

能動リンクを用いた自由関節リンクの姿勢制御

吉田 靖夫*, 青木 孝志**, 河合 吉文**

Attitude Control of a Link with a Free Joint Using an Active Link

Yasuo YOSHIDA*, Takashi AOKI** and Yoshifumi KAWAI**

(Received May 26, 1997)

This paper describes the attitude control of a link with a free joint using an active link. The active link is controlled by integral resolved-acceleration control. The model robot has the first link with a supported joint free to rotate and the second link with a revolute joint actuated by a servo motor. By actuating the active link, the position control and the sine wave trajectory control of the free link were analytically and experimentally performed. Experimental results suggest that the active link's inertia force might possibly to control the motion of the free link.

Keywords : Attitude Control, Free Joint, Active Link, Nonlinear Control

1. はじめに

クレーンの吊り荷揺れ防止などの運動制御に関して、運動体に質量を持つリンクを付加して制御する方法が考えられる。慣性力を利用して制御する方法^{(1),(2)}は、振動制御の分野では動吸振器として良く知られているが、運動制御に積極的に活用している実用例はあまり無いようである。ロボットの軌道制御における振動制御では、アクティブマスダンパーを使用したフレキシブルアームの軌道制御の研究⁽³⁾があり、運動制御では、宇宙ロボットのアーム運動の影響を考慮した姿勢制御シミュレーションの研究⁽⁴⁾がある。ここでは、上述のような目的で、回転自由な関節を有するリンク先端に能動リンクを取り付け、能動リンクを駆動させることにより自由関節リンクの姿勢を制御する実験とシミュレーションを行った。このモデルは、第1関節が回転支持、第2関節が駆動関節より成る水平形2リンク1関節ロボットであり、第2関節点の動きを制御量としている。能動リンクを積分形分解加速度制御(モデル追従サーボ系)^{(5),(6)}を用いて駆動させることに

より、自由リンクの位置決め制御及び正弦波軌道制御を試み、制御システムの有効性を検討すると共に、目標角度、駆動リンク先端の質量、制御ゲインをそれぞれ変化させ、それらの影響について調べた。

2. 理 論

2.1 モデル

図1に水平形2リンクロボットのモデルを示す。 l は長さ、 m は質量、 I は慣性モーメントを示す。質量と慣性モーメントは、図中の黒丸位置における値である。長さについての添数字は各リンクを、添字 g は各リンクの重心を表す。 l_1 部分を第1リンク、 l_2 部分を第2リンクとする。 l_3 部分は水平バランスを取るために設けたリンクである。 l_1 と l_3 の結合部は真直固着された回転自由な支持関節となっており、 l_1 と l_2 の結合部はサーボモータによる回転駆動関節で、それぞれ第1関節、第2関節とする。第1関節を原点として水平面に xy 座標をとり、第1リンクと x 軸とのなす角度を θ_1 、第2リンクとのなす角度を θ_2 、サーボモータのトルクを τ とする。

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

**工業物理学科 (Department of Engineering Physics)

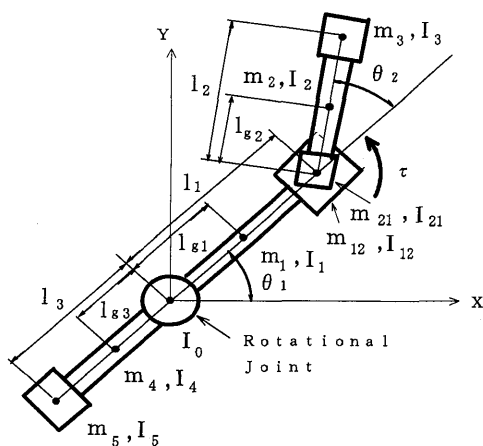


図1 モデル

2.2 運動方程式

摩擦を無視すると、ロボットの運動方程式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、

$$M_{11} = A + B + 2C \cos \theta_2$$

$$M_{12} = M_{21} = B + C \cos \theta_2$$

$$M_{22} = B$$

$$h_1 = -C \ddot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_1) \sin \theta_2$$

