

角運動量に注目したつまずき転倒回避動作の解析

Analysis of the fall avoidance motion focusing on the angular momentum induced by tripping during gait

西崎碧人 (名古屋大) ○正 秋山靖博 (名古屋大)
正 岡本正吾 (名古屋大) 正 山田陽滋 (名古屋大)

Aoto NISHIZAKI, Yasuhiro AKIYAMA,
Shogo OKAMOTO, and Yoji YAMADA, Nagoya University

Fall is one of the greatest causes of nursing care for the elderly. Thus, the reduction of fall injury of the elderly is required. In some previous researches on trip, angular momentum is used as an evaluation parameter. However, the relation between fall avoidance motion and angular momentum is not focused. Thus, in this research, we focus on angular momentum as an index of fall evaluation. To reveal the influence of angular momentum on fall avoidance motion, angular momentum is increased in different ways. One is attaching weights to subject and another is having subjects walk faster and the other is pulling subject from the front. The result suggested that the trend of reaction motion differed among conditions. However, there are some common feature among the reaction motion of these conditions according to the analysis of correlation coefficients

Key Words: Fall avoidance motion, Tripping, Angular momentum

1 緒言

超高齢社会の日本においては、高齢者の生活の質を維持するための転倒回避動作の解明が求められている。転倒を引き起こす代表的な外的な要因として、躓きによる転倒が挙げられる [1][2]。これまでも転倒に関する研究は多く行われてきた。しかし、転倒回避動作を決定するパラメータははまだ解明されていない。これまでの転倒動作の研究では回復脚を素早く動かす必要性や転倒の有無と下肢の筋力の関係など様々な側面から解析が行われてきた [3][4]。しかし、角運動量の視点から転倒回避動作の解析が行われていなかった。そこで、本研究では、転倒時の角運動量に注目し転倒回避動作にもたらす影響をみることを目的とした。

2 実験概要

2.1 歩行・つまずき誘発装置

任意のタイミングで外乱を印加し、トレッドミル歩行中の実験参加者のつまずきを誘発する実験系を開発した。本実験系の概略を図 1 に示す。左右それぞれのベルト速度が制御可能なトレッドミル (大武・ルート工業社製) および歩行転倒誘発装置 (イー・バレイ社製) に速度指令値を入力する。なお、つまずき転倒誘発装置は直径 5 cm のアルミニウム製の円筒と、それを矢状面で水平に動かすためのリニアスライダで構成されている。さらに、一般的な若年層のつま先クリアランスに基づいて、円筒に高さ 15 cm のプレートを設置した。障害物はトレッドミルと同一の速度で動作する。なお、つまずきタイミングの予測を防ぐために、下半分が覆われたゴーグルを着用させて障害物の動きが視界に入らないようにし、イヤホンによりノイズを聞かせ、その上からイヤーマフを着着させることで障害物が稼働する際のモーター音が聞こえないようにした。また、視認可能範囲の中央に目印を置き、注視するよう促すことで歩行のふらつきを防いだ。

本研究では、健康な男性 5 名 (年齢 23.7 ± 0.5 歳, 身長 174.0 ± 5.6 cm, 体重 66.2 ± 6.1 kg) を被験者として実験を行った。4つの条件の下で各条件 6 回ずつ、計 120 回の試行を行い、Elevating strategy の動作が行われた試行を対象に解析した。本実験は名古屋大学工学部倫理部会の許可のもとに行った。

2.2 歩行・つまずき誘発装置

本実験では実験者が設定する任意のタイミングでつまずきを誘発させる。その手法は次の通りである。トレッドミル上で実験参加者が条件に応じた速度で歩行を開始する。ランダムに 5 秒 ~ 20 秒経過後に実験者が入力するトリガー後から 5 周期目までの歩行周期と障害物が接触する高さの下肢部位置の平均値を取得

