

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820089

研究課題名(和文) 駆動台を用いた非駆動対象物の動的運動制御

研究課題名(英文) Dynamic motion control of passive objects using an active plate

研究代表者

青山 忠義 (Aoyama, Tadayoshi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00569337

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、駆動源をもたない対象物に対して駆動台の外力を加えることによる対象物の運動制御法の提案を行った。始めに、対象物を2次元モデルに限定し、対象物及び駆動台を包括した系のモデル化を行い、構築したモデルに基づいた対象物の傾斜角を目標値に制御する手法を提案し、シミュレーションにより提案手法の安定性・有効性を検証した。続いて、モデルを3次元対象物に拡張し、駆動台による対象物の運動制御法の提案を行い、シミュレーションによる提案手法の検証を実施した。

研究成果の概要(英文)：This work proposed motion control of passive object by adding force of an active plate. Firstly, 2-D controlled object is considered. The controlled object and active plate is modelled and object's inclination control method was proposed. Then, the proposed method was verified through numerical simulations and experiments. Secondly, the controlled object was expanded to 3-D model. The control method of 3-D object was proposed and verified through numerical simulation.

研究分野：メカトロニクス・ロボティクス

キーワード：マニピュレーション 離散システム 周期的安定性

1. 研究開始当初の背景

これまでに、重力場での劣駆動システムの制御法が提案され、劣駆動振子の振り上げ・倒立制御、ブラキエーション、ホッピング、2足歩行制御などに適用されている。こうした動作は、モデルが生来持つナチュラルダイナミクスを巧みに利用しているため、その運動は効率的であると報告されている。しかし、システムの自由度よりも入力が少ない劣駆動システム制御の困難さに起因して、扱っているモデルは単純なものであり、実用的なシステムへの応用が困難であると考えられる。また、多リンク、多自由度の複雑なロボットを用いた従来研究も1質点等の単純なモデルに簡略化しているため、モデル化誤差により提案されている制御法の適用可能な範囲は限定的なものとなっている。このように、劣駆動システムは高効率であるという利点を抱えているにもかかわらず、その制御システムの適用範囲が限られているため、積極的に活用されてこなかった。

これまでに、申請者はヒューマノイド型ロボットを劣駆動システムとして記述し、重力場においてモデルが生来持つナチュラルダイナミクスを利用したダイナミクスの安定化、移動方向制御を包括した3次元2足歩行制御アルゴリズムを提案し、その環境適応性の解析も行った。本歩行アルゴリズムは、歩行運動を劣駆動系の離散システムとしてとらえ、動的安定性を保つものであったが、駆動源を持たない対象物とロボット等の駆動源を持つシステムを包括した系を劣駆動系の離散システムとしてとらえることにより、これまでに申請者が行ってきた研究を発展させる形で、新たな劣駆動システムの制御法を構築することで、斬新な動的安定運動を生成することが可能ではないかと考え、本申請を着想するに至った。本研究の準備実験として、動力学ライブラリ Open Dynamics Engine (ODE)を用いた動力学シミュレーションを行った。図1にシミュレーション時のスナップショットを示す。本シミュレーションにおいて、対象物である起き上がりこぼしに対し、駆動台による1周期10ミリ秒の周期的な外力を与えることで、駆動源を持たない対象物が傾斜した状態を維持する物理現象の存在を確認している(図1)。

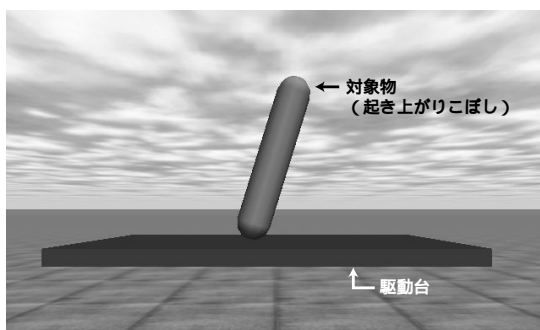


図1 シミュレーション実験時のスナップショット

しかしながら、駆動台の制御入力が発見的に探索されたものであり、対象物の目標状態に対する制御入力の導出は不可能である。ゆえに、力学的解析に基づき、体系的な駆動系の離散システム制御法を構築することで、駆動源を持たない対象物の動的安定運動の生成が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、駆動源をもたない物体に対して駆動台による外力を加えることで、対象物の運動を制御することを目的とする。

