320 擬似テザーキャスティング制動制御の数値実験

Control of Modeled Tether System with Casting Operation

○西田 俊勝 (山口大)

小河原 加久治 (山口大)

Toshikatsu NISHIDA, Yamaguchi University

Kakuji OGAWARA, Yamaguchi University

Key Words: Space Robot, Manipulator, Delayed Feedback Control, Tether System, Casting Operation

論文要旨 擬似テザーのキャスティングモデルに対する制御方法の確立を目的としたテザーキャスティングシステムの制動制御に関する研究. マニピュレータのキャスティング動作を利用してテザー先端の子衛星を目的のポイントへ誘導し, 静止させる力学運動を数値シミュレーションにより行い, 最適な制御方法を研究する.

1. はじめに

近年の宇宙開発において, 宇宙開発プロジェクトの規模縮小などにもともない人工衛星, 宇宙実験機, 宇宙ロボットなどが小型化している傾向がある. 小型軽量化された宇宙機が宇宙空間を移動する際の推進力を得るためにロケットエンジンやスラスタなどの推進器を使用するのは困難になってくる. 燃料や推進薬を搭載するスペースが確保されにくくなるからである. そこで, 母船に搭載されたマニピュレータと小型宇宙機(以降, 子衛星と呼ぶ)をテザーで連結したシステムが提案されている. このシステムを用いると, マニピュレータのキャスティング動作を制御することによってテザー先端の推進器を持たない子衛星を移動させることが可能となる.

テザー(紐)の細く柔軟な性質は, リールに巻き取ることによって長距離におよぶテザーをコンパクトに収納させたり, 剛体ロボットアームなどに比べてはるかに軽量なものであり, 非常に多くの利用価値が期待される. しかし, 無重力もしくは微小重力の宇宙空間において, テザーシステムのキャスティング動作は非線形で不規則な動きとなる. このようなテザーの運動を解析するとき, たわみを考慮しない弦としてモデル化することが多く行われている. しかし, 実用テザーとしてはワイヤーの周りを何重にも被覆したものや, 網目状に編みこんであるものなどが提案されている. これらの素材はばねのような伸縮性や, 大きなたわみをともなう動きをすると考えられる.

そこでテザーを連続体ではなく, 剛体, ばね, ダンパからなる複数の微小要素を連結させた系(擬似テザー)として近似し, そのキャスティングモデルにおいて遅延フィードバック制御を用いた制動制御, 軌道制御に関する数値実験が中村等によって行われている. 遅延フィードバック制御はカオスシステムの不安定軌道制御を安定化する制御手法であり, これを用いた中村等の実験においてテザー先端の子衛星を静止させられること, 並びに軌道の安定化が可能であることが確認されている. しかしその静止位置を任意に制御するまでには至っていない.

本研究では, 遅延フィードバック制御を用いて大変形, 大変位をともなう擬似テザーに対して, 宇宙空間を想定した場での制動制御を行う. キャスティングを行ってから静止するまでの時間を短縮すること, さらに子衛星を任意の位置に静止させることを目標とする. 以下, 本研究の概要を示す.

2. キャスティングモデル

Fig.2-1 に示すようにマニピュレータ, テザー, 子衛星からなるシステムを考える. テザーは n 個の質点をばねとダンパで連結し, 各連結部の回転を自由とすることで大変形, 大変位をともなう擬似テザーとして扱う. 子衛星は剛体の球とする. また, 剛体のマニピュレータにのみ駆動トルク u が与えられるとする.

マニピュレータ, テザー要素の質点, 子衛星の質量をそれぞれ m_m, m_i, m_s , それぞれの状態を $\mathbf{X}_m = [x_m, y_m, \theta_m]^T$, $\mathbf{X}_i = [x_i, y_i]^T$ ($i=1, 2, \dots, n$), $\mathbf{X}_s = [x_s, y_s, \theta_s]^T$ で表し, マニピュレータの長さを l_m , 子衛星の半径を l_s とする. また, マニピュレータ, 各質点, 子衛星それぞれの間の距離を $\mathbf{d}_i = [d_{i,x}, d_{i,y}]^T$, 反力を $\mathbf{R}_i = [R_{i,x}, R_{i,y}]^T$ ($i=0, 2, \dots, n$) とする. ばね定数を k , ダンパ定数を c で表す.

Fig.2-1 Casting Model

2-1 運動方程式

i 番目と $i+1$ 番目の要素間の関係を Fig.2-2 に示す. $\mathbf{d}_i$ は質点 i と $i+1$ の距離を表すベクトルで次のように求める.

$$\mathbf{d}_i = \begin{bmatrix} x_{i+1} - x_i \\ y_{i+1} - y_i \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ばねの自然長を k_0 , 距離の伸び速度を $\dot{\mathbf{d}}_i$ とすると, $\mathbf{R}_i$ は次式で表される.

$$|\mathbf{R}_i| = k \cdot (|\mathbf{d}_i| - k_0)^3 + c \cdot |\dot{\mathbf{d}}_i| \quad (2.2)$$

ここで, $|\mathbf{R}_i|$ は反力ベクトルの大きさを表しており, 方向は $\mathbf{d}_i$ と同じ方向である. 以上のことから i 番目の質点に関する

