

## 有段変速クレーンの高速制振搬送に関する研究

著者	松井 功祐
学位名	博士（工学）
学位の種類別	課程博士
報告番号	甲第505号
研究科・専攻	工学専攻
学位授与年月日	2022-09-26
URL	<a href="http://doi.org/10.15118/00010874">http://doi.org/10.15118/00010874</a>

# 博士論文

有段変速クレーンの高速制振搬送に関する研究

Study on Anti-Sway and High-Speed Transfer for Multi-Step

Speed Operation Crane

2022年9月

室蘭工業大学大学院

工学研究科 工学専攻

松井 功祐

Kosuke Matsui

# 目次

目次 .....	i
要旨 .....	iii
Abstract .....	iv
第 1 章 はじめに .....	2
第 2 章 時間多項式法による FF 制御入力 .....	11
2.1 クレーンモデルとダイナミクス .....	11
2.2 走行, 横行, 巻きの 3 軸同期搬送 .....	16
2.2.1 走行時間が一番大きい場合( $T_y > T_x, T_l$ ) .....	20
2.2.2 横行時間が一番大きい場合( $T_x > T_y, T_l$ ) .....	21
2.2.3 巻き時間が一番大きい場合( $T_l > T_x, T_y$ ) .....	22
第 3 章 更新型 FF 制御入力生成アルゴリズムによる制御入力 .....	25
3.1 トロリの駆動系に制約があるクレーンシステム .....	25
3.2 三角波比較法を利用した FF 制御入力の近似 .....	26
3.3 更新型 FF 制御入力生成アルゴリズム(UFFT) .....	27
3.4 UFFT を利用した 3 軸同期制御 .....	30
第 4 章 シミュレーション .....	34
4.1 シミュレーションモデル .....	34
4.1.1 Simscape Multibody モデル .....	37
4.1.2 Simulink サブシステム .....	42
4.2 シミュレーション結果 .....	45
第 5 章 実験 .....	52
5.1 実験装置 .....	52
5.2 実験結果 .....	69
5.3 吊り荷の質量変化に対するロバスト性の評価 .....	74
第 6 章 更なる制振性能の向上 .....	76

6.1 NSFTC アルゴリズム .....	76
6.2 シミュレーション .....	82
<b>第 7 章 おわりに</b> .....	<b>87</b>
<b>謝辞</b> .....	<b>88</b>
<b>参考文献等</b> .....	<b>89</b>
<b>付録</b> .....	<b>94</b>
付録 1 UFFT 制御入力式の導出 .....	94
付録 2 Simscape Multibody モデル .....	104
付録 3 Simulink サブシステム .....	110
付録 4 記号表 .....	115
<b>研究業績</b> .....	<b>118</b>
学術誌掲載論文 .....	118
国際会議発表 .....	118

# 要旨

クレーンによる吊り荷の高速自動搬送には、高度な自動制御技術が求められる。ワイヤロープを用いて玉掛けした吊り荷を、クラブトロリの巻き上げ装置を用いて吊り上げたあと、駆動装置によって目的地に向けて搬送すると、クラブトロリの加減速によって吊り荷に振り子運動が生じる。このとき、制振制御を考慮せずに目的地の直上まで搬送した場合、目的地に到着したあとも吊り荷には振れが残留する。このため、すぐに吊り荷を地面に着地させることができず、クレーンの総運搬時間が長くなり、運搬効率の低下を招く。したがって、クレーンで吊り荷の高速自動搬送を行うとき、吊り荷の振り子運動を制御して、目的地で振れを収束させるための制振制御技術が必要である。これまで、制振制御に関するさまざまな方法が提案されているが、トロリの駆動システムに加速度一定の制約を持つクレーンに対する制振制御法は報告されていない。このようなシステムは旧式の有段変速クレーンに多く採用されており、リレー回路による on/off 指令でトロリが駆動される。

そこで本論文では、トロリ駆動システムに加速度一定の制約をもつクレーンに適用可能な、新たなフィードフォワード (FF) 制振制御法を提案する。本手法は、時間多項式による FF 制御法 (FFT) に基づき、制約条件を考慮するために FFT 法により生成した制御入力をパルス幅変調法 (PWM) により近似する。FFT 法は線形近似モデルにより FF 制御入力を生成するためモデル化誤差が生じる。また、生成した制御入力を PWM 制御入力で近似するため量子化誤差が生じる。これらの誤差の影響に対してロバストな制御入力を生成するアルゴリズムとして更新型 FFT 法 (UFFT) と総当たり更新型 FFT 法 (NSFTC) を構築した。これらは、残留振れが小さくなるように制御入力を繰り返し計算するアルゴリズムであり、シミュレーションによる性能評価によって、FFT 法より有効な制振制御法であることを確認した。さらに、FFT 法に比べて UFFT 法が有効な制御法であることを、実験評価用クレーンを利用して実証した。実験ではさらに、吊り荷の質量変化に対してロバストな制御入力も探索できることを確認した。以上、本論文では、クレーントロリの駆動システムに加速度一定の制約を持つ有段変速クレーンにおいて、高速制振搬送のための FF 制御入力を生成できる新たなアルゴリズムを提案し、その有効性をシミュレーションと実験で明らかにした。

# Abstract

Advanced automatic control technology is required for high-speed automatic transport of suspended loads by cranes. When a suspended load slung by a wire rope is lifted by a hoisting device of a crane's club trolley and transported to a destination by a driving device at high speed, a pendulum motion is caused by the acceleration and deceleration of the trolley. If the trolley is moved above the destination without considering sway control, the load continues to oscillate even after arrival. Therefore, the load cannot be immediately unloaded, and the crane transportation time increases, resulting in a deterioration in yard productivity. High-speed automatic transfer of suspended load by crane requires technology to sway control. A number of crane control methods have been proposed in the past. However, if the drive system of the crane has restrictions, the conventional anti-sway control method may not be directly applicable. This type of system is used for many older cranes which are driven of multistep speed by on/off relay circuits.

In this study, we propose a feedforward (FF) control input generation method that can realize automatic anti-sway transport of a suspended load for a crane system with restrictions that the trolley can only accelerate or decelerate at a constant rate; the switching frequency of the acceleration input cannot be too high. The proposed method combines the FF control input generation using the time-polynomial (FFT) method and pulse width modulation (PWM) control. In the FFT method, the derived FF control input may be unable to suppress the swing of the suspended load because of the modeling error in deriving the FF control input and the quantization error in approximating the FF control input by the PWM control input. To solve these problems, we propose two algorithms. First algorithm is the update type FF control input generation using the time-polynomial (UFFT) method, second algorithm is the neo-style FF control input generation using the time-polynomial (NSFTC) method, both of which evaluates the residual sway at a constant time interval and updates the original FF control input derived by the FFT method. The effectiveness of these methods is confirmed through simulations. Moreover, the effectiveness of the UFFT method is experimentally confirmed, and it is also confirmed that a control input that is robust to the mass variation of the suspended load can be easily explored. In conclusion, we propose the new FF control input generation algorithms for high speed transfer in a multi-step speed operation crane.

# 第1章

はじめに

# 第1章

## はじめに

クレーンによる吊り荷の高速自動搬送には、高度な自動制御技術が求められる。ワイヤロープを用いて玉掛けした吊り荷を、クラブトロリの巻き上げ装置を用いて吊り上げたあと、駆動装置によって目的地に向けて搬送すると、クラブトロリの加減速によって吊り荷に振り子運動が生じる。このとき、制振制御を考慮せずに目的地の直上まで搬送した場合、目的地に到着したあとも吊り荷には振れが残留する。このため、すぐに吊り荷を地面に着地させることができず、クレーンの総運搬時間が長くなり、運搬効率の低下を招く。したがって、クレーンで吊り荷の高速自動搬送を行うとき、吊り荷の振り子運動を制御して、目的地で振れを収束させるための制振制御技術が必要である。制振制御技術は、これまで多くの方法が提案されている。[1]では、Rahman らによって、1961 年以降のクレーンの制振制御に関する種々の研究をレビューしてまとめている。2000 年以降の制振制御技術に関するレビュー論文では、Ramli ら[2]によって、2016 年までのレビューがまとめられている。[3]-[10]では、ファジィ推論を用いた制振制御法が提案されている。天井クレーンにおけるファジィ制御の適用例として、Wang ら[7]は、吊り荷の変位とクレーンの旋回角をそれぞれファジィコントローラで設計することで、制振制御に関する制約を単純化し、計算量を軽減する方法を提案している。ロータリクレーンにおけるファジィ制御の適用例として、Arvin ら[8]は、MATLAB Simulink を用いてファジィ PID コントローラを設計し、シミュレーションによって、高い搬送能力を有しながら荷振れを抑制する手法を提案している。ガントリークレーンにおけるファジィ制御の適用例として、Ahmad ら[9]は、駆動システムに外乱を有する条件下における制振制御法を提案している。比例微分ファジィコントローラを開発し、シミュレーションによって性能を評価している。そのほか、Wu ら[10]は、 $H_{\infty}$ 制御とファジィ推論を組み合わせた制振制御法を提案している。次に、Zhang ら[11]は、三次元天井クレーンシステムに対して、吊り荷の振れを抑制するモデルに依存しない PD-SMC 法を提案している。He ら[12]は、クレーンのワイヤロープが柔軟性を持つ場合の制振搬送方法を提案している。吊り荷の残留振れを抑制する手法は、フィードバック (FB) 制御とフィードフォワード (FF) 制御の二つに大別することができる。FB 制御は、吊り荷の振れ量を FB してトロリを制御することで吊り荷の振れを収束させる。FB 制御を活用した制振搬送法も数多く提案されている[14]-[21]。例えば[14]では、Neupert らによって、最適制御理論を用いた港湾用移動式クレーンの制振・追従制御法を提案している。Helma ら[15]は、ガントリークレーンのアクティブクレーン FB 制振制御法を提案している。これは FB 制御で生成した参照軌道の周りで

システムを安定化させるために、荷とトロリの位置を正確に測定する必要があるため、IMU センサを用いて吊り荷の状態を取得して、クローズドループ系を構築するものである。IMU センサを用いた振れ角測定としての他の報告は、Kalmari ら[16]によるものがある。クレーンブームの先端と吊具の二箇所にセンサを設け、測定値をカルマンフィルタによって補正することで、旋回角と振れ角を測定する方法を提案している。IMU センサ以外の振れ角取得手法として、K. Sorensen ら[17]は吊り荷の振れ角測定にターゲットマーカとカメラによる画像処理技術を利用して、産業用クレーンのクレーン操作用マニピュレータシステムを開発している。また、Wu ら[18]は、ドットマーカを用いた橋形クレーンの吊り荷の位置検出方法を提案している。天秤に設けた二点のマーカを、トロリから天秤に向けて設置した単眼カメラで撮影し、撮影画像のピクセル間距離から吊り上げ高さを演算している。また、吊り荷の角度やオフセンター角度の演算方法も提案している。Yang ら[21]は、天井クレーンのFB制御による安定搬送法を提案している。非線形適応追従制御則を解くことで、トロリの位置と振れ角の制御が可能となり、吊り荷の質量や長さに依存しない閉ループシステムによる高い安定化法を提案している。

以上、FB制御を用いた搬送は、目的地に到着した時の残留振れがほとんど無く、トロリの高い位置決め精度を実現できる手法である。しかしながら、FB制御でトロリを最大速度付近で制御する場合、制御入力飽和、制御性能低下してしまう可能性があるため、トロリの動作速度を最大速度よりも小さくしておく必要がある。つまり、クレーンの搬送能力を最大発揮できない可能性があり、高速自動搬送にFB制御を適用できない場合がある。次に、機械的な制振法として、La ら[22]は、センサレスによる制振制御方法を提案している。ラジアルスプリングダンパを用いて振れを低減している、タワークレーンの吊具と吊荷の間にダンパを適用して、効果的に減衰する手法を提案している。Kim ら[23]は、吊具に可動式マスダンパを設けることで、残留振れを抑制する手法を提案している。ワイヤロープによる吊り荷の振り子運動を、機械的に抑制する優れた手法である一方で、専用の吊具を取り付ける必要があるため、機構部の維持管理が必要となるほか、吊り荷重量の増加が懸念される。次に、Ermidoro ら[24]は、天井クレーンにおいて、ゲインスケジューリング法を用いた制御法を提案している。FBコントローラに、ロープ長に合わせた制御システムを組み込むことで残留振れを低減している。Wang ら[25]は、スライディングモード制御による橋形クレーンの制振制御装置を提案している。Le ら[26]は、スライディングモード制御に基づいて、三次元天井クレーンの制振制御法を提案している。

次に、FF制御について述べる。FF制御は、制振搬送制御入力あらかじめ設計されている手法で、これまでに数多くの提案がある[27]-[44]。Tallman ら[27]はポジティブキャスト制御法を提案している。さらに、Singar ら[28]は、[27]を基礎として、機械系、電気系や空気系への適用を可能としたプリシェイピング法を提案している。これはクレーンで吊り荷を搬送する際にトロリへ入力する加速波形を、入力波形周期の半周期経過後に同じ加速波形を与えることで、搬送中に吊り荷に加えられたエネルギーを打ち消して制振搬送を実現する

手法である。Abe ら[29]は、ブーム式旋回クレーンの制振制御法について提案している。目的地で振れが抑えられる吊り荷の軌道を求めることができるロバスト FF 制御法を提案している。さらに Abe ら[30]は、ニューラルネットワークを用いた天井クレーンの位置決め後の制振制御法を提案している。残留振れ角を評価値として粒子群最適化にて学習させることで、制振搬送軌道を生成する方法を提案している。Ramli ら[31]は、天井クレーンにおける、プリシェイピング法とニューラルネットワークを組み合わせた制振アルゴリズムを提案している。Ramli ら[32]はさらに、外乱を含む天井クレーンの制振制御法として、ニューラルネットワークを組み合わせ、外乱に適応する制御ゲインをリアルタイムに取得する手法を提案している。Rincon ら[33]は、クレーンの FB 情報をもとに、ニューラルネットワーク ANN 機械学習を用いたクレーンの FF 制御を提案している。Kurihara ら[34]は、FF 制振制御法として、台車の起動設計に関する減衰非線形系の残留振れ抑制法を提案している。Feng ら[35]は、オイラーラグランジュの方程式と外乱に基づいた複合制御器を提案している。クレーンの搬送問題を線形二次レギュレータで最適化し、さらに外乱を考慮するために改良したオブザーバー制御器を新たに開発している。三好ら[36]は、時間多項式法を用いた FF 制御入力生成法を提案している。この手法は、吊り荷の制振搬送を行うためのトロリの加速度入力を、時間多項式で表現している。そのためこの加速度入力は、プリシェイピング法に比べて滑らかにできる特徴を持つ。また、ロープの巻上げ動作がある場合でも、簡単に制御入力を求めることができる。ただし、これら FF 制御法は、減衰のない理想的な条件の元で制振性能を発揮するため、実際の現場で発生する摩擦や外乱によって制御性能が低下してしまう。そこで、Maghsoudi ら[37]は、摩擦を考慮した制振制御法を提案している。さらに Abdullahi ら[38]は、屋外の突風による外乱を考慮した FF 制御法を提案している。また、吊具と吊り荷による二重振り子運動に関する研究として、Moradi ら[39]は、天井クレーンによる制振搬送について、三自由度システムとして二重振り子をモデル化し、レギュレータ問題として荷振れを抑制する手法を提案している。Huang ら[40]は、吊り荷と天秤で二重振り子になる場合の橋梁クレーンの動特性と制振制御について、理論解析と実験解析を行っている。小規模な橋梁クレーンで実験を行い、設計したシステムの有効性を評価している。Jaafar ら[41]は、二重振り子の吊り荷に対する天井クレーンの振れ問題に対して、FF コマンドシェイピング法を提案している。従来の一般的な制御法に必要なクレーンシステムの減衰比や吊り荷の固有振動数を必要としない制御法を提案している。Maghsoudi ら[42]は、三次元天井クレーンの制振制御法として、非線形モデルを解いた UMZV シェイパーの制御スキームを提案している。Ouyang ら[43]は、エネルギーシェイピング法を基礎として、二重振り子の非線形制振制御装置を提案している。以上、FF 制御を用いた制振制御法はいずれも、目的地の直上まで搬送が完了すると同時に、吊り荷の振れが抑えられるような制御入力をあらかじめ求めておく方式である。そのため、トロリの搬送速度を、定格最高速度を用いることができ、搬送時間の短縮が見込める。したがって、クレーンに高い搬送能力が必要となる場合や、FB システムを搭載していないクレーンに対しても、大規模な装置改造を行わずに適用可能な

方法である。以上のように、FB 制御および FF 制御のどちらにおいても、制振搬送に関する技術は実際の現場に適用できるレベルまで発展を遂げ、数多くの提案がなされている。しかし一方で、クレーンの駆動システムに制約があるとき、上述の制振制御法を直接適用できない場合がある。例えば、トロリがリレー回路による on/off 信号で動作し、さらにトロリの加速度も一定の場合である。このようなシステムは旧式のクレーンに採用されていることが多い。このようなタイプのクレーンでは、これまでに述べた手法によって求めた制振加速度入力をクレーンが再現できない。リレー回路方式のクレーンに対する FF 制振法の提案例は少ないが、K. Sorensen らによる報告が行われている[44]。これはリレー回路による on/off 指令と、1 ステップの加速度のみを用いて制振搬送を行っている。しかしこれは、プリシェイピング法をベースとした制振搬送制御のため、1 ステップの加速度で制振加速度入力を生成できるような搬送条件とする必要があり、トロリの加速時間が吊り荷の固有周期よりも長いクレーンに限定される。

以上のように、リレー回路による駆動方式を有し、かつトロリの加速時間を長く必要とするクレーンを対象とした、FF 制御による高速制振搬送に関する研究は見当たらない。そこで本研究では、トロリ駆動システムの加速度が一定で、リレー回路による on/off 指令でクレーンが動くという制約があり、さらにトロリの加速時間が吊り荷の固有周期よりも長い場合でも適用可能な、新たな FF 制振制御法を検討する。今回提案する手法は、FFT 法[36]とパルス幅変調 (PWM) 制御を組み合わせたもので、三好らの時間多項式法による FF 制御法 (FFT) をベースとしている。まず、[36]と同様に時間多項式による FF 制御入力を導出する。次に、導出した制御入力を、三角波比較方式により PWM 制御入力として近似する。この入力は元の入力を on/off 信号により近似しており、この場合、FF 制御入力を導出する際のモデル化誤差や、FF 制御入力を PWM 制御入力で近似する際の量子化誤差により、導出した FF 制御入力では吊り荷の振れを抑制できない可能性がある。これらの問題を解決するために、一定の時間間隔で残留振れを評価し、FFT 法で導出したオリジナルの FF 制御入力を更新する時間多項式 (UFFT) 法による更新型 FF 制御入力生成法を新たに設計する。提案手法の有効性はシミュレーションと実験により確認した。本手法は、FF 制御入力の更新周波数と PWM 周波数を適切に設定することで、モデル化誤差や量子化誤差の影響を低減した制振搬送を実現できる。また、コントローラの制御入力切り替え周波数が高くなくても、残留振れを抑えることができる FF 制御入力を、探索的に得ることができる。

ここで、Fig. 1-3 は、これまでに提案されてきた制振制御法を分類し、体系的に表したものである。今回提案する UFFT 法は、FF 制御に FB 制御の要素を組み合わせたハイブリッド手法に属する。制御入力を予め求めておく FF の要素に、量子化誤差の低減のため事前にシミュレーションによりトロリの状態を考慮する FB の要素を加えた制振制御法となっている。今回、適用の対象としているクレーンの構造は、Fig. 1-1 に示すように工場屋外や岸壁に設置されるガントリークレーンや、Fig. 1-2 に示すように工場屋内に設置される天井クレーンである。これらのクレーンは、工業用途で一般的に普及しているクレーンで、3 軸の

駆動システムによって吊り荷を運搬する。本論文では、これらのクレーンのうち、トロリの駆動システムに制約を持つ場合でも適用可能な、高速制振搬送法を提案している。本論文は Fig. 1-4 に示すように構成されている。第 2 章では、FFT 法を用いて制振制御入力を導出する。第 3 章では、FFT 法によって導出された FF 制御入力を、残留振れが低減されるように更新する UFFT (Update type FFT) 法を述べる。第 4 章では、UFFT 法によって導出された FF 制御入力を、制振性能を検証するために行ったシミュレーション結果を述べる。次に第 5 章では、制振性能評価用クレーンを製作して搬送実験を行った結果を述べる。第 6 章では、UFFT のさらなる改良アルゴリズムである NSFTC(Neo Style UFFT)法について考察する。最後に第 7 章では、まとめと今後の展望について述べる。



Fig. 1-1 コンテナ輸送用ガントリークレーン([1]より)



(a) クレーンガーダー部と吊り具



(b) 横行トロリ部

Fig. 1-2 天井クレーン([17]より)

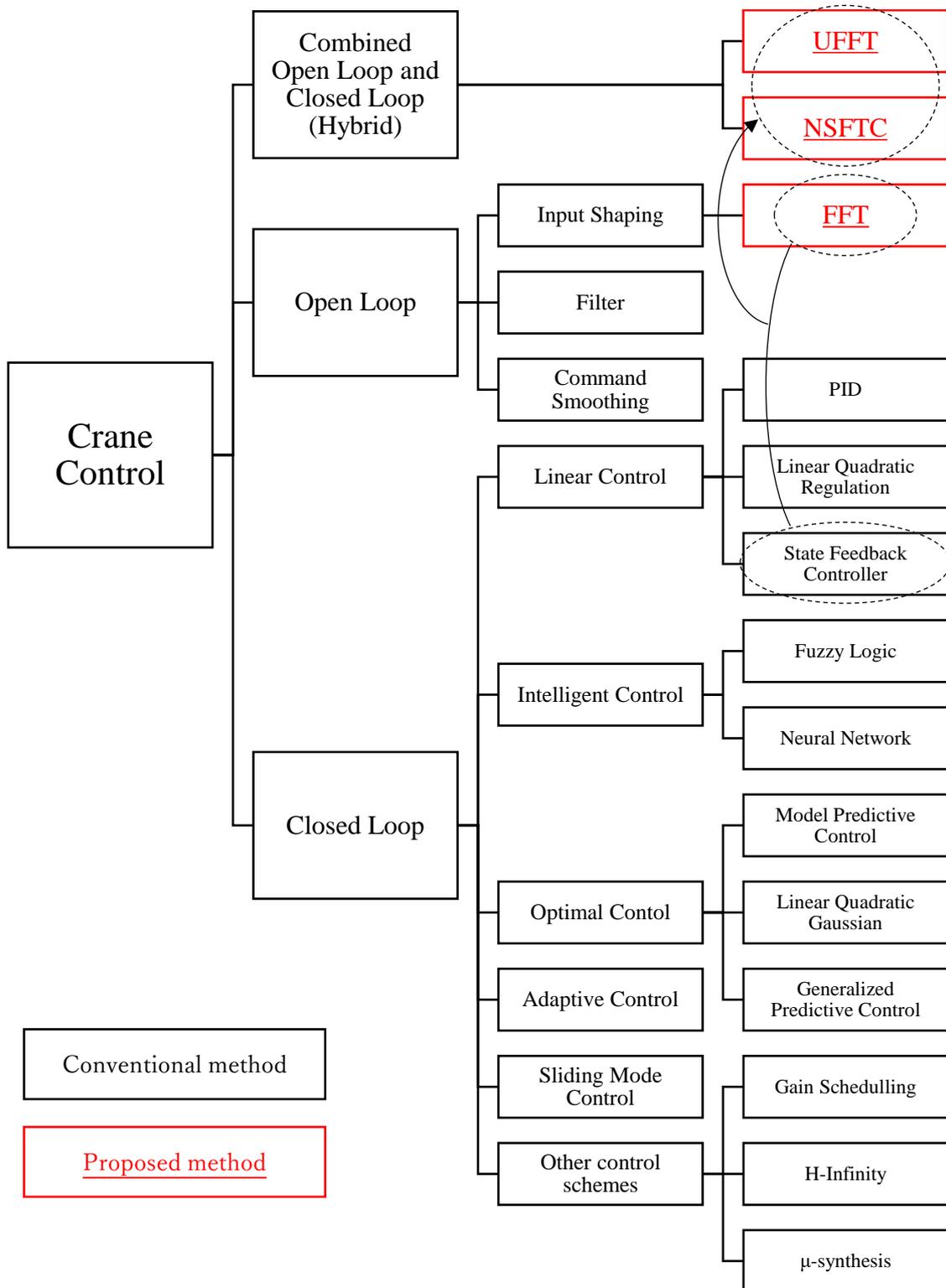


Fig. 1-3 クレーン制振制御法の分類 ([2]より, 一部改)



Fig. 1-4 論文の構成

## 第 2 章

### 時間多項式法による FF 制御入力

## 第2章

### 時間多項式法による FF 制御入力

本研究では、三好らによる時間多項式法[36]を基礎として、クレーンシステムの FF 制御入力を生成する FFT アルゴリズムを構築する。本章では、時間多項式 FF 制御入力を導出する方法について述べる。

#### 2.1 クレーンモデルとダイナミクス

Fig. 2-1 に示すようなクレーンシステムを考える。  $x$  はトロリの位置、  $\theta$  は鉛直軸に対する吊り荷の角度、  $l$  はトロリから吊り荷までのロープの長さ、  $M$  はトロリの質量、  $m$  は吊り荷の質量、  $f_1$  はトロリに加える力、  $f_2$  は吊り荷に加える力である。

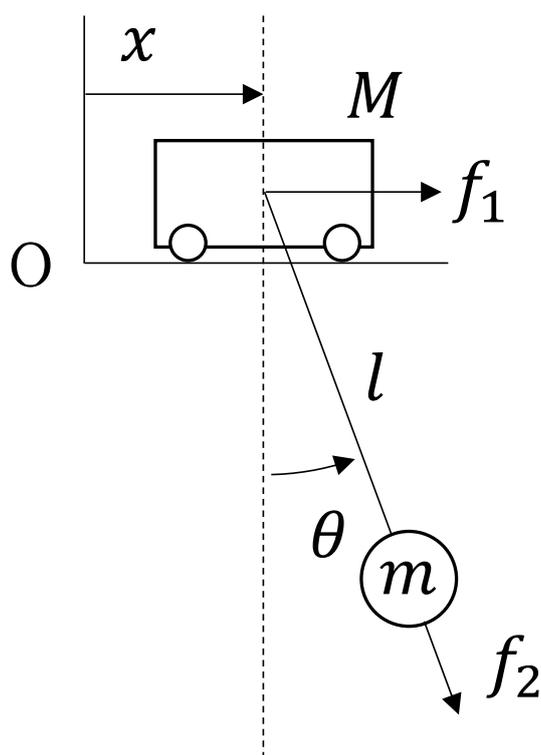


Fig. 2-1 モデル化したクレーンと吊り荷

このモデルではロープの質量はないと仮定する。クレーンシステムの運動エネルギー $K$ 、ポテンシャルエネルギー $U$ は以下になる。このモデルでは、ロープの質量は十分に小さく無視できるものとする。

$$K = \frac{1}{2}(M + m)\dot{x}^2 + \frac{1}{2}ml^2\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}m\dot{l}^2 + ml\dot{x}\dot{\theta} \cos \theta + m\dot{x}l \sin \theta \quad (1)$$

$$U = -mgl \cos \theta \quad (2)$$

ここで、 $g$ は重力加速度である。第2種のラグランジュ方程式より運動方程式は以下のようになる。

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = f_1 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{l}} \right) - \frac{\partial L}{\partial l} = f_2 \quad (5)$$

なお、本論文では、 $(\dot{\cdot}) = \frac{d(\cdot)}{dt}$  の表記を使用している。 $L = K - U$ はラグランジュアンである。

[45]より、式(1)(2)を式(3)(4)(5)に代入すると、クレーンシステムの運動方程式が以下のよう  
に得られる。

$$(M + m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta + m\ddot{l} \sin \theta + 2ml\dot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = f_1 \quad (6)$$

$$ml\ddot{x} \cos \theta + ml^2\ddot{\theta} + 2ml\dot{\theta} + mgl \sin \theta = 0 \quad (7)$$

$$m\ddot{x} \sin \theta + m\ddot{l} - ml\dot{\theta}^2 - mg \cos \theta = f_2 \quad (8)$$

本研究ではトロリの加速度 $\ddot{x}$ を制御入力 $u$ とする。

$$\ddot{x} = u \quad (9)$$

また、吊り荷の振れ角は、クレーンによる運搬のため微小 $|\theta| \ll 1$ であると仮定する。このとき、式(7)において $\cos \theta \approx 1, \sin \theta \approx \theta$ とすると以下となる。

$$l\ddot{\theta} + 2l\dot{\theta} + g\theta = -u \quad (10)$$

さらに、吊り荷のロープ長は以下のような3次関数で変化させるとする。

$$l(t) = l_0 + l_1 t + l_2 t^2 + l_3 t^3 \quad (11)$$

(9)(10)(11)を利用して、制振FF制御入力 $u$ を求める方法について述べる。時間 $t = 0$ からトロリを加速し、 $t = T$ においてトロリの目標速度を $V$ 、目標位置を $VT/2$ 、吊り荷の振れ角と角速度は0の状態(13)となる制御入力 $u$ を導出することを考える。

$$\begin{pmatrix} x(0) \\ \theta(0) \\ \dot{x}(0) \\ \dot{\theta}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} x(T) \\ \theta(T) \\ \dot{x}(T) \\ \dot{\theta}(T) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} VT/2 \\ 0 \\ V \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

(12)は,  $t = 0$ でトロリと吊り荷が静止状態であることを示している. (13)は, 所望の速度と位置を $V$ と $VT/2$ とし,  $t = T$ で吊り荷の振れがない状態であることを示している. ここで, 台車の位置 $x$ , 振り角 $\theta$ , 制御入力 $u$ が以下の時間多項式で表されるとする.

$$x(t) = \sum_{k=0}^{j_x} x_k t^k \quad (14)$$

$$\theta(t) = \sum_{k=0}^{j_\theta} \theta_k t^k \quad (15)$$

$$u(t) = \sum_{k=0}^{j_u} u_k t^k \quad (16)$$

上式より, 全ての未知変数 $x_k, \theta_k, u_k$ の数は以下となる.

$$j_x + 1 + j_\theta + 1 + j_u + 1 \quad (17)$$

(14) (16)を(9)に代入したとき, 両辺の $t$ の次数は等しくなければならないので, 以下の関係を得る.

$$j_x - 2 = j_u \quad (18)$$

また, 両辺の各次数の係数が等しくなければならない. このとき, 各次数の係数に関して得られる方程式の数は以下となる.

$$j_x - 2 + 1 \text{ or } j_u + 1 \quad (19)$$

同様に(11)(15)(16)を(10)に代入したとき, 両辺の最大次数が等しい条件から, 以下の関係を得る.

$$\max(3 + j_\theta - 2, 2 + j_\theta - 1, j_\theta) = j_u \quad (20)$$

上式より以下の関係が得られる.

$$j_\theta + 1 = j_u \quad (21)$$

また, 各次数の係数に関して得られる方程式の数は以下となる.

$$j_\theta + 1 + 1 \text{ or } j_u + 1 \quad (22)$$

境界条件(12)(13)を(14)(15)に代入したとき, 得られる方程式の数は8である. よって未知変数に関して得られるすべての方程式の数は以下となる.

$$j_x - 2 + 1 + j_\theta + 1 + 1 + 8 \quad (23)$$

未知変数の数と方程式の数が等しくなければ, 未知変数を求めることができない. そこで, (17)と(23)が等しいとして整理すると, 以下となる.

$$j_u = 6 \quad (24)$$

上式を(18)(20)に代入して整理すると以下となる。

$$j_x = 8, j_\theta = 5 \quad (25)$$

よって、(9)(10)の解は以下のような時間多項式で表すことができる。

$$x(t) = \sum_{k=0}^8 x_k t^k \quad (26)$$

$$\theta(t) = \sum_{k=0}^5 \theta_k t^k \quad (27)$$

$$u(t) = \sum_{k=0}^6 u_k t^k \quad (28)$$

(11)(26)(27)(28)を(9)(10)に代入して得られる式と、(12)(13)で表される境界条件を(26)(27)(28)に代入して得られる式から未知変数 $x_k, \theta_k, u_k$ に関する 22 個の連立方程式を得ることができる。これらの連立方程式を解くと、 $u_k$ は以下のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= -\frac{420 V l_0 (2 l_2 - g + 6 T l_3)}{T^3 (54 T^2 l_3^2 - 42 T g l_3 + 84 T l_2 l_3 + 7 g^2 - 28 g l_2 + 28 l_2^2)} \\ u_1 &= -\frac{1260 V (2 g l_0 - 4 l_0 l_2 - T g l_1 - 18 T l_0 l_3 + 2 T l_1 l_2 + 6 T^2 l_1 l_3)}{T^4 (54 T^2 l_3^2 - 42 T g l_3 + 84 T l_2 l_3 + 7 g^2 - 28 g l_2 + 28 l_2^2)} \\ u_2 &= -\frac{210 V (6 l_3 T^3 g + 60 l_3 T^3 l_2 - T^2 g^2 - 8 T^2 g l_2 + 20 T^2 l_2^2 - 216 l_1 l_3 T^2 + 24 l_1 T g - 48 l_1 T l_2 + 216 l_0 l_3 T - 12 l_0 g + 24 l_0 l_2)}{T^5 (54 T^2 l_3^2 - 42 T g l_3 + 84 T l_2 l_3 + 7 g^2 - 28 g l_2 + 28 l_2^2)} \\ u_3 &= \frac{420 V (-42 T^3 l_3^2 + 16 T^2 g l_3 + 148 T^2 l_2 l_3 - T g^2 - 16 T g l_2 + 36 T l_2^2 - 180 l_1 T l_3 + 10 l_1 g - 20 l_1 l_2 + 60 l_0 l_3)}{T^5 (54 T^2 l_3^2 - 42 T g l_3 + 84 T l_2 l_3 + 7 g^2 - 28 g l_2 + 28 l_2^2)} \\ u_4 &= \frac{210 V (432 T^2 l_3^2 - 66 T g l_3 - 408 T l_2 l_3 + g^2 + 26 g l_2 - 56 l_2^2 + 180 l_1 l_3)}{T^5 (54 T^2 l_3^2 - 42 T g l_3 + 84 T l_2 l_3 + 7 g^2 - 28 g l_2 + 28 l_2^2)} \\ u_5 &= \frac{1260 V l_3 (7 g + 28 l_2 - 108 T l_3)}{T^5 (54 T^2 l_3^2 - 42 T g l_3 + 84 T l_2 l_3 + 7 g^2 - 28 g l_2 + 28 l_2^2)} \\ u_6 &= \frac{63000 V l_3^2}{T^5 (54 T^2 l_3^2 - 42 T g l_3 + 84 T l_2 l_3 + 7 g^2 - 28 g l_2 + 28 l_2^2)} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

