

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22560452

研究課題名(和文) 劣駆動系の非線形制御理論の新展開と体系化

研究課題名(英文) New Development and Systematization of Nonlinear Control Theory for Underactuated Systems

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、劣駆動系の制御系の設計・解析法に関して、劣駆動度(一般化座標数と制御入力数の差)1の系の目標軌道への追従制御、劣駆動度2の系の振り上げ・安定化制御、劣駆動系の安定な制御器による安定化などの中核的な問題に挑戦し、7つの2自由度および5つの3自由度以上の劣駆動系を対象とし、劣駆動系の物理的構造とその固有の非線形特性を用い、上記の中核問題を解決している。得られて成果は国内外の権威のある学術雑誌に11編、Springer社の専門書1冊、21編の査読付きの国際会議論文などに掲載されている。本研究は、劣駆動系に対する非線形制御理論の新展開に成功し、その体系化に貢献している。

研究成果の概要(英文)：This research aims to challenge the following key problems for control design and analysis for underactuated systems: trajectory control for systems with underactuation degree (the difference between the numbers of its control input and degrees of freedom of the system) one, swing-up and stabilizing control for underactuation degree two, strong stabilizing control for underactuated systems. For seven systems with 2 degrees of freedom and five systems with higher degrees of freedom, by using the fundamental physical properties inhibited in these systems, this research presents refined solutions to the above key control problems. The achieved results have been published in 11 authoritative academic journal papers, 1 monograph of Springer, and 21 refereed internal conference papers. This research made an important contribution to new development to the nonlinear control theory for underactuated robotic systems.

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：5107

キーワード：劣駆動システム ロボット 非線形制御 エネルギー制御法 振り上げ制御 安定性解析 運動解析

### 1. 研究開始当初の背景

近年、制御入力の数が一般化座標数より少ない劣駆動系の制御は注目を集めている。劣駆動系の例としては、移動ロボット、歩行ロボット、アクロバットロボット、柔軟リンクロボット、宇宙ロボット、潜水艇や水上艇などが挙げられる。劣駆動系の有効な制御法が確立できれば、ロボットの軽量化、コストダウン、省エネルギー化、耐故障性のみならず、新しい機器の創出などに貢献できると期待されている。しかし、そのような劣駆動系には一般に非ホロノミック拘束などの強い非線形性があるため、その制御には新たな設計・解析理論が必要となっている。

研究代表者は、軽量化を極限まで求める宇宙ロボットなどへの応用を目指し、劣駆動ロボットの開発・制御に取り組んできた。特に、劣駆動度 1 (一般化座標数と制御入力数の差) のいくつかの 2、3 自由度のロボットの振り上げ制御問題に対して、劣駆動系の受動性を利用した制御系の設計・解析に関する研究を行い、系全体のエネルギーと駆動関節角度および角速度を制御するというエネルギー制御法が有効であることを理論的に明らかにしてきた。

劣駆動系の制御に関する研究全体を眺めると、劣駆動度 1 の系の大域的な安定化制御などに関する一定の成果が報告されている。しかし、理論の重要性および応用のニーズがあるにもかかわらず、劣駆動系に対して、劣駆動度 1 の系の目標軌道への追従制御問題、劣駆動度 2 以上の系の振り上げ制御問題、劣駆動系の安定な制御器による安定化問題などはまだ解決されていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、劣駆動系の物理的構造とその固有の非線形特性を用い、劣駆動度 1 の系の目標軌道への追従制御、劣駆動度 2 以上の系の振り上げ制御、劣駆動系の安定な制御器による安定化などの中核的な問題に挑戦し、劣駆動系に対する非線形制御理論の新展開と体系化を目的とする。

### 3. 研究の方法

劣駆動系に対して、劣駆動系の物理的構造とその固有の非線形特性を用い、全体のエネルギーと駆動関節角度および角速度を制御するというエネルギー制御法に着目し、その適応範囲について調査するとともに、非線形制御の安定性理論を活用し、研究目的を達成する。

### 4. 研究成果

本研究では、非駆動関節を有する劣駆動ロボットの制御系の設計・解析に対して、7つの 2 自由度および 5 つの 3 自由度以上の劣駆動系を対象とし、その受動性などの固有性質を利用し、いくつかの劣駆動系の中核問題を

