

機関番号：11301  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20760157  
 研究課題名（和文） 文化的環境に低侵襲なバリアフリー実現のための移動支援ロボットに関する研究  
 研究課題名（英文） Study on robotic mobility aids for barrier-free having minimal invasiveness in cultural environments  
 研究代表者  
 菅原 雄介（SUGAHARA YUSUKE）  
 東北大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：60373031

## 研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、歴史的建造物や史跡・景勝地において、景観保護やオーセンティシティの維持に配慮し文化財を傷つけることなく車いす利用者が健常者と同じ経路で観賞することを可能にするバリアフリー技術を提案する事である。これに対し、新たな駆動原理に基づく階段昇降車いすを開発した。これは変形動作の繰り返しにより階段の昇降、また車輪の駆動により走行と旋回が可能なるものであり、実験により安定して走行と階段昇降が可能なることを確認した。

## 研究成果の概要（英文）：

The final target of this study involves realizing a smooth and hospitable means of locomotion for wheelchair users in environments having a cultural meaning, such as historical Japanese wooden buildings and castle ruins, without tampering with the authenticity of the environment. With this goal in mind, a prototype of a novel wheelchair having a stair-climbing function resulting from transformable wheeled four-bar linkages was developed, and the basic performance was confirmed through an experiment.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス、バリアフリー、車いす、移動支援、文化財

## 1. 研究開始当初の背景

近年、超高齢社会を迎えるわが国において、バリアフリーやユニバーサルデザインの考え方が広く認識されるようになり、法整備も進んで車いす利用者の行動範囲は広がってきている。しかしながら、文化財である建造

物や史跡など歴史的・文化的環境を考えると、エレベータの設置などインフラの整備によりバリアを除去することは、オーセンティシティの面からは望ましくない。特に多くの歴史的建造物が木造である日本ではこういった設備を建造物にダメージを与えないよう追加することは難しく、城郭など高層の国宝

建築物においては車いす利用者のアクセスは現在まったく不可能である。歴史的・文化的に意味のある環境に対する、オーセンティシティを損なわない BF 手法の構築については、近年これを問題と指摘する研究例が建築・街づくりの分野で散見されるようになったが、技術的な研究開発を含む研究が行われた例はない。

## 2. 研究の目的

本研究の最終目標は、日本における古い木造建築や城跡の石段など、歴史的・文化的に価値を有する環境において、車いす利用者の円滑で快適な移動を、その環境の本来の形から大きく手を加えることなく実現する、いわば「歴史的環境に対する低侵襲性」を備えた移動バリアフリー技術の構築にある。とくに、歴史的・文化的に価値を有する環境において、車いす利用者が、環境を改変することなく、環境に対して人間が通行する程度のダメージしか与えずに、階段や斜面を含む歴史的に本来の移動経路を、自立して通行することのできる車いすの開発を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究は、(1)国内外の関連研究の調査、(2)コンセプトに基づく機能的要求の抽出、(3)機構と動作原理の考案、(4)運動学関係の導出、(5)静力学関係の導出、(6)詳細設計と試作、(7)評価実験、の順に遂行した。

## 4. 研究成果

### (1)国内外の関連研究の調査

バリアフリーの一手法として不整地や階段の昇降機能を付加した車いすの研究例はこれまでに多くあるが、「歴史的環境に対する低侵襲性」が考慮された例はなかった。

Patra Four は 80 mm の段差踏破が可能である不整地走破性の高い電動車いすだが、階段の昇降は不可能である。

HELIOS-V は車輪径の 1.5 倍の高さの段差の踏破が可能な特殊な車輪を用い階段昇降が可能であるが、階段の角に集中荷重を加えるため木造建築の場合階段を損傷する可能性がある。

柳原らは車輪付き回転十字アームを用いた洗練された階段昇降車いすを提案しているが、前後に長く階段昇降中の方向転換が不可能であることなど狭い環境での運用は困難である。

iBOT は有名な階段昇降機能付き電動車いすであり、アメリカでは実際に販売された実績を持つが、昇降中の安定性確保に搭乗者が腕で手すりをつかむ必要があり、また昇降中

