大阪公立大学
Osaka Metropolitan University
学術情報リポジトリ

階段昇降用可変車輪の開発

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-12-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 新垣, 有斗, 大村, 一磨, 里中, 直樹 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00007559

階段昇降用可変車輪の開発

新垣有斗*, 大村一磨**, 里中直樹***

Development of Transformable Wheel for Climbing Stairway

Yuto SHINGAKI*, Kazuma OMURA** and Naoki SATONAKA***

ABSTRACT

Recently, portable stairlifts are studied to help wheelchair users climbing up and down stairs. However, those stairlifts have problems that they are incompetent to drive on flat grounds and the vertical movement of stairlifts is large. In this study, we aim to develop the transformable wheel for climbing stairway as the premise application of the wheelchairs. The transformable wheel for climbing stairway moves on flat grounds with the wheel form, and climb up and down stairs with the form like stars by transforming sector wheels which are divided equally. Firstly, we analyzed gear generating forms based on cross-sectional shapes of stairways. Secondly, we designed and manufactured the actual transformable wheels and experimental device with them which can ride on and drive it by himself. Thirdly, we measured the operating force by a driver when the driver climbed up the stairs with the experimental device. Finally we confirmed that the transformable wheel can climb up stairs only with human power from the experimental results.

Key Words: stairway, stairlift, transformable wheel, human power, operating force

1. 緒論

脚が不自由な人が高所へ移動するための手段として,エレベータやエスカレータというような運搬機械が広く普及している. しかし,駅や公共施設の中には,これらが設置されていない場所もある. このような場所では,車椅子による階段昇降は, いまだに介助者の手助けによって行わざるを得ない. 厚生労働省の統計資料[1]によると,平成 24 年度の国内の下肢障碍者数は,約 1,760 千人であり,全身体障碍者(約 3,483 千人)のうち,50.5%を占めている. 高齢化の影響もあり,車椅子利用者はこれからも増えていくと考えられている.

このような社会的背景から, 可搬型の階段昇降機について数々の研究が行われている. 提案されている階段昇降機構には, 多輪型,羽根形車輪型,クローラ型や車輪-脚併用型などがある[2]~[4]が, その多くは不整地用の機構をそのまま階段に流用しており, 平地における走行性能が不十分であることや, 所要動力が大きい, 機体のピッチング変動が大きいといった問題がある.

2013 年 8 月 19 日 受理

* 総合工学システム専攻 機械工学コース (Advanced Course, Dept. of Technological Systems : Mechanical Eng. Course)

** 総合工学システム学科 システムデザインコース 2010 年度 卒業生 (Graduate of Dept. of Technological Systems : System Design Course)

*** 総合工学システム学科 システムデザインコース(Dept. of Technological Systems : System Design and Production Course)

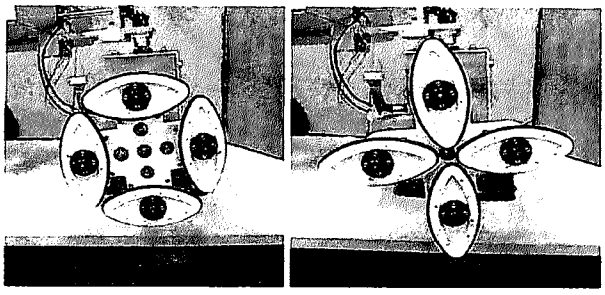
そこで本研究は, 車椅子への応用を前提として階段昇降用可変車輪の開発を目的とする. この階段昇降用可変車輪は, 平地走行時は車輪状態であるが, 階段昇降時は等分割された車輪を星型に展開することにより階段昇降を行う. 本機構は, 平地走行と階段昇降の両方を「ころがり運動」により移動することが特長であり, 走行抵抗が小さく移動効率を向上できるものと考えられる. 本機構を応用することにより, これまで存在しなかった, 人力でも階段昇降が行える車椅子の実現の可能性があるものと期待できる.

なお, 本稿では, 階段昇降用可変車輪と, 実際に搭乗者が操作可能な車椅子型実験装置を設計製作することを目的とする. また, 搭乗者自身の操作力を測定し, 本機構により実際に人力による階段昇降が可能かどうかを考察する.

2. 従来の階差乗越用可変車輪

車輪形状を展開することにより階差乗越を行う機構は, 従来からも研究されている. その代表的なものとして, 図 1 に日本大学が開発した階差乗越用展開構造車輪[5]を示す.

