Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.20-00095

Received date : 28 March, 2020

Accepted date : 13 October, 2020

J-STAGE Advance Publication date : 21 October, 2020

機構的な伸縮性と柔軟性を有する1アクチュエータ車輪型ロボットの開発

武部 直人^{*1}, 末岡 裕一郎^{*2}, 重吉 比呂^{*3}, 杉本 靖博^{*2}, 大須賀 公一^{*4}

Development of a single actuator wheel robot with mechanical scalability and flexibility

Naoto TAKEBE^{*1}, Yuichiro SUEOKA^{*2}, Hiro SHIGEYOSHI^{*3},
Yasuhiro SUGIMOTO^{*2} and Koichi OSUKA^{*4}

^{*1,*2,*3,*4} Graduate School of Engineering, Osaka University
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

Abstract

In general, small robots can operate in narrow spaces, and large robots can traverse over rough terrains. Although a few robots with adjustable wheel diameter have been developed, they require multiple actuators for rotating the wheels and changing the wheel diameter. This paper proposes a wheel robot that can adjust the wheel diameter according to the wheel rotation. The robot uses a centrifugal force-aided diameter adjustable mechanism; the wheel diameter is expanded/contracted by a circular pantograph via the centrifugal force. Thus, the wheel diameter can be changed depending on the drive of the wheel. We adopt the circular pantograph mechanism to maintain the round shape of the wheel during expansion and contraction. We conducted experiments with the developed robot and found that the wheel diameter appropriately changes with the wheel acceleration and deceleration. The results show that the proposed mechanism improves the performance when climbing a step and operating in a narrow space. Further, the robot also had mechanical flexibility, which helps reduce the impact when facing a step. These characteristics could be achieved because the wheel was passively and adaptively deformed according to the running environment.

Keywords : Mobile robot, Wheel diameter adjustable function, Pantograph

1. 緒 言

移動ロボットは様々な環境において活動することが求められており、走行環境の整った平地だけでなく段差や溝のある場所、狭窄空間などの不整地でも活躍することが期待されている(広瀬, 2000). ロボットの移動方式としてクローラ型, 脚型, 車輪型の大きく3つが挙げられる(山下他, 2003). このうち車輪型移動ロボットはクローラ型や脚型と比べて移動効率がよく, 機構・制御が簡単であることから最も広く採用されている. しかし, 車輪型移動ロボットは不整地における移動性能は低く, 活動可能な環境に制限が存在する(高野, 1987).

そこで, 車輪型移動ロボットの不整地移動性能を向上させる研究がなされている. リムレス型の車輪は車輪中心から放射状に伸びた凹凸を有する形状をしている. これらはその形状から段差や凹凸のある地形の移動に優れる(Jeans and Hong, 2009) (Eich et al., 2008) (長村, 三上, 2013). また, 車輪形状を走行面の状況に応じて使い分ける

No.20-00095 [DOI: 10.1299/transjsme.20-00095]

^{*1} 学正員, 大阪大学工学研究科 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

^{*2} 正員, 大阪大学工学研究科

^{*3} 大阪大学工学研究科

^{*4} 正員, フェロー, 大阪大学工学研究科

E-mail of corresponding author: n.takebe@dsc.mech.eng.osaka-u.ac.jp

ロボットも開発されている。平坦な路面では円形の車輪で走行し、凹凸のある場所や軟弱地では車輪内部に格納した爪やパドルを展開することで移動性能を向上させるロボット (Sun et al., 2008) (岩本, 渋谷, 2005) や、円形から脚車輪や星型へと変形するロボット (山田他, 2013) (Kim et al., 2013) が挙げられる。Ryu らは車輪の回転を利用して、低速移動時には平地走行に適した円形車輪、高速移動時には段差踏破に適したスポークを展開した形状の車輪へと変形するロボットを提案している (Ryu et al., 2020)。これらは車輪の形状を工夫することによって不整地における移動性能を向上させている。不整地移動性能に影響を与える要素として車輪形状の他にも、走行面との摩擦や車輪の柔軟性 (東海林, 飯塚, 2019) (矢田貝他, 2014) などが挙げられるが、ここで筆者は車輪径に注目した。