(28)(29)は境界条件(12)(13)を満たす FF 制御入力である。式(29)より、 $u_0 - u_6$ はクレーンの速度 $V$ 、加速時間 $T$ 、ロープ長の変化 $l_0, l_1, l_2, l_3$ を搬送条件として設定すると計算できることがわかる。さらに、(11)では、ロープの速度が $\dot{l}(0) = \dot{l}(T) = 0$ となるように $l_k (k = 0 - 3)$ を設定する。これによって、 $t = 0$ で初速 0 からなめらかにロープを巻き上げ、 $t = T$ で巻き上げ速度が 0 になるまでなめらかに減速させることができる。また、トロリを減速、停止させる制御入力を求める場合は、(28)の右辺の符号を反転させて求める。このように、加速区間の制御入力と、減速区間の制御入力を求めることで、吊り荷を目的地に搬送したときに振れ角が 0 となる制御入力を得ることで、FF 制御による制振搬送を行うことができる。Fig. 2-2 に FFT のシミュレーション結果を示す。青実線は、ロープ長を固定 {No hoisting,  $(l_0, l_1, l_2, l_3) = (0.76, 0, 0, 0)$ } した場合と、橙実線は、ロープ長が変化 {Up and down hoisting,  $(l_0, l_1, l_2, l_3) = (0.76, 0.1, 0, 0)$ } した場合を示している。いずれの場合も、加速完了時刻  $t = 2$  s と減速完了時刻  $t = 5$  s で吊り荷の振れがないことがわかる。

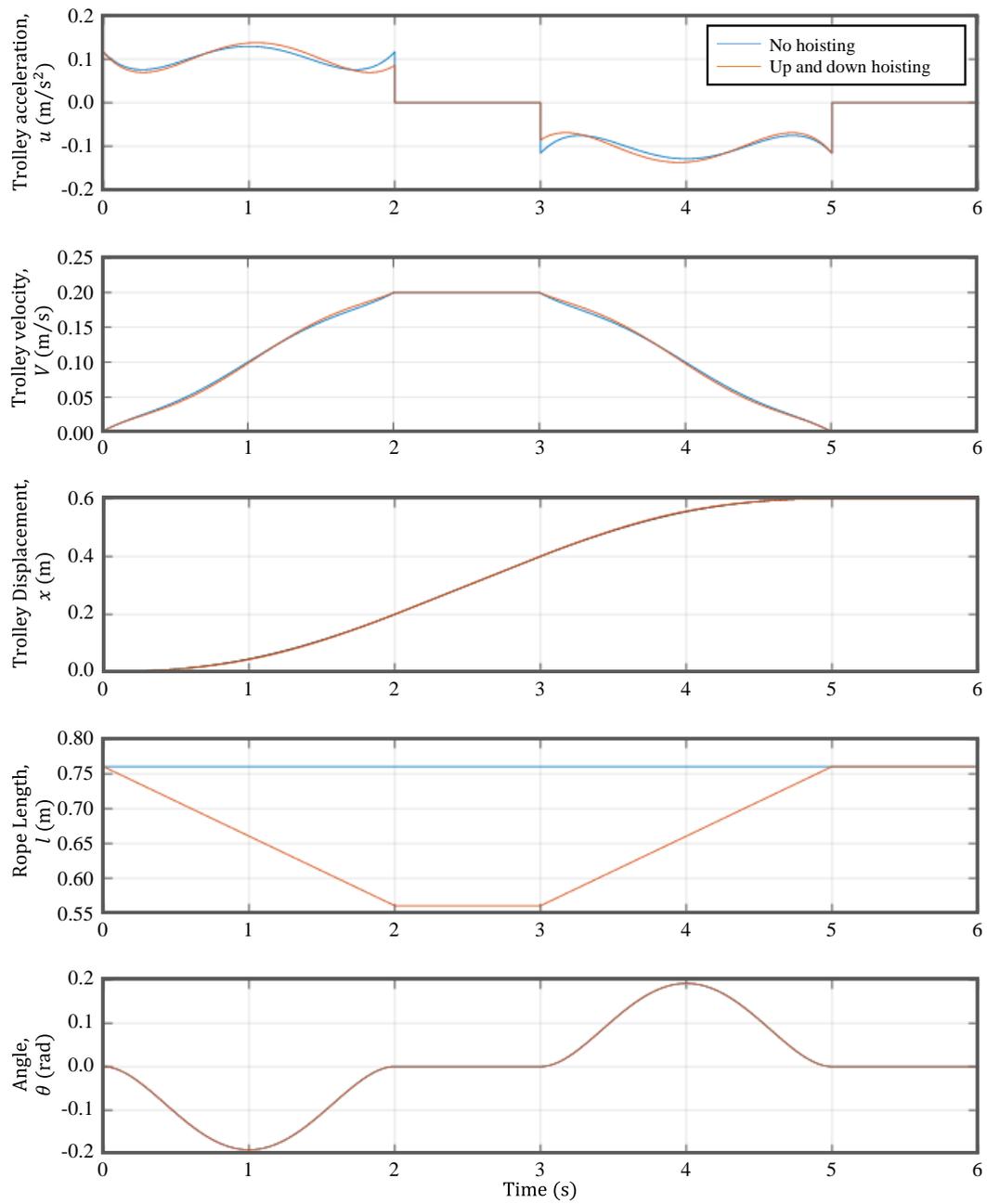
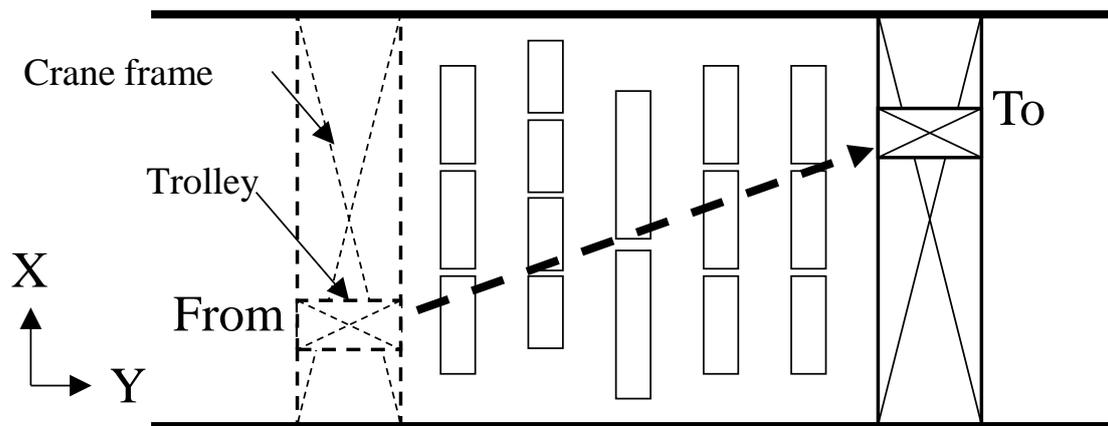


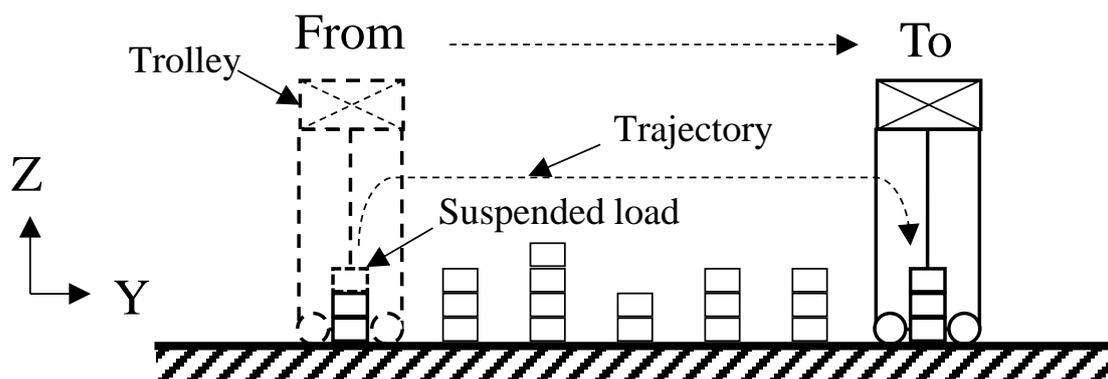
Fig. 2-2 FFT シミュレーション結果

## 2.2 走行, 横行, 巻きの3軸同期搬送

実際のクレーンによる運搬を考えたとき, 荷の搬送先は, クレーンが稼働する領域内の様々な場所となる. したがって運搬条件により, 横行 X 軸, 走行 Y 軸それぞれの搬送時間も異なる. ここで, Fig. 2-3 に示すような運搬を考える. このとき, 走行, 横行それぞれを搬送元 From から搬送先 To に向けて定格速度で運搬すると, Fig. 2-4 の Root2 に示すように, 目的地までの平面上の軌跡が直線とならずに, くの字の軌跡となることがある. FF 制御入力によって制振搬送を行ったあとでも, 制御誤差や外乱によって, 走行方向残留振れと横行方向残留振れが生じた場合, 振れ周期次第では吊り荷が旋回運動する. これらの残留振れを抑える操作を手動によって行う難易度は一般的に高く, これらが発生させない動きが求められる. 運搬時間のネックとならない方向(Fig. 2-4 の場合は横行方向)を考えると, 定格速度で運搬する必要はなく, ネックである走行方向の運搬に合わせた速度で, Root1 のような軌跡となるような横行速度をとれば, 運搬能力を低下させることはない. 加えて, 走行方向と横行方向の運搬時間を同時にできると, 旋回残留振れ問題も解消できるうえに, Fig. 2-4 に示すように, 残留振れ角は  $\theta_{x1} < \theta_{x2}$ ,  $\theta_{y1} < \theta_{y2}$  となり, より良い制振搬送を期待できる. また, 巻き方向 Z 軸についても同期させることができれば, Fig. 2-3(b)のように単純な吊り荷の軌跡となって, 運搬境界条件の設定が容易になるため都合が良い. そこで本章では, 定格速度での運搬を設定したときに, 走行方向と横行方向で運搬時間が異なる場合に, ネックとならない方向の速度を调速して, ネック方向と同期させる制御について述べる.



(a)平面図



(b)側面図

Fig. 2-3 吊り荷の一般的な搬送軌跡

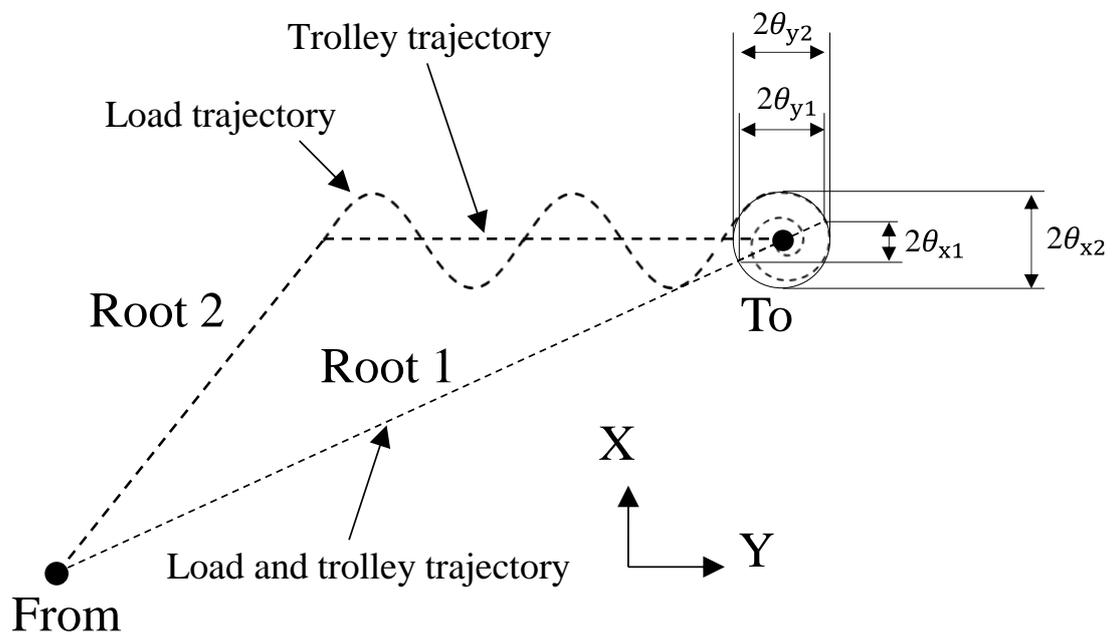


Fig. 2-4 残留振れの軌跡

ここで、以下のようにパラメータを定義する。加速終了位置： $x_0$ （横行）， $y_0$ （走行），目標速度： $V_x$ （横行）， $V_y$ （走行）， $V_l$ （巻き），初期ロープ長： $l_0$ ，加速終了位置，目標位置，速度を Fig. 2-5(a)に示すように3軸独立に設定したとき，加速時間 $T_{y0}$ ，走行時間 $T_y$ は以下のように求められる。加速終了時の移動距離 $y_0$ は以下のように表される。

$$y_0 = \frac{V_y T_{y0}}{2} \quad (30)$$

よって，

$$T_{y0} = \frac{2y_0}{V_y} \quad (31)$$

走行動作終了時の移動距離 $y_d$ は以下のように表される。

$$y_d = V_y(T_y - T_{y0}) \quad (32)$$

よって，

$$T_y = \frac{y_d}{V_y} + T_{y0} = \frac{2y_0 + y_d}{V_y} \quad (33)$$

同様に，横行方向の加速時間 $T_{x0}$ ，走行時間 $T_x$ は以下のように表される。

$$T_{x0} = \frac{2x_0}{V_x} \quad (34)$$

$$T_x = \frac{x_d}{V_x} + T_{x0} = \frac{2x_0 + x_d}{V_x} \quad (35)$$

また，巻き上げ量 $l_0 - l_d$ は以下のように表される。

$$l_0 - l_d = V_l T_{l0} \quad (36)$$

よって，巻上時間 $T_{l0}$ は

$$T_{l0} = \frac{l_0 - l_d}{V_l} \quad (37)$$

ここで，3軸同期搬送を実現するため，3軸の中で搬送時間が最も大きなものに動作を同期させることを考える。走行，横行，巻きの3パターンを考えると，以下のようなになる。

### 2.2.1 走行時間が一番大きい場合( $T_y > T_x, T_l$ )

横行の加速終了時および巻き上げ終了時の時間を $T_{y0}$ 、横行動作および巻き動作終了時の時間を $T_y$ として、横行加速終了位置 $x'_0$ 、横行速度 $V'_x$ 、巻き速度 $V'_l$ を求める。  
横行動作終了時の移動距離 $x_d$ と横行加速終了位置 $x'_0$ 、および巻き上げ量 $l_0 - l_d$ は以下のよう  
に表される。

$$x_d = V'_x(T_y - T_{y0}) \quad (38)$$

$$x'_0 = \frac{V'_x T_{y0}}{2} \quad (39)$$

$$l_0 - l_d = V'_l T_{y0} \quad (40)$$

式(38)(39)(40)を式(31)(32)の関係を利用して整理すると以下となる。

$$x'_0 = \frac{x_d}{y_d} y_0 \quad (41)$$

$$V'_x = \frac{x_d}{y_d} V_y \quad (42)$$

$$V'_l = \frac{V_y(l - l_d)}{2y_0} \quad (43)$$

以上のように、走行時間に合わせて横行および巻きの動作時間を合わせると Fig. 2-5(b)に示すような速度パターンとなり、3軸同時に動作が終了する。

### 2.2.2 横行時間が一番大きい場合( $T_x > T_y, T_l$ )

走行の加速終了時および巻き上げ終了時の時間を $T_{x0}$ ，走行動作および巻き動作終了時の時間を $T_x$ として，走行加速終了位置 $y'_0$ ，走行速度 $V'_y$ ，巻き速度 $V''_l$ を2.2.1と同様に求めると以下となる．

$$y'_0 = \frac{y_d}{x_d} x_0 \quad (44)$$

$$V'_y = \frac{y_d}{x_d} V_x \quad (45)$$

$$V''_l = \frac{V_x(l - l_d)}{2x_0} \quad (46)$$

### 2.2.3 巻き時間が一番大きい場合( $T_l > T_x, T_y$ )

巻き時間が一番大きくなるのは、横行・走行動作において定速区間が無い場合である。このとき、横行の加速終了時の時間を $T_{l0}$ 、横行動作終了時の時間を $2T_{l0}$ として、横行加速終了位置 $x_0''$ 、横行速度 $V_x''$ を求める。横行動作終了時の移動距離 $x_d$ と横行加速終了位置 $x_0''$ は以下のように表される。

$$x_d = V_x'' T_{l0} \quad (47)$$

$$x_0'' = \frac{V_x'' T_{l0}}{2} \quad (48)$$

式(47)(48)に式(37)を代入して整理すると以下となる。

$$V_x'' = \frac{V_l x_d}{l_0 - l_d} \quad (49)$$

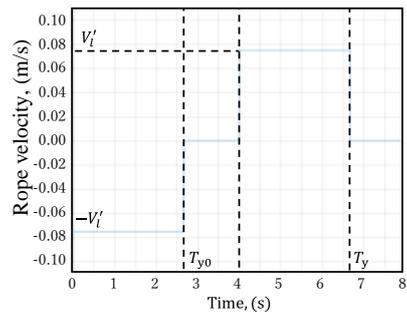
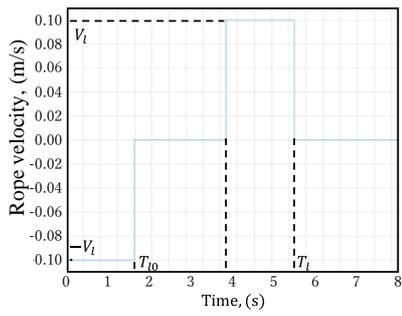
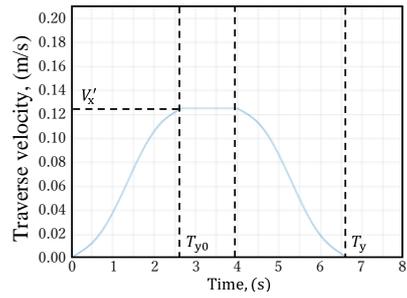
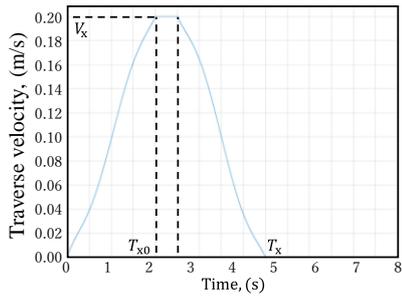
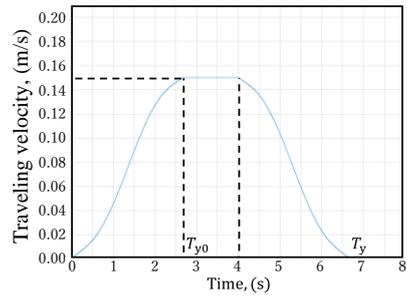
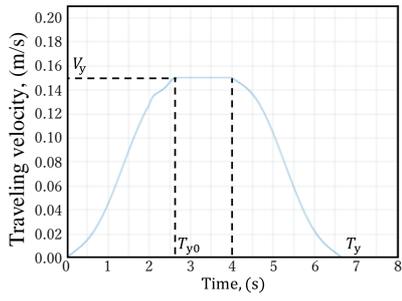
$$x_0'' = \frac{x_d}{2} \quad (50)$$

同様に走行加速終了位置 $y_0''$ 、横行速度 $V_y''$ は以下のように求められる。

$$V_y'' = \frac{V_l y_d}{l_0 - l_d} \quad (51)$$

$$y_0'' = \frac{y_d}{2} \quad (52)$$

Fig. 2-5(b)は、Fig. 2-5(a)と同じ目標位置への搬送における同期制御適用後の速度波形を示している。この場合、走行方向が最も搬送時間を有するネック方向であり、2.2.1 に示すように横行方向の最高速度を調整している。その結果、減速終了時刻を同期できていることがわかる。また、巻き上げ速度も同様に同期させて、トロリの搬送が完了すると同時に巻き下げも終了していることがわかる。



(a) 同期制御なし

(b)同期制御あり

Fig. 2-5 搬送速度の同期制御, 非同期制御の比較

## 第 3 章

# 更新型 FF 制御入力生成アルゴリズム

# 第3章

## 更新型 FF 制御入力生成アルゴリズムによる制御入力

第2章で示したFFT法では、クレーンシステムを質点モデルにより近似して運動方程式を導出し、FF制御入力を導出した。この制御入力を現実のシステムに適用してもモデル化誤差のため制御性能が低下する可能性がある。本研究では一定の加速度でしかトロリを制御できず、加速度の切り替え周波数もあまり高くできないという制約を持つクレーンシステムの制御を考える。このようなシステムは前章で示した連続的に変化する加速度入力により直接制御することができない。このような場合は連続的な加速度入力をPWM制御入力により近似することが多いが、制御入力の切り替え周波数を高くできない場合には制御入力の量子化誤差により制御性能が低下することが想定される。本章ではモデル化誤差と制御入力の近似誤差に対してロバスト性を持たせるために設計した更新型FF制御入力生成アルゴリズムについて述べる。

### 3.1 トロリの駆動系に制約があるクレーンシステム

本研究で制御対象とするトロリの駆動系に制約があるクレーンシステムのブロック図をFig. 3-1に示す。 $\dot{X}_d$ はトロリの目標速度、 $e$ は目標速度からの誤差である。制御器は $e > 0$ の場合は加速度 $a_s$ でトロリを加速し、 $e < 0$ の場合は加速度 $-a_s$ でトロリを減速する。なお、 $e = 0$ の場合の加速度は0である。

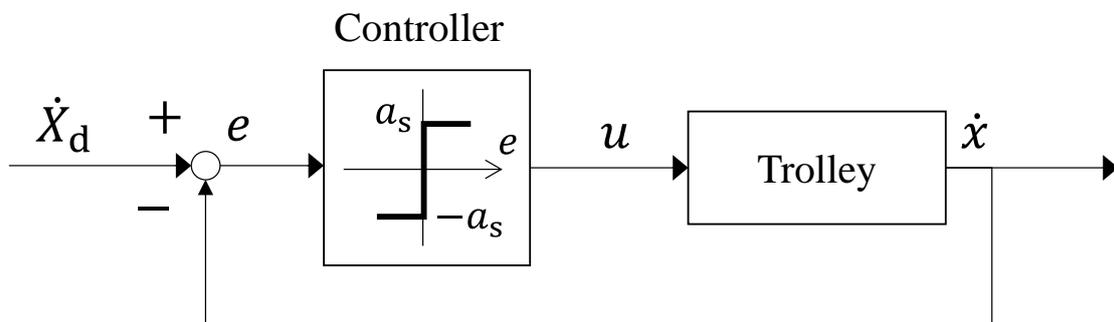


Fig. 3-1 駆動系に制約を持つクレーン駆動システムブロック図

## 3.2 三角波比較法を利用した FF 制御入力の近似

本研究では三角波比較法を利用して、連続的な FF 制御入力を PWM 制御入力によって近似することを考える。Fig. 3-2 に三角波比較法を利用して連続的な FF 加速度入力を PWM 制御入力により近似する流れを示す。  $u_{\text{org}}(t)$  は FFT 法により導出した制御入力である。三角波の振幅はトロリの最大加速度  $a_s$  とし、周期は  $T_s$  とする。三角波と  $u_{\text{org}}(t)$  をコンパレータにより比較することで、  $u_{\text{org}}(t)$  を PWM 制御入力に近似したスイッチング入力  $u_s(t)$  を得ることができる。なお、トロリの目標速度は  $u_s(t)$  を積分することにより与えるものとする。

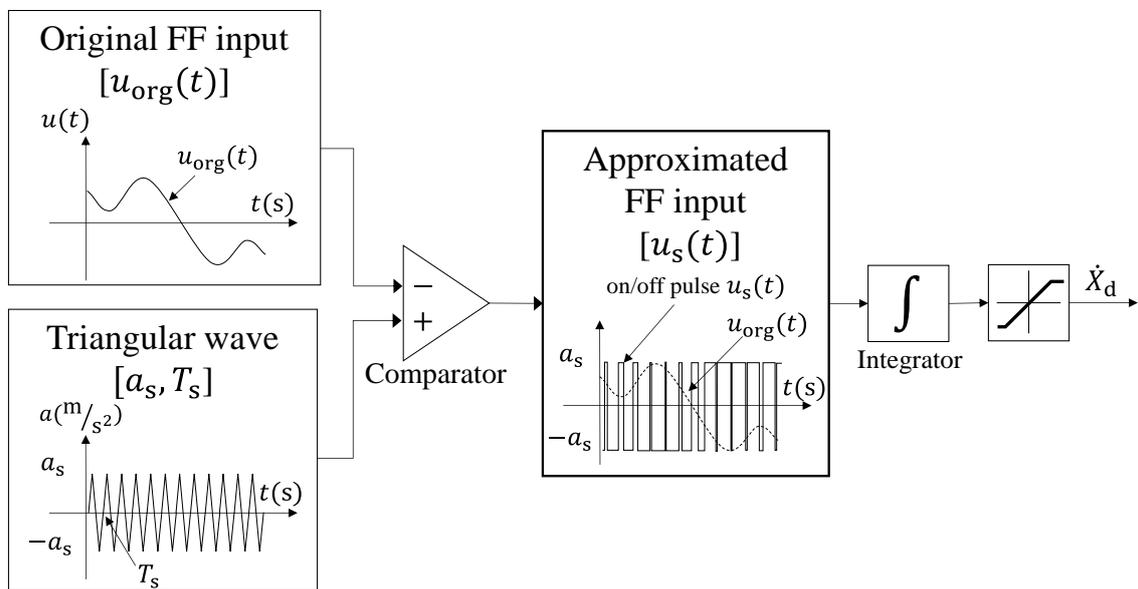


Fig. 3-2 三角波比較法による FF 制御入力の PWM 近似

### 3.3 更新型 FF 制御入力生成アルゴリズム(UFFT)

PWM 制御入力 $u_s(t)$ により連続的な加速度入力 $u_{org}(t)$ を近似するとき、PWM 周期 $T_s$ が大きければ近似誤差により制振性能が低下すると考えられる。そこで PWM 制御入力を加えた場合でも制振性能が低下しない制御アルゴリズムを提案する。本手法は、 $u_s(t)$ を入力したときの残留振れを一定時間ごとに計算し、残留振れが小さくなるように $u_{org}(t)$ を更新する。我々は本手法を更新型 FF 制御入力生成アルゴリズム(UFFT)と呼んでいる。FFT 法では、最初に求めた $u_{org}(t)$ は更新しない。しかし UFFT 法では、提案したアルゴリズムにしたがって FFT 法で求めた $u_{org}(t)$ を自動的に更新する。このような意味で“更新型”と呼んでいる。Fig. 3-3 に本アルゴリズムのブロック図を示す。予測器は一定時間ごとのクレーンの状態を新たな境界条件として FF 制御入力を再計算する。また、残留振れが最小となる FF 制御入力を求める。Fig. 3-4 に制御入力の更新周期を $T_p$ 、搬送終了時間を $T$ 、計算ステップ数を $n = 0, 1, 2, \dots, T/T_p$ とし、UFFT を利用して FF 制御入力 $u_s(nT_p)$ を求める処理スキームを示している。まず $n = 0$ のとき、初期条件をすべて 0 として $u_{s0}(t)$ を計算する。そして $u_{s0}(t)$ をクレーンシステムに入力しクレーンの応答 $[x_0(t), \dot{x}_0(t), \theta_0(t), \dot{\theta}_0(t)]$ と残留振れ $|\theta_0|_{max}$ を計算する。このときの残留振れと制御入力を $|\theta|_{max}, u_s(nT_p)$ に設定する。 $n \neq 0$ のとき、初期条件を $[x_{n-1}(nT_p), \dot{x}_{n-1}(nT_p), \theta_{n-1}(nT_p), \dot{\theta}_{n-1}(nT_p)]$ に設定して、FF 制御入力 $u_{sn}(t)$ を計算する。次に $[x_n(t), \dot{x}_n(t), \theta_n(t), \dot{\theta}_n(t)]$ と $|\theta_n|_{max}$ を計算する。もし残留振れがこれまでの最小値( $|\theta_n|_{max} < |\theta|_{max}$ )であるならば、最小値と制御入力を更新する $[|\theta|_{max} = |\theta_n|_{max}, u_s(nT_p) = u_{sn}(nT_p)]$ 。このようなアルゴリズムを繰り返すことにより残留振れが最小となる FF 制御入力 $u_s(nT_p)$ が生成できる。なお、UFFT の制御入力式とアルゴリズムの詳細手順を付録 1 で述べている。

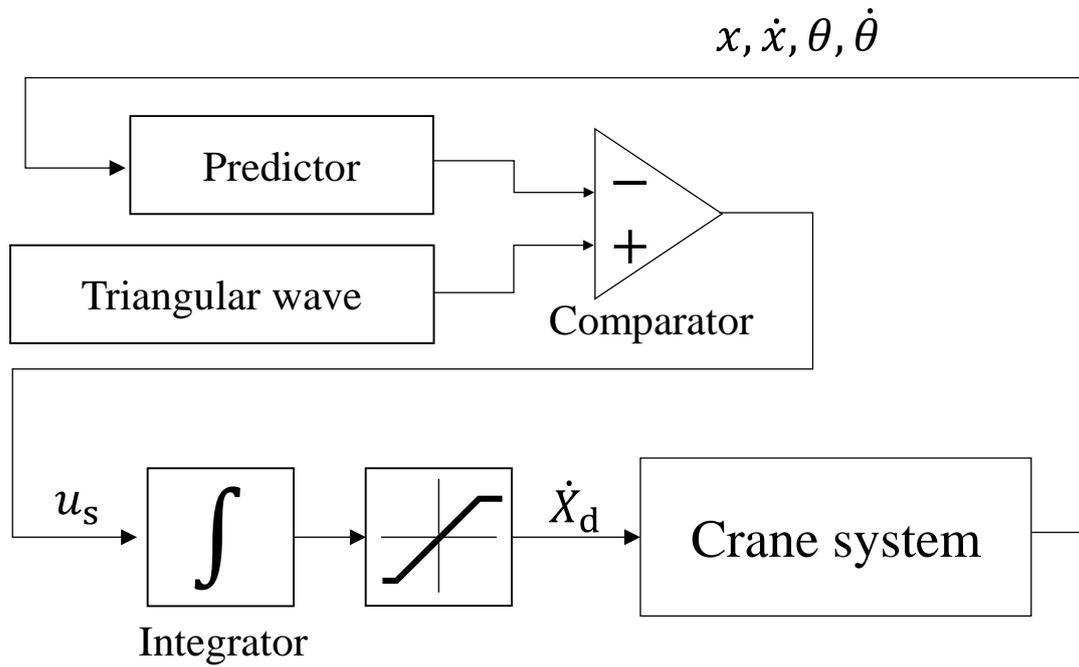


Fig. 3-3 UFFT の概念図

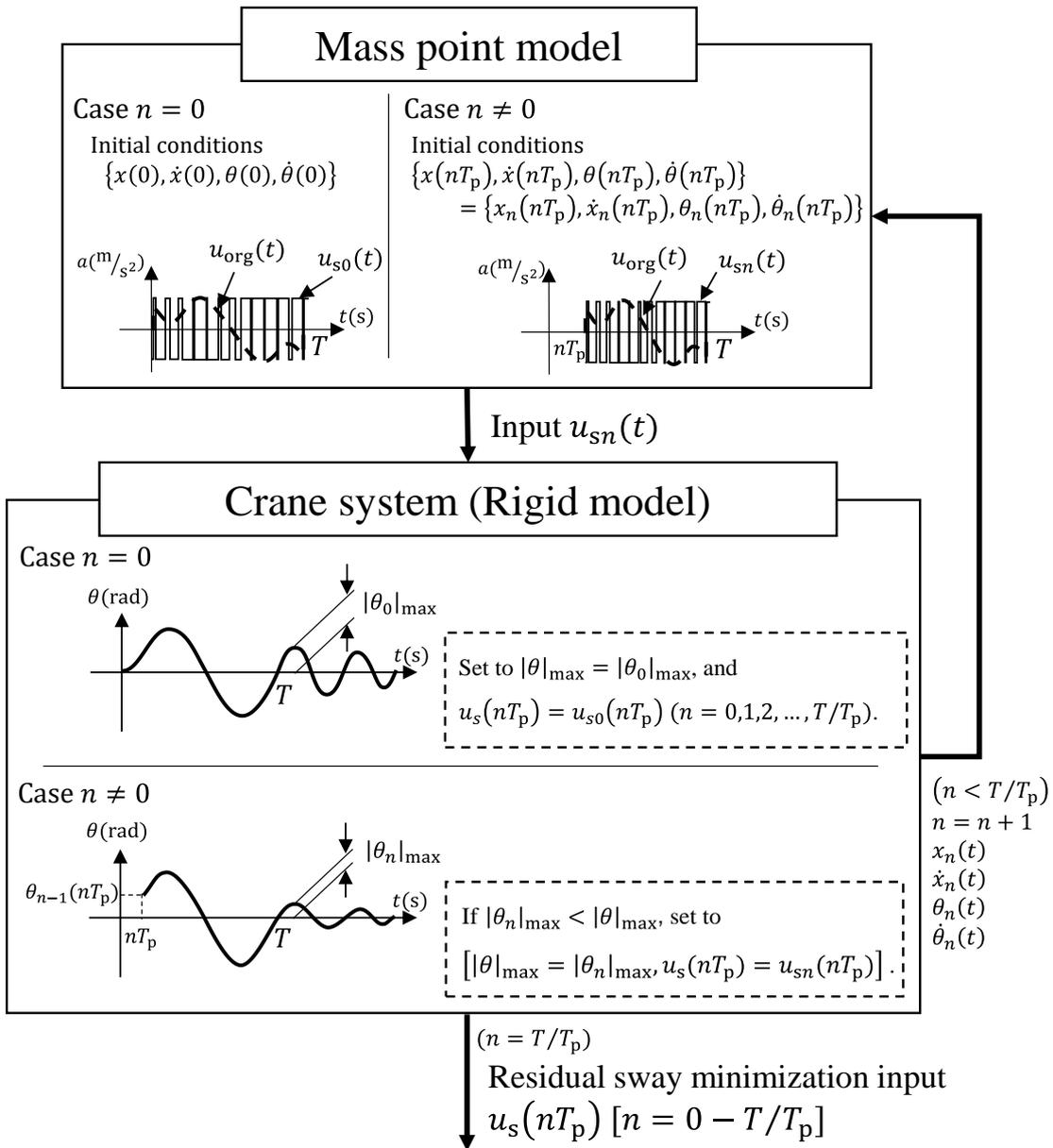


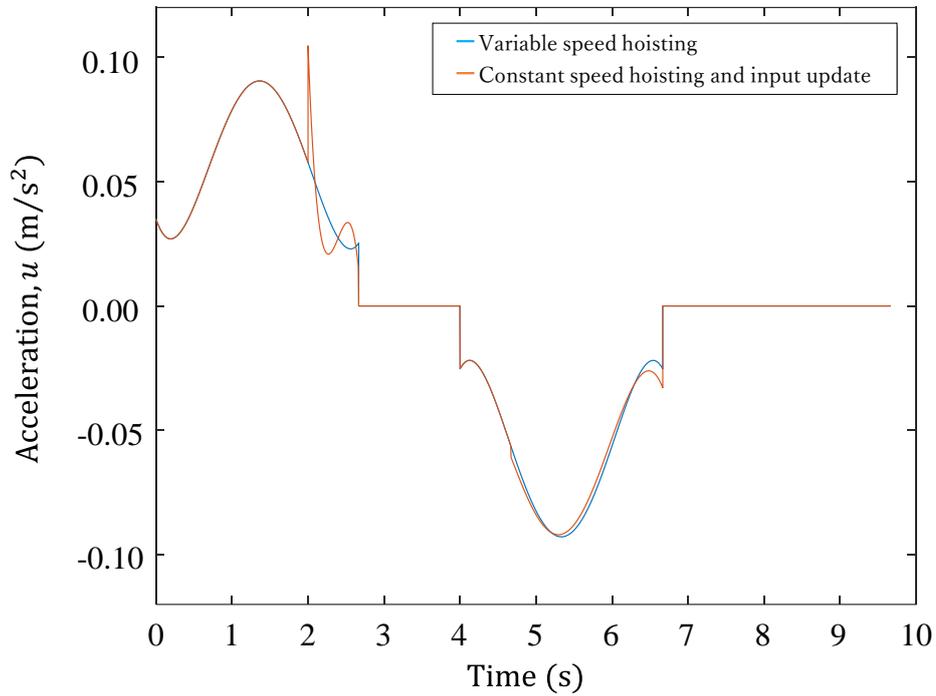
Fig. 3-4 UFFT 処理スキーム

## 3.4 UFFT を利用した 3 軸同期制御

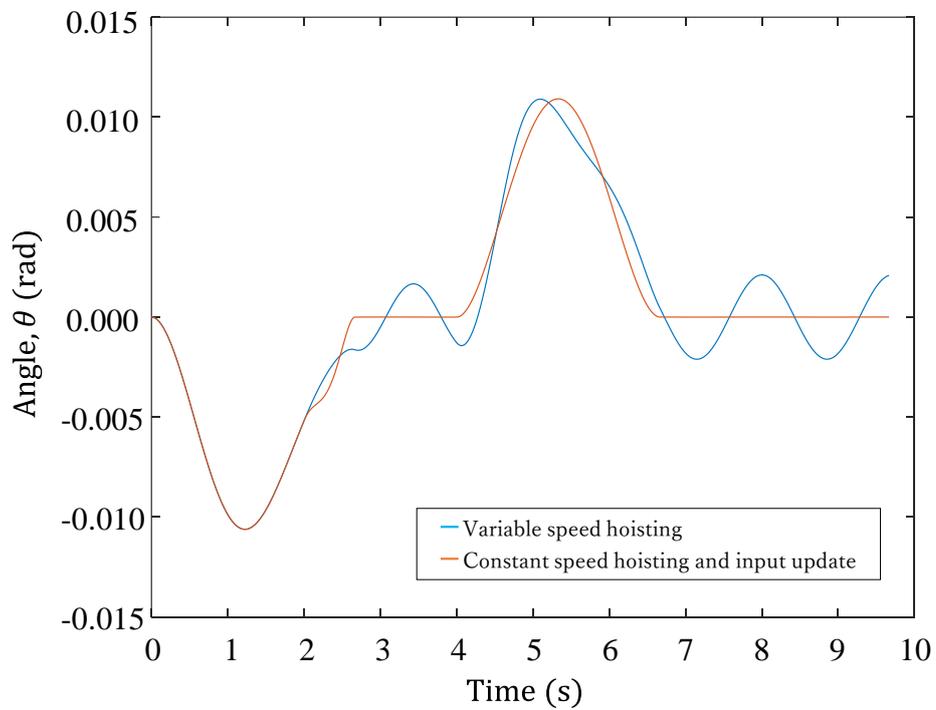
2.2 で述べた 3 軸同期搬送では、走行、横行、巻きそれぞれの動作の運搬時間を比較して、最も時間を要する動作と同時に運搬が完了するように、速度を調整する。同期搬送によって、搬送平面上では目的地に対して直線的に運搬することができる。ここで、巻き動作がネックにならなかった場合は、巻き速度を遅くすることになる。一方で、今回想定しているクレーンシステムは、駆動系に制約をもつ。定格速度よりも遅く、任意の速度を得るためには、PWM 制御による近似を行う必要がある。吊り荷の巻上げ下げで PWM 制御を行うと、巻上装置への on/off 指令による断続的な加速度指令によって、ワイヤロープが伸縮して所望のロープ速度やロープ長に制御できない恐れや、ワイヤロープへの負荷が変動するため設備面や安全面での懸念が生じる。そのため、巻き上げ加速度は変化させずに 3 軸同期制御を実現する方法が望ましい。そこで、UFFT を応用した同期制御アルゴリズムを以下に示す。

