

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20246043

研究課題名(和文) テザー宇宙ロボットの軌道上実験解析と地上試験評価

研究課題名(英文) Orbital Experiment Analysis and Ground Test Evaluation  
For A Tethered Space Robot

研究代表者

能見 公博 (NOHMI MASAHIRO)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：20325319

研究成果の概要(和文)：

本研究はテザー宇宙ロボットの宇宙実験解析を目的とし、超小型衛星 STARS 軌道上実験、観測ロケット宇宙実験(TSR-S)、および地上シミュレーションを実施した。STARS は親子衛星/テザー衛星/ロボット衛星の特徴を持ち、各機能の技術実証に成功した。TSR-S ではテザー伸展に成功し、テザー張力が作用するロボットの姿勢制御実験に成功した。これらのデータ解析は、航空機実験・無重力模擬実験、数値解析による評価・検証を実施した。

研究成果の概要(英文)：

The purpose of this research is space experimental analysis for a tethered space robot, and on-orbital experiment of a pico-satellite "STARS," space experiment by the sounding rocket "TSR-S," and simulation on the ground have been performed. STARS is: mother-daughter satellite, tethered system, robotic system, and those techniques were verified. In the TSR-S experiment, tether was successfully extended, and attitude control under tether tension was achieved. These experimental data were analyzed by parabolic flight, ground experiment, and numerical simulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2009年度	15,800,000	4,740,000	20,540,000
2010年度	15,800,000	4,740,000	20,540,000
年度			
年度			
総計	35,700,000	10,710,000	46,410,000

研究分野：宇宙機械システム

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：宇宙実験、超小型衛星、ロボット、テザー

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者はテザー(ひも)の先端にロボットを持つ「テザー宇宙ロボット」を提案している。これは、テザーを利用した宇宙空間移動が可能であり、テザー先端宇宙機はロボット機能を有する。テザーに繋がれているため緊急回収が容易であり、冗長系を持たない最小機器構成で小型化できる。また予備燃料も必要なく、テザー張力を利用した移動、姿

勢制御による燃料節約、そして小型化へと繋がる。また、ロボットは作業対象があるため、とくに微小重力環境である宇宙では、接触・衝突の危険性が高い。小型化は、その被害を最小限に抑えることができる。テザー宇宙ロボットは、大型母船からテザー伸展により対象物に近づくシナリオで、宇宙機外観検査、人工衛星保守、軌道上デブリ(ごみ)処理、惑星探査などへの利用が期待できる。

「テザー宇宙ロボット」は1995年に提案、移動方法確立、テザー宇宙ロボット制御手法構築、などの理論解析研究を行った後に、2001～2003年度に日本宇宙フォーラム地上研究公募に採択され、とくに姿勢制御手法の検証・評価、テザーの挙動解析に焦点をあて、航空機および落下施設による微小重力実験を行ってきた。さらに同公募には、宇宙実証実験に向けた研究として2005/2006年度に採択され、実宇宙システムとしての評価も行った。

このような経緯から、いよいよ宇宙実証実験に向けたフェーズへ移行した。テザー宇宙ロボットの軌道上実証・評価の第一段階として、超小型人工衛星 STARS が平成 21 年 1 月に、相乗り衛星（主衛星 GOSAT）として H-IIA ロケットにより打ち上げられた。これは相乗り衛星公募として、平成 18 年夏に宇宙開発研究機構（JAXA）がはじめて実施したものであり、比較的後発である香川大学の衛星開発プロジェクトが選定された主要理由には、テザー宇宙ロボットの有用性が評価されたと考えることができる。

## 2. 研究の目的

テザー宇宙ロボットの実用化では、短距離テザーの安定性（長距離の場合、重力および軌道運動による遠心力で安定する）、テザー張力を利用した姿勢制御の有効性が、キー技術となる。本研究では超小型衛星 STARS の軌道上実験結果について地上試験およびシミュレーション等による解析を実施、さらに観測ロケット宇宙実験を実施、上記キー技術の評価／検証を行うことを目的とする。さらに、その解析結果に基づいて、実用ミッションへと繋げることを目指す。

