

展開車輪を使った階段昇降ロボットの昇降制御 — 階段昇降での展開量操作による制振と傾斜角の調整 —

○田中 康皓*¹ 吹田 夏樹*¹
入江 寿弘*² 新宮 清志*³

キーワード：展開車輪 ロボット 階段昇降 段差

1. はじめに

近年のIoT技術の発展に伴い、ドローンでの農地・災害現場の撮影・観測や、無人機による建物内や構造物のメンテナンス、人間とコミュニケーションをとる人型ロボット等のように、社会でのロボットの需要が増加している。それと同時に、社会における少子高齢化進行に伴い電動車椅子やシニアカー等といった移動手段の普及も進んでいる。

そうしたロボットや乗り物、特に地上を移動する物では、車輪を回転させて移動させるものが多い、だが車輪を用いる場合は、エネルギー効率は良いが大きな段差や階段での移動が困難である。高齢化社会に伴うバリアフリー問題への対策が求められている¹⁾が、階段や段差は未だに少なくなく車輪式のロボットや乗り物にとっては障害となる。

他の移動手段を用いる場合、脚を動かす、クローラを駆動させる等の方法がある。脚の場合は段差や階段での移動が可能だが機構が複雑で外乱（横風、つまづき、障害物への衝突等）に弱い、クローラの場合には段差や階段のほか不整地での移動が容易だが、重量が大きい、速度が遅い、路面を損傷させる恐れがある、といった問題点がある²⁾。

そこで筆者らは、平地では車輪のように移動でき、変形を行うことで階段などの段差を乗り越えられるような変形式の展開車輪³⁾の開発、およびそれを搭載した移動ロボットの研究を行っている。本研究では、階段昇降での振動の軽減と車体の傾斜角の調整方法について検討を行った。

2. 階段昇降ロボット

本研究で使用している階段昇降ロボットを図-1に示す。このロボットは展開車輪と駆動・変形機構を合わせた駆動部、荷物や乗員を載せることができる荷台と天板を水平に保つ水平維持機構からなる荷台部、前輪と後輪とを接続し荷台部を支える車体部から構成される。



図-1 展開車輪を用いた階段昇降ロボット



(a) 車輪状態

(b) 展開状態



(c) 昇段開始

(d) 昇段

図-2 階段移動動作

図-2のように、展開車輪を車輪状態から展開させ、その状態で前進させて段差に引っ掛け、機体を持ち上げる事で段差を移動する。2つのモータを使用して車輪の回転角と展開量を自由に変化させることができ、段差の高さに合わせた変形操作が可能である。後輪にはオムニホイールを採用し前輪の動きに柔軟に対応できるようにしている。なお現状では前輪のみであるが、後輪にも展開車輪を採用した場合の階段昇降についても研究を検討している。

3. 機体設計

本研究における階段昇降ロボットは、建築基準法で定められている寸法⁴⁾を考慮し設計・製作されている。例えば、ロボットの全幅については、移動する環境のあらゆる階段に対応する為、全幅は建築基準法で定められている階段と踊り場の幅の最小値75[cm]未満に収めて設計されている。また、前輪を中心とした旋回移動が可能とするために駆動部分を前輪2輪としている。これにより狭い空間での方向転換を行うことが可能となり、そして機体前方に重心が存在するため、階段移動中に後方へ転倒しにくくなる。そのほか、ロボットの駆動・変形機構、展開車輪、水平維持機構のそれぞれの構造について説明する。

