自動着床制御を用いたトランスファークレーン
自動運転システムの開発*千 蔵 孝^{*1}, 山 本 元 司^{*2}
門 前 唯 明^{*1}, 内 田 浩 二^{*1}

Development of Automated Transfer Crane in a Port Container Yard

Takashi CHIKURA^{*3}, Motoji YAMAMOTO,
Tadaaki MONZEN and Koji UCHIDA^{*3} Hiroshima Research & Development Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.,
5-1 Eba-oki-machi, Naka-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima, 730-8642 Japan

In a port container yard, rubber tired gantry crane (RTG) are majority which perform handling the container from a chassis to a yard, or from a yard to a chassis. It has been very difficult to realize automated RTG, because RTG is a large low rigidity crane mounted on rubber tires. We developed new technologies. (1) Image sensors installed at corners of spreader to detect container position directly by the CCD camera. (2) Automatic landing control, anti-skew control, sway velocity observer system. We converted into actual automated RTG and experiment automatic operation system. As a result, we obtained the utilization prospect of automated RTG.

Key Words: Port Container Yard, Transfer Crane, RTG, Automatic Operation, Image Sensor, Landing Control, Anti-Skew Control, Observer System

1. まえがき

我が国の貿易のほとんどは海上コンテナ輸送されており、港湾コンテナターミナルは日本経済の重要な拠点となっている。港湾コンテナターミナル内には、コンテナを一時保管するためのコンテナヤードがあり、荷役機械としては、コンテナの多段積みが可能でかつ機動性のあるタイヤ式門型トランスファークレーン

(RTG, Rubber Tired Gantry Crane) が多く用いられている。この RTG によって、シャーシ上のコンテナを掴んでコンテナヤードに蔵置する、またはコンテナヤードに蔵置されているコンテナを掴んでシャーシ上に載せる、といった荷役作業が行われている。本荷役作業に対しては、高速化・効率化が望まれており、運転手の作業負担がますます高くなっている。そのため、RTG の自動化に対するニーズが高い。

コンテナクレーンの自動化に関して、特に振れ止め制御技術についてはこれまでいくつかの研究がなされている^{(1)~(4)}。また、コンテナクレーンシステム全体に関しては、レール式門型トランスファークレーン (RMG, Rail Tied Gantry Crane)⁽⁵⁾、またコンテナ用岸壁クレーン⁽⁶⁾について、ある程度の自動化システ

ムがすでに実用化されているものの、RTG は 100ton 以上あるクレーン本体をラバータイヤで支えているため、クレーンの運動や変形が発生しやすく、自動でのコンテナ段積みの精度確保が難しいため、これまで実用化に至っていない。

今回、この問題を解決するために、(1)コンテナ段積み目標位置を検出する画像処理システムおよびこの目標位置への自動着床制御手法の提案、(2)電動シリンドラを用いたコンテナスキュー (水平面内回転) 振れ止め・位置決め制御手法の提案、(3)さらに、コンテナの巻き上げ、トロリによる横行搬送、巻き下げといった、巻き・横行の位置制御の組み合わせによる全体システムの構築によって、トランスファークレーン自動運転システムを実現した。

本論文ではまず、開発した自動運転システムの概要を説明し、この自動化技術の核となるコンテナ自動着床制御手法を提案する。さらに、この自動運転システムを搭載したクレーンによる実験結果を示す。

2. 自動 RTG の概要

開発した自動 RTG の概略構成を図 1 に、主仕様を表 1 に示す。自動 RTG は、従来の標準的な手動 RTG に自動化用センサおよび制御装置を追加することで実現した。RTG の基本動作は、走行、横行、巻きである。走行とは、クレーン全体がヤード内をタイヤ走行

* 原稿受付 2004 年 3 月 15 日。

^{*1} 正員、三菱重工業(株) (☎ 730-8642 広島市中区江波沖町 5-1)。^{*2} 正員、九州大学大学院工学研究院 (☎ 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

E-mail: takashi_chikura@mhi.co.jp

Fig. 1 Overview of automated RTG

Table 1 Specification of automated RTG

Type	6Row+1Chassis lane, 4Tier+1Clear	
Length	Span	23.47 m
	Height	18.89 m
Container	Weight	40.6 ton
	Type	ISO Conformity, 20/40/45 ft
Speed	Hoist	23~52 m/min
	Trolley	70 m/min
	Gantry	135 m/min

