

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05853

研究課題名(和文) 多自由度振動制御による弾性脚を持つ4足歩行ロボットの高效率高速走行

研究課題名(英文) High-Efficiency and High-Speed Running of Quadruped Robot with Compliant Legs by Multiple Degree of Freedom Vibration Control

研究代表者

梶原 秀一 (KAJIWARA, Hidekazu)

室蘭工業大学・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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、周期入力制御法と同期パターン制御を組み合わせることにより、これまで1入力にのみ適用可能であった周期入力制御法を多入力多出力化し、新たな多自由度振動制御法を構築した。本手法を結合振り子系、結合パラメータ励振系に適用し、システムの同期パターンを自由に制御できることを明らかにした。また、4足歩行ロボットの歩行パターン生成にも応用し、周囲の環境に応じて歩行パターンを変化させることにより、障害物回避動作などを実現できた。さらに、弾性脚を持つ4足歩行ロボットの制御に本手法を適用し、本体の運動とバネの振動を同期させるタイミングを変化させることにより、ホッピング動作、バウンド走行が可能であった。

研究成果の概要(英文)：In this research, we built a new multiple degree of freedom vibration control method by a combination of periodic input control method and synchronization pattern control method. Our traditional periodic input control method was applicable only to single-input system. However, our new control method is applicable to multi-input and multi-output system. We applied the developed method to coupled pendulum system, coupled parametric excitation system, and showed that synchronization patterns of those systems can be controllable freely. Next, we applied our method to walking pattern generation of a quadruped robot. As a result, the robot was able to avoid obstacles by changing the walking pattern in response to changes of the environment around the robot. Finally, we developed a quadruped robot with compliant legs, hopping motion and bound running was possible by changing the timing to synchronize the motion of the robot body and the vibration of the spring.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：周期入力制御 同期パターン制御 振動制御 エネルギー制御 van der Pol方程式

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、その強制引き込み現象を利用して周期入力と制御対象を一定の位相差で同期させて制御する方法を提案してきた[1]。また、同期させるタイミングを積極的に変化させて制御対象のエネルギーを制御し、目標とする振幅や位相をもつ周期運動に制御対象を収束させる周期入力制御を考案し[2]、本手法を、バネの弾性エネルギーを利用して跳躍するホッピングロボットの跳躍高制御に応用してきた[3]。また、VDP 方程式の相互引き込み現象を利用してさまざまな同期パターンを制御する手法を考案し、多足歩行ロボットの歩行パターンを簡単に作成できることを示してきた[4]。

2. 研究の目的

本研究では以上の研究成果を組み合わせ、これまで1入力系にのみ適用可能であった周期入力制御を多入力多出力系の同期制御法へ拡張し、多数の質点やバネで構成される振動系(多自由度振動系)の制御法として確立する。さらに本手法の同期パターンを自由に制御できるという特徴も生かして、脚に弾性を持つ4足歩行ロボットの制御に本手法を適用し、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する。

3. 研究の方法

本研究ではまず、周期入力制御系を同期パターン制御と組み合わせることにより、これまで1入力にのみ適用可能であった周期入力制御法を多入力多出力化し、新たな多自由度振動制御法を構築する。これにより、複数の周期入力制御系のエネルギーを制御しながら、それらの同期パターンを自由に制御することが可能となる。構築した制御手法を多自由度振動系の制御に適用し、さまざまな振動モードを制御可能かどうか検証する。最終的に、構築した手法を弾性脚を持つ4足歩行ロボットの制御に適用して、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する。

4. 研究成果

周期入力制御系と同期パターン制御法を組み合わせ多入力多出力化した多自由度振動制御法を構築し、その有効性を検証するために本手法を多自由度振動系、パラメータ励振系、4足歩行ロボットの制御に適用した。多自由度振動系として図1に示すような電磁力で駆動される振子実験装置を製作した。各振子装置はそれぞれ周期入力制御により一定のエネルギーを持つように制御できる。振子の制御入力を構成している VDP 方程式を相互に結合し、同期パターンを制御できるかどうか実験した結果を図2に示す。

