

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：52501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14705

研究課題名（和文）一輪2自由度方式によるパーソナルモビリティのホロノミック移動制御の研究

研究課題名（英文）Study on Holonomic Locomotion Control of Personal Mobility with Two Degree of Freedom Wheel System

研究代表者

浅野 洋介（Asano, Yosuke）

木更津工業高等専門学校・電気電子工学科・准教授

研究者番号：70390416

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）：1輪のみで全方向に移動することが可能な2自由度車輪について研究を行った。継続した安定動作という課題は残るものの、車輪に搭載した外周チューブの回転によって全方向に移動することが可能な2自由度車輪を開発することが出来た。チューブへの動力伝達方法としては、ベルト駆動の接触型のものと磁気歯車を用いた非接触型のものを検討した。アクチュエータの入力と進行方向の関係性を見だし、さらに1輪のみでYaw軸姿勢を制御することが可能なアルゴリズムを非線形モデル予測制御に基づいて提案した。今後は車いすへの搭載を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

全方位移動システムは、複数の受動車輪を用いるものから、能動車輪を用いるものに移り変わりつつあり、様々な機関で研究が行われてきた。本研究の成果はそれらの研究の中でも、大きな径の車輪が構築しやすいという大きな特徴を打ち出すことが出来た。また、これまでに考えられていなかった非接触で動力伝達できる能動全方位移動システムを提案することが出来た。したがって、将来的には小型のモビリティから人間が搭乗するサイズのパーソナルモビリティに適用され、より快適な移動手段のひとつとなることが予想される。

研究成果の概要（英文）：We studied of 2-DOF wheel which can move omnidirectionally only one wheel. We were able to develop 2-DOF wheel which mounted tubes around the outer ring of the wheel. The torque transmission method to the tube was considered about the contact type using the belt and non-contact type using the magnet gear. Moreover, we proposed the algorithm to control the Yaw-axis direction of the 2-DOF wheel, which is based on non-linear model predictive control. In the future, we aim to install in wheelchairs.

研究分野：制御工学

キーワード：全方位移動 2自由度車輪 非接触動力伝達 非ホロノミックシステム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

モビリティの研究において、全方位移動機構に関する様々な研究が行われてきた。通常の車輪型移動機構と比較して、全方位移動機構の利点は、非ホロノミック拘束が存在せず、直感的な移動が可能なことである。一般的な全方位移動機構はオムニホイールやメカナムホイールと呼ばれる特殊な車輪を3輪以上組み合わせることで実現される。

この機構の課題は、全方位移動の実現に車輪を配置するための広い面積が必要となり、狭路での移動・作業が困難となる。従来の車輪には接地面が進行方向と垂直に回転する車輪も存在するが、受動輪であり、能動的に動作しない。接地面を能動的に回転可能なものは存在するが、軽負荷が想定されている、といったことが挙げられる。さらに、既存の車輪は、いずれの構造であっても接地面が不連続であり、移動中の振動を避けられない。自動車における全方位移動機構も存在するが、多数のアクチュエータを必要とする構造であり、パーソナルモビリティへの適用には困難である。

次世代のパーソナルモビリティに必要な車輪は、人間が搭乗することが想定された対向2輪型で、障害物乗り越え可能なほど大径であり、通常タイヤのように振動が発生しない、単純な構造で軽量となるものと考えられる。申請者は、これまでにこれらを実現する一輪2自由度方式の車輪の研究・開発を行ってきた。図1は申請者が試作した2自由度車輪である。図2に動作原理を示す。車輪の接地面全体に、T軸沿って回転可能なチューブがあり、Y軸方向の移動を実現している。車輪の中央に図3のような差動歯車機構を搭載し、入力軸に接続された2つのアクチュエータの動力を、図4のように、車輪回転とチューブ回転に振り分けることで1輪のみで2自由度移動を実現している。接地面を一連のチューブとしているため、振動は発生せず、X軸方向およびY軸方向にスムーズな移動を可能とした。