本研究の学術的および宇宙開発の観点からの意義を次にまとめる。

### (1) 制御工学観点からの意義

ロボット制御に関して、ベース固定型ロボット制御手法は既に確立され、宇宙ロボットなどベース浮遊型ロボットについても、仮想マニピュレータ・一般化ヤコビ行列などの制御手法が提案されている。しかし、テザー宇宙ロボットはテザー張力が作用する状態で、ベース固定ともベース浮遊とも異なる手法が必要となる。その手法は、テザー先端系質量中心およびテザー連結点とテザー伸展方向の相対関係を、ロボット機能により操作し、テザー張力による回転力を制御する。この新規制御法の構築は、制御工学およびロボット工学への貢献が大きいものと期待できる。

### (2) 機械力学観点からの意義

宇宙構造物の運動解析を実現するために発展したマルチボディダイナミクスの分野

では、従来から行なわれてきた剛体系の解析を経て、柔軟系へのモデリング、定式化手法の開発が盛んに行なわれている。本研究で対象とするテザー宇宙ロボット運動解析では、超柔軟体と剛体との混在系、大変形・大変位・大回転を伴う非線形課題、制御系、時変系（伸展回収によるテザーの長さ変化）など、マルチボディダイナミクスにおける種々の先端的課題が包含し、かつ連携しており、その取り扱いが工学的、工業的な意義が大きい。

### (3) 宇宙開発への貢献

近年、宇宙デブリ問題は深刻な問題となりつつある。とくに低軌道上のデブリ対策は重要であり、「デブリを出さないようにすること」と同時に、既に宇宙空間に存在するデブリ、またはデブリとなる可能性のある宇宙機に対し、「デブリを排除すること」、「デブリによる被害に対応すること」、が必要となる。テザー宇宙ロボットは、これらの既存デブリへの対応に有効であると期待できる。

## 3. 研究の方法

本研究はテザー宇宙ロボットの宇宙実験解析を目的とし、超小型衛星 STARS 軌道上実験解析、追加実験として観測ロケット宇宙実験（TSR-S）、および宇宙実験データの評価／検証を目的とした地上シミュレーションを実施した。

### (1) テザー宇宙ロボットの姿勢制御

はじめに、本研究に共通するテザー宇宙ロボットの姿勢制御について説明する。制御手法では、テザーに連結されるロボットに作用するテザー張力により発生する回転力を利用する。このため、テザー張力方向の軸回りの制御は不可能である。図 1 はベースとアームから構成される平面モデルである。(a) に示すように、テザー張力が作用する状態において、テザー伸展線上にロボット質量中心位置がある場合、安定な平衡状態となる。(b) 及び (c) のように、平衡状態から逸脱すると、テザー張力による回転力が発生する。ア

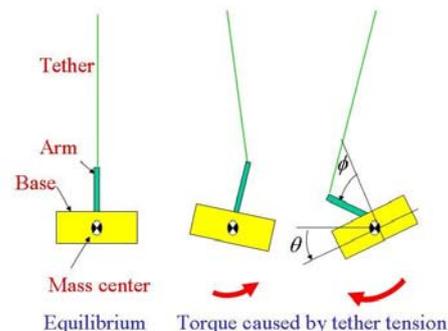


図 1 テザー宇宙ロボットの姿勢制御

ーム動作によりこの回転力を制御することで、姿勢制御が可能となる。なお、アームを傾けた状態においてもテザー伸展線上に質量中心がある場合は平衡状態となることから、任意の姿勢を目標とした制御が可能である。

## (2) 超小型衛星 STARS 軌道上実験

超小型衛星 STARS (Space Autonomous Robotic Satellite) は 2008 年 9 月に、図 2 に示すフライト機が完成した。概形 160×160×400mm・質量 8kg (親子結合状態) である。親子衛星、テザー衛星、ロボット衛星の特徴をもち、テザー伸展機能を持つ親衛星からテザー宇宙ロボットである子衛星を放出することを主ミッションとした。

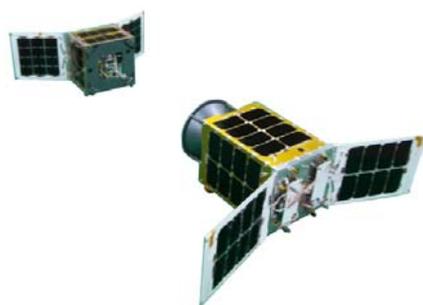


図 2 超小型衛星 STARS

STARS は 2009 年 1 月 23 日 12:54 (JST) に種子島宇宙センターより H-IIA ロケットにより打ち上げられた。14:32 (JST) に受信協力してくれた北海道工業大学が STARS からの電波を受信、香川大学では 14:34 (JST) に親機の電波を受信、14:36 (JST) に子機の電波を受信、正常に軌道投入されたことが確認された。なお、香川大学交信可能時間は、14:34~14:44 と推定されていたことから、ロケットからの分離および衛星起動が計画通り実施され、正常状態であることが確認された。

