

トランスファクレーン自動運転システムの開発

Development of Automatic Operation System of Transfer Cranes

広島製作所 小坂 裕二*¹ 宮田 紀明*²
 技術本部 村田 五雄*³ 西岡 正樹*⁴
 エレクトロニクス事業部 桑原 青子*⁵

トランスファクレーンはコンテナヤードばかりでなく製鉄所でも使われ始め使用環境も厳しくなるなど、オートステアリング機能と自動運転の要求レベルも高まってきた。このような要求にこたえるために、(1)複数台あるトランスファクレーンを最も効率のよい運用条件下で使えるようにする荷役スケジューリング方法、(2)傾斜地盤や変動荷重下でも高精度でオートステアリング制御できる画像処理方式によるずれ検出法と高精度フィードバック制御方法、(3)コンテナハンドリングの自動運転を可能にする、横走行の位置決め制御、吊り荷振れ止め制御、スタッキングガイドを開発し実用化したのでそれらの考え方や概要を紹介する。また、今後の動向についても言及する。

Transfer cranes have been used for not only in container yards but also in steel mill yards. As conditions of use in both areas have become severe, and also the automation level required has become higher, we have developed a high level automation system for transfer cranes in order to respond to these requirements. This automatic transfer crane operation system has following characteristics. (1) Transfer crane scheduling system with high efficiency, (2) Autosteering system of transfer cranes with precise position sensing system using image processing and a feedback control system, (3) Automatic container handling system with precise position control, precise antisway control and container stacking guide, (4) Back up system using gyrocompass for autosteering control in case of obscured lines. In this paper we will introduce an outline of these points and our philosophy. In the last stage we will discuss some points about future trends.

1. ま え が き

タイヤ走行式トランスファクレーンは走行レールの敷設が不用であるというメリットはあるが直進走行制御が必要となる。このため直進走行させるためのオートステアリング制御は早い時期から開発され実用化されていた。しかし初期の頃の制御はずれ検出には地下埋設線に交流電流を流しそれがつくる磁界を検出する方法が使われ、また制御にはずれ量とずれ角をフィードバック制御するだけの単純な制御であった。オペレータの運転の補助という位置づけからそれなりの効果があったが次のような問題があった。(1)交流電流線の地下埋設工事が必要であり、またいったん配線してしまったら変更がしにくい。(2)平坦な路面で一定走行速度時には十分な精度を保証できたが路面傾斜があったりトロリが同時運転されるような状態での走行制御では必ずしも十分な精度が保証されない場合もあった。最近のように、コンテナターミナル内のトランスファクレーンの台数が増え、しかも熟練オペレータが不足する現状で荷役効率に対する要求は厳しく、そのためトランスファクレーンの運転への自動化要求レベルが高くなってきた。近い将来無人化の要求も出てくる可能性がある。

2. コンテナターミナル合理化の動向

コンテナターミナルにおける荷役システム全体の関係を図1に示す。コンテナターミナル荷役作業を合理化するためには、これらのシステム全体の整合性及びバランスを取りながら各々のシステムの自動化を進めることが重要なポイントとなる。これらの自動化の狙いは図2のようにまとめることができる。

これらの自動化を実現するには、トランスファクレーン方式のコンテナターミナルにおける主要搬送機器であるコンテナクレーン、シャシ、トランスファクレーンのすべてに対して自動化を進

