柔軟はりのテンドン振動制御実験*

室津義定*¹三ッ矢 明*¹照井冬人*²泉田 啓*¹山口武仁*³

HARDWARE EXPERIMENT OF A TENDON VIBRATION CONTROL SYSTEM FOR A FLEXIBLE BEAM

Yoshisada MUROTSU, Akira MITSUYA, Fuyuto TERUI
Kei SENDA, Takehito YAMAGUCHI

The idea of a tendon vibration control system for the flexible space structure has been proposed, and to verify the feasibility of this concept for a cantilever beam-like flexible space structure, a hardware model was constructed in the laboratory. This paper discusses the hardware experiment of the tendon control system for a clamped-free flexible stainless-steel beam hung in the vertical direction. Since the test structure has very low damping, a low-order modal controller becomes unstable due to the truncated modes in the controller design called residual modes. This phenomenon is called spillover. In order to avoid the spillover instability, two different approaches to the control system design are examined both by numerical simulations and by hardware experiments. First, the DVFB(Direct Velocity Feedback Control) which adds damping to all the vibration modes like a passive damper, is applied. Next, a state feedback controller based on a reduced-order model which is called the HAC(High Authority Control), is applied and results in a spillover instability. Finally, a hierarchical controller called LAC/HAC(Low Authority Control/High Authority Control) considering of the DVFB(LAC) for damping augmentation of the truncated modes, and HAC is applied. As the result, the closed-loop system becomes stable and high performance is achieved.

Key Words: Space Engineering, Application of Control, LSS, Tendon Actuator, Vibration Control, Flexible Beam, Hardware Experiment, Spillover, Truncation, Residual Mode, DVFB(Direct Velocity Feedback Control), LAC(Low Authority Control), HAC(High Authority Control), LAC/HAC(Low Authority Control/High Authority Control)

1. 緒言

大規模宇宙構造物(LSS:Large Space Structure)の振動制御技術が、宇宙開発における一つの検討課題となっており、その設計法に対する検討が数多くなされている¹⁾。筆者らは、片持ちはり状のLSSの新しい振動制御法として、テンドン制御法を提案し、その問題点、有効性を検証するために図1のようなテンドン制御系地上模擬実験装置を製作し、そのダイナミクスを明らかにすると共に¹⁾、それに対して実験、数値シミュレーションを行うことにより、本方法の制御特性に関する種々の検討を行ってきている²⁾⁻⁴⁾。本報では、テンドン制御系地上模擬実験装置のハードウェアについて説明すると共に、前報²⁾で行った数値シミュレーションに対応する実験結果について報告する。

まず2章では製作したテンドン制御系地上模擬実験装置の構造および制御装置について説明する。次に3、4、5章では、実験装置で、テンドンとして剛性の高いピアノ線を用いた場合の制御系設計法として前報²⁾で報告したDVFB(Direct Velocity Feedback)、HAC(High Authority Control)、LAC/HAC

(Low Authority Control/High Authority Control)

と呼ばれる方法に関してアナログ回路によって構成した制御器を用いた実験によって検討した結果を示す。

2. テンドン制御系地上模擬実験装置

2.1 実験装置の構造 テンドン制御系地上模擬実験装置の全景写真を図1に、その概略図を図2に示す。LSSの振動制御実験を地上で行う場合、重力と空気による影響が避けられないという制約が存在する。LSSの特性である低振動数の振動モードを実現するためにははりを柔軟なものにする必要があるが、これを横方向に支持すると重力の影響で曲げ振動とねじり振動が連成する可能性があるため、本研究では長さ2.4m、幅150mm、厚さ1mmの細長い板状のステンレススティール製はりを図1に示すように、はり上部を固定して鉛直方向に片持ち支持する方法を採用した。試験架台の重量は約700kgで、十分な剛性を有しているため、はりの振動との干渉はない。また、上端を固定端としたために剛体モードは存在せず、振動制御だけを独立させて考えたものになっている。はりの固有振動数とモードシェイプは重力による分布荷重の影響を受ける¹⁾。