を解決した。得られて成果は国内外の権威のある学術雑誌に 11 編、ならびに 21 編の査読付きの国際会議論文などに掲載されている。また、その成果に対して、Springer 社からの誘いで、4 名の専門家の審査の結果より、「Control Design and Analysis for Underactuated Robotic Systems . X. Xin, Y. Liu, Springer」(319 頁の専門書) が出版されている。

その主要な研究成果について、以下のように紹介する。

#### 1. 2 リンク劣駆動ロボットの振り上げ制御：理論と実験検証 (雑誌論文 4,6,7,8)

本研究では、第 1 に、リモート駆動型 Acrobot (第 2 関節のみが駆動である 2 リンクロボット) を対象とし、そのエネルギー制御法を用いた振り上げ安定化制御則を提案し、そのロボットの大域的に動きを解明するとともに、提案した制御則の有効性を理論と実験より明らかにした。

第 2 に、カウンターウェイト付 Acrobot を用い、エネルギー制御法の有効性とそのロボットの平衡点における線形近似モデルの可制御性との関連性を示すとともに、シミュレーションによりその理論結果の妥当性を確認した。

第 3 に、Pendubot (第 1 関節のみが駆動である 2 リンクロボット) を対象とし、そのエネルギー制御法を用いた振り上げ安定化制御則を提案し、そのロボットの動きを大域的に解明するとともに、提案した制御則の有効性を理論とシミュレーションより明らかにした。

第 4 に、回転型振子に対して、そのエネルギー制御法を用いた振り上げ安定化制御則を提案し、そのロボットの大域的に動きを解明するとともに、提案した制御則の有効性を理論と実験より明らかにした。

#### 2. 任意の 1 つの関節が非駆動である n リンクロボットの振り上げ制御 (雑誌論文 1,2,12)

本研究では、任意の 1 つの関節が非駆動である n リンク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、ならびにその動きに関する大域的解析を、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に基づき、非駆動関節の全ての配置に対して統一的行った。また、振り上げ制御の目的に達成するために、制御パラメータに関する選定法を与えている。それより、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を確立した。

#### 3. エネルギー制御法による劣駆動度 2 の系の大域的な安定化制御 (雑誌論文 3)

本研究では、まず、台車つき直列 2 重振子を対象とし、その全体エネルギーと駆動関節

をそれぞれの目標値に制御するという未解決問題を扱い、エネルギー制御法をその振り上げ制御問題へ適用し、その振り上げ制御則を設計するとともに、その未解決なエネルギーの収束性の解析問題に挑戦し、系全体のエネルギーと台車の変位および速度がそれぞれの目標値への収束性を明らかにした。また、その制御則による台車つき直列2重振子の振り上げ・安定化制御へ応用し、シミュレーションにより、提案した制御則の有効性を示した。

その成果を垂直平面における関節1のみが駆動、関節2と3が非駆動での3リンクロボットへの拡張に試み、3リンクロボットの新たな固有物理的性質を示し、それを活用することにより、エネルギー制御法によるその3リンクロボットの制御系の設計・解析に成功している。さらに、数値シミュレーションなどにより、提案した制御則でのロボットの動きを解析し、制御則の有効性や限界を示した。

#### 4. 部分エネルギーを用いた可変長振子の軌道追従制御とその動作解析 (雑誌論文 11)

本研究では、パラメータ励振系の一例として広く知られる2自由度1入力の変長振子を対象とし、それを任意の姿勢から、ある目標軌道へ追従させる制御問題を扱った。まず、従来のエネルギー制御法を用いて設計される追従制御則には回避しにくい特異点が存在することを示した。次に、系全体のエネルギーの代わりに、可変長振子の回転による運動エネルギーと位置エネルギーのみを用いたエネルギー制御による追従制御則を提案するとともに、その制御則に特異点がないことを示し、その可変長振子の動きに関する解析を行い、追従制御目的が達成できることを明らかにした。