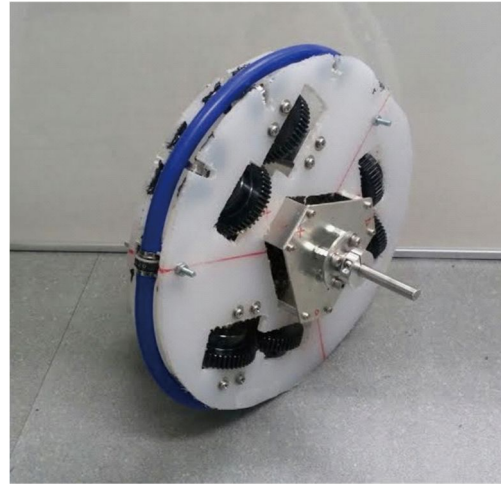


図1 申請者が開発中の2自由度車輪

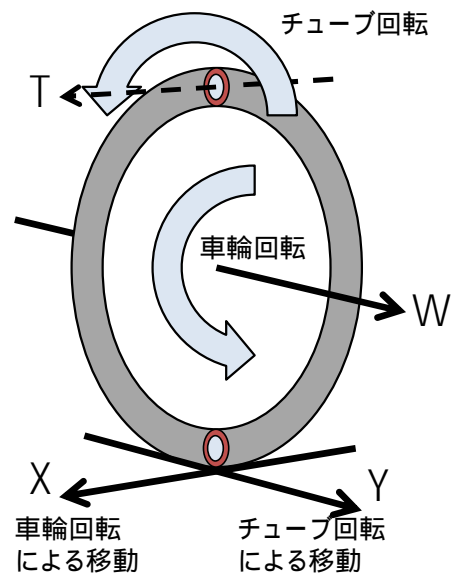


図2 2自由度車輪の動作原理

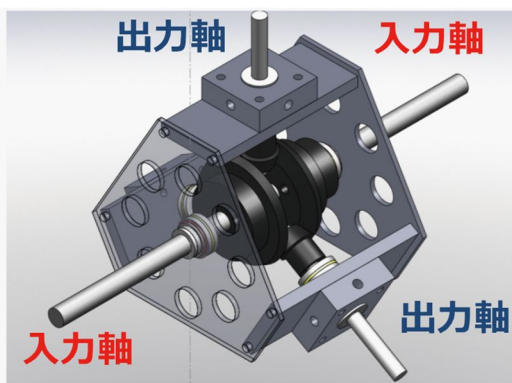


図3 差動歯車機構

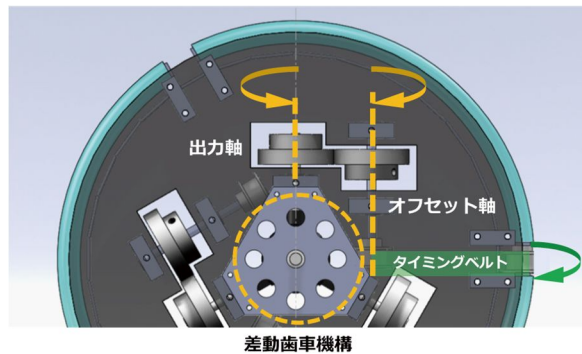


図4 差動歯車からチューブ回転への動力伝達メカニズム

2. 研究の目的

上記の背景およびこれまでの研究成果をもとに、本研究では、一輪2自由度方式の制御手法を確立し移動ロボットへの応用を目指す。基礎となる車輪の試作検討は既に行っているため、研究期間内には主に実機実験を行い、以下の点を明らかにする。

- (1) 一輪2自由度方式の数値モデリングと各自由度の非干渉制御手法の確立
- (2) メンテナンスフリーを考慮した動力伝達機構の非接触化
- (3) 一輪2自由度方式を用いた電動車いすの移動制御手法の確立

3. 研究の方法

上述の本課題における2つの具体的な研究テーマについて、2017年度から2019年度までの3年間の研究期間において実際に遂行した研究方法の概要について述べる。

(1) 2自由度車輪の設計および製作

接触式動力伝達：これまでに試作された車輪は精度が不十分であったため、あらためて設計を行った。設計時には、重量の軽減、横方向移動のための外周チューブの選定および地面との接触、外周チューブの保持を特に考慮した。重量軽減のために、本体および内蔵している歯車の材質を決定した。外周チューブについては、グリップ力があり、曲げに対して円形を保つことが可能で、ねじれに対しても強いものを選定した。また、外周チューブは接地面以外では車輪本体から外れやすいことが判明したため、接地面を確保、かつ、脱落しないように保持することが可能な機構を検討した。設計した動力伝達機構および保持機構については、図5に示すように、サーボアナライザを用いた測定装置において、動作を確認したのちに2自由度車輪に実装した。

