

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月15日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246124

研究課題名（和文） 超小型衛星技術を応用した実践的な軌道上サービスシステムの探求

研究課題名（英文） Research on Practical On-Orbit Servicing Systems Using Nano-Satellite Technologies

研究代表者 松永 三郎（MATUNAGA SABURO）

独立行政法人・宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：00222307

## 研究成果の概要（和文）：

超小型衛星技術を応用した実践的な軌道上サービスシステムを創出するため、まず、JAXAの小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS を対象に、外観検査用の超小型分離カメラシステムを開発して、世界初のソーラーセイルの展開形状の撮影に成功した。カメラ画像を用いて三次元復元推定を行い、膜形状解析を実施した。新しい軌道上サービスシステムとして、サービスされやすい衛星という概念、Cluster Flight やクーロン力を利用した監視サービスに関して、最適設計法や航法誘導・姿勢制御則を提案した。

## 研究成果の概要（英文）：

For practical on-orbit servicing systems using nano-satellite technologies, a small deployable camera and a small separation system were considered for on-orbit observation of the large membrane deployment of the IKAROS: the world first solar sail spacecraft developed by JAXA, and the deployable camera has successfully taken the pictures of the fully deployed large membrane of the IKAROS on orbit. From the pictures, three dimensional image reconstruction has been conducted and the membrane shape was analyzed. As a novel on-orbit servicing, the concept of easily serviceable satellite, the cluster flight and a Coulomb charged formation flying were proposed and their optimal orbit design and guidance with two-axis attitude control were proposed.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	11,300,000	3,390,000	14,690,000
2010年度	11,300,000	3,390,000	14,690,000
2011年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
総計	33,600,000	10,080,000	43,680,000

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：航空宇宙システム

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙機・人工衛星のミッションが多様で複雑になるにつれて、大型宇宙構造物や膜面など極めて柔軟で軌道上で容易に変形して状態が変化しやすい展開構造物の利用が増えて、その状況監視などを行う軌道上サービスミッシ

ョンの重要性が意識されてきた。そこでは、軌道上での展開確認やデブリ等による損傷、材料の経年変化等による変形などを外観検査することが必要となるし、スペースデブリの除去を実現するためには、安全かつ確実に接近することが重要であり、高度な画像処理機能を備えた監視カメラシステムが要求されていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、構造物外観検査、船内外活動支援などの軌道上サービスシステム、軌道上／月惑星・理工学実験、要素研究開発に対して、我々が世界に先導して開拓してきた数 kg 級超小型衛星技術という新しい視点を導入し積極的に応用することで、実際に軌道上で実証することを考慮とした要素技術と統合システムの研究開発を行い、視覚機能技術(超小型カメラユニット、状態監視推定)、移動機能技術(超小型分離放出機構、姿勢制御、相対航法制御)、システム化技術(モジュールアーキテクチャなど)、統合実証実験について、基盤共通技術やシステム技術に関して総合的に検討することで、実践的な軌道上サービスシステムを探求・構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 宇宙用のデバイスは信頼度を優先するあまり、機能・性能面に限界があり、且つ大がかりな物が多く、上記のような画像処理機能を備えた監視カメラシステムを実現する事は困難である。そのため、携帯電話やデジタルカメラなどに活用されている民生用電子デバイスの宇宙環境適合性について評価を行った上で、故障に対してロバスタなシステムを構成することにより、小型で高機能な監視カメラシステムを構成する。これを用いた軌道上サービスの具体的なターゲットとして、航空宇宙研究開発機構 JAXA の小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS の外観検査を選定する。IKAROS は、差し渡し 20m にもなる 7.5 ミクロン厚の大型膜面をスピン展開させて展張を維持する計画であり、その形状外観検査用の超小型分離カメラとそれを放出する超小型分離機構のシステム検討を行い、フライトモデルまで開発し、その軌道実証に挑戦する。さらに得られた画像から IKAROS の膜面形状推定を試みる。

(2) 大型膜面構造物の展開時や展開後の運動状態の推定には、参照となる数学モデルならびにそれを用いたシミュレーション技術が必要で、そのモデルおよびシミュレーション結果と軌道上データとを比較することにより、軌道上での状態推定や数学モデルの再構築が可能となる。そこで、膜面特有のしわや折り癖を考慮した数学モデルを用いた膜面展開シミュレーションと軌道上データとの比較による数学モデルの検証と膜面画像からの特徴点抽出、ならびに、ステレオ視法による特徴点の三次元位置推定法の研究を行う。

