研究

ロボットアームの高速位置決め*

—間欠運動の高速化に関する研究—

神谷好承** 横山恭男** 高野政晴***

Study on High-speed Intermittent Motion of Robot Arm

Yoshitsugu KAMIYA, Yasuo YOKOYAMA, Masaharu TAKANO

Industrial robots are used for supplying an automatic machine with some kinds of parts or for loading and unloading the works to the machine. In these cases, the robot arm moves intermittently. When the robot arm is driven at a high speed, positioning error at the settlement place (the cam-dwell mode) is generally drawn because of the residual vibration which is caused for the lack of stiffness. This paper deals with a method of reducing a residual vibration rapidly. It is realized by inserting a spring-mass-damper system between the driving system and the robot arm. Here, we define the optimal parameters on the combination of a spring, a damper, and a mass for the elastic support which has the steepest slope of the envelope curve of the residual damped vibration. After an analysis, the optimal parameters are given by $\beta=1$ and $\zeta_d=1/\sqrt{\alpha}$. Where, β ; ratio of the undamped natural frequencies of the elastic support and the robot arm, α ; ratio of the masses of the elastic support and the robot arm, and ζ_d ; damping ratio of the elastic support. Two practical examples of the elastic support are shown. One is a high speed positioning system of a robot arm driven by an indexing-cam mechanism and the other is the system of a robot arm driven by a pneumatic actuator.

1. 序 論

自動化技術の発展に伴い機構の高速化と、それに伴う精度の高い運動が要求されている。例えば自動機械の機械運動に注目した場合、ツールや部品の供給あるいは取出しに代表される間欠的運動が随所に採用されており、これらの高速化は重要な問題となっている。またその機器構成としては片持ちばりに代表される腕をある距離だけ移動させる、ごく簡単な間欠動作を繰返し行わせるものが多く用いられ、その高速位置決めが最も重要な問題とされている。

これら間欠運動機構を高速で駆動したとき、剛性の不足から、停止位置(dwell)で振動が残り、迅速な位置決めができない。また振動するアームの先端と不動点との間にダンパを取付けることは、ロボットアームが持つ作業性と機能から望ましくないことも少なくない。本研究では最も簡単なモデルとして片持ちばりに代表されるロボットアームをとり上げ、その高速位置決めに関して述

べる。

本研究はロボットアームの間欠運動の高速化として、いたずらにアームの剛性を上げること考えなくても高速化を可能にする一手段を提案している。それは負荷系と駆動系の間に振動系を挿入し、結果としてロボットアームを吸振支持することによりアームの残留振動を速やかに減衰させる方法である。今までにも残留振動に注目した研究として、dwellの位置でちょうど残留振動を0にする手法¹⁾、あるいは動吸振器により残留振動を減衰させる手法²⁾もあるが、本研究での吸振方法は、負荷の変動やカム立上がり時間の変化に対してその適用範囲をさらに大きくしたものであり、またその構成方法から特に片持ちばりをなすロボットアームの高速位置決めに適している。

ここでは、本研究で得られた理論の具体的な応用例を中心として、インデックスカム機構(ゼネバ機構も含む)により駆動されるロボットアームの高速位置決めと、空気圧シリンダにより駆動されストッパにより停止されるロボットアームの高速位置決めに関して述べる。

2. 理 論 解 析

2.1 吸振支持の構成方法とそのモデル

インデックスカム機構により駆動されるロボットアーム

* 原稿受付 昭和53年4月7日。昭和52年度精機学会春季大会学術講演会(昭和52年4月4日)および昭和53年度精機学会春季大会学術講演会(昭和53年3月31日)にて発表。

** 正 会 員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

*** 正 会 員 東京大学工学部(東京都文京区本郷7-3-1)

図1 インデックスカム機構により駆動されるロボットアームを吸振支持した具体例

ムを吸振支持した具体例とそのモデルを図1に示す。この方法は負荷系であるロボットアームと駆動系であるインデックスカム機構の間にばね・ダンパ・質量から成る振動系を挿入することで構成される。このように片持ちはりとしてのロボットアームを吸振支持することは吸振支持部のばねおよびダンパの形状が比較的自由に、かつ非常にコンパクトに設計することができる。また振動するアームの先端と不動点との間にダンパを取付ける必要がないためロボットアームの作業性および機能をそこなわない。

