

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：32621

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26820075

研究課題名(和文) たわみ状態を積極的に活用したテザー利用技術の開発

研究課題名(英文) Development of tether utilization technology using deflection

研究代表者

竹原 昭一郎 (Takehara, Shoichiro)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：20431819

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、テザー回収・進展時のシステムの運動を対象として、長さ変化、大変形を伴うテザー・剛体系の運動を考えた。テザーの長さ変化に関しては、スパゲティプロブレムのモデル化手法を用い、テザー後端と剛体系の結合部に駆動拘束を与えることで定式化し、数値シミュレーションモデルを構築した。そして、微小重力環境を模擬した実験を行い、実験結果と数値シミュレーション結果の比較から、提案モデルの妥当性を検証した。さらに、回転エネルギーを利用した制御方法を適応し、有用性について示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we discuss the motion of a tethered system during winding a tether in microgravity. When the tether is being wound, it comes into strong contact with the feeding section of the system. Accordingly, both are expected to undergo complex motion as they interact with each other. We have therefore carried out both a numerical and an experimental study to clarify the motion of such a system using a mobility device using the tether named TSMD proposed by us as an example. Furthermore, we proposed a TSMD attitude control method during tether winding while focusing on changes in the system's rotational kinetic energy. Using the proposed analytical model, the angular velocity of a rigid body system is confirmed to converge to 0 deg/s when control is applied.

研究分野：機械力学・制御工学

キーワード：マルチボディダイナミクス テザー 巻き取り制御

1. 研究開始当初の背景

宇宙テザー技術は、日本国が歴史的に早い段階からその確立と実用に向けて検討を行ってきた。テザーは、展開・収納性に優れており、大型システムの構造部材としても、打ち上げコストが少なくすむといった利点を持っているため、工学的に将来の宇宙計画に非常に有用な技術とされている。従来の研究においては、テザーは常に張力が働いている状態を仮定したものがほとんどであるが、我々は、宇宙空間のような、微小重力環境では、テザーのような柔軟体は大変形を起し、先端機器との相互作用によって、強い連成運動が生じ、たわみが無視できないことを明らかにし、報告してきた。このためテザーの利用は、装置の設置環境により、張力が持続的に働かない状況下での利用が制限されるほか、何らかのアクシデントによりテザーにたわみが生じた場合の安全性確保の点も、実用化の壁となっている。さらに、たわみはシステムの破綻に繋がる場合が多いことから、このようなシステムは、大変形問題を含んだ系として、動力学的な解析を行うことが必須である。このような背景から、テザーのたわみを積極的に活用した人間用の移動装置を提案している。この装置ではテザーにたわみが発生している場合、テザーからシステム本体への影響が少ないため、本体のみの制御を考慮するだけで、システムを安定化することができる可能性を示した。しかしながら、テザーの巻き取り方法やシステムの姿勢制御、テザーの展開に関しては検討の余地がある。

2. 研究の目的

本研究は、宇宙空間における物や人の輸送・移動手段として有効とされているテザー（ワイヤロープやひも）の利用に関して、大変形を含めたテザー技術の研究基盤を確立する試みである。本研究により、たわみ状態を積極的に活用したテザー利用技術を開発することを目的としている。

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モデルを用いて、制御方法などの検討を行う。

4. 研究成果

(1) 力学モデルの構築

図1に示す力学モデルをマルチボディダイナミクスを用いて定式化を行い、数値シミュレーションモデルを構築した。さらに、提案の力学モデルの妥当性検証として、図2に示す実験装置を製作し、数値シミュレーション結果と実験結果を比較した。その結果、たわみ状態が生じる運動を精度よく再現できることを示すことができた。

