

6脚作業移動ロボットの直立姿勢における車椅子の操作

Operation of Wheelchairs in the Upright posture of Working Six-Legged Robots

○今野真*, 川口敏史*, 井上健司*

○Makoto Konno*, Toshifumi Kawaguchi*, Kenji Inoue*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード： 6脚ロボット (six-legged robot), 車椅子 (wheelchair), 旋回 (rotating), 坂道 (slope way), 静力学 (statics)

連絡先： 〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学 大学院理工学研究科 機械システム工学専攻 井上健司, Tel.: (0238)26-3335, Fax.: (0238)26-3335, E-mail: inoue@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

車椅子利用者の走行の負担を軽減する方法として、電動車椅子がある。比較的簡単な仕組みで走行可能になるものの、溝の跨ぎ越えや段差の上り下りに難がある。一方、汎用性のあるロボットが、車椅子介助者のように車椅子を押す方法も考えられる。この場合、ロボット自体は高価だが、他の作業にも利用でき、介助者と同じように、溝の跨ぎ越えや段差の上り下りが可能になると期待できる。

著者らは、開発している6脚作業移動ロボットが、人の介助者と同じように、直立姿勢で車椅子を操作することを目指している。本研究では、平地における直進旋回操作、坂道における押し操作を実現する。なお、実験は、ロボットのサイズに合わせた縮小モデルで行った。

2. 6脚作業移動ロボット

2.1 構造と直立姿勢

6脚作業移動ロボット¹⁻⁴⁾の垂直4脚2腕モードをFig.1に示す。垂直4脚2腕モード（以下、直立姿勢と呼ぶ）では、ボディを地面に対して垂直した状態で、下部4脚で歩行し、上部2脚を腕に転用して高所での腕作業を行う。

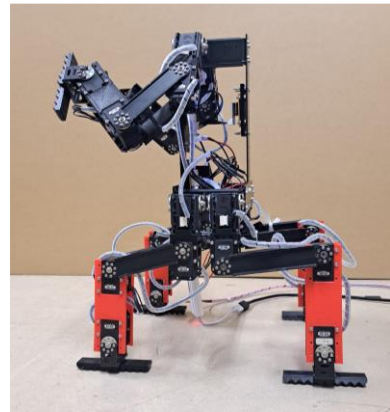


Fig.1 6脚作業移動ロボットの直立姿勢

各脚は足首を含む4自由度で、足首のモータにはROBOTIS社のRX-28、他の関節のモータにはMX-28Rを用いている。質量は 3.37kg, Fig.1の状態ではボディ上面の高さは 450mm である。

2.2 全方向歩容

Fig.2はロボットを上から見た図で、対角の2脚を支持脚、残りの2脚を遊脚とする。各脚は、設定された軌道円の範囲内で動く。ボディ中心の速度角速度(v_{bx} , v_{by} , ω_b)から決まる回転中心ICRから、各脚の円弧軌道を生成する。支持脚は、ボディに対して進行方向とは逆向きに円弧軌道に沿って動かす。遊脚は、進行方向の円弧軌道と軌道円の交点に向かって動かす。支持脚が軌道円に達したら、遊脚を接地して一旦4脚状態になった後、遊脚と支持脚を切り替える。直進の場合は、円弧軌道が直線軌道になる。

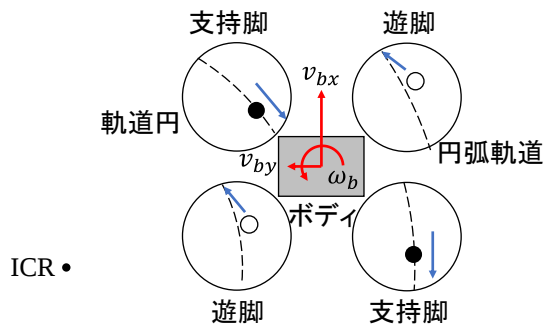


Fig.2 全方向歩容

3. 平地における直進旋回操作

3.1 車椅子モデル

JIS T9210を参考に、ロボットの大きさに合わせてFig.3に示す車椅子モデルを制作した。主なサイズは図に示す通りで、質量は3.22kgである。ロボットはハンドを持たないので、手押しハンドル部分に穴の開いたアタッチメントと取り付け、その穴にロボットの脚先を穴に通して車椅子を操作する。

