

段差乗り越え機構の開発とシルバーカーへの応用

Development of a Step-Climbing Mechanism and Its Application to a Mobility Aid for the Elderly

崔 鎮圭* 朴 忠植* 北川 貴弘*
Jin-Kyu Choi Choong Sik Park Takahiro Kitagawa
中谷 幸太郎* 杉井 春夫*
Kotaro Nakatani Haruo Sugii

(2008年6月11日 受理)

This paper presents a newly developed step-climbing mechanism and its application to a mobility aid for the elderly. It comprises a gear pair and two links. The gearing motion can transform the user's pushing force into lifting and supporting forces for step climbing. Existing mobility aids usually cannot mount a step higher than half of the front wheel's radius. In contrast, this mechanism can mount a step higher than the radius of the front wheel using less user's pushing force and with less shock. This paper first describes the component and principle of the step-climbing mechanism and then clarifies its performance through theoretical analysis and experiments with a mobility aid having the step-climbing mechanism. Finally, another application example to a power-assisted oxygen cart for patients on long-term domiciliary oxygen therapy is introduced: it can surmount a 110 mm step with 64-mm wheel radius!

キーワード：段差乗り越え機構，シルバーカー，酸素カート，歩行支援機

1. はじめに

高齢化社会が進み、歩行支援を目的とした様々な福祉用具が利用されている。手押しタイプの歩行支援機器であるシルバーカーも、足腰の弱い高齢者によく利用される器具の一つである。筆者らはこれまでもシルバーカーの開発を行ってきた。しかしながら、これまでに行った市販のシルバーカーを用いた段差乗り越えの実験では15 mm程度の段差でも乗り越えが困難であり、これより低い段差を乗り越えるときにも相当の力が必要とされ、段差乗り越え自体が高齢者においては大きな負担となることが分かった。また、段差乗り越えに失敗したときには、衝突による衝撃や前向きのモーメントにより歩行者が転倒する危険性も考えられる。

本論文では、歩行機能が低下した高齢者の安全な歩

行の支援を目的とした新たな段差乗り越え機構を提案する。本段差乗り越え機構は市販のシルバーカー((株)島製作所のリズムRWC)の前輪(半径66 mm)より小さな車輪(半径50 mm)を持っているにもかかわらず、より高い段差(30 mm程度)を容易に乗り越えることが可能である。さらに、段差との衝突により生じる衝撃を緩和する性質をも有している。本論文の流れは以下の通りである。まず、提案する段差乗り越え機構の構成と原理について説明する。次に、その段差乗り越え機構が取り付けられたシルバーカー(実験機)の理論的解析及び実験を行い、提案する段差乗り越え機構の性能を明らかにする。最後に、本機構にパワーアシスト方式を併用し、公道にある高い段差でも乗り越え可能とした在宅療法患者向けの酸素カートを紹介する。

2. 提案する段差乗り越え機構

* 情報電子部 制御情報系

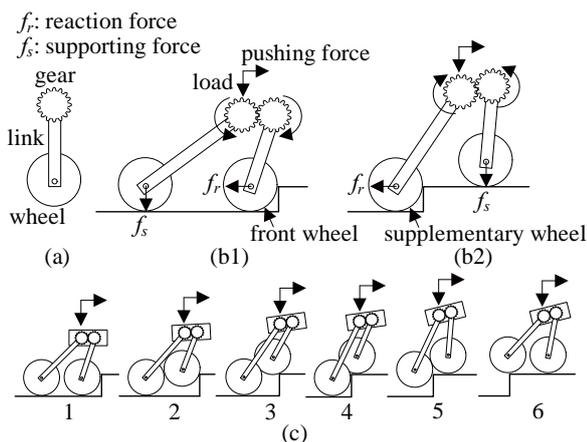


Fig. 1 The proposed step-climbing mechanism consists of a gear pair, two links, and two wheels as shown in (a) and (b), and the gearing motion can transform the user's pushing force into the lifting and supporting forces for step climbing as shown in (b) and (c).