には 2 つの車輪のみが接地するため接地圧が大きく、階段に与える負荷が甚大で日本の木造建築内での運用は困難である。

宮城らの昇降車、またこれと同様の構造を持つ Zero Carrier, Zero Carrier II は高い静的安定性を保ったまま幅広い蹴上げと奥行きに対応できる洗練された階段昇降車両であるが、自由度が多くまた原理的に車輪径を大きくできないため不整地走行には困難が伴う。

平行リンク機構を用いた階段昇降可能な車いす CALMOS は単純な機構で静的安定性の高いものであるが、やはり原理的に大径車輪の使用が困難である。

HELIOS-VI は、クローラと受動車輪を用いるシンプルな機構で階段昇降が可能となっているが、階段の角に集中荷重を加えるため木造建築の場合階段を痛める可能性があり、また滑落の危険もある。

クローラを用いた階段昇降車いす Top Chair も同様に階段の角に集中荷重を加えるものである。

また WL-16, i-foot, HUBO FX-1 など 2 足歩行式のもは環境に与える負荷が人間と同程度であり、技術的にも興味深いが、安全性や平地での移動効率には課題が多い。

### (2)機能的要求の抽出

日本の歴史的建造物や遺跡などでは、環境に対し通常健常者が通行する程度の負担しかかけないことが望まれる。このために路面や階段踏み面には人間が歩行するのと同じ程度の接地圧で走行・昇降が可能であり、また階段のエッジに集中荷重をかけないことが必要である。また歴史的に本来の移動経路を通行するためには直線階段のみでなく湾曲した階段が昇降可能であることや、不整地での走行が可能である必要がある。一方バリアフリー技術の観点からは、高齢者の使用を前提とするため、昇降中に常に静的安定性を確保することが求められる。

### (3)機構と動作原理

これらの機能的要求を満たす移動機構として、筆者らは車輪付形状可変型 4 節リンク機構による複数車輪式階段昇降機構の試作機 TBW-1 Matsushima を開発した。写真と構造を図 1, 2 に示す。市販の車いすの座面下部に一本の脚を取り付け、この脚部はそれぞれピッチ軸方向の能動自由度である股関節と足関節を有し、股関節は車いすの座面下部に、足関節は左右にそれぞれ 4 節リンク部と接続されている。

4 節リンク部の構造を図 3 に示す。この 4 節リンク部は各頂点に車輪を有し、また隣り合う二つの頂点が能動対偶となっており、これを駆動することにより平行四辺形（図

4(a) から一直線 (図 4(b)) へと変形することができる。また 4 本のリンクはすべて同じ長さであり、これにより一直線の姿勢において適切に関節を制御することによりくの字の姿勢 (図 4(c)) に移行することができる。

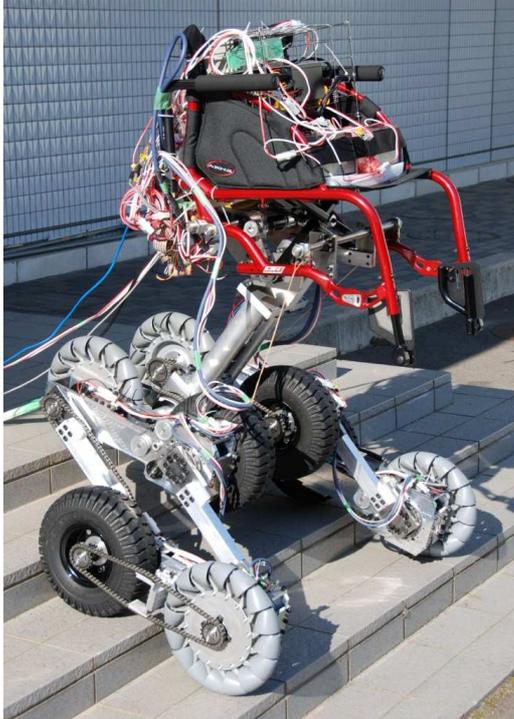


図 1. TBW-1 Matsushima.

