

ONLINE ISSN: 2188-9023 PRINT ISSN: 0919-2948

Volume 55, Number 2, Page 117-128

Category: Paper

Received date: 10 September 2018

Accepted date: 13 November 2019

J-STAGE Advance publication date: 27 December 2019

Publication date: 5 February 2020

Corresponding author: Keisuke KATO (E-mail address: k_kato@meiji.ac.jp)

DOI: 10.14953/jjsde.2018.2827

Copyright©2020 Japan Society for Design Engineering

移動支援と運搬作業支援を行う階段昇降移動ロボットの設計・開発 (階段形状に適応する C 字型受動爪を有した車輪と段鼻間隔に適応する車体の設計)

Design and Development of Stair Climbing Robot to Support Mobile and Carriage (Design of Wheels with C-shaped Passive Claws Adaptable to Shape of Step and Vehicle Body Adaptable to Distance between Stair Nosings)

加藤 恵輔*¹, 中村 祐介*², 長谷川 一樹*³, 根崎 雄太*⁴

(Keisuke KATO) (Yusuke NAKAMURA) (Kazuki HASEGAWA) (Yuta NESAKI)

Abstract

Promotion of barrier-free systems has been discussed actively because of the recent aging society, and more and more elevators and other devices have been installed in places such as large-scale public facilities and stations. However, it is difficult to apply barrier-free designs to every building to assist people's mobility and smooth carriage of luggage. Especially stairs are the challenging place in terms of mobility. We consider a vehicle-type robot that can go up and down stairs is effective to solve this problem. Thus, in our study, we aimed to establish a technology which prevents the robot from sliding down stairs, and we proposed the wheel structure with the new C-shaped claw mechanism to adapt passively to shapes of steps. We also proposed the movement action principle that is less affected by the distance between the stair nosings. In this paper, we discuss the mechanical configuration and the mechanical design of the vehicle-type robots that we have developed, and report on the experiments.

Key words

stair climbing, human supporting robot, adaptable claw and wheel, expansion and contraction body, vehicle robot

日本設計工学会 2016 年度秋季大会研究発表講演会 (2016 年 10 月 8 日) にて発表

* 1 正会員, 明治大学理工学部 (〒214-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1), k_kato@meiji.ac.jp

* 2 非会員, 日本車輛製造(株)エンジニアリング本部 (〒456-8691 名古屋市熱田区三本松町 1-1),
yu-nakamura@n-sharyo.co.jp

* 3 非会員, (〒132-0024 江戸川区一之江 4-13-9), drs.kh1122@gmail.com

* 4 非会員, 明治大学理工学部 (〒214-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1), ce72055@meiji.ac.jp

1 緒言

高齢化の一途を辿る我が国の実情から、機械による生活支援の必要性が古くから議論¹⁾されている。人間が行動する空間にて、階段は下肢筋力の低下した人にとって移動の困難な場所であることが着目^{2), 3)}されている。歩行に支障がある人⁴⁾あるいは移動機械にとっても移動の困難な場所である。その解決策としてエレベータ、駅などで見られる特別な運用のエスカレータ、ガイドレール式リフト⁵⁾などに頼らざるを得ない。近年はバリアフリー構想の下、建物各所に工夫が凝らされている例も数多く存在⁶⁾する一方、著しい遠回りを要す経路⁷⁾であることも無視できない。また、係員など他人への依頼が必要で自力での遂行が困難であるなど、完全な対応は実現できていないのも現状⁸⁾である。従って、建物の付帯設備の設置に頼らない移動技術の確立は、自在な移動を実現する上で有効であり、本研究の目的である。これまでに階段を移動する様々な形態の機械^{9), 10)}が提案されている。階段昇降にクローラ型^{11), 12)}を利用し、優れた移動機能を実現した例も多々ある。クローラ型の中でも履帯の一定間隔の突起が階段の段鼻（階段の凸部）間隔に適応できない故の滑落等の問題に着目し、これを解決した試み¹³⁾は特徴的である。一方、車輪を用いた研究例は、ばねに支えられた多数の接地ブロックが車輪外周に配置されて階段の突起に適応¹⁴⁾するものもあり、6輪構成で中央の車輪に対して前後4輪は上下方向に適応できる自由度^{15), 16)}を有し、中央2輪は外周部に放射状の切れ込みによって移動面の凸部に噛み合う¹⁷⁾ことで段差乗り越え能力を向上したものである。以上のように多くの手法が試みられているが、筆者らはまだ検討の余地があると考え、移動ロボットの車輪の材料や車体構造部材の変形に依存しない手法を用いて更に簡便な方法を模索した。本稿では、階段の段鼻形状およびその間隔に適応可能な車輪を用いた車両について提案し、機構構成法、設計および動作実験について論じていく。

2 階段保持機構を有した車輪を用いた階段昇降機械の提案

階段は健康な人間の効率的な移動に特化したものであり、歩行に支障がある人には適しておらず、手摺等による対策が講じられているが充分ではない¹⁸⁾。ここで階段での移動を考えると、2脚による不連続接地移動性を活用し、足裏の主な接地面が踏面に収まり、支持脚は重力方向の荷重のみ支えて移動するという条件が前提であると筆者らは考えている。従って、階段を安定して移動できる装置の条件は、階段形状の検出・認識した上での脚式ロボットの形態を選択することである。ここで述べた安定とは静的安定であり、接地部の滑りがなく、過大な慣性力もなく随時停止可能を意味している。さて、車両型ロボットが階段を昇降するという課題を整理する。階段は、(1)踏面（水平方向の面）すなわち段という不連続面で構成され、(2)踏面と蹴上げ（概ね垂直方向の面）の寸法は多様で段鼻（階段の凸部）の間隔も各々異なる、(3)段鼻の角 R や滑り止め材などにより段鼻形状が多様という形状的特徴に加え、(4)中空ゴムタイヤは半径に依存した段差乗り越え能力（通常は車輪直径の $1/4 \sim 1/3$ 程度）となり、(5)段の連続する階段では半径を大きくすると車軸中心や接地中心が段から外れるという車輪寸法の問題がある。なお、先に挙げた(4)については、車輪自体の対地適応性を上げるために低圧タイヤの変形を用いる方法¹⁹⁾が対地適応性を求められる農業機械のような例に用いられる。しかし、車輪による階段の接地はさらに注意すべき点があることに我々は着目した。**図1**に示した寸法関係のように、筆者らの所属機関の建物を例に考え、踏面 240mm、蹴上 200mm のものを対象に車輪を検討した場合、車輪径 $\phi 480$ 以下であれば、踏面に接地点が乗って安定して静止できるが、段を超えるには $\phi 800$ 以上必要という矛盾が生じる。これらから検討し、1章で論じた問題を解消できるよう

