

令和 5 年 4 月 3 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04393

研究課題名（和文）ロボットの制御しやすさの指標：再考

研究課題名（英文）Robot manipulability: Revisited

研究代表者

岩谷 靖（Iwatani, Yasushi）

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10400300

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）：本研究では、ロボットの制御しやすさについて、サーボスフィア（球形トレッドミル）とリムレスホイールロボットを対象に、その特性を明らかにした。サーボスフィアについては、可操作度と呼ばれるロボットの制御しやすさの指標が最適なままに、振動を低減させる最適モータ配置を発見した。またリムレスホイールロボットの構造最適化について、移動速度や移動効率と構造パラメータの間に、通常の車輪では見られない凸状の関係が見られることを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボットを含む制御システムにおいては、制御のしやすさが構造や姿勢に依存する。これまでロボット設計における制御のしやすさの判定には、可制御性と呼ばれる指標が用いられてきた。本研究課題は、従来使用されてきた可制御性のみでは判定できない構造特性が存在することを明らかにしている。本研究課題の成果は、ロボット開発において、制御しやすい、すなわち、より少ないエネルギーで動作可能な構造や、より機敏に動作可能な構造の選定に役立つ。

研究成果の概要（英文）：In this research, I show some control properties of the servosphere and the rimless wheel robot. For the servosphere, I found an optimal motor location that maximizes a manipulability index and reduces vibrations. In an optimization problem of some design parameters for the rimless wheel robot, I found that the relationship between the maximum steady speed and the wheel radius is concave for the rimless wheel robot, but is linear for the rimmed wheel robot.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ロボット 制御しやすさ 制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

可操作性はロボットの制御しやすさを特徴付ける性質であり、特異点回避や機構設計を含むロボット工学の基盤を形成している。一方で、動力学モデルに対する可操作性の指標である動的可操作度には古くから不備が指摘されており、未解決な問題として残っている。

実際に研究代表者が過去に作製したサーボスフィア(図1)と呼ばれる球形トレッドミルでは、次の段落に述べる問題が生じていた。サーボスフィアは1970年代に原型が提案された、トレッドミル(ルームランナー)の平面方向への拡張である。サーボスフィアは三つの全方位車輪付きモータから構成され、これら全方位車輪の上に置かれた球の回転を制御することで、並進二次元および回転一次元方向のトレッドミルを実現する。サーボスフィアは、動物の行動観測に用いられてきている。具体的に、動物を球の上に載せ、動物の動きと反対方向に球を動かすことで対象動物を球上に非拘束に留めながら行動観察を行うことができる。

研究代表者がサーボスフィアを開発・改良するにあたり、その機構設計問題において既存手法では解決できない可操作性の問題が発生した。可操作度や動的可操作度を最適に設計しても、振動等の動力学的問題が解決できないのである。すなわち、研究代表者は研究開始当初、可操作度の不備の問題に直面していた。

