

歩行パラメータと歩行安定性指標間の関係性に対する統計的年代間比較

Inter-age comparison of the relationship between gait parameters and gait stability indices

○学 黒田 知士 (都立大) 正 岡本 正吾 (都立大) 秋山 靖博 (信州大)

Tomohito KURODA, Shogo OKAMOTO, Tokyo Metropolitan University

Yasuhiro AKIYAMA, Shinshu University

Margin of stability (MoS), which is a dynamic gait stability index, are computed in the anterior and mediolateral directions. However, how the relationships between the mediolateral and anterior MoSs vary depending on ages has not been well investigated. The inter-age comparison reveals age-specific walking characteristics and their effects on stability. We used the multiple indicators, multiple causes model in order to investigate the effects of gait parameters on the MoSs, then discussed their differences between healthy participants over 60 years old and those in their 20s. The MoSs in two different directions were mostly independent for the young adults; however, they interfered with each other for the elderly.

Key Words: Gait stability, Margin of stability, Multiple indicators multiple causes model

1 はじめに

転倒リスクを定量的に表す歩行安定性指標は、転倒リスクが高い人を未然に発見することで、将来の転倒を予防することが期待されている。Margin of stability (MoS) [1] はもっともよく利用される転倒安定性指標の一つである。MoS は倒立振子の原理に基づくもので、優れた構成概念妥当性を有する [2]。さらに、MoS は前後方向と内外側方向について計算され、それぞれの方向に対する転倒余裕を示す。

先行研究の多くは、歩行安定性の決定要因を理解するために MoS と歩行パラメータとの関係を調査した。しかしながら、両方向の転倒余裕と、歩行速度、歩幅、歩隔、ケイデンスなどを含む歩行パラメータ間の関係性は先行研究間で食い違いが見られる [3, 4, 5, 6, 7, 8]。例えば、前方向歩行速度が内外側方向と前方向の MoS に影響すること、特に前方向歩行速度が内外側方向の安定性を損なうことが示唆されている [6, 9, 10, 8]。一方で、Hak ら [4] は内外側方向 MoS と歩行速度間にはほとんど相関を示さないと主張し、Caterby ら [11] は速度が異なっても内外側方向 MoS は変化しないと主張した。このように、歩行パラメータが MoS に与える影響について一貫性がないのは実験条件や参加者の違いに起因していると考えられる。

加えて、前および内外側方向の MoS の関係性は十分に調査されていない。例えば、Hak ら [4] および Alamoudi ら [6] は歩行パラメータと前後方向、内外側方向の転倒余裕との関連性を調査したが、両者間の関係性は調査対象としていなかった。異なる方向の MoS を一つの統計モデルで表すことは重要である。前方への転倒リスクと側方への転倒リスクは異なり、どちらの方向にも安定している歩行様態が望ましい。単一の統計モデルで両方向への転倒リスクを記述することは、このような議論を可能にする。

先行研究では、若年層と高齢層を分けて調査していたものの、年齢層による定常歩行時の MoS の違いについてはほとんど研究されていない。本研究では、青年成人 (20 歳-30 歳) と高齢者 (60 歳-78 歳) の定常歩行時の前方向および内外側方向の MoS と歩行パラメータの関係性を構造方程式モデリング手法である MIMIC (multiple indicators multiple causes) モデルで検討した。これらを計算するための歩行データとしてオープンデータベース [12] を活用した。MIMIC モデルは構成概念と呼ばれる潜在的かつ共通の変数を用いて複数の指標と複数の原因を示す。複数の歩行パ

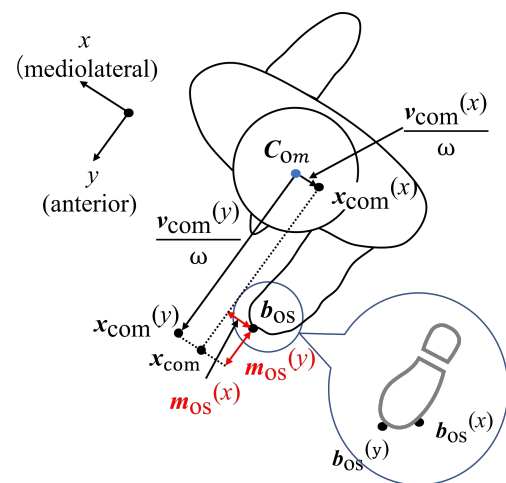


Fig.1 Computation of margin of stability along the anterior and mediolateral direction. Adapted from [13].

