

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289329

研究課題名(和文)超小型衛星システム技術を応用した形状可変宇宙システムの機能実証研究

研究課題名(英文)Function Demonstration Study of Variable-Shape Space Systems Utilizing
Microsatellite System Technology

研究代表者

松永 三郎(Matunaga, Saburo)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：00222307

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：ミッションが高性能化、複雑化する超小型衛星のために、超小型衛星システム技術を高度化する研究・開発を実施した。特に50kg級超小型衛星のフライトモデルを完成させ、軌道上運用に成功し、貴重な情報を得た。そして、高度化技術をもとにミッション遂行時に作業要求に合わせて形状を最適な大きさ、形に変更できる「可変形状宇宙システム」を実現するための基礎研究を実施した。特に、形状可変姿勢制御を提案し、解析・試作・実験により、その有効性を示した。並行して、具体的な軌道計画ミッションを選定して、早期軌道実証を目指した超小型衛星システムの概念設計を行い、実践的な研究開発を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to meet advanced requirements in near future microsatellite missions, research and development of microsatellite system technology were conducted for enhancement of its functionality. In particular, flight model of 50kg micarosatellite TSUBAME was finished, launched and operated to gain valuable lesson learned. Next, concept of variable-shape space system was focused which has configuration change function in order to make itself adaptive for task requirement in mission operations. In the study, variable-shape attitude control was proposed and its fundamental research was conducted: extraction of element technology, analysis, development and experiment. In particular, concept design of 50kg micarosatellite Hibari was reviewed using variable-shape attitude control to conduct a new scientific observation.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：宇宙システム 超小型衛星 再構成システム

1. 研究開始当初の背景

(1)全質量50kg級およびそれ以下の超小型衛星の研究開発が、全世界において驚異的な勢いで活発に進められている。日本でも、東工大（JAXA宇宙研）・松永研と東大・中須賀研が、1kg級キューブサットの世界初軌道上実証に成功して、多くの大学が超小型衛星の世界に参入した。近年、超小型衛星の研究開発が重点化され、宇宙工学において新しい分野が開拓されつつある。オールジャパン体制を築き画期的成果へと結実させることで、世界をリードし、社会に貢献することが期待されている。

(2)松永研は、3機の1-3kg級超小型衛星を開発・打上運用に成功し、特にCute-1.7+APD IIではAPDセンサによる世界初の低エネルギー粒子の全球観測に成功した。H21年度から50kg級衛星TSUBAMEの研究開発に本格的に着手した。TSUBAMEは、超小型軽量のコントロールモーメントジャイロ(CMG)を用いた高速姿勢変更技術の実証、宇宙で起こる天体の突発的爆発現象であるガンマ線バーストの硬X線偏光観測、災害監視・海上の船舶航行状況監視・気象観測・植生観察等を目的とした地上・海上及び雲の高解像度可視観測である。TSUBAMEは、従来の同サイズの衛星と比較して、電力密度やバッテリー容量密度において3~6倍あり、姿勢の迅速変更・高指向安定制御の両立を目指すという非常に高度な技術を先鋭的に盛り込んだ極めてハイリスクな挑戦的科学技术実験衛星であり、超小型宇宙システムを用いた最先端技術の早期宇宙実証を行うという明快な方向性を体現している。H26年度中にフライトモデルを完成させ、ロシアのドネイプルロケットにて打ち上げられる予定である（本科研はH26年度開始）。

2. 研究の目的

(1)今後、ますますミッションが高性能化、複雑化することが予想される超小型衛星の需要にこたえるために、超小型衛星システム技術を高度化する研究・開発を実施する。

(2)その高度化技術をもとにミッション遂行時に作業要求に合わせて形状を最適な大きさ、形に変更できる「可変形状宇宙システム」を実現するための基礎研究を実施する。

3. 研究の方法

(1)「可変形状宇宙システム」の実現に必要な要素技術課題を抽出し、超小型衛星システム技術を応用して、解析・試作・実験により、その解決を図る。

(2)並行して、具体的な軌道計画ミッションを選定して、早期軌道実証を目指した超小型衛星システムの概念設計を行い、実践的な研究開発を行う。

4. 研究成果

(1) 超小型衛星システム技術を高度化する

研究開発

(1)-1. 50kg級超小型衛星TSUBAMEのフライトモデルの開発と打ち上げ、運用：

50kg級TSUBAMEは、世界最小・高トルクのコントロールモーメントジャイロ(CMG)を用いた高速姿勢変更制御の実証、突発的天体現象の硬X線偏光観測、地球の災害監視等を目的とした高解像度可視観測をミッションとし、H26年11月にドネイプルロケットにより軌道上に打上、初期運用に成功した。

