

MBD 手法による遠隔自動トランスファクレーンの スプレッダ位置決め機能の開発

Development of Spreader Positioning Control System for Remote Automated Transfer Crane by MBD Method

○正 山下 大輔^{*1}, 長野 徹^{*2}, 正 中田 成幸^{*1}

Daisuke YAMASHITA^{*1}, Toru NAGANO^{*2}, and Shigeyuki NAKADA^{*1}

^{*1, *2} 株式会社三井 E&S MITSUI E&S Co.,Ltd.

To enhance the cycle time of transfer cranes used in remote automatic operations, improving the performance of spreader positioning is essential. In this study, the capabilities and layout of an optimal positioning device, as well as the performance evaluation of anti-sway and spreader positioning, were conducted using a coupled analysis method that integrates a three-dimensional physical mechanism model with a control circuit model. This method was confirmed to enable effective investigation of mechanism parameters, control strategies, and control parameters based on dynamic behavior prediction, thereby contributing to the reduction of both development cost and development time.

Key Words : Transfer Crane, Spreader Positioning Control, Model-Based Development, Dynamic analysis,

1. 結 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、安全性強化を目的として、遠隔操作技術および自動運転技術の導入が進んでいる⁽¹⁾。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。これまで、コンテナターミナルではトランスファクレーンとして、レール走行型の ASC（Automated Stacking Crane）と、無軌道上ラバータイヤ走行型の RTG（Rubber Tired Gantry Crane）が主に使用されてきた。これらのクレーンの主要な機能は、シャーシトラックとのコンテナの受け渡し、蔵置エリア内でのコンテナ着床、吊上げ、ならびにそれらの位置間を往復する横行動作である。トランスファクレーンの遠隔自動運転化とは、これらの機能を原則として人の介在なしに自動運転で行い、シャーシトラックが有人運転の場合は、安全確認のため、コンテナの受け渡し操作のみをオペレータが遠隔操作卓から運転することを指す。コンテナのハンドリングを効率的に行い、荷役サイクル時間を改善するためには、吊具（スプレッダ）・把持コンテナの振れ止めと位置決めを実現する機能（スプレッダ位置決め機能）が重要であり、遠隔自動運転化の進展に伴い、この機能の重要性は一層高まっている⁽²⁾。一方、スプレッダ位置決め機能を多自由度化、高精度化、高速化、低コスト化し、高性能化しようとする、機構設計、要素部品の配置設計、要素機器の容量設計、制御設計、動的挙動評価をコンカレントに行いながら、開発設計を進める必要がある。しかし、実際の装置を製作し評価しながら、これらの設計の最適化を図っていくことは、開発時間、およびコスト面から実施困難であるという問題がある。

その問題を解決するために、スプレッダ位置決め機能のコンセプトの考案から詳細設計まで、試作機を製作することなく、MBD（Model-Based Development）手法による開発を試行することとした。本研究では、3次元物理機構モデルと制御回路モデルによる連成解析を行い、スプレッダの振れ止め性能および位置決め性能を評価しつつ、位置決め装置の容量設計、装置レイアウトの設計、制御法および制御パラメータの設計を行い、システム全体の最適化を図った結果について報告する。

^{*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）

^{*2} 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. システム構成

本研究の対象であるトランスファクレーンは、門型のクレーンであり、上部梁（ガーダ）上にトロリと呼ばれる車輪で横行する移動体を有している。コンテナを把持着床させるスプレッダは、トロリからロープを介して懸垂されている。制御対象となるトロリ、スプレッダ懸垂系の機構構成を図1に、制御系も含めたシステム構成を図2に示す。スプレッダの巻上げを担う巻上装置のほかに、スプレッダの微動位置決め機構として、4系統ウインチ式スプレッダ位置制御装置を備えている。スプレッダおよび把持コンテナの重量分は、巻上装置のメインロープで支持し、微動位置決め操作力分のみを4系統ウインチの補助ロープで担うシンプルな機構とするコンセプトである。この機構により、スプレッダおよび把持コンテナの2方向のシフト（横行、走行方向）、2方向の姿勢角（スキュー、トリム方向）の多自由度な調整位置決めが可能となる。また、トロリの横行に伴うスプレッダの振れ止め機能も備えている点が本機構の特長である。本研究ではこれらの機構の実現性を確認し、設計に反映させるためにMBD手法を用いて開発設計を行った。