な従前に存在しない新しい方式の車輪を提案する。

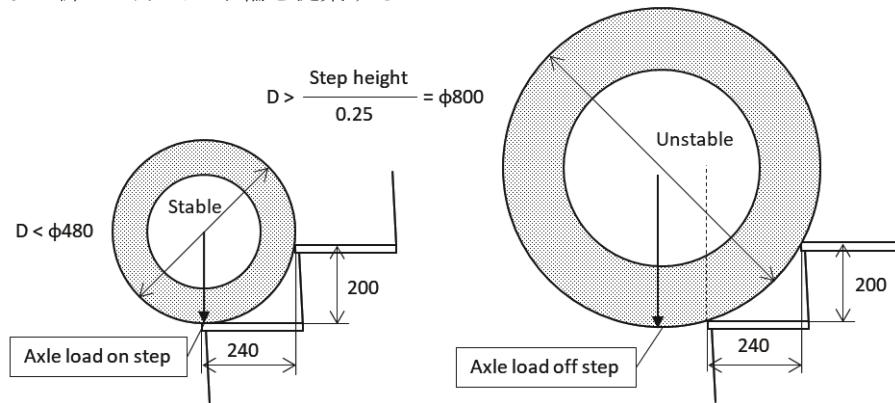
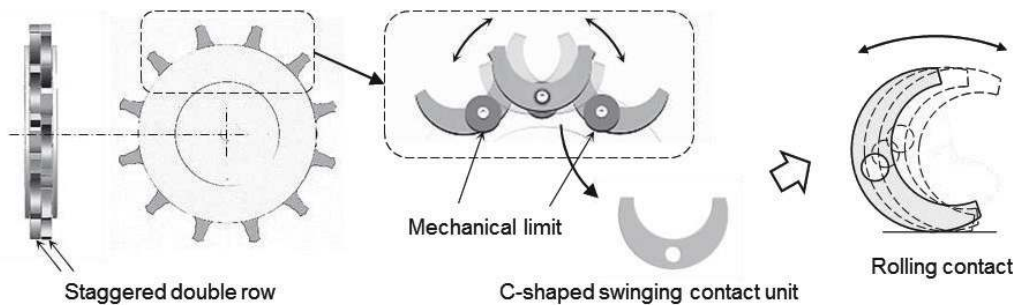


Fig. 1 Dimension of stairs, diameter of wheel and contact point

この段鼻保持機構に用いる車輪は、移動面を幾何的に拘束して安定した段差乗り越え機能を獲得するものである。例えば、階段形状をラックとして見立て、ピニオンギアのような突起を有した車輪を噛み合わせれば幾何的に拘束でき、滑落の危険を抑制可能であろうと発想したものである。放射状に突起を配した車輪を4つ利用しても、各々の車輪の突起がどのような角度で階段に接触するかは確定できず、先に挙げた履帯の突起が有効に機能しないことがある問題¹³⁾もあり、更には突起先端部が段鼻に突き当たらない状態となる適応的な保持動作¹⁴⁾が求められる。これらの機能を勘案し、本研究で目指す簡単な原理で実現するには、車輪外周の突起が踏面および段鼻に適応的に接触し、かつ確実に保持する必要がある。図2(a), (b), (c)のような基本機構を提案する。(a)は車輪の全体図であり、提案するC字型爪機構が複列で交互に配置されている。(b)はC字型爪機構の配置を示しており、シーツ状に適応動作するよう取り付けられているとともに、交互に取り付けた軸にストoppaを用いて取り付け動作角を制限している。(c)はC字型爪機構の転動接触状態を示しており、車輪の回転に伴い、爪が転動する際の接触状態として転動を想定している。

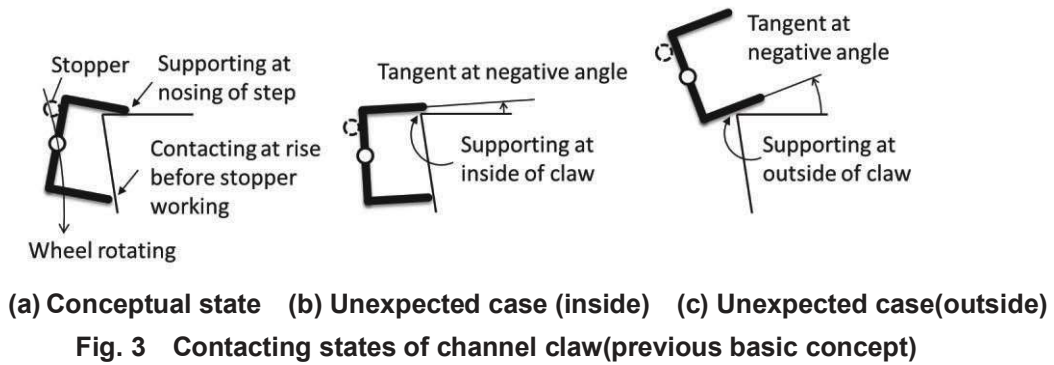


(a) Overview of wheel (b) Arrangement of contact units (c) Contacting states

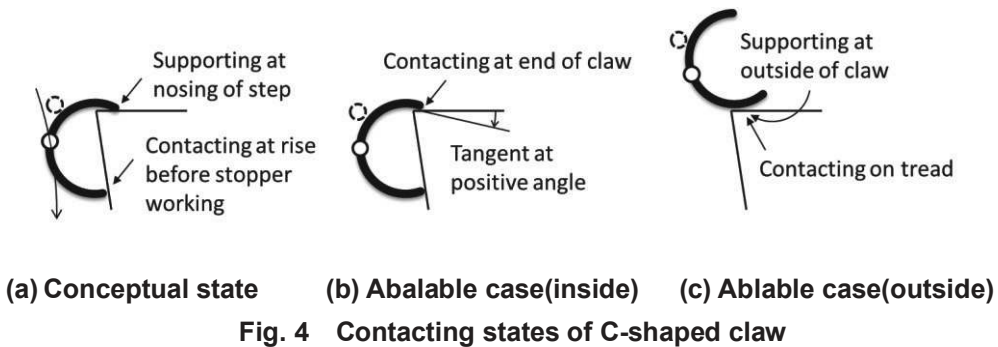
Fig. 2 Proposed wheel mechanism with swinging contact units

C字型爪機構のような放射状の突起は、筆者らが試作を繰り返した上で得た知見に基づいて設計したものである。放射状の爪を配した機構は先に挙げた研究例¹³⁾で論じられたクローラの爪先端同様の問題が発生し、段鼻を掴めなくなる問題があるため、我々は、爪がある程度動いて段鼻を回避し、かつ受動的にこれが可能な方法を検討した。図3(a), (b), (c)は開発当初の突起形状であり、コの字型を有する。この形状を選択した理由は、囲める形状を用いて階段凸部（段鼻）を掴むような動作を期待したからである。動作角は爪の先の厚さ分を十分に逃がして適応でき、水平面でも回転できるように $\pm 15^\circ$ 程度に設定して動作を制限しておき、階段に接地した後は不用意に動かないようストoppaに当たって爪が停まり車輪として駆動力を伝達する構

