

Tether Applied as Actuator to Control Tethered Space Solar Power Satellite*

Hironori A. FUJII,
Yusuke KOGA and Takeo WATANABE

Tokyo Metropolitan Institute of Technology / Tokyo Metropolitan University
6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065 Japan

Abstract: Some control methods are introduced for tether applied as an actuator to control the tethered space solar power satellite (SSPS). The control methods include 1) Attitude control by actuating tensions of tether connected to a bus mass; 2) Vibration control of the solar panel by actuating tension of tether connected at fixed points of the solar panel. Results of analytical, numerical, and experimental analyses are presented and possibility of the control employed with tether as an actuator is discussed being applied to control the tethered SSPS.

テザー型 SSPS のテザーをアクチュエーターとして用いた制御のいろいろ**

藤井 裕矩(ふじいひろのり)
古賀祐介(こがゆうすけ) 渡部武夫(わたなべたけお)
首都大学東京/都立科学技術大学大学院
〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6

1. はじめに

USEF が提案するテザー型 SSPS は、構造にテザーを用いることにより重力傾度を利用して姿勢制御をおこなうものである。本発表では、これまで都立科技大/首都大で行われてきた、テザーをアクチュエーターとして用いたいくつかの制御手法に関する研究について紹介する。

2. 主なシステムパラメータ

図 1 は、USEF によって提案されたテザー型 SSPS の実証用モデルである。解析に用いた主なシステムパラメータを以下に示す。

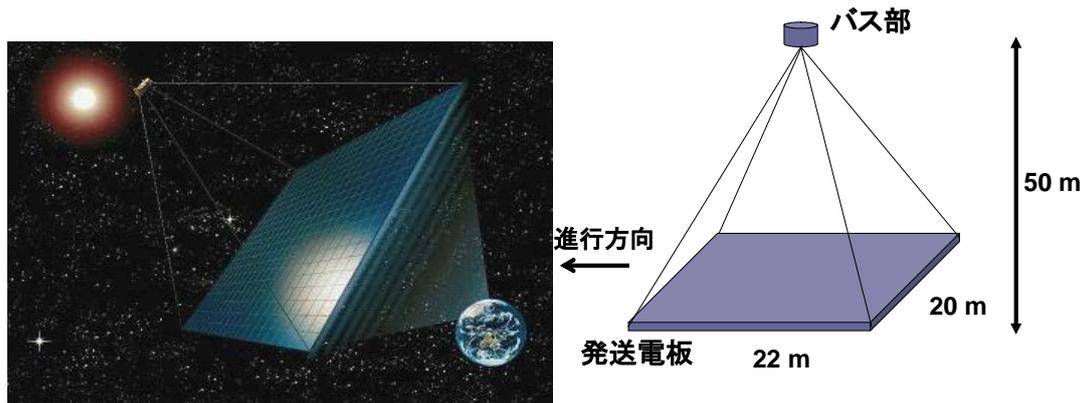


図 1. テザー型 SSPS と解析モデル

USEF, SSPS 実証モデル・2010 年頃の打ち上げ目標 ・テザーを使い姿勢制御は重力傾斜安定・最大張力
0.27N・パネルの主な振動数 0.8~10Hz ・バス部 質量 1100[kg] ・発電電板 質量
10,240[kg]

縦 20[m], 横 22[m], 厚さ 0.05[m] の板、バス部と発電電板との距離 50[m]
軌道高度 500[km]

*Presented at the 8th SPS Symposium 16-17 September 2005

**第 8 回 SPS シンポジウム、帝京大学八王子キャンパスにて 2005 年 9 月 16, 17 日開催

3. テザーを用いた制御のいろいろ

3.1 テザー先端質量を用いた姿勢制御: [1,2]

テザー長を操作することで、バス部を振らせ、円軌道上にあるシステムのピッチ運動、およびロール、ヨー方向の運動を制御することを目的とする。

システムの質量中心に基準座標系 $\hat{\mathbf{a}}$ 、発電電板の質量中心に機体座標系 $\hat{\mathbf{x}}$ をとる。二つの座標系はオイラー角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ で関係づけられており、機体座標系の $\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2, \hat{\mathbf{x}}_3$ 軸はそれぞれヨー、ロール、ピッチ軸となる。また、機体座標系におけるバス部の位置を(1)式のように表す。

$$\mathbf{r} = (r_0 + x_1)\hat{\mathbf{x}}_1 + x_2\hat{\mathbf{x}}_2 + x_3\hat{\mathbf{x}}_3 \quad (1)$$

