

シルバーカーのためのそりを用いた段差乗り越え機構の開発

Development of a walker mechanism with a sled for riding over a step

精密工学専攻 30号 角田郁弥
Fumiya Tsunoda

1. 緒言

シルバーカーとは足腰の衰えた高齢者が使用する歩行補助具である (Fig.1). 近年の高齢社会で需要が増加し, シルバーカーの改善を目的とした研究も多く見受けられる⁽¹⁾.

しかし, 使用者の増加によりシルバーカーによる事故も増加している⁽²⁾. 事故原因には, 転倒や段差とのつまずきが多い. そのため段差衝突時の撃力が少なく, かつ容易に段差乗り越えが達成できるシルバーカーが必要となる.

先行研究⁽³⁾では衝撃軽減機構の開発を行った. 提案された先行機構のモデルを Fig.2(b)に示す. (一般的な機構を Fig.2(a)に示す.) 先行機構は前輪部付近にバネと回転するリンクを持つ. これにより段差衝突時の衝撃をバネが吸収し撃力は減少した. しかし乗り越えられる段差高さは約1 cmに留まり, 高い段差ではバネが縮み車体が前のめりに沈み込んでしまった. そのため目標段差を乗り越えることはできなかった.

そこで本研究では, この沈み込みを解消するためのそり機構を付加し, 乗り越え機能の向上する機構の開発を行う. また, 新機構を一般的な機構との比較実験より評価する. ここで, 横断歩道と歩道との段差は標準2 cmであることから乗り越える段差高さの目標は3 cmとする. 以下, Fig.2(a)を一般機構, (b)を先行機構と呼ぶ.

2. 提案するそり機構の概要

提案する新機構について説明する. まず, 市販されているシルバーカーは非常にシンプルな構造である. 機構を提案する前提条件として, この利点を損なわない機構とした.

今回提案する新機構のモデルを Fig.2(c)に示す. 新機構では先行機構にスライドするそりのような機構を追加した. そりの段差との接地点が支えとなるため沈み込みを防ぐことができると同時に, そりが段差を滑ることで, 乗り上げも容易になることが期待できる. そりは車体に装着されたレール上を滑る構造となっており, そりの段差との接触面の水平に対する角度を θ とする. 以下, Fig.2(c)をそり機構と呼ぶ.



Fig.1 An example of walker for an aged person

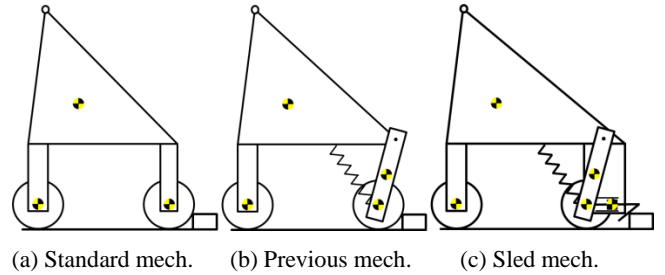


Fig.2 Model of a walker for an aged person

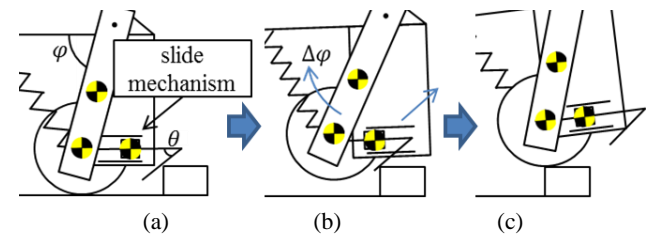


Fig.3 Model of sled mechanism for riding over a step

3. 段差乗り越えの力学的解析

乗り越えの様子を Fig.3 に示す. まず, そりが段差に衝突する(a). 次にそりによる段差の上昇(b), 最後にそりが支えとなり前輪で乗り越える(c). ここで(c)の動作は先行機構での段差乗り越えと同様であるといえる. 先行機構では段差高さ1 cmなら乗り越えが成功することが分かっているため(b)の動作で前輪に対する段差の高さが1 cm以下になるまで上昇させることで段差乗り越えが達成できる. また, この一連の動作の中で, そりの角度 θ が手元への撃力や乗り越えに大きな影響を与えられられる. そこで, そりの角度 θ に注目し, そり機構の段差衝突時の撃力, 及び乗り越えの挙動を力学的に解析する. 理論の結果から目標段差を達成できるか等の優位性を確認する. また, そり機構を設計する際のそりの角度 θ の適切なパラメータの探索を行う.