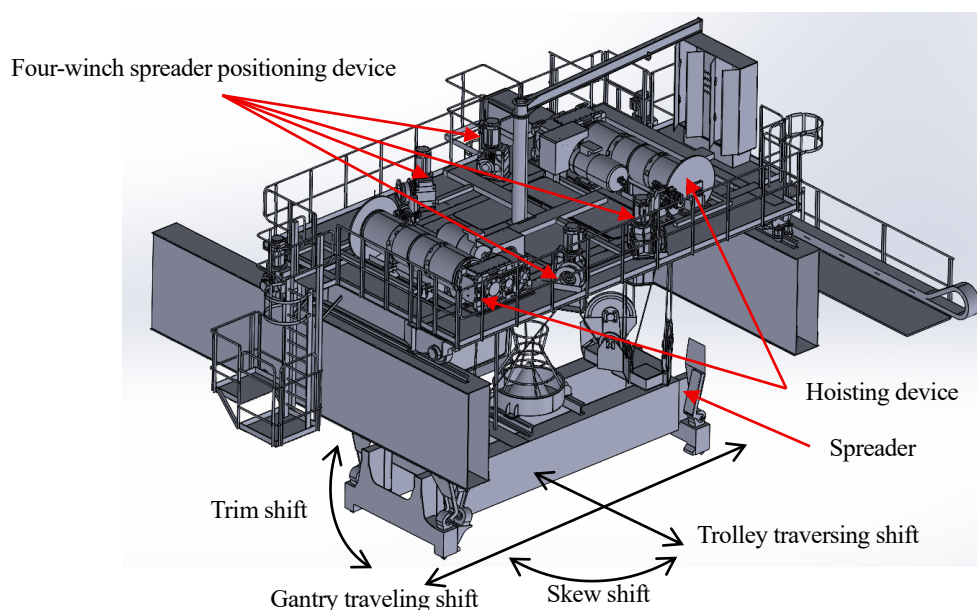


Fig. 1 Conceptual model of four-winch spreader positioning system

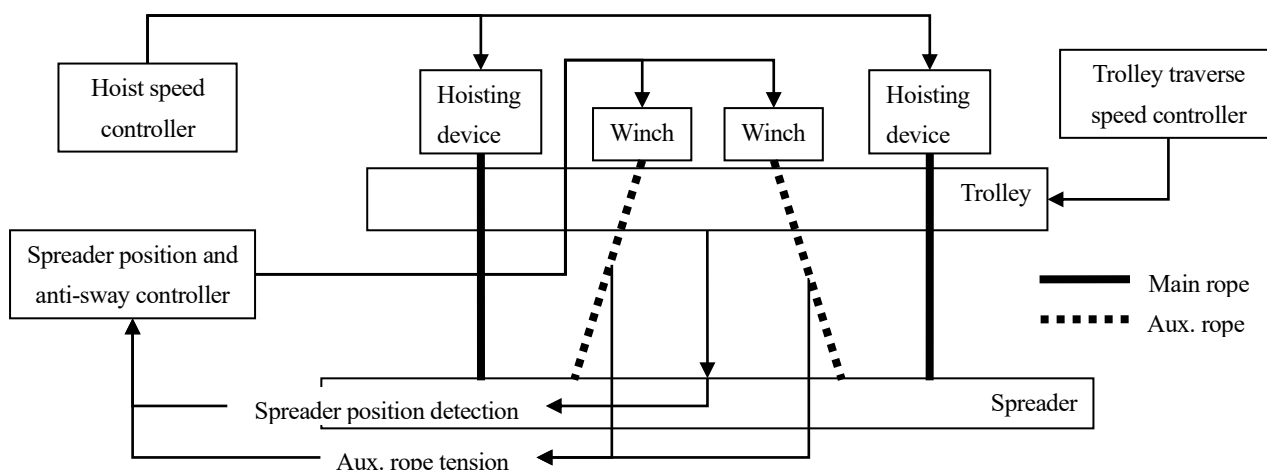


Fig. 2 Conceptual system diagram

3. モデル化

3次元物理機構モデルは、汎用機構解析ソフトウェアであるAdamsを利用してモデル化、制御回路モデルは、数値計算・シミュレーションソフトウェアであるMATLAB/Simulinkを利用してモデル化を行う。

以下に各要素のモデル化の要領について述べる.

3・1 3次元物理機構系のモデル化

3次元物理機構モデルを作成するにあたり, より現実のクレーンに近似したモデルとすることを目標とし, 以下の点に留意してモデリングを実施する.

- ドラム側のロープ繰出し位置と, スプレッド側のシーブの相対位置によって生じるロープの角度により, スプレッドに作用するロープ張力ベクトルを正確に演算可能なモデルとする.
- ロープの伸び, 減衰, およびシーブとの相互作用による機械損失を再現可能なモデルとする.

(1) パート作成

各要素モデルを視覚的なパートで設定する. パートは変形しない剛体であり, 重量や慣性モーメントは, 設定ダイアログにて自由に設定できるほか, 各パートの重心位置を移動させることで, 偏心荷重を考慮した評価も可能である. 本解析モデルでは, 図3に示すトロリフレーム, 巻上装置のドラム, ロープの巻取り位置設定用のダミーパート, スプレッド位置制御装置のウインチ, および図4に示すスプレッド, コンテナのパートを作成した. また, ドラムパートにおいては, スプレッドの揚程に応じた繰出し位置を再現するため, 1個のドラムに対してインナードラム (黄色ソリッドモデル) とアウタードラム (赤色ワイヤフレームモデル) に分離した2種類のパートを作成している.