1. 2.2.1 または 2.2.2 の方法で速度パターンを設計する。
2. 境界条件を設定し、FF 制御入力 1(Fig. 3-6 FF1, FF3)を計算する。このときの巻き速度を  $V'_l$  とする。
3. 計算した FF 制御入力 1 によりシステムのシミュレーションを行う。このときの巻き上げ速度は  $V_l > V'_l$  とする。  $V_l$  は最大定格速度である。  $V_l > V'_l$  であるので、トロリが定速運動となる前に、ロープ長が一定となる。このときのシステムの状態量を境界条件とし、FF 制御入力 2(Fig. 3-6 FF2, FF4)を新たに計算する。

上記のアルゴリズムを検証した結果を Fig. 3-6 に示す。巻上完了時刻を  $t_1$ 、トロリ加速完了時刻を  $t_2$ 、トロリ減速開始時刻を  $t_3$ 、巻下開始時刻を  $t_4$ 、搬送終了時刻を  $t_5$  とする。Fig. 3-6 ではトロリの加速区間において、ロープ長が一定となったとき、そのときの境界条件を取得して FF 制御入力を更新している。また、減速区間では巻き下げ動作開始時に FF 制御入力を更新している。Fig. 3-5 では、制御入力を更新した場合と更新しない場合の比較シミュレーション結果を示している。制御入力を Fig. 3-5(a)に、吊り荷の振れ角を Fig. 3-5(b)に示す。周期はそれぞれ  $3\text{Hz}$  である。制御入力を更新した場合は、巻き動作を定格速度で行ったため、境界条件を満たし、残留振れが生じていないことがわかる、反対に、制御入力を更新しない場合は、ロープ長を PWM 近似したことによって、FFT 制御入力であっても残留振れが生じていることがわかる。



(a) 加速度入力比較



(b) 振れ角比較

Fig. 3-5 異なる巻き同期方法による FFT の振れ角比較

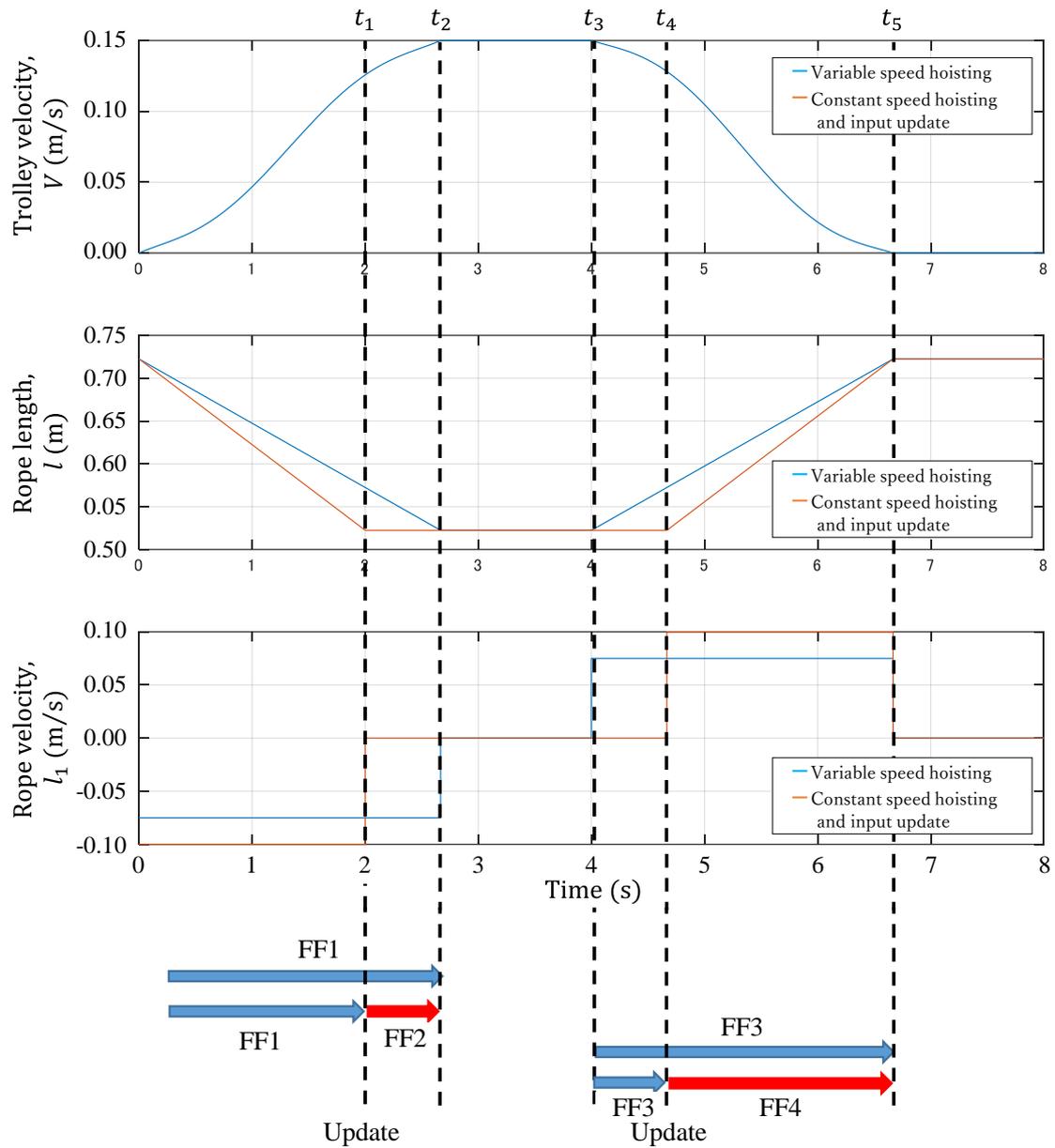


Fig. 3-6 定格速度による巻上を条件とした場合の FFT 同期制御方法

## 第4章

### シミュレーション

# 第4章

## シミュレーション

本章では、提案した制御アルゴリズムを数値シミュレーションで評価した結果について述べる。

### 4.1 シミュレーションモデル

設計した制御アルゴリズムにより生成した制御入力の制振性能をシミュレーションにより評価する。Fig. 4-1 にシミュレーションの構造を示す。まず、吊り荷の搬送条件の設定を行う。吊り荷の搬送目標位置、トロリの速度、同期制御の適用有無、PWM 周波数などを決定する。そのあと、Simulink により制御入力を生成する。制御入力は、ロープの制御関数とトロリの制振制御関数である。次に、制御入力を MATLAB を経由して Simscape Multibody に投入する。走行、横行、巻きの3軸それぞれが、与えられた制御入力に基づいて多自由度剛体シミュレーションを行う。トロリの動きと吊り荷の動きをセンシングし、結果を MATLAB に格納して一連のシミュレーションが終了する。Fig. 4-2 にシミュレーションのために作成した CAD モデルを示す。本モデルは MATLAB/Simulink Simscape Multibody を用いて作成する多自由度剛体モデルである。Fig. 4-2(a)に示すように、本モデルのトロリ部は Motor1 で X 軸方向、Motor2 で Y 軸方向に駆動される。トロリにはロープ巻き上げ機構があり、吊り荷は巻き上げ機構の Motor3 で Z 軸方向に駆動される。Fig. 4-2(b)に吊り荷の拡大図を示す。吊り荷部はロープと動滑車を介して吊るされており、吊り荷は動滑車の回転軸を支点として回転する自由度を持っている。シミュレーションモデルのパラメータは実験モデルから推定したパラメータを利用している。パラメータの推定には MATLAB/Simulink と System Identification Toolbox を使用した。以下では、このモデルにおいて FFT および UFFT による制御入力により吊り荷を X 軸方向に制振搬送した場合のシミュレーション結果について述べる。シミュレーションと実験で制御入力を計算するために使用した吊り荷のパラメータは、実験で使用する吊り荷のパラメータを使用している。これらのパラメータはロープの重さも含めた吊り荷全体の運動をロープの質量を無視した一質点モデルと近似して推定されている。Table 4-1 に吊り荷のパラメータを示す。

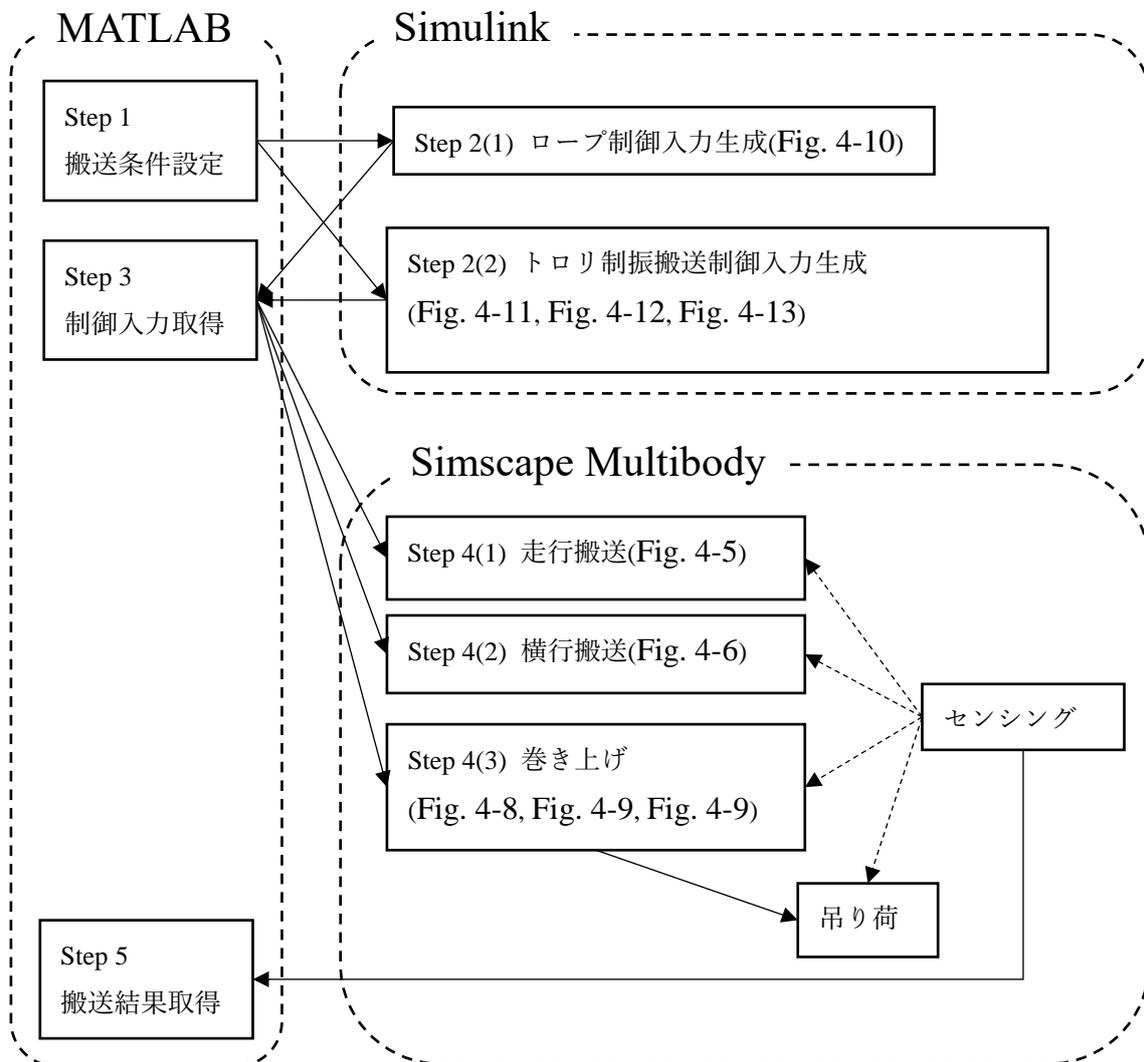
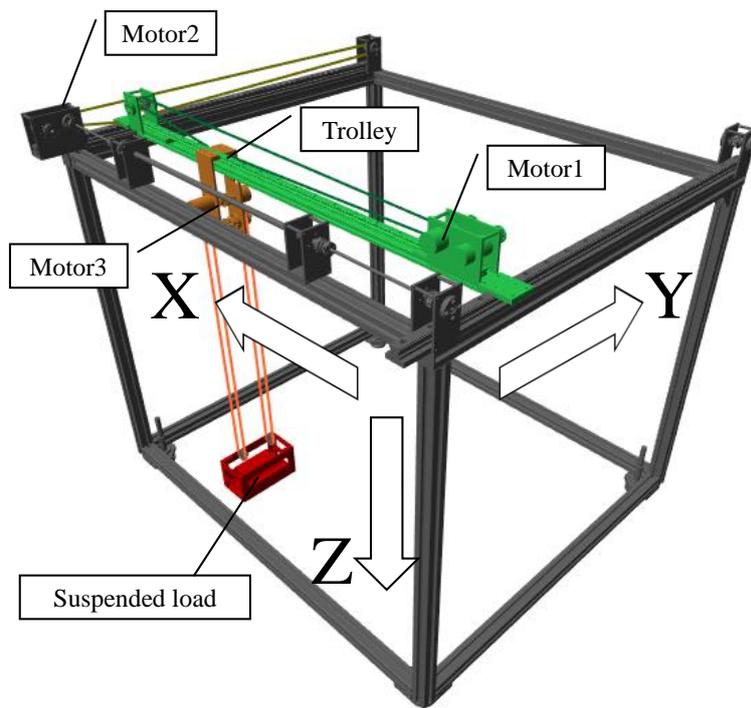
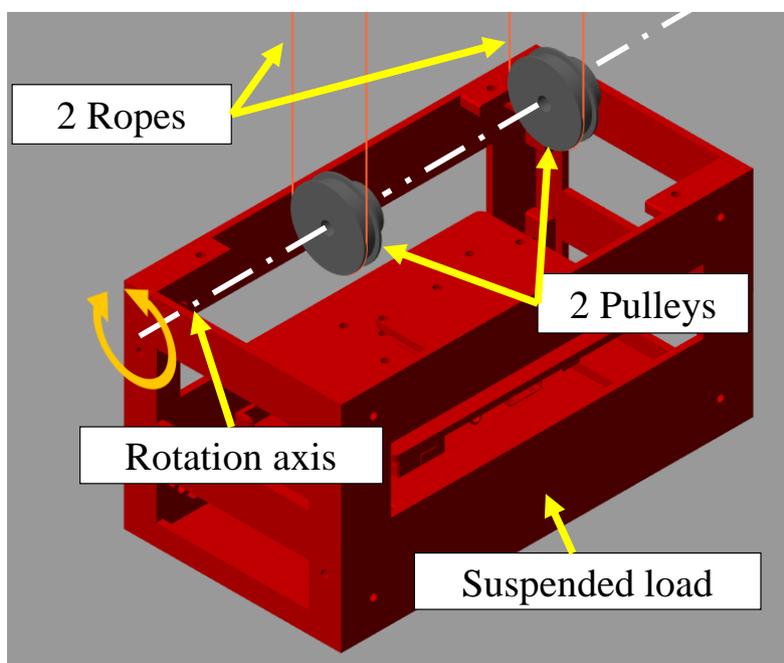


Fig. 4-1 シミュレーションの構造



(a) クレーンシステム全体図



(b) 吊り荷部拡大図

Fig. 4-2 シミュレーション CAD モデル

Table 4-1 吊り荷のシミュレーションパラメータ

Parameter	Value	Unit
$m$	0.96	kg
$l$	0.76	m

### 4.1.1 Simscape Multibody モデル

Fig. 4-3 に、今回のシミュレーションで用いた剛体クレーンモデルのメインシステムを示す。メインシステムは、四つのサブシステムから構成されており、クレーン本体のサブシステム、走行装置のサブシステム、横行装置のサブシステム、最後に巻き動作のサブシステムから構成されている。クレーン本体の Crane base frame サブシステムを Fig. 4-4 に示す。World フレームと本体が接続され、本体が接地している。また、走行装置と横行装置と In/Out ブロックによって接続されている。次に、走行サブシステムである Traveling サブシステムを Fig. 4-5 に示す。Crane base frame サブシステムと走行トロリが接続されており、走行トロリには Revolute Joint ブロックが設けられており、このブロックにトルクを入力することで駆動する。また、トロリには PI 制御系を組み込んであり、任意の速度に調整することができる。同様に、Fig. 4-6 で示す横行装置の Traversing サブシステムについても、Traveling サブシステムと同様の構成となっている。加えて、トロリの位置と速度を取得するためのセンシングブロックを配置している。次に、巻き動作の Hoisting サブシステムを Fig. 4-7 に示す。吊り荷は二点吊りのため、二つの巻上機構を有することから、Fig. 4-8 に示す Left side サブシステムと、Fig. 4-9 に示す Right side サブシステムを配置している。巻上動作も、走行、横行の駆動と同様に、Revolute Joint ブロックにトルクを入力することで行っており、PI 制御系を組み込んである。巻き動作のサブシステム内には、下部に吊り荷を配置している。6-DOF Joint ブロックにより六自由度を持たせてあり、吊り荷が自由振動するようになっている。横行トロリの中心と吊り荷の中心をセンシングブロックで接続して、ロープ長、吊り荷角速度、吊り荷角度を取得できるようにしている。クレーンモデルの各サブシステムの凡例と用途および使用した制御ブロックについて、付録 2 に示す。

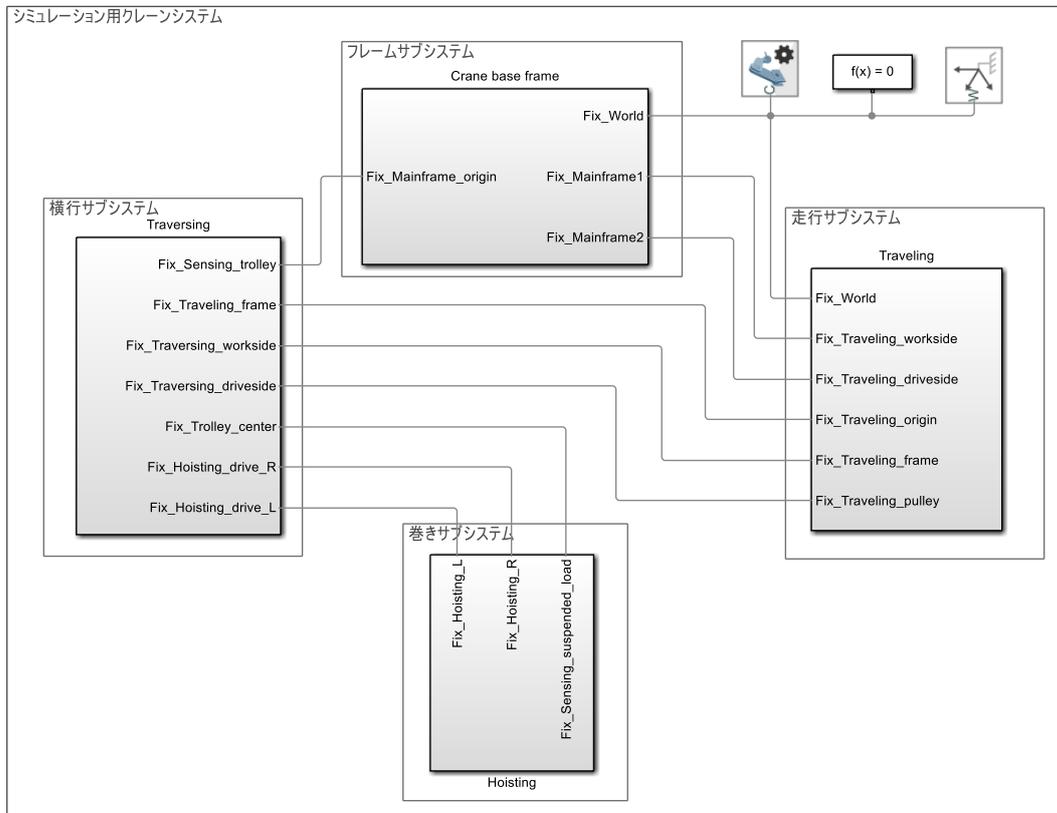


Fig. 4-3 クレーン本体のメインシステム



Fig. 4-4 Crane base frame サブシステム

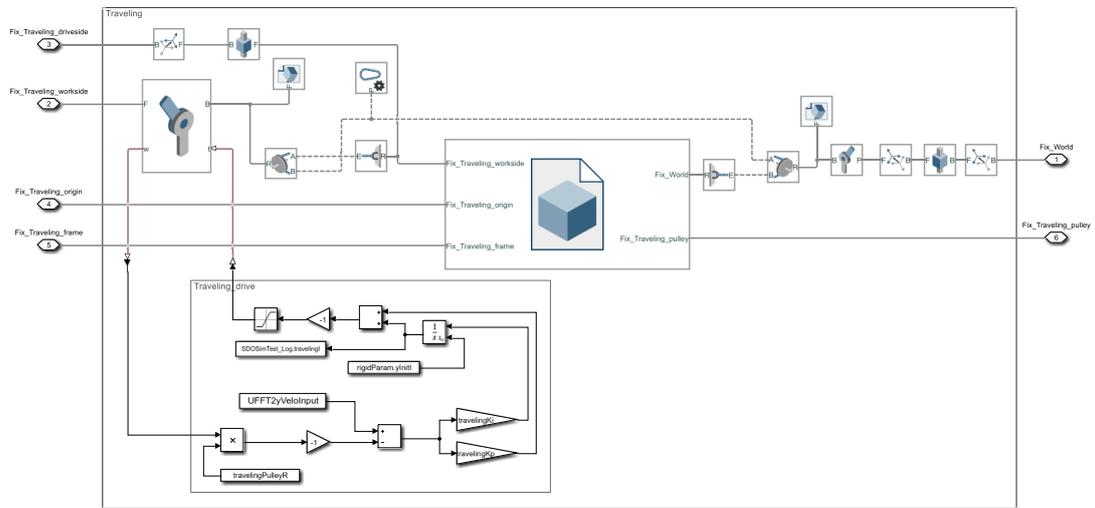


Fig. 4-5 Traveling サブシステム

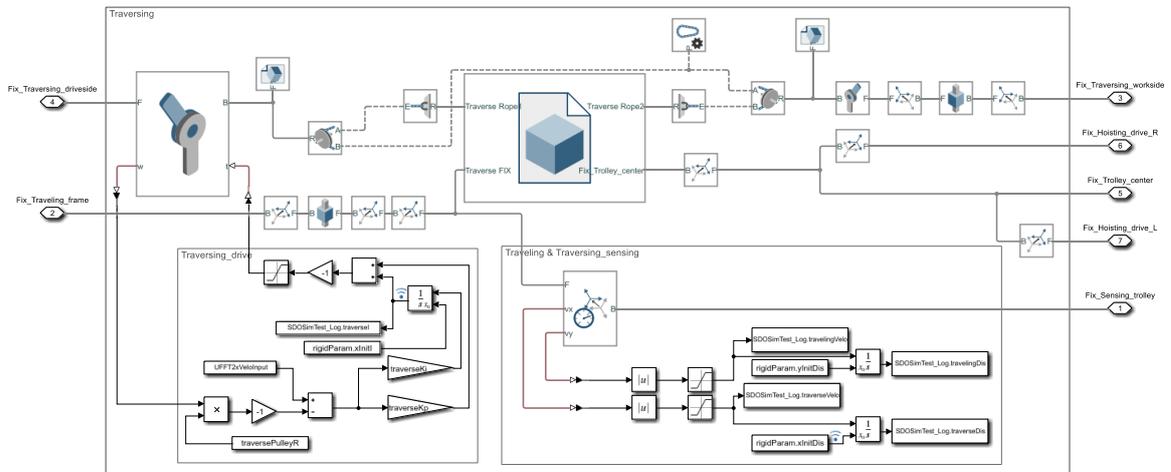


Fig. 4-6 Traversing サブシステム

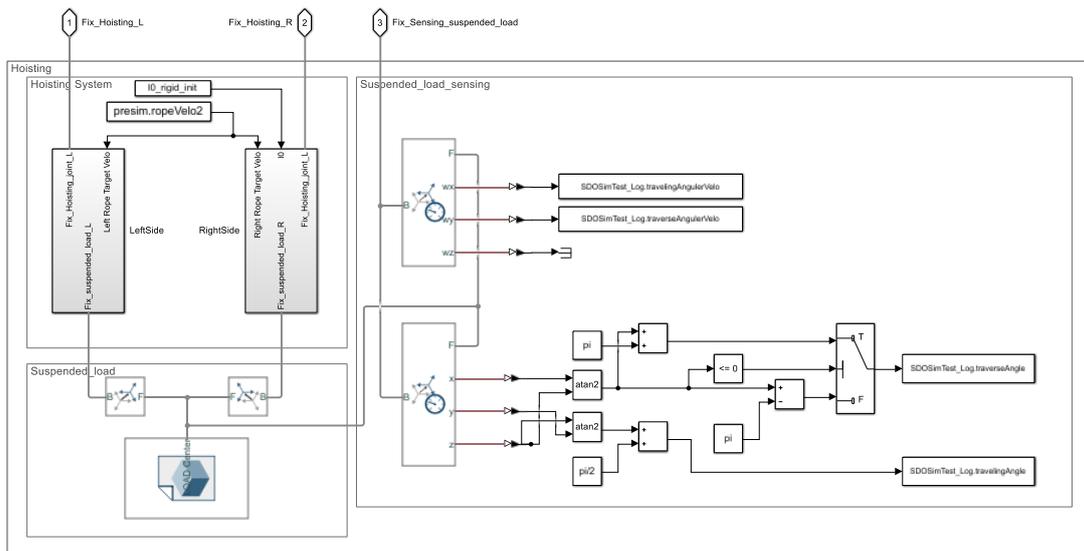


Fig. 4-7 Hoisting サブシステム

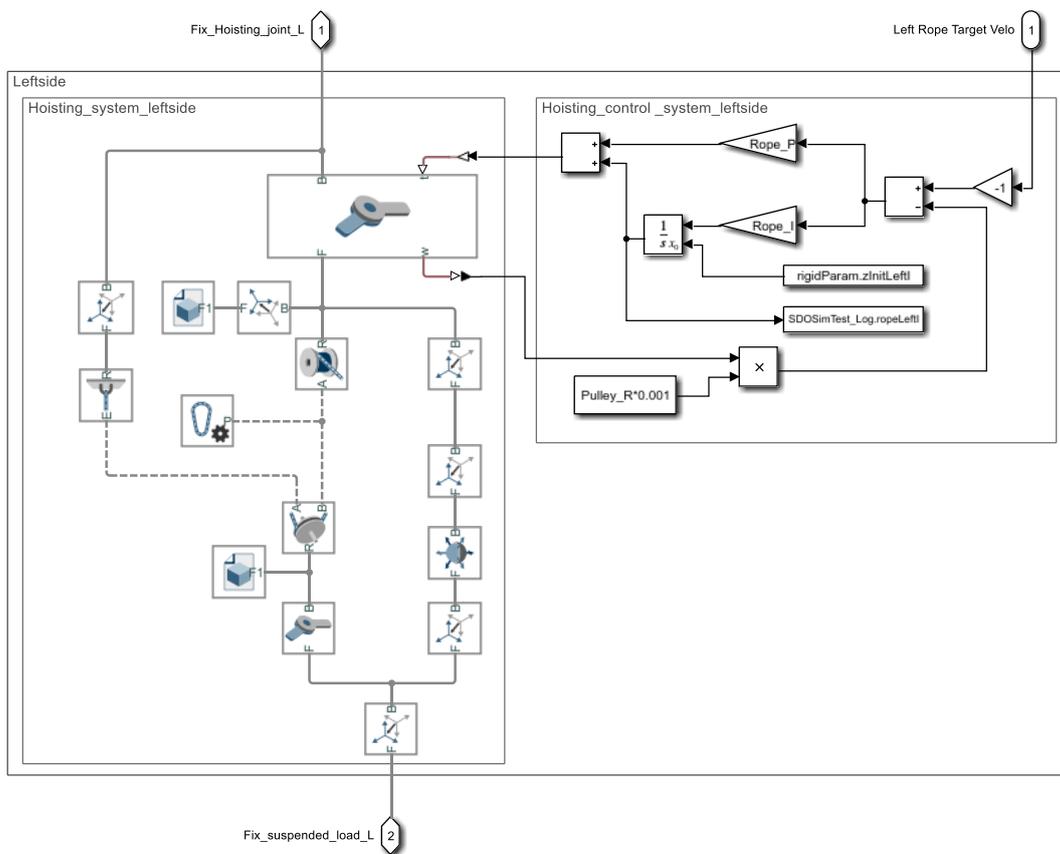


Fig. 4-8 Left side サブシステム

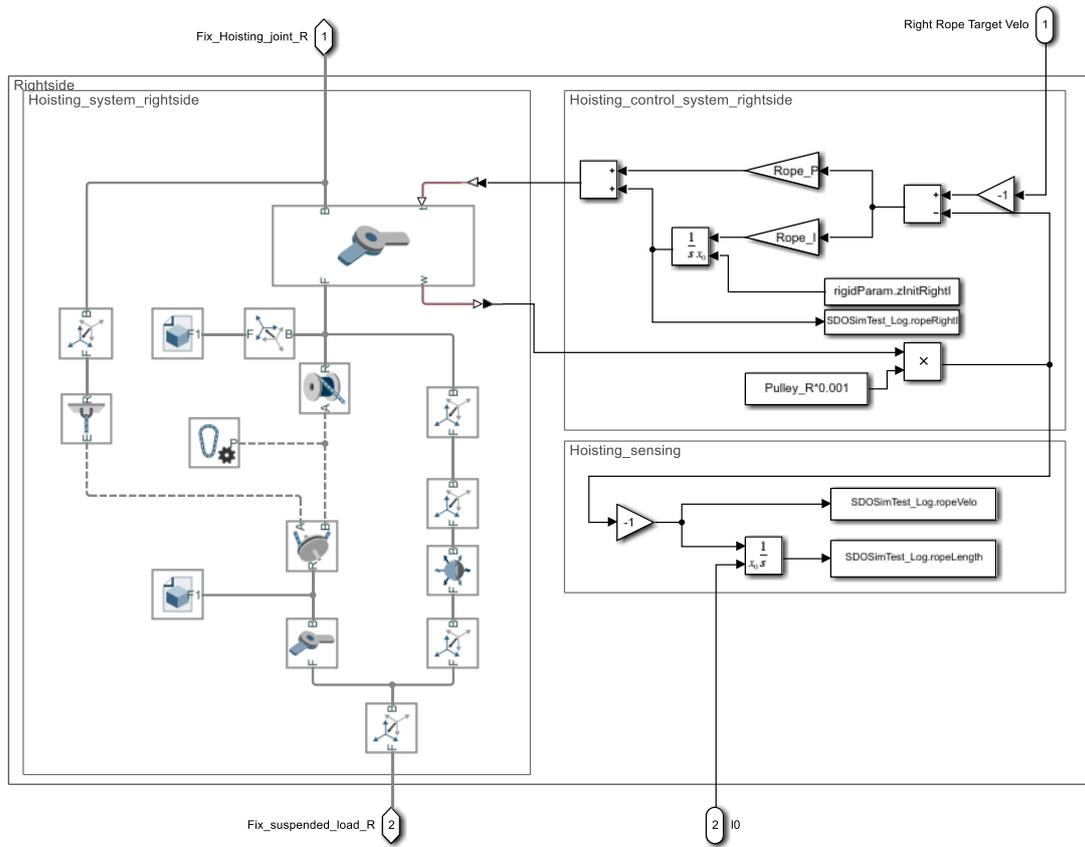


Fig. 4-9 Right side サブシステム

## 4.1.2 Simulink サブシステム

FF 制御入力の生成は、任意の搬送条件に対応させるため Simulink を用いた。ロープ速度、ロープ長さの設定には、Fig. 4-10 に示すシステムを用いた。MATLAB function で(11)に従うロープ制御関数を定義し、トロリ加速区間、一定速区間、減速区間それぞれの時系列データを作成した。使用したブロックに関する詳細は、付録 3 で述べる。