$$h_2 = C \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2$$

$$A = I_0 + I_1 + I_{12} + I_4 + I_5 + m_1 \ell_{g1}^2 + m_4 \ell_{g3}^2 + m_5 \ell_3^2 + (m_{12} + m_{21} + m_2 + m_3) \ell_1^2$$

$$B = I_{21} I_2 + I_3 + m_2 \ell_{g2}^2$$

$$C = (m_2 \ell_{g2} + m_3 \ell_2) \ell_1$$

M_{11} から M_{22} は質量マトリクス要素、 h_1 , h_2 はそれぞれコリオリ、遠心力ベクトル要素である。また、 A は関節2にリンク2を集合したときの関節1に関する全慣性モーメントを、 B はリンク2の関節2に関する慣性モーメントを、 C はリンク1とリンク2が互いに関係する慣性モーメントをそれぞれ表している。

2.3 制御方法

式(1)を角加速度について解くことができる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21}} \begin{bmatrix} -M_{22}h_1 - M_{12}(\tau - h_2) \\ M_{21}h_1 + M_{11}(\tau - h_2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

u を入力として、制御量 θ_1 に関して次の線形化システムを考える。

$$\ddot{\theta}_1 = u \quad (3)$$

式(2)より、式(4)の線形化補償器が得られる。

$$\tau = \left(M_{21} - \frac{M_{11}M_{22}}{M_{12}} \right) u - \frac{M_{22}}{M_{12}} h_1 + h_2 \quad (4)$$

制御量 θ_1 の目標軌道から角加速度目標値を求め、入力 u として式(4)に与えれば必要なトルク τ が得られるが、このような開ループ制御のみではモデル化誤差や外乱によって目標軌道から外れる恐れがある。ここでは、式(3)に対して離散化積分分解加速度制御⁷⁾による閉ループ制御を構成する。サンプリングタイムを T 、タイムステップを $k=0,1,2,\dots$ とし、次の変数を定める。

$$e_k = \theta_{1d,k} - \theta_{1,k}, \quad S_k = e_k - e_{k-1}, \quad x_k = \begin{bmatrix} e_k & S_k & \dot{S}_k \end{bmatrix}^T$$

$$\overline{u}_k = \ddot{\theta}_{1d,k} - u_k, \quad d_k = \overline{u}_k - \overline{u}_{k-1}$$

制御量 θ_1 と軌道 θ_{1d} との偏差 e に関する離散化状態式は次式となる。

$$x_{k+1} = p x_k + q d_k$$

$$y_k = c x_k = e_k \quad (5)$$

ここに、

$$p = \begin{bmatrix} 1 & 1 & T \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} 1/2 T^2 \\ 1/2 T^2 \\ T \end{bmatrix}, \quad c = [1 \quad 0 \quad 0]$$

評価関数 J を次式とする。

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (y_{k+1}^2 + w d_k^2) \quad (6)$$

w は入力に対する重み(ウェイト)である。評価関数 J を最小にするフィードバックゲイン G は次式で得られる。

$$d_k = G x_k$$

$$G = (w + q^T H q) q^T H p \quad (7)$$

H は次の離散形リカチ式の定常解である。

$$H_{k+1} = \dot{p}^T H_k \dot{p} - \dot{p}^T H_k q (w + q^T H_k q)^{-1} q^T H_k \dot{p} + W_x$$

$$H_0 = W_x = c^T c \quad \dots\dots\dots (8)$$

以上の式から、ゲインG及び入力 u_k を具体的に表すと次のようになる。

$$G = [K_0 \quad K_1 \quad K_2] \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$u_k = \ddot{u}_k + \ddot{\theta}_{1dk} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、

