コンクリート圧送用多関節柔軟アームの振動抑制*

(第1報, DVFBを用いた振動抑制)

布原達也^{*1}, 室津義定^{*2}, 泉田 啓^{*2}

Vibration Suppression of a Flexible Concrete Distributor Arm (1st Report, Vibration Suppression Using DVFB)

Tatsuya NUNOHARA, Yoshisada MUROTSU and Kei SENDA

This paper is concerned with vibration suppression of a flexible concrete distributor arm. The concrete distributor arm with length of over 30 m is modeled as a multi-link flexible arm by using FEM (Finite Element Method) together with a singular value decomposition for reduction of mathematical model. DVFB (Direct Velocity Feedback) is applied to the control of a joint torque for suppressing the vibration. A hardware test model is set up to simulate the actual system. The vibration of the flexible multi-link arm is successfully suppressed in the hardware test. Farther, it is shown that the results by using the mathematical model are in close agreement with those of the hardware model.

Key Words: Vibration suppression, Construction Machinery, DVFB, Flexible Arm, Concrete Distributor Arm

1. 緒 言

近年のコンクリートの打設現場において、コンクリートポンプはその作業工法上で、不可欠なものとなっている。生コンをポンプより打設現場へ移送するディストリビュータアームは全長30mに達する長尺アームで、アームに沿って生コン圧送用の配管が取り付けられ、さらに様々な現場に対応するため、図1のように3～4関節を持つ多関節構造となっている。また、重量上の制約から低剛性とならざるをえず、その共振周波数は0.3～0.5 Hzである。これは多くの場合、生コン圧送時に発生するコンクリート圧送ポンプの脈動周波数と一致し、共振による過大な振動を引き起こす。通常のコンクリート打設作業では、アームの先端にゴム製のデリバリーホースを取り付け、これらの振動を逃がして作業する。しかしアームの振動が過大になると取り付けられたデリバリーホースの暴れにより、付近の施工途中のコンクリート配筋を損傷したり、ホース先端

を作業者が抱えて生コンを排出操作するために、作業者への負担が増大するなどの問題が発生する。よって、このアームの振動を抑制することは建設作業の安全上重要な事項である。さらに、共振はアームの強度面においても過大な応力の主原因となるので、アーム自体の疲労寿命の面からも避けることのできない問題である。現在は機械を操作する作業者が、アームの揺れを見ながら、共振点を避けるようにポンプの回転数を調整して作業しているが、作業者への負担の大きさから、確実な共振点回避の操作が期待できないことなどから、揺れない（共振しない）アームが望まれている。本論文ではこのような背景のもとに、第一報として、ディストリビュータアームの振動特性を調べ、これを改善するため、DVFB制御を採用したときの振動抑制効果を数値シミュレーションで確認する。また、これを検証するために、実機を模擬した試験装置による実験結果を報告する。

2. ディストリビュータアームのモデル

コンクリート圧送用ディストリビュータアームは、図1のように複数の鋼製の梁が回転軸により結合され、

* 原稿受付 1997年7月15日。

^{*1} 正員、極東開発工業(株) (☎663-8113 西宮市甲子園口6-1-45)。

^{*2} 正員、大阪府立大学工学部 (☎599-8531 堺市学園町1-1)。

Fig. 1 Photograph of Concrete Distributor Arm

それぞれが油圧シリンダによりその回転を拘束された構造となっている。そこでこのようなアームのモデルとして、図2のような片持ち梁を考える。各梁は一樣断面とし、各関節は回転ジョイントで結合され、バネで支持されているものとする。このバネは油圧シリンダ内の油の圧縮性に相当する。

Fig. 2 Four-link Flexible Arm Model

このようなモデルの運動方程式は、FEM手法等を用いて下記のようなマトリクス形式の運動方程式で表すことができる。(1)

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u = f \quad (1)$$

ここで M は質量マトリクス、 K は剛性マトリクス、 u は対応する変位ベクトル、 f は外力ベクトル、また C は減衰マトリクスを表し、以後の計算の簡便化のため比例減衰と仮定する。式 (1) はこの仮定により固有値解析によるモード展開が可能となり、また減衰項も実験的に各振動モードごとのモード減衰として扱うことができる。 M, K を固有値解析して得られたモードマトリクスを Φ とし、モード変数 q を用い、 $u = \Phi \cdot q$ の変数変換を式 (1) に施して下式の非連成化された振動方程式を得る。(2)

$$\ddot{q} + \Gamma \cdot \dot{q} + \Lambda \cdot q = \Phi^T \cdot f \quad (2)$$

ただし

$$\Lambda = \text{diag} [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] \quad (3)$$

$$\Gamma = \text{diag} [2 \cdot \zeta_1 \cdot \omega_1, 2 \cdot \zeta_2 \cdot \omega_2, \dots, 2 \cdot \zeta_n \cdot \omega_n] \quad (4)$$

λ_n : n 番目の固有値

$$\omega_n^2 = -\lambda_n$$

ζ_n : n 次のモード減衰比で、実機による実験より得る。

得られたモデルの信頼性を確認するため、図3に本論文で使用する数学モデルと実験で得た実機アームの周波数応答の実測値を示す。数学モデルは計算の簡略化のため、低次4次のモードまで採用する。それぞれのアームは全て水平状態であり、応答はアーム先端への加振力から同じ位置の加速度への伝達特性をあらわす。両者は良い一致を示し、数学モデルが妥当であることが分かる。

Fig. 3 Accelerance of Actual Arm and Mathematical Model

3. 実機のアーム加振源

実機における、コンクリート打設時のディストリビュータアームへの加振動作を考える。アームの振動は、コンクリートポンプより圧送された生コンがアームに沿って取り付けられた配管内を流れるとき、ポンプの特性により流速が周期的に変化することによって起こる。一般にコンクリートポンプは二本の一定容量のピストンポンプにより構成され、この二本のポンプが交互に生コンの吸入と、吐出を繰り返すことにより作動する。配管内の生コンの流速変化は二本のポンプの生コンの吐出と吸入が切り替わるときに、一時的に全体の吐出スピードが0となることに起因する。図4にこのような示すが、生コンの吐出量が大きいほど、これに起因する加振力が大きく、かつその周期が短くなることがわかる。

Fig. 4 Concrete Flow Speed

次に生コンの流体力がアームに及ぼす加振力を考える。まず、アーム先端の生コン吐出部分に加わる力は、放出される生コンの運動量 $dm \cdot v$ (v : 生コンの流速) が全て流体力として先端部に作用したとすると、運動量の時間変化として下式で表される。

$$f = \frac{dm \cdot v}{dt} = -\rho \cdot A \cdot v^2 \quad (5)$$

ただし

ρ : 生コンの密度

A : ディストリビュータパイプの断面積

v : 生コンの流速

次にアーム関節部において、関節部への生コン流入角を θ_1 、流出角を θ_2 とすると、生コンの運動量の差が関節に加わる流体力となる。図5の関節点における x, y 軸方向の流体力 f_x, f_y は下式で示される。

$$f_y = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (\sin(\theta_1) - \sin(\theta_2)) \quad (6)$$

$$f_x = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (\cos(\theta_1) - \cos(\theta_2)) \quad (7)$$

これらより、最も加振力を受けるアーム姿勢は、全体が円弧状または、水平で、アームと直角方向に生コンを吐出するときであり、アーム全体がM形状になるときは、流体力の一部は互いに打ち消し合ってアームへの加振力は弱まることが分かる。

Fig. 5 Flow Force of Joint

4. 制御則

まず、本論文で取り扱っているコンクリートポンプのディストリビュータアームに振動抑制を施すとき、考慮すべき点を列挙する。

- 1) 一次モードの加振周期は最大で、0.7Hz程度 (コンクリートポンプの作動速度により制限される) であるので、振幅が最も大きくなる1次共振点を抑えることを第一の目標とする。
- 2) 図6に示すようにアーム姿勢の自由度は非常に大きい。また、アームに沿って配置されたパイプ内を流れる生コンの種類によっても、流体力が変動する。本機のような建設機械の場合、プラントの特性変動

は、長期的な時間変化に伴うものよりも、作業による様々な使用方法に起因するものの要因が大きい。従って、採用する制御則は、プラントの動特性の変動が大きい場合でも、振動抑制効果が期待できることが望ましい。

- 3) 式(5), (6), (7) に示すように、加振源となる生コンの流体力は流速の二乗に比例する。従って、流速の低い低流量域では加振力が弱く、振動抑制の必要性が低い。

Fig. 6 Operation Area of Distributor Arm

系全体のダンピングを向上させ、各モードの共振点のゲインを下げる制御則として、DVFB (Direct Velocity Feedback) 制御則⁽³⁾が知られている。この制御則はプラントの変動によらず基本的にその安定性が保証されており、本機のように大きな特性変動が予測されるプラントに適しており、本論文ではこれを採用する。

また、制御力を加える位置には、本来アーム姿勢によって最適値が存在するが、本論文ではアームの実作業上、最も重要なアーム全伸状態での振動抑制を最重要視して、この姿勢で全ての振動モードの抑制に寄与できる第一関節に制御トルクを加えることとした。

このときの制御則は次式で与えられる。

$$\tau = -k \cdot \theta - d \cdot \dot{\theta} \quad (8)$$

τ : 第一関節への制御トルク

θ : 第一関節の変位

k : 角度のフィードバックゲイン

d : 角速度のフィードバックゲイン

このように、第一関節のみにDVFB制御を施した場合にはその関節が直接関与している振動モードの減衰には寄与するが、全てのモードの共振点でのゲインを下げる結果とは必ずしもならない。従って、最適なフィードバックゲインの探索が必要となる。その一例を以下に示す。

まず、第一関節の角度のフィードバックゲインを固定し、速度のフィードバックゲインを変化させた場合の周波数応答の計算結果を図7に示す。計算したモデルは全長が32.6mのアーム (PY120-36型) である。角度のフィードバックゲインは、 $k=4.4 \times 10^6$ [N・m/rad] に固定し、角速度のフィードバックゲインを大きくしていくと $d=5.0 \times 10^6$ [N・m・s/rad]迄は図7の1~3の曲線に示すように、系全体に減衰が付加された形となり、共振抑制効果が高くなる。しかし、さらに大きくすると4~6の曲線に示すように、制御関節が固定された状態に近くなり、共振点の周波数がシフトした形で振動特性が悪化していくことが分かる。以上の計算結果は、図3と同じアーム姿勢と入出力位置に対するものである。従って、図3は振動制御を行わない場合の振動応答に対応する。

ここで、図7で最適と考えられるフィードバックゲイン $k=4.4 \times 10^6$ [N・m/rad]、 $d=5.0 \times 10^6$ [N・m・s/rad] において、一次共振点よりも低い周波数領域で振幅が大きくなっていることが分かる。しかしこれは、加振源である生コン流体力変化が、低周波数域では非常に低いという、本機械特有の条件により許容される。

Displacement Feedback Gain [N・m/rad]	Velocity Feedback Gain [N・m・s/rad]
1: 4.4×10^6	1.0×10^6
2: 4.4×10^6	2.5×10^6
3: 4.4×10^6	5.0×10^6
4: 4.4×10^6	1.0×10^7
5: 4.4×10^6	1.5×10^7
6: 4.4×10^6	3.0×10^7

Fig. 7 Accelerance with DVFB Control

次に、角度のフィードバックゲインの影響を考察するため、さまざまな角度のフィードバックゲイン値において振動抑制効果が最も高くなるように角速度のフ

ィードバックゲインを設定した時の、アーム先端加速度の周波数応答を図8に示す。これより、特に一次モードの共振点でのゲイン抑制に関しては、角度のフィードバックゲインが小さいほど、最適な角速度のフィードバックによって達成できる振動抑制効果が高くなることがわかる。一方、角度のフィードバックゲインの大きさは実作業時のアームの位置決め応答性に直接関与するが、コンクリートディストリビューターアームの場合、コンクリート打設作業は一般にアーム姿勢を固定して行い、またアーム姿勢のセッティング時の関節作動速度も高速性を要求されていない。そこで、角度のフィードバックゲインは、振幅が過大にならない程度で、比較的小さな値まで許容できる。本論文では低周波数域で振幅が過大にならず、かつ一次モードの振動抑制の効果が高いと考えられるフィードバックゲイン $k=4.4 \times 10^6$ [N・m/rad] に設定した。

Displacement Feedback Gain [N・m/rad]	Velocity Feedback Gain [N・m・s/rad]
1: 1.0×10^6	3.0×10^6
2: 4.4×10^6	5.0×10^6
3: 1.0×10^7	6.0×10^6
4: 5.0×10^7	2.0×10^7
5: 1.0×10^8	5.0×10^7

