テザー宇宙ロボットの姿勢制御に関する微小重力実験^{*1} Microgravity Experiment for Attitude Control of a Tethered Space Robot

能 見 公 博^{*2}
Masahiro NOHMI

Key Words: Space Engineering, Robot, Tether, Attitude Control, Microgravity

Abstract: A tethered space robot, which is connected to a mother spacecraft through a piece of tether, is a new space system proposed in the previous work. The tethered subsystem is envisioned to be a multi-body system for a robot, whose attitude can be controlled under tether tension by its own link motion. This paper discusses about microgravity experiment for a tethered space robot. Design and mechanism of the experimental device, required for the proposed attitude control, were explained. Also, link motion control algorithm was designed for the experimental device. Characteristics of the proposed attitude control were confirmed by microgravity experiment using a drop shaft, which can provide high quality microgravity condition during 4.5 s.

1. 緒 言

宇宙開発の進歩に伴い、軌道上サービスが重要となってきた。人工衛星の保守・点検はもちろんのこと、国際宇宙ステーション、将来的な軌道上中継基地などに伴い、その需要はますます増加すると予測される。このような軌道上サービスにおいて、空間を自由に移動できるロボットは、多種多様な作業要求に対応できると期待されている¹⁾。このような背景より、テザー宇宙ロボットを提案している²⁾。テザー宇宙ロボットは、大型母船から伸展されるテザー先端に小型ロボットを取り付けたシステムである。

テザーは軽量・収納性のよさから宇宙利用が期待され、古くから研究されている³⁾。従来の研究では、重力傾斜を利用した数 km から数百 km のテザー伸展が中心であり、伸展回収制御法として、線形レギュレータを用いた最適制御⁴⁾、ミッションファンクション制御⁵⁾などが提案されている。また、テザー先端機の姿勢を考慮し、テザー伸展位置をブームにより動作させる制御方法も研究されている⁶⁾。宇宙実証実験としては、Gemini-Agena プログラム⁷⁾、米・伊の共同プロジェクトである Tethered Satellite System Project⁸⁾ が実施されている。また将来的には Kyusyu-university Tethered Satellite Experiments⁹⁾ などが計画されている。

これらに対し、軌道上サービスを目的とするテザー宇宙ロボットは、伸展長を数 m から数百 m 程度と想定している。このため伸展方法は、初速度をテザー先端機に与える方法、例えばキャスティングなどを用いる¹⁰⁾。近年、このような軌道上サービスにテザーを利用するものとして、フォーメーションフライト¹¹⁾、デブリ処理¹²⁾、なども考えられて

いる。これらの研究を含めて、従来研究ではテザー先端機の姿勢制御は、テザー張力、リアクションホイール、スラスタなどを用いているが、テザー宇宙ロボットはテザー張力を利用したロボット動作による姿勢制御を行う¹³⁾。これは、テザー先端が複数剛体系により構成されていることを利用して、テザー先端機の質量中心およびテザー連結位置とテザー伸展方向の相対関係を操作することにより、テザー伸展方向に垂直な二軸回りの、テザー張力による回転力を制御するものである。これは地上ロボットはもちろんのこと、空間浮遊型ロボット^{14, 15)}とも異なる新しい手法である。

本論文では、これまでに理論解析を行ってきたテザー宇宙ロボットについて、地上における微小重力実験による姿勢制御法の検証・評価を目的とする。テザー張力による回転力を空間的に制御するためには、二自由度関節が必要であることを考慮して、姿勢制御に適した関節機構を持つ実験装置を設計・製作し、その制御系を設計した。この空間的動作が可能な関節機構による制御を行うこと、および微小テザー張力を利用した姿勢制御は摩擦の影響を大きく受けるため二次元的な平面実験では十分ではないことを考慮して、落下塔において実験カプセルを落下させ微小重力環境を作り出す、日本無重量総合研究所¹⁶⁾において三次元微小重力実験を実施した。そして、テザー宇宙ロボットの姿勢制御に関して、実験解析により、実用面における特徴を明らかにした。

2. テザー宇宙ロボット実験装置

2.1 基本構成 テザー宇宙ロボットの姿勢制御は、ロボットに作用するテザー張力によ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り、この軸に垂直な二軸の回転力を制御し姿勢制御を行う。第 1 図に、姿勢制御に必要なアームとベースから構成されるモデ

^{*1} © 2005 日本航空宇宙学会
平成 16 年 9 月 30 日原稿受理
^{*2} 香川大学

ルを示す．テザー伸展位置に固定された慣性座標系 $O-xyz$ を Σ_i とする．ベースに固定され，原点が球関節中心に位置し，平衡状態においてテザー伸展方向を二軸とする座標系 $O-012$ を Σ_r とする．

