

平成22年6月9日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560452

研究課題名（和文）劣駆動系の新しい非線形制御理論の構築とそのロボット制御への応用

研究課題名（英文）Development of New Nonlinear Control Theory for Underactuated Mechanical Systems with Its Application to Robot Control

研究代表者

忻 欣 (Xin Xin)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：70293040

研究成果の概要（和文）：本研究では、1つの非駆動関節を有するnリンクロボットを任意の初期状態からすべてのリンクが共に鉛直真上姿勢で静止した真上平衡点の任意の近傍まで振り上げる制御則の設計、ならびにその動きに関する大域的解析を、仮想合成リンクの逐次的な構築に基づき、非駆動関節の全ての配置に対して統一的行なうことに国内外で成功した。これは、1つの非駆動関節を有するロボットの振り上げ制御に関する従来の成果を統一的に扱うことのできる理論であり、受動性に着目したエネルギー制御法による多自由度劣駆動ロボットの制御系の設計・解析法に対し、新たな糸口と知見を与えるものとする。

研究成果の概要（英文）：This research concerns a swing-up control problem for an n-link revolute planar robot with any one of the joints being a passive joint. The goal of this study is to design and analyze a swing-up controller that can bring the robot into any small neighborhood of the upright equilibrium point with all links in the upright position. First, we address how to iteratively devise two series of virtual composite links separated by the passive joint to be used for designing a coordinate transformation on the angles of all active joints. Second, we devise an energy based swing-up controller that uses a new Lyapunov function based on that transformation. Third, we analyze the global motion of the robot under the controller and establish conditions on control parameters that ensure attainment of the swing-up control objective. The results obtained not only unify some previous results for some underactuated robots with a passive first joint, but also provide insight into the energy-based control of underactuated multi-degree-of-freedom systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：(1) ロボット (2) 非線形制御 (3) 劣駆動システム (4) エネルギー制御法 (5) 安定性解析 (6) 多自由度システム (7) 振り上げ制御 (8) 運動解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、非ホロノミック拘束を有する劣駆動系の制御は注目を集めている。移動ロボットや宇宙ロボットのような、速度拘束を有する劣駆動系(1階非ホロノミック系)については、多数の研究成果が報告されている。一方、非駆動関節を有する劣駆動ロボット、潜水艇や水上艇のような、加速度拘束を有する劣駆動系(2階非ホロノミック系)については、その状態方程式がドリフト項をもつ非対称アフィン系であり、これまで1階非ホロノミック系を扱うために考案されたアプローチをそのまま適用できないため、その制御には新たな設計・解析理論が必要となっている。

(2) 2自由度劣駆動系に関しては、国内外で理論と実機両面からよく研究されている。しかし、多自由度劣駆動系は、応用のニーズがあるにもかかわらず、その制御系に関する設計、とりわけ、解析理論の進展は遅いのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、多自由度劣駆動系に対して、劣駆動系固有の受動性などの特性を利用し、劣駆動系に対する新しい非線形制御理論を構築するとともに、多自由度鉄棒アクロバットロボットでその有効性を検証することを目的とする。具体的には、

(1) 多自由度劣駆動系の代表例として垂直平面にある3自由度、2入力の劣駆動アクロバットロボットを対象とし、その鉄棒上での「巧み」な運動を実現する制御則を開発するとともに、その制御系の安定性・性能限界などに関する解析法を確立する。

(2) 3自由度劣駆動ロボットの姿勢制御に関する研究成果を一般の多自由度のリンク系によって構成される劣駆動ロボットへ拡張する。

2. 研究の方法

(1) 多自由度劣駆動ロボット制御に関する研究が注目されつつある。3自由度の場合に関する研究では、水平面機構タイプが報告されているが、本研究のような垂直平面にあるタイプはあまり報告されていない。3自由度以上の劣駆動ロボットについては、その姿勢制御問題を、いくつかの自由度を順次固定することによって、2自由度の問題に帰着させるという考え方はあるが、「巧み」な運動を実現することは困難である。また、そのよう

な「硬い」制御は、多自由度系固有の性質を利用しないため、アクチュエータの駆動効率もよくないことが予想される。本研究の特色・独創的な点の1つは、多自由度劣駆動ロボットに装備する複数のアクチュエータを協調駆動させることのできる制御系を設計・解析することである。