造となっている。本形状で実験を行った際、噛み合っているが、引っ掛けて上昇する際、滑って外れることがあった。頻度は不規則であるが、1段上るときに2回ほど外れる場合もあったため、安定した動作とは言い難いと判断した。図3(a)であれば確実に保持できるが、内側で接触した(b)の場合や外側で接触した(c)の場合、接触点における接線のなす角度は負となり、摩擦状態により滑り落ちて車輪が空転する結果となった。



そこで、この問題の解決のために、爪の接触部における接線のなす角度に着目した。図3(b), (c)のような角度では滑り落ちるため、接地部の接線は最低限水平である必要がある。また、引っ掛ける形状であることも望ましく、図4(a), (b), (c)に示したようにC字型にすることを考案した。



この条件から、1) (a), (b)のように内側は鉤爪のように段鼻を引っ掛ける機能とし、接線のなす角度は正となる。また、2) (c)のように外側は円弧形状として転動や摺動にも対応し、接線は水平となるという形状に変更した。また、先の図2(a)に示したように複列に配置し、C字型爪機構の内側と外側が適応できるよう交互に配置するが、この際に外側の転動と摺動が発生するため、滑らかな形状が効果的であると考え、本形状を選択した。これより、2輪接地部の回転角における位相が調整できる自由度を持った機能を実現しながら2輪を1組としてまとめた構造により爪の内側接地から外側接地に連続的に切り替わることができる。これに加え、突起機構そのものが段鼻に適応的に接触できる必要があり、図5に示した車輪の動作概念を用いた移動方法を提案する。図中の○印は主に動作する部位を示している。可動式接地部の先端が段鼻を保持するために、図中②のように一旦は鉤爪のように掛かった後、すぐに③に示した次の接触部の背(緩い凸R)が踏面に接触し、本体を引き上げる動作となる。鉤爪形状により保持力を確保できるが、これだけでは踏面に過大な面圧が掛かるため、段鼻の保持後は面圧を上げずにゆっくり昇る機能の実現を目指したことが提案する機構の特徴である。また、平地移動においても十分な低速に限定すれば、接触部先端は滑らないため、多角形車輪のような移動が可能である。従って、踊り場や若干の水平移動を伴う場所においても移動可能な構造である。以上述べた車輪を3輪以上用いれば、本研究の目的を満たす車輪型車両を実現可能である。

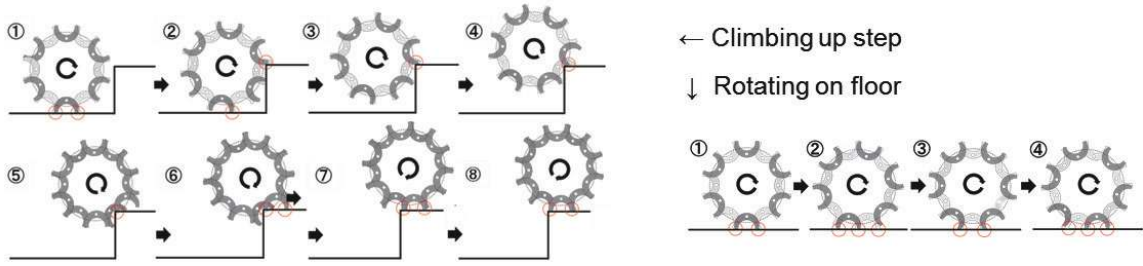


Fig. 5 Motions of climbing steps and running on flat plane

3 階段保持可能な車輪機構設計と車両型試験装置の開発

3.1 C字型爪機構を有した車輪の接触部形状

筆者らは提案する車輪の性能を決定する接触部形状を検討した. 爪型の接触部はストップで止まる構造であり, 車輪回転に応じて姿勢が変わるため, 段に対して転がり接触が適している. 歯車のように段鼻に噛み合うが, 設計にあたり簡単に製作できる円弧形状を選択した. 図 6(a), (b), (c), (d)にその概念図を示す.