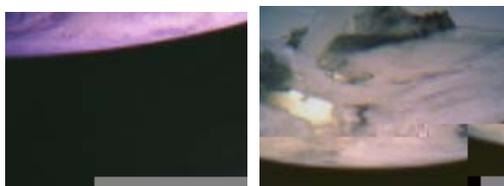


図 3 STARS による地球撮影画像

その後、初期チェックとして、地上からの指令により衛星が機能すること、衛星からのデータ取得が正常であること、ミッションに必要なカメラ撮影および衛星間通信機能を確認した。図 3 には衛星から撮影した地球画像を示す。

初期チェックが完了し、2 月 2 日に主ミッ

ションとなる親子分離によるテザー伸展実験を実施した。しかし、ここではテザー伸展が実施できなかった。この原因は、テザーはリールに巻き付けられ収納されているが、そのリールロック (打ち上げ振動に耐えるための固定) 解除操作が正常に行われていなかったためと推定されている。その後、緊急リールロック解除指令によりテザー伸展を実施できたが、テザー伸展長は数 cm から数十 cm 程度の結果となった (設計値は 5m)。これはリールロック解除操作中に生じた親子分離機構の不具合が原因と推定される。

親子分離によるテザー伸展実験は計画通りに実施することができなかったが、テザー



図 4 STARS の機体撮影画像

伸展機能、ロボットのフィードバック制御機能の検証実験は実施できた。また図 4 に子機から撮影した親機のパドルの画像を示す。これより、親子は確実に分離できていることが分かる。テザー伸展距離が十分でなかったために、テザー宇宙ロボットの実証には至らなかったが、超小型宇宙ロボットとして、開発、打ち上げ、軌道上動作実証したことの技術的意義は大きい。

## (3) 観測ロケット宇宙実験 (TSR-S)

2010 年 8 月 31 日、宇宙開発研究機構 (JAXA/ISAS) の観測ロケット S-520-25 号機により、TSR-S (Tethered Space Robot S) を鹿児島県内之浦から打ち上げた。S-520 は高度 300km 程度まで飛翔し、10 分程度の宇宙実験が可能であり、25 号機では JAXA/ISAS を中心とした首都大学および静岡大学の導電性テザー実験との相乗り実験として、テザー宇宙ロボット姿勢制御実験を実施した。

図 5 に本実験で用いたテザー伸展装置およびロボットを示す。高度 300km でテザー伸展装置からロボットが放出され、テザー張力を利用したロボット動作による姿勢制御実験を実施した。実験は成功し、アーム動作によ



図 5 テザー宇宙ロボットの観測ロケット実験

り姿勢変動を抑制することが可能であること、アーム中点を変更することにより目標姿勢を変更できること、が検証された。

#### (4) 地上シミュレーション

宇宙実験は貴重な機会であることから、事前の実験計画立案、および事後の実験データの信頼性・妥当性評価を目的に、4種類の地上シミュレーションを実施した。

はじめにハードウェアシミュレーションについて述べる。航空機実験は20秒間の微小重力環境を模擬でき、STARSに関してはロケットからの分離、親子の分離、TSR-Sに関してはテザー伸展装置からのロボット放出の事前検証を実施した。またTSR-Sに関しては姿勢制御挙動解析を実施した。可搬式汎用マニピュレータPA-10では、重力補償をした無重力状態模擬により、実験機搭載センサの妥当性を検証した。

次に数値シミュレーションについて述べる。汎用機構解析/動力学解析ソフトウェアADAMSを用いて、テザー伸展およびテザー宇宙ロボット姿勢制御解析を実施した。また、非線形有限要素法を用いたテザーの定式化を行い、長さ変化を解析できるシミュレーションツールを開発した。これらの数値シミュレーションモデルは、実用ミッションを含む次の宇宙実験に用いることができる。