もう一つの例として、空気圧シリンダにより駆動され、ストップにより停止されるロボットアームを吸振支持した具体例とそのモデルを図2に示す。この方法は剛体で構成される従来のストップをばね・ダンパ系で構成し、かつ空気圧シリンダにより駆動されてきたロボットアームをばね・ダンパ系で構成した吸振支持ストップに当てることにより、衝突を緩和し、また衝突時のロボットアームの残留振動を速やかに減衰させるものである。なお吸振支持ストップの場合、位置決め精度を上げるためには、吸振支持ストップを置いて、さらに剛体ストップを置くという二段構えの構造を考えることができる。

インデックスカム機構により駆動されるロボットアームは、吸振支持部がロボットアームと共に回転するため、riseの区間においても、アームの振動減衰に効果を

図2 空気圧シリンダにより駆動され、ストップにより停止されるロボットアームを吸振支持した具体例

現すが、空気圧シリンダに代表されるアクチュエータにより駆動されるロボットアームについては、アームがストップに押付けられている間だけ、その振動減衰効果を現す。しかしいずれにしる dwell においてロボットアームの残留振動を速やかに減衰させることができる。

2.2 吸振支持による残留振動の減衰と最適パラメータ

吸振支持は駆動系と負荷系の間にばね・ダンパ・質量から成る振動系を挿入することで構成される。動吸振器により残留振動を減衰させた²⁾ときと同様、吸振支持による残留振動の減衰も、振動の減衰の程度は、dwellでの残留振動の包絡線の傾きで表される。すなわち吸振支持による振動減衰の効果としては残留振動の包絡線の傾きが急なものほどよい(図3(c)参照)。

図1(b)モデルの dwell での、あるいは図2(b)でロボットアームがピストンに働く空気圧によりストップに押付けられ反発しないときのロボットアームの運動方程式は、図3(b)より

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{x}_1 + K(x_1 - x_2) &= 0 \\ m_d\ddot{x}_2 + \lambda_d\dot{x}_2 + k_d x_2 + K(x_2 - x_1) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

また、この系の振動数方程式は

$$S^4 + 2\zeta_d \beta \Omega S^3 + \left(1 + \frac{1}{\alpha} + \beta^2\right) \Omega^2 S^2 + 2\zeta_d \beta \Omega^3 S + \beta^2 \Omega^4 = 0 \quad (2)$$

で表される。ただし $K/M = \Omega^2$, $k_d/m_d = \omega_d^2$, $m_d/M = \alpha$, $\omega_d/\Omega = \beta$, $\zeta_d = \lambda_d/(2\sqrt{m_d k_d})$ とした。ここで振動数方程式の4根を $-\eta_1 \pm j\Omega_1$, $-\eta_2 \pm j\Omega_2$, あるいは $-\eta_1 \pm j\Omega_1$, $-\eta_2$, $-\eta_3$ と仮定すれば ($j = \sqrt{-1}$), 式(1)の解は

$$x_{1,2} = e^{-\eta_1 t} (C_1 \cos \Omega_1 t + C_2 \sin \Omega_1 t) + e^{-\eta_2 t} (D_1 \cos \Omega_2 t + D_2 \sin \Omega_2 t) \quad (3 \cdot a)$$

あるいは

$$x_{1,2} = e^{-\eta_1 t} (C_1 \cos \Omega_1 t + C_2 \sin \Omega_1 t) + D_1 e^{-\eta_2 t} + D_2 e^{-\eta_3 t} \quad (3 \cdot b)$$

(C_1, C_2, D_1, D_2 はそれぞれ積分定数)

