

シルバーカーの段差衝突時における衝撃軽減機構の開発と解析

Development and Analysis of Walker Mechanism for Aged Persons
for Reducing Impact Forces at the Time of Collision with a Step

精密工学専攻 24号 棚田 瑞樹
Mizuki Tanada

1. 研究背景, 及び研究目的

シルバーカーとは, 自立歩行が可能な高齢者が用いる歩行補助具である (Fig.1). 近年, 高齢化が進んでいることから需要も増加傾向にあり, 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)(2).

使用者が増えることでシルバーカーによる事故も増加している (3). 使用者が高齢であることも考慮すると転倒事故などは非常に危険である. その事故の要因の一つである, 段差につまずくことに注目した. そこで本研究では段差衝突時の撃力が少なく, かつ乗り越えのしやすいシルバーカーの開発を行う. また, 開発したシルバーカーを用いて撃力の減少効果, 及び段差乗り越えのしやすさを実験から評価する.

2. 提案する機構の概要

今回提案する衝撃軽減機構について説明する. はじめに, 一般的なシルバーカーは Fig.1 に示したように, 非常にシンプルな製品である. 提案する機構の条件として, この利点を損なわない機構であることを重視した.

一般的なシルバーカーのモデルを Fig.2(a) に, 今回提案する機構のモデルを Fig.2(b) に示す. 衝撃を吸収する安価な材料としてバネに注目した. これを段差から受ける撃力を効率よく吸収できるように, 回転リンクを介して斜めに取り付けた. このリンクの初期角度を φ_0 とする.

以下, Fig.2(a) を従来機構, Fig.2(b) を提案機構と呼ぶ.

3. 段差乗り越えの力学的解析

本章では提案機構の段差衝突の瞬間, 及び乗り越えの挙動を力学的に解析する. 理論の結果から提案機構の優位性を確認する. また, 提案機構を設計する際のバネ (k) やリンクの初期角度 (φ_0) の適切なパラメータの探索を行う.

シルバーカーが段差を乗り越える現象は, Fig.3 に示す



Fig.1 An example of walker mechanism for aged persons

2つのステップを経て行われる. まず, 段差衝突の瞬間に大きな力が発生し, 速度が不連続に変化する (STEP1). 次いで, 前輪が段差の角周りを回転して段差を乗り越える (STEP2). 以下, それぞれのステップについて説明する.

3.1 段差衝突時 (STEP1) について

まず, 段差衝突の瞬間に手元に発生する撃力 ($F\Delta t$) を理論的に求める. 前提条件として, 理論では衝突時間は無限小 ($\Delta t \approx 0$) と考えるため, バネの反力は発生しない. また, 衝突した後に段差を乗り越えるか否かは STEP2 で求めるためここでは考えない.

段差衝突の瞬間の力学モデルの概要を Fig.4 に示す. シルバーカーと人間の腕部まで質点を持ったリンク機構が, 等速直線運動していることを考える (Fig.4(a)). 段差と衝突することで段差の角から撃力を受け (Fig.4(b)), これがリンクを伝わり Fig.4(c) のようにハンドルを持つ手に力積 (T_x, T_y) が発生する. 段差衝突の直前直後において段差角回りの角運動量保存則が成り立つため, 各質点を受ける力積を考慮した角運動量のつり合い式より衝突直後の速度と発生する力積が求まる. 手元に発生した力積の二乗平方和を撃力として定義する ((1) 式).