ラメータが共通因子を構成し、それらが MoS に与える影響が可視化される。青年者と高齢者の MIMIC モデルの比較は、歩行パラメータが歩行安定性に及ぼす影響に関する先行研究の矛盾を一部説明する可能性がある。さらに重要なことは、この結果から、年齢が歩行パラメータと安定性にどのような影響を与えるかを議論することができることである。本研究は、高齢者のみを分析した先行研究 [13] をベースにしているが、本研究では高齢者と青年者の比較に焦点をあてている。

2 調査方法

2.1 Margin of stability (MoS)

Fig. 1 に示すとおり、MoS は歩行中の任意の瞬間の転倒余裕であり、人体の質量中心の近い将来における予測位置と支持基底面の端点間の進行方向と内外側方向の距離と定義される [1]。MoS は斜め方向を含む全方向に対して計算可能であるが [14]、直進歩

行では、斜め方向はほとんど議論されない。質量中心の近い将来における予測位置は前方向と横方向における質量中心の速度を用いて推測される。転倒余裕は以下の式で表される。

$$\mathbf{m}_{os} = \mathbf{b}_{os} - \mathbf{x}_{com} \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_{com} = \mathbf{c}_{com} + \frac{\mathbf{v}_{com}}{\omega} \quad (2)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (3)$$

ここで \mathbf{b}_{os} と \mathbf{c}_{com} はそれぞれ支持基底面の端点と質量中心の位置ベクトルである。 \mathbf{v}_{com} は質量中心の速度ベクトル、 \mathbf{x}_{com} は質量中心の近い将来における予測位置の位置ベクトルである。 l は直立時における質量中心の床面からの高さのことであり、 g は重力加速度である。なお、内外側方向の MoS と前方向の MoS は大きいほど安定であることを示す。MoS は歩行中常に計算される。1 歩行周期中の最小値が最も不安定な時点と対応している。

内外側方向について、MoS が最小になるタイミングは歩行周期において約 10, 60 パーセントである。質量中心の将来予測は支持基底面よりも内側にあり、一般に MoS は正になる。もし質量中心の将来予測が支持基底面よりも外側にあれば MoS は負になる。この状況は、内外側方向への転倒リスクが高い状況を示す。前方向について、MoS が最小になるタイミングは約 0, 50 パーセントである。質量中心の将来予測は支持基底面よりも前にある。そのため、一般に前方向の MoS は負になる。小さい MoS は、前方向にバランスを失いやすいより不安定な歩行を示す。

2.2 歩行パラメータ

本稿では分析に 8 個の歩行パラメータを用いた。歩行パラメータは内外側方向と前方向の質量中心の最大速度、歩隔、歩幅、ケイデンス、遊脚期間、両方向の MoS 最小のタイミングを含んだ。

歩隔は歩行中における内外側方向の右足と左足間の距離のことである。歩幅は前方向における連続した 2 歩の距離である。ケイデンスは 1 分間あたりの歩数である。遊脚期間は歩行 2 歩中の片足支持期の割合のことである。これらの歩行パラメータは先行研究にて歩行安定性との関連性が示されている [3, 4, 5, 6]。

MoS 最小のタイミングは、それぞれの MoS がゲイト・サイクル中で最小になるタイミングであり、サイクル・パーセンテージで表された。MoS の計算の際に、質量中心の将来予測位置と支持基底面の位置の位相にサンプル間で違いがみられることがあった。そのため、MoS が最小になるタイミングが安定性余裕に対して影響するのではないかと考えた。MoS 最小のタイミングを歩行パラメータとして扱っている今までの研究にはないが、分析に含めることとした。

2.3 歩行データベース

本稿では AIS T 歩行データベース 2019 [12] にて公開されている、歩行中の体の各部位の時系列座標情報を用いた。参加者は 10m の直進歩行を行い、その中間の約 1 歩行周期を記録している。座標情報の測定には光学式モーションキャプチャを用いている。

Table 1, 2 に青年層と高齢層における MoS と歩行パラメータの平均を示す。今回の研究では 60 歳から 78 歳の 30 人の男性と 30 人の女性の計 60 人を高齢層、20 歳から 30 歳の男性 30 人、女性 30 人の計 60 人を青年層として扱った。右足のヒールコンタクトから始まる各個人の 5 ストライドを分析した。高齢層として 300 サンプル、成年層として 300 サンプルの合計 600 サンプルを用いた。

