

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04554

研究課題名（和文）タワークレーンの非線形制御理論の構築と実機検証

研究課題名（英文）Development and Experimental Validation of Nonlinear Control Theory for Tower Cranes

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） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、研究代表者の多自由度劣駆動ロボットに対する非線形制御系の設計・解析に関する経験に基づき、タワークレーンの非線形動特性および構造を活用し、駆動・非駆動変数を組み合わせた複合信号を使用した軌道追従制御則を設計した。この制御則を用いてクレーンの動作を解析し、軌道追従制御の目的が達成できることを確認した。さらに、実機実験を通じて、提案した制御則がペイロードの揺れを効果的に抑制し、ジブの正確な位置決めが可能であることを示した。また、他の劣駆動システムにおける振り止め制御や可制御性に関する研究も行い、閉ループシステムの代表極の実部を最小化する振り止め制御の設計・解析方法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、自由度と制御入力数の差が2である高劣駆動度のタワークレーンを対象とし、非線形制御理論の構築と実機検証を行った。また、他の劣駆動システムにおける振り止め制御や可制御性に関する研究も行い、閉ループシステムの代表極の実部を最小化する振り止め制御の設計・解析方法を確立した。この成果は他の高劣駆動度のシステムや非線形性が強い様々な対象の高性能制御にも波及効果があると確信される。

研究成果の概要（英文）：In this study, based on the principal investigator's experience in designing and analyzing nonlinear control systems for multi-degree-of-freedom underactuated robots, a trajectory tracking control rule was designed using a composite signal combining actuated and unactuated variables, leveraging the nonlinear dynamic characteristics and structure of tower cranes. This control rule was used to analyze crane operations and confirm that the objectives of trajectory tracking control were achieved. Furthermore, through experiments, it was demonstrated that the proposed control rule effectively suppresses payload oscillation and allows for precise jib positioning. Additional researches were conducted on damping control and controllability in other underactuated systems, establishing design and analysis methods for damping controls that minimize the real parts of the poles in closed-loop systems.

研究分野：制御工学・ロボット工学

キーワード：劣駆動系 タワークレーン 振り止め制御 非線形制御 エネルギー制御法 安定性解析

## 1. 研究開始当初の背景

操作入力数が一般化座標数より少ない劣駆動系では、アクチュエータの数が全駆動系に比べて少ないため、コスト、重量などの点で優れているが、そのような劣駆動系には強い非線形性があるため、その制御に関する研究は制御・ロボット工学分野で注目を浴びる挑戦的課題である。研究代表者は、2000年から軽量化を極限まで求める宇宙ロボット等への応用を目指し、劣駆動ロボットの制御理論の構築と実機実験検証に取り組んできた。今までの劣駆動ロボット系に関する研究成果をクレーンなどの制御へ応用することを図り、研究代表者は2018年度から劣駆動ロボットのすべてのリンクが鉛直下向き姿勢への安定化制御に関する研究を行っている。

一方、タワークレーン (Tower Crane) は近年急増するタワーマンションの建築現場、港湾などで、吊り荷の運搬を行うための機械装置である。その複雑な構造で、運搬中に吊り荷が大きく揺れやすいため、その制御には、安全性を維持し、高速・正確な吊り荷の位置決めを実現しつつ、過渡時の吊り荷の振動と残留振動を抑制することが重要である。現状は操縦者の経験や勘に頼る面が大きいため、吊り荷の振れを効果的に抑制するシステムを備え、操縦者の運転操作の負担を軽減する必要がある。

タワークレーンのモデルには4つの自由度があり、滑車 (Trolley) の変位とアーム (Jib) の回転角はそれぞれのモータで直接駆動され、吊り荷の2つの角度は非駆動である。タワークレーンは高劣駆動度 (自由度と制御入力数の差が2)、非常に複雑な非線形動特性などを持つため、その制御に多くの挑戦的課題がある。先行研究の多くは、タワークレーンの平衡点近傍での線形近似モデルに基づく制御系設計・解析を行っている。

## 2. 研究の目的

本研究では、研究代表者の多自由度劣駆動ロボットに対する非線形制御系の設計・解析法に関する研究経験などを基に、タワークレーンの非線形動特性や構造を活かした、その状態制約を考慮した最適軌道計画をするとともに、最適軌道への不確かなパラメータと外乱を考慮したロバストな適応追従制御などに関する設計・解析法を構築し、その妥当性・有効性を実機実験により検証することを目的とする。また、その他の劣駆動系の振り止め制御への応用を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 劣駆動度系の振り下げ制御