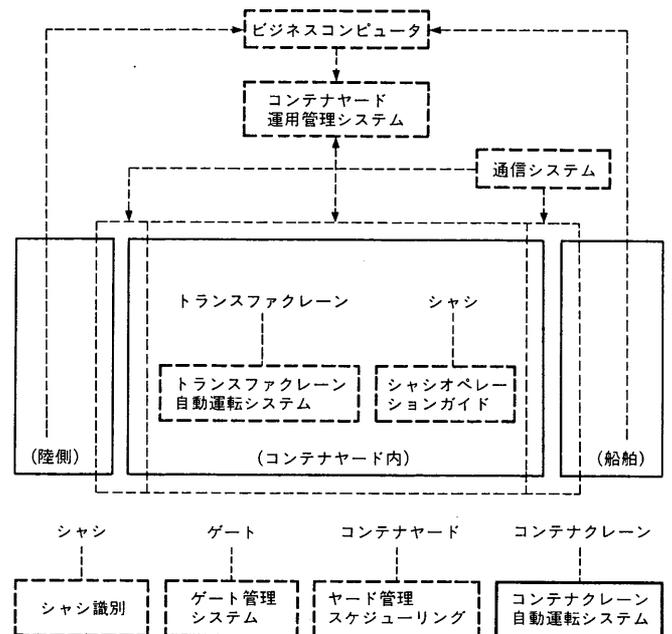


図1 コンテナヤードにおける荷役システム コンテナヤード全体のシステム機能と関連を示す。
Handling system in container yard

めていくことが肝要である。特に最近では、それぞれの機器を無人化していくとしようとする動きが出始めている。シャシに換わる機器としてコンテナ搬送用AGVも開発され実用化され始めている。コンテナクレーンについては、中央制御室から指示されたジョブシーケンスに従って高精度振れ止め制御、位置決め制御を可能にする自動化システムが実用化されている。コンテナターミナル全体の効率化のためにはトランスファクレーンを効率的に配備する

*1 運搬機部運搬機設計課主務
 *2 運搬機部電気制御設計課
 *3 広島研究所鉄構・土木研究室主任

*4 広島研究所工作機械研究推進室
 *5 開発・製造部制御システム三課

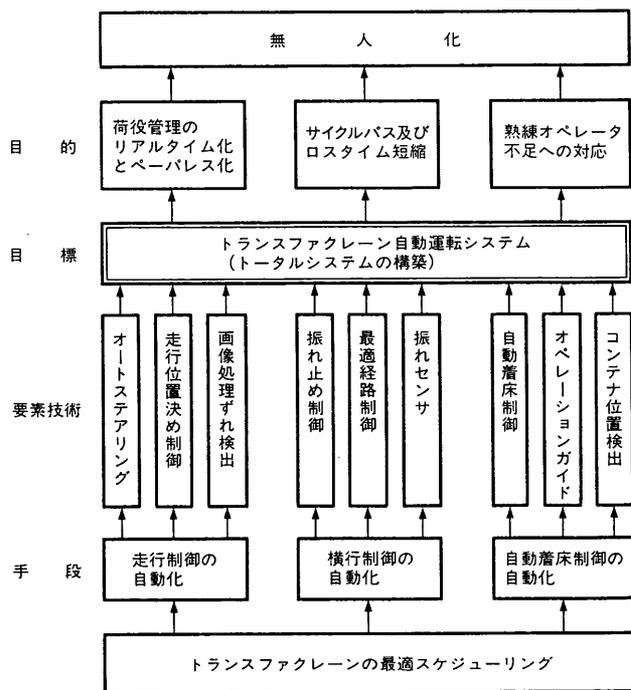


図2 トランスファークレーン自動化の狙い 自動化の目的, 目標手段, 要素技術を示す.
Purpose of automation of transfer crane