テザー張力が作用する状態において，テザー延長線上（図中 z 軸上）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．第 1 図は平衡状態であり，ここでは球関節中心とベース質量中心位置を一致させているため，図中 0 軸および 1 軸回りの任意のベース姿勢を目標とすることができる．そして，0 軸および 1 軸回りのアーム動作により，ロボットに作用するテザー張力による回転力を制御し，姿勢制御を行うことができる．

このモデルに，さらにロボットとしての機能を追加することが可能である．作業用アームをベースに取り付けた場合，ベース姿勢が制御されていれば，例えば，一般化ヤコビ行列¹⁴⁾，仮想マニピュレータ¹⁵⁾により作業用アームを制御することが可能である．

2.2 実験装置 テザー宇宙ロボット実験装置は，第 1 図に示す基本モデルをもとに設計・製作した．第 2 図に実験装置を示す．テザーはアーム先端に取り付けられる．電源としてバッテリー（特別仕様）を搭載し，自律系とすることにより外部からの配線をなくし，ロボットに作用する外力は，アーム先端に作用するテザー張力のみとした．パラメータは，次の通りである．

ベース寸法	261×261×82 [mm]
アーム長	100 [mm]
質量	4.7 [kg]

実験装置に搭載する制御装置は，第 3 図に示す構成となっている．制御は 1 台のマイコン（AKI-H8・秋月電子社製）を用いて 1 ms 周期で行う．日本無重量総合研究所で使用する落下カプセルで実施可能な小型装置を考えると，姿勢角検出はジャイロセンサーが適している．ベースにジャイロセンサー（CRS03-02・シリコンセンシングジャパン社製または JG-108FD1・日本航空電子社製）を 2 個取り付け，二軸（0 軸および 1 軸）の角速度（ ω_0 および ω_1 ）を検出する．アーム関節駆動は，0 軸および 1 軸に沿って配置するモータ（3042w012c・FAULHABER 社製）により行う．その回転角（ ϕ_0 および ϕ_1 ）は，機械的インターフェースを介してポテンショメータ（357-2-0・SPECTRO 社製）により検出する．各データは，記録装置に保存される．

2.3 アーム関節機構 第 1 図に示す球関節の二軸（0 軸および 1 軸）をモータにより駆動するため，第 4 図に示すように，二つの駆動関節および三つの自由関節，合計五つの関節から構成される機構を用いる．直交する二軸に二駆動関節（関節 1 および関節 2）を配置し，それぞれ同じ軸に自由関節（関節 a および関節 b）を配置し，この二軸の交点をアーム軸とし，回転自由な関節（関節 c）により連結する．この関節機構により，0 軸回りおよび 1 軸回りに，アームを回転させることができる．

第 1 図 基本構成モデル

第 3 図 実験装置電子部品構成

第 2 図 テザー宇宙ロボット実験装置

第 4 図 アーム関節機構

第5図 アームとベースの回転運動

3. 姿勢制御手法

3.1 テザー張力による回転力制御 第5図に、平衡状態から逸脱した回転運動のようすを示す。ここで、アーム先端位置ベクトルについて、第1図の平衡状態で慣性座標系 Σ_r の z 軸と一致しているものを p_i 、アームが動作していない状態でベース固定座標系 Σ_r の2軸と一致しているものを p_r 、アームが動作している状態のものを p とする。また、テザー張力ベクトルを n 、ベース姿勢角速度ベクトルを $\omega = [\omega_0 \ \omega_1 \ \omega_2]^T$ とする。

テザーは柔軟な連続体であり、その挙動を予測・計測することは困難であるため、ロボットに作用するテザー張力を把握することは難しい。そこで、テザーはロボットの大きさに対し十分に長いものとし、またテザー張力は一定とし、 Σ_i 上においてベクトル n は時間によらず一定と仮定して、制御系を設計する。また、ベース質量はアーム質量と比較して十分大きいものとし、アーム動作によるベースへの反力は無視する。これより、テザー張力によりロボットに作用する回転力 τ_r は、

$$\tau_r = p \times n = -n \times p_r - n \times (p - p_r) \quad (1)$$

と表される。式(1)において、アーム動作により変化するのは p であり、 p_r および n は変化しない。第1項はベースが回転することによる平衡状態への復元力であり、アーム動作がない場合にも発生する。第2項はアーム動作により変化する回転力であり、この項によりテザー張力による回転力を制御することができる。