となる。式(3)から η_1, η_2 あるいは η_1, η_2, η_3 の値が上述の残留振動の包絡線の傾きを決定していることがわかる。しかも η_1 と η_2 の小さい方: $\eta_{\min} = \min[\eta_1, \eta_2]$ あるいは η_1, η_2, η_3 の最も小さい値: $\eta_{\min} = \min[\eta_1, \eta_2, \eta_3]$ の振動成分が残留振動の主成分になるため、吸振効果をよくするためには $\eta_{\min}$ を最も大きくするばね・ダンパおよび質量の大きさの組合せを決定しなければならない。これより $\eta_{\min}$ を最も大きくするばね・ダンパおよび質量の組合せを最適パラメータとする。

動吸振器での最適パラメータ²⁾を求めたのと同様な方法により吸振支持における最適パラメータを求める。4根を仮定したときの振動数方程式と式(2)の振動数方程式の係数を比較し、かつ最適パラメータが持つと思われる物理条件を考慮すると同時に、根の存在範囲を吟味することにより、最適パラメータとして、固有振動数比 $\beta=1$, 質量比と減衰比の関係 $\zeta_d = 1/\sqrt{\alpha}$ が得られる。またこの最適パラメータでの振動数方程式の根は

$$\eta_{\text{opt}} = \eta_1 = \eta_2 = \frac{\zeta_d \Omega}{2} \quad (4)$$

(根の実数部分)

$$\Omega_{\text{opt}} = \Omega_1 = \Omega_2 = \sqrt{1 - \frac{1}{4\alpha}} \Omega \quad (5)$$

(根の虚数部分)

のように複素重根である。ただし最適パラメータとしてこのように複素重根をもつことができるのは式(5)から $\alpha \geq 0.25$ の場合に限られる。

最適パラメータが複素重根をもつ場合として与えられるとき、その最適パラメ

(a) 間欠運動機構の動力学モデル

(b) 吸振支持の機構モデル

(c) 系の運動と残留振動

$$\Omega^2 = \frac{K}{M}, \quad \omega_d^2 = \frac{k_d}{m_d}, \quad \alpha = \frac{m_d}{M}, \quad \beta = \frac{\omega_d}{\Omega}, \quad \zeta_d = \frac{\lambda_d}{2\sqrt{m_d k_d}}$$

図3 ロボットアーム機構の動力学モデルとその運動

(a) 最適パラメータが複素重根をもつ場合として与えられるとき (質量比1のとき)

(b) 最適パラメータが複素重根をもつ場合として与えられないとき (質量比0.2のとき)

図4 吸振効果に及ぼす減衰比と固有振動数比の関係

ロボットアーム (りん青銅): 質量 206 g, 長さ 280 mm, 幅 36 mm, 厚さ 3 mm

M, m_a の慣性モーメント: $8.67 \times 10^4 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$

M と K, m_a と k_a による固有振動数: 26.5 Hz

$\lambda_d = 2.9 \times 10^7 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$

図5 ゼネバ機構により駆動されるロボットアームの実験装置

ータは $\beta=1$, $\zeta_d=1/\sqrt{\alpha}$ で与えられる。図4(a)に $\alpha=1.0$ (最適パラメータが複素重根をもつ場合として与えられるときの一例) のときの最適パラメータと最適パラメータ付近の $\eta_{\min}$ の様子を示す。図4(b)に $\alpha=0.2$ (最適パラメータが複素重根をもつ場合として与えられないときの一例) のときの最適パラメータと最適パラメータ付近の $\eta_{\min}$ の様子を示す。どちらも減衰比 ζ_d と振動数比 β 面上で $\eta_{\min}$ がピークとなる値の組合せが最適パラメータである。なお $\eta_{\min}$ のピーク値は $\alpha=0.25$ のときが最も高く、他はそれよりすべて低い。

図3(b)のモデルで、ばね K と並列にダンピング λ (このダンピングは系が自然にもつ小さな量である) があるとき最適パラメータは、同一質量比に対して、減衰比は少し高く、固有振動数比は少し低くなる。しかし系の残留振動の減衰はほぼ吸振支持の吸振効果により決まる。

