

令和 3 年 6 月 29 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04003

研究課題名(和文) 歩行パターン制御と多自由度振動制御による4足歩行ロボットのリミットサイクル制御

研究課題名(英文) Limit Cycle Control of a Quadruped Robot Using Gait Pattern Control and Multi-Degree-of-Freedom Vibration Control

研究代表者

梶原 秀一 (KAJIWARA, Hidekazu)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00280313

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、4足歩行ロボットの歩行パターン生成法と多自由度振動制御を組み合わせ、4足歩行ロボットの歩行運動を目的とするリミットサイクルに安定化させる手法を構築した。2自由度弾性脚を持つ4足歩行ロボットに本手法を適用することにより、脚部の弾性エネルギーを利用してトロット歩行やバウンド走行が実現できるリミットサイクル制御系を設計し、実験によりその有効性を確認した。また、歩行速度が最大となる歩行パターンを検証し、歩行速度と動作パラメータの関係を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、脚部に弾性を持つ4足歩行ロボットを開発し、脚部の弾性エネルギーを利用した歩行運動を実現するための新しい制御手法を構築した。さらに、実験によりバウンド走行やトロット歩行を実現できることを確認した。本研究の成果を応用すると、動物のような柔軟性のある脚を持ちエネルギー消費が少なく高速な歩行・走行動作が実現できる4足歩行ロボットが実現できる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we built a new method to stabilize a walking motion of a quadruped robot to a target limit cycle by combining a walking pattern generation method and a multi-degree-of-freedom vibration control. By applying our method to the quadruped robot with 2-DOF elastic legs, we designed a limit cycle control system that can realize the trot walking and the bound running by using the elastic energy of the legs, and confirmed its effectiveness by experiments. In addition, we verified the gait pattern that maximizes the walking speed and clarified the relationship between the walking speed and the walking pattern parameters.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：走行ロボット 振動制御 エネルギー制御 リミットサイクル制御 歩行パターン制御

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

申請者らはこれまでに振動子のモデルとして van der Pol(VDP)方程式を利用し、多数の VDP 方程式を相互に結合した多結合 VDP 方程式の同期パターンを制御する方法を提案してきた[1]. 本手法は周期解をすべて同相に誘導する同相フィードバック制御と各方程式間の位相補償制御により構成され、周期解を任意の位相で同期できる. また、4 足歩行ロボットに対して、4 結合 VDP 方程式の周期解を各関節のモータの指令値として与え、障害物からの距離に応じて周期解の位相をリアルタイムに変化させる手法を提案し、障害物を回避しながらロボットを目的地まで誘導する歩容制御を実現できることを示してきた[2][3]. さらに、多数の振子系を目標とする振幅や位相を持つリミットサイクルに安定化させながら同期パターンを制御できる多自由度振動制御法を構築してきた[4][5][6][7]. 本手法は多自由度振動系でさまざまな振動モードが実現可能である. また、本手法を弾性脚を持つ 4 足歩行ロボットに応用して、バネの弾性エネルギーを効率よく利用した高速走行を実現してきた[8][9][10]. 以上の研究成果の応用として、4 足歩行ロボットの歩行パターン生成法と多自由度振動制御を組み合わせることにより、動物のような柔軟性のある脚を持った 4 足歩行ロボットが実現できるのではないかと考えた. 本手法が確立できれば、歩行運動を安定化させる目標リミットサイクルを変化させることにより、ロボットの歩容を制御することができ、リミットサイクル間の同期パターンを変化させることによりロボットの移動方向を制御することが可能である. したがって、4 足歩行ロボットの移動方向制御と歩行から走行までの幅広い歩行制御が同時に実現できる.

2. 研究の目的

本研究では新たな 4 足歩行ロボットの制御手法を確立し、動物のような歩行ができるロボットを開発する. これまでに、歩行ロボットの多数の関節を協調して動作させる歩行パターン生成手法として、神経振動子の相互引き込み現象を利用する方法が多数提案されてきた. しかし、これらの方法は目的とする位相関係となるように振動子同士の結合パラメータを調整することが難しく、これまでのほとんどの研究では結合パラメータは試行錯誤的に決められていた. 本研究の歩行パターン生成手法は試行錯誤的にパラメータを決めることなく任意の位相で多数の VDP 方程式を同期できるので、容易に目的とする歩行パターンが生成できる. また、多自由度制御法を脚に弾性を持つロボットに適用すると、脚部の共振現象を利用した効率的な歩行および走行が可能である. 本研究ではこれらの手法を組み合わせることにより歩行パターンの設計が容易、エネルギー消費が少なく長距離移動が可能、動物のような柔軟な歩行・走行が可能といった特徴を持つ 4 足歩行ロボットを実現する.