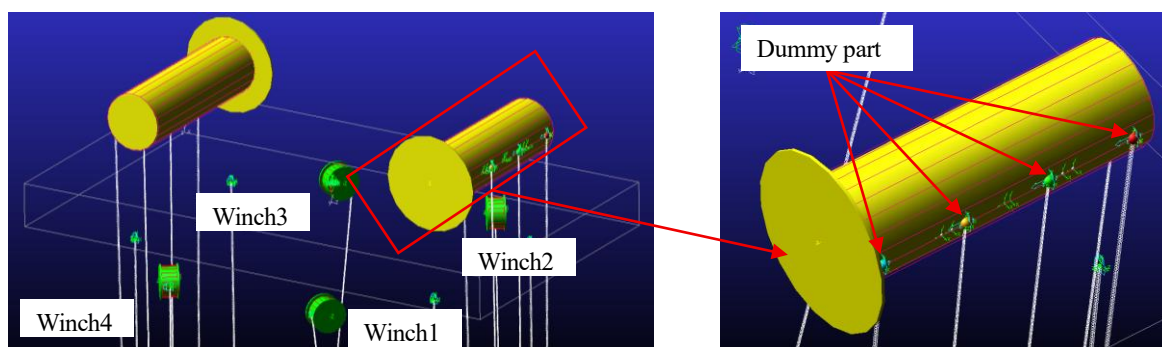


Fig. 3 Trolley part

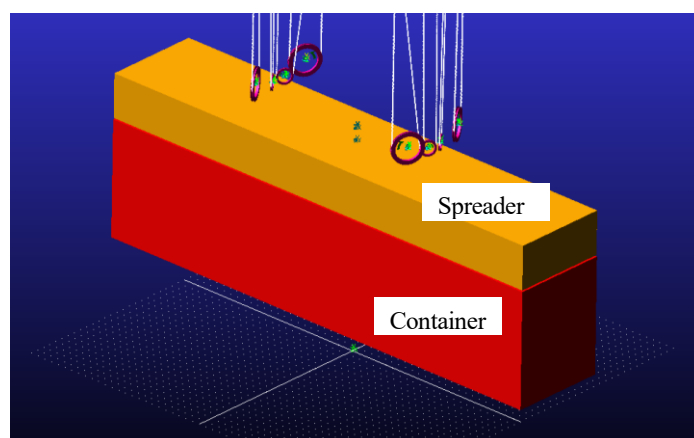


Fig. 4 Spreader part

(2) 拘束条件

ジョイント設定により, 各パート同士の拘束条件を設定する. 可動パートは, 並進3成分, 回転3成分の自由度を有しており, これを拘束する成分の定義づけを行う. 本解析モデルでは, 表1に示すジョイントを設定した.

Table 1 Joint list

Base part	Movable part	Joint type
Ground	Trolley frame	Planar joint
Trolley frame	Inner drum	Fixed joint
Trolley frame	Outer drum	Revolute joint
Inner drum	Dummy part	Translational joint
Spreader	Container	Fixed joint

アウトードラムは回転ジョイントで設定し、ドラムの回転によるロープの巻取り、繰出し量を関数（回転角度（radian）×ドラム半径）により再現させることに加えて、インナードラムは完全固定ジョイントでトロリと結合し、ダミーパートと並進ジョイント結合させた。さらに、ダミーパートはロープアンカーと結合される。通常 Adams では、ドラムの回転によるロープの巻取り、繰出しのみがシミュレーション可能であり、ロープがドラム溝へ巻取られることによって生じる繰出し位置の移動は再現されない。そこで、本設定を施し、ロープの巻取りをアウトードラムへ、ロープ繰出し位置の移動をインナードラムへ役割を分離させることで、図 5 に示すようにドラム回転量（スプレッド揚程）に応じて、ロープ繰出し位置が移動する様子を再現可能とした。これにより、ロープ角度が正確に再現されることで、スプレッドに作用するロープ張力ベクトルが正確に演算され、スプレッドの移動量や、装置の容量設計を正確に評価することができる。

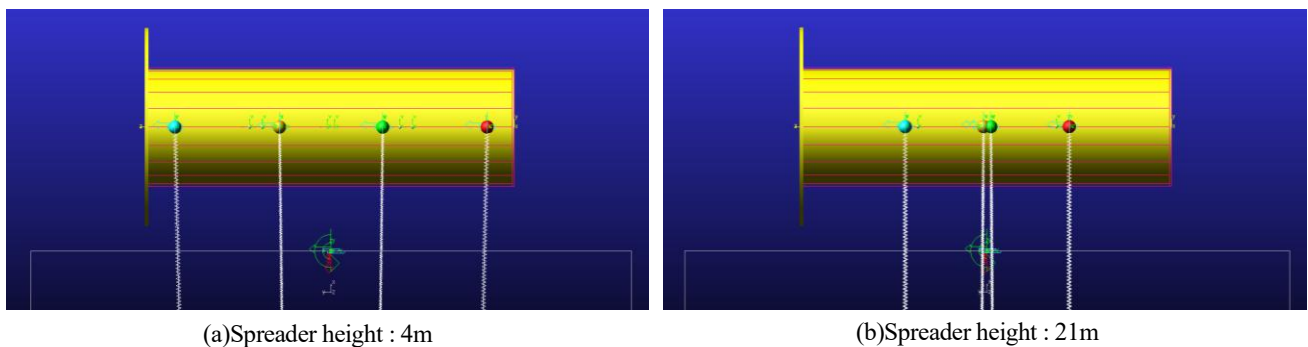


Fig. 5 Movement of the rope winding position due to changes in the spreader height

(3) モーション作成

モデルを構成する各パートの動作を設定する。本解析モデルでは、クレーンの基本動作であるトロリの横行、各ドラムの回転を連成解析入力によるモーションとして設定し、ダミーパートはドラム 1 回転ごとにロープ溝 1 ピッチ分水平移動するよう、並進移動モーション関数を設定した。ドラムを 1 個のパートで作成すると、外部入力によるドラムの回転モーションに、ロープアンカーが接続されるダミーパートも追従してしまい、らせん運動を呈してしまう。これを防ぐため、(1) および (2) にて前述したとおり、完全固定したドラムパートを別に用意し、これとダミーパートを並進ジョイント接続することとした。

(4) ロープ、シーブ要素作成

トロリ上の巻上装置によってスプレッドを巻上げする機構、および各ウインチの補助ロープをモデル化するため、ロープとシーブ要素のモデリングを行う。ロープ要素は、質量と慣性を持ち、伸びに対する弾性と減衰作用を持つ要素としてモデル化される。さらに、シーブ要素については、回転軸に対する慣性モーメントだけでなく、ロープとの摩擦係数、シーブ溝形状の設定もできることから、ロープとの接触による減衰を再現することができる。