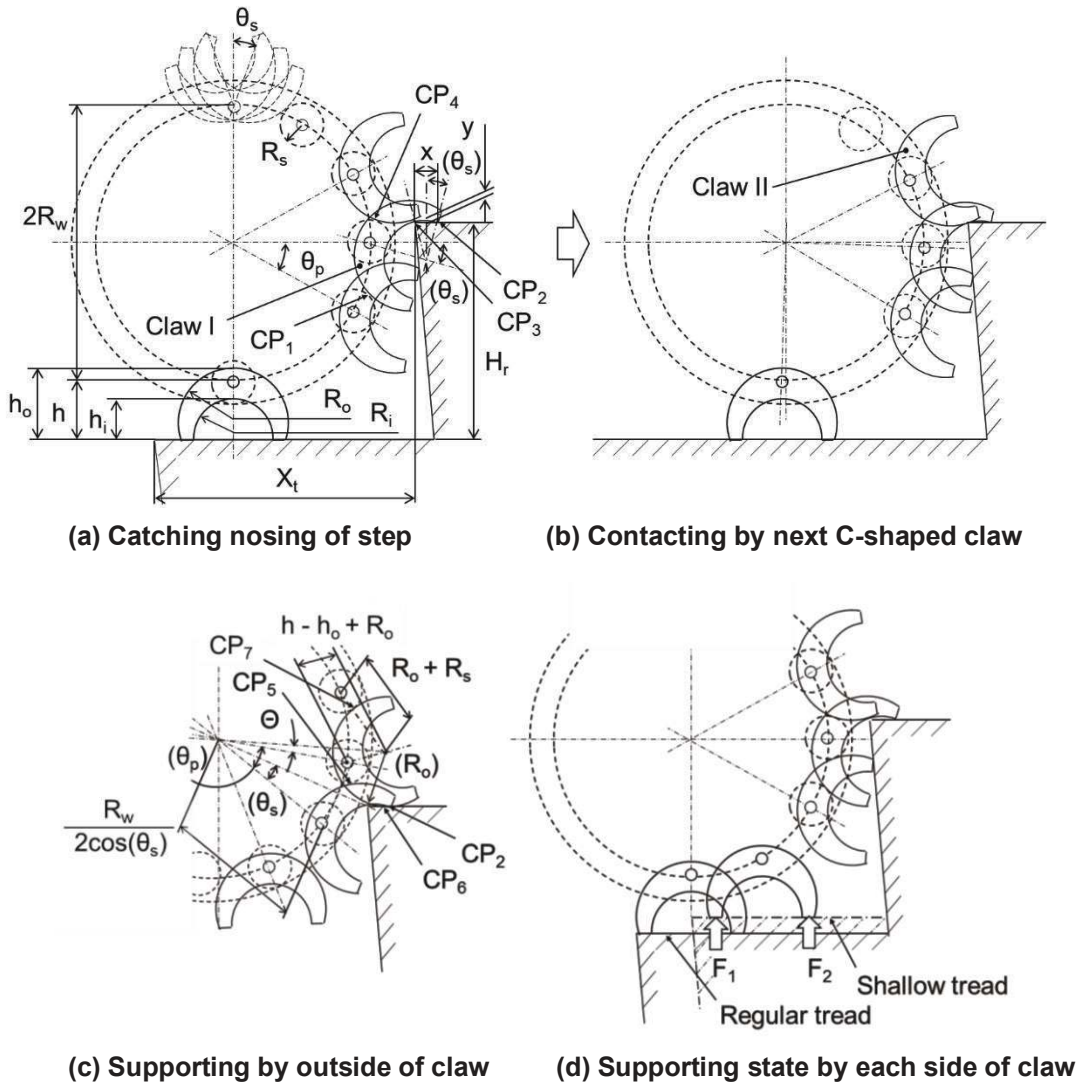


Fig. 6 Designed dimensions of proposed wheel mechanism

図中の寸法は、蹴上げ H_r 、踏面 X_t とし、C字型爪機構の内半径 R_i と移動面からの高さ h_i 、外半径 R_o と移動面からの高さ h_o および支持軸のピッチ円半径 R_w とピッチ角 θ_p とおき、これから接地面までの高さ h とする。また、ストップの半径を R_s とし、ストップで制限されたC字型爪機構の動作角を $2\theta_s$ とする。爪先端部が踏面に入り込む長さを x 、間隙の高さを y とおき、説明のために接触点を示す CP_i (i は番号)を各部に示した。

車輪動作は低速で、接地部は受動的に適応動作し、接触部の滑りは生じない条件から、幾何的な形状を基に設計した要件を次に述べる。C字型爪Iの接触部が CP_1 にてストップで支えられている状態を起点として、内側先端部 CP_2 が乗り越えられる高さが H_r となるよう設計する。なお、試作機においては12等分にC字型爪機構を配置し、 $\theta_p = 30^\circ$ ごとの配置となることから、平地では $\pm 15^\circ$ 以上揺動できる必要がある。従って、C字型爪機構の動作角 $\theta_s = 15^\circ$ となるようストップの直径 R_s を調整した。次に、支持軸が図のように 90° 回転した位置の時に先端部が入り込むよう R_i の形状を決定する。この長さ x は、 CP_1 および CP_2 で接触する弦の長さと同しく、式(1)ようになる。このとき、C字型爪IIが CP_4 にてストップに支えられ、間隙 y が生じるため、2章にて議論した図4(a), (b), (c)接触部の接線のなす角度は正となり、踏面に噛み合うような姿勢となる。

$$x = 2R_i \sin \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{h_i - R_i}{R_i} \right) \right\} = 2R_i \sin \theta_s \quad (1)$$

前章で述べたC字型爪機構の動作は、内側を使って鉤爪のように段鼻を捉え、次の爪の外側により、滑らかに登ることが求められる。車輪下部が踏面から離れて登り始めるとき、車輪の回転によって図6(c)のように、 CP_5 で支えられていた爪の次の爪が CP_6 で接触して切り替わり、さらに回転すると、 CP_7 で支えられ、爪機構の外側支持される動作となる。この一連の動作から、段差を上るための条件を考えると、図6(a)の初期状態で、確実に次の爪機構の外側が段に入り込む必要がある。この動作ができる条件を満たすように R_o の形状を含め、以下の式(2)を満たすように各値を調整しながら設計を行った。これは幾何的に求めているものであり、式が長いため、 θ については式(3)に示しておく。

$$H_r = h + R_w + \frac{\left\{ \sin(\theta) - \sqrt{R_o^2 + (h - h_o + R_o)^2} \right\}^2}{4 \sin \theta_p \cos(\theta_p + \theta_s)} \quad (2)$$

$$\theta = \left(\frac{\pi}{2} - \theta_s \right) - \cos^{-1} \left\{ \frac{\left(\frac{R_w}{2 \cos \theta_s} \right)^2 + (h - h_o + R_o)^2 - (R_o + R_s)^2}{\frac{R_w}{\cos \theta_s} (h - h_o + R_o)} \right\} - \cos^{-1} \frac{R_o}{\sqrt{R_o^2 + (h - h_o + R_o)^2}} \quad (3)$$

また、C字型爪機構は回転軸で支持されており、ストップに接触していないときは、モーメントは生成しないものの、図6(d)の通り、支持反力 F_1 と F_2 は均等となる。また、これら踏面からの反力は鉛直方向となるため、車輪軸を十分に静止できるトルクが生成できていれば、中空タイヤのように摩擦に依存する車輪と異なり、車輪軸が踏面から外に出る寸法条件であっても、安定して支持できることが可能である。

実験機の開発に際し、踏面240mm、蹴上200mmを標準的な条件として設計したが、踏面は最低 $X_t = 210$ mm、蹴上は最大 $H_r = 250$ mmまで対応可能である。一方、図6(d)に示したような車軸が踏面から外に出る $X_t = 180$ mm程度となる奥行き浅い踏面での接地も可能であるが、対応できる蹴上げは $H_r = 180$ mmに減少する。具体的な設計時は、3D CAD Creoを用いて形状モデルを作成し、移動面との干渉を確認しながら細部の寸法を調整・決定した。これらの要件から、車輪外径は $2R_w = \phi 370$ 、受動接触部の外周半径 $R_o = 60$ mm、内周半径 $R_i = 45$ mmに決定して実験装置を製作した。

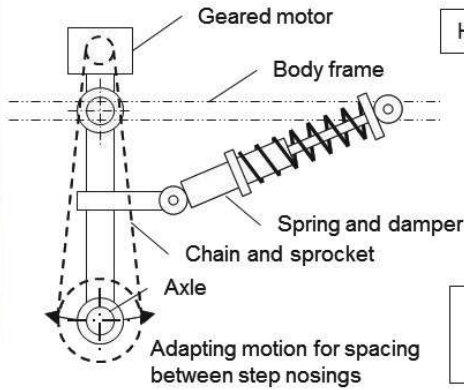
3.2 車軸間距離調整機構を有した車体設計と前後交互間歇駆動動作法の検討

提案する動作原理を検証するための3種類の車体を設計・製作した。第1試作機は、提案する車輪の機能を確認するためのもので、階段の段鼻間に適応できるように、ばね・ダンパを用いた車軸間距離調整機構を有し、第2試作機では、前後車輪の交互動作による安定した動作の確認のための車体の折れ曲がり自由度を付与したものである。第3試作機では、第2試作機の動作原理を活用した重量物搬送動作を目的とし、車体に受動伸縮自由度を付与したものを開発した。いずれも実験に用いる階段の中間にある1.2mの踊り場に収まるよう、車軸間距離等の寸法を設計し、車輪は同じものを用いた。

