

クレーンのリアルタイムバンバン制御

吉田靖夫, 十河拓也

Real Time Bang Bang Control of a Crane

Yasuo Yoshida, Takuya Sogo

Abstract: Bang-bang control can enable fast and precise positioning of the load suppressing the swing of the rope of a gantry crane. However, because bang-bang control is a feedforward control approach, it fails when the natural period of the swing cannot be identified accurately; the natural period varies with parameters such as the length of the rope and center of gravity of the load. This paper proposes a time-optimal control with adjusting mechanisms based on the visual real-time measurement of the swing period in transportation. Simulation and experimental results are presented to show the effectiveness of this approach for an overhead crane.

Keywords : Bang bang control, Time-optimal control, Visual information

1. はじめに

走行クレーン吊り荷を短時間で搬送し、目標位置に振れなしで位置決めできる制御法として、バンバン制御がある。しかしながらこの最短時間制御はフィードフォワード制御であり、実際の現場でのロープ長誤差、重心位置誤差、剛体振子挙動などによる不正確な振れ周期が使用される場合は制御の前提をくずし高速な制御操作を困難とする。これに対しては、フィードバック制御との組み合わせ制御^[1]が考えられるが、ここでは最短時間制御で搬送中の周期計測と振れ制御の方法を示し、これらをもとにした最短時間制御修正による走行クレーン操作方法^[2]を明らかにする。

2. クレーンの応答と制御

トロリーを加速度 u_0 で走行させる場合のクレーン吊り荷の振れ角 θ を図1に示す。 x はトロリー変位、 m, l は吊り荷質量とロープ長さ、 g は重力加速度である。運動方程式は、

$$\ddot{\theta}(t) + \omega^2 \theta(t) = u_0 / l \quad \cdots (1)$$

となる。 $\omega = \sqrt{g/l}$ は円振動数、 $T = 2\pi/\omega$ は固有周期である。トロリー加速度 u_0 が一定で、初期値が $\theta(0) = \dot{\theta}(0) = 0$ のときの応答を求め、振れ角位相面を作成すると図2となる。座標原点 O 点を出発し、点 $p(0, u_0/g)$ を中心とし $R = u_0/g$ の半径

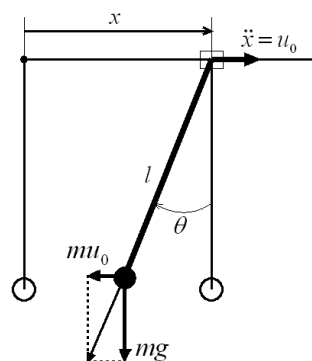


Fig.1 Crane load under trolley's acceleration

で反時計まわりに周期 T にて $0-A-C_1-B-0$ の順で一周し、再び振れ角ゼロの原点に戻る。従って、トロリー加速時間を周期 T とした加速動作終了以降では、吊り荷振れ無しでトロリーは $v=u_0T$ の等速度となる。これは同調制御である。

トロリー加速時間を周期 T より短くする方法として最短時間制御があり、 $0-A-C_2-B-0$ の順で動かす。A, B は加速度切りかえ点であり、トロリー加速度 u_0 をプラスからマイナス、マイナスからプラスにそれぞれ切りかえている。円弧 $A-C_2-B$ の円中心は $Q(0, -u_0/g)$ 点である。原点 O 点に戻るまでの時間 T_{op} は次式となる。

$$T_{op} = 2T_\zeta + T_\eta \quad (\leq T) \quad \dots(2)$$

ここで、 $T_\zeta = \zeta/\omega, T_\eta = \eta/\omega,$
 $\eta = 2 \tan^{-1}(\sin \zeta / (2 - \cos \zeta)).$

