

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04255

研究課題名(和文)劣駆動ロボットの移動制御技術を応用した物体搬送・動的操作システム

研究課題名(英文) Object Carrying and Dynamic Manipulation Systems Applied with Locomotion Control Techniques of Underactuated Robots

研究代表者

浅野 文彦 (Asano, Fumihiko)

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授

研究者番号：70415066

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)：劣駆動移動ロボットを駆動源とした物体搬送装置・動的操作システムに関して、主に以下の研究成果を得た。第一に、傾斜したステージを能動的あるいは受動的に上下運動させることで、正多角形状をした搬送物の移動速度を引き込みにより制御できることを数値・実機実験の両面から示した。また形状や大きさが異なる複数台の搬送物の基本周期は整数比で互いに同期し得ることを数値的に示した。第二に、匍匐型移動ロボットの身体の一部を環境に固定することでこれを駆動源とした給紙システムを提案し、揺動が生む前進のための推力を適切に給紙操作力へと変換できることを数値的に示した。より高機能な動的操作を実現する新型ロボットの提案も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、劣駆動移動ロボットを物体搬送装置・動的操作システムの駆動源として活用すべく、その数学的モデリングや運動生成・制御技術に関する手法を適切に書き換え、革新的な産業機械を創出することを目的としたものである。傾斜したステージを能動的または受動的に上下運動させることで、その上を移動する搬送物の移動速度制御や自動整列を実現できることを理論と実機実験の両面から示した。また、匍匐型移動ロボットの身体の一部を環境に固定することで給紙システムを実現し、前進のための推力を適切に給紙操作力へと変換できることを示した。これらの研究活動を通して、ロボットの運動制御技術の新しい応用分野の開拓に努めた。

研究成果の概要(英文)：The main research results on object transfer devices and dynamic operation systems driven by underactuated mobile robots are summarized below. First, we numerically and experimentally showed that the moving speed of a regular polygonal conveyed object can be controlled by moving a tilted stage actively or passively up and down, and numerically clarified that the fundamental periods of multiple conveyed objects with different shapes and sizes can be synchronized with each other at an integer ratio. Second, we proposed paper feeding systems that connect a part of the body of a crawling-like locomotion robot to the environment and use it as a driving source, and numerically showed that the robot's forward propelling force generated by wobbling can be appropriately converted to the paper feeding operation force. Furthermore, we proposed a new robot model that can achieve more advanced dynamic operation.

研究分野：ロボティクス、制御工学

キーワード：物体搬送 動的操作 同期現象 軸回転摩擦 移動ロボット 運動生成 劣駆動システム

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

表面が低摩擦である下り斜面上あるいは水平面上を一定速度で前進または後退する匍匐型移動ロボットの実現可能性が示された。これは半円形状をした本体フレームの内部に揺動質量を取り付け、これを高周波振動させることで生み出される引き込み現象等の非線形力学の効果を利用したものである。当該研究に着手した時点では、凍結路面等の悪路に屈しない移動制御技術の基盤構築を目指すものであったが、複数の製造業者からこの技術を物体搬送システムの駆動源として応用できないかという相談を受けたことが機会となり、その後の共同研究や実状調査等を通して、物体搬送装置は劣駆動移動ロボットの運動制御技術全般を活用することができる対象であり、ロボット技術の新しい応用分野として開拓していけないのではと不着想に至った。物体搬送システムは個々の搬送物の形状や物理的特性に応じた試行錯誤に基づく設計開発が常であり、その基礎となる統一的なモデリング・制御理論も確立されておらず、重力・摩擦・傾斜・振動が組み合わさることで生み出される複雑で予測不可能な非線形現象を如何にして扱うかといった問題が山積していた。以上の背景より、これまでに蓄積されてきた移動ロボットの運動生成・制御技術を適切に応用することで、物体搬送や動的操作に関する諸問題の解決を図ろうとする計画に辿り着いた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、環境に固定されない劣駆動ロボットの歩行や匍匐前進等の運動を効率的に生成することのみならず、これを接触する対象物を移動させるための駆動源として扱い、その運動生成・制御技術を効果的に応用した革新的な物体搬送システムおよび動的操作システムを創造すること、および設計開発に資する理論的基礎を構築することである。本研究が対象とするのは米粒等の微小な搬送物を大量に搬送するシステムでなく、ステージ・コンベヤと同等の質量・体積を有し、かつ動力学的特性を考慮する必要がある(考慮すべき)搬送物である。各製造業者において試行錯誤的に設計開発が行われてきた多種多様な物体搬送システムに対し、統一的なステージ・コンベヤ設計論を提供しFAの高度化を促進するとともに、攪拌・顛覆・整列等への機能拡張についても検討を行う。具体的な移動形態として、揺動と摺動を利用した匍匐型前進・後退運動、および劣駆動歩行運動の二つを対象とし、これらのために構築された制御方策の物体搬送・動的操作制御系への拡張と変換を試みる。また、上記の研究を通して得られた新たな知見を、劣駆動移動ロボットの運動生成・制御技術にも還元する。