実験装置の各部分の写真を図3に示す。テンドンアクチュエータとして、はりの両側面にアーム長15cmのアルミニウムのテンドンアームを1組取り付け、アー

* 平成元年11月10日 機械力学講演会において講演、原稿受付 平成元年4月13日。

¹⁾ 正員、大阪府立大学工学部(〒591 堺市百舌鳥梅町4-804)。

²⁾ 准員、大阪府立大学大学院。

³⁾ 大阪府立大学大学院。

ムの両端にテンドンとしてピアノ線を取り付け、ピアノ線の他端をはりの固定端の更に上方に位置するアルミニウム製の上部リンクの左右に、各テンドン同士が平行になるように取り付ける。上部リンクは支点を中心として回転する。制御力は図に示すリニアモータによって発生させる。テンドンには事前に一定のテンションをかけておくことで、テンドンのたるみを防ぎ、はりの振動とテンドンの振動との干渉を防ぐ。表1に実験によって得られた固有振動数と減衰比を示す。こ

れより、テンドンアクチュエータを取り付けた全体系の場合でも構造は十分に柔軟で、モード減衰比も1次モードを除けばかなり小さいことがわかる。

図1 柔軟はりのテンドン制御地上模擬実験装置

(a)上部リンク

(b)モーメントアーム

図2 テンドン制御地上模擬実験装置の構造

(c)渦電流型変位センサ

図3 実験装置

表1 実験より得られた固有振動数と減衰比

Modes	Ω_1 [Hz]	ζ_1
1st	0.407	0.011
2nd	1.225	0.0041
3rd	2.75	0.0040
4th	5.10	0.0041
5th	8.13	0.0016
6th	11.50	0.0035
7th	16.25	0.0017
8th	20.0	0.0025
9th	25.0	—
10th	32.0	—

2. 2 制御装置 模擬実験装置に対する制御装置全体のブロック図を図4に示す。後述するが、観測量としては、D V F B (L A C) のためには上部リンクの角速度、H A C のためには上部リンクの角度が必要である。実験においては、上部リンクの角度を近似的に計測するセンサを用い、角速度はその信号をアナログ微分回路を通して求めている。制御入力は上部リンクに加えるモーメントであり、それはリニアモータによる並進力をリンクに加えることによって発生する。D V F B (L A C)、H A C における制御力を決定する制御プロセッサは、デジタルコンピュータを用いず、すべてアナログ回路によって構成している。以下に制御装置の各要素を説明する。

2. 2. 1 上部リンク角度センサ 上部リンクの角度を計測するセンサの構成を図2、3(a)に示す。上部リンクの支点より19cm上方の頂点に赤外線を放射するLEDターゲットを取り付け、その上部リンクの回転振動による2次元変位を半導体検出素子(P S D: Position Sensitive Detector)を使用した光点位置計測装置(浜松ホトニクス(株) ポジションセンサ C2399)によって非接触で計測する。上部リンク角度はLEDターゲットの横変位計測データのみを用い、振動による変位は微小であると仮定して換算する。

2. 2. 2 リニアモータ、モータドライバ 上部リンクに加える制御モーメントはリニアモータによって実現する。本研究ではボイスコイル型の円筒状リニア直流モータ(昭和電線電機(株) 26-02R)を制御用アクチュエータとして用いている。このリニアモータは図2、3(a)に示すように円筒状の永久磁石の中を電機子が移動する形の物で、電機子のコイルに流れる電流に比例した並進力を発生し、約±1cmの範囲で電機子が前後に移動する。リニアモータの発生する力は15cmのモーメントアームを介して上部リンクにモーメントを加えることになる。リニアモータは定電流回路であるモータドライバによって駆動される。

2. 2. 3 渦電流型変位センサ はりの変位の測定には図3(c)のような渦電流効果を利用した非接触

図4 制御装置全体のブロック図

変位計(新日本測器(株) 非接触変位計 503-F型)を用いる。この変位計は、本研究では制御には用いず、制御性能を単にモニタするためには先端から6cmの位置でのはりの変位を計測できる位置に1つだけ配置している。

2. 2. 4 デジタルコンピュータ デジタルコンピュータ(NEC, PC9801-VM)は、後述する励振のための疑似インパルス信号の出力、及びデータの取り込みのために用いる。

2. 2. 5 制御回路 前述のように、得られた観測値から制御力を決定する制御用プロセッサはアナログ回路を用いている。これは連続時間系である制御対象及び連続時間系に対して設計される制御則とを離散時間制御系で実装する際の問題点を除去するためである。その結果、より理論に近い実験結果が得られた。制御回路は各々の制御アルゴリズムによって異なるので、その詳細は適用例の所で示す。