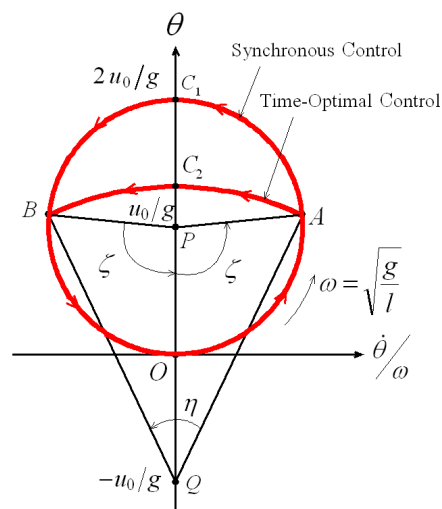


Fig.2 Swing angle phase plane of synchronous control and time-optimal control

3. 振れ計測による修正最短時間制御

搬送中に吊り荷振れ計測を行い、正確な振れ周期をもとにした位置決め制御修正と振れ制御追加動作を内容とした修正最短時間制御を提案する。すなわち、初めの加速時に同調制御を行い、ビジョンセンサを用いて振れ周期を計測する。等速時に振れ制御、減速時に最短時間制御、最後の搬送停止時に振れ制御を行う。

3.1 加速搬送時の同調制御

トロリー加速度 u_0 で搬送し、吊り荷を同調制御するときの位相面を図3に示す。P 点を中心に半径 u_0/g で反時計まわりに角速度 $\omega = \sqrt{g/l}$ で回転する。従って固有周期 T の時間だけ正しく加速度を作動させたとき振れは生じない。しかしながら、誤りの周期 T_e を使用して同調制御（誤同調）を行うと振れ振動が残る。このとき $O-A-O_1$ を誤周期の時間 T_e でまわる。トロリーが等速度または停止となると、原点 O を中心に $O-O_1$ を半径とする円をまわる振れ振動を生じる。

正しい周期 T を測るため、カメラによる計測で加速時 A 点を判定し、このときの時間が振れ周期 T の半分であることから固有周期を求めることができる。

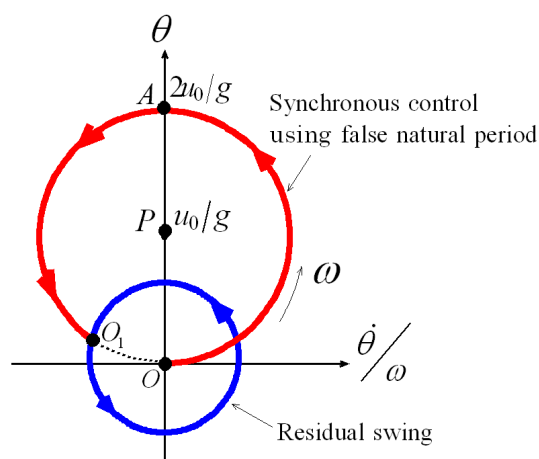


Fig.3 Synchronous control during accelerating transportation

3.2 等速搬送時の振れ止め制御

振幅 θ_V 、周期 T で振れている吊荷の振れ止め制御方法を考える。

図4は、振れ角ゼロのA点から始めB点で切り替え0点までの最短時間制御による振れ止め制御を示している。トロリーをP点の加速度 ag で t_a 時間走行, そのあとQ点の減速加速度 $-bg$ で t_b 時間走行させる。吊荷は位相面上をAからBまで t_a 時間, Bから0まで t_b 時間で移動する。

0点でトロリー速度がゼロとなる条件は、図中の角度 $\angle APB = \phi_a = 2\pi t_a/T$ および $\angle BQO = \phi_b = 2\pi t_b/T$ を用いた関係となる。

$$\frac{\phi_a}{\phi_b} = \frac{b}{a} \quad \dots (3)$$

さらに図4の位相面より角度 ϕ_a, ϕ_b は θ_v, a, b と関係することを考慮すると、図5(a), (b)のように、加速度を示す a, b 関係および位相面での角度 ϕ_a, ϕ_b 関係がそれぞれ求められる。