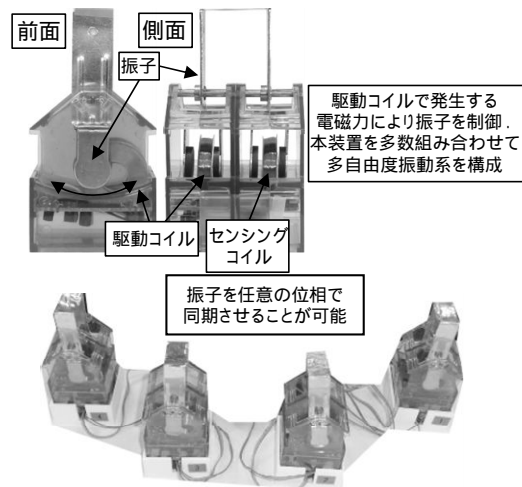


図 1 : 多自由度振動系の同期パターン制御

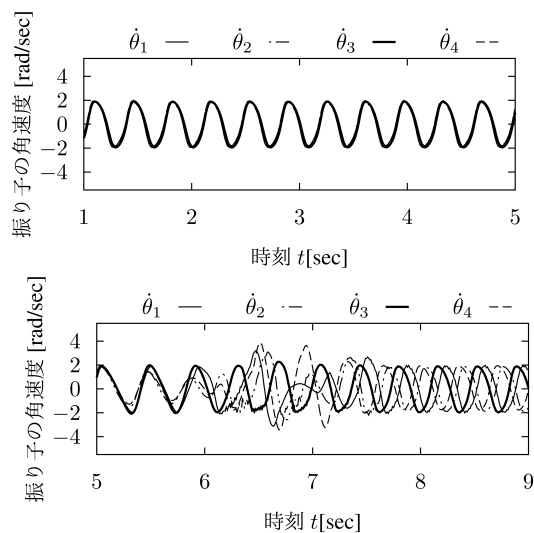


図 2 : 4 結合周期入力制御系の同期パターン制御(同相モードからゼロ和モードへ)

図2は振子系を4つ相互に結合し、はじめは同相で振動する同相モード、5秒時に全ての周期運動の和がゼロとなるゼロ和モードになるように制御入力を加えた場合である。図より同期モードを制御できることがわかる。

次に、パラメータ励振系として支点から重心までの距離が変化するブランコを取り上げ、構築した手法を適用した結果を述べる。図3に製作したブランコ実験装置を示す。本装置はサーボモータが取り付けられたラックアンドピニオン機構により重心位置が変化し、振子の運動に合わせて重心位置を変化させることによりエネルギーを制御することが可能である。振子系の場合と同様に制御入力を構成している VDP 方程式を相互に結合し、同期パターンを制御できるかどうか実験した結果を図4に示す。

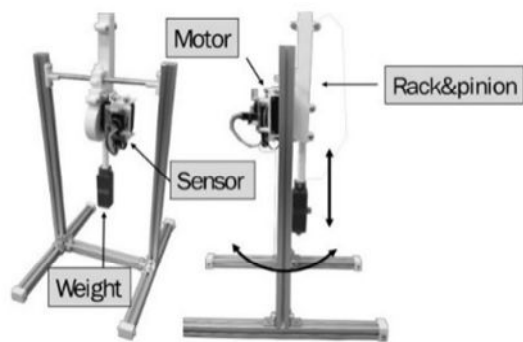


図 3: プランコ実験装置

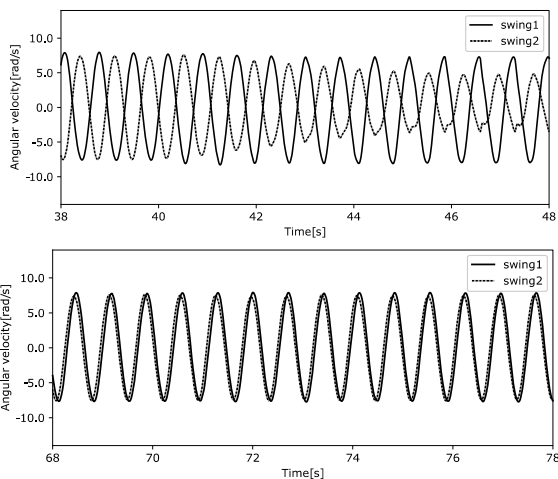


図 4: 2 結合パラメータ励振系の同期パターン制御 (逆相モードから同相モード)