$$\ddot{u}_k = \ddot{u}_{k-1} + K_0 e_k + K_1 \dot{S}_k + K_2 \dot{S}_k$$

3. 実験

3.1 実験モデル

表1に実験モデルの諸元を示す。各リンクの長さは0.2mである。第2リンク先端の質量 m_3 は表1に示すように大きさが約0.4,0.2,0.1kgの3種類を用意し、それぞれMass-A,B,Cと名付けた。第1関節と第2関節の角度は、シンクロベルトと歯車を用いて、それぞれギア比5と2によって増幅した値をポテンシオメータにて計測した。A/D変換器によりパソコンに取りこんだ値を用いて制御トルクを計算し、D/A変換してサーボモータに与えた。用いたサンプリングタイムは50msである。

表1 実験モデルの諸元

Mass [kg]		Moment of Inertia [kg·m ²] × 10 ⁻³		Length [m]	
		I ₀	0.145	l ₁	0.2
m ₁	0.260	I ₁	0.585	l _{g1}	0.1
m ₁₂	0.528	I ₁₂	0.109	l ₂	0.2
m ₂₁	0.036	I ₂₁	10.4	l _{g2}	0.1
m ₂	0.087	I ₂	0.351	l ₃	0.2
m ₃ (Mass-A)	0.420	I ₃ (Mass-A)	0.101	l _{g3}	0.1
m ₃ (Mass-B)	0.222	I ₃ (Mass-B)	0.042		
m ₃ (Mass-C)	0.111	I ₃ (Mass-C)	0.010		
m ₄	0.364	I ₄	1.61		
m ₅	0.890	I ₅	0.319		

3.2 制御システム

図2に式(4)、(9)、(10)を元にした制御システムを示す。制御量 θ_k と軌道 θ_{1dk} との偏差 e_k 及びそのタイムステップ差 S_k とその微分にゲインGをかけ、式(10)のように軌道角加速度を加えて制御加速度 u_k を求める。これを用いて式(4)から制御トルク τ_k を求めるのであるが、この際、 M_{11} から M_{22} , h_1 , h_2 は式(1)のように非線形な係数であるので、各タイムステップ毎に計測値の θ_{1k} , θ_{2k} を使用して係数の値を更新する。表2に実験に用いたゲインの値を示す。サンプリングタイム50msを式(5)から(8)に適用した結果であり、ウェイトwの

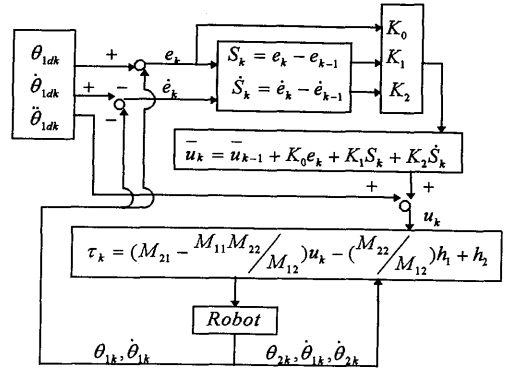


図2 制御システム

表2 ゲインの値

W	K ₀	K ₁	K ₂
0.001 (Gain-A)	20.59	97.41	13.96
0.1 (Gain-B)	2.591	26.10	7.225
10. (Gain-C)	0.2882	6.239	3.532

大きさを0.001,0.1,10の3種類を用意し、それぞれの場合のゲインをGain-A,B,Cと名付けた。

4. 実験結果

4.1 位置決め制御

目標角度を一定とした位置決め制御実験を行った。図3は、Mass-Aのモデルに対しGain-Bのゲインを用い、目標角度を30,60,90度の3種類としたときの実験結果である。計測は10秒間で、1秒経過後に制御をスタートさせた。実線が第1リンクの角度、破線が目標角である。図より、目標角が大きいくほど、オーバーシュートと整定時間が大きくなることが分かる。

