

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04050

研究課題名（和文）ハーフドローン倒立振り子型自律移動ロボットによる階段昇降に関する研究

研究課題名（英文）Research on climbing up and down stairs by half-drone inverted pendulum autonomous robot

研究代表者

前山 祥一（MAEYAMA, Shoichi）

香川大学・創造工学部・教授

研究者番号：50292537

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）：車輪型倒立振り子の上部に2つのプロペラ（ロータ）を持つ荷台（ハーフドローン部）を結合した移動ロボット「ハーフドローン倒立振り子型搬送ロボット」を開発した。平地での移動効率と階段での重量物搬送の両方を実現できる新しい移動機構を持つ移動ロボットであり、本研究では、異なる移動モードにおいて、滑らかな平面移動を実現したほか、車輪径に対して比較的大きな段差を昇降する場合についても、その数式モデルの導出と数値シミュレーションを進め、そのメカニズムを解析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

移動ロボットが自律的に階段を昇降でき、荷物を運ぶことができれば大変有用である。被災した建屋の内部やエレベータの設置義務がない低層アパートであっても階段は利用できる場合が多い。災害時の物資の搬送、日常の宅配業務の両方の場面で、エレベータが利用できなくとも、別の階への物の運搬がロボットで自動化されることは大変有意義である。本研究成果は、これらの場面で、移動効率や安全性の面でドローンやクローラや車輪等の従来の移動機構にはない利点を持つ新しい移動機構とその制御法である。

研究成果の概要（英文）：Half-drone inverted pendulum transportation robot which integrate wheeled inverted pendulum with droned cargo?? is developed. This robot has transportation function of heavy load with high mobility on both 2D plane and stairs. In this research, smooth moving on 2D plane is realized and mechanism on climbing up and down a step which is relatively larger than wheel radius is analyzed in detail.

研究分野：ロボット工学

キーワード：車輪型倒立振り子 搬送ロボット 段差昇降 ドローン

1. 研究開始当初の背景

移動ロボットが自律的に階段を昇降でき、荷物を運ぶことができれば大変有用である。被災した建屋の内部やエレベータの設置義務がない低層アパートであっても階段は利用できる場合が多い。災害時の物資の搬送、日常の宅配業務の両方の場面で、エレベータが利用できなくとも、別の階への物の運搬がロボットで自動化されることは大変有意義である。

近年、ドローンによる宅配が期待されているが、運べる重量の制約は厳しいし、そもそも重い物体が頭上を横切るのは安全面からも避けたいことである。一方、被災環境等での階段昇降には、クローラ型や索状ロボット等が利用されるが、平地での移動速度や移動効率が車輪と比べるとかなり劣る。車輪の場合、車輪径の大きい車輪を用いると段差の乗り越えは楽になるが、移動ロボット自体も大型化してしまい、踏面の狭い階段には使いにくい。そこで、これらの問題を解決する新しい移動機構の提案とそれを用いた搬送ロボットの実現が期待される。

2. 研究の目的

「ハーフドローン倒立振り子型自律移動ロボット」を提案する。これは、基本は倒立振り子型の車輪型移動ロボットであるが、その上部に2基のプロペラを持つドローンを結合して構成され、平地では車輪で移動しドローンは前後のバランス制御の補助的役割を果たす。階段昇降時は、上向きに推力を発生させ、ロボットが軽量化されたことと等価な状態を作り出すことで、小さい車輪でも階段を容易に乗り越えるようにするものである。これにより、平地での移動効率が車輪と同等かそれ以上で、階段での重量物搬送も可能となる。ここで、ハーフドローンという呼び名は、一般的なドローンは、通常ロータが4基だが2基であること、また、位置姿勢6次元の空間ではなく、ピッチ角とXZ平面の二次元に運動が拘束されることから、ハーフを語頭に付した。

倒立振り子型移動ロボットも、ハーフドローンもそれぞれ不安定な系であり、それが結合されると、さらに複雑なシステムとなり、制御の面からも学術的に興味深い。また、ロボットシステムとしての構成としても、搬送物をどこで保持し、バッテリーやコントローラ等をどう設置すると最適かを考える必要があり、ロボットの構造設計の面でも興味深い対象である。さらに、図1のように、停止時や低速走行には、荷台の下に補助輪をセットし台車が接地した形態にも変更できる大変ユニークなロボットシステムである。