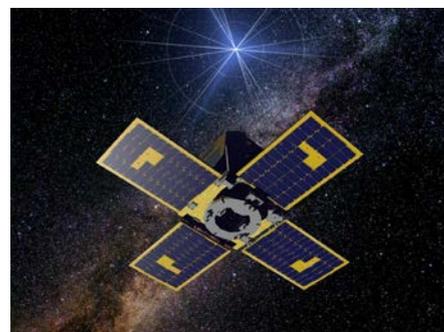
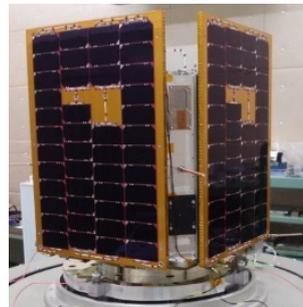


図1 超小型衛星TSUBAMEと軌道上想像図

TSUBAMEは運用初期にアマチュア帯通信周辺回路に不具合を生じ、復旧作業を行ったが、3か月後に通信が途絶した。軌道上データをもとにH26-27に徹底した原因究明と対策を行い、学会論文として公開した。この過程で最先端衛星の解析・設計・製造・試験・運用に関する実践的なノウハウを体得した。

TSUBAMEの再挑戦を目指して、TSUBAME2として計画書を取りまとめ、JAXA宇宙研の小規模プロジェクト公募にH27年2月に応募したが不具合原因究明途中であったためなどで不採用となった。

その後、(2)に述べる改善・先鋭化された50kg級衛星「ひばり」ミッションを優先して、CMG単体、偏光観測器はそれぞれ別の衛星に搭載して実証する道を探ることとした。高解像可視カメラ技術は別の衛星にて既に軌道上実証された。

(1)-2. 高性能姿勢アクチュエータCMGの操舵制御則に関する研究：

CMGとは、高速回転するフライホールを、その回転軸と直交するジンバル軸回りに、回転させることによってCMGに生じるトルクの反作用トルク（ジャイロトルク）を衛星本体に働かせるためのアクチュエータであり、それを通常複数組み合わせ、衛星の姿勢制

御を行う。本研究では、3軸姿勢制御方法を検討した。具体的には、超小型衛星 TSUBAME を題材にとり、CMG を用いた制御方法と地上統合試験について研究を行った。

姿勢表現に修正ロドリゲスパラメータを用いた修正スライディングモード制御、また CMG の操舵則として、従来の G-SR 操舵則の 2 組のパラメータに対して新しい選定基準を用いた W-SR 操舵則を提案し、数値シミュレーションにより有効性を示した。センサモデル、CMG を含むハードウェア駆動モデル、姿勢決定制御ソフトウェアを組み込んだ衛星シミュレータを用いて、CMG の各種姿勢制御法を衛星搭載計算機に実装し、姿勢変更性能や消費電力などの軌道上性能を模擬して、その有効性を明らかにした。

さらに 4 基のコントロールモーメントジャイロ CMG をピラミッド配置した宇宙機の大幅角度姿勢変更において、ハードウェア特性を考慮し、計算時間を大幅に短縮した高速姿勢変更制御則を考案し、その有効性を数値シミュレーションで示した。また、単一のアクチュエータで 3 軸姿勢制御が可能なる可変速 2 軸ジンバル CMG の逆運動学に基づいた駆動則を提案し、高精度で特異点回避／通過の判断が可能であることを数値シミュレーションにより示した。