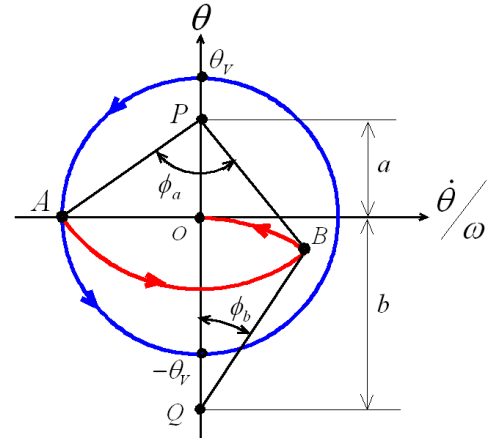
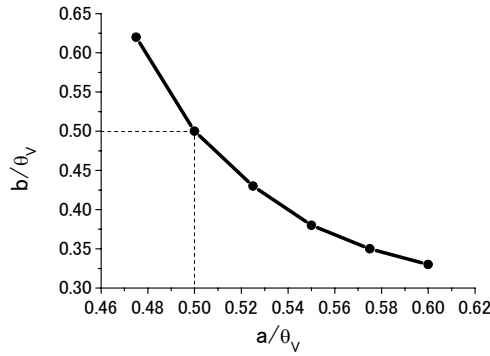
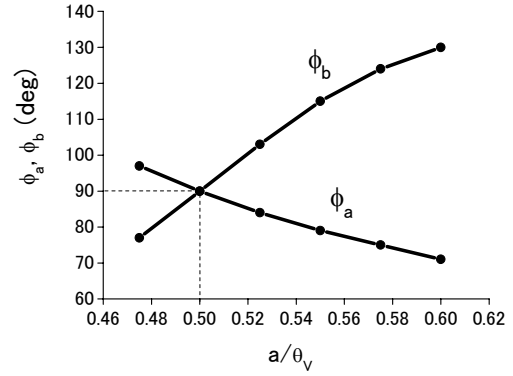


Fig.4 Swing control during constant velocity transportation



(a) Relation of b/θ_v and a/θ_v



(b) Values of angle ϕ_a, ϕ_b for a/θ_v

Fig. 5 Time optimal control for swing suppression

トロリーが等速度で搬送中に、吊り荷振れ止め制御するときの位相面を図6に示す。ここでは $a = b = 0.5\theta_v$, $\phi_a = \phi_b = 90\text{deg}$ を採用した。振幅を θ_v とする振れは、原点を中心に半径 θ_v で反時計回りに角速度 ω で回転する。カメラによる判定で振れ最大のR点を定め、この点で振れ振幅 θ_v をカメラデータより計測する。つぎに、カメラによる判定でA点を定め、振れ制御を開始する。R点として、振れが最大の R_1 点と最小の R_2 点が考えられる。いずれかは、誤同調制御終了後から計測できるまでの時間が近い方で選択する。 R_1 点で振幅を計測したあと振れ止め制御するとき、トロリーを加速・減速と操作し

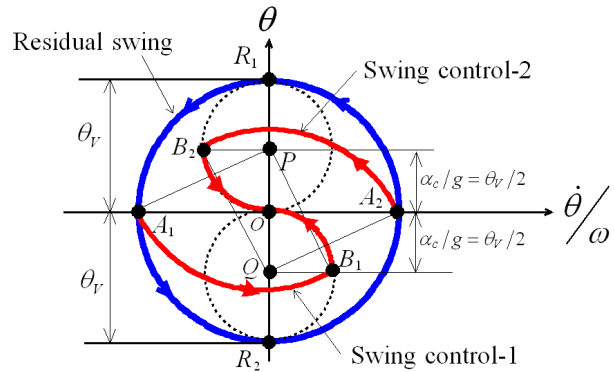


Fig.6 Swing control during constant velocity transportation when $a = b = 0.5\theta_v$, $\phi_a = \phi_b = 90\text{deg}$

