

# リクレーマ船上のトロリクレーンの吊荷振れ止め制御

筒井 昭\*・上島 衛\*\*

\*技術開発本部・機械研究所 \*\*建設機械本部・高砂建設機械工場

## Swing Control for Trolley Cranes on Reclaiming Ships

Akira Tsutsui・Mamoru Ueshima

In this paper the swing control system of the crane apparatus on reclaiming ships is described. Bang bang control is the standard method for crane swing control. However, open loop control methods do not take into consideration the pitching of the crane apparatus. An improved open loop control method that takes into consideration the pitching of the reclaiming ship on which the crane was mounted was developed. This new method was found to be efficient for swing control in computer simulations and in actual experiments.

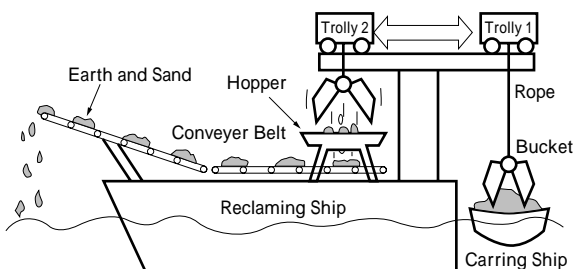
まえがき = 港湾での建設工事現場では、海底から掘り起こした土砂を港の埠頭に陸揚げしたり、別の海底にばらまいたりする作業にリクレーマ船が使用される。リクレーマ船とは、台船上に土砂把持作業をおこなうためのバケットと、バケットを運搬するためのトロリ台車、そしてバケットで把持し、運ばれてきた土砂を運搬するためのベルトコンベアから構成される土砂運搬用の作業船のことである(第1図)。大規模な埋め立て工事や、海底から掘り起こされた土砂の陸揚げ作業には、大型のリクレーマ船が必要であり、また、その作業効率を上げるためには、大容量の土砂を短時間で運搬するための技術が必要である。

本稿では、トロリクレーンによる土砂運搬作業において、作業効率を向上させるために開発した吊荷の振れ止め制御技術について紹介する。

### 1. トロリクレーンの吊荷振れ止めシステム

リクレーマ船上にトロリクレーンは2基搭載されており、1人のオペレータで作業ができるように、一方のバケットでオペレータが土砂把持作業をおこなっている間に、他方のバケットを自動運行でホッパ側に運搬するシステムが搭載されている。この自動運行によりバケットがホッパ上に運搬されたとき、振れ止めが実現されていればただちにホッパへ土砂を落とす作業に移れるため、作業時間が短縮可能である。

トロリクレーンなど、直線走行方式のクレーン装置の吊荷の振れ止め制御方法については、いくつかの手法が



第1図 リクレーマ船の概略図  
Fig. 1 Reclaiming ship

提案・実用化されているが、大きく分けて以下の二つの方法に分類される。

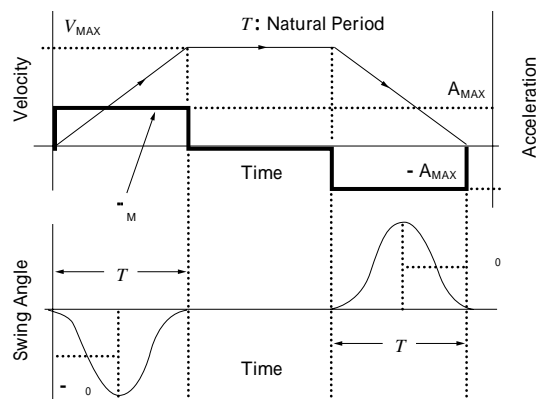
- 吊荷の振れ角度情報をもちいるフィードバック制御
  - 吊荷の振れ角度情報をもちないオープンループ制御
- 今回検討した吊荷の振れ止め制御には、後者のオープンループ制御を採用することにした。理由は以下のとおりである。

作業環境が屋外であるために、吊荷の振れ角センサの搭載に問題点があること。

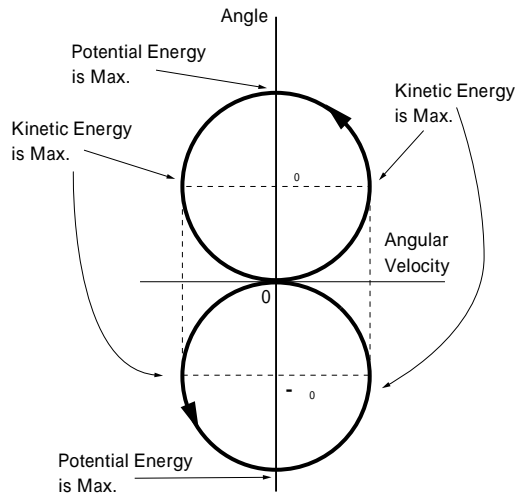
土砂把持作業のとき、バケットが土砂運搬船上に接地しており、かならず吊荷の振れ角度が零の初期条件から振れ止め制御を開始できるので、振れ角センサがなくても振れ角度を予測できること。