することである。横行とは、クレーン最上部のトロリがガーダ上を移動してコンテナを搬送することである。巻きとは、トロリ上のドラムでコンテナ専用吊具であるスプレッドを巻き上げ下げすることである。これらの動作によって、例えば、図2に示すような荷役作業を行う。図1に示した各機器について説明する。マジックアイは、コンテナの段積みを高精度に行うために開発した、吊コンテナと目標コンテナの相対ずれ量を検出する画像処理システムである。詳細は3.1節で説明する。振れセンサ⁽⁷⁾は、スプレッド上のレーザ光源をカメラで捉え、吊荷の横行振れ、スキュー振れ、走行振れを検出し、振れ過大による隣接コンテナとの衝突監視、スキュー振れ止め制御を行う。また、マジックアイが使用できない時のバックアップに利用する。スタックプロファイルセンサは、各Row(列)のコンテナ高さを検出し、横行中の安全かつ最短な吊荷の経路生成や、目標コンテナ高さの認識に利用する。衝突防止センサ(隣接コンテナ隙間センサ)は、隣に段積みコンテナがある場合の巻上げ中の衝突防止インターロックを行う。オートステアセンサは、自動直線走行するために、磁気ガイドラインからのずれ量を検出し、オートステアリング制御用のフィードバック信号とする。ベイセンサは、自動走行位置決め

Fig. 2 Automatic container handling trajectory

するために、埋設磁石であるベイマークを検出し、走行エンコーダと併用して自動走行位置決め制御用使用する。

運転手は、例えば、コンテナをRow(列)1, Tier(段)2に段積みする、というジョブを選択し、自動開始鈕を押す。すると、制御PCはこれらを受信して、一連の自動運転指令を出力する。すなわち、ツイストロック(スプレッドがコンテナを掴む)、巻上げ、横行、巻下げ、着床の各動作指令を出力し、RTGを例えば図2のように自動で動かす。図中のOptimal trajectoryとは、スプレッドの安全かつ最短な経路である。スタックプロファイルセンサで検出したコンテナの積山高さをもとに、この高さをクリアするための必要最小限の巻上目標高さ、および巻上中に仮に横行非常停止でコンテナが振れても積山に衝突しない最も早い横行開始タイミングをもとに決定している。なお、横行開始タイミングは、巻上開始時に単振り子近似の横行シミュレーションを行い、最短のタイミングを探索して決定している。

なお、本説明は、ジョブの種別がヤードグランドの場合である。その他に、コンテナをシャーシ上に載せるシャーシグラント、スプレッドのみ移動させヤード内のコンテナを掴むヤードピック、スプレッドのみ移動させシャーシ上のコンテナを掴むシャーシピック、所定のコンテナ積み付け場所まで走行するガントリームープも自動で動かすことができる。

3. 自動化技術

3.1 マジックアイによる相対ずれ検出

クレーンの遠動や変形がある中で、吊コンテナをヤードに蔵置されたコンテナ(目標コンテナ)の上に正確に積み付けるためには、図3左上に示すように、吊コンテナと目標コンテナとの相対的な位置ずれ量

(相対ずれ)を検出する必要がある。この相対ずれを精度よく検出するために、マジックアイ (MagicEye, Mitsubishi Advanced Graphical Image—device for Crane EYE) を開発した。マジックアイは、図3に示すようにスプレッド前側の左右のコーナに設置される。マジックアイは、CCDカメラと夜間用照明から構成され、CCDカメラで取り込んだスプレッド下の映像を基に、画像処理装置により目標コンテナ上面のエッジと吊コンテナ下面のエッジを検出し、両者の相対ずれ量を算出する。精度は、CCDカメラの分解能である2mmで、検出処理時間は100msecである。

3.2 自動着床制御

前述したように巻き下げ時に、マジックアイで相対ずれ量を検出し、この相対ずれ量をもとに、これをゼロにするべく吊荷位置制御を開始する。なお、相対ずれ量は、目標コンテナ位置を基準とした吊コンテナの絶対位置なので吊荷位置と同意である。

位置合わせを行うと、相対ずれが無くなるので、マジックアイからは目標コンテナ上面のエッジが見えなくなる。そのため、位置合わせを行う前には、マジックアイによる相対ずれ量をもとに、振れセンサの信号である振れ変位を校正し、相対ずれ量と等価な信号

を生成する。すなわち、トロリ位置と振れ変位を足し合わせたトロリ座標系の吊コンテナ位置に、両者を同時検出した時の差であるオフセットを加えることで、相対ずれ量と等価な信号を生成できる。