3.1 駆動・変形機構

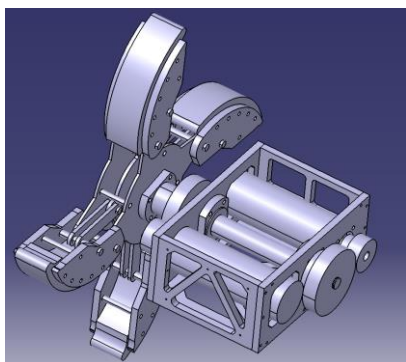


図-3 駆動・変形機構と展開車輪の 3D モデル

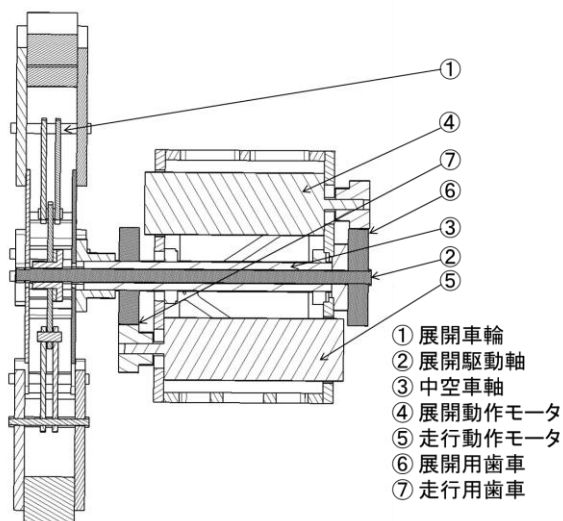


図-4 駆動・変形機構の構造図

図-3 および図-4 に示すように、展開車輪は 1 軸に対して 2 つのモータを使用し、それぞれが展開駆動軸と中空車軸を別々に駆動する。走行用モータを停止させた状態で展開用モータを逆転、あるいは展開用モータを正転させ走行用モータを停止させた場合に車輪が展開動作する。平地での車輪状態での走行や階段昇降の際には展開量を一定としなくてはならないため、各モータの回転角と回転速度を検出して同期するように制御を行っている。また、各モータを個別に制御することで車輪を回転させながら展開量を調整することも可能となる。

3.2 展開車輪

本研究で使用する展開車輪の機構部分について記す。図-5 に示す通り、階段と車輪寸法の関係は、展開車輪の最大ピッチ w [mm] が階段のピッチ W [mm] 以上であれば、次の段に転動爪体（アーム型部分）を引掛けて階段を乗り越える事が可能である。ただし、安定して階段を乗り越える為には、展開車輪の乗り越え高さ h [mm] が

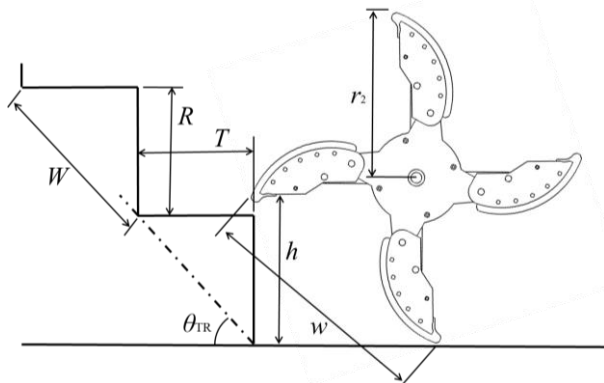


図-5 階段と展開車輪の寸法

階段蹴上げ高さ R [mm] よりも大きい必要がある。建築基準法で定められている寸法から、傾斜が最も急になる条件は踏面の寸法 $T = 21$ [cm]、蹴上げの寸法 $R = 22$ [cm] の場合となる。この時の傾斜は $\theta_{th} = 46.4$ [°]、階段ピッチ $W = 304.2$ [mm] となる。また、図-6 のように車輪状態での接地面から車軸までの高さを r_1 [mm] とすると、変形後は車輪の高さが r_2 [mm] となる。ただし、変形後の半径 r_2 は車輪の 1/4 回転を 1 周期として変動するため、階段移動時に機体の傾斜が何度も変動する⁵⁾。

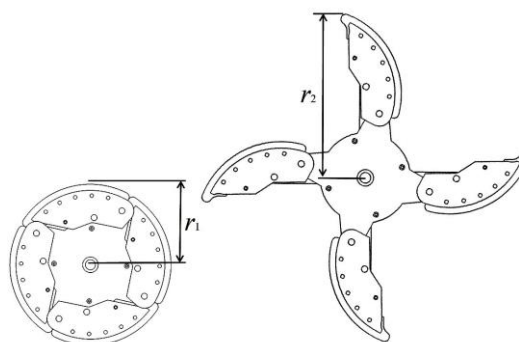


図-6 車輪状態・展開状態での車輪寸法

3.3 水平維持機構

荷台の安定化と車体が後方に転倒するのを防ぐため、このロボットには水平維持機構を搭載した。図-7 に水平維持機構を用いた機体の構造を示す。駆動部と車体部を固定し、荷台部と車体部の間にパンタグラフ式機構を搭載した。また、アクチュエーターにはギヤードモータを用い、荷台部分の水平判断には姿勢角センサを使用した。ギヤードモータが回転することにより、送りねじが回り、それによってパンタグラフ式機構が動く。パンタグラフは通常のものとは異なりリンク中央から前方にずれた部分で回転軸によって連結され、進展すると共に天板部分を前方に向けて傾斜させる機構となっている。また姿勢角センサから天板部分の傾斜角を読み取り、読み取った値から荷台が水平にな

るようにギヤードモータを回転させる。こうしたパンタグラフ機構と姿勢角センサの組合せにより、階段を昇る際に展開した車輪が天板と搭載された荷物に干渉することなく水平を維持することが可能となる。

