キャストイングにおけるテザー宇宙ロボットの運動制御*

能見公博^{*1}, Dragomir N. NENCHEV^{*2}, 内山 勝^{*3}

Motion Control of a Tethered Space Robot During Casting

Masahiro NOHMI^{*4}, Dragomir N. NENCHEV and Masaru UCHIYAMA^{**} Kagawa University, 2217-20 Hayashi-cho, Takamatsu-shi, Kagawa, 761-0369 Japan

This paper describes a casting strategy for a tethered space robot. The robot is tethered to the end-point of a spacecraft mounted manipulator which performs the casting. The casting strategy comprises three phases: (I) initial momentum is generated for the tethered robot using the spacecraft mounted manipulator; (II) the tethered robot takes off the spacecraft; (III) the tethered robot translates to a destination point. The following two control objectives should be met. First, the mass center of the tethered robot should arrive at the destination point accurately (translation control objective). Second, the angular momentum of the tethered robot with respect to its mass center should be zero at the destination point (angular momentum control objective). The translation control objective can be easily achieved using the spacecraft mounted manipulator. The manipulator is able to adjust the translational trajectory by controlling tether tension. We show here that to achieve the angular momentum control objective, it would be sufficient to invoke position control of the tether attachment point, in a cooperative manner with tether tension control.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Space Robot, Manipulator, Motion Control, Tethered Robot, Casting Strategy, Angular Momentum Control

1. 緒 言

宇宙開発において、空間を自由に移動できるロボット^{(1)~(3)}は、多種多様な作業要求に対応できると期待されている。しかし、その移動には推進力が必要である。この推進力に燃料を用いるロボットは、燃料消費量の増大、燃料噴射による宇宙機の汚染などが、問題となる。このような背景において、我々は「テザーロボット」を提案している^{(4)~(6)}。母船とロボットがテザーにより連結されたこのシステムでは、テザー張力を利用した宇宙空間移動が可能である^{(7)~(9)}。このため、燃料使用による前述の問題を回避できる。

テザーロボットの移動方法「キャストイング」は、大型である母船搭載マニピュレータを用い、テザーロボットを目標地点に投げ、テザー張力により停止させる方法である。この方法に関して、テザーロボットを質点と仮定した場合の制御手法を、すでに確立してい

る⁽⁴⁾。しかし、テザーロボットを剛体とすると、回転運動が励起される可能性があり、質点系における制御手法の確立・解析のみでは不十分である。

本論文では、複数の剛体と関節より構成されるテザーロボットを取扱う。このモデルでは、テザーロボット質量中心とテザー連結点のテザー伸展方向に対する相対位置関係に依存して、テザー張力に起因する回転力がテザーロボットに作用する⁽⁶⁾。その結果、テザーロボット質量中心まわりの回転運動が励起され、角運動量が発生する。慣性空間にベースが固定されていないテザーロボットでは、角運動量が零でない場合、その運動制御が困難となる。そこで、テザーロボットの関節動作による角運動量制御法を提案する。キャストイングにおいて、提案した制御法を用いて角運動量を零に維持することにより、テザーロボットは目標姿勢を維持して、目標地点に到達することができる。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、キャストイングの説明を行い、制御モデルを設定する。次に、移動軌道修正制御について説明し、テザーロボットを剛体とした場合のテザー張力に起因する回転力について調べる。その回転力を考慮して、テザーロボットの角運動量制御法を提案する。最後に、キャストイングのシミュレーションにより、制御法の検証を行う。

* 原稿受付 1999年7月19日。

^{*1} 正員, 香川大学工学部(☎761-0369 高松市林町2217-20)。^{*2} 正員, 弘前大学理工学部(☎036-8561 弘前市文京町3)。^{*3} 正員, 東北大学大学院工学研究科(☎980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)。

E-mail: nohmi@eng.kagawa-u.ac.jp

2. キャスティングと制御モデル

2・1 キャスティング キャスティング(図1)によるテザーロボットの移動は、次に示す三つの段階から構成される。

- ・加速段階：母船搭載マニピュレータを動かし、テザーロボットに目標地点方向の速度を与える。
- ・離脱段階：母船搭載マニピュレータの手先より、テザーロボットを切り離す。
- ・移動段階：テザーロボットが目標地点まで移動し、停止状態となる。すなわち、速度＝加速度＝0となる。