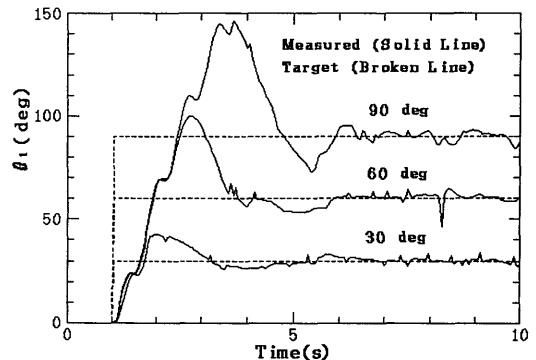


図3 位置決め制御実験結果 (Mass-A, Gain-B)

4.2 正弦波軌道制御

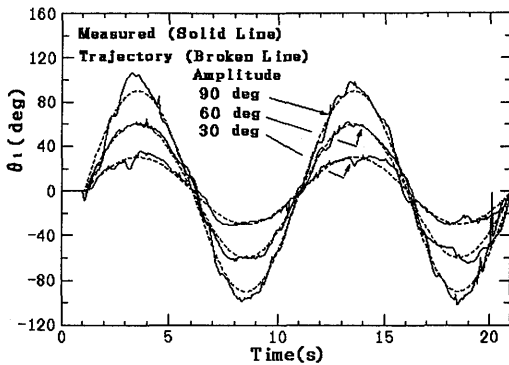


図4 正弦波軌道制御実験結果 (Mass-A, Gain-B)

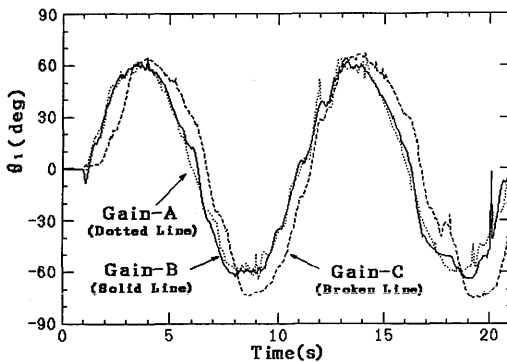


図5 正弦波軌道制御実験結果 (Mass-A, 振幅 60 度)

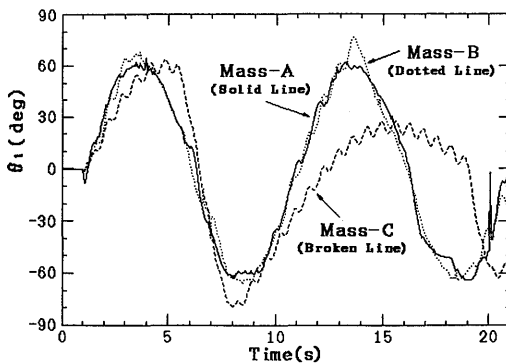


図6 正弦波軌道制御実験結果 (Gain-B, 振幅 60 度)

目標角度を正弦波とした軌道制御実験を行った。図4は、位置決め制御の場合と同様にMass-Aのモデルに対しGain-Bのゲインを用い、正弦波軌道振幅を30, 60, 90度の3種類としたときの実験結果である。正弦波軌道の周期は10秒であり、以降の実験も同様である。計測は21秒間で、1秒経過後に制御をスタートさせ、正