$$F\Delta t = \sqrt{T_x^2 + T_y^2} \quad (1)$$

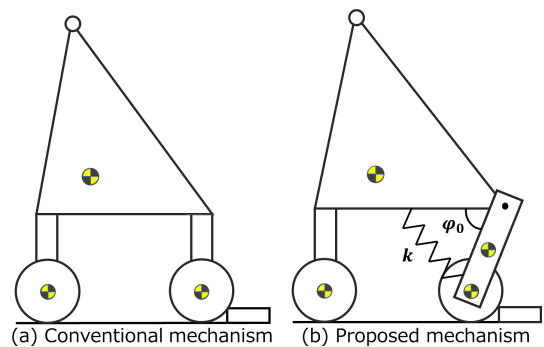


Fig.2 Models of silver walker mechanism

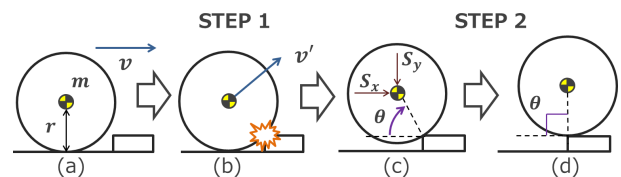


Fig.3 Dynamic model of overcoming a step

3.2 段差乗り越え時 (STEP2) について

次いで、段差を乗り越える挙動を確認する。段差衝突の直後から、前輪が段差の上に来るまで (Fig.3(d)) を θ に関する運動方程式で表す。前提条件として車輪は地面、段差と離れることはなく、滑りも発生しないものとする。なお、 I : 車輪の慣性モーメント、 m : 車輪質量、 r : 車輪半径、 S_x, S_y : ハンドルを押すことで発生する前輪に働く力、である。

$$I\ddot{\theta} = S_x r \sin \theta - (S_y + mg)r \cos \theta \quad (2)$$

(2) 式に与える初期値には 3.1 節で求めた衝突直後の速度を代入し、STEP1 → STEP2 と連続した運動を再現する。なお、高齢者がシルバーカーを押す力や、歩行する速度は文献 (4) を参考に設定する。

3.3 理論の結果

STEP1,2 で得られた結果と、良い結果を与える提案機構のパラメータ (k, φ_0) について以下にまとめる。

3.3.1 リンクの初期角度と撃力の関係

段差から受ける撃力は車軸に向かい、前輪部のリンクを介して手元に伝わる。この時、リンクが回転することで手元に伝わる撃力を減少させるため、提案機構のリンク初期角度と撃力には相関があると予想した。初期角度を 45 deg から 90 deg まで変化させながら、(1) 式から求めた手元に発生する撃力を Fig.5 に示す。シルバーカーは車輪半径 70 mm、重量 5.2 kg と設定した。身長 160 cm、体重 60 kg の人間が一定速度 0.8 m/s でシルバーカーを押して、10 mm の段差に衝突することを想定した。Fig.5 から初期角度 (φ_0) が 65 deg あたりで手元の撃力が最小になることが分かる。

なお、従来機構が段差 10 mm に衝突したときに発生する撃力は 1.1 N·s であり、どのリンク初期角度においても提案機構は大幅な撃力減少効果を得られている。

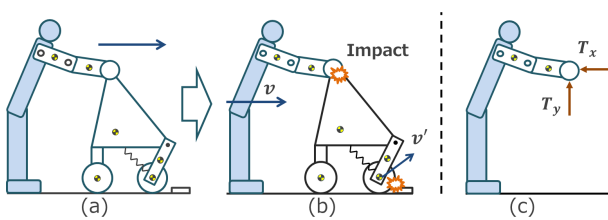


Fig.4 Model of moment at collision a step

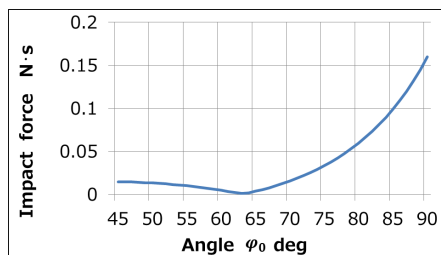


Fig.5 Relationship between angle φ_0 and impact force

3.3.2 段差乗り越えと適切なパラメータの探索

前項では撃力を軽減させるリンクの初期角度について調査した。次いで、段差の乗り越えの挙動を確認し、良い結果が得られるバネ定数と初期角度の両方を決定する。ただし初期角度は、Fig.5 を参考にして値を設定した。

