



リニアモータ駆動コンテナクレーンシステムにおける コンテナ揺れ角検出方法および統合制御システム に関する研究

谷口, 裕樹

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2010-09-25

(Date of Publication)

2011-12-14

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5097

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005097>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名 谷口 裕樹
博士の専攻分野の名称 博士（工学）
学 位 記 番 号 博い第 5097 号
学位授与の 要 件 学位規則第 5 条第 1 項該当
学位授与の 日 付 2010 年 9 月 25 日

【 学位論文題目 】

リニアモータ駆動コンテナクレーンシステムにおけるコンテナ揺れ角検出方法および統合制御システムに関する研究 (Fundamental Study of Detection Method of Swaying Angle of Container and Integrated Trolley Drive and Swaying Angle Control System for Linear Motor Driven Container Crane System)

審 査 委 員

主 査 准教授 山本 茂広
教 授 武田 実
教 授 小林 英一

氏名	谷口 裕樹		
論文 題目	リニアモータ駆動コンテナクレーンシステムにおけるコンテナ揺れ角検出方法および統合制御システムに関する研究 Fundamental Study of Detection Method of Swaying Angle of Container and Integrated Trolley Drive and Swaying Angle Control System for Linear Motor Driven Container		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名 Crane System
	主 査	准教授	山本 茂広
	副 査	教 授	武田 実
	副 査	教 授	小林 英一
	副 査		
	副 査		
要 旨			
<p>コンテナターミナルにおいて荷役作業の中心を担っているのがコンテナクレーンシステムであるが、コンテナ船の大型化に伴い、一層の高速化、自動化、保守性の向上が望まれている。本論文は、このコンテナクレーンシステムにリニアモータを導入し、かつ、駆動と一体的に揺動抑制制御をかけることで、これらの課題の解決を試みるものである。</p> <p>論文は、全6章で構成されており、第1章で研究の背景と目的を、第2章でリニアモータ駆動コンテナクレーンシステムの概要として提案システムの特徴を述べている。それらをまとめると、本研究の意義はつぎのとおりである。</p> <p>現在使用されている大多数のコンテナクレーンでは、トロリ（台車）に接続したワイヤを、シーブを介して回転形モータで駆動している。そして、コンテナを把持するスプレッドは、トロリからワイヤで吊り下げられ、トロリとスプレッドの上にトロリ駆動用モータとは別に設置した回転型モータでワイヤ長さを調整し、スプレッドの姿勢や揺動を制御している。これらのシステムは、レールと車輪の摩擦を利用してトロリを駆動する粘着駆動システムであり、レールの凍結などに対して脆弱なシステムである。これに対して、本論文では、リニアモータを導入することを提案している。リニアモータによりトロリに駆動力を直接作用させることが可能となり、レールの状態にとらわれず安定して高加減速の運転ができるようになる。さらに、リニアモータを導入することによりトロリの速度、加速度を緻密にコントロールできるようになるため、トロリの移動と同時にコンテナの揺動抑制制御をかけることが可能となる。本論文では、その制御方法について詳細に検討している。</p> <p>第3章から第5章までが本論文の中核となっている。まず第3章では、MATLAB/Simulinkでシミュレーションツールを作成し、それを用いたリニア駆動システムにおける基本的な特性の検討を行っている。さらにコンテナの揺動を小さくする推力制御の方法を検討した結果、スプレッド、コンテナとワイヤで構成される振り子系の周波数や位相に着目し、加減速時間を揺動しているコンテナの揺動周波数の整数倍の時間に一致させるようにすることで、定速走行時、停止時のスプレッドの揺れ角を大幅に減少させることが可能であることを示している。ただし、実際のシステムではワイヤの長さは変化し、それに伴ってコンテナの揺動周期も変化するため、このような加減速時間の調整による手段でコンテナの揺動を抑制し、トロリの位置を制御する方式には限界があることも指摘している。</p> <p>この結果を受け、本論文では、第4章と第5章で述べられているように、ワイヤの長さが変化する場合でも適用できる、コンテナの揺動抑制とトロリの位置決めとの整合を図った統合制御システムの開発を目指している。そのためには、コンテナの揺れ角を検出することが重要であり、簡便で新たな手法として、トロリに装着した加速度センサの出力からコンテナの揺れ角を推定する方法について第4章で提案している。まず、MATLAB/Simulinkを使用した実モデルを対象としたシミュレーションを行うことにより、コンテナの揺れ角の検出誤差は、十分に小さい値であることを確かめている。さらに、小形の実験装置を製作し、実験によっても揺れ角推定方法の妥当性を確認している。また、提案手法はコンテナの質量が既知であることを前提としているため、コンテナ質量に誤差を含む場合の影響についても調べている。その結果、十数パーセントの誤差まで対応できることが示されている。なお、コンテナの質量を実際よりも軽く設定した方が、重く設定するよりも、揺れ角の誤差が大きくなるという知見も得ている。</p> <p>第5章では、第4章で提案した揺れ角推定方法も取り入れた、1台のリニアモータでトロリ駆動制御とコンテナの揺動抑制制御を行う統合制御システムを提案している。最初に、システムの状態方程式を導出し、実システムモデルを対象としたシミュレーションにより、制御システムの妥当性と有用性を検証している。オープンループ制御時、コンテナの揺動抑制時、台車の走行制御（位置決め制御）と揺動抑制制御</p>			

