

Development of Automated Traveling Control for Transfer Cranes Using GNSS and White Line Image Recognition

○正 王 世宇^{*1}, 長内 福智^{*2}, 高橋 賢太郎^{*3}

滝澤 一樹^{*2}, 正 小笠原 正信^{*1}, 正 中田 成幸^{*1}

Shiyu WANG^{*1}, Yoshito OSANAI^{*2}, Kentaro TAKAHASHI^{*3}

Kazuki TAKIZAWA^{*2}, Masanobu OGASAWARA^{*1} and Shigeyuki NAKADA^{*1}

^{*1, *3} (株) 三井 E&S 物流システム事業部 MITSUI E&S Co.,Ltd, Logistics & System Division

^{*2} (株) 三井 E&S 成長事業推進事業部 MITSUI E&S Co.,Ltd, New Business Development Division

In recent years, the introduction of remote and autonomous driving technologies has advanced in port container logistics to improve working conditions, stabilize operations, and enhance safety. Among them, the automation of transfer cranes that load and unload containers in storage yards has become a key element in realizing smart ports. RTG(Rubber Tired Gantry Crane), widely used in Asia and Japan for their flexibility, require highly accurate travel and stopping control since they operate without rails. Traditionally, straight-line driving control with high-precision RTK-GNSS (Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System) has been applied, but as remote automation progresses, high stopping accuracy has become equally essential. However, GNSS sensors mounted on top of RTGs are affected by pitching due to slopes or acceleration, leading to discrepancies between measured and actual positions. To address this, researchers have explored the use of deep learning-based image recognition techniques to detect existing white lines in container yards, though challenges remain under severe outdoor conditions such as rain or glare. This study combines GNSS with YOLOX-based robust real-time white-line recognition to achieve accurate travel and positioning. A control system incorporating Input Shaping, Kalman Filtering, and feedback control was implemented to ensure seamless switching between GNSS and vision-based positioning, suppress pitching, and enhance stopping accuracy. Experiments on actual RTGs confirmed the effectiveness of the proposed system.

Key Words : Container logistics, Rubber Tired Gantry Crane(RTG), GNSS positioning, Deep learning, White-line detection, Autonomous driving, Input Shaping, Kalman Filter, Position Feedback

1. 緒 言

近年、港湾コンテナ物流の分野では、作業環境改善、業務効率安定化、安全性の強化を目的として、遠隔運転、自動運転技術の導入が進んでいる。特に、蔵置ヤード内でシャーシトラックとのコンテナの積み下ろしを担うトランスファークレーン（門型クレーン）の遠隔自動運転化は、スマート港湾の実現に向けた重要な要素の一つとなっている⁽¹⁾。これまで、遠隔自動化コンテナターミナルでは、トランスファークレーンとして、レール走行型のRMG（Rail Mounted Gantry Crane）とラバータイヤ走行型のRTG（Rubber Tired Gantry Crane）が主に使用されている。ゴムタイヤで無軌道面上を走行するRTGは、運用柔軟性が高く、アジアや日本において数多く使用されているが、無軌道面上を走行するため、その走行制御が重要な技術となってきた⁽²⁾。

^{*1} 正員, 株式会社 三井 E&S 物流システム事業部 (〒870-0395 大分県大分市日吉原3番地)

^{*3} 株式会社 三井 E&S 物流システム事業部 (〒870-0395 大分県大分市日吉原3番地)

^{*2} 株式会社 三井 E&S 成長事業推進事業部 (〒706-8651 岡山県玉野市玉3丁目1番1号)

E-mail of corresponding author: shiyu-wang@mes.co.jp

従来の手動運転に運転アシストとして走行自動制御を実現する場合、高精度衛星測位システム RTK-GNSS (Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System、以下 GNSS) を用いた直進走行制御が採用されてきたが、遠隔自動運転化されつつある近年は、コンテナ蔵置エリアでの自動荷役を効率的に行うため、直進走行だけでなく高精度な停止位置制御も重要な要件となっている。

GNSS は、広範囲の位置情報を±2 cm程度の精度で得られる優れたセンシングシステムであるが、衛星からの電波を受信する必要があり、天空をある程度の範囲で見渡せるように設置する必要がある。従い、RTGの測位を行う場合、構造体最上部に設置する必要があるが、路面傾斜や加速減速時のピッチング運動の影響を受け、RTGの姿勢が変化することから、GNSS 測位情報と直進走行軌道や停止位置の間に誤差が発生する課題がある。一方、コンテナ蔵置エリアで効率的な自動荷役を行うためには、RTGの基準となる構造体下部の中心位置を±2 cm程度の精度で再現性よく停止させるのが望ましい。

このような課題に、少ない追加設備で対処する方法として、コンテナヤード地面に通常描かれている既存の走行基準白線を画像処理で認識、計測する研究が行われている。このような先行研究では、屋外環境において白線位置を正確に検出するために、Hough 変換や適応的スライディングウィンドウ法といった手法が提案されているが⁽³⁾⁽⁴⁾、夜間雨天時の投光器による白飛びや、ブロック舗装の目地のテクスチャパターンから生じるノイズといった、厳しい外乱に対しては十分な精度が得られておらず課題を残している。また、深層学習の Mask R-CNN のインスタンス・セグメンテーションモデルを蔵置白線認識に適用し、ロバストな白線認識手法が提案されている⁽⁵⁾。しかしながら、本手法は物体検出とセマンティック・セグメンテーションをシリーズで行うため計算量が多く、走行制御に求められる数百ミリ秒のリアルタイム性を満たすことは、困難であると考えられる。

