

転倒リスク評価装置の開発4

主成分分析を用いた転倒経験者と非経験者の歩行特徴の可視化

The system to evaluate the risk of falling during walking 4

- Short term feedback effect of the "Tripping Risk Age" on the MTCs

○小林吉之 (産総研) 保原浩明 (産総研) 持丸正明 (産総研)

Yoshiyuki KOBAYASHI, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Hiroaki HOBARA, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Masaaki MOCHIMARU, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Abstract: Falls in the elderly are a major public health problem in all over the world. In order to clarify and understand the key movements that contribute to the risk of falling, this study conducted Principal Component Analysis (PCA) on the central tendency and the variability of joint angles at each time point of single gait cycle. Joint kinematics in lower extremities during overground walking was collected from 37 healthy community-dwelling elderly. PCA has conducted for the input matrix of 37 by 1818 dimensions (37 participants by 101 data, 3 joints, 3 planes, AVG & SD). It was found that there were significant differences between fallers and non-fallers only on PC 5 ($p < .05$). Recombined movement revealed sagittal plane hip, knee, and ankle angle variabilities throughout the swing phase and frontal plane hip and ankle joint angle variabilities throughout the stance phase as the feature of faller-like movement. The results of the present study will lead to identifying potential risk of falling in elderly individuals and better rehabilitation regimes by clinicians, and optimizing shoes or garment design by manufacturers with increased understanding of joint movements which they should intervene.

Key Words: Fall risk, Principal Component Analysis, Feedback

1. 諸言

転倒はすべての年代の人にとって、減らしたい事故である。国内外のバイオメカニクス分野の研究によって、遊脚期におけるつま先と地面との距離であるつま先クリアランスの最小値 (Minimum Toe Clearance, 以下 MTC) のばらつきを表す統計量が、転倒の主要因であるつまずきリスクに強く関与している可能性が示唆されている^{(1), (2)}。更に MTC のばらつきは、MTC が観測される時点における遊脚側矢状面の膝関節角度と足関節角度のばらつき、及び立脚側前額面の足関節角度のばらつきと有意な相関があることが報告されている⁽³⁾。このような知見は転倒リスクの高い者への介入を検討する際の重要な手がかりとなると考えられる。しかしこの研究では、1) MTC が観測される時点に限定されていること、2) 被験者が実験の時点で過去 2 年間に転倒を経験していない若年者と高齢者のみであること、及び 3) テッドミル上での歩行であることなど、いくつかの問題点が挙げられる。

そこで本研究では上記の知見を拡大させ、転倒リスクの高い者により効果的に介入できるようにするために、転倒経験者と非経験者を対象に、一歩行周期全期間における関節角度とそのばらつきの関与に着目することとした。

本研究では、先行研究のようにピアソンの積率相関係数を用いて MTC と各時点における関節角度のばらつきとの相関を見るのではなく、一歩行周期全期間における各関節角度の平均値とその標準偏差に対して主成分分析を用い、転倒経験の有無に関連する主成分について調べることとした。これは、転倒経験者の方が大きな MTC を示したと報告している先行研究⁽⁴⁾もあることから、転倒リスクは単純に MTC のばらつきだけによるものではないと考えられるためである。

以上のことから本研究の目的は、転倒経験者及び非経験者から取得した関節角度 (平均値と標準偏差) について主

成分分析を実施し、転倒リスクが一歩行周期中の関節角度の平均値とばらつきにどのように関連しているかを明らかにすることとした。本研究では、1) 転倒経験の有無に関する主成分が上位に認められる、2) 転倒経験がある者は、MTC が観測される時点だけでなくそれ以外の時点における関節角度のばらつきも大きい、及び 3) 転倒経験に関連する主成分は MTC のばらつきだけではなく、平均値にも関連があるという 3 つの仮説を立てた。

2. 方法

2.1 被験者

本研究の被験者は 37 名の高齢者とした。このうち 18 名は過去 1 年間に転倒経験を持つ者であった。すべての被験者は 2 足での歩行が可能であり、裸眼もしくは矯正視力は正常であり、歩容に影響を与えるような神経筋疾患の既往歴を持たなかった。

2.2 実験・分析方法

実験は 10m 程度の歩行が可能な実験室で実施した。被験者の体表に貼付した赤外線反射マーカの三次元座標を、三次元動作計測装置 (Vicon Nexus, Vicon 社製) を用いて 200Hz で計測した。このとき同時に床反力計 (BP400600-10000PT, AMTI 社製) を用いて歩行中の床反力を 1000Hz で計測した。被験者らには、実験室の端から端まで裸足でまっすぐ歩行し、歩行時の速度や歩幅、視線などに関しては特に意識せず、普段通り歩行するよう指示した。

実験では各被験者 5 試行ずつ歩行を計測し、生データには 4 次のバターワースフィルタ (カットオフ周波数はマーカ座標 10Hz, 床反力 56Hz) をかけ高周波成分を除去した。これらのデータから Visual 3D (C-motion 社製) を用いて、右踵接地から次の右踵接地までの一歩行周期で時間正規化し、それを 101 等分 (0~100%) したうえでそれぞれの時点における下肢 3 関節の関節角度 (矢状面・前額面・水平

Table 1 Results of PCA made from joint angle averages and variability waveforms.