### 4. 研究成果

#### (1) STARS軌道上実験結果

STARSではテザー張力を利用したロボットの姿勢制御実験には至らなかったが、大学衛星としては、親子衛星/テザー衛星/ロボット衛星として世界初となり、各機能の技術実証に成功した。親子衛星として、ロケットの打ち上げ振動に耐え、軌道上における衛星間通信等の機能を確認した。テザー衛星として駆動装置を用いた親子の分離およびテザーの伸展、そしてロボット衛星として、センサフィードバックによるロボット制御を実施した。低コスト・短期開発の特徴を持つ大学衛星により、ダイナミックな軌道上実験を実施した意義は高いといえる。

図6に、ロボットのフィードバック制御実験結果を示す。ジャイロセンサにより機体の姿勢角速度 $\omega$ を検出し、その角速度に制御ゲイン  $1\text{deg}/(\text{deg}/\text{s})$  を乗じた値をアーム関節角 $\phi$ の指令値としている。また空間運動であることから、平衡状態におけるテザー伸展方向に垂直な二軸を $y$ 軸および $z$ 軸とし、添え字で表す。なお、垂直破線時点において制御は終了している。各図は異なる周回において、地上管制局可視範囲に衛星が位置している状態での実験結果であり、親衛星と子衛星、およびテザーの状態が異なるため、挙動が異なる結果となっている。このため、本実験デ

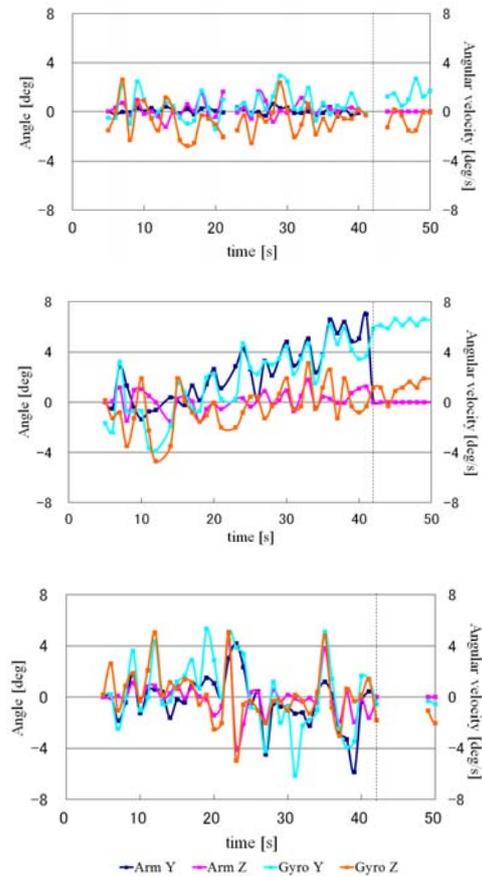
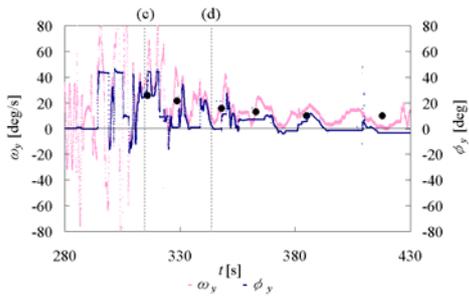


図6 フィードバック制御実験結果

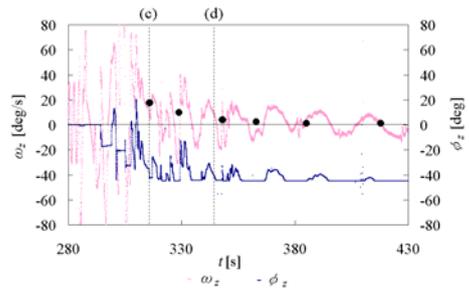
ータを定量的に評価することは困難であるが、ジャイロセンサ計測値を目標値としてアームが動作する「角速度フィードバック制御」が、定性的に検証できたといえる。