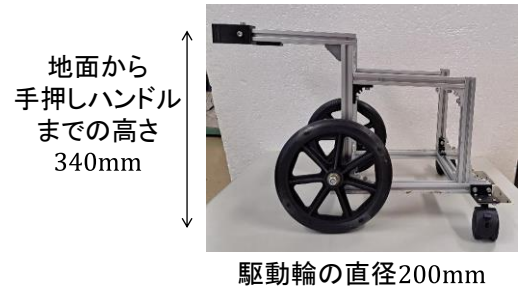


Fig.3 車椅子モデル

3.2 直進旋回操作

Fig.4のように、車椅子は、駆動輪の中心の速度 v_w と角速度 ω_w の2自由度を持つ。この中点とロボット中心との距離を D_w とすると、

$$\begin{cases} v_{bx} = v_w \\ v_{by} = -D_w \omega_w \\ \omega_b = \omega_w \end{cases} \quad (1)$$

この(v_{bx} , v_{by} , ω_b)を入力として、ロボット全方向歩容する。

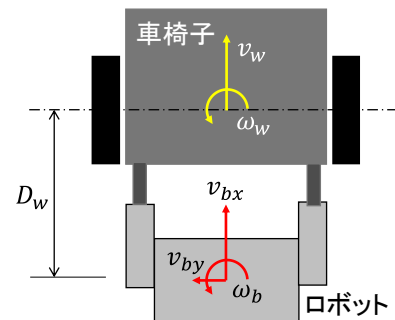


Fig.4 直進旋回操作

4. 坂道における押し操作

4.1 静力学解析

坂道では、車椅子の質量の坂道に平行な成分がロボット手に作用するため、ロボットがのけぞったり、後脚に過大な負荷がかかったりする危険性がある。よって、この力を押し返すのに十分な力が出せるように、ロボットの姿勢を調整する必要がある。

坂道で車椅子を押す速度は遅い。そこで、Fig.5に示す静力学解析を行った。

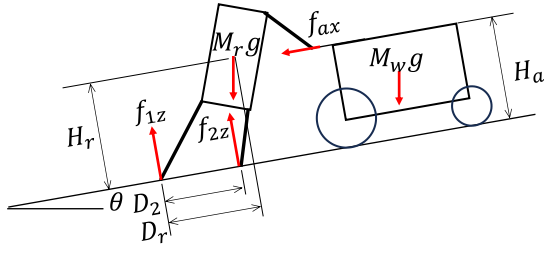


Fig.5 坂道における静力学解析

坂道に平行な方向を X 軸，垂直な方向を Z 軸，重力加速度を g ，坂道の斜度を θ ，車椅子の質量を M_w とする．駆動輪の回転は滑らかとすると，ロボットの腕先が車椅子から受ける X 方向の力 f_{ax} は，

$$f_{ax} = M_w g \sin \theta \quad (2)$$

ロボットが手押しハンドルを Z 方向に押し付けたり持ち上げたりしなければ，腕先が車椅子から受ける Z 方向の力はゼロである．前脚・後脚の足首トルクは小さいので，ロボットの Z 方向の力と後脚先端回りのモーメントのつり合い式は，

$$f_{1z} + f_{2z} - M_r g \cos \theta = 0 \quad (3)$$

$$f_{2z} D_2 + f_{ax} H_a + M_r g (H_r \sin \theta - D_r \cos \theta) = 0 \quad (4)$$

ここで， f_{1z} ：後脚先端が坂道から受ける Z 方向の力， f_{2z} ：前脚先端が坂道から受ける Z 方向の力， M_r ：ロボットの質量， D_2 ：後脚先端から前脚先端までの X 方向の距離， D_r ：後脚先端からロボット重心までの X 方向の距離， H_r ：坂道からロボット重心までの Z 方向の距離， H_a ：坂道から腕先までの Z 方向の距離．式(3)(4)より， f_{2z} と f_{1z} は次式で求められる．

$$f_{2z} = \frac{-f_{ax} H_a - M_r g (H_r \sin \theta - D_r \cos \theta)}{D_2} \quad (5)$$

$$f_{1z} = -f_{2z} + M_r g \cos \theta \quad (6)$$

4.2 姿勢のパラメータ

Fig.5のロボットの姿勢を定めるパラメータをFig.6に示す．ここで， φ ：ボディが地面となす角度， L_1 ：後脚根本から後脚先端までの距離， L_2 ：前脚根本から前脚先端までの距離．なお，後脚先端と腕先の X 方向の距離は式(5)(6)に関係ないので，考えなくてよい．