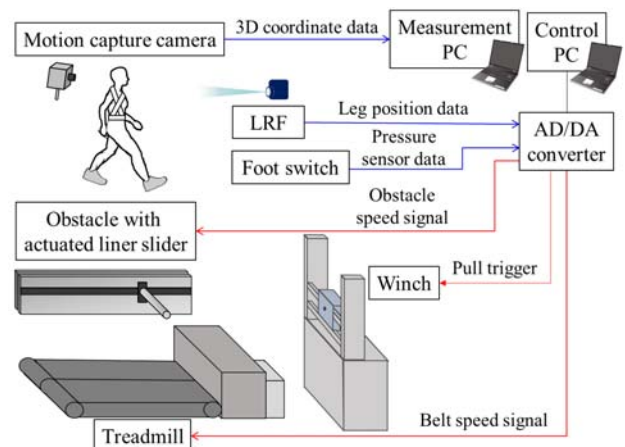


Fig.1 Overview of fall experiment system

する。同時に、それらを基にして障害物初期位置から所望のタイミング時の下肢部位置を推定し、障害物を稼働する時間を算出する。リニアスライダおよびワイヤ巻き取り装置の起動時間を考慮した上で 6, 7, 8 周期目のどの周期の間で外乱を起こすか決定する。決定された周期の中のあらかじめ設定した条件のタイミングに外乱が印加される。なお障害物は相対速度を 0 にするため駆動開始後ベルトと同速度で運動する。以上の内容がトリガー入力後から自動的に行われる。概要を図 2 に示す。

2.3 動作計測

光学式のモーションキャプチャシステム Motive (OptiTrack 社製) を用いて外乱時の反応動作を 8 台のカメラを使用して計測した。被験者の骨格モデル作成のために肘, 手首, 膝, 踝の内側を含め計 32 箇所計測用マーカーを貼り付け T ポーズの計測を行った。転倒動作計測時は内側のマーカー 8 個を取り外し, 計 24 箇所計測用マーカーを貼り付けた状態で計測を行った。本実験における計測用マーカーの貼り付け位置および貼り付け箇所の名称を表 1 に示す。

2.4 角運動量の計算手法

モーションキャプチャによって得た座標データと、実験参加者の身長・体重を基に 17 リンクモデルを作成した。各セグメントを

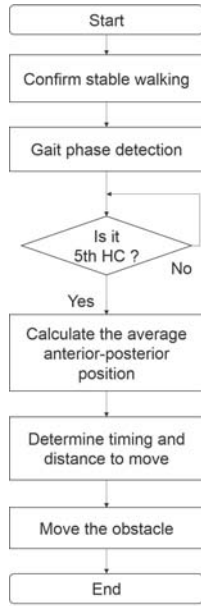


Fig.2 Flowchart of inducing trip

Table 1 Marker positions

Number	Name	Number	Name
1	Front.Head	13	L.PSIS
2	Rear.Head	14	R.PSIS
3	Top.Head	15	L.Trochanter
4	L.Shoulder	16	R.Trochanter
5	R.Shoulder	17	L.Knee
6	L.Elbow	18	R.Knee
7	R.Elbow	19	L.Ankle
8	L.Wrist	20	R.Ankle
9	R.Wrist	21	L.Toe
10	Sternum	22	R.Toe
11	L.ASIS	23	L.Heel
12	R.ASIS	24	R.Heel

表 2 に示す。物体の角運動量は、物体が基準点を中心に回転する大きさと方向を表すベクトル量である。 i 番目の部位の角運動量 \vec{L}_i は、自身の重心 (CoM: center of gravity) を中心に回転する角運動量 $\vec{L}_{i,local}$ と、全体の CoM と各部位の CoM の相対的な運動による角運動量 $\vec{L}_{i,transfer}$ の合計として計算される。全体の角運動量はこれら各部位の角運動量の合計である。それぞれの計算式を式 (1)、式 (2)、式 (3) に示す。

