

機関番号：22604

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760171

研究課題名（和文） テザーを利用した宇宙用モビリティに関する研究

研究課題名（英文） Study on Tether Space Mobility Device

研究代表者

竹原昭一郎 (TAKEHARA SHOICHIRO)

首都大学東京・理工学研究科・助教

研究者番号：20431819

研究成果の概要（和文）：本研究では、宇宙における生活空間での人の移動手段となり得るテザースペースモビリティデバイス(TSMD)を提案している。2009～2011年には、マルチボディダイナミクスを用いた数値シミュレーションモデルを作成した。その知見から、TSMDの試作機を作成し、理論的・実験的な両面から検討を行い、TSMDが宇宙空間におけるモビリティとして有用であることを示した。

研究成果の概要（英文）：In this research, a mobility system called the “Tether Space Mobility Device” (TSMD) is proposed. TSMD has a mechanism that enables the tether to move an object. In this study, numerical model and the prototype of TSMD is produced. The TSMD model is composed of two rigid bodies and one flexible body that can express motion with large deformation and large displacement. Several modeling of TSMD is performed. An influence on motion and control of TSMD is discussed. Therefore utility of TSMD is shown.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
21年度	2,700,000	810,000	3,510,000
22年度	800,000	0	800,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	810,000	4,310,000

研究分野：機械力学・制御工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：マルチボディダイナミクス、テザー、宇宙

1. 研究開始当初の背景

近年、国際宇宙ステーションの利用が盛んに行われてきており、実際の宇宙空間において、人類が活動を行うことが増えている。効率的に人が活動を行う上では移動手段が必要となる。宇宙空間において、人は浮遊してしまうといった問題点がある。さらに、宇宙ステーション内の様な密閉された空間においては空気を汚染させないことが望ましく、推進剤を用いたガス噴射による移動手段な

どは利用が好ましくない。そこで、本研究では、宇宙における生活空間での人の移動手段となり得るテザースペースモビリティデバイス(TSMD)を提案している。

2. 研究の目的

本検討では、テザー（ひも）を用いた宇宙用モビリティの実現のため運動解析を行い、実験機によってその可能性を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究においては、理論的・実験的の両面より検討を行う。理論的な方法では、マルチボディダイナミクスによる詳細なモデルを構築し、その数値シミュレーション結果から、モビリティとしての可能性を調べる。また、この結果から、実機の構成を検討する。

また、実験的な検討では、基礎検討として二次元平面内で運動する TSMD を開発し、その有用性について調べる。

4. 研究成果

(1) モビリティの提案

図 1 に示すようなコンセプトの宇宙空間における移動手段の検証ツールとして、図 2 に示すマルチボディシステムとしてのモデリングを行った。このモデルは大変形・大変位が表現可能な柔軟体要素によってテザーを表現している。さらにテザー（ひも）の長さ変化やひもに作用する流体効力を正確に模擬可能な詳細なモデルである。

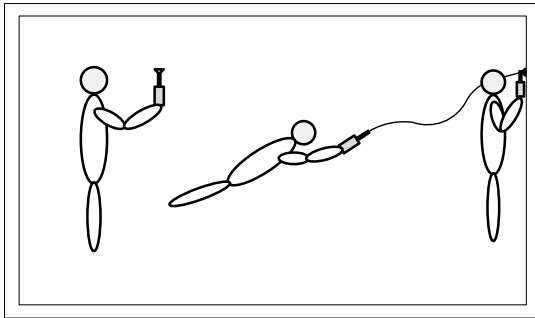


図 1. TSMD のコンセプト

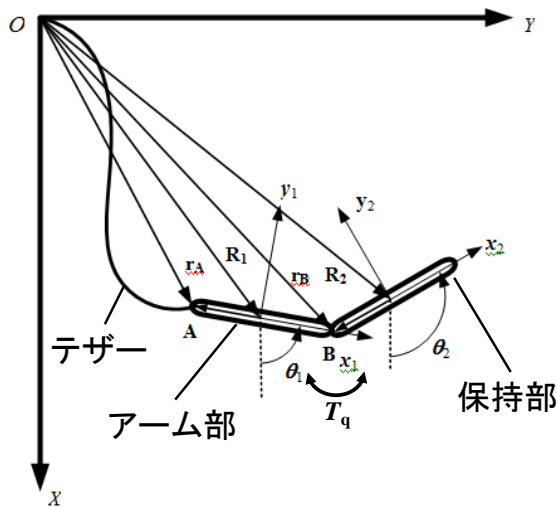


図 2. TSMD モデル

(2) 定式化

本研究では、TSMD を図 2 に示すようにテザー一部分を柔軟体、アーム部を剛体 1、保持部を剛体 2 とみなしモデル化する。本検討では人体については考慮せず今後の課題とする。また、系の運動は平面に限定し、テザー先端部と剛体 1、剛体 1 と剛体 2 の結合はピン結合とする。アーム部の制御は剛体間にトルクを作用させることにより行う。

