

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04017

研究課題名（和文）不静定問題を抱える円筒昇降ロボットの姿勢制御

研究課題名（英文）Attitude control of a cylindrical elevating robot with statically indeterminate problems

研究代表者

川崎 晴久（KAWASAKI, HARUHISA）

岐阜大学・工学部・特任教授・名誉教授

研究者番号：40224761

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：円筒昇降ロボットは、街路灯や電柱等の点検ロボット、森林での枝打ちロボット等幅広い応用がある。自重を利用した昇降ロボットが細りのある円筒を昇ると、細りの影響でロボットの姿勢が変化し、作業が困難となるため、姿勢制御が必要となる。しかし、車輪と円筒との接触点での抗力や摩擦力が一意に定まらない不静定問題を抱えているため、姿勢制御時に過大な抗力が不規則的に発生し、姿勢調整が困難となる状況が生じる。

本研究は、この不規則的に生じる過大な抗力の発生の要因を解明し、その解明に基づいて原理的に過大な抗力が生じたときの低減するための姿勢制御を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自重を利用した円筒昇降ロボットは、車輪と円筒表面で生じる接触力が一意に定まらない不静定問題を抱えている。このため、姿勢制御において円筒表面の凹凸や摩擦係数の変動等の影響も受けて過大な抗力が不規則的に生じ、その結果として姿勢制御ができなくなることが発生していた。

この解決に向け、この抗力の発生する仕組みを解明し、解明に基づいた不静定問題を解決する機体姿勢制御を研究した。不静定問題を抱える機構は、これまで構造体の力や応力の解析、ロボットマニピュレーションでの接触力の解析等で多くの研究があるが、その姿勢制御については世界に研究例がなく、機械制御の地平を広げる研究といえる。

研究成果の概要（英文）：Cylindrical elevating robots have a wide range of applications such as inspection robots for street lights and pruning robots in forests. When an elevating robot that uses its own weight climbs a thin cylinder, the posture of the robot changes due to the effect of the thinning, which makes work difficult, so attitude control is required. However, there is a statically indeterminate problem in which the drag force and frictional force at the contact point between the wheel and the cylinder are not uniquely determined. For this reason, excessive drag is irregularly generated during attitude control, which makes it difficult to adjust the attitude. In this study, we elucidated the cause of the generation of excessive drag that occurs irregularly, and based on the elucidation, we showed attitude control in which excessive drag does not occur in principle.

研究分野：ロボット工学

キーワード：昇降ロボット 姿勢制御 不静定問題

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

円筒昇降ロボットは、街路灯や電柱等の点検ロボット、油ヤシの枝払いロボット、森林での枝打ちロボット等幅広い応用がある。昇降ロボットが自重により落下しないようにするには、円筒を強く抱き車輪やクローラで昇降する抱き込み型、動物や昆虫の足爪の形態を模擬した爪型、蛇のような巻き付き型等があるが、いずれも高速昇降を実現できておらず、さらに故障時に昇降ロボットを円筒の高所から安全に降ろすことが難しい。

こうした課題の解決にむけ、自重を利用した車輪駆動の円筒昇降ロボットが近年研究されている。自重を利用するために、円筒を挟んで対向する上方と下方に車輪を配置し、質量中心は円筒の中心軸ではなく下方の車輪側に配置する。これにより、車輪と円筒との接触点で摩擦力を生成することが可能となり、車輪をモータ駆動することで昇降できる。さらには、モータと車輪との伝達部にバックドライバビリティのないウォーム減速機を設けることで、静止時にはエネルギー消費することなく、円筒に静止できる。自重を利用した昇降ロボットは、故障時にはロープ操作で機体の姿勢を変えて降ろすことが可能である。申請者は、世界で最初に自重を利用した昇降ロボットを研究開発し、3次元運動の安定化を図るため、上方と下方にそれぞれ二つの車輪を設置することを提案した。自重を利用するため、抱き込み機構や足爪等を必要とせず、0.2m/s 程の高速昇降も実現した。しかし、街路灯、電柱、樹木は、登るにつれて円筒径が小さくなる細りがある。自重を利用した昇降ロボットが細りのある円筒を昇ると、図1に示すように昇降ロボットの姿勢が傾き、点検や枝打ち作業が困難となる。さらに、円筒の全周において検査や枝打ち作業を行うには車輪を操舵して螺旋昇降することが必要となるが、車輪の間に円筒がはまり操舵ができなくなる問題が生じる。