車輪半径 70 mm のシルバーカーを、歩行速度 0.8 m/s で水平方向に 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。1 mm ずつ段差高さを増やしながら (2) 式でシミュレーションを行い、乗り越え可能な最大段差高さを確認した。乗り越え可能な最大の段差高さ、その段差に衝突した時の撃力を Table 1 に示す。結果から、提案機構は従来に比べ撃力を約 98 % 軽減させることが分かった。また、衝突時の運動量損失を減らすことで、従来よりも少し高い段差まで対応できることが分かった。

Table 1 の結果を得られたバネ定数と初期角度は $k=2.0$ N/m、 $\varphi_0=70$ deg であった。このパラメータが撃力の減少効果と段差乗り越え効果の両方において有効であったため、理論から求めた適当なパラメータとする。

4. 提案機構の設計

理論から提案機構の適当なパラメータ (k, φ_0) が求めたので、これを参考に提案機構を設計する。

提案機構は既存のシルバーカーの前輪部を改造することで作成した。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、ハンドルの高さは 900 mm であり、重量は 5.2 kg である。Fig.6(b) に製作した提案機構の実機を示す。右図が前輪部の拡大図であり、内部のリンクとバネを白線で示した。製作に用いたバネは $k = 1.8$ N/m の押しバネを使用し、リンクの初期角度は手元の撃力を少なくするため $\varphi_0 = 70$ deg とした。

Table 1 Comparison of theoretical values

	Maximum height	Impact force
Convention	10 mm	1.1 N·s
Proposed	12 mm	0.015 N·s

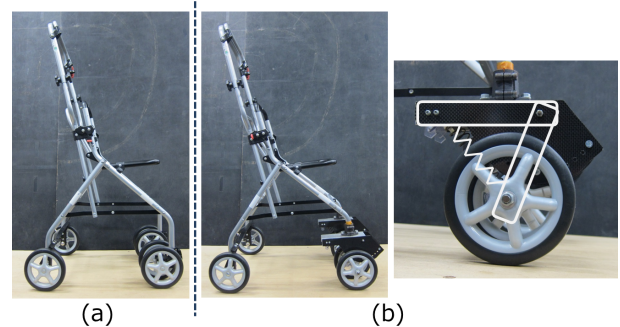


Fig.6 General walker mechanism and proposed mechanism

5. 従来機構との比較実験

本章では乗り越え可能な段差高さとして、手元に発生する撃力がどれくらい軽減できるかを実験から確認する。

5.1 実験方法

実験は Fig.6 に示したシルバーカーを人が押して段差に衝突させることで行った。被験者は健康な 20 代男性 10 人であり、各々が楽な姿勢でシルバーカーを押し、2 m 先の段差に衝突してもらった。

乗り越え可能な最大段差高さは段差を 5 mm ずつ高くすることで、どこまで乗り越え可能かを確認した。撃力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、段差の衝突時にハンドル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、計測する力方向の関係は Fig.7 に示す。

5.2 乗り越え可能な段差高さの確認

それぞれの機構で乗り越えられる最大の段差高さを調査した。従来機構は被験者全員が 10 mm の段差が乗り越え限界であったのに対して、提案機構は全員が 15 mm の段差を乗り越えた。また、10 人中 8 人の被験者は 20 mm の段差を乗り越え可能であった。

5.3 手元に発生する撃力の測定

ハンドル部に取り付けたセンサで計測した力データの一例を Fig.8 に示す。Fig.8 ではどちらも 4 s あたりで段差に衝突することで、瞬間的に大きな力が発生している。しかし、例えば鉛直方向の力に注目すると、従来機構は段差衝突時に約 110 N の大きな力が発生しているのに対し、提案機構は約 70 N の少ない力で済んでいる事が分かる。

段差衝突直後に最大の力が発生したピーク値 (F_{xp}, F_{yp}) と、平地を押す際にハンドルにかかる力 (F'_x, F'_y) の差を衝突時に発生する大きな力とし、実験値から得る撃力を (3) 式のように定義した。なお、衝突時間 (Δt) は 0.02 s とした。

$$F\Delta t = \sqrt{(F_{xp} - F'_x)^2 + (F_{yp} - F'_y)^2} \Delta t \quad (3)$$

10 人分の力データから (3) 式で撃力を計算し、それらの平均値を撃力の実験値とした。実験結果を理論値と合わせて Table 2 に示す。Table 2 より実験、理論共に従来機構より撃力を減らすことが出来たが、減少の割合は理論と差が大きいという結果を得た。この原因として、理論では衝