この車輪は, 平地走行時は(a)に示すように車輪形状で走行し, 階差乗越時は(b)に示すように車輪を変形させることで, 段上に楕円形状の分割車輪を引っ掛けな



(a)平地走行時　　(b)階差乗越時

図1　階差乗越用展開構造車輪[6]

がら昇降する．この点において，本機構は，本研究と同様のコンセプトといえよう．

しかし，分割車輪を引っ掛けながら階差乗越を行うことは，基本的には脚-車輪併用型機構と同様の機能であると考えられる．したがって，階段昇降時には機体のピッチング変動が大きくなるとともに，大きな所要動力を必要になると考えられる．そのため，本機構は，無人型移動ロボットを指向しているものと考えられる．

3.　本研究の階段昇降用可変車輪

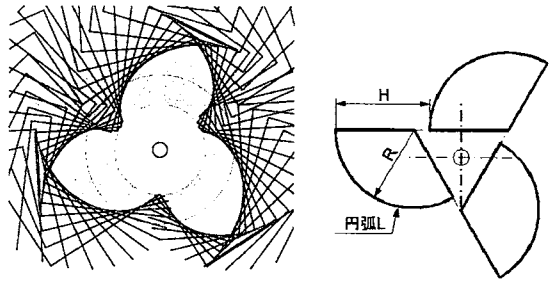
本研究が指向する可変車輪は，車椅子で人力による階段昇降を実現することを目的としている．従来の階段昇降用車椅子は，いずれもモータ動力を搭載したものになっているが，結果的に質量が大きくかつ所要動力が大きなものになっている．車椅子利用者の中には，上肢健常者で人力により階段昇降を行いたいという要望も多い．本研究は，その要望に応えるものである．

3.1　階段形状による可変車輪の創成加工形状

人力による階段昇降を実現するために必要な要件は，所要動力が小さいことと昇降時の機体のピッチング変動が少ないことである．これらを実現するために，歯車の創成加工原理を応用した．

歯車の創成加工は，ラックとピニオンの関係に相当する．ピニオンがラックとかみ合いながら回転移動するとき，ラックの基準ピッチ線に対してピニオンの中心軸が上下に変動しない．このことから，ラックを階段，ピニオンを可変車輪に置き換えて創成加工を行うことにより，階段に対して中心軸の上下変動の少ない可変車輪形状を創成できると考えた．

図2に階段形状による可変車輪形状の創成加工形状解析の結果を示す．(a)は得られた創成加工形状である．なお，解析にあたり，可変車輪の分割数は3とした．可変車輪の階段との接触面は，歯車と同様，インボリュート曲線となる．この曲線を，3等分割した扇形分割車輪の円弧として近似することを考えた．(b)はその近似円弧形状である．可変車輪を，車輪形状から(b)の形状に展開するためには，それぞれの扇形分割車輪を分割面をスライドしながら，お互いにずらせばよいことがわかった．



(a)創成加工形状　　(b)近似円弧形状

図2　階段形状による可変車輪形状の創成加工形状

このとき，分割車輪の展開高さ H を階段ステップ高さ，分割車輪の円弧長 L を階段ステップ奥行き W に等しくなるように設計すれば，展開形状は階段上を滑ることなく，ころがり運動を行うことにより，階段昇降を行わせることが可能になる．車輪の半径を R とすれば，(1)式によりもとめられる．

$$R = \frac{3L}{2\pi} = \frac{3W}{2\pi} \qquad (1)$$

すなわち，本機構は形状を可変することによって，平地走行と階段昇降の両方を，走行抵抗が小さく，移動時のエネルギ効率が高いころがり運動で移動することができる．このことから所要動力を小さくすることができ，人力でも階段昇降が行える車椅子を実現できるものと期待できる．

また，(b)の近似円弧形状は，(a)の創成加工形状の近似になっていることから，階段昇降時の車輪中心軸の変動量を小さくすることができるものと考えられる．

3.2　可変車輪の理論解析

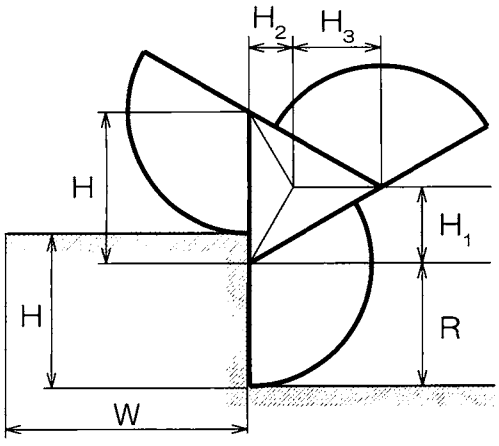
本研究の可変車輪の各種特性を明らかにするために，理論解析を行う．

3.2.1　車輪中心軸の運動軌跡

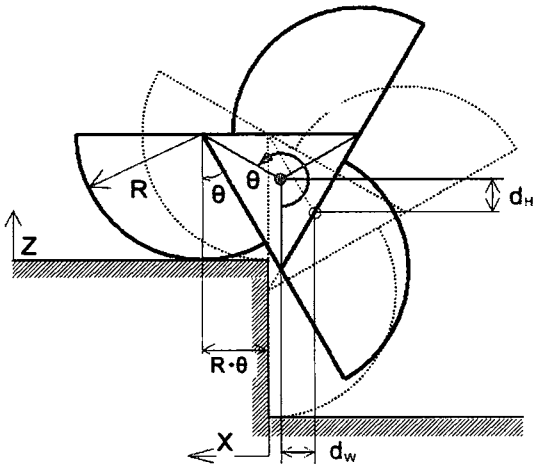
可変車輪が階段昇降を行った際の挙動を明らかにするために，車輪中心軸の運動軌跡をもとめた．図3に，その形状モデルを示す．

