

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06504

研究課題名（和文）高劣駆動度系の新しい制御理論の構築と応用

研究課題名（英文）New Control Theory of Mechanical Systems with High Underactuation: Development and Application

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） 3,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、劣駆動ロボットの実際応用を目指し、劣駆動度（一般化座標数と制御入力数の差）1の系に関する研究成果をもとに、高劣駆動度（劣駆動度2以上）系の物理的構造とその固有の非線形特性を活かして、高劣駆動度系の可制御性と可観測性、高劣駆動度系の振り上げ・安定化制御、および振り下げ制御などの中核問題を解決した。垂直平面における複数の非駆動関節を持つnリンク劣駆動ロボットの可制御性と可観測性であるための必要十分条件を示し、高劣駆動度系の新しい安定化制御系の設計・解析法を提案し、高劣駆動度系に関する新しい制御理論を構築している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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、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、省エネルギー化などに貢献できると期待されている。

本研究は、高劣駆動度（一般化座標数と制御入力数の差）2以上の系の新しい制御理論の構築と応用を行い、非線形性の強い他の様々な対象の制御にも波及効果があるものと確信する。また、本研究は、劣駆動型機構等の新たな機能性を発揮する機器の創出に貢献することが期待できると確信している。

研究成果の概要（英文）：Aiming at practical applications of underactuated robots, based on the results of underactuation degree (difference between the number of degree of freedom and input) one, this research studies concerns several fundamental problems of controlling underactuated mechanical systems with underactuation degree more than or equal to two. This research presents necessary and sufficient conditions of the linear controllability and observability of n-link planar robot moving in vertical plane with several passive joints, proposes new energy-based swinging-up control, angular momentum based stabilization control, swing-down control for planar multiple link underactuated robots. This results contribute to the development of control theory for underactuated mechanical systems and paves a way to speed up the applications of these systems.

研究分野：制御工学

キーワード：劣駆動系 非線形制御 ロボット制御 エネルギー制御法 安定性解析 運動解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 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、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。

(2) 劣駆動系の制御に関する研究全体を眺めると、劣駆動度(一般化座標数と制御入力数の差) 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が、高劣駆動度系(劣駆動度2以上の系)に対する制御系の設計・解析理論の進展は遅い。

### 2. 研究の目的

本研究では、劣駆動ロボットの実際応用を目指して、劣駆動度1の系に関する研究成果をもとに、力学系・生物系の本質から制御を考えることにより、高劣駆動度系の物理的構造とその固有の非線形特性を活かして、高劣駆動度系の可制御性と可観測性、高劣駆動度系の安定化制御などの中核問題を解決し、高劣駆動度系の新しい制御理論を構築する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 高劣駆動度系の可制御性と可観測性

劣駆動系の代表例としての鉛直平面における $n$ リンク劣駆動ロボット(図1)を対象とし、その線形可制御性と可観測性を解析的に明らかにする。

そのロボットの真上平衡点(すべてのリンクが鉛直真上姿勢にある)の安定化問題を解決するために、その線形近似モデルの可制御性と可観測性の解明は重要である。先行研究では、リンクの質量がすべてその末端に集中するという特殊な場合に対して、根元関節のみが駆動であるロボットは可制御と可観測であることが示されている。しかし、質量が末端に集中しないリンクの場合の可制御性と可観測性は明らかにされていなかった。

そこで、代表者は1つの駆動関節のみを持つ $n$ リンク劣駆動ロボットを対象とし、リンクに関する仮定を設けずに、根元関節あるいは末端関節のみが駆動である場合、そのロボットの機械パラメータに依存せず、そのロボットはその真上平衡点において可制御と可観測であることを明らかにした(IEEE Transactions on Automatic Control, 2016)。この研究成果をもとに、根元関節あるいは末端関節でない中間関節が駆動の場合について、以下の研究を行う。