3.2 アーム動作制御 テザー張力方向軸回りの制御は不可能であることを考慮すると、制御目標は p_r を p_i に一致させることとなる。この制御目標に対し単純なPD制御を考えると、テザー張力による回転力を復元力と減衰力を含むものとする。このため、 Σ_i に対する Σ_r の姿勢について、方向が回転軸を表し、大きさが回転量を表す回転ベクトル Ω 、および Σ_r の角速度ベクトル ω を、フィードバックする必要がある。

製作した実験装置は、二つのジャイロセンサーにより軸回りの角速度を検出するため、 Σ_r の0軸および1軸回りの角速度は検出されるが、姿勢を検出することは困難である。そこで、

$$\theta_i = \int \omega_i dt, \quad (i = 0, 1) \quad (2)$$

として、回転ベクトル Ω の i 軸成分と仮定する。また、

$$p - p_r = \ell \begin{bmatrix} \phi_1 \\ -\phi_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

と仮定する。ここで、 ℓ はアーム長である。式(2)および式(3)の仮定は、ベース姿勢変動およびアーム動作角が微小であるに基づくものであり、これらが大きい場合、制御効果に影響を及ぼすことを考慮しなければならない。

テザー張力ベクトルは、 $n = [0 \ 0 \ n]^T$ と表されることを考慮すると、式(2)および式(3)の仮定を用いると、式(1)は次の通り表される。

$$\tau_r = -n \times p_r - n\ell \begin{bmatrix} \phi_0 \\ \phi_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

k_p および k_d は制御ゲインとして、アーム動作制御式を、

$$\begin{bmatrix} \phi_0 \\ \phi_1 \end{bmatrix} = k_p \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \end{bmatrix} + k_d \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \omega_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

とすると、式(4)は次の通り表される。

$$\tau_r = -n \times p_r - n\ell k_p \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ 0 \end{bmatrix} - n\ell k_d \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \omega_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)において、第1項はベース姿勢変化による復元力、第2項はアーム動作による復元力、第3項はアーム動作による減衰力を表している。

ところで、式(6)において、アーム動作がない場合でも、 $-n \times p_r$ による復元力が作用する。これより、 $k_p = 0$ の設定でも姿勢制御は可能であることがわかる。このとき、復元力の計算に用いる仮定式(2)の影響は無く、アーム動作が大きい場合の減衰効果は、仮定式(3)の影響を受けることとなるが、大きなベース姿勢変動に対しても、姿勢制御が可能となる。

微小重力実験は、アーム動作による姿勢制御の基本的特性を調べることを目的とし、姿勢変動が大きい場合でも適用可能な $k_p = 0$ (D 制御) を基本とする。これに対し、 $k_d = 0$ (P 制御) では復元力のみとなるため振動が発生し、 $k_p, k_d \neq 0$ (PD 制御) では目標姿勢への収束性が向上することが予測される。

4. 微小重力実験

4.1 実験施設と伸展回収装置 微小重力実験は日本無重量総合研究所 (MGLAB) で実施した。MGLAB では落下塔において実験カプセルを自由落下させ、約4.5秒間の高精度微小重力空間 (10^{-5} G レベル) を作り出すことができる。実験カプセル内に設けられているユーザースペースは $\phi 720 \text{ mm} \times 885 \text{ mm}$ 、搭載可能最大重量 400 kg である。また実験カプセルは自由落下後に制動され、最大加速

第 6 図 伸展回収装置

第 7 図 D 制御による実験結果

度は 10 G となる。

ロボットは、第 6 図に示す機構により伸展回収される。この機構では、モータとテザー繰り出し・巻き取り用リール

第 8 図 PD 制御による実験結果

の間に、一定トルクを発生させることができるパーマトルク（工進精工所社製）を介すことにより、一定テザー張力を維持することができる。テザー長さはエンコーダ（RE30E・日本電産コパル電子株式会社製）により、テザー張力はロードセル（T1・株式会社オリエンテック社製）により測定される。初期状態において、ロボットはばねに支えられたプレート上に設置される。このとき、ロボット自重によりばねは圧縮されている。微小重力状態に移行するとロボット自重はゼロとなり、ばねは伸びることとなる。結果としてロボットは押し出され（射出）、テザーは伸展される。ところで伸展回収用モータは実験前から終了まで常に駆動し、パーマトルクを介して一定トルクをリールに伝達する。このため、ロボットには常に一定のテザー張力が作用し、押し出されたロボットはやがて停止、回収されることとなる。