3.1 撃力の導出

本研究では撃力 ($F\Delta t$) を段差衝突直後 Fig.2(a)に瞬間的に発生する大きな力積と定義し, 手元に発生する撃力を評価する. 前提条件は, そりや車輪は段差や地面から離れないこと, 衝突時間は無限小のためバネの力は発生しないとする.

衝突点回りの角運動量保存則と幾何拘束より, 手元の水平, 鉛直方向の速度 (v_x, v_y) を求め, 衝突直前直後の手元部の運動量の変化を求める. 初速: V , 手元の質量: m_{hand} とした際の手元に発生する撃力を以下のように定義する.

$$F\Delta t = m_{hand} \sqrt{(V - v_x)^2 + v_y^2} \quad (1)$$

3.2 段差上昇の挙動

次にそりによる段差上昇 Fig.2(b)の挙動を確認する。段差衝突直後からそりが段差を登り上がるまでの挙動についてそりと回転リンクの運動方程式として以下に示す。

$$m_1 \ddot{x} = -T_1 \sin \theta - T_1 \mu \cos \theta + T_2 \sin \varphi \quad (2)$$

$$I \Delta \ddot{\varphi} = T_2 b - a k \Delta \varphi - \left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) a g \cos \varphi \quad (3)$$

ここで x : そりの並進運動, $\Delta \varphi$: リンクの回転運動, φ : リンクの角度, $m_{1, 2, 3}$: そり, リンク, 前輪の質量, $T_{1, 2}$: シルバーカーを押すことにより発生する内力, μ : 摩擦係数, a : リンクの長さ, b : そりとの接触点までの距離, k : バネ定数, I : 慣性モーメント, g : 重力加速度とする。シルバーカーを押す力や速度は文献⁽⁴⁾を参考にして決めた。また, 速度の初期値には3.1節で求めた衝突直後の速度を代入することで連続の運動であることを再現した。

3.3 理論の結果

3.3.1 そりの角度と撃力の関係

そりの角度を 20 deg から 50 deg まで変化させながら手元に発生する撃力を Fig.4 に示す。シルバーカーを一定速度 0.65 m/s で押して, 3 cm の段差に衝突することを想定した。Fig.4 よりそりの角度が大きいほど手元の撃力が小さくなるのが分かる。

また, 一般機構において同条件で段差に衝突した際の手元の撃力は 1.29 N・s となり, どのそりの角度においても撃力を大幅に低減させることができる。

3.3.2 そりの角度と段差上昇

前項では撃力を低減させるそりの角度について調査した。しかし, 段差を乗り越えるか否かは求めていない。そのためそりの角度における段差乗り越えの挙動を確認し, 目標段差を達成できる角度を探索する。

歩行速度 0.65 m/s とし水平方向に 15 N, 鉛直方向に 30 N の力で使用者が押すことを想定する。段差高さを 3 cm とし, そりの角度を変化させながら (2), (3) 式でシミュレーションを行った。そりの角度と段差上昇の関係を Fig.5 に示す。ここで, 機構の設計上そりと地面の間を 1 cm 程度あけるため, 上昇距離が 1 cm から始まる。Fig.5 からそりの角度が 20 deg のとき初めて成功することが分かる。

そりの角度が 20 deg のとき目標段差の乗り越えを達成でき, かつ撃力についても大幅に低減させることが分かった。次章では, このパラメータを参考にして実機の製作を行う。

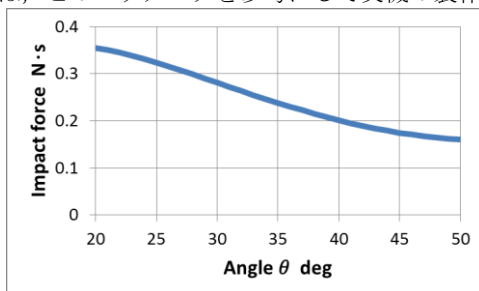


Fig.4 Relationship between angle θ and impact force

4. そり機構の製作

そり機構は市販のシルバーカーの前輪部を改造することで製作した。改造に使用したシルバーカー (ナカバヤシ: RQ シルバーカーニューSP) を Fig.6(a) に示す。なお, シルバーカーの車輪半径は 70 mm, ホイールベースは 400 mm, ハンドルの高さ 930 mm, 重量は 5.2 kg である。Fig.6(b) に製作したそり機構の実機を示す。さらに右図に機構の拡大図を示す。そりのスライド部にはリニアガイドを採用した。シミュレーション結果を参考にそりの角度 θ は 20 deg とした。この実験機を用いて, 提案した機構の有効性を確認する。