本研究では、深層学習の手法として YOLOX を使用し、認識のロバスト性とリアルタイム性の両立を目指した白線画像認識技術 (IR: Image Recognition) ⁽⁶⁾と GNSS 測位を組合せ、簡便でありながら、高精度な直進走行及び位置決め制御を行った結果について述べる。特に、GNSS 測位を走行制御全体のドライビングコントロールとして使用し、深層学習による測位を走行白線ならい制御、停止位置に対する位置決め制御に使用するシステムを指向し、実機試験を行った。また、これらを実現するため、GNSS 測位値から画像認識測位値への切り換えをよりスムーズにし、加減速変動を緩和するとともに、素早い高精度位置決めと停止時のピッチング運動を抑制する制御系として、Input Shaping⁽⁷⁾、Kalman Filter⁽⁸⁾⁽⁹⁾、フィードバック位置制御を組合わせた制御系を適用した。以上の制御システムを RTG 実機に実装し、所定の性能が確認できたので、報告する。

2. 画像認識自動走行システム構成

RTG は門型のクレーンであり、両脚の底部にゴムタイヤを介して立脚した構造を持つ。そのサイズは、幅が約 24m、高さが約 20m である。ヤード内の任意の場所で、コンテナの着床や吊上げを行うため、ゴムタイヤ車輪の回転により走行方向の移動が、クレーン上部のガーダ上のトロリによる横行方向の移動が可能となっている。

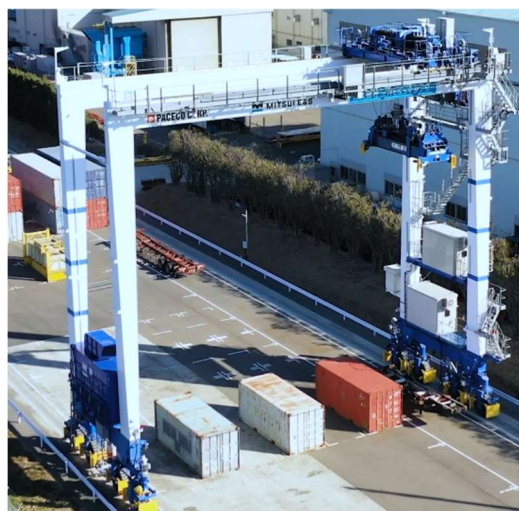


Fig.1 Overview of the RTG Test Prototype

本研究の対象である、自動走行に使用する機器の仕様を表 1 に示す。GNSS は、そのアンテナを RTG 上部ガーダの頂点部に 3 か所設置し、RTG の代表点の位置及び両脚を結ぶラインの姿勢角の情報が計測できる。RTG の両脚のシルビーム上には、片側に電気室が、もう片方に電源装置（エンジン発電機セットもしくは燃料電池）が搭載されており、それぞれ電気室側脚、エンジン側脚と呼ぶ。画像認識で用いるカメラは、図 2 に示すように、電気室側脚に 3 台、エンジン側脚に 1 台設置し、ヤード地面に引かれた走行用白線および停止白線の認識に使用される。4 台のカメラで取得された画像は、RTG 内の通信経路を経由して、電気室内の画像認識用 PC に送信され、深層学習による画像認識および計測値への変換が行われる。画像認識用 PC で求められた計測値は、RTG 走行制御 PLC（Programable Logic Controller）へ送信され、制御演算を経て、左右脚の走行モータの速度指令値へと指令される。RTG のタイヤ車輪は、操舵機能はなく、左右車輪の回転数差により、走行用白線に対する RTG の姿勢偏差および横行方向偏差をゼロにするように、ならい制御される。走行目標地点付近では、画像認識で停止白線が計測されたことを条件に、計測された停止白線までの残距離に従い、停止白線に合せ高精度で位置決め停止させる。これらの走行ならい制御、停止位置決め制御を高性能とするため、RTG 走行方向のピッチング運動の影響を抑制する制御を制御演算の中に入れていく。

Table.1 Equipment Specifications

Camera Specifications for Image Recognition		PC Specifications for Image Recognition	
Manufacturer	LUCID Vision Labs	CPU	Arm Cortex-A78AE (8-core)
Model (Sensor Type)	TDR054S-CC (IMX490)	GPU	NVIDIA Jetson Orin NX
Resolution	2×2 Binning : 1440×928 (5.4MP)	Memory	LPDDR5 16GB
Dynamic Range	120 dB	Specifications of GNSS System	
Frame Rate	26.4 FPS	Antenna	Akasaka Tech AR270
Electronic Shutter Type	Rolling Shutter	Receiver	Akasaka Tech nico・one
		Correction Unit	Sunrise Tech U7000