段差や凹凸のある地形の走行には大きい車輪が適している。しかし、狭窄空間に進入する場合には小型の車輪であることが望ましい。このことから、大径車輪のロボットと小径車輪のロボットの利点を併せ持つ車輪型移動ロボットとして、車輪径が拡大・縮小するロボットは不整地移動に優れると考えられる。車輪径可変型でない場合はこのように障害物踏破性能と狭窄部への進入性能を両立することは困難である。車輪の拡大によって狭窄部への進入性能を損なわずに障害物踏破性能を向上させられる点は、車輪径可変型の大きなメリットである。このような車輪径可変型移動ロボットはこれまでも提案されており、モータやリニアアクチュエータによってリンクを駆動し車輪径を変化せるもの (吉田他, 2006) (Grand et al., 2007) (Zeng et al., 2019) の他にも、シートの折りたたみを利用した車輪径可変ロボットが存在する。太陽帆に用いられる折りたたみパターンを SMA アクチュエータによって駆動することで車輪径を変化させるロボット (Lee et al., 2013) や、2次元平面状から3次元立体物への形態変化が可能な折り紙の構造を利用することで車輪径を変化させるロボット (Lee et al., 2014) などが挙げられる。しかし、これらは車輪径の変化には車輪の駆動とは別のアクチュエータを必要とする。それに対し、車輪径変化を実現するミニマルな構成を追求すると、車輪の駆動と車輪径変化を同時に1つのアクチュエータのみで実現することができるのではないかと考えた。

そこで本研究では、車輪の回転により生じる遠心力によって車輪径を変化させることができる車輪型移動ロボットを提案する。車輪の回転によって車輪径を変化させるロボットも存在するが、これは輸送時に収納できるよう小さくしておき、ロボットを使用し始める最初の車輪の回転で展開し大径状態へ変化させることを目的としている (Aoki et al., 2011)。一方、提案機構では、車輪の回転数が変化すると連動して車輪径も変化させることができ、大径と小径を切り替えることが可能である。さらに、車輪径の変化をアクチュエータを用いずに行うことで、センシングを行わずに環境からの作用による受動的な変形が可能となり、車輪を構成するリンクは剛体でありながら、その組み合わせによって車輪に機構的な柔軟性を持たせることができる。本論文では、ミニマルな構成で車輪径変化を実現するアイデアとして、遠心力によって1アクチュエータで走行と車輪径変化を行う機構の具現化が可能であるかの検証を目的とする。径の拡大・縮小が可能な車輪を製作し、遠心力を利用して車輪径の変化が可能であることを示す。その後、この車輪径可変ロボットの機構的な柔軟性を活かした段差の乗り越えおよび狭窄空間への進入について検証を行う。

本論文の構成は、以下の通りである。まず、2章では開発した遠心力を利用した車輪径可変型移動ロボットについて述べる。3章で製作したロボットを用いて実験を行い、実験結果に対する考察について述べる。最後に、4章で本論文をまとめる。

2. 遠心力を利用した車輪径可変ロボットの機構と開発

本章では、製作した径可変機構を持つ車輪型移動ロボットについて述べる。まず、車輪径が変化する仕組みと設計した径可変車輪の構造について述べる。次に、径可変車輪を搭載したロボットの大きさと構造について述べる。そして、遠心力を利用した車輪径変化が可能であるかの検証実験について述べる。

2.1 車輪径可変機構の提案

車輪径の拡大・縮小を実現する機構として、伸縮可能なクローズドループ機構の一種であるパンタグラフ構造を環状に閉じたリンク機構を採用した (Agrawal et al., 2001)。一般的なパンタグラフ構造は直線状のリンクで構成され、マジックハンドのように直線状の拡大・縮小を行うことが知られているが、くの字型のリンクを用いるこ

Fig. 1 Circular pantograph mechanism.

Fig. 2 Overview of the proposed wheel.

とで環状の構造にすることができる。この機構を用いることにより図 1 に示すように、局所的な形状の変化ではなく、環状を保ったまま拡大・縮小を実現することができる。くの字型リンクの折れ角を小さくするほど径の伸縮率を大きくすることが可能である。しかし、折れ角が小さいほど環状構造を構成するために必要な部品点数が多くなるため、本論文では製作コストやサイズを考慮し、折れ角 15 deg, 48 個のくの字型リンクにより構成した。

この構造を用いた車輪の外観を図 2 に示す。車輪を回転軸に固定する三又のハブ、三又のハブとパンタグラフ構造を接続するスポーク、および環状パンタグラフ構造から構成される。スポークは三又パーツおよびパンタグラフ構造に対して傾斜しており、スポーク同士が干渉することなく図 1 のように縮小することを可能にしている。また、この環状パンタグラフ構造は縮小した際に外周部の凹凸が大きくなるため、この隙間を補間するパーツを設計した。これをリンクに取り付けたものの一部を図 3 に示す。このパーツは車輪が回転した際に働く遠心力を大きくする重りとしても機能する。