3. D V F B

(Direct Velocity Feedback)⁶⁾

3. 1 D V F Bを実現する制御回路 D V F Bではアクチュエータ位置での速度成分即ち、この場合では上部リンクの角速度を直接フィードバックしなければならないため、P S Dコントローラの出力を時間微分する回路が必要となる。このため、図5のような疑似微分回路を使用している。これは2次おくれ系と微分要素の直列結合であり、入力の周波数が低い時は微分要素として働き、周波数の高い時には積分要素として働き高周波のノイズを除去する。本実験では、

図5 疑似微分回路図

図6 疑似微分回路のボード線図

(1) SIMULATION

(2) EXPERIMENT

図7 開ループ応答
(上部リンクにインパルス)

(1) SIMULATION

(2) EXPERIMENT

図8 DVF Bの開ループ応答
(上部リンクにインパルス)

$R_1 = 2.5 [\Omega]$, $R_2 = 1.1 [M\Omega]$, $C_1 = 0.15 [\mu F]$, $C_2 = 0.002 [\mu F]$ であり, このときの時定数は 2.2 msec , $0.375 \mu \text{ sec}$ となり, 0 Hz から 70 Hz 付近まで微分要素, 70 Hz から 400 KHz 付近までは比例要素, 400 KHz 以降は積分要素としてはたらく. 回路のボード線図を図6に示す.

3. 2 設計例 D V F Bにおけるフィードバックゲインの設計は前報²⁾と同様で, 低次の4次までのモードが一様に減衰するように角速度フィードバックゲイン $k_v = 3.45 [\text{Nmsec}]$ とする. 制御実験における外乱としては, 再現性のある励振を実現するために, パーソナルコンピュータのD/Aコンバータからソフトウェアの指令に従ってインパルス電圧を出力し, それをモータードライバに入力することによって, リニアモータを利用してインパルス励振力を加えている. これは上部リンクに, 0.525 Nm のインパルスモーメントを 58 msec の間加えることに対応しており, 実験結果の比較のためのシミュレーションでもこれと同じインパルスを加えている.

まず, 上述したインパルスを加えた場合の自由振動を図7に示す. (2)が実験, (1)がそれに対応する数値シミュレーションによって得られたものである. 両者とも(a)が上部リンクの角度, (b)がはり先端から 6 cm の位置でのはりの変位である. 実験とシミュレーションでは変位の変動幅, 減衰には若干の違いはあるが, は

ば同じような応答が得られている. D V F Bを行った場合のインパルス応答を図8に示す. シミュレーション, 実験の両者とも非常に良好な, 一致した制御性能が得られている. 実験では微分回路において高周波数域でゲインを下げるような工夫をしているが, それでも制御力に雑音が非常に大きいことがわかる. しかし, この雑音は非常に高周波なので, 制御性能には全く影響を与えていない.

4. H A C (High Authority Control)

4. 1 H A C 一般に, D V F Bのみでは制御性能に限界があるので, D V F BはL A C (Low Authority Control)と呼ばれるのに対し, 低次元化モデルに基づく状態フィードバック制御はH A C (High Authority Control)と呼ばれる.

H A Cではセンサ出力をそのままフィードバックするのではなく, オブザーバを用いてセンサ出力から状態量を推定しフィードバックする. しかし, 制御用回路の複雑さなどの実装上の問題から, H A Cで制御するモード数には限界がある. 本報においては, 前報²⁾と同様に, 状態変数として1次から4次までのモード変位, 速度をとった低次元化モデルを用い, 上部リンクに配置された角度センサを使ってH A Cの設計を行う.