Fig. 1 に提案する段差乗り越え機構の構成 ((a), (b)), 基本原理 (b), 段差乗り越え動作 (c) を示す. 本機構は段差を乗り越えるためにギアの回転を利用し, 使用者の押す力を車輪を持ち上げる力に変換する構造となっている. 各ギアは Fig. 1 (a) のようにリンクに接続し, リンクの他端にはそれぞれ車輪を取り付けている. 二つの車輪の前方の車輪を前輪, 後方の車輪を補助輪と呼ぶ.

段差乗り越え原理は以下のとおりである. Fig. 1 (b1), (c1) ~ (c3) のように前輪が段差と接触している状態で外部から押す力が加えられると, 段差からの反力 (f_r) によりギアが回転する. このギアの回転は, リンクを通して補助輪を床面に押す (f_s) ことにより前輪を持ち上げる動作を生み出し, 段差を乗り越える. 同様に補助輪も Fig. 1 (b2), (c4) ~ (c6) より段差を乗り越えることが可能である.

3. シルバーカーへの応用

Fig. 2 に提案する段差乗り越え機構の性能を評価するために試作した実験機を示す. 市販のシルバーカーの左右前輪の代わりに提案する段差乗り越え機構を取り付けた. 段差乗り越え機構 (b) は, 半径 50 mm の前輪と補助輪, アルミ製のリンク, 鉄製のギアから構成されている. 改造前のシルバーカーの重量は 4.2 kg, 実験機は 5.39 kg であり, また, 実験機の段差乗り越え機構は, 約 55 mm の段差の乗り越えが可能な寸法となっている (付録参照). Fig. 2 (c) に高さ約 50 mm のブロックを乗り越える様子を示す.

(1) 段差乗り越え実験

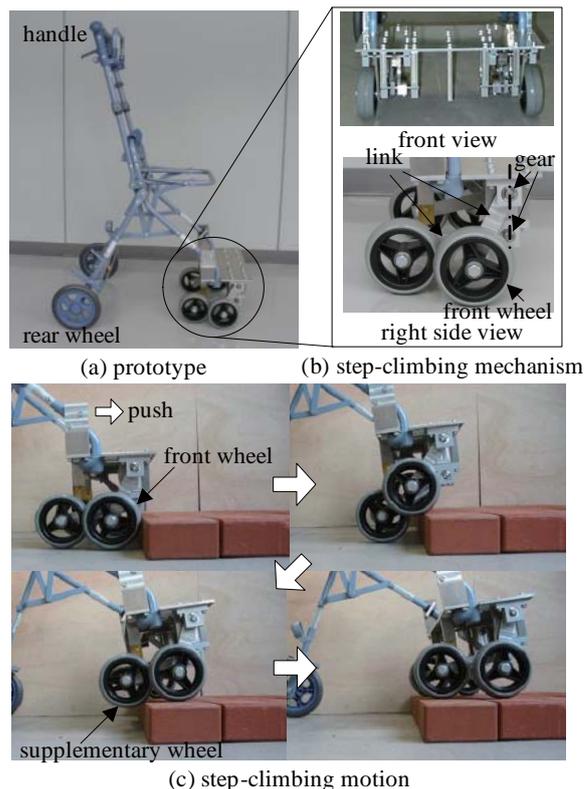


Fig. 2 A mobility aid with the proposed step-climbing mechanism (prototype).

実験機の乗り越え可能な段差高さを調査するために異なる高さの段差を設け, 手押しで乗り越え可能な段差の実験を行った. 二つのケースについて調べた. 一つ目は, 普通の力で押す場合 (進行方向への力で約 60 N) であり, 二つ目は, かなりの力を入れて押す場合 (進行方向への力で約 110 N) である. Table 1 にその実験の結果を示す. Table 中の 'usual force' と 'full force' はそれぞれ普通の押す力とかなりの力を入れて押すときの力を表す. まず, 普通の力で押す場合の実験では, 市販のシルバーカー (改造前のもの) は 66 mm の前輪半径で 18 mm しか乗り越えることができなかった. これに比べて, 実験機は 50 mm の車輪半径でありながらも 30 mm まで無理なく乗り越えることが可能であった. また, かなりの力を入れて押す場合には, 市

Table 1 Results of comparative experiments between a conventional mobility aid and our prototype. The maximum step heights were checked in two cases. One is when the user pushes with usual force^{a)} and the other is with full force^{b)}.