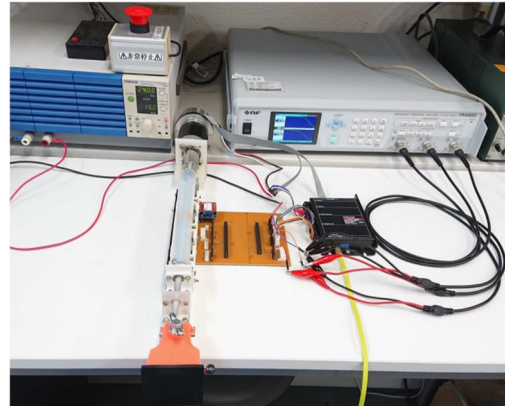


図5 チューブへの動力伝達および保持機構測定実験装置

非接触式動力伝達：前述の接触式動力伝達はベルト駆動であるため、外周チューブに若干の間隙が発生してしまうという欠点があった。そこで間隙が発生しにくく、非接触で動力を伝達することができる磁気歯車による2自由度車輪を設計した。図6に磁気歯車による2自由度車輪の原理図を示している。差動歯車を用いるという点では接触式の2自由度車輪と同様である。差動歯車の出力を、かさ歯車を模擬した円盤と円筒の磁気歯車の組み合わせを通して外周チューブに伝達出来るように設計した。

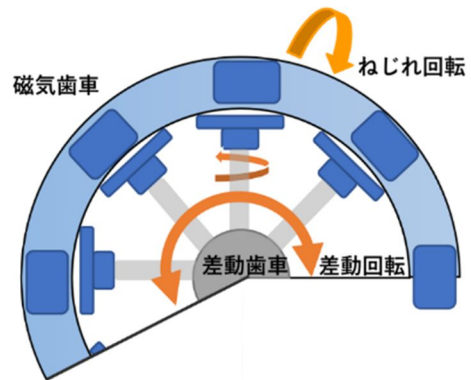


図6 磁気歯車による非接触動力伝達原理

(2) 2自由度車輪のモデリングおよび制御

移動方向制御：一般的な2自由度車輪のモデルを図7に示す。2自由度車輪の制御はこのモデルに基づいて行われた。2自由度車輪は原則として、直立した状態で動作させるものとしている。したがって、図7において、 $\theta = 0$ が基本のモデルとなる。この提案モデルに基づいて、図3における2つの入力軸に搭載するアクチュエータの回転数について、図2における前進方向および左右方向における移動速度への変換を検討した。

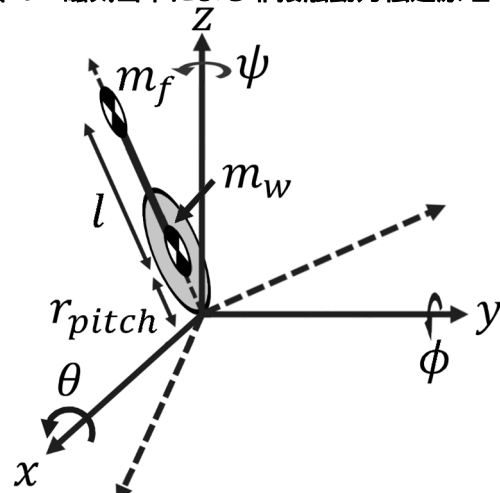


図7 2自由度車輪のモデル

Yaw軸回転制御：前述のように2自由度車輪は直立動作が基本である。2自由度車輪では、図8(a),(b)に示すような運動は可能である。しかし、図8(c)のようなその場でYaw軸方向の姿勢を変化することができるかは検討されていなかった。そこで、提案モデルに基づいてモデリングし、制御可能性について検討した。