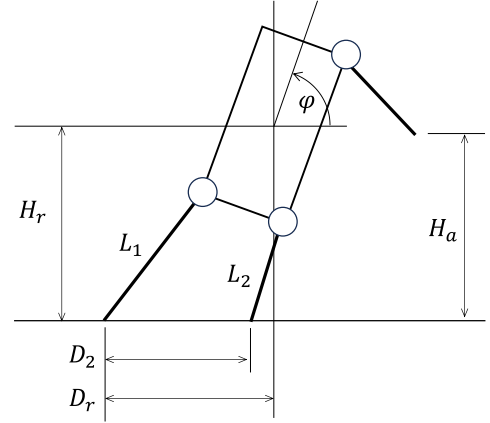


Fig.6 姿勢のパラメータ

パラメータ($H_a, H_r, D_r, D_2, \varphi, L_1, L_2$)のうち， H_a は地面から手押しハンドルまでの高さに等しく， D_2 は歩幅である．後脚の膝の負荷を考えると， L_1 はできるだけ長くした方がよい．よって，これらは定数とし， H_r と φ を姿勢を調整するためのパラメータとする． H_r と φ を仮定すると， D_r と L_2 はFig.6の幾何学から求められる．さらに，斜度 θ を与えれば式(5)(6)により f_{1z} と f_{2z} を計算できるので， f_{1z} と f_{2z} は変数(θ, H_r, φ)の関数となる．

4.3 評価関数とパラメータの調整方法

坂道では後脚に過大な負荷がかかりやすいので，後脚と前脚に作用する力 f_{1z} と f_{2z} をできるだけ均等にすることが望ましい．そこで，評価関数 Q を次式で定義し，斜度 θ の坂道に対して， Q が許容値 Q_0 以下になるように姿勢のパラメータ(H_r, φ)を調整する．

$$Q(\theta, H_r, \varphi) \equiv (f_{1z} - f_{2z})^2 \quad (7)$$

平地を歩行する時の $\varphi = 90^\circ$, $H_r = H_{r0}$ とし, 調整前の姿勢と呼ぶ. H_r のみを一定微小量 ΔH_r だけ変更して Q を計算し, そのときの Q の変化量を ΔQ_{Hr} とする. また, φ のみを一定微小量 $\Delta\varphi$ だけ変更したときの Q の変化量を ΔQ_φ とする. $|\Delta Q_{Hr}/\Delta H_r|$ と $|\Delta Q_\varphi/(H_{r0}\Delta\varphi)|$ を比較し, 大きい方のパラメータを変更する. 上記の比率で比較するのは, 少ない変更量で姿勢調整するためである. また, $\Delta\varphi$ に H_{r0} をかけるのは, 比較の際の次元をそろえるためである.

変更後の姿勢に対して同様の微小量変更を繰り返し, $Q \leq Q_0$ となったときの φ と H_r を調整後の姿勢とする.

5. 実験

5.1 平地における直進旋回操作

平地において, 車椅子を前進・後退・円弧移動・その場旋回させる実験を行った結果, いずれの場合も車椅子を移動させることができた. 円弧移動, その場旋回の様子をFig.7, Fig.8に示す.