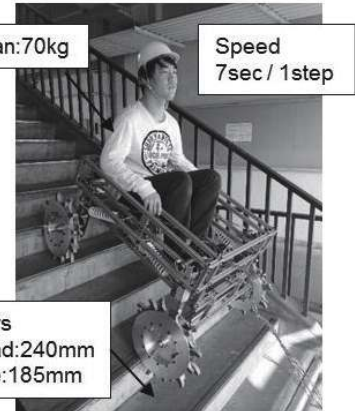


L1100mm×W850mm×H580mm, 68kg
Wheel base (620~)780mm
DC motor 63W×4, Gear ratio 6192:1

(a) Experimental equipment

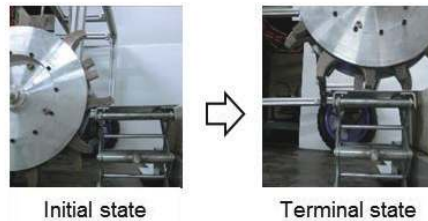
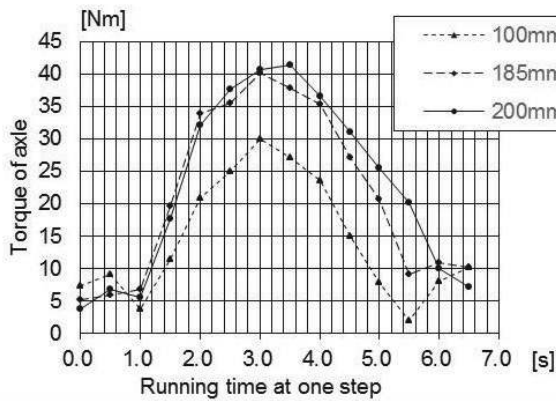


(b) Adaptation mechanism



(c) Example of experiments

Fig. 7 First prototype of vehicle



Riser (mm)	100	185	200
Measured current (A)	5.19	6.56	6.72
Torque calculated by current (Nm)	30.0	40.2	41.3
Simulated torque (Nm)	19.6	36.3	39.2

Fig. 8 Experiment on stairs and logged torque at one step

図7(a)に示した第1試作機は、人間が乗れる寸法を検討して設計したものである。踏面が $X_t = 180\text{mm}$ から 240mm 、蹴上げが $H_r = 130\text{mm}$ から 180mm 程度の範囲で存在することから、多様な段鼻間距離へ適応可能するため、車軸間距離が 46mm 以上変化できる必要があり、平地から階段、踊り場の通過、階段から平地などの移り変わりの場合、前・後輪は各々異なる動作の状態となる。この動作に関する制御を簡便にするため、図7(b)に示した前後輪に対し、車軸間距離を調整するばね・ダンパ受動自由度を持った機構を導入した。前後に揺動する構造であり、ばね・ダンパには入手性の良い原動機付自転車の部品（グロンドマン製、ホワイトトルネード280mmモンキー/ゴリラ用）を利用して製作した。後に第2試作機について議論するが、実験時に接地状態により後輪側のばねが大きく縮み、重心と階段下側の車輪接地点の水平面に投影した距離が

減少して安定余裕が減少する問題が発生した。階段下側の車輪の登り側への動作を制限することで、重心と接地点の間隔が狭まらないよう対策したことにより、**図 7(c)**に示した動作実験では 70kg の健常者が重心を階段上側に寄せるように乗ることで、階段の登りと下りをそれぞれ実現できた。

また、車輪自体の基礎特性を知るため、段差を乗り越える際のトルクを電流から計測できるかについて確認した。**図 8**のような高さを変化可能な台を用いて段を昇らせた時のトルクのグラフと実験の様子を示す。車輪直径 $2R_w = \phi 370$ で車体重量を 4 等分した 1 輪あたりの荷重 181.5N が加わる条件を用い、車輪が昇りきるまで 7s を要す動作を実行し、段に噛み合っている段階での最大電流値と算出したトルクと比較した。この実験結果より、段が低い場合では計測値と計算値が異なるが、階段程度の場合は 5~10% の誤差で概ね電流値に近い傾向を示しており、電流値を用いたトルク計測が可能であることが確認できた。後に示していく各階段移動試験では、この速度を基にして動作を行った。第 1 試作機の課題である前後車輪の爪が掛かる順番により車体姿勢が変化し、重心が大きく移動する問題を回避し、重心と接地点の余裕を確保するために、**図 9(a)**に示した第 2 試作機は、前後どちらかの車輪は常に止まり、他方のみ動かす交互間歇駆動という簡潔な動作と折りたたみ関節を付与した簡潔な機構構成で移動を試みたものである。