3. 研究の方法

本研究ではまず、4 足歩行ロボットの歩行パターン生成法と多自由度振動制御を組み合わせた新たな制御手法を構築する. 次に関節部に弾性を持ち、弾性エネルギーを積極的に利用して歩行動作を行うことができる 4 足歩行ロボットを開発する. 各弾性脚は目標リミットサイクルとなるようにエネルギー制御し、各リミットサイクルは歩行パターン制御器により任意の位相で制御される.

4. 研究成果

構築した制御手法を検証するために製作した 4 足歩行ロボットを図 1 に示す. ロボットの各脚は 2 個のサーボモータとバネで構成されており、弾性部は圧縮ばねとこれを支えるシャフト、リニアプッシュで構成される. 脚部の第一リンクではサーボモータと平行リンク機構により第二リンクを垂直方向に駆動し、第二リンクではサーボモータによりシャフトを前後に駆動している. ロボット本体の姿勢と地面からの距離は、本体に取り付けた 4 個の PSD センサにより計測している. 計測した各脚の地面からの高さ、各脚に与える制御入力の位相を一定のタイミングで同期させる多自由度振動制御系を構成し、同期させるタイミングを変化させることで走行制御可能かどうか実験を行った.

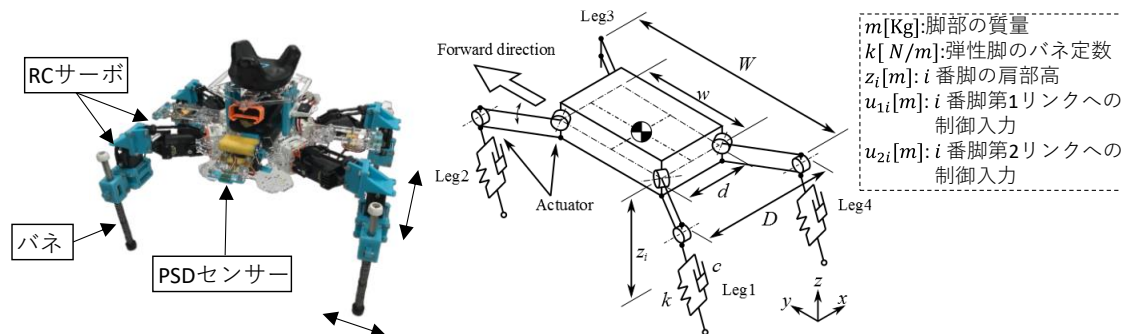


図 1 弾性脚を持つ 4 足歩行ロボット

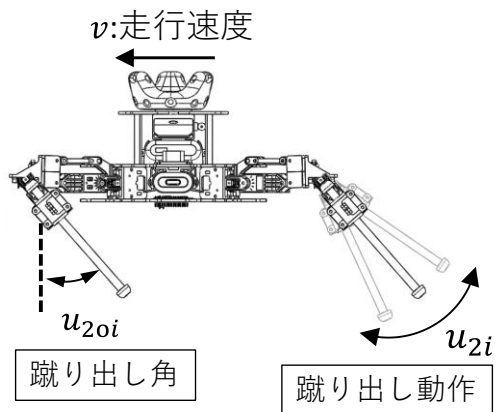


図 2 第 2 リンクの動作

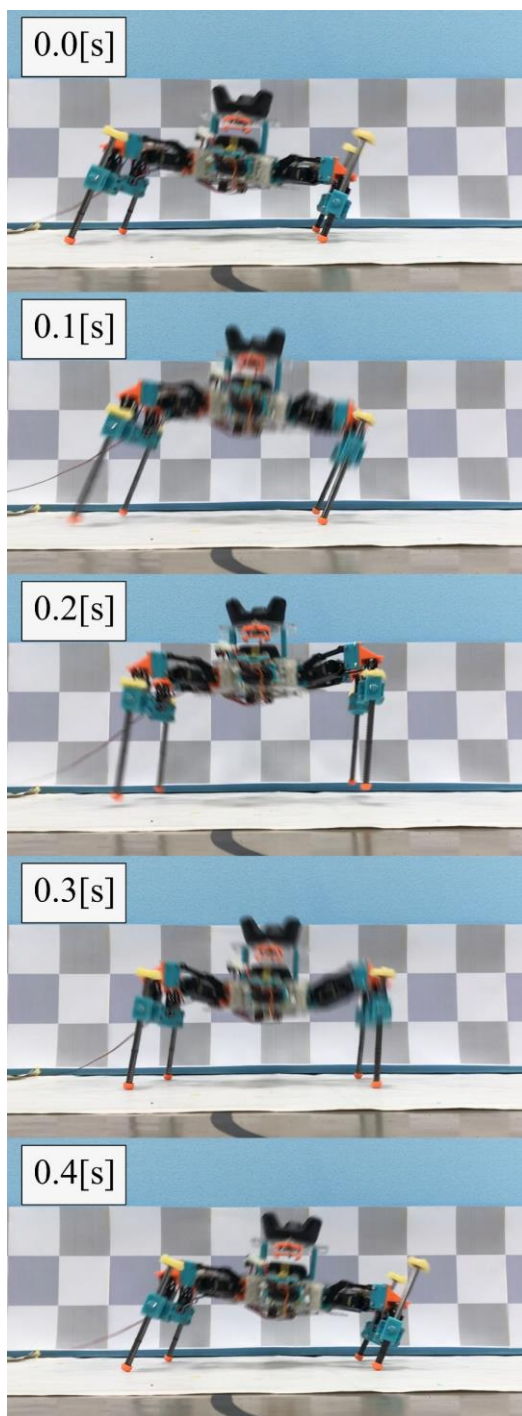


図 3 バウンド走行の様子

開発したロボットは図 2 に示すように第二リンクを動作させることにより、けり出し角度を変化させたり、けり出し動作ができる。

各脚部の目標エネルギーを $E_d = 0.4$ [J] とし、けり出し角度を $u_{2oi} = 0.16$ [rad]、けり出し動作の振幅を 0.06 [rad] として制御した結果を図 3 に示す。図 3 よりバウンド走行制御ができていていることわかる、図 4 に各脚のエネルギーの時間変化を示す。各脚のエネルギーは目標値に制御されていることがわかる。また、図 5 にけり動作がある場合とない場合のロボットの移動距離を示す。けり動作がない場合の走行速度は 0.089 [m/s] であり、けり動作がある場合は走行速度は 0.162 [m/s] であり、けり出し動作があると移動速度が 2 倍になった。

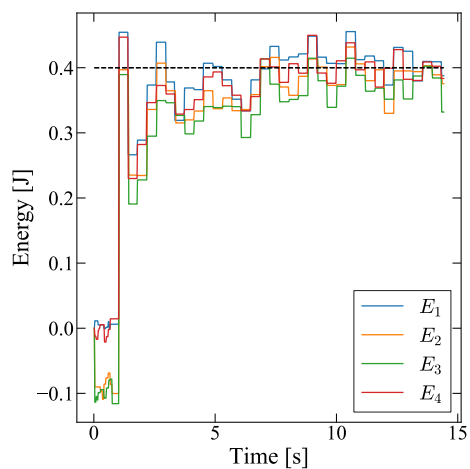


図 4 各脚のエネルギー変化

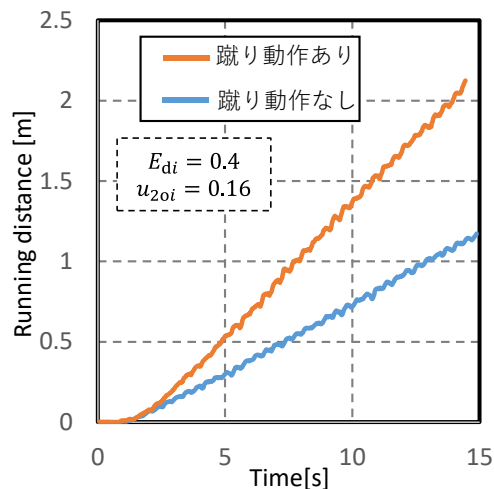


図 5 ロボットの移動距離

けり出し角を変化させたとき、走行速度がどのように変化するか実験により調べた結果を図6に示す。けり出し角を大きくしていくことで速度が増加していくことがわかる。また、第二リンクの角度が $0.08[\text{rad}]$ 以降において目標エネルギーが大きい場合も速度が増加していることがわかる。しかし $0.02\sim 0.06[\text{rad}]$ 間においては、エネルギーによる差が生じなかった。この理由として、接地時の負荷と脚部の遊びにより、第二リンクの角度が一定に保たれないためであると考えられる。特に $0.02\sim 0.06[\text{rad}]$ 間では相対的に遊びの影響が大きいいため、第二リンクが安定した直角になる場合がある。重心位置が上昇するにつれ脚部に掛かる負荷が減り、角度が現れるため走行自体は実現できたと考えられる。

けり出し角を $0.16[\text{rad}]$ とし、後脚の目標エネルギーに対する走行速度を調べた結果を図7に示す。図7より後脚のエネルギーを大きくしていくことで走行速度が向上していくことがわかる。

第二リンクのけり出し角を $=0.16[\text{rad}]$ とし、第二リンクの振幅を変化させ制御した結果を図8に示す。走行速度は第二リンクの振幅に対し単調に増加しており、振幅によって速度を増加させることができることがわかる。

以上の実験結果より、ロボットの第1リンクにより跳躍制御を行いながら、第2リンクの動作により脚部を一定角度に曲げることで、バネの弾性エネルギーを利用した走行が可能であること、跳躍運動にあわせて第2リンクによるけり出し動作を追加することで、より高速なバウンド走行が実現できることを確認した。

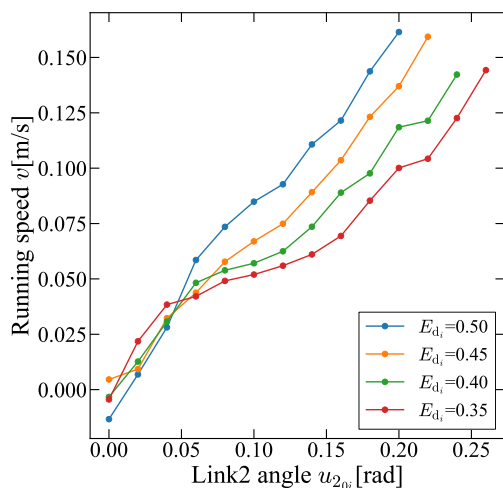


図6 けり出し角を変化させたときの走行速度特性

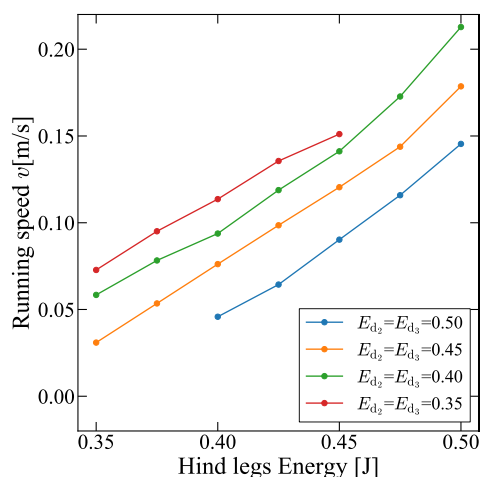


図7 後脚のエネルギーを変化させたときの走行速度特性

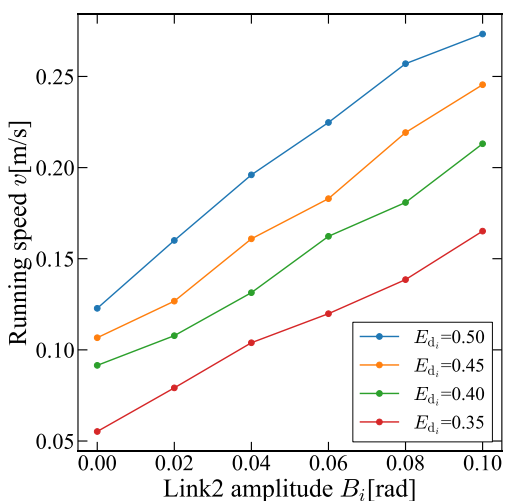


図8 けり出し動作の振幅を変化させたときの走行速度特性

次に製作した 4 足歩行ロボットに対してトロット歩行制御系を設計し歩行実験を行った結果について述べる．設計した制御系は VDP の周期解を利用してトロット歩行パターンを生成する．この時の歩行周期は脚部のバネの固有周期とした．また，トロット歩行をする場合には，本体重心の上下運動の周期は歩行周期の 2 倍になることに着目して，2 : 1 の割合で重心運動と歩行運動を同期するように制御系を構成した．

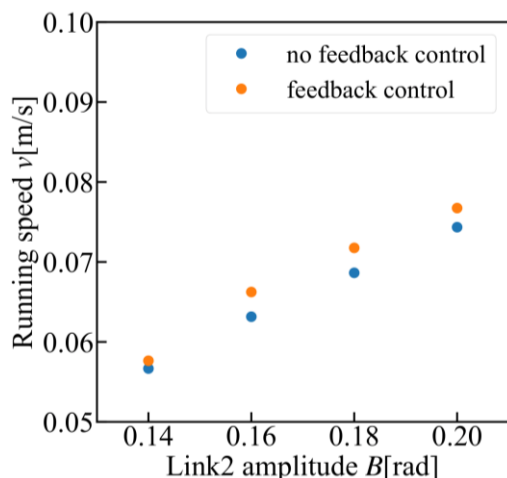


図 9 けり出し動作の振幅を変化させたときのトロット歩行速度特性

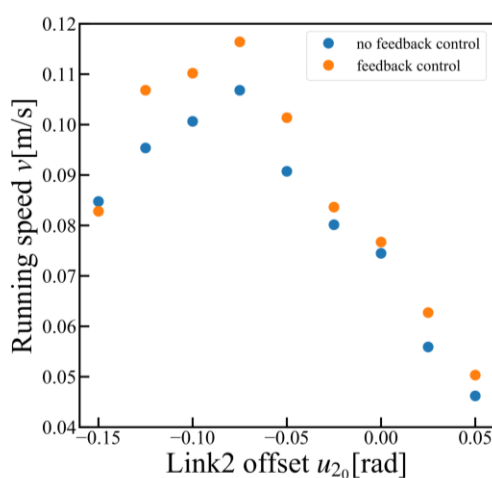


図 10 けり出し角を変化させたときのトロット歩行速度特性

図 9 にけり出し動作の振幅を変化させたときのトロット歩行の速度特性を示す．実験では本体の重心運動を歩行生成にフィードバックした場合としない場合で実験を行った．実験の結果，第二リンクの振幅を大きくしていくと歩行速度が増加すること，本体の重心運動をフィードバックした方が歩行速度が速いことがわかる．重心位置をフィードバックした方が歩行速度が大きくなるのは，重心まわりの運動が安定化されるためであると考えられる．

図 10 にけり出し動作の振幅は一定とし，けり出し角を変化させたときの実験結果を示す．図より歩行速度が最大となるけり出し角が存在すること，本体の重心位置をフィードバックした方が歩行速度が大きくなることもわかる．

以上の実験結果より，脚部の弾性部の固有周期でトロット歩行する場合，第二リンクの動作パラメータが歩行速度に大きく影響すること，本体の重心位置の運動をフィードバックして歩行パターンを生成した方が歩行速度が増加することなどが新たにわかった．

最終的に本研究では，2 自由度弾性脚を持つ 4 足歩行ロボットを製作し，脚部の弾性エネルギーを利用してトロット歩行やバウンド走行が実現できるリミットサイクル制御系を設計し，実験によりその有効性を確認した．また，歩行速度が最大となる歩行パターンを検証し，歩行速度と動作パラメータの関係を明らかにした．

[1] 多結合 van der Pol 方程式の同期パターン制御，梶原秀一，青柳 学，花島直彦，第 59 回自動制御連合講演会講演論文集，pp. 1285/1288，2016 年

[2] 4 結合 VDP 方程式を用いた 4 足歩行ロボットの歩容制御，佐藤僚太，梶原秀一，青柳 学，花島直彦，第 17 回計測自動制御学会 S I 部門講演会論文集，pp. 1549/1552，2016 年

[3] 4 結合 VDP 方程式を用いた 4 足歩行ロボットの歩行パターン生成，佐藤僚太，梶原秀一，青柳 学，花島直彦，ロボティクスメカトロニクス講演会 2016 講演論文集，p. 1A2-06b4，2016 年

[4] 結合周期入力制御系の相互引き込み現象と同期パターン制御－2 または 3 結合周期入力制御系の場合－，梶原秀一，花島直彦，青柳学，計測自動制御学会論文集，53 巻，5 号，pp. 308/318，2017 年

[5] 周期入力制御系の数理構造と強制引き込み現象，梶原秀一，花島直彦，青柳学，計測自動制御学会論文集，52 巻，10 号，pp. 573/579，2016 年

[6] 結合周期入力制御系の相互引き込み現象と同期パターン制御，磯嶋拳成，梶原秀一，青柳学，花島直彦，第 21 回知能メカトロワークショップ講演会論文集，pp. 97/100，2016 年

[7] 結合自励振動系の同期パターン制御，梶原秀一，花島直彦，青柳 学，第 58 回自動制御連合講演会講演論文集，pp. 2E1/4，2015 年

[8] 周期入力制御による弾性脚を持つ 4 脚走行ロボットの跳躍姿勢安定制御，志賀 昂，梶原秀一，青柳 学，花島直彦，第 18 回計測自動制御学会 S I 部門講演会論文集，pp. 1553/1556，2016 年

[9] 周期入力制御による弾性脚を持つ 4 脚走行ロボットの跳躍移動制御，志賀 昂，梶原秀一，青柳 学，花島直彦，ロボティクスメカトロニクス講演会 2016 講演論文集，p. 1A2-06b4，2016 年

[10] 周期入力制御による弾性脚を持つ 4 脚ロボットの跳躍制御，志賀 昂，梶原秀一，計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集，pp. 1188/1191，2015 年

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 妹尾成, 梶原秀一, 青柳学 |
| 2. 発表標題 周期入力制御による弾性脚を持つ4足ロボットの走行制御 |
| 3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 妹尾成, 梶原秀一, 青柳学 |
| 2. 発表標題 周期入力制御による弾性脚を持つ4足ロボットの走行制御 - 実機による検証 - |
| 3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 佐藤 正隆, 梶原 秀一, 青柳 学 |
| 2. 発表標題 結合van der Pol方程式の同期パターンを利用した4足歩行ロボットの歩容パターン生成 |
| 3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名 梶原秀一 |
| 2. 発表標題 周期入力によるブランコの振幅制御 |
| 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 妹尾成, 梶原秀一 |
| 2. 発表標題 周期入力制御による弾性脚を持つ4足走行ロボットの跳躍制御ー位相変調入力による跳躍制御ー |
| 3. 学会等名 第51回計測自動制御学会北海道支部学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 土居智寛, 梶原秀一 |
| 2. 発表標題 非線形振動子の同期パターンを利用した移動体の車間制御 |
| 3. 学会等名 第51回計測自動制御学会北海道支部学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 梶原秀一, 妹尾成, 青柳学 |
| 2. 発表標題 周期入力制御による弾性脚を持つ4脚ロボットの走行制御 - 蹴り出し動作による走行速度の向上 - |
| 3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐藤 正隆, 梶原 秀一, 青柳 学 |
| 2. 発表標題 4 結合van der Pol 方程式の同期パターンを利用した 4 足歩行ロボットのトロット歩行 |
| 3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 西木悠生, 梶原秀一, 青柳学 |
| 2. 発表標題 周期入力制御による2 リンク鉄棒ロボットの同期パターン制御 |
| 3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 西木悠生, 梶原秀一, 青柳学 |
| 2. 発表標題 周期入力制御による劣駆動システムの同期制御 |
| 3. 学会等名 第25回知能メカトロワークショップ講演会 |
| 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 |
|-------|------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 妹尾 成 (SENOO Naru) | | |
| 研究協力者 | 土居 知寛 (DOI Tomohiro) | | |
| 研究協力者 | 佐藤 正隆 (SATO Masataka) | | |

6. 研究組織（つづき）

| | 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 |
|-------|---|--------------------------------------|----|
| 研究協力者 | 西木 悠生 (NISHIKI Yuki) | | |
| 連携研究者 | 青柳 学 (AOYAGI Manabu) (80231786) | 室蘭工業大学・もの創造系領域・教授 (10103) | |

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 |
|---------|---------|
| | |