

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：53901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06284

研究課題名(和文)安全性と操作性を考慮した遠隔運転天井クレーン液体タンク搬送システムの開発

研究課題名(英文) Development of remote-controlled overhead crane liquid tank transfer system considering safety and operability

研究代表者

兼重 明宏 (KANESHIGE, AKIHIRO)

豊田工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：70224615

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：遠隔地から操作を行い、タンク内の液体振動を抑え、且つ、目的地に短時間で自動的に障害物を回避し搬送を行う「安全性と操作性を考慮した遠隔運転天井クレーン液体タンク搬送システムの開発」のため、(1)天井クレーンのオペレータからの2次元搬送操作入力を可能にする入力デバイスを製作し、液体振動抑制を行う搬送制御系の設計をした。(2)制御系の有効性については、タンク形状の変化、ロッド長さの変化に対するロバスト性の検証とともに、障害物回避のための操作性について検証を行った。(3)操作者に伝える反力の大きさならびに通信遅延によるシステムの安定性を確保し、安全性や操作性を十分考慮した遠隔搬送制御系の構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

天井クレーンによるタンク内液体の振動抑制制御を考察の対象とする点に本研究の特色がある。天井クレーンによる液体搬送に関する研究は少なく、FMSを指向した天井クレーンによる液体搬送を考察する研究は他には無く、その点で本研究の独創性、新規性があり、シーズ的研究であると考えられる。開発したシステムにより、従来、閉所内であつた劣悪な労働条件下にあった熟練オペレータの省力化が図られ、クレーンを用いた液体搬送の場合、搬送中および搬送終了時に発生するスロッシングを抑えた最適な搬送が可能となり、生産性、労働環境および安全性の向上が図られると考える。

研究成果の概要(英文)：The following was done for development of a remote-controlled overhead crane liquid tank transportation system considering safety and operability.

(1)An input device that enables two-dimensional transfer operation input from an operator of an overhead crane was manufactured, and a transfer control system that suppresses liquid vibration was designed.(2)The robustness of the designed control system against changes in tank shape and rod length was verified, and the operability for avoiding obstacles was verified.(3)A remote transfer control system was constructed that ensured the magnitude of the reaction force transmitted to the operator and the stability of the system due to communication delay, and fully considered safety and operability.

研究分野：システム制御工学

キーワード：天井クレーン 液体タンク 2自由度制御系 制振制御 液面振動

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災の原発事故に代表されるように、人が立ち入れない環境に対して、遠隔制御によるロボットが必要となり、高機能、高精度な遠隔制御システムの開発について、様々な観点から研究が行われている。

一方、鉄鋼や鋳造業の天井クレーンを用いた高温で重量のある溶湯搬送は、安全に且つ効率的に運ぶために、高温、高湿度、粉塵等のある劣悪環境の中、熟練オペレータが、溶湯タンク内の液体の振動（スロッシング）を抑えた操業を行っている。また、自動化に至っても固定経路での操業に留まっており、作業環境や方策の柔軟な変更に対応した操業には至っていない。

熟練オペレータの不足や作業環境改善の観点から、目的地に短時間で搬送する天井クレーンシステムの役割は大きく、その制御システムの自動化、自律化が特に望まれる。

申請者はこれまでに、クレーンの自動化について、1) 搬送する荷物の振れ止め制御、2) クレーン搬送のオフラインとオンラインにおける環境認識（障害物等の認識）と環境地図の自動生成、3) 2) に基づいた障害物の回避および目的位置への最適経路の自動生成を行う「自律走行天井クレーンシステム」の研究・開発を行っている。

天井クレーンによる液体搬送では、図1に示すように、液体の入ったタンクの吊り下げ用ロッドの振れやタンク内の液体振動（スロッシング）が発生し易く、それにより液体の溢流など危険であり、ノロなど異物の溶湯内への巻き込みによる品質劣化を引き起こしてしまう。このため現状では、上記で述べた様に熟練オペレータの手動運転や経験的なパターン制御によるクレーン走行が行われているのが現状である。これに対して申請者は、クレーンが搬送液体に及ぼす影響を解析し、対象システムのモデルを、慣性モーメントを考慮した振り子モデルとして導出している。また、実験およびシミュレーション解析から、スロッシング制振のためのクレーンのロッドと液体タンク設計方法についての知見を得て、振動抑制および目標位置追従特性である搬送時間と位置決め精度を考慮した目標軌道の与え方を提案している。そして、天井クレーンによる液体搬送の自律化について、これまで行ってきた「自律走行天井クレーンシステム」と統合した「自律走行天井クレーン液体タンク搬送制御システムの開発」を行っている。



図1 液体搬送システム

一方、液体タンク搬送システムに対して、「ロッドと液体振動の抑制を考慮した遠隔搬送制御システムの開発」を行っている。この遠隔搬送制御システムは、ロッド長さや液位の変動に対してロバスト性があり、また、操作性の向上を図るために、視覚情報だけでなく、ロッド振動を反力として介すバイラテラル制御を実現している。

