130 角加速度入力によるジブクレーン起伏動作時の制振位置決め制御

Vibration Suppression for Positioning Control of Jib Cranes by Angular Acceleration Inputs in Derricking Motion

○正 村上 新(島根大) 正 池田 隆(島根大) 川本 雅義(島根大院)

Shin MURAKAMI, Shimane University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue, Shimane

Takashi IKEDA, ibid.

Masayoshi KAWAMOTO, ibid.

The construction methods of acceleration input pattern which suppress the residual vibration in positioning of a jib crane are proposed. In derricking motion, the moment acting on the payload due to inertia force is nonlinear function of the derricking angle. So the effectiveness of the proposed methods is not clear. However, by numerical simulation, it is clarified that the combination of proposed methods can suppress the residual vibration instead of nonlinearity of the moment. By window function method, the robustness is also achieved.

Keywords: High speed positioning control, Jib crane, Open loop control, Residual vibration, Window function

ジブクレーンとは、旋回および起伏可能な腕を持つ運搬機械であり、工場、港湾などにおける重量物の運搬作業に重要な役割を果たしている。一般的にクレーンは移動終了時に振動が発生しやすく、目的位置まで高速で運搬することが困難であり、作業効率を上げるには、移動中及び移動後の振動を抑えた動作が不可欠である。

筆者らは、加速度入力に制御対象の減衰固有周期成分が含まれない時、制御対象の自由振動が励起されないという性質を使用し、この条件を満たす簡便な加速度パターン構成法を提案してきた。

本報告ではジブクレーン起伏動作に関し、起伏角の角加速度に対して、これまで提案してきた加速度パターンを適用し、数値シミュレーションによりその有効性を検証する。

図 A1 に解析モデルを示す。本研究ではクレーンのワイヤーと吊荷を振り子とし、ジブの移動角 θ_1 は任意に与えられと仮定する。この系の無次元化された運動方程式は、

$$\ddot{\theta}_2 + \sin \theta_2 = l[\ddot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) + \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1 - \theta_2)] \quad (A1)$$

Fig.A1 Analytical Model

Fig.A3 Time history of moment and angle of payload

となる。ここに、 θ_2 はワイヤーの傾き角、 l はジブ長さ l_1 の振り長さ l_2 に対する比である。

数値シミュレーションによって提案する加速度パターン(図 A2)を $\ddot{\theta}_1$ に対して与え、残留振幅の変化を調べた。図 A3 に式 (A1) の右辺と吊荷角度の時刻歴を示す。この図で、起伏動作終了後の吊荷の角度の最大値を残留振幅とする。

加速時間 T_{acc} 、加速減速の時間差 T_{int} を変えて残留振幅の変化を等高線で表した結果の、一定角加速度の場合を図 A4(a) に、窓関数適用法を用いた場合を図 A4(b) に示す。

以上より、次のことが明らかとなった。

- (1) 起伏動作の初期角および、移動角が大きくなるにつれ、慣性力によるモーメントが増大し、残留振幅は大きくなる。
- (2) 等角加速度入力によるジブの起伏動作の場合、並進運動の系と比較すると、残留振幅を抑制可能な範囲は限られるが、 T_{acc} と T_{int} を適切な値にすることにより、残留振幅を抑えることが可能である。
- (3) 窓関数適用法の場合、 $T_{acc}/T_n=3.5$ 以上では広範囲で残留振幅の抑制が可能で、ロバスト性にも優れている。

(a) Timing and parameter decision method

(b) Window function method

Fig.A2 Proposed acceleration input patterns

(a) Constant acceleration

(b) Window function method

Fig.A4 Contour map of the residual amplitude ($\theta_1 = 0^\circ \rightarrow 30^\circ$)