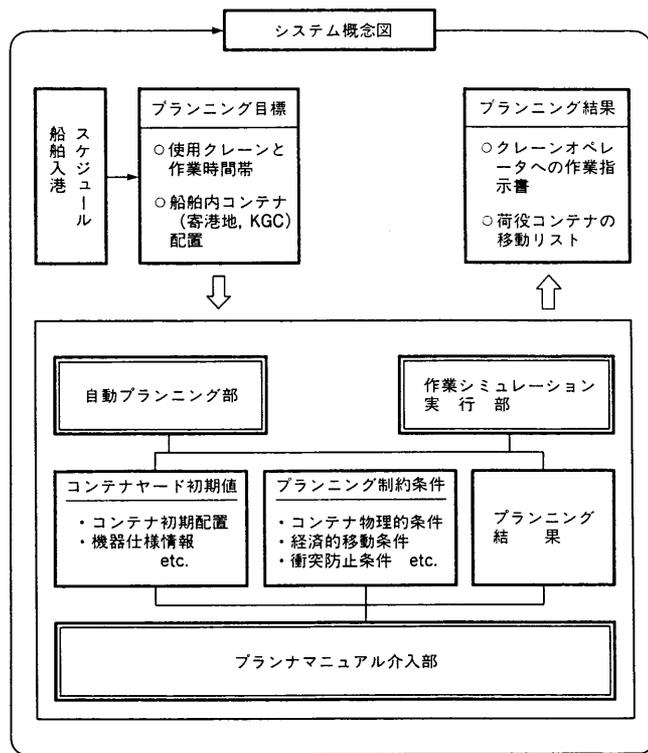


図3 スケジューリングシステム概念図 スケジューリングシステム内の各機能をブロック図で示す.
General idea of scheduling system

ことが重要なポイントとなる。そのためには少数のトランスファークレーンで効率的作業が行われる荷役スケジューリングの自動化が必要になる。また、あらゆる悪環境下で安定かつ高精度走行制御が求められている。そして同時にこれら一連の作業の自動化の総合的なレベルアップが求められ始めた。

3. 荷役スケジューリング

トランスファークレーンの荷役作業の中では、船積み作業が最も時間的に厳しいので最優先されなければならない。1台のコンテナクレーンには数台のトランスファークレーンが通常対応するので、対象コンテナは予定台数分のグループにまず分けられる。このとき各グループ内の荷役作業量が均等になり、かつ全作業時間が最小になり、コンテナクレーンでの荷役順序に従うように割り当てられていなければならない。このようにグループ化されたコンテナ群に対応するトランスファークレーンを決定するのが第2のステップである。ここでは、すべてのトランスファークレーンとすべてのグループのコンテナ群を組合せて計算するのは現実的ではないので、真の最適値ではないが、各荷役対象コンテナに最も早く到達できるものから順次割り当てていく方法を簡便法として採用した。

荷役対象コンテナの上に他のコンテナが置かれている場合は、山操り作業を最小にする必要がある。このため、山操り回数を評価値とする発見的なアルゴリズムを開発採用し、荷役作業時間を最小にする荷役順序を決定することができるスケジューリングシステムとした。以上のことを実現するスケジューリングシステムの概念図を図3に示す。

4. オートステアリング (走行中の横ずれ制御)

4.1 基本的考えとモデリング

タイヤ式トランスファークレーンではタイヤのへこみ等で蛇行しやすいため、オートステアリング制御は早い時期に実用化された。

しかし制御性能は±150 mmと悪く、最近の厳しい使用条件には対応しきれない。そのため以下の条件を満足するものが求められていた。

- (1) 制御性能は 100 mm, 停止時ずれ量は±30 mm 以内
 - (2) レーン替え時の走行にも応用でき、かつ土木工事が不要
 - (3) ヤード路面に傾斜があったり、荷吊り状態で走行したり、トロリ横行中に走行動作があっても精度良く制御されること
 - (4) 加減速時, 定速時, 停止時にも制御性能を満足すること
 - (5) 走行位置決め制御などとも連動した制御とすること
- オートステアリング制御は前後の駆動輪の速度差で行うので、速度差をコントロールすることにより、走行ラインからのずれとずれ角を制御することができる。モデル式を式(1)に示す。

$$\left. \begin{aligned}
 m_G \frac{dV_G}{dt} &= (T_A - R_A) + (T_B - R_B) - F_3 \\
 &\quad - F_2(\theta + \beta) \\
 I_G \frac{d^2\theta}{dt^2} &= -(T_A - R_A) l_a + (T_B - R_B) l_b \\
 &\quad + C_A(\beta_A + \delta_A) l_a - C_B(\beta_B + \delta_B) l_b \\
 \frac{V_G}{r} &= -(\dot{\theta} + \dot{\beta})
 \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 m_G はクレーン質量、 V_G は走行速度、 T_A, T_B は前後駆動モータの駆動力、 R_A, R_B は前後駆動輪にかかる抵抗力、 F_3, F_2 は走行方向と、それに直角な方向の路面傾斜による重力外乱、 θ はラインとクレーンのなす角、 β, β_A, β_B はクレーンの向きと走行方向のなす角、 I_G はクレーンの重心を中心とした慣性モーメント、 l_a, l_b は重心から駆動輪までの腕の長さ、 δ_a, δ_b は車輪取り付け角度誤差、 C_A, C_B はコーナリングフォース。