(2) 劣駆動ロボットのダイナミクスは完全に線形化できないため、その姿勢制御問題に対して、部分線形化法による制御則は報告されている。しかし、閉ループ系の振る舞いがその初期状態と制御パラメータに依存するゼロダイナミクスによって決定されるため、ロボットの動きに関する解析は困難で、制御目的が実現されることは保証されない。そのため、劣駆動ロボットの受動性を利用して、リアプノフの安定性定理に基づく制御則の開発が注目を集めている。

(3) 関節1のみが非駆動である3自由度劣駆動ロボットを対象とする。リンク2とリンク3を1つの仮想合成リンクと考え、それに基づく2つの駆動関節の角度に関する座標変換を用いることで、その振り上げ制御系の設計・解析を行う。

(4) 劣駆動系は一つ一つの系の個性があるため、軸数、非駆動関節の配置、重力項の有無、あるいはリンクの質量分布によってさえも性質が根本的に変わり、制御にも異なるアプローチが要求される。本研究では、一般の多自由度のリンク系によって構成される劣駆動ロボットに対して、劣駆動の機構にしたがって、提案した3自由度劣駆動ロボットの振り上げ倒立の姿勢制御則をどのように拡張すればよいかについて研究する。

(5) 1つの非駆動関節を持つ n 自由度劣駆動ロボットを対象とする。そこで、複数の仮想合成リンクの考え方を提案し、それに基づく座標変換を構築するとともに、その新しい座標系において、エネルギーと駆動関節の角度、角速度を含むリアプノフ関数を構築し、リアプノフ安定性定理に基づいて制御則を設計する。次に、その閉ループ系の振る舞いに関する解析を行う。特に、閉ループ系の解が収束し得るいくつかの不変集合に対して、目標不変集合のみを安定化させ、それ以外の不変集合を出現させない、あるいは不安定化させるような制御パラメータの選定法を与える。さらに、数値シミュレーションにより、その設計・解析法の有効性、妥当性を検討する。

4. 研究成果

鉄棒運動をする体操選手の2リンクモデルである関節1(手)が非駆動、関節2(腰)が駆動の2リンクロボットを対象とし、大域的な安定化制御(振り上げ制御)(Int. J. Robust and Nonlinear Control 2007)を実現する制御系の設計・解析を行うとともに、製作した劣駆動ロボット実機による振り上げ倒立制御に成功している。また、鉄棒運動をする体操選手の3リンクモデルである関節1(手)が非駆動、関節2(肩)、関節3(腰)が駆動の3リンクロボットを対象とし、駆動リンクによる仮想的に合成したリンク(VCL)の考え方を提案し、それに基づく振り上げ制御系の設計・解析法(IEEE Trans. on Robotics 2007)を与えている。さらに、垂直平面における n リンクロボットを対象とし、複数の仮想合成リンクの逐次的な構成法を考案し、その関節1のみが非駆動の場合(Automatica 2009)と任意の1つの関節が非駆動の場合(計測自動制御学会論文集2009)の振り上げ制御問題を国内外で初めて解決している。具体的成果について以下のように紹介する。

(1) エネルギー制御法によるAcrobotの振り上げ制御:設計と解析(Int. J. Robust and Nonlinear Control, 2007等)

劣駆動システムの代表例である2リンク劣駆動ロボットAcrobotを対象とし、Acrobotを任意の初期状態から真上平衡点の任意の近傍まで振り上げる制御則の設計と、Acrobotの動きに関する大域的解析を目的とした。まず、Lyapunovの安定性理論に基づき、エネルギー制御法による振り上げ制御則を提案するとともに、その制御則に特異点が存在しないための制御パラメータに関する必要十分条件を与えた。また、Acrobotのエネルギーの収束値とその動きを大域的に解析した。その解析により、提案した制御則で、Acrobotは、任意の初期状態から、真上平衡点の任意の近傍まで振り上げられるか、あるいは、ある平衡点集合に属する1つの平衡点に収束するかの何れかになることを明らかにした。また、その平衡点集合が真下平衡点のみを持つように制御パラメータをいかに選ぶかを示し、その点が閉ループ系の不安定な双曲型平衡点であることを証明した。したがって、Acrobotは、ある測度が0である集合を除いた任意の初期状態から、真上平衡点の任意の近傍まで振り上げられることを解明した。これにより、エネルギー制御法がAcrobotの振り上げ制御に有効であることを理論的に示した。