(3) 新しい軌道上サービスシステムとして、「サービスされやすい衛星」の概念を検討し、

機器のモジュール化により交換可能性を高める衛星内の分散型情報アーキテクチャ、故障耐性・機能の発展性・リスク分散を高めるため衛星全体の機能を複数の衛星に分散させる“Fractionated Spacecraft”のための Cluster Flight の軌道設計、サービスされやすさの定義と、それを具現する衛星の構造・機器配置の自動設計システムについて考察を行う。

(4) 主衛星の周囲全体を監視する周回監視や一方方向監視などを実現するため、分離された監視デバイス(分離衛星)を遠隔力であるクーロン力によって能動的に制御する方法を対象に軌道面内における周回監視や一方方向監視の誘導制御則を検討する。

## 4. 研究成果

(1) IKAROS では、差し渡し 20m にもなる 7.5 ミクロン厚の大型膜面をスピン展開させて展張を維持するが、その形状外観検査用の分離カメラのシステム検討を行い、実際にフライトモデルを JAXA と連携して開発した。民生用電子デバイスやボードカメラレンズを、真空及び放射線環境への適合性評価を実施し、小型高機能なカメラシステムを開発した。搭載に伴うインターフェース調整を行うことで IKAROS 監視カメラ及び分離カメラとして使用した。そして、分離放出される分離カメラ部(DCAM) (カメラヘッド、バッテリー、送信機など)と分離機構部(回転付加機能付き保持分離機構、受信機、アンテナなど)を設計製作し、フライトモデルを完成させた(図1)。小型高機能監視カメラシステムは IKAROS に搭載され、2010年5月21日に打ち上げられ、世界初のソーラー電力セイルの展開状況をモニターすることに成功した(図2)。



図1 分離カメラシステム



(a) 本体側面カメラによる膜面展開写真



(b) 分離カメラによる IKAROS 全体写真

図2 小型監視カメラシステムによる成果

特に宇宙機から分離されることで自由な視点からの画像取得を実現する DCAM は無人宇宙機としては世界初の宇宙機自身の画像取得に成功し (2010年6月14日、19日)、世界的にも大きな反響を得た。衛星本体から離れて自由な視点で画像を取得するという考え方は、探査機や人工衛星のアプリケーションについての考え方に革新的な変革をもたらし、現在「はやぶさ2」「EISESAT」「ほどよし衛星3・4号機」など様々なミッションで活用が検討されている。

得られた複数枚の画像にわたって基準点を抽出し、画像間の視差から IKAROS 膜面形状を推定する方法として、2枚の画像間の視差を利用するステレオ法にくりこみ法と呼ばれる統計偏差除去法を組み合わせた膜面形状推定方法を検討した。図3にその結果例を示す。全体の傾向として、膜面は太陽側にたわんでいるという結果が得られ、IKAROS の姿勢データから推測される結果を支持しているが、今回のカメラ性能および運動方向制約のために形状推定精度は低いため、その高精度化は今後の大きな課題である。

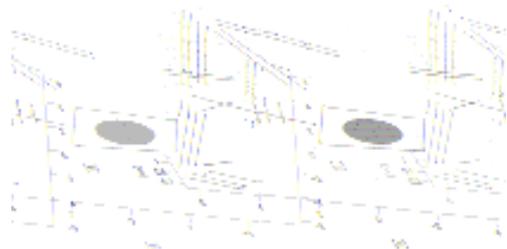


図3 DCAM 画像を用いた 3次元復元結果例

(2) 膜面特有のしわや折り癖を考慮した数学モデルを用いた膜面展開シミュレーションに用いた数学モデルの検証を小型ソーラー電力セル実証機 IKAROS の軌道上データ (スピンレートの時間変化など) を利用して行い、数学モデルの妥当性を示した。膜面画像からの特徴点抽出とステレオ視法による特徴点の三次元位置推定法について、軌道上を模擬した照度環境の暗室において膜面に取り付けたタグならびに折り目の頂点を特徴点とした三次元形状計測・誤差評価法を示した (図4)。そして、取得データから膜面の低次元数学モデルを再構築する方法として、経験的固有直交分解法が有効であることを示した (図5)



(a) 軌道上模擬暗室での膜面撮影 (左) と歪補正した小型カメラ画像例 (右)



(c) 大型真空層での膜面状態計測実験例

図4 三次元形状計測実験

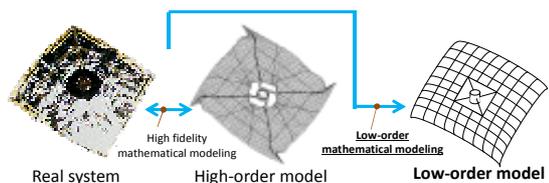


図5 低次元数学モデルの再構築方法

(3) サービスされやすい衛星のあり方に関する研究に関して、まず、①モジュール化を高める情報アーキテクチャのあり方について、第一に、モジュール型小型衛星を想定して、リンクとバスを複合して使う新しいネットワークのトポロジーを提案した。違うタイプを同時に使うことによってシナジー効果を生み、高い信頼度と性能を両立させることが可能になる。第二に、ハイブリッドネットワークのノードの配置最適化の手法と情報伝送の経路選択 (メッセージコントロール) のアルゴリズムを新しく提案した。

