

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14067

研究課題名（和文）「車輪機構学」の確立に向けた未知機構の探究と統一的評価法の構築

研究課題名（英文）Exploration of Unknown Mechanisms and Construction of Unified Evaluation Methods for the Establishment of "Wheeled Mechanism Science"

研究代表者

寺川 達郎 (Terakawa, Tatsuro)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：10847982

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：どのような車輪機構が、どのような特性を有し、どのような要求に応えられるのかを明らかにするため、車輪機構に関する理論体系の構築を目的として研究を行い、以下の成果を得た。車輪機構の機能を抽象化して表現し、スクリュウ理論と呼ばれる運動理論を適用できるようにした。過去に構築した運動モデルを拡張して、新しい動作原理に基づく新機構を提案した。車輪機構に生じる拘束を空間運動の制御に利用する機構を提案した。種々の車輪機構について解析を行い、滑りや振動について調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スクリュウ理論が導入されることで、車輪機構の創造設計や比較評価を直感的に行いやすくなる。新動作原理により、複雑な車輪式移動装置を容易に制御できるようになる。車輪機構の拘束を利用することにより、省モータ化など新しい特性を備えた機構が実現できるようになる。各車輪機構の特性を数値的に評価することで、より有効な車輪機構の選定や設計を行うことができる。これらの成果は、必要な機能を備えた車輪式移動装置の機構を誰でも簡単に作り出せるような設計方法論の構築に寄与する。

研究成果の概要（英文）：In order to clarify what kind of wheel mechanism has what kind of characteristics and responds to what kind of requirements, this research was conducted with the aim of constructing a theoretical system for wheeled mechanisms, and the following results were obtained. (1) The functions of the wheel mechanism were abstracted and expressed so that a theory of motion called screw theory could be applied. (2) A new mechanism based on a new principle of motion was proposed by extending the kinematic model that had been constructed in the past. (3) A mechanism was proposed that utilizes the constraints imposed on the wheel mechanism to control the spatial motion. (4) Various wheel mechanisms were analyzed and their slippage and vibration were investigated.

研究分野：機構学

キーワード：車輪 移動装置 運動学 機構総合

1. 研究開始当初の背景

交通渋滞や交通事故、物流危機などヒトやモノの移動に関わる社会課題の解決が急務となっている。そうした状況から移動装置へのニーズも多様化が進み、輸送を省力化する自律移動ロボット、近距離移動用の低炭素型パーソナルモビリティ、高齢者をサポートする高機能電動車いすなど新たなスタイルの移動装置が様々要求されている。これに対し、移動装置の知能化やサービス化といった情報技術を導入した新機能の開発が精力的に進められている。一方、移動装置の根本的な運動特性は機構構造により決定される。そのため移動装置をより用途に見合ったものとするには、それぞれの使用条件に適した特性を持つ機構を提供することが必要になる。

移動装置を構成する機構の中で移動機能を支配する最も重要な部分が車輪機構である。従来の移動装置ではタイヤ付き車輪を回転駆動する機構が多く採用されているが、移動ロボット分野では他にも種々の車輪機構が提案されており、各々に適した用途でその有効性が示されている。しかし、各機構の特性や適性は様々であり、既存の機構だけですべての要求に応えることはできない。そこで研究代表者は所望の特性を備えた車輪機構を創成するプロセスの構築に取り組んでいる。過去の研究(引用文献①)において、既存の車輪機構の運動学条件式を比較・統合することであらゆる車輪機構の運動を記述可能な一般化運動学モデルを構築した。本モデルから車輪機構の運動は数理的に共通項と特性項で表現され、特性項が機構固有の機能を担っていることを明らかにした。この結果を逆に利用すれば、所望の特性を実現するための特性項の条件を導くことができる。さらに機構学の知見を用いて条件から機構を具体化することにより、所望の特性を備えた車輪機構が得られる。

2. 研究の目的

どのような車輪機構が、どのような特性を有し、どのような要求に応えられるのかを理論的に明らかにするため、①未知の車輪機構の探究を通じ、車輪機構の成立条件やその動作特性との関係を数理的に示すこと、②あらゆる車輪機構に共通する運動理論を構築し、定量的に比較評価可能な指標を開発することを本研究の目的とした。①により車輪機構の総合法を、②により分析法を構築し、「車輪機構学」の確立を目指す。

