号：24760658

研究課題名(和文)超小型人工衛星用低コスト短期開発・評価環境の構築

研究課題名(英文)Low-cost Rapid Development and Verification Environment for Micro-satellites

研究代表者

桑原 聡文(Kawahara, Toshinori)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30601033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年超小型人工衛星の開発及び実利用化が国内外で活発化してきている。本研究では超小型人工衛星の信頼性を総合的に向上させ、且つ短期低予算での開発を実現する開発・評価環境を構築した。本環境は同一プラットフォーム上においてフルソフトシミュレーションから動的閉ループシミュレーション、更には実運用までを可能にする。また、プロジェクトの要求に応じて非常に柔軟にコンフィギュレーションを拡張することも可能である。環境の構築後、東北大学の超小型衛星プロジェクトを一例に、機能評価を実施した。

研究成果の概要(英文)：Recently, not only research and development of micro-satellite technologies, but also their actual utilization is becoming very active in the world. This research has established an integrated and comprehensive development and verification environment of micro-satellites in order to improve their reliability in the orbit, as well as to enable rapid and low-cost development. This environment is capable of full software simulation, dynamic closed-loop simulation, and real operation based on the same platform. This environment can be also configured and extended very flexibly according to the project's demands. The functionality of this environment has been evaluated as it was applied to Tohoku University's real-life micro-satellite project.

研究分野：人工衛星工学

キーワード：超小型人工衛星 姿勢制御 地上評価環境 信頼性向上 短期低コスト開発 シミュレーション 運用支援

## 1 研究開始当初の背景

近年小型人工衛星の開発が国内外において盛んに行われている。国内の活動は活発化する一方で、海外においてもこの10年で、単なる技術実証や観測実験に留まらず、災害監視や生活インフラの実用的ツールとして小型衛星を導入する事例が増えている。ところが、2002年来日本国内においてこれまでに打上げられた約20機の小型人工衛星の中で正常運用に成功した例は非常に少ない。これは1) これまでの小型人工衛星開発プロジェクトの多くが開発作業を重視し、運用技術を構築することを疎かにしてきたこと、2) 短期開発の実現を重視し、十分な試験・評価活動を怠ってきたこと、及び3) 小型人工衛星の開発環境が未熟であったために、衛星の仕様に問題が内在していてもそれを地上試験で発見することができなかったこと、が原因であると言える。

一方、近年成功を収めている大型人工衛星の開発現場では、高額の開発費で長期開にわたり開発を行うスタイルが一般的となっている。衛星の仕様は1) 運用の側面を十分に考慮して策定され、2) 複数のモデルを用いて試験、評価を行い、3) 高度なソフトウェア技術に基づく開発環境を用いて開発支援、運用模擬、機能評価を実施し、高い信頼性を確保している。しかしながらこのような開発工程、試験環境は短期低コスト開発を掲げる小型人工衛星の現場には適さない。以上のことから、小型人工衛星に特化した開発・評価手法、及び環境の構築が求められている。

## 2 研究の目的

このような背景を踏まえ、本研究では超小型人工衛星の信頼性を総合的に向上させ、且つ短期低コスト開発を支援する超小型人工衛星用開発・評価環境の構築を目指す。この環境は開発当初から実運用にいたるプロジェクトの一連の活動を支援し、総合的なシミュレーション技術によって運用までを模擬した機能開発・評価環境を実現する。これにより小型人工衛星のために最適化した地上評価技術を構築し、小型人工衛星の軌道運用の信頼性の改善と社会への貢献の促進を図る。

東北大学では2007年から2009年にかけて50kg級超小型衛星1号機「SPRITE-SAT」の開発を行い、2009年にH-IIAロケットで打ち上げ、運用の経験を積んだ。その後この経験を踏まえ、地上での試験と運用模擬環境の構築に力を入れながら2号機RISING-2の開発・運用、そして現在3号機の開発に着手したところである。本研究開始当時の超小型衛星開発環境の様子を図1に示す。このような背景を踏まえ、本研究では東北大学におけるこれまでの小型人工衛星開発、運用の経験を活かしながら、上述の要素技術を一つの開発・評価環境として統合化し、広く小型人工衛星の開発に適用できるツールに拡張する