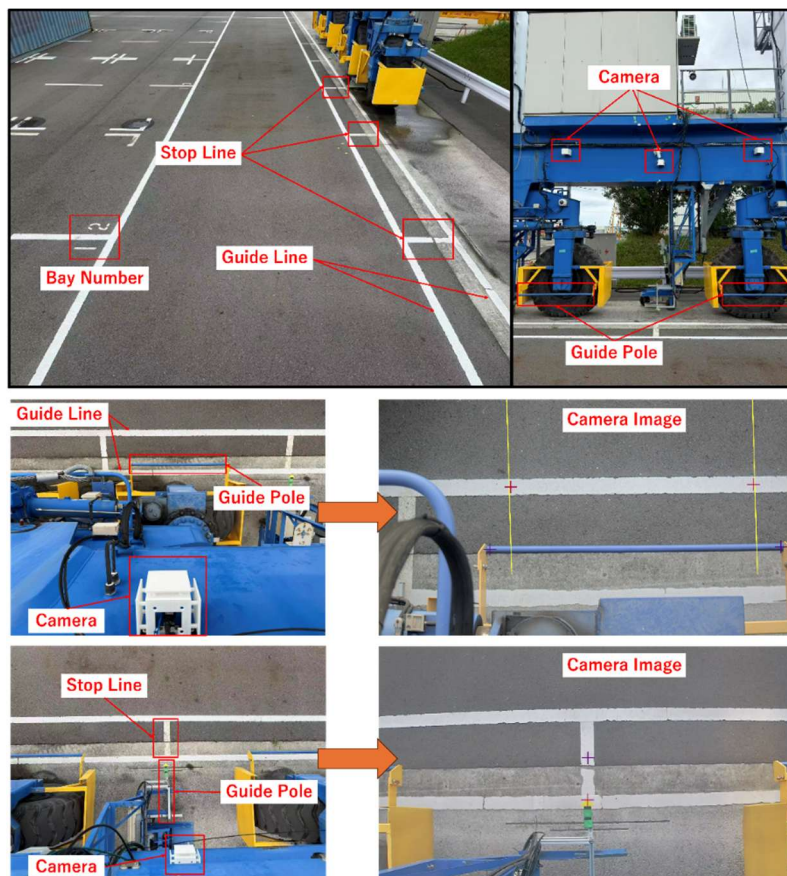


Fig.2 Camera Mounting Position and Line Position

3. 深層学習による画像認識

3・1 深層学習アルゴリズム

本研究では、以下に示すYOLOX (You Only Look Once X) を使用し、RTG 基準要素点および白線特徴点の物体検出を行っている。YOLOX は、2021 年に Z. Ge 等により提案された物体検出アルゴリズムであり、アンカーボックスを使用しないアンカーフリー設計を採用し、中心点予測によるシンプルな構造を実現し、計算コストを削減しつつモデルの精度を維持している。また、分類タスクと回帰タスクを分離したデカップルドヘッドを採用することで、学習の収束速度と予測精度を向上させている⁽¹⁰⁾。コンテナヤードでは、日照や降雨の条件下で白線認識を行う必要がある。そのようなノイズ条件下でも頑健に白線を認識させるために、日照により影の入った画像、降雨時に路面に水溜りが発生した画像、夜間照明の反射光が写り込んだ画像等も学習データに加えている。また、耐ノイズ性を高めるために実画像に対して CutOut や MixOut 等の前処理を行った画像 (図 3) を学習データに加えるなど頑健性に対する方策を定めている。

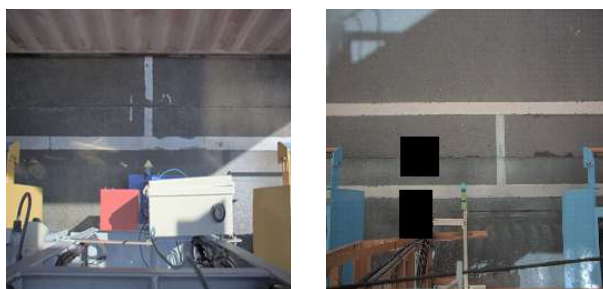


Fig.3 Examples of training data: (left) images with shadows added, and (right) images with CutOut applied

3・2 走行ならい偏差の算出

図 4 にカメラで撮影した画像の模式図を示す。カメラ画像には走行基準線となる走行ならい白線と RTG 側の基準点となる走行ならい目安棒の端点、走行ならい目安棒端点から直角方向に白線側に伸ばした仮想目安線が含まれている。深層学習による画像認識により、目安棒端点および仮想目安線と白線中心との交点の座標を検出する。この検出を左右 2 つのカメラおよび画像処理により行う。

クレーン座標系における左右の目安棒端点の座標値を $(x_{Cr,bL}, y_{Cr,bL})$, $(x_{Cr,bR}, y_{Cr,bR})$ とし、仮想目安線と白線中心の交点の座標値を $(x_{Cr,LL}, y_{Cr,LL})$, $(x_{Cr,LR}, y_{Cr,LR})$ とする。制御棒端点から白線中心までの y 軸方向の相対変位 $\Delta y_{Cr,LbL}$, $\Delta y_{Cr,LbR}$ は、次式で求められる。

$$\Delta y_{Cr,LbL} = y_{Cr,LL} - y_{Cr,bL} \quad (1)$$

$$\Delta y_{Cr,LbR} = y_{Cr,LR} - y_{Cr,bR} \quad (2)$$

左右の目安棒端点は、クレーン座標系原点に対して対称な位置に設定するとし、クレーン中心 $x_{Cr} = 0$ の面におけるクレーン座標系の相対変位を p_y と定義すると、次式で求められる。

$$p_y = \frac{\Delta y_{Cr,LbL} + \Delta y_{Cr,LbR}}{2} \quad (3)$$

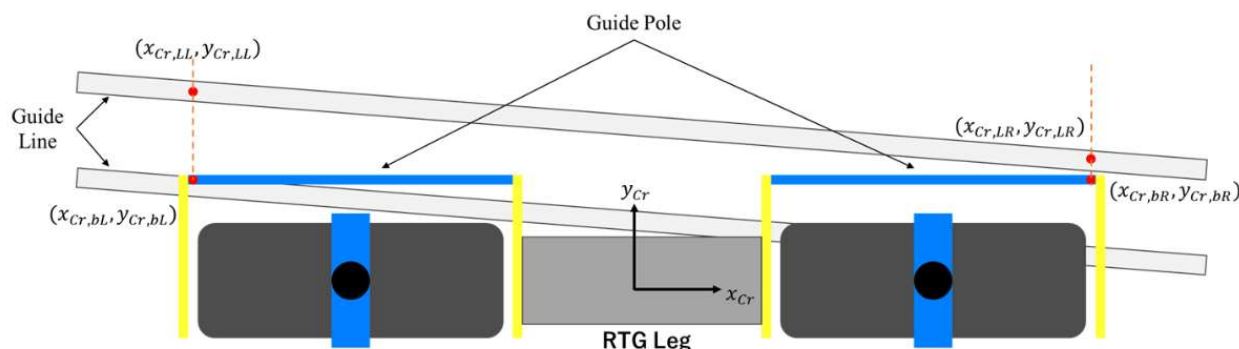


Fig.4 Schematic Diagram of Travel Line-Following

クレーン座標系からみた走行白線の傾き角である姿勢角 θ_S は次式で得ることができる。

$$\theta_S = \tan^{-1} \frac{y_{Cr,LR} - y_{Cr,LL}}{x_{Cr,LR} - x_{Cr,LL}} \quad (4)$$

