

階段を登れる車椅子の構造設計

米山 光^{*1}、大海 悠太^{*2}、鈴木 秀和^{*2}、辛 徳^{*2}

Structure design for wheelchair climbing stairs

Hikaru Yoneyama^{*1}, Yuta Ogai^{*2}, Hidekazu Suzuki^{*2}, Duk Shin^{*2}

Abstract In recent years, barrier-free is being proceeded for the disabled and the aged people. Due to this influence, facility equipped with slope and elevator continue to grow steadily. However, considering access to facilities that are not equipped with them, a wheelchair is difficult to climb up the stairs on their own. We design the structure of wheelchair based on the rocker bogie mechanism, which could climb three types of actual stairs in Tokyo Polytechnic University. Additionally, in order to obtain stability, we would focus on the center point of weight (CM: Center of Mass) as straight as possible with respect to the slope of the stairs.

1 序論

1.1 研究背景

近年、急速な高齢者社会化によるバリアフリーが進行し、エレベータやスロープ、昇降機が設備されている施設が増加している。日本では東京都営地下鉄の全駅にエレベータが備わっている。このことで現代社会は車椅子利用者に適用しやすいよう変化している。しかし、現実には予算や場所の都合により全ての施設にバリアフリー化することが難しい。その問題を解決するために階段を自力で登れる車椅子が必要となる。

現在、電動車椅子の主な駆動構造はタイヤ型とトラックベルト(キャタピラ)型である。タイヤ型は最もシンプルな構造で、機動性が高く平面での高速移動がしやすい。しかし、凹凸な道では走りにくく、地面が濡れていると滑りやすい。トラックベルト型は接地面積が大きく、凹凸な道に対応しやすい特徴を持つ。車椅子昇降機にもトラックベルト型が採用されている。そのデメリットとして、ベルトや内蔵車輪等パーツが多いので総重量が重くなる。それにより地面や階段の角を痛めやすい問題がある。本研究ではタイヤ型でありながら、不整地に対応できるロッカーボギー機構に着目した。ロッカーボギー機構は6輪で構成された不整地走破機構である。前輪、中輪を繋ぐリンクがフリー結合にすることで、全てのタイヤが接地しやすい。その高い走破性からNASAの火星探査機「Opportunity」や「Curiosity」にも採用されている。2012年、Kimらによりロッカーボギー機構を基に階段を登る研究が公表された[1]。その研究では階段登り時に重さの中心点(CM点: Center of Mass)の軌跡を直線状に近づけることで安定性を得ることを目指していた。しかし、全長が約450mmと短いため人が乗ることができない。また、CM点が前方にあるためバック走行をしないと階段を下れない問題がある。そこで人が乗れるよ

うに設計し直し、CM点の軌跡を直線状に近づけることが重要となる。

本研究ではロッカーボギー機構を基に階段を登る車椅子の機構を設計する。東京工芸大学厚木キャンパスに実在する3ヶ所の階段を登ることを目指す。また、安定性を得る為に登りの最中にCM点の軌跡を直線状に近づけることを目指す。

2 設計概要と提案モデル

2.1 設計概要

今回、図1の二次元モデルを基に設計していく。始めに、電動車椅子の寸法はJISの規格番号「JIS T9203:2010」により最大値が定められている。これにより、モデルの全長、CM点の高さ(座椅子の高さ)の範囲は式(1)、式(2)に表す。

$$\text{全長 } 2r + L_1 + L_2 \leq 1200 \text{ mm} \quad (1)$$

$$\text{CM点の高さ } L_4 \leq 470 - r \quad (2)$$

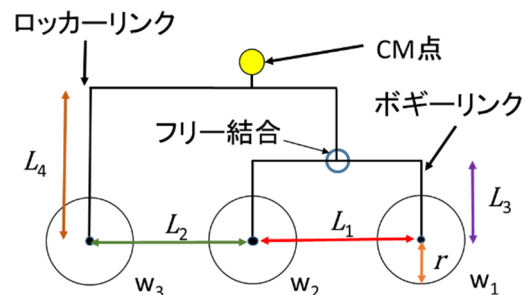


図1. ロッカーボギー機構の基本モデル

^{*1} 東京工芸大学工学部電子機械学科大学院生

^{*2} 東京工芸大学工学部電子機械学科准教授

2018年9月25日 受理

次に各タイヤに荷重が等しくかける為に CM 点を中輪 w_2 の上に来る必要がある[3]。よってリンク L_1 、 L_2 の長さを等しくし、タイヤ w_1 、 w_2 、 w_3 の半径を r で統一する。