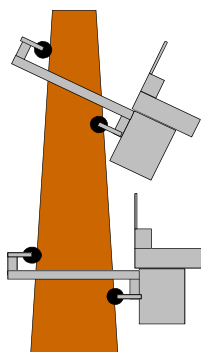


図1 細りのある円筒

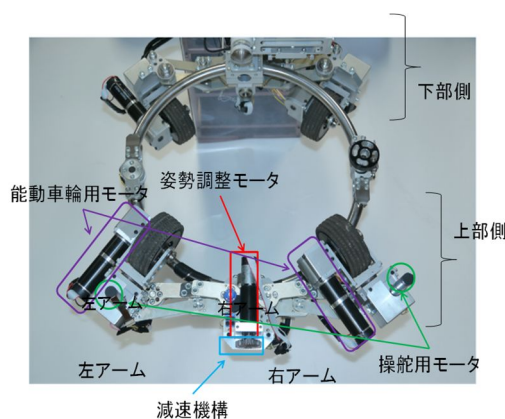


図2 姿勢調整機構のある円筒昇降ロボット

2. 研究の目的

細りのある円筒の昇降において、昇降ロボットの姿勢を一定に保つため、申請者は、1自由度アームにより上方と下方の車輪間距離を調整する図2に示す姿勢調整機構を備えた昇降ロボットを考案した。円筒の中心軸と昇降ロボットの中心軸を一致させるため、下方のアームは姿勢角度のPID制御、上方は下方アームの関節角度のPID制御を採用して、姿勢を常に一定に保つことができることを示した。しかし、この昇降ロボットは、能動車輪と円筒表面で生じる接触力が一意に定まらない不静定問題を抱えている。図3の2次元モデルにおいて、上方と下方の接触点における抗力 (F_1, F_2) と摩擦力 (f_1, f_2) の4つの接触力は、平面運動と回転運動の3つの釣り合い式で定まらず不静定である。同様に、3次元モデルでは、4箇所の接触点での1

2の接触力が平面運動と回転運動の6つの釣り合い式で定まらない。このため、アームを駆動し上下車輪の距離の調整において、円筒表面の凹凸や摩擦係数の変動等の影響も受けて過大な抗力が不規則的に生じ、その結果として姿勢調整ができなくなることが発生する。