バス部を動かすためのテザー張力による制御入力 \mathbf{u} は、線形二次形式レギュレータを用いて(2)式のように、状態変数にフィードバックゲインを作用させて与えられる。なお、評価関数にはシステムのハミルトニアンを用いた。

$$\mathbf{u} = -K\mathbf{x} \quad (2)$$

軌道面内運動の解析結果を図3に示す。制御前は重力傾斜が作用しているため発散せず一定の振動を続けているが、バス部を動かし制御すると振動がおさまっていくのが確認できる。これは、バス部を動かすことにより、慣性モーメントが変化するためであると考えられる。

次に、軌道面外運動の解析結果を図4、図5に示す。制御前は先程同様に発散することなく一定の振動を続けているが、バス部を動かし制御すると時間はかかるもののヨー、ロール角ともに振動が収まっていく様子が見てとれる。ヨー角の振動は、ピッチ角、ロール角の振り子振動とは違い、振りのような挙動をとる振動であるがために、単純にバス部を動かすだけでは振動を収束させるまでに時間がかかってしまう。また、ロール角はヨー角の振動が影響し収束までに時間がかかる。

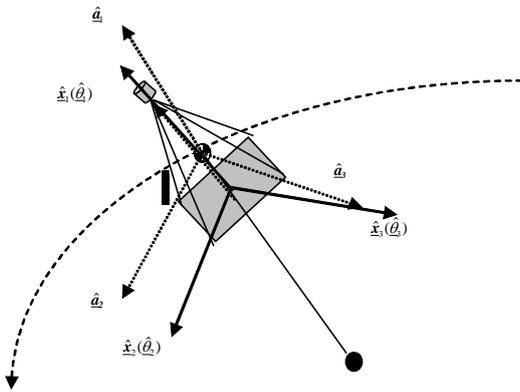


図2 システムモデルと座標系

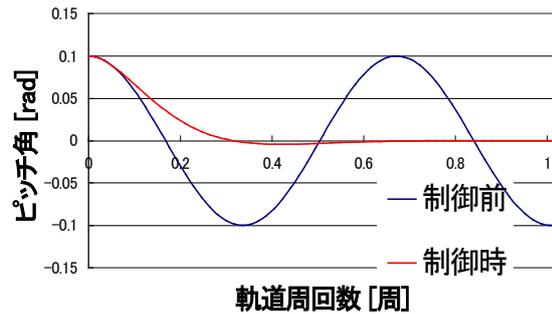


図3 ピッチ方向運動と制御

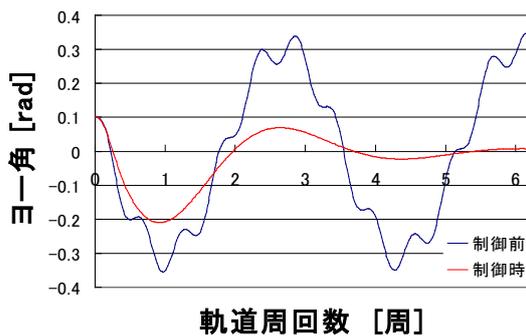


図4 ヨー方向運動と制御

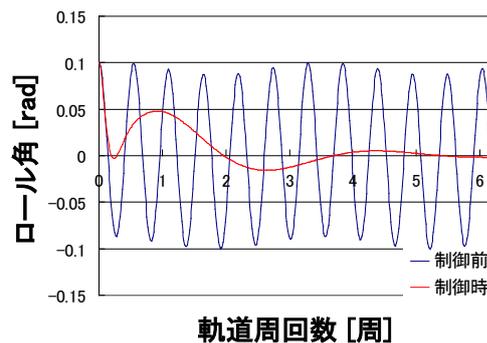


図5 ロール方向運動と制御

3.2 テザーの張力を利用した SSPS の発電電パネルの振動制御: [1][3-5]