3・3 走行停止偏差の算出

停止用目安棒から見た停止白線中心までの相対変位 P_x の算出方法について示す。計測に用いる中央のカメラ画像の模式図について図 5 に示す。深層学習による画像認識により、クレーン座標系の目安棒先端の座標値 $(x_{Cr,bc}, y_{Cr,bc})$ と停止白線の中心点 $(x_{Cr,c}, y_{Cr,c})$ を求める。目安棒先端点から停止線中心点へのクレーン座標系 x 軸方向の相対変位 P_x は次式で求めることができる。

$$P_x = x_{Cr,c} - x_{Cr,bc} \quad (5)$$

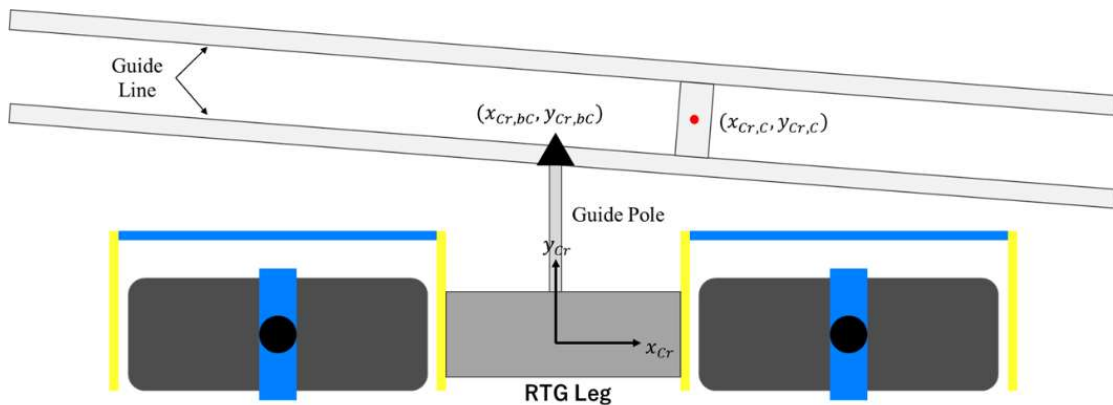


Fig.5 Schematic Diagram of Stop Control

4. 走行制御システム

走行制御を安定させ、精度よい位置決めを行うためには、RTG のピッチング運動をモデル化し、その特性を考慮した制御を行うことが望ましい。本研究では、RTG の構造体は剛体であると仮定し、ゴムタイヤの弾性を考慮した簡易物理モデルから求められる運動方程式を使用した。このモデルに Input Shaping を適用し、走行停止時に残留ピンチング運動が抑制できる制御を実装した。また、この運動方程式に駆動系を付加したモデルを導出し、Kalman Filter を適用することにより、GNSS の位置信号から RTG 下部の位置を推定し、走行制御を安定させるとともに、停止時の画像認識による停止偏差信号への切換えの不連続を緩和する制御を実装した。

4・1 RTG 走行運動モデル

走行ピッチング運動のモデルとして、RTG の走行ならいの姿勢偏差は微小だと仮定し、図 6, 7 に示すような簡易モデルとする。RTG 構造体を剛体とし、走行タイヤの上下方向のバネダンパ特性によりピッチング運動が

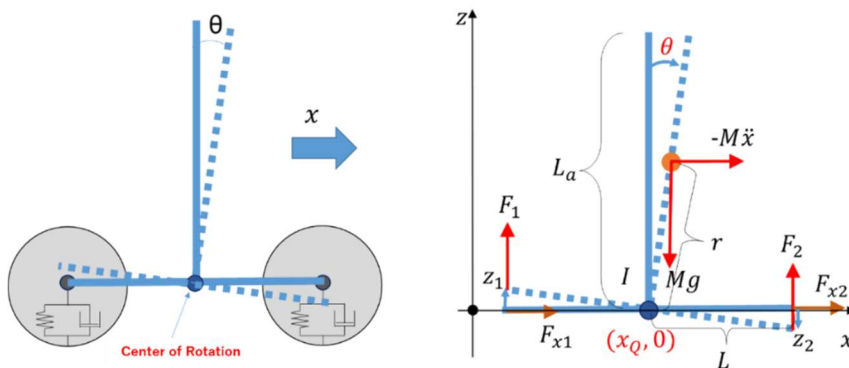


Fig.6 Simplified Model of Traveling

発生するモデルとした。すなわち、構造体は、前後輪タイヤを連結するビーム中点を回転中心として回転すると近似し、回転中心が前後上下運動を行うことは無視する。図6、7で定義した定数、変数を表2に示す。