本研究は、この過大な抗力が発生する原因を解明し、解明に基づいた不静定問題を解決する機体姿勢制御を研究目的とする。

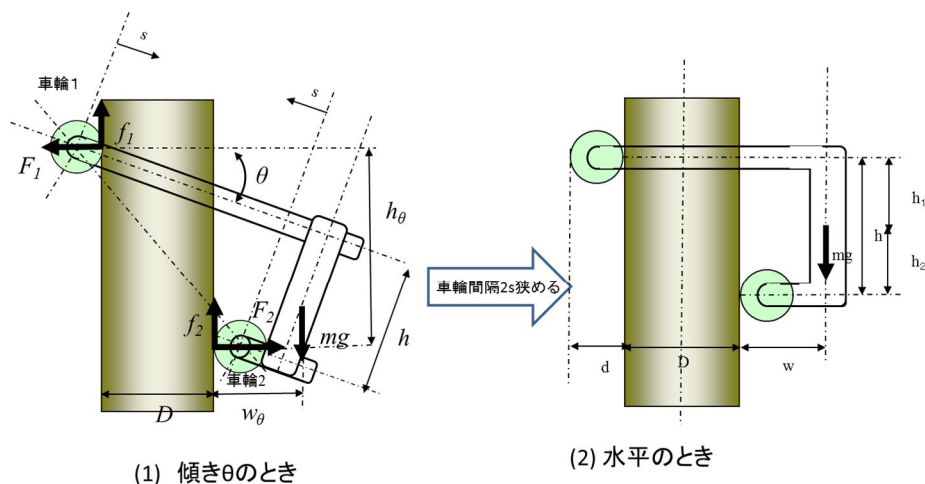


図3 自重を利用して昇降する枝打ちロボットの姿勢制御

3. 研究の方法

機体の姿勢調整は、機体が静止しているときと昇降中のときのいずれにおいても必要である。

はじめに、静止時での姿勢制御を考察する。これまでの実験から、静止時に初期角度 θ_0 を与え、目標角度0度とすると、はじめは機体が回転することで姿勢調整しているが、途中から目標姿勢に至る前に回転が停止する。こうした実験観察と力学的釣り合い式から、原因を解明する。これまでの検討では、2次元モデルでは $h_\theta/D \leq \mu$ のときは、常に抗力が増大し、姿勢調整ができなくなることが判明している。ここで、 h_θ は姿勢が θ のときの鉛直方向の車輪間距離、 D は円筒外径、 μ は車輪と円筒との摩擦係数である。この関係式は、鉛直方向の車輪間距離を小さくなると姿勢調整が困難であることを示す。 $h_\theta/D > \mu$ のときは、予備実験では抗力が増加するときと増加しないときがあり、この関係はPID制御のゲインが関係している。この関係を解析的に明らかにする。

次に、昇降中における姿勢制御を考察する。接触点では昇降に必要な接線力が加わり、円筒と車輪との間に滑りが生じやすくなるが、抗力が増加すると増加しないときがあり。こうした関係を解析的に明らかにする。

姿勢のPID制御は理論的には姿勢誤差を零とするので高精度な姿勢制御に適するが、解析結果に基づいて、姿勢誤差を漸近的に零に収束させながらも抗力が増加しない姿勢制御法を明らかにする。アームによる姿勢制御のみでは困難なときは、上下の車輪の速度制御との組み合わせによる昇降ロボットの姿勢制御を研究する。上下の車輪に速度差を与えると、昇降ロボットが直動上昇と回転の運動の合成となり、この回転を利用して抗力の増加を抑えることができると考える。

4. 研究成果

(1) 静止時の姿勢制御

図2に示す上下のアーム機構により、上下車輪間の水平距離を調整することで、常に機体を水平に保つ姿勢制御をする。このとき、静止時の姿勢制御について、図3の2次元モ

デルでの考察から、上下車輪に作用する抗力 $f_i(i=1,2)$ と摩擦力 F_i は図4に示す関係があることが明らかとなった。図中、 m は機体の質量、 d_i は円筒外径、 h は傾き のときの車輪間の鉛直方向の長さ、 w は傾き のときの樹表面から質量中心までの長さである。点Aのように、上下車輪の摩擦力の大きさに大きな差があるとき、車輪の滑りが生じると摩擦係数は減少し、摩擦力は点Cに移動する。このため、上下の摩擦力は均等化し、抗力は減少する方向に作用することを解析した。このことは、円筒表面での凹凸により車輪が滑るときは、上下の抗力差は縮小するといえる。

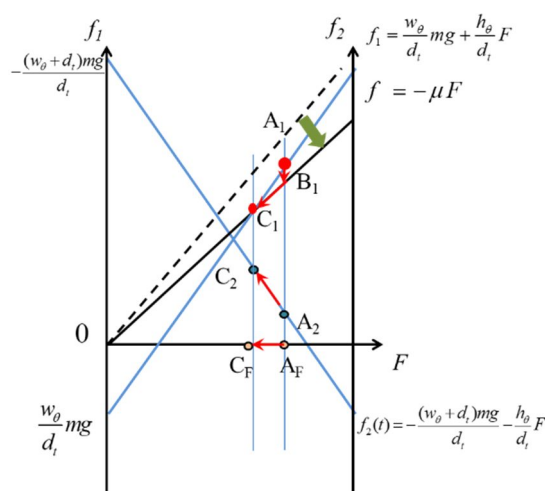


図4 摩擦力、抗力、摩擦錐の関係

(2) 昇降時の姿勢制御

昇降時の姿勢制御では、円筒の細りにより、上下車輪間の距離が短くなるため、少なくとも一方の車輪に滑りが生じる。これにより、静止時より抗力の増加は生じにくいことを解析した。また、抗力の増加が生じる現象は、解析では十分な説明はできていないが、姿勢制御にPID制御を採用していること、姿勢制御装置の入力制限により理論通りの制御が実現できないことが要因であることが示唆された。