この方法では、テザーロボットが目標地点へ正確に移動し、停止状態とすることが目標となり、これを目標地点への到達と呼ぶ。すなわち、テザーロボットの位置を目標地点と一致させ、速度および加速度を零とすることである。さらに、目標地点において望ましい姿勢とするとともに、その姿勢を維持するため、テザーロボット質量中心まわりの角運動量を零とすることが必要となる。

本論文では、テザーロボット質量中心の目標地点への到達、およびテザーロボット質量中心まわりの角運動量の抑制を目的とし、基本的制御法を構築する。これらの目標に対し、宇宙空間における運用では、以下に挙げる影響に起因する外乱が考えられる。

(i) 自然外力

キャストイングは、自然外力が小さい宇宙空間において有効な方法である。すなわち、重力の影響が大きい地上では成立しない。軌道上の自然外力は、重力・磁力・空力・太陽風などが考えられる。キャストイングに大きく影響する外力は重力と考えられるが、軌道高度・テザー伸展方向・テザー長などの要素により、その影響は変化する。例として、地球軌道上高度 600 km 程度での運用を想定し、軌道半径 7 000 km で母船が軌道運動している場合、重力傾斜の影響が大きい

方向に 100 m テザーを伸展すると、テザーロボットに作用する加速度は $0.000\ 35\ \text{m/s}^2$ となる。

(ii) 母船の位置

テザーロボットの移動に伴い、宇宙空間に浮遊している母船の位置も移動する。その移動量は母船・テザーロボットの質量比により決定され、大形である母船の質量が小形であるロボットに対し大きいほど、母船の移動量は小さい⁽⁵⁾。また、母船搭載マニピュレータのテザーロボットを投げる動作は、母船の運動に影響を及ぼす。その影響を補償する方法は、一般化ヤコビ行列を用いた制御法⁽²⁾、アームと姿勢の協調制御法⁽³⁾などが考えられている。

(iii) 連続体としてのテザー⁽⁹⁾

テザーの材質として、ケブラー繊維が挙げられる。その物理パラメータを、線密度 $1 \times 10^{-3}\ \text{kg/m}$ 、ヤング率 $1 \times 10^4\ \text{N/mm}^2$ 、断面積 $1\ \text{mm}^2$ 程度に見積もると、テザーを 100 m 程度伸展した場合に、テザー総重量 0.1 kg 程度となる。また、テザー張力を 1 N とすると、たわみの発生量に影響するパラメータである伸張と横波の伝ば速度は、0.01 m 程度と 1 s 程度となる。

(iv) 母船搭載マニピュレータの手先位置

キャストイングを行う場合、母船搭載マニピュレータは大形となる。このため、マニピュレータの弾性を無視することはできない。このようなフレキシブルマニピュレータに関する研究は、振動抑制制御、弾性を考慮した手先位置制御、など数多く行われている⁽¹⁰⁾。ここでは、未知外乱を補償できる基本的な制御系を設計することを目的とし、これらの影響を検討することは別の課題とする。ただし、5章のシミュレーションでは、これらの影響に起因する外乱と同等以上の大きさの外乱を設定し、制御法を検証している。

キャストイングの制御目標は、テザーロボットの移動を表す並進運動量、および質量中心回りの回転運動を表す角運動量を、目標地点において零とすることである。この制御目標に対し、未知外乱に対する補償制御系を設計する場合、テザーロボット質量中心位置・運動量がフィードバック状態量として必要となる。そこで、テザーロボットのテザー連結位置、および連結されている剛体の姿勢は計測可能とし、テザーロボットに対する目標地点も計測できるものとする。また、母船搭載マニピュレータ・テザーロボットは、それぞれ関節角度が計測でき、ヤコビ行列を用いる制御が可能であるとする。