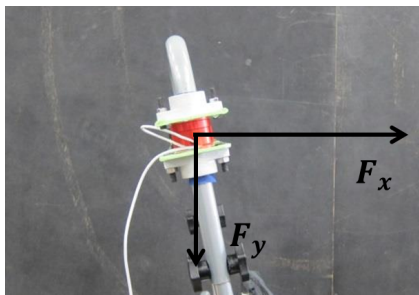


Fig.7 Force sensor and measurement direction of force

突時間 (Δt) を無限小と捉えているため、バネの影響を無視していることが挙げられる。実際に衝突する際にはバネの反力が手元に発生し、理論値よりも大きな撃力が発生したと考えられる。

6. 段差乗り越え時の手先インピーダンスの解析

5.3 節では段差衝突の瞬間のみに注目し、撃力の評価を行った。しかし、段差乗り越え全体の評価を行うためには、衝突の瞬間だけではなくその後の挙動も考える必要がある。そこで、本章では撃力も含めた段差乗り越え全体の挙動について解析を行うことを目的とする。

段差乗り越えのしやすさはシルバーカーだけでなく、使用者も含めた運動によって変化する。文献 (5) より人間の筋骨格系に粘弾性があり、多関節運動のインピーダンス特性を推定することが可能であることが分かっている。本章ではシルバーカーのハンドルを握る手先のインピーダンスを調査する。段差衝突から有限の衝突時間を設定することで、撃力も含めた段差乗り越え中の手元の様子を確認する

6.1 手先インピーダンスの記述

衝突の瞬間の人間の手先運動のインピーダンスモデルを推定するために、ハンドルを握る腕部の力学モデルを Fig.9 に示す。Fig.9 においてシルバーカーが段差に衝突することで、手元のハンドルに変位 x と力 F が発生する。このインピーダンスモデルは式 (4) のように書ける。本来、手先インピーダンスである M, B, K は時々刻々と変化するものだが、衝突乗り越えという極めて短い時間において各値は一定と近似する。なお、 x_v は手先の平衡点 (仮想軌道) である (6)。

$$M\ddot{x}(t) + B\dot{x}(t) + K(x(t) - x_v(t)) = -F(t) \quad (4)$$

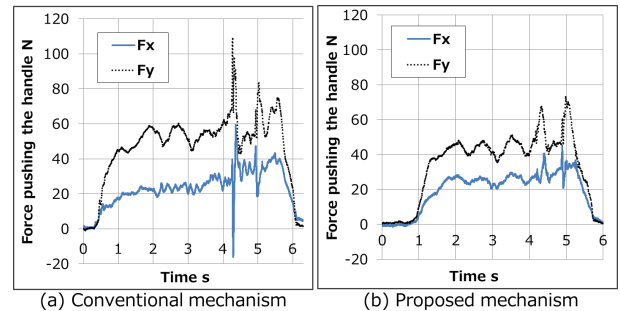


Fig.8 An example of measurement force data

Table 2 Experimental values and theoretical values of impact force

	Conventional	Proposed	Decrement
Experimental value [N·s]	0.88 ± 0.27	0.42 ± 0.39	52 %
Theoretical value [N·s]	1.1	0.015	98 %

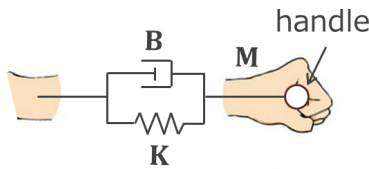


Fig.9 Description of hand impedance in infinitesimal movement



Fig.10 Attitude of pushing walker mechanism for aged

6.2 インピーダンス推定のための実験

手先インピーダンスの推定を行うためには、ハンドル部の位置情報と力情報の時系列データが必要となる。高速カメラ(ディテクト: HAS-L1)でハンドル部を撮影し、動作解析ソフト(ナックイメーজテクノロジー: MOVIAS Neo)で定点追跡を行うことで、位置、速度、加速度を得る。段差乗り越えの瞬間においてハンドル部は山なりの軌道を描く。鉛直方向にハンドルが上昇した瞬間から、元の高さに戻るまでの時間を段差乗り越えに要する時間と設定した。力情報は5.1節で述べた力覚センサで計測する。センサのサンプリングタイムはどちらも1000 Hzである。