(a)は可変車輪の各部寸法を示す．分割車輪が展開状態のとき，中心部に一辺が車輪の展開高さ H に等しい正三角形ができることから，(a)の各部寸法 H_1, H_2, H_3 は(2)式により求められる．

$$H_1 = \frac{1}{2}H, \quad H_2 = \frac{\sqrt{3}}{6}H, \quad H_3 = \frac{\sqrt{3}}{3}H \qquad (2)$$



(a)可変車輪の各部寸法



(b)階段昇降時の移動量

図 3 可変車輪中心軸の運動軌跡

(a)の状態を階段昇降開始位置として考え，この状態から(b)のように車輪が θ だけ回転したものとする．このとき，車輪中心軸の水平方向移動量 d_W は(3)式，鉛直方向移動量 d_H は(4)式で，それぞれ求められる．

$$d_W = R\theta + H_2 - H_3 \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \tag{3}$$

$$d_H = H_1 - H_3 \cdot \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \tag{4}$$

(3),(4)式の結果をもとに，車輪が階段を一段昇ったときの車輪中心軸の軌跡を図 5 に示す．

もし，展開状態が創成形状であれば，軌跡は理想的な軌跡である階段傾斜線(H/W)に一致し，変動は生じない．しかし，実際は円弧形状で近似していることから，軌跡は階段昇降開始・終了位置では一致するものの，途中では階段傾斜線からはずれることになる．しかしながら，たとえば階段寸法を W=300[mm], H=180[mm]としたとき，最大変位量は 28[mm]となり，車輪中心軸の変動は比較的小さいといえる．

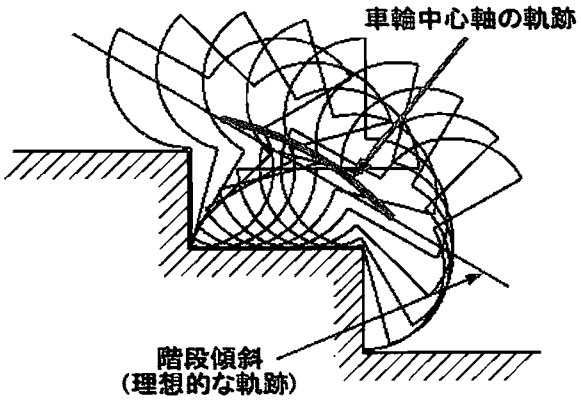


図 4 車輪中心軸の運動軌跡

3.2.2 階段昇降トルク

本可変車輪の階段昇降トルクをもとめる．図 5 に，その力学系モデルを示す．

機体および搭乗者の重量による車輪接地面反力を P [N]，昇降トルクを T [Nm]とすると，Tは(5)式で求めることができる．

$$T = Pr = \frac{1}{\sqrt{3}} PH \cos\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \tag{5}$$

