

2026年 1月 5日

機械工学専攻	学籍番号	第 239101 号	指導教員	内山 直樹 高橋 淳二
氏名	百濟 和文			

論文内容の要旨 (博士)

博士学位論文名	旋回クレーンの作業効率向上および機械負荷低減のための最適動作軌道の生成
---------	-------------------------------------

(要旨 1,200 字程度)

旋回クレーンは多様な作業現場で重量物の運搬に広く用いられているが、吊荷の制御は難しく、安全な操作には熟練の技能が求められる。また主要構造物であるラチスブームは高い耐荷重性能を備える一方、複雑な格子構造を有するため局所的に応力が集中しやすく、不適切な操作や荷振れによって疲労損傷や座屈につながる危険性が報告されている。そのため、安全性や作業効率向上を目的として吊荷制御に関する研究は多数行われてきたものの、それらの多くは位置精度向上や残留荷振れの抑制に焦点が当てられており、高速動作による作業効率向上や、高速動作中に発生する機械的負荷の低減まで考慮した研究は限られている。本研究はこれらの課題を踏まえ、高速動作による作業効率向上と機械負荷低減を両立する最適動作軌道の生成の提案を目的とする。

第2章では、熟練オペレータによる実機旋回クレーンの高速動作における、荷振れ挙動やラチスブーム下部に生じる応力特性、旋回動作軌道を計測し、それらを詳細に分析した。これにより熟練オペレータ特有の高速動作の特性や、接線方向の荷振れがブーム応力を増大させるメカニズムを明らかにし、高速動作における課題を具体化した。

第3章では、吊荷の運動に関するダイナミクスモデルを構築し、ラボスケール装置を用いた実験結果と比較しモデルの妥当性を確認した。クレーン動作時の荷振れ特性がシミュレーションで再現されていることを確認した。

第4章では、熟練オペレータの動作軌道を参考に設定した2段S字曲線軌道を高速動作の基準とし、機械性能および荷振れ抑制の制約のもと、動作時間最小化を目的とした最適動作軌道生成法を提案した。シミュレーションとラボスケール装置実験の結果、最適動作軌道は旋回単動作のみならず、ロープ長や起伏角が変化する複合動作においても、目標位置で残留荷振れを十分に抑制できることが示された。

第5章では、高速動作時の機械負荷低減を目的に、接線方向の荷振れがブーム高応力を生じさせる点に着目し、荷振れを抑制するための最適複合動作軌道を検討した。複数軌道の比較により有用な性質を特定し、ラチスブーム型クレーンの構造特性に適した動作軌道を設計した。その結果、提案軌道は2段S字曲線軌道に比べ接線方向の荷振れを30.6%低減し、有限要素解析では最大応力振幅を17.7%低減した。また、ISO 4301-1に基づく耐疲労性評価では、最大運転サイクル数が従来軌道の約2.7倍に向上することが示され、長期的な運用に関する有効性を示す結果が得られた。

第6章では、目標旋回角度が微小に変化する場合を想定し、リアルタイム補正軌道生成手法を提案した。ダイナミクスモデルを線形化し、二次計画法に基づいて補正軌道を生成することで、事前に得られた最適軌道の情報を微小な角度変化に対して修正することで高い制振性能を維持できることを確認した。

第7章では、研究成果を総括し、今後の課題を述べた。

Department of Mechanical Engineering	Student ID Number D239101	Supervisors Naoki UCHIYAMA Junji TAKAHASHI
Applicant's name Kazufumi KUDARA		

Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Optimal Motion Trajectory Generation for Enhancing Work Efficiency and Reducing Mechanical Stress in Rotary Cranes
-----------------	--

Approx. 800 words

Rotary cranes are widely used for heavy-load handling in various worksites; however, controlling loads remains challenging, and safe operation continues to rely heavily on skilled operators. Although the lattice boom—the primary structural component—offers high lifting capacity, its complex truss structure makes it susceptible to localized stress concentration, leading to fatigue damage or even buckling under inappropriate operation or excessive load sway. Accordingly, many studies have conducted research to improve safety and work efficiency through advanced load-sway suppression. However, most prior research has primarily focused on positioning accuracy and residual load sway suppression, while comparatively few studies have addressed the dual objectives of enhancing work efficiency through high-speed motion and reducing the mechanical stress induced during rapid operations. This study aims to generate optimal motion trajectories that simultaneously improve operational efficiency and reduce mechanical stress during high-speed crane motion.

Chapter 2 investigates high-speed operations performed by skilled operators using an actual-scale rotary crane. Detailed measurements of load-sway behavior, stress responses in the lower region of the lattice boom, and rotational motion trajectories were conducted. The analysis identifies characteristic motion patterns unique to skilled operators and clarifies the mechanism by which tangential load sway increases boom stress, thereby highlighting critical issues that arise during high-speed operation.

Chapter 3 develops a dynamics model that describes the motion of the load and confirms its validation through comparison with lab-scale crane experiments. The results confirm that the model accurately reproduces the load sway characteristics observed in actual crane motion.

Chapter 4 generates an optimal motion trajectory based on a two-stage S-curve trajectory derived from skilled-operator motion patterns. Based on machine performance limits and residual load sway suppression constraints, the motion trajectory is minimized in total motion time. Simulations and lab-crane experiments demonstrate that the generated trajectory effectively suppresses residual load sway not only during single rotation but also during multi-axial motions involving rope-hoisting and boom-luffing motions.

Chapter 5 generates an optimal motion trajectory for reduction of mechanical stress during high-speed motion by focusing on the lattice-boom stress increase caused by tangential load sway. Through comparative analysis of multiple motion trajectory candidates in prior studies, effective features for reducing tangential load sway were identified, and a trajectory tailored to the structural characteristics of lattice-boom rotary cranes was designed. The proposed motion trajectory reduces tangential sway by 30.6% relative to the two-stage S-curve trajectory. In addition, it decreases maximum stress amplitude by 17.7% relative to the skilled trajectory, as verified through finite element analysis based on actual crane specifications. Additionally, fatigue evaluation based on ISO 4301-1 indicates a 2.7-fold increase in mechanical lifespan, demonstrating the trajectory is effectiveness for long-term crane operation.

Chapter 6 proposes a real-time trajectory modification method that accounts for small variations in desired rotational angle. By linearizing the crane dynamics model and applying quadratic programming to generate modified motion trajectories, the generated motion trajectory maintains high load sway suppression performance while relying on only a single reference motion trajectory.

Chapter 7 concludes the study and outlines future research directions.