TSMD はテザーを巻取ることによって目的地に移動するといった特徴から、テザーの長さ変化を適切に表現することが運動解析において重要な点の一つである。本検討では、柔軟体の時間変化は要素の長さ l_e を時間の関数として扱うことにより長さ変化を考慮した。常に柔軟体部分は n 個の要素に分割する。このため、柔軟体の各要素の長さも時間的に変化する。柔軟体の運動を ANCF を用いて定式化する。この方法は大変形、大変位を伴う運動を絶対座標上で表現でき、要素の節点座標として要素の空間勾配を用いることが特徴である。図 6 にテザーの 1 要素を示す。このとき、絶対座標系を $O-XY$ とし、要素の初期状態を OA とし、変化後の状態を OA' とする。要素上の任意点 x' の位置ベクトル \mathbf{r} は節点座標 \mathbf{e} と形状関数 \mathbf{S} を用いて次のように表すことができる。

$$\mathbf{r} = \mathbf{S}\mathbf{e} \quad (1)$$

ここで、要素節点の全体座標による節点座標 \mathbf{e} は

$$\mathbf{e} = [e_1 \ e_2 \ e_3 \ e_4 \ e_5 \ e_6 \ e_7 \ e_8]^T \quad (2)$$

と表され、 e_1, e_2 は点 O' における X, Y 座標、 e_3, e_4 は点 O' における全体座標系での要素の勾配であり、 X, Y 座標で定義される O' 点での変位の空間微分である。同様に e_5, e_6 は点 A' における X, Y 座標、 e_7, e_8 は点 A' における全体座標系での要素の空間勾配である。また、 \mathbf{S} は形状関数マトリクスであり、ベルヌーイ・オイラーの仮定を用いると、

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1-3\xi^2+2\xi^3 & 0 \\ 0 & 1-3\xi^2+2\xi^3 \\ l_e(\xi-2\xi^2+\xi^3) & 0 \\ 0 & l_e(\xi-2\xi^2+\xi^3) \\ 3\xi^2-2\xi^3 & 0 \\ 0 & 3\xi^2-2\xi^3 \\ l_e(\xi^3-\xi^2) & 0 \\ 0 & l_e(\xi^3-\xi^2) \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

である。 x を変形前の要素節点 O からの任意の点の位置とすると、 $\xi = x/l_e$ であり、ここで、 l_e は要素の長さである。式(1)を微分することにより、次式が得られる。

$$\dot{\mathbf{r}} = \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial l_e} \frac{dl_e}{dt} \mathbf{e} + \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial x} \frac{dx}{dt} \mathbf{e} + \dot{\mathbf{S}}\mathbf{e} \quad (4)$$

以降、式(4)の各偏微分を $\mathbf{S}_{le}, \mathbf{S}_x$ で表す。ここで、式(4)の右辺第1項は要素の長さ l_e が時間変化する効果であり、右辺第2項は節点が柔軟体上を相対的に移動する効果を表している。この時、要素の運動エネルギー T は次式によって表される。

$$T = \frac{1}{2} \int_0^{l_e} \rho a \dot{\mathbf{r}}^T \dot{\mathbf{r}} dx \quad (5)$$

次に、柔軟体の弾性エネルギーを導出する。ここでは、要素座標系を用いずに弾性エネルギーを求める。軸方向のひずみエネルギー U_l は次式で定義される。

$$U_l = \frac{1}{2} \int_0^{l_e} E a \varepsilon^2 dx \quad (6)$$

ここで、 E はヤング率、 a は断面積、 ε は点 $O'A'$ 間の軸歪みである。このとき、梁の軸方向の変形が微小であると仮定すると軸歪みを次式で定義できる。

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{(e_5 - e_1)^2 + (e_6 - e_2)^2} - l_e}{l_e} \quad (7)$$

式(7)を式(6)に代入し整理すると

$$U_l = \frac{1}{2} E a l \frac{1}{l_e^2} \left[\left\{ (e_5 - e_1)^2 + (e_6 - e_2)^2 \right\} - \frac{2}{l} \sqrt{(e_5 - e_1)^2 + (e_6 - e_2)^2} + 1 \right] \quad (8)$$