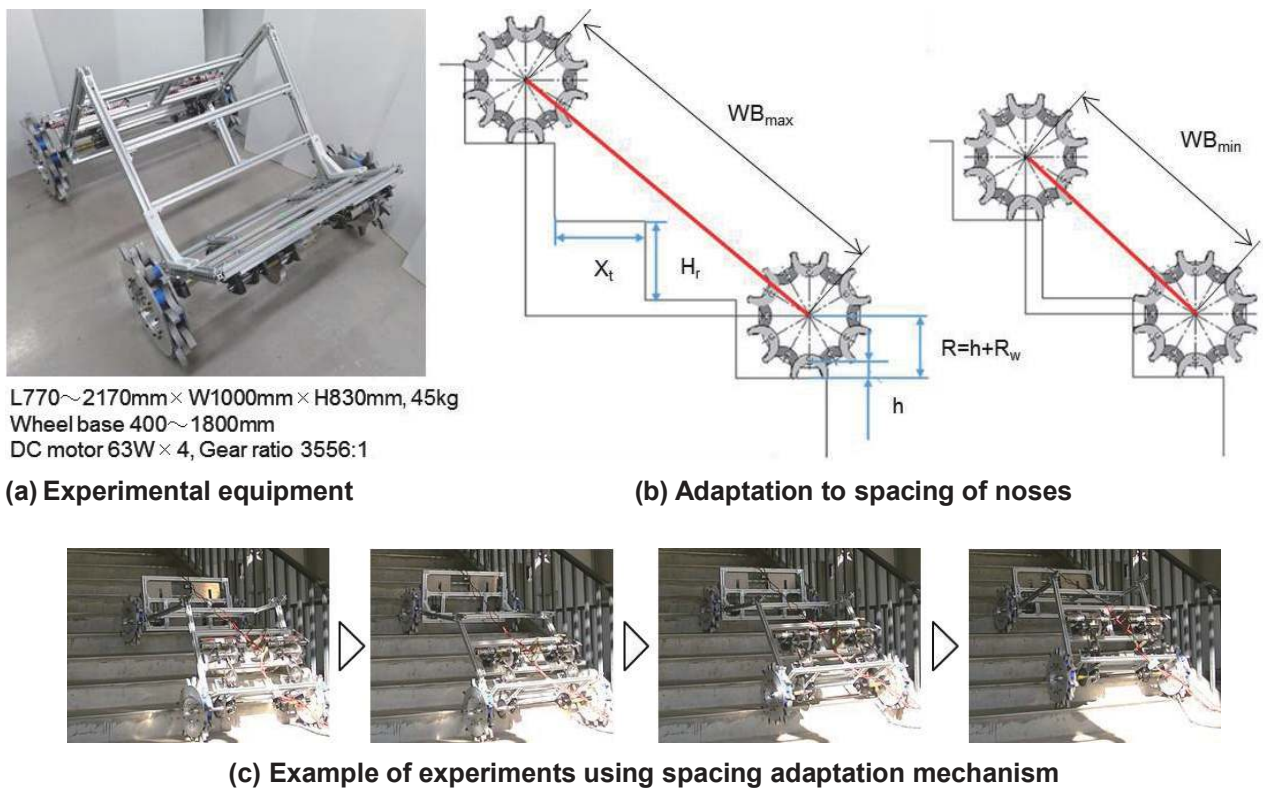


Fig. 9 Second prototype of vehicle

機体設計にあたり、車軸間距離の伸縮長について検討した。**図 9(b)**に示した通り、車軸間距離を WB とおき、前後車輪の乗る階段の段数を n とし、他の変数は**図 6**同様である。最大長は式(4)、最小長は式(5)となり、第 2 試作機、第 3 試作機の設計に利用した。

$$WB_{max} = \sqrt{\{(n+1)X_t - R - R_o\}^2 + (nH_r)^2} \tag{4}$$

$$WB_{min} = \sqrt{\{(n-2)X_t + R + R_o\}^2 + \{(n-1)H_r\}^2} \tag{5}$$

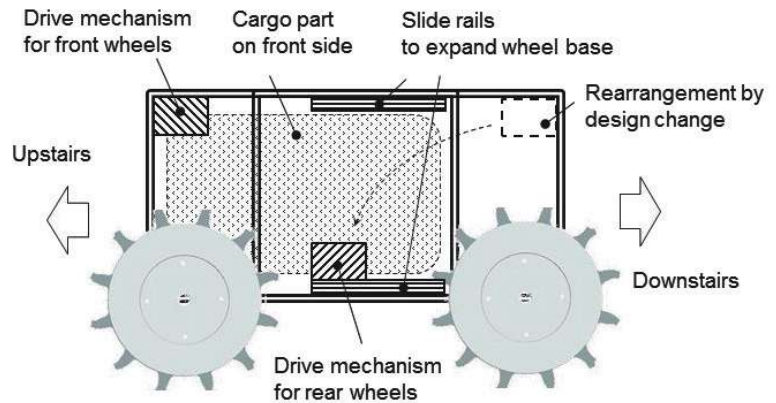
第2試作機を用いて交互間歇駆動による前後輪の交互昇降動作を試みる実験の結果、**図9(c)**に示すように階段を安定して走行でき、12段、踊り場1.2m、12段から成る階段において踏み外し等の不安定な挙動は観察されず、車軸間距離調整機構に基づく前後交互間歇駆動動作が有効に機能することを確認できた。

そこで**図10(a)**に示す第3試作機では、限られた出力の動力で、重量物をさらに安定して搬送することを考慮し、前後どちらかの車輪を交互に止めて足場として機能させ、他方で昇降させる間歇駆動法が有効と考え、**図10(b)**に示す車体重量と70kg程度の人間に相当する荷重を想定したスライドレールを車体に配置したものを設計した。



L1300~1650mm×W1000mm×H830mm, 85kg
Wheel base 930~1280mm
DC motor 63W×4, Gear ratio 8357:1

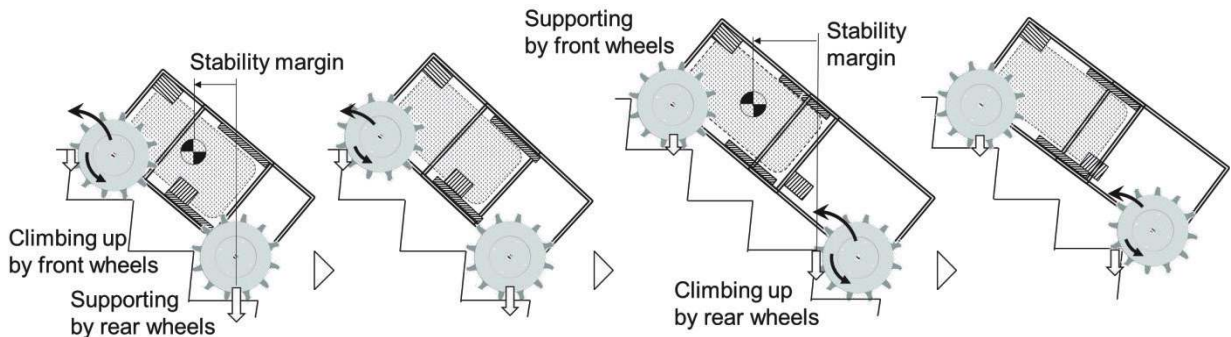
(a) Experimental equipment



(b) Mechanical structure with investigated mass properties

Fig. 10 Third (final) prototype of proposed vehicle with C-shaped claws and expandable body

伸縮ストロークを決定するには、**図8**で示した実験条件より踏面 $X_t = 240\text{mm}$ 、蹴上げ $H_r = 200\text{mm}$ の場合であれば、式(4)と式(5)より段鼻間の間隔は313mmであるので、若干の余裕を考慮し350mm程度と決めて設計した。**図11(a), (b), (c), (d)**に示す傾斜面を走行することを想定して車体の重心位置を検討し、車体方向の階上、階下を決めて、**図10(b)**のように質量の嵩む駆動系を当初の前後対称配置から階上の側に寄せて配置しなおし、搬送対象は階上の側の車体に積載する構造として車体を設計した。これは**図11(a)**のように、車軸間距離が最も短くても、階下側の車輪は踏面で支持されているため、重心の移動面への投影点は接地点から離れており、安定余裕を維持できる動作方法である。前後同時に駆動による第1試作機で、この余裕が著しく縮小していた問題を改善するものである。



(a) Shortened wheel base (b) Driving front wheels (c) Expanded wheel base (d) Driving rear wheels