て A_1-B_1-O へ変化させる． A_1 から B_1 および B_1 から O へ移動する時間は、それぞれ $T/4$ となる．
 なお、吊荷制御に伴うトロリー速度は走行等速度に比べて小さいと仮定している．この仮定では、トロリーは前進のみであり後退することはない．

3.3 減速搬送時の最短時間制御

等速搬送時に振れが防止されたとき、減速搬送時に最短時間制御するとトロリー停止後に荷振れは残らない．一方、等速搬送時の振れが残っているときや減速搬送時の最短時間制御で誤周期設定があるときはトロリー停止後も荷振れが生じる．図7に示すような残留振れがないときは、トロリーを T_ζ 時間だけマイナス加速すると位相面上は半径 QO の円を反時計回りに $O-A$ へ移動する． A 点で T_η 時間だけプラス加速に切り替えて $A-B$ へ、最後に B 点で再び T_ζ 時間だけマイナス加速させ $B-O$ へ移動させる．移動時間の合計 $2T_\zeta + T_\eta$ は同調制御より短くなる．誤同調制御や等速走行中の振れ制御がうまくいかなかったときなどは、最短減速制御において、初期振れや誤周期設定がある場合となる．

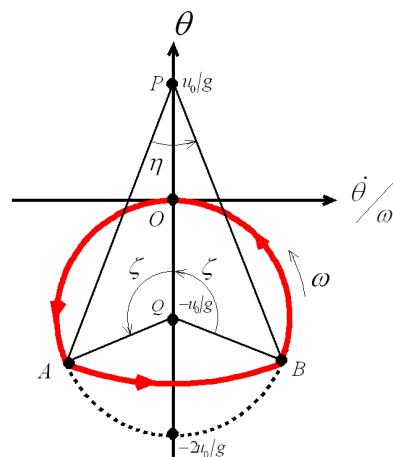


Fig.7 Optimal-time control during slowdown acceleration transportation

3.4 停止時の振れ止め制御

トロリーが停止後も荷振れが残留する場合は、振れ止め制御を行う必要がある．方法は等速搬送時制御と同じであるが、安全上、トロリー後退なしの図6の A_1-B_1-O 制御が考えられる．

