

歩行訓練ロボット制御のための下肢関節間の協調性に着目した歩容の定量化手法の検討

Quantifying Gait Based on Inter-joint Coordination for Development of Gait Training Robot Control

○ 三宅太文（早大） 小林洋（早大） 藤江正克（早大） 菅野重樹（早大）

Tamon MIYAKE, Waseda University
Yo KOBAYASHI, Waseda University
Masakatsu G Fujie, Waseda University
Shigeki SUGANO, Waseda University

Abstract: Elderly people are at risk of tripping because of lower inter-joint coordination. Gait training to improve inter-joint coordination could be instrumental in avoiding tripping. However, a method for making trajectory based on inter-joint coordination has not been established. In this paper, we quantified the gait by deriving a plane of lower limb joints space which is a three-dimensional representation, and investigated the relationship between the variance of the minimum toe clearance and the variance of the joint coordination along vertical direction to the plane. As a result, the direction of the normal vector of the plane was almost the same as the direction of the Jacobian vector between toe clearance and lower limb joints. We concluded that plane shows inter-joint coordination to inhibit the variance of the minimum toe clearance as the correlation coefficient between the two variances was 0.864.

Key Words: Gait training, Inter-joint coordination, Healthcare

1. 緒言

高齢者において、心身の健康を維持するために、歩行中の転倒の危険性を低減させ、積極的な歩行を促す取り組みが重要である。転倒の原因の約53%はつまずきであるため⁽¹⁾、つまずきの予防が必要である。

つまずきを予防するために、歩行訓練ロボットにより、つまずきにくい歩容を獲得する歩行訓練が有益である。代表的な歩行訓練ロボットとして、下肢軌道を与えるLokomat (Hokoma, Swithland) が挙げられる⁽²⁾。訓練中に人のより自律的な歩行を促すために、人の動きに適応し、必要な時のみに下肢軌道を与える制御の研究がなされている。しかし、ロボットが与える基準軌道をどのように設定するのかの指標は未だに確立されておらず、人の歩容を基にロボットの与えるべき下肢軌道を決定することが難しい。

つまずきによる転倒が生じやすいのは、遊脚中のつま先高さが最も低くなる最小つま先高さの時である⁽³⁾。周期毎に各下肢関節角度はばらつきを有するが、関節間協調性を働かせることにより、各関節のばらつきを相互に補い、最小つま先高さのばらつきを抑えている⁽⁴⁾。最小つま先高さのばらつきが大きい人ほどつまずく危険性が高く、ばらつきは加齢に伴い増加するため⁽⁵⁾、下肢関節間の協調性を定量的に評価し、それを高める歩行訓練が必要である。

協調性の評価手法として、UCM(Uncontrolled manifold)解析がある⁽⁶⁾。UCM解析とは、関節角度の組み合わせで決まる身体のある部位を制御する際、制御対象の位置のばらつきが大きくなる条件で関節角度のばらつきが許容される特性を利用した解析方法である。関節角度のばらつきを制御対象の位置がばらつく成分とばらつかない成分とに分解した時、ばらつかない成分の割合が大きいほど協調性が高いと評価される。しかし、UCM解析は統計的なデータの偏りにより判別する方法であるため、リアルタイムで協調性の高さの評価が難しく、ロボットの制御に利用することが難しい。一方で、下肢関節角度の3次元座標の空間上に下肢関節角度データをプロットすると平面に拘束されることが報告されている⁽⁶⁾。平面に拘束されるということは、下肢関節角度間に協調的な関係が存在することが考えられ、リアルタイムで協調性の高さを判断する手法へ利用できる

可能性があるが、下肢関節角度空間上に生成される平面と最小つま先高さのばらつきとの関係は明らかになっていない。

本論文は、下肢関節角度空間上に生成される平面に対する下肢関節角度の分散と最小つま先高さの分散の関係を導出することを目的とする。

2. 研究手法

2.1 歩容の定量化手法

右足のみの股関節、膝関節、足関節の角度とつま先高さを計測し、主成分分析によりこの3関節の角度空間上に存在する平面を導出する。まず、遊脚期と立脚期で平面の種類が異なるため、主成分分析を行う前に遊脚期と立脚期のデータを分類する(Fig. 1)。股関節角度は伸展方向、膝関節角度は屈曲方向、足関節角度は背屈方向を正の方向とした。遊脚期を抽出する閾値は股関節角度 -25° 以上、膝関節角度 40° 以上、足関節角度 -3° 以下とした。そして、遊脚期中のデータより遊脚期における第一主成分の単位ベクトル w_1 と第二主成分の単位ベクトル w_2 、第三主成分の単位ベクトル w_3 を導出する。この時、平面上の任意の点 P は次式で示すことができる。

$$P = \alpha w_1 + \beta w_2 + G \quad (1)$$

ここで、 G は遊脚期の各下肢関節角度の平均値を示すベクトルである。また、 w_3 は面の法線ベクトルである。

次に、下肢関節角度空間上の座標 Q から平面の座標 P へと射影した。射影前後を結ぶベクトルは w_1 と w_2 と直行に交わるため、式(2)と(3)より写像した各点の α と β が求まる。

$$\alpha = Q \cdot w_1 - G \cdot w_1 \quad (2)$$

$$\beta = Q \cdot w_2 - G \cdot w_2 \quad (3)$$

2.2 実験手法

若年健常者の被験者5名において実験を行った(男性3名と女性2名、年齢: 23 ± 1 歳、身長: 164 ± 13 [cm])。被験者がトレッドミル上を歩行している時の右下肢関節角度