1. 緒 言

ジブクレーンとは、旋回および起伏可能な腕を持つ運搬機械であり、工場や港湾、建築現場における重量物の運搬作業に重要な役割を果たしている。しかし、一般にクレーンは運搬動作終了時に吊荷に振動が発生しやすく、目的位置まで高速で運搬することが困難である。このため作業効率を上げるには、移動中及び移動後の振動を抑えたクレーン的高速移動が不可欠である。これまでのクレーン系の制振位置決め制御の研究では様々な方法が提案されている。直線走行する振子系に低次元化し最適レギュレータを適用したもの⁽¹⁾、ジブおよび吊荷を非線形モデルとして定式化し、代数運動方程式を用いた直接最適制御を適用した非線形制御⁽²⁾、ファジィルールを用いた制御手法を適用したもの⁽³⁾などのフィードバック制御、吊荷の振動周期に着目し、ジブが瞬間的に旋回させられると仮定することにより目標位置へ静止させるもの⁽⁴⁾、ジブの旋回運動を一次ホールドされた直線運動に離散化し、任意の初期位置、初速度から有限回のステップで吊荷を静止させる方法⁽⁵⁾、吊荷と地面との衝突を考慮した上で、系の時間特性・周波数特性を制御系に取り込み旋回・起伏・巻上げの同時制御を行うもの⁽⁶⁾などのオープンループ制御がある。しかし、前者はシステムの複雑化やコスト高が問題となり、後者は最適軌道の決定や制御系の設計が複雑であるという問題がある。

筆者らは、加速度入力に制御対象の減衰固有周期成分が含まれない時、制御対象の自由振動が励起されない⁽⁷⁾という性質を利用し、この条件を満たす簡便な加速度パターン構成法を提案してきた。これらの構成法はばね質量系⁽⁸⁾や、はりの並進運動⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、角度に関する非線形性を考慮した天井クレーン⁽¹¹⁾に対して有効であることが報告されている。このうちクレーンの研究⁽¹¹⁾では、並進運動であるため一方向のみの慣性力しか伝わらず、慣性力の大きさや向きが変化するジブクレーンについては提案する加速度パターンが有効であるかは明らかでない。

そこで、本報告はジブクレーンについてこれまで提案してきた加速度パターンを適用し、数値シミュレーションによりその有効性を検証する。ただし、本報告ではジブの起伏動作のみに限定し、吊荷の運動は鉛直平面内のみを考慮して、ジブの角度による吊荷に掛かる慣性力の変化が提案する方法にどう影響するかを詳しく調べる。

2. 理 論 解 析

2.1 運動方程式 図1に解析モデルを示す。本報告では水平方向に x 軸、垂直方向に y 軸とした鉛直平面内での運動のみを考える。ジブを原点を中心に回転する剛体棒、ワイヤーと吊荷を剛体棒の先端に取り付けられた単振子と考える。ジブの長さ l_1 、ワイヤーの長さ l_2 は一定とし、先端質量を m とする。また、ジブの水平軸からの角度を θ_1 、ワイヤーと鉛直線のなす角を θ_2 とし、ジブの角度 θ_1 は任意に与

Fig. 1 Analytical Model

えられると仮定する。ワイヤー取り付け部分と空気抵抗による減衰は無視できるほど小さいと仮定し、ラグランジュの方法によりこの系の運動方程式を導くと次式を得る。

$$m l_2^2 \ddot{\theta}_2 + m g l_2 \sin \theta_2 = m l_1 l_2 \ddot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (1)$$

この式の左辺は質量 m 、長さ l_2 の単振子の運動方程式と同等である。この式は、単振子の支点がジブの起伏によって移動し、それに伴う慣性力によるモーメントが右辺に現れていると解釈することができる。この単振子の固有振動数 ω_n は、式 (1) の右辺を零と置き、 θ_2 が十分小さいと仮定することによって得られ、 $\omega_n = \sqrt{g/l_2}$ である。

代表長さを l_2 、代表時間を $\tau = 1/\omega_n$ として無次元量 $t' = t/\tau$ 、 $l = l_1/l_2$ を導入し式 (1) の無次元化を行う。さらに、“”を t' に関する微分に置き換えると、次式を得る。

$$\ddot{\theta}_2 + \sin \theta_2 = l \{ \ddot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) + \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \} \quad (2)$$