大型で柔軟な発電電パネルに外乱等の影響で発生する恐れのある振動を、テザーの張力による制御入力によって抑制する。

システムの質量中心を原点として軌道座標系 X 、パネルの質量中心を原点とし機体座標系 A をそれぞれ図のように設定した。ここで、座標 X と A は互いにオイラー角 θ によって関係付けられる。機体座標系において、パネルの微小要素を表すベクトル \mathbf{r} とバス部を表すベクトル \mathbf{r}_b をそれぞれ以下の式で定義した。

$$\mathbf{r} = w\mathbf{a}_1 + x\mathbf{a}_2 + y\mathbf{a}_3 \quad (3)$$

$$\mathbf{r}_b = u_1\mathbf{a}_1 + u_2\mathbf{a}_2 + u_3\mathbf{a}_3 \quad (4)$$

発電パネルの振動抑制を試みるにあたり、分布定数系の制御に有効なMF (Mission Function) 制御則を適応した。MF制御とは、系のエネルギー状態を元にした制御則であり、リヤプノフの安定理論に基づいたものである。

図7にはパネルの中心における変位の時間応答を示した。図8、図9には制御時におけるバス部の運動の様子を、図10には制御時におけるピッチ角の時間応答を示した。これらの結果から、テザー張力によって加えられる制御入力により発電パネルの振動を抑制できることが確認できた。

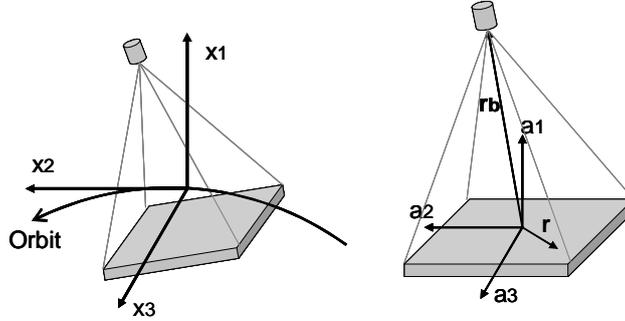


図6 解析モデル

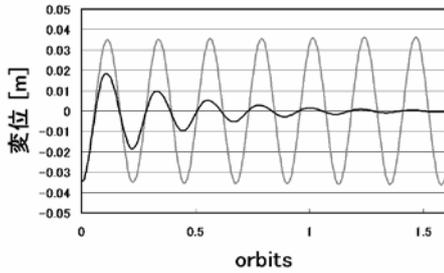


図7 パネル中心の時間応答

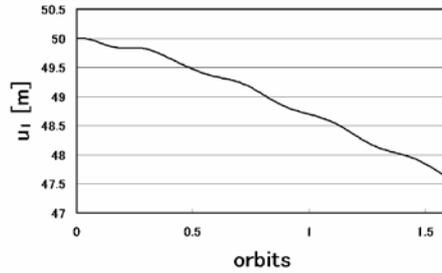


図8 バス部の時間応答 (u_1)

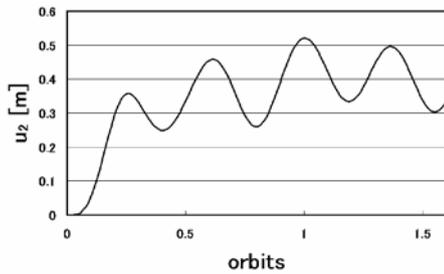


図9 バス部の時間応答 (u_2)

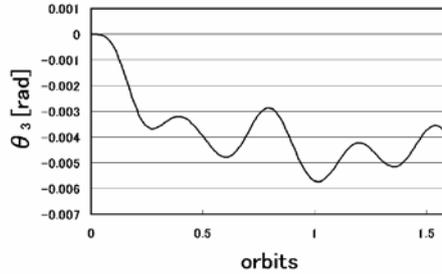


図10 ピッチ角の時間応答

3.3 太陽電池板の振動制御：[6]

テザー張力によるパドルの振動制御について数値的な解析を行い、ドラム型テザーリールと同じ駆動原理であるトルク入力を用いての実験検討もおこなった。

図11に示す解析モデルを設定し、実験装置を製作した。 x は梁の長さ位置、 w は変位を表す。運動方程式は分布定数系を最も忠実に表現する偏微分方程式で記述した。今回は、偏微分方程式を解く差分法の一つである Clank-Nicolson の陰解法を使用した。梁の運動方程式、モータの運動方程式は次のように得られる。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q_x \quad (5)$$

$$J \frac{\delta^2 \theta}{\delta t^2} = P - C_0 - C_v \frac{\delta \theta}{\delta t} - \bar{Q}_x r \quad (6)$$

制御則として、MF 制御を使用する。張力は負の値をとることが出来ないので、数値解析では、梁先

端の速度が負の時は零とした。次に以上の制御則を式(5)に代入し、先ほどと同様に、Clank-Nicolson の陰解法を使って、数値解析をおこなった。

速度フィードバックゲイン k について、さまざまに値を変化させ数値解析をおこなった。 $k=0.01$ のときの結果を図 12 に示す。図 13 の周波数応答を見ると、実験と数値解析の両方で、MF 制御によって振動の減衰を達成していることが確認できた。