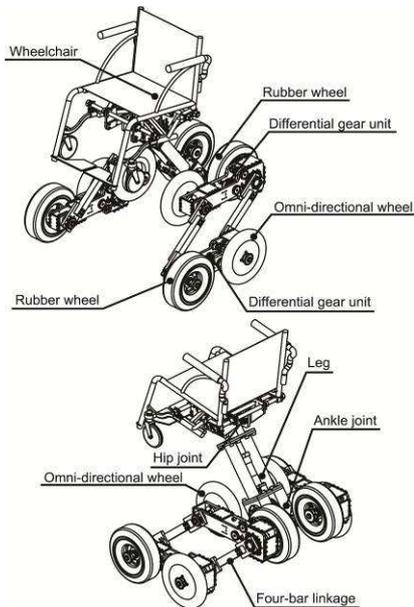


図 2. TBW-1 Matsushima の概要.

階段昇降時の動作を図 5 に示す。このように、本機構は基本的には平行四辺形と一直線それぞれへの変形を繰り返すことにより階段昇降動作を行う。ここで、図中 (b)~(d) に示すように、下り階段の降りはじめ、上り階段の上り終わりの際には、前述のくの字変形

を利用する。昇降中も絶えず 4 輪以上が接地しており、これにより原理的に低い接地圧と広い支持多角形が確保できるようになっている。この際、接地している 4 輪で形成される支持多角形の中心付近に ZMP が位置するよ

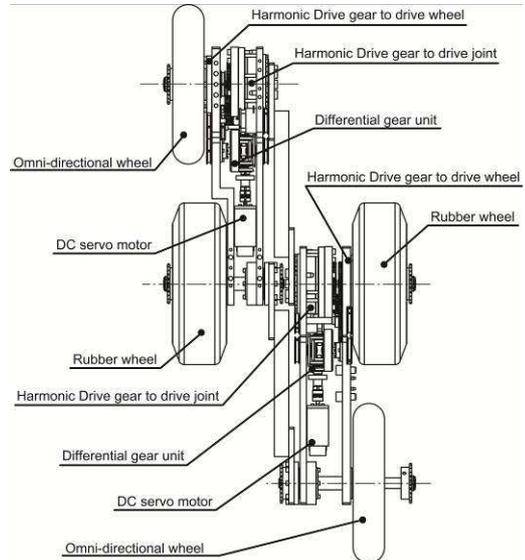


図 3. 車輪付 4 節リンク機構の概要.

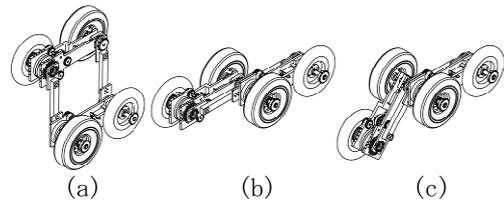


図 4. 車輪付き 4 節リンク機構の変形モード. (a) : 平行四辺形モード, (b) : 一直線モード, (c) : の字モード.

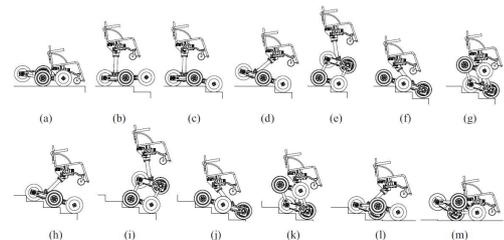


図 5. 階段昇降時の動作シーケンス.

う足関節と股関節を適切に制御することによって安定性を確保する。また、8 つ備える車輪のうち半数をゴムタイヤ、半数を全方向移動車輪とすることにより、平地走行中と昇降中とにかかわらず 4 輪が接地している際は左右のゴムタイヤの接地位置を結んだ線上の点を中心に旋回が可能である。

この車輪付形状可変型 4 節リンク機構の駆動には、単純に考えれば片側機構につき車輪駆動用に 1 個と変形用に 2 個の計 3 個のアクチュエータが必要となるが、本研究ではと