2・2 制御モデル 2・1 節に述べているように、基本的制御系を設計するため、次に示す仮定を設けたモデルを図2に示す。

Fig. 1 Tethered robot system

(i) 母船・テザー・テザーロボットに作用する外力は零とする。

(ii) 母船は慣性空間に固定されている。

(iii) テザーの質量・伸縮・たわみは無視する。また、張力のみを伝達でき、押力は伝達することができないものとする。

(iv) テザーロボットは剛体と回転関節で構成される。

まず、 x 軸がテザーロボットの目標移動軌道に平行となるように、母船に固定された慣性座標系 Σ_I を設定する。 Σ_I 上の位置ベクトルとして、目標地点を $\mathbf{d}$ 、母船搭載マニピュレータの手先位置を $\mathbf{s}_e$ 、テザー連結位置を $\mathbf{s}_0$ とする。テザー張力ベクトルは $\mathbf{F}$ とする。テザーと連結されるテザーロボットは、 $n+1$ 個の剛体により構成される。テザーと連結される剛体を剛体 0 とし、そこから順に連結される剛体を、剛体 1, 剛体 2, ..., 剛体 n とし、剛体 n はテザーロボットの手先とする。各剛体に関して、質量および質量中心回りの慣性テンソルを m_i および $\mathbf{I}_i$ 、質量中心位置ベクトルを $\mathbf{s}_i$ 、質量中心回りの角速度ベクトルを $\boldsymbol{\omega}_i$ とする。ただし、 $i=0, 1, \dots, n$ とする。そして、剛体 $i-1$ と剛体 i は回転関節 i において連結される ($i \neq 0$)。さらに、テザーロボットの総質量を $w (= \sum_{i=0}^n m_i)$ 、その総質量中心位置ベクトルを $\mathbf{s}_g (= \sum_{i=0}^n m_i \mathbf{s}_i / w)$ とする。また、関節回転角ベクトルを ϕ とする。

3. テザー張力によるテザーロボットの運動

3.1 テザーロボットの移動軌道修正制御 まず、テザーロボットを質点と仮定した移動軌道修正制御について説明する⁽⁴⁾。この仮定は、剛体モデルにおいてテザーロボット質量中心位置にテザーが連結され、回転運動が発生しない場合と同じである。目標テザー張力 $\mathbf{F}_d (= [f_d \ g_d \ h_d]^T)$ を、次のように設定する。

Fig. 2 Casting model

$$\mathbf{F}_d = \begin{bmatrix} f_d \\ -w \left\{ \mathbf{K}_v \begin{bmatrix} \dot{s}_{gy} \\ \dot{s}_{gz} \end{bmatrix} + \mathbf{K}_p \begin{bmatrix} s_{gy} - d_y \\ s_{gz} - d_z \end{bmatrix} \right\} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $(\dot{}) \equiv d()/dt$, $\mathbf{d} = [d_x \ d_y \ d_z]^T$, $\mathbf{s}_g = [s_{gx} \ s_{gy} \ s_{gz}]^T$ とし、 $\mathbf{K}_v$ および $\mathbf{K}_p$ は制御ゲインとする。さらに、 x 軸成分に関しては最終的に $s_{gx} = d_x$ となるように、 s_{gx} と $\dot{s}_{gx}$ および d_x の関数として f_d を与える。その具体例については、5.1 節の式(14)に示す。式(1)で表されるテザー張力を与えるために、母船搭載マニピュレータの目標手先位置 $\mathbf{s}_{ed} (= [s_{edx} \ s_{edy} \ s_{edz}]^T)$ を、 s_{edx} が与えられている条件において、次のように設定する。

$$\begin{bmatrix} s_{edy} \\ s_{edz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{gy} \\ s_{gz} \end{bmatrix} - \frac{1}{f_d} (s_{gx} - s_{edx}) \begin{bmatrix} g_d \\ h_d \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)を用いた母船搭載マニピュレータの手先位置制御により、テザーロボット質量中心の目標移動軌道からの逸脱を、 y 軸と z 軸成分に関して独立に補償できる。また、 f_d の値により決定されるテザー張力を与えると、テザーロボット質量中心の x 軸成分を制御でき、目標地点に到達させることができる。