氏名	谷口 裕樹
<p>との統合制御時のシミュレーション結果より、オープンループ時に比べ統合制御時は、コンテナの揺動抑制とトロリの位置制御が良好に行えることを示している。次に、小形実験装置を使用した実験の結果、シミュレーション結果と実験結果は概ね良好に一致することを確かめている。これらの検討結果より、ワイヤの長さが時間とともに変わる場合でも提案システムの有用性と妥当性が確認されたと結論づけている。また、第5章で検討したコンテナ質量の誤差が、最終的な制御特性にどの程度の影響を及ぼすかについても検討し、提案手法の適用限界も明らかにした。最後に、第6章は結論として本論文のまとめと今後の課題について述べている。</p> <p>本研究の根幹部分については、以下の1)、2)に示す有審査論文と3)に示す国際会議のプロシーディングンにおいて公表されている。4)、5)は、関連研究である。</p>	
<p>1) 谷口裕樹, 安 相伯, 山本茂広, 小豆澤照男:「リニアモータ駆動コンテナクレーンシステムにおけるコンテナ揺れ角検出方法に関する研究」, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.45, No.1, pp.116-121 (2010-1)</p> <p>2) 谷口裕樹, 安 相伯, 山本茂広, 小豆澤照男:「リニアモータ駆動コンテナクレーンシステムにおける統合制御に関する検討」, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.45, No.3, pp.401-407 (2010-5)</p> <p>3) Yuki Taniguchi, Sangbaek An, Hongkun Wang, Hidenari Makino, Shigehiro Yamamoto and Teruo Azukizawa: "Fundamental Study of an Integrated Control Method for a Linear Motor Driven Container Crane System". Proc. of The International Conference on Electrical Engineering 2008(ICEE2008), (2008-7)</p> <p>4) Yuki Taniguchi, Sangbaek An, Hongkun Wang, Shigehiro Yamamoto and Teruo Azukizawa: "Integrated Control Method for Liner Motor Driven Container Crane System", Proc. of The 6th International Symposium on Liner Drives for Industry Applications, pp.35-36, (2007-9)</p> <p>5) Yuki Taniguchi, Sangbaek An, Shigehiro Yamamoto and Teruo Azukizawa: "Integrate Trolley Drive and Swaying Angle Control System for a Linear Motor Driven Container Crane System". Proc. of The 7th International Symposium on Liner Drives for Industry Applications, pp.280-283, (2009-9)</p>	
<p>以上のように、本論文は、コンテナターミナルにおける重要な機器であるコンテナクレーンシステムの性能改善を目指したものであり、コンテナクレーンにリニアモータを導入した場合について、その位置決めと揺動抑制の統合制御に関する重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。</p> <p>よって、学位申請者 谷口裕樹 は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。</p>	

論文内容の要旨

氏 名 谷口 裕樹

専 攻 海事科学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

リニアモータ駆動コンテナクレーンシステムにおけるコンテナ揺れ角検出方法および統合制御システムに関する研究

指導教員 山本 茂広

(注) 2,000字～4,000字でまとめること。

世界の物流の90%以上を扱う重要な物流システムである海運の主役であるコンテナ船は大型化が進んでいる。このようなコンテナ船の大型化に伴い、コンテナターミナルの荷役作業を行うコンテナクレーンシステムには、一層の高速化、自動化、保守性の向上が課題となっている。現在コンテナターミナルで使用されている大多数のコンテナクレーンでは、トロリ(台車)に接続したワイヤを、シーブを介して回転形モータで駆動している。そして、コンテナを把持するスプレッドは、トロリからワイヤで吊り下げられ、トロリとスプレッド(コンテナを把持する機器)の上にトロリ駆動用モータとは別に設置した回転型モータでワイヤ長さを調整し、スプレッドの姿勢や揺動を制御している。現在のクレーンシステムでは、ガントリークレーンの上部に運転室が設けられ、クレーンのオペレータが岸壁や船内荷役作業主任者と連絡を取りながらクレーン動作の全ての操作を行っている。コンテナ船の荷役作業においては、どのような気象状況、つまり、波や風でコンテナ船が揺れたり、トロリの走行レールに相当するガードが凍結したりしていても、確実にコンテナを積み下ろしする必要がある。このような環境の中、コンテナターミナルにおける更なる荷役効率の向上、オペレータの疲労軽減、安全性の向上を図るなどを目的として、コンテナクレーンを用いた自動化技術が開発されている。コンテナを正確に搬送するためには、トロリの搬送位置決めと揺れ・回転連成振動防止の制御技術が重要である。その中でも揺れ止め制御は、熟練者でなくとも容易に扱える操作性と自動運転をコンテナクレーンに与える基盤技術であり、多くの研究がなされている。また、コンテナクレーンの自動運転を実現するためには、短い時間でトロリが目標位置に到達し、かつ、コンテナの揺れが残らないようにコンテナの抑制制御を行う必要がある。コンテナの揺動抑制制御に関しては、あらかじめ計算した最適な速度パターンをルール化してトロリの走行制御を行うファジィ制御を適用した例などが報告されているが、一層の制御精度の向上や、制御時間の短縮が期待されている。

このような背景の中で、コンテナクレーンの荷役作業を高速化し、自動化するには、トロリを目的位置まで高速に移動すること、スプレッドを揺動させることなく所定位置に停止させることが最重要課題である。そこで、リニアモータを使用してコンテナクレーンの荷役作業を高速化するアイデアが提案されている。しかしながら、実用システムや実用化に際して解決すべき技術課題に関する報告はなされていない。そこで本論文では、トロリの位置決めとスプレッドの揺動抑制制御をも、トロリを駆動する1台のリニアモータで制御するという新たなコンセプトのリニアモータ駆動コンテナクレーンシステムを提案する。

まず第2章では、提案するリニアモータ駆動コンテナクレーンシステムの概要ならびに、特徴について詳述する。提案システムは、回転形モータで駆動された車輪とレール間の摩擦力により推進力を得る粘着駆動方式と異なり、台車上の一次鉄心が軌道側の二次導体との相互作用により直接駆動される非粘着駆動システムである。すなわち、リニアモータ

(氏名： 谷口 裕樹 NO. 2)

タ駆動システムでは、リニアモータが発生する推進力、制動力が直接台車に作用するので、台車の支持車輪の空転や滑走によりモータの推進力が台車に伝わらないという事態は発生しない。したがって、提案システムでは、トロリを駆動するリニアモータが、雨天時やレール凍結時にも確実にトロリを高加減速度で駆動可能である。すなわち、リニアモータ駆動システムによればトロリの速度を調整することで、コンテナの揺動抑制を実現することが可能である。これにより、提案システムにおける吊下げワイヤは、原則としてスプレッドを上下させる機能のみを有すれば良く、システム全体の構成が簡素になるとともに、保守性が大幅に向上し、自動化に適應できるものと期待できる。

まず、リニアモータ制御システムを構築するに当たり、スプレッドの揺動とトロリの走行特性をシミュレーションにより明らかにする必要がある。そこで第 3 章では、MATLAB/Simulink でシミュレーションツールを作成し、それをを用いたリニア駆動システムにおける特性の検討、さらにコンテナの揺動を小さくする推力制御の方法を検討した結果を述べる。その結果、スプレッドを吊り下げるワイヤの長さが一定ではあるが、スプレッドの揺動を抑えながらトロリを走行させる運転方法についていくつか知見を得た。そこで、スプレッド、コンテナとワイヤで構成される振り子系の周波数や位相に着目し、加減速時間を、揺動しているコンテナの揺動周波数の整数倍の時間に一致させるようにすることで、定速走行時、停止時のスプレッドの揺れ角を大幅に減少させることが可能であることを確認した。しかしながら、実際のシステムではワイヤの長さは変化し、それに伴ってコンテナの揺動周期も変化するため、このような加減速時間の調整による手段でコンテナの揺動を抑制し、トロリの位置を制御する方式には限界があることも確認した。