以降は、この相対ずれ量等価信号を使い、相対ずれが完全にゼロとなるように吊荷位置制御を行う。吊荷位置制御は、図4の単振り子モデルをもとに設計する。図中、 m は吊荷質量、 ℓ はロープ長、 x は振れ変位、 x_1 はトロリ位置、 x_2 は吊荷位置である。図4をもとに、式(1)の単振り子の運動方程式を導出する。トロリ速度の動特性については、吊荷振れ周期に比べて十分速いので、式(2)に示す簡素な1次遅れで近似する。 T_1 は1次遅れ時定数である。そして、式(1)と式(2)から、式(3)に示す状態方程式を導出し、式(4)に示す重み行列を Q , R とする評価関数を設定して、図5および式(3)に示す、吊荷位置をゼロにする積分型最適制御として設計する。なお、 Q , R は、式(3)の状態方程式を基にリカッチ方程式を解いて最適ゲインを算出するツールの中で、制御系シミュレーション機能も付加し、本シミュレーションによって調整し決定する。なお、後述する着床巻き下げ制御の最中も吊荷位置制御を行うので、ロープ長をリアルタイムに検出して振れ周期を算出し、振れ周期の変化に対応した可変ゲイン制御とする。可変ゲインについては、振れ周期と予め求めた最適ゲインのテーブルから、補間計算により求める。

Fig. 3 Relative position detect system by Magic Eye

Fig. 4 Motion model of a pendulum

$$m \ddot{x}_2 = -mg \frac{x_2 - x_1}{\ell} \quad \dots (1)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{1 + T_1 s} u \quad \dots (2)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} u \quad \dots (3)$$

$$\mathbf{x} = [x_1, \dot{x}_1, x_2, \dot{x}_2, \int x_2 dt]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \omega^2 & 0 & -\omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J = \int (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{R} u^2) dt \quad \cdots (4)$$

$$u = k_1 x_1 + k_2 \dot{x}_1 + k_3 x_2 + k_4 \dot{x}_2 + k_5 \int x_2 dt \quad \cdots (5)$$

Fig. 5 Load position optimum control

吊荷位置が、許容値以下で振れ停止状態になるか、または振れている状態であっても、着床寸前状態から着床までの時間が振れ周期の1/10程度であるので、着床時の吊荷位置を以下の式(6)に示すように現在速度が着床予想時間まで継続すると近似して、この予測値が許容値以下になると判断したら巻下げて着床させる。ここで、 t は着床までの予想時間とすると、吊荷位置予測値 $\hat{x}_2$ を

$$\hat{x}_2 = x_2 + \dot{x}_2 \cdot t \quad \cdots (6)$$

で見積もる。 x_2 は現在の吊荷位置、 $\dot{x}_2$ は現在の吊荷速度である。予想時間は、レーザー距離計で測定した相対高さを、所定の着床巻下速度で割ることによって求める。コンテナ幅244mmに対し、幅方向に許容値 $\pm 25\text{mm}$ 、すなわち $\pm 1\%$ 以下で段積みする必要があるため、各状態量は高精度で検出する必要がある。特に、 $\dot{x}_2$ は検出値 x_2 の微分値なのでノイズが問題になる。この対策として次節で述べるオブザーバを設計する。

3.3 オブザーバによる振れ速度検出

前節で述べたように、自動着床制御では、吊荷速度を使って着床時の吊荷位置を予測する。しかし、直接検出できるのは吊荷位置であり、吊荷速度は吊荷位置を微分して求める必要がある。このとき、吊荷速度はトロリ速度と振れ速度に分解できる。トロリ速度は

トロリ駆動用モータの速度フィードバック値より得られるが、振れ速度は振れセンサ検出値である振れ変位から微分して求める必要がある。しかし、単純に数値微分するとノイズが大きく、フィルタをかけると位相遅れが生じる。そこで、ノイズが小さく、かつ位相遅れも小さい、高精度な振れ速度検出方法としてオブザーバを採用する。図4中に示した単振り子モデルを式変形すると(7)式となり、状態方程式で表すと式(8)となる。各変数は図4に示した通りである。

$$\ddot{x} + \omega^2 x = -\ddot{x}_1 \quad \cdots (7)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}' \mathbf{x} + \mathbf{B}' \ddot{x}_1 \quad \cdots (8)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}' = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}' = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

