

シルバーカーの段差衝突時における腕の力と衝撃力の関係の解析

Analysis of relationship between arm joint stiffness and impact force generated by collision between a wheeled walker and a step

精密工学専攻 38号 須田 瑞生
Mizuki Suda

1. 序論

近年、日本では少子高齢化が進んでいる。高齢者の増加と共に要支援・要介護認定を受ける人の数も増加しているが、介護可能な若者が減少しており、介護者の人材不足が社会問題となっている。

また、高齢化に伴い、足腰の衰えた高齢者が歩行時の杖代わりや休憩する際の椅子代わりに利用する歩行補助具であるシルバーカーの種類や販売台数が増加している。しかし、シルバーカーの需要が増加する一方で、シルバーカーに関連する事故も増加している。その事故のうち、90%がつまずいたりバランスを崩したりすることにより転倒し怪我をした事例である[1]。

路面の段差に車輪が衝突した際に発生する大きな衝撃力は、転倒を引き起こす大きな要因と考えられる。そして、転倒は高齢者が要介護者になってしまう原因の一つでもあるため、シルバーカーの使用による転倒を防ぐことが社会問題の解決に繋がると考える。

シルバーカーの使用による転倒防止に関わる先行研究として、シルバーカーの段差乗り越えに関する研究が行われている[2]。これはシルバーカーの段差の乗り越えと段差衝突時の衝撃力の低減を目的として行われた研究で、前輪にそり機構を付けることで、3cmまでの段差の乗り越えと、一般機構より衝撃力を減少することが可能となった。

また、衝撃力を事前に評価できれば転倒防止の機構設計にも資することができる。シルバーカーの段差衝突時の腕の姿勢と衝撃力の関係のモデル化の研究が先行研究として行われており、腕を曲げた状態であれば3リンクのモデルで説明できることが判明した。このとき腕に力を入れない条件で実験が行われたが、実際にシルバーカーを使用する際は腕に力を入れて使用するため、腕の力を入れた場合についても考慮する必要がある。そこで本研究では、シルバーカーの段差衝突時の腕の力と衝撃力の関係のモデル化を行う。

2. 画像からの衝撃力導出方法

2.1. 腕の3リンクモデル

シルバーカーの前輪が路面の段差に衝突した際の手先にかかる衝撃力の画像からの値を導出するため、腕を3リンクのマニピュレータに近似した(Fig.1)。 l_i は腕や手をリンクとした時の第*i*リンクの長さ、 m_i はその質量[3]、 a_i は各リンク根元側関節と重心間の距離、 I_i はリンクの重心回りの慣性モーメントである。

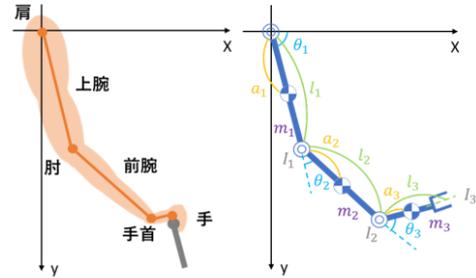


Fig.1 3 link model of human arm

2.2. 腕に発生する撃力

マニピュレータのヤコビ行列を J とすると、動力学方程式は式(1)と表すことができる。

$$\tau = H\ddot{\theta} + h(\dot{\theta}, \theta) + g(\theta) - J^T F \quad (1)$$

また、

$$\dot{x} = J\dot{\theta}, \quad \ddot{x} = J\ddot{\theta} + \dot{J}\dot{\theta}, \quad \tau = J^T f \rightarrow \ddot{\theta} = J^{-1}(\ddot{x} - \dot{J}\dot{\theta}) \quad (2)$$

が成立するので、これを式(1)に代入すると式(3)のようになる。

$$f = J^{-T} H J \ddot{x} - J^{-T} \dot{H} J \dot{x} + h(\dot{\theta}, \theta) + g(\theta) \quad (3)$$