本論文で提案しているシステムの実現を目指すには、このようにワイヤの長さが変化した場合でも、コンテナの揺動抑制とトロリの位置決めとの整合を図った統合制御システムの開発が必要である。そのためには、コンテナの揺動を抑えながら所定の荷役処理を行なうために、まず、コンテナの揺れ角を検出することが重要である。

そこで第 4 章で、コンテナの揺動抑制制御に必要なコンテナの揺れ角を検出する簡便な新たな手法として、トロリに装着した加速度センサの出力からコンテナの揺れ角を推定する方法について提案する。まず、MATLAB/Simulink を使用した実モデルを対象としたシミュレーションを行うことにより、コンテナの揺れ角の検出誤差は、十分に小さい値であることが確認でき、十分な精度でコンテナ揺れ角を検出できることを確認した。しかしながら、提案する検出方法では、コンテナの質量の測定精度が正確である必要がある。そこで、提案する揺れ角検出方法において、コンテナの質量に誤差がある場合、提案方法にどの程度誤差を生じるかを検討するためのシミュレーションにより確認した。その結果、揺れ角検出誤差の許容範囲を ± 1 度以内とすると、コンテナ質量の誤差は $-4\text{ton}\sim+5\text{ton}$ の範囲に抑える必要があることが分かった。

(氏名： 谷口 裕樹 NO. 3)

次に、提案している揺れ角検出方法、リニアモータ駆動コンテナクレーンシステムにおける統合制御システムの妥当性を検証するために小形の実験装置を製作した。そして、小形の実験装置における揺れ角推定方法の妥当性を評価するために、シミュレーションと実験により提案している揺れ角検出方法の有効性を検討した。その結果、加速度センサのノイズを考慮すると、トロリが加減速時にはコンテナ揺れ角を誤差 ± 5 度以内、トロリが停止時にはコンテナ揺れ角を誤差 ± 1 度以内で推定できることが分かった。加速時における推定誤差が大きいが、これは実験装置の製作精度によるものと考えられる。そして、実験装置とシミュレーションによる検討結果より、提案している揺れ角検出方法は良好に使用できることを確認した。

最後に第 5 章で、本論文で提案しているリニアモータ駆動コンテナクレーンシステムにおいて、1台のリニアモータでトロリ駆動制御とコンテナの揺動抑制制御を行う統合制御システムを提案し、実システムモデルを対象としたシミュレーションにより、制御システムの妥当性と有用性を検証した。オープンループ制御時、コンテナの揺動抑制時、台車の走行制御（位置決め制御）と揺動抑制制御との統合制御時のシミュレーション結果より、オープンループ時に比べ統合制御時は、コンテナの揺動抑制とトロリの位置制御が良好にできることを確認した。これらの検討結果より、ワイヤの長さが時間とともに変わる場合でも提案システムの有用性と妥当性を確認した。次に、シミュレーションと小形実験装置を使用した実験結果により、提案している統合制御システムの妥当性と有用性の検討を行った。実験装置の製作精度の問題を考慮すると、シミュレーション結果と実験結果は概ね良好に一致し、提案システムの妥当性が証明された。

さらに、提案手法でコンテナの揺れ角を推定する際には、コンテナの質量が実際のコンテナ質量と異なる場合、揺れ角推定値に誤差が生じ、トロリ台車の走行制御や位置決め制御特性、コンテナの揺動抑制制御特性に悪影響を及ぼすことが考えられる。そこで、コンテナ質量の設定誤差が、トロリ台車駆動制御特性、及び、コンテナ揺動抑制制御特性に与える影響についてシミュレーションにより検討した。

今後の課題としては、揺れ角検出方法の推定誤差の低減による更なる統合制御性能の向上が考えられる。また、コンテナターミナルの完全自動化に対応するために、トロリが搬送するコンテナの位置を自動検出し、目的地までの確に搬送するシステムの開発などが必要となる。このようなトロリの自動走行と本論文で紹介した統合制御システムが可能であれば、コンテナターミナルにおける荷役作業の高効率化、完全自動化などが期待できる。