数値解析の結果、MF 制御を用いたテザーの張力による梁の振動を制御できることがわかった。また、今回のようにすべての振動モードを含んでいる振動に対しても MF 制御は有効であることを確認した。実験では、一方、トルク入力を用いたテザーの張力による振動制御の場合、モータの低回転速度並びに、回転方向の切り替えの影響で微小張力の制御が困難であることがわかった。

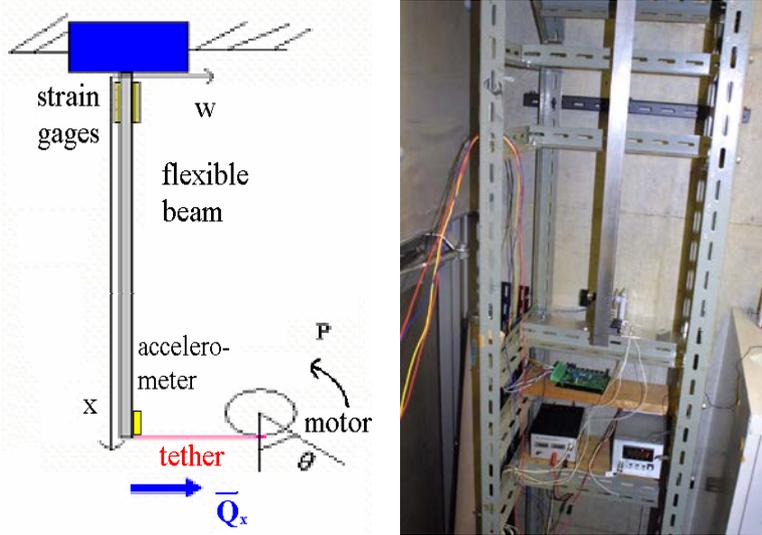


図 11 解析モデルと実験装置

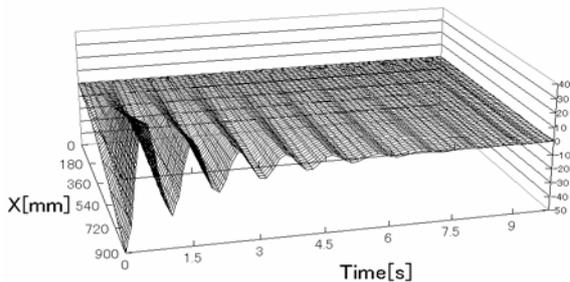


図 12 制御時の時間応答

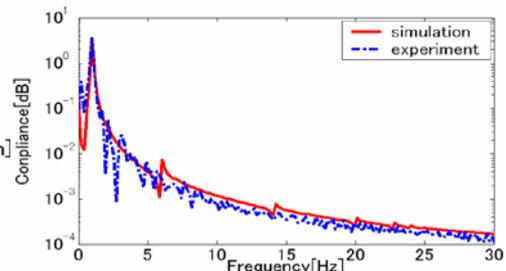


図 13 システムの周波数応答

3.4 高効率化を目指したパネル姿勢制御：[7]

太陽電池パネルを太陽に対して傾けることにより投影面積を増加させ、発電効率を改善する方法を新たに提案し、その制御方法について検討した。

テザー型 SSPS のシステムモデルを図 15 に示す。このモデルではピッチ方向の姿勢変化のみを考慮している。機体座標系 (a_1, a_2, a_3) は太陽電池パネルの中心を原点に取り、太陽電池パネルの姿勢角を θ_3 、機体座標系に対するバス部の傾き角度を ϕ_3 とおいた。また、システムの質量中心は軌道上にあるものとした。

制御手法として PD 制御にインプットシェーピングを組み込んだ方法を用いる。インプットシェーピングは、計算機を用いて制御を行うシステムに対して、あらかじめ残留振動が発生しないような入力を生成するフィードフォワード制御手法のひとつである。入力コマンドによって、ロバスト性や立ち上がり時間を改善したモデルが提案されている。

目標角度を 45 度に設定した姿勢変化の様子を図 16 に示す。図から、姿勢変化時に発生した残留振動は、インプットシェーピングにより抑止することに成功している。PD 制御のみの場合と比較すると振幅を 8%以下に抑えることが可能である。