(1)-3. 太陽電池による発生電力を模擬した衛星シミュレータに関する研究：

太陽光の放射照度・セル温度に応じた太陽電池の発生電力を模擬する電源、計算機内の姿勢・軌道シミュレータ、衛星の姿勢制御、搭載計算機からなるシミュレータを提案して開発して、TSUBAME がロケット分離から太陽指向まで最長となる条件でも電力収支が正になりバッテリーが枯渇しないことを示した。衛星打ち上げ後、地上実験を行い、ロケット分離後のバッテリー残量の変化を軌道上データと比較して 5% の精度で推定した。

(1)-4. 深層学習を用いた地球姿勢センサの研究開発：

超小型衛星搭載を目指した低コスト多機能センサとして、画像処理に深層学習を応用した地球姿勢センサの研究と軌道上フライトに向けた開発を実施した。可視光領域で撮影した画像を衛星オンボードで複数の物体に高精度で分類することが可能な、分解能要求に応じた識別器 (Multi-layered Perceptron と Convolutional Neural Network) の設計と、衛星搭載を想定した計算機上での性能評価を行った。

また、上記識別方法を利用し、低軌道における可視光画像を用いた 3 軸姿勢決定手法を提案し、基本的性能を評価した。

さらに、上記のセンサを実現するためのハードウェア設計 (構造体と電気回路) と基本機能確認を行った。



図 2 Convolutional Neural Network による識別例

(1)-5. 超小型衛星のアンテナ配置とその検証用通信シミュレータに関する研究：

超小型衛星の通信性能を最大化する目的で、衛星の軌道・姿勢を考慮した、複数アンテナの最適配置を求めるシステムの構築、設計指針の提案、衛星のドップラシフト・信号レベルの変動を無線信号で再現するシミュレータ開発を行い、有効性を示した。



図 3 通信シミュレータ

(2) 可変形状宇宙システムの研究

(2)-1 並進方向展開収納技術：

並進可変を実現するために、超軽量、高展開率を持つ展開ブームの設計・試作に関する研究を行った。高収納性と高比剛性を両立する伸展部材を実現するために、CFRP 製の 2 枚のブーム材を合わせ、それらをレースファスナーで閉断面処理する方法を取った伸展ブームを検討して、伸展収納実験、および解析検討を行い、課題を明確化した。

次に、本レースファスナーを用いたバイコンベックス型の伸展ブームについて、その試作モデルを用いた伸展収納実験や収差許容挙動の計測、さらに、有限要素解析を行い、その伸展収納特性を評価した。そして、ブーム剛性を高め、伸展中の屈曲を防ぐ方法を提案して、その効果を実験的に示した。



図 4 伸展ブーム

(2)-2 可変形状姿勢制御の提案と性能検討：

松永は太陽電池パドルなどを回転駆動させることによって生じる反トルクにより姿勢制御を行う“可変形状姿勢制御 (Variable Shape Attitude Control : VSAC)”を提案した。この方式は、高い迅速性と高い安定性の両立を目指した姿勢制御方法である。

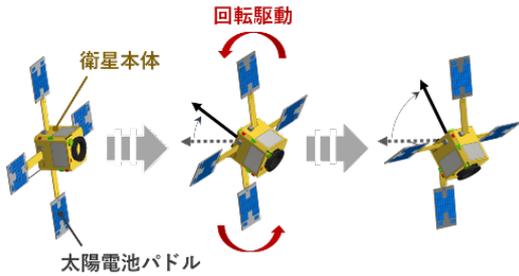


図5 形状可変姿勢制御の概念図

この方法は衛星全体を姿勢変更するのではなく、部分的に姿勢変更するため、必要なエネルギーが大幅に減少することを示した。

次に、可変形状姿勢制御による迅速姿勢変更とその後の低擾乱な高精度指向制御に関して、角運動量基準による制御則、リアクションホイールを併用した制御則、最短時間最適制御則を提案し、各種性能を評価した。