本研究では、提案するロボットシステムの倒立モードと接地モードの走行制御について理論と実機を通して検証、および、段差昇降のメカニズムに関するシミュレーションを用いた解析を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 倒立モードにおける制御系の検証

図2に示す一次試作機を開発し、倒立モードにおける走行制御を理論と実機の両方で検証した。まず、倒立モードでの物理モデルを導出し現代制御理論に基づき状態フィードバックによる制御系を構築しシミュレーションにより検証した。また、組み込み制御用コントローラを用いて実装して、実機実験により総合的に評価した。

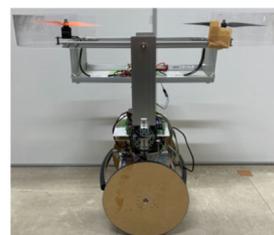


図2. 理論検証用一次試作機

(2) 実用サイズの実機の開発と倒立/接地モードでの走行制御

図3に示す実用サイズの二次試作機の開発を行った。一次試作機からの改良点は、安全性と制御性を考慮し二重反転ロータを採用したことで荷台の水平を保つ機構と上向き推力の発生を分離したことである。この二次試作機について、荷台ドローン部の再設計および基本性能の評価、接地モードと倒立モードの両モードにおいて滑らかな平面移動について、実機実験により評価した。



図3. 実用化検証用二次試作機

(3) 段差昇降メカニズムの解析

車輪径に対して比較的大きな段差を昇降する場合のメカニズムについて、その数式モデルの導出と数値シミュレーションを進め、段差を登る際の特性、降りる際の特性をそれぞれ丁寧に分析した。

4. 研究成果

車輪型倒立振子の上部に2つのプロペラ（ロータ）を持つ荷台（ハーフドローン部）を結合した移動ロボット「ハーフドローン倒立振子型搬送ロボット」を実現した。平地と段差を効率良く移動できる可能性を持つ新しい移動機構を持つ移動ロボットである。本研究成果では、異なる移動モードにおいて、滑らかな平面移動を実現したほか、車輪径に対して比較的大きな段差を昇降する場合についても、その数式モデルの導出と数値シミュレーションを進め、そのメカニズムを解析した。

(1) 倒立モードにおける制御系の検証

図4に示す物理パラメータを用いて、ハーフドローン車輪型倒立振子の物理モデルを導出した。そして、積分型サーボ系を用いた位置制御と速度制御を切替ながら並進移動を制御し（図5参照）、旋回制御と組み合わせることで平面走行制御を実現し、実機実験を行って検証した。その結果、荷台を水平に保ちつつ、微小な段差にもある程度対応して、滑らかに二次元平面の走行制御が可能となった。

なお、機構上の工夫としては、モータから車輪への動力伝達機構である減速器をノンバックラッシュギヤに換装することで、速度制御性を大幅に改善した。

(2) 実用サイズの実機の開発と倒立/接地モードでの走行制御

二重反転ロータを使用した台車ドローン部を設計開発した。その結果、ドローン部の出力単体では、荷台部を保持できないことが分かった。これについては、引き続き性能改善に努めつつ車輪モータのトルクとの組み合わせによるモード変更の可能性について研究することとした。

また、接地モードと倒立モードの各モードにおける上体のヨー軸周りの慣性モーメントの違いを考慮した計算トルク法で駆動輪モータへのトルクを制御する方法を用いて、両方のモードにおいて滑らかな平面移動が実現可能かを検証した。その結果、計算トルク法を用いて慣性モーメントを考慮することで入力安定性が改善することが分かった。

(3) 段差昇降メカニズムの解析

車輪が段差の角の1点で接触し車輪が滑らずに回転すると仮定し、高さ方向の位置の変位を導入して、段差乗り越え時の物理モデルを導出した。

その結果、本体を前傾して段差を登る場合、段差を登るための車輪の前進が本体を起こす動作と連動しており、ドローンによる推力が少なくても登る動きが可能であることが分かった。一方、降りる際は、落ちないようにする分だけロータの出力が必要となるが、問題なく降りることが可能であることが分かった。図6は段差を降りる際の数値シミュレーションによる挙動を図示したものである。