作成したクレーンの 3 次元物理機構モデルを図 6 に示す。

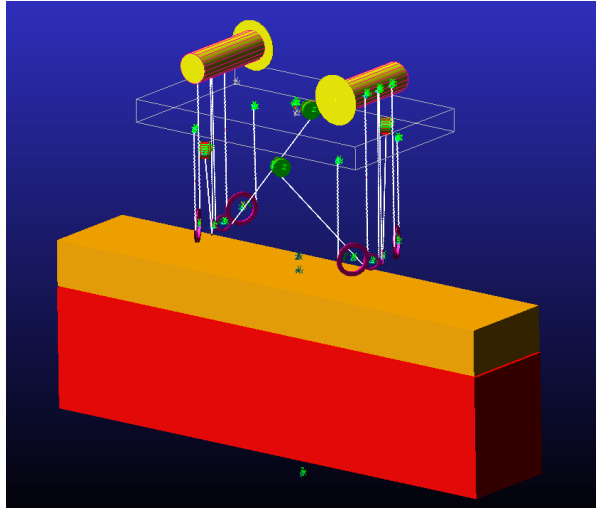


Fig. 6 Mechanism model of crane

3・2 制御系のモデル化

スプレッド位置制御装置は、以下の3点の機能を持たせるよう、制御系の構築を行うことを目指す。

(1) シフト機能使用時

トロリ横行方向、クレーン走行方向、スキュー方向のシフト動作を行うため、それぞれの動作に応じた補助ロープに張力を与え、必要動作量に達した時点でその張力を保持するようなフィードフォワード (FF) 制御を行う。もしくは、スプレッドの必要動作量を指令値として与え、動作量計測値をフィードバック (FB) してその偏差を0にするように張力を与えるFB制御を行う。あるいはそれらを同時に行う2自由度制御を行う。

(2) トロリ横行動作時

トロリ横行時の加減速度に応じて補助ロープに張力を与え、慣性力によるスプレッドの振れを張力によってキャンセルするFF制御を行う。もしくは、スプレッドの振れ量の計測値をFBし、これを0とするよう振れ止めを行う張力を与えるFB制御を行う。あるいはそれらを同時に行う2自由度制御を行う。

(3) 待機時 (シフトおよびトロリ横行動作停止時)

補助ロープがたるまない程度の張力指令 (一定値) を、以下で述べる張力マイナーループ制御系に与え、装置に設置された荷重センサの計測値と一致するように制御することにより、スプレッドの巻上下げによる補助ロープのたるみ、過度の張りを抑制し、自動的に補助ロープ長さが調整されるようにする。

ウインチ駆動用モータのインバータはトルク制御で使用し、トルク制御系を図7に示すモデルと仮定する。

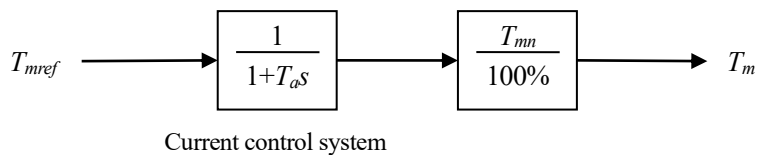


Fig. 7 Winch motor torque control block diagram

ここで、 T_{mref} はトルク指令値[%], T_a は電流制御系 (1次遅れ近似) 時定数[sec], T_{mn} はモータの定格トルク[Nm], T_m はモータの出力トルク[Nm]である。

また、モータトルクからロープ張力までの外乱を補償するため、図8に示すように荷重センサの計測値をFBし、張力指令値との偏差を0に近づけるPIDコントローラを加え、マイナーループ制御系とした。

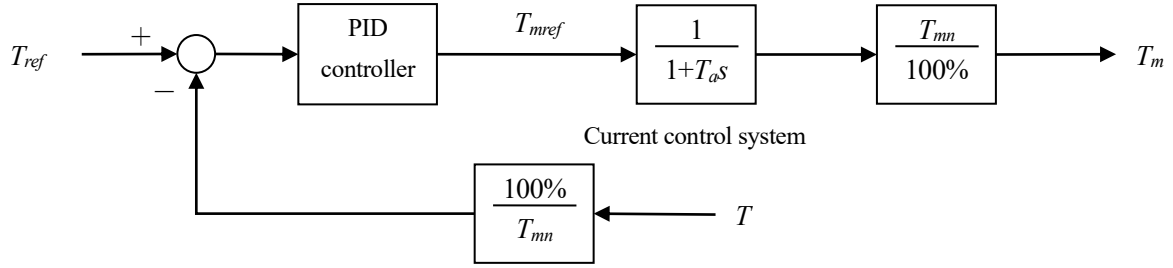


Fig. 8 Winch motor torque control block diagram with PID controller

ここで、 T_{ref} は張力指令値[%]、 T は荷重センサの計測値[N]をモータトルクに換算したトルク値[Nm]である。

これに加えて、スプレッダのシフト量をFBするメジャーループ制御を行う。制御系構築のため、ウインチ 1, 4 に対応したモータへ 4%→100%のステップ指令、ウインチ 2, 3 に対応したモータは 4%の指令を継続させる横行シフト動作のステップ応答のシミュレーションを行い、制御対象の動特性の把握を行った。シミュレーションの一例として横行方向のシフト動作について、その仕様を表 2 に示し、結果を図 9 に示す。

Table 2 Specifications for step response analysis

Spreader weight(t)	Container weight(t)	Spreader height(m)	Aux. motor power(kW)
10.2	40.6	12.0	4.0