これより振り子に加わる無次元モーメントはジブの長さの振り子に対する比 l によって大きさが定まることが分かる。なお、これ以降、無次元時間 t' の “” は省略する。

3. 角加速度パターン構成法

3.1 並進運動系における加速度パターン構成法⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾

並進運動する多自由度系については、各モード座標 q_i の運動方程式は以下ようになる⁽⁸⁾。

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\bar{m}_i \ddot{x}_0 \quad (3)$$

ここに、 ξ_i 、 ω_i 、 $\bar{m}_i$ は i 次モードの減衰比および固有振動数であり、モード質量、 $\ddot{x}_0$ は駆動部の加速度である。このとき、以下に示す加速度パターンが位置決め制御時の制振に有効である。

3.1.1 タイミング決定法 一般的な位置決め制御は、静止した制御対象を目的位置まで移動させるために、まず加速し、その後定速で移動させ目的位置の手前で減速し停止させる。図2(a)に、例として一定加速度の場合を示す。この加速と減速時の加速度パターンの形状が同一で符号のみが異なる時、加速を開始した時間と減速を開始した時間の差 T_{int} が制御対象の減衰固有周期 $T_{d_i} (\equiv 2\pi/\omega_{d_i})$ ただし、 $\omega_{d_i} =$

Fig. 2 Example of the construction methods of acceleration input pattern

$\omega_i \sqrt{1-\xi_i^2}$ の整数倍, すなわち nT_{di} (n は自然数) となるとき, 加速度パターンは減衰固有振動数を含まず, 残留振動を低減できる.

3.1.2 パラメータ決定法 加速度パターンの形状に関する何らかのパラメータ α を導入し, 加速度パターン $a(t, \alpha)$ において系の減衰固有振動数成分が零となる, すなわち

$$A(\omega_d) = \int_0^\infty a(t, \alpha) e^{-j\omega_d t} dt = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

となるパラメータ α を求めることにより, 残留振動を低減する加速度パターンを構成する方法である. 例えば, 図2(a)に示す一定加速度の場合では, 加速時間 T_{acc} をパラメータとすると, $T_{acc} = nT_{di}$ のとき残留振動が低減される.

3.1.3 窓関数適用法 急激な変化を避け, なだらかに変化する加速度パターン形状として, 信号処理に用いられる窓関数を使用する方法である. 窓関数は, 高次振動数成分が非常に小さくなるように設計されているため, これを用いることにより, 高次モードの振動を抑えることが可能となる. 窓関数にはその用途に合わせて, さまざまな種類が存在するが, 比較的簡便で有効なものとして, Blackman 窓, Blackman-Harris 窓が挙げられる. 図2(b)に例を示す.

3.1.4 組み合わせ法 以上の各方法を組み合わせることによって, 残留振動低減効果を高めることができる. 例えば, 一定加速度の場合では, $T_{int} = T_{acc} = T_{di}$ とすることによって, タイミング決定法とパラメータ決定法の条件が2つ同時に満たされることになる. また, 多自由度系の場合は $T_{int} = T_{d1}$, $T_{acc} = T_{d2}$ などとすることにより, 複数のモードの残留振動を同時に抑えることが可能となる.

3.2 ジブクレーン起伏動作への適用 並進運動では, 運動方程式 (3) の右辺には加速度に比例する慣性力 $-\bar{m}_i \ddot{x}_0$ のみが発生するため, 加速度により系に加わる慣性力そのものを与えることが出来る. しかし, 本研究の対象となるジブクレーンの起伏動作においては, 運動方程式 (2) の右辺は, 角加速度を含む非線形関数となり, 右辺全体が構成法の示す条件を満たすように与えることは困難である. このため, ジブの角加速度 $\ddot{\theta}_1$ に提案するパターンを適用したとき, どのような特性が得られるかを調べる.