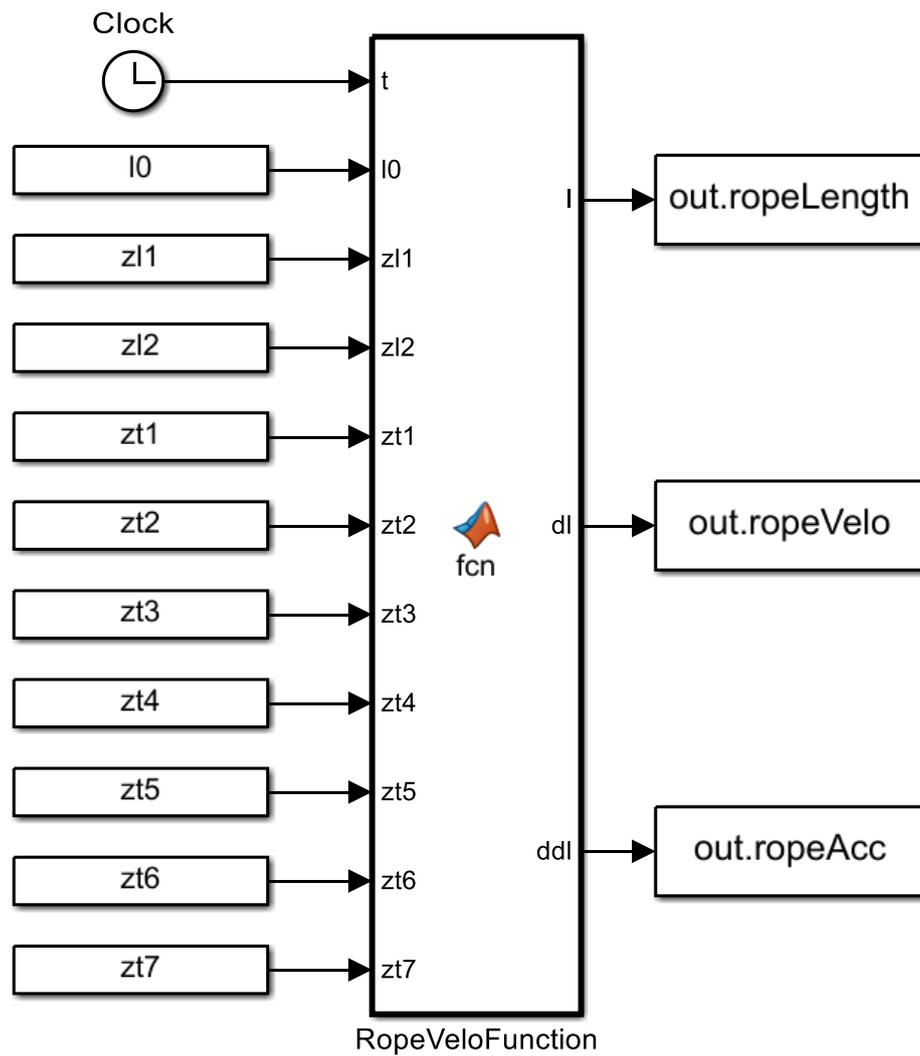


Fig. 4-10 ロープ速度設定 Function

トロリの制御入力生成には、Fig. 4-11 に示すシステムを用いた。MATLAB Function で FFT 制御入力(28)および 3.3 に基づいた UFFT 制御入力(55)を定義している。Fig. 4-11 で出力される制御入力 $u$ は、PWM 近似を行う前の、時間多項式で表される理想的な制御入力 $u_{sn}(t)$ に等しい。この入力を、Fig. 4-12 および Fig. 4-13 に示すサブシステムで PWM 近似を行ったあとにトロリ速度に変換し、制御入力の生成が完了する。この速度入力を、4.1.1 で示した Simscape モデルに投入することで、剛体シミュレーションが行われる。使用した入出力の凡例および使用した入出力ブロックについて、付録 3 に詳細を示す。

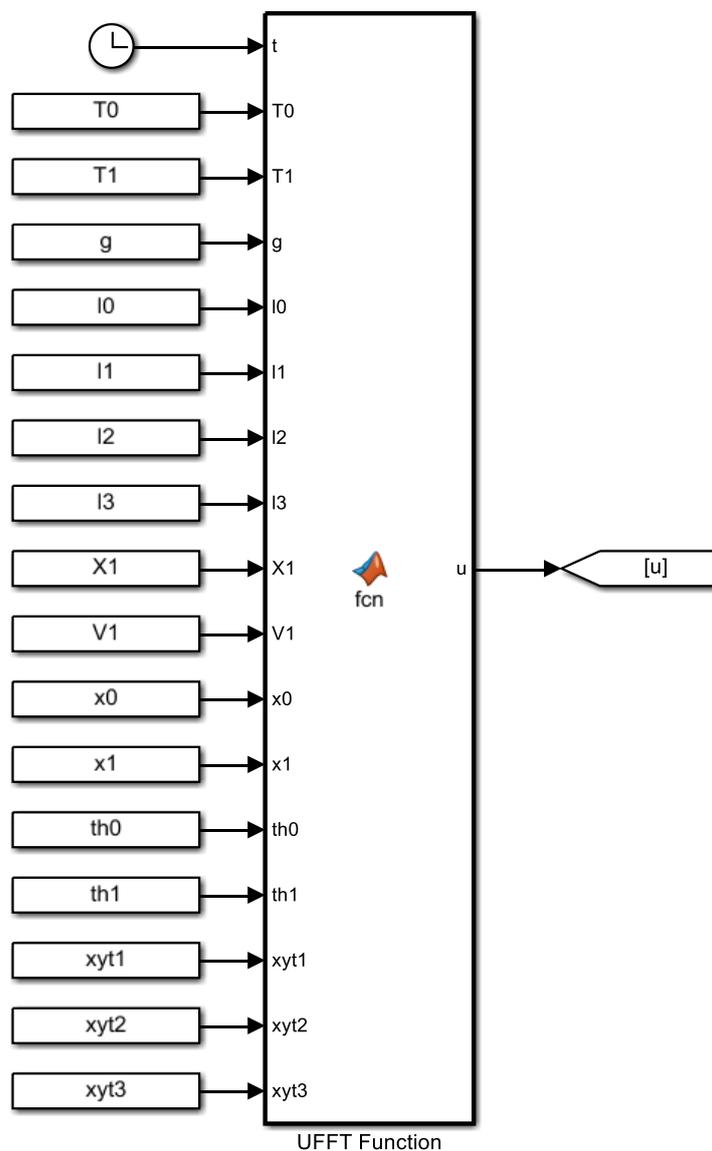


Fig. 4-11 UFFT 制御入力 Function

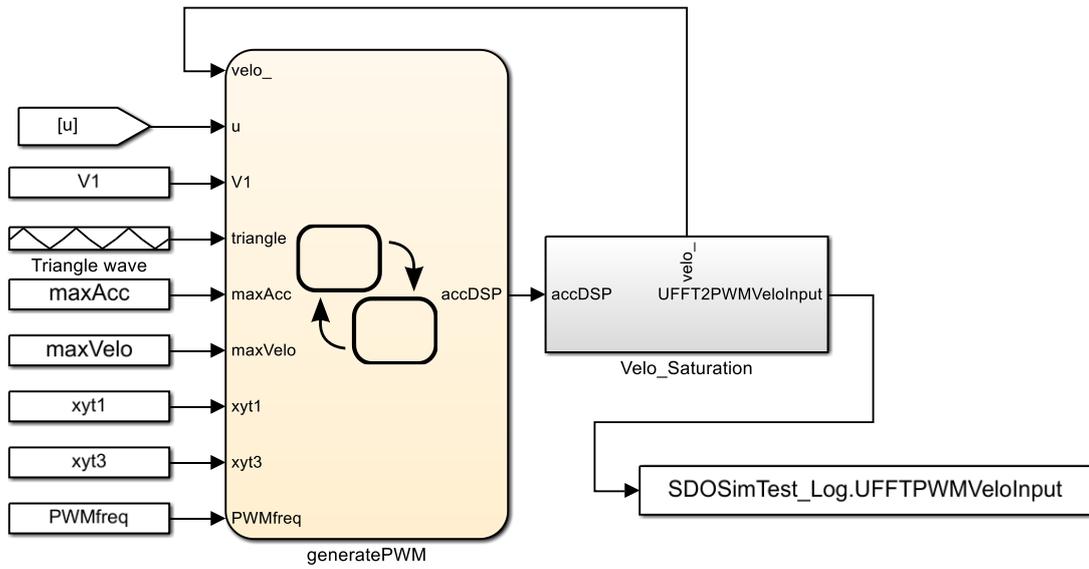


Fig. 4-12 PWM 近似によるトルリ速度入力生成サブシステム

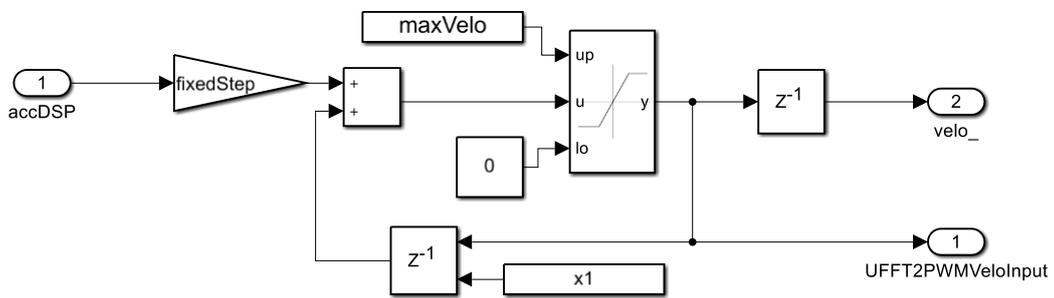
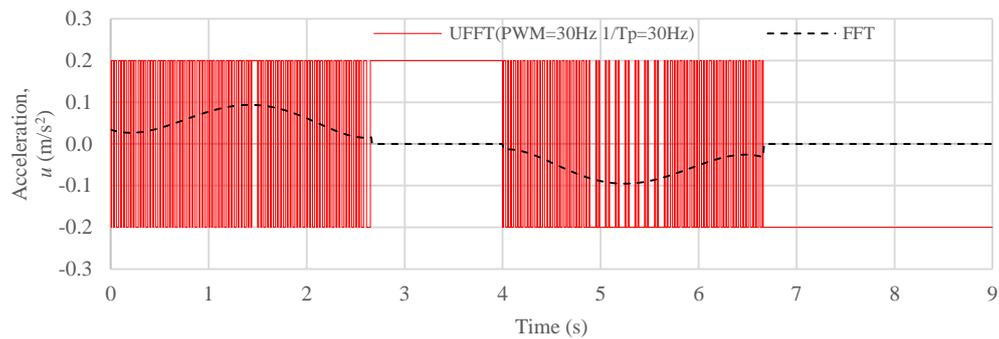


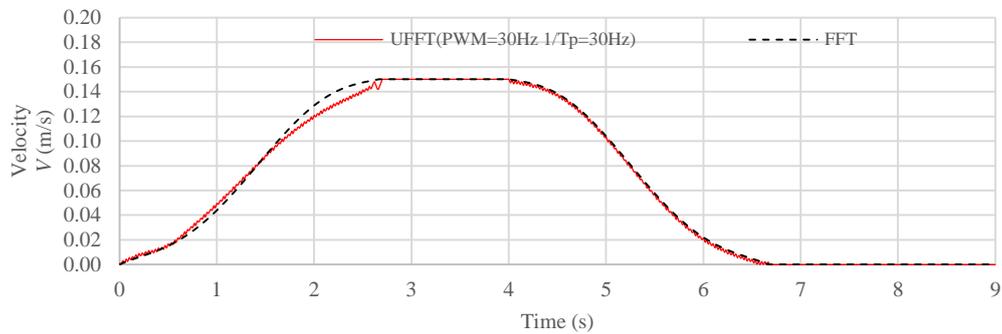
Fig. 4-13 トロリ速度飽和制御サブシステム

## 4.2 シミュレーション結果

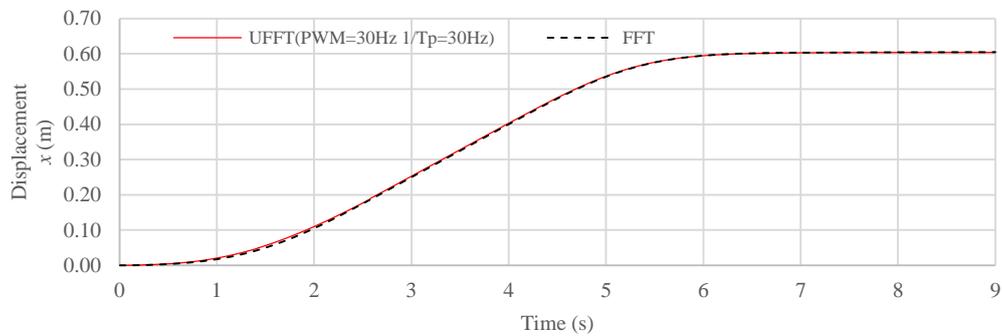
Fig. 4-14 は、搬送時間 6.7s の間に、吊り荷を X 軸方向に 0.6m 搬送し、Z 軸方向に 0.43m 上下させた場合のシミュレーション結果である。シミュレーションでは、PWM 周波数を 3Hz、FF 制御入力の更新周波数を 30Hz とし、(11)で  $(l_0, l_1, l_2, l_3) = (0.76, 0.2, 0.4, 0)$  と設定した関数にしたがってロープ長を変化させている。また、制御入力  $u_{org}(t)$  のパラメータは  $V = 0.15 \text{ m/s}$ 、 $T = 2.7 \text{ s}$  とした。



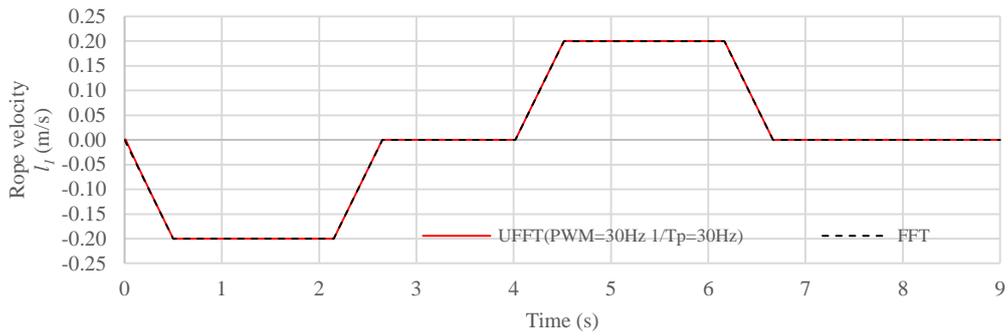
(a) 加速度入力



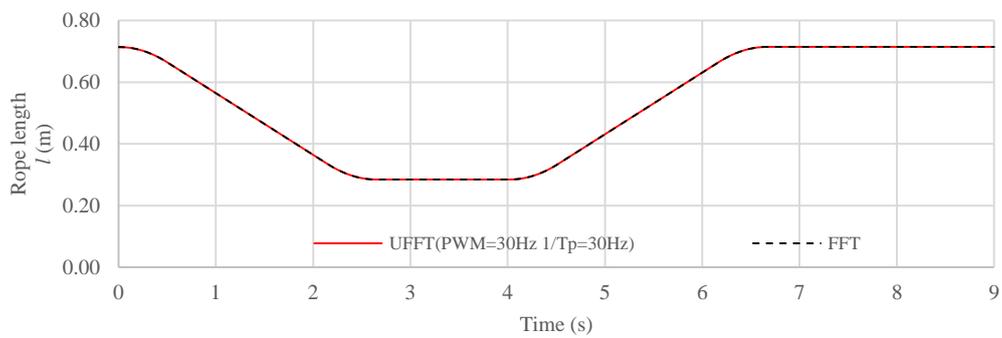
(b) トロリ速度



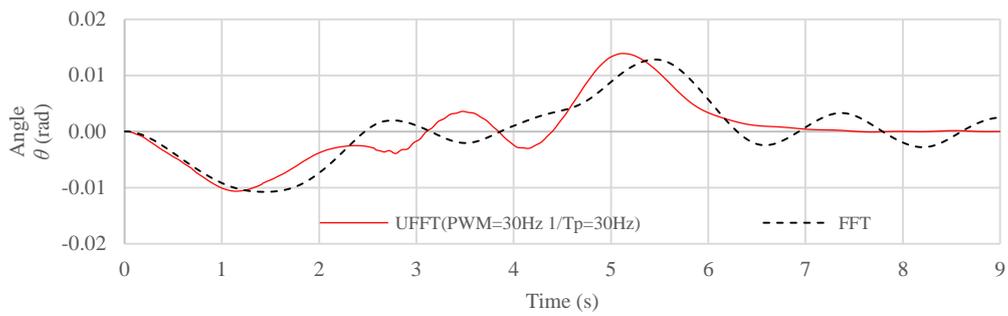
(c) トロリ位置



(d) ロープ速度



(e) ロープ長



(f) 振れ角

Fig. 4-14 シミュレーション結果

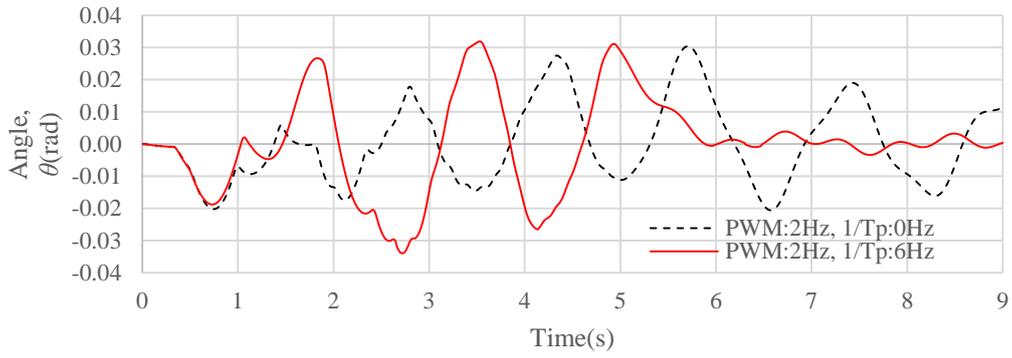
実線は加速度に制約のあるトロリを UFFT により生成した制御入力により制御した結果を示している。また、破線は連続的に加速度を制御できるトロリを FFT による制御入力  $u_{\text{org}}(t)$  により制御した結果を示している。Fig. 4-14(a)より UFFT の加速度指令値は、トロリの定速区間  $2.7 < t < 4$  と停止区間  $6.7 < t$  で 0.2 または -0.2 の一定値となっていることがわかる。Fig. 3-1, Fig. 3-2, Fig. 3-3 で示すように、PWM 制御信号  $u_s(nT_p)$  の積分値がトロリの目標速度  $\dot{X}_d$  であり、積分器出力の上限と下限は制限されている。このため加速度指令値が入力され続けてもトロリは加速または減速し続けることはない。シミュレーションでは速度の上限は 0.15, 下限は 0 としている。Fig. 4-14(f)より、UFFT では PWM 制御入力によりトロリを加減速しても、残留振れが抑えられていることがわかる。FFT では速度を連続的に制御できるにもかかわらず残留振れが生じている。これは、質点モデルを利用して導出した  $u_{\text{org}}(t)$  を多自由度システムの制御に利用したためであると考えられる。以上の結果より、UFFT では FF 制御入力を求める際のモデル化誤差による影響を低減できることがわかる。次に、PWM 制御の周波数と UFFT の再計算周波数を変化させてシミュレーションを行った結果について述べる。PWM 周波数と UFFT の更新頻度が制御性能に及ぼす影響を調べるために行っている。Table 4-2 にそれぞれ 12 種の PWM 周波数および 13 種の再計算周波数で搬送シミュレーションを行った場合の残留振れ値を示す。なお、残留振れ値は  $t = 7 - 9\text{s}$  間の最大振れ角  $|\theta|_{\text{max}}$  である。

Table 4-2 シミュレーション結果

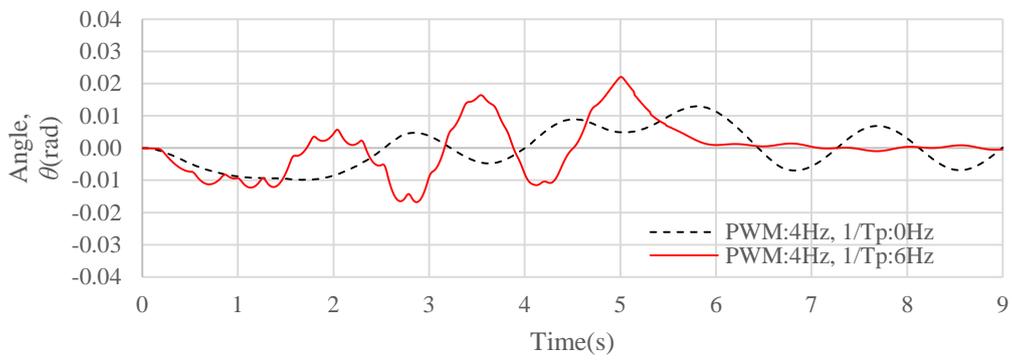
Residual sway max angle $ \theta _{\max}$ ( $\times 10^{-3}$ rad)		Update frequency, $1/T_p$ (Hz)													Fig
		FFT	UFFT												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	30	
PWM freq. (Hz)	1	23.6	16.4	24.7	8.4	25.7	9.1	4.2	13.5	13.3	3.3	13.5	2.2	2.0	
	2	19.0	16.9	8.3	12.1	6.4	8.7	3.4	8.8	16.3	5.8	9.0	4.7	4.2	Fig.4-15(a)
	3	23.7	19.2	19.8	5.7	9.1	6.4	3.9	3.5	7.1	3.6	6.5	3.3	2.8	
	4	6.9	12.2	15.8	3.5	18.4	2.5	0.9	2.9	1.5	1.1	1.6	1.1	1.5	Fig.4-15(b)
	5	14.0	4.4	4.4	1.6	2.4	1.2	3.6	3.9	5.6	1.7	1.0	1.0	0.5	
	6	8.2	3.6	13.1	2.8	6.4	0.9	1.4	0.6	3.9	1.4	0.9	1.0	1.4	Fig.4-15(c)
	7	9.8	2.2	9.3	2.6	3.6	2.0	0.9	2.3	1.8	1.0	2.9	1.6	1.4	
	8	8.2	6.7	2.2	5.4	4.8	2.9	3.3	1.3	0.9	1.9	0.4	2.2	0.4	Fig.4-16(a)
	9	7.7	1.0	3.2	0.9	8.4	1.5	0.7	1.7	1.7	2.1	0.9	0.7	0.8	
	10	6.9	3.2	2.1	1.9	4.4	1.0	2.1	1.0	1.3	1.6	0.5	1.1	0.3	Fig.4-16(b)
	15	5.9	2.7	6.2	0.9	5.5	1.0	1.1	0.4	4.4	0.4	0.7	0.8	0.4	
	30	4.7	0.8	4.6	0.7	2.9	0.6	0.4	1.2	6.1	1.0	0.8	0.7	0.4	Fig.4-16(c)



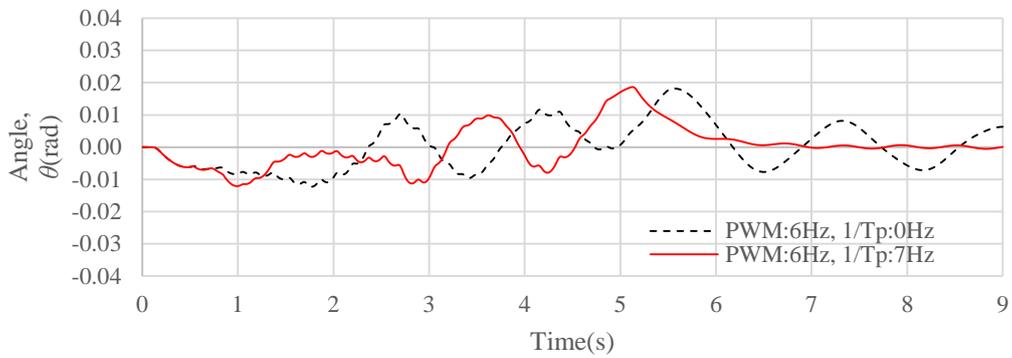
シミュレーション結果より，各 PWM 周波数において再計算周波数を大きくすると残留振れが抑制される傾向が確認できる．また，Fig. 4-15，Fig. 4-16 に FFT と UFFT のそれぞれの PWM 周波数と残留振れの関係を示す．どちらの場合も，PWM 周波数を大きくしていくと残留振れが小さくなることがわかる．また，FFT に比べて UFFT において残留振れが小さいことも確認できる．したがって，FFT に比べて UFFT による制御は，モデル化誤差による影響と連続加速度入力を PWM 制御入力により近似した際の量子化誤差による影響を軽減できることがわかる．



(a) PWM freq. = 2 Hz

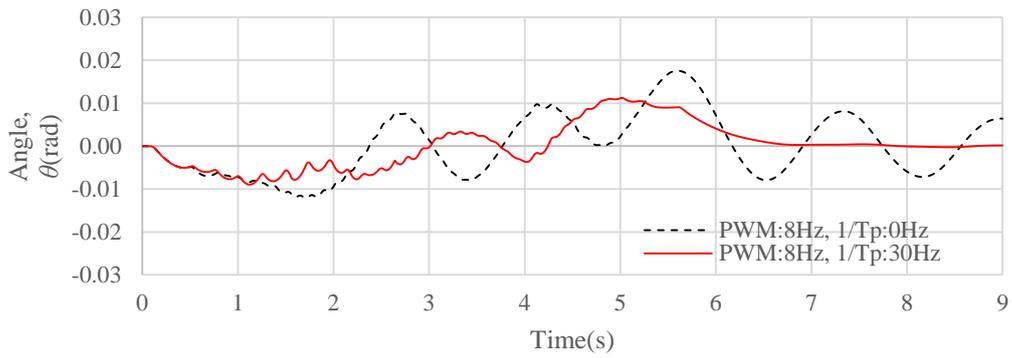


(b) PWM freq. = 4 Hz

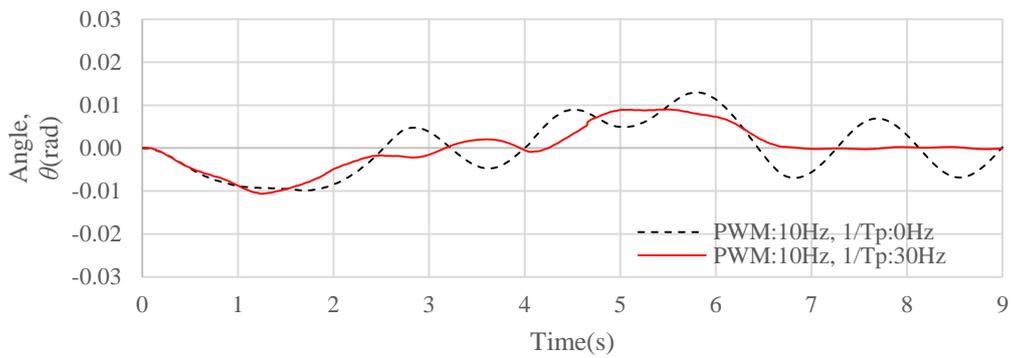


(c) PWM freq. = 6 Hz

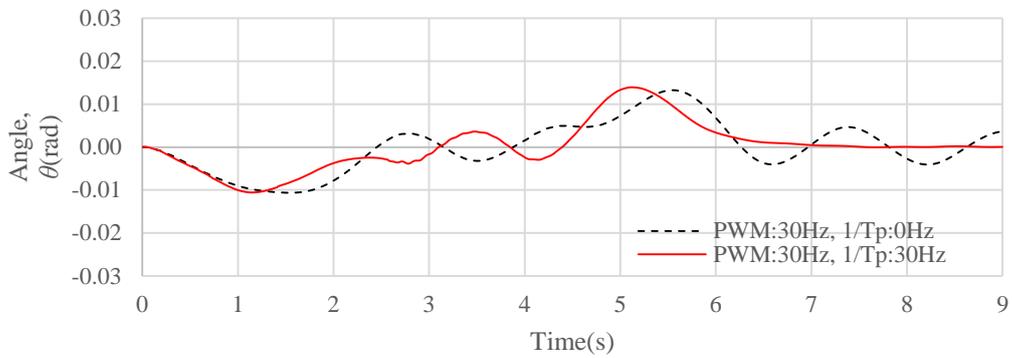
Fig. 4-15 振れ角の変化 (PWM freq. = 2, 4, 6 Hz)



(a) PWM freq. = 8 Hz



(b) PWM freq. = 10 Hz



(c) PWM freq. = 30 Hz

Fig. 4-16 振れ角の変化 (PWM freq. = 8, 10, 30 Hz)

# 第 5 章

## 実 験

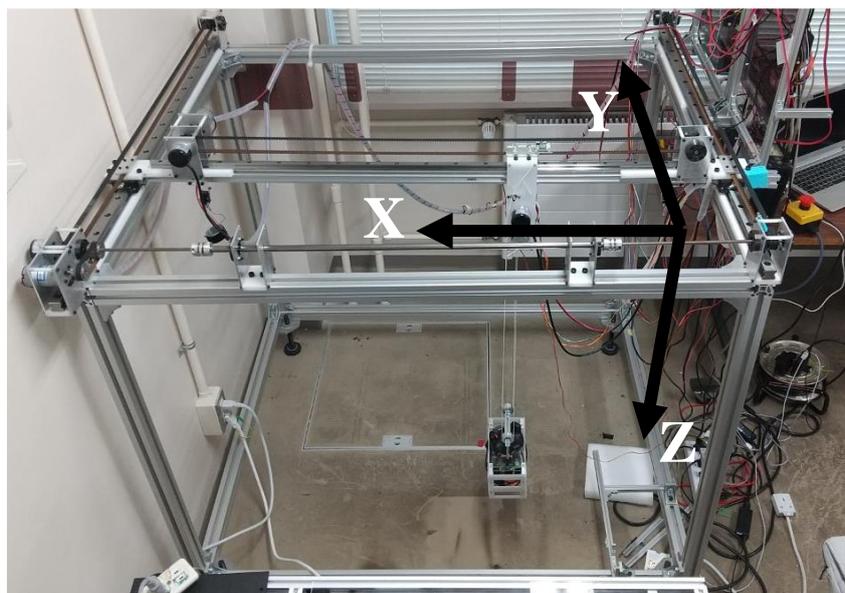
# 第5章

## 実験

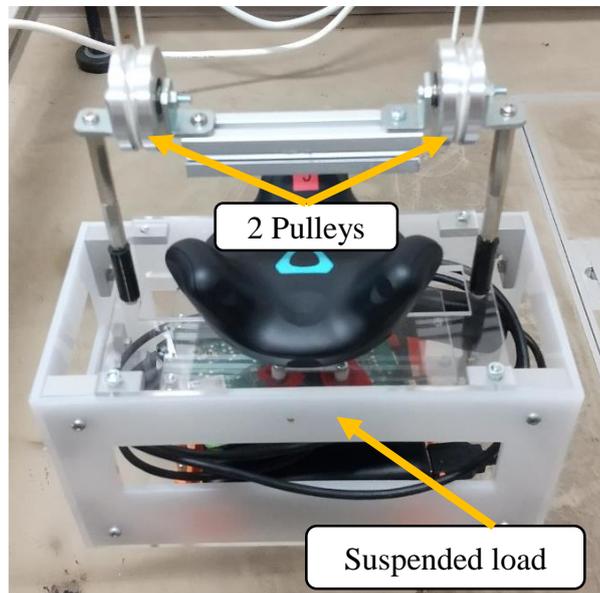
本章では，装置を製作して搬送実験を行った結果について述べる．

### 5.1 実験装置

Fig. 4-2 の CAD モデルをもとに，実験用クレーンを製作した．装置の外観を Fig. 5-1 に示す．また，制御ブロック図を Fig. 5-2 に示す．装置は，制御 PC，プログラマブルロジックコントローラ(PLC)，DC モータ等で構成されている．



(a) 実験装置の外観



(b) 吊り荷



(c) 横行トロリ

Fig. 5-1 実験用クレーン

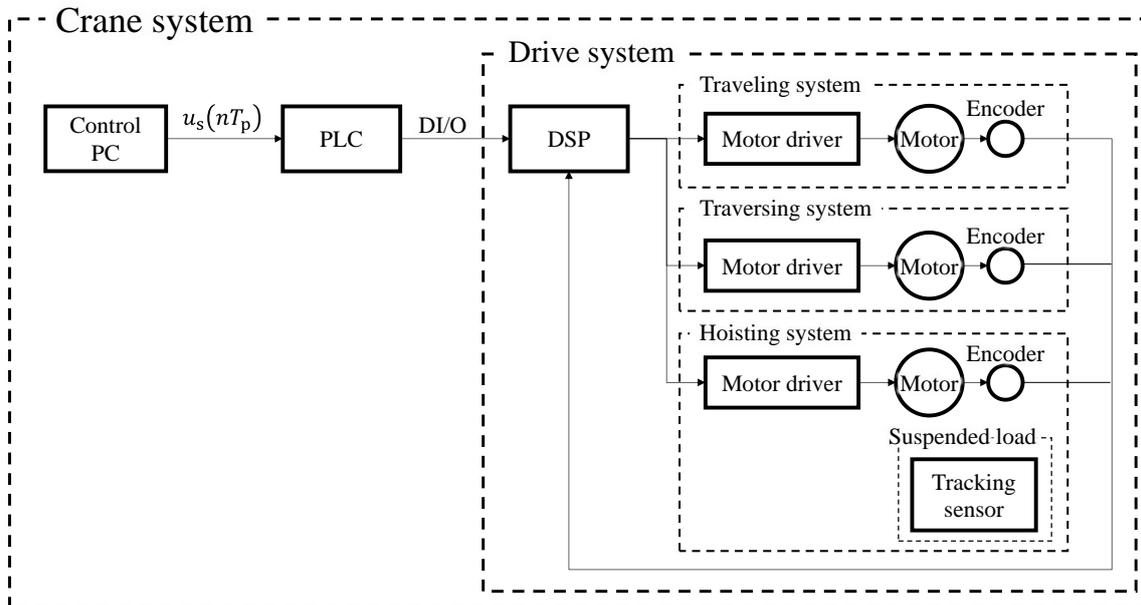


Fig. 5-2 クレーンシステム構成図

制御 PC は汎用ノートパソコンを用いており、制御用ソフトウェアとして MATLAB/Simulink、デジタルシグナルプロセッサ(DSP)制御用ソフトウェア、および吊り荷座標トラッキング用ソフトウェアをインストールしている。Fig. 5-3 に示すように、MATLAB App Designer で搬送指令制御を行うアプリケーションを作成した。アプリケーション画面の参照ボタンを押すと、トロリ制御信号（トロリ on/off 信号）、ロープ制御信号などの搬送条件を読み込む。その他の搬送条件は、加速後目標位置、減速後目標位置、目標速度、初期ロープ長、ロープ巻き速度である。加えて、Simulink シミュレーションで予め得られた吊り荷の予想振れ角波形が表示される。FFT および UFFT の性能比較を行うためには、トロリ制御信号以外の搬送条件を同一にする必要がある。そこで、制御手法の切り替えを画面上で任意に行うことができるようになっている。制御手法を選択後、搬送開始ボタンを押すことで、入力信号が PC から PLC 経由で DSP へ入力され搬送が行われる。搬送終了後、原点復帰ボタンを押すと、トロリは原点座標位置まで自動的に復帰する。