3. 研究の方法

①では、研究代表者が構築した機構総合法に基づき新機構の存在可能性を検討した。車輪機構を構成する対偶に注目し、一般化運動学モデルと機構学の知見から与えられる条件の下でその種類と配置を様々に変えて可能な組合せを探索した。また各種の車輪機構の構造に対し、所望の運動を実現し得る動作形態を探索した。車輪機構を構成する対偶のうち駆動する対偶の組合せを種々にとり、機構の入出力関係を表す条件式から入出力特性を明らかにし、新しい動作形態の発見を試みた。また他の種類の機構で用いられる運動理論も応用することにより、対象の機構を平面機構だけでなく空間機構にも広げて検討を行った。

②では、申請者が構築した車輪機構の一般化運動学モデルを基に各種機構に適用可能な力学モデルを構築し、解析によりその特性を調査した。まずLagrange法等の解析力学の知見を導入して車輪機構の動力学モデルを構築した。これを用いて各機構の特性を評価し、特に車輪式移動装置で重要となる滑りや振動などの現象を中心に議論した。また主要な結果について実機を用いた実験で計測を行い、その結果の妥当性を確かめた。

4. 研究成果

(1) スクリュー理論を用いた車輪機構の総合法および解析法を構築した。移動装置を一種の平行リンク機構と見なすことにより、スクリュー理論と呼ばれる運動理論を車輪機構に導入した(図1)。具体的には、車輪を移動装置の本体と地面をつなぐ対偶と考え、相当する回転対偶と滑り対偶の組合せに変換し、各種の車輪機構において生じる運動と拘束をスクリューを用いて表現できることを示した。

その結果、車輪機構は2種類に大別できることを指摘し、それらの組合せによって成立する移動装置にどのような種類の機構が存在し得るのか議論した。また、スクリュー理論を用いて運動学関係式を導出する方法を示し、車輪の種類と配置によって移動装置の動作特性がどのように変化するか調査した。スクリュー理論を用いることにより、従来は数式ベースで扱う必要があった移動装置の数理モデルを幾何学的関係と直接的に結び付けて検討することが可能となった。

また、車輪機構と通常のリンク機構を共通の理論で取り扱えるようになったことから、車輪機

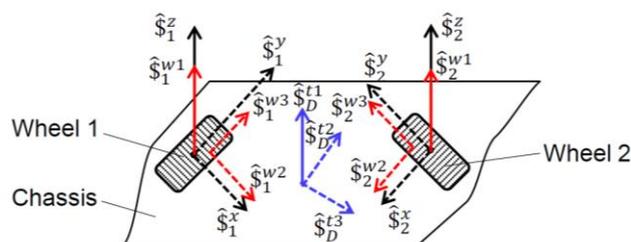


図1 車輪式移動装置とスクリュー理論

構とリンク機構を組み合わせた空間機構（モバイルマニピュレータ）の総合・解析手法を構築した。研究代表者が調査した限り、車輪機構とリンク機構を同時に一つの理論で総合する手法はこれまでになく、機構の種類を横断した新たな理論体系の創出に寄与することが期待される。今後、本理論の適用範囲の拡張を図るとともに、より実際的な要求に応じた機構の設計法を構築し、「車輪機構学」のさらなる展開を目指す。

(2) 一般化運動学モデルを拡張し、車輪の相対運動を摂動に近似して表現することで、新動作原理に基づく車輪式移動装置の運動法を提案した。この運動法は、周期的動作を利用することで機構内に存在する受動対偶の運動をコントロールするものである。移動装置本体の回転のみで複数の受動対偶を制御できるため、特殊な構造の車輪を用いることなく従来機構よりも少ない数のモータで任意方向移動が可能な機構を構築することができる。この運動法は車輪式移動装置において不等式制約を考慮した運動を生成する新しいアプローチを提供する。本運動法が適用可能な機構を一般化運動学モデルを用いて表現し、その成立条件を数理的に明らかにした。この結果を基に可能な機構の候補を複数示し、特に実用性が高いと考えられる機構（図2）に注目して、その運動の近似モデル、制御法、経路計画法を構築した。それらの有効性をシミュレーションと実験により実証した。