### 2. 従来の吊荷の振れ止め制御

従来から、吊荷の振動をオープンループで制御する方法として、最短時間制御(バンバン制御)が有効であることが提案されている<sup>1)</sup>。これはクレーン系を単振り子とみなし、第2図のようにトロリをあらかじめ演算した速度パターンもしくは加速度パターン $M$ で走行させると、第3図のように、固有周期 $T$ で吊荷の振れ角度と角速度の関係が $\theta_0$ を振れ角中心とした円を描き、加減速終了時に吊荷の振れが零となることを利用したもの



第2図 吊荷の振れとトロリの速度・加速度パターン(1)  
Fig. 2 Swing of load and patterns of trolley's velocity and acceleration (1)



第3図 位相平面軌跡図(1)  
Fig. 3 Phase plane trajectory (1)

である。いいかえると、吊荷の位置エネルギーと運動エネルギーが、式(1)で求められる固有周期  $T$  ごとにトレードオフを繰り返す性質を利用した吊荷の振動制御方法である。

$$T = 2 \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (L: \text{ロープ長}, g: \text{重力加速度}) \dots (1)$$

また、最高速度の上限は存在するが、トロリの機械的性能が優れており、第2図の速度パターンよりも大きな加速度が出せる場合には、第4図のように加減速を何段階か繰り返すことで、吊荷の固有周期  $T$  よりも短い時間と小さな振れ角度で、吊荷の振れが零となるように制御できる。

このようにバンバン制御は、実際のシステムの仕様に応じて加速度パターンまたは速度パターンを設定することで、そのシステムが持つ能力の範囲内でもっとも短時間で目標位置にトロリを移動させ、しかも吊荷の振れ止めが実現できる特徴を持っている。

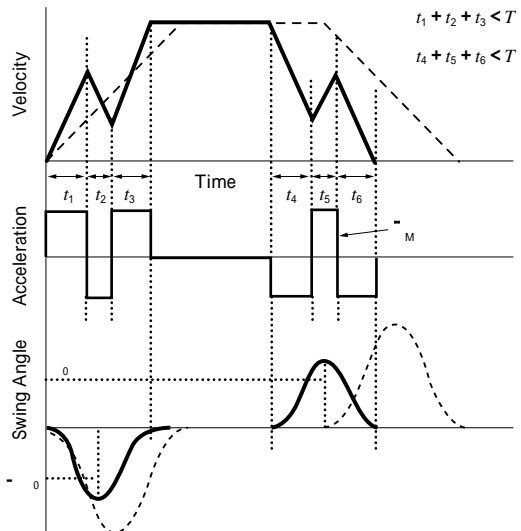
しかし、工場内などに設置されている通常の天井走行クレーンとは異なり、リクレーマ船上のクレーン装置は、船体が揺動することによりクレーン装置自体が揺動するため、バンバン制御をそのまま適用しても吊荷の振れ止めは実現できない。その理由は以下のとおりである。

(A) 船体揺動によりクレーン系に水平方向の加速度成分が加わるため、絶対座標から見るとトロリは目標加速度  $\ddot{y}_M$  ではなく、外乱成分を含んだ加速度  $\ddot{x}_M$  で横行することになる。また、鉛直方向の加速度成分  $\ddot{y}_M$  も加わるので、第3図や第5図の位相平面軌跡が描く円の中心位置  $0$  が  $0_{OW}$  に変化し、それに伴って位相平面軌跡も変化してしまう。これによりトロリの加減速が終了したときに位相平面軌跡が原点  $0$  に戻ってこれなくなり、制御終了時に吊荷系のエネルギーが零にならなくなる。