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・解析をするとともに、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。

### (2) 複数の非駆動関節を持つ多リンクロボットの線形可制御性

垂直平面内に台車に取り付けられた  $n$  リンク倒立振り子システムと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、研究代表者の今までの劣駆動ロボットの可制御性に関する成果を生かし、その目標平衡点あるいは目標軌道回りの可制御性を研究する。

### (3) 共通構造体に設置された複数台のメトロノームの同期現象に関する解析

共通構造体である台車あるいは吊り台に設置された複数台のメトロノームは劣駆動系であり、その同期現象に関する研究は、数値シミュレーションや実験で行われているが、理論解析はあまり行われていない。本研究では、記述関数法を用いて、共通構造体の動きに着目し、同期後に

現しうる基本調波の振動周波数と振幅を解析的に示す。

#### (4) 柔軟な関節を持つ2リンク劣駆動ロボットのエネルギー法に基づく振り上げ制御

本研究では、垂直面内で動く第二関節のみに1つアクチュエータを持ち、第一関節には線形の回転はねがある2リンクロボットを対象とする。エネルギー法に基づいて、その振り上げ制御則を設計するとともに、設計された制御器の下でのロボットの全体的な運動分析を行う。

#### (5) クレーン系の振り止め制御

先行研究では、タワークレーンを対象とし、その線形近似モデルに基づいて、部分結合強化法による軌道追従制御則が提案された。本研究では、タワークレーンを対象に、線形近似モデルを利用せず、駆動・非駆動変数からなる複合信号を用いた軌道追従制御則を設計するとともに、その制御則でのクレーンの動きを解析し、軌道追従制御目的が達成できる条件を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 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。本研究では、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。

(1.1) 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。

(1.2) 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ている。この成果の一部は国際会議 21st World Congress of International Federation of Automatic Control (2020) にて発表されている。この成果は国際学術雑誌 *ISA Transactions* (2022) に掲載されている。

(1.3) 天井クレーンのトロリーを、ペイロードの揺れを抑えながら任意の位置に移動させる制御則の開発を目的とする。この制御目的を達成するために、PD 制御則を検討した。この制御則について、閉ループシステムの真下平衡点周りに関する線形化モデルの代表極の実部を最小化する意味で最適な比例ゲインと微分ゲインを解析的に示すした。その後、得られた最適ゲインの有効性を数値シミュレーションによって検証した。この成果の一部は第30回計測自動制御学会中国支部学術講演会にて奨励賞を受賞した。また、国際学術雑誌に投稿する予定である。

#### (2) 複数の非駆動関節を持つ2つの多リンクロボットの線形可制御性

垂直平面内に台車に取り付けられた  $n$  リンク倒立振り子システムを対象とし、台車が駆動されている場合に限り、すべてのリンクが直立した平衡点でシステムは線形可制御であることが証明されている。また、この可制御性はシステムの物理的パラメータに影響されない。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ている。この可制御性は、システムの物理的パラメータや他の関節が劣駆動であるかどうかに影響されない。この成果は国際学術雑誌 ISA Transactions (2022)に掲載されている。

本研究では、リンクの数が三以上の一般的な台車・倒立振子システムの可制御性研究を完了し、多数の劣駆動関節の状況を水平面  $n$  リンクの可制御性分析に組み込んだ。これにより、クレーン系の研究に理論的指導を提供し、バイオニックフィッシュ、蛇型ロボット、宇宙用ロボットアームなどの劣駆動システムの設計と分析などの分野で広い応用の展望が開けている。

#### (3) 共通構造体に設置された複数台のメトロノームの同期現象に関する解析

共通構造体である台車あるいは吊り台に設置された複数台のメトロノームの同期現象に関する研究は、数値シミュレーションや実験で行われているが、理論解析はあまり行われていない。メトロノームの記述関数を用いて、共通構造体の動きに着目し、同期後に出現しうる基本調波の振動周波数と振幅を解析的に示すとともに、数値シミュレーションと実験により、その解析結果の妥当性を検証する。この成果は国際学術雑誌 Asian Journal of Control (2022)にて発表されている。