4. 数値計算例

4.1 残留振動の定義 運動方程式 (2) を用いてジブ起伏動作時の吊荷の挙動を数値シミュレーションによって調べる. 計算に用いたパラメータは $l=2$ とした. 図3は起伏動作を行ったときのジブと吊荷の挙動の一例を示す. 図3(a)は角加速度パターン $\ddot{\theta}_1$ である. この例では前節の図2(a)に示したような一定角加速度で加速および減速しており, 加速時間を T_{acc} , 加速と減速の時間差を T_{int} , 台車が加速を開始してから停止するまでの時間を $T_{mov} (=T_{acc}+T_{int})$ で表す. $T_{acc}/T_n = 0.5$, $T_{int}/T_n = 0.7$, 起伏角 $\theta_1 = 30^\circ \sim 60^\circ$ とした. 図3(b)は起伏角の角加速度に図3(a)のパターンを与えた場合の運動方程式 (2) の右辺, すなわち慣性力によるモーメントの変化を示している. 角加速度の矩形波とは異なり, 複雑な形状をしていることが分かる. 図3(c)は吊荷の傾き角 θ_2 であり, 起伏動作終了後の吊荷角度の絶対値の最大値を残留振動と定義する. 図3(d)はこの時のジブと吊荷の状態を一定時間毎に示したものである. なお, 対象とする系は減衰を考慮していないため, 減衰固有周期は固有周期 T_n と等しく, 無次元化をしているため $T_n = 2\pi$ となる. 以下ではこの T_n を時間の基準とする.

4.2 タイミング決定法とパラメータ決定法の組み合わせ 図4に, T_{int}/T_n の値を 0.50, 1.00, 1.50, 2.00 に固定し, T_{acc}/T_n

の値を変化させてシミュレーションを行ったときの残留振動の変化を示す. 図の (a)(b)(c) はジブの初期角度と最終角度をそれぞれ $\theta_1 = 0^\circ \rightarrow 30^\circ$, $30^\circ \rightarrow 60^\circ$, $0^\circ \rightarrow 60^\circ$ とした場合に対応する. これらの図において, $T_{int}/T_n = 0.50$ の場合には T_{acc}/T_n がいかなる値においても残留振動が大きく, $T_{int}/T_n = 1.50$ の場合についても, 残留振動が零に近づくことは無い. しかし, $T_{int}/T_n = 1.00, 2.00$ の場合には, T_{acc}/T_n の値によって残留振動が零に近くなるなることが分かる. そこで, これらのうち $T_{int}/T_n = 1.00, 2.00$ の場合の振幅変化を拡大したものを, 図5に示す. 図5(a)の $\theta_1 = 0^\circ \rightarrow 30^\circ$ の場合には, T_{acc}/T_n の値によって, 残留振動がほぼ零になる場合がある. 図5(b)(c)の場合には, 図5(a)の場合ほど小さくはならないが, 条件によって残留振動をラジアン単位で 0.001 オーダー, すなわち, 残留振動を吊荷ロープ長に対して千分の1に抑えることが出来ることが分かる. 図7に残留振動がほぼ零となる場合の例として, $T_{acc}/T_n = 2.00$, $T_{int}/T_n = 1.09$ の場合のモーメントの変化, 吊荷の傾き, および挙動を示す. 図7(a)で示されるように, 慣性力によるモーメントに図2(a)のような規則性は見受けられないが, 残留振動が小

(a) Angular acceleration

(b) Moment due to inertia force

(c) Angle of payload

(d) Stroboscopic view

Fig. 3 Example of numerical simulation ($T_{acc}/T_n = 0.5$, $T_{int}/T_n = 0.7$, $\theta_1 = 30^\circ \rightarrow 60^\circ$)

Fig. 4 Residual amplitude vs T_{acc}/T_n (constant angular acceleration) Fig. 5 Residual amplitude vs T_{acc}/T_n (constant angular acceleration, enlarged view) Fig. 6 Example of numerical simulation (constant acceleration, $\theta_1 = 0^\circ \rightarrow 30^\circ$, $T_{acc}/T_n = 2.00$, $T_{int}/T_n = 1.09$)