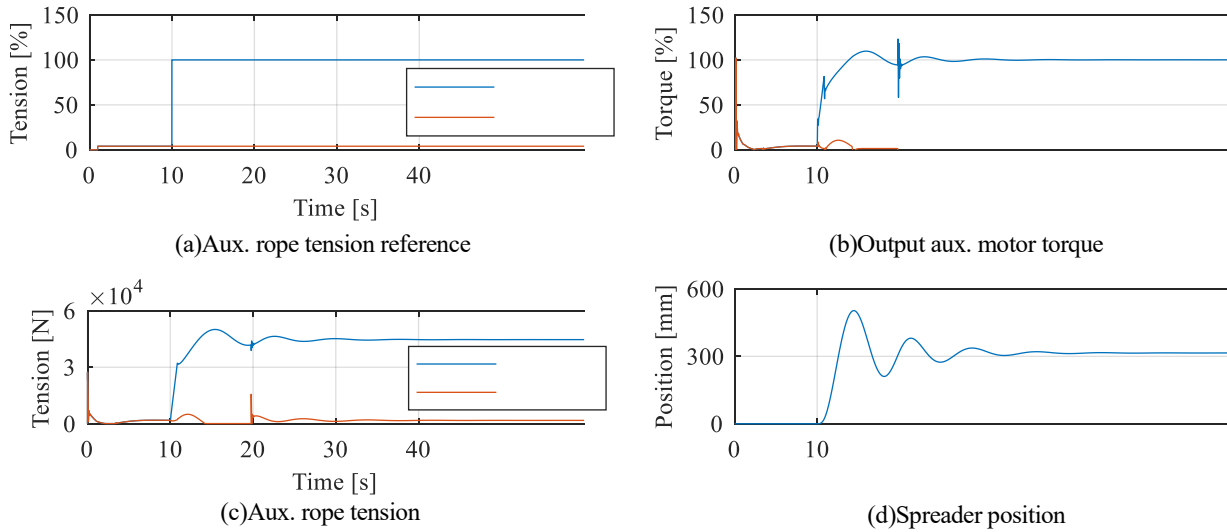


Fig. 9 Trolley traversing shift dynamics

図 9 のシミュレーション結果から、張力指令からスプレッダの横行シフト位置までの伝達関数を以下とし、各パラメータを同定した。ここで、 $RT_{A1\&4}(s)$ はウインチ 1, 4 の張力指令、 $RT_{A2\&3}(s)$ はウインチ 2, 3 の張力指令をそれぞれラプラス変換した関数、 $X(s)$ は横行シフト位置の応答をラプラス変換した関数である。

$$\frac{X(s)}{RT_{A1\&4}(s)} = \frac{K_X \omega_X^2}{s^2 + 2\zeta \omega_X s + \omega_X^2}, \quad X > 0 \quad (1)$$

$$\frac{X(s)}{RT_{A2\&3}(s)} = \frac{-K_X \omega_X^2}{s^2 + 2\zeta \omega_X s + \omega_X^2}, \quad X < 0 \quad (2)$$

走行方向のシフトとスキュー方向のシフトも同様の応答特性が確認できたため、以下の代表モデルに対して、統一的に制御設計を行う。ここで、 $u(s)$ は操作を行うシフトとその方向に対応する補助ロープの張力指令（操作量）、 $y(s)$ は対応するシフト位置（制御量および観測量）である。

$$P(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \quad (3)$$

この式(3)を制御対象として、2自由度制御系の制御を行うこととし、図10のモデルを作成した。

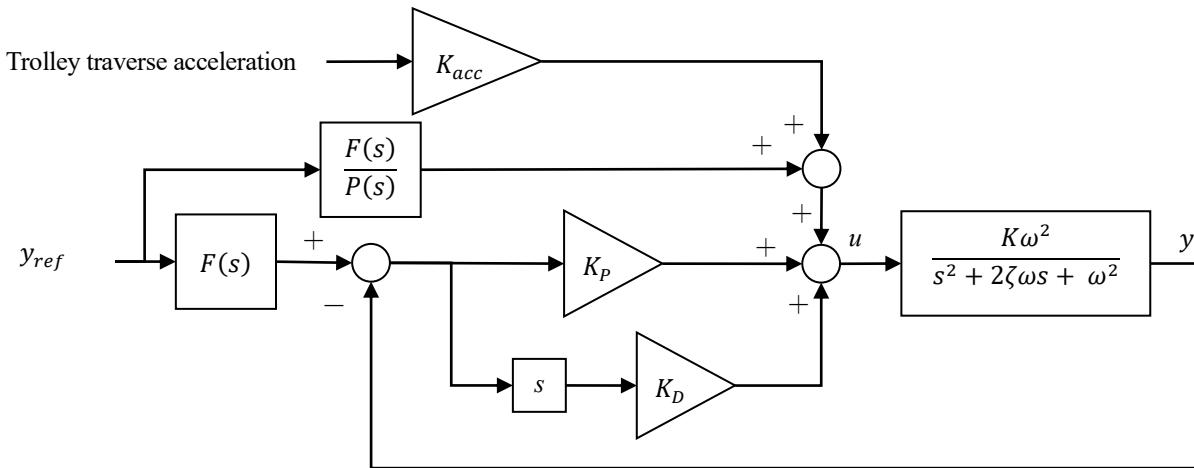


Fig. 10 Two-degree-of-freedom control block diagram for anti-sway

FB系は比例-微分型のコントローラとし、状態FBの極配置法により決定した。

また、FF制御系は制御対象の逆モデルを利用することとし、FF制御のコントローラとして伝達関数が真にプロパーとなるように、以下の規範モデル $F(s)$ を導入し、 $F(s)/P(s)$ をFFコントローラとする。

$$F(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f\omega_f s + \omega_f^2} \cdot \frac{1}{T_d s + 1} \quad (4)$$