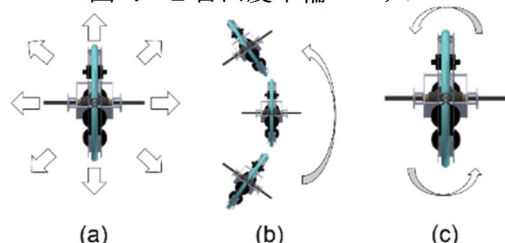


図8 2自由度車輪の移動可能な方向

4. 研究成果

(1) 2自由度車輪の設計製作：図9に、再設計した2自由度車輪の外観を示す。図1では樹脂製の本体

および細いゴムチューブを使用していたが、図 9 では、アルミプレートおよび太いシリコンチューブを採用することで重量軽減を図っている。この 2 自由度車輪において、横方向移動が実現されている。外周チューブの保持力を向上させるために、図 10 に示すような外周チューブの保持機構を開発した。図 9 の 2 自由度車輪では、外周チューブが 2 点支持になっていたのに対して、4 点支持にすることで外周チューブを保持する力が向上した。検証結果として、図 11 にチューブ保持機構を改良したときのシステムの周波数特性を示す。以前の保持機構では周波数特性を観測することが出来ずに脱落してしまっていたが、提案した保持機構によって安定して特性を測定することが出来ていることがわかる。図 12 に改良した外周チューブ保持機構を用いた 2 自由度車輪の外観を示す。

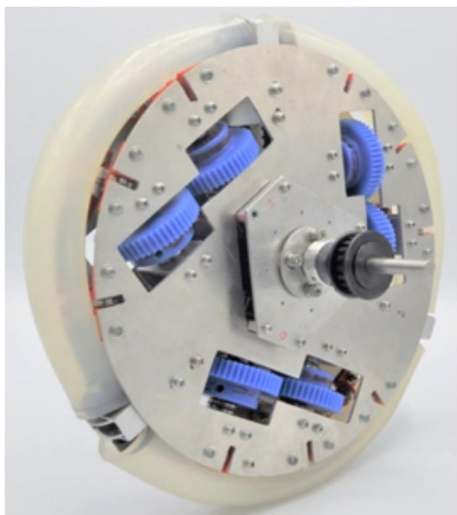


図 9 再設計した 2 自由度車輪の外観

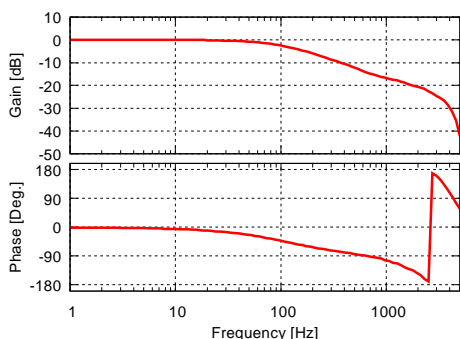


図 11 外周チューブ保持力確認実験におけるシステムの周波数特性

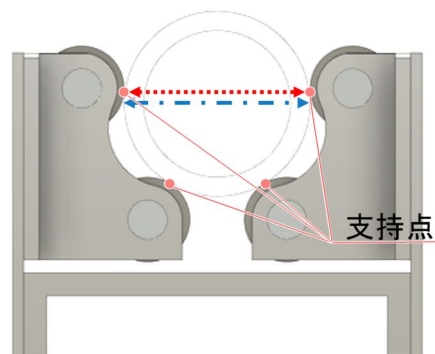


図 10 チューブ保持機構の改良

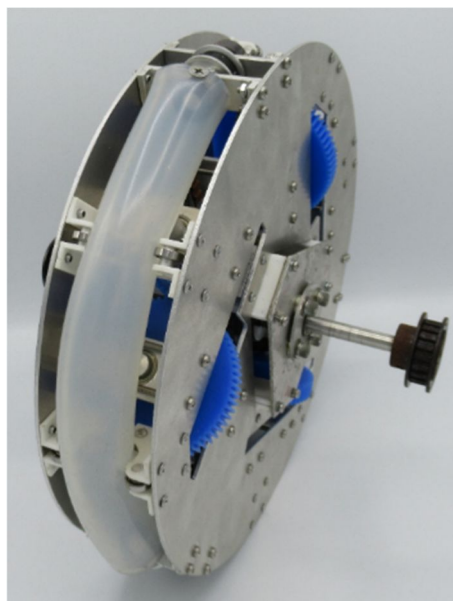


図 12 チューブ保持機構を改良した 2 自由度車輪

磁気歯車を用いた非接触動力伝達機構による 2 自由度車輪の外観を図 13 に示す。図 6 の原理通りに車輪本体の外周に円盤タイプの磁気歯車が配置されている。図 14 にはチューブの配置状況が示されている。チューブの内部に円筒タイプの磁気歯車が挿入されていて、車輪外周にチューブを保持することが可能である。車輪本体は磁気の影響を受けないように 3D プリントを用いて ABS 樹脂によって構築されている。3D プリントの印刷可能サイズに限界があり、接触方式動力伝達機構の 2 自由度車輪よりも径が小さくなっている。そのため、チューブの選定が難しい状況にある。適切なチューブの選定や印刷可能な 3D プリントの導入などが必要である。