(3) 勢誤差を漸的に零に収束させながらも抗力が増加しない姿勢制御法

解析と実験により、車輪で生じる抗力が許容範囲を超えて大きいときは、アーム制御により車輪間距離を広げ、抗力を低減させて、再度姿勢制御する方式を考案し、解析でその有効性を示した。実験検証は、実験機の故障、及び代替として計画していた企業との共同研究で開発している枝打ちロボットがコロナ禍による開発遅れにより実験に利用できなかった。このため、今後の課題とした。

(4) 関連研究

自重を利用した昇降ロボットの関連研究として、センサーを搭載し螺旋昇降しながら枝打ちする枝打ちロボットへの応用を検討した。通常、センサーは直動により枝打ちするが、周回運動中の枝打ちでは切口をセンサーバーで切り開く力が必要となる。この切り開く力を低減するため、枝に対するセンサーの最適な設置角度を解析し実験検証した。その結果、従来法と比較し1/4程に低減できた。この結果は、国際会議CEMD2018で講演発表し、特許出願(特願2018-197071)した。

また、昇降ロボットでは、図5に示すように枝等の突起物との衝突が生じることがあり、こ

の回避が求められる。そこで、ロボット外乱オブザーバによる突起物との接触力と接触位置の推定法を研究し、実用的な精度で推定できることを実験検証した。図6は推定した位置と力の例であり、センサレスで接触外力と接触点が推定できることを示した。この結果は、特許出願（特願 2019-224486）し国際会議 ARIC2019 で講演発表（Best oral presentation 受賞）した。