提案する最適化手法は、計算量を明示的に指定した中での効率的な探索ができ、速い学習と故障発生時の高い対応能力などの良好な性質を持っていることを示した。

Cluster flight の軌道設計に関する研究では、相対離心率および相対軌道傾斜角という新しい設計パラメータを使って遺伝的アルゴリズム (GA)により燃料最小の軌道を設計し、衛星の数が変化した際の軌道の再構成問題や、衛星間の衝突を回避できる軌道設計など、実際に起こり得る状況を想定した実際の軌道設計を行った。

サービスされやすい衛星の機器配置・構造設計に関する研究では、Serviceability の概念を定義し、それを最適化する衛星の機器配置・構造を設計する問題を定式化した。ここでは、機器配置を先に行いそれをつなぐ形で構造を設計するという、通常とは逆の順序での設計シーケンスを、全設計空間を探索できるよう自動化することで、人間の先入観に捉われない自由な構造の創出が可能となり、その中で特定の評価基準を満足する構造設計ができるシステムを構築している。このような「構造」というパラメータ化しにくい設計対象まで含んだ最適設計システムの研究は少なく、そこに Serviceability の定義と並ぶもう一つの本研究の独自性がある。

(4) クーロン力を利用した監視サービスに関して、クーロン力制御の特徴を整理し、実現性について検討した上で、従来のような静的平衡解を用いるのではなく動的平衡解を用いた編隊飛行について、監視を行う従衛星が主衛星の回りを周回しながら監視し、しかも回収できるシステム (以下、監視システム) の構成様式と航法誘導制御方法を新たに提案し、その有効性を示した。数値シミュレーションでは、外力として重力摂動の J2 項を含む引力、クーロン力、ローレンツ力なども考慮している。

放出時および回収時のクーロン力による相対位置・相対軌道制御に関して、軌道面内の周回軌道への誘導、および軌道面に対して傾斜する周回軌道への誘導、さらに回収軌道への誘導について、クーロン力のみを用いた最小システム構成における制御方法を具体的に提案した。監視を行う従衛星が目標方向へ指向するために、クーロン力のみを用いた最小システム構成において姿勢制御を行う方法について考察した。まず、クーロン力のみを用いた姿勢制御自由度として、1 軸制御と 2 軸制御に分け、それぞれの場合について、リアプノフ関数を用いて安定性を確保した姿勢制御方法を導出した。最小システム構成においてはクーロン力によって位置と姿勢の同時制御が困難であることを指摘し、それを解決するために位置と姿勢の制御を時間分割した切り替え制御による擬似的な同時制御方

法を提案するとともに、適切なクーロン電荷の配分方法を提案して、各パラメータによる影響を数値解析により詳細に検討し、提案方法の有効性を示した。さらに、回収時の 2 軸姿勢制御方法、監視を行う 2 機の従衛星の位置制御、そして従衛星の周回軌道自体の移動制御について考察を行い、特に、回収時の位置・姿勢制御については、回収時に従衛星を主衛星とのドッキング軌道に投入するため、確実な航法誘導制御の方法を提案し、その有効性を明らかにした。

一定方向監視のための制御について、航行平面には主衛星モデルの形状に由来する制御不能領域 (要求電荷量を満たせない領域) が存在することを示し、主衛星の安全性を考慮した誘導禁止領域の範囲内にて直線運動と楕円運動を組み合わせる手法を提案した。さらにこの制御則は位置・速度の目標値との差からクーロン力の要求量と、電荷制御装置の電荷要求量を算出する過程からなる航法誘導制御則を考案し、誘導可能領域内の任意の位置へ高精度で誘導制御が行われることを確認した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

① Paul Iliffe and Saburo Matunaga, "Release Guidance Analysis of a Deputy Satellite Using Charged Formation Flying for On-Orbit Servicing", Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.55, No.2, 2012, pp.99-108.

② Shinichi Kimura and Akira Miyasaka (2011) "Qualification Tests of Micro-camera Modules for Space Applications", Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 9, pp.15-20

③ Shinichi Kimura, Akira Miyasaka, Ryu Funase, Hirotaka Sawada, Nobuomi Sakamoto and Naoki Miyashita (2011) "High-Performance Image Acquisition & Processing Unit Fabricated using COTS Technologies", IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, Vol. 26, No. 3, pp. 19-25

④ Masahiko Yakazaki and Yasuyuki Miyazaki, "Empirical Model Reduction of Geometrical Constrained Gossamer Structures", Journal of System Design and Dynamics, Vol.5, No.3, pp.441-449, April 28, 2011.