ことを目指す。教育機関におけるこのような環境の開発例は国外では若干の例が見られるのに対し、国内では未だ例がないのが現状である。

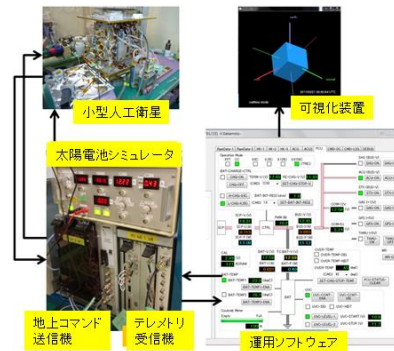


図1 研究開始当初の東北大学における超小型衛星開発環境

本研究では、衛星の構想当初から詳細設計、地上試験、軌道上運用に至るプロジェクトの一生に渡ってその活動を支援できる環境の構築を目指すと共に、各構成要素をモジュール化し、プロジェクトごとの規模と需要に合わせてこれを再構成、拡張可能であるようにする。この環境は純粋なソフトウェア環境としても使用できるため、加速試験が可能であると共に、新規参加者が衛星システムの設計、開発、運用の一連の過程を仮想的に経験することができ、新規参加の敷居を下げ、コミュニティーを活性化することにつながる。

研究目的は大きく分けて二分される。その一つは主に電算処理装置とインターフェース（モジュール化フロントエンド）を対象としたソフトウェアアプリケーションの構築・評価である。この環境を構成するハードウェアは比較的早期に構築可能であり、ソフトウェア開発がその焦点となる。もう一つは動的シミュレータの構築・評価である。空気浮上ベアリングを適用し、リアクションホイールや角速度センサなど、衛星の姿勢制御系の主要装置、及びその制御ソフトウェアの定性的評価に利用する。本研究で構築した環境は東北大学における実プロジェクトに適用しながらその仕様と性能の評価を行い、実用性を高める努力をする。

## 3 研究の方法

東北大学でこれまでに培ってきた小型人工衛星開発技術を反映し、現在開発中の小型人工衛星を適用対象として開発・評価環境を構築する。開発開始直後から運用までのプロジェクトの一生にまたがって適用することができる開発・評価・運用支援環境を実際の衛星開発プロジェクトの進行に沿いながら逐次構築、検証していく。

研究目的を実現する環境を図2に示されているように4つのステップに分類し、研究に関してもこのステップを順に遂行していく。

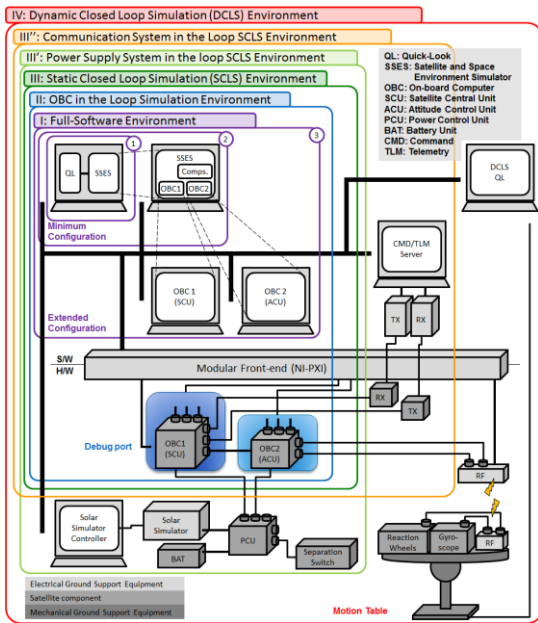


図2 本研究で構築を目指す開発・評価環境

(1) 平成 24 年度

東北大学は 50kg 級小型人工衛星を既に 2 台開発した経験があり、そのうちの 1 台に関しては打ち上げ、運用を経験しており、人工衛星の開発、評価、運用に関して経験を有している。現在開発中の同じく 50kg 級小型人工衛星の実際のプロジェクトの進行に歩幅を合わせる形で目的とする低コスト短期開発・評価技術の習得とその環境の構築を目指す。平成 24 年度は設定した 4 つのステップのうちの最初の 2 つである Software-In-The-Loop-Simulation (SILS) 環境、及び搭載電算機を交えた Hardware-In-The-Loop (HILS) 環境に必用となる装置を設置し、ソフトウェア群の開発を行う。また新規開発が必要となる動的閉ループ環境の構成要素の設計、開発を行う。