昇降トルクの最大値 T_{max} は，θ=π/3[rad]のとき，すなわち階段ステップ上 $W/2$ の位置で生じる．

$$T_{max} = \frac{PH}{\sqrt{3}} \tag{6}$$

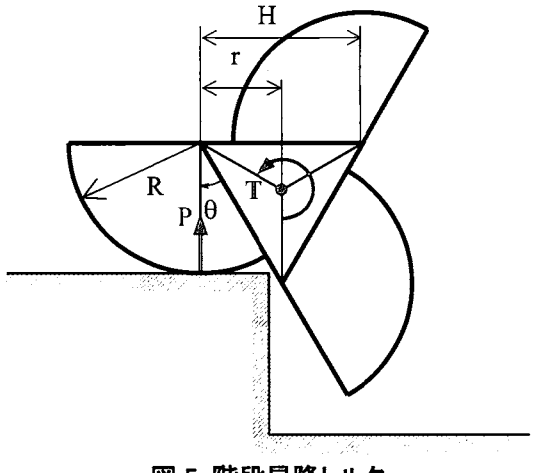


図 5 階段昇降トルク

なお，実際には平地走行時と同様に，これに車輪接地面のころがり摩擦による走行抵抗トルクが加わる．

4. 階段昇降用可変車輪の設計

以上の理論解析結果をもとに設計した階段昇降用可変車輪の構造および機構を図 6 に，その仕様を表 1 に示す．

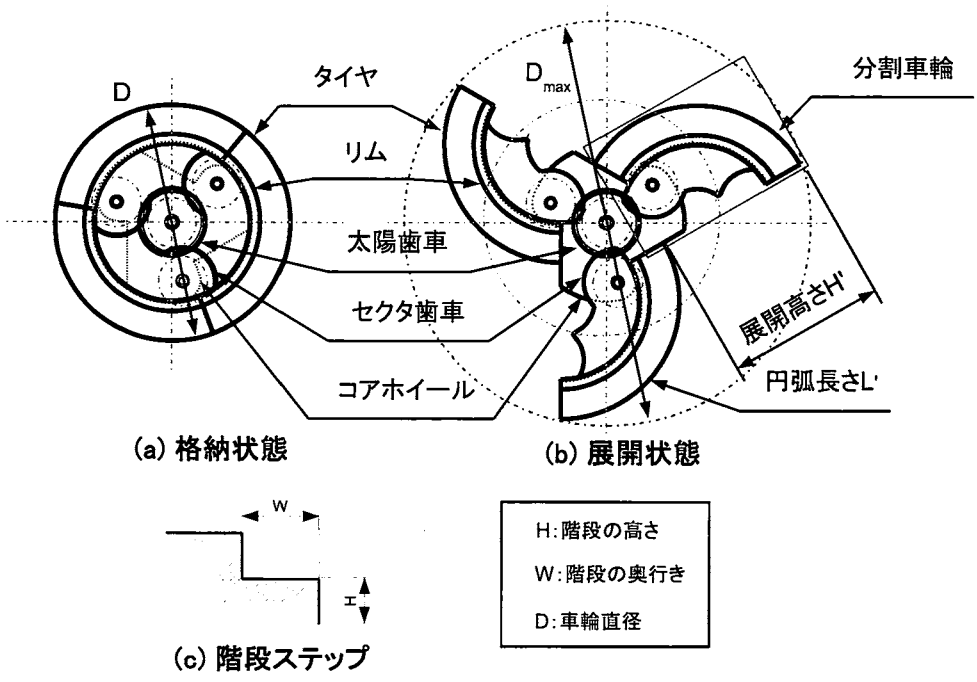


図6 階段昇降用可変車輪の構造および機構

表1 可変車輪の仕様

項目	仕様
階段の奥行き W	305[mm]
階段の高さ H	178[mm]
円弧長さ L'	320[mm]
展開高さ H'	190[mm]
車輪直径 D	304.8[mm]
車輪幅 B	44[mm]
車輪分割数 N	3 個
展開時最大直径 D_{max}	488.5[mm]
材質	鉄鋼および アルミニウム合金など

本可変車輪は，3等分割された車輪の1つを分割車輪と呼び，それぞれの分割車輪にはセクタ歯車が取り付けられている．セクタ歯車は車輪中心軸にある太陽歯車と噛み合っており，太陽歯車を回転させることで可変車輪の展開・収納の可変動作を行う．太陽歯車は，3 つのセクタ歯車を同期して可変させなければならないため，歯数は3の倍数にしなければならない．

本可変車輪が適合する階段寸法は，大阪府立大学工業高等専門学校(以下，本校)一般教養棟および専門棟の階段寸法の平均を採用した．これは，人間工学的に適切な階段寸法にほぼ一致している[6]．

また，本可変車輪を実装した車椅子型実験装置において，搭乗者の階段昇降時および平地走行時の乗り心地や安定性などの走行性能を考慮して，既製品の車椅子と同様にタイヤとリムを可変車輪外枠に取り付けた．なお，タイヤは3分割して使用するため，通常のゴムチューブタイヤは使用できない．そこで，子供用バイクで使用されているEVA製ノーパンクソリッドタイヤを使用することにした．また，タイヤおよびリムの寸法は，(1)式の結果より，12インチのものがほぼ適合した．

車輪展開高さ H' については，階段昇降時に搭乗者および実験装置の機体の荷重によりタイヤ部分がへこみ，車輪全体がわずかに沈み込むことにより，実際は小さくなると考えた．そこで，タイヤの変形量を12[mm]と仮定して，H' は階段ステップ高さ H よりも大きめに設定し，190[mm]とした．同様に，円弧長さ L' についても，車輪のへこみを考慮して，標準階段の奥行き L よりも大きめに設定してある．

5. 実験装置

設計製作した可変車輪が，実際に人力により階段昇降が可能かを明らかにするために，搭乗者が操作可能な車椅子型実験装置を設計製作する．実験装置の構造および機構を図7に，その仕様を表2に示す．