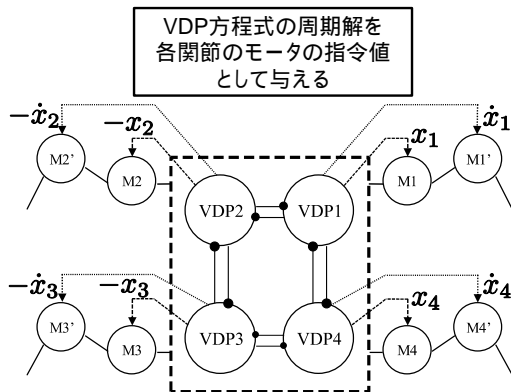


図 5: 4 結合VDP方程式による歩行パターン生成

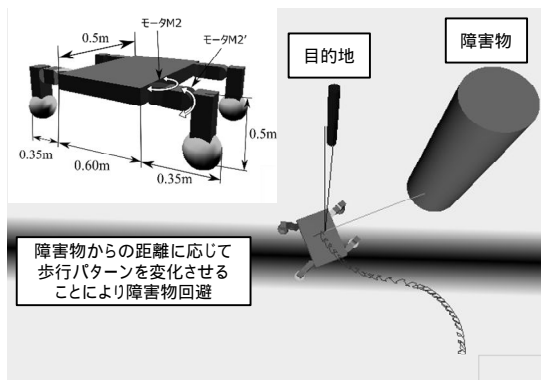


図 6: 歩行制御による障害物回避

図 4 は制御開始時は逆相モード, 40 秒時に同相モードになるよう制御した場合である. 同期パターンを制御できることがわかる.

次に, 4 足歩行ロボットの歩行制御に応用した場合について述べる. 4 足歩行ロボットでは図 5 に示すように VDP 方程式を 4 つ相互に結合し, VDP 方程式の周期解を各関節のモータの指令値とすることでロボットを制御する. 同期パターン制御により各周期解を任意のパターンで同期させてロボットの歩行を制御できるかどうかシミュレーションにより検証した結果, 図 6 に示すように各方程式間の位相を適切に変化させることにより, ロボットの歩行を制御し, 障害物回避動作などが可能であった. また, 図 7 に示すような各関節が 2 個のサーボモータで駆動される 4 足歩行ロボットを製作し, 本体中央部の測域センサーにより周囲の環境をセンシングしながら各脚間の位相を変化させることにより, 障害物を回避しながら歩行できることを実験的にも確認した (図 8).

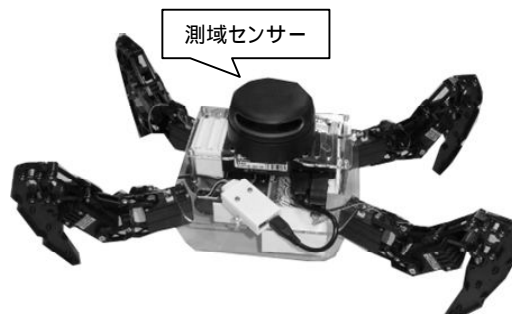


図 7: 測域センサーを持つ 4 足歩行ロボット

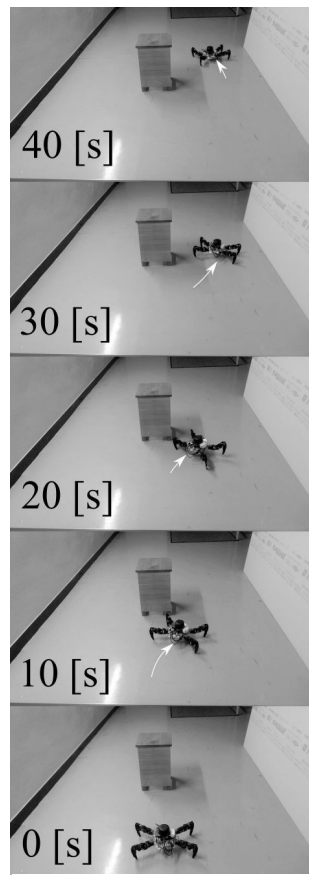


図 8: 障害物回避実験

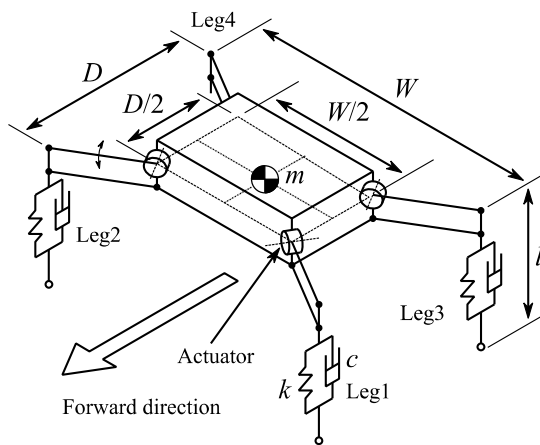
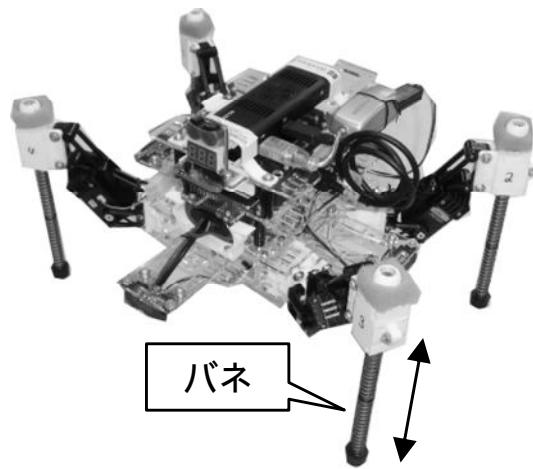


図 9 : 弾性脚を持つ 4 足歩行ロボット

多自由度振動制御法を弾性脚を持つ 4 足歩行ロボットに適用して、バネの弾性エネルギーを利用した高速走行が可能かどうか実験した結果について述べる。

図 9 に製作した 4 足歩行ロボットを示す。ロボットは各脚が 1 個のサーボモータとバネで構成されており、制御用 PC、バッテリーが全てロボットに搭載されている。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。

実験の結果、本体の運動とバネの振動を適切なタイミングで同期させることにより、鉛直方向のホッピング動作が可能であり、制御入力の大きさや位相を変化させることにより、跳躍高を制御することも可能であった。また、各脚を同期させるタイミングを変化させることにより、一歩あたり 0.1~0.15m のジャンプを繰り返しながら、0.2~0.3m/s の速度で移動するバウンド走行が実現できた(図 10)。また、ロボットを全方向に移動させることも可能であった。

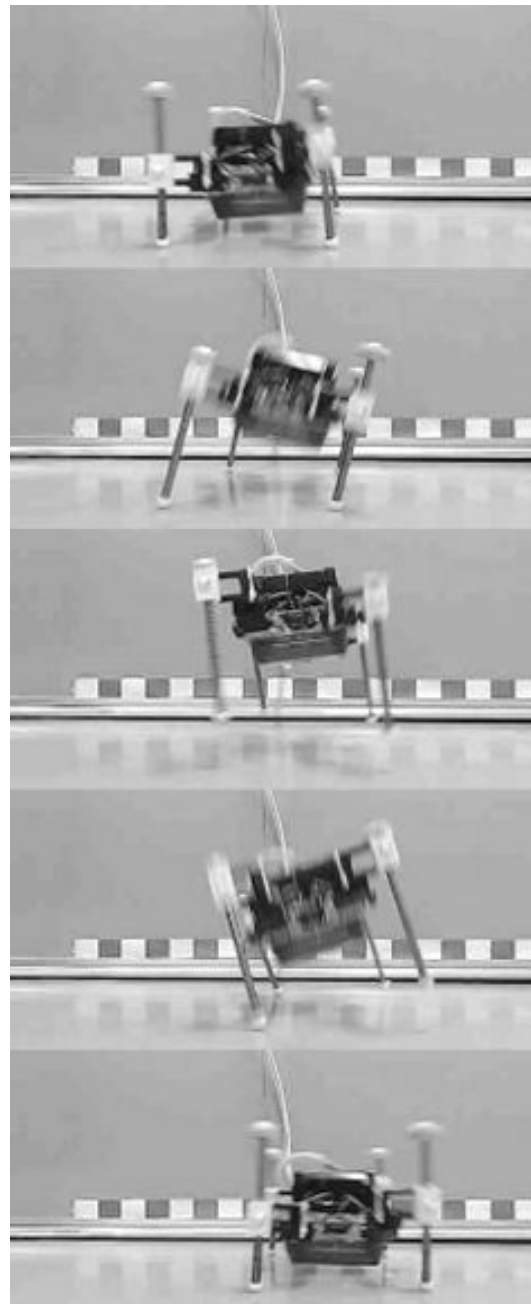


図 10 : 弾性脚を持つ 4 足歩行ロボットのバウンド走行

<引用文献>

- [1] 梶原秀一, 橋本幸男, 松田俊彦, 土谷武士, 鉄棒ロボットの数理解析と運動制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 4, 2000, pp. 515-520
- [2] 梶原秀一, 橋本幸男, 土谷武士, 周期入力による振子の運動制御, 日本機械学会論文中 (C), Vol. 67, No. 663, 2001, pp. 3454-3460
- [3] 梶原秀一, 周期入力制御によるホッピングロボットの跳躍高制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 45, No. 5, 2013, pp. 537-546
- [4] 梶原秀一, 結合 van der Pol 方程式の位相制御と多足歩行ロボットへの応用, 電気学会電気・情報・システム部門大会, 2013 年 9 月 5 日, 北海道北見市

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2件)

梶原秀一, 花島直彦, 青柳学, 周期入力制御系の数理構造と強制引き込み現象, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 52, No. 10, 2016, pp. 573-579
DOI:10.9746/sicetr.52.573

梶原秀一, 花島直彦, 青柳学, 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 -, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 53, No. 5, 2017, pp. 308-318
DOI:10.9746/sicetr.53.308

[学会発表](計16件)

日西杜夫, 梶原秀一, 青柳学, 周期入力制御によるプランコロボットの制御と強制引き込み現象, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015, 2015年11月19日, 北海道函館市

志賀昂, 梶原秀一, 青柳学, 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, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015, 2015年11月19日, 北海道函館市

佐藤寮太, 梶原秀一, 青柳学, 非線形振動子を用いた多足歩行ロボットの歩行パターン生成, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015, 2015年11月19日, 北海道函館市

梶原秀一, 花島直彦, 青柳学, 結合自励振動系の同期パターン制御, 第58回自動制御連合講演会, 2015年11月15日, 兵庫県神戸市

日西杜夫, 梶原秀一, 青柳学, 花島直彦, 周期入力制御されたパラメータ励振系の引き込み現象, 第48回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 2016年3月1日, 北海道札幌市

志賀昂, 梶原秀一, 青柳学, 花島直彦, 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 - 実機による検証 - 第48回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 2016年3月1日, 北海道札幌市

日西杜夫, 梶原秀一, 青柳学, 花島直彦, 周期入力制御されたパラメータ励振系の相互引き込み現象, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2016, 2016年6月9日, 神奈川県横浜市

志賀昂, 梶原秀一, 青柳学, 花島直彦, 周期入力制御による弾性脚を持つ4脚歩行ロボットの跳躍移動制御, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2016, 2016年6月9日, 神奈川県横浜市

佐藤寮太, 梶原秀一, 青柳学, 花島直彦, 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, 日本機械学会ロボ

ティクスメカトロニクス講演会 2016, 2016年6月9日, 神奈川県横浜市

磯嶋拳成, 梶原秀一, 青柳学, 花島直彦, 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, 電気学会第21回知能メカトロワークショップ, 2016年8月28日, 北海道函館市

梶原秀一, 青柳学, 花島直彦, 多結合 van der Pol 方程式の同期パターン制御, 第59回自動制御連合講演会, 2016年11月12日, 福岡県北九州市

日西杜夫, 梶原秀一, 青柳学, 花島直彦, 周期入力制御によるパラメータ励振系のエネルギー制御と強制引き込み現象, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2016年12月16日, 北海道札幌市

志賀昂, 梶原秀一, 青柳学, 花島直彦, 周期入力制御によるパラメータ励振系の工周期入力制御による弾性脚を持つ4脚歩行ロボットの跳躍姿勢安定制御, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2016年12月16日, 北海道札幌市

佐藤寮太, 梶原秀一, 青柳学, 花島直彦, 4結合VDP方程式を用いた4足歩行ロボットの歩容制御, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2016年12月16日, 北海道札幌市

磯嶋拳成, 梶原秀一, 青柳学, 花島直彦, 任意の形状で相互結合した周期入力制御系の同期制御, 第60回自動制御連合講演会, 2017年11月12日, 東京都調布市

梶原秀一, 青柳学, 花島直彦, 任意の形状で相互結合した4結合 van der Pol 方程式の同期制御, 第60回自動制御連合講演会, 2017年11月12日, 東京都調布市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梶原秀一 (KAJIWARA, Hidekazu)
室蘭工業大学・しくみ情報系領域・准教授
研究者番号: 00280313

(2) 連携研究者

青柳学 (AOYAGI, Manabu)
室蘭工業大学・しくみ情報系領域・教授
研究者番号: 80231786

花島直彦 (HANAJIMA, Naohiko)
室蘭工業大学・もの創造系領域・教授
研究者番号: 40261383

(3) 研究協力者

佐藤 僚太 (SATO, Ryota)
志賀 昂 (SHIGA, Takashi)
日西 杜夫 (HINISHI, Morio)
磯嶋 拳成 (ISOJIMA, Kensei)