Fig. 8 Accelerance with DVFB Control

最後に、この最適なフィードバックゲインと考えられる、 $k=4.4 \times 10^6$ [N・m/rad]、 $d=5.0 \times 10^6$ [N・m・s/rad] でアーム姿勢を変えた場合の振動周波数応答を図9に示す。第2から第4アームは水平のままに、第1アームだけを水平から垂直まで変化させたものであるが、第一関節が90度のときは、全体の振動抑制に第一関節が寄与する割合が少し小さく、振動抑制効果が低くなっているが、他の姿勢では-20dB程度の共振抑制効果が得られており、実用上十分な性能が確保されている。

Fig. 9 Accelerance with various arm angles

5. テストモデルによる検証実験

第一関節へのDVFBによる共振抑制効果を確認するため、実機を模擬したテストモデルによる検証実験を行った。その結果を以下に示す。

テスト装置のシステム図を図10に、その全体写真をFig. 11に示す。アームは一樣な平板より構成され、全体のバランスを実機に近づけるため、その板厚をアームごとに変えている。アーム姿勢は様々な関節角を取

Fig. 10 System Diagram of Vibration Test Model

Fig. 11 Photograph of Vibration Test Model

ることができるが、ここでは全てのアームが水平状態となるようにしている。第一関節はハーモニックドライブモータにより駆動され、その関節トルクを制御することにより振動を抑制する。実験ではアームの先端への垂直方向加振力から、同位置の振幅までの伝達特性を採取する。

テストモデルの数学モデルによる振動周波数特性の計算値を図12に、実験により採取した実データを図13

Fig. 12 Compliance of Mathematical Model

Fig. 13 Compliance of Experimental Hardware

に示す。グラフ中の1は関節を固定した状態で、全周波数帯にわたり良い一致を示し、モデルの妥当性が確認できる。2, 3は関節に制御を施した場合で、角度のフィードバックゲインは2, 3共に29.5 [N・m/rad], 角速度のフィードバックゲインは、それぞれ、2:47.2, 3:11.8 [N・m・s/rad]である。3の場合に1次の共振の抑制に対する最良の結果が得られ、その振動抑制効果は著しい。ただし、二次共振点以降の周波数域では振動抑制効果が計算値より低い。これは、関節駆動トルクの制御性能が高い周波数域で悪化しているためである。

6. 結言

本論文では、コンクリートディストリビューターアームを多関節柔軟アームとみなし、生コン打設時にポンプ脈動に起因する流体力変化による、アームの共振を抑制するため、第一関節に位置と速度のネガティブフィードバックを施して、系全体の振動特性を改善することについて、検討を行った。

制御する関節は、第一関節以外も考えられるが、実用上、最小の費用で最大の効果を得る観点から、設置の容易性や、全ての振動モードに効果的であることを考慮して第一関節を選定し、またアーム姿勢は、実使用上で共振が最も問題となる水平状態を中心に制御定数の検討を行った。

水平状態で設計した制御定数のままで、それ以外の状態において、その振動特性を数値計算し、他の姿勢でも実使用上十分な振動抑制効果があるという結果を得た。最後に、これらの検討結果を検証するため、実機を模擬した試験装置により、検証テストを行ったが、その結果は満足できるものであった。

一般に柔軟アームにおいて、関節トルクにDVFB制御を加えて振動抑制を行う場合、共振点のゲインを抑えるためには、位置のフィードバック定数を低めに設定する必要がある。従って、制御系の設計は位置決めの応答性や、低い周波数域でのゲインとのトレードとなる。しかし、本件の場合、低周波数域は加振力自体が小さくある程度無視できること、作業時はアームを固定して使用するので、位置制御特性にあまり注意を払う必要がないことなどの有利な条件があり、DVFB制御だけで、実用上十分な性能が確保できるとの結論を得た。

参考文献

- (1) 川井忠彦、藤谷義信 “振動および応答解析入門” 培風館 (1991)

- (2) 戸川隼人 “有限要素法による振動解析” サイエンス社 (1975)
- (3) 例えば、梶谷和久、池田雅夫、木田隆 “Collocated Feedback による宇宙構造物の最適制御” 計測自動制御学会論文集 Vol.25, No.8, 1989, pp. 828-888