Fig. 11 Telescopic motion by intermittent alternating wheel drive

いずれの実験機も全く同じ DC モータを利用した。第 3 試作機は車体重量が 84kg であるが、前後交互の間歇運転であるため、68kg の第 1 試作機における電源の負担は合計値のピークで 21A あったものが、13A となり、車体の間歇伸縮動作を用いることによって 6 割程度に抑える効果を得た。

4 基本動作実験

4.1 C 字型爪機構を有する車輪の動作

本研究にて提案している車輪の動作に関する連続写真を **図 12** に示す。

3.2 節で示した実験の通り、踏面 $X_t = 240\text{mm}$ 、蹴上げ $H_r = 180\text{mm}$ の階段において 1 段を 7s 以上掛けて登る動作であることから、C 字型爪機構は内側の円弧で段鼻を捉え、階段にまっすぐ進入すれば、左右輪同時に噛み合い、その後も踏み外すことなく登ることができた。また、外側の円弧で接触し、滑らかに転動して、滑落なく登ることを確認できた。

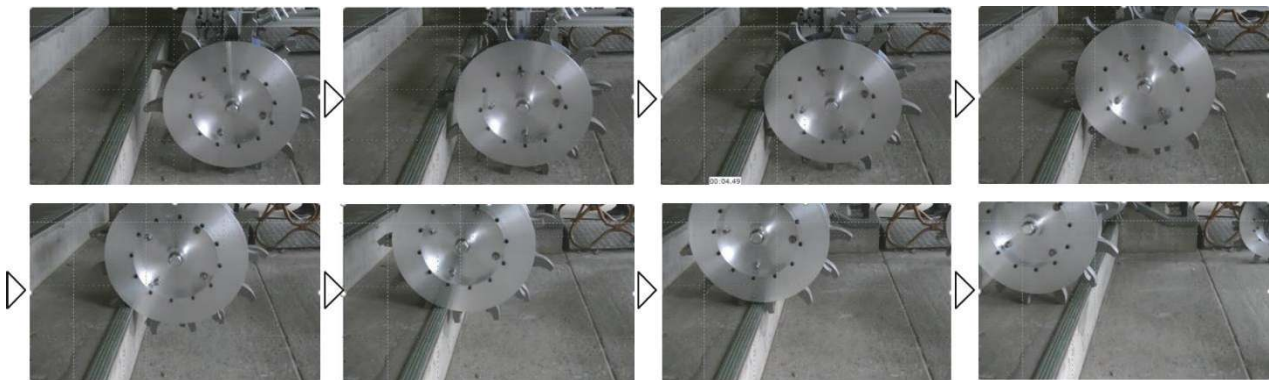


Fig. 12 Experiment of proposed wheel mechanism installed C-shaped claw mechanisms

4.2 階段移動動作試験

実験環境は、12 段、途中に 1.2m の踊り場、12 段の段があり、幅 2m の階段を用いて実験した。第 1 実験機は **図 7(c)** のように、第 2 実験機は **図 9(c)** のように、階段の昇り降りの走行が可能であった。すでに論じた通り、第 1 実験機では、前後車輪が同時に回転するため、階下側の車軸間距離調整機構の動作によって挙動が不安定になることを回避するために動作範囲を制限する対策を要する問題があった。そこで第 2 実験機では前章にて議論した前後車輪を交互に間歇駆動する動作法を試み、安定して登る可能性を得たため、第 3 試作機を開発した。 **図 13** に示したように、階段を登ることができた。

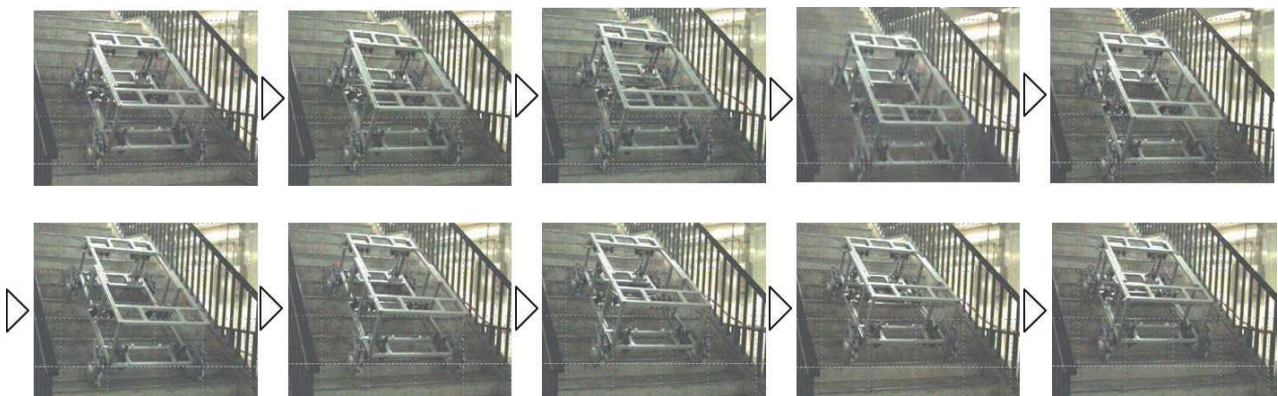


Fig. 13 Climbing up stairs using telescopic motion

一連の動作で滑落は起こらず、直進性についても7mの移動行程にて特に軌道修正は行っていないものの、第1実験機から第3実験機のいずれの機体でも誤差±120mmに収まっている。

7mに加えて車体全長分が階上に登りきるおよそ7.8から8.3mの移動行程で、第1実験機では245s（速度34.4mm/s）を要し、第2,3実験機では510sec（速度16.5mm/s）を要す。第2実験機は動作のみであり、第1,3実験機では70kgまでの可搬重量を確認した。なお、途中の1.2mの踊り場も通過することができ、**図14**に示したように、床から階段、階段から床への乗り移りも可能であることが確認できた。このように前後いずれかが床である場合、交互間歇駆動動作を用いず、前後とも同時駆動で昇降とも可能であることが分かった。また、**図15**に示したように、階段を降りることも可能であることを確認した。