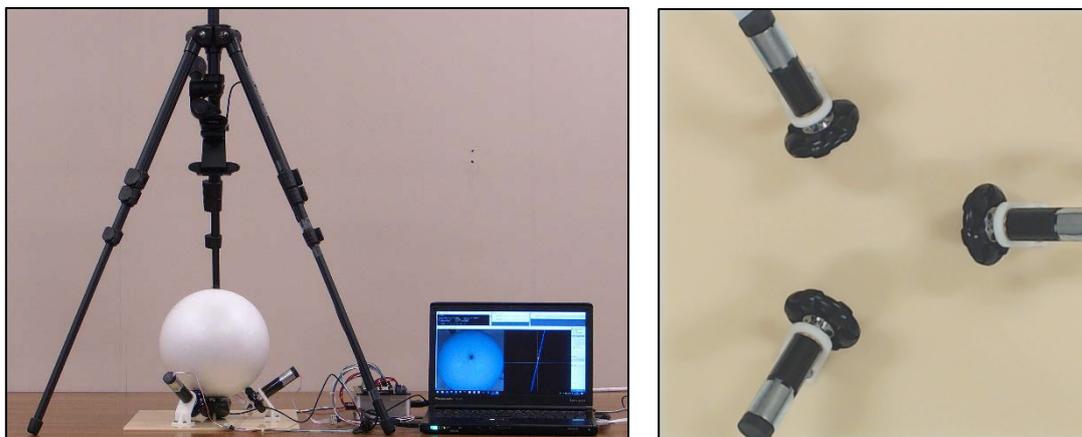


図1. 左：サーボスフィアの側面から見た全景。右：上面から見た従来の最適モータ配置。

2. 研究の目的

本研究の目的はロボットの制御しやすさを特徴付ける可操作度の概念を再考し、ロボットの制御しやすさについて、より実践的な特徴付けを行うことにある。

3. 研究の方法

本研究課題は、理論的なアプローチと実験的なアプローチにより、ロボットの制御しやすさの本質に迫る。

理論的なアプローチでは、ロボット工学における制御しやすさの概念である可操作性と、制御工学における制御しやすさの概念である正実性の関連を調査することで、制御しやすさの本質に迫る。実験的なアプローチでは、前述のサーボスフィア(球形トレッドミル)などを対象に実験を通して制御しやすさの本質に迫る。

4. 研究成果

理論的なアプローチについては、残念ながら確固たる理論的な成果を得ることはできなかった。

一方、実験的なアプローチでは、以下に述べる数多くの成果を得ることができた。

まず、前述のサーボスフィア(球形トレッドミル)に関する成果について述べる。「研究開始当初の背景」の欄に述べたように、サーボスフィアは三つの全方位車輪付きモータから構成され、これら全方位車輪の上に置かれた球の回転を制御することで、並進二次元および回転一次元方向のトレッドミルを実現する。サーボスフィアの操作性は、モータの配置(より正確には、三つの全方位車輪の位置および角度)に極めて大きく依存する。これまでは、図1右に示す配置とすることが一般的であった。この配置は、可操作度について最適化されているものの、高速動作時に大きな振動を発生する問題があった。この問題に対して本研究課題では、操作性を低減させずに振動を大きく低減するモータ配置が二つ存在することを明らかにした。一つは図2上の配置であり、並進二次元と回転一次元方向の制御が可能である。もう一つは図2下の配置であり、並進二次元方向のみの制御が可能である。

図2上の配置は、これまでの最適配置である図1右の配置と等価な可操作度を有する. 図2上の配置では、図の矢印の方向にモータ位置を変更しても可操作度は変わらない. このため、可操作度が変わらない範囲で、振動特性を改善できるモータ配置を選択できる. 実際に、モータ配置を図2上の矢印方向に変更させた際の振動特性を実験的に解析することで、最適なモータ配置を確定できた.

図2下の配置は、回転方向の制御を行わない代わりに、並進方向の可操作度を向上するものである. 実際にサーボフィアの用途である動物の行動観察では、対象動物を球上に留める意味での並進方向の制御のみが出来れば十分であることがある. このような状況では、図2下の配置は図1右や図2上よりも並進方向の可操作度が高いため、図2下の配置は効率な並進操作が可能である. 図2上と同様に図2下の配置も、矢印の方向にモータ位置を変更しても可操作度は変わらない. このため、可操作度が変わらない範囲で、振動特性を改善できるモータ配置を選択できる.

また、図2の二つの配置の振動特性を解析する過程で、高速動作時の振動には二種類の振動が存在することを確認した. 一つは鉛直方向の振動であり、もう一つは水平方向の振動である. 図2の二つのどちらにおいても、最適なモータ配置から外側にモータを配置すると、鉛直方向の振動が増加する. 逆に、最適なモータ配置から内側にモータを配置すると、水平方向への振動が増加する. さらに、モータの最適配置を含むこれらの特性が、ロボットの部材の材料特性に影響されることも明らかにした.

さらに、具体的なロボットの制御しやすさの指標に関するロボット設計問題の課題として、リムレスホイールの設計問題について取り組んだ. リムレスホイールは、リム(車輪の外周輪)のない車輪機構で、スポーク先端が直接地面と設置することで駆動力を地面に伝える. 設計問題を簡潔にするために、図3左に示される一つのリムレスホイールと一つの質点(胴体)から構成されるロボットの設計問題を考察した. ホイールと質点はアクチュエータ付きの回転関節で接続されており、アクチュエータに駆動トルクを印加することでロボットは動く.

まず比較対象として、通常のリム有りの車輪と質点(胴体)から構成されるロボットの定常走行の解析を行った. このロボットに対しては、定常走行時の移動速度と移動効率を理論的に導出できる. 移動速度と移動効率のどちらも、各種設計パラメータに対して単調に増加あるいは減少することを確認した. そのため通常車輪においては、これらの指標に対して最適なパラメータ値は存在しない.