タイヤの最大サイズは階段によって変化してくる。タイヤの中心から階段の段差に垂直線を引くことで r の最大サイズを求めることが出来る[1]。図 2 より r の最大値 ($r \leq 269$) を求めると式 (3) の範囲を得られる。なお、本章において計算に用いる階段のサイズは $d=250$, $h=170\text{mm}$ としている。

$$r^2 = d^2 + (r - h)^2 \quad (3)$$

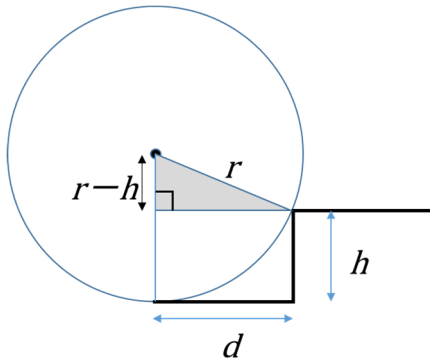


図 2. 段差に乗れるタイヤの最大半径

リンク L_1 について計算を行う。 w_2 が段差に当たる時、 w_1 が一段先の段差に乗るように定義する。この時、 L_1 は図 3 のように直角三角形に見なすことができ、式 (4) が得られる

$$L_1 = \sqrt{(r + d)^2 + (2h)^2} \quad (4)$$

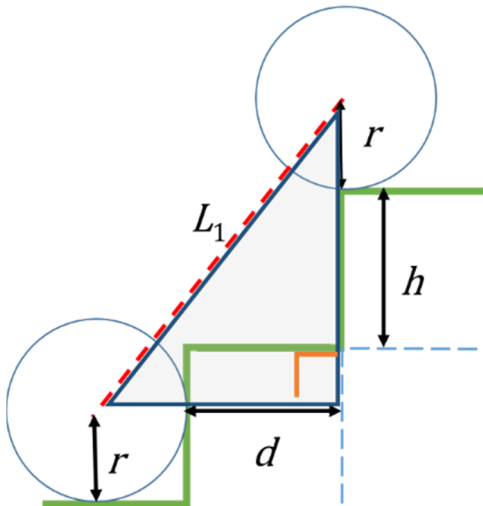


図 3. L_1 の計算図

図 4 において w_1 、 w_2 が階段を上りきる際 L_1 が最後の段差に干渉しないよう L_1 に垂直なベクトル \vec{s} 方向に上げる必要がある。その為に図 4 (3) の L_3 の計算を目指していく。

まず、 w_1 、 w_2 が図 4 (1) の状態の時、 L_1 と辺 C のなす角度 β は以下の様に計算できる。

$$\beta = \cos^{-1}\left(-\frac{h^2 - C^2 - L_1^2}{2L_1C}\right) \quad (5)$$

$$\text{但し、} C = \sqrt{L_1^2 - h^2}$$

次に、図 4 (2) に注目していく。図 4 (3) の直角三角形の斜辺 b を求める為に a について計算を行う。 L_1 を段差の点 P と交差するまでベクトル \vec{s} 方向に引き上げると仮定した時、線分 PQ の内分は $b:a$ と等しくなる。これにより、辺 L_1 、 r 、 a によって直角三角形と見なすことができる。このことから a 、 b の計算ができる。