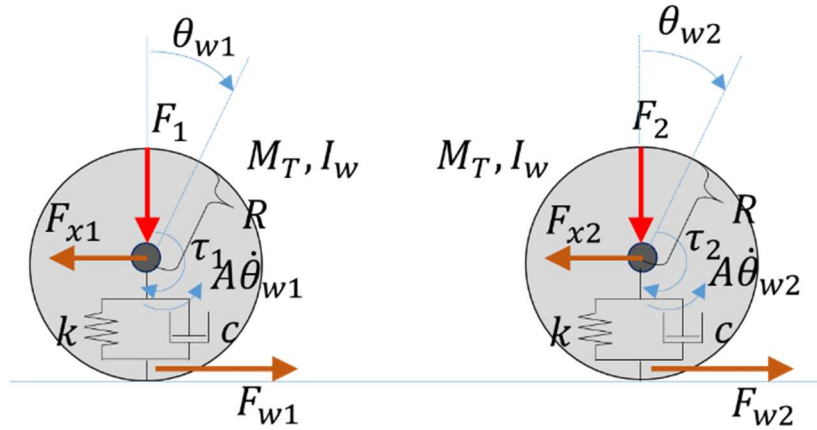


Fig.7 Simplified Tire Model

Table.2 Variables and Definitions

Variables	Definitions
$x_Q = x_Q^L$	Coordinate of the rotation center of the structure [m] (lane coordinate system)
θ	Rotation angle around the rotation center of the structure [rad]
z_1, z_2	Vertical displacements of the rear and front wheel connection points [m]
r	Distance from the rotation center to the center of gravity of the structure [m]
L	Length of the arm from the rotation center to the tire connection point [m]
L_a	Length from the rotation center to the upper end point (GNSS installation position) [m]
M	Mass of the structure [kg]
I	Moment of inertia of the structure about the rotation center [kg·m ²]
F_1, F_2	Vertical forces exerted by the rear and front wheels [N]
F_{x1}, F_{x2}	Horizontal forces exerted by the rear and front wheels [N]
θ_{w1}, θ_{w2}	Rotation angles of the rear and front wheels [rad]
τ_1, τ_2	Motor torques of the rear and front wheels [N·m]
M_T	Mass of the rear and front tires [kg]
I_w	Moment of inertia of the rear and front tires [kg·m ²]
R	Radius of the rear and front tires [m]
k	Spring constant of the rear and front tires [N/m]
c	Damping coefficient of the rear and front tires [N·s/m]
F_{w1}, F_{w2}	Horizontal forces generated by friction with the road surface [N]
$A\theta_{w1}, A\theta_{w2}$	Running resistance moments proportional to velocity [N·m]
F_{x1}, F_{x2}	Horizontal forces exerted from the structure [N]
F_1, F_2	Vertical forces exerted from the structure [N]

後輪前輪とも同じトルクを発生させるとし、全モータ4台分の合計トルクを $\tau = \tau_1 + \tau_2$ とし、車輪と路面はスリップしないものとし、 $x_Q = R\theta_w = R\theta_{w1} = R\theta_{w2}$ とする。また、 $\sin \theta \approx \theta$ 、 $\cos \theta \approx \theta$ と近似し、 $z_1 = L\theta$ 、 $z_2 = -L\theta$ とすると、運動方程式は、以下で求められる。

$$\{2I_w + R^2(M + 2M_T)\} \cdot \theta_w + 2A\theta_w = \tau \quad (6)$$

$$I \cdot \theta + 2cL^2\theta + (2kL^2 - Mgr)\theta = -Mr \cdot x_Q \quad (7)$$

ここで、ピッチング運動を示す式(7)は、1自由度振動系であることから、次の一般的な運動方程式に帰着できる。

$$\theta + 2\zeta\omega_n\theta + \omega_n^2\theta = K_{st} \cdot x_Q \quad (8)$$

ここで、

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2kL^2 - Mgr}{I}} \quad (9)$$

$$\zeta = cL^2 \sqrt{\frac{1}{I(2kL^2 - Mgr)}} \quad (10)$$

$$K_{st} = -\frac{Mr}{I} \quad (11)$$

である。

また、式(6)はRTGの駆動系の運動方程式であるが、モータ容量は負荷に対して十分であるとし、インバータ、モータで速度制御されているものとし、モータの駆動制御系の動特性を、次の1次遅れ系で近似する。ここで、 $n_{mref\%}$ はモータ回転数指令[%]、 $n_{m\%}$ は、モータ回転数[%]、 T_d は、1次遅れ時定数[sec]である。

$$\frac{n_{m\%}}{n_{mref\%}} = \frac{1}{1 + T_d s} \quad (12)$$

ここで、式(8)、(12)および、次の関係式(13)、(14)を使用することにより、RTG走行運動モデルを式(15)の状態方程式とする。

$$x_Q^L = R\theta_w \quad (13)$$

$$n_{m\%} = \frac{100\%}{N_r} \cdot \frac{60R_g}{2\pi} \theta_w \quad (14)$$

ここで、 N_r は、モータ定格回転数[rpm]、 R_g は減速機の減速比である。

$$\begin{bmatrix} n_{m\%} \\ x_Q^L \\ \theta \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_d} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{N_r}{100\%} \cdot \frac{2\pi}{60R_g} \cdot R & 0 & 0 & 0 \\ -K_{st} \cdot \frac{N_r}{100\%} \cdot \frac{2\pi}{60R_g} \cdot \frac{R}{T_d} & 0 & -2\zeta\omega_n & -\omega_n^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_{m\%} \\ x_Q^L \\ \theta \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_d} \\ 0 \\ K_{st} \cdot \frac{N_r}{100\%} \cdot \frac{2\pi}{60R_g} \cdot \frac{R}{T_d} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot n_{mref\%} \quad (15)$$

観測値は、GNSSの計測値から求めたRTG中心の位置信号 x_{Qgnss}^L [m]、およびモータ回転数 $n_{m\%}$ [%]であるとし、観測方程式を以下とする。

$$\begin{bmatrix} n_{m\%} \\ x_{Qgnss}^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_{m\%} \\ x_Q^L \\ \theta \\ \theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

ここで、 $T_d, \omega_n, \zeta, K_{st}$ は物理パラメータから求めることも可能であるが、RTGの走行試験データからの同定により求め、実測値から、 $T_d=0.2[\text{sec}]$, $\omega_n=2.243[\text{rad/s}]$, $\zeta=0.083[-]$, $K_{st}=-3.49 \times 10^{-2}[1/\text{m}]$ とした。

4・2 Input Shaping

RTG 走行運動を停止させたり、走行速度を一定にした時に、ピッチング残留振動を残さないように、制御対象へのプレフィルタを追加することを考え、Input Shaping と呼ばれる技術⁷⁾を適用する。Input Shaping は、1988年頃にMITのグループで発案された技術で、自在な指令値に対してフィルタ補償を追加できる特長を有する。