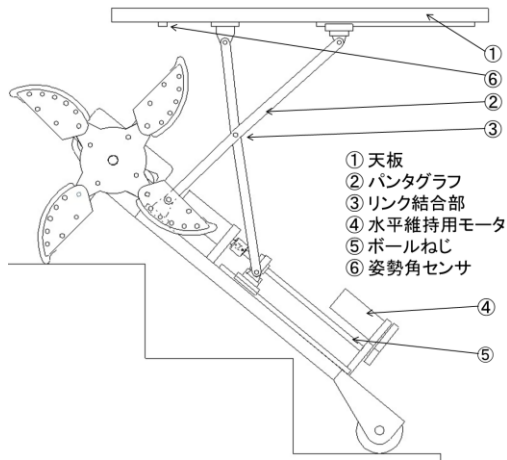


図-7 水平維持機構

4. 展開車輪の回転角と展開量の制御

4.1 展開車輪寸法と車輪位置・角度との関係

回転軸の回転角と展開車輪の転動爪体先端の位置関係を考察するにあたり、次に示す図-8のような簡易モデル図を用いた。

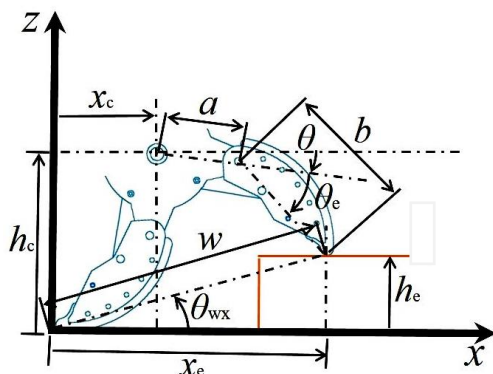


図-8 展開車輪簡易モデル図

図-8において、水平ピッチ x_e 、段差高さ h_e 、車輪中心の位置 x_c 、 h_c 、リンク長さ a 、 b ($a = 105$ [mm]、 $b = 152.5$ [mm])としている。また、車軸の回転角を θ 、展開量を θ_e としている。これらのパラメータを用いて位置と角度に関する関係式を立てた。なお、 $S_{(\theta_n)} = \sin(\theta_n)$ 、 $C_{(\theta_n)} = \cos(\theta_n)$ としている。

$$x_c = aS_{(\theta)} + bS_{(\theta+\theta_e)} \quad (1)$$

$$h_c = aC_{(\theta)} + bC_{(\theta+\theta_e)} \quad (2)$$

$$x_e = x_c + aC_{(\theta)} + bC_{(\theta+\theta_e)} \quad (3)$$

$$x_e = a(C_{(\theta)} + S_{(\theta)}) + b(C_{(\theta+\theta_e)} - S_{(\theta+\theta_e)}) \quad (4)$$

$$h_e = h_c - aS_{(\theta)} - bS_{(\theta+\theta_e)} \quad (5)$$

$$h_e = a(C_{(\theta)} - S_{(\theta)}) + b(C_{(\theta+\theta_e)} - S_{(\theta+\theta_e)}) \quad (6)$$

$$w^2 = x_e^2 + h_e^2 \quad (7)$$

$$w = \quad (8)$$

$$\sqrt{2(a^2 + b^2) + 4ab(C_{(\theta)}C_{(\theta+\theta_e)} + S_{(\theta)}S_{(\theta+\theta_e)})}$$

移動する階段の寸法について、蹴上げ寸法 R と段差高さ h_e 、踏面寸法 T と水平ピッチ x_e が等しいとすると、展開量は式(7)と式(9)、回転角は式(10)と式(11)で求めることができる。

$$w = \quad (9)$$

$$\sqrt{2(a^2 + b^2) + 4abC_{(\theta_e)}} \quad (0 \leq \theta_e \leq 2.20)$$

$$\theta_{wx} = \cos^{-1} \frac{x_e}{w} \quad (10)$$

$$\theta_{wx} = -\theta + \frac{1}{4}\pi \quad (11)$$

これらの関係式により、階段の踏面や蹴上げの寸法に対する最適な展開量および回転角を求められる。

4.2 機体の傾斜角と車輪の回転角

ロボットが階段を昇降する際、展開車輪を回転させて階段を昇っている。この方法の場合、階段を昇り始める際に機体の傾斜角が大きく変動してしまう問題がある。今後、制御の最適化を行うために機体の傾斜角について考えた。その際に使用した簡易モデルとパラメータを図-9、図-10に示す。図-9、図-10における記号は、それぞれ車体の傾斜角 θ_{ang} 、車輪の回転角 θ' 、車体のホイールベース H_b 、蹴上げを含めた車輪中心の位置 h'_a 、蹴上げを除いた車輪中心位置 h'_c 、後輪のオムニホイール半径 H_r となっている。