(2) 平成 25 年度

3 つ目のステップである衛星システム全体を対象とした静的閉ループシミュレーション環境を構築する。必用となる実時間シミュレータと各種衛星搭載機器とのインターフェース(モジュール化フロントエンド)の設置を完了する。シミュレータの計算結果に基づき衛星への入力信号を模擬すると共に、衛星からの出力信号を処理に反映させる環境を構築する。搭載通信機器、及び地上コマンド/テレメトリサーバについても実機を導入し、実際の運用に限りなく近づけた開発・評価環境を構築する。また、動的閉ループ環境の構成要素を設置する。

(3) 平成 26 年度

4 つ目のステップである動的閉ループシミュレーション環境を構築する。空気浮上ベアリングを使用した 3 軸自由のテーブルを開発し、太陽模擬装置を設置する。3 軸テーブルにはテーブルの姿勢を検出する装置、慣性

能率を調整する装置、衛星の中央電算機及びモジュール化フロントエンドとの無線通信装置を搭載する。環境一式を設置後は精度の合わせ込み作業を行い、衛星の姿勢制御系の特性を評価できることを確認する。

4 研究成果

項目別の研究成果を以下にまとめる。

(1) 開発・評価環境の構築

当初研究方法に掲げた図 2 の内容に沿い、開発・評価環境を構築した。その様子を図 3 に示す。図 3 には空気浮上テーブルを除く構成要素が示されている。ソフトウェアを実行処理する電算処理装置を中心に、環境変数のモニタ及び制御インターフェース、シミュレーション環境と衛星との電気的なインターフェースをとる目的のモジュール化フロントエンド、電源系評価のためのソーラーシミュレータ、通信系評価のための無線通信機器等が接続された状態が示されている。

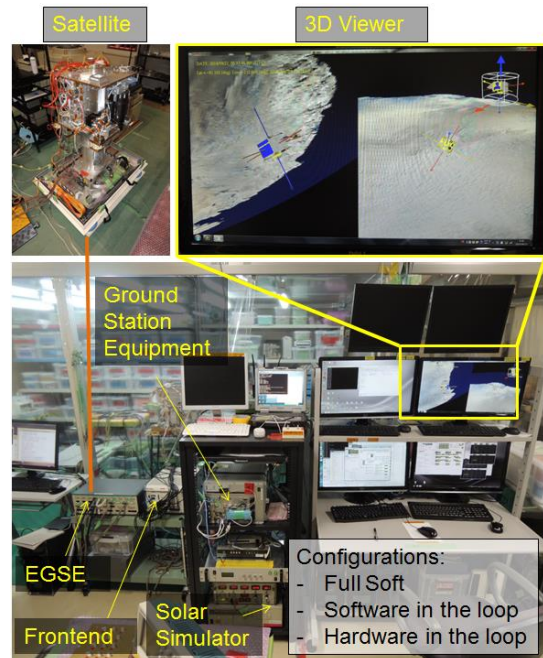


図3 開発・評価環境の機器構成

(2) ソフトウェアアプリケーションの開発

シミュレーション環境のソフトウェア構成は C++ に基づくオブジェクト指向型を採用した。特に衛星の搭載モデルはモジュール化し、互いの接続は実際の搭載機器の構成を反映できるようにした。これによりソフトウェアモデルとハードウェアモデルを等価に取り扱うことが可能となり、開発段階に応じて適宜両者を入れ替えながら開発・評価を実施できるように配慮した。この様子を図 4 に示す。また、図 5 に示されるように、ソフトウェアモデルと搭載電算装置の接続に関しては、ソフトウェアモデルとモジュール化フロントエンドに実装された物理層とが LAN 経由で情報の授受を行う形式とし、その正常動作を確認した。

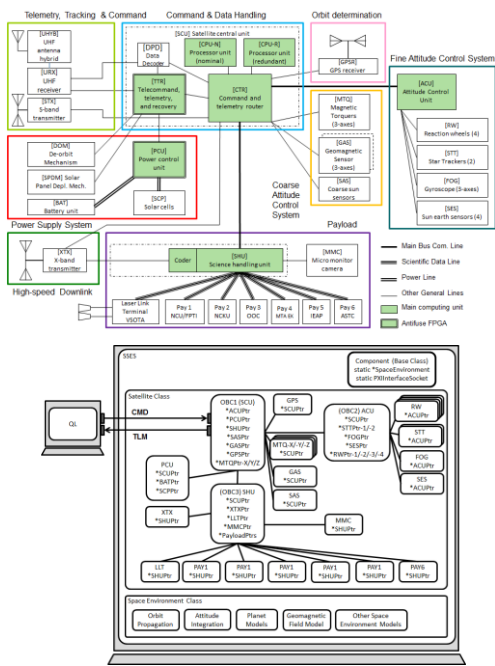


図4 超小型人工衛星の機器構成例(上)とそれを反映したシミュレーション環境内のソフトウェアモデルの接続関係(下)