3.2 テザー張力による回転運動 移動軌道修正制御は、テザーロボットにテザー張力を作用させることにより行われる。テザーロボットを剛体として扱う場合、このテザー張力に起因して、次式で表される回転力 N が発生する。

$$N = \tilde{\mathbf{s}}_{0g} \mathbf{F} = \frac{\|\mathbf{F}\|}{\|\mathbf{s}_{e0}\|} \tilde{\mathbf{s}}_{0g} \mathbf{s}_{e0} = \frac{\|\mathbf{F}\|}{\|\mathbf{s}_{e0}\|} \tilde{\mathbf{s}}_{0g} \mathbf{s}_{eg} \quad \dots (3)$$

ただし、 $\|\|$ はベクトルのノルムを表し、 $(\tilde{})$ は外積を記述する交代行列とする。任意のベクトル $\mathbf{a}_1$ と $\mathbf{a}_2$ の外積ベクトルは、 $\tilde{\mathbf{a}}_1 \mathbf{a}_2$ と表される。また、 $\mathbf{s}_{0g} = \mathbf{s}_g - \mathbf{s}_0$, $\mathbf{s}_{e0} = \mathbf{s}_0 - \mathbf{s}_e$, $\mathbf{s}_{eg} = \mathbf{s}_g - \mathbf{s}_e$ とする。式(3)より、テザー張力の大きさと、テザー連結位置・テザーロボット質量中心位置により、 N は決定されることがわかる。

テザー張力に起因する回転力により、テザーロボットの回転運動が励起されるため、テザーロボット質量中心まわりの角運動量が発生する。慣性空間にベースが固定されていないテザーロボットでは、角運動量が零でない場合、その運動制御が困難となる。また、目標地点においてテザーロボットを望ましい姿勢とするため、テザーロボット質量中心まわりの角運動量を零とすることが必要である。

式(3)において、テザーロボットの関節動作による制御が可能である変数は、テザーロボット質量中心とテザー連結点の相対位置関係を表す $\mathbf{s}_{0g}$ のみである。

$\|F\|$ は移動軌道修正制御則により決定されるので、角運動量制御のための入力値として用いることはできない。また、母船搭載マニピュレータの手先位置 s_e も同様に決定されるため、 s_{eg} および s_{e0} を入力値として用いることもできない。これより、テザーロボットの関節動作により N の大きさを制御することは困難であるため、その方向のみを制御することによる角運動量制御を行う。

4. テザーロボットの角運動量制御

4.1 テザーロボットの運動量 空間浮遊型ロボットの制御系設計には、慣性空間との運動学的関係を運動量により表すことが有効であると知られている⁽²⁾。テザーロボットはテザー張力が作用するため、完全に浮遊しているわけではないが、ベースが固定されていないため、運動量に基づいた制御系設計手法を用いる。

図2に示すモデルにおいて、運動量の定義よりテザーロボット各剛体の慣性座標系に対する運動量の総和 $\mathcal{L}_s$ は、次のように表される。

$$\mathcal{L}_s = \begin{bmatrix} P_s \\ L_s \end{bmatrix} = H_0 \begin{bmatrix} \dot{s}_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + H_\phi \dot{\phi} + \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{s}_0 P_s \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (4)$$

ただし、 P_s および L_s は並進運動量および角運動量を表す。また、各行列は次のとおりとする。

$$H_0 = \begin{bmatrix} wE & w\tilde{s}_{0g}^T \\ w\tilde{s}_{0g} & \sum_{i=0}^n \{I_i + m_i \tilde{s}_{0i}^T \tilde{s}_{0i}\} \end{bmatrix},$$

$$H_\phi = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n m_i J_{Li} \\ \sum_{i=1}^n \{I_i J_{Ai} + m_i \tilde{s}_{0i} J_{Li}\} \end{bmatrix}$$

ただし、 E は単位行列、 0 は零ベクトル、 $s_{0i} = s_i - s_0$, $i=0, 1, \dots, n$ とし、 $(\quad)^T$ は転置を表す。ここで、 J_{Li} および J_{Ai} は、剛体 i に関する質量中心の並進および回転について、剛体 0 に対するヤコビ行列を表す。同様に、テザーロボット質量中心の慣性座標系に対する運動量 $\mathcal{L}_m$ は、次のように表される。

$$\mathcal{L}_m = w \begin{bmatrix} E \\ \tilde{s}_g \end{bmatrix} \dot{s}_g \quad \cdots \cdots (5)$$