ピッチング運動の運動方程式(8)の x_Q に、 n 個のインパルスを入力した時の、 n 番目のインパルスを入力した $t=t_n$ における残留振動振幅は、次式となる。ここで A_i, t_i は、 i 番目のインパルスの大きさ、投入時間である。

$$\theta(t_n) = \frac{K_{st}}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} e^{-\zeta\omega_n t_n} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega_n t_i} \cos \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega_n t_i} \sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_i\right)^2} \quad (17)$$

一方、 $t=t_0$ で大きさ1のインパルスを入力した際の残留振動振幅は、次式となる。

$$\theta(t_0) = \frac{K_{st}}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} \quad (18)$$

この基準振幅値で規格化し、2つのインパルスで残留振動をゼロにするように設計されたZV (Zero Vibration) Shaper を使用した。2つのインパルスの大きさと作用させる時間の組合せは、以下で与えられる。

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)}{1 + \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} \\ 1 + \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) & \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} \end{bmatrix} \quad (19)$$

このインパルス列と速度指令値のコンボリューション（畳み込み積分）を行う。

4・3 Kalman Filter

GNSSは、RTGの位置、速度を広範囲に高精度で計測できるセンサであるが、RTGのピッチング運動の影響を受ける。RTGの走行運動モデルを使用して、GNSSの計測値からRTG下部のピッチング回転中心座標 x_Q の位置を推定し、走行制御に使用する。推定には、Kalman Filterの理論を活用する⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

RTGの走行運動モデル式(15)、(16)にプロセスノイズ w 、観測ノイズ v を加えた次のモデルを定義し、それぞれの共分散行列を設計パラメータとして、以下とした。

$$\hat{x} = Ax + Bu + Gw \quad (20)$$

$$y = Cx + v \quad (21)$$

$$E\{ww^T\} = Q \equiv 1 \quad (22)$$

$$E\{vv^T\} = R \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (23)$$

ここで、各変数、定数パラメータは、以下が対応する。

$$\begin{aligned} x &= [n_{m\%} \quad x_Q^L \quad \theta \quad \theta]^T \\ u &= n_{mref\%} \\ y &= [n_{m\%} \quad x_{Qgnss}^L]^T \end{aligned} \quad (24)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_d} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{N_r}{100\%} \cdot \frac{2\pi}{60R_g} \cdot R & 0 & 0 & 0 \\ -K_{st} \cdot \frac{N_r}{100\%} \cdot \frac{2\pi}{60R_g} \cdot \frac{R}{T_d} & 0 & -2\zeta\omega_n & -\omega_n^2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_d} & 0 & K_{st} \cdot \frac{N_r}{100\%} \cdot \frac{2\pi}{60R_g} \cdot \frac{R}{T_d} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (26)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_a \end{bmatrix} \quad (27)$$

以上の準備のもと、MATLAB の `lqw` 関数（後継は `kalman` 関数）を用いて、リッカチ方程式を解き、カルマンゲイン \mathbf{L} を求めた。状態量の推定値 \hat{x} は以下で求められ、この状態方程式を離散化し、制御に用いた。

$$\hat{x} = (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})\hat{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{L}y \quad (28)$$

4・4 走行制御システム構成

本研究で用いた制御システムの全体構成を図8に示す。予め Map データに記録された目標位置 (Target Position) が選択され、現在の RTG の位置との相対距離により、速度指令作成 (Speed Command Generation) モジュールにて速度指令値が作成される。速度指令値を積分した位置指令値信号と Kalman Filter で推定された RTG 中心の走行方向位置 \hat{x}_Q^L が比較され、位置制御コントローラの演算を経た信号を Input Shaping に入力し、モータドライバに速度指令値として指令される。走行中は、白線画像認識により計測した白線に対する RTG の横方向偏差および姿勢角偏差を減ずるように、ならい制御コントローラ (Tracking Deviation & Attitude Controller) の演算により、左右両脚のモータ回転数指令に補正が入る構成となっている。

RTG 中心の走行方向位置が目標位置に近づき、白線画像認識により停止白線が計測できるようになったことをトリガーに、セレクタにより、停止白線の位置を正として、停止白線までの残距離情報に基づいて、目標位置を新しい値として書き換えるとともに、Kalman Filter の出力値から画像認識の残距離情報に基づく位置制御に切り換える。停止白線は、電気室側脚およびエンジン側脚の両方に備えられており、新しい目標位置は、左右脚それぞれに設定され、位置決め制御が行われる。