3. 研究の方法

(1) 能動的に上下振動をするステージを利用した物体搬送システム

次の方法でモデリングと運動解析を行う。駆動力を用いて制御される傾斜したステージ上を1台の正多角形状をした搬送物が移動するシステムを考え、その数学モデルを Mathematica を用いて導出する。MaTX や MATLAB などのソフトウェアを用いて数値シミュレータを開発し、運動解析を行う。ステージは斜面に対して垂直な方向へ単純な正弦波振動、または衝突を含む振動をするよう制御される1自由度のものとする。ステージの振動の目標周波数に対する搬送物の振動数の変化を解析し、同期条件を見極める。以上の数値解析結果を踏まえ、理論検証用実験システムの設計開発も行う。

(2) 受動的に上下振動をするステージを利用した複数台の搬送物の自動整列・分別システム

次の方法でモデリングと運動解析を行う。受動的に振動する傾斜したステージ上を複数台の正多角形状をした搬送物が移動するシステムを考え、その数学モデルを Mathematica を用いて導出する。MaTX や MATLAB などのソフトウェアを用いて数値シミュレータを開発し、運動解析を行う。ステージは1自由度の質量・バネ・ダンパー系として再現され、斜面に対して垂直な方向へ受動的に減衰振動をするものとする。まず同一の正多角形状をした2台の搬送物を対象として、ステージの粘弾性係数や傾斜角度に対する同期現象の傾向を解析する。次に一方の正多角形の頂点の数や外接円の半径の長さを変化させ、同様の解析を行う。更に搬送物に自由度を追加する、身体内部に駆動力を搭載する等の修正を加えたものも導入し、ステージを媒体とした自動整列の実現可能性についても検討を行う。

(3) 匍匐型移動ロボットを駆動源とした給紙操作システム

次の方法でモデリング・制御系設計・運動解析を行う。半円形状をした本体フレームの内部に低自由度の揺動質量を取り付けた平面ロボットのモデルを考え、その運動方程式を Mathematica を用いて導出し、MaTX や MATLAB を用いてその運動解析用シミュレータを開発する。身体内部のすべての関節に摩擦は無いが、本体フレームと床面との接点にはクーロン摩擦力が作用するものとする。出力追従制御により揺動質量を一定の周波数で振動させ、これにロボット全体の運動を引き込むことで、前進・後退運動の生成を試みる。また、身体の一部を環境に固定し本体の下に紙状の搬送物を置くことで給紙システムを実現し、同様の運動制御により給紙操作を実現できることを確認する。更に、理論検証用の実験システムの設計開発も行う。一方で、より高速・高機能な給紙操作の実現を目指した新しい匍匐型移動ロボットのモデルの検討も行う。

(4) 軸回転摩擦を利用した物体搬送システム

製造業者により開発された軸回転摩擦コンベヤの実験システムを用いてルーペ形状をした搬送物の搬送実験を行い、ステージの傾斜角度と軸回転速度に対する搬送速度を測定する。得られた実験結果を忠実に再現可能な数学モデルの構築を目指して、冠状面内と矢状面内の運動が互