#### 5. 柔軟関節を有する2自由度劣駆動ロボットの振り上げ制御 (雑誌論文 10)

近年、ロボットの軽量化に伴い、剛性が低下することで振動が発生し正確な作業が困難になるため、柔軟ロボットの制御問題が注目を浴びている。

本研究では、2本の剛体リンクとそれらを繋ぐ関節に回転方向に作用するバネを有する柔軟ロボットを対象とし、そのロボットを鉛直平面において真上平衡点へ振り上げ安定化することを目的とした。まず、PD制御則では真上平衡点近傍で安定化できるための機械パラメータ及び制御パラメータに関する条件を導出した。次に、そのPD制御則では安定化できないロボットに対して、エネルギー制御法による振り上げ制御則を設計し、そのロボットの動きに関する解析を試みた。さらに、そのロボットが真上平衡点近傍まで振り上げられ、振り上げ制御から安定化制御へ切り替えられることをシミュレーションより確認した。

#### 6. 2自由度劣駆動ロボットの強安定化器の存在性と設計法 (雑誌論文 9)

システムの保全性から、現場のエンジニアは不安定な制御器を使うことに抵抗があり、また、制御対象が強安定化(安定な制御器で安定化)可能であるための条件を導くことは、同時安定化問題の解決にも役に立つことから、強安定化に関する研究がよく行われている。そこで、本研究では、2自由度劣駆動ロボットの代表例であるAcrobotとPendubotなどの劣駆動度1の系の強安定化器の存在性のみならず、その実用性に優れた低次元の強安定化器の存在性を明らかにし、さらにその解析的な設計法を確立した。なお、この成果に関する論文は制御分野に権威のあるAutomaticaに掲載された一年間に、500回程度のアクセスやダウンロードされたことがAutomaticaからの朗報が入った。

#### 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 11 件)

以下の論文は全部査読有であり、SCIはScience Citation Indexの省略である。

- 1) 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 忻欣, 余錦華, 山崎大河, 計測自動制御学会論文集 **45**, 251-260 (2009).
- 2) Swing-up control based on virtual composite links for n-link underactuated robot with passive first joint. X. Xin, J.H. She, T. Yamasaki, Y. Liu, *Automatica* **45**, 1986-1994 (2009). (Regular paper) (SCI paper)
- 3) Analysis of the energy-based swing-up control for the double pendulum on a cart. X. Xin, *International Journal of Robust and Nonlinear Control* **21**, 387-403 (2011). (SCI paper)
- 4) New results of energy-based swing-up control for a rotational pendulum. S. Tanaka, X. Xin, T. Yamasaki, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration* **4**, 394-400 (2011).
- 5) A unified solution to swing-up control for n-link planar robot with single passive joint based on virtual composite links and passivity. X. Xin, J.H. She, Y. Liu, *Nonlinear Dynamics* **67**, 909-923 (2012). (SCI paper)
- 6) Energy-based swing-up control for a remotely driven acrobot: Theoretical and experimental results. X. Xin, T. Yamasaki, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **20**, 1048-1056 (2012). (SCI paper)
- 7) New analytical results of energy-based swing-up control for the Pendubot. X.

- Xin, S. Tanaka, J.H. She, T. Yamasaki, *International Journal of Non-Linear Mechanics* **52**, 110-118 (2013). (SCI paper)
- 8) On simultaneous control of the energy and actuated variables of underactuated mechanical systems -example of the Acrobot with counterweight-. X. Xin, *Advanced Robotics*, **27**, 959-969 (2013). (SCI paper)
  - 9) Reduced-order stable controllers for two-link underactuated planar robots. X. Xin, Y. Liu, *Automatica* **49**, 2176-2183 (2013). (SCI paper)
  - 10) A set-point control for a two-link underactuated robot with a flexible elbow joint. X. Xin, Y. Liu, *Transactions of the ASME -Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* **135**, 10 pages (September 2013). (SCI paper)
  - 11) Trajectory tracking control of variable length pendulum by partial energy shaping. X. Xin, Y. Liu, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **19**, 1544-1556 (2014) (SCI paper)

[学会発表](計 21 件)