式(8)に基づいて振れ速度を推定するオブザーバを図6に示す。本オブザーバを式表現すると式(9)となる。 $\mathbf{k}$ はオブザーバゲインである。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}' \mathbf{x} + \mathbf{B}' \ddot{x}_1 + \mathbf{k} \mathbf{C} (x - \hat{x}) \quad \cdots (9)$$

$$\mathbf{C} = [0 \quad 1]$$

ここで、単振り子モデル $\mathbf{A}'$ 、 $\mathbf{B}'$ はロープ長に応じてリアルタイムに変化させる。オブザーバゲイン $\mathbf{k}$ は、制御対象である単振り子モデルの特性根よりも、オブザーバ全体の特性根の方が複素平面上で左側、すなわち応答性が速くなるように決定し、固定値とする。本オブザーバを実機に組み込み、振れ速度検出を行った結果を図7に示す。ノイズ、位相遅れともに小さいことを確認した。なお、本オブザーバで検出した振れ速度は、式(6)の予測式で使うと共に、式(5)の吊荷位置制御においても使用する。

Fig. 6 Estimating sway velocity by observer

Fig. 7 Experiment of estimating sway velocity

3.4 スキュー振れ止め制御

風やコンテナの偏荷重によって、コンテナが水平面上で旋回するスキュー振れや、静的スキューが発生し、コンテナがねじれて段積みされる⁽⁸⁾。スキュー振れ止めと静的スキュー除去を自動で行うため、ハードウェアとしては、トロリ上の既存の小旋回装置のスキューシリンダをサーボドライブ化し、スキューシリンダによる主巻ロープの引き込み／繰り出しを行って、スキュー振れ止め制御を行う。制御の概要を図8に示す。まず、振れ止め PID 制御によって、スキュー角度をフィードバックして、スキュー振れ止めを行うべくシリンダ目標位置を算出する。D 制御で減衰を付加し、PI 制御で静的スキューを除去する。そして、シリンダ位置の比例制御によって、シリンダ目標位置に追従するようにシリンダ速度指令を出力する。

制御演算式を式(10)に示す。 θ はスキュー角度、

K_P, K_I, K_D は各々 PID ゲイン、 P_{ref} はシリンダ目標位置、 P_{fbk} シリンダ位置 FB、 K_C はシリンダ位置制御ゲイン、 v_{ref} はシリンダ速度指令である。

本スキュー振れ止め制御を実機に組み込み、スキュー振れ止めを行った結果を図9に示す。スキュー初期振れに対して、約 20%減衰で振れ止めできることを確認した。ところで、シリンダ変位を入力とし、スキュー角度を出力とする制御対象は、2次振動モデルで近似できる。そこで、この2次振動モデルに対して吊荷位置制御の場合と同様に積分型最適制御を設計し、PID ゲインの相当する3つの最適ゲインを得た。ただし、近似モデルに基づく最適ゲインなので、現場で微調整して PID ゲインとする。本 PID ゲインも吊荷位置制御の場合と同様、ロープ長変化に対応した可変

Fig. 8 Anti-skew control

$$\left. \begin{aligned} p_{ref} &= K_P \theta + K_D \dot{\theta} + K_I \int \theta dt \\ v_{ref} &= K_C (P_{ref} - P_{fbk}) \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

Fig. 9 Experiment of anti-skew control

ゲインとする。なお、横行方向の吊荷位置制御とは独立にスキュー制御を行っているため、互いに干渉して制御性を劣化させることはない。また、横行方向、スキュー方向以外にも、タイヤ走行時には走行振れが生じるが、走行中は安全のため最上まで巻き上げるため、振れは僅かで、走行振れ止めは現状必要としていない。

4. 実機検証試験

名古屋港のコンテナターミナルにおいて、自動 RTG の実機検証試験を行った。その時に実施した自動運転のパターンを図10に、実測波形を図11に示す。図10と図11の図中に①～⑥の各動作を記す。①は自動巻上げである。ヤード傾斜が図10の左右方向に 1/100 程度あるので、隣接コンテナに衝突しないように、微小横行させながら傾斜に沿って巻上げる。また、スプレッドに横向きに設置した超音波センサによる衝突防止も行っている。

