

令和元年6月6日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06902

研究課題名(和文) 海上機械システムの適応ロバスト制御および動揺推定手法

研究課題名(英文) Adaptive robust control and oscillation estimation for offshore mechanical systems

研究代表者

戸田 勝善 (Masayoshi, Toda)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：70262342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、海上・船上クレーンやレーダー姿勢制御システム等、波浪で動揺するベース上に設置された機械システムの運動制御システムに関するものである。研究期間内において、船体の運動によって生じる動揺周波数の変動に対する適応ロバスト運動制御手法および適応ロバスト動揺推定手法を開発した。前者は各周波数に対するH_∞制御器を切り替える手法、後者は適応ゲインを用いたカルマンフィルタおよび通常のH_∞フィルタを組み合わせ、これらを切り替える手法である。制御手法はシミュレーションによる評価、推定手法はシミュレーションおよびジャイロセンサを用いたモデル実験による評価を行い、それぞれ有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、動揺下にある海上機械システムの作業性能および安全性の向上に寄与するものであり、海洋における食料資源のみならず鉱物、エネルギー資源への需要または関心が高まる中、その社会的意義は大きいと考える。また、学術面においては、特に推定手法の基礎となるイノベーション(計測値と計測値の推定値の差)に基づいたカルマンゲインの適応化およびH_∞フィルタとのスイッチングは新たな手法であり、それぞれのフィルタの利点を活用した有効な手法として大きな意義を有する。

研究成果の概要(英文)：In this study, we consider motion control systems for ocean mechanical systems subject to wave-induced base oscillation such as offshore/onboard cranes, radar attitude control systems, and so on. In this research term, we have developed an adaptive robust control method and an adaptive robust oscillation estimation one to cope with frequency variation due to ship motion. The control method is based on switching multiple H_∞ controllers for respective frequencies. The estimation method is based on selectively combining a Kalman filter with adaptive gain and the conventional H_∞ filter. Evaluations were conducted for the control method by simulations and for the estimation method by not only simulations but also model experiments using a gyro sensor respectively, and consequently those results have shown their effectiveness.

研究分野：制御工学

キーワード：適応カルマンフィルタ H_∞フィルタ スwitchingフィルタ カルマンフィルタの漸近安定性 イノベーション

1. 研究開始当初の背景

海上でのベースが動揺する機械システムの運動制御について、国外においては、クレーン、ドリル等を対象にしたヒープモーション補償付運動制御に関して研究が行われてきた。これらで応用されている制御手法としては、外乱オブザーバ、LQ 最適制御、入出力線形化等である。一方、国内においては、本研究代表者が、前述のモデルシステムとしての「動揺ベースマニピュレータ」を対象としたロバスト運動制御に関する研究成果を発表し、さらにこれまでの成果を monograph として出版した。このモデルシステムは 1 自由度動揺ベースおよび 2 自由度マニピュレータから構成されている。本システムを対象として、ベースが動揺する環境下で、動揺による外乱を抑制しながら、所望の運動制御が達成できる制御手法の開発を目的として、 H 制御および PD 制御を組み合わせた手法、非線形な切り替え超平面を利用したスライディングモード制御による 2 種類の方法を提案した。提案手法を評価するために、シミュレーションのみならず、実験用システムを開発し、モデル実験によってもその有効性を確認することができた。

しかしながら、提案手法は、「動揺周波数の変動が小さいこと」、「ベースの動揺が精度よく計測できること」を前提としているため、状況によっては適用できない場合がある。例えば、船舶などの移動するベースでは波浪との出会い方向、船速の変化に応じて、動揺周波数が大きく変動する場合がある。一方、ベースの動揺を計測するために、一般的なジャイロセンサを用いて、それを積分すると、ドリフトや積分誤差により計測の精度が悪化する場合がある。

よって、本研究ではこれらの問題点を解決するために、「動揺周波数の大きな変動に対して適応的に制御できる手法」、「比較的安価なジャイロセンサ等でもベースの動揺が精度よく推定できる手法」、さらに「周波数変動に対応できる運動制御手法」の開発を目的とした。

2. 研究の目的

本研究は、まず、周波数変動に対する適応制御手法の開発を目的として、 H 制御をゲインスケジューリング化する手法および H 制御器をスイッチングする手法をそれぞれ検討する。対象とする制御問題に対応するそれぞれの制御則導出方法を理論的に構築し、シミュレーションおよびモデル実験による評価を行う。

つぎに、動揺の推定手法については、カルマンフィルタおよび複数の H フィルタを用いて、イノベーション（計測値と推定値の偏差）より計算される指標に基づいて、選択的に組み合わせ推定を行う手法について検討する。制御手法と同様に、理論的なフィルタ則の構築、シミュレーションおよびモデル実験による評価を行う。