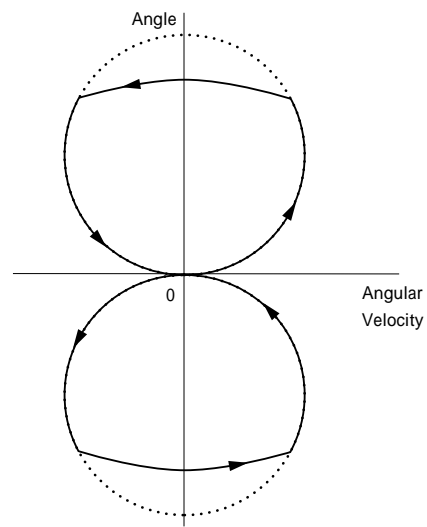
$$0 \quad \frac{\ddot{x}_M^2}{g^2 + \ddot{y}_M^2} \dots (2)$$

$$0_{OW} \quad \frac{\ddot{x}_M^2}{(g + \ddot{y}_M)^2 + \ddot{x}_M^2} \dots (3)$$

(B) また、クレーン系に加わる鉛直方向の加速度成分



第4図 吊荷の振れとトロリ velocity パターン(2)  
Fig. 4 Swing of a load and a pattern of a trolley's velocity (2)



第5図 位相平面軌跡図(2)  
Fig. 5 Phase plane trajectory (2)

$\ddot{y}_M$  は、吊荷の固有周期  $T$  を式(4)のように変化させてしまう。これにより、位相平面軌跡があらかじめ速度パターンを設計したときに設定していた時間で描かれなくなり、トロリが速度パターンにしたがって走行終了したときに、位相平面軌跡が原点  $0$  に戻ってこないか、または通り過ぎてしまったりして、制御終了時に吊荷系のエネルギーが零にならなくなる。

$$T = 2 \sqrt{\frac{L}{g + \ddot{y}_M}} \dots (4)$$

### 3. ピッチング揺動を考慮した振れ止め制御

前章の(A)(B)両者の問題に共通していることは、吊荷が規則的にトレードオフをおこなっているエネルギー保存の系に、揺動外乱によって余分なエネルギーが加えられ、位相平面上で吊荷の振れの推移が予測できなくなってしまうということである。吊荷の振れについてオープンループで振れ止め制御をおこなうためには、この問題を解決しなければならない<sup>2)</sup>。

この問題を解決する方法としては、揺動外乱が存在す

る場合でも、揺動が存在しない場合と同様の位相平面軌跡を描くように、トロリの加速度パターンを設計すればよい。

そこでまず(A)の問題の対策としては、位相平面軌跡が描く円の中心位置が揺動外乱が存在する場合でも、揺動がない場合の中心位置 $\phi_0$ と同じ位置になるようにする。これは式(2)=式(3)とすることで、中心位置 $\phi_{0W}$ を $\phi_0$ に保持するために必要なトロリの加速度を式(5)で導出でき、この加速度をトロリの水平方向の目標加速度 $\ddot{X}_{MW}$ と考へて積分演算し、目標速度 $\dot{X}_{MW}$ として、実際のトロリの水平方向速度成分 $\dot{X}_M$ をセンシングして速度のフィードバック制御をおこなうことで実現できる。

$$\ddot{X}_M = \frac{g + \ddot{Y}_M}{g} \ddot{X}_{MW} \dots\dots\dots (5)$$

以上の処置で、揺動外乱が存在する場合でも位相平面軌跡は第3図や第5図のように描かれる。ただし、軌跡を描く時間は変化する。

つぎに(B)の問題の位相平面軌跡を描く時間の変化に対する対策としては、トロリの目標加速度パターンを時刻で切替えるのではなく、目標加速度を位相平面軌跡の状態 $\phi^*$ (第6図)に応じて第7図の加速度パターン $\ddot{X}_M(\phi)$ のように切替えれば、時間変化に関係なく、良好な振れ止め制御が可能である。

トロリの目標加速度の切替えタイミングとなる各状態 $\phi^*$ は、揺動が存在しない場合の位相平面軌跡図をもとに計算できる。この計算で導出した各 $\phi^*$ と、トロリの鉛直方向加速度センサの検出情報をもとに式(6)で算出される実際の $\phi$ とを比較して、トロリの加速度を切替える。