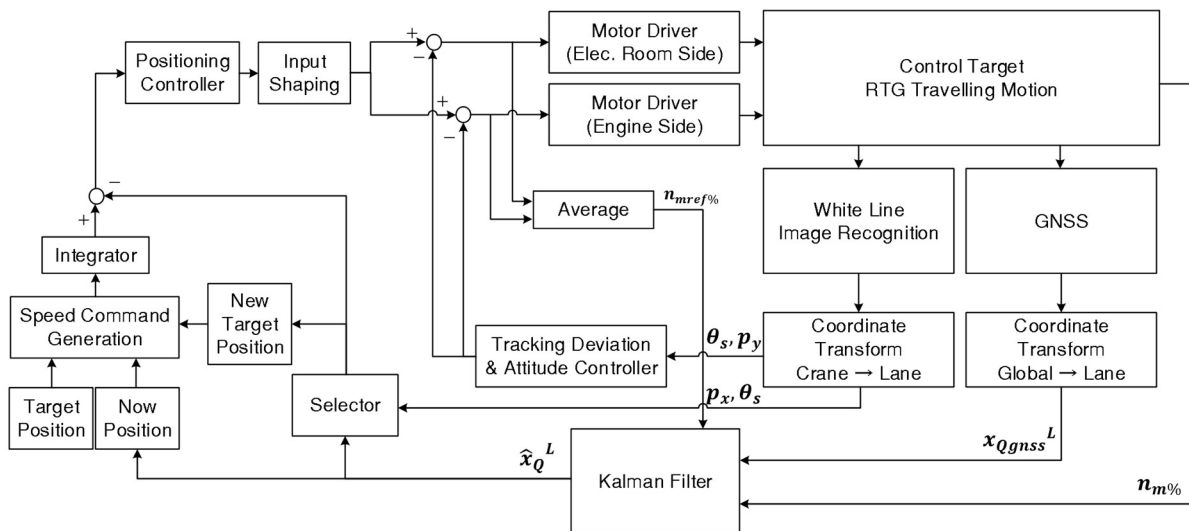


Fig.8 Overall Configuration of Travelling Control System

5. 試験結果

GNSS と深層学習による白線画像認識の計測値を組合せるとともに、RTG のピッチング運動による走行速度変動を抑制し、停止時の残留振動を抑えた走行制御を行った結果を図 9 に示す。本試験では、RTG の走行速度を定格 1.5m/s の約 50% に制限し、画像認識の計測精度、停止白線に対する位置決め誤差、ならびに走行および停止制御の安定性を評価した。

試験結果としては、速度変動の少ない走行が確認でき、ならい制御も横方向偏差と姿勢偏差が抑えられて走行され、位置決め停止も $\pm 20\text{mm}$ 以内で位置決めできることが確認できた。画像認識の計測精度は、その画像および現物を目視確認した結果、計測値も誤差 5mm 程度で認識できていることが確認できた。

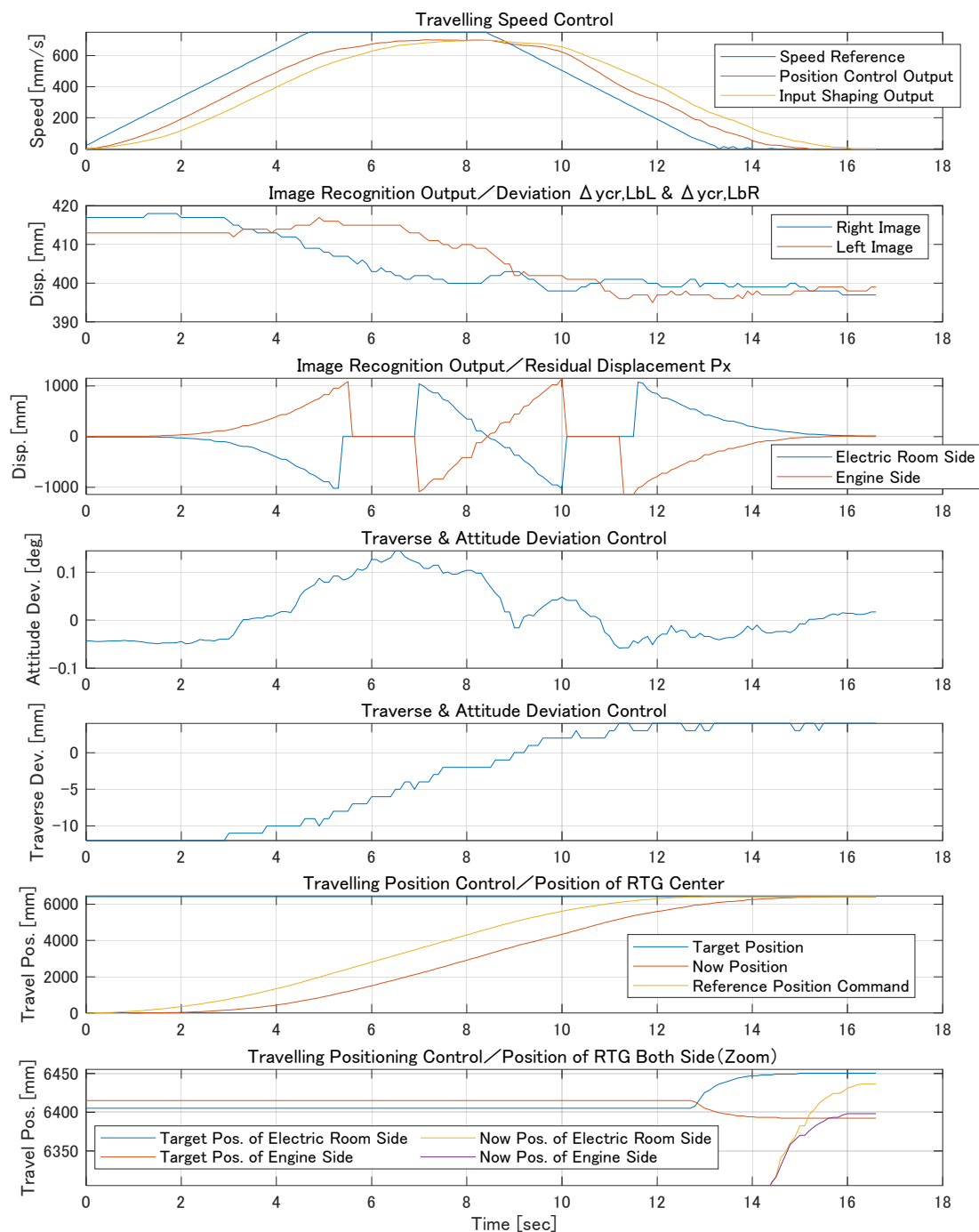


Fig.9 Test Results

図 10 には、走行停止偏差 P_x を画像認識した結果を、GNSS から画像認識結果に切り換えたタイミング、停止位置決め後のタイミングについて、示している。目安棒先端点および停止線中心点が+マークにて検出されており、所定の計測が行われていることが確認できる。同様に、図 11 には、ならい走行制御中の横方向偏差と姿勢偏差を計算するための、左右 2 台のならい走行用画像の認識結果を示している。走行ならい目安棒の端点、仮想目安線と白線中心との交点が+マークにて検出されており、左右カメラの計測結果から、横方法偏差と姿勢偏差が求められることを示している。

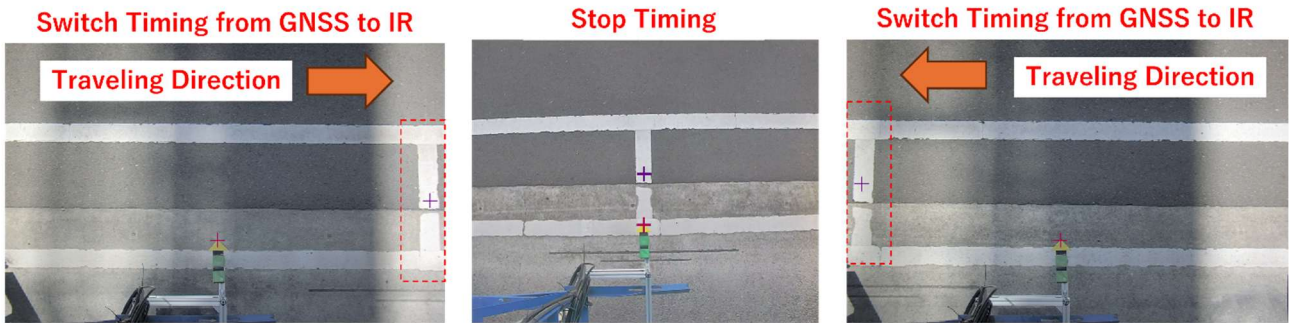


Fig.10 Image Recognition Results of Travel stop deviation (Switching and Stop Timing)

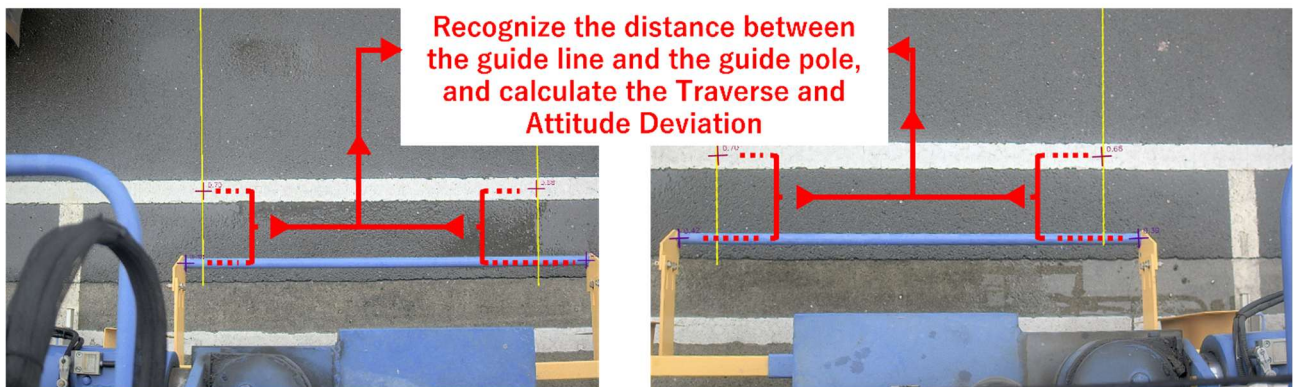


Fig.11 Image Recognition Results of Traverse and Attitude Deviation

6. 結論

本研究では、GNSS と深層学習を用いた画像認識技術を融合し、トランスファクレーンの自動走行位置決め制御に適用した。その結果、クレーン特有のピッチング運動の影響を補償しつつ、高速かつスムーズな高精度位置決めが実現可能であることを確認した。これにより、港湾物流における作業環境の改善、業務効率の安定化、安全性の向上に資する技術的有効性が示された。今後は、深層学習の学習量を増やし、その信頼性を確認しつつ、外乱環境への適応性をさらに高め、実運用に向けた検証を進めることが課題となる。今後も自動化ターミナルにおける遠隔自動 RTG の利便性と効率安定性に寄与できる走行制御システムの機能改善を進めて行く予定である。

文 献

- (1) 中田成幸, 星島一輝, 宮田淳也, “コンテナ荷役の作業環境改善と生産性向上”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 60 卷, 第 2 号(2025).
- (2) 上田剛士, 安部智久, “コンテナターミナルにおける遠隔操作 RTG 導入に対応したレイアウト及びオペレーションに関する基本的考察”, 国土技術政策総合研究所資料, No. 1212 (2022/7), pp. 1-3.
- (3) Feng, Y., Zhang, R., Zhong, L., Wang, H., and Xu, J. "Lane detection algorithm for nighttime digital image based on distribution feature of boundary pixels ",. *Journal of the Optical Society of Korea*, 17(2), (2013), pp.188–199.
- (4) Kawai, H., Zhang, R., Zhong, L., Wang, H., and Xu, J. "Vertical lane line detection technology based on Hough transform",. *Journal of the Optical Society of Korea*, 15(1), (2011) , pp.1–9.
- (5) Yang, J., Zhang, R., Zhong, L., Wang, H., and Xu, J. "Robust lane detection method based on adaptive Hough transform". *Journal of the Optical Society of Korea*, 26(2), (2022) , pp.123–134.
- (6) 長内福智 ほか, “白線画像認識による RTG 走行制御の位置・姿勢計測技術の開発”, 第 43 回日本ロボット学会学術講演会, 3P3-06, 2025.
- (7) N. C. Singer, and W. P. Seering, "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration", *ASME, J. Dyn. Sys., Meas., Control*. Mar 1990, 112(1): pp.76-82.
- (8) 足立修一, 丸田一郎, "カルマンフィルタの基礎", 東京電機大学出版局
- (9) Matlab Control System Toolbox R2024b, リファレンスマニュアル, pp.2-558~569
- (10) Z. Ge, S. Liu, F. Wang, Z. Li and J. Sun, "YOLOX: Exceeding YOLO Series in 2021", *arXiv preprint*, arXiv:2107.08430, (2021).