〔解 説〕

建設用ロングアーム作業機の振動抑制制御

本 間 和 男** 中 島 吉 男**
 広 島 実** 稲 満 広 志***

1. は じ め に

土木、建設業界では、建設作業、保守点検作業等の省力化、安全化、高効率化が急務となっており、既に各種機械が開発されている。クレーンに関しては、鉄筋の配筋や建設中の建屋内への資材の搬入などの各種建設作業に対応できる「ロングアームマニピュレータ」を搭載した移動式作業機が望まれている。

このようなロングアームマニピュレータにおいて、従来の産業用ロボットの設計思想である剛性設計を適用すると、全体重量が膨大となり、移動式作業機械として成り立たなくなる。一方、強度を優先した軽量化設計を行うと、アームが柔構造となり、アームのたわみと振動による位置決め精度の悪化が問題となる。従って、それを解決するための振動抑制が必要となる。

そこで、軽量高剛性化設計技術、及び柔構造ロングアームの制御技術を開発し、軽量、低振動で、かつ分解運動速度制御の機能を有する操作性の良いロングアームマニピュレータを備えた移動式作業機を実現した。

以下、建設用ロングアーム作業機とその振動抑制制御について述べる。

2. 移動式作業機の概要

図 1、写真 1 にロングアームマニピュレータを備えた移動式

写真 1 移動式作業機の外観

原稿受領 1988 年 8 月 16 日

* Vibration Damping Control of Construction Machine with Long Arm Manipulator

** (株)日立製作所機械研究所

*** 日立建機(株)FAI 工場部

式作業機を示す。この作業機は 4 関節アームと旋回機構、及びクローラ式移動機構からなっており、障害物の回り込み作業や地下下での作業が可能であり、動作範囲が非常に広がっている。さらに、アームの収納性がよいので、走行体としてトラックを使用することも可能である。

3. 振動抑制制御システム

3.1 実験装置の概要

建設用ロングアーム作業機の開発に当たり、初めにコンクリートデストリビュータを改造した 3 関節の実験機を用いて基礎的な実験検討を行った。

図 2 に実験装置の全体システムの概要を示す。この実験機は、第 1 アーム、第 2 アーム、第 3 アームとそれらを駆動する油圧シリンダから構成されており、アーム全長は約 16m である。油圧回路は、油圧制御弁としてサーボ弁を用い、油圧シリンダの両ポートにはパイロットチェック弁を備えている。

コントロールユニットには操作レバーからの速度指令入力信号、油圧回路の圧力信号、各アームの相対角度信号、アーム先端の加速度信号などが入力され、コントロールユニットでは、それらの信号を処理して、チェック弁の切り換え信号とサーボ弁の電流信号を出力する。

又、各アームの主要部分には、応力測定を目的として、歪ゲージが貼られている。

運転席	2人
先端荷重	450kg
アーム全長	18m
先端速度	1.5m/s
位置精度	±50mm
軌跡精度	±100mm

図 1 移動式作業機

3.2 振動抑制の方式

ロングアームマニピュレータの振動を抑制するためには、次に示す3種類の制御が必要である。

- (1) 圧力マッチング制御：アーム起動時、パイロットチェック弁の前後の圧力を一致させる制御。
- (2) 緩起動、緩停止制御：アームの起動、停止時に過大な操作加速度の入力を阻止する制御。
- (3) 振動抑制制御：外乱等、なんらかの原因で振動が生じたならば、速やかに振動を減衰させる制御。

3.2.1 圧力マッチング制御

操作レバーから、油圧シリンダを駆動する入力信号がコントロールユニットに入ると、パイロットチェック弁を開くと共にサーボ弁に電流信号を出力するが、そのとき、パイロットチェック弁の前後に大きな圧力差があると高圧側から低圧側に油が流れることによる切り換えショックがでて、アームが振動する。そこで、チェック弁が閉じた状態でシリンダのロッド側圧力 P_r とヘッド側圧力 P_h を検出し、サーボ弁の両ポート圧力を制御して、チェック弁前後の圧力差によるシリンダ推力の差を極力小さくした後、チェック弁を開く。その制御内容をブロック線図で表すと図3になる。なお、チェック弁の開閉は切り換え弁動作のむだ時間も考慮して行っている。