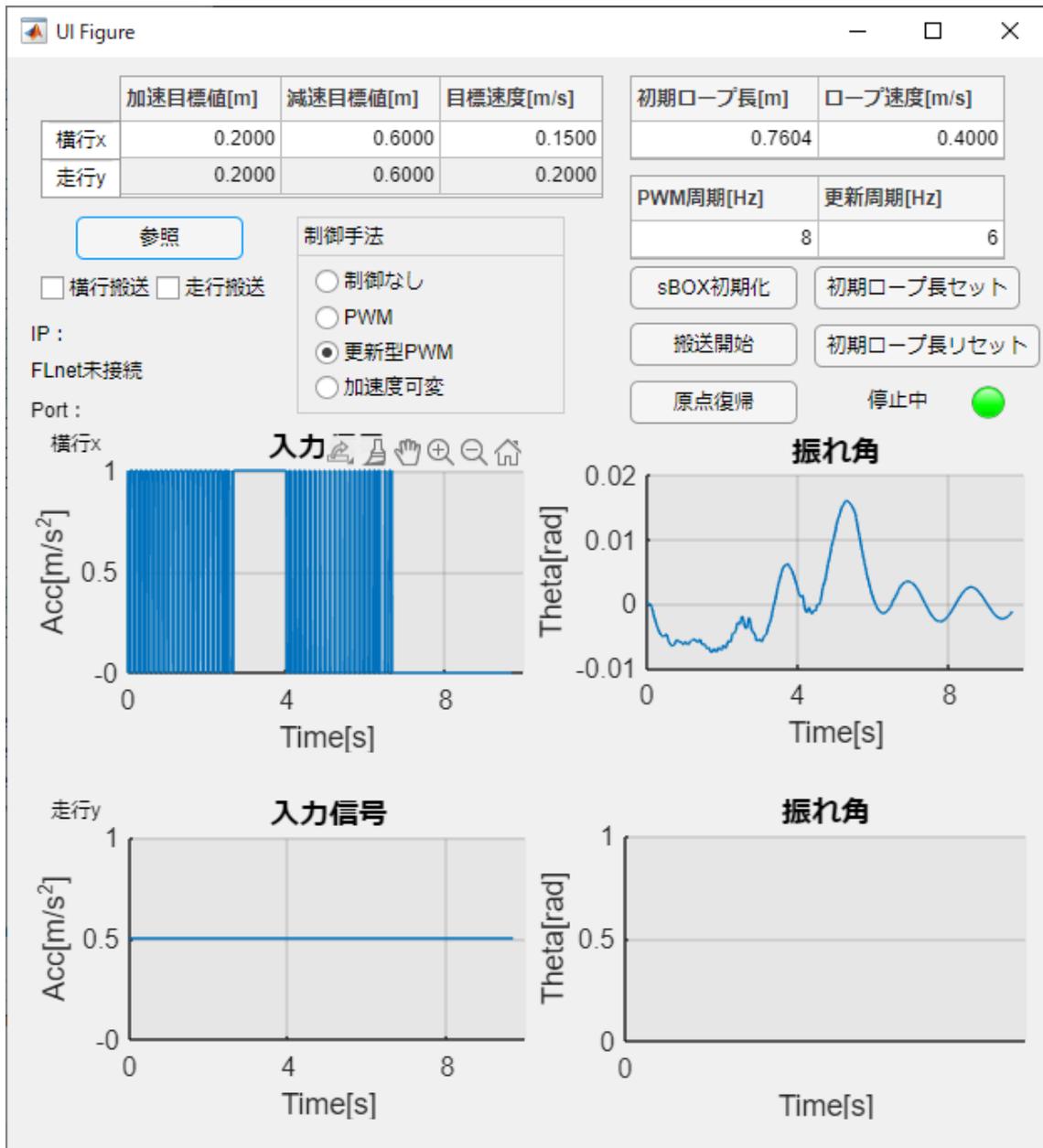
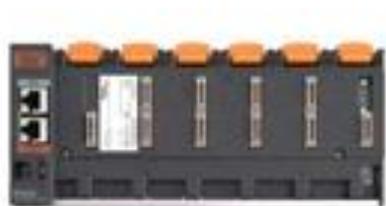


Fig. 5-3 実験装置を制御するアプリケーション画面

PLC は FA 用 PLC を選定した。追加モジュールには、制御 PC とのインターフェース(I/F)のための FL-net モジュール、DSP への出力用の I/O モジュールを搭載した。仕様を Table 5-1 に示し、外観を Fig. 5-4 に示した。

Table 5-1 PLC 仕様

Manufacturer	Module	Model	Number	Spec.	Fig
富士電機	ベースボード	NP1BS-06	1	6 Module	Fig. 5-4 (a)
富士電機	電源	NP1S-22	1	AC100V/ DC24V	Fig. 5-4 (b)
富士電機	CPU	NP1PS-74R	1	20ns response	Fig. 5-4 (c)
富士電機	FL-net	NP1L-FL3	1	Ver.3	Fig. 5-4 (d)
富士電機	I/O	NP1W1606T	1	20ch	Fig. 5-4 (e)



(a)ベースボード



(b)電源モジュール



(c)CPU モジュール



(d)FL-net モジュール



(e)I/O モジュール

Fig. 5-4 PLC モジュール外観([46]より)

モータドライブシステムは、Fig. 5-5 に示すように、デジタルシグナルプロセッサ (DSP) , モータドライバ、DC モータ、ロータリエンコーダで構成されている。DSP は、PLC、モータドライバと I/F している。DSP は、PLC に書き込まれている on/off 信号を読み込み、モータドライバに対してモータ速度指令をアナログ出力する機能を持つ。Fig. 5-6 に DSP の外観を、Table 5-2 に仕様を示す。

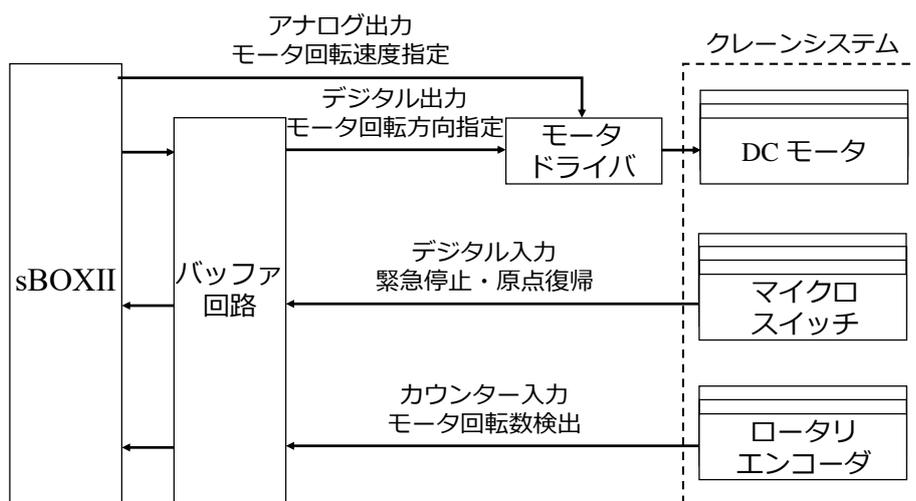


Fig. 5-5 クレーンドライブシステムブロック図



Fig. 5-6 DSP 外観([47]より)

Table 5-2 DSP 仕様

Manufacturer	Model	Analog I/O(ch)	Digital I/O(ch)	Counter Input
MIS	sBoxII	6	8	6

次に、DSP の入出力回路図を Fig. 5-7 に示す、これはデジタル入出力(DI/O)の機能を持たせた回路で、DSP が出力したモータ回転方向をモータドライバにデジタル出力する機能と、緊急停止信号と原点復帰用のデジタル入力、およびロータリエンコーダのカウンター入力機能を持つ。

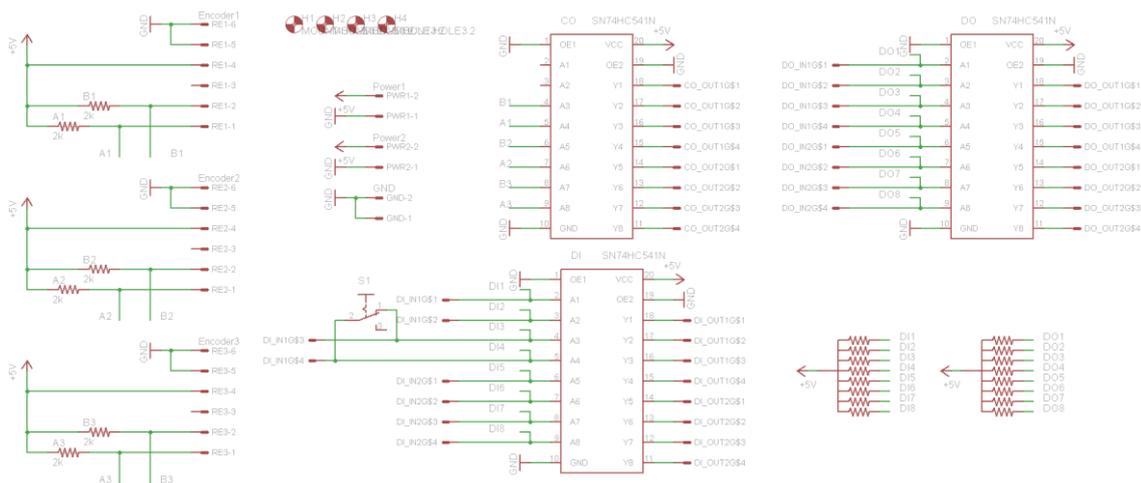


Fig. 5-7 DSP 入出力回路図

モータドライバは、PWM 制御に対応したものを選定している。Fig. 5-8 に外観図を、Table 5-3 に仕様を示す。



Fig. 5-8 モータドライバ外観([48]より)

Table 5-3 モータドライバ仕様

Axis	Manufacturer	Model	Voltage (V)	Current (A)	Ch	Number
X, Y, Z	Cytron	SmartDriveDuo- 30	DC7~35	30~ 80(<1s)	2	2

DC モータは、モータドライバによって駆動させ、DSP によって指定速度に制御する。 Fig. 5-9 に DC モータの外観を示し、Table 5-4 に仕様を示す。 Fig. 5-9(a)は走行および横行方向の駆動用モータで、 Fig. 5-9(b)は巻上げ駆動用モータである。このとき、トロリの加速度の大きさが一定になるように、制御ゲインを調整している。 Fig. 5-10 に、目標速度を 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 m/s、目標加速度を  $0.2\text{m/s}^2$  として調整した結果を示す。



(a) 走行・横行モータ



(b) 巻上モータ

Fig. 5-9 実験クレーン用 DC モータ外観([49]より)

Table 5-4 DC モータ仕様

Axis	Manufacturer	Model	Voltage (V)	Output (W)	Torque (mN・m)	Number
X, Y	ツカサ電工	TG-85B-SG (Fig. 12a)	12	5.5	196	2
Z	ツカサ電工	TG-05R-SG (Fig. 12b)	12	2.3	68.6	1

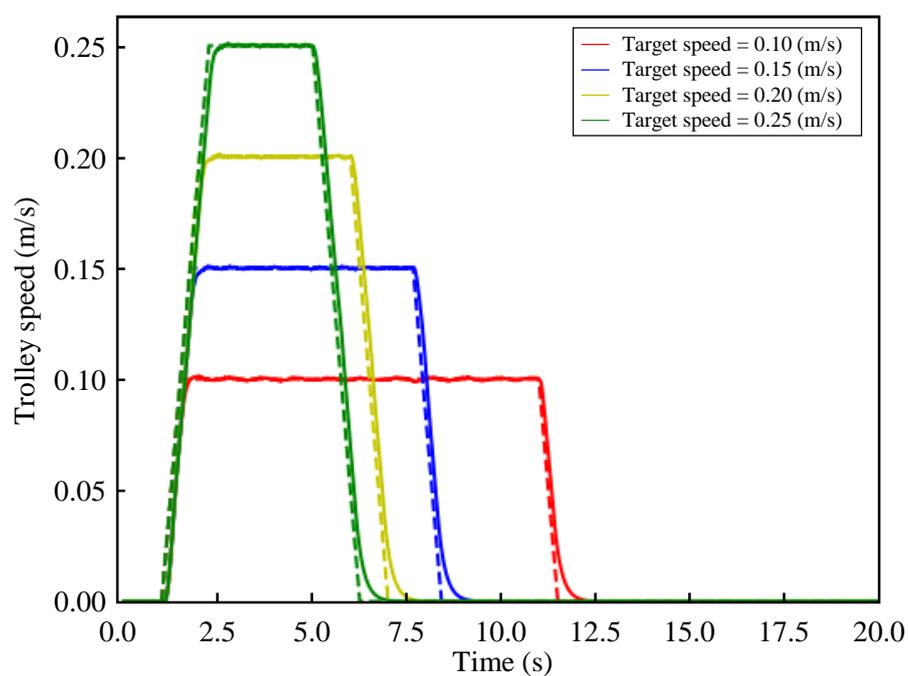


Fig. 5-10 トロリ加速度一定化調整結果

また、それぞれのモータの回転軸には、センシング用にロータリエンコーダを取り付けている。ロータリエンコーダの外観を Fig. 5-11 に、Table 5-5 に仕様を示した。

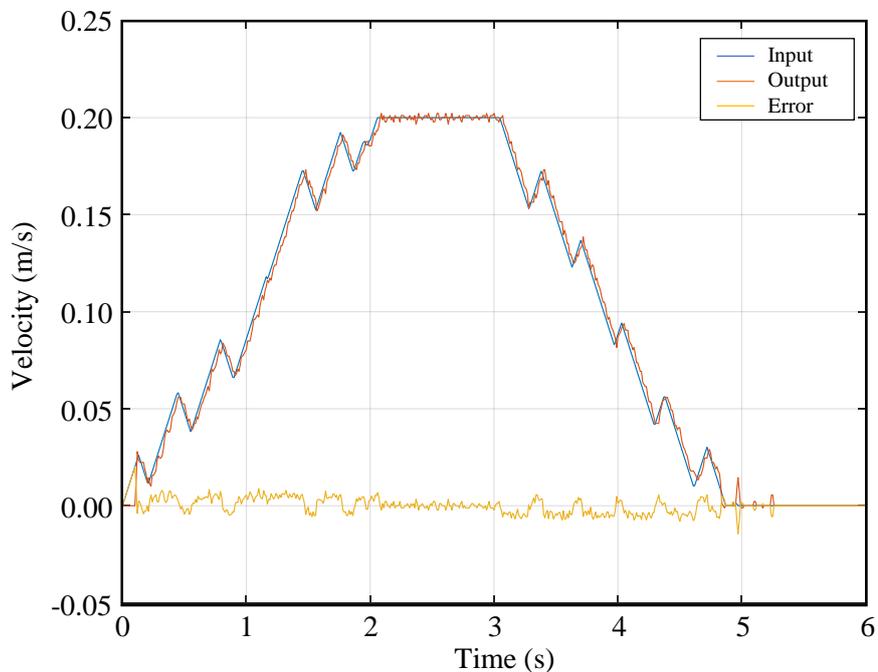


Fig. 5-11 ロータリエンコーダ外観([50]より)

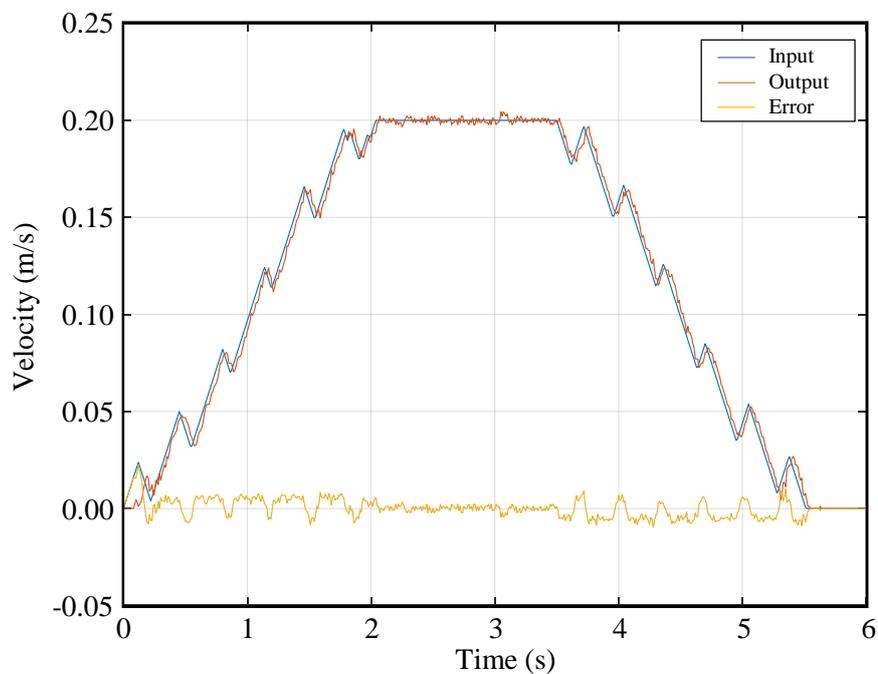
Table 5-5 ロータリエンコーダ仕様

Axis	Manufacturer	Model	Resolution	Phase	Voltage	Output
X, Y, Z	Autonics	E40HB6	2000	3	DC5	NPN

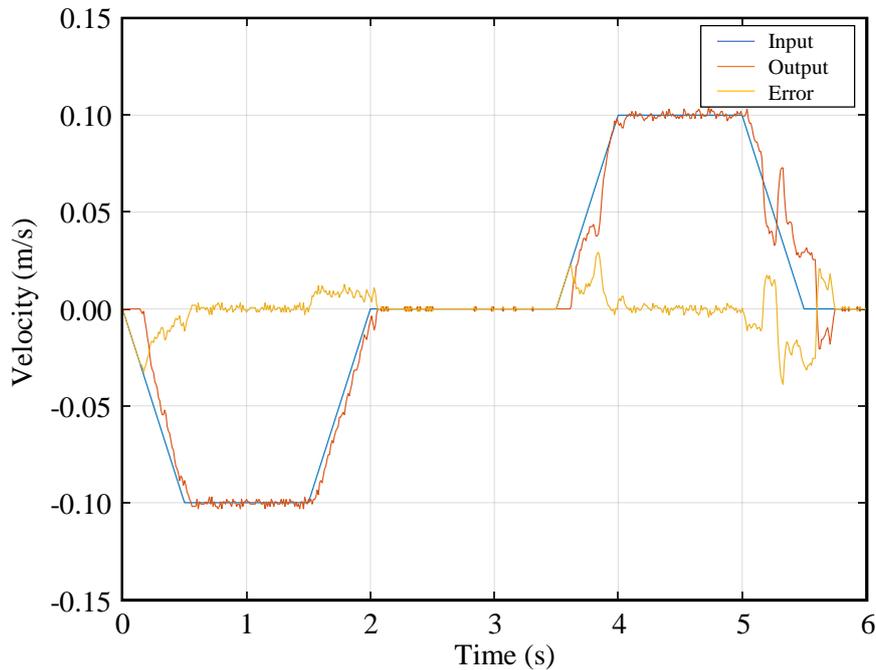
次に、走行方向および横行方向のモータに対して、PWM3Hz の速度指令を入力し、制御ゲインを調整した結果を Fig. 5-12 に示す。走行、横行いずれも加速度が一定で、かつ最高速度で一定速となっており、制御ゲインを適切に調整できていることがわかる。



a) 走行方向の速度制御



b) 横行方向の速度制御



c)巻き方向の速度制御

Fig. 5-12 トロリの速度応答確認結果

なお、現実のクレーンシステムでは駆動系に AC モータが使用されることが多い。しかし、本システムでは、駆動システムの特性を簡単に変更するために DC モータを使用した。現実のクレーンに存在する制約にするため、PLC と DC モータを使用した駆動システムで疑似的に再現している。吊り荷の振れ角測定には、赤外線トラッカーシステムを利用した。Fig. 5-13(a)に示すトラッカーを、Fig. 5-14 に示すように吊り荷の上部に設置した。Fig. 5-13(b)に示すベースステーションを装置外部からトラッカーに向けて配置することで、吊り荷の空間座標をリアルタイム測定できる。ベースステーションは、ラボクレーンの外から 2 機配置した。トラッカーとベースステーションの仕様を Table 5-6 に示した。吊り荷の振れ角の取得方法は、トロリ座標と吊り荷座標の関係から三角関数で演算している。トロリ座標とロープ長は、各モータ軸に取り付けたロータリエンコーダから取得している。



(a)吊り荷座標検出用トラッカー



(b)ベースステーション

Fig. 5-13 吊り荷トラッキングユニット外観([51]より)

Table 5-6 吊り荷座標検出センサ仕様

Type	Manufacturer	Model	FOV (deg)	Number
トラッカー	HTC Corp.	VIVETracker2018	360	1
ステーション	Valve	Steam VR Base Station	160	2

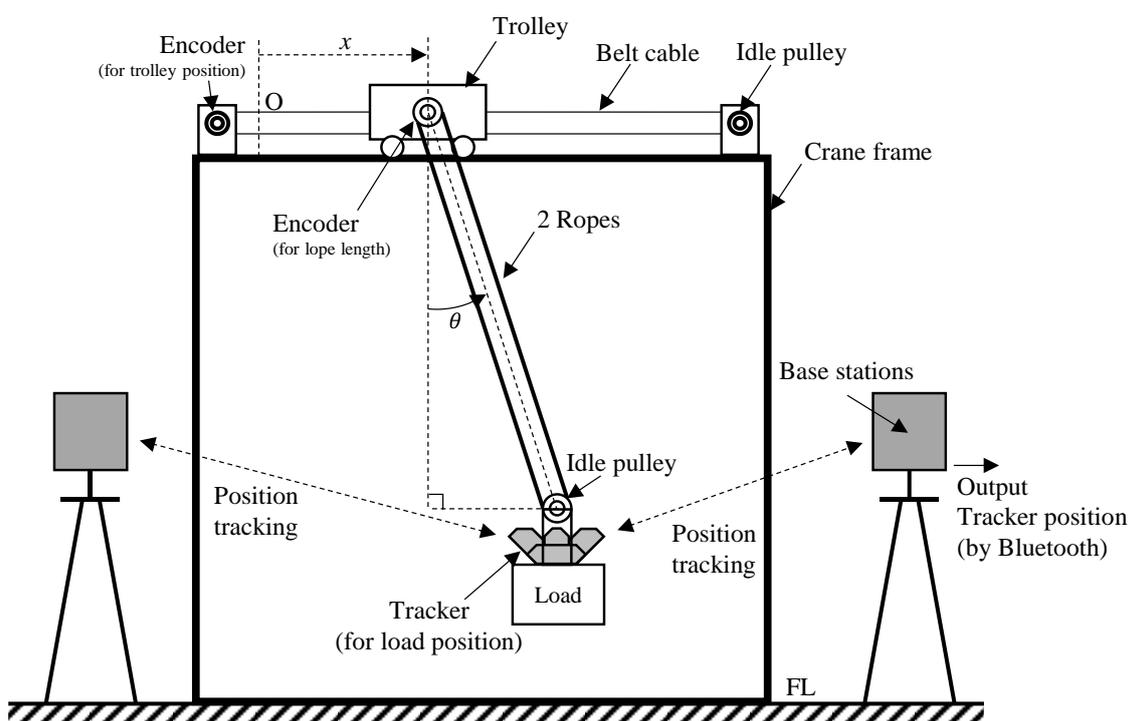


Fig. 5-14 振れ角測定用トラッカーの配置図

クレーン制御盤の外観図を Fig. 5-15 に示す。PLC, DSP, I/O ターミナル, 入出力ドライブ回路を壁面に設置している。

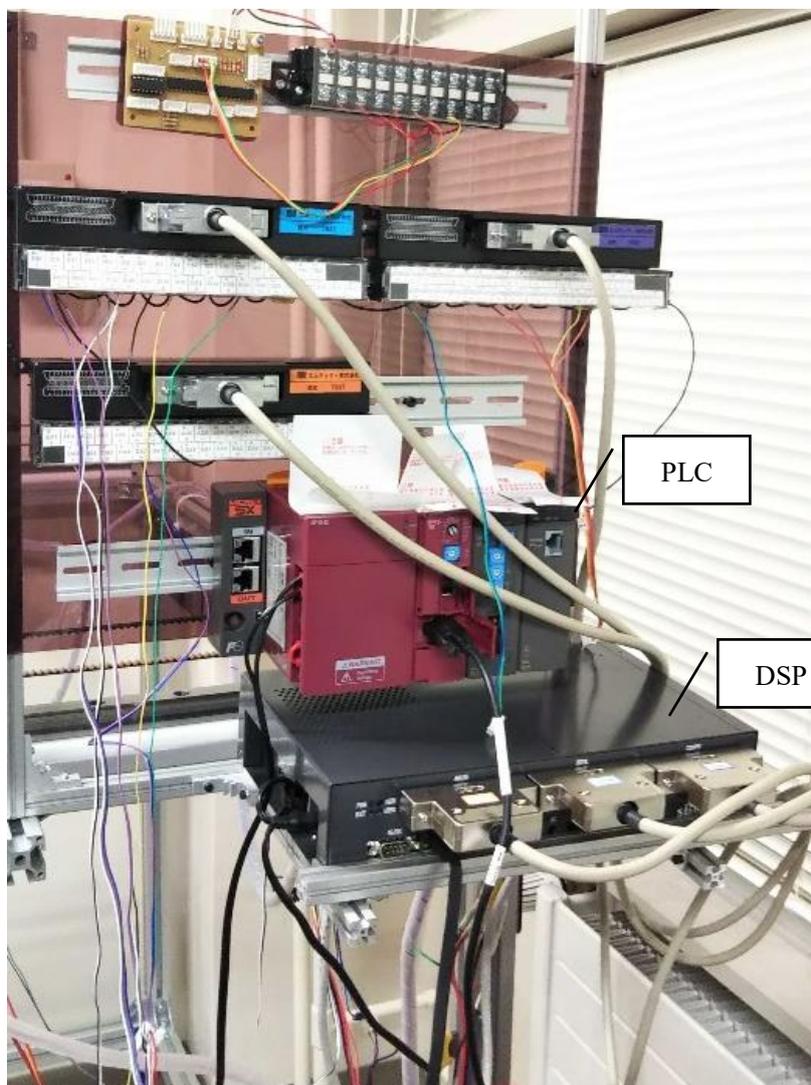


Fig. 5-15 クレーン制御盤外観図

今回作成したクレーンシステムの流れを Fig. 5-16 に示す。まず、UFFT によって生成した FF 制御信号を、制御 PC の MATLAB App で受け取る。次に、FF 制御入力 of 加速(on:1) または減速(off:0) に対応するデジタル信号を、制御 PC から PLC のメモリに FL-net モジュールを経由して書き込みする。これで搬送準備が完了する。次に、PLC に書き込まれた信号は、DSP に伝送されメモリに格納される。DSP は on/off 信号を速度に変換し、速度指令値に応じてモータドライバと I/F して DC モータを一定の加減速度で駆動させる。DC モータの回転軸に取り付けられたエンコーダによってトロリの状態を取得し、DSP App で結果を取得する。

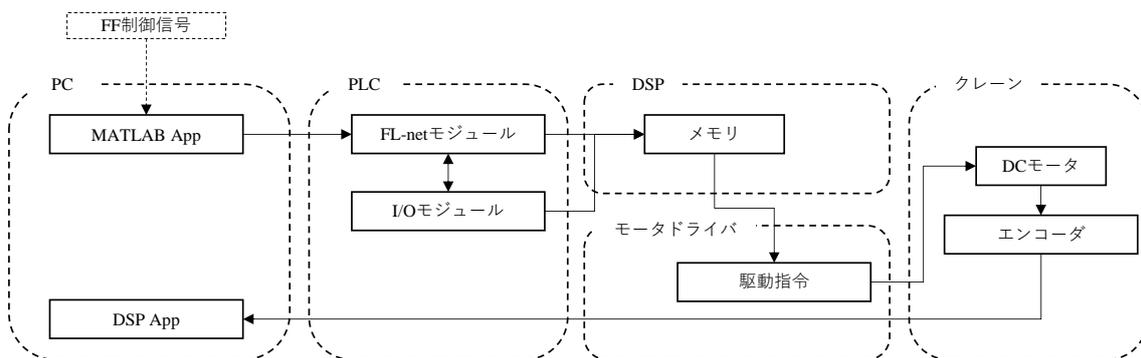


Fig. 5-16 クレーンシステムの動作フロー

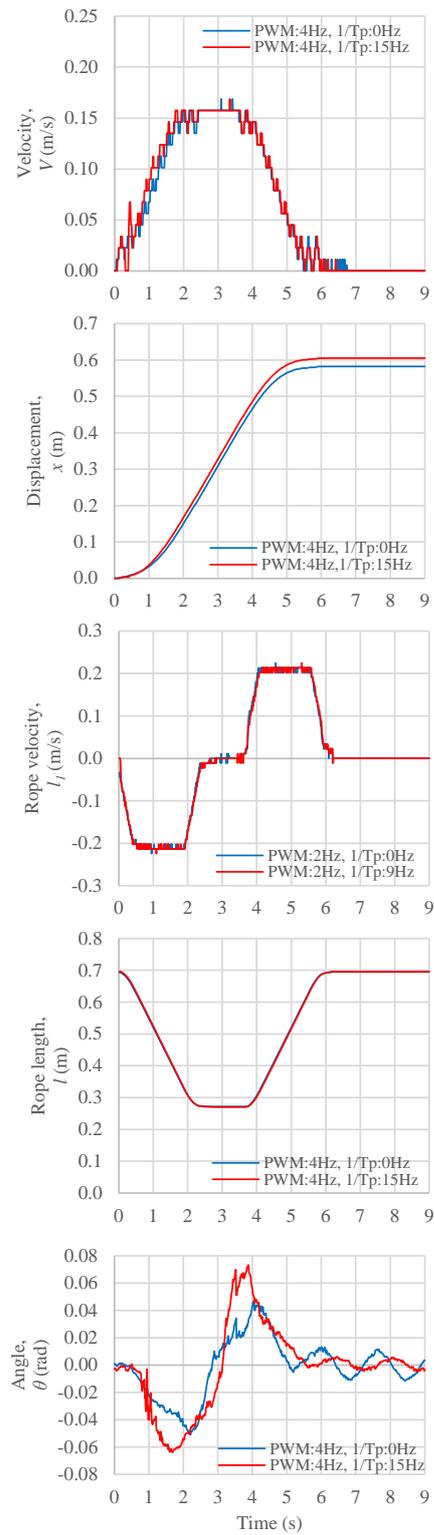
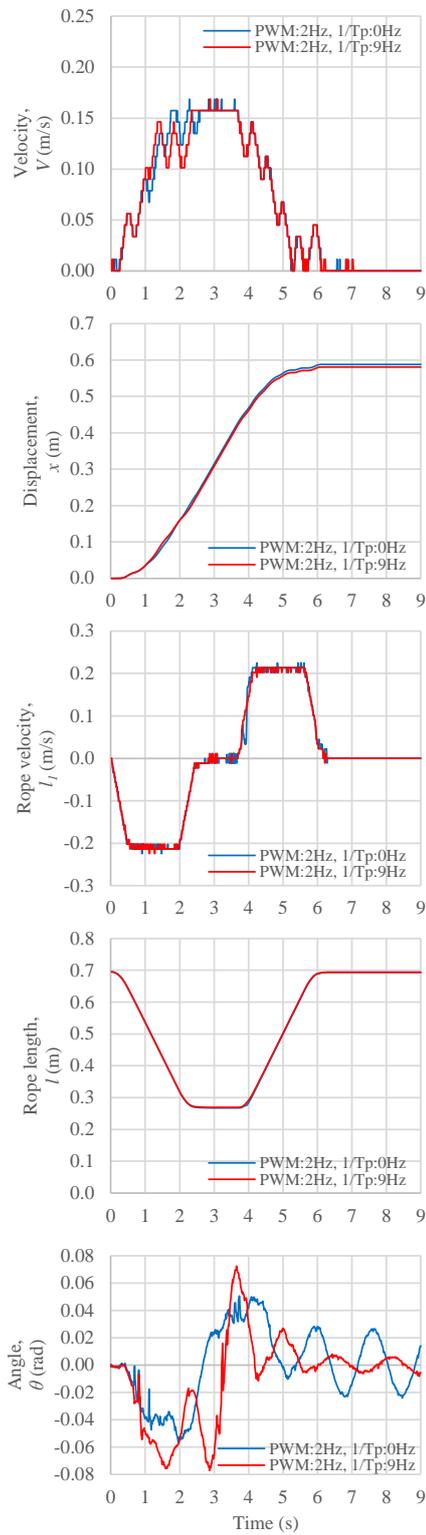
## 5.2 実験結果

シミュレーションと同じ搬送条件で、搬送実験を行った結果を Table 5-7 に示す。Fig. 5-17, Fig. 5-18 および Fig. 5-19 は、Table 5-7 の下線部分に示す実験条件における、トロリ速度、トロリ位置、ロープ速度、ロープ長、および吊り荷の振れ角の時間応答結果を示している。実験の結果、UFFT は適切な更新周波数を選択することで FFT よりも残留振れを低減することができ、PWM が 8Hz、更新周波数が 6Hz のときに残留振れが最も小さくなることがわかった。シミュレーションでは、PWM の周波数が高くなると残留振れが単調に減少する傾向にあったが、実験では、残留振れがまず減少し、次に増加することがわかった。シミュレーションと実験では、吊り荷と速度制御器の特性はシステム同定により一致させている。しかし、シミュレーションでは制御入力を出力する PLC の周波数応答を考慮していない。このことから、実験における制御入力の高周波領域において制御性能が低下するのは、PLC の高周波数での応答速度が遅く、出力信号を高速で切り替えることができないためであることがわかる。高速に応答する PLC を利用することにより、制御性能が良くなることは容易に予想される。しかし、本研究の目的は、駆動系に制約のあるクレーンシステムにおいて残留振れが最小となる制御入力を探索する方法を設計することであるため、良い性能の制御器を利用して、制御性能をよくすることは本来の目的ではない。実験結果より、UFFT は、制御入力を高速で切り替えられない場合でも、吊り荷の振れを抑制できる制御入力を探索することがわかる。一方で、実験結果よりトロリの位置誤差があることがわかる。より高い位置精度が求められる場合には、残留振れとトロリの位置誤差の両方を最小化する制御入力を探索するように探索アルゴリズムを改良すればよいと考えている。これは今後の検討する課題である。

Table 5-7 実験結果

Residual sway max angle $ \theta _{\max}$ ( $\times 10^{-3} \text{rad}$ )		Update frequency, $1/T_p(\text{Hz})$													Fig
		FFT	UFFT												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	30	
PWM freq. (Hz)	1	21.6	63.3	65.5	18.7	50.4	12.8	16.5	9.3	13.6	9.9	16.0	24.2	7.5	
	2	<u>26.4</u>	12.7	24.8	27.7	26.8	17.4	13.9	7.7	49.5	<u>6.3</u>	13.5	9.2	14.1	Fig.5-16(a)
	3	19.5	55.3	23.3	13.5	27.2	12.0	9.3	17.7	27.8	18.2	14.4	19.4	13.4	
	4	<u>11.6</u>	25.2	17.2	8.5	30.2	14.7	6.3	7.3	8.8	7.6	10.1	<u>5.7</u>	7.2	Fig.5-16(b)
	5	13.4	19.5	8.0	15.0	5.0	2.4	8.2	16.7	10.0	12.7	4.3	7.5	13.9	
	6	<u>7.5</u>	4.2	19.0	10.0	5.0	5.6	4.4	10.1	<u>2.8</u>	5.5	5.1	10.0	13.0	Fig.5-17(a)
	7	16.5	6.6	22.5	12.5	7.0	7.5	4.6	9.6	6.1	10.0	4.7	6.8	12.8	
	8	<u>6.4</u>	12.3	8.5	24.7	11.9	5.5	<u>2.4</u>	6.9	5.7	4.4	7.5	7.9	7.9	Fig.5-17(b)
	9	7.8	10.5	6.7	8.5	8.3	11.1	4.5	8.1	4.1	11.2	6.3	9.8	6.5	
	10	<u>17.8</u>	20.2	9.7	10.0	10.5	11.1	9.1	9.0	9.2	19.5	12.6	11.0	<u>6.9</u>	Fig.5-18(a)
	15	12.0	13.4	15.1	10.8	7.4	8.2	9.1	8.8	8.5	11.2	14.7	8.0	8.0	
	30	<u>21.2</u>	16.4	14.3	22.2	22.7	16.8	<u>8.5</u>	16.6	8.9	19.4	14.9	11.8	15.2	Fig.5-18(b)