⑤ Masahiko Yamazaki and Yasuyuki Miyazaki, "Empirical Model Reduction of Spinning Solar Sail," Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, Vol.8, No.ists27, Pc\_35-Pc\_40, December 29, 2010.

[学会発表] (計 38 件)

① Kim Jiyeon and Shinichi Nakasuka, Device-Centered Ontology Driven Information Modeling for the Easily-Serviceable Satellite, The 4th Aerospace Innovation Workshop, Tokyo, February 1-2, 2012

② Jihe Wang, Shinichi Nakasuka, Fuel-Optimal and Fuel-Balanced Cluster Flight Relative Geometry Maintenance Strategies, The 4th Aerospace Innovation Workshop, Tokyo, February 1-2, 2012

③ Jihe Wang, Shinichi Nakasuka, Fuel Optimal Impulsive Maneuver Strategy for Satellite Formation Reconfiguration Based on Relative Orbit Elements, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, June 5-12, 2011

④ Jihe Wang, Shinichi Nakasuka, Optimal Cluster Flight Orbit Design Method For Fractionated Spacecraft Based On Relative Orbital Elements, AIAA-2011-6235, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Portland, August 1-11, 2011

⑤ Ryo Hayase, Yasuyuki Miyazaki, Hiroyuki Kamemura, and Shoko Inoue, "A Study on Mechanical Model of Crease of Membrane", The 28th ISTS, 2011-c-31, pp.1-5, Okinawa Convention center, Okinawa, June 5-12, 2011.

⑥ M Masahiko Yamazaki and Yasuyuki Miyazaki, "Low-order Modeling and Experimental Validation of Spin Type Solar Sail Dynamics", The 28th ISTS, 2011-c-29, pp.1-7, Okinawa Convention center, Okinawa, June 5-12, 2011.

⑦ S. MATUNAGA, S. INAGAWA, T. NISHIHARA, S. KIMURA, H. SAWADA, O. MORI, K. KITAMURA and IKAROS Structure Team, "On-Orbit Demonstration of Deployable Camera System for Solar Sail IKAROS," 28th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Okinawa, Japan, June 5-10, 2011, 2011-o-4-07v.

⑧ H.Sawada, O.Mori, N.Okuizumi, Y.Shirasawa, Y.Miyazaki, M.C.Natori, S.Matsunaga, H.Furuya and H.Sakamoto, "Mission Report on The Solar Power Sail Deployment Demonstration of IKAROS," 52th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 12th AIAA Gossamer Spacecraft Forum, AIAA-2011-1887, Denver, Colorado, 4 - 7 Apr 2011, DVD.

⑨ Yasuyuki Miyazaki, Yoji Shirasawa, Osamu Mori, Hirotaka Sawada, Nobukatsu Okuizumi, Hiraku Sakamoto, Saburo Matunaga, Hiroshi Furuya, and Michihiro Natori, "Conserving Finite Element Dynamics of Gossamer Structure and Its Application to Spinning Solar Sail "IKAROS"", AIAA-2011-2181, pp.1-17, Denver, Colorado, 4 - 7 Apr 2011, DVD.

⑩ Masahiko Yakazaki and Yasuyuki Miyazaki, "Error Estimation of Low-Order Model for Gossamer Multi-body Structure", AIAA-2011-6281, pp.1-9, 2011, Denver, Colorado, 4 - 7 Apr 2011, DVD.

⑪ Paul Iliffè and Saburo Matunaga, "Two-Axis Attitude Control of a Deputy Satellite during Out-of-Plane Guidance in a Coulomb Formation", AIAA Guidance Navigation and Control (GNC) Conference, Portland, Oregon, August 8-11, AIAA-2011-6707, 2011

[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] なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松永 三郎 (Matunaga Saburo)

独立行政法人・宇宙航空研究開発機構・宇宙  
科学研究所・教授

研究者番号：00222307

### (2) 研究分担者

中須賀 真一 (Nakasuka Shinichi)

東京大学・工学系研究科・教授

研究者番号：40227806

宮崎 康行 (Miyazaki Yasuyuki)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：30256812

木村 真一 (Kimura Shinichi)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：00358920

### (3) 連携研究者

澤田 弘崇 (Hirotaka Sawada)

独立行政法人・宇宙航空研究開発機構・宇  
宙科学研究所・研究員

研究者番号：70392842