さらに、空気潤滑を用いた地上実験装置を整備し、駆動機構、ヒンジ、アーム、本体の挙動評価を行った。

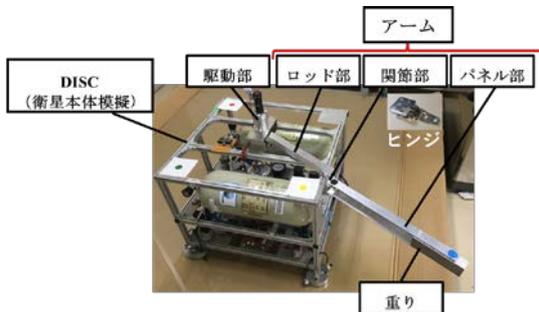


図6 地上実験装置の外観

(2)-3 50kg 級超小型衛星「ひばり」のミッションと基本的概念検討：

可変形状宇宙システムの具体例として、形状可変姿勢制御を有効活用する科学ミッションである重力波天体の極紫外線計測の早期軌道実証を目指した超小型衛星システム「ひばり」の概念検討を行った。その成果を H28 年度の衛星設計コンテスト設計部門に提出し、設計大賞を受賞した。

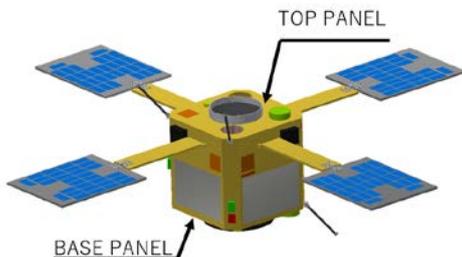
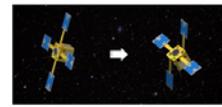


図7 ひばりの概念図

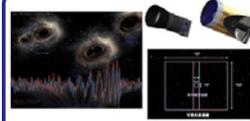
工学ミッション



形状可変機能を用いた迅速かつ高安定な姿勢制御

+

理学ミッション



突発天体の精密位置決定
爆発時増光フェーズの観測



連携ミッション



1. 突発天体検知後にその方向へ迅速姿勢変更
2. その後ただちに安定状態へ遷移し、科学観測

図8 ひばりの理工融合ミッション

今後、H31 年度以降の打ち上げを目指して、研究開発を進めていく予定である。

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) Ting HAO, Shota KAWAJIRI, Kyosuke TAWARA, Saburo MATUNAGA, "A Practical Rapid Attitude Maneuver Control System using Control Moment Gyros for Microsatellite TSUBAME," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 13, 2015, pp. 37-43, DOI:http://doi.org/10.2322/tastj.13.37

(2) T. Hao, S. Matunaga, "New Sliding Mode Control Approach for Rapid Attitude Maneuver using Control Moment Gyros," Journal of Aerospace Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 29, Issue 2 (March 2016), pp.10, 2015 DOI:http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000537

(3)M. Matsushita, Y. Yatsu, M. Arimoto and S. Matunaga, "Hardware Development and In-orbit Demonstration of the Electrical Power System for High-powered Microsatellite TSUBAME," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 60, No. 2 p. 109-115, 2017. DOI:http://doi.org/10.2322/tjsass.60.109

[学会発表] (計 31 件)

①M. Matsushita and S. Matunaga, "Flight Model Development and Integration Test of the Micro-satellite TSUBAME," The 21st Session of the Asia-Pacific Regional Space Agency Forum (APRSF-21), Space Technology Working Group, National Museum of Emerging Science and Innovation (Miraikan), Tokyo, Dec. 2-5, 2014.

②松下将典, 河尻翔太, 長洲 孝, 宮里和良, 鈴木聡太, 俵 京佑, キム・ユージン, 太田 佳, 古賀将哉, 下中淳史, カク・テイ, 栗田 真, 森山長久, 有元 誠, 谷津陽一, 木村真一, 松永三郎, "超小型衛星 TSUBAME のフライトモデル開発とクリティカルフェーズ運用," 5th UNISEC Space Takumi Conference, ISAS/JAXA, Kanagawa, Japan, Dec. 26, 2014, UNISEC 2015-003, pp. 28

③河尻翔太, 俵 京佑, 古賀将哉, 神谷崇志, 松永三郎, "超小型衛星 TSUBAME におけるロケット分離直後の姿勢制御シミュレーション," No. 14-77 講演会 第 23 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2014 年 12 月 19-20 日, コスモアイル羽咋, D04, pp. 6

④松下将典, 宮里和良, 古賀将哉, 伊藤 慶, 有元 誠, 谷津陽一, 松永三郎, "地球・天体観測技術実証衛星「TSUBAME」の電源系フライトモデル開発," No. 14-77 講演会 第 23 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス [SEC' 14], 2014 年 12 月 19-20 日, コスモアイル羽咋, D05, pp. 6