本可変車輪を使用した車椅子は，本来は平地走行と階段昇降の両方を移動できるが，今回の実験装置

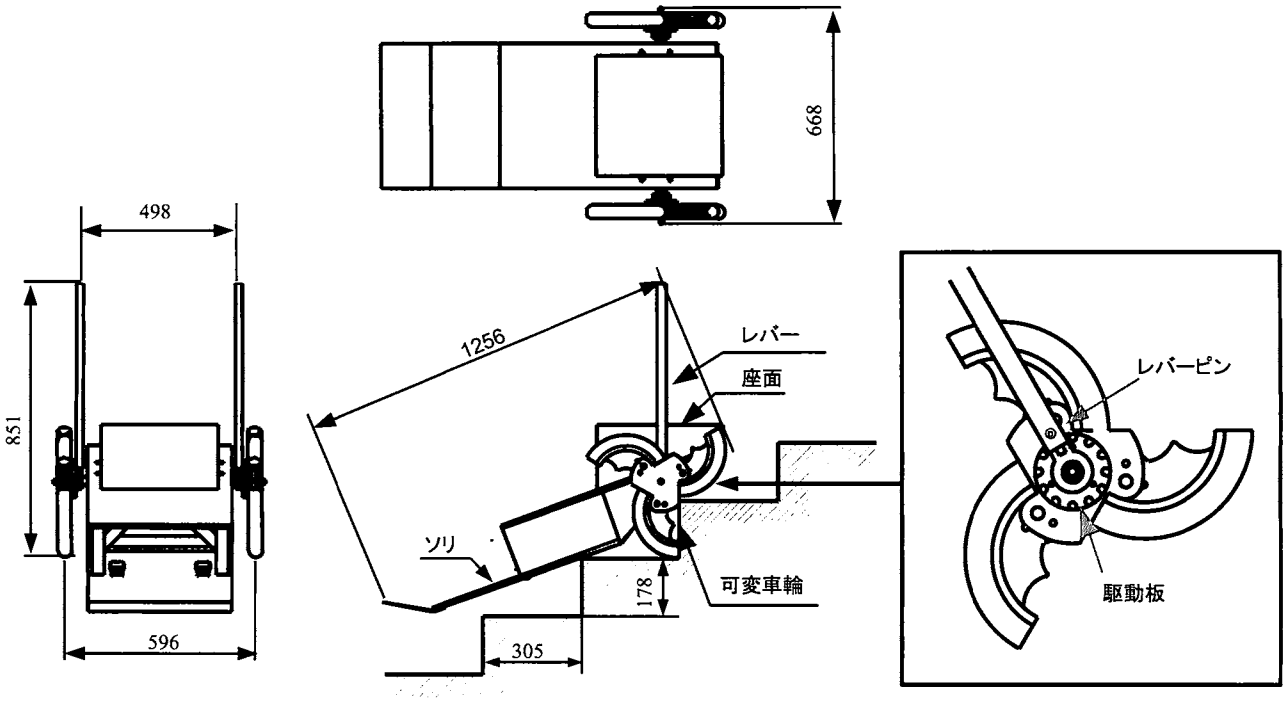


図 7 車椅子型実験装置の構造および機構

表 2 実験装置の仕様

項目	仕様
駆動方式	レバー入力による車輪の駆動
最大高さ	851[mm]
最大幅	668[mm]
最大長さ	1256[mm]
質量	27.6[kg]
搭乗可能人数	1 人

は，階段昇降時の特性を明らかにするために，構造は階段昇降時の状態に固定した．そのため，階段昇降時には機体が傾くが，座面は階段ステップ面に対して水平になるように設計した．しかし，実用性を考慮すると，将来は平地走行時と階段昇降時にかかわらず，座面を水平保持する機構が必要である．

実験装置の平地走行時の進行方向は左方向であるが，階段上昇時の方向は右方向，すなわち，搭乗者から見てバックしながら階段を上ることになる．このようにした理由は，搭乗者が階段下方に背を向けて階段を昇ると，恐怖感が生まれるという心理的要因が挙げられる．したがって，搭乗者が階段ステップ面に座るような感覚で操縦できるようにした．このとき，座面を可変車輪軸の直上になるように配置しておけば，脚は自然に階段下側に向くようになるとともに，搭乗者重量を直接可変車輪で支持することができるようになる．

また，本実験装置では，後輪に可変車輪を配置し，前輪部分は簡易形状のソリで代用することとした．本来であれば，前輪を配置するべきであるが，今回の階段昇降実験においては，可変車輪の特性を測定するにあたって，階段ステップ壁面に引っかかってかえって障害になると考えた．また，このソリは搭乗者の足置きを兼ねており，姿勢の安定をはかる機能も持たせている． ただし，このままでは平地走行時に逆に走行抵抗となるため，将来は前輪機構の検討も必要である．