Table 1 Mean \pm standard deviation of the MoSs for elder and young adults

	Elder adults	Young adults
Mediolateral MoS (m)	0.033 \pm 0.011	0.022 \pm 0.011
Anterior MoS (m)	-0.033 \pm 0.031	-0.032 \pm 0.035

Table 2 mean value of the gait parameters for elder and young adults

	Elders	Young adults
Maximal mediolateral CoM speed (m/s)	0.12 \pm 0.025	0.11 \pm 0.030
Maximal anterior CoM speed (m/s)	1.44 \pm 0.16	1.50 \pm 0.18
Step width (m)	0.15 \pm 0.027	0.12 \pm 0.033
Stride length (m)	1.26 \pm 0.089	1.36 \pm 0.10
Cadence (steps/min)	58.82 \pm 4.57	60.98 \pm 3.80
Swing duration (%)	0.85 \pm 0.067	0.86 \pm 0.033
Mediolateral MoS min Timing (%)	9.04 \pm 5.10	7.81 \pm 5.51
Anterior MoS min Timing (%)	0.34 \pm 0.89	0.34 \pm 0.85

2.4 Multiple indicators multiple causes (MIMIC) モデル

Multiple indicators, multiple causes (MIMIC) モデルは構造方程式モデリング (SEM) で採用されるモデルの一種である。SEM は、多数の変数間の仮説的な線形関係の統計的妥当性を分析する。MIMIC モデルでは、複数の観測変数によってある潜在変数が規定され、その潜在変数が別の観測変数群に影響を与える。これらの潜在変数のことを構成概念と呼ぶ。構成概念を規定する複数の観測変数を形成指標と呼び、構成概念によって影響を受ける観測変数を反映指標と呼ぶ。複数の形成指標と反映指標が少数の構成概念で整理される。

本研究では、歩行パラメータが形成指標となり、反映指標が二方向の MoS となる。SEM は、構造全体の有意性と各ノードの有意性を議論しやすい。一つのモデルのなかに、2 種の MoS を組み込むことで、両者の関係を示す統計的に妥当なモデルが得られる。分析に際して R のパッケージである lavaan を用いた。成年層と高齢層について別々にモデルを作成した。

3 結果

3.1 青年層における MIMIC モデル

青年層の MIMIC モデルを Fig. 2 に示す。リンクに付けられた数字は、あるノードから別のノードへの影響力の強さを表す係数である。ノードまたは変数はそれらの分散が 1 になるように標準化されている。主な適合度指数は以下の通りである。comparative fit index (CFI) = 0.99, goodness of fit index (GFI) = 1.00, $\chi^2 = 8.50$ ($p = 0.04$)。これらの値は、有効なモデルの一般的な基準 [15] を概ね満たしている。

前方向歩行速度のみが構成概念 1 と 2 の両方に同時に影響を与え、他の歩行パラメータは 1 つの潜在的構成要素にのみ影響を与えた。構成要素 1 は主に前方向に影響を与え、構成概念 2 は主に内外側方向の MoS に影響を与えた。すなわち、内外側方向と前方向の MoS はほとんど分離している。

前方向 MoS の主な決定要因は、前方向歩行速度、遊脚期間、そしてステップ長であった。遊脚期間と前方向歩行速度の減少は構成概念 1 の値を小さくする。また、両者の係数は負であるため、構成概念 1 の減少が前方 MoS の増加につながる。