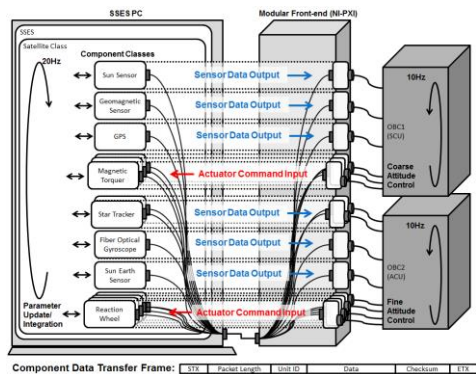


図5 ソフトウェア環境とモジュール化フロントエンドの接続関係

### (3) 静的シミュレーション環境の構築

上述の環境に搭載電算装置を接続し、静的シミュレーション環境を構築し、性能を評価した。姿勢制御系の評価に特に力を入れ、姿勢制御系センサ自体の評価環境を拡張した。図6に恒星センサ評価環境を示す。恒星センサへの光学的な入力として、シミュレーション環境内の衛星の姿勢情報に基づき、恒星の像をモニタに出力する。これにより恒星センサを閉ループシミュレーションに統合した状態での姿勢制御系の評価が可能となった。

また、姿勢制御シミュレーション結果の一例として、地心方向指向制御時の角度及び角速度誤差の遷移の様子を図7に示す。このように、静的閉ループシミュレーション環境上で実運用を模擬したシミュレーション評価が可能であることが示された。

更に、電力収支のシミュレーション結果を図8に示す。図8はバッテリーの実物を用いたシミュレーション結果(HILS)と、バッテリーの

ソフトウェアモデルを用いた結果(SILS)の比較結果を示している。シミュレーションには衛星の姿勢やBATの放電度、日照・日陰の影響を考慮するためにそれらの物理モデルを実装した。このように、実際のハードウェアを用いずとも電力収支シミュレーションが可能であることも示された。

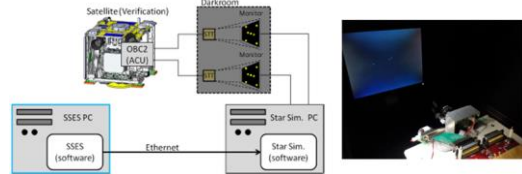


図6 恒星センサ評価環境

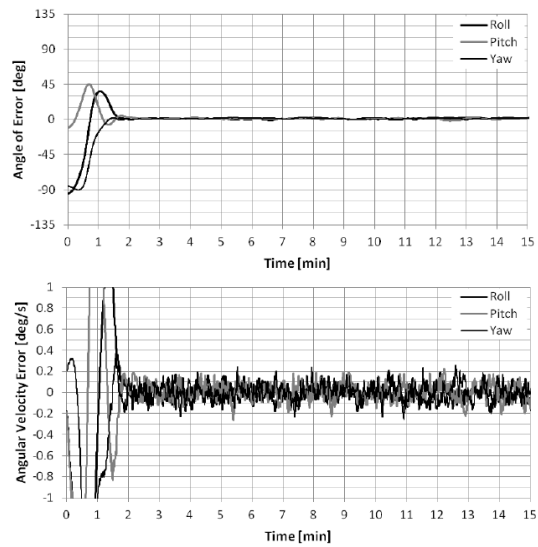


図7 衛星の姿勢制御シミュレーション結果例(地心方向指向制御)

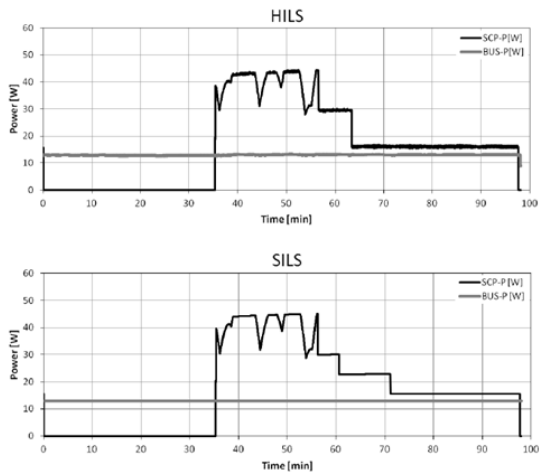


図8 電力収支シミュレーション結果の比較(上: HILS, 下 SILS)