いに干渉し合わないという仮定の下で運動方程式および摩擦モデルを導出する。数値シミュレーションと実験の結果を照合しながら、数学モデルの妥当性について議論する。

4. 研究成果

(1) 能動的に上下振動をするステージを利用した物体搬送システム

まず能動的に制御される傾斜したステージとその上を移動する 8 脚の対称形状をした受動リムレスホイールから構成される物体搬送システムの数学的モデリングを行い、数値シミュレーションによる運動解析を通して引き込み現象に基づく搬送速度制御の実現が可能であることを確認した。受動リムレスホイールがステージとの衝突を繰り返すのに対し、ステージは直動関節で斜面に垂直な方向へ連続時間的に駆動される。次に直動関節の代わりに 8 脚の能動リムレスホイールを駆動源とした物体搬送システムの数学的モデリングを行い、同様の運動解析を行った。この場合は駆動源のホイールもステージとの衝突を繰り返すが、同様の搬送速度制御が実現可能であることが確認された。これらの理論的結果の妥当性を検証すべく、図 1 に示す実験システムの設計開発を行った。上下動するステージ部分は外部業者に委託をしたが、駆動部のギヤボックスやベルト巻取り装置をはじめとする各種追加部品に関しては自ら設計開発を行った。基礎実験を通して、ステージの傾斜角度と駆動周波数を適切に設定することで引き込み現象が起り、目標搬送速度の調節が可能となることを確認した。

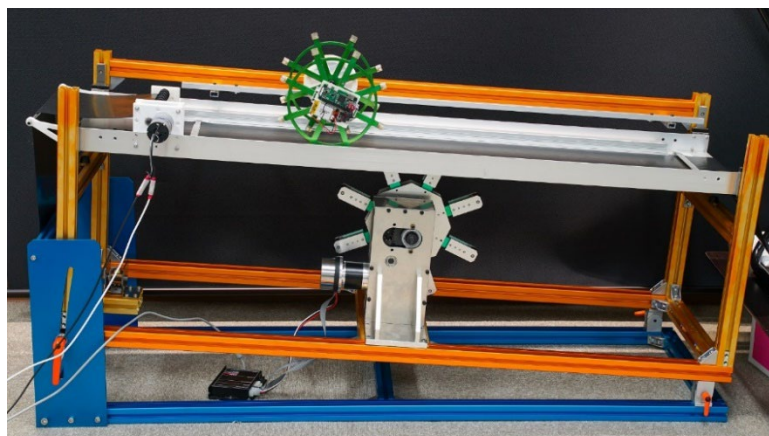


図 1. 能動的なリムレスホイールを駆動源とした物体搬送システム

(2) 受動的に上下振動をするステージを利用した複数台の搬送物の自動整列・分別システム

受動的に振動する傾斜したステージ上を 2 台の同一の正多角形状をした搬送物が受動的に運動をする（受動歩行をする）システムの数学的モデリングを行い、その数値シミュレーションによる運動解析を通して以下の結果を得た。2 台の搬送物の初期角速度やステージの粘性係数に応じて、定常状態において異なる位相関係が現れることを明らかにした。また 2 台の外接円の半径の比をパラメータとして変化させると、これが 1 に十分に近い場合には同じ歩行周期に同期すること、歩行周期の比を評価量としてプロットをするとカントール関数となる（歩行周期が整数比をとりながら不連続に変化する）こと等を明らかにした。更に高い自由度をもつ搬送物として 2 台のコンパス型 2 脚ロボットを導入し、同様の運動解析を通して、ロボットとステージを統合したシステム全体が多周期の安定な運動を生成すること、ステージの粘性係数が大きい場合にはロボット間の力学的干渉が弱まることで同期が起らなくなること、一方のロボットが周期的に駆動される場合にはステージを媒体として互いに同期していくこと等を明らかにした。

(3) 匍匐型高速移動ロボットを駆動源とした給紙操作システム

半円形状をした本体フレームに粘弾性要素をもつ受動的な直動関節を取り付け、更にその先端に 1 自由度の揺動質量を搭載した匍匐型移動ロボットのモデルを提案し、数値シミュレーションを通して過去に提案したモデルよりも高速な前進運動生成が可能であることを確認した。更に身体の一部を環境に固定して同様の制御を行うことで、前進しようとする推力をロボットの下に敷かれた紙状の搬送物を後方へ送り出す操作力に変換できること、受動関節や搬送物と床面との間の粘弾性係数を適切に設定することで目標の搬送速度を実現できること等を明らかにした。以上の理論的結果の検証実験用システムとして、図 2 左に示す匍匐型移動ロボット本体、および図 2 右に示す無動力コンベア的设计製作を行った。上記の研究に並行して、ロボット単体での高速前進運動生成の困難を突破すべく、鉛直方向のみに受動的に振動をする揺動質量を搭載したユニット 2 台を直動関節で結合した新しい匍匐型移動ロボットのモデルの提案も行った。数値シミュレーションによる運動解析を通して、2 台の揺動質量が互いに逆位相で振動をする際に、ユニット間距離を最適な位相差をもつ正弦波の時間軌道へ追従させることで、各ユニットの接地点における動摩擦力に非対称性が生まれ、前進・後退運動の速度を最大化できることを明らかにした。次に、このモデルの後方ユニットを粘弾性要素を介して環境に接続し前進運動生成を行うことで、その推力を適切に変換し給紙操作を実現できることを確認した。以上の解析結果を踏まえ、より高速かつ多機能な動的操作を実現するための新しい匍匐型移動ロボットの実験機的设计も行った（図 3 参照）。