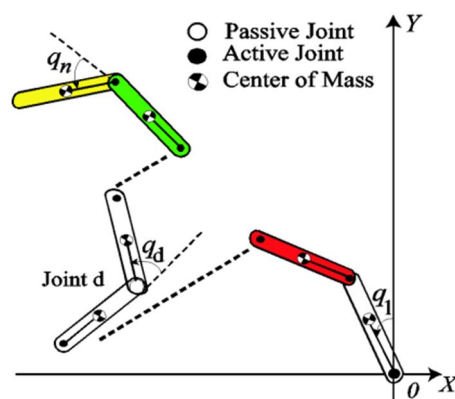


図1  $n$ リンク劣駆動ロボット

#### ① 1つの中間関節のみが駆動である $n$ リンク劣駆動ロボットの可制御性と可観測性

代表者は、 $n$  ( $n \geq 3$ ) が数値的に与えられたとき、不可制御あるいは不可観測であるロボットの数値例を発見している。そこで、そのロボットが可制御と可観測であるための必要十分条件を示すとともに、そのロボットの物理的構造、機械パラメータの性質を用いて、不可制御あるいは不可観測であるロボットが存在するかどうかを解析的に明らかにする。

#### 2つ以上の中間関節が駆動である $n$ リンク劣駆動ロボットの可制御性と可観測性

代表者は「そのロボットが可制御と可観測であるための必要十分条件は少なくとも2つの駆動中間関節が隣接することである。」という仮説を持っている。そこで、まず、そのロボットの可制御性と可観測性はその駆動関節の配置、機械パラメータとの関係を解析的に明らかにする。つぎに、その仮説を厳密に証明することを試みるとともに、2つの駆動中間関節が隣接しない場合に対して、不可制御あるいは不可観測のロボットが存在するかどうかを解析的に明らかにする。

その他の2つ高劣駆動度系の可制御性を解析的に明らかにする。

## (2) 高劣駆動度系の振り上げ・安定化制御

1つ関節のみ駆動である多リンクロボットを対象とし、その振り上げ・安定化制御問題に対して、エネルギー制御法の有効性や角運動量に着目した安定化制御器を研究する。

## (3) 劣駆動度系の振り下げ制御とその応用

劣駆動ロボットのすべてのリンクが共に鉛直真下姿勢で静止した真下平衡点への振れ止め制御は、クレーン系の振れ止め制御や体操競技の姿勢制御などに求められるものである。その系の非線形性を生かした非線形制御則を設計・解析するとともに、閉ループ系の代表極の実部が最小となるような制御ゲインを求める最適問題を研究する。

## 4. 研究成果

### (1) 高劣駆動度の $n$ リンクロボットなどの可制御性と可観測性

図1に示す鉛直平面における  $n$  リンク劣駆動ロボットを対象とし、根元関節あるいは末端関節でない中間関節が駆動の場合について、以下の主な研究成果を挙げた。

① 1つの中間関節のみが駆動である  $n$  リンク劣駆動ロボットについて、そのロボットの物理的構造、機械パラメータの性質を用いて、不可制御あるいは不可観測であるロボットが存在することを解析的に明らかにした。

2つ以上の中間関節が駆動である  $n$  リンク劣駆動ロボットについて、そのロボットの駆動関節の配置、機械パラメータとの関係を解析した結果、2つの駆動中間関節が隣接しない場合に対して、不可制御あるいは不可観測のロボットが存在することを解析的に明らかにした。また、そのロボットが可制御と可観測であるための必要十分条件は隣接する2つの駆動中間関節が存在することをはじめて示した。以上の成果は国際学術雑誌 IET Control Theory & Applications (2021), Automatica (2018) に掲載されている。

$n$  リンクの振子の根元関節を台車に載せて実装する台車型  $n$  リンクの振子を対象とし、台車が駆動され、 $n$  リンクにアクチュエータを持たない場合では、そのすべてのリンクが倒立した状態の近傍において、その台車や  $n$  リンクの機械パラメータによらず可制御であることを示した。この成果の一部は国際会議 57th IEEE Conference on Decision and Control (2018) にて発表されている。

また、水平面において一定速度で回転する円盤上の  $n$  リンクのロボットを対象とし、そのすべてのリンクが一直線である状態の近傍において、そのロボットが機械パラメータによらず可制御と可観測であるための必要十分条件は関節1が駆動であることを示した。この成果の一部は国際会議 58th IEEE Conference on Decision and Control (2019) にて発表されている。