式(4)・(5)の差 $\mathcal{L}_r$ は、次のとおり求められる。

$$\mathcal{L}_r = \mathcal{L}_s - \mathcal{L}_m$$

$$= H_0 \begin{bmatrix} -\dot{s}_{0g} \\ \omega_0 \end{bmatrix} + H_\phi \dot{\phi} = \begin{bmatrix} 0 \\ L_r \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで L_r は、慣性座標系上におけるテザーロボットの質量中心まわりの角運動量である。

4.2 テザーロボットの角運動量制御 ここでは、テザーロボットの関節動作により、テザー張力に起因

する回転力を制御し、テザーロボット質量中心回りの角運動量 L_r を零とする方法を提案する。式(3)に表されるように、テザー張力に起因する回転力の大きさは移動軌道修正制御により決定され、連続的に変化する。この大きさをテザーロボットの関節動作により制御することは困難なので、その方向を連続的に制御する。これより、回転力は連続的に変化することとなる。

まず、式(3)を考慮して、次の変数を定義する。

$$\lambda = \frac{1}{\|s_{e0}\|} \tilde{s}_{0g} s_{eg} \quad \cdots \cdots (7)$$

ここで、3.2節に述べているように、 s_{eg} および s_{e0} はテザーロボットの関節動作により制御することはできないことを考慮して、 $s_{eg}/\|s_{e0}\| = \text{一定}$ と仮定する。そして、 L_r を零とする方向に回転力を発生させるように、 λ の目標値を設定する。ところで、テザー伸展方向である s_{eg} 回りの回転力を発生させることは不可能である。このため、 s_{eg} 回りの回転力を制御するためには、推進装置などの制御装置が必要となる。これは、テザーロボット質量中心の目標移動軌道からの逸脱が、移動量に比べ小さいことを考慮すると、 λ_x は制御不可能であることを意味する。そして、 λ_y および λ_z による s_{eg} に垂直な軸回りの角運動量制御が可能となる。この幾何学的条件を考慮して、 λ_y および λ_z の目標値 λ_{yd} および λ_{zd} を次のように設定する。

$$\begin{bmatrix} \lambda_{yd} \\ \lambda_{zd} \end{bmatrix} = -\zeta_\lambda \begin{bmatrix} L_{ry} \\ L_{rz} \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (8)$$

ここで、 ζ_λ は制御ゲイン、 $L_r = [L_{rx} \ L_{ry} \ L_{rz}]^T$ とする。次に、 λ の値を制御するため、テザーロボットの指令速度ベクトル ν^c を次のように表す。

$$\nu^c = \begin{bmatrix} \nu_e \\ \dot{\lambda}_y \\ \dot{\lambda}_z \end{bmatrix} = J_{st} \begin{bmatrix} -\dot{s}_{0g} \\ \omega_0 \end{bmatrix} + J_{mt} \dot{\phi} \quad \cdots \cdots (9)$$

ここで、 ν_e はテザーロボットの作業空間において、制御目的に応じて設定する速度ベクトルである。また、 J_{st} および J_{mt} は次のとおり表される。

$$J_{st} = \begin{bmatrix} J_s \\ J_\lambda \ 0 \end{bmatrix}, J_{mt} = \begin{bmatrix} J_m \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$J_\lambda = \frac{1}{\|s_{e0}\|} \begin{bmatrix} s_{egz} & 0 & -s_{egx} \\ -s_{egy} & s_{egx} & 0 \end{bmatrix}$$

ただし、 $s_{eg} = [s_{egx} \ s_{egy} \ s_{egz}]^T$ とし、 J_s および J_m は ν_e に依存して決定される。式(6)を式(9)に代入すると、指令速度ベクトルの関係式が次のとおり得られる。

$$\nu^c = J_g \dot{\phi} + J_{st} H_0^{-1} \mathcal{L}_r \quad \cdots \cdots (10)$$