第9図 P 制御による実験結果

4.2 実験結果 第7図～第9図に、次の制御パラメータおよび設定張力 n による実験結果を示す。

- (i) D 制御 $k_p = 0, k_d = 2, n = 60$ [gf]
- (ii) PD 制御 $k_p = k_d = 3, n = 60$ [gf] (7)
- (iii) P 制御 $k_p = 2, k_d = 0, n = 100$ [gf]

各図において、第1列目はテザー長さ L 、第2列目および第3列目は0軸回りのベース姿勢角速度 ω_0 およびアーム角 ϕ_0 、第4列目および第5列目は1軸回りの ω_1 および ϕ_1 、第6列目はテザー張力 n を表す。ただし、第7図の(i) D 制御では、装置の不具合により、テザー張力測定データを得ることができなかった。また、(i) D 制御および(ii) PD 制御では、振動ジャイロセンサー（CRS03-02・シリコンセンシングジャパン社製）を用いて姿勢角速度を検出、(iii) P 制御では、ファイバ・オプティック・ジャイ

第10図 P 制御によるアーム動作

ロ（JG-108FD1・日本航空電子社製）を用いて各軸回りの姿勢角を検出している。このため、第9図の第2列目および第4列目は、姿勢角 θ_0 および θ_1 を表す。ジャイロセンサーおよびポテンショメータによる計測値はノイズが大きいため、100 ms の平均値を同時に示している。横軸は時間軸であり、落下開始時点をも $t = 0$ とする。微小重力状態は約 4.5 秒程度であり、その後落下カプセルは制動状態となるため、各図において $0 < t < 4.5$ の間が微小重力状態となる。

第7図のD 制御では、テザー長さ L が $t = 1.6$ 付近で不連続的に変化している。これは、ロボットがカプセル上部に衝突したためである。また、テザー長さ L が $t = 3.7$ 付近でも不連続的に変化している。これは、ロボットが回収され、カプセル底部に到達したためである。ロボットの挙動に関して、 $t = 0$ の射出時に外乱が発生しているが、その後姿勢が維持されている。また、最終的な大きな挙動は、カプセル底部に到達したためである。このことから D 制御では、外乱の発生による姿勢変動を補償し、目標姿勢を維持できることがわかる。

第8図のPD 制御では、テザー長さ L の変化は、微小重力状態である間、連続的に変化している。すなわち、微小重力状態の間に、ロボットがスムーズに伸展回収されていることがわかる。ロボットの挙動に関しては、 $t = 0$ での射出時に外乱が発生し、その後振動が発生しているが、減衰している。しかし、第7図の(i) D 制御の場合と比較すると、その挙動は大きく、姿勢制御は行われているが、目標姿勢への収束性が低いといえる。また、初期のアーム動作が大きいときに、張力変動が大きい。

第9図のP 制御では、テザー長さ L の変化は、連続的に変化した後、やや不連続に変化している。この不連続

第 11 図 0 軸 P 制御・1 軸 D 制御の実験結果

部分は、ロボットが回収され、カプセル底部に到達したためである。ロボットの挙動に関して、この場合は $t = 0$ での射出時の外乱発生はなく、途中から振動が発生し、増幅している。第 8 図の (ii) PD 制御の場合とあわせて考えると、式 (5) の第 1 項は回転運動の振動を増幅させている可能性がある。これは、アーム動作によるテザー張力の変動、およびモータの応答特性の遅延が原因であると考えられる。第 9 図に示す P 制御の結果について、第 10 図に制御指令角とアーム角、およびテザー張力を示す。この図から、アーム動作が大きい場合に、テザー張力変動が起きていることがわかる。また、振動のピークにおいて、アーム角は姿勢角から 100 ms 以上の遅れがあること、制御ゲインは $k_p = 2$ であるがアーム角は制御指令角より小さいこ

とがわかる。

式 (5) の復元項に起因する回転運動の振動発生について検証するため、アーム駆動二軸の一軸 (0 軸) を P 制御とし、他軸 (1 軸) を D 制御として実験を実施した。結果を第 11 図に示す。この実験では、テザー長さ L からロボットは、 $t = 1.0$ 付近でカプセル上部に衝突、 $t = 2.4$ 付近でカプセル底部に到達している。そしてロボットの挙動は、P 制御を行っている軸は回転運動の振動が増幅し、D 制御を行っている軸は回転運動がほとんど発生していない。また、P 制御を行っている軸のアーム動作が大きい場合に、大きなテザー張力変動が起きている。