4.2 オートステアリング制御

4.1節に述べたモデルからトランスファークレーンの状態は走行速度、ずれ量、ずれ角、ずれ角速度、前後の駆動輪の速度差で決まる。定速度走行時が基本であるからまず速度一定として系を線

形化すれば式(2)のような状態方程式が得られる。目標はずれ量、ずれ角、ずれ角速度、速度差をいずれも0に近づき走行速度を一定に保つことである。ここにレギュレータ理論を適用することにより、最適フィードバック制御系を式(3)のように構築することができる。

$$\dot{X} = Ax + Bu \quad X^T = [x \quad \theta \quad \dot{\theta}]$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & V_G & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{k(I_a^2 + I_b^2)}{I_G} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{k \cdot l}{I_G} \end{bmatrix}$$

$$u = \Delta V$$

$$J = \int \{A^T Q A + u^T R u\} dt \quad (3)$$

$$u = F \cdot X$$

ここで、 F は最適フィードバックゲインである。 Q 、 R は評価関数 J の重み係数である。

定速時と加減速時では異なるフィードバックゲインを採用するというゲインスケジューリング式オートステアリングシステムとして高精度化を実現した。実機計測結果を図4に示す。

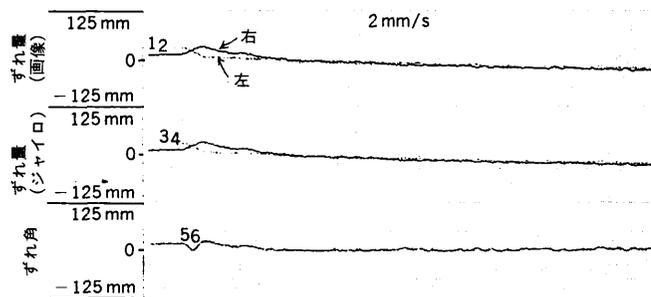


図4 実機計測結果 トランスファクレーンのオートステアリング制御結果。
Measuring results of autosteering by real cranes

4.3 ずれ検出方法

本システムの特徴の一つは、ずれ検出に画像処理方式を採用したことである。この方式の長所は、地下埋設が不要かつコース変更が非常に容易かつ高精度なことである。それは地上に白線か黒線を引きそれを CCD カメラで追尾する方法としたからである。このため、線が交差していても分岐していても画像処理ですべて処理しさえすればよく非常に柔軟な検出システムを実現することができた。

また、画像処理方式の欠点である雨や水たまりでの光の反射に対しても種々の外乱処理を施し、安定したずれ検出装置として実用化した（なお本項の詳細については別稿“搬送機器における画像処理技術の開発と適用”を参照のこと）。

4.4 悪環境下での制御

トランスファクレーンの走行制御の外乱は力の外乱と構造的な外乱とがある。力の外乱には、トルリ位置による偏荷重や路面の傾斜等がある。構造的には、センサの取付け誤差やクレーン本体の傾き等がある。路面が前後方向に傾斜しているような場合、線形フィードバック制御ではトランスファクレーン定常走行状態は式(4)に表現されるように、上記の種々の外乱が総合的に影響していることが分かる。

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{1}{a} \left\{ V_G \left(1 - \frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{b}{2(k_A + k_B)} \right. \\ &\quad \left. \cdot [-F_2 + k_A \delta_A + k_B \delta_B - 2(k_A + k_B) \Delta \theta_0] \right\} \\ \theta_0 &= \frac{-1}{k_A + k_B} (-F_2 + k_A \delta_A + k_B \delta_B) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 x_0 と θ_0 はずれ量とずれ角、 a 、 b はフィードバックゲイン、 V_G は走行速度、 r_1 、 r_2 はタイヤ径、 F_2 は路面傾斜による重力外乱、 δ_A 、 δ_B はタイヤ取付け誤差、 k_A 、 k_B は係数、 $\Delta \theta_0$ はセンサ取付け誤差である。

