

## テザー宇宙ロボットの研究開発～提案から宇宙実証まで～

香川大学 能見 公博、吉田俊一、 上智大学 曄道佳明、 東大 竹原昭一郎、  
東北大 内山勝、武蔵工大 ネンチェフドラゴミル

### Space Environmental Test for a Tethered Space Robot

Masahiro Nohmi, Shunichi Yoshida: Kagawa University, 2217-20 Hayashi, Takamatsu, Kagawa 761-0396

E-mail: [nohmi@eng.kagawa-u.ac.jp](mailto:nohmi@eng.kagawa-u.ac.jp)

Yoshiaki Terumichi: Sophia University, Shoichiro Takehara: Tokyo University,

Masaru Uchiyama: Tohoku University, Dragomir Nenchev: Musashi Institute of Technology

The Space Tethered Autonomous Robotic Satellite (STARS) is being developed in Kagawa University, and it will be launched by the H-IIA rocket by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) in summer 2008. The main purpose of the STARS is technical verification for a tethered space robot. A tethered space robot is a new type of space robot system proposed in the previous work. The STARS consists of mother and daughter satellites. The mother satellite deploys the daughter satellite which controls attitude by its own link motion.

**Key Words:** Space Robot, Space Tether, Pico-satellite

## 1. はじめに

宇宙テザーシステム、宇宙ロボットは、それぞれ独自に数多く研究されている[1], [2]. これらを融合したテザーに連結されるテザー宇宙ロボットは、1995年に提案した新規的・独創的なものである[3].

効率的な宇宙活動を考えると、宇宙ロボットは小型であることが望ましい。自律型宇宙機は緊急時に他の宇宙機から対応することは困難であり冗長系を必要とし、大型かつコスト的にも効率が悪くなる。緊急時にテザーによる回収が可能なテザー宇宙ロボットは、最小限の機器を搭載すればよいため小型化できる。また、同様な理由により燃料消費の優位性も挙げられる。テザー張力を利用した移動、姿勢制御を行うことにより燃料消費は大きく抑えることができ、さらに緊急時の予備燃料も抑えることができる。テザー宇宙ロボットのアプリケーションは軌道上人工衛星の保守・点検・回収、デブリ処理など数多く考えられるが、とくに外観検査への利用は期待度が高い。

STARSは、テザー宇宙ロボットの宇宙実証を目的とした超小型衛星である。親機・子機から構成され、親機のテザー伸展によりテザー宇宙ロボットである子機が放出され、子機搭載カメラにより親機を撮影する。

## 2. テザー宇宙ロボット

テザー宇宙ロボットに関する研究では、これまでに微小重力実験解析を行ってきた。微小重力実験に用いた実験装置について、左側に子機（テザー宇宙ロボット）右側に親機（伸展回収装置）を図1に示す。

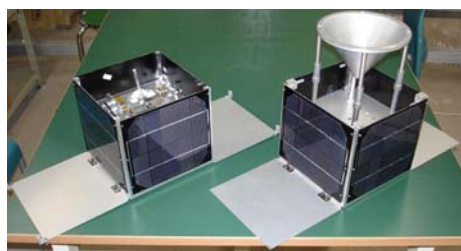


図1. 微小重力実験装置

### 2.1 落下実験

落下実験では、高精度微小重力環境 ( $10^{-5}G$ , 4.5秒) が模擬できることから、とくに姿勢制御解析を行っている。ここで、姿勢制御原理について、図2を用いて説明する。テザー張力が作用する場合には平衡状態が存在する。姿勢が変化するとテザー張力により平衡状態への復元力が発生する。ここで姿勢角フィードバックによりアームを操作すると復元力は大きくなる (P制御)。また、姿勢角速度フィードバックにより減衰効果を得ることができる (D制御)。

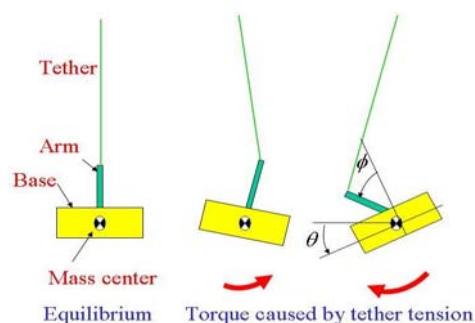


図2. 姿勢制御

図3に親機を固定して子機を伸展回収させた落下実験の様子を示す。これらの結果から、P制御が振動を増幅する可能性があることが分かった。これはアーム動作遅れ、およびアーム動作によるテザー張力変動が原因と考えられる。一方でP制御を行う場合、姿勢角フィードバックが必要であり、これはジャイロセンサー（角速度センサー）の積分値を用いることとなる。高精度姿勢角は三軸角速度の積分が必要であること、および積分誤差は避けられないこと、そして実験結果よりD制御により十分に姿勢制御が可能であることが分かった。