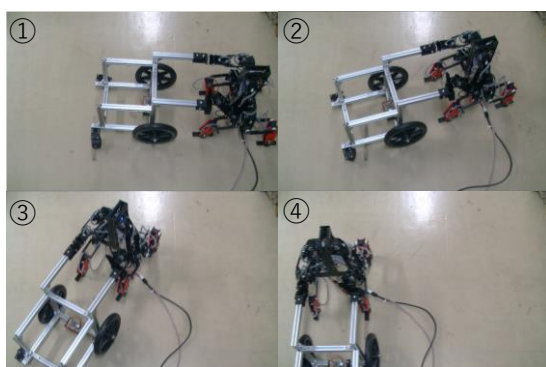


Fig.7 平地における円弧移動

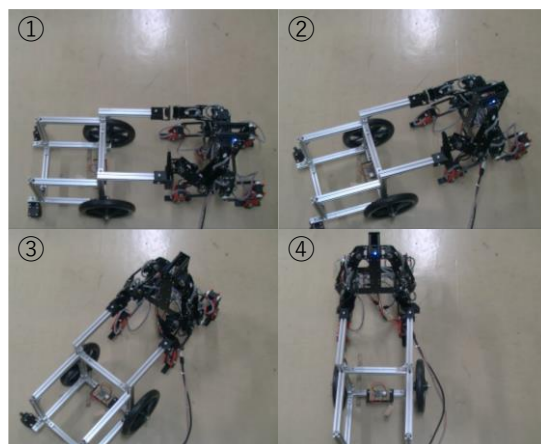


Fig.8 平地におけるその場旋回

5.2 坂道における押し操作

坂道の斜度 θ をいろいろ変えて, 調整前の姿勢と調整後の姿勢で車椅子を上らせる実験を行い, 10歩移動したときの車椅子の移動量を測定した. 定数とした $H_a = 340\text{mm}$, $D_2 = 270\text{mm}$, 調整前の姿勢は $\varphi = 90^\circ$, $H_{r0} = 290\text{mm}$ である.

移動量を比較した結果をTable 1に, 斜度 8.0° のときの実験の様子をFig.9に示す.

Table 1 10歩あたりの移動量の比較結果

斜度 $\theta [^\circ]$	移動量[mm]	
	調整前	調整後
7	182	322
8	174	306
9	148	307
10	124	190

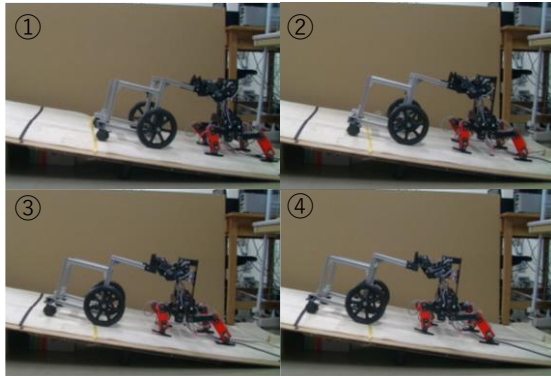


Fig.9 斜度8°の坂道を上らせる実験

坂道における調整後の姿勢は、調整前に比べて前傾、低重心となっており、例えば斜度8°の場合、 $\varphi = 81.4^\circ$, $H_r = 244\text{mm}$ であった。いずれの坂道でも、調整後の姿勢をとることで、同じ歩数あたりの移動量が調整前の姿勢よりも増している。この理由は、調整前の姿勢では、後脚の負荷が大きいため車椅子に押されてボディが後退し、前脚の着地位置が目標位置の手前になり、実際の歩幅が目標の歩幅より短くなる。一方、提案手法では、できるだけ後脚と前脚の負荷が均等になるように姿勢を調整するので、後脚の負荷が少なくなり、ボディが後退しにくくなるためである。

6. おわりに

著者らが開発している6脚作業移動ロボットの直立姿勢における車椅子操作として、平地における直進旋回操作法、坂道における押

し操作法を提案した。実験の結果、平地において、車椅子を前進・後退・円弧移動・その場旋回させることができた。また、提案する姿勢パラメータ調整法により、坂道の押し操作能力が向上することを確認した。

本研究では、すでに坂道にある状態について議論した。今後の課題は、平地・坂道間の遷移を実現することである。

参考文献

- 1) 井上健司, 大江寛次郎: 3つのモードを切り替え可能な6脚作業移動ロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会2008講演論文集, 1A1-E04, 2008/6.
- 2) 佐藤悠, 井上健司: 異なる起伏の地形を移動する6脚ロボットのトライポッド歩容, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.843, 2016, No.16-00348
- 3) 高津陽太, 井上健司: 5脚1腕ロボットの腕脚協調制御, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.881, 2020, No.19-00173
- 4) Yuto Honda, Toshifumi Kawaguchi, and Kenji Inoue: Overturn Recovery of Working Six-Legged Robots on a Flat Slope with Preparatory Body Rotation, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.36, No.4, pp.940-949, 2024/8.