## (2) 高劣駆動度系の振り上げ・安定化制御

以下の主な研究成果を挙げた。

① 関節1が駆動で、関節2と3が非駆動であるロボットを対象とし、そのすべてのリンクが鉛直真上の目標平衡点を安定化する問題を扱った。エネルギー制御法を用いた制御則を設計するとともに、その特異点回避の必要十分条件を与え、機械パラメータによらずエネルギーの収束性を厳密に証明した。また、シミュレーションより、設計したエネルギー制御則が、目標平衡点の近傍で状態フィードバック安定化制御則に切り替えられ、目標平衡点の安定化が成功したことから、提案法の有効性を示した。この成果は国際学術雑誌 Nonlinear Dynamics (2017) に掲載されている。

第2関節のみが駆動される2リンクロボット Acrobot を対象とし、その角運動量とその一次と二次の時間微分、および駆動関節の角度の非線形関数を用いた安定化制御則を提案し、従来の LQR 安定化器より、安定化の吸引領域が大幅に拡大されていることをシミュレーションより確認できた。この成果の一部は国際会議 56th IEEE Conference on Decision and Control (2017) にて発表されている。

末端関節のみが駆動  $n$  リンクロボットを対象とし、そのロボットの角運動量とその一次と二次の時間微分以外のフィードバックする変数の選定法を提案するとともに、その選定法を用いた安定化制御則を設計した。3リンクの場合に対して、従来の LQR 安定化器より、安定化の吸引領域が拡大されていることをシミュレーションより示した。この成果の一部は国際会議 American Control Conference (2018) にて発表されている。

## (3) 劣駆動度系の振り下げ制御とその応用

劣駆動ロボットのすべてのリンクが共に鉛直真下姿勢で静止した真下平衡点への振れ止め制御は、クレーン系の振れ止め制御や体操競技の姿勢制御などに求められるものである。その振れ止め制御について、以下の主な研究成果を挙げた。

① 第1関節のみが駆動される2リンクロボット Pendubot を対象とし、その駆動関節の角速度を線形フィードバックする項に加え、その角度を線形と非線形フィードバックする2つの制御則を提案し、振れ止め制御目的を大域的に達成するための制御ゲインに関する条件を与えた。閉ループ系の代表極の実部が最小となるような制御ゲインを求める最適問題を解決し、劣駆動ロボットのすべての機械パラメータに使える解析解を示すとともに、その提案則の有効性と閉ループ系の性能限界を明らかにした。さらに、シミュレーションでも提案した制御則の有効性を示

した。この成果は国際学術雑誌 International Journal of Robust and Nonlinear Control (2021) に掲載されている。

第2関節のみが駆動される2リンクロボット Acrobot を対象とし、その駆動関節の角速度を線形フィードバックする制御則を再考し、その制御に基づく Acrobot の運動解析を行い、従来の研究結果と異なり、振れ止め制御目的が達成できるための Acrobot の機械パラメータに関する条件が必要であることを明らかにした。また、駆動関節の角速度を線形フィードバックする項に加え、角度を非線形フィードバックする制御則を提案した。Acrobot に関する成果は Pendubot に関する成果と異なり、閉ループ系の代表極の実部が最小となるような制御ゲインを求める最適問題の本質を示した。この成果の一部は国際会議 21st World Congress of International Federation of Automatic Control (2020) にて発表されており、国際学術雑誌に投稿中である。