本実験装置は，搭乗者が左右の可変車輪に取り付けられたレバーを操作することによって，操縦を行う．可変車輪に取り付けられた駆動板に刻まれた等間隔の溝に，レバーを回転軸方向に押し付けながらレバーピンを引っかけて，あたかもボートを漕ぐように回転させると可変車輪が階段を昇る．なお，レバー内にはバネが内蔵されており，押し付け力を開放すると，レバーピンが駆動板の溝から外れるようになっている．

また，レバーの操作力を開放すると，現行ではブレーキ機構が内蔵されていないため，搭乗者および機体の自重により逆トルクが作用し，実験装置が階段から滑落してしまう．これを防止するため，可変車輪回転軸には，安全装置としてツメ車を利用したラチェット機構による逆回転防止機構を付加した．そのため，本実験装置は，階段上昇実験のみを行うものとした．階段下降時に比べて，上昇時は搭乗者および機体の自重が直接負荷になるため，人力による昇降の可否は階段上昇時の操作力を測定すれば判断できると考えた．

6. 実機

本研究で製作した階段昇降用可変車輪の実機を図 8, 実験装置の実機を図 9 に示す. なお, 撮影場所は本校の時計塔前階段である.

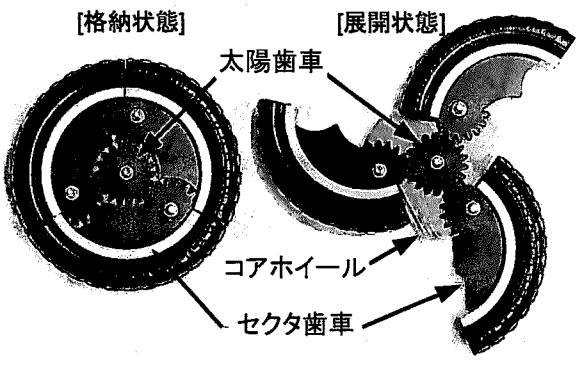


図 8 階段昇降用可変車輪の実機

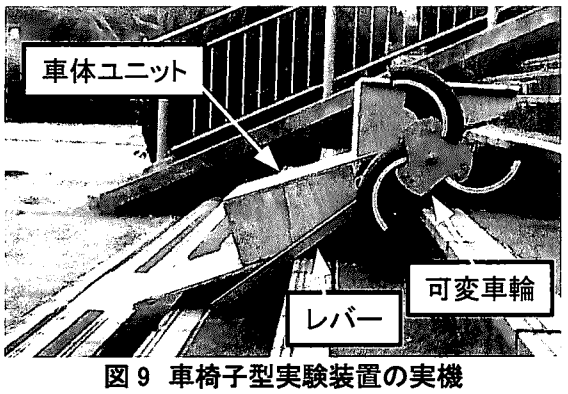


図 9 車椅子型実験装置の実機

実験装置の操作レバーを図 10 に示す. なお, 右側レバー先端の握り部直下には, ロードセルが取り付けられており, 階段上昇時に搭乗者がレバーを引いた際にかかるせん断力を操作力として測定する.

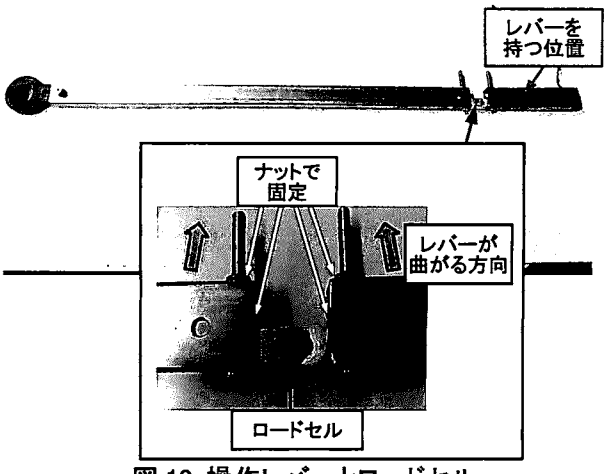


図 10 操作レバーとロードセル

7. 実験

実験装置を用いて, 以下の実験を行った.

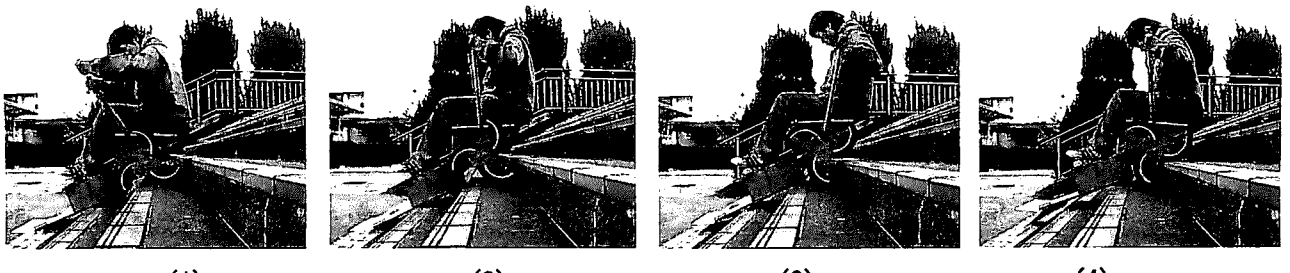
- 重心位置測定実験
- 平地走行実験
- 階段上昇実験(可否の確認と操作力測定)

これらの実験の結果から, 本研究の可変車輪による人力での階段昇降の可否の確認, 車椅子に応用するにあたっての問題点の発見, および, その問題点の考察を行う. ただし, 紙面の関係上, 本稿では, もっとも重要である階段上昇実験について説明する.