	Wheel radius	Max. step height (with usual force)	Max. step height (with full force)
Conventional	66 mm	18 mm	22 mm
Prototype	50 mm	30 mm	44 mm

a) the user's horizontal force of about 60 N.

b) the user's horizontal force of about 110 N.

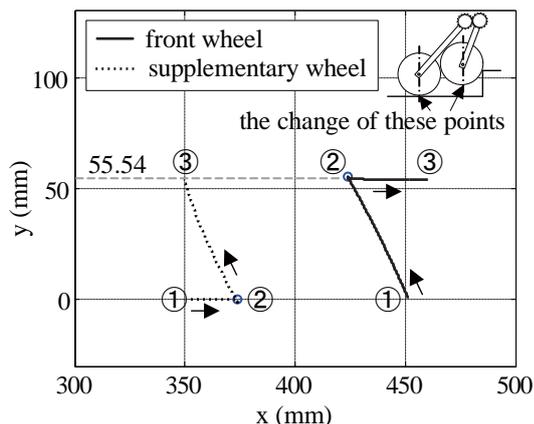


Fig. 3 Trajectories of the front and supplementary wheels when going up the maximum step height (the reference frame is attached at the contact point between the rear wheel and the floor).

販のシルバーカーでは 22 mm，実験機では 44 mm まで乗り越えることができた。一般に，軽くて車輪半径が大きいほど段差乗り越えに有利であるが，実験機は，市販のシルバーカーよりその重量は大きく，また前輪半径も小さいのにもかかわらず，ギアとリンクをうまく活用し，より高い段差の乗り越えを可能としている。次節には，このような実験機の理論的解析を行い，その性能をより明らかにする。

(2) 理論的解析

まず，幾何学的解析を行い，実験機の乗り越え可能な最大段差量を調べた。後輪中心を原点とする座標系を設け，後輪中心から補助輪のギア中心まで (Fig. 8 での O から A まで)，および補助輪のギア中心から前輪のギア中心まで (A から B まで) をそれぞれ一つのリンクとみなすと，補助輪と前輪の動きは合計四つのリンク姿勢より決まる。したがって，ギアの回転角の変化による補助輪と前輪の位置変化はロボットアームの順運動学の計算法を用いれば直ちに求められる¹⁾。

Fig. 3 に幾何学的解析の結果を示す。前輪と補助輪の軌跡は後輪と床面との接触点を基準として表した位置座標である。前輪が段差と接触している状態で押す力を加えると，前輪は段差と接触しながら上昇すると同時に補助輪は床面を沿って前方へ進む (① → ②)。前輪が段差を乗り越えると，続いて補助輪が段差を上がり，前輪は前方へと進む (② → ③)。この一連の動作により，前輪の段差乗り越え時に変化した機構の姿勢は補助輪の段差乗り越え過程で元に戻り，次の段差乗り越えへ対応することが可能となる。このとき実験機が段差乗り越えを実現するためには，次の条件を満たす必要がある。

$$d \geq R_s$$

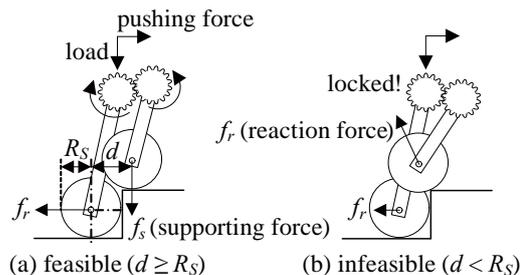


Fig. 4 Feasible and infeasible situations.