2.2 提案機構の力学モデル

本節では、今回提案する車輪径可変機構の力学モデルについて述べる。

まず、車輪が非接地状態で回転する場合を考える。リンクに作用する重力は、車輪の上半分では車輪の縮小方向に、下半分では拡大方向に作用するが、提案する車輪径可変機構は 1 自由度であるため、リンク全体（リム部）に作用する重力は車輪径の変化には寄与しない。車輪径変化に影響を及ぼす力として、遠心力とリンクやスポークの回転結合部での摩擦力が考えられる。この摩擦力は各回転結合部の軸まわりの力だが、ここでは簡単のために車輪が拡大もしくは縮小するのを妨げる抵抗力 f_{joint} として捉える。この場合、遠心力が f_{joint} を上回れば拡大が可

Fig. 3 Interpolation parts attached to the pantograph mechanism.

Fig. 4 Differences caused by the direction of rotation due to the spoke structure.

能となる．次に，地面に置いて走行する場合を考える．地面で走行する際の車輪径の変化に影響を与えるものとして遠心力，抵抗力 f_{joint} に加えて，スポーク構造に起因する転がり摩擦 f_r による力とロボット本体（車軸）を持ち上げるのに必要な力が考えられる．図 2 に示す車輪は，そのスポーク構造に起因して，車輪の回転方向によって特性が変化する．図 4a に示すように時計回りに回転する場合，転がり摩擦 f_r によってスポークはハブとの結合軸まわりに反時計まわりに回転し，車輪径を縮小させる力が発生する．一方，図 4b に示すように反時計回りに回転する場合，スポークはハブとの結合軸まわりに時計まわりに回転し，車輪径を拡大させる力が発生する．本論文では，図 4a 示す向きで以降の実験を行ったため，車輪径を縮小させる向きに作用する力を f_{roll} とおく．そして，この車輪には車軸部にロボット本体の荷重がかかっており，車輪が拡大するためには図 5 に示すように，車軸部を上方に移動させる必要がある．リム部の質量を除いたロボットの質量を $2M$ ，重力加速度を g とすると，二輪車両の場合，一方の車輪に作用するこの力は， $f_{body} = Mg$ である．車輪のリムの質量を m とし，走行中に車輪径が拡大するための条件は以下のように表される．

$$mr\omega^2 \geq f_{body} + f_{joint} + f_{roll} \quad (1)$$

ここで，摩擦の影響である f_{joint}, f_{roll} の詳細な解析が困難であることから，簡単のため摩擦を無視した理想的な状態を仮定すると，走行中に車輪径が拡大するための条件は以下のように表される．

$$\begin{aligned} mr\omega^2 &\geq f_{body} \\ \therefore \omega &\geq \sqrt{\frac{Mg}{mr}} \end{aligned} \quad (2)$$

2.3 実機製作

設計した車輪を用いて開発した二輪の移動ロボットの外観を図 6 に示す．ロボットの各種パラメータを表 1 に示す．本体の白色および赤色部分は 3D プリンタを使って PLA 樹脂を射出成形したものであり，黒色部分はアクリル板を切り出したものである．赤色部分は動画解析を行う際のマーカとして用いる．ロボットにはマイコン (Arduino Pro Mini 328 5V 8MHz, SparkFun 製)，モータドライバ (MD13S Cytron 製)，モータ (380K150 Tamiya 製) およびバッテリー (DTP502535, Data Power Technology 製 および CX G3 LiPo Power Pack, Hyperion 製) を搭載した．左右の車輪は同一軸に固定されているため，常に左右の回転数は同じである．使用するモータは一つのみで，モー

Fig. 5 Increasing the wheel diameter lifts the body of the robot.

(a) Front view.

(b) Side view.

Fig. 6 Mechanical structures of the developed robot.

タから車軸へ減速比 13/37 のギヤを通じて動力伝達を行う。また、対向二輪型のロボットを推進させるためには、車輪を回転させるためのモーメントを支持する必要があるので、地面に接して支持するためのパーツを駆動部に取り付けた。ここで、一方の車輪のリム部の質量は $m = 0.5 \text{ kg}$ ，ロボット全体から両輪のリム部を除いた質量は $2M = 0.4 \text{ kg}$ ，最小時の車輪半径 $r = 0.25 / 2 = 0.125 \text{ m}$ であるから，式 (2) より走行中の車輪径拡大に必要な回転角速度は $\omega = 5.6 \text{ rad/s}$ と見積もられる。車輪径が最小のときに同じ回転角速度では遠心力が最も小さくなるため，ここでは r を車輪の最小径とした。

Table 1 Specification of the robot.