実システムでの運用を目指した場合、完全無人運転を行うよりも、人間の優れた柔軟な判断能力と機械の優れた安全性、信頼性の利点を生かし、搬送目的位置情報を人間が機械的に与え、(a)監視と操作は作業員（人間）に依存させる。(b)障害物回避のための目標軌道の導出や荷振れを抑制するための制御入力も機械的（自動的）に与える。(a)と(b)を融合させることで、人間と機械が協調するシステムが安全性と操作性の観点から優れ、作業現場からのニーズもある。また、鉄鋼や鋳造業における作業環境は高温で粉塵等の劣悪環境であり、操作者は環境の良い遠隔地で操作を行うことが望まれる。しかし、クレーン操作は3次元操作が必要であり、とくに遠隔操作においては、TV 画像のみでの操作は難しく、操作性の改善が必要である。

これらのことから、現状自律化システムと遠隔搬送制御の研究を統合し、振動状態を触覚として伝えることにより、遠隔地でのクレーンの動作状況を適切に操作者に与え、上記(a)と(b)の人間と機械のインターフェイス機能を充実させることで、3次元空間を自由に移動でき、かつ安全性や操作性を兼ね備えたクレーン搬送遠隔制御システムの開発ができる

考える。

2. 研究の目的

本研究では、遠隔地から操作を行い、タンク内の液体振動を抑え、且つ、目的地に短時間で自動的に障害物を回避し搬送を行う「安全性と操作性を考慮した遠隔運転天井クレーン液体タンク搬送システムの開発」を行う。本研究は、遠隔地にある振動が発生する制御対象の安定性を確保し、如何に上手く操れる制御システムを構築することにより、安全性や操作性を考慮した実作業システムを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

安全性や操作性に優れたクレーン搬送遠隔制御システム構築のため、まず、クレーン操作者（人間）が X, Y 平面の 2 次元操作を与え、その操作による搬送経路上の障害物認識・回避および液面振動を抑制した搬送制御を行う。また、申請者が提案している天井クレーンの遠隔制御に関する研究を応用し、操作者には画像情報だけでなく、クレーンの荷振れ角情報を操作ハンドルへ反力（力帰還バイラテラル制御）として与えることにより、映像とともに荷振れを感じることで安全性や操作性を高めるシステムの構築を目指し、現有の装置に 2 次元の操作入力装置を付加し、以下に示す本研究で取り組む課題を解決して「安全性と操作性を考慮した遠隔運転天井クレーン液体タンク搬送システムの開発」を行う。

（1）操作者による入力装置と現有の障害物認識・回避経路計画システムとの統合

X, Y 平面の 2 次元操作を与えるジョイスティック入力装置を製作し、操作者の 2 次元操作入力のみで、高さ (Z) 方向の障害物を自動的に回避するシステムの開発を行う。

（2）天井クレーンによるタンク内液体搬送制御システム（ソフトウェア）の開発

上記（1）で生成される様々な経路（指令値）から液面振動抑制効果のある指令値に修正するフィードフォワード制御系と外乱（装置のガタなど）に対応するフィードバック制御系を含む 2 自由度搬送制御システムを開発する。

（3）遠隔制御搬送制御システムの開発

操作者に伝える反力の大きさならびに通信遅延によるシステムの安定性を確保し、安全性や操作性を十分考慮した上記（1）と（2）を実現できる遠隔搬送制御システムの構築を行う。

（4）実作業を十分考慮した搬送制御システムの開発

実験解析を行い、実システムへの適用を考えた場合の問題点や課題を提起する。

4. 研究成果

遠隔地から操作を行い、タンク内の液体振動を抑え、且つ、目的地に短時間で自動的に障害物を回避し搬送を行う「安全性と操作性を考慮した遠隔運転天井クレーン液体タンク搬送システムの開発」のために次のことを行った。

（1）天井クレーンのオペレータからの 2 次元搬送操作入力を可能にする入力デバイスの製作を行い、液体振動抑制を行う搬送制御系の設計をして、その制御系の有効性を検証した。搬送制御系は、ノッチフィルタを用いたフィードフォワード制御系と液位やロッド長変化に対応可能なロバスト制御系を用いた 2 自由度制御系である。

（2）制御系の有効性の検証については、タンク形状の変化、ロッド長さの変化に対するロバスト性の検証とともに、障害物回避のための制御系の操作性について検証を行った。搬送制御系は、通常の操作を行うには問題が無かったが、位置決めを行うための細かな入力を与えた場合に対して、振動的な挙動をすることがわかった。これを解決する方法として、入力デバイスの感度を下げる方法などがあるが、理論的な解決には至っていない。

（3）最適な障害物回避計画手法として、スタートとゴールを与え、障害物回避と荷振れを考慮したオンデマンド搬送軌道計画法を開発した。また、クレーンシステムの制約を満たしながら、障害物回避、振動抑制、高速移動を可能にした人工ポテンシャル法と逐次二次計画法を用いた高速移動軌道計画法を提案した。