$$\vec{L}_{i,local} = I_{CoM_i} \vec{\omega}_i \quad (1)$$

$$\vec{L}_{i,transfer} = \vec{r}_i \times \vec{p}_i = \vec{r}_i \times m \vec{v}_i \quad (2)$$

$$\vec{L}_i = \vec{L}_{i,local} + \vec{L}_{i,transfer} \quad (3)$$

Table 2 Name of 17-segments

Number	Name	Number	Name
1	R.Thigh	10	L.Upperarm
2	R.Shank	11	L.Forearm
3	R.Foot	12	L.Hand
4	L.Thigh	13	Pelvis
5	L.Shank	14	Trunk
6	L.Foot	15	Abdmn
7	R.Upperarm	16	Neck
8	R.Forearm	17	Head
9	R.Hand		

ここで $\vec{\omega}_i$ は各部位の CoM の角速度と方向を表すベクトルであり、 \vec{r}_i は全体の CoM から各部位の CoM への距離と方向を表すベクトルであり、 \vec{v}_i は各部位の CoM の速度と方向を表すベクトルである。

2.5 実験条件

角運動量による転倒回避動作への影響を確認するため、角運動量の大きさおよび与え方を変えた 4 つの条件を用意した。

条件 1 は通常条件とし、被験者に特殊な条件を設定せず、3.6 km/h でトレッドミル上を歩行中に障害物によって転倒を誘発するものである。条件 2 は引っ張り条件とし、被験者が障害物と衝突する瞬間にワイヤで前方から約 90 N の力で 105 ms 引っ張る条件である。条件 3 は速度条件とし、被験者が通常転倒の条件よりも速い 4.2 km/h で転倒を誘発する条件である。条件 4 はおもり条件とし、被験者に約 10 kg のおもりを装着させ、通常転倒と同様に 3.6 km/h で転倒を誘発する条件である。

通常条件および速度条件の歩行速度は予備実験により決定した。予備実験では健康成人男性 3 名にトレッドミル上を歩行してもらい、ベルト速度を徐々に上げ、恐怖または不快を感じる速度に達した段階でベルト速度を下げ、不快を感じた段階でベルト速度をまた上げていき、これを 3 回繰り返す実験を行った。その際に報告された下限、上限の速度を被験者の平均をとり、歩行速度を決定した。

おもり条件は被験者の重心の近くにおもりを装着することで疑似的に被験者の質量を増加させ、転倒の瞬間に生じる慣性を大きくすることで前方への角運動量を増加させる目的がある。速度条件は被験者の歩行速度を大きくし、障害物との接触時の被験者の回転方向の速度を増加させることで前方への角運動量を増加させる目的がある。引っ張り条件は転倒の瞬間に引っ張ることで前転モーメントを増加させ、前方への角運動量を増加させる目的がある。

条件を設定する上で、通常時の角運動量、おもり・速度の条件で増加させた角運動量および引っ張りの条件で増加させた角運動量をそれぞれ次の式 (4)、式 (5) のように計算した。

$$m \times v \times h = L \quad (4)$$

$$F \times t \times h' = L \quad (5)$$

ここで、 m は質量、 v は歩行速度、 h は重心高さ、 F は引っ張り力、 t は引っ張り時間、 h' は引っ張り高さ、 L は角運動量を表している。

これらの式から理論的に転倒時のつまきき周りの角運動量の増加量をもとめ、おもり、速度および引っ張りの条件での角運動量がおおよそ等しくなるように条件を設定した。この 3 つの条件と通常条件を比較することで角運動量の増加による転倒回避動作への影響を調べる。また 3 つの条件間の比較から角運動量の増加方法の違いが転倒回避動作へ与える影響を調べる。

3 実験結果

3.1 各パラメータの条件間の比較

転倒動作に関して HT (Hit: 障害物衝突) から FS (First step: 衝突脚の踵接地) まで、FS から SS (Second step: 逆足の踵接地) までの股関節最大角度と FS 時、SS 時の体幹角度、重心降下速度、ステップ長、ステップ時間、安定性余裕 (MoS: margin of stability) を解析に使用した。

