1310 旋回と起伏を考慮したジブクレーンの角加速度入力による制振位置決め制御

Vibration Suppression for Positioning Control of a Jib Crane by Angular Acceleration Input in Swing and Derricking Motions

正 村上 新 (島根大) 正 池田 隆 (島根大) ○学 川本 雅義 (島根大院)

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

Takashi IKEDA, ibid.

Masayoshi KAWAMOTO, ibid.

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

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の高速移動が不可欠である。一方、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⁽¹⁾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⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。

本報告ではジブクレーンの吊荷の旋回および起伏時の両動作によって吊荷に掛かる慣性力の大きさや向きの変化に対し、これまで提案してきた加速度パターンをジブの回転角、起伏角に適用し、数値シミュレーションによりその有効性を検証する。

2. 理論解析

図1に解析モデルを示す。原点を中心に旋回、起伏する剛体のジブを考え、ワイヤーと吊荷をワイヤーの先端に取り付けられた振り子と考える。ジブの長さを l_1 、ワイヤーの長さを l_2 、吊荷の質量を m とする。また、ジブの z 軸回りの旋回角を x 軸の正の方向を基準として ϕ_1 、起伏角を水平面($x-y$ 平面)を基準として ϕ_2 とする。ジブ長手方向のワイヤーの傾きを鉛直線を基準として θ_1 、また横方向の傾きを θ_2 とする。本報告では、ワイヤーの長さ、ジブの長さは変わらないものとし、旋回角 ϕ_1 、起伏角 ϕ_2 のみを変化させて、吊荷を運搬するものとする。

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

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta}_1 &= l \cos \phi_2 \dot{\phi}_1^2 + l \cos \phi_2 \dot{\phi}_2^2 - l \cos \phi_2 \theta_1 \theta_2 \ddot{\phi}_1 \\ &\quad - l \cos \phi_2 \theta_1 \theta_2 \ddot{\phi}_2 + l \sin \phi_2 \dot{\phi}_2^2 + 2l \sin \phi_2 \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_2 \dot{\phi}_1 \\ &\quad + l \sin \phi_2 \dot{\phi}_2 \theta_1 \theta_2 \ddot{\phi}_2 - \theta_2 \ddot{\phi}_1 - 2\theta_2 \dot{\phi}_1 \dot{\theta}_2 - \theta_2 \theta_1 + \theta_2 \dot{\phi}_1^2 \theta_2 \theta_1 \\ \ddot{\theta}_2 &= \dot{\phi}_1 \theta_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\phi}_1 \theta_2) + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \theta_1 + \theta_2 \{-1 + (\ddot{\phi}_1 - \ddot{\phi}_2) l \cos \phi_2 \\ &\quad + \dot{\phi}_2 (-2\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) l \sin \phi_2 + \dot{\phi}_1 \sin \theta_1\} \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

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“ $\cdot$ ”は省略する。

3. 加速度パターン構成法

並進運動する線形ばね質量系については、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ことが示されている⁽²⁾。

3.1 タイミング決定法 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 の整数倍、すなわち mT_d (m は自然数)となると、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。

3.2 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、系の減衰固有振動数成分が零となる α を求める方法。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、 $T_{\text{acc}} = mT_d$ のとき残留振動が低減される。

3.3 繰り返し法 任意のパターンをある規則にしたがって複数回繰り返す方法。その規則とは図2(a)に示すように任意の加速度パターンを減衰固有周期 T_d の n/m 倍すなわち $(n/m)T_d$ 時間ずらしながら m 回繰り返すことである。ここで、 n, m は互いに素であるような自然数で、 m は2以上である必要がある⁽²⁾。なお、本報告では $n = 1, m = 3$ とした。

3.4 組み合わせ法 上記のパターン構成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、 $T_{\text{int}} = T_{\text{acc}} = T_d$ 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⁽²⁾。

3.5 旋回、起伏動作への適用 並進運動においては、運動方程式の右辺には加速度に比例する慣性力のみが発生する。本研究の対象となるジブクレーンの動作においては、式(1)の運動方程式の右辺は、ジブの角加速度を含む複雑な非線形関数となる。本来は、この右辺全てが提案するパターンになることが望ましい。しかし、これは困難であるため、ジブの角加速度 $\ddot{\phi}_1, \ddot{\phi}_2$ に提案する構成法を適用することにより、旋回、起伏動作時の残留振幅の低減が可能であるかを調べる。

Fig.1 Analytical Model

Fig.2 Angular acceleration pattern

Fig.3 Angle of payload

Fig.4 Contour map of residual amplitude (Swing motion)

Fig.5 Residual Amplitude vs T_{acc}/T_n

Fig.6 Angle of payload

Fig.7 Contour map of residual amplitude (Derricking motion)

4. 数値計算例

4.1 残留振幅の定義 運動方程式 (1) を用いてジブの旋回, 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. パラメータは $l = 2$ とした. 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 T_d は固有周期 T_n と等しく, これ以降は T_d の代わりに T_n を用いる.