Weight	1.4 kg
Width	300 mm
Diameter (contracted)	250 mm
Diameter (expanded)	390 mm

2.4 遠心力に基づく車輪径変化の検証

製作した車輪が遠心力を利用した拡大が可能であるかの検証実験を行った。

Fig. 7 Snapshots of the wheel in the rotating motion.

Fig. 8 Relation between the wheel diameter and the angular velocity.

2.4.1 実験手順

車輪が地面に接さない状態にロボットを固定し、モータへの印加電圧を 0 V から 7.2 V まで上昇させた後、再び 0 V まで降下させた。その間の車輪赤色部分のトラッキングを行い、車輪直径および車輪の回転角速度を計測した。

2.4.2 実験結果

実験中の車輪の様子を図 7 に示す。また、計測した車輪直径と車輪の回転角速度をプロットしたものを図 8 に示す。図 8 のにおいて、回転角速度に対して車輪径のばらつきが見られるが、これは高速回転する車輪の赤色部分をトラッキングする際にズレが生じたためである。(i)～(ii) において印加電圧の上昇に伴って回転角速度は大きくなったが、車輪径は変化しなかった。(ii)～(iv) において回転角速度の上昇に伴って車輪径が拡大し、最大径に達した。(iv)～(v) において印加電圧が下がり回転角速度は小さくなったが、車輪径は変化しなかった。

2.4.3 考察

遠心力は角速度の 2 乗に比例する。(ii)～(iv) において角速度の上昇に伴って車輪径が変化していることから、遠心力によって車輪径が変化していると言え、車輪の駆動と車輪径の変化を同じアクチュエータで行えることが確

認できる．(i)～(ii)では車輪径が変化していないが，これは回転によって生じる遠心力がリンクやスポークの回転結合部に生じる静止摩擦による抵抗力を上回る必要があるためである．図 8 より，今回作成した機構では回転角速度 $\omega = 1.5 \text{ rad/s}$ 程度で車輪径が拡大し始めていることが確認でき，力の釣り合いより片輪に作用するこの抵抗力は $f_{joint} = m r \omega^2 = 0.28 \text{ N}$ と推測できる． f_{joint} は結合部の締め付け強さが支配的であり，車輪の質量による変化は小さいと考えられる．よって，車輪の質量を大きくすることで，より小さな回転角速度で車輪径の拡大が可能となることが予測できる．(iv)～(v)では車輪に外力が働かないため，車輪は角速度が小さくなくても最大径のまま変化しなかった．

3. 車輪径可変ロボットによる実機実験

本章では，前章で製作したロボットを用いて行った実験について述べる．前章では非接地状態において，遠心力を利用した車輪径変化が可能であることを確認した．本章では以下に関する実験を行なった．

1. 走行中の車輪径変化の検証
2. 径可変車輪による段差乗り越え性能変化
3. 柔軟性を活用した狭窄空間への進入

3.1 走行時の車輪径変化に関する実験

製作したロボットを地面に置いて走行させた際に，自重を上回るだけの遠心力が生じて車輪径を変化させることが可能であるかの検証を行った．さらにロボットの移動速度と車輪径の関係の解析を行った．

3.1.1 実験手順

ロボットを平坦な床に置き，モータへの印加電圧を 0 V から 7.2 V まで上昇させ加速している間と，その後 0 V まで下降させ減速している間を撮影し，車輪径とロボットの移動速度を測定した．また，撮影範囲の都合上，ロボットの速度が 0.5 m/s 以降を解析範囲とした．

3.1.2 実験結果

加速走行中および減速走行中のロボットの様子を図 9 に示す．加速に伴って車輪径が大きくなり，また減速に伴って車輪径が小さくなっていることが確認できる．加速，減速時をそれぞれ 2 回ずつ撮影し，車輪直径とロボットの移動速度をプロットしたものを図 10 に示す．加速時と減速時の間にずれがあるものの，それぞれにおいて直径と移動速度に正の相関関係が確認できる．加速時における相関係数は 0.83 ，減速時における相関係数は 0.72 となった．

3.1.3 考察

ここでは，加速時と減速時のずれおよび車輪径拡大に必要な回転角速度について考察する．

2.2 節では縮小状態の車輪が走行中に拡大するための条件を式 (1) に示した．ここで，拡大状態で走行中に車輪径が縮小し始めるための条件は，静止摩擦による抵抗力の向きが変化することから，以下のように表される．

$$f_{body} + f_{roll} \geq m r \omega^2 + f_{joint}$$

$$\Leftrightarrow f_{body} + f_{roll} - f_{joint} \geq m r \omega^2 \quad (3)$$

式 (1) および式 (3) を比較すると，拡大状態で走行中に車輪径が縮小し始める回転角速度は，縮小状態の車輪が走行中に拡大し始める角速度よりも小さいことがわかる．これが原因となって加速時と減速時の間にずれが生じたと考えられる．

また，加速時において，車輪径が拡大し始める速度は図 10 より 1.0 m/s 程度であることが確認できる．ここで，最小時の車輪の半径は 0.125 m であるから，車輪径が拡大し始める回転角速度は $1.0 / 0.125 = 8.0 \text{ rad/s}$ となる．2.3 節において見積もった車輪径の拡大に必要な回転角速度は 5.6 rad/s であったが，これは摩擦を無視した理想的な状態を仮定したものである．つまり， f_{joint}, f_{roll} の影響によって，実際に走行中に車輪径が拡大するためには 2.3 節で得られた理論値より大きな角速度が必要であると考えられる．本論文の目的である，遠心力によって 1 アク

(a) In acceleration.

(b) In deceleration.

Fig. 9 Changes of the wheel diameter during rotating motion.

Fig. 10 Relation between the wheel diameter and the velocity. The circular ones are the cases of acceleration. The triangle ones are the cases of deceleration.

チュエータで走行と車輪径変化を行う機構の具現化に対して、この差が及ぼす影響は小さく、提案機構の具現化が可能であることが確認できた。

3.2 段差の乗り越え性能および機構的柔軟性に関する実験

径可変車輪により段差乗り越え性能が向上するかを検証する。

3.2.1 実験手順

ロボットの走行経路に段差を用意し、車輪径を最小および最大に固定した状態と可変の状態でもータに同じ電圧を印加することで、乗り越え性能の比較を行った。段差の高さを 90 mm と 120 mm とし、車輪の最小時の直径は 250 mm、最大時の直径は 390 mm であった。

3.2.2 実験結果

まず、120 mm の段差の乗り越え実験の様子を図 11 に示す。車輪を最小径に固定した状態では段差に衝突後、乗り越えられずにその場で止まった。車輪を最大径に固定した状態では段差に衝突後、段差に跳ね返って乗り越えることができなかった。車輪径可変の状態では衝突後、段差を乗り越えて再び走行している様子が確認できる。

Fig. 11 Climbing experiments for the 120 mm step.

また、車輪径可変の場合の車輪径の時間変化を図 13 に示す。0.2 s までは加速に応じて車輪径が大きくなっていき、0.2 s 付近でロボットは段差に衝突し乗り越え始める。このとき、車輪径が小さくなりながら段差を乗り越えていることが確認できる。また、90 mm の段差に関して、車輪径を最小に固定した場合は乗り越えることができなかったが、車輪径を最大に固定した場合と可変の場合はいずれも乗り越えられた。ここで、車輪径を最大に固定した場合と可変の場合の、段差乗り越え時の車輪軸の軌跡をプロットしたものと実験の様子をそれぞれ図 14 と図 15 に示す。横軸はロボットの移動方向、縦軸はそれに垂直な方向の座標を表しており、 $x = 0$ m の位置が段差の端部である。ロボットが段差に乗り越えることで車軸位置も変化しており、車輪径を固定した場合の車軸の鉛直方向の最大変位は 0.19 mm、車輪径が可変の場合の最大変位は 0.12 mm となった。

3.2.3 考察

この比較実験から、径可変車輪によって段差の乗り越え性能が向上したと言える。ここで、車輪径が固定した場合と可変の場合とで乗り越えに必要な駆動力について考える。車輪の駆動トルクを τ 、車輪の最小径を r 、最大径を R 、段差の高さを H とする。また、ロボットの全質量は $2(m+M)$ と表される。車輪が段差を乗り越えるためには車輪の半径が段差よりも高い必要があるので、 $R > r > H$ の関係が成り立つ。車輪が最小径に固定されている

Fig. 12 Mechanical analyses during step climbing.

Fig. 13 Changes of diameter in climbing the 120 mm step.

Fig. 14 Axle height trajectories of the axle of two wheel robots in climbing the 90 mm step. The blue one is the case of wheel diameter adjustable. The orange one is the case of wheel diameter fixed at maximum size.

場合 (図 12a), 車輪が段差と衝突するときの車輪中心と段差までの距離を l' とすると, 車輪が段差を乗り越える条件は, 段差との接点周りのモーメントを考えて,

$$\tau > 2(m+M)gl' = 2(m+M)g\sqrt{r^2 - (r-H)^2} \quad (4)$$

となる. このとき段差との接点, 車輪中心, 地面との接点のなす角を θ' とする. 車輪が最大径に固定されている場合 (図 12b), 車輪が段差と衝突するときの車輪中心と段差までの距離を L とすると,

$$\tau > 2(m+M)gL = 2(m+M)g\sqrt{R^2 - (R-H)^2} \quad (5)$$

となる. このとき段差との接点, 車輪中心, 地面との接点のなす角を θ とする. 車輪径が可変の場合, まず図 12b の状態で段差に衝突する. これは図 11c(ii) の状態に対応する. その直後, 衝突によって図 11c(iii) のように段差との接点, 車輪中心, 地面との接点のなす角は図 12b と同じ θ のまま段差との接点に向かって最小径まで車輪が縮小し, 図 12c に示す状態となる. このときの車輪中心と段差までの距離を l とすると,

$$\tau > 2(m+M)gl = 2(m+M)g\frac{r}{R}\sqrt{R^2 - (R-H)^2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &= 2(m+M)g\sqrt{r^2 - \left(r - \frac{r}{R}H\right)^2} \\ &= 2(m+M)g\sqrt{r^2 - (r-h)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

となる. 式 (5) と式 (6) を比較すると, $r/R < 1$ であることから, 車輪径可変の方が車輪径が最大に固定された場合よりも乗り越えに必要なトルクが小さいことが分かる. 式 (4) と式 (7) を比較すると, $r/R < 1$ であることから,

(a) Wheel diameter fixed robot (390 mm).

(b) Wheel diameter adjustable robot.

Fig. 15 Climbing experiments for the 90 mm step.

$h = rH/R < H$ であり，車輪径可変の方が車輪径が最小に固定された場合よりも乗り越えに必要なトルクが小さいことが分かる．車輪径が拡大した状態で段差に衝突すると，受動的な縮小によって最小径に達することで，実際の乗り越え高さが H から h へと減少すると言える．以上より，車輪径可変の場合は車輪径を最大および最小に固定したいずれの場合に対しても段差乗り越えに必要な駆動トルクが小さくなることが確認できる．車輪が段差との衝突によって受動的に縮小することが，踏破性能を向上させていることが確認でき，この車輪の柔軟性は車輪径の変化にアクチュエータを用いずに行なったことで生まれた特徴の一つである．車輪の構成要素には弾性を有する柔らかい部材を用いていないが，剛体であるリンクの組み合わせによって構造的な柔軟性が現れる．また，この柔軟性によって車輪径固定の場合よりも車軸の鉛直方向変位を小さく抑えて滑らかに段差を踏破することができた．車軸の位置はこのロボットの重心位置にほぼ一致する．重心の鉛直方向変位が小さく抑えられることから，柔軟な径可変車輪を用いることでより小さな駆動力で段差を乗り越えることが可能である．

Fig. 16 Passing experiment in the narrow space.

3.3 柔軟性を活用した狭窄空間への進入に関する実験

2.2 節によって、車輪の受動的な縮小が確認された。これにより、拡大状態のロボットが狭窄空間に差し掛かった際に受動的に車輪径が小さくなり進入が可能であると考えられる。そこで、狭い空間に向かってロボットを走行させた。

3.3.1 実験手順

高さが 300 mm から 250 mm へと変化していく狭窄空間を用意し、そこに向かってロボットを走行させた。実験中、ロボットにかかる電圧は変化させず一定値とした。

3.3.2 実験結果と考察

実験の様子を図 16 に示す。また、その時の車輪径の変化を図 17 に示す。横軸はロボット進行方向の座標、縦軸は車輪直径である。 $x = 0$ m が狭窄部の端である。ロボットが狭窄空間内で天井に衝突するまで車輪直径は大きくなった。その後、 $x = -0.2$ m 付近で天井に衝突すると車輪径が受動的に小さくなりながら進入していき、狭窄空間を通過した。モータへの印加電圧は一定であり、車輪の駆動力は変化させていないが、車輪の柔軟性により狭窄空間の進入が可能となった。これらの実験結果より、センシングを行わずに車輪径の変化及び機構の柔軟性を活用することで段差や凹凸、狭窄空間が存在する不整地の走破を行えることが確認できた。

4. 結 言

本論文では、環状のパンタグラフ構造を持つ車輪を設計し、遠心力を用いることで従来とは異なる 1 アクチュエータでの車輪の駆動と車輪径変化を実現するロボットを開発した。実機実験を通じて、ロボットの加速・減速によって車輪径の調整が可能であること、段差踏破性能の向上、さらには狭窄空間への進入が可能となることを確認した。また、提案ロボットは車輪径の拡大・縮小にアクチュエータを使用しなかったことから、機構的な柔軟性を併せ持つことも分かった。

今後の研究では、左右で遠心力による車輪径の変化具合が異なる車輪を搭載した移動ロボットを製作し、一つ

Fig. 17 Changes of the diameter in passing the narrow space.

のモータだけで左右の車輪径差を生じさせ、ロボットを任意方向に移動させる制御や経路追従について取り組む。また、車輪径拡大率の向上や、機構的な柔軟性を生かしたさらなる径可変機構の開発を行っていく。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 基盤研究 (S) 17H06150, 若手研究 18K13776, および JST CREST の助成を受けて行われた。

文 献

- Agrawal, S. K., Kumar, S., Yim, M. and Suh, J. W., Polyhedral single degree-of-freedom expanding structures, Proceedings 2001 ICRA, IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164), Vol. 4 (2001), DOI:10.1109/ROBOT.2001.933133.
- Aoki, T., Murayama, Y. and Hirose, S., Mechanical design of three-wheeled lunar rover; “Tri-Star IV”, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2011), DOI:10.1109/ICRA.2011.5980180.
- Eich, M., Grimminger, F., Bosse, S., Spennberg, D. and Kirchner, F., Asguard: A hybrid-wheel security and sar-robot using bio-inspired locomotion for rough terrain, Proceedings ROBIO 2008 (2008), pp.774-779.
- Grand, C., Bidaud, P. and Jarrassé, N., Innovative concept of unfoldable wheel with an active contact adaptation mechanism, 12th IFToMM World Congress (2007).
- 広瀬茂男, 屋外で活躍するロボット 屋外で活躍する移動ロボットの機構設計, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7 (2000), pp.904-908.
- 岩本太郎, 渋谷恒司, 可変翼車輪を用いたロボットビークルの構想と機構, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 701 (2005), pp.171-177.
- Jeans, J. B. and Hong, D., IMPASS: Intelligent mobility platform with active spoke system, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2009), DOI:10.1109/ROBOT.2009.5152735.
- Kim, Y. S., Jung, G. P., Kim, H., Cho, K. J. and Chu, C. N., Wheel transformer: A miniaturized terrain adaptive robot with passively transformed wheels, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2013), DOI:10.1109/ICRA.2013.6631385.
- Lee, D. Y., Jung, G. P., Sin, M. K., Ahn, S. H. and Cho, K. J., Deformable wheel robot based on origami structure, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2013), DOI:10.1109/ICRA.2013.6631383.
- Lee, D. Y., Kim, J. S., Park, J. J., Kim, S. R. and Cho, K. J., Fabrication of origami wheel using pattern embedded fabric and its application to a deformable mobile robot, 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2014), DOI:10.1109/ICRA.2014.6907222.
- 長村勝也, 三上貞芳, 高い障害物走破性能を持つ移動ロボットのための車輪システム, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2013 (2013), DOI:10.1299/jsmermd.2013._2A1-R01_1.
- Ryu, S., Lee, Y. and Seo, T., Shape-morphing wheel design and analysis for step climbing in high speed locomotion, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 5, No. 2 (2020), pp.1977-1982.

- Sun, Y., Yang, Y., Ma, S. and Pu, H., Modeling paddle-aided stair-climbing for a mobile robot based on eccentric paddle mechanism, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (2015), DOI:10.1109/IROS.2015.7353964.
- 高野政晴, 自律移動ロボットの機構と移動制御技術, 日本ロボット学会誌, Vol. 5, No. 5 (1987), pp.384-390.
- 東海林篤, 飯塚浩二郎, 可変柔軟機構を搭載した月面探査ローバ用車輪に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2019 (2019), DOI:10.1299/jsmermd.2019.2P1-T04.
- 山田慶太, 入江寿弘, 浅見明, 変形車輪を用いた段差移動ロボットの研究, 日本知能情報ファジィ学会 ファジィ システム シンポジウム 講演論文集 第 29 回ファジィシステムシンポジウム (2013), DOI:10.14864/fss.29.0_216.
- 山下淳, 浅間一, 新井民夫, 太田順, 金子透, ロボットの移動機構に関する研究動向, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 3 (2003), pp.282-292.
- 矢田貝光, 山田泰之, 石上玄也, 森田寿郎, 受動変形車輪を有する小型ローバの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2014 (2014), DOI:10.1299/jsmermd.2014_.2A1-A05_1.
- 吉田和哉, 永谷圭司, 久瀬満広, 車輪径可変機構を有する小型 2 輪ローバの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2006 (2006), DOI:10.1299/jsmermd.2006_.2P2-D25_1.
- Zeng, W., Xu, G., Jiang, H. and Gao, F., Development of a novel variable-diameter wheel, Applied Sciences, Vol. 9, No. 21 (2019), 4631.