ここで， d は前輪中心と補助輪中心との水平距離， R_s は補助輪の半径を表す。例えば，Fig. 4 のように， $d \geq R_s$ の場合には段差からの反力によりギアが働き，段差乗り越えが可能になるが， $d < R_s$ の場合には両車輪が反力を受けることになるので，ギアはロックされてしまう。つまり，段差乗り越えは不可能となる。Fig. 3 からは，実験機は最高 55.54 mm の段差まで上ることができると，前輪や補助輪の動きはほぼ線形的であることが分かる。

次に，段差乗り越えに必要とされる歩行者からの力と段差量との関係調べるために力学的解析を行った。歩行者が段差を乗り越えるために力を入れた瞬間に前輪と段差との接触点は動かない (滑らない) と仮定すると，力のつりあい関係から段差乗り越えに必要な力を求めることができる¹⁾。Fig. 5 に力学的解析の結果を示す (本解析に用いた各パラメーター値は付録と参考文献 1) を参照のこと)。 F_U と W_U はそれぞれハンドルでの歩行者からの進行方向への押す力と下向きの力を表す。 F_U と W_U は，段差量が大きくなるにつれ，徐々に大きくなり，段差量が前輪半径 (50 mm) 以上の段差量では $F_U \approx 96$ N および $W_U \approx 120$ N となった。これに比べ，半径 66 mm の前輪 (一般車輪) を持つ市販のシルバーカーの場合では，段差量 10 mm 以上になると急激に大きくなり，段差量が 40 mm 以上では発散する傾向をみせた。これは歩行者の押す力では前輪半径近傍の段差量は乗り越えられないことを意味する。これに対し，実験機はある程度の力は要るが前輪半径以上の段差量も乗り越えることが可能である。なお，本解析では市販のシルバーカーの前輪重量はゼロとし，前輪に加わる負荷は実験機と同じ値とした。

また，Fig. 5 の実験機の前輪での反力 N_f および補助輪での反力 N_s の変化から分かるように，段差乗り越え機構は二つの車輪 (前輪と補助輪) を持っているため，機構に加わる負荷はこの二つの車輪に分散される。車輪に加わる負荷が小さいほど段差乗り越えがしやすくなることから，これは段差乗り越えを容易にする役割を果している。

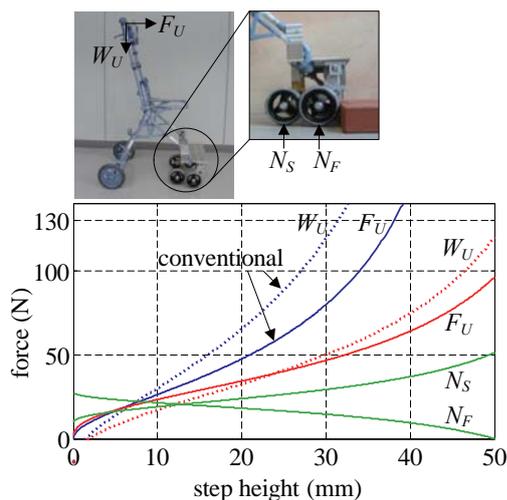


Fig. 5 Necessary forces for step climbing.

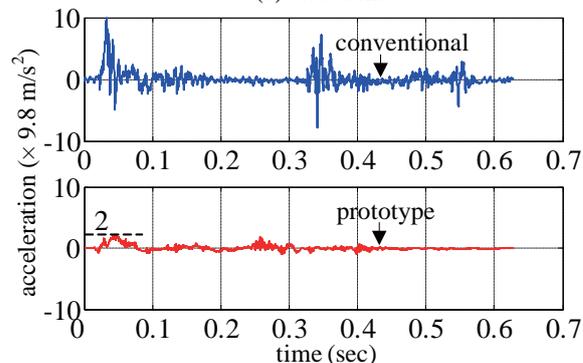
本解析結果で実験機の押す力 F_U は段差量が 30 mm で約 50 N, 44 mm では約 80 N となっている。これらは段差乗り越え実験における段差量が 30 mm での押す力 ‘usual force’ ($F_U \approx 60$ N), 44 mm での押す力 ‘full force’ ($F_U \approx 110$ N) とは少し異なる。この理論値と実験値の差は、歩行者の力が加えられたときに生じる実験機フレームのたわみによるものと判断される。また、段差量が大きくなるにつれ、歩行者からの下向きの力も大きくなるが、これは進行方向への力により生じる段差との接触点での前向きのモーメントを防ぐためである。