これらの特性は通常の安定走行状態では問題ないが、停止時と再スタートのときは制御性を悪化させる恐れがあるので、停止時とスタート時にはまず傾きがなくなるような制御を施している。

4.5 ジャイロ走行

画像処理方式のずれセンサは、白線か黒線が走行路に沿って引かれていることが前提となっている。しかし、トレーラなどの走行のため、線がある範囲で消されてしまう場合もある。このように線が消えたところでもオートステアリング制御ができるように、光ファイバジャイロでバックアップする方式も採用した。ジャイロを使う場合はスタート時にずれ量を検出する別センサが必ず必要になるし、またドリフトがあるので長期間ジャイロだけで走行制御することはできず、走行区間内には一定間隔ごとに補正用センサが必要になる。画像処理方式を補正用の基準センサとする相互補間方式により、安定かつ高精度制御を実現することができた。

5. 自動運転システム

5.1 走行位置決め制御

オートステアリング制御されたトランスファクレーンは、目標ベイの位置に走行位置決め制御する必要がある。その方法は、目標位置が与えられたら現在位置との差を計算し、残距離が事前設定距離になったらそれぞれの目標速度に減速し、最終位置合わせはイン칭ング制御により行う。概略位置検出はエンコーダで行い、最終位置検出は地上マーカを CCD カメラでとらえ、画像処理方式により行う。この方式により走行位置決め制御精度は±30mmを達成した。

また、ベイ番地検出のために我々は次の3方式を用意し、用途と条件により使い分ける方針で進めている。

- (1) 高精度位置検出値（上記）から番地に換算する方法
 - (2) トランスポンダを使う方法
 - (3) 二次元番地マークを CCD カメラでとらえ認識する方法
- (2)と(3)の方式は絶対番地を直接検出する方法である。トランスポンダは地面に埋設する必要があるのに対し、二次元番地マーク方式は地表に置くだけでよい。

5.2 コンテナ位置決め制御

対象コンテナのハンドリングのためにはコンテナあるいはスプレッドの位置決め制御をできるだけ短時間に行うことが重要で、次のような技術が必要である。

- (1) 吊り荷振れ止め制御
- (2) トロリ位置決め制御
- (3) 吊り荷最適経路制御
- (4) スキュー振れ止め制御
- (5) 自動着床制御

トランスファクレーンの吊り荷振れ止め制御は従来補助ロープ

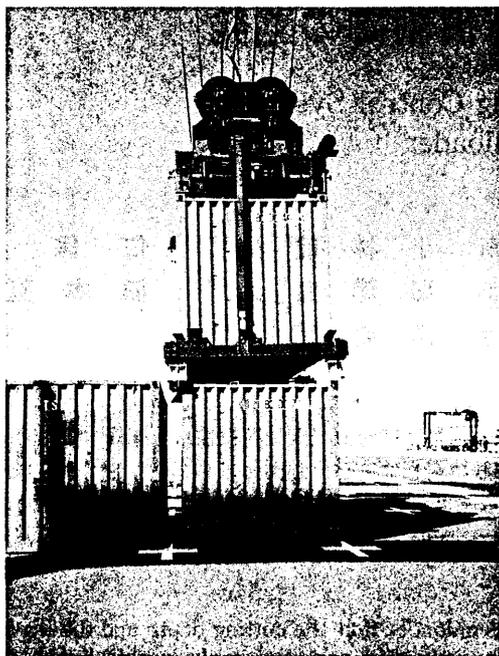


図5 スタッキングガイド スタッキングガイドを使った自動着床の状況。 Stacking guide

式制御が使われてきたが、最近電気式振れ止め制御に切替える動きが出始めており、トータルな自動化システムの実現へとつながってきた。また、段積み時に自動着床する場合、上下のコンテナのずれがないようにするためにスタッキングガイドを開発した。概観を図5に示す。

5.3 システム構成

以上述べてきたトランスファークレーン自動運転のシステム構成例を図6に示す。システムを中心を成すのは32ビットマイコンのインテル80386であり、コンテナクレーン自動運転システムと共通にすることにより標準化を達成し、かつ高速処理を実現している。また、中央制御室との通信は無線通信あるいはフロッピーベースによる接続により作業予定のジョブシーケンスやコンテナヤード内のコンテナ積付情報が入力される。また次の作業指示もタッチパネルから容易に操作することができる。