5. 一般機構との比較実験

製作した機構の段差踏破機能の検証, および市販のシルバーカーとの撃力の比較を確認, 評価する。

5.1 実験方法

坂道にシルバーカーを置き, 自由落下によって段差に衝突させることで段差を乗り越えさせるという手法を行った (Fig.7)。これにより実験の再現性を高めた。なお, 手の質量としてハンドル部に 2 kg の重りを乗せた。

段差乗り越え機能の検証には段差高さを 5 mm ずつ高くすることで確認する。また, 段差に衝突直前の速度が約 0.65 m/s となるようにシルバーカーを設置した。撃力の測定は高速カメラ (DITECT: HAS-L1), 動作解析ソフト (NAC: MOVIAS Neo) を用いて行う。まずハンドル部に特徴点を付け, これをカメラで撮影し, 解析ソフトで定点追跡を行うことで特徴点の水平, 垂直方向の速度を得る。衝突直前と直後の速度差より手元の撃力を求める。なお, カメラのフレームレートは 1000 fps である。

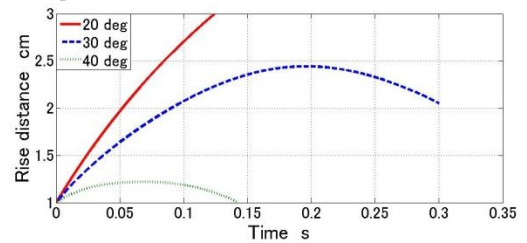


Fig.5 Rise distance of a sled (sled angle is variable)

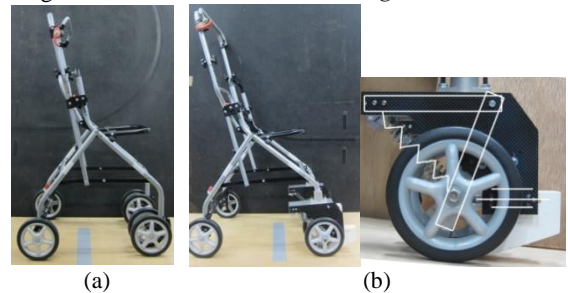


Fig.6 A standard walker mechanism and sled mechanism

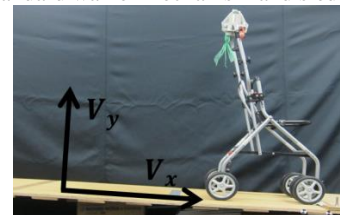


Fig.7 Experimental setup

5.2 段差乗り越え機能の検証

段差高さを 30 mm まで高くしていき、段差乗り越え機能について確認した。まず、一般機構では 15 mm の段差が限界だったのに対して、製作したそり機構では 30 mm の段差までの乗り越えに成功した。

5.3 手元に発生する撃力の比較

前項より市販のシルバーカーが段差 15 mm までしか乗り越えられないことが分かったため、本実験では段差高さを 15 mm に設定した。高速度カメラを用いて取得した段差乗り越え時のハンドル部の速度変化の結果の一例を Fig.8 に示す。なお、斜面に対して平行な方向を V_x 、垂直な方向を V_y とする。Fig.8 より、一般機構、そり機構共に衝突直後に水平方向の速度が急激に落ちているのが分かる。しかし比較するとそり機構のほうが速度変化がなだらかであることが分かる。

衝突直前直後の速度差を用いて求めた手元の撃力を Table 1 に示す。Table 1 より、そり機構では一般機構の撃力の 62% まで減少していることが確認でき、撃力回避にも有効であることが検証できた。また、そり機構において初速 0.65 m/s の撃力の理論値は 0.36 N·s となる。

6. 実環境を想定した段差乗り越え

本章では実際の使用を想定して摩擦と段差乗り越えの関係と荷物を載せた際の影響についてシミュレーションと実験から確認する。

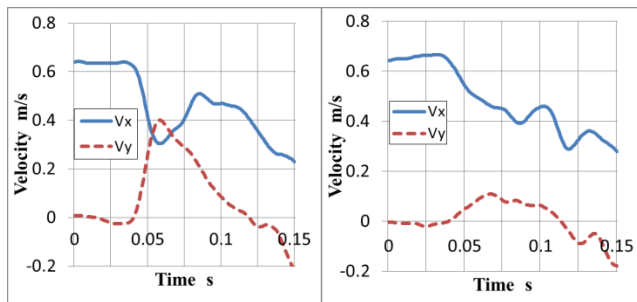


Fig.8 Velocity of the handle of the walker

Table 1 Experimental results of impact force

	Standard mech.	Sled mech.
Average	0.99 N·s	0.38 N·s
Deviation	0.07	0.01

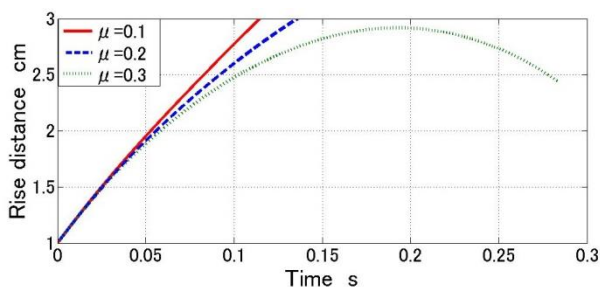


Fig.9 Rise distance of a sled(friction is variable)

6.1 摩擦と段差乗り越えの関係

今回、試作したそりは製作のしやすさの点から 3D プリンターを用いたため、材質は PLA を使用した。日常生活で使用されることを考えると耐久性についても考える必要がある。また、実験装置は簡易に変更ができることから木製のものを使用している。しかし実際はアスファルトなど未知の材質との摩擦になる。そしてそりの接触面と段差との摩擦は段差乗り越えに影響が大きいことが実験から分かった。そこで段差乗り越えが達成できる摩擦係数について確認する。

摩擦係数 μ を変化させて乗り越え時の影響を考える。段差高さ 3 cm の段差上昇のシミュレーション結果を Fig.9 に示す。Fig.9 より摩擦係数が 0.2 まで成功することが分かった。また、学校内のコンクリートにおいてそりとの摩擦を測定した結果、静止摩擦係数は約 0.2~0.3 だった。動摩擦係数は静摩擦係数より小さい値になる傾向があるため、本機構は実環境においても対応できると考える。

6.2 荷重との関係

本節ではシルバーカーに荷物等を積載した際の段差乗り越えの影響を確認する。また、荷重が負荷された際にも簡易に乗り越えられるように車体の重心位置に注目した。重心位置を変化させた際の段差乗り越えの影響、及び乗り越え時の手元に掛かる負荷について確認する。

6.2.1 荷物積載時の段差乗り越え

シルバーカーに付属する荷物入れを利用時の段差乗り越えについて調査する。本実験ではより実際の利用状況を意識し、人が押して段差に衝突させることで行った。また、荷物として想定する荷重は市販されているシルバーカーの積載荷重や文献⁽⁶⁾を参考にして 3 kg、5 kg と設定した。実験の結果、荷重が大きくなるほど乗り越えに失敗することが分かった。

6.2.2 重心位置による影響

段差乗り越えは後輪中心の回転運動となることに注目し、この回転運動に影響が大きいと考えられる車体の水平方向の重心位置を変化させて乗り越えの影響を確認する。その際車体、荷物、手元の質点を合成した点を車体の重心位置とする (Fig.10)。後輪からの重心の水平位置を変化させながら式 (2)、(3) 式でシミュレーションを行った。重り 5 kg、段差高さ 3 cm において後輪からの重心の水平位置と段差上昇の関係を Fig.11 に示す。Fig.11 から重心が後輪から 10 cm の距離までであれば荷重が加わった際にも段差乗り越えが達成できることが分かる。この結果を参考にして次項では実機による実験を行う。

6.2.3 実験方法

前項の結果を参考にして重りを後輪から 5 cm の位置 (後輪部) に設置し、後輪から 20 cm の位置 (中央部) に設置したものと比較実験を行う。

実験は人が押して 3 cm の段差に衝突させることで行った。また、歩行速度が 0.65 m/s となるように意識した。

乗り越え時の手元の最大負荷はハンドル部に六軸力覚セ

ンサ（ワコーテック：WDF-6M200-3）を取り付けて、段差乗り越え時に発生する力データから計測した。今回は進行方向と鉛直方向の2方向の力（ F_x , F_y ）を計測する。取り付けたセンサと、計測する力の関係を Fig.12 に示す。

6.2.4 重りの位置による乗り越え

それぞれの重心位置での段差乗り越え性能について確認した。各位置 10 回行った際の成功率を Table 2 に示す。Table 2 より後輪部に重りを設置すると大幅に成功率が上がり、中央部に設置したものの2倍以上の成功率となった。また、5 kg の重りでの乗り越え成功した内の最低歩行速度を比較すると歩行速度が約 0.1 m/s 減少しても成功することが分かった。