#### (2) TSR-S宇宙実験結果

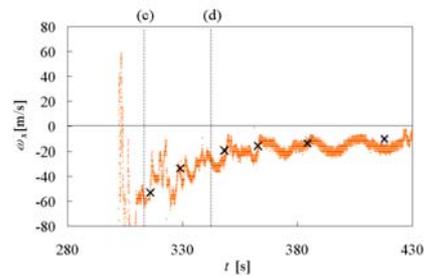
観測ロケット宇宙実験では、テザー伸展に成功し、テザー張力が作用する状態におけるロボットの姿勢制御実験に成功した。図7に実験結果について、(a)および(b)はRobot機軸垂直方向二軸( $y$ 軸および $z$ 軸)の角速度およびアーム角度、(c)はRobot機軸回り( $x$ 軸)の角速度を示す。観測ロケットは、機軸回りの約1Hzで回転しながら飛翔する。またこの実験では、目標姿勢角(平衡状態)を $\theta \neq 0$ としている。これらの理由から、目標状態において $\omega \neq 0$ となり、その値は機軸回りの角速度 $\omega_x$ により決まる。図(c)の $\times$ に示す $\omega_x$ から求めた目標状態の $\omega_y$ および $\omega_z$ を図(a)および図(b)に $\bullet$ で示す。アーム制御は $t=290$ から開始され、アーム角度が一定の箇所は、可動限界制限により停止している状態である。この実験結果より、Robotの姿勢はアーム制御により目標値へと収束するように動作していることがわかる。またグラフ後半では、アーム可動限界となる状態が多いため、



(a) 機体角速度・アーム角度 (y軸)



(b) 機体角速度・アーム角度 (z軸)



(c) テザー伸展軸回り機体角速度 (x軸)

図7 観測ロケット実験結果

抑制効果が少ないこともわかる。

### (3) シミュレーション

本研究では、宇宙実験の挙動解析を目的に数値シミュレータを開発した。数値シミュレータを用いて、超小型衛星 STARS 軌道上実験のミッション計画を立案、また観測ロケット宇宙実験 (TSR-S) の実験計画および実験結果のデータ解析を実施し、挙動メカニズムを明らかにした。さらに、次期衛星のミッション計画の立案を実施している。

汎用機構解析ソフトウェア ADAMS を用いた超小型衛星 STARS モデルを図 8 に、観測ロケット実験 TSR-S モデルを図 9 に示す。また、非線形有限要素法を用いたテザーの定式化について、一定の長さでの振動解析および長さ変化 (短縮) のシミュレーション結果について、図 10 および図 11 に各時刻におけるモードを示す。