タッチパネル画面例を図7に示す。振れ止め制御は、レギュレータ方式の電気式振れ止め方式とした。そのためのセンサは、画像処理式振れセンサとトルリ横行速度検出用としてタコジェネを使用した。

6. あとがき

コンテナターミナルにおけるトランスファークレーン自動運転システムの概要について述べた。これらは無人化に至る途中段階の技術であるが、現実的にオペレータの介入は最少限でよい状態になっており、オペレータの技量に関係なく高効率を達成できる。さらに、最終目標とも言える無人化達成のためには次の2点が最大の課題と言える。

- (1) 荷役対象コンテナ（地上エリア）の位置検出

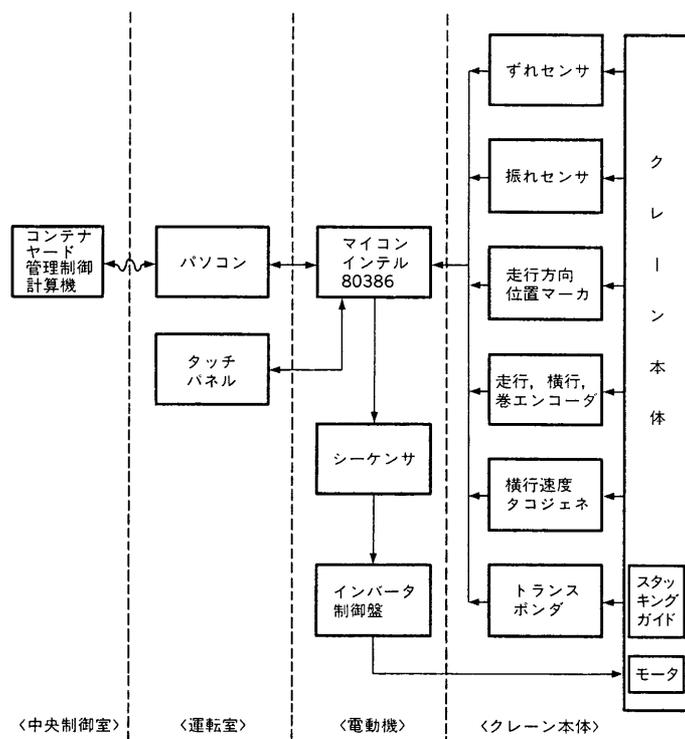


図6 システム構成例 トランスファークレーン自動運転システムの構成の一例を示す。 Example of system configuration

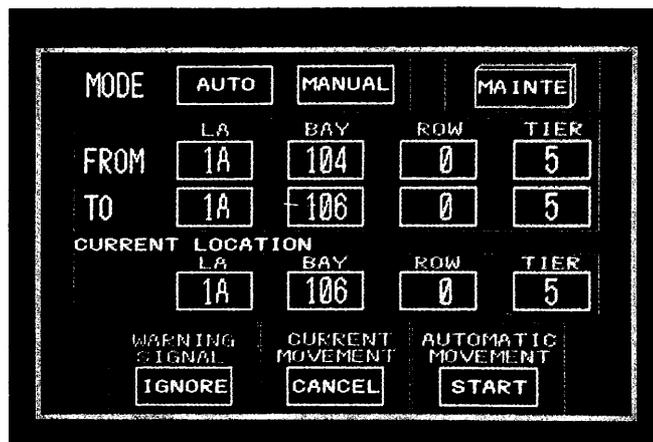


図7 タッチパネル画面例 オペレータはこの画面に従って操作することができる。 Example of touch operation panel

- (2) レーン替え、走行時を中心にした安全性の確保
これらについても鋭意研究中であり近い将来実現されるものと思う。

参考文献

- (1) 村田五雄ほか、画像処理による自動追尾と分岐制御、日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'93
- (2) 村田五雄ほか、画像処理によるクレーン吊り荷位置検出法、日本機械学会論文集（C編）60巻569号（1994-1）