3.2.3 緩起動、緩停止制御

乱暴に操作レバーを動かした場合、その操作量に比例してサーボ弁の電流を増減すると、油圧シリンダが急加速、または急減速して、アームに大きな振動が発生する。そのようなときでも、アクチュエータの加速及び減速時に生ずる最大加速度及び最大減速度を制限してやれば、ショックなくスムーズに加減速できる。その方法を次に示す。

アクチュエータに対応したそれぞれのサーボ弁について

図2 全体制御システムの概念図

て、単位時間当たりの電流増分量の最大値 $\Delta i_{\max}$ を決めておき、操作レバーが急激に操作された時には、電流増分量の最大値 $\Delta i_{\max}$ で操作し、ゆるやかなレバー操作のときには、そのレバー操作速度に対応してサーボ弁の電流値を増減する。

3.2.4 振動抑制制御

アームの減衰特性の改善策としては、油圧回路に絞り等の抵抗を挿入する方法や、アーム先端の加速度をフィードバックする方法、アームに多数の歪ゲージを貼り、応力の分布を検出してフィードバックする方法などが考えられる。しかし、第一の方法は、油圧回路の変更による回路効率の低下があり、得策ではない。第二の方法は、各アーム間の干渉に対する補償などが必要になり、制御が難しくなる。又、第三の方法は、歪ゲージの信頼性、制御の複雑さなどが問題となる。

一方、アームが振動することによって油圧シリンダに外力が加わり、その反力によって油圧シリンダ内の圧力が振動する。この変動圧力は加速度とほぼ同等の挙動を示す。従って、油圧シリンダ内の圧力をフィードバックすればアームの減衰特性が改善される。但し、油圧シリンダ内の圧力をそのままフィードバックしたのではアームの剛性が低下するため、圧力の変動分のみ抽出してフィードバックする必要がある。

そこで、油圧シリンダ内の圧力に基づいて、油圧シリンダに加わっている変動外力を演算し、その外力が小さくなるように制御して減衰特性を改善する。図4にそのブロック線図を示す。同図におけるフィルタは変動圧力のみを抽出するためのハイパスフィルタである。

3.3 実験結果

図5に緩起動、緩停止制御の特性を示す。3本のアームを一直線にし、最大加速度及び減速度の制限値 $\alpha_{\max}$

図3 圧力マッチング制御のブロック線図

図4 振動抑制制御のブロック線図

図5 緩起動, 緩停止制御の特性

を種々変えて第1アームを操作したときの, 第3アーム先端の加速度のピーク値を測定したものである。

図5から, 制限値 $\alpha_{\max}$ を小さくすれば, 当然, 加速度ピーク値が小さくなるのが分かる。但し, 制限値 $\alpha_{\max}$ をあまり小さくすると, 起動, 停止が緩慢になり, 操作性が悪くなる。そこで, 実験により, 操作性を損なわない程度の値, 約 160 cm/s^2 (図中矢印) に決めた。この値を用いると, 3本のアームを一直線にした最大速度での下げ動作中に, 急激にレバーを戻した時点から約 0.7 秒後に, アーム先端が約 38cm 下がって停止することになるが, 位置決め等に特別問題は生じなかった。

図6, 7に振動抑制が無い場合とある場合の実験結果の一例を示す。両図は3本のアームを一直線にし, 第1シリンダを駆動してアームを下げた場合の起動と停止時における各部の挙動を示したものである。その結果, 制御が無い場合は起動, 停止時とも大きな加速度ピークが生じると共に, 非常に振動の減衰が悪いが, 制御がある場合は加速度ピークが小さく, 振動が速やかに減衰していることが分かる。振動抑制を行うことにより, 振動抑制制御が無い場合に比べ, 減衰係数比を 0.06 から 0.31

図6 振動抑制が無い場合の実験結果

図7 振動抑制がある場合の実験結果 (アーム系)

まで高めることが出来た。

なお, 振動抑制制御は各アームそれぞれ独立に構成したが, アーム間の干渉は特に観察されず, あらゆるアーム姿勢において, 良好な制御性能を示した。

図8に振動抑制制御を行った場合と行わない場合のアーム最大応力の比較を示す。振動抑制制御を行うことにより, 振動応力の最大値が約 1/3 に減少することが確認された。