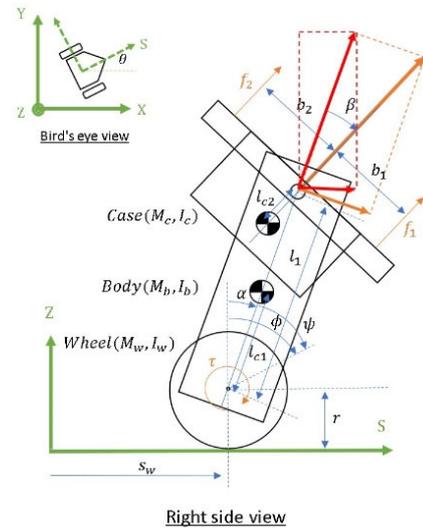


図4. 物理モデルの導出に用いたパラメータ

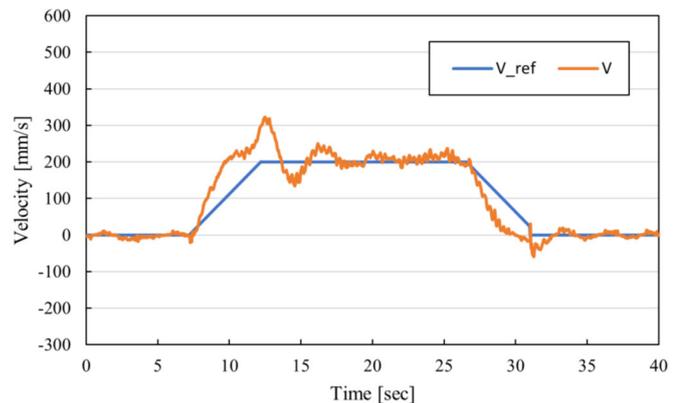


図5. 位置制御と速度制御の切替による並進走行制御

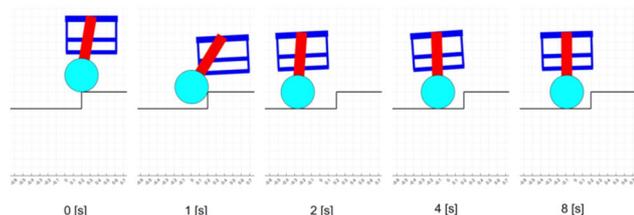


図6. 数値シミュレーションによる段差を降りるメカニズムの解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Rintaro Hoji, Shoichi Maeyama, Takuro Kono, Toshinobu Takei and Shin'ichi Yuta
2. 発表標題 Position Control for Half-Drone Wheeled Inverted Pendulum Robot
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoki Yaemoto and Shoichi Maeyama
2. 発表標題 Development of the second prototype of a half drone inverted pendulum transportation robot to improve the safety and the controllability
3. 学会等名 EJEA Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八重本 直希, 前山 祥一, 小柳 栄次
2. 発表標題 安全性と制御性を考慮したハーフドローン倒立振り子型搬送ロボット 2号機の開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坊寺 琳太郎, 前山 祥一, 油田 信一
2. 発表標題 ハーフドローン倒立振り子型搬送ロボットの速度制御
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野 拓郎, 坊寺 琳太郎, 前山 祥一, 竹田 年延, 油田 信一
2. 発表標題 ハーフドローン倒立振子型搬送ロボットの統合制御
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(SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前山 祥一, 坊寺 琳太郎, 田中 健太
2. 発表標題 ハーフドローン倒立振子型搬送ロボットの提案
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坊寺 琳太郎, 前山 祥一
2. 発表標題 ハーフドローン倒立振子型搬送ロボットの制御システムの開発
3. 学会等名 第20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(SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中 健太, 前山 祥一
2. 発表標題 ハーフドローン倒立振子型搬送ロボットの荷台のバランス制御
3. 学会等名 第20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(SI2019)
4. 発表年 2019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
---------	---------