$$\phi = \int \sqrt{\frac{g + \ddot{Y}_M}{L}} dt \dots\dots\dots (6)$$

従来のバンバン制御に対し、今回検討した各制御方法を付加した制御系のブロック線図を第7図中に示す。

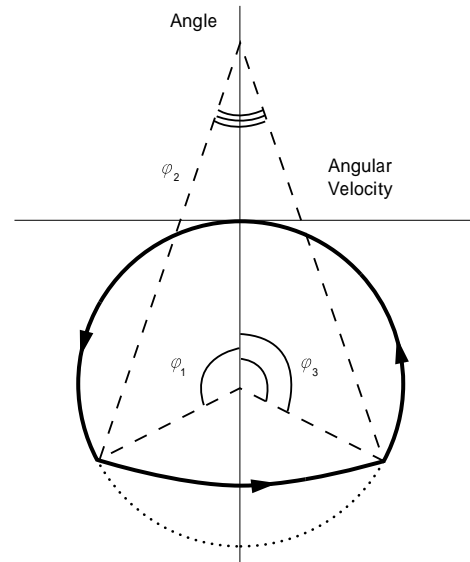
#### 4. 吊荷のロープ巻上げ動作

今回検討したトロリの自動走行制御では、トロリが加速中に吊荷のロープをある長さまで巻き上げながら走行する作業<sup>3)</sup>を前提として、トロリの加速度パターンを検討した。第6図において吊荷のロープ長が一定である場合は $\phi_1 = \phi_3$ となるが、ロープ長が変化する場合第8図のように $\phi_1 \neq \phi_3$ となる。制御中の状態量 $\phi$ の計算においても、ロープ長センサの検出情報 $L$ を式(6)に代入して計算し、その状態量 $\phi$ に応じてその加速度パターンを切替える必要がある。このとき、吊荷の振れの位相平面軌跡は第8図のようになる<sup>4)</sup>。

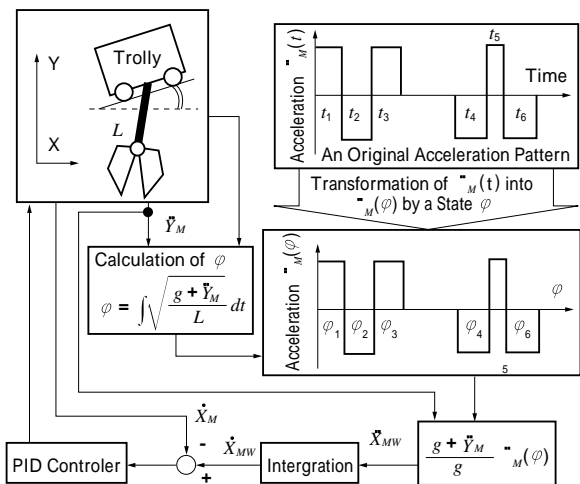
#### 5. シミュレーションによる有効性の検討

前述の制御方法の有効性を確認するため、第9図で示すシミュレーションモデルをもちいて、従来のバンバン制御による吊荷の振れ止め制御をおこなった場合と、今回検討した方法で制御をおこなった場合の比較をおこなった。

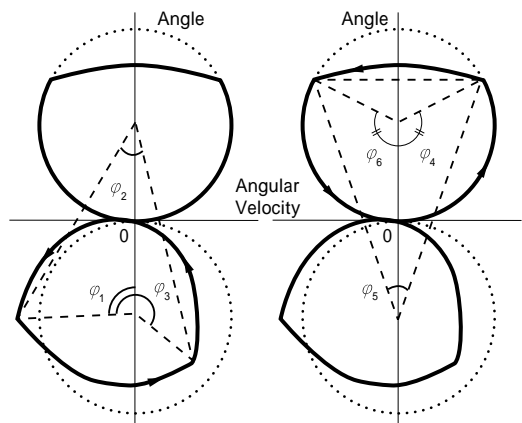
まず、船体揺動がない場合の吊荷の振れ止めシミュレ



第6図 位相平面軌跡中の状態量 $\phi$   
Fig. 6 States  $\phi$  in a phase plane trajectory



第7図 制御システムのブロック線図  
Fig. 7 Block diagram of this control system



第8図 位相平面軌跡図(3)  
Fig. 8 Phase plane trajectory (3)

ーションをおこなったところ、吊荷の振れ止め結果は第10図のようになり、両制御方法とも良好な振れ止めが実現できていることがわかるが、若干、吊荷の挙動に差が見られる。これは、今回検討した制御方法において、目標加速度パターンの切替えタイミングにもちいている状態量 $\phi$ の演算式(6)が、近似計算であるために発生



(Running Trolley with Winding Ropes)



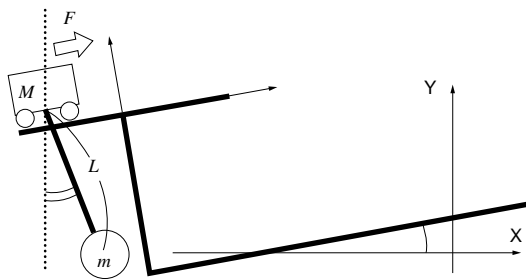
(Swing Control Over a Hopper)