PC	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Explained variance (%)	15.412	9.593	9.246	6.647	5.850
Cumulative (%)	15.412	25.005	34.251	40.898	46.748
Non-Fallers: mean (S.D.)	-0.145 (1.134)	0.028 (1.169)	-0.092 (0.752)	-0.034 (1.164)	-0.328 (0.895)
Fallers: mean (S.D.)	0.153 (0.841)	-0.029 (0.819)	0.097 (1.224)	0.037 (0.825)	0.346 (1.011)
P value	0.368	0.863	0.580	0.831	0.039

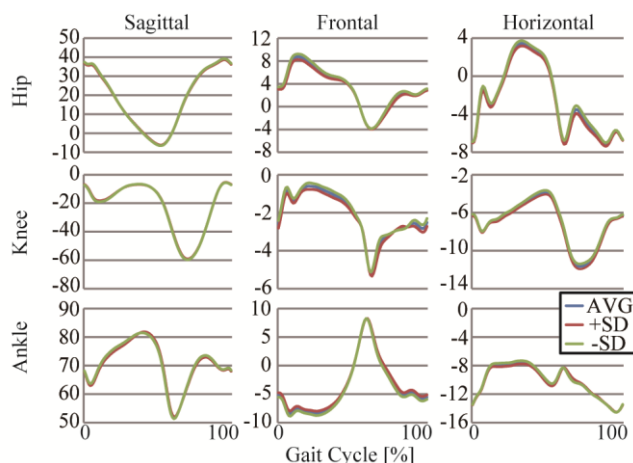


Figure 1 Recombined joint angles averages. Vertical axis indicates joint angle averages (degree), and horizontal axis indicates the % of one gait cycle.

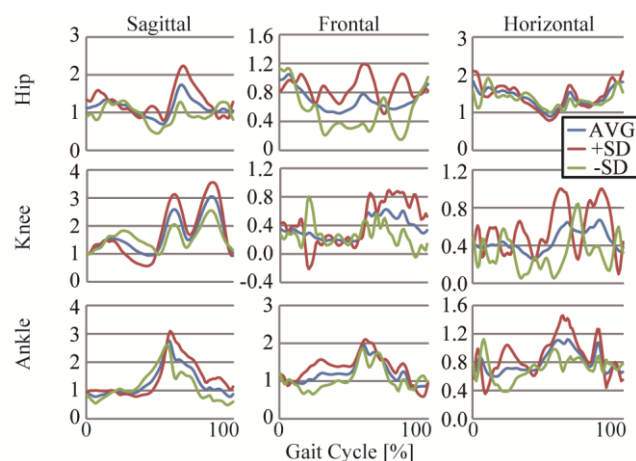


Figure 2 Recombined joint angle variabilities. Vertical axis indicates joint angle variability, and horizontal axis indicates the % of one gait cycle.

面)を算出した。算出された各時点における関節角度については5試行分の平均値と標準偏差を算出し、主成分分析を行うために標準得点化した。

2.3 統計処理

本研究では、37名×1818変数(3関節, 3平面, 101等分された平均値と標準偏差)のデータについて主成分分析を実施した。その際、サンプル数に比べて変数の数が非常に多かったことから結果の不安定性が懸念された。そこでジャックナイフ法を応用して分析を繰り返し、安定性の確認を行った。

分析の結果得られた各主成分の主成分得点については、転倒群と非転倒群でt検定を行い、群間の差を評価した。ここで有意差が確認された主成分についてはその主成分に関する動きを再構築し、特徴となる動きの解釈に用いた。更に、先行研究で転倒リスクに強く関連していることが報告されているMTCの平均値とばらつきについても、各被験者の各主成分得点との相関関係を求め、先行研究との整合性について検討することとした。なお各試行のMTCは先行研究に基づいてBeggらの手法⁽¹⁾によって取得した。また、本研究ではMTCの平均値は5試行分の算術平均とし、ばらつきは5試行分の標準偏差とした。

3. 結果

3-1 主成分分析の結果

分析の結果、16個の主成分で80%以上の特徴を説明できることが確認された。これらのうち第6主成分以降は5%以下の寄与率であったため、この先の分析対象からは除外することとした。分析対象とした第1主成分から第5主成分のうち、転倒経験の有無によって主成分得点に有意差($p < .05$)が認められたのは第5主成分のみであった(表1)。

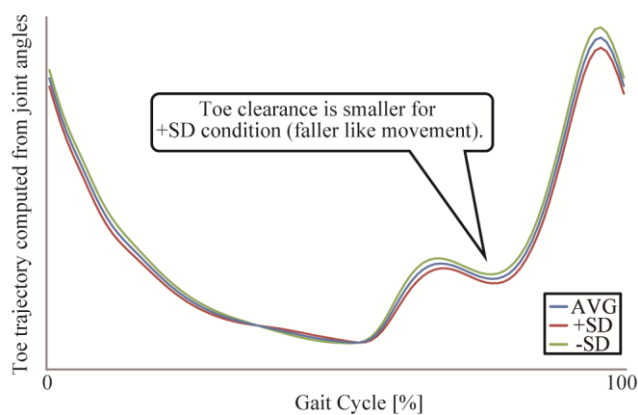


Figure 3. Toe trajectory estimated from recombined joint angles. Horizontal axis indicates the % of one gait cycle. Toe clearance is smaller for +SD condition (faller like movement) for entire swing phase.