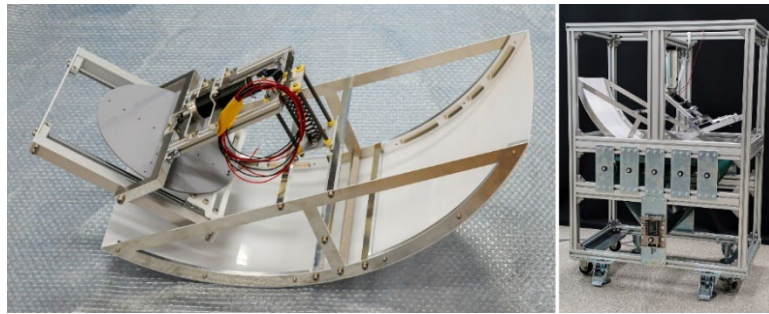


図 2. 匍匐型移動ロボット (左) および無動力コンベア (右)

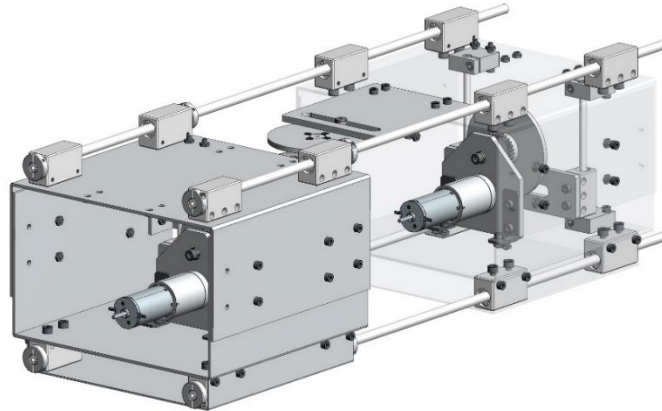


図 3. 2 台のユニットから構成される匍匐型移動ロボットの設計図

(4) 軸回転摩擦を利用した物体搬送システム

ルーペ形状をした搬送物の運動方程式を、冠状面内と矢状面内の運動が互いに干渉し合わないという仮定の下で導出し、これを用いて数値シミュレーションによる運動解析を行った。傾斜した 2 本の軸を同速度で互いに逆方向へ回転させることで、搬送物を一定速度で移動させることができる、搬送速度は軸の回転速度の影響を殆ど受けることなくステージの傾斜角度や接触点の動摩擦係数に応じて変化する等の結果を得た。しかし、これは次に述べる実験結果とは乖離する内容のものであった。

図 4 に示す実験システムを用いて、回転軸の傾斜角度を 1.0 [deg] ~ 6.0 [deg] の範囲に設定し、軸回転速度を徐々に増大させ、テストピースの安定な搬送が可能な範囲内で搬送速度を測定した。結果より、軸回転速度が大きくなると非線形性が強くなり、軸回転速度の 1 次関数として近似することは困難になることが分かった。そこで搬送速度を軸回転速度の 1 次 ~ 4 次の多項式として近似を行い、このうち 4 次多項式が最も高精度な近似値を与えることを示した。また全ての実験データを整理し、軸回転速度と傾斜角度を入力することで搬送速度を出力できる計算ツールをエクセルを利用して作成した。考察を通して、基礎的なニュートン力学に基づく数学モデルで現象を記述することは困難であり、滑り角に基づく説明が妥当であろうとの結論に至った。