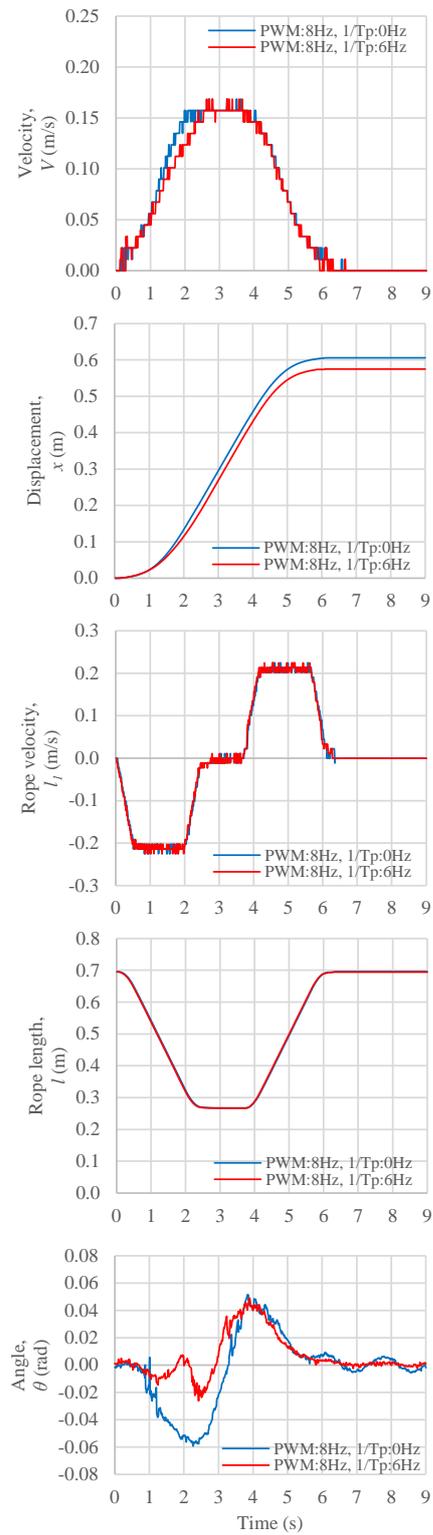
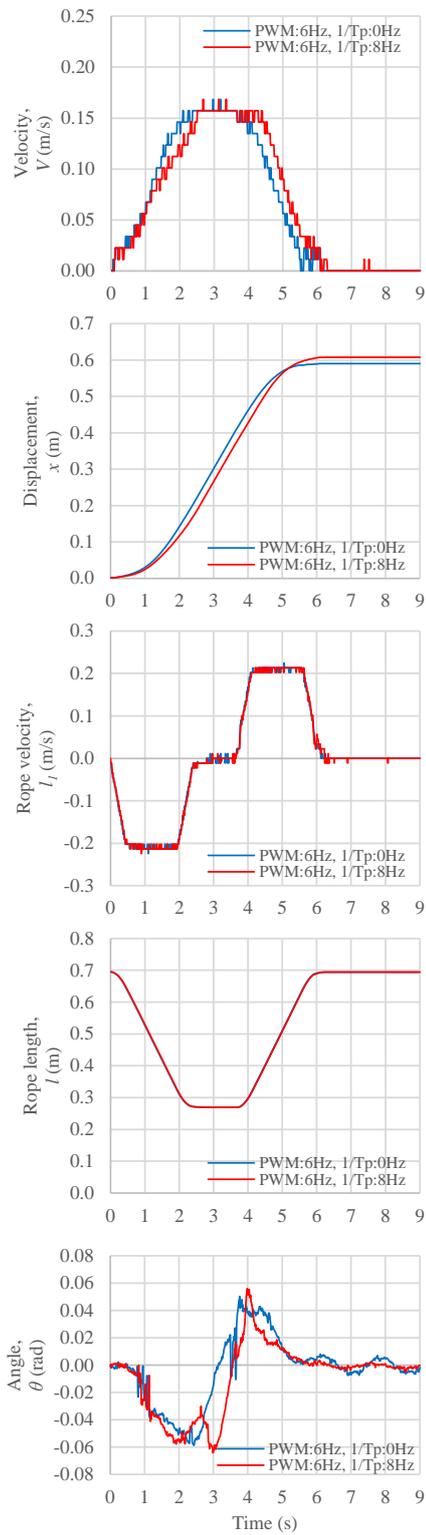




(a) PWM = 2 Hz

(b) PWM = 4 Hz

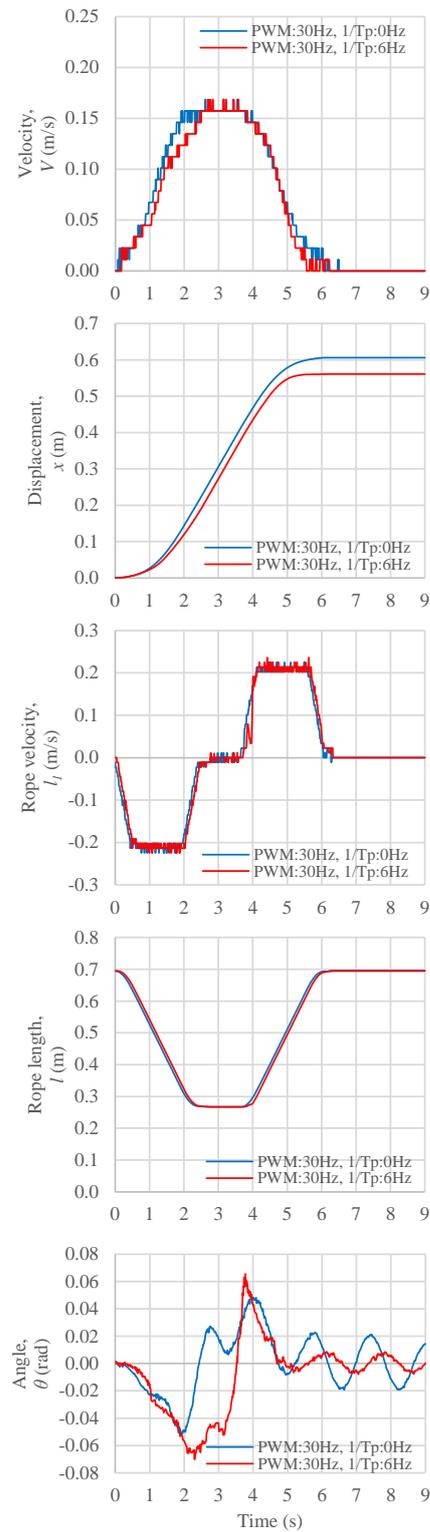
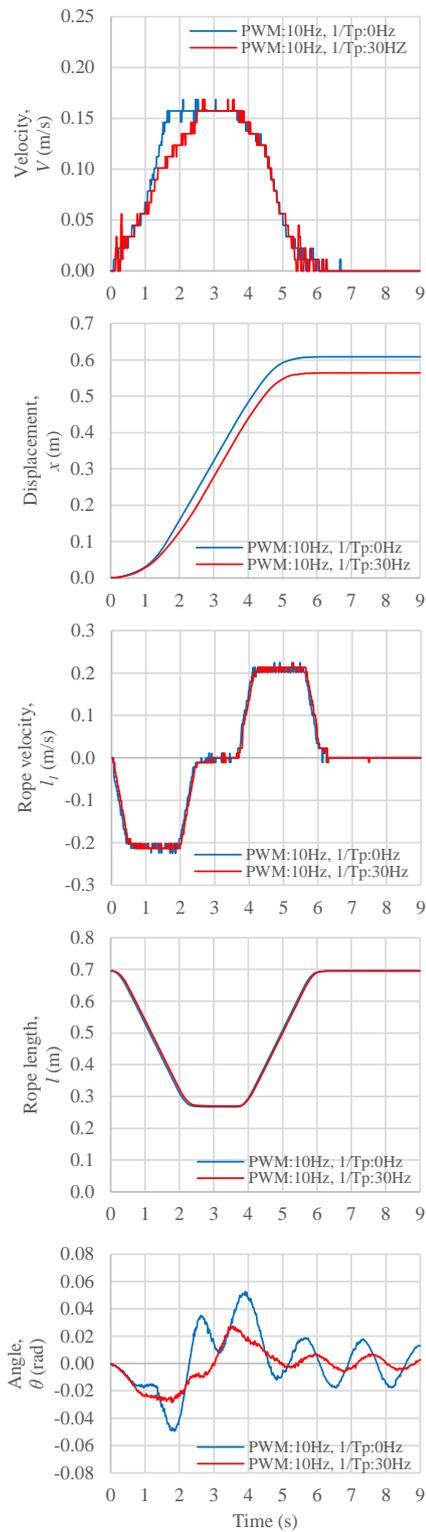
Fig. 5-17 実験結果 (PWM freq. = 2, 4 Hz)



(a) PWM = 6 Hz

(b) PWM = 8 Hz

Fig. 5-18 実験結果 (PWM freq. = 6, 8 Hz)



(a) PWM = 10 Hz

(b) PWM = 30 Hz

Fig. 5-19 実験結果 (PWM freq. = 10, 30 Hz)

### 5.3 吊り荷の質量変化に対するロバスト性の評価

UFFT 法で求める制御入力(10)からわかるように吊り荷の質量 $m$ を含んでいないため、理論的には質量変化に対してロバストである。しかし、実際の搬送では、質量変化がモデル化誤差に影響を与えて制御性能が悪くなる可能性がある。以下に、吊り荷の質量に対するロバスト性を評価するために吊り荷の質量を変化させて搬送シミュレーションと実験を行った結果を Fig. 5-20 に示す。制御入力の PWM 周波数は  $8\text{Hz}$  である。黒丸と白丸は更新周波数を変えた場合のシミュレーションと実験での残留振れを示している。各プロット点から上下に伸びる線は、吊り荷の基準質量  $m = 0.960\text{kg}$  から、質量を  $-30\%$ ,  $-15\%$ ,  $+15\%$ ,  $+30\%$  に変化させた場合の残留振れが変動する範囲を示している。

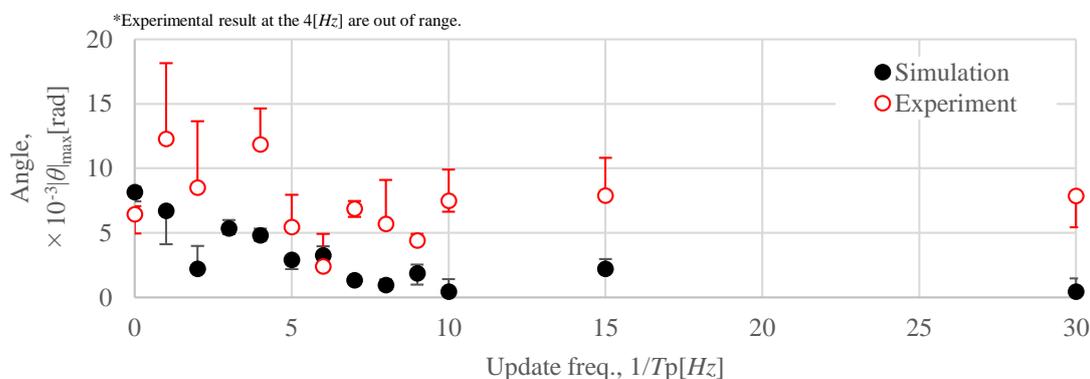


Fig. 5-20 吊り荷の質量を変化させた場合の最大残留振れ

Fig. 5-20 より、質量を変化させると残留振れも変化することがわかる。今回の実験の場合には、更新周波数を  $6\text{Hz}$  に設定すると残留振れが最小となる。しかし、最もロバストな更新周波数は  $9\text{Hz}$  であることがわかる。以上の結果は理論的に保障されているわけではないが、UFFT 法は質量変化を想定した実験により、質量変化にロバストな制御入力を簡単に探索できる。

## 第 6 章

### 更なる制振性能の向上

# 第6章

## 更なる制振性能の向上

今回提案した UFFT 法は、FFT 法と比較すると制振制御性能が高いことが、シミュレーションおよび実験で明らかとなった。一方で、要求される制振条件を UFFT 法で満たせない場合は、より制振性能の高い制御入力を導出できるアルゴリズムが必要となる。そこで本章では、UFFT の制御スキームを基礎として、制振性能のさらなる向上を目的とした改良アルゴリズムを提案する。そのアルゴリズムは、UFFT では更新比較対象となっていない境界条件に着目して、制御入力の更新判断を総当たりで求めるものである。そのアルゴリズムを、総当たり新型 FFT 法(NSFTC)と呼ぶ。

### 6.1 NSFTC アルゴリズム

まず、UFFT の処理フローチャートを Fig. 6-1 に示す。質点モデルで理想的な制御入力  $u_s(t)$  を求めたあと、多自由度剛体モデルによるシミュレーションを繰り返し行う。Fig. 6-2 に、多自由度剛体モデルのシミュレーションで、 $nT_p$ ごとに境界条件を更新して振れ角を評価する過程の更新判定に関するツリー図を示す。このとき、 $\theta_6$ がこの時最も残留振れの小さいケースで、 $\theta_3$ が $\theta_6$ の次に残留振れが小さい場合とする。Fig. 6-2 では、UFFT 法は橙色線の経路を選択し、NSFTC 法は赤色線の経路を選択している。UFFT 法では、 $t = T_1$ の境界条件に基づく制御入力から得られる残留振れ角の比較において、 $t = T_0$ の際に設定した $|\theta|_{\max}$ より悪化すると判断して、制御入力の更新を行っていない。なお、次のステップでは $|\theta|_{\max}$ が良化すると判断して、更新を行っている例である。しかしこのとき、UFFT 法は一つ先の更新周波数のみを比較対象としているため、二つ先以降でより良化する可能性がある経路を選択することができない。一方で NSFTC 法は、すべての境界条件を総当たりで実行したため、最終的に $|\theta|_{\max}$ が最小となる制御入力を選択することができる。したがって、Fig. 6-2 の NSFTC 法では、 $t = T_1$ においては $|\theta_1|_{\max}$ が悪化するがあえて制御入力を更新し、さらに次の  $t = T_2$ では更新せず、 $t = T_3$ では更新する経路を取って、最小残留振れ $\theta_6$ を得る経路を取得していることを概念として示している。なお、UFFT 法の場合は、 $nT_p$ ごとの更新判定を行うため、判定回数は $nT_p$ 回である。一方で NSFTC 法は Fig. 6-2 で示す丸印すべての境界条件を使うため、判定回数は $2^{nT_p}$ 回である。Fig. 6-3 に、NSFTC の処理フローチャートを示す。NSFTC 法は、 $nT_p$ ステップ間隔の境界条件を設定して制御入力を再度生成し、剛体シミュレーションを繰り返し行うことで、最適制御入力を探索的に求めるという点においては UFFT 法と共通である。しかし、更新判定対象を 1 ステップ先に限定している UFFT 法に対して、

NSFTC 法はすべての境界条件を総当たりでシミュレーションして残留振れ角を格納したあと、最も振れ角が小さくなる制御入力を導出するアルゴリズムとなっている。したがって、NSFTC 法は UFFT 法のシミュレーションパターンも網羅しているため、原理的には、UFFT と同等以上の制振性能を得ることができる。一方で懸案として、制御入力の導出に当たって、計算負荷には大きな違いがある。UFFT 法は  $nT_p$  回の再計算で良い一方で、NSFTC 法は  $2^{nT_p}$  回の再計算を行う必要があり、NSFTC 法は、計算機の負荷が大幅に増大する。

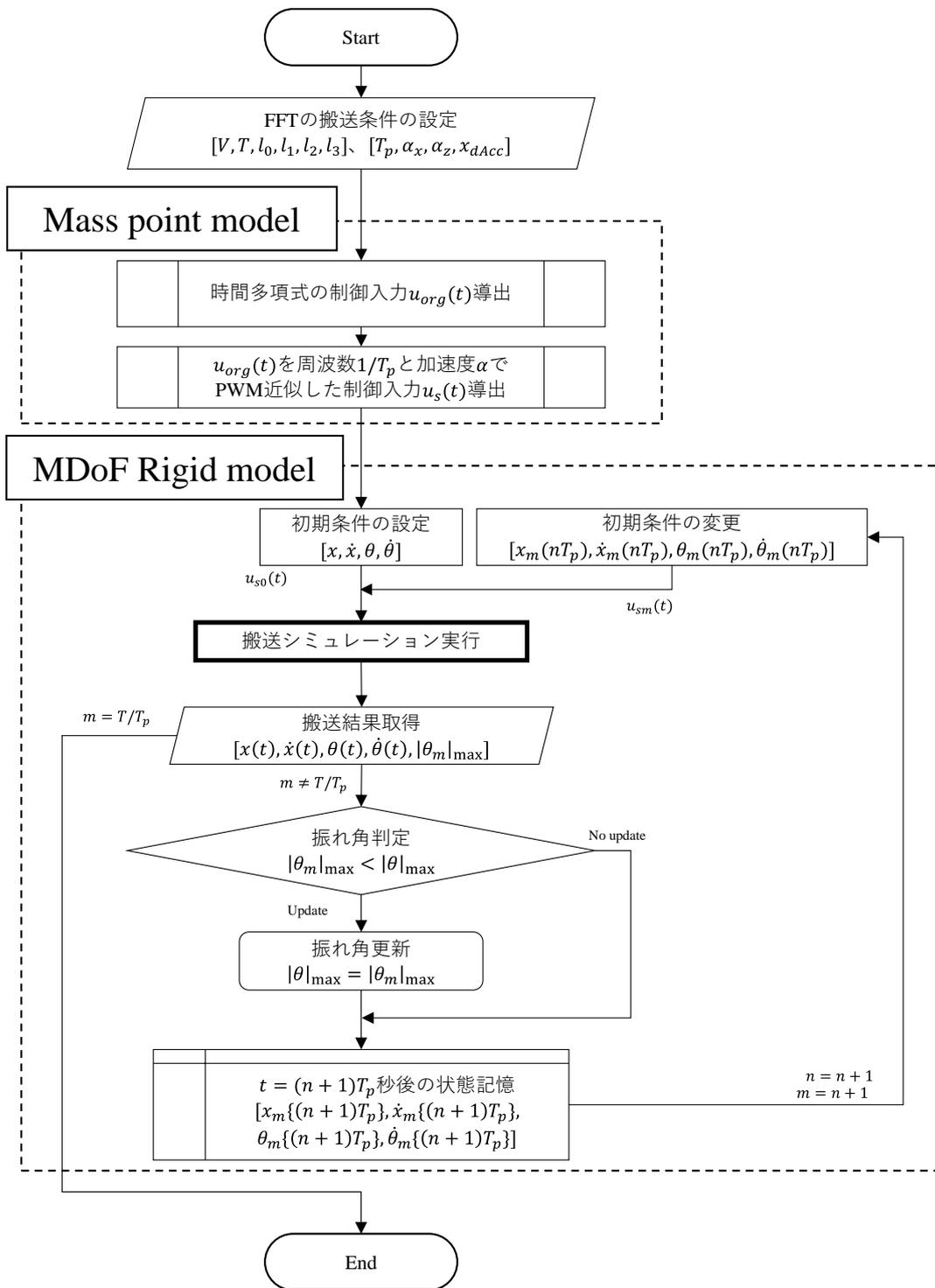


Fig. 6-1 UFFT の処理フローチャート

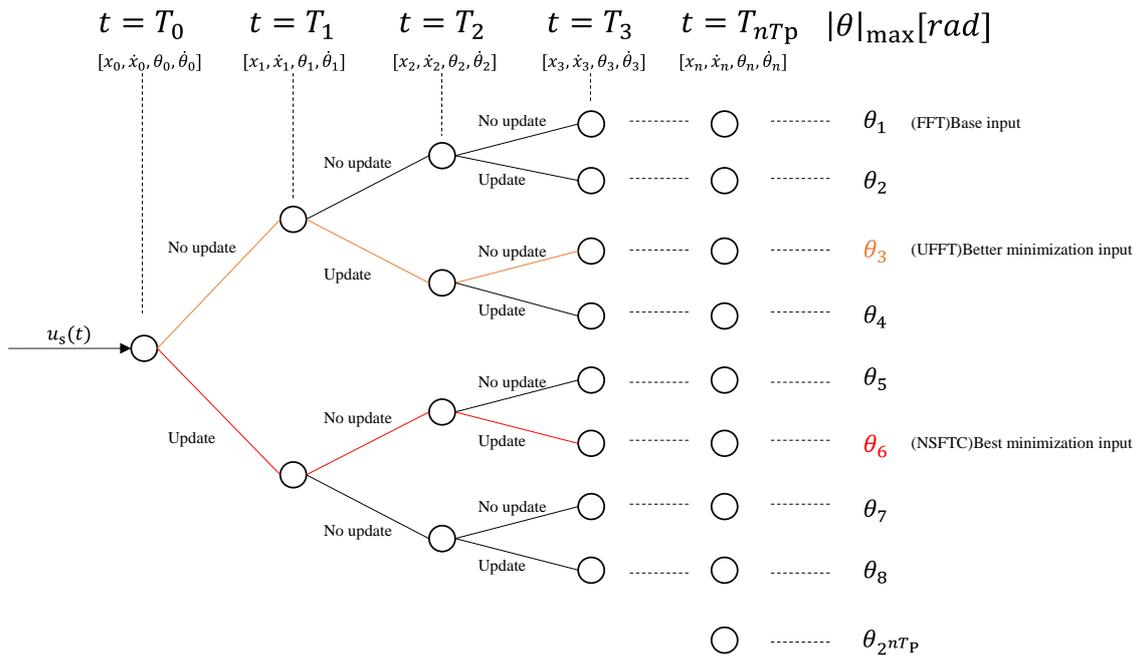


Fig. 6-2 NSFTC アルゴリズムと UFFT アルゴリズムの更新判定スキーム

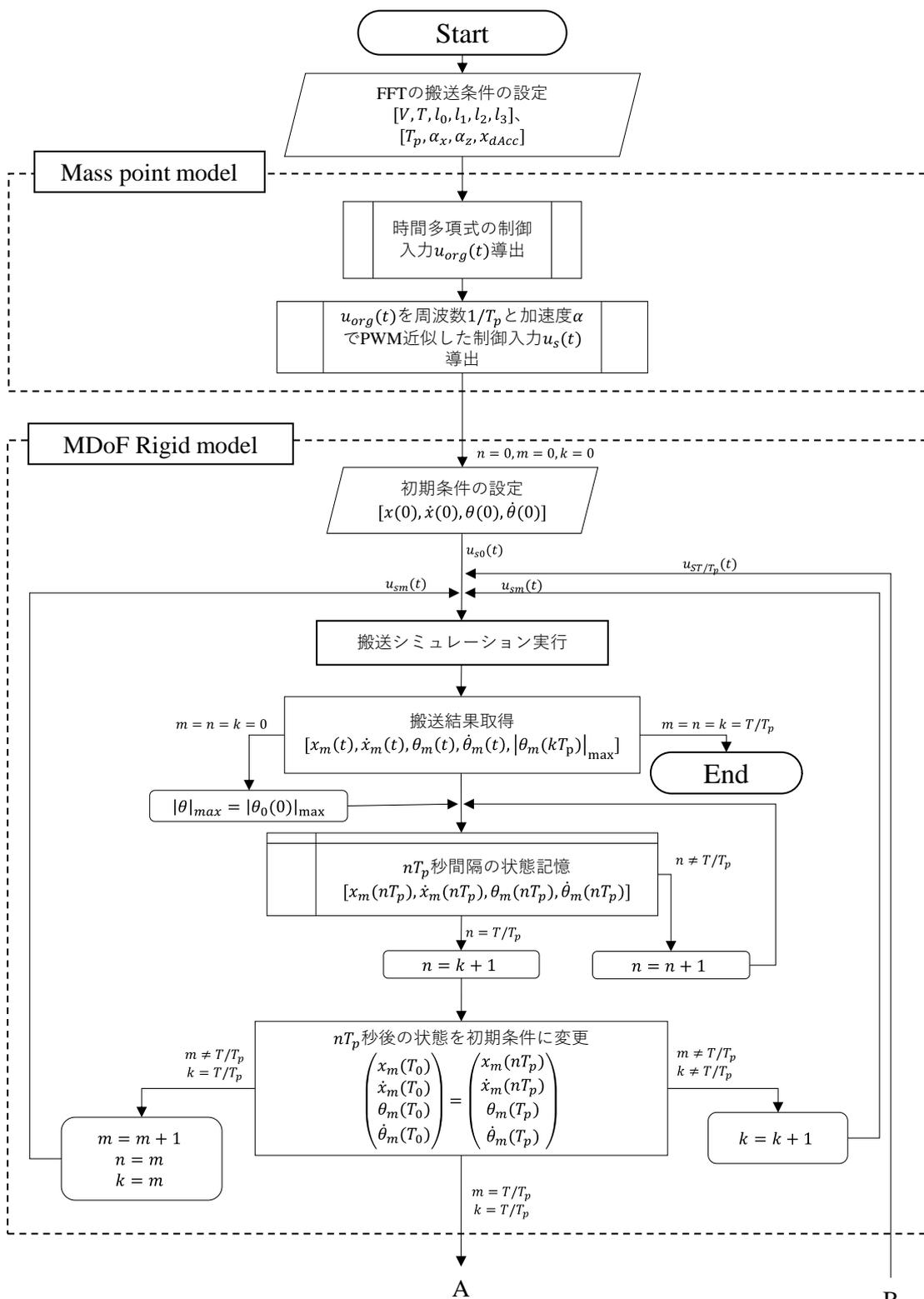


Fig6-3(b)

B  
Fig.6-3(b)

(a)制御入力導出部, 演算部

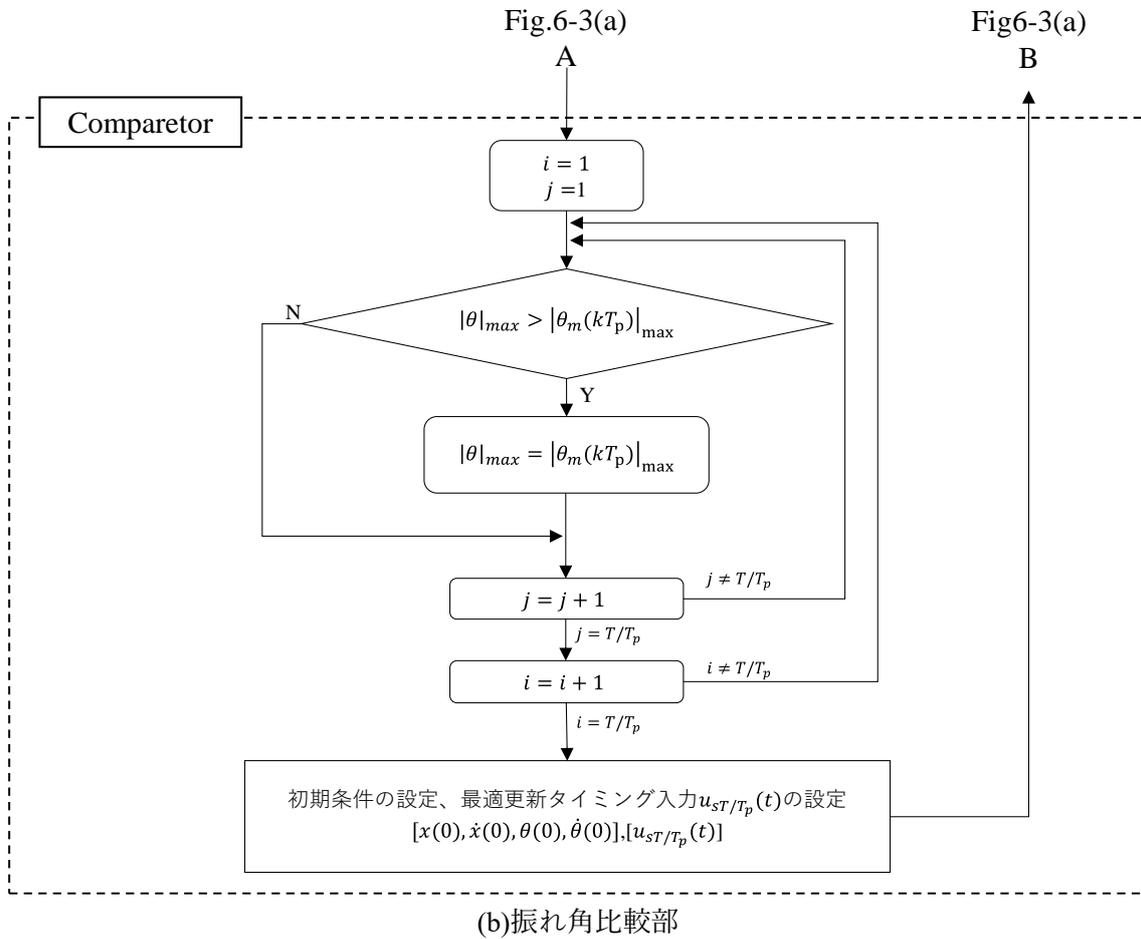
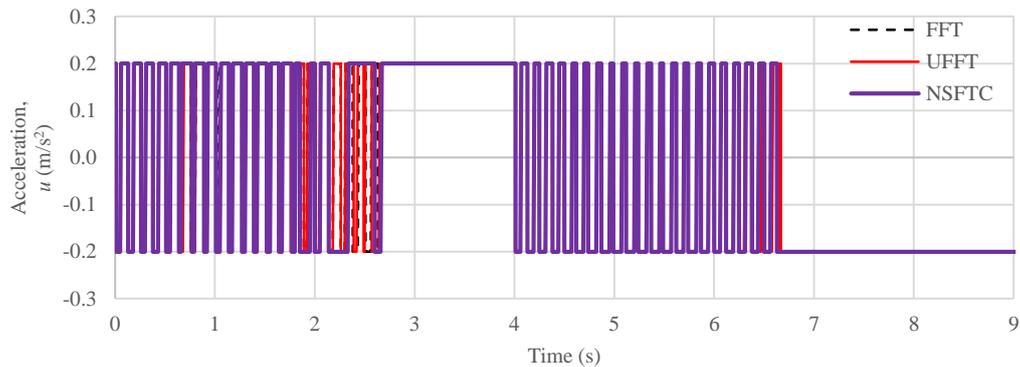


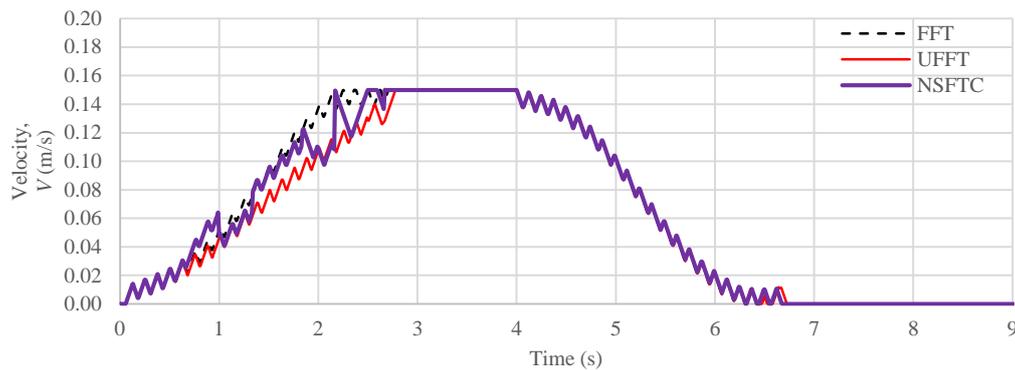
Fig. 6-3 NSFTC フローチャート

## 6.2 シミュレーション

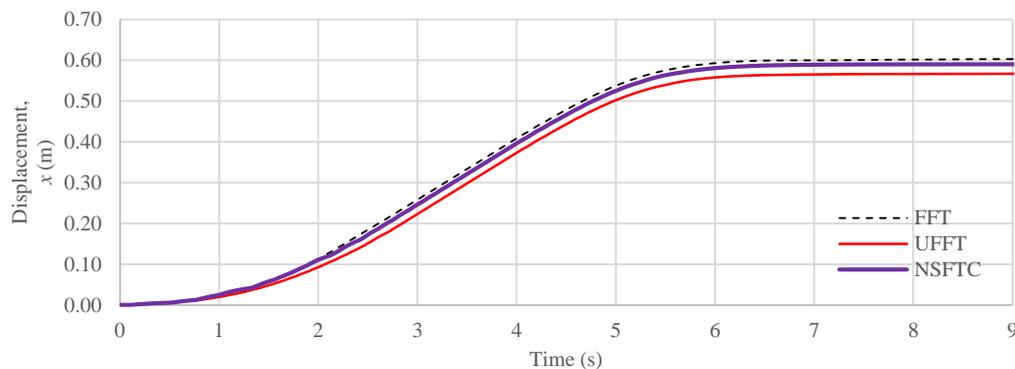
UFFT の搬送実験で最も制振できた条件である PWM 周波数  $8\text{Hz}$ 、更新周波数  $6\text{Hz}$  において、NSFTC でさらなる制振性能の向上を試みる。搬送条件は、UFFT と同様とし、制御入力  
の導出アルゴリズムのみを変更してシミュレーションした結果を Fig. 6-4 に示す。