弦波軌道の2周期の20秒間まで制御した。実線が第1リンクの角度、破線が正弦波軌道である。実験結果は軌道を良く追従していると思われるが、位置決め制御の実験結果と同様に、軌道振幅が大きいほど軌道との差が生じており、その差は位相遅れではなく、振幅との差である。図5は、Mass-Aのモデルに対し正弦波軌道振幅を60度とし、ゲインをGain-A, B, Cの3種類としたときの実験結果である。表2に示すように、ゲインの値は点線のA、実線のB、破線のCの順に小さく成っている。図より、ゲインの値が小さいほど、軌道との差が生じており、その差は位相遅れであり、振幅はあまり差を生じていない。図6は、正弦波軌道振幅を60度及びゲインをGain-Bとし、第2リンク先端の質量をMass-A, B, Cの3種類としたときの実験結果である。表1に示すように、先端質量の大きさは実線のA、点線のB、破線のCの順に小さくなっている。図より、先端質量が小さいほど、軌道との差が生じており、その差は位相遅れと振幅差の両方である。特に最も小さな質量であるMass-Cの場合には、第1周期終了付近の10秒経過の後には、軌道との差が大きくなっている。

4.3 計算との比較

実験結果とシミュレーションとの比較を行った。シミュレーションは2変数操作のルンゲクッタ法を用いた。図7は、Mass-AのモデルでGain-Bのゲインを用い、正弦波軌道振幅が90度の追従制御を行った場合の比較である。実線が計測値、破線が計算値である。図より、第1リンクの角度 θ_1 は計測値と計算値が良く一致しているが、第2リンクの角度 θ_2 は計測値のほうが計算値よりかなり大きくなっており、しかもマイナス側に偏っていることが分かる。これは、角度 θ_1 は制御量として追従制御を行っているが、角度 θ_2 に関しては行って

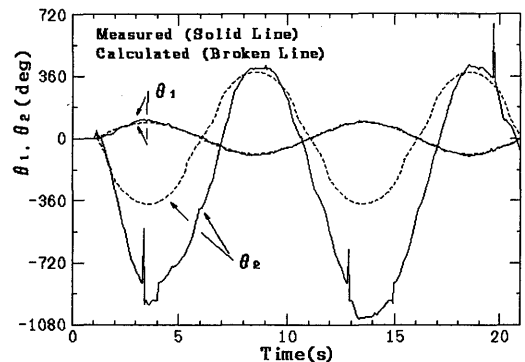


図7 計測値と実験値の比較

(Mass-A, Gain-B, 正弦波軌道振幅 90 度)

おらず、しかもサーボモータのクーロン摩擦や減速器のバックラッシュ（無負荷時最大2.7度）が影響しているものと思われる。制御トルク τ においても、角度 θ_2 と同様の傾向が見られた。

5. まとめ

回転自由なリンク先端に能動リンクを取り付けたモデルに関して、能動リンクを駆動させることにより回転自由なリンクの位置決めと正弦波軌道制御を行い次の結論を得た。

- (1) 実験及びシミュレーション結果より、積分形分解加速度制御を用いた制御システムが位置決めと軌道制御に有効であること、及び以下の傾向があることを明らかにした。
- (2) 位置決め制御実験から、目標角が大きくなるにつれてオーバーシュートと整定時間が大きくなった。
- (3) 正弦波軌道制御実験から、軌道振幅が大きいほど振幅差が大きくなった。また、制御ゲインの

値が小さいほど、軌道に対して位相遅れによる差が大きくなった。更に、能動リンク先端の質量が小さいほど、軌道に対して位相遅れと振幅差を生じた。

- (4) 以上から、運動体に質量を持つ能動リンクを付加しその慣性力を利用して制御する方法が可能であることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 吉田, 日本機械学会講演論文集 (MOVIC), (1995), 183.
- 2) 吉田, 青木, 河合, 中部大学工学部紀要, 32, (1996), 7.
- 3) 吉田, 日本機械学会論文集, 60—575, C (1994), 2310.
- 4) 山田, 計測自動制御学会論文集, 29—4, (1993), 447.
- 5) Lue, J.Y.S. et al., IEEE Trans. Autom. Control, Vol. AC-25, No. 3 (1980), 468.
- 6) Furuta, K. et al., J. Robotic Systems, Vol. 2, No. 1 (1985), 89.
- 7) 吉田, 中部大学工学部紀要, 30, (1994), 15.