#### (4) 柔軟な関節を持つ 2 リンク劣駆動ロボットのエネルギー法に基づく振り上げ制御

本研究は、垂直面内で動く 2 リンクロボットの振り上げ御に関するものである。このロボットは第二関節に 1 つアクチュエータを持ち、第一関節には線形の回転はねがある。まず、ロボットが直立平衡点 (UEP、2 つのリンクが両方とも直立している状態) で線形可制御であるための必要十分条件を与える。次に、アクチュエータの関節角が一定トルクの下で一定である場合、ロボットが平衡点にあることを証明する。さらに、ばねの剛性が重力項の係数によって決定される値以下である場合、特異点のないエネルギー法に基づく制御器を提案する。提案された制御器の下でのロボットの全体的な運動分析を行う。ロボットの全機械的エネルギーが所望の値に収束する場合、閉ループ解の位相図を示す。収束が達成されない場合、閉ループ解が平衡点の集合に属する平衡点に近づくことを示し、その不安定性を確認するための十分条件を示す。このような運動分析から、提案された振り上げ制御器の下でロボットを UEP 近くまで振り上げするための十分条件を提示する。最後に、数値シミュレーションを通じて理論結果を検証する。

#### (5) クレーン系の振り止め制御

タワークレーンを対象に、駆動・非駆動変数からなる複合信号を用いた軌道追従制御則を設計するとともに、その制御則でのクレーンの動きを解析し、軌道追従制御目的が達成できる条件を明らかにした。設計した制御則がシミュレーションにおいて、非零の初期スイング角度を与えた場合、目標平衡点に対して定常偏差を残す原因を説明し、駆動変数と目標軌道の積分フィードバック項を加えることで解決策を与えた。上記の設計した制御則を基に、ジブ・トロリーを同時に動かした場合のタワークレーンに対して制御則を拡張し、シミュレーションにより有効性を示した。さらに、また、実機実験により、提案した制御則がペイロードの揺れを抑制し、ジブの位置決めを有効に行えることを示した。この成果の一部は第 31 回計測自動制御学会中国支部学術講演会にて優秀賞を受賞した。また、国際学術雑誌に投稿する予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Xin Xin, Liu Yannian, Izumi Shinsaku, Yamasaki Taiga, She Jinhua	4. 巻 140
2. 論文標題 Nonlinear swing-down control of the Acrobot: Analysis and optimal gain design	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ISA Transactions	6. 最初と最後の頁 109 ~ 120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.isatra.2023.06.011	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 Xin Xin, Liu Yannian, Zhang Kanjian	4. 巻 131
2. 論文標題 Linear controllability of two multi-link robotic systems with multiple unactuated joints	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ISA Transactions	6. 最初と最後の頁 264 ~ 273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.isatra.2022.05.028	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 Peng Zhiyu, Xin Xin, Liu Yannian	4. 巻 111
2. 論文標題 Energy-based swing-up control for a two-link underactuated robot with flexible first joint	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 289 ~ 302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11071-022-07831-7	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 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 Xin Xin, Liu Yannian, Hara Shinji, Muraoka Yoshinori	4. 巻 -
2. 論文標題 Analysis of synchronization of multiple identical metronomes on a cart via describing function approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Asian Journal of Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/asjc.2725	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 Wei Cui, Chai Tianyou, Xin Xin, Chen Xinkai, Wang Liangyong, Chen Ye-Hwa	4. 巻 69
2. 論文標題 A signal compensation-based robust swing-up and balance control method for the Pendubot	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 3007 ~ 3016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2021.3065621	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 Zhu Chenglong, Zhang Kanjian, Xin Xin, Gao Fangzheng, Wei Haikun	4. 巻 31
2. 論文標題 Event triggered adaptive fixed time output feedback fault tolerant control for perturbed planar nonlinear systems	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 6934 ~ 6952
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/rnc.5655	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 Xin Xin, Makino Kazunori, Izumi Shinsaku, Yamasaki Taiga, Liu Yannian	4. 巻 32
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 1-20
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 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

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 橋本竜英, 忻欣, 佐藤翔, 泉晋作, 山崎大河
2. 発表標題 回式クレーンの振れ止め制御: 理論と実験
3. 学会等名 第31回計測自動制御学会中国支部学術講演会 (優秀賞受賞)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ziyu Wang, Xin Xin, Yannian Liu
2. 発表標題 Strong Stabilization of the Acrobot at the Down-Up Equilibrium Point
3. 学会等名 22nd IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤翔, 忻欣, 泉晋作
2. 発表標題 代表極に基づく天井クレーンの最適振れ止めPD 制御ゲインの設計 (奨励賞受賞)
3. 学会等名 第30 回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2021年

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 佐藤翔、 牧野和倫、 忻欣、 泉晋作、 山崎大河
2. 発表標題 タワークレーンの非線形振れ止め制御
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	東北大学	