具体的には、対象物及び駆動台の運動モデルの構築を行い、「背景で述べた準備実験において確認されている物理現象の力学的解析を行う。なお、研究の初期段階においては、対象物のモデルは2次元の剛体モデルを取り扱う。次に、力学的解析に基づいて、駆動台による対象物の運動制御法の設計を行い、駆動台の実験システムを構築する。構築した実験システムを用いて、対象物の傾斜角制御を実現し、提案制御法の実験的検証を行う(図2)。さらに、対象物のモデルを3次元、多リンクモデルへと複雑化し、駆動台上で受動歩行ロボット等の駆動源を持たない比較的複雑な対象物の運動制御を試みる。

これらの研究において、駆動台による物体の動的運動制御法の確立を通し、従来の簡略化されたモデルを扱った限定的な劣駆動システムの運動制御手法とは一線を画した、広い適用範囲を有する新たな劣駆動システム制御技術を確立させることが本研究の最終目標である。

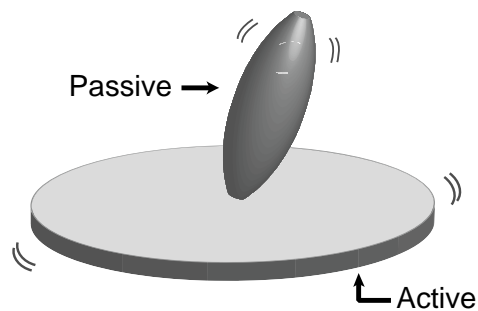


図2 2次元対象物の運動制御

3. 研究の方法

(A) 対象物及び駆動台の運動モデルの構築

1) 対象物を2次元の剛体と仮定し、駆動台によって生成される周期運動を離散力学系として記述し、対象物の運動を表現するため、対象物の位置、速度、回転角、回転角速度から成る状態量ベクトルを定義する。

2) 運動の1周期を (i)Slide phase, (ii)Hop phase, (iii)Flight phase, (iv)Collision phase の4つのPhaseに分割する。なお、このような周期運動を実現させるためには、対象物に対して何らかの復元力が加わる必要があるが、本研究では、対象物を「起き上がりこぼし」とすることで、(i)Slide phaseに

において復元力を発生させる。上述の 4 つの Phase における運動方程式をそれぞれ導出し、生成される周期運動を状態ベクトルを用いた離散システムとして記述する。

3) 導出した運動方程式に基づき、シミュレーション環境を構築し、シミュレーション上で (ii) Hop phase における駆動台の動作を決定づけるパラメータを試行錯誤的に変化させ、状態ベクトルが安定となる周期運動の探索を行う。探索された周期運動の平衡点周りの軌道安定性を解析し、平衡点が安定平衡点となっているかの確認及び証明を行う。

(B) 対象物の運動制御法の設計

1) 上述の(A)において得られた安定状態から駆動台の入力を決定する逆問題を解く。解析的に解が得られない場合は、安定状態と駆動台の制御入力に対応をコントローラーにマップとして組み込む。

2) 対象物が振動台に着地した際の状態ベクトルと平衡点に収束した状態ベクトルの差分から駆動台の制御入力を変更するフィードバック制御系を構築する。

3) 上述の(B)-2)において構築したフィードバック制御系の性能を Matlab 等の数値解析ソフトウェアを用いて検証する。

(C) 実験システムの構築

1) 本研究では、駆動台を高速・高周波で駆動させる必要があると予測されるため、申請者の所属機関が所有しており、高速・高周波 (1kHz) での動作が可能なパラレルリンクロボットのエンドエフェクタに 200 mm 平方、5mm 厚の台座を取り付けることで高速な動作を実現する駆動台の作製する。なお、台座の表面の部材は、シリコンゴム、ポリプロピレン、羊毛などの摩擦条件の異なった数種類の部材を試行錯誤的に試し、上述の(A)の運動モデルと一致するような部材を選択するよう工夫する。

2) 上述した駆動台の動作実験を行い、目的の動作が実現されない場合、アクチュエータを台座の下に組み込むステージ状の駆動台の作製を試みる。

3) 対象物が振動台に着地する際の着地判断及び状態ベクトルを推定するため、高速ビジョンシステムを実装する。高速ビジョンシステムとしては、申請者の研究グループで研究開発された IDP Express システムを使用する。IDP Express システムは、これまでにリアルタイムで高速な画像処理を実現してきた実績が十分にあり、一般的なロボットの制御周期である 1 ミリ秒に対応したセンサとして使用することが可能である。