内外側方向 MoS に大きく影響する歩行パラメータは重心の内側方向の速度と歩隔であった。歩隔が大きいのか、内外側方向の

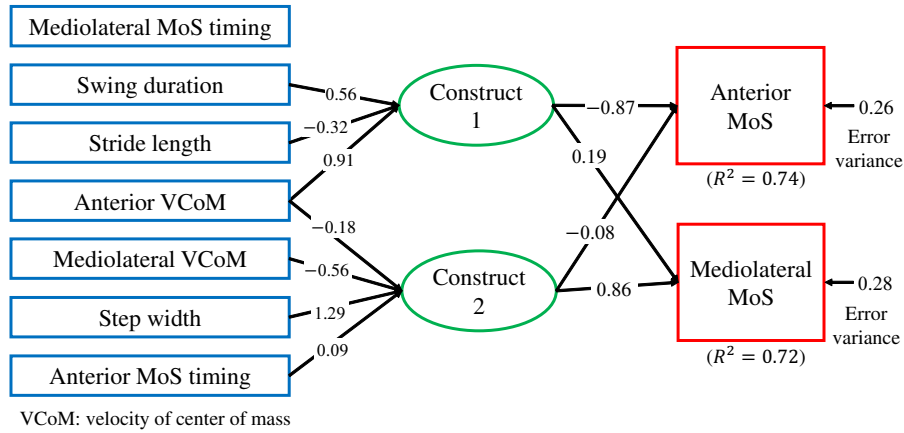


Fig.2 The MIMIC model for young (20–30s) adults group. Square nodes are observed variables. Circular nodes are latent variables. GFI = 1.0. CFI = 1.0. $p = 0.84$. Error variances are the variances of the prediction errors. The correlation coefficients among the formative variables are not shown.

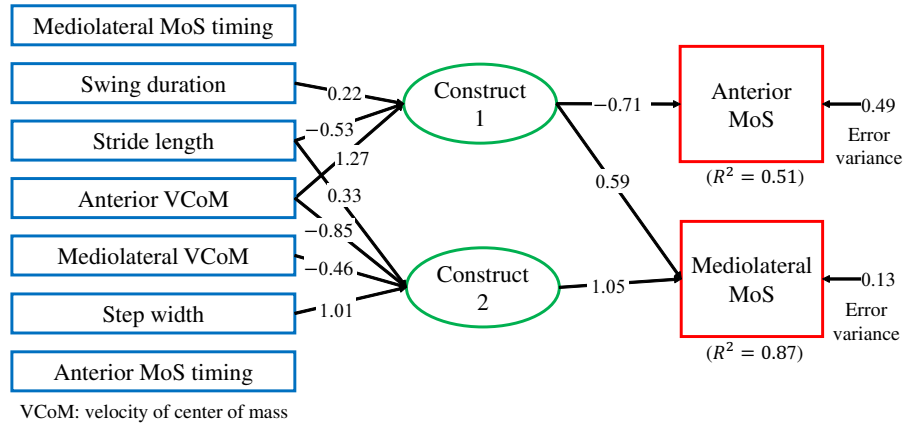


Fig.3 MIMIC model for the adults aged over 60 years old. Square nodes are observed variables. Circular nodes are latent variables. GFI = 0.99. CFI = 0.98. $p = 0.003$. Error variances are the variances of the prediction errors. The correlation coefficients among the formative variables are not shown.

重心速度が遅いことは潜在的構成概念 2 と内外側方向の安定性を向上させる。

3.2 高齢層における MIMIC モデル

高齢層の MIMIC モデルを Fig. 3 に示す。このモデルの主な適合度指標は以下の通りであった。CFI = 0.98, GFI = 0.99, $\chi^2 = 11.92$ ($p = 0.003$)[†]

高齢者のモデルは青年者のモデルよりも複雑である。高齢者のモデルでは、いくつかの歩行パラメータが 2 つの構成概念の両方に影響を与えている。構成概念 1 は内外側方向と前方向の MoS に正負反転でほぼ同じ影響を与える。構成概念 1 は前方向 MoS を減少させるが内外側方向 MoS を増加させる。構成概念 2 は内外側方向の MoS にも影響を与える。その結果、単一の歩行パラメータの変化が 2 種類の MoS の変化につながる。例えば、質量中心の前方向歩行速度の減少は構成概念 1 により前方向 MoS を増加させ、内外側方向 MoS を減少させる。しかし、高齢者の MIMIC モデルは青年層の MIMIC モデルと同じ傾向も示している。例えば、歩隔が大きく、重心位置の内外側方向の速度が遅いことが内外側方向の安定性につながる。また、前方への速い歩行は内外側方向の安定性を低下させる。

4 議論

2 つの年代間の違いは単純ではなく、構成概念を形成する変数と、構成概念の前方向 MoS への影響は大きく異なった。一方で、2 モデル間で、内外側方向の MoS は構成概念からの影響に差はなかった。そのため、構成概念への影響の 2 モデル間での差がそのまま内外側方向 MoS への差となる。