References

- Agrawal, S. K., Kumar, S., Yim, M. and Suh, J. W., Polyhedral single degree-of-freedom expanding structures, Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164). Vol. 4 (2001), DOI:10.1109/ROBOT.2001.933133.
- Aoki, T., Murayama, Y. and Hirose, S., Mechanical design of three-wheeled lunar rover; "Tri-Star IV" , 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2011), DOI:10.1109/ICRA.2011.5980180.
- Eich, M., Grimminger, F., Bosse, S., Spenneberg, D. and Kirchner, F., Asguard: A hybrid-wheel security and sar-robot using bio-inspired locomotion for rough terrain, Proceedings ROBIO 2008 (2008), pp.774-779.
- Grand, C., Bidaud, P. and Jarrassé, N., Innovative concept of unfoldable wheel with an active contact adaptation mechanism, 12th IFToMM World Congress (2007).
- Hirose, S., Mechanical design of mobile robot for external environments, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 18, No. 7 (2000), pp.904-908 (in Japanese).
- Iwamoto, T. and Shibuya, K., Concept and mechanism of robot vehicle using variable configuration segmented wheels, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 71, No. 701 (2005), pp.171-177 (in Japanese).
- Jeans, J. B. and Hong, D., IMPASS: Intelligent mobility platform with active spoke system, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2009), DOI:10.1109/ROBOT.2009.5152735.
- Kim, Y. S., Jung, G. P., Kim, H., Cho, K. J. and Chu, C. N., Wheel transformer: A miniaturized terrain adaptive robot with passively transformed wheels, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2013).
- Lee, D. Y., Jung, G. P., Sin, M. K., Ahn, S. H. and Cho, K. J., Deformable wheel robot based on origami structure, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2013).
- Lee, D. Y., Kim, J. S., Park, J. J., Kim, S. R. and Cho, K. J., Fabrication of origami wheel using pattern embedded fabric and its application to a deformable mobile robot, 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2014), DOI:10.1109/ICRA.2014.6907222.
- Nagamura, K. and Mikami, S., Wheel systems for mobile robot running under unstructured obstacles, Proceedings of the 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2013), DOI:10.1299/jsmermd.2013_.2A1-R01_1 (in Japanese).
- Ryu, S., Lee, Y. and Seo, T., Shape-morphing wheel design and analysis for step climbing in high speed locomotion, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 5, No. 2 (2020), pp.1977-1982.

- Sun, Y., Yang, Y., Ma, S. and Pu, H., Modeling paddle-aided stair-climbing for a mobile robot based on eccentric paddle mechanism, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (2015), DOI:10.1109/IROS.2015.7353964.
- Takano, M., Mechanism of autonomous mobile robot and its motion control, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 5, No. 5 (1987), pp.384-390 (in Japanese).
- Tokairin, A. and Iizuka, K., Study on wheel for lunar exploration rovers with variable flexible mechanism, Proceedings of the 2019 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2019), DOI:10.1299/jsmermd.2019.2P1-T04 (in Japanese).
- Yamada, K., Irie, Y. and Asami, A., Development of a stairs climbing robot with the transformable wheels, Proceeding of 29th Fuzzy System Symposium (2013), pp.933-936 (in Japanese).
- Yamashita, A., Asama, H., Arai, T., Ota, J. and Kaneko, T., A survey on trends of mobile robot mechanisms, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 21, No. 3 (2003), pp.282-292 (in Japanese).
- Yatagai, H., Yamada, Y., Ishigami, G. and Morita, T., Development of small rover having a passive transformation wheel, Proceedings of the 2014 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2014), DOI:10.1299/jsmermd.2014.2A1-A05_1 (in Japanese).
- Yoshida, K., Nagatani, K. and Kuse, M., Development of small-sized dual wheel rover with mechanism of variable wheel diameter, Proceedings of the 2006 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2006), DOI:10.1299/jsmermd.2006.2P2-D25_1 (in Japanese).
- Zeng, W., Xu, G., Jiang, H. and Gao, F., Development of a novel variable-diameter wheel, Applied Sciences, Vol. 9, No. 21 (2019), 4631.