(D) 運動制御法の実験的検証

「(C) 実験システムの構築」において構築した実験システムを用いて、目標の対象物の傾斜角を維持する運動の実現を試み、提案したコントローラーの性能を評価する。さらには、目標の傾斜角が動的に変化するような運動の実現を試みる。

(E) 対象物の 3 次元モデルへの拡張

1) 対象物を 3 次元の剛体モデルとし、状態ベクトルを再定義、運動方程式の導出を行い、運動モデルを再構築する。3 次元のモデルにおいても(A)-2)で述べた 4 つの Phase に分割するが、振動台の運動も 3 次元に拡張される。

2) 振動台の 3 次元の運動動作を決定づけるパラメータを試行錯誤的に変化させ、周期的安定性を満たす離散システムの探索を行い、平衡点の安定性解析を行う。

3) 平成 25 年度の(B)で構築した運動制御法に対して、3 次元の運動モデルを適用することで、3 次元の対象物の運動を制御するフィードバック制御系の構築、性能の評価を行う。

(F) 拡張された運動制御法のシミュレーション及び実験的検証

1) Open Dynamics Engine を用いた動力学シミュレーションを行い、駆動台の 3 次元運動が構築した実験システムの性能に対応しているかを確認する。実機実現が可能な条件を全探索的に導出する。

2) 3 次元計測に対応するため、(C)において構築した実験システムに高速ビジョンを追加することで、ステレオ計測を可能とし、目標の対象物の傾斜角を維持する運動の実現を試みる。対象物が 3 次元モデルとなる場合のコントローラーのロバスト性の評価も行う。

4. 研究成果

研究の方法で述べたような駆動台によって生成される周期運動を設計し、衝突を伴う非線形離散システムとして表現した。その離散システムに対して、リターンマップを用いた平衡点の安定性解析を行った。図 3 に示すようなリターンマップが得られ、設計した周期運動が漸近安定となることを示した。

さらに、図 4 に示すような実験システムを構築し実験的検証を行った。実験システムは、3 自由度のパラレルリンクロボット、ハイスピードビジョンプラットフォーム IDP-Express、制御用コンピュータで構成されている。制御対象物は、粘土がアクリル球に充填された起き上がりこぼしを用いる。制御対象物の重さは 0.3 [kg] であり、制御対象物の角度を計測するための 2 つのマークが取り付けられている。各種パラメータを設定した上で実験を行い、1[ms] 毎に対象物の角度を高速ビジョンシステムにより取得した。その結果、35 回の周期運動が達成された。図 5 に対象物が駆動台と衝突した直後の対象物の角度を示す。この図から、周期運動の開始時に対象物の角度が設定角度 5[deg] に収束していることが確認できる。また、図 6 に示した実験時のスナップショットからも制御対象物が傾き、角度がついていることが視覚的にも確認できる。