査読付きの国際学術会議論文のみをリストする。

- 1) On the energy based control for underactuated mechanical systems. X. Xin, *Proceedings of ICROS-SICE International Joint Conference 2009*, 1465-1470 (2009) (Fukuoka, Japan)
- 2) Can the energy and actuated variables of underactuated mechanical systems be controlled? -Example of the Acrobot with counterweight-. X. Xin, L. Guo, *Proceedings of Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*, 1962-1967 (2009) (Shanghai, China)
- 3) Swinging up multiple parallel pendulums on a cart via energy control. X. Xin, *Proceedings of Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*, 7351-7356 (2009) (Shanghai, China)
- 4) A rewinding approach to motion planning for acrobat based on virtual friction, J.H. She, X.Z. Lai, X. Xin, L.L. Guo, *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 471-476 (2010) (Viña del Mar, Chile)
- 5) Revisiting energy-based swing-up control for the Pendubot. X. Xin, S. Tanaka, J.H. She, T. Yamasaki, *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Control Applications*, 1576-1581 (2010) (Yokohama, Japan)
- 6) Swing-up and stabilizing control for two-link underactuated robot with flexible elbow joint. X. Xin, *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, 6127-6132 (2011) (Yantai, China)
- 7) New results of energy-based swing-up control for rotational pendulum. S. Tanaka, X. Xin, T. Yamasaki, *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, 10673-10678 (2011) (Milano, Italy)
- 8) Trajectory tracking control of pendulum with variable length by partial energy shaping. X. Xin, T. Shinji, T. Yamasaki, C.Y. Sun, *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, 10679-10684 (2011) (Milano, Italy)
- 9) Set-point control for folded posture of 3-link underactuated gymnastic planar robot: Beyond the swing-up control. X. Xin, Y. Liu, J. H. She, L. Guo, *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, 11875-11880 (2011) (Milano, Italy)
- 10) Swing-up control for a two-link underactuated robot with a flexible elbow joint: New results beyond the passive elbow joint. X. Xin, *Proceedings of 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, 2481-2486 (2011) (Orlando, USA)
- 11) Existence and design of strongly stabilizing controller for the Acrobot. X. Xin, K. Juuri, *Proceedings of the 31st Chinese Control Conference*, 1446-1451 (2012) (Hefei, China)
- 12) Experimental verification of energy-based swing-up control for a rotational pendulum. S. Tanaka, X. Xin, T. Yamasaki, *Proceedings of SICE Annual Conference 2012*, 534-539 (2012) (Akita, Japan)
- 13) Existence and design of a strongly stabilizing controller for the Pendubot. X. Xin, K. Juuri, *Proceedings of SICE Annual Conference 2012*, 1598-1602 (2012) (Akita, Japan)
- 14) Existence and design of reduced-order stable controllers for two-link underactuated planar robots. X. Xin, K. Juuri, Y. Liu, C.Y. Sun, *Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control*, 4971-4976 (2012) (Maui, USA)
- 15) Reduced-order stable stabilizing

- controllers for remotely driven acrobot: Existence and design method. X. Xin, Y. Liu, *Proceedings of the 2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation*, 1627-1632 (2013) (Hangzhou, China)
- 16) Global stabilization control for a two-link underactuated robot with a flexible elbow joint. X. Xin, Y. Liu, J. Wu, *Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference*, 1520-1525 (2013) (Xi'an, China)
- 17) Analysis of the simultaneous control of energy and actuated variable of TORA with pendulum. K. Sumida, X. Xin, T. Yamasaki, *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 1267-1272 (2013) (Takamatsu, Japan)
- 18) Studies on stable stabilizing controllers for a rotational pendulum. S. Tanaka, X. Xin, T. Yamasaki, *Proceedings of the 15th IASTED International Conference on Control and Applications*, 85-91 (2013) (Oahu, Hawaii, USA).
- 19) On n-Link planar revolute robot: Motion equations and new properties, Yannian Liu, Xin Xin, Jinglong Wu, *Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation* (2014) (Shenyang, China)
- 20) Simultaneous control of energy and actuated variable of 3-Link planar robot with underactuation degree two and its application. Y. Liu, X. Xin, M. Yamakita, *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, (2014) (Nanjing, China)
- 21) Design and analysis of energy-based controller for 3-Link robots with a single actuator. X. Xin, Y. Liu, C. Sun, *Proceedings of the 19th IFAC World Congress*, (2014) (Cape Town, South Africa).

〔図書〕(計 2 件)

1. Energy-based control for underactuated mechanical systems. X. Xin, A Chapter in Theory and Applications of Complex Systems and Robust Control (editors by J. Huang, K.Z. Liu, and Y. Ohta), 177-190, Tsinghua University Press (2010)
2. Control Design and Analysis for Underactuated Robotic Systems. X. Xin, Y. Liu, Springer. (2014) (Monograph of 319 pages)

〔その他〕

ホームページ等

<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