②は自動横行である。スタックプロファイルセンサでコンテナ積山高さを検出し、蔵置コンテナに衝突しない安全かつ最短な最適経路に沿って行く。また、標準装備の機械式振れ止め装置及び吊コンテナの振れ周期の整数倍の時間で加減速する振れ止め速度パターン⁽⁹⁾により、吊コンテナの振れ止めを行いながら横行する。横行目標位置への位置決めは、トロリの現在位置と目標位置との偏差をゼロとする位置フィードバック制御により行う。

③は自動巻下げで、①の自動巻上げと同様である。

④はマジックアイから吊コンテナに隠れることなく目標コンテナ上面エッジをとらえることができるように、相対ずれを作る横行シフトである。

⑤はマジックアイにより検出した相対ずれ量を用いて、吊コンテナを目標コンテナ真上に位置合わせする吊荷位置制御である。相対ずれが無くなると、マジックアイからは目標コンテナ上面のエッジが見えなくなるため、吊コンテナの振れを検出する振れセンサを併用して、最後まで相対ずれが検出できるようにする。

また、コンテナ端左右両方の位置合わせを行うために、スキュー制御も行う。

⑥は着床巻下げ制御である。相対ずれが許容値以下で振れ停止状態となるか、または、オブザーバによって求めた吊荷速度で着床時の相対ずれ予測値を求め、これが許容値以下になったら、巻下げて着床させる。以上の結果、図 11 に示すように、着床信号 ON のタイミングでコンテナ左右両端の相対ずれ量は数 mm であり、許容値 $\pm 25\text{mm}$ 以下で段積みさせることができた。ここで、Skew angle, Sway に偏差が残っているのは機体が斜めにずれて停止しているためである。ただし、この程度の偏差は上記の許容値以内となり、着床作業に問題は生じない。

Fig. 10 Experiment of automated RTG

Fig. 11 Measurement time chart

5. あとがき

港湾コンテナヤードで多く使われている、タイヤ式門型トランスファークレーン (RTG) に対し、目標コンテナと吊コンテナとの相対ずれ量を、CCD カメラと画像処理により検出するマジックアイを開発する。また、この相対ずれ量を使って、目標コンテナ上に高精度に段積みさせる自動着床制御を開発する。自動着床制御においては、吊荷位置の積分型最適制御とスキュー振れ止め制御によって、コンテナ左右両端の相対ずれ量をゼロにし、オブザーバによる着床時の吊荷位置予測によって着床巻下げし段積みするようにする。これらの技術を搭載して、従来の RTG を自動化改造し、H15/4 に名古屋港コンテナターミナルにおいて自動運転実機試験を行った。その結果、コンテナ左右両端の横行方向の段積み精度 $\pm 25\text{mm}$ 以内を達成した。現在、試験的ではあるが実荷役に使用できるほどの完成度となっている。ただし、サイクルタイム、信頼性において、例えば、着床精度が $\pm 25\text{mm}$ を超えた場合、着床制御リトライで約 15 秒の時間延長が発生する等、まだ多くの課題もあり、今後も引き続き性能向上を図ってゆく予定である。

参考文献

- (1) 佐久本政和・林亨, ファジィ制御のコンテナクレーン振れ止めシステムへの適用, 機論, 58-550, C(1992), 1792-1797
- (2) 白井潤二・ほか7名, コンテナクレーンの振れ止め制御技術の実用化, 機論, 59-561, C(1993), 1443-1447
- (3) 村田五雄・ほか3名, 横行クレーンのサーボ形振れ止め制御, 機論, 61-582, C(1997), 513-518
- (4) 飯島慶次・ほか2名, コンテナハンドリングクレーンの振れ止め制御, SICE システムインテグレーション部門講演会予講集, (2001), 45-46
- (5) 小林 雅人 他3名, 大型門型クレーンの自動運転, 日本機械学会第8回交通・物流部門大会講演論文集, No.99-59 (1999-12), 37-38
- (6) 宮本淳也・ほか5名, コンテナクレーンの自動運転システム, SICE システムインテグレーション部門講演会予講集, (2001), 49-50
- (7) 吉川博文・ほか4名, 港湾クレーン用吊荷位置センサの開発, 三菱重工技報, Vol.37 No.5 (2000-11), 290-293
- (8) 大久保 欣昭・ほか3名, コンテナクレーンのスキュー振れ止め制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '94 講演論文集, No.940-21 (1994-6), 445-448
- (9) 宮田紀明・ほか4名, クレーン荷役効率化・干渉回避のための「フットワード」振れ止め制御の開発, 三菱重工技報, Vol.37 No.5 (2000-11), 294-297