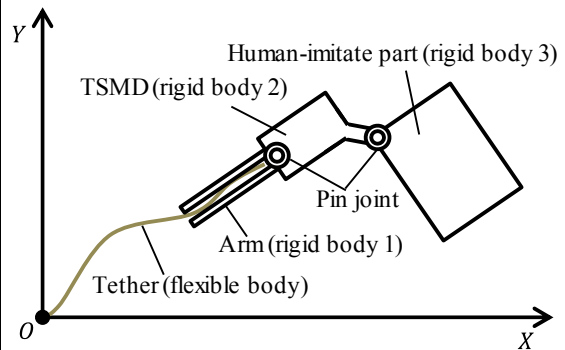


図1 解析モデル

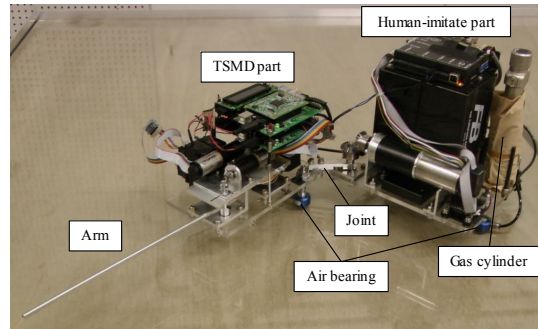


図2 実験装置

(2) 定式化

本研究では、研究対象のテザー部分を柔軟体、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。

研究対象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。要素上の任意点 x の位置ベクトル r は節点座標 e と形状関数 S を用いて次のように表すことができる。

$$r = Se$$

ここで、要素節点の全体座標による節点座標 e は

$$e = [e_1 \ e_2 \ e_3 \ e_4 \ e_5 \ e_6 \ e_7 \ e_8]^T$$

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

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, 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,

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

である。運動エネルギー T は次式によって表される。

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

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。

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

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。

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

さらに,

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

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。

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

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,

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

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。

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

以上より, 重力を含む外力項を \mathbf{Q}_f とすると, 最終的な梁要素の運動方程式は以下のよう

になる。

$$\mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{e}} + (\mathbf{K}_t + \mathbf{K}_l) \mathbf{e} = \mathbf{Q}_f$$

(3) 制御方法の提案

本研究ではテザーの長さ変化を利用したテザー回収時の姿勢制御手法を適用させる。この際, システムの回転運動に起因する運動エネルギーの変化に着目し, テザーのたわみを考慮に入れたテザーの巻取り制御則を設計した。その時の数値シミュレーション結果を図3に示す。この結果から提案制御手法を適応することにより, 姿勢制御効果が得られていることがわかる。

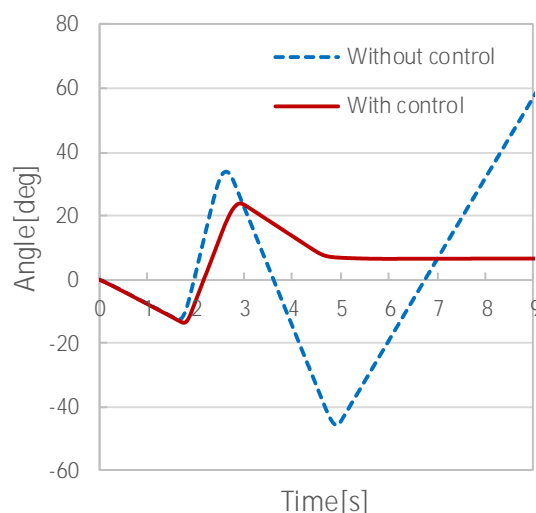


図3 角度の時刻歴

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)

宮地航, 竹原昭一郎, 植松優, 長さ変化を伴うテザー・剛体系の連成運動解析, 日本機械学会論文集, 査読あり, Vol. 83, No. 848, 2017.

〔学会発表〕(計 3 件)

宮地航, 竹原昭一郎, 微少重力下におけるテザーの巻き取り制御に関する研究, 日本機械学会, 第14回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, 2017.

植松優, 竹原昭一郎, 宮地航, テザーの速度可変式巻き取り制御に関する研究, 日本機械学会, D&D2016USB論文集, 2016.

湯浅良太, 竹原昭一郎, 植松優, テザーの巻き取り制御に関する実験的検討, 日本機械学会, 第15回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：テザーを用いた移動装置及び移動方法
発明者：竹原昭一郎，宮地航，植松優
権利者：学校法人上智学院
種類：特許
番号：特許願 2017-191540 号
出願年月日：平成 28 年 4 月 15 日
国内外の別： 国内

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
<http://pweb.sophia.ac.jp/takeha-labo/>

6．研究組織

(1)研究代表者

竹原昭一郎 (TAKEHARA, Shoichiro)
上智大学・理工学部・准教授
研究者番号：20431819