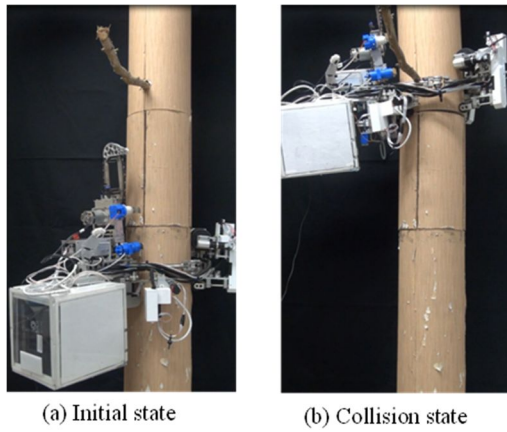


図5 円筒昇降ロボットの突起物との衝突

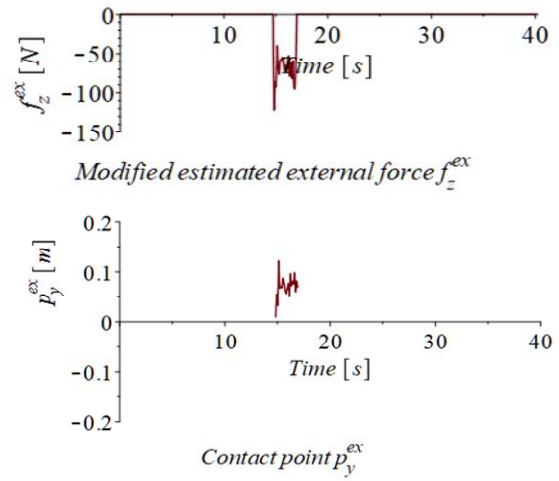


図6 推定したy軸の位置とz軸の接触外力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri	4. 巻 IJRE-3-009
2. 論文標題 Force Discrimination of Finger Pads Using Improved Hand Haptic Interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of VIBGYOR Robotic Engineering	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35840/2631-5106/4109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri	4. 巻 31
2. 論文標題 Humanoid Robot Hand and its Applied Research	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2019.p0016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 上木 諭, 毛利 哲也, 川崎 晴久	4. 巻 55
2. 論文標題 作業空間での大域的指数安定な非線形外乱オブザーバ	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.55.8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Haruhisa Kawasaki, Mouri Tetuya, Satoshi Ueki, Haruo Nagayama, Toshitake Yanagawa
2. 発表標題 Estimation of Obstacle Contact Force and Position for Robots in Task Space
3. 学会等名 2019 International Conference on Artificial intelligence, Robotics and Control (AIRC2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 毛利 哲也, 二村 光祐, 尾関 智恵, 川崎 晴久
2. 発表標題 物体移動を伴うVR筋電義手訓練システム
3. 学会等名 第20回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 杉村駿太、毛利哲也、尾関智恵、川崎晴久
2. 発表標題 遠隔操作ハンドロボットにおける最近傍点を用いた環境回避
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Mouri, Haruhisa Kawasaki
2. 発表標題 High Power Hand with Retention Mechanism
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference. on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuya Mouri, Hibiki Yamamura, Haruhisa Kawasaki
2. 発表標題 Visual Support System for Tele-operated Hand Robot
3. 学会等名 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haruhisa Kawasaki, Mouri Tetuya, Toshitake Yanagawa, Haruo Nagayama
2. 発表標題 Optimization of Chainsaw Setting Angle in Pruning Robot
3. 学会等名 The 2nd annual International conference on Control Engineering and Mechanical Design [CEMD2018] (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長田裕之、毛利哲也、川崎晴久、山村響
2. 発表標題 人間型ハンドロボットの適応制御ゲインによる遠隔操作
3. 学会等名 2018ROBOMECH
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 毛利哲也、山村響、川崎晴久
2. 発表標題 人間型ハンドロボットの遠隔操作のための視覚支援システム
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上木 諭, 毛利 哲也, 川崎 晴久
2. 発表標題 非線形外乱オブザーバによる摩擦力と外力の推定
3. 学会等名 第19回システムインテグレーション部門講演会 (SI2018)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 H. Kawasaki, S. Ito, S. Ueki, T. Mouri	4. 発行年 2020年
2. 出版社 IGI Gloval	5. 総ページ数 36
3. 書名 Design and Control of a Hand-Assist Robot with Multiple Degrees of Freedom for Rehabilitation Therapy, Chapter 43 of Robotic Systems: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications	

1. 著者名 川崎晴久	4. 発行年 2020年
2. 出版社 森北出版	5. 総ページ数 180
3. 書名 ロボット工学の基礎第3版	

1. 著者名 H. Kawasaki, S. Ito, S. Ueki, T. Mouri	4. 発行年 2020年
2. 出版社 IGI Gloval	5. 総ページ数 2075(36)
3. 書名 Design and Control of a Hand-Assist Robot with Multiple Degrees of Freedom for Rehabilitation Therapy, Chapter 43 of Robotic Systems: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 外乱オブザーバ及び外乱オブザーバを用いた接触点推定手段	発明者 川崎 晴久	権利者 岐阜大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願 2019-224486	出願年 2019年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 枝打ち装置	発明者 川崎 晴久	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-197071	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

1) Kawasaki & Mouri Laboratory 岐阜大学工学部 川崎・毛利 研究室
<https://www1.gifu-u.ac.jp/~kawalab/index.html>
 2)川崎晴久、放送大学岐阜学習センター公開講演会、「人に優しく役立つ未来のロボット」、2020.2.1
 3) 川崎晴久、(株)日本テクノセンター主催技術セミナー、「ハプティックインターフェイスの基礎とVR空間操作・遠隔操作への応用」、2020.11.27
 4) 川崎晴久、JSME 東海支部70周年に寄せて、日本機械学会東海支部創立70周年記念誌 発行：日本機械学会東海支部，pp.17-18，2022.2

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