となる。次に、曲げ変形によるひずみエネルギー U_t は次式で定義される。

$$U_t = \frac{1}{2} \int_0^{l_e} E I \kappa^2 dx \quad (9)$$

ここで、 I は断面二次モーメント、 κ は点 P における曲率である。このとき、

$$\kappa^2 = \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 = \mathbf{e}^T \left(\frac{d^2 \mathbf{S}}{dx^2} \right)^T \left(\frac{d^2 \mathbf{S}}{dx^2} \right) \mathbf{e} \quad (10)$$

という関係が得られる。したがって曲げ変形によるひずみエネルギーは次式により得られる。

$$U_t = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \left[\int_0^{l_e} E I \left(\frac{d^2 \mathbf{S}}{dx^2} \right)^T \left(\frac{d^2 \mathbf{S}}{dx^2} \right) dx \right] \mathbf{e} \quad (11)$$

以上より、要素に貯えられるひずみエネルギー U は

$$U = U_l + U_t \quad (12)$$

となる。ここで、ラグランジュ関数 L を用いたラグランジュの運動方程式は

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{e}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{e}}} \right) = \mathbf{0} \quad (13)$$

となり、式(13)に式(5),(12)を代入すると次の運動方程式が得られる。

$$\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{e}} + (\mathbf{C}_V - \mathbf{C}_V^T + \dot{\mathbf{M}}_a) \dot{\mathbf{e}} + (\mathbf{K}_V + \dot{\mathbf{C}}_V^T) \mathbf{e} + \mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}_f \quad (14)$$

ここで、 \mathbf{M}_a は要素質量マトリクス、 \mathbf{Q}_f は重力を含む外力項、 \mathbf{Q}_k は弾性力による項である。また、 $\dot{\mathbf{M}}_a$ は \mathbf{M}_a の時間微分である。また、 $\mathbf{C}_V, \mathbf{K}_V$ は要素が軸方向に移動することにより、要素の長さが時間変化する効果、および節点が柔軟体上を相対移動する効果により現れる項である。これらは次式のように表される。

$$\mathbf{M}_a = \rho a \int_0^{l_e} \mathbf{S}^T \mathbf{S} dx \quad (15)$$

$$\mathbf{Q}_k = \left(\frac{\partial U_l}{\partial \mathbf{e}} \right)^T + \left(\frac{\partial U_t}{\partial \mathbf{e}} \right)^T \quad (16)$$

$$\mathbf{C}_V = \rho a l_e \int_0^{l_e} \mathbf{S}_{le}^T \mathbf{S}_x dx + \rho a \dot{x} \int_0^{l_e} \mathbf{S}_x^T \mathbf{S}_x dx \quad (17)$$

$$\mathbf{K}_V = -\rho a l_e^2 \int_0^{l_e} \mathbf{S}_{le}^T \mathbf{S}_{le} dx - \rho a \dot{x}^2 \int_0^{l_e} \mathbf{S}_x^T \mathbf{S}_x dx - \rho a \dot{x} l_e \int_0^{l_e} \mathbf{S}_{le}^T \mathbf{S}_x dx - \rho a \dot{x} \left(\int_0^{l_e} \mathbf{S}_{le}^T \mathbf{S}_x dx \right)^T \quad (18)$$

各要素で式(14)の運動方程式を求め、これらを重ね合わせるにより、柔軟体の運動方程式を求めることができる。

(3) 数値シミュレーション結果

上記の数値シミュレーション結果より、提案のコンセプトが宇宙空間における移動手段として有用な事を示した。図3、図4にシミュレーション結果を示す。この図から、制御用アームの制御効果によって人間の保持する部分が水平に保たれたまま移動することができており、本システムの有用性が見て取れる。

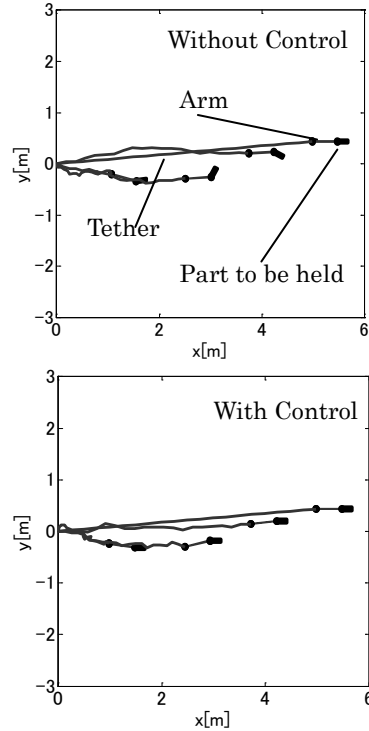


図3. 数値シミュレーション結果

(1/10 重力の場合)