（4）振動抑制軌道生成法として、S 字曲線コマンドを用い、天井クレーンのアクチュエ

ータの最大速度と最大加速度を考慮した最短時間最適化手法によりオンライン天井クレーン振動抑制軌道生成法を提案した。

(5) 遠隔制御については、従来提案しているバイラテラル制御手法を用い、上記(1)の搬送制御系で実施できることを確認した。今後の課題として、実用化を目指すことが挙げられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Noda Yoshiyuki, Hoshi Ryuki, Kaneshige Akihiro	4. 巻 2019
2. 論文標題 Training Simulator for Acquiring Operational Skill to Operate Overhead Traveling Crane while Suppressing Load Sway	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Shock and Vibration	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1155/2019/3060457	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Tho Ho Duc, Kaneshige Akihiro, Terashima Kazuhiko	4. 巻 98
2. 論文標題 Minimum-time S-curve commands for vibration-free transportation of an overhead crane with actuator limits	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Control Engineering Practice	6. 最初と最後の頁 104390~104390
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.conengprac.2020.104390	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 兼重 明宏、天野 敬道、上木 諭、野田 善之、三好 孝典、寺嶋 一彦	4. 巻 89
2. 論文標題 天井クレーンによる液体タンク搬送制御システムの制振設計	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 鑄造工学	6. 最初と最後の頁 577~584
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11279/jfes.89.577	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 上木 諭、山内 悠、兼重 明宏、三好 孝典、寺嶋 一彦	4. 巻 83
2. 論文標題 天井クレーン液体容器搬送制御システムの設計	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 237
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.17-00237	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 K.Matsusawa, Y. Noda, A. Kaneshige
2. 発表標題 On-demand Trajectory Planning with Load Sway Suppression and Obstacles Avoidance in Automated Overhead Traveling Crane System
3. 学会等名 Proc. of 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering(CASE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松澤彼方, 野田善之, 兼重明宏
2. 発表標題 天井クレーンにおける障害物回避と振動抑制を考慮した オンデマンド搬送軌道計画
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松澤彼方, 野田善之, 兼重明宏
2. 発表標題 人工ポテンシャル法と軌道最適化を統合した天井クレーンの搬送軌道計画法
3. 学会等名 第20回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kanata Matsusawa, Yoshiyuki Noda, Akihiro Kaneshige
2. 発表標題 Trajectory Planning with Consideration for Load Sway Suppression and Obstacles Avoidance using Artificial Potential Method and Sequential Quadratic Programming in Automated Overhead Traveling Crane
3. 学会等名 Proc.of the 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田善之, 星龍貴, 兼重明宏
2. 発表標題 VRクレーンシミュレータを用いた荷振れ抑制操作技能習得のための教示訓練システム
3. 学会等名 日本鑄造工学会第171回全国講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兼重明宏, 上木諭, 野田善之, 三好孝典, 寺嶋一彦
2. 発表標題 天井クレーン液体容器搬送制御システムの操作性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松澤彼方, 野田善之, 兼重明宏
2. 発表標題 天井クレーンにおけるタッチインターフェースを用いた搬送軌道指示とそれに基づく荷振れ抑制を考慮した搬送軌道計画法の開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A.Kaneshige, S.Ueki, Y.Noda and T.Miyosh
2. 発表標題 Development of molten metal transport support system with an overhead crane
3. 学会等名 The 73rd World Foundry Congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野田善之, 星龍貴, 兼重明宏
2. 発表標題 天井クレーンにおける荷振れ抑制操作技能の解析とトレーニングシミュレータの開発
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兼重明宏, 上木諭, 山内悠, 三好孝典, 寺嶋一彦
2. 発表標題 天井クレーンによる溶湯搬送支援システムの開発
3. 学会等名 日本鑄造工学会第170回全国講演大会講演概要集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ho Duc Tho, 田崎良佑, 兼重明宏, 三好孝典, 寺嶋一彦
2. 発表標題 Robust Sliding Mode Control with Integral Sliding Surface of an Under actuated Rotary Hook System
3. 学会等名 Proc. of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronic(AIM2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shogo Hamada, Yudai Kawasaki, Takanori Miyoshi, Kazuhiko Terashima
2. 発表標題 Development of handwritten tele-communication system for the Deaf-blind based on the multi-lateral control
3. 学会等名 International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2017(ICISIP2017)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 柳田秀記、兼重明宏、西村太志、他	4. 発行年 2017年
2. 出版社 実教出版	5. 総ページ数 344
3. 書名 専門基礎ライブラリー 機械設計	

1. 著者名 柳田秀記、兼重明宏、西村太志、他	4. 発行年 2019年
2. 出版社 実教出版	5. 総ページ数 128
3. 書名 実例で学ぶ機械設計製図	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	野田 善之 (NODA YOSHIYUKI) (60426492)	山梨大学・大学院総合研究部・教授 (13501)	
研究分担者	上木 諭 (UEKI SATOSHI) (50467213)	豊田工業高等専門学校・機械工学科・准教授 (53901)	
研究分担者	三好 孝典 (MIYOSHI TAKANORI) (10345952)	長岡技術科学大学・技術経営研究科・教授 (13102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------