ここで、

$$J_g = J_{mt} - J_{st} H_0^{-1} H_m$$

は一般化ヤコビ行列である⁽²⁾。式(10)を用いると、テザーロボットの制御目的を達成することができると同時に、 λ_y および λ_z を操作して y 軸および z 軸回りの回転力を制御することができる。式(10)により回転力を制御するためには指令速度ベクトルが二成分増加し、テザーロボットの角運動量制御には2自由度の冗長性を必要とすることとなる。

5. シミュレーション

5.1 シミュレーション設定 本論文で提案している制御法を、シミュレーションにより検証する。その検証は、次に述べる理由により、面内で行うことで必要十分である。まず、移動軌道修正制御は y 軸と z 軸成分に関して独立に制御されることが、式(2)よりわかる。また、角運動量制御に関しても、 λ_y および λ_z が L_{ry} および L_{rz} により独立に決定されるので、 y 軸回りと z 軸回りは独立に制御されることが、式(8)よりわかる。さらに、 $y(z)$ 軸回りの角運動量は $xz(xy)$ 面内の回転運動を引き起こし、 $z(y)$ 軸方向の移動軌道修正制御に影響を及ぼす。すなわち、移動軌道修正制御と回転運動制御は相互干渉するが、それは目標移動軌道を含む面内において発生する。これより、本シミュレーションは、 Σ_I 上 xz 面内において行う。

ところで、本論文で提案している制御法は、未知外乱に対する補償を目的とした制御系として設計している。そして、その外乱要因としては2.1節において挙げられるようなものが考えられるが、ここでは制御法の有効性を検証することを目的とするため、外乱の主要因を母船搭載マニピュレータの制御誤差のみとする。具体的には、制御パラメータを小さく設定することによる手先位置追従誤差の発生を考える。この設定を用いると、テザーロボットが母船搭載マニピュレータ手先と直接連結されている加速段階において手先位置誤差は大きくなり、テザー張力が作用する移動段階において手先位置誤差は小さくなる。

5.1.1 テザーロボットの設定 テザーロボットの制御は、手先姿勢維持および角運動量制御を目的とする。面内において、手先姿勢制御には1自由度必要である。また xz 面内において、式(7)はスカラー量 λ_y により表されるため、角運動量制御には1自由度の冗長性が必要となる。そこで、三リンク二関節の二自由度テザーロボットを考える。そして、次に示す制御則を用い、計算トルク法による制御を行う。

$$\ddot{\phi}^c = \zeta_v \{ J_g^{-1} (\nu^c - J_{st} H_0^{-1} \mathcal{L}_r) - \dot{\phi} \} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $\ddot{\phi}^c$ は逆動力学方程式に与える目標加速度、 ζ_v

は制御ゲインである。また式(10)において、

$$\nu^c = \zeta_v \begin{bmatrix} \Phi_{2d} - \Phi_2 \\ \lambda_{yd} - \lambda_y \end{bmatrix} \dots\dots\dots (12)$$

とする。ただし、制御ゲイン $\zeta_v = 1/1/s$ は次元を一致させるために設定しており、 $\Phi_2 (= \phi_0 + \phi_1 + \phi_2)$ は手先となる剛体2の姿勢を表し、目標姿勢を $\Phi_{2d} = 0$ とする。各リンクの質量中心はその中央にあり、パラメータは次のとおり設定する ($i=0, 1, 2$)。

$$m_0 = m_1 = 30 \text{ kg}, m_2 = 40 \text{ kg}, l_i = 1 \text{ m}, \\ I_0 = I_1 = 30 \text{ kgm}^2, I_2 = 40 \text{ kgm}^2$$

5.1.2 母船搭載マニピュレータの制御則

母船搭載マニピュレータは2リンクで構成され、母船との連結部に1関節、リンク間の連結に1関節の2自由度を持ち、面内可動範囲において任意の手先位置指令を与えることができるものとする。その手先位置制御には以下に示す計算トルク法を用い、各関節に τ_s で表されるトルクを与える。

$$\tau_s = h_s + M_s J_s^{-1} \\ \times \{ -\dot{J}_s \dot{q}_s + C_v (\dot{s}_{ed} - \dot{s}_e) + C_p (s_{ed} - s_e) \} \dots\dots\dots (13)$$