4. 分解運動速度制御

4.1 制御方式

多関節マニピュレータを操縦する場合, レバー操作量と関節速度が対応するように構成すると, アーム先端の運動が円弧軌跡となるため, 操作性に問題があり, 関節数が多ければ多いほど操作が難しくなる。そこで, ロングアーム作業機では分解運動速度制御を用いることにした。

分解運動速度制御とは, レバー操作量 V_x, V_y, ϕ が

図8 振動抑制による振動応力の減少 (実験値)

第4アーム先端の動作速度の直交成分及び第4アーム姿勢角速度にそれぞれ対応するように第2～第4シリンダの速度を制御するものである。なお、第1アームは半固定とし、第1アームの姿勢を変えたときでもレバー操作量と第4アーム先端の動作が対応するように構成した。

図9に分解運動速度制御の機能ブロック線図を示す。レバー操作量 V_x, V_y, ϕ とその時点での関節角度 θ_0 から逆座標変換演算により、各関節の目標角度 θ_r と目標角速度 $\dot{\theta}_r$ を求め、関節角度をサーボ制御する。サーボ制御部ではフィードバック制御とフィードフォワード制御を併用している。なお、各シリンダ間で流量のアンバランスがある場合にはサーボ弁の流量が飽和しアーム先端の運動軌跡精度が悪化することがある。そこで、入力速度指令値からサーボ弁流量を演算し、もし演算結果が許容値を越えたならば、分解運動速度の比を維持したままで、すべてのサーボ弁流量が飽和しないように再び入力値を演算しなおす制御（サーボ弁流量飽和防止制御）を導入した。

4.2 実験結果

図10に実験結果の一例（水平動作）を示す。その結果、ストローク約8mに対して、移動平均速度約40cm/sで軌道精度15cm (p-p)を達成した。

5. おわりに

建設作業のロボット化を進めるためには、移動機能を備えたロングアームマニピュレータが不可欠であると考えて、今回の開発を行った。振動の抑制に関しては、各アームの先端加速度を検出してアーム間の干渉を補償する試みも行ってみたが、高次の振動モードの干渉まで除去することが困難であり、結局、シリンダ内圧の振動成分をフィードバックするという最も古典的な方法を採用

することになった。そして、この方法があらゆるアーム姿勢に対して優れた制御性能を示し、かつ信頼性も高いことを再確認する結果となった。

本稿が読者諸兄の参考になれば幸いである。

図9 分解運動速度制御の機能ブロック線図

図10 分解運動速度制御の実験結果の一例（振動抑制、流量飽和防止有）

参考文献

- 1) 森 他, “我社におけるロボットの適用事例”, ロボット, No.38, pp.62-68 (昭58-11).
- 2) 中島 他, “ロングアームマニピュレータの制御”, 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.309-310 (昭62-11).
- 3) 中島 他, “ロングアームマニピュレータの開発”, 第4回知能移動ロボットシンポジウム講演予稿集, pp.187-192 (昭63-6).

本間和男 (Kazuo HONMA)

昭和36年山形県立鶴岡工高卒。同年(株)日立製作所入社。油圧制御の研究開発を経て、現在、同社機械研究所にて、原子力、宇宙、建設、クリーンルーム等の特殊環境ロボットの研究開発に従事。所属学会：日本ロボット学会、日本機械学会、日本油空

圧学会。

中島吉男 (Kichio NAKAJIMA)

昭和44年、群馬県立伊勢崎工高機械科卒業。同年(株)日立製作所機械研究所入所。建設機械の自動化、ロボット、マニピュレータの研究開発に従事。所属学会：日本ロボット学会、日本機械学会。

広島 実

(Minoru HIROSHIMA)

昭和46年金沢大学工学部機械工学科卒業。同年(株)日立製作所機械研究所入所。構造解析、建造物の強度と最適化及び多点加振制御システムを用いた信頼性評価の研究に従事。日本機械学会、ターボ機械協会会員。

稲満広志 (Hiroshi INAMITSU)

昭和45年九州大学工学部採鉱学科卒業。同年、日立建機(株)入社。現在FA事業部開発設計部主任技師。建設機械、水処理装置、超音波検査装置、ロボットの開発に従事。