一方でリムレスホイールにおいては、定常走行時の移動速度と移動効率を理論的には導出できていない. そこで、各種パラメータに対する定常走行時の移動速度と移動効率を数値実験により導出した. その結果、いくつかのパラメータは通常車輪と同様に移動速度と移動効率が単調に変化した. 一方、通常車輪とは異なり、移動速度または移動効率が凸状に変化する. すなわちこの場合、最大となるパラメータが最適値となる(図3右).

以上のように、数値実験を含む実験的なアプローチでは、様々な観点からロボットの制御しやすさの特性を明らかにすることができた.

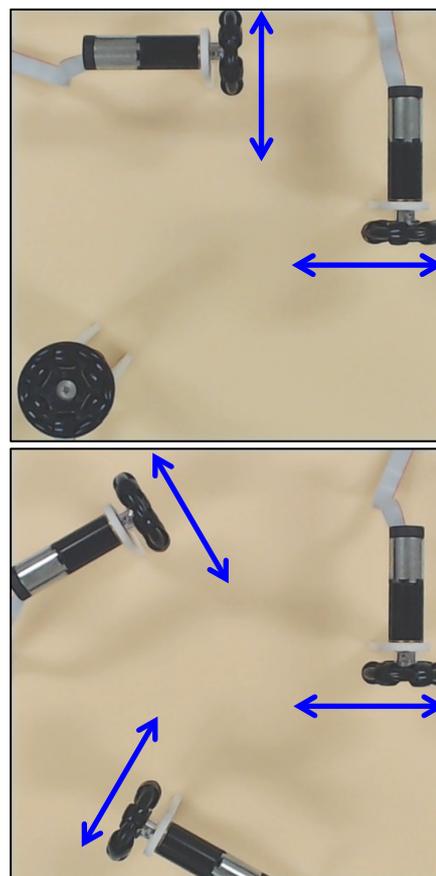


図2. 発見した最適モータ配置

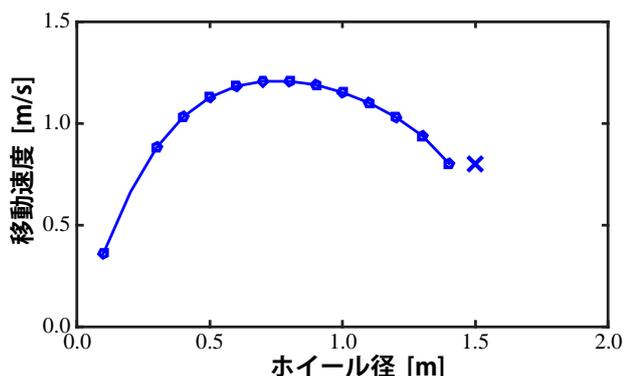
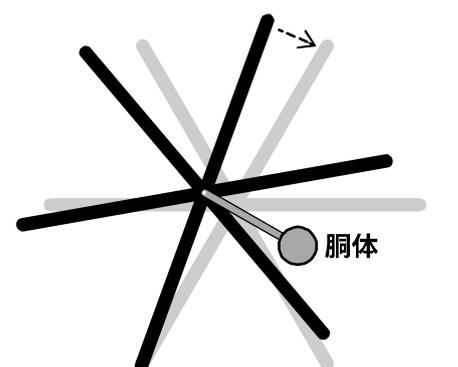


図3. 左: リムレスホイールロボットの側面からの外観. 右: 走行特性の凸性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yasushi Iwatani and Toshinobu Takei	4. 巻 15
2. 論文標題 Steady locomotion in torso-actuated rimless wheel robots	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 99 ~ 108
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/18824889.2022.2097402	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 木内和秀, 設楽久志, 岩谷靖, 小川宏人
2. 発表標題 コオロギ気流誘導性逃避行動は刺激時の運動状態によって変化する
3. 学会等名 第92回日本動物学会オンライン米子大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 毛利無限, 岩谷靖
2. 発表標題 コバネイナゴの跳躍における疲労の解析
3. 学会等名 計測自動制御学会東北支部第333回研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩谷靖
2. 発表標題 伸張する布を用いた二次元トレッドミルの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasushi Iwatani
2. 発表標題 High-speed servosphere
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩谷靖
2. 発表標題 サーボスフィアの並進制御における最適モータ配置
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020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