一方、質量比 α が小さいほど、その時の最適パラメータに用いるばね定数は小さくなり、結局最適パラメータにおいて $\alpha/(1+\alpha)$ だ

け吸振支持を含めた系全体が外力に対してたわみやすくなる。従って、質量比 α はあまり小さくしない方がよく、この点から、少なくとも $\alpha \geq 0.25$ (最適パラメータが複素重根をもつ場合として与えられる範囲) なる質量比を設定すべきであるように思われる。

3. 実験装置および実験結果

3.1 インデックスカム機構により駆動されるロボットアームでの実験

減速機付きモータにより駆動されるゼネバ機構 (割出

図6 ゼネバ機構により駆動されるロボットアームでの実験結果

ロボットアーム (りん青銅): 質量 348 g, 長さ 250 mm, 幅 34 mm, 厚さ 3 mm
 M の慣性モーメント: $1.2 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$
 m_d の慣性モーメント: $3.4 \times 10^4 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$
 M と K , m_d と k_d による固有振動数: 27 Hz
 $k_d = 3.45 \text{ kg/mm}$, $\lambda_d/m = 628 \text{ s}^{-1}$

図 7 空気圧シリンダにより駆動され、ストッパにより停止されるロボットアームの実験装置

し数: 6) を間欠運動機構として用い、ロボットアーム状片持ちばりを吸振支持し実験を行った。図 5 に外形を示す。質量比 (慣性モーメント比) α を 1 としたため、最適パラメータとして減衰比 $\zeta_d = 1.0$, 固有振動数比 $\beta = 1.0$ を目標とし装置の設定を行った。ロボットアームの固有振動数は約 26.5 Hz であった。ばねとしては板ばねを、ダンパとしてはシリコンオイルによる油膜減衰器を用いた。図 6 に実験結果として、吸振支持したときと、しなかったときのアーム先端の加速度波形を示す。吸振支持を最適パラメータに設定した場合、ロボットアームに減衰がなくても理論的には減衰比 0.5 が得られる。しかし実際にはわずかながらロボットアーム自身に減衰があるため、ロボットアームの減衰を含めた最適パラメータは前述のものと少し異なるが、波形から見て全体的には理論値に近い減衰振動を示していることがわかった。rise 区間中での加速度のピーク値は吸振支持しても、しなくてもほぼ同じであるが、dwell 区間中での残留振動は吸振支持したときの方が非常に小さい。なおカム立上がり時間を変化させても加速度の絶対値が異なるだけで、すべて相似な波形であった。実験結果に示されているように、rise 区間の加速度波形において、加速度が正の間 (加速時) は大きな加速度値を示さないが、正から負になった時 (減速時) に非常に大きな加速度ピーク値を生じ、その振動が dwell になっても残っている。これは動吸振器により残留振動を減衰させたときに得た実験結果²⁾ と同じ性質であり、これは入力軸減速機のバックラッシュが原因となって起こるものである。

3.2 空気圧シリンダにより駆動され、ストッパにより停止されるロボットアームでの実験

図 8 空気圧シリンダにより駆動され、ストッパにより停止されるロボットアームでの実験結果 (dwell での残留振動)

空気圧シリンダにより駆動されるロボットアームのストッパをばね・ダンパ系で構成し、実験を行った。図 7 に外形とストッパ部分を拡大したものを示す。質量比 (慣性モーメント比) α を 0.25 としたため、最適パラメータとして減衰比 $\zeta_d = 2.0$, 固有振動数比 $\beta = 1.0$ を目標としたストッパの設定を行った。ロボットアームの固有振動数は約 27 Hz であった。ばねとしては圧縮コイルばねを、ダンパにはピストン式減衰器を用いた。吸振支持ストッパのばねに及ぼす空気ばねの影響はわずかであった。図 8 に実験結果として、ロボットアームが剛体ストッパに衝突したときと、吸振支持ストッパに衝突したときの、アーム先端の残留振動 (加速度) を示す。吸振支持ストッパを最適パラメータに設定した場合、ロボットアームに減衰がなくても理論的には減衰比 1 が得られるはずであるが、図 4 に示すように吸振支持を最適パラメータに設定することは非常にむずかしく (特に $\alpha = 0.25$ のときは最適パラメータでの減衰比がピークをなしてい