図 2 にジブに与える加速度パターンの例を示す. 図 2(a) は一定加速度の場合であり, 図中の T_{int} , T_{acc} が T_n の整数倍のときそれぞれタイミング決定法, パラメータ決定法の条件を満たす. 図 2(b) は図 2(a) の加速度パターンを $T_n/3$ ずらして 3 回繰り返す, 繰り返し法の条件を満たしている. 数値計算ではこのパターンを用い T_{int} , T_{acc} を変化させた. なお, このパターンでは台車が加速を開始してから停止するまでの時間は $T_{mov} [=T_{acc}+T_{int}+(2/3)T_n]$ となる. 図 3 に旋回動作のみを行ったときの吊荷の挙動の一例を示す. $T_{acc}/T_n = 0.2$, $T_{int}/T_n = 1.5$, 旋回角 $\phi_1 = 30^\circ$ とした. 図 3 は吊荷の傾き角 θ_1 , θ_2 であり, 動作終了後 (T_{mov} 以降) の吊荷角度の絶対値の最大値 ($\sqrt{\theta_1^2 + \theta_2^2}$)_{max} を残留振幅と定義する. 以下では旋回動作を行った後, 起伏動作, またはその逆のパターンを行うものとする.

4.2 旋回動作→起伏動作の場合 図 4 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, 旋回動作のみを行っ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. 等高線図では左下の部分が黒く, 残留振幅が大きいことが分かるが, T_{int}/T_n T_{acc}/T_n が 1.0 以上の値を取る範囲では, 残留振幅が小さくなる範囲が広く存在していることが分かる. しかし残留振幅が完全に零になることはないため, 何らかの規準を設けて低減効果を評価する必要がある. そこで本研究では, 残留振幅の値が 0.005 rad 以下は許容できるものし, 図 4 より最短時間で 0.005 rad 以下となる条件を選択し, その後起伏動作へ移行する. このときの旋回動作のパラメータは, $T_{int1}/T_n = 1.1$ $T_{acc1}/T_n = 0.2$ であった. 図 4 に対応する点を○で示す. なお, T_{int1} , T_{acc1} は初回動作, T_{int2} , T_{acc2} は後続動作にそれぞれ対応する.

図 5 に, T_{int2}/T_n の値を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 に固定し, T_{acc2}/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幅の変化を示す. $T_{int2}/T_n = 0.5$ の場合には T_{acc2}/T_n の値が小さいほど残留振幅が大きいが, T_{acc2}/T_n の値が大きくなるにつれて $T_{int2}/T_n = 1.0, 1.5, 2.0$ の場合と同じ程度の残留振幅となった. 図 6 に, $T_{acc2}/T_n = 0.2$, $T_{int2}/T_n = 1.2$ の場合の吊荷の傾きを示す. 動作後の残留振幅の大きさは θ_1 よりも θ_2 の方が小さいが, 全体では 0.00452 rad と残留振幅は小さいことが分かる.

図 7 に, 図 4 と同様の条件で 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. 図 4 と比べると, 全体的に黒くなっている. これは, 旋回動作終了時の残留振幅が零ではない

Fig.8 Contour map of residual amplitude (Derricking → Swing)

ため, その時の影響を受けているものと考えられる. しかし, T_{acc}/T_n T_{int}/T_n が大きくなるにつれて, 残留振幅が旋回動作直後に比べ, 同程度またはそれ以下の値となることが分かる. これより, 旋回動作から起伏動作という移動方法の場合では, 旋回時の残留振幅を極端に抑えることはできなかったが, 起伏動作にはあまり影響しないことが分かった.

4.3 起伏動作→旋回動作の場合 前節と同様の方法で, 起伏から旋回動作という手順でシミュレーションを行った. 図 8(a) に, 起伏動作を行ったときの残留振幅の値を等高線図として表す. 単体動作では, 図 4 と非常によく似ていることが分かる. 図 8(a) より最短時間で残留振幅の値が 0.005 rad 以下となる条件を起伏動作へ適用させ, 旋回動作へ移行する. このときの起伏動作のパラメータは, $T_{int1}/T_n = 1.1$, $T_{acc1}/T_n = 0.2$ であった. 図 8(b) に, 旋回動作による残留振幅の大きさの等高線図を示す. こちらも起伏時の影響を大きく受けていることが分かる. 図 7 と比較すると, 等高線の山となる部分が広い範囲で表れていることより, 旋回→起伏に比べ残留振幅が抑えられる範囲が狭い.

5. 結 言

位置決め制御時の残留振動低減について, 等角加速度パターンを $T_d/3$ ずらして 3 回繰り返した繰り返し法を用いて, ジブクレーンの旋回, 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) 旋回動作→起伏動作の場合では, 比較的短時間で旋回動作終了時の残留振幅と同程度, あるいはそれ以下に抑えることができる.
- (2) 起伏動作→旋回動作の場合では, 移動時間, 残留振幅共に旋回動作→起伏動作と同様の結果を得るが, 残留振幅が抑えられる範囲は狭くなる.

文 献

- (1) S.P.Bhat・D.K.Miu, *Journal of Dynamic Systems*, Vol.112, (1990), 667-674
- (2) 村上・池田, 日本機械学会 D&D2004 講演論文集 (CD-ROM), 232, 1-6, (2004)
- (3) 村上・池田, 日本機械学会 D&D2005 講演論文集 (CD-ROM), (2005), 207, 1-5
- (4) 村上・池田, 日本機械学会 D&D2008 講演論文集 (CD-ROM), (2008), 130, 1-6