被験者は20代男性一人であり、Fig.10のように肘を伸ばして、毎回同じ姿勢でシルバーカーを押すよう意識して実験を行った。乗り越える段差高さは10 mmである。実験から得た $\ddot{x}(t)$, $\dot{x}(t)$, $x(t)$, $F(t)$ を用いて、(4)式より最小二乗法からパラメータ M , B , K の推定を行う。

6.3 パラメータの推定結果

段差乗り越えに要する時間を従来機構は0.10 s、提案機構は0.13 sと設定し、その間の時系列データを用いてパラメータ推定を行う。進行方向(x)と鉛直方向(y)それぞれの推定結果をTable 3に示す。

進行方向においては、提案機構は粘性と剛性の値が下がる傾向が得られた。提案機構ではバネが撃力を吸収するため、従来よりも段差衝突時に受ける力が小さい。そのため、使用者への負担が少なくシルバーカーを押す人間側の筋骨格の粘弾性が低下したと考えられる。

一方で、鉛直方向では剛性が大きく上がる傾向が見られた。これはシルバーカーに対して鉛直方向に体重を預けていることが原因であると考えられる。今回の実験ではFig.10に示すように、もともと鉛直方向への剛性が高い持

Table 3 Estimated parameters of value

		M [kg]	B [Pa-s]	K [N/m]
Conventional	x	0.32 ± 0.01	98 ± 1	6800 ± 55
	y	0.66 ± 0.01	67 ± 1	2300 ± 45
Proposed	x	0.19 ± 0.02	59 ± 0	980 ± 390
	y	0.63 ± 0.01	17 ± 1	9000 ± 85

ち方をしている。従来機構ではこの剛性を下げることで、鉛直方向の変位を増やして段差を乗り越えていると考えられる。これに対して、提案機構では前輪部のリンクが変位する分人間側の姿勢の変化が少なく、高い剛性を維持したまま段差を乗り越えることが出来たと考えられる。

7. 結論

シルバーカーが段差に衝突した時の撃力を軽減させる機構を提案した。理論から撃力を98%軽減するという結果を得た。シミュレーションで乗り越え可能な段差を求めたところ、従来機構では10 mm、提案機構は12 mmまで乗り越え可能であった。

次いで、理論で良い結果が得られたパラメータを参考に実機の製作を行い、比較実験を行った。実験では従来機構では10 mmの段差が乗り越え限界のところ、提案機構は被験者全員が15 mmの段差を乗り越えることが出来た。力覚センサで撃力を計測したところ、従来機構に対して約50%の撃力軽減効果を得られるという結果を得た。

最後に、衝突時間も考慮した撃力および段差乗り越えのしやすさの評価方法として、手先インピーダンスの推定を行った。推定結果より、進行方向の粘弾性が大きく低下し、鉛直方向に関しては高剛性を保ったまま段差を乗り越えられるという結果が得られた。

以上より、実験からも段差衝突の瞬間、及び乗り越え中の両方において提案機構が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, 大阪府立産業技術総合研究所報告, No22(2008), pp.53-57
- (2) 唐澤祐太, 山根悟史, 林憲玉, 歩行アシストを目的とした電動シルバーカーの開発, 日本機械学会次大会講演論文集, No.8(2008), pp.203-204
- (3) 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
- (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) 辻敏夫, 後藤和弘, 伊藤宏司, 長町三生, 姿勢維持中の人間の手先インピーダンスの推定, 計測自動制御学会文集, vol.30, No.3(1994), pp.319-328
- (6) 辻敏夫, 野口裕史, 金子真, 仮想キャッチング動作における人間の作業インピーダンスの解析, 計測自動制御学会, Vol.37, No.8(2001), pp.770-776