くに、2個のアクチュエータにより関節と車輪をそれぞれ干渉駆動することにより省自由度化を図っている。

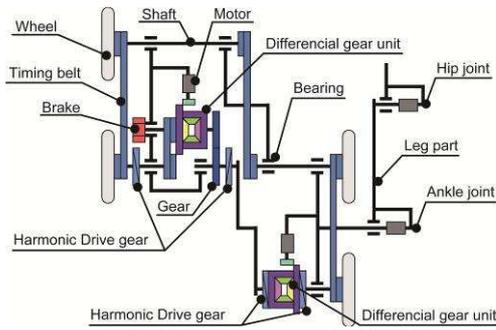


図6. 車輪付き4節リンク機構の構造。

図6に4節リンク部の構造の模式図を示す。モータは平行な2つのリンクに配置され、各々のモータの出力はディファレンシャルギヤにより車輪の回転と隣り合う2つの能動対偶の変位(4節リンクの変形)の2つの運動に分配される。2つの能動対偶の変位は幾何学的に干渉しており、4節リンク上の4つの車輪はチェーンにより接続されるため全ての車輪の回転角度は同じになる。ここで、片方のディファレンシャルギヤの2本の出力軸はそれぞれチェーンと平歯車を介して車輪軸と関節軸に接続される。これにより、モータを同じ方向に同じ量だけ回転させる時には、関節部が駆動され4節リンク部の形状が変化し、逆にモータを異なる方向に同じ量だけ回転させる時には、関節部は動かず車輪が回転する。車輪軸と関節軸はそれぞれハーモニックドライブ減速機を備えるため、大トルクの必要な階段昇降動作と走行動作の両方で適切な減速比を持たせることが可能である。

階段の降りをはじめと昇り終わりの際に必要となるくの字状態に関しても、4節リンク部の隣り合う2箇所の関節を駆動関節とすることにより、2通りのくの字状態においても駆動ができるようになっている。

#### (4) 運動学関係

4節リンク部の機械的拘束と幾何学的拘束、ディファレンシャルギヤの運動学関係を組み合わせ運動学モデルを導出し、順運動学解と逆運動学解を求めた。この運動学解は制御系において各姿勢におけるモータ角度を導出するのに用いている。

詳細は発表論文を参照されたい。

#### (5) 静力学関係

運動学関係と同様に、4節リンク部の機械的拘束と幾何学的拘束、ディファレンシャルギヤの静力学関係、これに加え接地状態に応じた地面反力を考慮して静力学モデルを導出し、静力学解を求めた。この静力学解は詳

細設計に際して各姿勢におけるモータの必要トルクを導出するのに用いた。

詳細は発表論文を参照されたい。

#### (6) 詳細設計と試作

開発した試作機 TBW-1 Matsushima の仕様と外形寸法図を表1と図7に示す。

試作機は股関節と足関節に各1個、左右の

表1. 仕様.

Model No.	TBW-1
Dimension / Weight	
Height	744 - 1460 mm
Width	1129 mm
Weight	154 kg (w/o electric component)
Mechanism	
Link Mechanism	Four-Bar Linkage
Degree of Freedom	6
Actuator	
Motor	DC servo motor
Rated Power	150 W
Brake	Electromagnetic Brake
Computer	
CPU	PentiumM 1.8 GHz
OS	QNX 6.1.0
Electric System	
DC Servo Driver	TD12770-48W10

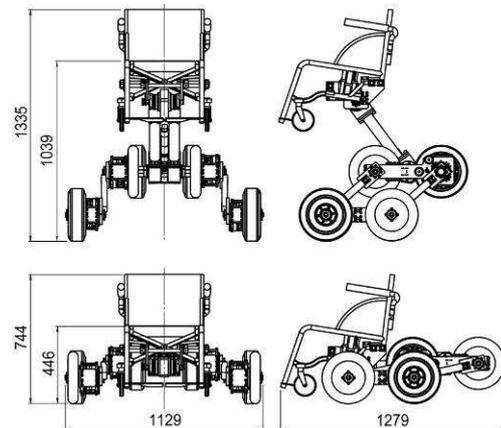


図7. 外形寸法図.

4節リンク部に各2個の計6個のDCサーボモータにより駆動される。4節リンク部は平地走行時など変形を必要としない際に能動対偶を固定するための負動作電磁ブレーキを左右各1個備えており、同様に足関節・股関節も負動作電磁ブレーキを備える。

全高は脚の駆動と4節リンクの変形により744 mmから1460 mmまで変化し、これにより座面を一般的な車いすと同等の高さから搭乗者の目線を直立姿勢の健常者と同等の高さまで変化させることができる。

図7に示すどちらの姿勢においても4輪が接地しており、この姿勢のまま走行と旋回が可能である。

#### (7) 評価実験

##### ① 平地走行実験

試作機の平地走行性能を評価するため、走行実験を行った。外側リンクを上を持ち上げた平行四辺形の形態を用い、姿勢は変化させずに車輪だけを駆動して走行を行わせた。

実験の様子を図 8 に示す。はじめに前進走行を行い (0-9 s)、その後右旋回を行っている (9-15 s)。前進走行とその場旋回が行えることが確認できる。

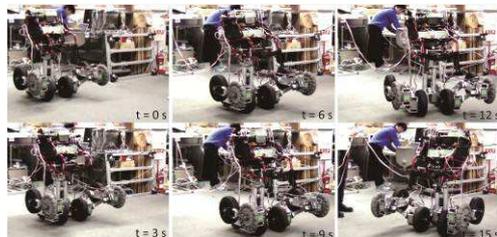


図 8. 平地走行実験.