3.5 トロリー制御速度

トロリーの加速度と速度を表示すると図8となる．ここで、予測振れ周期は T_a 、計測振れ周期は T_m である．なお、搬送距離は速度分布の面積である．

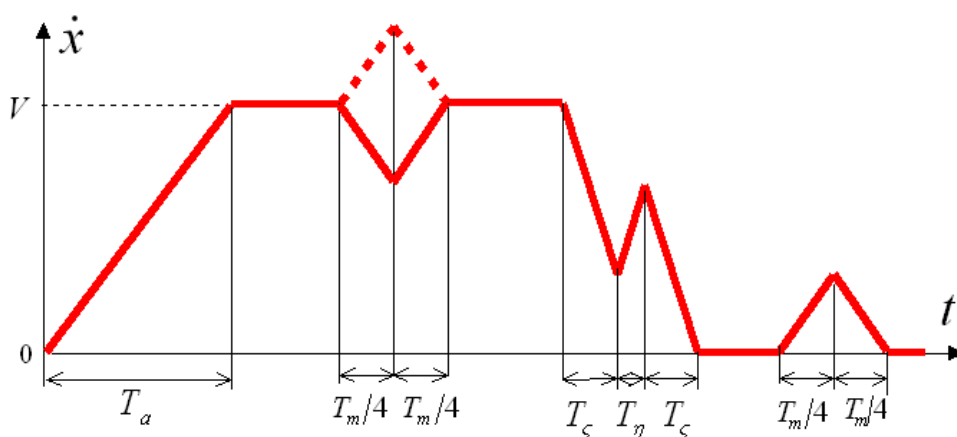


Fig.8 Trolley's control velocity

4. シミュレーションと実験

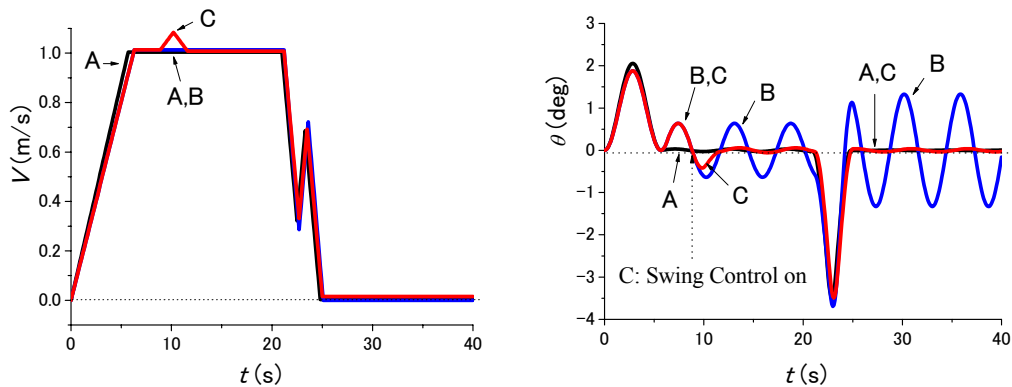
ロープ長 8m (振れ周期 5.68 s) の走行クレーンについて, 搬送距離 20m でロープ長を 120% (振れ周期 6.22 s) と予測した場合のシミュレーションを行った. サンプルタイムは 0.10 s で, $A \sim C$ の下記 3 ケースとした. ここで, 周期 5.68 s を用いたときを「正」, 6.22 s を用いたときを「誤」, 搬送中の計測周期 5.60 s を用いたときを「計測」と表示している.

A : 正同調制御 (増速時) + 正最短時間制御 (減速時)

B : 誤同調制御 (増速時) + 誤最短時間制御 (減速時)

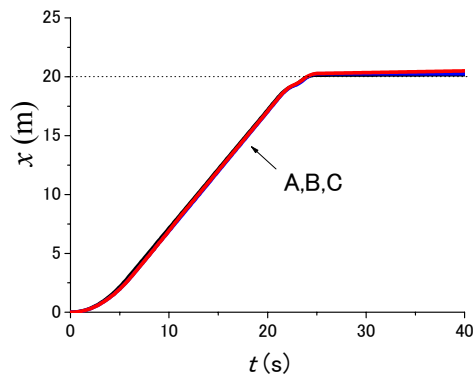
C : 誤同調制御 (増速時) + 計測振れ制御 (等速搬送中) + 計測最短時間制御 (減速時)

図 9 (a) はトロリー駆動速度, (b) は吊り荷振れ角, (c) は搬送距離である. ケース A は正しい振れ周期を用いているため, トロリー加減速時以外は吊り荷の振れは生じない. ケース B は誤った振れ周期を用いたため, 停止後も振れが続いている. ケース C では図 9 (b) より加速時の振れが 2.8 s で振れ角が最大となるため計測周期は 5.60 s となる. さらに残留振れ振幅は 7.40 s で 0.638deg となる. 従って, 図 5 の制御方式に従い, 振れ制御は 8.80 s から 10.20 s まで加速度 0.055m/s^2 で加速し, そのあと 11.60 s まで減速した. その結果, 振れは防止されていることがわかる.