3. 研究の方法

以上の背景および目的の下、本研究を以下のとおり実施した。

1) ベースの動揺を一般的なジャイロセンサを用いて精度よく推定するための手法の開発を目的として、フィルタリングアルゴリズムの考案・定式化、シミュレーションによる評価、実験による評価を行った。

2) ベースの動揺周波数が大きく変動しても適応的に制御可能な手法の開発を目的として、制御アルゴリズムの考案・定式化、シミュレーションによる評価を行った。

3) 上記、動揺推定手法および適応制御手法を組み合わせた総合的な評価をシミュレーションにより評価を行った。

4. 研究成果

研究期間内において、船体の運動によって生じる動揺周波数の変動に対する適応ロバスト運動制御手法および適応ロバスト動揺推定手法を開発した。前者は各周波数に対する H 制御器を切り替える手法、後者は適応ゲインを用いたカルマンフィルタおよび通常の H フィルタを組み合わせ、これらを切り替える手法である。制御手法はシミュレーションによる評価、推定手法はシミュレーションおよびジャイロセンサを用いたモデル実験による評価を行い、それぞれ有効性を確認した。以下にそれぞれの詳細を説明する。

まず、本研究で開発した動揺推定のためのフィルタリング手法は、未知の時間変動をする線形システムに対して利用可能なフィルタリング手法であり、非線形システムに利用可能な場合もある。この場合は、非線形システムに対して線形モデルを適用し、誤差についてアルゴリズムの適応性およびロバスト性で対処するものである。フィルタリング手法のポイントは、イノベーションのパワーに基づいてゲインを適応化した適応カルマンフィルタと通常の H フィルタをそれぞれのイノベーションのパワーの比を基準として、スイッチングする点にある。これにより、ガウス性ノイズに効果的なカルマンフィルタと確定的なノイズやシステムの不確定性にロバストな H フィルタの利点を生かすことが可能である。

本手法の有効性を検証するために周波数が時間変動する単振動システムおよび海洋波による船舶の動揺システムを対象として、ジャイロセンサを想定して、角加速度データをを用いて動揺角を推定する問題を設定し、シミュレーションにより本手法の有効性を確認した。船舶動揺モ

デルとしては、線形システムのみならず復元項に軟化バネ（転覆モデルの基礎となる）や硬化バネを有する非線形システムについても適用を試みたが、いずれの場合も提案したアルゴリズムは有効であった。さらに、船舶の動揺システムについては、モータ制御により動揺を再現できる実験装置を用いて、比較的安価なジャイロセンサに本手法を適用して、実時間においても開発してアルゴリズムが実装可能であり、比較的ノイズが大きい環境においても有効な推定が可能であることを確認した。なお、これらの検証結果から、ノイズが大きい場合にはカルマンフィルタが選択され、モデル変動が大きい場合には H フィルタが選択されることを確認し、提案したフィルタリング手法が初期のねらいどおりの性能を発揮することを確認した。

さらに、本手法の開発過程において、既往の研究では見当たらなかった、システムの不可制御極（推定の意味で）が単位円上に存在する場合の、カルマンフィルタの逐次漸近安定性を保障する十分条件を導出し、それに基づいて適応カルマンフィルタの適応ゲイン採用の可否を判定している。この判定条件を適用した場合と、判定条件は適用せずすべての時間ステップで適応ゲインを採用した場合とをシミュレーションにより比較すると、判定条件を適用したフィルタの方がよい性能を示した。

これらの成果について、IEEE Transactions on Industrial Electronics へ regular paper として投稿し、掲載可となった。論文タイトルは "Adaptive Algorithms of Tuning and Switching Kalman and H Filters and Their Application to Estimation of Ship Oscillation with Time-Varying Frequencies" であり、early access バージョンについてはすでにインターネット上で閲覧可能である。

つぎに、周波数変動に対応する適応運動制御手法について説明する。H 制御をゲインスケジューリング化する手法および異なる周波数に対応した複数の H 制御器をスイッチングする手法をそれぞれ検討した。開発した動揺推定手法による周波数推定値により、ゲインスケジューリングおよびスイッチング手法をシミュレーションにより、それぞれ評価および比較を行った。その結果、どちらの手法も一定の制御性能を示した。また、比較の点においては、スイッチング手法の方が、スイッチングのタイミングで少し性能が低下するものの、全体的な制御性能としては、ゲインスケジューリングよりも優れた制御性能が得られることを確認した。

今後は、さらに外乱オブザーバによる手法との比較を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

M. Sato and M. Toda, "Adaptive Algorithms of Tuning and Switching Kalman and H Filters and Their Application to Estimation of Ship Oscillation with Time-Varying Frequencies", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 印刷中, web 上 early access version は既に閲覧可能

〔学会発表〕(計 1 件)

N. Sugiyama and M. Toda, "A Nonlinear Disturbance Observer Using Delayed Estimates --Its Application to Motion Control of an Underwater Vehicle-Manipulator System--", 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況（計 0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。