⑤太田 佳, 河尻翔太, 宮里和良, 古賀将哉, 谷津陽一, 松永三郎, "複数地上局を用いた超小型衛星用自動運用システムの提案," No. 14-77 講演会 第 23 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2014 年 12 月 19-20 日, コスモアイル羽咋, E06, pp. 6

⑥Masanori Matsushita, Kazuyoshi Miyasato, Masaya Koga, Eugene Kim, Sota Suzuki, Kei Ito, Makoto Arimoto, Yoichi Yatsu and Saburo Matunaga, "Major Upgrade of Electrical Power System for High-powered Micro-satellite", 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe Convention Center, July 6-10, 2015, 2015-q-11, pp. 5

⑦Shota Kawajiri, Masanori Matsushita, Kyosuke Tawara, Masaya Koga and Saburo Matunaga, "Attitude Simulation and Result of On-Orbit Initial Operation of

Microsatellite TSUBAME", 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe Convention Center, July 6-10, 2015, 2015-f-41, pp. 6.

⑧Sota Suzuki, Takashi Nagasu, Eugene Kim and Saburo Matunaga, "Thermal Design and Evaluation of Microsatellite TSUBAME Using Thermal Analysis During Orbit", 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe Convention Center, July 6-10, 2015, 2015-f-60, pp. 7.

⑨Kyosuke Tawara, Shota Kawajiri, Eugene Kim and Saburo Matunaga, "Accuracy Improvement on Attitude Maneuver Simulations for Microsatellites Using CMGs", 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe Convention Center, July 6-10, 2015, 2015-f-46, pp. 4

⑩Kyosuke Tawara and Saburo Matunaga, "On Attitude Control of Microsatellite Using Shape Variable Elements," The 24th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, ISAS, Sagami-hara, July 27-28, 2015, C-9.

⑪古賀将哉, 松下将典, 河尻翔太, 長洲孝, 松永三郎, "超小型衛星の軌道・姿勢運動を考慮した電力収支の高精度模擬", 日本機械学会 2015 年度年次大会, 北海道大学, 札幌, 2015 年 9 月 13-16 日, S1920101

⑫宮里和良, 松永三郎, "電磁場干渉を考慮した超小型衛星の通信システム設計について", 2015, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 北海道大学, 札幌, 2015 年 9 月 13-16 日, S1920102.

⑬松永三郎, 河合誠之, 谷津陽一, 木村真一, "超小型衛星 TSUBAME の開発と軌道上運用の総括", 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, かごしま県民交流センター, 鹿児島, 2015 年 10 月 7-9 日, JSASS-2015-4360, 2I08.

⑭俵京佑, 松永三郎, "形状可変式姿勢制御のエネルギー効率と姿勢安定度に関する検討", 第 24 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, ことひら温泉「琴参閣」, 香川, 2015 年 12 月 21-22 日, B06.

⑮宮里和良, 松永三郎, 古賀将哉, 河尻翔太, "衛星・地上局の運用条件を考慮した超小型衛星のアンテナ配置最適化とそのシステム構築", 第 24 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, ことひら温泉「琴参閣」, 香川, 2015 年 12 月 21-22 日, C04.

⑯鈴木聡太, 松永三郎, 古谷寛, 宮崎康行, 渡邊秋人, "レールファスナにより結合されたバイコンベックスプームの伸展収納挙動の評価", 第 24 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, ことひら温泉「琴参閣」, 香川, 2015 年 12 月 21-22 日, D05.

⑰Kyosuke Tawara, and Saburo Matunaga, "New Attitude Control for Agile Maneuver and Stably Pointing Using Variable Shape

Function and Reaction Wheels,” 26th JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, C1, Kanagawa, Japan, July 25-26, 2016.

⑱ Shota Kawajiri and Saburo Matunaga, “Real-time Attitude Control for Agile Maneuver of an Spacecraft with CMGs,” 26th JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, C2, Kanagawa, Japan, July 25-26, 2016.