図9 ゼネバ機構による位置決め時間

る), この実験ではほぼ減衰比 0.6 程度までしか得られなかった。しかも吸振支持ストップの場合, ストップへの衝突現象は避けられないため, 理論通りの波形は得にくい, 実験結果にも示されているようにロボットアームの振動減衰は非常に速い。また空気圧シリンダのピストンに働く固体摩擦のため, 減衰しきれない残留振動成分があることもわかった。なおロボットアームがストップへの衝突現象を含むため, ダンパの大きさは最適なもののより小さいものの方がよい実験結果を示した。

一般に空気圧シリンダはピストンの目標位置直前でクッション作用を行わせ, 剛体ストップにゆっくり衝突させているものがほとんどであるが, 本研究の吸振支持ストップをあわせ用いればより高速かつより信頼性の高いロボットアームの運動が期待できる。

4. 考 察

位置決めの際の許容振動振幅を A_p (全リフト量 h に対する割合) とすると, 残留振動初期値 $A_1 h$ が減衰して $A_p h$ に対するまでの時間, すなわち減衰時間 $t_a = \tau_a$ ($2\pi/\Omega_0$), ($\Omega_0 = t_c/\Omega$) は次の式から求められる。

$$\tau_a = \frac{1}{2\pi\zeta} \ln \frac{A_1}{A_p} \quad (6)$$

したがって位置決め時間 $t_p = \tau_p(2\pi/\Omega_0)$ は $\tau_p = A + \tau_a$, ($A = t_c/(2\pi/\Omega)$) から求められる。図9に吸振支持したときと, しなかったときの位置決め時間を示す。これらの曲線より上の部分がそれぞれ許容振幅 A_p 以内に収束する範囲である。 $\tau_p = A$ は立上がり終了時点を表すので $\tau_p = 0$ からこの直線までがカム立上がり時間, この直線から上が残留振動の減衰時間となる。

また本研究がロボットアームを対象とする

とき, アームがつかむワークの重量により, 固有振動数などの系のパラメータが大きく変化することが考えられる。ただし本研究で扱っている簡単なロボットにおいては, そのアームの長さは変化しないものとする。ワーク: ΔM により, アームに加わる付加質量を $\gamma = \Delta M/M$ で定義すれば, 質量比は $\alpha/(1+\gamma)$, 固有振動数比は $\beta/\sqrt{1+\gamma}$ に変化する。従ってこのとき吸振支持に用いる最適パラメータも変化する。この観点から図4の最適パラメータ付近の $\eta_{\min}$ の様子を見ると, 十分な吸振効果を期待できる範囲は非常に限定された範囲であることがわかる。こうした吸振支持において減衰比 0.3 以上を得れば, 一応残留振動の減衰が期待できるものとし, ここでは最適パラメータ領域を $0.3 \leq \eta_{\min}/\Omega$ と定義する。そして系のパラメータが変化しても吸振支持が最適パラメータ領域を維持できるばね, ダンパの組合せを考える。図10に一例として質量比 $\alpha=0.7$ のときを基準 ($\gamma=0$) に考え, $\alpha=0.7$ ($\gamma=0$), $\alpha=0.525$ ($\gamma=1/3$), $\alpha=0.469$ ($\gamma=1/2$) におけるおのおのの最適パラメータ領域を示す。

結論として図10に示されている最適領域の共通領域は付加質量 γ の変化 ($0 \leq \gamma \leq 1/2$) が起こっても, なお最適パラメータを維持できる吸振支持部のばねとダンパの組合せである。また別の観点からこの最適パラメータ領域を見れば, 吸振支持部に用いるばねとダンパの設定値に対する許容範囲を与えるのものであるともみなせる。