ここで、 ζ_f はオーバーシュート特性を調整するパラメータであり、 T_d と ω_f は、応答性を調整するパラメータである。

この構成により、基本的な振れ止めを含め応答性を調整する部分をFF部で担い、FB部ではモデル化誤差やロープ長変化、風外乱などへの対処を担う構成とする。これにより、FBゲインをハイゲイン化することなく応答性を追求でき、安定性と応答性のバランスの取れた横行方向、走行方向、スキュー方向の振れ止め付きのシフト動作制御が可能となる。

さらに、トロリの横行動作には、加速度によるスプレッドの振れが発生するが、この振れを補助ロープの張力で制御するため、横行方向のシフト制御系には、トロリの横行加速度信号にゲイン K_{acc} を作用させ、張力指令に加えるFF制御を追加した。従来では、トロリ横行動作時のスプレッド振れ止めは、トロリの運動制御により行われていたが⁽²⁾、この手法と比較して、補助ロープ張力で振れ止めを行うことで、横行時間の短縮が期待できる。

3.3 連成解析システム

作成した3次元物理機構モデルと制御回路モデルより、閉ループシステムによる連成解析システムを構築する。制御対象となる3次元物理機構モデルは、Adamsプラントとして出力し、さらに巻上、横行速度制御コントローラを加え、図11に示す連成解析システムを構築した。MATLAB/simulinkにて、各種コントローラによる制御操

作量が数値計算され、Adamsへ入力される。Adamsでは、入力に応じた動解析がシミュレーションされ、動解析結果から出力された応答が、MATLAB/simulinkにフィードバックされる連成解析システムとなっている。

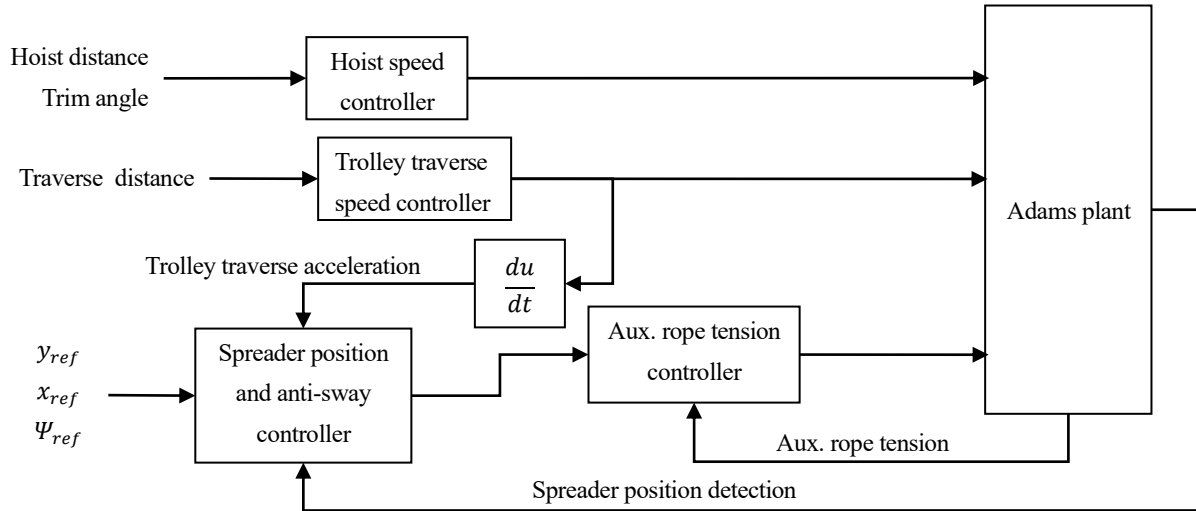


Fig. 11 Coupled analysis system

4. 解析結果

作成した連成解析モデルを用いて、シフト性能、振れ止め性能の要求値を満たすことができ、さらにコストのバランスを考慮したスプレッド位置制御装置レイアウト、モータ容量、減速比、各種制御パラメータのサーベイを実施した。各シフト量に対する、シフト位置決め時間の要求性能は下記の通りである。

横行シフト：±200mm，10sec 以内，走行シフト：±250mm，10sec 以内，スキューシフト：±5deg，9sec 以内

シフト位置指令は、トルク指令の飽和を避けるためランプ関数で与え、また、スプレッドの応答の遅れを考慮し、傾きを以下の通りとした。

$$y_{ref} = 200\text{mm}/5\text{sec}, x_{ref} = 250\text{mm}/5\text{sec}, \Psi_{ref} = 5\text{deg}/4.5\text{sec}$$

シフト位置指令に対する応答について、解析結果の代表として、スプレッドの揚程を 12m に設定した場合の横行シフトを図 12，走行シフトを図 13，スキューシフトを図 14 にそれぞれ示す。