⑲ Sota Suzuki, Saburo Matunaga, Hiroshi Furuya, Yasuyuki Miyazaki, Akito Watanabe, “Folding and Unfolding Properties of Extension Boom with Slide Fasteners for High Rigidity and Storability,” 8th Asian Conference on Multibody Dynamics, The Japan Society of Mechanical Engineers JSME, Kanazawa Miyako Hotel, August 7-10, 2016.

⑳ 佐々木 謙一, 鈴木 聡太, 松永 三郎, “レールファスナを用いたバイコンベックスブームの伸展収納特性に関する FEM 解析による評価,” 1H10, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 函館アリーナ, 9 月 6~9 日, 2016

㉑ 古賀 将哉, 宮里 和良, 松永 三郎, “複数のアンテナを持つ超小型衛星のアンテナ最適配置について,” 3G04, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 函館アリーナ, 9 月 6~9 日, 2016

㉒ Kyosuke Tawara, Naoto Kondo, Yoichi Yatsu and Saburo Matunaga, “Numerical Evaluation of On-orbit Attitude Behavior for Microsatellites with Variable Shape Function,” 67th International Astronautical Congress, IAC-16-C1-8-9- x35261, Expo Guadalajara, Guadalajara, Mxico, Sep. 26-30, 2016.

㉓ 渡邊輔祐太, 俵京佑, 松永三郎, “形状可変機能を用いた Rest-to-Rest 三軸姿勢変更に関する一考察”, 第 25 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2B1, ホテルかめ福, 山口, 2016 年 12 月 21-22 日.

㉔ 古賀将哉, 宮里和良, 松永三郎, “ソフトウェア無線を用いた衛星通信シミュレータの開発”, 第 25 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 1A5, ホテルかめ福, 山口, 2016 年 12 月 21-22 日.

㉕ Masanori Matsushita, Osamu Mori, Nobukatsu Okuizumi, Yasutaka Satou, Takahashi Iwasa, Saburo Matunaga, “Wrinkles in a Membrane with a Small Thin Film with Different Stiffness under Tension Load: Experiments and Simulations,” 4th International Symposium on Solar Sailing, 17069, Kyoto, Japan, Jan. 17-20, 2017.

㉖ Shota Kawajiri, and Saburo Matunaga, “Real-time Attitude Control for Large-angle Agile Maneuvers of a Spacecraft with Control Moment Gyros,” 27th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, AAS 17-457, San Antonio, Texas, Feb. 5-9, 2017.

㉗ Kyosuke Tawara, Shohei Harita, Yoichi Yatsu, Saburo Matunaga, and Hibari project team, “Technology Demonstration Microsatellite Hibari: Variable Shape Attitude Control and Its Application to Astrometry of Gravitational Wave Sources,” 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-f-013, Ehime Prefectural Cultural Hall, Matsuyama, June 3-9, 2017.

㉘ Shota Kawajiri, and Saburo Matunaga, “Singularity Avoidance/Passage Steering Logic for a Variable-speed Double-gimbal Control Moment Gyro Based on Inverse Kinematics,” 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-d-165, Ehime Prefectural Cultural Hall, Matsuyama, June 3-9, 2017.

㉙ Masanori Matsushita, Osamu Mori, Nobukatsu Okuizumi, Yasutaka Satou, Takashi Iwasa, and Saburo Matunaga, “Wrinkling of a Membrane with a Curved Small Thin Film,” 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-c-40, Ehime Prefectural Cultural Hall, Matsuyama, June 3-9, 2017.

㉚ Yuhei Kikuya, Masanori Matsushita, Masaya Koga, Kei Ohta, Yuki Hayashi, Takehiko Koike, Toshiki Ozawa, Yoichi Yatsu, and Saburo Matunaga, “Fault Tolerant Circuit Design for Low-cost and Multi-Functional Attitude Sensor Using Real-time Image Recognition,” 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-f-093, Ehime Prefectural Cultural Hall, Matsuyama, June 3-9, 2017.

㉛ Kei Ohta, Takehiko Koike, Yoichi Yatsu, and Saburo Matunaga, “On-board Satellite Imagery Classification using Convolutional Neural Networks,” 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-n-10, Ehime Prefectural Cultural Hall, Matsuyama, June 3-9, 2017.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松永 三郎 (MATUNAGA SABURO)
東京工業大学・工学院・教授
研究者番号 : 00222307