Fig. 7 Contour map of the residual amplitude (constant angular acceleration)

さくなっていることが分かる。

図7に、縦軸を T_{acc}/T_n 、横軸を T_{int}/T_n として、 T_{acc}/T_n と T_{int}/T_n の値をそれぞれ 0.2～5.2 の範囲で変化させたときの残留振幅の値を等高線図として表す。等高線図は、白に近くなるほど残留振幅が小さいことを示しており、最も白い領域で、残留振幅は 0.001 rad 以下である。

これら3つの等高線を比較すると、 $\theta_1 = 0^\circ \rightarrow 30^\circ$ の場合、等高線図の右上の部分が白く、比較的広い範囲で残留振幅が小さいが、 $\theta_1 = 30^\circ \rightarrow 60^\circ$ では残留振幅が全体的に大きくなる。これは、起伏角が 90° に近くなると、式(2)の右辺第1項に含まれる $\sin(\theta_1 - \theta_2)$ の値が大きくなるため、発生する慣性力が大きくなり、残留振幅が大きくなるものと考えられる。 $\theta_1 = 0^\circ \rightarrow 60^\circ$ では、さらに残留振幅が大きくなって

いる。また、 $\theta_1 = 30^\circ \rightarrow 60^\circ$ の場合、等高線の谷の部分の規則的な格子状になっており、並進運動の場合に近い結果となっている。これは、初期角が大きいと、ジブ先端の動きが直線運動に近くなるからであると考えられる。また、いずれの場合にも T_{acc}/T_n と T_{int}/T_n が整数に近いとき、残留振幅が小さくなる範囲が存在する。線形系の並進運動の場合には、 T_{int}/T_n , T_{acc}/T_n のうち、どちらかの値が整数であれば残留振幅が零となった。一方、ジブクレーンの振り上げ動作の場合、これらの値が整数であるのみでは残留振幅が零にならないが、 T_{int}/T_n , T_{acc}/T_n の双方を等高線の谷となる適切な値にすることによって、残留振動を低減できることが分かる。このことより、吊荷に加わるモーメントが式(2)の右辺に表されるような複雑な場合においても、角加速度に

Fig. 8 Residual amplitude vs T_{acc}/T_n (window function method) Fig. 9 Example of numerical simulation (constant acceleration $T_{acc}/T_n = 4.00$, $T_{int}/T_n = 2.00$, $\theta_1 = 0^\circ \rightarrow 60^\circ$)

Fig. 10 Contour map of the residual amplitude (window function method)

対して提案する方法を適用し、残留振幅を低減する条件を見出すことが出来ることが分かる。なお、これまでジブの振り上げ動作について述べたが、振り下げ動作についても同様な結果が得られたので省略する。

4.3 窓関数適用法 3.1.3 節において説明した Blackman 窓を角加速度パターンとして使用し、前節と同様の方法でシミュレーションを行った。 T_{int}/T_n の値を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 とし、 T_{acc}/T_n の値を変化させて残留振幅を求めた結果を図 8 に示す。 T_{acc}/T_n の値が大きくなると、 T_{int}/T_n がどの値をとっても残留振幅が小さく、起伏角がいずれの場合も、 $T_{acc}/T_n = 4.0$ 以上では安定して残留振幅の抑制を行える。図 9 に、窓関数適用法の例として、起伏角 $\theta_1 = 0^\circ \rightarrow 60^\circ$ 、 $T_{acc}/T_n = 4.0$ と $T_{int}/T_n = 2.0$ の場合を示す。図 9(a) は式 (2) の右辺のモーメント、図 9(b) はワイヤー傾き角 θ_2 の時刻歴であり、そのときの挙動を図 9(c) に示す。窓関数適用法による起伏動作の場合、モーメントの変化が並進運動の場合とほぼ同様となり、その結果、高い制振効果が得られていることが分かる。初期角 30° から 60° への起伏動作の場合も、初期角が 0° からの起伏動作と同様な結果を得た。図 8 で表した残留振幅をより広範囲で調べるため、 T_{acc}/T_n と T_{int}/T_n の値をそれぞれ 0.2~5.2 の範囲で変化させたときの残留振幅の値を図 10 に等高線表示で示す。起伏角が $\theta_1 = 0^\circ \rightarrow 30^\circ$ 、 $30^\circ \rightarrow$