(a) Trolley's velocity

(b) Payload swing angle



(c) Traveling displacement

Fig.9 Simulation results

図 10 は 3 次元カメラ^[1]を用いて停止時の振れ止め制御実験を行った結果である．ロープ長 1.67m に振れ振幅を約 7deg 与え，図 6 の制御を実験にて検証した．振れ角を計測して周期 2.40 s を求め，11.60 s ～12.80 s および 13.60 s ～14.80 s に 2 回制御している．

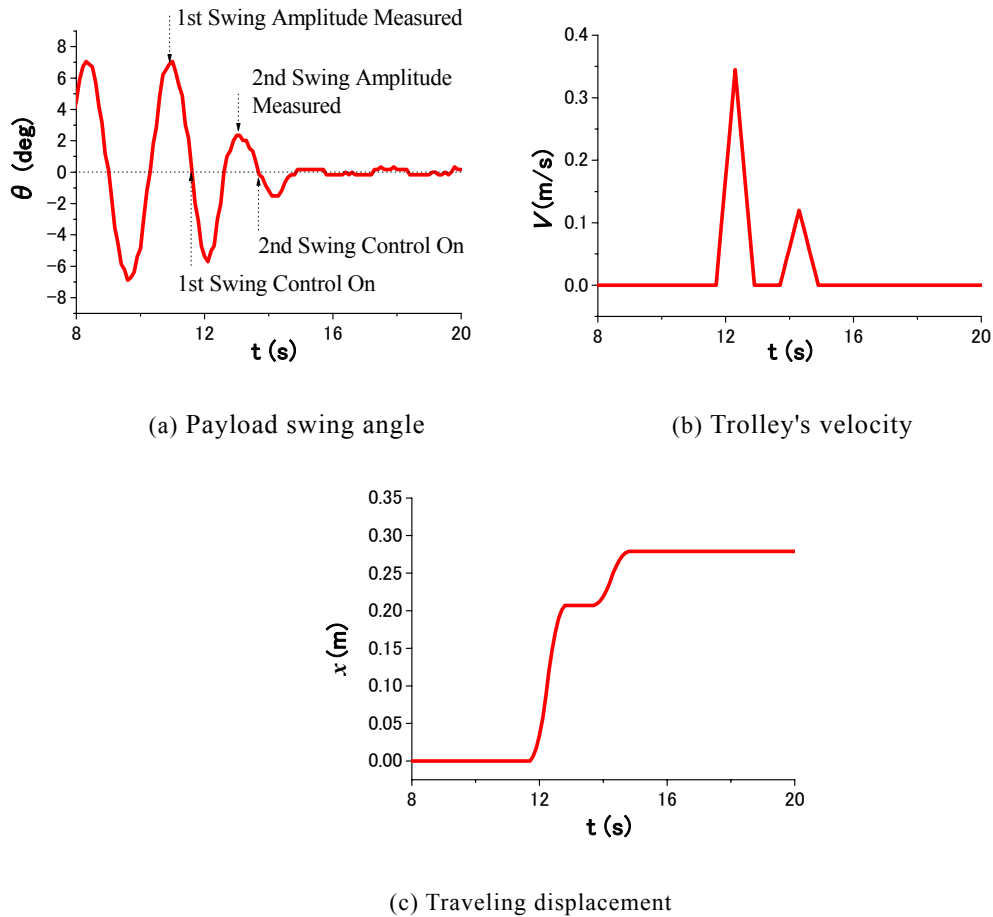


Fig. 10 Experiment of swing suppression using 3D camera

5. おわりに

搬送中の荷振れ情報とバンバン制御（最短時間制御）を用いた天井クレーン操作法について提案し，シミュレーションと 3 次元カメラによる実験によってその有用性を示した．

謝辞

本研究は中部大学総合工学研究所 平成 21 年度～22 年度の第 1 部門の援助を受け遂行されたものであり，ここに謝意を表します．

参考文献

- 1) Y. Yoshida and H. Tabata, "Visual Feedback Control of an Overhead Crane and Its Combination with Time-Optimal Control", Proc. of the 2008 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 1114-1119, Xi'an, China, 2008.
- 2) 吉田靖夫, 加藤慎吾: 荷振れ情報と最短時間制御を用いた天井クレーン操作法, 計測自動制御学会第 10 回システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 645-648, 東京, 2009.