ここから、式(4)に示す実慣性行列 M が求まる。

$$M = J^{-T} H J^{-1} \quad (4)$$

衝突時のマニピュレータ手先の等価質量は、実慣性行列 M から求めることができる。

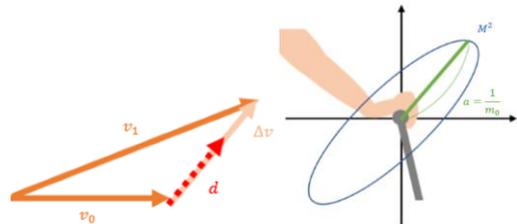


Fig.2 Minion speed

Fig.3 Ellipsoid M^2

衝突時の手先の速度 v_1, v_0 から式(5)より求まる速度差 Δv と同方向に取った単位ベクトルを d とする(Fig.2)。

$$\Delta v = v_1 - v_0 \quad (5)$$

その方向における質量 m_0 は、 f の絶対値を 1 とした時の M^2 の楕円 (Fig.3) と d 方向の交点と原点の長さの逆数として、式(6)と求まる。

$$m_0 = \sqrt{d^T M^2 d} \quad (6)$$

マニピュレータの手先にかかる衝撃力 F は速度差 Δv を用いて、

$$F = m_0 \Delta v \quad (7)$$

と表すことができる。

3. 実験

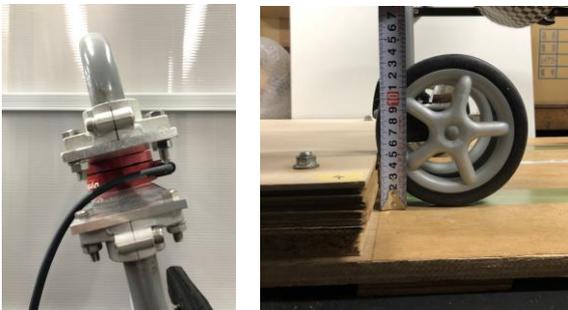
3.1. 衝撃力測定実験

実験装置の全体図を Fig.4 に示す。男性の健常者 1 名(23 歳, 身長 173cm)を対象とし, Fig.5 のように取手部分に 6 軸力覚センサを取り付けた市販のシルバーカー(前輪半径 7cm)を, 段差の 120cm 手前から押し, 約 5cm の段差にできるだけ同じ速度で衝突させ, 手元にかかる衝撃力を測定した。段差と前輪の側面の拡大図を Fig.6 に示す。

また, 同時にその様子を高速度カメラで撮影した。高速度カメラで腕の関節とシルバーカーに取り付けたマーカー計 6 点を追跡し, 腕の速度や角度を元に 2 章の式から衝撃力を算出した(Fig.7)。その際, カメラのレンズが実験対象者やシルバーカーの側面と平行となる向きにし, 撮影したい範囲が全て写る距離, 高さ tripod で固定して撮影した。



Fig.4 Overall view of devices



(Left) Fig.5 6-axis dynamic sensor attached to handle

(Right) Fig.6 Front wheel and step dimensions

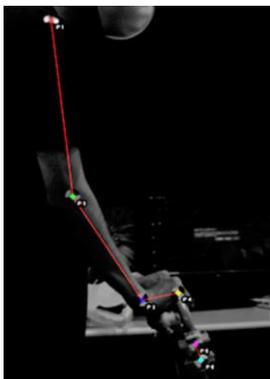


Fig.7 Image of high-speed camera and 6 markers

(A)自然な姿勢で力を入れない状態, (B)自然な姿勢で腕に力を入れ関節を固定した状態の 2 通りの姿勢で各 5 回ずつ実験を行った。高速度カメラの画像解析で得たデータから計算した衝撃力の計測値と, 力覚センサで測定したデータから得た衝撃力の計測値を比較した。

今回の実験で使用した機器等は以下の通りである。なお, 6 軸力覚センサに関しては, 前半の実験では DynPick : WDF-6M200-3 を使用し, 後半の実験ではセンサの故障, および同型の生産終了のため, 新たに DynPick : WEF-6A200-4-RCD-B を使用した。

- ・シルバーカー
ナカバヤシ:RQ シルバーカーニューSD(前輪半径 7cm)
- ・6 軸力覚センサ
ワコーテック社製 DynPick:WDF-6M200-3(前半)
ワコーテック社製 DynPick: WEF-6A200-4-RCD-B(後半)
- ・高速度カメラ(ディテクト社 HAS-L1)
- ・板で作った段差(約 5cm)
- ・画像解析ソフト(ディテクト社 Dipp-Motion V Ver1.1.33)

3.2. 実験結果

段差衝突時の衝撃力を解析したところ, 同じ条件ではほぼ同じ結果を得たため, (A), (B) における代表的な結果をグラフと表で示す(Fig.8, Fig.9, Table.1)。Fig.8 では 8~9 秒付近, Fig.9 では 7~8 秒付近で段差に衝突している。

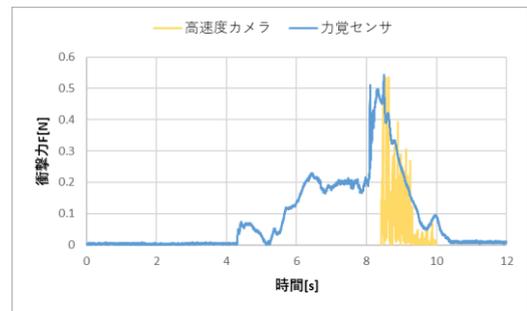


Fig.8 Impact force of (A)

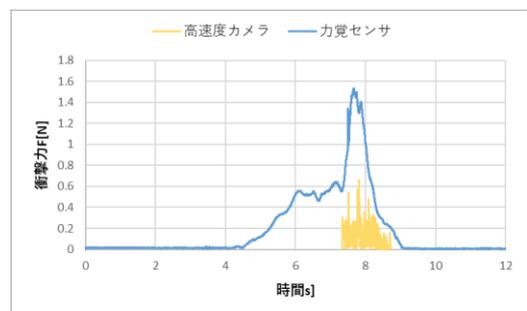


Fig.9 Impact force of (B)

Table.1 Summary of analysis results

	(A)	(B)
Impact force of sensor value [N]	0.544	1.29
Impact force of image value [N]	0.536	0.464
Relative error [%]	1.66	177
Equivalent mass of sensor value [kg]	2.53	6.49
Equivalent mass of image value [kg]	2.49	2.34

衝突前後にセンサの値が出力されている部分があるが、これは助走または衝突後の挙動による振動によるものである。以降全てのグラフにおいてこのことが言える。

(A), (B) において衝撃力 F の大きさを比較すると、センサの値は(A)<(B)、画像からの値は(A)≒(B)となった。また、(A)ではセンサの値と画像からの値がほぼ同じ値となったが、(B)では画像からの値がセンサの値を大きく下回った。つまり、(B)のセンサの値のみ大きくなり、ほかの値はあまり変化しなかったことが分かる。

次に、(B)でセンサの値のみが大きくなった原因を調べるため、等価質量 m_0 を導出し解析した。等価質量 m_0 は2.2節の式(7)から導出できるが、衝撃力 F と速度差 Δv のベクトルの方向は等しいため、値の大きさをを用いて計算を行った。ただし、 Δv の大きさはセンサでは計測不能なため、画像からの値を用いて計算を行った。その結果、等価質量 m_0 の大小関係も衝撃力 F と同様であることが分かった。

3.3. 新センサによる再実験および手首の角度による実験

これまで使用してきた力覚センサが故障したため、同じメーカーの新しいセンサを購入し使用することとした。センサ自体の大きさ、重さは旧センサより大きくなった(Table.2)が、衝撃力の測定に影響のない範囲である。また、その他のパラメータについては旧センサとほぼ同じである。

Table.2 Parameter of two 6-axis force sensors

	WDF-6M200-3	WEF-6A200-4-RCD-B
External dimensions [mm]	φ 50×H28	φ 80×H32.5
Weight [g]	120	380

また、手首の角度によって段差衝突時の手元の挙動が変化するため、それによって衝撃力や等価質量が変化するのではないかと考えた。そこで、前回の実験と同様の手法で新しい力覚センサで(A), (B)の2通り、および(C)手首を下向きにして腕を固定した姿勢、(D)手首を上向きにして腕を固定した

姿勢の計4通りで実験をそれぞれ5回ずつ行った。

3.4. 実験結果

段差衝突時の衝撃力を解析したところ、同じ条件ではほぼ同じ結果を得たため、まず(A), (B)における代表的な結果をグラフと表で示す(Fig.10, Fig.11, Table.3)。Fig.10では8~9秒付近、Fig.11では12~13秒付近で段差に衝突している。

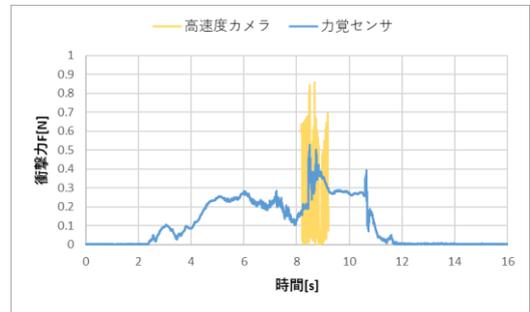


Fig.10 Impact force of (A)

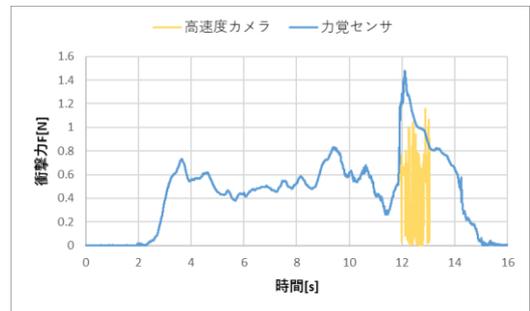


Fig.11 Impact force of (B)

Table.3 Summary of analysis results of (A),(B)

	(A)	(B)
Impact force of sensor value [N]	0.528	1.48
Impact force of image value [N]	0.859	1.15
Relative error [%]	-38.6	27.7
Equivalent mass of sensor value [kg]	1.85	4.23
Equivalent mass of image value [kg]	3.01	3.32

(A), (B)において衝撃力 F の大きさを比較すると、センサの値は(A)<(B)、画像からの値は(A)≒(B)となった。また、(A)では画像からの値がセンサの値を上回り、(B)ではセンサの値が画像からの値を若干上回る結果となった。旧センサの(A), (B)と比較すると、センサの値は(A), (B)ともに変化しないのに対し、画像からの値が(A), (B)ともに大きくなったことがわかる。旧センサの実験結果と異なる原因は、センサを変えたことによる影響ではなく、高速度カメラに問題がある

と考えられる。

次に(C), (D)における代表的な結果をグラフと表で示す(Fig.12, Fig.13, Table.4). Fig.12 では10~11秒付近, Fig.13では7~8秒付近で段差に衝突している。

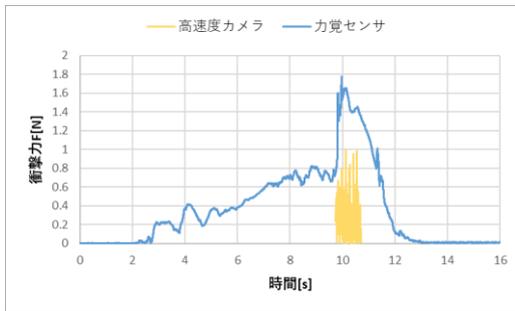


Fig.12 Impact force of (C)