### 2.2 航空機実験

航空機実験 ( $0.05G$  以下, 20秒程度) は実験スペースを大きく取れることから、マクロ的な挙動解析を行った。親機・子機がドッキングした浮遊状態から、親機放出機構のばねにより子機に初速を与えて伸展回収実験を行った。実験を通して得られた知見は、ドッキ

ング状態ではロボット制御は停止させること（アーム動作により不安定な挙動となる）、ドッキングの衝突により親子は離れるが、衝突を繰り返すことにより、ドッキング状態へと収束する、などである。



図 3. 落下実験



図 4. 航空機実験

### 3. 超小型人工衛星 STARS

#### 3.1 ミッション概要

STARS のミッションは、親機から子機（テザー宇宙ロボット）を伸展し、カメラ撮影を行うことである。ミッション実施には以下に示す技術が必要となる。

- ◇ テザー宇宙ロボットの短距離伸展回収
- ◇ テザー宇宙ロボットの姿勢制御
- ◇ 衛星間通信による親子協調制御
- ◇ ランデブー撮影



図 5. STARS

STARS のミッションは、次の通り行われる。ドッキング状態の親子は、親機が子機（テザー宇宙ロボット）に初速度を与えることにより分離する。分離を確認後、子機はロボット制御を開始する。伸展回収はテザー張力制御およびロボット制御が行われている状態で実施され、その間にカメラ撮影を行う。ここで、ロボット制御により子機搭載カメラは親機を捕捉している。回収最終状態では、ロボット制御を終了し親子ドッキングする。これは一回のミッションであり、STARSでは複数回実施する予定である。

#### 3.2 搭載機器概要

親機の主要サブシステムは伸展回収系となり、伸展回収機構／放出機構／ドッキング機構から構成される。伸展回収機構は、モータとテザー巻き取りリールがパーマトルク（一定トルク伝達機構）により連結された機構となっている。モータを一定方向（巻き取り方向）に高速回転させ、子機に初速を与えテザーを伸展すると、パーマトルクによるトルクが巻き取りリールに作用することとなり、子機は減速、停止、回収されることとなる。放出機構は、圧縮ばねを圧縮／開放することにより、ドッキング機構により子機に初速を与えてテザーを伸展させる機能を持つ。ドッキング機構は円錐状のもので、定常運用で子機のアームは円錐中に格納され、親機の円錐底面と子機のアーム取り付け面が接している状態である。

子機の主要サブシステムはロボット系となり、アームとベースが関節機構により連結される構成となる。アームは、アームの軸回り以外の方向に回転できることが必要となるため、差動歯車機構を用いる。

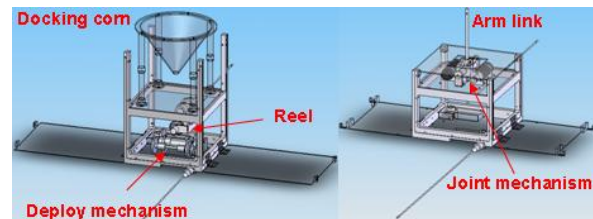


図 6. STARS 主要機構

## 4. おわりに

「テザー宇宙ロボット」の微小重力実験研究に関して述べ、宇宙技術実証を目的とした超小型衛星 STARS について説明した。航空機・落下施設における微小重力実験から、伸展回収実験の挙動解析を行い、その結果をもとに、宇宙実証機の開発を進めている。

## 文 献

- [1] C. C. Rupp and J. H. Laue, "Shuttle/Tethered Satellite System," The Journal of the Astronautical Sciences, Vol. 26, No. 1, pp. 1-17, 1978.
- [2] Y. Umetani and K. Yoshida, "Resolved Motion Rate Control of Space Manipulators with Generalized Jacobian Matrix," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 3, pp. 303-314, 1989.
- [3] 能見・内山, テザーを利用した宇宙ロボットの提案と挙動解析, 第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1995), 397 - 398.