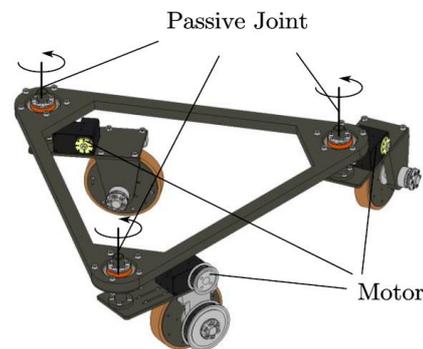


図2 提案した新動作原理移動装置

また、拡張した一般化運動学モデルに基づき、移動装置の構成要素と自由度の関係から所望の移動機能を実現するための数理的な必要条件を示した。当該条件を満足する機構の構造を分類・探索し、複数の新機構を提案した。さらに、特に有用性が高いと考えられる機構に対し、複数の制御法に基づく制御器や機構の構造的特徴を利用した状態観測器を設計し、制御対象としての特性を比較・分析した。今後、これらの知見を統合し、「車輪機構学」の拡充を進める。

(3) 車輪式移動装置において生じる運動拘束である非ホロミック拘束を利用し、モータ数よりも多くの自由度を制御可能な空間機構（図3）を提案した。本機構は、能動2自由度を有する車輪式移動装置を駆動ユニットとし、出力部が受動3自由度の適当な連鎖を介して駆動ユニットと接続されている。各駆動車を適当な軌道で駆動すると、その位置と姿勢を任意の状態とすることができる。各駆動車の位置と姿勢は出力部の位置と姿勢と1対1で対応するため、出力部の位置と姿勢も任意の状態とすることができる。すなわち、空間6自由度の運動を制御することができる。通常の機構では空間6自由度の運動を実現するために6個以上のモータが使用されるが、本機構は4個のモータのみを使用する。従って、本機構は従来機構よりも少ない数のモータで構成可能である。車輪式移動装置に非ホロミック拘束が作用することは一般に知られているが、研究代表者が調査した限り、空間機構の運動制御に応用する例は本研究が初である。

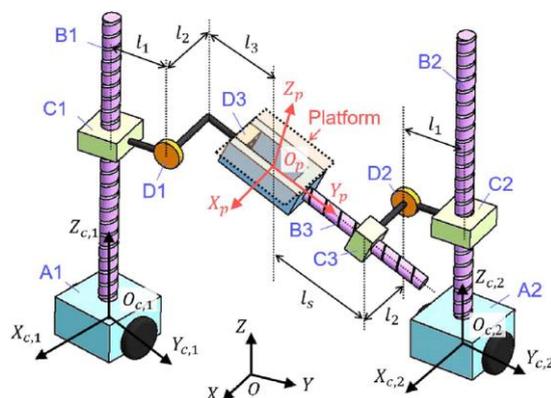


図3 提案した非ホロミックロボットシステム

また、提案する空間機構の動作においては、空間機構の連鎖に由来する拘束を考慮しながら車輪式移動装置を制御する必要がある。これに対し、独自の経路計画法を提案するとともに、設定した経路をロボストに追従するためのフィードバック制御器を設計し、任意の初期状態から任意の目標状態に到達可能な制御システムを構築した。シミュレーションおよび試作機を用いた実験を行い、提案した機構と制御システムが有効に機能することを確認した。今後、対象とする機構の範囲を拡大し、車輪式移動装置を用いた非ホロミックロボットシステムの特性や応用について研究する。

(4) 単体で全方向移動可能な車輪は特殊な構造を必要とし、その構造上の複雑さから通常車輪とは基本的性能で異なることが指摘されている。これに対し、複数の車輪式移動装置を対象に動力学解析を行い、新たな運動特性や機構設計上の知見を示した。摩擦力を利用して外周ローラを駆動し全方向移動を実現するアクティブオムニホイール（引用文献②）に関して、車輪機構の駆動系の動力学モデル（図4）を構築し、解析を行い、外周ローラに生じる滑りと振動に関して調査した。シミュレーションおよび実験を行い、滑りや振動が摩擦駆動部の接触位置や外周ローラ支持部の弾性に強く依存することを明らかにした。また、アクティブオムニホイールにおける外周ローラの二層構造に着目し、アクティブオムニホイールを搭載した移動装置において接地