7.1 人力による階段上昇の可否確認

階段昇降動作のうち, 階段降下については搭乗者や機体の自重により, レバーによる操作力を加えなくても自由降下できることが容易に予想される. 一方, 階段上昇については, 搭乗者および機体の自重が直接負荷になることから, レバーにより大きな操作力が必要であると予想される.

実験装置により, 実際に階段 1 段を上昇している様子を図 11 に示す. 図 11 より, 実際に搭乗者の人力により階段上昇が可能であることが確認できた.



(1)　(2)　(3)　(4)

図 11 実験装置による人力での階段上昇の模様

7.2 階段上昇時の操作力測定実験

階段上昇実験では，上昇時のレバー操作力を測定した．図 12 に測定実験の模様を示す．

図 12 階段上昇時の操作力測定実験の模様

実験場所としては，地面がコンクリート製である本校の時計塔前階段と，専門棟内の階段の 2 か所で行った．階段を昇る際，左右にかかる力の大きさおよびその間の相違の有無およびその差を調べるため，ロードセルを 2 個用いて左右のレバーに 1 つずつ取り付け，階段を昇った際の左右のレバーに作用するせん断力を同時に測定した．

計測システムは，ロードセルからのアナログ入力を A/D 変換し PC に時系列データとして取り込むというものである．

8. 結果および考察

階段上昇時の操作力測定実験の結果を示し，その結果に関する考察を述べる．

8.1 レバー操作力の測定結果

図 13 に左右レバー操作力を同時測定した結果を示す．測定実験では，実験装置で階段を 3 段上昇させた．階段を上昇するごとに，レバー操作力の変化が上昇していることが，グラフよりわかる．なお，操作力の山の間に，0 の谷間があるが，これは引いたレバーを戻す操作の途中であり，このときは安全装置であるツメ車を利用したラチェット機構による逆回転防止機構により，逆トルクを保持しているため，レバーには操作力はかかっていない．また，そのとき実験装置は階段ステップ上で停止状態にあるためである．

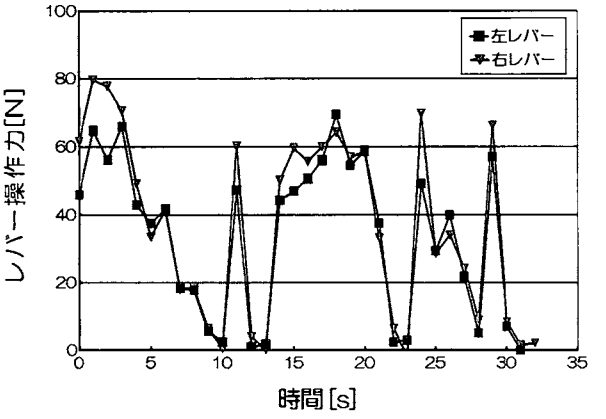


図 13 レバー操作力の測定結果

レバー操作力の変化には，人力による操作のためばらつきが見られるが，グラフより最大レバー操作力は 80[N] であることがわかる．(6)式によってもとめたレバー1 本あたりに必要な理論的な最大操作力は 62[N] であった．このことから，階段上昇時のレバー操作力は，昇降トルクからもとめたレバー操作力の理論値よりも大きくなった．一般的に，手巻きウインチ等の荷役機械において，設計で仮定される人力は，150[N]とされている[7]．本実験装置では座ったまま腕力により操作を行うため，上記の荷役機械と同等の設計基準をそのまま適用することはできない．しかしながら，約半分の操作力で済んでいることから，搭乗者の人力で操作するには，問題のない大きさだと考えられる．

この原因としては，主に可変車輪駆動系の摩擦による動力損失が考えられる．また，実験装置の座面が平坦で滑りやすかったことから，レバー操作中に搭乗者の身体が前方に滑ることにより，重心が可変車輪の中心よりも前方に移動したことが考えられる．これにより，実験装置の重心も階段斜面下方に移動し，前方のソリに大きな反力が発生し，それにともなう摩擦抵抗力が作用し，大きな操作力を要したためと考えられる．搭乗者が座面から滑らないようにする対策が必要である．

8.2 タイヤのスリップ現象

実験で観察された現象として，図 14 に示すような可変車輪のタイヤのスリップがある．これにより，実験装置で連続して階段上昇が行えなかったことがあった．

スリップの原因としては，一つは前方のソリ形状が不適切であったため，その先端部分が階段ステップ壁面に引っかかり，実験装置の階段上昇の妨げになったことが考えられる．ソリ形状については，階段への乗り上がり考慮して，先端を曲げただけで，平坦な構造になっている．しかし，図 4 の車輪中心軸の運動軌跡か

図 14 タイヤのスリップ現象

らもわかるとおり，中高な軌道を描くため，それが原因でわずかながら機体のピッチング変動が生じる．これにより，ソリ先端が階段ステップ壁面に引っかかりと考えられる．もう 1 つの原因は，EVA タイヤ接地面の滑りによるものと考えられる．本来であれば，よりグリップ力の高いゴムタイヤを採用すべきである．この問題の対策としては，ゴムチューブタイヤの空気の代わりに，EVA を充填してソリッドタイヤ化することが考えられる．

8.3 ソリ形状解析

階段ステップ壁面に引っかからないソリ形状をもとめるために，図 4 の理論解析を応用し，可変車輪が 1 回転する間に車輪中心からみた階段ステップ先端の運動軌跡を作図した．図 15 にその解析結果を示す．

階段ステップ先端の運動軌跡は，車輪中心軸の運動軌跡と，お互いに相対運動の関係にある．ソリ形状をこの軌跡の形状にすることにより，車輪中心軸の運動軌跡と同期して，ソリが階段先端を滑るようになり，先端の引っかかりを防止するとともに，機体は階段昇降時に並進運動のみをさせることができる．これにより，機体のピッチング変動も押さえ，搭乗者の乗り心地も向上させることができるものと予想する．

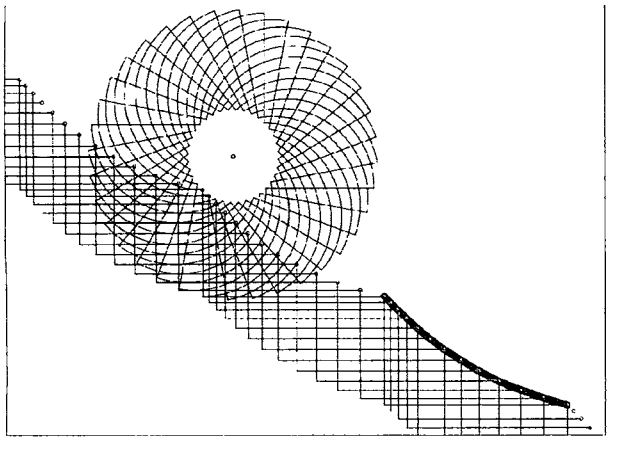


図 15 ソリ形状解析

9. 結論

本研究では，階段昇降用可変車輪を設計製作し，その可変車輪を用いて平地走行および階段昇降が可能な実験装置を製作した．そして実験により，人力での階段上昇が可能であるということを明らかにした．

下記に本研究における成果を述べる．

- 階段昇降用可変車輪の設計製作を行った
- 可変車輪を用いた車椅子型実験装置の設計製作を行った
- 実験装置による階段上昇実験および人力での階段昇降が可能であることを確認した
- 階段昇降時のレバー操作力の測定を行った

現状での課題を以下に示す．

- 階段下降用のブレーキを取り付ける
- 可変車輪の収納・展開状態の切り替え機構・ロック機構を実装する
- ソリ形状を改良するとともに前輪を実装する
- 座面を常時水平に保持する機構を実装する

参考文献等

[1] 「身体障害児・者等実態調査」-厚生労働省，http://www.mhlw.go.jp/toukei/list/108-1.html (2012 年閲覧)

[2] 福島研究室-HELIOS-IX，http://www-robot.mes.titech.ac.jp/robot/wheeled/helios3/helios3.html (2013 年閲覧)

[3] 玉川大学工学科，-階段昇降可能な電動車椅子 http://www.jst.go.jp/tt/dokusou/pdf/res_pdf/res_11/res_11_261.pdf(2013 年閲覧)

[4] 株式会社サンワ-階段昇降機，http://www.ekouhou.net/階段昇降機/disp-A,2012-65808.html (2013 年閲覧)

[5] 日本大学-階段昇降用展開構造車輪を用いた車輪型移動ロボット，http://www.jstshingi.jp/abst/p/10/1031/nihon-u8.pdf (2013 年閲覧)

[6] 機械類の安全性-機械類への常設接近手段-第 3 部:階段，段はしご及び防護さく(柵)，JIS B9713-3:2004(ISO 14122-3:2001)，5 頁

[7] 林 洋次ほか，機械製図，実教出版，262 頁，2008 年