また、転倒時の前転方向の重心周りの角運動量について、障害物との接触 (HT) から衝突した脚による回復脚接地一歩目 (FS) までの最大値 (MAX N) と平均値 (MEAN)、HT から最大値にいたるまでの時間 (Time to Peak) および FS 時の角運動量 (AM N FS) を解析に使用した。

条件による影響を見るために各条件の結果を通常条件の結果で除することで通常条件に対する割合を求めた。その各条件のごと結果を図 3、図 4、図 5 に示す。また、結果の値が小さく 0 に近いパラメータについては各条件の結果と通常条件の結果の差を使用した。その各条件のごと結果を図 6、図 7、図 8 に示す。FS 時に関するパラメータを青色、SS 時に関するパラメータを赤色、角運動量に関するパラメータを緑色で示した。ここでエラーバーは 95% 信頼区間を表している。

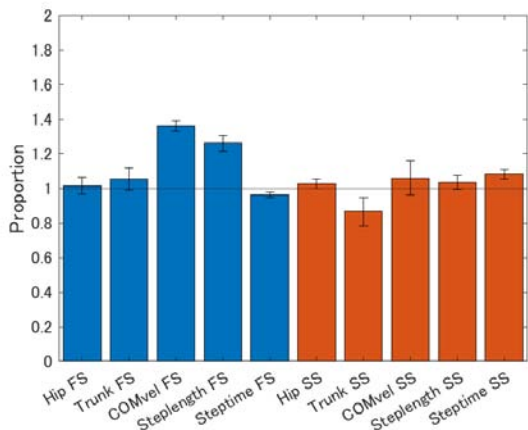


Fig.3 Result of Pull condition (Proportion)

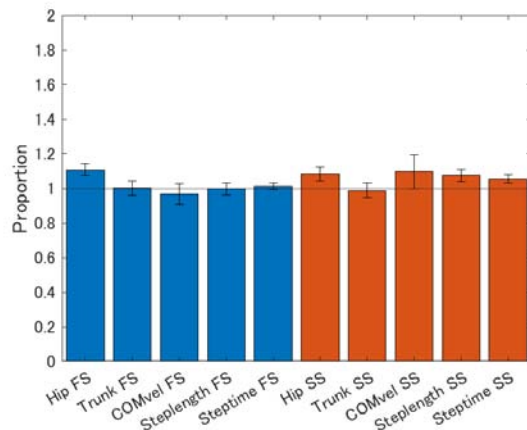


Fig.5 Result of Weights condition (Proportion)

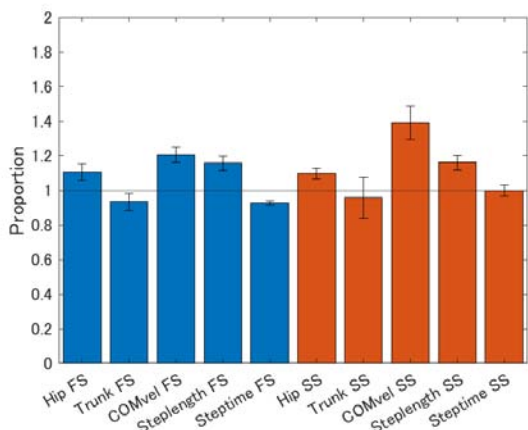


Fig.4 Result of Speed condition (Proportion)

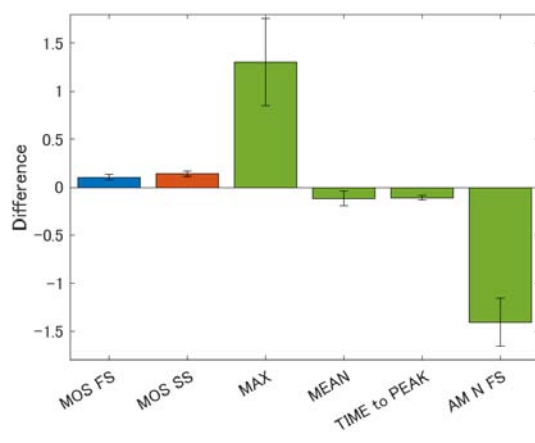


Fig.6 Result of Pull condition (Difference)