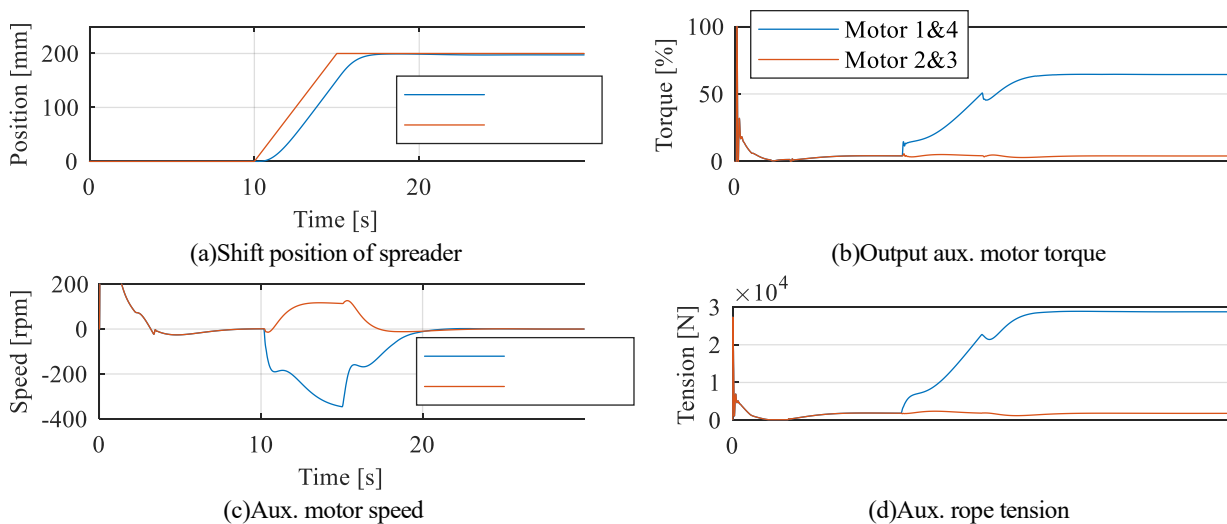


Fig. 12 Trolley traversing shift analysis results

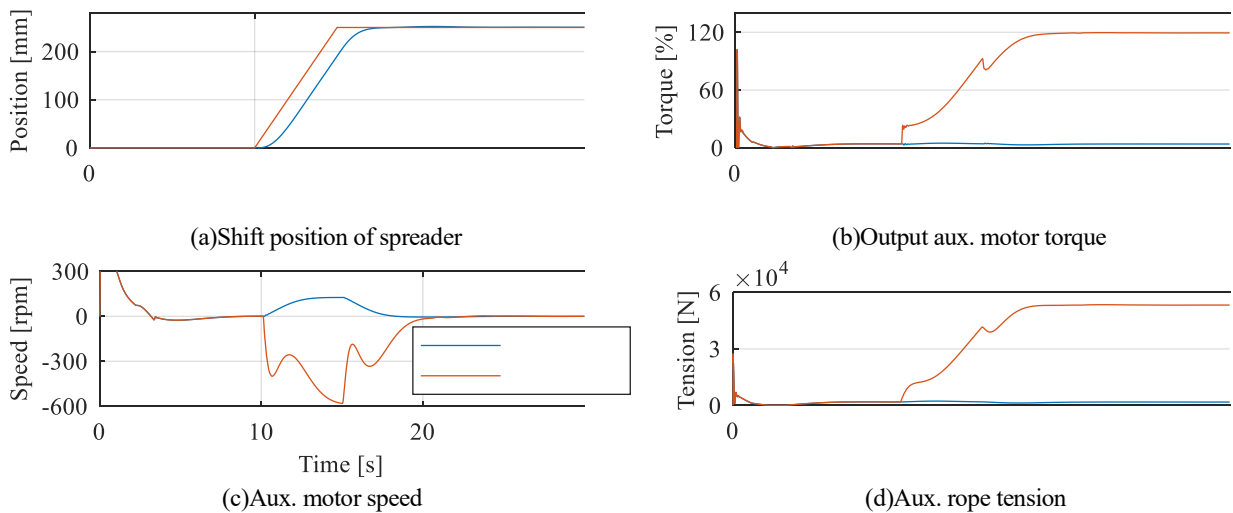


Fig. 13 Gantry traveling shift analysis results

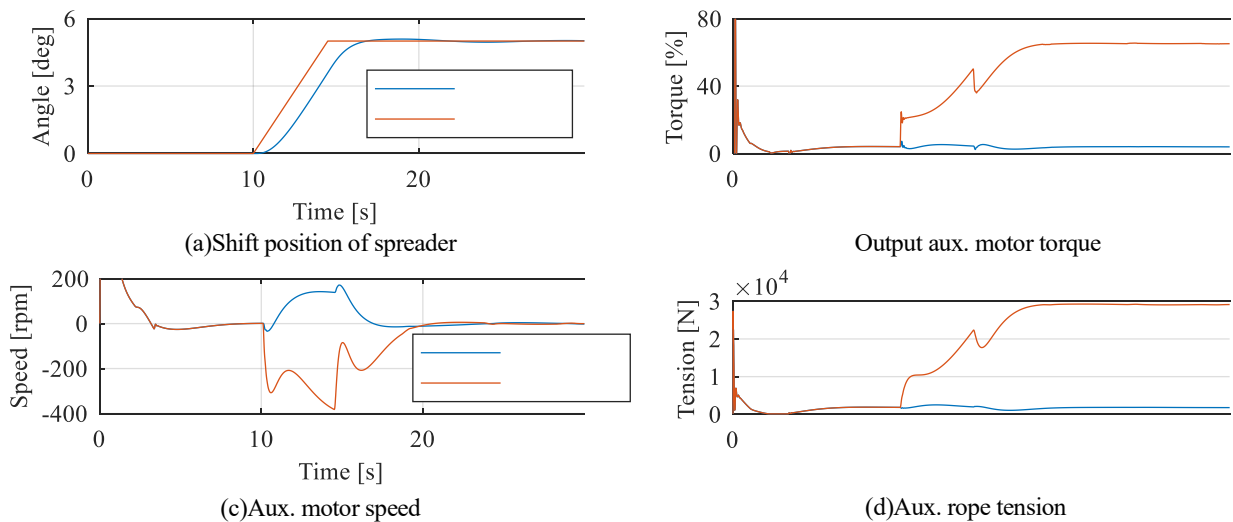


Fig. 14 Skew shift analysis results

3方向のシフト応答について、図12から図14それぞれの(a)に着目すると、スプレッドの振れが発生することなく、要求性能の時間内に、指令位置までのシフトが完了していることが確認できる。(b)に着目すると、最大モータ出力トルクは、定格トルクの100%前後で推移しており、(c)に着目すると、モータ使用回転域は定格回転数(1800rpm)以下であることから、装置容量の選定は妥当であるといえる。