より複雑な制御対象物への対応を可能とすることで、劣駆動システム制御法の応用先が広がっていくことが期待される。

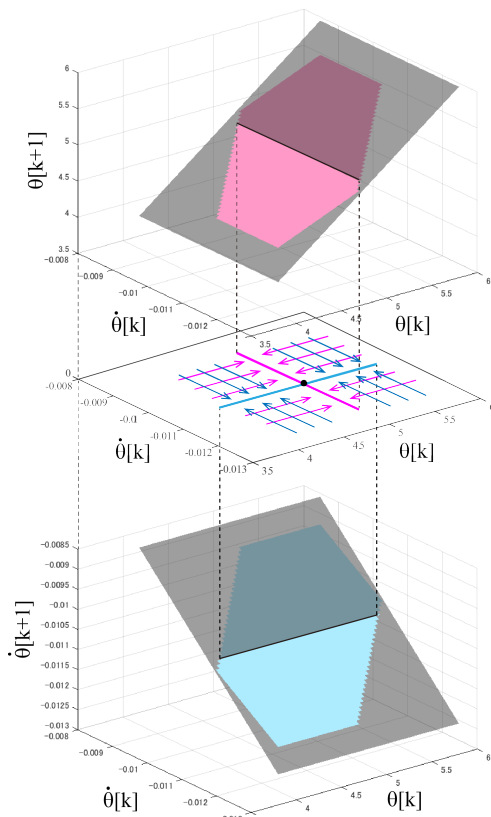


図3 リターンマップ

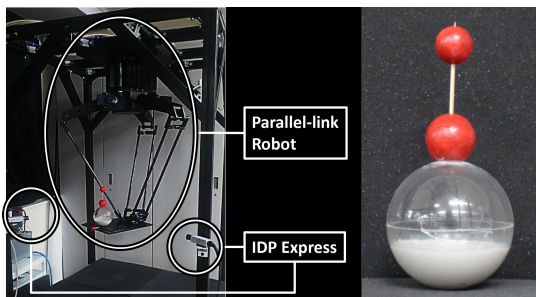


図4 実験システム

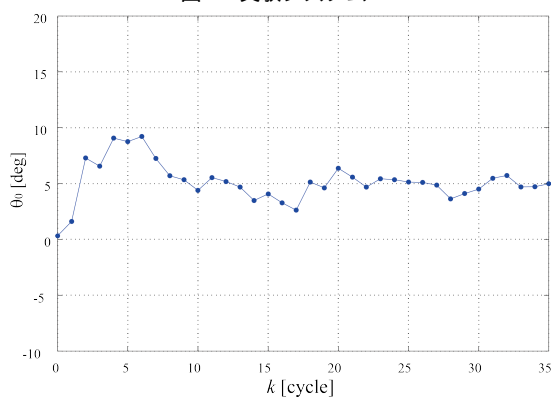


図5 実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

1. Tadayoshi Aoyama, Yuji Harada, Qingyi Gu, Takeshi Takaki and Idaku Ishii, “Cyclic motion design and analysis for a passive object manipulation using an

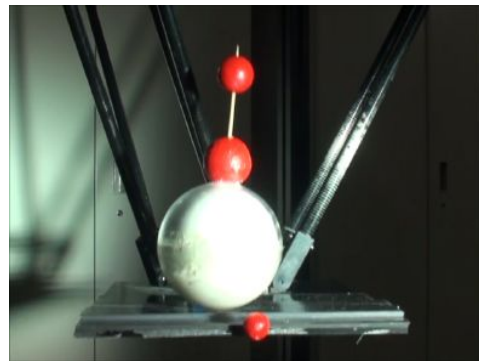


図6 スナップショット

active plate”, Advanced Robotics, pp.493-503, 2015, 査読有.

〔学会発表〕(計 6件)

1. Tadayoshi Aoyama, Yuji Harada, Qingyi Gu, Takeshi Takaki and Idaku Ishii, “A Scheme for Manipulating a Passive Object Using an Active Plate”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2015年5月26日~30日, Seattle (USA).

2. 青山忠義, 原田祐次, 高木 健, 石井 抱, “周期的並進運動生成による非駆動対象物に対する姿勢角操作”, 第20回ロボティクスシンポジウム, pp. 552-557, 2015年3月15日~16日, 軽井沢プリンスホテル(長野県軽井沢市).

3. Tadayoshi Aoyama, Yuji Harada, Takeshi Takaki, and Idaku Ishii, “Posture Angle Manipulation of Passive Object Using Active Plate”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp.1451-1456, 2014年12月5日~10日, Bari (Indonesia).

4. 青山 忠義, 高木 健, 石井 抱, “駆動台による3次元受動歩行ロボットのラテラル運動制御”, 第32回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2014AC2B1-07, 2014年9月4日~6日, 九州産業大学(福岡県福岡市).

5. 青山忠義, 原田祐次, 顧 慶毅, 高木 健, 石井 抱, “駆動台による非駆動対象物の動的運動制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 1P2-P04, 2014年5月25日~29日, 富山市総合体育館(富山県富山市).

6. 青山忠義, 原田 祐次, 高木健, 石井抱, “駆動台による非駆動対象物の姿勢角制御”, 第31回日本ロボット学会学術講演, 3E1-03, 2013年9月4日~6日, 首都大学東京(東京都八王子市).

6. 研究組織

(1)研究代表者

青山 忠義 (Aoyama Tadayoshi)
 広島大学・大学院工学研究院・助教
 研究者番号: 00569337