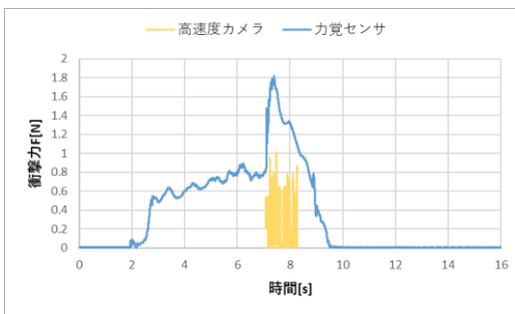


Fig.13 Impact force of (D)

Table.4 Summary of analysis results of (C),(D)

	(C)	(D)
Impact force of sensor value [N]	1.78	1.82
Impact force of image value [N]	1.00	1.01
Relative error [%]	77.7	79.5
Equivalent mass of sensor value [kg]	5.74	5.29
Equivalent mass of image value [kg]	3.23	2.95
Difference of speed on hand $ \Delta v $ [m/s]	0.310	0.344

(C), (D)において衝撃力 F の大きさを比較すると、センサの値、画像からの値ともに(C) \approx (D)となった。また、(C), (D)ともにセンサの値が画像からの値を上回っており、センサの値と画像からの値の相対誤差もあまり変化はなかった。また、衝突の瞬間前後の速度差 Δv の大きさを調べると、(C), (D)であまり変化はなかった。つまり、衝突後の挙動の違いによる衝撃力、等価質量ともに変化はないことが分かった。

また、旧センサを使用した(B)の結果と比べると、センサの値と画像からの値の大小関係は同じであるが、今回の(C), (D)はセンサの値、画像からの値ともに大きい値となった。

4. 考察

以上の衝撃力と等価質量の結果から、(B)においてセンサの値のみが変化した原因は以下2点が考えられる。1つ目は、関節が固定されたことにより2本のリンクが1本のような状態にモデル自体が変化し、等価質量も変化したため、センサの値が変化したと考えられる。2つ目は、3リンクという前提で画像からの値を導出している上、高速度カメラでは腕の力を考慮して計算することができないため、画像からの値は変化しなかったと考えられる。

また、(C), (D)において、手首の姿勢や衝突後の挙動の違いによる衝撃力や等価質量の変化は見られなかった。このことから、手首の姿勢や衝突後の挙動は等価質量と関係がないと考えられる。

さらに、(A), (B)において高速度カメラの値が新旧で異なった原因は、計算に利用したサンプリングタイムが違っていった可能性や、そもそも手首姿勢や腕への力の入れ方が毎回同じではなかった可能性が考えられる。

5. 結論と今後の課題

本研究では、シルバーカーの段差衝突時の腕の力と衝撃力の関係のモデル化を目的として、人間の腕をマニピュレータに近似し腕の力の入れ方から理論的に衝撃力を算出する手法を取り、画像からの値とセンサの値を比較した。その結果、腕に力を入れない状態では、腕を3リンクのマニピュレータに近似することで理論的に衝撃力を求められることがわかった。一方で、腕に力を入れ関節を固定した状態では、その手法では大きな誤差が生じてしまうため、今後は各関節をそれぞれ固定した2リンクもしくは1リンクのマニピュレータとしてモデル化を行い、どのモデルがセンサの値に最も近くなるかを検証する必要があると考える。

また、今回は高速度カメラの不具合により新旧で異なる結果が出たため、原因を究明・解決し新センサを使用した実験でも今回の手法が適用されるか改めて検証する必要があると考える。

参考文献

- [1]安心院他, 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, pp77-84, 2010.
- [2]角田郁弥, 棚田瑞樹, 小野学, 田村雄介, 大隅久, シルバーカーのための段差乗り越え機構の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 2A1-107.
- [3]望月弘彦, 総論 身体計測の方法, 日本静脈経腸栄養学会誌, vol. 32, No. 3, pp1137-1141, 2017.