5. 結 論

吸振支持により, 片持ちはりなすロボットアームの残留振動を速く減衰できることを二つの具体例をもって示した。その結果を次に列挙する。

- (1) インデックスカム機構により駆動されるロボットアームを吸振支持することは, ロボットアームの作業性と機能をそこなうことなくアームの残留振動を減衰することができる。

図10 付加質量に伴う最適パラメータ領域

- (2) 空気圧シリンダにより駆動されるロボットアームを吸振支持ストッパにより停止させることは、アームをストッパにソフトに衝突させるため、残留振動の発生も小さく、かつアームの残留振動を速く減衰させることができる。この吸振支持ストッパは従来の剛体ストッパの持つ欠点を改良したものとみることができる。
- (3) 吸振支持に用いるばね、ダンパおよび質量の組合せに対する最適パラメータを得た。質量比が小さいほど、吸振支持を含めた系全体が外力に対してたわみやすくなるため、最適パラメータが複素重根をもつ場合として与えられる範囲の質量比を選ぶべきである。
- (4) ロボットアームを対象とするとき、アームの付加質量により最適パラメータが変化する。従って新たに最適パラメータ領域を定義し、付加質量が変動しても最適パラメータを保持できる限界を明らかにした。
- (5) 本研究では、共に回転運動系による具体例であったが、直線運動系に対しても全く同様にあてはめて

考えることができる。

本研究で扱った吸振支持は最適パラメータに設定して用いるのが一番効果的であるが、ロボットアームのような場合は、付加質量が作業に応じて常に変動することが考えられる。このとき当然最適パラメータも変動する。こうしたとき、今後の問題として、より大きな効果とフレキシビリティを持たせるために、ロボットアームの状態を推定し、その推定値に基づいてパラメータを変化させ、常に最もよい吸振効果を発揮させるようにすべきである。

終わりに、本研究を行うにあたり御助言をいただいた金沢大学・岡部佐規一助教授ならびに実験に協力された野村久直氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 板生 清：ポリダイナミクスによるタイプヘッドの高速度位置決め，精密機械，**37**，3 (1971) 204. ほか。
- 2) 神谷好承，高野政晴：間欠運動の高速度に関する研究——動吸振器による残留振動の減衰，精密機械，**43**，9 (1977) 1075.

情 報

(p. 141 より続く)

(3) 流通・消費関連技術＝前年度と同様に大幅増加を示し、甲種、乙種を合わせ導入件数の 35.2% を占めた。増加の目立つのは、家庭電化製品の 145 件 (278.8%) 増、雑貨・家具・化粧品の 39 件 (33.3%) 増などである。なかでも家庭電化製品が急増したのは、同製品に同一技術の導入件数が多かったことによる。

(4) 電子計算機関連の技術＝52 年度は 105 件で、前年度比 36 件も減った。うちハードウェア技術は 22 件で前年度より増加したが、ソフトウェア技術は 83 件で前年度に比べ約 2/3 も激減している。ソフトウェア技術では構造物強度解析関係のプログラムの件数が多いが、地震探鉱ソフトウェアなど新しい分野のソフトウェア技術も導入されている。一方、ハードウェア技術では周辺装置関連技術が多いものの、マイクロプロセッサ関連技術も目立っている。

(5) エネルギー開発関連技術＝原子力関連技術の増加が最も顕著であり、化石資源関連技術は横ばい傾向、自然エネルギー関連技術は微増傾向を示している。原子力関連技術の内訳は原力炉技術が 60%、核燃料製造技術が 25%、廃棄物処理技術が 15% 程度である。

また乙種技術が甲種技術に比べ導入件数が多いことが原子力関連技術の特徴である。

化石資源関連技術の内訳は探査・掘削技術が約半数を占め、残りを輸送・貯蔵技術および加工処理技術が分け合っている。

なかでも、ここ数年、海底油田開発技術、石油備蓄技術などの増加が目立つ。また自然エネルギー関連技術は研究開発中で、実用化段階に至らないものが多く、導入件数が少ない。技術内容は太陽エネルギーの利用に関するものが大部分である。

(p. 193 へ続く)