

| | |
|---------|--------------------------------|
| 氏名 | 田中 征治 |
| 授与した学位 | 博士 |
| 専攻分野の名称 | 工学 |
| 学位授与番号 | 博甲第97号 |
| 学位授与の日付 | 平成26年3月24日 |
| 学位論文の題目 | 回転型振子の振り上げ・安定化制御に関する研究 |
| 学位審査委員会 | 主査 忻 欣 副査 渡邊富夫 副査 山崎大河 副査 穂苅真樹 |

学位論文内容の要旨

劣駆動システムは、複雑な非線形の動特性や非ホロノミック拘束を有するために、その制御が難しいことが知られている。本論文では、振子型劣駆動システムの代表例の一つである回転型振子システムに対して、その振り上げ制御および安定化制御を行うための制御器の設計法を論じる。ここで、回転型振子とは、固定された軸を中心に水平面内を回転する駆動アームと、そのアームの先端に非駆動関節を介して取り付けられた振子から構成され、振子は垂直平面内を自由に回転できるようなシステムのことをいう。また、回転型振子の振り上げ・安定化制御とは、振子を直立姿勢（真上平衡点）まで振り上げるとともにアームを望ましい位置まで移動させ、振子とアームをその姿勢で静止させることをいう。本論文では、まず、振り上げ制御について、エネルギー制御法と呼ばれるシステムの総エネルギーに着目した制御手法を扱い、理論、および実験の両方において従来からの結果からの改善点を示す。つぎに、安定化制御について、安定な出力フィードバック制御器によって、与えられたプラントを安定化する強安定化の問題を扱い、強安定化制御器の存在性と設計法を示す。本論文は以下の6章で構成される。

第1章では、劣駆動システムの姿勢制御に関する研究背景、および本論文の主要な結果を、従来研究との比較とともに述べる。また、本論文の構成についてまとめる。

第2章では、回転型振子システムのモデルを示し、非線形の運動方程式を導出する。また、安定化制御器の設計で用いるため、システムを真上平衡点のまわりで線形化したモデルを導出する。

第3章では、回転型振子システムの総エネルギーに着目したエネルギー制御法による振り上げ制御問題を扱う。まず、制御則の特異点（制御入力トルクが無限大になる回転型振子の状態）を回避するための既存の十分条件に対して、そ

の必要十分条件を新たに提示する。次に、振子の大域定な動きの解析を行い、真下平衡点(振子が下向きに静止する点)がサドル型平衡点であることを関連付けることにより、従来研究において仮定されていた、振子が真下平衡点に留まるのを防ぐための初期条件と制御パラメータの制約を取り除けることを示す。具体的には、ラウス・フルビッツの判別法を用いて、真下平衡点におけるヤコビ行列が、開左半平面および右半平面にそれぞれ二つの固有値をもつことを示す。これにより、ルベーク測度ゼロの集合を除いたすべての初期状態に対し、振子を目標とする真上平衡点の任意の近傍まで振り上げられることを示す。また、先行研究よりも制御パラメータの選択範囲を拡大することができること、および従来研究で仮定されていた振子の初期条件に関する制約もほとんど無くすることができることを示す。さらに、数値シミュレーションによって、理論解析の結果の有効性を確認し、また、改善された制御パラメータの条件下では、振り上げ制御が素早く達成できることを示す。

第 4 章では、エネルギー制御法によって設計した回転型振子の振り上げ制御則の有効性を実機を用いて検証する。その有効性は、これまでに数値シミュレーションでは検証されていたが、実機による検証結果の報告は、本論文がはじめてである。本論文では、Quanser Consulting Inc. で開発された実験システムを使用して、エネルギー制御法の有効性を示すとともに、実験システムの開発元によって提供されている振り上げ制御則のサンプルを、本論文の結果と比較する。このサンプルで用いられている制御法は、振子の回転運動エネルギーのみを制御し、振り上げ制御の段階でアームは制御していないため、理論的および実験的に、本論文で提案した制御則の方が優れていることを示す。

第 5 章では、回転型振子の真上平衡点における強安定化の問題を扱う。回転型振子の安定化制御では、通常、真上平衡点における線形近似モデルを用いてその制御器が設計される。その際、通常、アームと振子の角度と角速度が測定可能な場合には、静的なフィードバック制御器が用いられ、アームと振子の角度のみが測定可能な場合には、オブザーバを用いたフィードバック制御器が用いられる。ただし、オブザーバに基づいて設計した制御器が安定か不安定かは自明ではなく、実システムにおいて、その安全性が保たれない可能性があるため、安定な制御器の使用が望ましいとされる。安定な出力フィードバック制御器によって制御対象を安定化することを強安定化といい、実システムの制御では、システムの保全性からも、強安定化制御器の使用が望ましいとされる。

本論文では、Acrobot や Pendubot と呼ばれる回転型振子とは異なる構造をもった振子型劣駆動システムの強安定化制御に関する先行研究にヒントを得て、真上平衡点における線形近似モデルの状態方程式を用いて、回転型振子の強安定化を達成するための適切な出力が存在するかどうかについて調査する。その