図9 H A Cの開ループ応答
(上部リンクにインパルス)

HACにおいては、4次の振動モードまでしか制御しないため、設計において打ち切られた5次以上のモード(剰余モード)の安定性は必ずしも保証されない。この現象はスピルオーバー(spillover)と呼ばれる。

4.2 設計例 テンドン制御系において、実際にHACを設計し、数値シミュレーション、実験を行って、スピルオーバー不安定を確認した例を示す。状態フィードバックゲイン F の設計には、前報²⁾と同様に、閉ループ極を $-1 \pm \omega_i j$ (ω_i ($i=1, \dots, 4$): i 次モードの固有円振動数)に配置した。オブザーバゲイン K の設計も、オブザーバの極を $-2 \pm \omega_i j$ ($i=1, \dots, 4$)に配置した。

上記のように制御系を設計した場合の実験結果と、それに対応するシミュレーション結果を図9に示す。励振の条件は前章のDVFBの場合と同じである。制御回路については次章のLAC/HACの章で説明する。明らかに閉ループ系は不安定であり、典型的なスピルオーバー不安定が生じていることがわかる。実験では装置を破壊する恐れがあるため振動変位がある程度大きくなったら制御を中止して、後は自由振動をさせるようにしている。

5. LAC/HAC (Low

Authority Control/High Authority Control)⁷⁾

5.1 LAC/HAC DVFB(LAC)によってあらかじめ剰余モードの減衰を一様に増加させ、DVFB閉ループ系を新たな制御対象としてHACを設計するLAC/HACという階層的な制御系設計によって、スピルオーバー抑制効果が期待できる。本報では、前報²⁾と同様に前節で不安定となった6次モードに重点的に減衰が加わるように $k_v=0.4$ [Nm·sec]とする。

5.2 LAC/HACを実現する制御回路 HACは、4次のモードまでを推定するオブザーバと、推定されたモード成分から制御力を決定するレギュレータから構成される。図10にLACとオブザーバを併用したレギュレータをアナログ回路で実現したHACのブロック図を示す。制御対象には内部ループとして前述した疑似微分回路を用いてLACを行っている。 Q ($i=1, 2, 3, 4$)は各振動モードの回路ユニットである。このユニットは図11に示すように、主に、2次振動系を実現する2つの積分器とレギュレータゲイン

$$F = [F_1, F_2, \dots, F_6] \quad (1)$$

やオブザーバゲイン

$$K = [K_1, K_2, \dots, K_6]^T \quad (2)$$

また、システムマトリックス

$$b = [0, 0, 0, 0, \phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{13}, \phi_{14}]^T \quad (3)$$

$$c = [\phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{13}, \phi_{14}, 0, 0, 0, 0] \quad (4)$$

ϕ_{1i} ($i=1, 2, 3, 4$): i 次モードのモードシェイ

プの上部リンク位置の成分に対応する増幅器によって構成されている。このユニットへの入力、制御力 u_{L+H} 、誤差 $e = y - c \hat{x}$ の2つ、ユニットからの出力は $\phi_i \hat{q}_i$, $F_i \hat{q}_i$, $F_{i+4} \dot{\hat{q}}_i$ ($i=1, 2, 3, 4$)の3つである。センサからの信号は $\hat{y}$ との差を取られ、誤差 e として、各ユニットに入力される(図10(A)点)。また、出力 $\phi_i \hat{q}_i$ ($i=1, 2, 3, 4$)は、総て加算されて $\hat{y}$ となる((B)点)。 $F_i \hat{q}_i$, $F_{i+4} \dot{\hat{q}}_i$ ($i=1, 2, 3, 4$)についても全て加算されて、HACによる制御力 u_H となる。そして制御対象に対しては y を微分して k_v をかけることによって得られるLACによる制御力 u_L と、 u_H の和 u_{L+H} が入力され、((C)点)、オブザーバに対しては、 $\hat{y}$ を微分して得られる u_L と u_H の和 u_{L+H} がそれぞれ入力される((D)点)。

5.2 設計例 上記のように制御系を設計し、DVFB, HACの場合と同様の条件でのLAC/HACの閉ループ応答を図12に示す。スピルオーバー不安定は回避されると共に良好な制御性能が得られていることがわかる。シミュレーション、実験の両者ともほぼ一致しているが、実験の応答の方が若干1次モードの減衰が小さい。これは観測量として上部リンクの角速度を用いていて、1次モードは上部リンク角度への寄与が他のモードに比べて小さいため、制御用機器の特性、雑音、非線形性、可動部の摩擦、ガタ、モデル

図10 LAC/HAC用アナログ回路のブロック図

図11 1自由度振動回路ユニットの回路図

図12 LAC/HACの閉ループ応答
(上部リンクにインパルス)