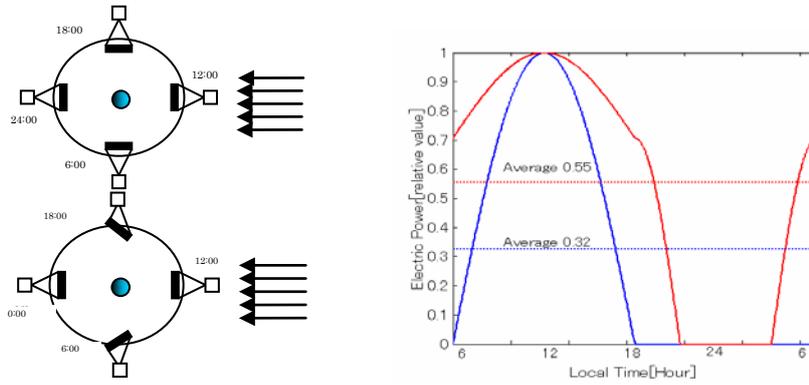


図 14 太陽電池パネルの姿勢角と発電効率の関係

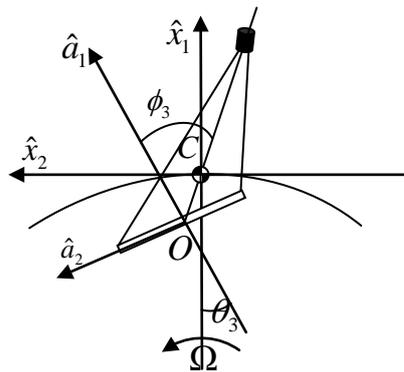


図 15 システムモデル

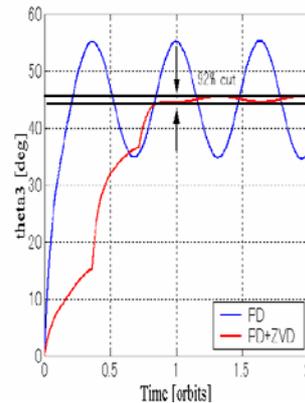


図 16 姿勢角の変化

4. おわりに

本講演では、USEF が提案するテザー型 SSPS の姿勢制御ならびに振動制御について、これまで東京都立科学技術大学/首都大学東京、藤井研究室で行われてきた研究についての概要を紹介した。解析の結果、テザー型 SSPS の構成要素であるテザーを、姿勢運動およびパネル振動の制御アクチュエータとして用いることが有効であることを示した。

参考文献

- [1] Hironori A. FUJII, Takeo WATANABE, Hirohisa KOJIMA, Kazuma SEKIKAWA, and Naoki KOBAYASHI "CONTROL OF ATTITUDE AND VIBRATION OF A TETHERED SPACE SOLAR POWER SATELLITE" AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference & Exhibit, AIAA 2003-403, 6-9 Aug. 2003 Austin Texas USA.
- [2] Watanabe,T., Taniue,M., Kobayashi,N., Fujii,H.A., Kojima, H., and Sasaki, S., "Tether Control for Attitude Motion of Space Solar Power System," Advances in the Astronautical Science, American Astronautical Society, Vol.117, pp.237-244.
- [3] Sekikawa,K., Fujii,H.A., Watanabe,T., and Kojima,H., "Control of Flexible Solar Panel by Employment of Tether Tension," Advances in the Astronautical Science, American Astronautical Society, Vol.117, pp.231-236.
- [4] 関川和馬(都科技大), 藤井裕矩, 渡部武夫, 小島広久, "Mission Function Control による、テザーを用いた柔軟太陽電池パネルの制御", 第 8 回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, pp.69-70, 中央大学・神田駿河台、東京、10月30日~11月1日。

Sekikawa, K, and Fujii,H.A., “Control of Flexible Solar Panel by Employment of Tether Tension,” Paper C1-03, the 10th International Space Conference of Pacific-basin Societies, December 9-12, 2003, Tokyo Waterfront City, Japan.

- [6] 福留弘幸、関川和馬、藤井裕矩、”テザー張力による太陽電池パドルの振動制御” Dynamics and Design Conference 2004 日本機械学会
- [7] 古賀雄介、渡部武夫、藤井裕矩、「テザー型宇宙太陽発電衛星の高効率化を目指したパネル姿勢制御の検討」第14回宇宙エネルギーシンポジウム、平成17年3月7日、宇宙航空研究開発機構、相模原。