ため、調整可能なパラメータを用いて特定の出力を設計する。そのうえで、回転型振子の機械パラメータの性質と、線形近似モデルの状態方程式と特定の出力から構成されるシステムの伝達関数における極零点の関係を使用して、真上平衡点で回転型振子を局所安定化する強安定化制御器が常に存在すること、および強安定化制御器の設計手法を示す。また、数値シミュレーションによって、設計した強安定化制御器の有効性を検証し、さらに、設計した強安定化制御器がシステムのある程度の不確かなパラメータに対してもロバストであることを示す。

第 6 章では、本研究で得られた結果を総括し、今後の研究課題について述べる。

主業績

| | |
|------|---|
| No.1 | |
| 論文題目 | New Results of Energy-Based Swing-Up Control for Rotational Pendulum |
| 著者名 | S. Tanaka, X. Xin, T. Yamasaki |
| 発表誌名 | Proceedings of 18th IFAC World Congress, pp. 10673–10678, 2011 |
| No.2 | |
| 論文題目 | New Results of Energy-Based Swing-Up Control for Rotational Pendulum |
| 著者名 | S. Tanaka, X. Xin, T. Yamasaki |
| 発表誌名 | SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.4, No.6, pp. 394–400, 2011 |
| No.3 | |
| 論文題目 | Experimental Verification of Energy-Based Swing-up Control for a Rotational Pendulum |
| 著者名 | S. Tanaka, X. Xin, T. Yamasaki |
| 発表誌名 | Proceedings of SICE Annual Conference 2012, pp. 534–539, 2012 |
| No.4 | |
| 論文題目 | Studies on Stable Stabilizing Controllers for a Rotational Pendulum |
| 著者名 | S. Tanaka, X. Xin, T. Yamasaki |
| 発表誌名 | Proceedings of the IASTED International Conference on Control and Applications (CA 2013), pp. 85–91, 2013 |

関連業績

| | |
|------|--|
| No.1 | |
| 論文題目 | Revisiting Energy-Based Swing-up Control for the Pendubot |
| 著者名 | X. Xin, S. Tanaka, J. H. She, T. Yamasaki |
| 発表誌名 | Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Control Applications, pp. 1576–1581, 2010 |
| No.2 | |
| 論文題目 | New Analytical Results of Energy-Based Swing-up Control for the Pendubot |
| 著者名 | X. Xin, S. Tanaka, J. H. She, T. Yamasaki |
| 発表誌名 | International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol.52, No.6, pp. 110-118, 2013 |

論文審査結果の要旨

本論文は、劣駆動システムの代表例の一つである回転型振子システムにおける、振り上げ制御・安定化制御に関する新たな成果について述べている。本論文では、まず、振り上げ制御について、エネルギー制御法と呼ばれるシステムの総エネルギーに着目した制御手法を扱い、理論および実験の両方において従来の結果からの改善点を示している。つぎに、安定化制御について、安定な出力フィードバック制御器による安定化という強安定化の問題を扱い、強安定化制御器の存在性と設計法を示している。得られた成果は次のとおりである。

1. 回転型振子のエネルギー制御法による振り上げ制御問題に対して、まず、従来の研究で使われていた制御則の特異点を回避するための十分条件を改善し、その必要十分条件を与えている。つぎに、振子の大域的な動きの解析を行い、真下平衡点がサドル型平衡点であることを証明することにより、従来の研究において仮定されていた、振子が真下平衡点に留まるのを防ぐための初期条件と制御パラメータの制約を取り除けることを明らかにしている。さらに、数値シミュレーションにより、理論解析結果の有効性を確認し、改善された制御パラメータの条件下では、振り上げ制御が素早く達成できることを示している。
2. 回転型振子のエネルギー制御法による振り上げ制御則について、まず、Quanser Consulting Inc. で開発された実験システムを用いて、理論解析結果の有効性を示している。従来の研究は、数値シミュレーションによりその有効性を検証しているが、実機による検証結果の報告は、本論文が初めてである。つぎに、実験装置の開発元からサンプルプログラムとして提供されている、システムの一部のエネルギーのみに着目したエネルギー制御法の振り上げ制御則との比較を行い、理論的および実験的に本論文で提案した制御則の優位性を示している。
3. 回転型振子の真上平衡点における強安定化の問題を扱っている。アームと振子の角度による特定の出力を設計し、真上平衡点における線形近似モデルの状態方程式とその出力から構成されるシステムの伝達関数における極零点の関係を使用して、真上平衡点で回転型振子を局所安定化する強安定化制御器が常に存在すること、およびその制御器の設計法を示している。また、数値シミュレーションによって得られた理論結果の有効性を検証し、さらに設計した強安定化制御器が、機械パラメータがある程度の不確かさを持つ場合に対しても、ロバストであることを示している。

以上の結果より、本論文の内容は、学術的、実用的価値が極めて高いものと判断し、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