そこで第5主成分に関する動きを再構築した(図1~2)。また、各被験者の第5主成分における主成分得点とMTCのばらつき($r = 0.33$)の間には有意な相関関係が認められたが、平均値との間には認められなかった($r = -0.02$)。

3-2 結果の安定性

これらの結果の安定性を調べるために、ジャックナイフ法によって作製されたサンプルに分析を繰り返したところ、ほぼすべての組み合わせで転倒経験の有無によって有意差が認められる主成分が確認された。またその主成分による転倒経験者の動きの特徴は、全体での主成分分析の結果と同じく遊脚期全期間にわたる矢状面関節角度のばらつきと、立脚中期から後期にかけての前額面関節及び足関節のば

らつきなどが確認された。

4. 考察

本研究の結果、仮説1)の通り、転倒リスクに関連する主成分として第5主成分のみが確認された。そこでこの主成分に関連する動きを再構築したところ、仮説2)の通り、転倒経験者の歩行は遊脚期全期間に亘って矢状面関節角度のばらつきが大きく、また立脚中期から後期にかけての前額面股関節及び足関節のばらつきが大きいという特徴を持つことが明らかになった(図2)。このような結果はMTCが観測された時点での関節角度のばらつき具合を報告した先行研究⁽³⁾の結果と一致している。また第5主成分の主成分得点とMTCのばらつきとの間に有意な相関関係が認められたが、MTCの平均値との間には認められなかったこと、および第5主成分以外には転倒リスクに関連する主成分が認められなかったことから、転倒リスクは、転倒経験者を対象とした平地での自由歩行でも関節角度のばらつきとそれによって生じるMTCのばらつきが強く関連していることが示唆された。

一方関節角度の平均値(図1)については、ばらつきほど顕著な差は認められなかった。しかし再構築された関節角度に基づいてつま先の動きを算出してみると、転倒経験者の方が非転倒経験者よりも遊脚期全期間に亘ってつま先高さが低くなることが確認された(図3)。Beggらは、つまずきリスクを減少させるにはMTCのばらつきを小さくすること以外にも、MTCを平均的により高く持ち上げるなどの対策が考えられると述べている⁽¹⁾。本研究では第5主成分とMTCの平均値との間に有意な相関関係は認められなかったが、本研究における非転倒経験者らはまさにこのような戦略をとることで転倒リスクを減少させている可能性が示唆された。このことを更に検証するために、今回取得したデータのうち、関節角度のばらつきのみを用いた37名×909変数(3関節, 3平面, 101等分された標準偏差)について追加の主成分分析を実施した。これは、もし転倒リスクにMTCの平均値が関わらない場合は、このような行列でも本研究と同様の結果が得られると考えられるためである。しかし分析の結果、このようなデータでは転倒リスクに関連する主成分は確認されなかった。このことから仮説3)の通り、転倒リスクはMTCのばらつきだけでなく、平均値も強く関与していることが示唆された。

本研究の結果、転倒リスクが一歩行周期中の関節角度の平均値とばらつきにどのように関連しているかを明らかにすることができた。このような知見は転倒リスクの高い者への介入を検討する際の重要な手がかりとなると考えられる。今後は本研究の成果に基づいて、転倒リスクの高い者への具体的な介入を検討・実施していきたいと考えている。

参考文献

- (1) Begg RK, Best R, Dell'Oro L, Taylor S, Minimum foot clearance during walking: Strategies for the minimisation of trip-related falls, *Gait Posture*, Vol. 25, No. 2, pp. 191-198, 2007.
- (2) Khandoker, AH, Taylor, SB, Karmakar, CK, Begg, RK, and Palaniswami, M, Investigating scale invariant dynamics in minimum toe clearance variability of the young and elderly during treadmill walking, *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, Vol. 16, No. 4, pp. 380-389, 2008.

- (3) Mills PM, Barrett RS, Morrison S, Toe clearance variability during walking in young and elderly men, *Gait Posture*, Vol. 28, No. 1, pp. 101-107, 2008.
- (4) Barrett RS, Mills PM, Begg RK, A systematic review of the effect of ageing and falls history on minimum foot clearance characteristics during level walking, *Gait Posture*, Vol. 32, No. 4, pp. 429-435, 2010.

謝辞

本研究はH25年度 日本学術振興会 科学研究費補助金(若手A):「歩行中の転倒リスク評価・警告装置の開発-日常の歩容を見守ることによる転倒数減少策」の一部助成を受けて実施された。