ただし、 h_s はコリオリ力・遠心力、 M_s は慣性行列、 J_s はヤコビ行列、 q_s は関節角ベクトルを表す。そして、制御ゲインについては追従誤差が発生するように、以下に示す設定を行う。

$$C_v = 2E \text{ 1/s}, C_p = E \text{ 1/s}^2$$

また、式(1)で表される目標テザー張力の x 軸成分は、

$$f_d = w \frac{\dot{s}_{gx}^2}{2(s_{gx} - d_x)} \dots\dots\dots (14)$$

とし、 z 軸成分の移動軌道修正制御ゲインは、テザーロボットを質点と仮定した移動軌道修正制御の解析⁽⁴⁾を踏まえ、次のとおり設定する。

$$K_v = 0.6 \text{ 1/s}, K_p = 0.9 \text{ 1/s}^2$$

ただし、 s_{gz} のみの修正となるので、式(1)における制御ゲインは一成分となり、 $K_v = K_v$ および $K_p = K_p$ とする。各リンクの質量中心はその中央にあり、パラメータは次のとおり設定する ($i=1, 2$)。

$$l_{si} = 2 \text{ m}, m_{si} = 10 \text{ kg}, I_{si} = 20 \text{ kgm}^2$$

5.2 シミュレーション結果

5.2.1 移動軌道修正と角運動量制御 テザーロボットの移動段階での目標地点を、次のとおり設定する。

$$(d_x, d_z) = (100, 2) \text{ m}$$

母船搭載マニピュレータの手先位置の初期値を、次のとおり設定する。

$$(s_{ex}, s_{ez}) = (-1, 2) \text{ m}$$

テザーロボットの初期値は次のとおりとし、加速段階・離脱段階では、初期値を維持するものとする。

$$\phi_i = 0 \text{ rad}, \dot{\phi}_i = 0 \text{ rad/s}$$

加速段階における母船搭載マニピュレータの制御は、

$$(s_{ex}, s_{ez}) = (0, 2) \text{ m}, (\dot{s}_{ex}, \dot{s}_{ez}) = (2, 0) \text{ m/s}$$

を離脱段階の目標値とし、手先が等加速度となる指令を与える。離脱段階は、 $\dot{s}_{ex}$ が目標値と一致した時点 ($\dot{s}_{ex} = 2 \text{ m/s}$) で行う。その結果を表 1 に示す。

5・2・2 協調制御による効果 移動段階では、母船搭載マニピュレータ目標手先位置は $s_{edx} = 0 \text{ m}$ として、式(2)より s_{edz} を求める。そして、次の二通りのシミュレーションを行う。

(i) 角運動量制御なし ($\zeta_v = 0 \text{ 1/s}$)

(ii) 角運動量制御あり ($\zeta_v = 1 \text{ 1/s}$)

ただし、式(11)において $\zeta_v = 1 \text{ 1/s}$ とする場合、目標値に対する追従誤差は無視できる程度である。また、式(12)における λ_{yd} を式(8)より求めるとき、移動段階における平均テザー張力は 2 N であることを考慮して、 λ_y の制御可能な最大値 1.5 m に対し十分小さい値となる制御ゲイン $\zeta_\lambda = 0.2 \text{ 1/Ns}$ に設定する。

テザーロボット質量中心位置 s_{gx} および s_{gz} 、母船搭載マニピュレータの手先位置 s_{ex} および s_{ez} の時刻歴について図 3 に、テザーロボット並進運動量 $P_s (= \|P_s\|)$ 、質量中心回り角運動量 L_{ry} 、および手先姿勢 ϕ_2 の時刻歴について図 4 に示す。それぞれの図において、点線は (i)、実線は (ii) についての結果を示す。並進運動量の大きさは、テザーロボットの移動速度を表しており、零となることは停止したことを意味する。また、角運動量 L_{ry} が零でない場合は、テザーロボット質量中心回りの回転運動が発生していることを意味する。