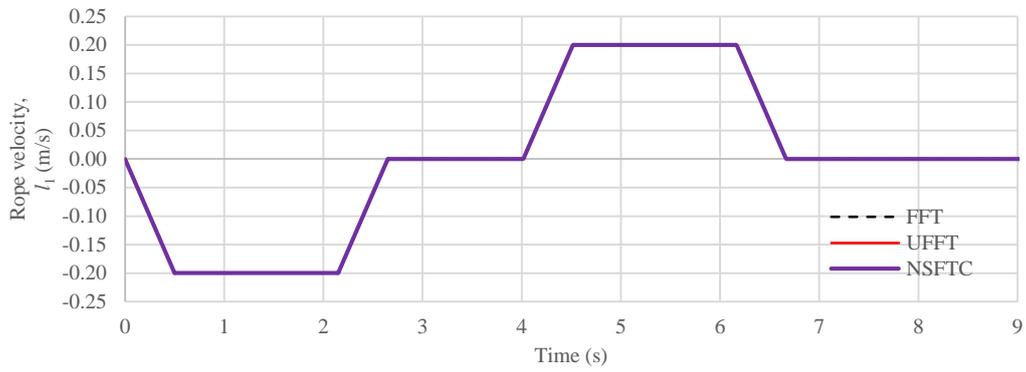
(a) トロリ加速度



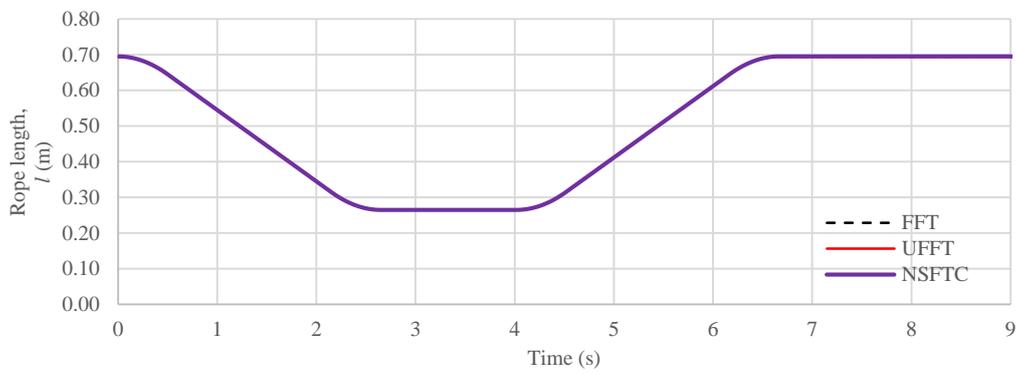
(b) トロリ速度



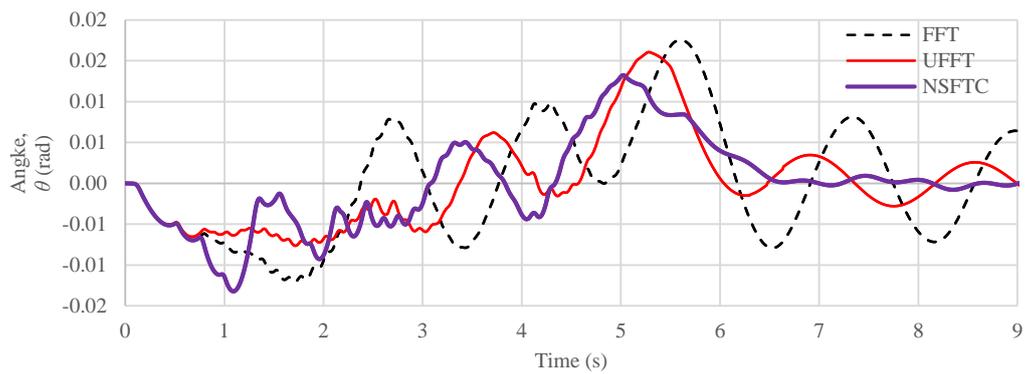
(c) トロリ位置



(d) ロープ速度



(e) ロープ長



(f) 振れ角

Fig. 6-4 NSFTC のシミュレーション結果

Fig. 6-4 より，FFT 法，UFFT 法よりさらに振れが止まっていることがわかる．PWM 周波数ならびに更新周波数が高く取れる場合は，UFFT 法で十分制振できるため，計算負荷の大きい NSFTC 法を選択する必要はないが，今回シミュレーションした更新  $6\text{Hz}$  の場合は，更新回数が比較的少ないことから，NSFTC 法による制振性能の向上がより明確となっている．その理由として，UFFT 法が  $nT_p$  と  $(n+1)T_p$  の隣接するステップにおける振れ角比較では振れが悪化すると判断し適用しなかったステップを NSFTC で選択して，次ステップ以降で良化するパターンが存在したためと考えられる．そこで，NSFTC 法の制振性能向上に関する考察を確かめるため，更新周波数  $2\text{Hz}$  で得られるすべての制御入力を入力更新有無に関わらず記録して，振れ角変化を重ね合わせた結果を Fig. 6-5 に示す．図中凡例の破線は，振れ角比較によって，制振性能が悪化すると判断して更新を行わなかった場合の振れ角を示している．緑実線は FFT 法による振れ角を示している．赤実線は UFFT 法による振れ角を示している．今回の確認シミュレーションでは， $0.5\text{s}$  で UFFT 法による更新が行われ，残留振れの抑制が可能と判断して制御入力を更新し，FFT と比較して制御性能が良化していることが確認できる．紫実線は NSFTC 法による振れ角を示している．更新周波数ごとに境界条件を変更して，破線を含めすべての制御入力の中で最も残留振れが抑制できるパターンを探索している．波形の枝分かかれ方から，UFFT の 1 回目の制御入力更新が  $0.5\text{s}$  であるのに対して，NSFTC 法では  $1.5\text{s}$  となっている．これは前述の考察の通り，UFFT 法の隣接ステップでの比較タイミング以降で，より制振が可能な境界条件が存在し，NSFTC 法ではその境界条件を含め探索できていると考えられる．したがって，NSFTC 法は UFFT 法と同等以上の制振性能をもつアルゴリズムであるといえる．

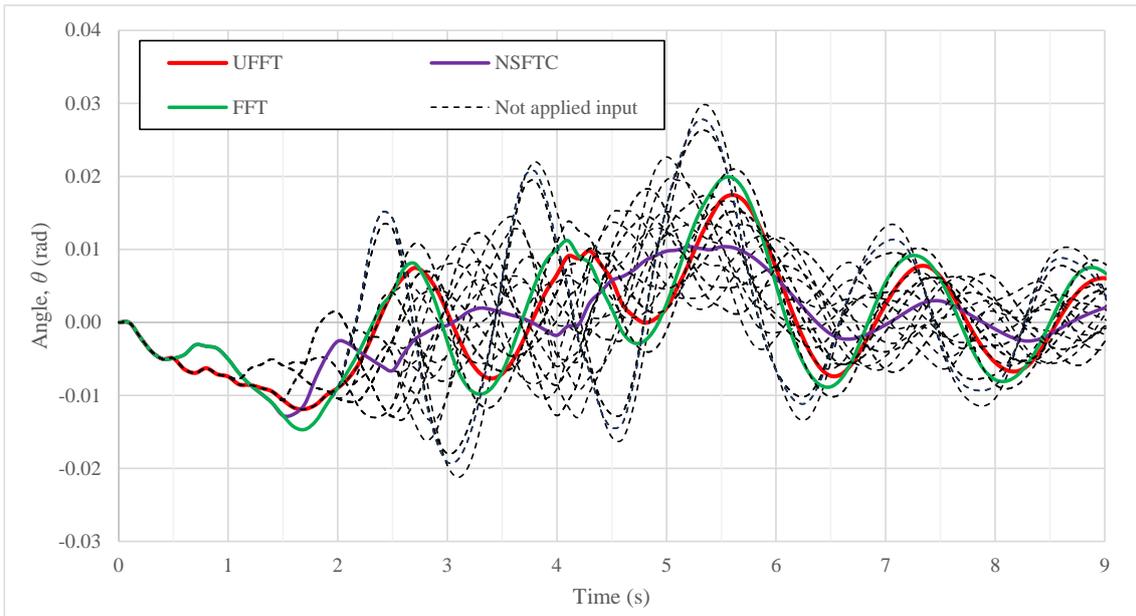


Fig. 6-5 制御入力更新に伴う振れ角変化(更新周波数=2Hz)

## 第7章

おわりに

# 第7章

## おわりに

本研究では、駆動系に制約を持つクレーンシステムに対する FF 制御入力生成法を提案した。提案手法は、FFT 法と PWM 制御を組み合わせ、残留振れを低減するために FF 制御入力を反復計算するものである。トロリの加速度が一定という制約があり、かつそれを早く切り替えできないクレーンシステムに対して適用可能な FF 制振制御法として、従来の FFT 法を PWM 近似して適用すると、近似誤差と量子化誤差によって制振性能を発揮できない。一方で、今回提案した UFFT 法と NSFTC 法は、数式モデルと実装モデルの間で、ロープ質量や摩擦などの誤差があり、加えて PWM 周波数が低く近似誤差が発生する場合でも、これらを考慮した上で最適な制振制御入力を導出できる。また、最適な FF 制御入力を探索的に導出できることも新たな提案であり、制約を持つクレーンシステムとの相性が良い。シミュレーションおよび実験により、提案手法によって生成された FF 制御入力は、FF 制御入力の導出過程で発生するモデル化誤差や、制御入力を PWM 制御入力に離散化する際に発生する量子化誤差の影響を低減できることを確認した。また、提案手法は、制御装置の制御入力切り替え周波数が高くなくても、残留振れを抑制できる制御入力を探索できることを実験的に確認した。さらに、質量を変化させた場合でも、残留振れの変化が小さいロバストな制御条件を探索することが可能であることを示した。本研究の手法は駆動システムに制約のあるクレーンシステムにおいて、制振搬送が実現できる制御入力を探索することができる。この信号は単なる on/off 信号であるため、この信号で現実のクレーンシステムを制御することは非常に簡単である。クレーンが PLC のようなコントローラにより制御されている場合には、PLC からクレーンの速度制御器に on/off 信号を送ることにより制振搬送が実現できる。また、クレーンが機械的な on/off スイッチにより制御されている場合には、スイッチを押すことができるアクチュエータを取り付け、このアクチュエータを PLC により制御すれば同様に制振搬送が実現できる。UFFT 法ならびに NSFTC 法は最適な制御条件を探索するために、実験を繰り返す必要があるが、制御器の周波数特性、吊り荷の質量変動なども考慮した制御入力を求めることができる。一方、今回我々が提案した手法は、トロリ応答や走行レールの歪みおよび段差などの再現性のある外乱は考慮しているが、搬送開始時や搬送中に吊り荷に加えられる突風などの外乱は想定していないため、これらが生じると、制振性能が低下する。この点に対しては、本手法と FB 制御を組み合わせた手法などを検討したい。また、今後は本手法と機械学習を組み合わせることにより、最適な更新周波数と PWM 周波数を自動探索することも検討している。

## 謝辞

本研究の遂行と本論文の作成にあたり、以下に謝意を表します。全体を通して終始懇切なるご助言とご指導を頂いた、主査 室蘭工業大学 梶原秀一 博士に、心より深く感謝の意を表しますとともに、ここに厚く御礼申し上げます。論文のまとめにあたって、ご教示とご助言を賜りました、副査 室蘭工業大学 青柳学 博士、ならびに副査 室蘭工業大学 花島直彦 博士に心より深く感謝を申し上げます。次に、本研究の遂行にあたり、室蘭工業大学の学生として実験にご協力頂いた伊藤億音 氏、石垣椎大 氏、荒川尚輝 氏に感謝の意を表します。次に、本研究の基点となった産学連携共同研究に関して、遂行にあたり数多くのご助言とご協力を頂いた、中村明海 氏、馬場誠 氏、藤森達之 氏、福家英晃 氏、冨増悠二 氏、宮川誠伍 氏に感謝申し上げます。次に、社会人での大学院通学に関して、多大なるご高配を賜りました、氏家義太郎 氏、篠原光範 氏、梅津祐司 氏、田中勉 氏、百成睦 氏、本間清大 氏に心より感謝を申し上げます。最後に、社会人と大学での研究を両立させるにあたり、妻美知子の寛大な心配りに感謝します。このように、本論文は多くの方々のご指導、ご鞭撻、ご協力によってなされたものであり、ここに改めて深くお礼申し上げます。

## 参考文献等

- [1] A. Rahman, A. H. Nayfeh and Z. N. Masoud, “Dynamics and Control of Cranes: A Review,” *J. Vib. Control*, Vol. 9(7), pp. 863-908, July 2003.
- [2] L. Ramli, Z. Mohamed, A. M. Abdullahi, H. I. Jaafar and I. M. Lazim, “Control strategies for crane systems: A comprehensive review,” *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 95, pp. 1–23, 2017.
- [3] J. Smoczek and J. Szpytko, “Evolutionary algorithm – based design of a fuzzy TBF predictive model and TSK fuzzy anti – sway crane control system,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, Vol. 28, pp. 190-200, 2014.
- [4] J. Smoczek and J. Szpytko, “The neuro-fuzzy adaptive anti-sway crane control system,” in *Proc. Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Transportation Systems*, Redondo Beach, CA, USA, Sep. 2-4, 2009.
- [5] J. Smoczek, “Fuzzy crane control with sensorless payload deflection feedback for vibration reduction,” *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 46, pp.70-81,2014.
- [6] D. Qian, S. Tong and S. Lee, “Fuzzy–Logic-based control of payloads subjected to double–pendulum motion in overhead cranes,” *Autom. Constr.*, Vol. 65, pp. 133-143, 2016.
- [7] L. Wang, H. Zhang and Z. Kong, “Anti-swing control of overhead crane based on double fuzzy controllers,” in *Proc. The 27th Chinese Control and Decision Conference*, 2015, pp. 981-986.
- [8] R. Arvin, M. Solihin, F. Heltha, R. Tan and A. Ammar, “Modeling and control design for rotary crane system using MATLAB Simscape Toolbox,” in *Proc. IEEE 5th Control and System Graduate Research Colloquium*, 2014, pp. 170-175.
- [9] M. Ahmad, A. Nasir, M. Najib and H. Ishak, “Anti-sway techniques in feedback control loop of a gantry crane system A comparative assessment of PD and PD-type fuzzy logic controller,” in *Proc. 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2009, pp. 2483-2487.
- [10] T. Wu, M. Karkoub, W. Yu, C. Chen, M. Her and K. Wu, “Anti-sway tracking control of tower cranes with delayed uncertainty using arobust adaptive fuzzy control,” *Fuzzy Sets Syst.*, Vol. 290, pp. 118-137, 2016.
- [11] M. Zhang, Y. Zhang, H. Chen and X. Cheng, “Model-independent PD-SMC method with payload swing suppression for 3D overhead crane systems,” *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 129, pp. 381-393, 2019.

- [12] X. He, W. He, J. Shi and C. Sun, "Boundary Vibration Control of Variable Length Crane Systems in Two-Dimensional Space With Output Constraints," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, Vol. 22, no. 5, pp. 1952-1962, Oct. 2017.
- [13] W. He and S. S. Ge, "Cooperative control of a nonuniform gantry crane with constrained tension," *Automatica*, Vol. 66, pp. 146-154, 2016.
- [14] J. Neupert, E. Arnold, K. Schneider and O. Sawodny, "Tracking and anti-sway control for boom cranes," *Control Eng. Pract.*, Vol. 18, Issue 1, pp. 31-44, Jan. 2010.
- [15] V. Helma and M. Goubelj, "Active anti-sway crane control using partial state feedback from inertial sensor," in *Proc. 23rd International Conference on Process Control (PC)*, 2021, pp. 137-142.
- [16] J. Kalmari, H. Hyyti and A. Visala, "Sway Estimation using Inertial Measurement Units for Cranes with a Rotating Tool," *IFAC Proc. Volumes*, Vol. 46, Issue 10, pp. 274-279, 2013.
- [17] K. Sorensen, H. Fisch, S. Dickerson, W. Singhose and U. Glauser, "A Multi-Operational-Mode Anti-Sway and Positioning Control for an Industrial Bridge Crane," *IFAC Proc. Volumes*, Vol. 41, Issue 2, pp. 881-888, 2008.
- [18] Q. Wu, X. Wang, L. Hua and G. Wei, "The real-time vision measurement of multi-information of the bridge crane's workspace and its application," *Measurement*, Vol. 151, pp. 107207, 2020.
- [19] S. Won, S. Kim, S. Choi and C. Choi, "POSCO YARD CRANE AUTOMATION," in *Proc. 16th Triennial World Congress*, Prague, Czech Republic, 2005, Vol. 38, Issue 1, pp. 286-291.
- [20] U. Schaper, C. Sagert, O. Sawodny and K. Schneider, "A load position observer for cranes with gyroscope measurements," in *Proc. Proceedings of the 18th World Congress The IFAC*, Milano, Italy, 2011, Vol. 44, Issue 1, pp. 3563-3568.
- [21] J. Yang and S. Shen, "Novel Approach for Adaptive Tracking Control of a 3-D Overhead Crane System," *J. Intell. Robot Syst.*, Vol. 62, pp. 59-80, 2011.
- [22] V. La and K. Nguyen, "Combination of input shaping and radial spring-damper to reduce tridirectional vibration of crane payload," *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 116, pp. 310-321, 2019.
- [23] D. Kim, Y. Kim, J. Jang and G. Zhai, "Gain-scheduling approach to mass damper type anti-sway system design," *IFAC Proc. Volumes*, Vol. 16, pp. 263-268, 2005.
- [24] M. Ermidoro, A. Cologni, S. Formentin and F. Previdi, "Fixed-order gain-scheduling anti-sway control of overhead bridge cranes," *Mechatronics*, Vol. 39, pp. 237-247, 2016.

- [25] T. Wang, N. Tan, C. Zhou, C. Zhang and Y. Zhi, “A Novel Anti-Swing Positioning Controller for Two Dimensional Bridge Crane via Dynamic Sliding Mode Variable Structure,” *Procedia Comput. Sci.*, Vol. 131, pp. 626-632, 2018.
- [26] V. Le, H. Le, L. Nguyen and M. Phan, “An Efficient Adaptive Hierarchical Sliding Mode Control Strategy Using Neural Networks for 3D Overhead Cranes,” *Int. J. Autom. Comput.*, Vol. 16, pp. 614–627, 2019.
- [27] G. Tallman and O. Smith, “Analog study of dead-beat posicast control,” *IRE Transactions on Automatic Control*, Vol. 4, No. 1, pp. 14-21, March 1958.
- [28] N. Singer and W. Seering, “Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration,” *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, Vol. 112(1), pp. 76-82, March 1990.
- [29] A. Abe, “A Study on the Robust Feedforward Control for a Rotary Crane,” *The Japanese Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers*, Vol. 6, pp. 9-16, 2018.
- [30] A. Abe, “Open-Loop Control for Overhead Cranes with Load Hoisting by Using Soft Computing,” *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Series C, Vol. 77, Issue 778, pp.2201-2210, 2011.
- [31] L. Ramli, Z. Mohamed, H. Jaafar, “A neural network-based input shaping for swing suppression of an overhead crane under payload hoisting and mass variations,” *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 107, pp. 484-501, 2018.
- [32] L. Ramli, Z. Mohamed, M. Efe, I. Lazim, H. Jaafar, “Efficient swing control of an overhead crane with simultaneous payload hoisting and external disturbances,” *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 135, 106326, 2020.
- [33] L. Rincon, Y. Kubota, G. Venture and Y. Tagawa, “Inverse dynamic control via “simulation of feedback control” by artificial neural networks for a crane system,” *Control. Eng. Pract.*, Vol. 94,104203, 2020.
- [34] K. Kurihara, T. Kondou, H. Mori, K. Matsuzaki and N. Sowa, “Vibration control of an overhead crane by elimination of the natural frequency component (Application to the system with uncertainty in natural frequency),” *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 84, Issue 868, p. 18-00274, 2018.
- [35] Z. Feng, J. Yang and E. Shao, “Anti-Sway Control of Underactuated Cranes Using Linear Quadratic Regulator and Extended State Observer Techniques,” in *Proc. Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2020, pp. 2893-2898.
- [36] T. Miyoshi, K. Terashima and M. Morita, “Study of Feedforward Control Input without Residual Vibration for the Time-Variant Vibration Mechanism and Its Application to the Crane System,” *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Series C, Vol. 64, Issue 624, pp. 2859-2866, 1998.

- [37] M. Maghsoudi, Z. Mohamed, S. Sudin, S. Buyamin, H. Jaafar and S. Ahmad, “An improved input shaping design for an efficient sway control of a nonlinear 3D overhead crane with friction,” *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 92, pp. 364–378, 2017.
- [38] A. Abdullahi, Z. Mohamed, H. Selamat, H. Pota, M. Abidin, F. Ismail and A. Haruna, “Adaptive output-based command shaping for sway control of a 3D overhead crane with payload hoisting and wind disturbance,” *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 98, pp. 157–172, 2018.
- [39] H. Moradi and G. Vossoughi, “State estimation, positioning and anti-swing robust control of traveling crane-lifter system,” *Appl. Math. Model.*, Vol. 39, Issue 22, pp. 6990-7007, 2015.
- [40] J. Huang, Z. Liang and Q. Zang, “Dynamics and swing control of double-pendulum bridge cranes with distributed-mass beams,” *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 54–55, pp. 357-366, 2015.
- [41] H. Jaafar, Z. Mohamed, L. Ramli and A. Abdullahi, “Vibration Control of a Nonlinear Double-Pendulum Overhead Crane Using Feedforward Command Shaping,” in *Proc. IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC)*, 2018, pp. 118-122.
- [42] M. Maghsoudi, L. Ramli, S. Sudin, Z. Mohamed, A. Husain and H. Wahid, “Improved unity magnitude input shaping scheme for sway control of an underactuated 3D overhead crane with hoisting,” *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 123, pp. 466-482, 2019.
- [43] H. Ouyang, Z. Tian, L. Yu and G. Zhang, “Load swing rejection for double-pendulum tower cranes using energy-shaping-based control with actuator output limitation,” *ISA Trans.*, Vol. 101, pp. 246-255, 2020.
- [44] K. Sorensen, W. Singhose and S. Dickerson, “A CONTROLLER ENABLING PRECISE POSITIONING AND SWAY REDUCTION IN CRANES WITH ON-OFF ACTUATION,” *IFAC Proc. Volumes*, Vol. 38, Issue 1, pp. 580-585, 2005.
- [45] D. Greenwood, “Advanced Dynamics,” *Cambridge University Press*, 2003, pp.73-84.
- [46] FUJI Electric Co., Ltd., “Module List,” FUJI Electric Global, <[https://www.fujielectric.com/products/plc/product\\_information/](https://www.fujielectric.com/products/plc/product_information/)>, (Browse:2022/6/23).
- [47] MIS Corp., “sBOXII,” <[https://www.mttis.co.jp/items/model\\_base\\_design/s-box2/](https://www.mttis.co.jp/items/model_base_design/s-box2/)>, (Browse: 2022/6/23).
- [48] Cytron Technologies, “SmartDriveDuo,” <<https://www.cytron.io/p-30amp-7v-35v-smartdrive-dc-motor-driver-2-channels?search=smartdriveduo>>, (Browse:2022/6/23).
- [49] TSUKASA ELECTRIC CO. LTD., “Motor,” <[https://www.tsukasa-d.co.jp/en/en\\_motor/](https://www.tsukasa-d.co.jp/en/en_motor/)>, (Browse:2022/6/23).

[50] Autonics Corp., “E40HB6-2000-3-N-5,” <<https://www.autonics.com/model/A2500005378>>, (Browse:2022/6/23).

[51] HTC Corp., “SteamVR Base Station 2.0,” <<https://www.vive.com/us/accessory/base-station2/>>, (Browse:2022/6/23)

# 付録

## 付録 1

### UFFT 制御入力式の導出

3.3 で示したアルゴリズムに基づいて, UFFT の制御入力式を導出する.  $nT_p$ ごとに制御入力を導出する際, 初期条件および終端条件を任意に変更する必要がある. そこで(12)および(13)の条件を変更して,

$$\begin{pmatrix} x(T_0) \\ \theta(T_0) \\ \dot{x}(T_0) \\ \dot{\theta}(T_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{T_0} \\ \theta_{T_0} \\ V_{T_0} \\ \omega_{T_0} \end{pmatrix} \quad (53)$$

$$\begin{pmatrix} x(T) \\ \theta(T) \\ \dot{x}(T) \\ \dot{\theta}(T) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_T \\ \theta_T \\ V_T \\ \omega_T \end{pmatrix} \quad (54)$$

とおく. UFFT 制御入力を,

$$u'(t) = \sum_{k=0}^6 u'_k t^k \quad (55)$$

おき, 2.1 と同様に解くと,  $u'_k$ は以下のようになる.

$$u'_0 = \frac{\begin{aligned} &11760 l_0^2 l_2 \theta_{T_0} - 5880 g l_0^2 \theta_{T_0} - 7 g^3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 - 5880 X_0 g l_0 \\ &+ 5880 X_T g l_0 + 11760 X_0 l_0 l_2 - 11760 X_T l_0 l_2 + 12600 V_0 l_0 l_3 (T - T_0)^2 \\ &+ 7560 V_T l_0 l_3 (T - T_0)^2 - 3360 g l_0^2 \omega_{T_0} (T - T_0) + 6720 l_0^2 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0) \\ &+ 20160 l_0^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0) + 112 g^2 l_0 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 - 14 g^2 l_1 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 \\ &+ 840 g^2 l_0 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 - 28 g l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 + 28 g^2 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 \\ &+ 42 g^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 - 54 g l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^6 + 448 l_0 l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 \\ &+ 12600 l_0^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 - 56 l_1 l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 + 720 l_0 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\ &- 108 l_1 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 + 3360 l_0 l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 3600 l_0 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 \\ &- 3360 V_0 g l_0 (T - T_0) - 2520 V_T g l_0 (T - T_0) + 6720 V_0 l_0 l_2 (T - T_0) \\ &+ 5040 V_T l_0 l_2 (T - T_0) + 20160 X_0 l_0 l_3 (T - T_0) - 20160 X_T l_0 l_3 (T - T_0) \\ &- 3360 g l_0 l_1 \theta_{T_0} (T - T_0) + 6720 l_0 l_1 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0) - 448 g l_0 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 \\ &- 630 g l_0 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 + 56 g l_1 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 + 84 g l_1 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\ &- 3360 g l_0 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 - 4200 g l_0 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 - 84 g l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 \\ &+ 1260 l_0 l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 - 168 l_1 l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 + 12600 l_0 l_1 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 \\ &+ 8400 l_0 l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \end{aligned}}{(T - T_0)^4 (7 g^2 - 28 g l_2 + 28 l_2^2 + 54 l_3^2 (T - T_0)^2 - 42 g l_3 (T - T_0) + 84 l_2 l_3 (T - T_0))} \quad (56)$$

$$\begin{aligned}
& 141120 l_0^2 l_2 \theta_{T_0} - 70560 g l_0^2 \theta_{T_0} + 7 g^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 + 112 l_2^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& - 70560 X_0 g l_0 + 70560 X_T g l_0 + 141120 X_0 l_0 l_2 - 141120 X_T l_0 l_2 \\
& + 10080 V_0 g l_1 (T - T_0)^2 + 7560 V_T g l_1 (T - T_0)^2 + 136080 V_0 l_0 l_3 (T - T_0)^2 \\
& - 20160 V_0 l_1 l_2 (T - T_0)^2 - 37800 V_0 l_1 l_3 (T - T_0)^3 + 90720 V_T l_0 l_3 (T - T_0)^2 \\
& - 15120 V_T l_1 l_2 (T - T_0)^2 - 22680 V_T l_1 l_3 (T - T_0)^3 - 60480 X_0 l_1 l_3 (T - T_0)^2 \\
& + 60480 X_T l_1 l_3 (T - T_0)^2 - 37800 g l_0^2 \omega_{T_0} (T - T_0) + 75600 l_0^2 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0) \\
& + 226800 l_0^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0) + 840 g^2 l_0 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 - 336 g^2 l_1 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& - 84 g l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 - 42 g^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 + 54 g l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^7 \\
& + 8400 g^2 l_0 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 10080 g l_1^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 - 2520 g^2 l_1 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& + 3360 l_0 l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 + 136080 l_0^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 - 1344 l_1 l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& + 4860 l_0 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 - 2160 l_1 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 + 336 l_2^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 \\
& + 216 l_2 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^7 + 33600 l_0 l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 - 20160 l_1^2 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& - 10080 l_1 l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 + 32400 l_0 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 - 37800 l_1^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& - 10800 l_1 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 - 37800 V_0 g l_0 (T - T_0) - 32760 V_T g l_0 (T - T_0) \\
& + 17640 X_0 g l_1 (T - T_0) - 17640 X_T g l_1 (T - T_0) + 75600 V_0 l_0 l_2 (T - T_0) \\
& + 65520 V_T l_0 l_2 (T - T_0) + 226800 X_0 l_0 l_3 (T - T_0) - 35280 X_0 l_1 l_2 (T - T_0) \\
& - 226800 X_T l_0 l_3 (T - T_0) + 35280 X_T l_1 l_2 (T - T_0) - 20160 g l_0 l_1 \theta_{T_0} (T - T_0) \\
& + 40320 l_0 l_1 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0) + 10080 g l_0 l_1 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 - 3360 g l_0 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& - 4536 g l_0 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 + 1344 g l_1 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 + 1890 g l_1 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& - 84 g l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 - 33600 g l_0 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 - 40320 g l_0 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& + 10080 g l_1 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 + 12600 g l_1 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 - 20160 l_0 l_1 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& - 37800 l_0 l_1 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 + 9072 l_0 l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 - 3780 l_1 l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& + 75600 l_0 l_1 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 80640 l_0 l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 - 25200 l_1 l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 \\
u'_1 = & - \frac{\text{above terms}}{(T - T_0)^5 (7 g^2 - 28 g l_2 + 28 l_2^2 + 54 l_3^2 (T - T_0)^2 - 42 g l_3 (T - T_0) + 84 l_2 l_3 (T - T_0))}
\end{aligned} \tag{57}$$

$$\begin{aligned}
& 352800 l_0^2 l_2 \theta_{T_0} - 176400 g l_0^2 \theta_{T_0} - 1680 V_0 g^2 (T - T_0)^3 - 1260 V_T g^2 (T - T_0)^3 \\
& \quad - 2940 X_0 g^2 (T - T_0)^2 + 2940 X_T g^2 (T - T_0)^2 + 33600 V_0 l_2^2 (T - T_0)^3 \\
& \quad + 25200 V_T l_2^2 (T - T_0)^3 + 58800 X_0 l_2^2 (T - T_0)^2 - 58800 X_T l_2^2 (T - T_0)^2 \\
& \quad + 56 g^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 + 420 g^3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 + 2240 l_2^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& \quad - 324 l_3^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^8 + 16800 l_2^3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 - 176400 X_0 g l_0 + 176400 X_T g l_0 \\
& + 352800 X_0 l_0 l_2 - 352800 X_T l_0 l_2 + 75600 V_0 g l_1 (T - T_0)^2 - 13440 V_0 g l_2 (T - T_0)^3 \\
& \quad + 6300 V_0 g l_3 (T - T_0)^4 + 65520 V_T g l_1 (T - T_0)^2 - 10080 V_T g l_2 (T - T_0)^3 \\
& \quad + 3780 V_T g l_3 (T - T_0)^4 - 23520 X_0 g l_2 (T - T_0)^2 + 10080 X_0 g l_3 (T - T_0)^3 \\
& \quad + 23520 X_T g l_2 (T - T_0)^2 - 10080 X_T g l_3 (T - T_0)^3 + 317520 V_0 l_0 l_3 (T - T_0)^2 \\
& \quad - 151200 V_0 l_1 l_2 (T - T_0)^2 - 272160 V_0 l_1 l_3 (T - T_0)^3 + 63000 V_0 l_2 l_3 (T - T_0)^4 \\
& \quad + 226800 V_T l_0 l_3 (T - T_0)^2 - 131040 V_T l_1 l_2 (T - T_0)^2 - 181440 V_T l_1 l_3 (T - T_0)^3 \\
& \quad + 37800 V_T l_2 l_3 (T - T_0)^4 - 453600 X_0 l_1 l_3 (T - T_0)^2 + 100800 X_0 l_2 l_3 (T - T_0)^3 \\
& \quad + 453600 X_T l_1 l_3 (T - T_0)^2 - 100800 X_T l_2 l_3 (T - T_0)^3 - 90720 g l_0^2 \omega_{T_0} (T - T_0) \\
& \quad + 181440 l_0^2 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0) + 544320 l_0^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0) - 1680 g^2 l_1 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& \quad - 2016 g l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 + 336 g^2 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 - 357 g^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 \\
& \quad + 612 g l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^7 + 15960 g^2 l_0 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 75600 g l_1^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& \quad - 18480 g^2 l_1 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 - 15120 g l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 + 2520 g^2 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& \quad - 2100 g^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 + 1800 g l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^6 + 40320 l_0 l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& \quad + 317520 l_0^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 - 6720 l_1 l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 + 9072 l_0 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& \quad - 9720 l_1 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 + 6132 l_2^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 + 3096 l_2 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^7 \\
& + 134400 l_0 l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 - 151200 l_1^2 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 - 33600 l_1 l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& \quad + 68040 l_0 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 - 272160 l_1^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 - 64800 l_1 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& \quad + 42000 l_2^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 + 18000 l_2 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^6 - 90720 V_0 g l_0 (T - T_0) \\
& \quad - 85680 V_T g l_0 (T - T_0) + 141120 X_0 g l_1 (T - T_0) - 141120 X_T g l_1 (T - T_0) \\
& \quad + 181440 V_0 l_0 l_2 (T - T_0) + 171360 V_T l_0 l_2 (T - T_0) + 544320 X_0 l_0 l_3 (T - T_0) \\
& \quad - 282240 X_0 l_1 l_2 (T - T_0) - 544320 X_T l_0 l_3 (T - T_0) + 282240 X_T l_1 l_2 (T - T_0) \\
& \quad + 50400 g l_0 l_1 \theta_{T_0} (T - T_0) - 100800 l_0 l_1 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0) + 75600 g l_0 l_1 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& \quad - 20160 g l_0 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 - 2520 g l_0 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 + 6720 g l_1 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& \quad + 9072 g l_1 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 - 2352 g l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 - 99120 g l_0 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& \quad - 78120 g l_0 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 + 53760 g l_1 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 + 86940 g l_1 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& \quad - 16800 g l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 - 151200 l_0 l_1 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 - 272160 l_0 l_1 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& \quad + 80640 l_0 l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 - 18144 l_1 l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 - 136080 l_0 l_1 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& \quad + 277200 l_0 l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 - 98280 l_1 l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 \\
u'_2 = & \frac{\text{above terms}}{(T - T_0)^6 (7 g^2 - 28 g l_2 + 28 l_2^2 + 54 l_3^2 (T - T_0)^2 - 42 g l_3 (T - T_0) + 84 l_2 l_3 (T - T_0))}
\end{aligned} \tag{58}$$