### (4) 動的シミュレーション環境構築

実際のリアクションホイールなどの駆動装置や角速度センサなどの検出系装置を用いた動的閉ループシミュレーションを可能にするために空気浮上ボールベアリングを用いた動的シミュレーション環境を構築した。この様子を図9に示す。

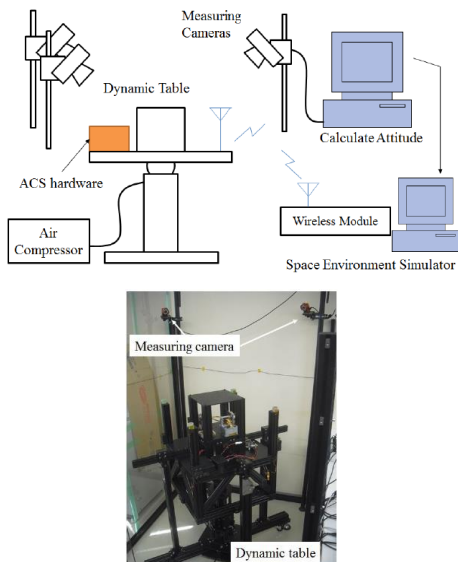


図9 動的シミュレーション環境

動的シミュレーション環境の姿勢をモニタカメラにより高精度検出し、その情報を用いてシミュレーション環境内で姿勢制御系の性能評価が可能となった。テーブルにはテーブルに搭載する装置駆動用の電源を設置し、機器間の通信には無線通信を採用した。システムの重心合わせの精度を確保するため、テーブルの運動解析による重心位置合わせ手法を確立した。

#### (5) 軌道上データを用いた開発・評価環境の性能評価

超小型衛星 RISING-2 は本研究期間中である2014年5月に打ち上げられた(図10)。打ち上げ前においては本研究で構築した評価環境を用いて静的閉ループ試験を実施し、その性能を評価した。動的閉ループ試験はスケジュールの関係で実施することはできなかった。RISING-2 打ち上げ後の初期運用において衛星からのデータを地上で解析し、開発・評価環境の性能評価を実施した。ある時点でのフライトデータを初期値として使用し、その後の衛星の挙動を地上においてシミュレーションした結果と、実際に軌道上で取得されたデータの比較を実施した。その一例を図11, 12 に示す。地上において衛星の挙動を可視化しながら解析評価できると共に、推定値と実測値が非常によく一致することが確認でき、開発・評価環境の定性的な機能、及び実用性を確かめることができた。



図10 RISING-2 の打ち上げの様子

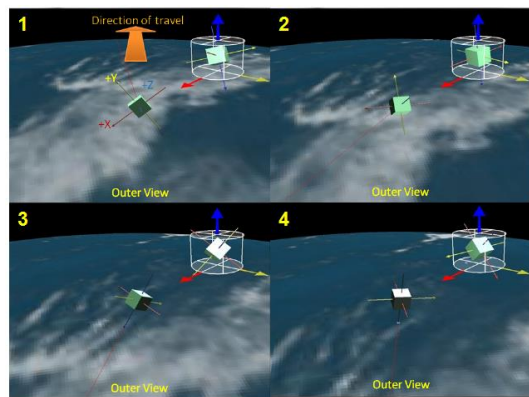


図11 フライトデータに基づく地上での姿勢シミュレーション結果

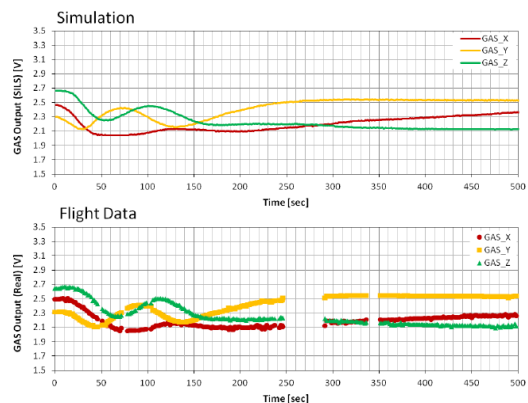


図12 フライトデータと地上シミュレーション結果の比較(磁場センサ出力値の比較)