(2) 非駆動の根元関節を有する3リンクロ

ボットの振り上げ制御とその動きの解析(IEEE Trans. on Robotics, 2007等)

鉄棒運動をする体操選手の3リンクモデルとしての関節1(根元関節)が非駆動、関節2、3が駆動のロボット(以下PAA型垂直ロボットと呼ぶ)を対象とし、PAA型垂直ロボットを任意の初期状態から真上平衡点の任意の近傍まで振り上げる制御則の設計と、その動きに関する大域的解析を目的とした。まず、PAA型垂直ロボットの固有のダイナミクスや平衡姿勢の構造を利用し、リンク2とリンク3を1つの仮想合成リンクと考え、それに基づく2つの駆動関節の角度に関する座標変換を提案した。また、その座標変換を用いて新たなLyapunov関数を選定し、エネルギー制御法による振り上げ制御則を提案するとともに、任意の状態に対して、その制御則に特異点が存在しないための制御パラメータに関する必要十分条件を与えた。つぎに、その振り上げ制御でのロボットの動きを解析した。その解析により、提案した制御則で、PAA型垂直ロボットは、任意の初期状態から、真上平衡点の任意の近傍まで振り上げられるか、あるいは、ある平衡点集合(真上平衡点を含まずに、真下平衡点を含む)に属する1つの平衡点に収束するかの何れかになることを明らかにした。さらに、その平衡点集合が真下平衡点のみをもつように、制御パラメータに関する条件を与えると同時に、真下平衡点が不安定であることを示し、その振り上げ制御でのロボットの動きを大域的に初めて解析した。最後に、ある体操選手の3リンクモデルのパラメータを用い、数値シミュレーションにより本設計・解析法の有効性を確認した。

この成果はエネルギー制御法による多自由度劣駆動ロボットの制御系の設計・解析法に対して、新たな糸口と知見を与えた。

(3) 非駆動の根元関節を有する n リンクロボットの仮想的な合成リンクによる振り上げ制御とその動きの解析(Automatica, 2009等)

垂直平面における根元関節のみが非駆動である n リンクロボットを対象とし、そのロボットを任意の初期状態から真上平衡点の任意の近傍まで振り上げる制御則の設計と、その動きに関する大域的解析を行った。具体的には、そのロボットの平衡姿勢の構造を利用し、 $n-1$ 本の仮想的な合成リンクを設計し、それに基づく駆動関節の角度に関する座標変換を用いることで、制御則の設計、およびその振り上げ制御でのロボットの動きの大域的な解析に国内外で初めて成功している。

(4) 1つの非駆動関節を有する n リンクロボットの振り上げ制御:設計と解析(計測自動制御学会論文集2009等)

1つの非駆動関節を有する n リンクロボットを任意の初期状態からすべてのリンクが共に鉛直真上姿勢で静止した真上平衡点の任意の近傍まで振り上げる制御則の設計、ならびにその動きに関する大域的解析を、非駆動関節の全ての配置に対して統一的行なうことを目的とした。まず、非駆動関節で分けられる2つの仮想合成リンクシリーズの逐次的な構築法を考案するとともに、それらに基づく駆動関節の角度に関する座標変換を提案した。つぎに、その座標変換を用いた振り上げ制御則を設計し、その制御則のもとでの n リンクロボットの動きを大域的に解析する。その結果、 n リンクロボットは、任意の初期状態から、真上平衡点の任意の近傍まで振り上げられるか、あるいは、真上平衡点を含まないある平衡点集合に属する1つの平衡点に収束することを明らかにした。さらに、2つの仮想合成リンクシリーズを用いて、その平衡点集合が1つの不安定平衡点だけを持つような制御パラメータに関する条件を示し、本論文の振り上げ制御目的が達成できるための制御パラメータの選定法を与える。最後に、4リンク劣駆動ロボットを用い、数値シミュレーションにより本設計・解析法の有効性を確認した。

