

平面法則と主成分分析を用いた変形性膝関節症患者の歩行解析

○石川雄己 Qi An 中川純希（東京大学） 戸島美智生（早稲田大学）
安井哲郎 岡敬之 井口はるひ 真野浩志 芳賀信彦 山下淳 浅間一（東京大学）

概要 変形性膝関節症を歩行を用いて診断するシステムを開発するためには、歩容の特徴を明らかにする必要がある。そこで Elevation angle へ主成分分析を適用して変形性膝関節症患者の歩行を解析し、歩容の違いを明らかにする。変形性膝関節症患者 5 名の歩行計測を行い、健常者 3 名と比較した。結果、第 2 主成分のベクトルが健常者と患者で異なることが確認された。また、累積寄与率から患者においても健常者と同程度の平面法則が確認された。この結果から変形性膝関節症の動的診断システムに本手法が利用できる可能性が示唆された。

キーワード: 変形性膝関節症, Elevation Angle, 歩行, 主成分分析

1 序論

変形性膝関節症は経年的に軟骨や半月板の損傷や骨棘を伴い関節痛を発生させる疾患であり、歩行障害などを引き起こし、患者の Quality of Life 低下を招いている。本邦での有病者数は 2,530 万人と推定されるなど、その疾患対策への社会的ニーズが高まっている¹⁾。変形性膝関節症の発症・悪化の危険因子を同定するための大規模な疫学調査が進められているが¹⁾、評価に用いられるのは単純 X 線画像を中心とした静止した医用画像（静的情報）であり動的な情報は加味されていない。発症・悪化に機械的ストレスが関与するとされる本疾患は、静的情報だけでは診断は不十分であり、機械的ストレスの影響を推定できる動的情報を用いた診断手法が必要である²⁾³⁾⁴⁾。

著者らの先行研究⁵⁾では、動的情報として歩行動作に着目し、変形性膝関節症患者の歩行計測結果の Elevation angle を解析し、歩容の特徴を抽出する試みを行った。Elevation angle とは関節角度の算出手法の一つであり、健常者では平面法則（下記に詳細を示す）が成り立つことが明らかにされている⁶⁾。また、健常者において平面法則の成立を確認するために、Elevation angle に対して主成分分析が行われている。解析手法を患者の歩行に適用した結果、変形性膝関節症患者の歩容においても健常者と同程度に平面法則が成り立つことが明らかとなった。また、近似平面の傾きを健常者と比較した際に、個体差の影響が大きいことが明らかとなった。しかし、患者数が 3 人と人数が少なく、結果の一般性はまだ確認できず、近似平面以外に健常者との違いがある項目を特定できていなかった。そこで本研究では、患者の人数を増やし、平面法則が成り立つか確認する。さらに Elevation angle の近似平面を生成する際に用いる主成分分析の結果を用いて、患者と健常者の歩容の差を調べることを目的とする。

2 手法

2.1 Elevation angle の平面法則

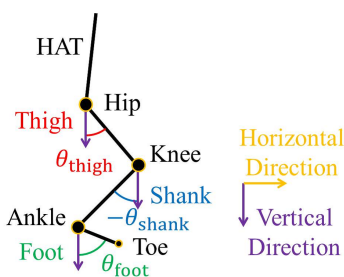
ヒトの下肢 3 体節と鉛直方向とのなす角を Elevation angle ($\theta_{\text{thigh}}, \theta_{\text{shank}}, \theta_{\text{foot}}$) と定義する。Fig. 1(a) に示した大腿 (Thigh)・下腿 (Shank)・足部 (Foot) の体節と鉛直方向との角度である。Fig. 1(a) 中には下肢 3 体節と上半身 (HAT (Head and torso)) が示されている。このように定義された角度の時系列データを 3 次元にプロットすると、それらが同一平面上に現れることを平面法則と呼ぶ⁶⁾。