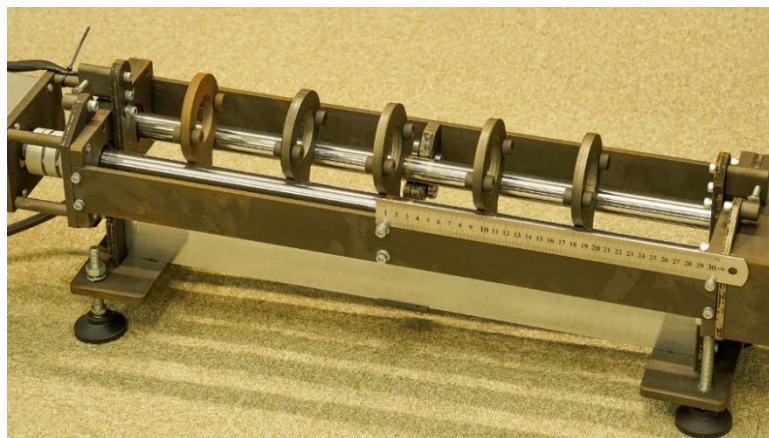


図 4. 軸回転摩擦コンベアとルーペ形状をした搬送物

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 Lin Guo, Fumihiko Asano and Longchuan Li
2. 発表標題 Development of experimental paper-feeding system using crawling-like locomotion robot
3. 学会等名 International Conference Series on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fumihiko Asano
2. 発表標題 Mathematical modeling and motion analysis of conveying object moving on rotating shafts
3. 学会等名 International Conference Series on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kento Mitsuhashi, Masatsugu Nishihara and Fumihiko Asano
2. 発表標題 Experimental verification of vibratory conveyor system based on frequency entrainment of limit cycle walker
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 趙新迪, 顔聡, 浅野文彦
2. 発表標題 ルーベ形状をした物体の軸回転摩擦搬送に関する基礎実験
3. 学会等名 第21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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 郭琳, 李龍川, 浅野文彦
2. 発表標題 葡萄型移動ロボットを用いた物体搬送システムの実機開発
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 浅野文彦
2. 発表標題 軸回転摩擦搬送に関するモデリングおよび運動解析
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 三橋研人, 西原正継, 浅野文彦
2. 発表標題 引き込み現象を利用してリムレスホイールの劣駆動歩行を実現する外部揺動搬送機の開発
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 Lin Guo, Longchuan Li and Fumihiko Asano
2. 発表標題 Conveyor manipulation system using high-speed crawling-like locomotion robot
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Longchuan Li, Fumihiko Asano and Isao Tokuda
2. 発表標題 A novel worm-like locomotion robot slides on slippery ground with asymmetric inner oscillation
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kento Mitsuhashi, Masatsugu Nishihara and Fumihiko Asano
2. 発表標題 A novel vibrating conveyor system based on principle of limit cycle walking
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xindi Zhao, Cong Yan and Fumihiko Asano
2. 発表標題 Basic experiment and data analysis of transportation of loupe-shaped object using shaft rotational friction
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumihiko Asano, Longchuan Li and Isao Tokuda
2. 発表標題 Passive motion analysis of two identical regular octagonal objects that move on passively vibrating tilted stage
3. 学会等名 International Conference Series on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumihiko Asano, Isao Tokuda, Yuxuan Xiang, Cong Yan and Longchuan Li
2. 発表標題 Analysis of passive-dynamic motion on vibrating tilted stage of two regular polygonal objects of different sizes and shapes
3. 学会等名 The 20th International Conference on Advanced Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumihiko Asano
2. 発表標題 Motion generation of crawling-like locomotion robot composed of two identical units with passive wobbling mass and its extension to paper feeding
3. 学会等名 The 20th International Conference on Advanced Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fumihiko Asano and Shotaro Yamaguchi
2. 発表標題 High-speed motion generation of crawling-like locomotion robot based on adjustment of amplitude and elastic coefficient in simple vibration of passive wobbling mass
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumihiko Asano
2. 発表標題 Motion analysis of two identical passive compass-like biped robots walking on vibrating and slippery downhill
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Runyu Liu, Cong Yan and Fumihiko Asano
2. 発表標題 Analysis of synchronization between active and passive bipedal walkers on tilted vibrating stage
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅野文彦
2. 発表標題 振動的な下り斜面上の受動歩行とその安定化制御
3. 学会等名 第22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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野文彦
2. 発表標題 振動的かつ滑りやすい下り斜面上の受動歩行
3. 学会等名 第22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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野文彦, 河合瑞紀, 李龍川, 徳田功
2. 発表標題 振動的な下り斜面上の2台のコンパス型2脚ロボットの受動歩行
3. 学会等名 第22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
4. 発表年 2021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 分担 者	徳田 功 (Tokuda Isao) (00261389)	立命館大学・理工学部・教授 (34315)	

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
---------	---------