ここで、2 つの MIMIC モデルの違いを理解しやすくするために、MoS を目的変数、歩行パラメータを説明変数として重回帰分析を行った。 $p < 0.05$ で有意な説明変数のみをステップワイズ法で採用した。これらの計算のため、回帰係数が MIMIC モデルの係数と同等になるように、全ての変数を標準化した。内外側方向 MoS に対する青年層の重回帰式 ($\hat{R}^2 = 0.52$) は以下の通りだった。

$$\overline{MoS}_{ml}^{(young)} = -0.47V_{ml} + 1.11W_{idth} + 0.09S_{wing} + 0.08T_{ant} \quad (4)$$

内外側方向 MoS に対する高齢層の重回帰式 ($\hat{R}^2 = 0.74$) は以下の通りだった。

$$\overline{MoS}_{ml}^{(elderly)} = -0.50V_{ml} - 0.26V_{ant} + 1.06W_{idth} + 0.13S_{wing} \quad (5)$$

参考文献

- [1] A. Hof, M. Gazendam, and W. Sinke. The condition for dynamic stability. *Journal of Biomechanics*, Vol. 38, No. 1, pp. 1–8, 2005.
- [2] S. M. Bruijin, O. G. Meijer, P. J. Beek, and J. H. van Dieën. Assessing the stability of human locomotion: A review of current measures. *Journal of The Royal Society Interface*, 2013.
- [3] L. Hak, H. Houdijk, F. Steenbrink, A. Mert, P. van der Wurff, P. J. Beek, and J. H. van Dieën. Speeding up or slowing down?: Gait adaptations to preserve gait stability in response to balance perturbations. *Gait and Posture*, Vol. 36, No. 2, pp. 260–264, 2012.
- [4] L. Hak, H. Houdijk, P. J. Beek, and J. H. van Dieën. Steps to take to enhance gait stability: the effect of stride frequency, stride length, and walking speed on local dynamic stability and margins of stability. *Plos One*, Vol. 8, No. 12, p. e82842, 2013.
- [5] A. Hallemans, E. Verbecque, R. Dumas, L. Cheze, A. Van Hamme, and T. Robert. Developmental changes in spatial margin of stability in typically developing children relate to the mechanics of gait. *Gait and Posture*, Vol. 63, pp. 33–38, 2018.
- [6] R. Alamoudi and M. Alamoudi. Development of linear regression models to estimate the margin of stability based on spatio-temporal gait parameters. *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 19853–19859, 2020.
- [7] T. Iwasaki, S. Okamoto, Y. Akiyama, and Y. Yamada. Walking motions with high margin-of-stability values. In *IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics*, pp. 224–228, 2021.
- [8] T. Iwasaki, S. Okamoto, Y. Akiyama, and Y. Yamada. Gait stability index built by kinematic information consistent with the margin of stability along the mediolateral direction. In *IEEE access*, Vol. 10, pp. 52832–52839, 2022.
- [9] L. Gill, A. H. Huntley, and A. Mansfield. Does the margin of stability measure predict medio-lateral stability of gait with a constrained-width base of support? *Journal of Biomechanics*, Vol. 95, , 2019.
- [10] H. Ohtsu, S. Yoshida, T. Minamisawa, T. Takahashi, S. Yomogida, and H. Kanzaki. Investigation of balance strategy over gait cycle based on margin of stability. *Journal of Biomechanics*, Vol. 95, , 2019.
- [11] T. Caderby, E. Yiou, N. Peyrot, M. Begon, and G. Dalleau. Influence of gait speed on the control of mediolateral dynamic stability during gait initiation. *Journal of Biomechanics*, Vol. 47, pp. 417–423, 2014.
- [12] Y. Kobayashi, N. Hida, K. Nakajima, M. Fujimoto, and M. Mochimaru. AIST gait database 2019. 2019.
- [13] T. Kuroda, S. Okamoto, and Y. Akiyama. Verifying the independence of anterior and mediolateral margin of gait stability indices. In *IEEE Global Conference on Consumer Electronics*, pp. 590–592, 2022.
- [14] Y. Akiyama, Y. Kuboki, S. Okamoto, and Y. Yamada. Novel approach to analyze all-round kinematic stability during curving steps. *IEEE access*, Vol. 11, pp. 10326–10335, 2023.
- [15] R. P. McDonald and M. H. Ho. Principles and practice in reporting structural equation analysis. *Psychological Method*, Vol. 7, No. 1, pp. 64–82, 2002.
- [16] S. Sivakumaran, A. Schinkel-Ivy, K. Masani, and A. Mansfield. Relationship between margin of stability and deviations in spatiotemporal gait features in healthy young adults. *Human Movement Science*, Vol. 56, pp. 366–373, 2018.