60° の場合では、 $T_{acc}/T_n = 3.5$ 以上、 $\theta_1 = 0^\circ \rightarrow 30^\circ$ の場合では、 $T_{acc}/T_n = 4.0$ 以上の領域になると、残留振幅が 0.001 rad より小さくなっており、等加速度入力による起伏動作に比べて、残留振幅を低減可能な範囲が広く存在し、系の変化に強いロバストな制御が可能であることが分かる。

5. 結 言

位置決め制御時の残留振動低減について、提案する加速度パターン構成法を、ジブクレーンの起伏動作に適用し有効性を検証した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 起伏動作の初期角および、移動角が大きくなるにつれ、吊荷に加わる慣性力によるモーメントが増大するために、残留振幅は大きくなる。
- (2) 等角加速度による起伏動作の場合、並進運動の系と比較すると、残留振幅を抑制可能な範囲は限られるが、 T_{acc}/T_n と T_{int}/T_n を適切な値にすることにより、吊荷ワイヤー残留振幅を 0.001 rad 以下に抑えることが可能である。
- (3) 窓関数を適用した加速度入力の場合、 $T_{acc}/T_n = 3.5$ 以上では、広範囲にわたって残留振幅の抑制が可能で、ロバスト性にも優れている。

文 献

- (1) 多田博夫・井上喜雄・大嶋真人・芳村敏夫, 旋回式クレーンの吊り荷振れ止め制御に関する研究 (吊り荷振れ角センサの開発と縮小モデルでの旋回振れ止め制御),
- (2) 日野順市・渡辺典明・芳村敏夫・蘇伝信, 旋回クレーンのつり荷の非線形制御, 機論, 65-632, C(1999), 122-129
- (3) 多田博夫・芳村敏夫・大谷良治・井上喜雄, 旋回式クレーンの吊り荷振れ止め制御に関する研究 (ファジィ理論による旋回振れ止め制御), 機論, 65-634, C(1999), 192-199
- (4) 近藤良・武田亨・田口彦衛・石橋丈厚, 振動周期に基づく旋回クレーンの振れ止め制御, 機論, 67-655, C(2001), 135-141
- (5) 近藤良・伊藤哲弘・鈴木亮, 離散化手法に基づく旋回クレーンの振れ止め制御, 機論, 68-665, C(2002), 68-75
- (6) 矢野賢一・江口健司・寺嶋一彦, 地面との衝突回避を考慮した旋回クレーンのセンサレス振れ止め制御, 機論, 68-676, C(2002), 145-153
- (7) S.P.Bhat・D.K.Miu, Precise Point-to-Point Positioning Control of Flexible Structures, *Journal of Dynamic Systems*, Vol.112, (1990), 667-674
- (8) 村上新・池田隆, 加速度入力による多自由度系の高速位置決め制御, 日本機械学会 D&D2004 講演論文集 (CD-ROM), No.04-5, 232, 1-6, (2004)
- (9) Murakami,S.and Ikeda,T., High Speed control of a flexible Arm by Acceleration Input, *VSTech2005, Proc. of 1st Intl. Symposium on Advanced Tech. of Vib. & Sound*, Miyajima, Hiroshima, JAPAN, (2005), 127-132.
- (10) 村上新・池田隆, 窓関数を適用した柔軟構造物のオープンループ位置決め制御, 日本機械学会 D&D2005 講演論文集 (CD-ROM), (2005), 207, 1-5
- (11) 村上新・池田隆, 加速度入力による天井クレーンの制振位置決め制御, 日本機械学会 D&D2006 講演論文集 (CD-ROM), (2006), 128, 1-6