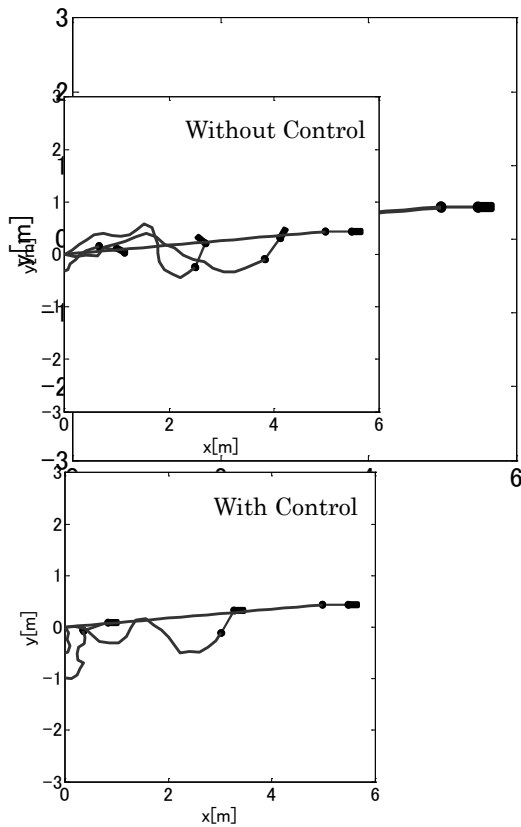


図4. 数値シミュレーション結果
(無重力)

(4) 試作機の製作

数値シミュレーション結果などをもとに試作機の仕様を決定し、図5に示すようなプロトタイプのTSMDを制作した。この試作機は、2個のモータ（アーム回転用、テザー巻き取り用）、ジャイロセンサ、制御用アーム、測定用ノートパソコンからなる。測定用のノートパソコンは人体の影響を模擬できるように本体に対して幾何学的な配置を決めるなどの工夫をしている。

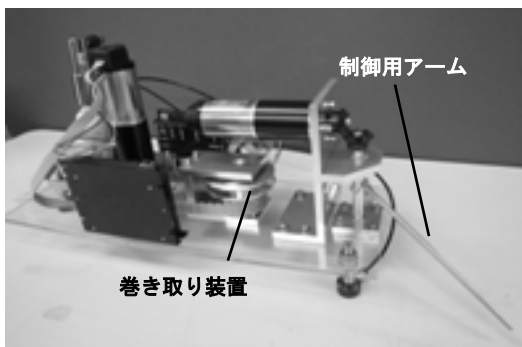


図5. プロトタイプTSMD

(4) 試作機を用いた検証

試作機を用いた実験において、数値シミュレーション結果においても得られたような保持部の角度制御効果が確認できた。図6に

保持部（人体が保持する部分の）の角度の時刻歴を示す。この結果からアームによる制御を行うことにより、角度変化が抑制されていることがわかる。このことより、提案システムがテザーを利用した宇宙用のモビリティとして利用できる可能性を示すことができた。

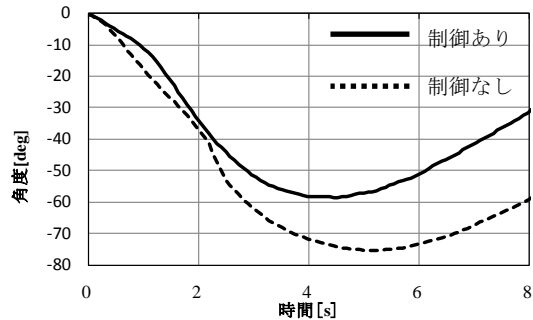


図6. 保持部の角度の時刻歴

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① 竹原昭一郎, 曄道佳明, 曾我部潔, Motion of a Submerged Tether Subject to Large Deformations and Displacements, *Journal of System Design and Dynamics*, 査読あり, Vol. 5, No. 2, 2011, 296-305.

〔学会発表〕（計3件）

- ① 竹原昭一郎, 近藤優一, 曄道佳明, 吉村卓也, Motion and control of tether space mobility device, The 1st Joint International Conference on Multibody System Dynamics, May 25-27, 2010, Lappeenranta, Finland.
- ② 竹原昭一郎, 近藤優一, 曄道佳明, Modeling of Tethered Space Mobility Device, 5th Asian Conference on Multibody Dynamics 2010, August 23-26, 2010, Kyoto, Japan.
- ③ 近藤優一, 竹原昭一郎, テザーを利用した宇宙用モビリティのモデリングに関する研究, Dynamics and Design Conference 2010, 2010.9.14-18, 京田辺市, 京都.
- ④ 竹原昭一郎, 近藤優一, テザーを利用した宇宙用モビリティのモデリングに関する研究, 第19回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2011.1.27-28, 熊本.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹原昭一郎 (TAKEHARA SHOICHIRO)
首都大学東京・理工学研究科・助教
研究者番号：20431819