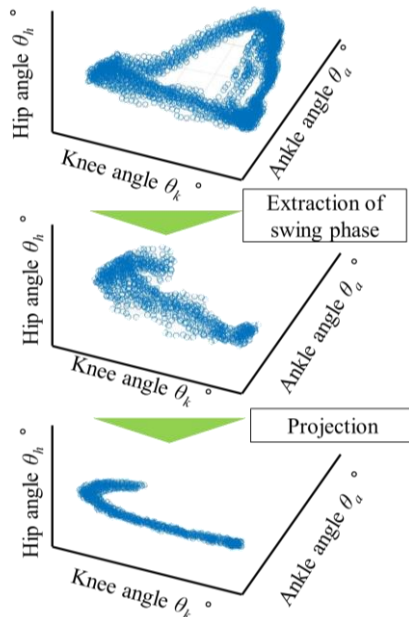


Fig. 1 Method of quantifying gait

をゴニオメータ(SG110・SG150, Biometrics Ltd., Newport, UK)で、つま先高さを光学式モーションキャプチャシステム(Rapter-E, Motion Analysis, USA)で計測した(Fig. 2)。つま先のマーカーは、指の屈伸の影響を受けないように、親指の付け根の第一中足骨に貼った。定常状態における歩容を計測するために、トレッドミル上で30[s]間歩行をしてから計測を開始した。歩行速度は、高齢者の歩行速度に近づけるために2.5[km/h]とし、計測時間は30[s]とした。一人につき各2試行分の計測を行った

2.3 評価手法

まず、平面の特徴を示す法線ベクトルを算出することで歩容を定量化する。次に、最小つま先高さの時の下肢関節角度とつま先高さの関係を示すヤコビ行列を求める。ヤコビ行列の成分がつま先高さの分散に影響を持つ角度空間上の成分となる。平面に対するばらつきがつま先高さのばらつきに影響を持つ程度を導出するために、ヤコビ行列と平面の法線ベクトルである第3主成分ベクトルとの内積を算出する。そして、最小つま先高さにおける角度データの射影前後の距離の分散を算出した。各試行における最小つま先高さの分散を算出し、最小つま先高さの分散と射影前後の距離の分散の相関関係を調べた。

3. 結果・考察

Table 1 に各被験者における主成分分析で求めた平面の法線ベクトルを示す。また、Table 2 にヤコビ行列と第3主成分の内積結果と各主成分の寄与率を記す。平面の法線ベクトルがつま先高さの分散に影響を持つ傾向にあることが確認された。また、Fig. 3 に最小つま先高さの分散と角度データの射影前後の距離の分散の関係を示す。この2つの変数の相関係数は0.864であり、強い相関が得られた。ただし、ヤコビ行列と第3主成分の内積が小さいデータは、相関関係を小さくする要因になる傾向があった。以上より、最小つま先高さとなる瞬間に下肢関節角度の座標が平面に近づくことで最小つま先高さのばらつきを抑えることができる可能性が示された。今後の課題として、実際に歩行訓練ロボットにおいて、平面に近づける制御をし、最小つま先高さのばらつきへ与える影響を調べる必要がある。

Table 1 the normal vector of the plane in each subject

Subject	θ_h direction	θ_k direction	θ_a direction
A	0.682	0.121	0.721
B	0.762	-0.399	0.510
C	0.777	-0.0963	0.624
D	0.736	-0.0557	0.674
E	0.558	-0.243	0.793

Table 2 Contribution rate and inner product in each subject

Subject	contribution ratio 1st	contribution ratio 2nd	Contribution ratio 3rd	Inner product
A	0.851	0.138	0.0111	-0.928
B	0.825	0.168	0.00736	-0.851
C	0.915	0.0803	0.0325	-0.917
D	0.683	0.301	0.0164	0.876
E	0.630	0.350	0.0191	0.651

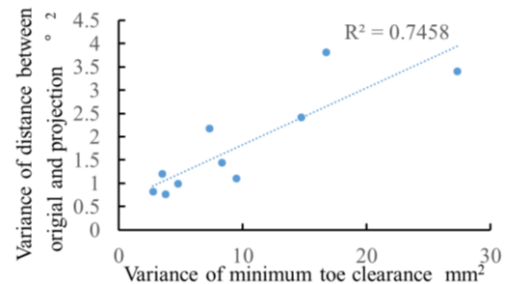


Fig. 2 Relationship between variance of MTC and variance of distance between original and projection

4. 結言

遊脚期における下肢関節角度の3次元空間上に生成される平面を導出することで歩容を定量化した。最小つま先高さの時の下肢関節角度の平面に対する角度座標の分散と最小つま先高さの分散に強い相関が得られた。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省博士課程教育リーディングプログラム「実体情報学博士プログラム」、文部科学省科研費「挑戦的萌芽研究」(15K12606)の支援を受けて行われた。

参考文献

- (1) A.J. BLAKE, K. et al. "FALLS BY ELDERLY PEOPLE AT HOME:PREVALENCE AND ASSOCIATED FACTORS," Age Ageing. Vol. 17, pp. 365-72, 1988.
- (2) W. Meng, Q., et al., "Recent development of mechanisms and control strategies for robot-assisted lower limb rehabilitation," Mechatronics, Vol. 31, pp. 32-145, 2015.
- (3) Peter M. Mills et al., "Toe clearance variability during walking in young and elderly men," Gait & Posture, vol. 28 pp. 101-107, 2008.
- (4) 垣内田翔子, 橋爪 善光, 西井淳, "歩行における脚関節間シナジーの解析", ニューロコンピューティング Vol. 109, pp. 207-212, 2010.
- (5) Mark L. Latash, et al., "Toward a New Theory of Motor Synergies," J Motor Control, Vol. 11, pp. 276-308, 2007.
- (6) Yuri P. Ivanenko, et al., "Modular Control of Limb Movements during Human Locomotion," Journal of Neuroscience, Vol. 27, pp. 11149-11161, 2007.