図 3 において、テザーロボット質量中心の目標移動軌道からの逸脱は初期段階において大きく、母船搭載マニピュレータの手先位置の変化も大きい。これより、テザーロボットの移動軌道には、離脱段階において発生する外乱が大きく影響を及ぼすことがわかる。図 4 では、テザーロボットの運動制御を行う (ii) のほうが角運動量 L_{ry} の変化量が少なく、手先姿勢 ϕ_2 の変化も小さいことがわかる。すなわち、提案した角運動量制御法が有効であることを示している。さらに図

3 より、テザーロボット質量中心の移動軌道は (ii) の逸脱量の方が大きく、その移動軌道修正のため、母船搭載マニピュレータの手先位置の変化量も大きいことがわかる。この理由は、角運動量制御において回転力を発生させるため、テザー張力の作用線をテザーロボット質量中心から能動的に逸脱させるためである。

(a) The end-point state time history of the spacecraft mounted manipulator

(b) The mass center state time history of the tethered robot

Fig. 3 Simulation of tethered robot casting
(..... for case (i) — for case (ii))

Fig. 4 Momentum and end-effector attitude state time history during tethered robot casting
(..... for case (i) — for case (ii))

Table 1 Condition at separation phase

	s_{ex} [m]	s_{ez} [m]	$\dot{s}_{ex}$ [m/s]	$\dot{s}_{ez}$ [m/s]
Desired	0.0	2.0	2.0	-0.0
Phase (2)	0.054	2.0	2.0	-0.0057

6. 結 言

本論文では、テザーロボットの移動方法である「キャストイング」を取扱い、テザーロボットの宇宙空間移動における角運動量制御法を提案した。キャストイングの制御目標は、目標地点への到達、および目標地点における姿勢維持である。前者は母船搭載マニピュレータを用いたテザー張力制御による移動軌道修正、後者はテザーロボットの関節動作による角運動量制御により、達成される。

まず、キャストイングへの外力の影響を検討し、制御モデルを設定した。そして、移動軌道修正制御法を説明するとともに、テザー張力により発生する回転力について調べた。それは、テザー伸展方向に対するテザーロボット質量中心とテザー連結点の相対位置関係に依存する。この性質を考慮して、回転力を制御することによる角運動量制御法を提案した。テザー伸展方向に対するテザーロボット質量中心とテザー連結点の位置関係は2自由度であるため、角運動量制御には2自由度の冗長性が必要となる。

移動軌道修正制御および角運動量制御は各軸独立に行われること、そして両制御法は目標移動軌道を含む面内において干渉することを考慮して、提案した制御法の検証は面内シミュレーションにより行った。そし

て、移動軌道修正制御と角運動量制御の相互干渉が発生するが、テザーロボット質量中心は目標地点に到達できるとともに、テザーロボット質量中心回りの角運動量は零に抑制され、姿勢維持が可能であることが検証された。

文 献

- (1) Torres, M. A. and Dubowsky, S., *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, **1** (1993), 812-817.
- (2) Yoshida, K. and Nenchev, D. N., *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, **2** (1995), 1271-1277.
- (3) 小田光茂, 宇宙開発事業団報告, NASDA-TMR-960030 (1997).
- (4) 能見公博・Nenchev, D. N.・内山勝, 機論, **64**-618, C (1998), 629-635.
- (5) Nohmi, M., Nenchev, D. N. and Uchiyama, M., *Proc. Twentieth Int. Symp. Space Tech. Science* (1996), 486-491.
- (6) 能見公博・Nenchev, D. N.・内山勝, 機論, **64**-622, C (1998), 221-227.
- (7) Bainum, P. M. and Kumar, V. K., *Acta Astronautica*, **7**-6 (1980), 1333-1348.
- (8) Kawakatsu, Y., Watanabe, T. and Nakasuka, S., *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Eng.*, **38**-122 (1996), 370-382.
- (9) 小山孝一郎, 日本航空宇宙学会誌, **37**-429 (1989), 464-472.
- (10) Konno, A. and Uchiyama, M., *Control Engineering Practice*, **3**-9 (1995), 1315-1321.