(3) 衝撃実験

段差乗り越え時の歩行者への衝撃を調べるため、実験機と市販のシルバーカーの衝撃実験を行った²⁾。手で乗り越えを行う場合、速度や押す力の条件を揃えることは困難なので、スロープを設けて、スロープの下方に段差を設置し、上方からシルバーカーを自然落下させて、慣性により段差を乗り越えさせることにした。実験機と市販のシルバーカーの前輪上部に 3 軸加速度センサを取り付け、水平方向 (x 軸方向) の加速度の変化を調査した。Fig. 6 に実験結果を示す。ピーク値は実験機の場合 $2 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ であるのに比べ、市販のシルバーカーの場合は $10 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ となった。重量と車輪の仕様が少し異なるが、実験機のほうが衝撃吸収能力の高いことが分かる。これは、Fig. 3 での前輪が線形的に上がる特徴 (実線の①→②) より、段差と当たった瞬間、少し後退しながら上がるからである。これより衝撃の吸収のみならずスムーズな段差乗り越えも実現可能となる。



(a) test scene



(b) acceleration change in the horizontal direction

Fig. 6 Results of shock tests.

4. パワーアシスト方式との併用：酸素カートへの応用

実験機は 50 mm 段差の乗り越えを目標として設計したが、100 mm を超える段差のある実際の道路には対応困難である。一方、実験機の力学的解析結果である Fig. 5 からわかるように、高い段差を乗り越えるためには、その分大きな力が必要となる。本章では、提案する段差乗り越え機構の新たな応用例として、パワーアシスト方式を併用し、公道上にある高い段差でも乗り越え可能とした在宅療患者向けの酸素カートを紹介する。段差乗り越え機構部は 120 mm の段差も乗り越えるように設計変更し (付録参照)、また段差乗り越え時に後輪をモータにより駆動するようパワーアシスト機構を設けた³⁾。

Fig. 7 に開発した酸素カートを示す。市販の四輪カートを改造し、前輪の代わりに新たに試作した段差乗り越え機構を、後輪部にパワーアシスト機構を、段差乗り越え機構部には段差量の計測のための超音波センサを、またハンドル側にはユーザー・インターフェースを取り付けた。段差乗り越えは以下のように行う。まず、前輪が段差と接触した時点で、超音波センサにより段差の検出及び高さを計測する。計測データはユーザー・インターフェースにある制御部に送られ、乗り越え可能な高さかどうかを判定した後、LCD (Liquid Crystal Display: 液晶ディスプレイ) とブザーによりユーザーへの段差情報を通知する。乗り越えを行う場