ここで、 MoS_{ml} は内外側方向の MoS, V_{ml} は内外側方向の質量中心の最大速度, V_{ant} は前方向の最大歩行速度, W_{idth} は歩隔, S_{wing} は遊脚期間, T_{ant} は前方向 MoS が歩行周期中で最小になるタイミングを表す. Fig. 2 および 3 と重回帰式で示す通り, 内外側方向 MoS は内外側方向の質量中心速度や歩隔に影響される. これは 2 節で説明した内外側方向 MoS の定義と一致する. 一方, 前方歩行速度が内外側方向 MoS に及ぼす影響は, 高齢者の回帰モデルにおいてのみ有意であり, このことは MIMIC モデルからも確認できる. 歩行速度の速い高齢者は内外側方向に不安定になりやすいが, 青年の内外側方向 MoS は歩行速度に影響されなかった. Ohtsu ら [10] は, 速い歩行速度は内外側方向の MoS 値を低下させると主張しているのに対し, Hak ら [4] や Sivakumaran ら [16] は, 踵の接触タイミングでは, 歩行速度は内外側方向 MoS に関係がないと報告している. 本研究の結果は, これらの報告における食い違いが, 参加者グループの違いによるものである可能性を示唆している. 歩行速度が内外側方向 MoS に及ぼす影響は年齢によって異なる.

前方向 MoS に対する青年層の重回帰式 ($\hat{R}^2 = 0.73$) は以下の通りであった.

$$\overline{MoS}_{ant}^{(young)} = -0.74V_{ant} + 0.26L_{length} - 0.50S_{wing} \quad (6)$$

前方向 MoS に対する高齢層の重回帰式 ($\hat{R}^2 = 0.52$) は以下の通りだった.

$$\begin{aligned} \overline{MoS}_{ant}^{(elderly)} = & 0.18V_{ml} - 0.88V_{ant} - 0.14W_{idth} \\ & + 0.35L_{length} - 0.14S_{wing} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 MoS_{ant} は前方向 MoS, V_{ml} は内外側方向の質量中心最大速度, V_{ant} は前方向最大歩行速度, W_{idth} は歩隔, L_{length} はステップ長, S_{wing} は遊脚期間を意味する. これらの回帰式では, 両年齢層とも歩行速度が遅いか歩幅が大きいかほど, 前方向に安定することが示された. これらの効果は, 前方向の MoS の定義を考慮すると妥当である. さらに, 遊脚期間が短いほど安定であることが示された. これらの特徴は 2 つの年齢層で一致していた. 一方, 高齢層では, 内外側方向最大速度 V_{ml} と歩隔 W_{idth} が前方向 MoS の有意な決定因子となった. これらの歩行パラメータは前額面で計算されるため, 前方向 MoS の計算には関係ないように思える. しかし, Fig 3 に示した MIMIC モデルでは, これらのパラメータ, すなわち V_{ml} と W_{idth} が前方向 MoS に影響することが示された. したがって, 高齢層では前方向 MoS と内外側方向 MoS は相互に干渉する. 以上のことから, 前方向の歩行特徴も 2 つの年代間で異なっていることが示された.

5 結論

これまでに, 通常歩行時の前および内外側方向の MoS と歩行パラメータの関係を一つのモデルで表し, 成年層と高齢層の間でそれらと比較した研究はなかった. 両方向の MoS について, 成年層と高齢層で影響する歩行パラメータに違いがあるのかを MIMIC モデルを用いて検証した. 成年層のモデルでは, 両方向の MoS がほとんど分離していたのに対し, 高齢層のモデルでは, 複数の歩行パラメータが両方向の MoS に同時に影響し, 前と内外側方向の MoS は相互に干渉した. 特に, 内外側方向の MoS では, 2 年代間で歩行速度の影響に差異が見られた. 高齢層では速い歩行によって内外側方向の安定性が損なわれるが, 青年層ではその影響は見られなかった. これらの結果は, 高齢層と成年層の間で, 歩行安定性と歩行パラメータの構造に違いがあることを明らかにした.