2.2 主成分分析を用いた解析

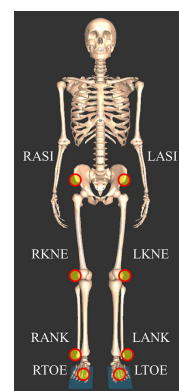
主成分分析を用いて、得られた計測データから近似平面を生成する⁵⁾。主成分分析は直交座標系を回転させ、分散を最も説明できる成分から順に主成分を抽出する手法であり、平面法則が成り立つ場合には、第 1 主成分と第 2 主成分で 3 変量の Elevation angle を説明できることになる。したがって、第 1 主成分と第 2 主成分の負荷量は近似平面の基底ベクトルとなり、第 3 主成分の負荷量が近似平面の法線ベクトルとなる。

本研究では、患者と健常者の歩容の違いを調べるために、第 1 主成分に該当する基底ベクトルと第 2 主成分に該当する基底ベクトルのそれぞれ違いを求めた。具体的には、健常者のベクトルと患者のベクトルのなす角を内積を利用して求めた。健常者全員の Elevation angle の全試行の両脚の時系列データに対して主成分分析を行った結果を健常者のベクトルとした。そのベクトルと各患者のベクトルのなす角を内積を利用して算出した。また、どの程度個体ごとにばらつきがあるか参照するために、健常者間でのなす角を算出し、得られた角度差の平均と標準偏差を算出した。

また、得られた成分がどの程度影響がある要素かを調べるために第 1 主成分と第 2 主成分の寄与率を算出した。さらに、先行研究⁵⁾と同様に近似平面がどれだけ計測データを説明できているかを調べるために、第 1 主成分と第 2 主成分の累積寄与率を算出した。寄与率は各主成分の分散を全変量の和で割ったものである。累積寄与率は第 1 主成分と第 2 主成分の寄与率の合計で算出した。



(a) Elevation angle.



(b) Markers.

Fig. 1: Definition of elevation angle and markers.

2.3 歩行計測

変形性膝関節症患者 5 名 (Patient1, 2, 3, 4, 5) と比較対象として健常者 3 名 (CON1, 2, 3) の歩行を計測した。計測開始前に研究について十分に説明をし、同意を得た。また本研究は東京大学大学院医学系研究科倫理委員会の承認を受け実施された。計測には光学モーションキャプチャシステム (VICON) を用いた。カメラは 9 台使用し、サンプリングレートは 100 Hz とした。各々歩行 1 周期を 10 試行 (Patient5 のみ 8 試行) 計測した。マーカセットは Plug in Gait を使用し、Fig. 1(b) に赤点で示した、下肢 3 体節の特徴点 (RASI・LASI・RKNE・LKNE・RANK・LANK・RTOE・LTOE) の 8 か所のマーカを使用した。マーカの情報は、3 次元スプライン補間を用いて一歩行周期を 100% に正規化した。鉛直方向と水平方向は絶対座標系の座標軸を使用した。鉛直方向の単位ベクトルを鉛直方向ベクトルとした。各被験者の Elevation angle は各体節と鉛直方向ベクトルとの内積から算出した。

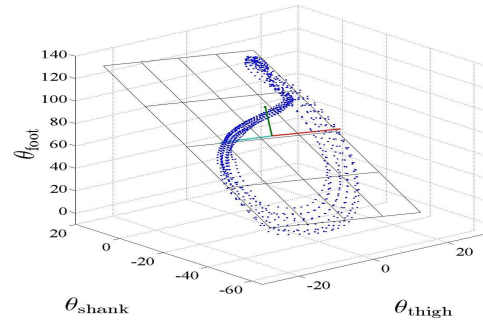
3 結果と考察

健常者と患者で Elevation angle がどのように異なるか 3 次元プロットを用いて確認した。Fig. 2(a), Fig. 2(b), Fig. 2(c) と Fig. 2(d) はそれぞれ CON2 の右脚 (Right) と左脚 (Left) と Patient4 の患側脚 (Disease) と反対側脚 (Contralateral) の Elevation angle を 3 次元プロットしたものである。近似平面 (黒のメッシュ)、近似平面の基底ベクトル (緑と赤の線) と法線ベクトル (水色の線) を表示したものである。CON2 は左右でほぼ同様の近似平面が見られるのに対し、Patient4 の左右の近似平面は傾きが異なっていることが確認できる。