図 9. 階段降下実験.

## ②階段降下実験

試作機の階段昇降性能を評価するため、著者らの所属大学の建物玄関の階段において階段降下実験を行った。段の蹴上高さは 110 mm、踏み代は 300 mm である。

現在のところこの試作機は階段の形状を測定するセンサを搭載しておらず、実験に際してはオフラインで各関節の角度軌道を手作業で設定し、そこから逆運動学計算を用いて各モータの角度軌道を求めこれに基づき各モータを制御している。

実験の様子を図 9 に示す。最初は四節リンク部は一直線モードであり (0 s)、まずそこからくの字モードに変形し (0-16 s)、上体を前方に移動させた上で後部の 2 輪を持ち上

げて 4 節リンク部を再度一直線モードに変形する (16-32 s)。この後は適宜上体を移動させながら平行四辺形モードと一直線モードを交互に繰り返すことで階段を降下している (32-80 s, 80-112 s, 112-176 s, 176-208 s)。最後に、階段に接する後部 2 輪を持ち上げることで階段から離れる (208-224 s)。動作は速くはないが、この試作機が安定して階段を降下していることがわかる。

これより、開発した 4 節リンク機構が一直線モードから他の 2 つのモードに滑らかに変形することができ、またこれにより試作機は安定して階段を降下できることを確認した。

なお、同様の変形を繰り返すことによりこれより長い階段も降下でき、またこの動作を逆に繰り返すことにより階段を昇することもできる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 菅原雄介, 米澤直晃, 小菅一弘, 車輪付形状可変型 4 節リンク機構を用いた階段昇降機構, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol. 29, 号未定, 2011, ページ未定. (採録決定済, 印刷中)

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① Yusuke Sugahara, Naoaki Yonezawa and Kazuhiro Kosuge, A Novel Stair-Climbing Wheelchair with Transformable Wheeled Four-Bar Linkages, Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3333-3339, October 18-22, 2010, Taipei, Taiwan.  
<http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2010.5648906>
- ② 米澤直晃, 菅原雄介, 小菅一弘, 車輪付形状可変型 4 節リンク機構を有する階段昇降機構 (第 2 報, 運動学・静力学関係と動作実験), 日本ロボット学会第 28 回学術講演会予稿集, 1J3-2, 2010 年 9 月 22 日, 愛知県.
- ③ 菅原雄介, 米澤直晃, 小菅一弘, 車輪付形状可変型 4 節リンク機構を有する階段昇降機構 (第 1 報, コンセプトの提案と動作原理), 日本ロボット学会第 28 回学術講演会予稿集, 1J3-1, 2010 年 9 月 22 日, 愛知県.
- ④ Yusuke Sugahara, Naoaki Yonezawa and Kazuhiro Kosuge, A Novel Stair-Climbing Wheelchair with Variable Configuration Four-Bar

Linkage: Mechanism Design and Kinematics, ROMANSY 18 -Robot Design, Dynamics and Control- Proceedings of the 18th CISM-IFTOMM Symposium, pp. 167-174, July 5-8, 2010, Udine, Italy.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 階段昇降式移動車

発明者: 菅原雄介, 小菅一弘, 米澤直晃, 相川正司, 畔地芳幸

権利者: 株式会社クマリフト技術研究所, 国立大学法人東北大学

種類: 特許

番号: 特願 2010-146497

出願年月日: 平成 22 年 6 月 28 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

- ① 菅原雄介, 移動支援ロボットシステムの設計, 設計工学, Vol. 46, No. 4, 2011, pp. 184-193.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

菅原 雄介 (SUGAHARA YUSUKE)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 60373031

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 研究連携者

( )

研究者番号: