力覚センサを用いた2リンク柔軟マニプレータの振動制御*

小松 督^{*1}, 植之原 道宏^{*2}, 飯倉 省一^{*1}
三浦 宏文^{*3}, 下山 勲^{*3}Vibration Control for Two-Link Flexible Manipulator using
a Wrist Force SensorTadashi KOMATSU, Michihiro UENOHARA, Shoichi IIKURA,
Hirofumi MIURA and Isao SHIMOYAMA

This paper reports on the vibration control of a flexible space manipulator in which the tip deflection of each flexible link is fed back in a closed control system. A simple dynamic model is derived using the static deflection model to derive the system dynamics equations of a flexible manipulator. A force/torque sensor incorporated in the manipulator's wrist is proposed as a new type of sensors to estimate the deflection. To investigate the effectiveness of this control method, a two-link flexible SCARA manipulator system was constructed. This manipulator was 1.5 m long and was floating on a base-plate using air bearings capable of handling a 40kg payload. The experimental results showed that the deflection feedback realized the same effect on the vibration control as the general method of strain gauge output feedback.

Key Words: Vibration Control, Robotics, Force Torque Sensor, Space, Flexible Arm

1. は じ め に

近い将来宇宙ステーション等の利用によって宇宙での作業量が増加してくると、宇宙用マニプレータを使ってこれに対処することが考えられる。このようなマニプレータは打上げ時のコストや微小重力環境下での使用ということで、極端に軽量化されることが考えられる。さらに、地上用のマニプレータにおいても、高速かつ省エネルギー化のためにはアームの軽量化が必要になる。このような軽量化マニプレータを高精度で動かすためには、軽量低剛性化によって発生する振動を制御することが重要な問題となり、従来から数多くの研究がなされている^{(1)~(3)}。

ところで、今まで行われた振動制御法には、ひずみゲージ出力のフィードバックや加速度フィードバックなどがあるが⁽⁴⁾、どの方法を選ぶかはモデリングや利用できるセンサの種類に大きく依存している。例えば多リンク系を考えた場合には数学的に厳密なモデルを導出するのは非常に困難であるため、アーム先端に仮

想的な“集約ばね”を設定し、実質的に1リンクとみなしてその変位をフィードバックすることも行われている⁽⁵⁾。センサにおいては、近似的にでもモデルが得られれば先端加速度センサなどアクチュエータから離れた場所に取付けたセンサを用いることができるが、一般的には各リンク根元のひずみゲージなどコロケートされたものを利用して、制御面での安定性を確保している。このリンク根元のひずみゲージを使ったローカルフィードバックによる制御は、振動抑制の効果が良好であるため、数多くの実験例が報告されている⁽⁴⁾。しかし、この場合はセンサが各軸に分散しているので、実システムにおいては取付方法やメンテナンスの点で問題がある。

本研究では、2リンク柔軟マニプレータの振動制御について考える。特に、対象を宇宙用として、自重をささえる必要がないことから、リンクが極端に軽量化され、大質量物をハンドリングした場合を想定する。そして、このマニプレータに対して各リンク先端のたわみ量をフィードバックする振動制御方法を示す。

振動計測用のセンサとして、手首の力/トルクセンサを提案する。今後、マニプレータの高技能化のためには力制御あるいはコンプライアンス制御を行うことが必要となり、そのために手首部に力/トルクセンサ

* 原稿受付 平成2年2月16日。

^{*1} 正員、(株)東芝総合研究所 (●210 川崎市川崎区浮島町4-1)。^{*2} (株)東芝総合研究所。^{*3} 正員、東京大学工学部 (●113 東京都文京区本郷7-3-1)。

が取付けられる。例えば、宇宙ステーションの日本実験モジュール用の親アームにおいても、モニタ用ではあるが力/トルクセンサを取付けることが計画されている⁽⁶⁾。したがって、このセンサを力制御だけでなく振動制御にも利用できれば、加速度計を新たに取付ける方法に比べてコスト、スペース、メンテナンスの点で非常に有利となる。また、センサの数が減らせるという点では軽量化にもつながる。

まず、各リンクをマスをレスとしたバネ-マス系で置き換えたモデルを用いて柔軟マニプレータの動特性を導く。次に、マニプレータ手首に取付けた力/トルクセンサを用いたリンクたわみ量推定法を提案する。最後に実験により、本方法がリンク根元のひずみゲージのローカルフィードバック制御と同等の制振効果を生むことを示す。

2. 柔軟マニプレータのモデリング

まず、柔軟マニプレータのダイナミクスを導出するにあたって以下の仮定をおく。

- (1) 解析の対象を2リンクスカラ形のアームとし、リンク変形は曲げのみを考える。
- (2) ペイロードの質量が支配的とし、各リンクはマスをレスと考え、リンクの変形を静たわみ曲線で近似する。
- (3) リンク変形はリンク長に比べて十分小さいものとする。

図1 解析モデル

(4) ダイナミクスにおける遠心力やコリオリの力、および重力の影響は無視する。

(5) マニプレータの動作速度は非常に遅いものとする。

図1の解析モデルを用いて、柔軟マニプレータのダイナミクス導出を行う。図1においてO-XYは絶対座標系を表している。

ここで、

m_T : 先端部質量 (手首部を含む)

m_2 : ひじ関節質量

j_T : 先端部イナーシャ (手首部を含む)

j_2 : ひじ関節イナーシャ

θ_1 : 肩相対角度

θ_2 : ひじ相対角度

V_1 : リンク1先端部のたわみ量

V_2 : リンク2先端部のたわみ量

ひじ・手首・ペイロード重心の絶対座標をそれぞれ、

$(x_2, y_2) \cdot (x_3, y_3) \cdot (x_T, y_T)$ とすると、

$$\begin{cases} x_2 = l_1 \cos \theta_1 - V_1 \sin \theta_1 \\ y_2 = l_1 \sin \theta_1 + V_1 \cos \theta_1 \\ x_3 = x_2 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) - V_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \\ y_3 = y_2 + l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) + V_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \\ x_T = x_3 + L \cos (\theta_1 + \theta_2 + \theta_2) \\ y_T = y_3 + L \sin (\theta_1 + \theta_2 + \theta_2) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $l_1 \cdot l_2 \cdot L$ は各リンク長であり、 $i_1 \cdot i_2$ は各リンク先端でのたわみ角である。

さて、各リンクの変形を、次のような一端固定で他端に集中力 F_n とモーメント M_n が働く場合の静たわみ曲線で示す⁽⁷⁾。

$$V_n = \frac{l_n^3}{3E_n I_n} F_n + \frac{l_n^2}{2E_n I_n} M_n \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$i_n = \frac{l_n^2}{2E_n I_n} F_n + \frac{l_n}{E_n I_n} M_n \quad \dots\dots\dots (3)$$

($n=1, 2$)

ここで、 l_n はリンク長、 E_n は縦弾性係数、 I_n は断面二次モーメントで、 E_n と I_n は一様であるとする。

今、リンク変形に大きな影響を与えるものとして、ペイロード並進慣性力を考える。すると、 V_n と i_n に関して次の線形式が導かれる⁽⁷⁾。

$$i_1 = a V_1 + b V_2, \quad i_2 = c V_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$a = \frac{3}{2l_1}, \quad b = \frac{3E_2 I_2 l_1 (l_2 + L)}{2E_1 I_1 (2l_2^3 + 3l_2^2 L)}$$

$$c = \frac{3(l_2^2 + 2l_2 L)}{2l_2^3 + 3l_2^2 L}$$

そこで、各関節部の運動エネルギーと各リンクのポテンシャルエネルギーを求め、ラグランジュの運動方程式を導出し⁽⁷⁾、目標値まわりで線形化すると、目標値からの偏差ベクトル

$$\tilde{x} = (\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, V_1, V_2)^t \\ = (\Delta\tilde{\theta}, \tilde{V})^t \quad \dots\dots\dots (5)$$

に関する運動方程式が次のように求まる。

$$\tilde{M}\ddot{\tilde{x}} + \tilde{D}\dot{\tilde{x}} + \tilde{K}\tilde{x} = \tilde{T} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $\cdot$ は時間微分

$$\tilde{M}: \text{質量マトリックス} = \begin{bmatrix} \bar{M}_1 & \bar{M}_2 & \bar{M}_3 & \bar{M}_4 \\ & \bar{M}_5 & \bar{M}_6 & \bar{M}_7 \\ \text{sym.} & & \bar{M}_8 & \bar{M}_9 \\ & & & \bar{M}_{10} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{D}: \text{減衰マトリックス} = \text{diag}(d_1, d_2, d_3, d_4)$$

d_1 および d_2 は関節部の摩擦であり、 d_3 および d_4 はリンクの比例減衰である。

$$\tilde{K}: \text{剛性マトリックス} = \text{diag}(0, 0, k_1, k_3)$$

$$k_1 = 3E_1I_1/l_1^3, k_3 = \alpha/\beta$$

$$\alpha = 9l_1(l_2+L)E_2^2I_2^2(4l_1-4l_1\cos\theta_2^*+l_2+L)$$

$$+12E_1I_1E_2I_2(l_2^2+3Ll_2^2+3L^2l_2)$$

$$\beta = E_1I_1(2l_2^2+3l_2^2L)^2, * \text{ は目標値}$$

$$\tilde{T}: \text{関節トルク} = (T_1, T_2, 0, 0)^t$$

式(6)より次の状態方程式が得られる。

$$\dot{\tilde{X}} = \tilde{A}\tilde{X} + \tilde{B}\tilde{T} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{0} & \tilde{E} \\ -\tilde{M}^{-1}\tilde{K} & -\tilde{M}^{-1}\tilde{D} \end{bmatrix}, \tilde{E}: \text{単位行列}$$

$$\tilde{B} = [\tilde{0}, \tilde{M}^{-1}]^t, \tilde{X} = (\tilde{x}, \dot{\tilde{x}})^t$$

さて、リンク変形に大きな影響を与えるものとして、ペイロード並進慣性力を考えると、式(2)における F_n と M_n は静力学的釣合い関係から次のように与えられる⁽⁷⁾。

$$\begin{cases} F_1 = P_{Tx} \sin \theta_2 + P_{Ty} \cos \theta_2 \\ F_2 = P_{Ty} \\ M_1 = (l_2 + L)P_{Ty} \\ M_2 = P_{Ty}L \end{cases} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(8)を式(2)に代入することで次式を得る。

$$P_{Tx} = \frac{3E_1I_1}{l_1^3 \sin \theta_2} V_1 - \frac{3E_2I_2\{2l_1 \cos \theta_2 + 3(l_2+L)\}}{l_1l_2^2(2l_2+3L)\sin \theta_2} V_2, P_{Ty} = \frac{6E_2I_2}{l_2^2(2l_2+3L)} V_2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $\theta_2=0$ のときは $P_{Tx}=0$ とする。したがって、計測量を関節角度 $\Delta\tilde{\theta}$ 、角速度 $\Delta\dot{\tilde{\theta}}$ 、マニプレータ先端力 P_{Tx} 、 P_{Ty} とすると、この場合の観測方程式は式(9)を線形化することで、

$$\tilde{Y} = \tilde{C}\tilde{X} \quad \dots\dots\dots (10)$$

として与えられる。ただし、 $\tilde{Y}$ は観測ベクトルであり、

$$\tilde{Y} = (\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, P_{Tx}, P_{Ty}, \Delta\dot{\theta}_1, \Delta\dot{\theta}_2)^t \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここに、 $\tilde{C}$ は観測行列であり次式で与えられる。

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & & & & & 0 \\ 0 & 1 & & & & & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3E_1I_1}{l_1^3 \sin \theta_2^*} & -\frac{3E_2I_2\{2l_1 \cos \theta_2^* + 3(l_2+L)\}}{l_1l_2^2(2l_2+3L)\sin \theta_2^*} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{6E_2I_2}{l_2^2(2l_2+3L)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & & & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & & & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

式(7)より、この系は可制御であり、また式(7)、(10)から、この系は可観測である。

3. リンクたわみ量の計測

フレキシブルマニプレータの振動制御を行うためには、フレキシブルリンクの振動状態を計測し、その結果、リンクたわみ量を推定する必要がある。本研究では、新たに振動センサとして手首の力/トルクセンサを用いて、各リンク先端のたわみ量を推定する方法を提案する。

さて、前章での仮定により、各リンクの弾性変形は静たわみ曲線で近似されている。この時、アーム先端に加わる並進力と各リンク先端のたわみ量との関係式は式(9)の線形式で与えられているので、この式より次式が求められる。

$$V_1 = \frac{l_1^3 \sin \theta_2^*}{3E_1I_1} P_{Tx} + \frac{l_1^2\{2l_1 \cos \theta_2^* + 3(l_2+L)\}}{6E_1I_1} P_{Ty}, V_2 = \frac{l_2^2(2l_2+3L)}{6E_2I_2} P_{Ty} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここでは、並進慣性力 P_{Tx} , P_{Ty} を手首部の力/トルクセンサで計測する。計測量を F_x , F_y とすると、図1の座標系では、静力学的釣合い関係から、

$$P_{Tx} = F_x \cos i_2 - F_y \sin i_2$$

$$P_{Ty} = F_x \sin i_2 + F_y \cos i_2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

が得られる。しかし、たわみ角 i_2 は非常に小さいものとし、その影響を無視することで、

$$P_{Tx} = F_x$$

$$P_{Ty} = F_y \quad \dots\dots\dots (14)$$

とした。以上より、力/トルクセンサより P_{Tx} , P_{Ty} が得られれば、式(12)より各リンクたわみ量 V_1 , V_2 が簡単に実時間で推定される。

4. 振 動 制 御

柔軟マニプレータの制御においては、剛体としての位置姿勢制御と、フレキシブルリンクの振動制御を同時に行わなければならない。

本研究においては、姿勢制御についてはリンク間の干渉を考えないローカルなフィードバック制御を、また振動制御においてはリンク間の干渉を考慮した制御を行うものとして、次式のフィードバック制御則を採用した。

$$T_i = g_{i1}(\theta_i^* - \theta_i) - g_{i2} \dot{\theta}_i + g_{i3} V_1 + g_{i4} V_2 \quad (i=1, 2) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし、 T_i は各アクチュエータの駆動トルク、 θ_i^* は目標関節角度、 $g_{i1} \sim g_{i4}$ は制御ゲインである。

ところで、ここでの仮定はリンク変形を静たわみ曲線で近似しているため、リンクの高周波の振動に対してはこの仮定は成立しない。そこで、スピルオーバーの影響を除くために、力/トルクセンサの信号に対してはローパスフィルタによって高周波成分をカットしている。

図 2 柔軟マニプレータ実験装置の外観

5. 実 験 装 置

図1の解析モデルの対象は、図2のような実験装置である。

アームは、3自由度スカラ形で、二つのフレキシブルリンクを有している。全長は1.5mで、リンクは直径6mmのステンレス棒で作られている。各関節部にDCモータと遊星歯車減速機(減速比100)で構成されるアクチュエータを配している。基部を除く全体を定盤上で空気軸受により浮上させており、平面内で微小重力環境を模擬している。センサとして、ポテンションメータ、タコジェネレータが各関節部、ひずみゲージが各リンク根元部、3軸力/トルクセンサが手首部にそれぞれ取付けられており、相対角度、相対角速度、リンクひずみ量、アーム先端力、が計測できるようになっている。力/トルクセンサは平行平板タイプ(図3参照)のものを製作して使用している。

ペイロードは、同様に空気軸受で浮上させており、質量は40kgに設定している。

制御および計測用のマイクロコンピュータとしては、モトローラのVME-10を用いており、MPUは16bitの68010である。

実験装置に対する各パラメータの値は次のとおりである。

$$\begin{aligned} m_T &= 44.8 \text{ kg} \\ m_2 &= 4.54 \text{ kg} \\ j_T &= 6.20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ j_2 &= 1.92 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ l_1 &= l_2 = 0.648 \text{ m} \\ L &= 0.360 \text{ m} \\ E_1 I_1 &= E_2 I_2 = 14 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \\ d_1 &= 300 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}, \\ d_2 &= 500 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad} \\ d_3 &= 31 \text{ N} \cdot \text{s/m} \\ d_4 &= 270 \text{ N} \cdot \text{s/m} \end{aligned}$$

図 3 平行平板構造

6. 実験結果

6・1 リンクたわみ量推定結果 ここでは、3章で示したリンクたわみ量推定方法を実験装置に適用した結果を、リンク根元にはったひずみゲージより推定した結果との比較で示す。

リンク根元にはったひずみゲージを用いる場合には、各リンク先端に接線力を加えることで、あらかじめ先端のたわみ量とひずみゲージの出力との対応を求めている。

実験は、マニプレータに40 kgのペイロードを把持させ、アームをまっすぐ伸ばした姿勢で各関節をサーボロックの状態にした。そして、ペイロードに手で外乱を与えて自由振動を行わせた。

実験結果を図4に示す。力/トルクセンサからの推定値には少々雑音が入っているが、低周波成分については、ひずみゲージを使用した結果と非常に良く一致している。

図4 たわみ量推定実験結果

図5 振動抑制を考慮した制御（ひずみゲージ使用）

ている。したがって、手首部の力/トルクセンサは、振動が低周波の場合に限って言えば、振動センサとして十分利用することができることがわかる。宇宙用マニプレータはできる限りの軽量化のために、材質そのものにおいてなるべく軽いものを選ぶのは当然であるが、システム構成においても簡素化あるいはユニット化を強いられる。したがって、一つのセンサシステムに複数の機能を持たせる本方法は、グラムオーダの軽量化が必要な宇宙機器に対しては非常に有効な方法であると考えられる。

6・2 振動制御実験結果 4章で示したリンクたわみ量フィードバックによる振動制御の実験結果を、ひずみゲージ出力のフィードバックとの比較で以下に示す。

実験は前節と同様に、マニプレータに40 kgのペイロードを把持させ、アームをまっすぐ伸ばした姿勢を初期姿勢とした。目標値として肩関節に -14° をステップ状に与えている。まず、図5にひずみゲージ出力のフィードバックによる制振実験の結果を示す。この制御方法は、振動抑制の効果が良好であることが従来の研究ですでに報告されており⁽²⁾、またPDS制御法として安定性等も論じられている⁽⁸⁾。図5は、上から肩、ひじの関節角および上腕、前腕のひずみゲージの出力をそれぞれプロットしたものである。振動制御を行わない場合には、周知のように図4のような残留振動が生じるので、それと比較して図5は効果的に振動が抑制されているのがわかる。

これに対して、リンクたわみ量のフィードバックに

図6 振動抑制を考慮した制御（力/トルクセンサ使用）

よる制振実験の結果を図6に示す。図5と同様の振動抑制効果が得られているのがわかる。ひずみゲージの出力で比べると、図6においては動かし始めに鋭いピークが生じている。これは、ローパスフィルタの位相遅れ、あるいはアクチュエータに入力トルクを与えてから力/トルクセンサの弾性部が変形するまでの波動伝搬遅れによって、一時的にたわみ量が零、すなわち剛体アームとして制御するので過大なトルクが指令されるためである。したがって、目標軌道を滑らかなものにする等の工夫により始動時の指令トルクを小さくして、このピークを減少させることは可能である。

以上のように、アーム先端のセンサを用いた図6の結果と、センサ/アクチュエータがコロケートされた場合の図5の結果はほぼ同じであるので、力/トルクセンサを用いたリンクたわみ量フィードバックによる振動抑制制御が十分可能であることがわかる。

7. 結 論

本研究では、大質量物をハンドリングした宇宙用の2リンク柔軟マニプレータの振動抑制制御を取り上げ、静たわみ曲線を用いたモデル化、リンクたわみ量推定、振動制御実験を行って、次の事項を明らかにした。

(1) 振動計測用のセンサとして、手首の力/トルクセンサを採用し、これを用いたリンクたわみ量推定

法を提案した。これと、ひずみセンサを用いたリンクたわみ量の推定値とを比較検討し、両者の値がほとんど一致することから、力/トルクセンサによる振動制御の可能性を示した。

(2) 力/トルクセンサを用いたリンクたわみ量フィードバック制御法と、従来より行われているひずみセンサ値のフィードバック制御法とを比較検討し、両者はほぼ同程度の振動抑制効果が得られることを実験により確認した。したがって、コスト、取付けスペース、メンテナンス性の観点から、力/トルクセンサを振動制御に用いる制御方法の一例を示した。

今後の課題は、三次元アームへの拡張である。

文 献

- (1) Cannon, R. H. Jr. and Schmitz E., *Int. J. Robot. Res.*, 3-3 (1984), 62.
- (2) 福田, 機論, 51-468, C (1985), 2140.
- (3) Sakawa, Y., Matsuno, F. and Fukushima, S., *J. Robot. Sys.*, 2-4 (1985), 453.
- (4) 福田, 日本ロボット学会誌, 6-5 (1988), 424.
- (5) 坂和・松野・大澤・清原・阿部, 日本ロボット学会誌, 6-1 (1988), 42.
- (6) 山本・ほか5名, 第3回宇宙ステーション講演会講演集, (1987-4), 49.
- (7) 小松・植之原・飯倉・三浦・下山, 機論, 55-516, C (1989), 2022.
- (8) 李・宮崎・有本, 計自論, 25-6 (1989), 675.