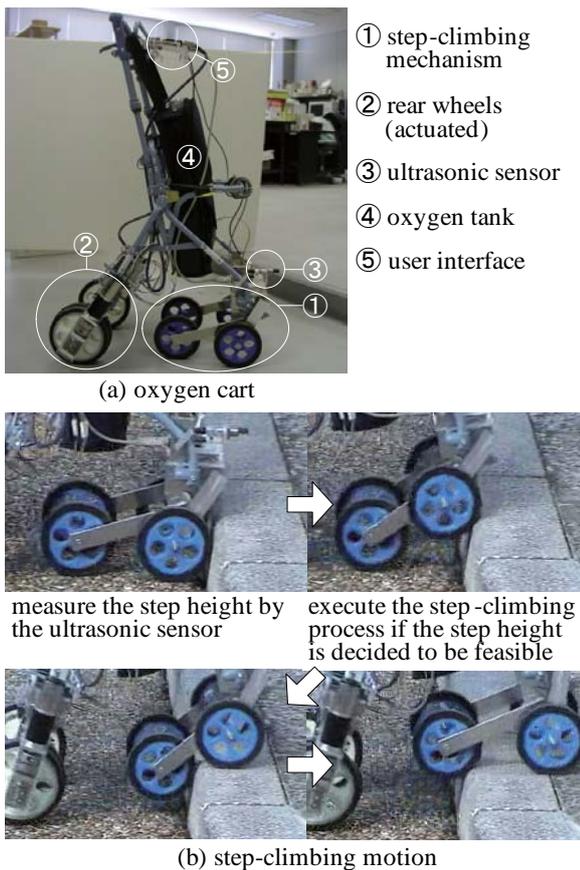


Fig. 7 Another application example: a power-assisted oxygen cart having the step-climbing mechanism.

合は、ユーザーが手元のボタンにより乗り越えを指示するとパワーアシスト機構が作動し、乗り越えを行う。Fig. 7 (b)の室外実験では、110 mm 段差も容易に乗り越えることが可能であった。

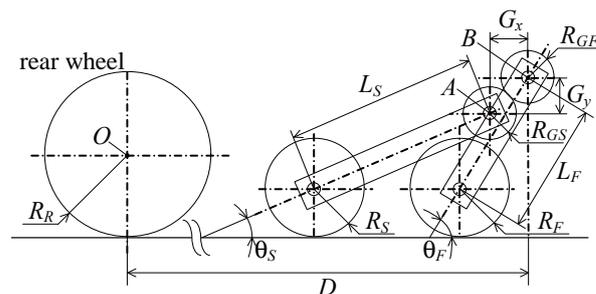
5. おわりに

本論文では新たな段差乗り越え機構を提案し、それを取り付けたシルバーカーの実験および理論的解析を行い、その有効性と性能を明らかにした。また、パワーアシスト方式を併用した在宅療法患者向けの酸素カートを紹介した。提案した段差乗り越え機構のメリットは以下のようにまとめられる。

- (1) 一般車輪と比べ、小さな車輪半径でも、より高い段差を容易に乗り越えることが可能である。

- (2) 車輪半径以上の段差も乗り越え可能である。
- (3) 段差との衝突による衝撃を緩和する性質を有している。
- (4) パワーアシスト方式と併用すると、より高い段差をより容易に乗り越えることが可能である。

最後に、本研究ではシルバーカーと酸素カートを実用対象としたが、手押し台車やベビーカー、車椅子、旅行カバン等への応用も考えられる。これらへの応用と実用化についての検討は今後の課題とする。



	Prototype	Oxygen cart		Prototype	Oxygen cart
R_R	79.5 mm	79.5 mm	G_y	0.0 mm	56.6 mm
$R_S=R_F$	50 mm	64 mm	G_y	60 mm	56.7 mm
L_S	132 mm	160 mm	θ_S	15°	14.7°
L_F	98.4 mm	115 mm	θ_F	73.2°	57.7°
$R_{GS}=R_{GF}$	30 mm	40 mm	D	480 mm	477.8 mm

Fig. 8 Dimensions of the step-climbing mechanisms attached to the prototype and the oxygen cart.

付 録

試作した実験機および酸素カートに取り付けた段差乗り越え機構の寸法を Fig. 8 に示す。

参考文献

- 1) J. -K. Cho, C. S. Park, T. Kitagawa, K. Nakatani and H. Sugii: Advanced Robotics (accepted).
- 2) 朴 忠植, 北川貴弘, 中谷幸太郎: ロボティクス・メカトロニクス講演会, (2006) p.1P1-A03(1).
- 3) 朴 忠植, 北川貴弘, 中谷幸太郎, 崔 鎮圭, 杉井春夫, 杉村延広: 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, (2007) p.751.