続いて、 $y_{ref} = 0$ に指令値を固定し、トロリを横行させる速度指令を与えた場合の、横行振れ止めの解析結果を図15に示す。スプレッドの揚程は12mに設定し、トロリの速度に関する条件、およびFFゲインは以下の通りの設定とした。

最大横行速度 $V_{max} = 70\text{m/min}$, 横行加減速度 $a_{tr} = \pm 0.224\text{m/s}^2$, FFゲイン $K_{acc} = 400\%/(\text{m/s}^2)$

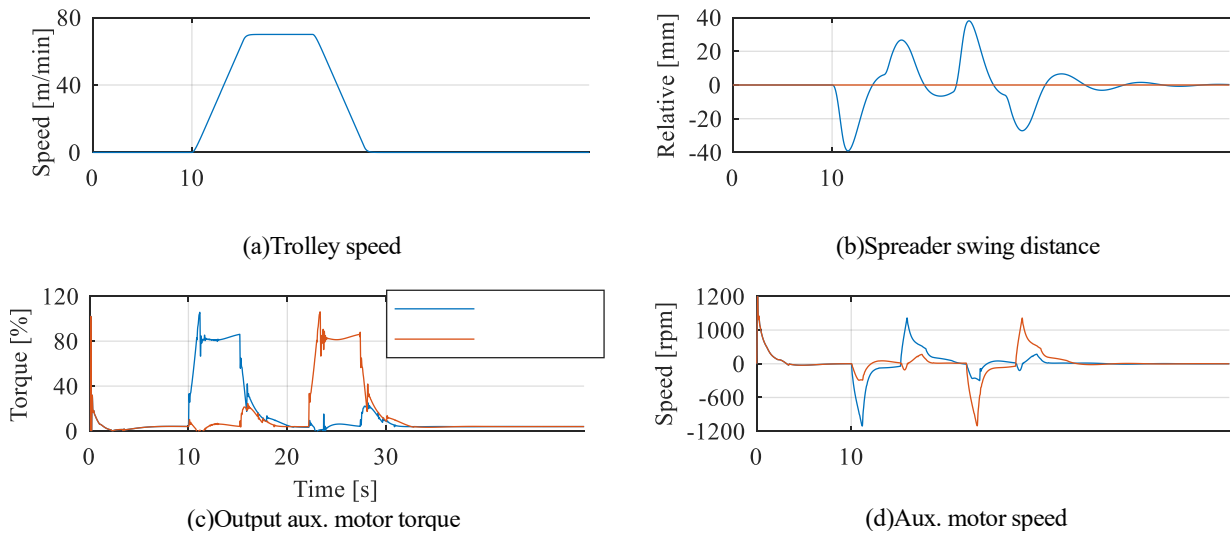


Fig. 15 Anti-sway analysis results

横行振れ止め性能について、(a)と(b)に着目すると、横行加減速中のスプレッドの最大振れ量は約 40mm であり、FF ゲインの調整次第でさらに抑えられる。また、横行停止後のスプレッドの残留振れも微少であり、振れの収束も早いので、横行停止後にスプレッドとコンテナの位置合わせ動作を直ちに開始できると考えられ、サイクルタイムの短縮が期待できる。また、(c)に着目すると、最大モータ出力トルクは定格トルクの 100%前後で推移しており、(d)に着目すると、モータ使用回転域は定格回転数以下であることから、装置容量の選定は妥当であるといえる。

5. 結 語

作成した 3 次元物理機構モデルと制御回路モデルの連成解析により、要求性能を達成できるスプレッド振れ止め位置決め制御回路が構築できた。さらに、各パラメータのサーベイが実施でき、試作機等の実機を製作することなく、トランスファクレーンのコンセプトモデル考案から、機械装置および制御回路の基本設計までを MBD 手法により進捗させることができた。なお、3 次元物理機構モデルの妥当性については未検証であるため、制御回路モデルや、サーベイしたパラメータの妥当性は、作成した 3 次元物理機構モデルに対する検証にとどまっている。そのため、実機試験データを取得し、本研究結果との比較を行うことで、各モデルやパラメータの妥当性を検証することが次の課題となる。

今後、本研究によって得られたパラメータをもとに詳細設計を進めたのち、試作機を製作する予定である。試作機に対して、構築した振れ止め位置決め制御を行った際のスプレッドの応答と、本研究によって得られた 3 次元物理機構モデルの応答を比較することで、構築した各モデルの妥当性が検証でき、本研究にて行った開発プロセスそのものが妥当であったかの検証がなされると考えている。それにより、遠隔自動運転に対応したクレーンの開発設計における MBD 手法が確立され、開発期間やコストの継続的な削減に努めることができ、今後のスマート港湾の発展により一層貢献できると考える。

6. 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、エムエスシーソフトウェア株式会社の小曾戸克世氏には、3 次元物理機構モデルのベースモデルの作成、並びに Adams によるシミュレーション方法をご指導いただきました。ここに深く感謝申し上げます。

文 献

- (1) 高橋浩二, 世界の自動化コンテナターミナルの動向分析, 港湾空港技術研究所報告, 56-4(2018), 3-67
- (2) 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)