$$\begin{aligned}
& \left( \begin{aligned}
& 11760 l_0^2 l_2 \theta_{T_0} - 5880 g l_0^2 \theta_{T_0} - 315 V_0 g^2 (T - T_0)^3 - 273 V_T g^2 (T - T_0)^3 \\
& - 588 X_0 g^2 (T - T_0)^2 + 588 X_T g^2 (T - T_0)^2 + 11340 V_0 l_2^2 (T - T_0)^3 \\
& - 4410 V_0 l_3^2 (T - T_0)^5 + 9828 V_T l_2^2 (T - T_0)^3 - 2646 V_T l_3^2 (T - T_0)^5 \\
& + 21168 X_0 l_2^2 (T - T_0)^2 - 7056 X_0 l_3^2 (T - T_0)^4 - 21168 X_T l_2^2 (T - T_0)^2 \\
& + 7056 X_T l_3^2 (T - T_0)^4 + 7 g^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 + 70 g^3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 + 504 l_2^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& - 252 l_3^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^8 + 5040 l_2^3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 - 1260 l_3^3 \theta_{T_0} (T - T_0)^7 - 5880 X_0 g l_0 \\
& + 5880 X_T g l_0 + 11760 X_0 l_0 l_2 - 11760 X_T l_0 l_2 + 7560 V_0 g l_1 (T - T_0)^2 \\
& - 5040 V_0 g l_2 (T - T_0)^3 + 2310 V_0 g l_3 (T - T_0)^4 + 7140 V_T g l_1 (T - T_0)^2 \\
& - 4368 V_T g l_2 (T - T_0)^3 + 1638 V_T g l_3 (T - T_0)^4 - 9408 X_0 g l_2 (T - T_0)^2 \\
& + 3948 X_0 g l_3 (T - T_0)^3 + 9408 X_T g l_2 (T - T_0)^2 - 3948 X_T g l_3 (T - T_0)^3 \\
& + 10080 V_0 l_0 l_3 (T - T_0)^2 - 15120 V_0 l_1 l_2 (T - T_0)^2 - 26460 V_0 l_1 l_3 (T - T_0)^3 \\
& + 18060 V_0 l_2 l_3 (T - T_0)^4 + 7560 V_T l_0 l_3 (T - T_0)^2 - 14280 V_T l_1 l_2 (T - T_0)^2 \\
& - 18900 V_T l_1 l_3 (T - T_0)^3 + 11844 V_T l_2 l_3 (T - T_0)^4 - 45360 X_0 l_1 l_3 (T - T_0)^2 \\
& + 29904 X_0 l_2 l_3 (T - T_0)^3 + 45360 X_T l_1 l_3 (T - T_0)^2 - 29904 X_T l_2 l_3 (T - T_0)^3 \\
& - 2940 g l_0^2 \omega_{T_0} (T - T_0) + 5880 l_0^2 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0) + 17640 l_0^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0) \\
& - 266 g^2 l_0 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 - 140 g^2 l_1 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 - 476 g l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& + 98 g^2 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 - 77 g^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 + 261 g l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^7 \\
& + 7560 g l_1^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 - 1890 g^2 l_1 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 - 4760 g l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& + 980 g^2 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 - 630 g^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 + 1740 g l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^6 \\
& + 11536 l_0 l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 + 10080 l_0^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 - 560 l_1 l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& - 4158 l_0 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 - 756 l_1 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 + 1204 l_2^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 \\
& + 288 l_2 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^7 + 23520 l_0 l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 - 15120 l_1^2 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& + 5040 l_1 l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 - 5040 l_0 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 - 26460 l_1^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& - 10080 l_1 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 + 10920 l_2^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 + 1920 l_2 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^6 \\
& - 2940 V_0 g l_0 (T - T_0) - 2940 V_T g l_0 (T - T_0) + 14700 X_0 g l_1 (T - T_0) \\
& - 14700 X_T g l_1 (T - T_0) + 5880 V_0 l_0 l_2 (T - T_0) + 5880 V_T l_0 l_2 (T - T_0) \\
& + 17640 X_0 l_0 l_3 (T - T_0) - 29400 X_0 l_1 l_2 (T - T_0) - 17640 X_T l_0 l_3 (T - T_0) \\
& + 29400 X_T l_1 l_2 (T - T_0) + 11760 g l_0 l_1 \theta_{T_0} (T - T_0) - 23520 l_0 l_1 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0) \\
& + 7560 g l_0 l_1 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 - 5236 g l_0 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 + 2058 g l_0 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& + 560 g l_1 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 + 735 g l_1 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 - 448 g l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 \\
& - 11760 g l_0 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 1260 g l_0 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 + 1260 g l_1 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& + 9660 g l_1 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 - 4200 g l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 - 15120 l_0 l_1 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& - 26460 l_0 l_1 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 + 18564 l_0 l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 - 1470 l_1 l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& - 35280 l_0 l_1 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 35280 l_0 l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 + 3360 l_1 l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4
\end{aligned} \right) \quad (59)
\end{aligned}$$

$$u'_3 = - \frac{20 \left( \text{above expression} \right)}{(T - T_0)^7 (7g^2 - 28gl_2 + 28l_2^2 + 54l_3^2(T - T_0)^2 - 42gl_3(T - T_0) + 84l_2l_3(T - T_0))}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& 1512 V_0 g^2 (T - T_0)^2 + 1428 V_T g^2 (T - T_0)^2 - 84672 V_0 l_2^2 (T - T_0)^2 + 108864 V_0 l_3^2 (T - T_0)^4 \\
& - 79968 V_T l_2^2 (T - T_0)^2 + 72576 V_T l_3^2 (T - T_0)^4 + 181440 X_0 l_3^2 (T - T_0)^3 \\
& - 181440 X_T l_3^2 (T - T_0)^3 - 28 g^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 - 315 g^3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& - 3136 l_2^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 + 3888 l_3^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^7 - 35280 l_2^3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& + 25920 l_3^3 \theta_{T_0} (T - T_0)^6 - 35280 X_0 g l_1 + 35280 X_T g l_1 + 70560 X_0 l_1 l_2 \\
& - 70560 X_T l_1 l_2 + 2940 X_0 g^2 (T - T_0) - 2940 X_T g^2 (T - T_0) - 164640 X_0 l_2^2 (T - T_0) \\
& + 164640 X_T l_2^2 (T - T_0) - 35280 g l_0 l_1 \theta_{T_0} + 70560 l_0 l_1 l_2 \theta_{T_0} + 39312 V_0 g l_2 (T - T_0)^2 \\
& - 35532 V_0 g l_3 (T - T_0)^3 + 37128 V_T g l_2 (T - T_0)^2 - 29988 V_T g l_3 (T - T_0)^3 \\
& - 65520 X_0 g l_3 (T - T_0)^2 + 65520 X_T g l_3 (T - T_0)^2 + 60480 V_0 l_1 l_3 (T - T_0)^2 \\
& - 87696 V_0 l_2 l_3 (T - T_0)^3 + 45360 V_T l_1 l_3 (T - T_0)^2 - 53424 V_T l_2 l_3 (T - T_0)^3 \\
& - 141120 X_0 l_2 l_3 (T - T_0)^2 + 141120 X_T l_2 l_3 (T - T_0)^2 + 2940 g^2 l_0 \theta_{T_0} (T - T_0) \\
& - 17640 g l_1^2 \theta_{T_0} (T - T_0) - 164640 l_0 l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0) + 35280 l_1^2 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0) \\
& + 1512 g^2 l_0 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 + 294 g^2 l_1 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 + 3024 g l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& - 672 g^2 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 + 819 g^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 - 3780 g l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 \\
& + 5040 g^2 l_1 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 34020 g l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 - 7560 g^2 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& + 8190 g^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 - 33390 g l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 - 84672 l_0 l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& + 1176 l_1 l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 + 108864 l_0 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 + 1512 l_1 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& - 5544 l_2^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 + 3024 l_2 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 - 70560 l_1 l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& + 181440 l_0 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 + 60480 l_1^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 120960 l_1 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& - 55440 l_2^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 + 32760 l_2 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 - 17640 V_0 g l_1 (T - T_0) \\
& - 17640 V_T g l_1 (T - T_0) + 76440 X_0 g l_2 (T - T_0) - 76440 X_T g l_2 (T - T_0) \\
& + 35280 V_0 l_1 l_2 (T - T_0) + 35280 V_T l_1 l_2 (T - T_0) + 105840 X_0 l_1 l_3 (T - T_0) \\
& - 105840 X_T l_1 l_3 (T - T_0) - 17640 g l_0 l_1 \omega_{T_0} (T - T_0) + 76440 g l_0 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0) \\
& + 35280 l_0 l_1 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0) + 105840 l_0 l_1 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0) + 39312 g l_0 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& - 35532 g l_0 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 - 1176 g l_1 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 - 1512 g l_1 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& + 1134 g l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 - 65520 g l_0 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 25200 g l_1 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& - 51660 g l_1 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 + 11340 g l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 + 60480 l_0 l_1 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& - 87696 l_0 l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 + 3024 l_1 l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 - 141120 l_0 l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& - 55440 l_1 l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3
\end{aligned} \right. \quad (60)
\end{aligned}$$

$$u'_4 = - \frac{\text{numerator}}{(T - T_0)^7 (7g^2 - 28gl_2 + 28l_2^2 + 54l_3^2(T - T_0)^2 - 42gl_3(T - T_0) + 84l_2l_3(T - T_0))}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& 840 X_0 g^2 - 840 X_T g^2 - 67200 X_0 l_2^2 + 67200 X_T l_2^2 + 840 g^2 l_0 \theta_{T_0} - 67200 l_0 l_2^2 \theta_{T_0} \\
& + 136080 V_0 l_3^2 (T - T_0)^3 + 97200 V_T l_3^2 (T - T_0)^3 + 233280 X_0 l_3^2 (T - T_0)^2 \\
& - 233280 X_T l_3^2 (T - T_0)^2 - 7 g^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 - 84 g^3 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& - 1120 l_2^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 + 3888 l_3^3 \omega_{T_0} (T - T_0)^6 - 13440 l_2^3 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& + 29160 l_3^3 \theta_{T_0} (T - T_0)^5 + 31920 X_0 g l_2 - 31920 X_T g l_2 + 420 V_0 g^2 (T - T_0) \\
& + 420 V_T g^2 (T - T_0) - 33600 V_0 l_2^2 (T - T_0) - 33600 V_T l_2^2 (T - T_0) + 31920 g l_0 l_2 \theta_{T_0} \\
& - 40320 V_0 g l_3 (T - T_0)^2 - 37800 V_T g l_3 (T - T_0)^2 + 20160 V_0 l_2 l_3 (T - T_0)^2 \\
& + 30240 V_T l_2 l_3 (T - T_0)^2 + 420 g^2 l_0 \omega_{T_0} (T - T_0) + 420 g^2 l_1 \theta_{T_0} (T - T_0) \\
& - 33600 l_0 l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0) - 33600 l_1 l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0) + 1092 g l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& - 252 g^2 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 + 756 g^2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 - 3816 g l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& + 13104 g l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 - 3024 g^2 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 8484 g^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& - 38088 g l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 + 136080 l_0 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 + 6120 l_2 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& + 233280 l_0 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 136080 l_1 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 + 1680 l_2^2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& + 64080 l_2 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 + 15960 V_0 g l_2 (T - T_0) + 15960 V_T g l_2 (T - T_0) \\
& - 78120 X_0 g l_3 (T - T_0) + 78120 X_T g l_3 (T - T_0) + 50400 X_0 l_2 l_3 (T - T_0) \\
& - 50400 X_T l_2 l_3 (T - T_0) + 15960 g l_0 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0) - 78120 g l_0 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0) \\
& + 15960 g l_1 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0) + 50400 l_0 l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0) - 40320 g l_0 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& - 1512 g l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 - 40320 g l_1 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 - 17808 g l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& + 20160 l_0 l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 + 20160 l_1 l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^2
\end{aligned} \right\} \quad (61) \\
u'_5 = \frac{\phantom{7} \left( \phantom{7} \right)}{(T - T_0)^7 (7 g^2 - 28 g l_2 + 28 l_2^2 + 54 l_3^2 (T - T_0)^2 - 42 g l_3 (T - T_0) + 84 l_2 l_3 (T - T_0))}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& 840 X_T g - 840 X_0 g + 1680 X_0 l_2 - 1680 X_T l_2 + 7 g^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 \\
& + 84 g^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 28 l_2^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 + 36 l_3^2 \omega_{T_0} (T - T_0)^5 \\
& + 336 l_2^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 288 l_3^2 \theta_{T_0} (T - T_0)^4 - 420 V_0 g (T - T_0) \\
& - 420 V_T g (T - T_0) + 840 V_0 l_2 (T - T_0) + 840 V_T l_2 (T - T_0) + 2520 X_0 l_3 (T - T_0) \\
& - 2520 X_T l_3 (T - T_0) - 840 g l_0 \theta_{T_0} + 1680 l_0 l_2 \theta_{T_0} + 1440 V_0 l_3 (T - T_0)^2 \\
& + 1080 V_T l_3 (T - T_0)^2 - 420 g l_0 \omega_{T_0} (T - T_0) - 420 g l_1 \theta_{T_0} (T - T_0) \\
& + 840 l_0 l_2 \omega_{T_0} (T - T_0) + 2520 l_0 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0) + 840 l_1 l_2 \theta_{T_0} (T - T_0) \\
& - 28 g l_2 \omega_{T_0} (T - T_0)^3 - 36 g l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 - 336 g l_2 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 \\
& - 384 g l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3 + 1440 l_0 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^2 + 72 l_2 l_3 \omega_{T_0} (T - T_0)^4 \\
& + 1440 l_1 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^2 + 768 l_2 l_3 \theta_{T_0} (T - T_0)^3
\end{aligned} \right\} \quad (62) \\
u'_6 = - \frac{\phantom{350} \left( \phantom{350} \right)}{(T - T_0)^7 (7 g^2 - 28 g l_2 + 28 l_2^2 + 54 l_3^2 (T - T_0)^2 - 42 g l_3 (T - T_0) + 84 l_2 l_3 (T - T_0))}
\end{aligned}$$

Table i に, UFFT の処理手順を示す. UFFT のベースである FFT は, 手順 1~8 となっており, 手順 9 以降が UFFT の処理となっている. 手順 1 でまず, 第 2 章で述べた(28)に境界条件を代入し, 質点モデルベースの FFT 制御入力を導出する. 手順 2 では, 制御入力を PWM 近似して on/off 信号に変換する. 手順 3 では, 剛体シミュレーションのトロリに与える速度入力に変換する. 手順 4 では, MATLAB Simulink Simscape Multibody による多自由度剛体シミュレーションを実行する. 手順 5~8 では, シミュレーション結果を取得するとともに, 振れ角については搬送完了後の残留振れ角を格納する. 以上が FFT の処理手順である. 次に, UFFT の処理手順を述べる. まず, 手順 9 では, 手順 5~8 における  $nT_p$  時点の状態を取得し, これを初期条件とする. 手順 10 では, 手順 9 の初期条件と, 手順 1 の終端条件のまま(55)に代入することで, トロリおよび吊り荷が動いている状態を初期条件とした, 質点モデルベースの制御入力を得る. 次に手順 11~12 では, 手順 2~3 と同様に PWM 近似による on/off 信号への変換とトロリ速度への変換を行っている. 手順 11~12 が手順 2~3 と異なる点は, 開始時刻が  $t \neq 0$  であるという点である. 手順 13 の剛体シミュレーションについても, 開始点を変数とし,  $nT_p$  秒からシミュレーションを行うようにしており, 手順 14~17 で得られる結果も  $nT_p$  秒から  $T_1$  秒の間の結果のみである. 手順 16 では, 振れ角結果の格納の他に, 前回までの残留振れ角の最小値と今回得られた残留振れ角を比較し, 振れ角が抑制されると判断できた場合は, 当該ステップから  $u_{sn}(t)$  を書き換えて制御入力を更新する. これで UFFT の処理が一巡する. 以降は, 手順 14~17 の  $nT_p$  秒のトロリの状態を初期条件として取得し, 手順 9 から再びシミュレーションを行い,  $n = T_1/T_p$  になるまで繰り返す.

Table i FFT と UFFT の処理手順(1/3)

手順	$n$	詳細	補足, 図
1	0(FFT)	質点モデルベース $u_{org}(t)$ の導出 境界条件(加速中) $\begin{pmatrix} x(0) \\ \dot{x}(0) \\ \theta(0) \\ \dot{\theta}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x(T) \\ \dot{x}(T) \\ \theta(T) \\ \dot{\theta}(T) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} VT/2 \\ V \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	
2	0(FFT)	PWM 近似, $u_{s0}(t)$ の生成	
3	0(FFT)	速度入力への変換	
4	0(FFT)	剛体シミュレーションの実行 $t = 0 - T_1(s)$	
5	0(FFT)	剛体シミュレーションの結果 $x_0(t)$ の取得	
6	0(FFT)	剛体シミュレーションの結果 $\dot{x}_0(t)$ の取得	
7	0(FFT)	剛体シミュレーションの結果 $\theta_0(t)$ の取得および $ \theta_0 _{max}$ の取得, $ \theta _{max}$ 格納	

Table i FFT と UFFT の処理手順(2/3)

手順	$n$	詳細	補足, 図
8	0(FFT)	剛体シミュレーションの結果 $\dot{\theta}_0(t)$ の取得	
9	1~ $T_1$ UFFT	$n = n + 1$ , 前回シミュレーションの1ステップ後の境界条件の取得と初期条件への設定	$\begin{pmatrix} x(T_0) \\ \dot{x}(T_0) \\ \theta(T_0) \\ \dot{\theta}(T_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{n-1}(nT_p) \\ \dot{x}_{n-1}(nT_p) \\ \theta_{n-1}(nT_p) \\ \dot{\theta}_{n-1}(nT_p) \end{pmatrix}$
10	1~ $T_1$ UFFT	質点モデルベース $u_{org}(t)$ の導出, $T_0 = nT_p$ 境界条件	$\begin{pmatrix} x(T_0) \\ \dot{x}(T_0) \\ \theta(T_0) \\ \dot{\theta}(T_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{n-1}(nT_p) \\ \dot{x}_{n-1}(nT_p) \\ \theta_{n-1}(nT_p) \\ \dot{\theta}_{n-1}(nT_p) \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x(T) \\ \dot{x}(T) \\ \theta(T) \\ \dot{\theta}(T) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} VT/2 \\ V \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
11	1~ $T_1$ UFFT	PWM 近似, $u_{sn}(t)$ の生成	
12	1~ $T_1$ UFFT	速度入力への変換	
13	1~ $T_1$ UFFT	剛体シミュレーションの実行 $t = nT_p - T_1(s)$	

Table i FFT と UFFT の処理手順(3/3)

手順	$n$	詳細	補足, 図
14	1~ $T_1$ UFFT	剛体シミュレーションの結果 $x_n(t)$ の取得	
15	1~ $T_1$ UFFT	剛体シミュレーションの結果 $\dot{x}_n(t)$ の取得	
16	1~ $T_1$ UFFT	剛体シミュレーションの結果 $\theta_n(t)$ の取得および $ \theta_n _{\max}$ の取得, $ \theta _{\max}$ との比較, 制振時 $u_{sn}(t)$ の更新	
17	1~ $T_1$ UFFT	剛体シミュレーションの結果 $\dot{\theta}_n(t)$ の取得	

## 付録 2

### Simscape Multibody モデル

4.1.1 で述べたモデルの構築で使用した制御ブロックを Table ii に示す。Table iii および Table iv は、各サブシステムの凡例と MATLAB ワークスペースとの入出力を示す。

Table ii シミュレーションに使用した Simscape ブロック(1/3)

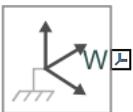
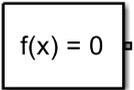
アイコン	ブロック名	用途
	World Frame	原点拘束ブロック
	Solver Configuration	Simulink 実行ソルバ設定ブロック
	Mechanism Configuration	Simscape 実行パラメータ設定ブロック
	Rigid Transform	拘束軸の変換
	File Solid	CAD モデリングした部品の参照
	Revolute Joint	走行, 横行, 巻きの動力部
	Belt-Cable End	走行, 横行, 巻きの駆動ロープ終端

Table ii シミュレーションに使用した Simscape ブロック(2/3)

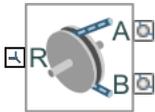
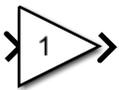
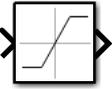
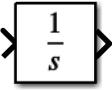
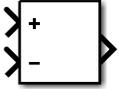
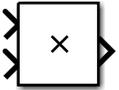
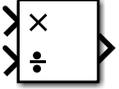
アイコン	ブロック名	用途
	Pulley	走行, 横行, 巻きのプーリー部
	Prismatic Joint	走行, 横行, 巻き駆動ロープの張力の調整
	Belt-Cable Properties	走行, 横行, 巻き駆動ロープのプロパティ
	Gain	ゲイン値調整, 正負変換
	Saturation	速度上下限しきい値の設定
	Integrator	出力結果の積分
	Plus	加算
	Minus	減算
	Product	乗算
	Divide	除算
	abs	絶対値

Table ii シミュレーションに使用した Simscape ブロック(3/3)

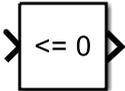
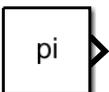
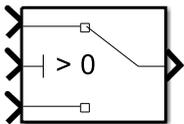
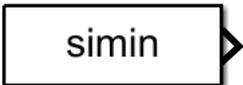
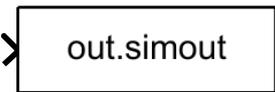
アイコン	ブロック名	用途
	Transform sensor	トロリ座標, 速度, 吊り荷座標, 吊り荷角速度の測定
	Compare To Zero	振れ角演算の正負切り替え
	pi	$\pi$
	Atan	吊り荷の振れ角演算
	Switch	吊り荷の振れ角演算時の正負切り替え 制御入力の切り替え
	6-DOF Joint	巻き上げ装置と吊り荷間の六軸自由度 連結
	From Workspace	MATLAB ワークスペース変数からの入力
	To Workspace	MATLAB ワークスペース変数への出力
	In	親サブシステムからの入力
	Out	親サブシステムへの出力

Table iii 4.1.1 のサブシステムの凡例

サブシステム	凡例	設定, 機能, 用途
Crane base frame	Fix_World	接地
Crane base frame	Fix_Mainframe1	走行駆動部との接続
Crane base frame	Fix_Mainframe2	走行従動部との接続
Crane base frame	Fix_Mainframe_origin	横行トロリ位置測定
Traveling	Fix_World	接地
Traveling	Fix_Traveing_workside	クレーン本体との接続 (従動側)
Traveling	Fix_Traveling_driveside	クレーン本体との接続 (駆動側)
Traveling	Fix_Traveling_origin	横行装置との接続
Traveling	Fix_Traveling_frame	横行駆動部との接続
Traveling	Fix_Traveling_pulley	横行従動部との接続
Traversing	Fix_Sensing_trolley	トロリ座標測定
Traversing	Fix_Traveling_frame	走行装置接続
Traversing	Fix_Traversing_workside	走行従動部との接続
Traversing	Fix_Traversing_driveside	走行駆動部との接続
Traversing	Fix_Sensing_trolley	トロリ座標測定
Traversing	Fix_Traveling_frame	走行装置との接続
Traversing	Fix_Traversing_workside	走行装置との接続
Traversing	Fix_Traversing_driveside	走行従動部との接続
Traversing	Fix_Trolley_center	振れ角測定
Traversing	Fix_Hoisting_drive_R	巻き駆動部(右側)との接続
Traversing	Fix_Hoisting_drive_L	巻き駆動部(左側)との接続
Left side	Fix_hoisting_Joint_L	巻き駆動部(左側)との接続
Left side	Left_Rope_Target_Velo	巻き速度の入力
Left side	Fix_Suspended_load_L	吊り荷との接続(左側)
Right side	Fix_hoisting_Joint_R	巻き駆動部(右側)との接続
Right side	Right_Rope_Target_Velo	巻き速度の入力
Right side	Fix_Suspended_load_R	吊り荷との接続(右側)
Right side	10	ロープ長測定

Table iv ワークスペースとの入出力(1/2)

サブシステム	名称	用途	機能	データ型
Traveling	UFFT2yVeloInput	トロリの駆動	速度入力	double timeseries
Traveling	TravelingPulleyR	プーリ半径設定	定数	INT
Traveling	travelingKi	積分係数 I	ゲイン調整	double
Traveling	travelingKp	比例係数 P	ゲイン調整	double
Traveling	rigidParam.yInitI	積分初期条件	定数	double
Traveling	SDOSimTest_Log.travelin gI	結果出力(走行 I)	値出力	double timeseries
Traversing	UFFT2xVeloInput	トロリの駆動	速度入力	double timeseries
Traversing	traversePulleyR	プーリ半径設定	定数	INT
Traversing	traverseKi	積分係数 I	ゲイン調整	double
Traversing	traverseKp	比例係数 P	ゲイン調整	double
Traversing	rigidParam.xInitI	積分初期条件	定数	double
Traversing	SDOSimTest_Log_traverse I	結果出力(横行 I)	値出力	double timeseries
Traversing	rigidParam.yInitDis	座標境界条件, 初 期条件	定数	double
Traversing	rigidParam.xInitDis	座標境界条件, 初 期条件	定数	double
Traversing	SDOSimTest_Log.travelin gVelo	結果出力(走行速 度)	値出力	double timeseries
Traversing	SDOSimTest_Log.travelin gDis	結果出力(走行座 標)	値出力	double timeseries
Traversing	SDOSimTest_Log.traverse Velo	結果出力(横行速 度)	値出力	double timeseries
Traversing	SDOSimTest_Log.traverse Dis	結果出力(横行座 標)	値出力	double timeseries
Hoisting	l0_rigid_init	ロープ初期長さ	定数	double
Hoisting	Presim.ropoVelo2	ロープ速度	値入力	double timeseries

Table iv ワークスペースとの入出力(2/2)

サブシステム	名称	用途	機能	データ型
Hoisting	SDOSimTest_Log.travelin gAngulerVelo	吊り荷角速度(Y 軸)	値出力	double timeseries
Hoisting	SDOSimTest_Log.travers eAngulerVelo	吊り荷角速度(X 軸)	値出力	double timeseries
Hoisting	SDOSimTest_Log.travelin gAngle	振れ角(Y軸)	値出力	double timeseries
Hoisting	SDOSimTest_Log.travers eAngle	振れ角(X軸)	値出力	double timeseries
Left side, Right side	Pulley_R	プーリ半径設定	定数	INT
Left side, Right side	Rope_I	積分係数 I	ゲイン調整	double
Left side, Right side	Rope_P	比例係数 P	ゲイン調整	double
Left side	SDOSimTest_Log.ropel ftI	結果出力(巻き左側 I)	値出力	double timeseries
Left side	rigidParam.zInitLeftI	積分初期条件	定数	double
Right side	SDOSimTest_Log.ropel o	結果出力(ロープ速 度)	値出力	double timeseries
Right side	SDOSimTest_Log.ropel ngth	結果出力(ロープ 長)	値出力	double timeseries
Right side	SDOSimTest_Log.ropel ghtI	結果出力(巻き右側 I)	値出力	double timeseries
Right side	rigidParam.zInitRightI	積分初期条件	定数	double

## 付録 3

### Simulink サブシステム

ここでは、4.1.2 で述べた剛体クレーンモデルに使用した Simulink サブシステムに関するブロックと入出力および Function を記載する。Table v は使用した Simulink ブロックを示す。Table vi および Table vii は、Function ブロックに使用した入出力の凡例を示す。Table viii および Table ix は、クレーンモデルの各サブシステム間の入出力に関する凡例を示す。

Table v 4.1.2 のシミュレーションに使用した Simulink ブロック(1/2)

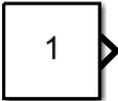
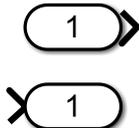
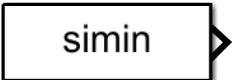
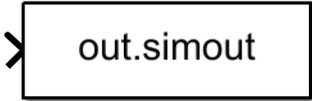
アイコン	ブロック名	用途
	clock	制御入力の時系列生成
	Constant	定数データの入力
	MATLAB Function	制御関数のスクリプト(ロープ関数, トロリ制御関数)
	In / Out	サブシステム間の接続
	From Workspace	ワークスペースからのデータ読込(ロープ速度, ロープ長さ)
	To Workspace	ワークスペースへのデータ出力(制御入力)

Table v 4.1.2 のシミュレーションに使用した Simlink ブロック(2/2)

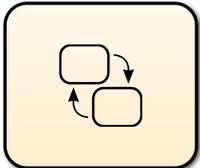
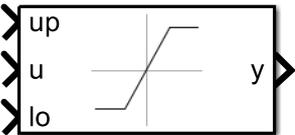
アイコン	ブロック名	用途
	Repeating Sequence	三角波の生成(PWM 近似用)
	From / Go To	サブシステム内のデータ転送
	Chart	MATLAB Simulink State Flow の関数
	Delay One Step	PWM 近似波形のステップずれ調整
	Saturation Dynamic	PWM 近似入力の飽和制御

Table vi ロープ速度設定 Function 入出力

ブロック名	用途	種類	データ型
Clock	時系列生成	時系列	timeseries
l0	初期ロープ長	定数	double
zl1	ロープ速度	定数	double
zl2	ロープ加速度	定数	double
zt1	巻上げ加速完了時刻	定数	double
zt2	巻上げ一定速完了時刻	定数	double
zt3	巻上げ完了時刻	定数	double
zt4	巻下げ開始時刻	定数	double
zt5	巻下げ加速開始時刻	定数	double
zt6	巻下げ一定速完了時刻	定数	double
zt7	巻下げ完了時刻	定数	double
out.ropeLength	ロープ長出力	変数	double timeseries
out.ropeVelo	ロープ速度出力	変数	double timeseries
out.ropeAcc	ロープ加速度出力	変数	double timeseries
RopeVeloFunction	ロープ速度設定	関数	MATLAB function

Table vii UFFT 制御入力 Function 入出力

ブロック名	用途	種類	データ型
Clock	時系列生成	時系列	timeseries
T0	初期時刻	定数	double
T1	終了時刻	定数	double
g	重力加速度	$g$	double
l0	初期ロープ長	定数	double
l1	ロープ速度	$l_1$	double
l2	ロープ加速度	$l_2$	double
l3	ロープ加々速度	$l_3$	double
X1	トロリ目標位置	$X$	double
V1	トロリ目標速度	$V$	double
x0	トロリ初期位置	$x_0$	double
x1	トロリ初期速度	$x_1$	double
th0	吊り荷初期振れ角	$\theta_0$	double
th1	吊り荷初期振れ角速度	$\theta_1$	double
xyt1	トロリ加速完了時刻	定数	double
xyt2	トロリ減速開始時刻	定数	double
xyt3	トロリ搬送終了時刻	定数	double
u	UFFT 制御入力	$u_s(nT_p)$	double timeseries

Table viii トロリ速度生成サブシステム入出力

ブロック名	用途	種類	データ型
Triangle wave	PWM 近似出力	三角波	timeseries
maxAcc	トロリ最大加速度	定数	double
maxVelo	トロリ最大速度	定数	double
PWMfreq	PWM 周波数	定数	int
generatePWM	制御入力の PWM 近似	Chart	
Velo_Saturation	PWM 速度の飽和	サブシステム	
accDSP	PWM 近似した制御入力	関数	double timeseries
velo_	PWM 近似のための戻り値	関数	double
SDOSimTest_Log.	ワークスペースへの結果	変数	double timeseries
UFFTPWMVeloInput	出力(PWM 近似し飽和制御したトロリ速度)		

Table ix トロリ速度飽和制御サブシステム入出力

ブロック名	用途	種類	データ型
fixedStep	StateFlow ステップ調整	定数	double
maxVelo	飽和速度値指定	定数	double

## 付録 4

### 記号表

本論文で使用した記号一覧を Table x に示す.

Table x 記号表(1/3)

記号	名称, 用途	単位, 表記
$x$	トロリの位置	(m)
$\theta$	ロープの振れ角	(rad)
$l$	ロープの長さ	(m)
$M$	トロリの質量	(kg)
$m$	吊り荷の質量	(kg)
$f_1$	トロリに加える力	(N)
$f_2$	吊り荷に加える力	(N)
$K$	運動エネルギー	(J)
$U$	ポテンシャルエネルギー	(J)
$O$	原点	(-)
$L$	ラグランジュアン	(J)
$u$	トロリの加速度入力	(m/s <sup>2</sup> )
$l_0$	ロープの初期長さ	(m)
$l_1$	ロープの速度	(m/s)
$l_2$	ロープの加速度	(m/s <sup>2</sup> )
$l_3$	ロープの加々速度	(m/s <sup>3</sup> )
$t$	時刻	(s)
$T$	トロリ加速完了時刻, トロリ加減速区間	(s)
$T_1$	トロリ搬送終了時刻	(s)
$V$	トロリの目標速度	(m/s)
$x_k$	$x(t)$ の未知変数	(m)
$\theta_k$	$\theta(t)$ の未知変数	(rad)
$u_k$	$u(t)$ の未知変数	(m/s <sup>2</sup> )
$j_x$	$x(t)$ の仮定解の総和繰り返し数	(-)
$j_\theta$	$\theta(t)$ の仮定解の総和繰り返し数	(-)
$j_u$	$u(t)$ の仮定解の総和繰り返し数	(-)
$k$	繰り返し番号	(-)

Table x 記号表(2/3)

記号	名称, 用途	単位, 表記
$\max(), \ \max$	$()$ , $\ \$ の最大値,	(-)
or	もしくは	(-)
$u_0$	制御入力式 $u(t)$ の0次係数	(-)
$u_1$	制御入力式 $u(t)$ の1次係数	(-)
$u_2$	制御入力式 $u(t)$ の2次係数	(-)
$u_3$	制御入力式 $u(t)$ の3次係数	(-)
$u_4$	制御入力式 $u(t)$ の4次係数	(-)
$u_5$	制御入力式 $u(t)$ の5次係数	(-)
$u_6$	制御入力式 $u(t)$ の6次係数	(-)
X, x	横行軸	(-)
Y, y	走行軸	(-)
Z, z	巻き軸	(-)
$\theta_{x1}$	Root1 のX軸残留振れ角幅	(rad)
$\theta_{x2}$	Root2 のX軸残留振れ角幅	(rad)
$\theta_{y1}$	Root1 のY軸残留振れ角幅	(rad)
$\theta_{y2}$	Root2 のY軸残留振れ角幅	(rad)
$x_0$	横行トロリ加速終了位置	(m)
$y_0$	走行トロリ加速終了位置	(m)
$V_x$	横行トロリ目標速度	(m/s)
$V_y$	走行トロリ目標速度	(m/s)
$V_\ell$	巻き目標速度	(m/s)
$T_{y0}$	走行トロリ加速時間	(s)
$T_y$	走行トロリ駆動時間	(s)
$y_0$	走行トロリ移動距離	(m)
$y_d$	移動距離	(m)
$T_{x0}$	横行トロリ加速時間	(s)
$T_x$	横行トロリ駆動時間	(s)
$\ell_d$	ロープの巻上終了後の長さ	(m)
$T_{\ell 0}$	巻上時間	(s)
$x'_0$	横行トロリ同期制御時の加速終了位置	(m)
$V'_x$	横行トロリ同期制御時の目標速度	(m/s)
$V'_\ell$	横行トロリ同期制御時の巻き速度	(m/s)

Table x 記号表(3/3)

記号	名称, 用途	単位, 表記
$x_d$	横行トロリ移動距離	(m)
$x'_0$	横行トロリ加速終了位置	(m)
$y'_0$	走行トロリ同期制御時の加速終了位置	(m)
$V'_y$	走行トロリ同期制御時の目標速度	(m/s)
$V''_\ell$	走行トロリ同期制御時の巻き速度	(m/s)
$x''_0$	巻き同期制御時の横行トロリ加速終了位置	(m)
$V''_x$	巻き同期制御時の横行トロリ目標速度	(m/s)
$y''_0$	巻き同期制御時の走行トロリ加速終了位置	(m)
$V''_y$	巻き同期制御時の走行トロリ目標速度	(m/s)
$\dot{X}_d$	トロリの目標速度	(m/s)
$e$	目標速度との偏差	(m/s)
$a_s$	加速度	(m/s <sup>2</sup> )
$u_{\text{org}}$	時間多項式 FF 制御入力	(m/s <sup>2</sup> )
$T_s$	PWM 近似用三角波周期	(s)
$T_p$	UFFT 更新周期	(s)
$u_s$	PWM 近似 FF 制御入力(FFT)	(m/s <sup>2</sup> )
$u_s$	PWM 近似 FF 制御入力(FFT)	(m/s <sup>2</sup> )
$n$	UFFT,NSFTC 再計算ステップ	(-)
$ \theta_n _{\text{max}}$	UFFT,NSFTC 残留振れ暫定最大値	(rad)
$ \theta _{\text{max}}$	UFFT,NSFTC 残留振れ最大値	(rad)

# 研究業績

## 学術誌掲載論文

1. Kosuke Matsui, Hidekazu Kajiwara,  
“Feedforward control input generation method for a crane system with restrictions on drive system,”  
*Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 170, 2022, 108865,  
ISSN 0888-3270,  
doi: 10.1016/j.ymsp.2022.108865.

## 国際会議発表

1. Kosuke Matsui, Hidekazu Kajiwara and Shiita Ishigaki,  
“Feedforward Control Design Methodology for a Crane System with Restrictions on Drive System,”  
in *Proc. 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, 2021, pp. 1-5,  
doi: 10.1109/ICM46511.2021.9385673.