$$b = h - (r + a) \quad (6)$$

$$\text{但し、} a = r \times \tan(\beta)$$

式 (5)、(6) の過程を経て、図 4 (3) にて計算を行うと計算式 (7) が得られる。これにより L_3 の長さの条件が求められる。

$$L_3 > b \times \cos(\beta) \quad (7)$$

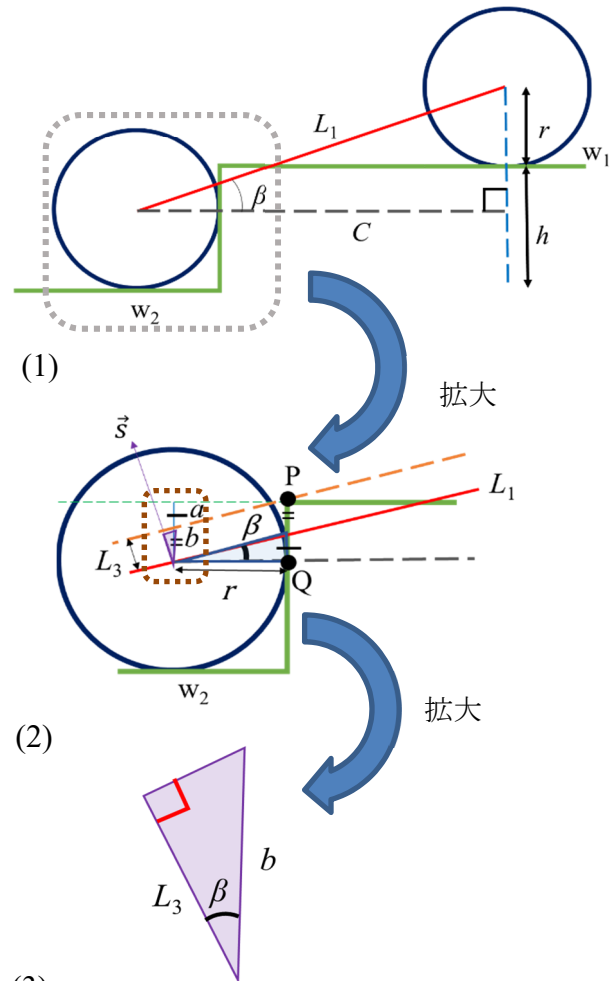


図 4. L_3 の計算過程

2.2 設計した提案モデル

式(3)～(7)の計算により設計したモデルを図5に、各要素の数値を表1にまとめる。最終的に全長とCM点の高さをJIS規格指定のサイズ内に当てはめることができた。 L_3 において、リンク幅や階段のサイズによる変位を考慮して実際の計算値より大きめの数値に設定している。

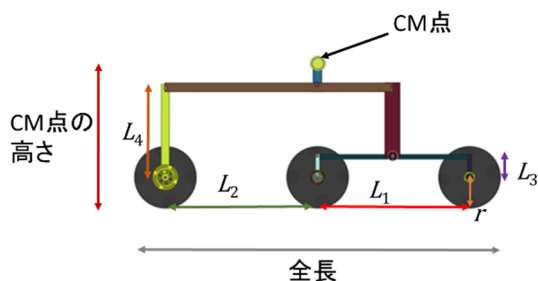


図5. 設計した提案モデル

表1. 設計モデルの長さ

要素	mm
r	100
L_1	488
L_2	488
L_3	65
L_4	300
CM点の高さ	470
全長	1176

3 シミュレーション実験方法

3.1 シミュレーション

今回設計したモデルの実験を行う為に、Algoryx シミュレーション(AB)製の二次元シミュレーションソフト

「Algodo」を用いた。Algodoにて提案した設計モデルとKimらのモデルを再現させ、CM点の軌跡をプロット化し比較した。また、安全面の評価を得るためにCM点にかかる加速度も求め、比較する。実験対象となる階段は東京工芸大学厚木キャンパスの建物の階段を実測した。表2に対象のサイズを示す。

Algodoにおいてシミュレーション時の設定について記述する。提案モデルとKimらのモデルの重量をまとめたものを表3にまとめる。タイヤに搭載されるモータは1000 rpm, 3.3 N・mとした。これは日本電産テクノモータ製「産業用ブラシレス DC モータ インナーロータ」を参考にした。このモータを2つのモデルのタイヤに全て搭載されていると仮定する。Kimらのモデルは図6の数値を参照し再現した。

Algodoでは摩擦の度合、反発の度合を調整することで材質を再現することができる。今回シミュレーションにて階段の材質を「石」に選択した。実際にAlgodo上で製作した階段を図7に示す。物質にかかる摩擦係数は摩擦の度合の相乗平均によって求められる。同様に反発係数も反発の度合の相乗平均で算出できる。表4に物質の摩擦、反発の度合についてまとめたものを示す。

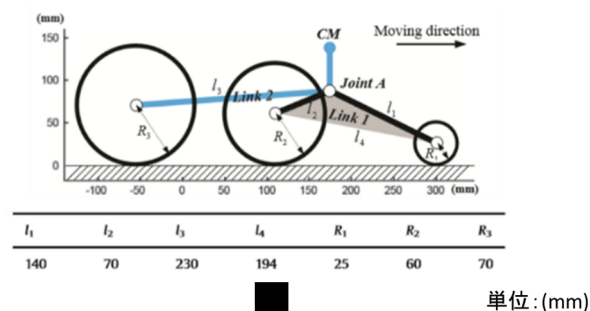


図6. Kimらのモデルの長さ

表2. 実験対象の階段サイズ

場所	高さ[mm]	奥行き[mm]	勾配[deg]
7号館	170	250	34.2
11号館	160	270	32.2
12号館	150	300	26.6

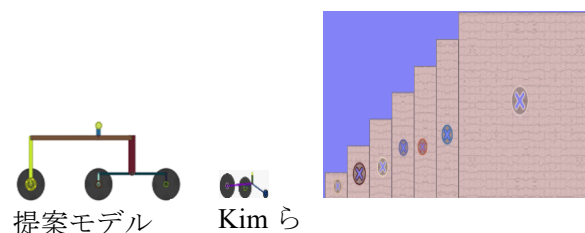


図7. Algodoで製作したモデルと階段

(サイズ: 7号館)

表3. 2つのモデルの重量

重さ(kg)	各リンク	w ₁	w ₂	w ₃
提案モデル	1	1	1	1
Kimら	0.1	0.35	0.07	0.07

表 4. 階段とタイヤの摩擦・反発の度合

材質 度合い	階段(石)	タイヤ (ゴム)	摩擦係数
			反発係数
摩擦	0.9	1.50	1.16
反発	0.2	0.85	0.41

3.2 評価方法

シミュレーションで得た軌跡を評価するために精度の指標を表す平均二乗誤差(RMSE: Root Mean Squared Error)と決定係数(R^2 : coefficient of determination)を工学解析用ソフト「MATLAB」にて算出した。RMSE は実測値(y_i)と理想値(y'_i)の差を示す指標である。なお、理想値や理想値のデータ群は階段の勾配に対する直線のことを表す(参照: 図 8 内計算範囲の直線)。実測値の精度の悪さについて評価するため、0 に近い程優れている。計算式は式(8)である。そして、決定係数はデータ群(y_i)と(y'_i)を直線で回帰したとき、説明変数(y)で従属変数(y')をどれだけ説明しているかを表す指標である。実測値と理想値の当てはまりの割合を示しているため 1 に近いほど優れており、計算式は式(9)となる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y'_i)^2} \quad (8)$$

N = 計測数

y_i = 実測値のデータ群

y'_i = 理想値のデータ群

$$R^2 \equiv 1 - \frac{\sum_i (y_i - y'_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

$\bar{y}' = y_i$ の平均値

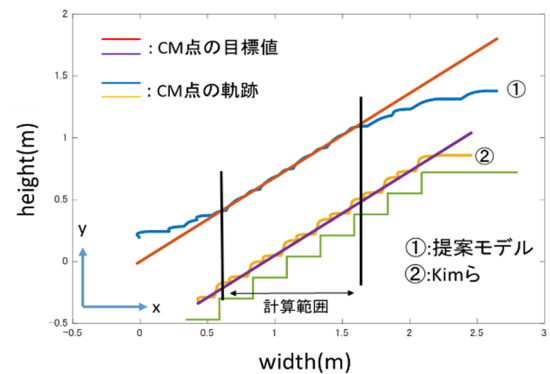
4 実験結果と考察

4.1 CM 点の軌跡

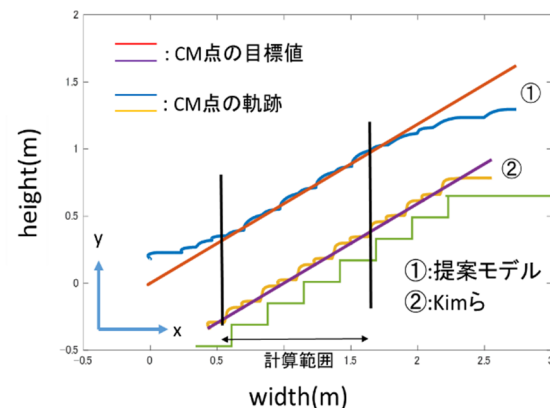
図 8 に東京工芸大学の 3 ヶ所の階段を登った時の軌跡を示す。解析において階段を登りの最中の軌跡を評価するために図 8 の「計算範囲」で示された区間を用いる。車椅子の安全性を考慮し、CM 点の軌跡ができるだけ直線状に近づけることが重要である。その解析結果、提案したモデルの軌跡が 3 つの階段で直線状に近づいたことが確認できた。軌跡を見ると Kim らのモデルは階段を登る時、理想線より上に大きな山なりの軌跡が描かれているが、提案モデルでは山なりの軌跡を縮小できたことが分かった。

4.2 精度評価

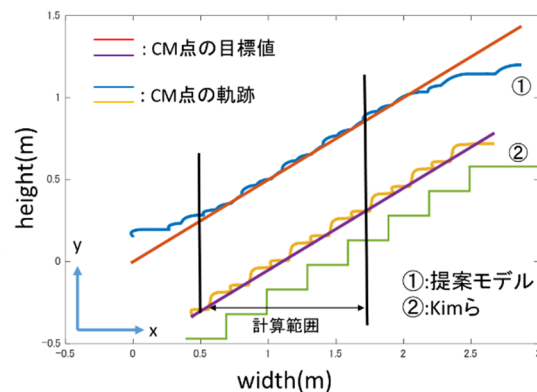
表 5 に軌跡の RMSE、決定係数による評価をまとめる。定量的な評価にも提案したモデルが Kim らのモデルより良い結果になった。Kim らのモデルでは 11 号館の階段を登った時、最も優れた評価を得る結果となった。この理由は、11 号館のサイズが Kim らの実験対象(高さ 160×奥行 310 mm の階段)と高さが等しいことにより精度評価に影響した可能性がある[1][2]。提案モデルは 7 号館の階段を登った時、最高評価を得る結果となった。提案モデルは 7 号館の階段サイズを基準に設計を行った為、この結果を得られたと考えられる。



(a) 7 号館(高さ 170mm×奥行 250mm)



(b) 11 号館(高さ 160mm×奥行 270mm)



(c) 12 号館(高さ 150mm×奥行 300mm)

図 8. 各階段を登った時の軌跡

表 5. ベンチマークとの精度比較

場所	提案モデル		Kim ら	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²
7 号館	0.079	0.9978	0.0426	0.9768
11 号館	0.0220	0.9909	0.0403	0.9829
12 号館	0.0226	0.9904	0.0494	0.9750

4.3 改善課題の考察

シミュレーションで提案モデルが階段登り時に高い精度を得ることができた。しかし、実用化に至るには様々な課題点が残っている。その中で、使用者の安全のため、速度制御による加速度の減少が重要となる。

表 6 にそれぞれの階段登り時に CM 点にかかった最高加速度をまとめる。全ての階段において Kim らのモデルでは重力加速度 $9.8[m/s^2]$ に近い値が、提案モデルでは $1G$ を超える値が観測できた。階段登り時において最高加速度が発生している位置を探した結果、前輪が段差に衝突する瞬間であることが判明でき、減速を行っていないことが原因であると考えられる。本実験では、シミュレーションにて CM 点の軌跡の精度評価に重点を置いたため、速度の制御を行わなかった。実用化の際の改善策として、距離センサやカメラによって階段や段差を認識し、減速を行うことで加速度の減少が期待できる。

表 6. ベンチマークとの加速度の比較

場所	提案モデル		Kim ら	
	x	y	x	y
7 号館	12.63	9.04	9.78	8.67
11 号館	11.96	10.68	7.75	8.08
12 号館	12.20	12.83	7.72	12.23

5 結論

本研究ではバリアフリー化されていない場所での階段を自力で登れるために、ロッカーボギー機構を用いて車椅子の構造を設計した。また、安定性を得る為に階段登り時に CM 点の軌跡を直線状に近づけることを目指した。提案したロッカーボギー機構のモデルは JIS 規格の車椅子の全長の最大値以内に当てはまる長さに調整出来た。CM 点の軌跡の精度評価を行ったシミュレーションの結果では Kim らの結果より全ての階段で良い結果が得られた。しかし、CM 点にかかる振動(加速度)が強いという結果を得たため、搭乗者の安全面を考慮して速度制御による段差の衝突を減少する改善が課題となった。

今後の課題として、約 1/4 スケールで制作を行い、シミュレーションとの CM 点の軌跡を比較していく。また、距離センサを用いた段差の認識によるモータの速度制御を行うことで加速度の減少を試みる。

参考文献

- 1) Dongmok Kim, Heeseung Hong, Hwa Soo Kim, Jongwon Kim, “Optimal design and kinetic analysis of a stair-climbing mobile robot with rocker-bogie mechanism”, Mechanism and machine theory, Vol.50, pp 90-108, 2012 – Elsevier.
- 2) Heeseung Hong, Dongmok Kim, Hwa Soo Kim, Seokwoo Lee, Jongwon Kim, “Contact angle estimation and composite locomotive strategy of a stair-climbing mobile platform”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.29, pp367-381, 2013—Elsevier.
- 3) 磯田 颯, 市川 瑞, 植松 千春, 及川 雄也, 山口 正勝, 「ロッカーボギー機構を用いた無人探査ロボット」日本惑星科学会誌 Vol. 21, No. 2, 2012.
- 4) Heeseung Hong, Dongmok Kim, Hwa Soo Kim, Sun Ho Kim, Jongwon Kim, “Optimal kinematic design of a mobile robotic platform that can navigate the stairs based on the rocker-bogie mechanism”, 6th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, June 22–25, 2010, Kyoto, Japan.
- 5) 内木 孝将, 「アクティブサスペンションを有する惑星探査ローバの不整地走破性能に関する研究」, 東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻 修士論文, 2月9日, 2010.