クレーン系に対して、新しい非線形振り止め制御則を提案するとともに、閉ループ系の性能を解析した。この成果の一部は国際学術雑誌 IEEE Access (2019), IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (2020), IEEE Transactions on Industrial Electronics (2022) に掲載されている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Xin Xin、Makino Kazunori、Izumi Shinsaku、Yamasaki Taiga、Liu Yannian	4. 巻 31
2. 論文標題 Anti Swing control of the Pendubot using damper and spring with positive or negative stiffness	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Robust and Nonlinear Control	6. 最初と最後の頁 4227 ~ 4246
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/rnc.5472	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yang Tong、Sun Ning、Fang Yongchun、Xin Xin、Chen He	4. 巻 69
2. 論文標題 New adaptive control methods for n-link robot manipulators with online gravity compensation: Design and experiments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 539 ~ 548
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIE.2021.3050371	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Sun Ning、Zhang Jianyi、Xin Xin、Yang Tong、Fang Yongchun	4. 巻 7
2. 論文標題 Nonlinear output feedback control of flexible rope crane systems with state constraints	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 136193 ~ 136202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2942054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Sun Ning、Fu Yu、Yang Tong、Zhang Jianyi、Fang Yongchun、Xin Xin	4. 巻 17
2. 論文標題 Nonlinear motion control of complicated dual rotary crane systems without velocity feedback: Design, analysis, and hardware experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automation Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 1017 ~ 1029
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASE.2019.2961258	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Xin Xin	4. 巻 94
2. 論文標題 Linear strong structural controllability and observability of an n-link revolute planar robot with active intermediate joint or joints	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 436 ~ 442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2018.04.050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Liu Yannian, Xin Xin	4. 巻 88
2. 論文標題 Global motion analysis of energy-based control for 3-link planar robot with a single actuator at the first joint	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 1749 ~ 1768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11071-017-3343-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xin Xin	4. 巻 11
2. 論文標題 Necessary and sufficient conditions for linear strong structural controllability and observability of n link underactuated planar robot with multiple active intermediate links	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IET Control Theory & Applications	6. 最初と最後の頁 1873 ~ 1883
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/iet-cta.2016.1117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Xin Xin, Maki Sakurai, Shinsaku Izumi, Taiga Yamasaki, Jinhua She, Yannian Liu
2. 発表標題 Nonlinear Swing Down Control of the Acrobot
3. 学会等名 21st World Congress of International Federation of Automatic Control (IFAC2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xin Xin, Shinsaku Izumi, Taiga Yamasaki, and Wei Lin
2. 発表標題 Linear controllability and observability of n-link underactuated planar revolute robot moving in constantly rotating frame in horizontal plane
3. 学会等名 58th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yiming Wu, Ning Sun, Xiao Liang, Yongchun Fang, and Xin Xin
2. 発表標題 A robust control approach for double-pendulum overhead cranes with unknown disturbances
3. 学会等名 2019 IEEE International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 牧野和倫, 三宅健太郎, 中村智大, 忻欣, 泉晋作, 山崎大河
2. 発表標題 PD制御とD制御を用いたPendubotの振り下げ制御
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻井麻稀, 忻欣, 中村智大, 泉晋作, 山崎大河
2. 発表標題 D制御とPD制御を用いたAcrobotの振り下げ制御
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻井麻稀, 忻欣, 泉晋作, 山崎大河
2. 発表標題 駆動角度・角速度を用いたAcrobotの非線形振り下げ制御
3. 学会等名 第28回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 牧野和倫, 忻欣, 泉晋作, 山崎大河
2. 発表標題 PD制御を用いた第一関節のみが駆動される3リンクロボットの振り下げ制御
3. 学会等名 第28回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xin Xin, Makoto Ono, Shisaku Izumi, Taiga Yamasaki, Kanjian Zhang
2. 発表標題 Angular momentum based stabilizing control of underactuated multi-link planar robots with last active joint
3. 学会等名 Proceedings of 2018 American Control Conference (ACC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xin Xin, Kanjian Zhang, Haikun Wei
2. 発表標題 Linear strong structural controllability for an n-link inverted pendulum in a cart
3. 学会等名 Proceedings of the 57th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Xin Xin
2. 発表標題 Linear Strong structural controllability and observability of an n-link underactuated planar robot with different actuator-sensor configurations
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xin Xin, Yoshinori Muraoka, Shinji Hara, Shinsaku Izumi, and Taiga Yamasaki
2. 発表標題 New characterization and classification of synchronization of multiple metronomes on a cart via describing function method
3. 学会等名 the 20th World Congress of International Federation of Automatic Control (IFAC2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Xin Xin, Makoto Ono, Shinsaku Izumi, and Taiga Yamasaki
2. 発表標題 New results of angular momentum based stabilizing control of the Acrobot
3. 学会等名 the 56th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takayuki Shimohashi, Xin Xin, Shinsaku Izumi, and Taiga Yamasaki
2. 発表標題 New results of synchronization condition of the non-uniform Kuramoto oscillators
3. 学会等名 the 37th Chinese Control Conference (CCC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xin Xin, Yoshinori Muraoka, Shinsaku Izumi, Taiga Yamasaki
2. 発表標題 Analysis of synchronization of n metronomes on a hanging plate via describing function method without assumption on amplitudes of metronomes
3. 学会等名 the 36th Chinese Control Conference (CCC2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="http://crl.cse.oka-pu.ac.jp/xxin/">http://crl.cse.oka-pu.ac.jp/xxin/</a>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
中国	東南大学	南開大学	