6.2.5 手元に掛かる負荷の比較

ハンドル部に取り付けたセンサで計測した力データから手元の最大負荷を求める。段差衝突後に最大の力が発生したピーク値と、平地で歩行する際にハンドルにかかる力の差を段差乗り越え時に手元に発生する最大負荷と定義した。実験から得られた最大負荷を Table 3 に示す。Table 3 から後輪部では F_x , F_y ともに負荷が減少していることが分かった。中央部と後輪部を比較すると重りの位置が後輪方向に移動するだけで F_y は 18% 減少し、 F_x では 36% 減少することが分かった。段差乗り越え時の負荷は F_y より F_x の値が大きい傾向があるため、重心や荷物の位置を考えることは段差乗り越え時の負荷に対してより軽減効果があると考えられる。

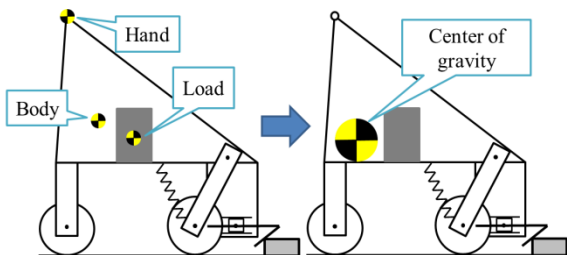


Fig.10 Position of the center of gravity

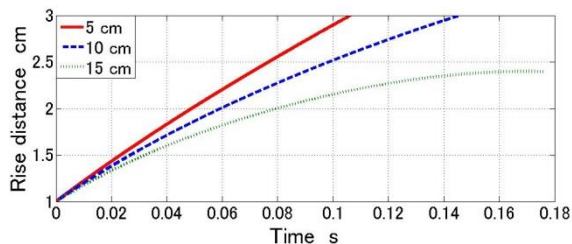


Fig.11 Rise distance of a sled(horizontal gravity position is variable)

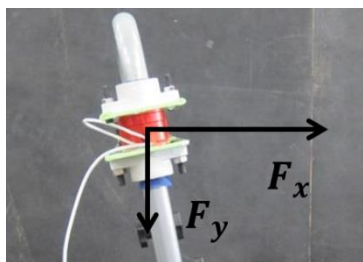


Fig.12 Force sensor and measurement direction of the force

Table 2 Success rate of riding over steps by the position of the load

	3 kg	5 kg
Rear part	90 %	80 %
central part	40 %	20 %

Table 3 Maximal load of riding over steps by the position of the load

	No weight	Rear part	central part	Decrement
F_y N	90.0	72.5	88.4	18 %
F_x N	138.3	101.0	157.0	36 %

また、重りを載せていない場合のほうが大きい値になっているのは軽い分、衝突時に車体全体が跳ね上がってしまうのを抑えるために発生したと考えられる。

7. 結言

シルバーカーが簡易に段差を乗り越えられる機構を提案した。理論から一般機構より撃力を大幅に減少させ、かつ目標段差まで乗り越えられるという結果を得た。

次いで、理論で得られたパラメータを参考にして実機の製作を行い、一般機構との比較実験を行った。実験では一般機構では 15 mm の段差が乗り越え限界だったが、そり機構では目標段差の 30 mm まで乗り越えることが出来た。速度変化より撃力を計測したところ、一般機構から 62% まで撃力を減少させる効果があった。

最後に実際の使用を想定して摩擦や荷重との関係についてシミュレーションや実験を行った。その接触面と段差との摩擦係数が 0.2 以下なら乗り越えに成功することを確認した。また、荷重が加わることで乗り越えづらくなるが重心又は荷物の位置を後輪方向に移動させることで乗り越えやすく、かつ負荷も軽減するという結果が得られた。

以上より、段差乗り越えにおいてそり機構は有効であるという結果を得た。

参考文献

- (1) 崔鎮圭, 朴忠植, 北川貴弘, 中谷幸太郎, 杉井春夫, 段差乗り越え機構の開発とシルバーカーへの応用, 大阪府立産業総合技術研究所報告, No22(2008), pp.53-57
- (2) 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, 国際交通安全学会誌, vol.35, No.2(2010), pp.77-84
- (3) 棚田他, シルバーカーのための衝撃軽減機構の開発, 第31回ロボット学会学術講演会(2013), 3F3-03
- (4) 堀内邦雄, 青木和夫, シルバーカーを押す力の測定, 人間工学, vol.39, No.1(2003), pp.38-41
- (5) 岩村大和, 塩見昌裕, 神田崇行, 石黒浩, 萩田紀博, 高齢者を対象とした買い物支援ロボットの雑談と外観の影響, 日本ロボット学会誌, Vol.31(2013), No.1, pp.60-70