化していないダイナミックスなどの実験におけるハードウェア実装上の種々の制約の影響を受けやすいからだと予想される。さらに、制御力の雑音はDVFBの場合よりはかなり小さく、オブザーバがフィルタの作用をしていることがわかる。また、当初心配されたはりの横振動とテンドンの横振動との干渉の問題は発生しなかった。

6. 結 論

本論文では、テンドン制御系地上模擬実験装置において、テンドンとして剛性の高いピアノ線を用いた場合の制御系設計法として、DVFB、HAC、LAC/HACを取り上げ、これらを数値シミュレーション、及びアナログ回路によって構成した制御器を用いた実験の両面から検討した。その結果、数値シミュレーションと実験での結果は良好な一致を見せ、実験装置に関するモデリングの正当性、採用した制御系設計法の

実現可能性を裏付けるものとなった。

参 考 文 献

- 1) 室津, 他 4 名, 機論, 54-507, C (昭63-11), 2681.
- 2) 室津, 他 4 名, 機論, 55-514, C (1989-6), 1345
- 3) Y. Murotsu, 他 4 名, Proc. of the AIAA Guid., Nav. and Control Conf., Part 2, Mineapolis, Aug. 15-17, 1988, pp. 85-860.
- 4) H. Okubo, 他 4 名, Proc. of the 16th Int. Symposium on Space Technology and Science, Sapporo, May 22-27, 1988, pp. 559-564.
- 5) 特集: LSS その近未来制御理論, 計測と制御, 26-10, (1987).
- 6) M. J. Balas, J. of Guid. and Cont., 2-3, pp. 252-253, 1979.
- 7) J. N. Aubrun, J. of Guid. and Cont., 3-5, pp. 444-451, 1980.

討 論

〔質問〕 狼 嘉 彰〔航空宇宙研究所〕

(1) 宇宙機に適用する場合、剛体モードを考慮する必要があるが、このとき、貴システムはどのような影響をうけるか。

(2) 図6の疑似微分回路の位相特性に符号の誤りがないか。

〔回答〕 (1) 本研究では柔軟はりの振動モードのみの能動制御を考えているが、剛体モードを考慮した場合でも宇宙機本体の剛体運動をも含めた制御対象のモデル化を行い、それに対して制御系を設計すれば、振動モードの制御に対して本システムは適用できる。

(2) 紛らわしい表現をして申し訳なかった。図5の疑似微分回路では、 $V_{out} = -(dV_{in}/dt)$ となっているので、その特性を実験的に計測し、そのまま表現すれば図6のようになる。しかし、その後に直列に符号を逆転する回路が接続されていて、位相は逆転する。したがって、符号に誤りはない。

〔質問〕 土 屋 和 雄〔大阪大学工学部〕

モード数の多い振動系の制御則を実験的に検討されている点に対し敬意を表す。以下の点についておたずねしたい。

(1) 疑似微分回路の時定数の決め方についてご教示願いたい。比例要素となる領域を広くとることに意味はあるのか。

(2) 制御結果から判断するとDVFBだけのほうが、LAC/HACよりも良好なようにも思えるが、

LAC/HACの効果についてどうお考えか。

〔回答〕 (1) 遅い時定数すなわち低い折れ点周波数は第4モードの振動数の10倍以上をターゲットとして70 Hzとした。また、早い時定数すなわち高い折れ点周波数は遅い時定数を定めた後に決定した。この高い折れ点周波数を、徐々に低くすると位相が低い周波数でも遅れはじめ、不安定になるモードが現れ始める。そこで、早い時定数は利用する最大のフィードバックゲインでも閉ループ系が安定するように実験によって決定した。その結果、比例要素となる領域が広がってしまったが、そのこと自身には特に意味はない。

(2) ここに示した閉ループ応答はインパルス的な外乱に対する応答なので、LAC/HACでのオブザーバが状態を推定するまでの時間遅れの間は十分な制御性能が得られず、その結果DVFBよりも最大変位が大きく、制御性能が悪いように見える。しかし、文献(2)の表2に示したように、制御モードである低次4モードのみならず、低次10モードに関しては八次モード以外はいずれもLAC/HACのほうがDVFBよりも減衰比が大きくなっていて、制御性能は高いと言える。また、LAC/HACはDVFBでは困難な各制御モードに対するフィードバックゲインの設定が可能であるため制御系設計の自由度が高く、よりきめ細かい制御が可能である点が長所であると考えられる。