4 考察

角運動量の結果から通常条件と比べ、引っ張り条件とおもり条件において最大値が大きくなり、速度条件とおもり条件においてHT から FS までの平均値が同程度大きくなっていることが分かる。条件によって角運動量の増加度合いが異なる結果となった。

転倒動作については、引っ張り条件では、通常条件と比べ角運動量が最大値に達するまでの時間が短くなり、一步目で素早く大きなステップをしたことが分かる。また、一步目の瞬間の角運動量が減少していることから、その時点で転倒の勢いは減少しており、このことが二歩目の上体を起こしたままゆっくりとしたステップに繋がったことが分かる。

速度条件では結果から、一步目では上体を起こしながら大きく脚を持ち上げるように素早く大きなステップをしたことが分かる。また、二歩目でも大きく脚を持ち上げ大きなステップをしていた。

おもり条件では結果から、通常条件と似たような動きをしていることが分かる。しかし、一步目と二歩目の股関節角度が大きくなっていることから大きく脚を持ち上げるようにステップしていることが分かる。

3.2 パラメータ間の相関係数

角運動量と転倒回避動作の関係を見るため、角運動量に関するパラメータと一步目の転倒回避動作に関するパラメータの相関係数を求めた。その結果を表 3 に示す。弱い相関も含め、相関が見られたのは角運動量の最大値とステップ時間、平均値と体幹角度、最大値までの時間と股関節角度、FS 時の角運動量と鉛直重心速度であった。

転倒回避動作は条件により異なる特徴が見られた。引っ張り条件は力積を加え角運動量を増加させる条件で、主に一步目のみ影響を受け大きなステップをしたが、二歩目では通常条件よりも安定性余裕が増加し、転倒からの回復に成功していたと考えられる。

速度条件は運動量の速度成分を増加させ角運動量を増加させる条件で、速度の増加が一步目と二歩目でともに大きく激しい動作に繋がったと考えられる。

おもり条件は運動量の質量成分を増加させ角運動量を増加させる条件で、主に股関節角度のみ影響を受けた。このことから角運動量の大きさが脚を持ち上げる動作に影響を与えている可能性が考えられる。

本実験では角運動量の増加度合いが条件により異なる結果となった。これは転倒動作が角運動量に与える影響によるものだと考えられる。そのためこれらの動作の影響を考慮する必要がある。そこで次に相関係数の結果について考察する。

角運動量の最大値とステップ時間の相関については、転倒の瞬間的な激しさが大きいときほどゆっくりと脚をつくようになり、片脚で耐えるような動作をしている可能性が考えられる。

Table 3 Correlation coefficient of parameters

	MAX	MEAN	Time to Peak	AM N FS
Hip FS	-0.07	0.10	0.41	-0.06
Trunk FS	0.28	0.56	0.23	0.02
COM velocity FS	-0.13	0.04	0.14	0.47
Step length FS	0.01	-0.11	-0.01	0.05
Step time FS	0.40	0.00	0.22	-0.25

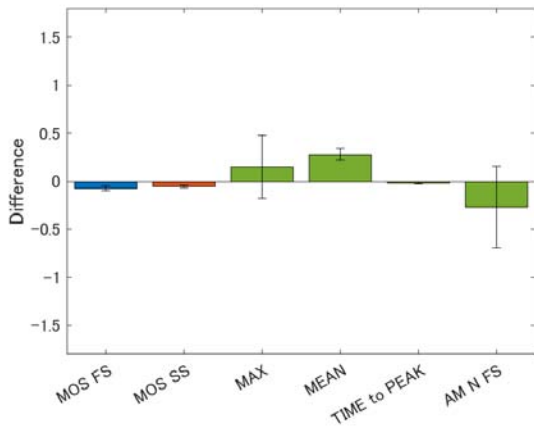


Fig.7 Result of Speed condition (Difference)

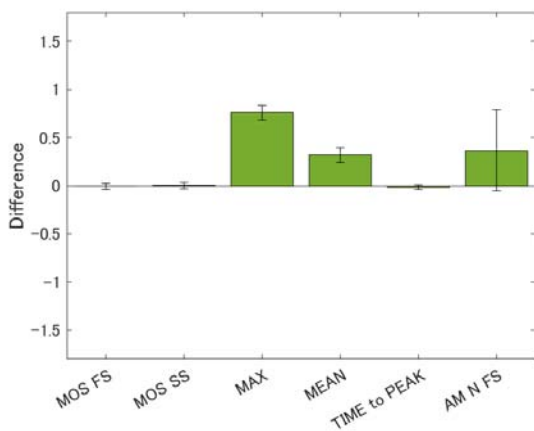


Fig.8 Result of Weights condition (Difference)

平均値と体幹角度の相関については、上体が前傾する方向に動くとき角運動量が増加するため、体幹角度が大きいほど平均値が増加する。このことから平均値は上体の動作の影響を受けていると考えられる。

最大値までの時間と股関節角度の相関については、股関節を曲げ、脚を持ち上げる方向に動くとき角運動量が減少するため、股関節角度が大きいほど角運動量の増加が抑制され、最大値にいたるまでの時間が伸びたのではないかと考えられる。

FS時の角運動量と鉛直重心速度の相関については、鉛直重心速度は上向きが正であることから、正の相関は重心降下速度が大きくなるほどFS時の角運動量が小さくなることを表している。このことから転倒の勢いが残っているときは下方向への動きが小さいということが考えられる。

5 結論

本研究では、転倒時の角運動量と転倒回避動作の関係に注目し実験を行った。角運動量の与え方と大きさの異なる4つの条件の結果を比較した。みられた転倒回避動作は条件により異なり、角運動量の与え方による違いが大きく表れた。

引っ張り条件では引っ張りによる力積の影響がFS時のみ表れ、速度条件では歩行速度の影響が転倒の激しさに表れ、おもり条件ではおもりの影響が股関節角度の大きさに表れ、条件ごとに異なる転倒回避動作が確認された。条件間に共通する特徴としては、相関係数の値から、瞬間的な角運動量の増加に対しては片脚で耐えるような傾向があること、FS時に角運動量が残っているときは下方向への動きが小さくなっていることなどが可能性として考えられる。

しかし、パラメータの比較や相関係数を求める際に同じ被験者、同じ条件においても試行ごとに異なる傾向が見られる場合

があり、クラスター分析を行い、得られたデータを傾向ごとにグループ分けをしていくなど各試行ごとのばらつきに対処していくことが今後の課題である。

参考文献

- [1] H Luukinen, M Herala, K Koski, R Honkanen, P Laippala, and S-L Kivela. Fracture risk associated with a fall according to type of fall among the elderly. *Osteoporosis International*, 11(7):631-634, 2000.
- [2] Stephen N Robinovitch, Fabio Feldman, Yijian Yang, Rebecca Schonnop, Pet Ming Leung, Thiago Sarraf, Joanie Sims-Gould, and Marie Loughin. Video capture of the circumstances of falls in elderly people residing in long-term care: an observational study. *The Lancet*, 381(9860):47-54, 2013.
- [3] Cecile Smeesters, Wilson C Hayes, and Thomas A McMahon. The threshold trip duration for which recovery is no longer possible is associated with strength and reaction time. *Journal of Biomechanics*, 34(5):589-595, 2001.
- [4] Mark D Grabiner, Timothy J Koh, Thomas M Lundin, and Dennis W Jahnigen. Kinematics of recovery from a stumble. *Journal of gerontology*, 48(3):M97-M102, 1993.