点が断続的に変化することによる運動への影響を調査した。その結果、適切なパラメータの条件下では移動装置のロール方向の運動に関して姿勢を安定化させる作用が生じ得ることを示し、実験によりその現象の存在を確認した。その他に、受動ローラを有するメカナムホイールを用いた4輪全方向移動装置に関して、受動ローラの回転と外力への耐性との関係について調査した。その結果、斜面走行時では、その斜度により滑りの生じやすさや滑りが生じた後の挙動の安定性・不安定性が異なることを明らかにした。さらに、種々の車輪機構を搭載した移動装置のエネルギー特性の差異を評価するために、エネルギーベースの評価指標の構築に取り組んだ。運動学と力学に基づいて評価モデルを設定し、機構構造や運動法と消費エネルギーとの関連性について指摘した。これらの知見は、より使用条件に適した車輪機構や車輪式移動装置の設計に寄与することが期待される。今後、各特性を統一的に扱うための理論の構築を目指す。

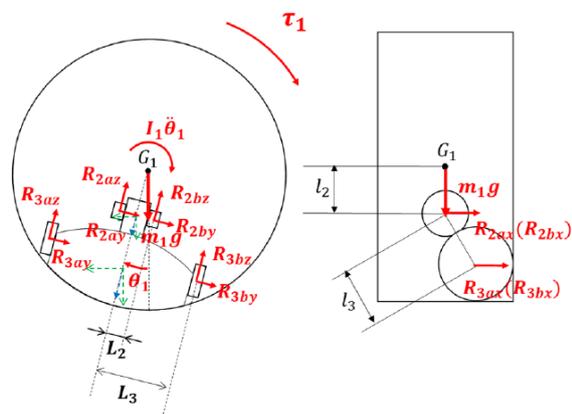


図4 アクティブオムニホイールの力学モデル

<引用文献>

- ① Tatsuro Terakawa, Masaharu Komori, Kippei Matsuda, Shinji Mikami, A Novel Omnidirectional Mobile Robot with Wheels Connected by Passive Sliding Joints, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 23, No. 4, 2018, 1716-1727.
- ② Tatsuro Terakawa, Masaharu Komori, Yuuta Yamaguchi, Yugo Nishida, Active Omni Wheel Possessing Seamless Periphery and Omnidirectional Vehicle Using It, Precision Engineering, Vol. 56, 2019, 466-475.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 YAO Qiang, TERAKAWA Tatsuro, MORITA Yuya, KOMORI Masaharu	4. 巻 17
2. 論文標題 Mobile parallel manipulator consisting of two nonholonomic carts and their path planning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 JAMDSM0020
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2023jamdsm0020	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 LONG Siying, TERAKAWA Tatsuro, KOMORI Masaharu	4. 巻 16
2. 論文標題 Type synthesis of 6-DOF mobile parallel link mechanisms based on screw theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 JAMDSM0005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2022jamdsm0005	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 Lin Geng, Terakawa Tatsuro, Shinno Koichiro, Inoue Taichi, Komori Masaharu	4. 巻 -
2. 論文標題 RoMop: A New Type of Wheeled Mobile Platform Based on Rotating Locomotion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMECH.2023.3333016	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 Long Siying, Terakawa Tatsuro, Yogou Mahiro, Koyano Rintaro, Komori Masaharu	4. 巻 16
2. 論文標題 Kinetic Analysis of Active Omni Wheel With Barrel-Shaped Rollers for Avoiding Slippage and Vibration	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Mechanisms and Robotics	6. 最初と最後の頁 51002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4062608	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tatsuro Terakawa, Yusuke Hattori, Siying Long, Takumi Ougino, Yugo Nishida, Masaharu Komori
2. 発表標題 Experimental Verification of Stabilizing Effect of Double-Row Active Omni Wheel
3. 学会等名 The 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tatsuro Terakawa, Mahiro Yogou, Masaharu Komori
2. 発表標題 Motion Characteristics Analysis of a Mecanum-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot on a Slope
3. 学会等名 The 16th IFToMM World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------