RISING-2 衛星の姿勢制御系の高精度な性能評価は現在も引き続き実施段階である。参考として、RISING-2 衛星が取得した地球の高解像度画像を図13に示す。本研究で構築した開発・評価環境を用いた地上試験、運用支援も寄与し、質量クラス世界最高となる地上分解能約5mを達成した。

衛星の姿勢制御系のシミュレーション環境の精度は実装する物理モデルの精度に依存する。本研究で構築した開発・評価環境は用途に応じて柔軟にコンフィギュレーションが可能であり、幅広い分野に適用が可能である。将来的には小型人工衛星に限らず、小型宇宙システム(探査機、ローバー)等の開発・評価への利用も考えられる。



図13 RISING-2 が取得した地球の画像(高解像度カメラが撮像した南魚沼市近郊の様子)

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 3 件)

- ① Yoshihiro Tomioka, Kazuya Yoshida, Yuji Sakamoto, Toshinori Kuwahara, Kazufumi Fukuda, Nobuo Sugimura, “Establishment of the Ground Testing Environment for Verification and Integration of Micro-Satellite,” Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Science, Space Technology Japan, 査読有, Vol 12, Tf\_33-Tf\_38, 2014  
DOI: 102322/tastj12Tf\_33
- ② Toshinori Kuwahara, Steve Battazzo, Yoshihiro Tomioka, Kazufumi Fukuda, Yuji Sakamoto, Kazuya Yoshida, “System Integration of a Star Sensor for the Small Earth Observation Satellite RISING-2,” Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Science, Space Technology Japan, 査読有, Vol 10, Td\_1-Td\_6, 2012  
DOI: 102322/tastj10Td\_1
- ③ Kazufumi Fukuda, Nobuo Sugimura, Yuji Sakamoto, Toshinori Kuwahara, Kazuya Yoshida, Yukihiko Takahashi, “The Evaluation Tests of the Attitude Control System of the 50-kg Micro-Satellite RISING-2,” Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Science, Space Technology Japan, 査読有, Vol 10, Td\_11-Td\_16, 2012  
DOI: 102322/tastj10Td\_11

[学会発表] (計 6 件)

- ① Toshinori Kuwahara, Yoshihiro Tomioka, Kazufumi Fukuda, Nobuo Sugimura, Yuji Sakamoto, Kazuya Yoshida, “Model-Based Environment for Verification and Integration of Micro-Satellites,” 19<sup>th</sup> IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Wuerzburg, Germany, September 3, 2013
- ② Toshinori Kuwahara, Kazuya Yoshida, Yoshihiro Tomioka, Kazufumi Fukuda, Hiroo Kunimori, Morio Toyoshima, Tetsuharu Fuse, Toshihiro Kubooka, Junichi Kurihara, Yukihiko Takahashi, “Laser Data Downlink System of Micro-satellite RISESAT,” 27<sup>th</sup> Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan Utah, USA, August 12, 2013
- ③ Toshinori Kuwahara, Kazufumi Fukuda, Yoshihiro Tomioka, Masato Fukuyama, Yuji Sakamoto, Kazuya

Yoshida, “Attitude Control System of International Scientific Micro-Satellite RISESAT,” 29<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, June 5, 2013

- ④ Yoshihiro Tomioka, Kazuya Yoshida, Yuji Sakamoto, Toshinori Kuwahara, Kazufumi Fukuda, Nobuo Sugimura, “Establishment of the Ground Testing Environment for Verification and Integration of Micro-Satellite,” 29<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, Nagoya Congress Center, Nagoya, Nagoya, Japan, June 5, 2013
- ⑤ Kazufumi Fukuda, Toshinori Kuwahara, Yoshihiro Tomioka, Nobuo Sugimura, Yuji sakamoto, Kazuya Yoshida, “Dynamic Test Table with Spherical Air Bearing for Microsatellite,” 29<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, Nagoya Congress Center, Nagoya, Nagoya, Japan, June 5, 2013
- ⑥ Yoshihiro Tomioka, Kazuya Yoshida, Yuji Sakamoto, Toshinori Kuwahara, Kazufumi Fukuda, Nobuo Sugimura, Masato Fukuyama, Yoshihiko Shibuya, “Establishment of the Environment to Support Cost-effective and Rapid Development of Micro-Satellites,” International Astronautical Congress, Naples, Italy, October 5, 2012

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等  
該当無し

6 研究組織

- (1) 研究代表者  
栗原 聡文 (KUWAHARA TOSHINORI)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号 : 30601033
- (2) 研究分担者  
該当無し
- (3) 連携研究者  
該当無し