(2) 2 自由度車輪の制御 : 2 自由度車輪は 2 つのアクチュエータの入力により任意の速度で全方向に移動することが可能である。モビリティに 1 輪タイプで実装し



図 13 磁気歯車による 2 自由度車輪の外観

たときも 2 輪タイプで実装したときもその考え方は同一である。アクチュエータの正転および逆転の組み合わせによって移動方向が決定される。表 1 にアクチュエータの入力と移動方向の関係を示す。姿勢と座標系は図 2 に定義されているものとし進行方向を 0° とする。表 1 によって進行方向が決まり、さらに、アクチュエータの回転数の和によって前進方向への移動速度が決定され、回転数差によって左右方向への移動速度が決定される。



図 14 外周チューブの配置状況

表 1 アクチュエータ入力と移動方向

入力軸 1	入力軸 2	移動方向・範囲
正転	正転	$-45^\circ \sim +45^\circ$
正転	逆転	$+45^\circ \sim 135^\circ$
逆転	逆転	$+135^\circ \sim 225^\circ$
逆転	正転	$+225^\circ \sim -45^\circ$

2 自由度車輪が 1 輪の場合には通常の制御則では Yaw 軸方向の姿勢を制御することは困難である。そこで、非線形モデル予測制御を適用したところ、図 15 に示している位置・姿勢の応答のように、Yaw 軸回転制御が可能であることがシミュレーションにより示された。結果より、任意の位置において、任意の姿勢を取ることが可能であることがわかる。

今後の展望：本研究課題において、接触及び非接触動力伝達機構によって 2 自由度車輪が実現された。外周チューブの材質や保持に課題があるものの、大径化に優れたシステムを提案することが出来たと考えられる。得られた知見によって、電動車いすの開発を進め、今後も継続的に研究を推進する。

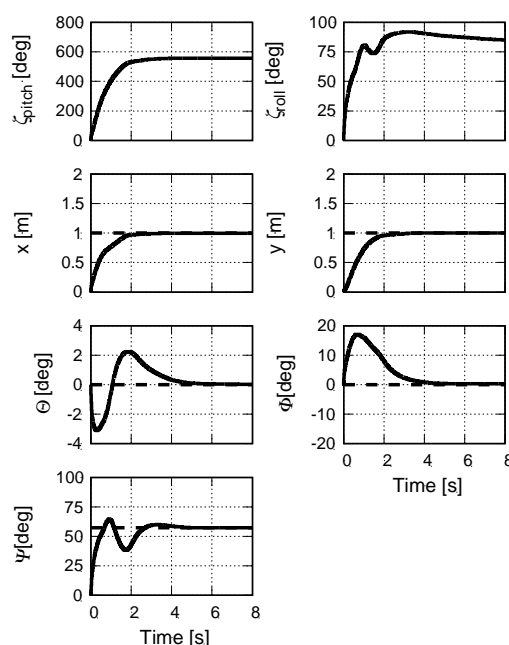


図 15 Yaw 軸回転制御のシミュレーション結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 鹿島 惇, 浅野 洋介
2. 発表標題 チューブのねじれ回転を用いた2自由度車輪の非ホロノミック制御
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Kashima, Yosuke Asano
2. 発表標題 Yaw Axis Rotation Control about Two-Degree-of-Freedom Wheel
3. 学会等名 The 4th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Kashima, Yosuke Asano
2. 発表標題 Study of dynamics about Two Degrees of Freedom Wheel using Twist Rotation of Tube
3. 学会等名 The 3rd International Workshop on Effective Engineering Education (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鹿島惇, 浅野洋介
2. 発表標題 チューブのねじれ回転を用いた2自由度車輪の開発
3. 学会等名 第18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 2017年

1. 発表者名 浅野洋介, 仲田稜, 鹿島惇
2. 発表標題 車輪外周チューブのねじれ回転を利用した全方位移動可能な2自由度車輪の開発 -外周チューブ保持機構の改良-
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

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----