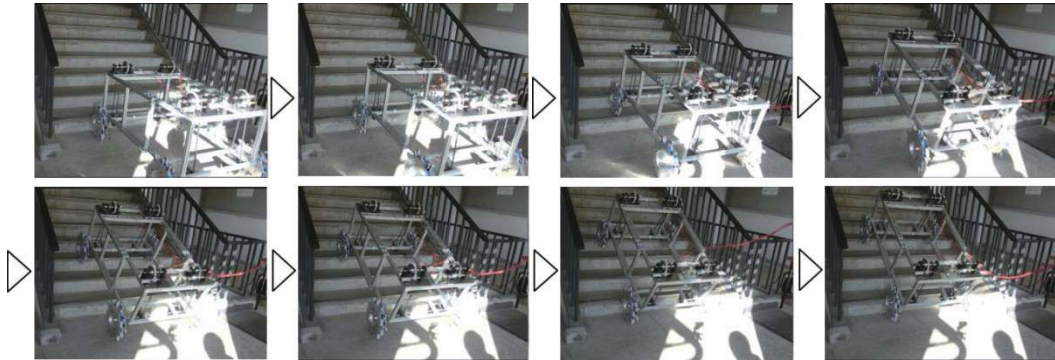


Fig. 14 Transfer between stairs and flat floor without telescopic motion

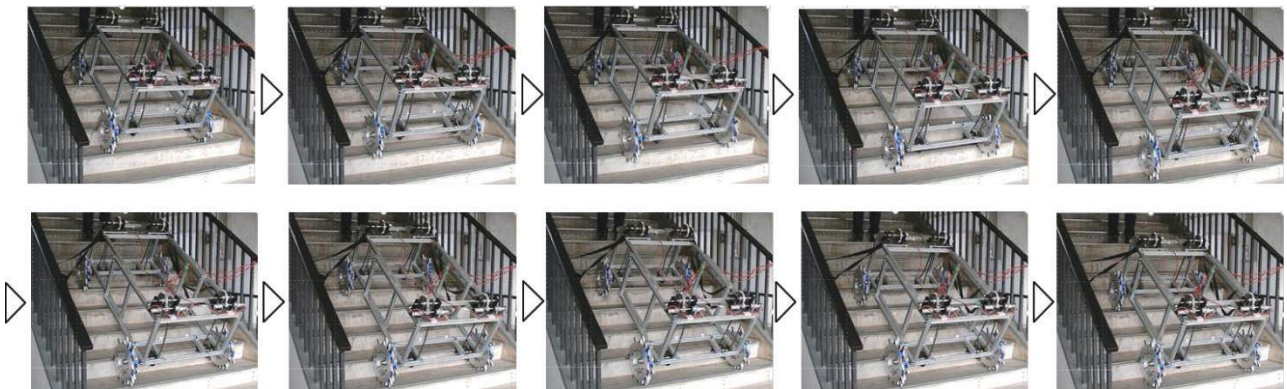


Fig. 15 Climbing down stairs using telescopic motion

5 結言

本研究では、人・重量物の移動・搬送において困難な場所となる階段を移動できる機械の開発を目標として取り組んできた。我々は、既存の建物にリフト等の付帯設備を追加することの実質的な難しさについて着目し、独立した装置本体を用いることのみによって階段を安定移動する手段の確立を目的とし、段から滑落しない低速かつ確実な移動動作の実現を目指してきた。本稿では、まず階段昇降に特化した階段の段鼻に適応可能な接地機構としてC字型爪機構を提案し、これらを車輪外周に配置した車輪の動作原理を検討してその設計法を論じてきた。これに加え、提案した車輪の特性を活用すべく、車軸間距離を調整する受動機構を有した車両構成法を3種類考案してきた。これらの機体を用いた実験より、前後車輪を交互に回転・停止させる間歇伸縮動作を用いることで、階段を昇降する動作における機体挙動を安定させ、電力のピーク値を抑えた動作ができ、より有効な移動方法であることを本稿にて報告した。

参考文献

- 1) 加藤一郎：特集 高齢化社会支援ロボティクス リリスボットー生活支援ロボットの構想，日本ロボット学会誌，11，5(1993)，614-617.
- 2) 勝平純司，山本澄子，丸山仁司，関川伸哉：階段およびスロープ昇降時の関節モーメントの分析，バイオメカニズム，17(2004)，99-109.
- 3) 相馬正之，宮崎純弥，山口和之，舟見敬成，川間健之介：段差昇段時における段差と加齢が母指・段鼻間距離に与える影響について，理学療法科学，24，4(2009)，529-533.
- 4) 安心院朗子，徳田克己，水野智美：歩行補助車を使用している高齢者の外出状況と交通上の課題，IATSS review，35，2(2010)，77-84.
- 5) 橋野賢：クローラ型階段昇降機の開発，バイオメカニズム，14(1998)，237-247.
- 6) 田尻要，伊達志日流：公共交通施設におけるバリアフリー化を目的とした移動連続性に関する調査，都市計画論文集，33(1998)，205-210.
- 7) 隅田康明，松永勝也，合志和晃，志堂寺和則：手動車いすの移動経路情報にもとづいたバリアフリーマップ構築法，電子情報通信学会技術研究報告，IEICE technical report，14，512(2015)，51-56.
- 8) 山田稔，澤村里志：交通バリアフリー法基本構想策定における市民参加の実態と行政担当者への理解促進効果，土木計画学研究・論文集，23(2006)，1057-1064.
- 9) 広瀬茂男，米田完：4足歩行機械の静動融合歩容とその連続軌道生成，日本ロボット学会誌，9，3(1991)，267-275.
- 10) 橋本健二，菅原雄介，川瀬正幹，林昭宏，田中智明，太田章博，高西淳夫：着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御による人間搭乗型2足歩行ロボットの屋外歩行の実現，日本ロボット学会誌，25，6(2007)，851-859.
- 11) 岩本太郎，山本広志，天城滋夫：地形適応機能を備えた実建屋内移動機構の開発，日本ロボット学会誌，6，1(1988)，67-74.
- 12) Tao, W., Yi, O. and Hutian, F.: Research on Dynamics and Stability in the Stairs-climbing of a Tracked Mobile Robot., International Journal of Advanced Robotics Systems, 9, 4(2012), 146.
- 13) 米田完，太田祐介，広瀬茂男：粉体の変形特性を利用したハイグリップクローラの開発，日本ロボット学会誌，15，8(1997)，1188-1193.
- 14) 広瀬茂男，宇佐稔，大森直陸，青木実仁，鶴澤直克：対地適応型4輪走行車 HELIOS-III の開発，第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集，(1991)，305-306.
- 15) 小柳栄次，油田信一：段差を踏破する車輪型移動ロボット，日本機械学会論文集 C 編，68，666(2002)，491-500.
- 16) Uchida, Y., Furuichi, K., Hirose, S.: Consideration of stair-climbing performance of a six-wheeled off-road vehicle 'HELIOS-V', Proceedings of 2nd International Conference on Climbing and Walking Robots, (1999), 383-391.
- 17) 内田康之，古市和也，広瀬茂男：車輪の凹凸地踏破性能評価と HS 車輪の開発，日本ロボット学会誌，18，5(2000)，743-751.
- 18) 勝平純司，山本澄子，関川伸哉，丸山仁司，長澤夏子，渡辺仁史：階段の形状と手すりの使用が階段昇降時の腰部モーメントに及ぼす影響，バイオメカニズム学会誌，29，2(2005)，95-104.
- 19) 守田伸六，田中孝，布野精治：砂丘地における農用低圧タイヤについて，農業機械学会誌，34，2(1972)，131-137.