5. 結 言

本論文では、これまでに理論解析を行ってきたテザー宇宙ロボットの姿勢制御手法の検証・評価を目的として、日本無重量総合研究所 (MGLAB) において落下塔による微小重力実験を行った。まずテザー宇宙ロボットの姿勢制御に必要な機構を設計し、落下カプセル内で実験可能な小型・軽量かつ自律系となる実験装置を製作した。そして、考案した機構に実装可能な制御手法を設計した。また姿勢制御をテザー張力が作用する伸張回収中に行うため、落下実験の特徴を考慮した伸張回収装置を製作した。

テザー宇宙ロボットの姿勢制御は、アーム動作によるテザー張力の回転力を制御することにより行う。テザー張力がテザー先端ロボットに作用する場合、テザー延長線上にロボット質量中心位置があると安定な平衡状態である。この平衡状態から逸脱すると、アーム動作がない場合でも、平衡状態方向にテザー張力が作用する。このため、減衰力を発生させるアーム動作により、姿勢制御は可能となる。この原理を利用した姿勢制御効果は、微小重力実験により検証・評価された。

姿勢制御精度を高めるためには、アーム動作により復元力を大きくすることが考えられる。しかし、本実験装置の制御系設計において、ロボットの三軸姿勢を検出するのは困難であること、さらに大きな姿勢変動またはアーム動作がある場合、機構を考慮したアーム動作を行う必要が生じること、またテザー張力を計測する必要があること、などの問題がある。さらに、微小重力実験結果からは、アーム動作が大きいと張力変動が発生すること、制御に遅れが生じると不安定な挙動となること、が確認された。ここでアーム動作による張力変動は、テザー宇宙ロボットの姿勢制御において特徴的な現象であり、とくに制御系設計において考慮する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 稲場典康, 小田光茂, 西田信一郎, 林 正人: 宇宙ロボットによる浮遊衛星捕獲のシステム設計, 日本航空宇宙学会論文集, 51 (2003), pp. 469-474.
- 2) 能見公博, 内山 勝: 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, pp. 397-398.
- 3) Rupp, C. C. and Laue, J. H.: Shuttle/Tethered Satellite System, J. Astronaut. Sci., 26 (1978), pp. 1-17.

- 4) Bainum, P. M. and Kumar, V. K.: Optimal Control of the Shuttle-Tethered-Subsatellite System, *Acta Astronaut.*, **7** (1980), pp. 1333–1348.
- 5) Fujii, H. and Ishijima, S.: Mission-Function Control for Deployment and Retrieval of a Subsatellite, *J. Guid. Control Dynam.*, **12** (1989), pp. 243–247.
- 6) Modi, V. J., Lakshmanan, P. K. and Misra, A. K.: On the Control of Tethered Satellite System, *Acta Astronaut.*, **26** (1992), pp. 411–423.
- 7) Lang, D. D. and Nolting, R. R.: Operation with Tethered Space Vehicles, Gemini Summary Conference, Houston, Texas, NASA SP-138, 1967, pp. 55–66.
- 8) Bergamaschi, S., Bonon, F., Merlina, P. and Morana, M.: Theoretical and Experimental Investigation of TSS-1 Dynamics, 44th Congress of the International Astronautical Federation, Graz, Austria, Paper No. IAF-93-A.3.21, 1993.
- 9) 板橋孝昌, 平山 寛, 八坂哲雄: 超小型テザー衛星 QTEX (1) プロジェクト概要, 第 48 回宇宙科学技術連合講演会, 2004, 2D01.
- 10) 能見公博, Nenchev, D. N., 内山 勝: キャスティングによるテザーロボットの宇宙空間移動, *機論 C*, **64** (1998), pp. 629–635.
- 11) 森 治, 松永三郎: 群型テザード衛星システムの回転運動制御, *日本航空宇宙学会論文集*, **50** (2002), pp. 109–117.
- 12) Ishige, Y., Kawamoto, S. and Kibe, S.: Study on Electrodynamic Tether System for Space Debris Removal, 53th International Astronautical Congress, Houston, Texas, IAF-02-A.7.04, 2002.
- 13) Nohmi, M., Nenchev, D. N. and Uchiyama, M.: Tethered Robot Casting Using a Spacecraft Mounted Manipulator, *AIAA J. Guid. Control Dynam.*, **24** (2001), pp. 827–833.
- 14) Umetani, Y. and Yoshida, K.: Resolved Motion Rate Control of Space Manipulators with Generalized Jacobian Matrix, *IEEE Trans. Robotics Automation*, **5** (1989), pp. 303–314.
- 15) Vafa, Z. and Dubowsky, S.: On the Dynamics of Space Manipulators Using the Virtual Manipulator, with Applications to Path Planning, *J. Astronaut. Sci.*, **38** (1990), pp. 441–472.
- 16) <http://www.mglab.co.jp/>