(Bucket Open)

写真 1 自動制御実験の様子

Photo.1 Experiment of automatic control



$M$ : Mass of Trolley       $m$ : Mass of Load

: Swing Angle       $F$ : Force for Trolley

: Pitching Angle of Reclaiming Ship

第 9 図 シミュレーションモデル

Fig. 9 A simulation model

した誤差である。

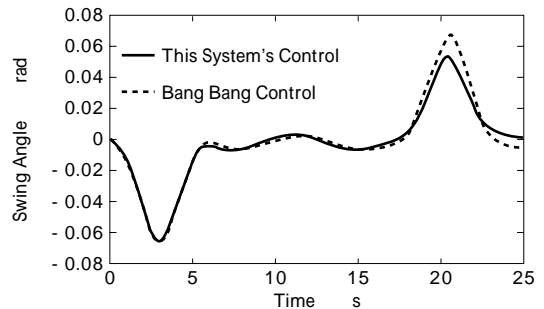
つぎに、船体が  $\pm 0.9$  度で 4 秒周期のピッチング揺動をしている場合についてシミュレーションをおこなったところ、吊荷の振れ止め結果は第 11 図のようになり、今回検討した制御方法のほうが、良好に振れ止めがおこなえていることがわかる。このとき、船上でのトロリの速度と、絶対座標から見た水平方向速度  $\dot{x}_{MW}$  と、ロープ巻上げの状態  $L$  を示したものが第 12 図である。

## 6. 実機実験

今回紹介した制御方法は、当社が上市したリクレーマ船 KB3500 に搭載されており、その開発段階でおこなった実験風景の様子を写真 1 に示す。

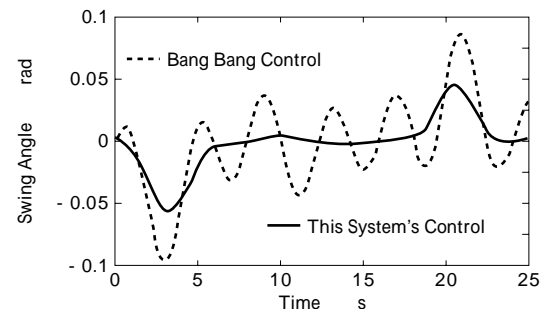
従来は、ホッパ上でトロリが停止してバケットの振れが残留した場合、バケットの振れがおさまるまで、数秒から十数秒以上作業を中断するか、もしくは操縦者の手動で振れ止めをおこなうなど、作業時間のロスがあった。しかし今回の自動振れ止め制御を搭載することにより、この作業時間のロスをなくすことができるようになった。

むすび=本稿では、クレーン装置自体がピッチング揺動することを想定して、従来のバンバン制御をアレンジした吊荷の振れ止め制御方法について検討した。低コストで、悪条件的环境下でも使用できる吊荷の振れ角センサが使用できればフィードバック制御を採用することが望ましいが、今回のシステムの場合のように、限られた条件下でシステムの性能を向上させる技術確立していくことも重要である。



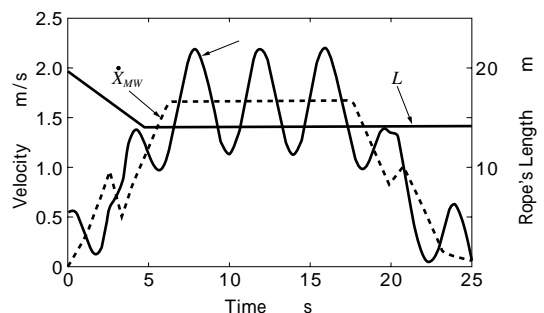
第10図 吊荷の振れ止め結果

Fig. 10 Results of swing control



第11図 ピッチング揺動がある場合の吊荷の振れ止め結果

Fig. 11 Results of swing control with pitching of a crane apparatus



第12図 トロリの速度とロープ長

Fig. 12 Trolley's velocity and rope's length

## 参考文献

- 1) 古田勝久：メカニカルシステム制御 (1984), p.203, オーム社。
- 2) 筒井 昭ほか：リクレーマ船のトロリクレーン自動運行装置, 第 75 期通常総会講演会講演論文集 ( 1998 ), p.394 .
- 3) 中尾通夫ほか：ケーブルクレーン自動制御システム, 第 38 回自動制御連合講演会前刷 (1995), p.489 .
- 4) 太田光雄ほか：自動制御 (1988), p.168 朝倉書房。