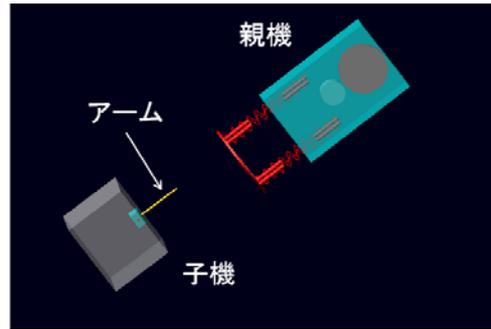


図 8 STARS ADAMS モデル

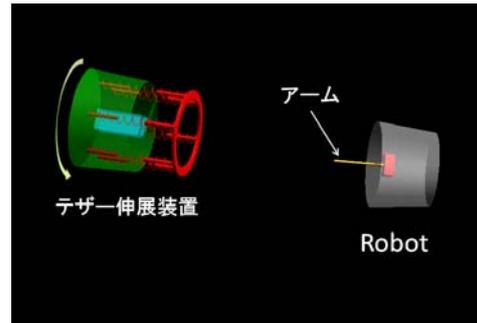


図 9 TSR-S ADAMS モデル

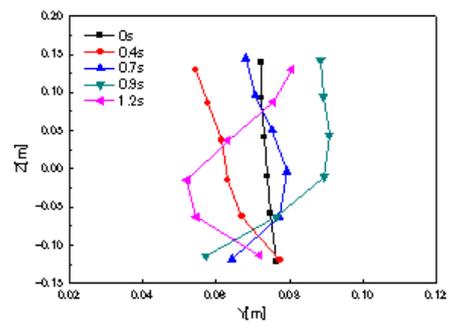


図 10 テザー振動解析

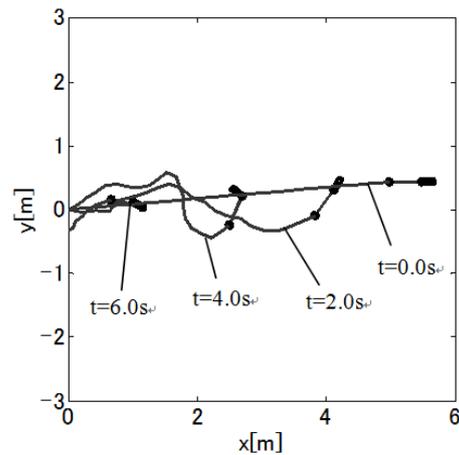


図 11 テザー長さ変化解析

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① M. Nohmi, T. Yamamoto, O. Itose, J. Saitou, "Rocket Separation Mechanism for Pico Mother and Daughter satellite "KUKAI", " Journal of System Design and Dynamics, Vol. 4, No. 6, Special Issue on D&D2009, pp. 984-995, 2010, 査読有.
- ② M. A. Abdullah Y. Michitsuji, S. Takehara, M. Nagai and N. Miyajima, "Swing-Up Control Of Mass Body Interlinked Flexible Tether," Archive of Mechanical Engineering, Vol. LVII, No.2, pp. 115-131, 2010, 査読有.
- ③ 能見公博,「超小型ロボット衛星の開発と軌道上動作実証」, 日本機械学会論文集 (C 編), 第76巻, 第770号, pp. 2515-2521, 2010年10月, 査読有.
- ④ M. Nohmi, "Microgravity Experiment for Attitude Control of A Tethered body by Arm Link Motion," Motion Control edited by Federico Casolo, INTECH, ISBN 978-953-7619-65-8, pp. 265-276, January 2010, 査読有.
- ⑤ 能見公博,「香川衛星 KUKAI の超小型テザー伸システム軌道上実験」, 日本機械学会論文集 (C 編), 第75巻, 第760号, pp. 3144-3151, 2009年12月, 査読有.
- ⑥ M. Nohmi, et. Al., "Kagawa Satellite "STARS" in Shikoku," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 7, No. ists26, pp. Tu\_7-Tu\_12, October 2009, 査読有.
- ⑦ S. Takehara, Y. Terumichi, M. Nohmi, K. Sogabe, "Numerical and Experimental Approaches on the Motion of a Tethered System," Journal of System Design and Dynamics, Vol.2, No.5, pp. 1106-1117, 2008, 査読有.

[学会発表] (計7件)

- ① M. Nohmi, "Mission Design for Pico-Satellite "Space Tethered Autonomous Robotic Satellite II" ," International Astronautical Congress, Prague, Czech Republic, Sep. 30, 2010.
- ② S. Takehara, Y. Kondo, Y. Terumichi, T. Yoshimura, "Modeling of Tethered Mobility Device," 5th Asian Conference on Multibody Dynamics 2010, Kyoto, Japan, Aug. 23-26, 2010.
- ③ M. Nohmi, J. Tanikawa, T. Hosoda, "Simulation Analysis of a Tethered Space Robot for Space Experiment on Sounding Rocket by JAXA/ISAS," IEEE International Conference on

Mechatronics and Automation, 西安, 中国, Aug. 5, 2010.

- ④ M. Nohmi, "Initial Experimental Result of Pico-Satellite KUKAI on Orbit," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 長春, 中国, Aug. 11, 2009.
- ⑤ M. Nohmi, "Mission Design of a Tethered Robot Satellite STARS for Orbital Experiment," IEEE Conference on Control Application, St. Petersburg, Russia, Jul. 9, 2009.
- ⑥ M. Nohmi, "Mother-Daughter Satellite STARS for Short Tether Deploying Experiment," 4th Asian Space Conference 2008, Taipei, Taiwan, 1 Oct., 2008.
- ⑦ M. Nohmi, S. Takehara, Y. Terumichi, "Microgravity Experiment For Dynamical Analysis of A Tethered Space Robot," 4th Asian Conference on Multibody Dynamics 2008, Jeju, Korea, Aug. 20, 2008.

[その他]

ホームページ等

<http://starsl.eng.kagawa-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

能見 公博 (NOHMI MASAHIRO)  
香川大学・工学部・准教授  
研究者番号：20325319

### (2) 研究分担者

滝 康嘉 (TAKI YASUYOSHI)  
八代工業高等専門学校・機械電気工学科・助教  
研究者番号：00455180

### (3) 連携研究者

竹原 昭一郎 (TAKEHARA SHOICHIRO)  
首都大学東京・都市教養学部・助教  
研究者番号：20431819

曄道 佳明 (TERUMICHI YOSHIKI)  
上智大学・理工学部・教授  
研究者番号：50262118

### (4) 研究協力者

吉田 俊一 (YOSHIDA SYUNICHI)  
香川大学・工学部・技術職員