この成果は、一つの関節が非駆動である n リンクロボットに対して、仮想合成リンクの逐次的な構築に基づき、その振り上げ制御系を設計・解析する方法を確立した。これは、1つの非駆動関節を有するロボットの振り上げ制御に関する従来の成果を統一的に扱うことのできる理論であり、受動性に着目したエネルギー制御法による多自由度劣駆動ロボットの制御系の設計・解析法に対し、新たな糸口と知見を与えるものと考えられる。

(5) H_∞ 制御を用いた外乱除去制御とその車両やロボットの制御への応用 (IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2007 等)

H_∞ 制御を用いた外乱除去制御とその車両やロボットの制御への応用に関する研究成果を得ている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ①. Xin, X., She, J.H., Yamaski, T., Liu, Y.N., Swing-up Control Based on Virtual Composite Links for n -Link, Underactuated Robot with Passive First Joint, Automatica, 査読有, vol. 45, no. 9, pp. 1986-1994, 2009. (Regular Paper)

- ②. 忻, 余, 山崎, 1つの非駆動関節を有する n 自由度ロボットの振り上げ制御: 設計と解析, 計測自動制御学会論文集, 査読有, vol. 45, no. 5, 251-260, 2009.
- ③. 余, 忻, 山浦, 等価入力外乱手法に基づく制御系の解析と設計法, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, vol. 75, no. 760, no. 760, pp. 3332-3338, 2009.
- ④. 余, 忻, 山浦, 等価入力外乱手法に基づく二連台車の位置決め制御, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, vol. 75, no. 758, pp. 2750-2756, 2009.
- ⑤. 余, 小林, 忻, 今津, 大山, 仮想摩擦に基づく Acrobot の軌道計画, 計測自動制御学会論文集, 査読有, vol. 44, no. 9, pp. 729-734, 2008.
- ⑥. Xin, X. and Kaneda, M., Swing-up control for a 3-DOF gymnastic robot with passive first joint: design and analysis, IEEE Transactions on Robotics, 査読有, vol. 23, no. 6, pp. 1277-1285, 2007.
- ⑦. Xin, X. and Kaneda, M., Analysis of the energy based swing-up control of the Acrobot, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 査読有, vol. 17, issue 16, pp. 1503-1524, 2007.
- ⑧. She, J. H., Xin, X. and Ohyama, Y., Estimation of equivalent input disturbance improves vehicular steering control, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 査読有, vol. 56, no. 6, Part: 2, pp. 3722 - 3731, 2007.

[学会発表] (計 36 件)

- ①. Xin, X., Swinging up multiple parallel pendulums on a cart via energy control, Proceedings of Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, Shanghai, 18 December, 2009.
- ②. Xin, X. and Guo, L., Can the energy and actuated variables of underactuated mechanical systems be controlled? Example of the Acrobot with counterweight, Proceedings of Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, Shanghai, 16 December, 2009.
- ③. Xin, X., On the energy based control for underactuated mechanical system, Proceedings of ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Fukuoka, 18 August, 2009.

- ④. Xin, X., She, J. H. and Yamasaki, T., Swing-up control for n-link planar robot with single passive joint using the notion of virtual composite links, Proceedings of 47th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 4339-4344, Cancun, 11 December 2008.
- ⑤. Xin, X., Analysis of the energy based swing-up control for a double pendulum on a cart, Proceedings of 17th IFAC World Congress, Seoul, 8 July, 2008.
- ⑥. Xin, X., Kaneda, M., Yamasaki, T. and She, J. H., Swing-up control based on virtually composite links for an n-link underactuated robot with passive first joint, Proceedings of the 17th IFAC World Congress, Seoul, 7 July, 2008.
- ⑦. Xin, X. and Kaneda, M., Swing-up control for a 3-DOF gymnastic robot with passive first joint: Design and analysis, Proceedings of 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, 12 December, 2007.

[その他]

ホームページ

<http://cosmos.c.oka-pu.ac.jp/~xxin/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者 忻 欣 (Xin Xin)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：70293040

(2) 研究分担者 兼田 雅弘 (Masahiro Kaneda)

(2007年度のみ)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：50033238

(3) 連携研究者

()

研究者番号：