運動方程式を次のように表す。

$$m_i \ddot{\mathbf{X}}_i = \mathbf{R}_i - \mathbf{R}_{i-1} \quad (2.3)$$

また、マニピュレータと子衛星の慣性モーメントを I_m , I_s とするとこれらの運動方程式は次のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{X}}_m &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_0 \\ \mathbf{r}_m \times \mathbf{R}_0 + \mathbf{u} \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{X}}_s &= \begin{bmatrix} -\mathbf{R}_n \\ (-\mathbf{r}_s) \times (-\mathbf{R}_n) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.4)$$

ただし、 $\mathbf{M}_m = \text{diag}(m_m, m_m, I_m)$, $\mathbf{M}_s = \text{diag}(m_s, m_s, I_s)$ は対角行列を表し、 $\mathbf{r}_m = [l_m \cos \theta_m, l_m \sin \theta_m]^T$, $\mathbf{r}_s = [l_s \cos \theta_s, l_s \sin \theta_s]^T$ はそれぞれの回転中心からばね、ダンパ結合部までの位置ベクトルを表す。

本研究では、(2.3), (2.4) 式を数値積分することで各時刻における状態変数を算出する。以下に本研究で使用したキャスティングモデルの物性値を示す。

Table.2-1 Physical-Properties Value

	Mass m (kg)	Length l (m)	Moment of Inertia ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
Manipulator	1.0	1.0	8.34×10^{-2}
Sub Satellite	1.0×10^{-2}	5.0×10^{-2}	1.0×10^{-4}
Particles	1.44×10^{-4}	—	—
Spring Constant k (N/m)			1.0×10^3
Natural Length of Spring k_0 (m)			1.0×10^{-1}
Damper Constant c (N·s/m)			1.0×10^{-1}

Fig.2-2 Relations between the two Particles

2.2 目標軌道の生成

システムの状態変数は $\mathbf{X}_m$, $\mathbf{X}_i$, $\mathbf{X}_s$ およびそれぞれの速度、角速度である $\dot{\mathbf{X}}_m$, $\dot{\mathbf{X}}_i$, $\dot{\mathbf{X}}_s$ のすべてが観測できることとする。時刻 t における制御入力 $u(t)$ を以下のように計算する。

$$u(t) = K_p(\theta_D(t) - \theta_m(t)) + K_D(\dot{\theta}_D(t) - \dot{\theta}_m(t)) \quad (2.5)$$

これは目標角度 $\theta_D(t)$ にマニピュレータの角度 $\theta_m(t)$ を追従させるような入力を加えている。なお各ゲイン K_p , K_D は任意とする。

マニピュレータを時刻 t から $t + \Delta t$ の間に $\theta_m(t)$ から目標角度 $\theta_D(t)$ に移動させる軌道の生成には以下の 5 次多項式補間を用いた。ただし境界条件における速度、加速度を零とする。

$$\theta_D(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (2.6)$$

$$\text{ただし, } a_0 = \theta_m, a_1 = \dot{\theta}_m, a_2 = \frac{\ddot{\theta}_m}{2}$$

$$a_3 = \frac{20(\theta_D - \theta_m) - (8\dot{\theta}_D + 12\dot{\theta}_m)\Delta t + (\ddot{\theta}_D - 3\ddot{\theta}_m)\Delta t^2}{2\Delta t^3}$$

$$a_4 = \frac{-30(\theta_D - \theta_m) + (14\dot{\theta}_D + 16\dot{\theta}_m)\Delta t - (2\ddot{\theta}_D - 3\ddot{\theta}_m)\Delta t^2}{2\Delta t^4}$$

$$a_5 = \frac{12(\theta_D - \theta_m) - 6(\dot{\theta}_D + \dot{\theta}_m)\Delta t + (\ddot{\theta}_D - \ddot{\theta}_m)\Delta t^2}{2\Delta t^5}$$

3. 遅延フィードバック制御

遅延フィードバック制御は、カオスシステムの不安定軌道制御をシステムのパラメータの微小摂動により安定化する制御手法である。周期 τ_d の不安定周期軌道を安定化させるために現時刻のパラメータと τ_d 時刻前のパラメータの差をフィードバックに用いる。Fig.3-1 に遅延フィードバック制御系の概要を示す。

Fig.3-1 Block diagram of Delayed Feedback control system

遅延フィードバックによる制御入力を $\tau(t)$ とすると以下の式で表される。

$$\tau(t) = K(y(t) - y(t - \tau_d)) \quad (3.1)$$

K はゲイン行列であり、その値を理論的に定める方法はいまだ確立されておらず経験的に定められる。

遅延フィードバック制御は遅延時間を安定化に利用しているため周期軌道をあらかじめ求める必要がなく、これが未知である場合にも安定周期軌道への安定化が可能である特徴がある。また、カオスシステムに限らず遅れ時間を有するシステムや不安定系に対する安定化が可能であるなど様々なシステムに対して有効であることが報告されている。

4. おわりに

本研究は、遅延フィードバック制御によって大変形、大変位をともなう擬似テザーシステムの子衛星を任意の位置に静止させる制動制御を行っている。そしてこの成果が宇宙環境の高度利用につながることを期待する。

参考文献

- (1) 小河原加久治・中村一平, 遅延フィードバックによる擬似テザーの制動制御, (現在投稿中)
- (2) 能見公博・内山勝, キャスティングにおけるテザー宇宙ロボットの運動制御, 機論, 66-647, C, (2000), 2255-2261