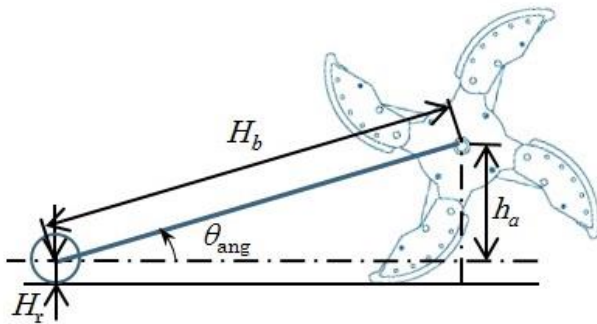


図-9 傾斜角に関する簡易モデル

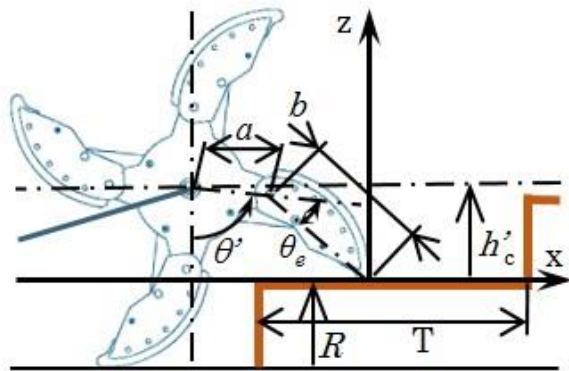


図-10 車輪周辺の簡易モデル

これらのパラメータを基に、傾斜角と回転角の関係式を立てた。それらを以下に示す。

$$\theta' = \theta - \frac{1}{2}\pi \quad (12)$$

$$h'_c = aC(\theta_r) + bC(\theta' + \theta_e) \quad (13)$$

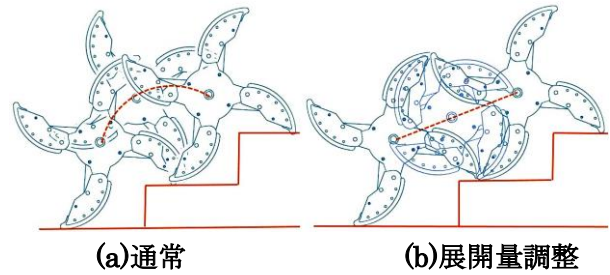
$$h_a = h'_c + R - H_r \quad (14)$$

$$\theta_{\text{ang}} = \sin^{-1} \frac{h_a}{H_b} \quad (15)$$

ここから、回転角によって機体の傾斜角が算出できる。

4.3 収納動作を伴う階段昇降

展開した状態では車輪半径 r_2 が 1/4 回転を 1 周期として変動するため、階段昇降時には機体傾斜角が変化し機体自体も上下に振動してしまう。ごく低速での移動時ならば水平維持機構によりある程度は低減できるが、そうでない場合には水平維持機構が追従できず荷物や乗員を揺らしてしまう。そこで、回転軸と転動爪体を同時に動作させることにより展開量を調整する。傾斜角を変動させることなく階段を昇降でき振動を抑えられ、またモータのトルクも抑えることが可能と考えられる。



(a)通常 (b)展開量調整
図-11 展開量の変化を伴う階段昇降

5. まとめ

展開車輪を使った階段昇降ロボットの傾斜角の変動と回転軸の上下運動について考察した。回転角の変動に伴い傾斜角が変動すること、展開量の操作により傾斜角や振動の調整ができることがわかった。今後、実機での検証と制御方法の検討を行い、より安全かつ安定な階段昇降を可能とする予定である。

【参考文献】

- 1) 高田邦道, 安井一彦, 他: 交通バリアフリーの実際, 共立出版 pp. 4-16, 2006
- 2) 日本ロボット学会: 新版 ロボット工学ハンドブック, pp. 375-449, 2005
- 3) 入江寿弘: 展開車輪, 無料データベースサイト J-STORE http://jstore.jst.go.jp/nationalPatentDetail.html?pat_id=33150
- 4) 総務省法令データ提供システム 建築基準法施行令 第二章 一般構造 第三節 階段 第二三条 <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S25/S25SE338.html>
- 5) 吹田夏樹, 入江寿弘, 新宮清志: 展開車輪を用いた移動ロボットの研究-階段昇降時の傾斜角変動を考慮した展開量の最適化-, 第 32 回ファジイシステムシンポジウム, TE3-2, 2016

- *1 日本大学大学院 理工学研究科 精密機械工学専攻 院生
- *2 日本大学 理工学部 精密機械工学科 教授 博士(工学)
- *3 日本大学 名誉教授 工学博士 総合資格学院 特別顧問