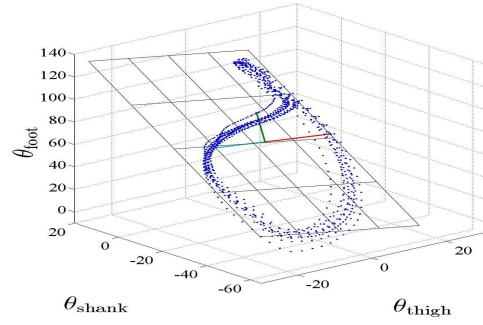
健常者と患者で Elevation angle の近似平面にどのような特徴の違いがあるかを調べるために、健常者と患者の第 1 主成分 (FMC) と第 2 主成分 (SMC) に該当するベクトルのなす角を求めた。Table1 は Patient1, 2, 3, 4, 5 の患側と反対側の Elevation angle の近似平面と健常者のベクトルとの角度差を示している。Table1 中の CON は健常者間でのばらつきを示す参考値となっている。CON1, 2, 3 の両脚 (合計 6 脚分) の Elevation angle の近似平面から得られたベクトルを相互に比較して、全組み合わせのなす角を求めた。Mean と SD は得られた 15 個のなす角の平均と標準偏差を示している。

第 1 主成分における角度差は健常者と患者で大きな違いが見られなかった。健常者と患者の違いはどの患者においても健常者間のばらつきの平均よりも小さい値となっており、第 1 主成分は健常者と患者で違いが小さいものと考えられる。

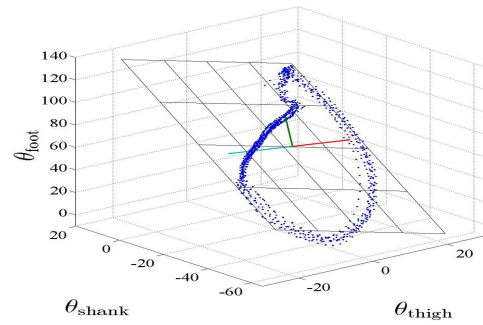
第 2 主成分における角度差は健常者と患者で違いが見られた。Patient1 と Patient2 に関しては健常者間の平均と標準偏差から見れば大きな違いではないが、Patient3, Patient4 と Patient5 に関しては明らかな違いが見られた。Ivanenko らの研究において、第 1 主成分と第 2 主成分はそれぞれ回転数と軸長の変化に対応していることが示されている⁸⁾。回転数は歩行周期の長さを示しており、軸長は歩行中の股関節回転中心と足部の地面接触点までの距離を示している。患者は健常者と比較して患側の立脚期に膝関節を屈曲せずに歩行する傾向があり⁹⁾、本研究で軸長の変化を示す第 2



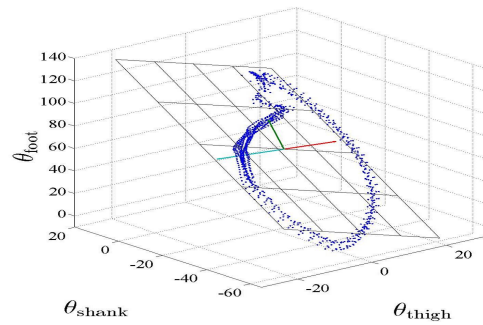
(a) CON2 Right.



(b) CON2 Left.



(c) Patient4 Disease.



(d) Patient4 Contralateral.

Fig. 2: Plot of elevation angle with approximate plane, basis vector and normal vector.

主成分に差がみられた原因であると考えられる。個体差は見られるものの、第 2 主成分を比較することで健常者との違いを把握できる可能性が示唆された。

成分ごとにどの程度影響があるかを調べるために第 1 主成分と第 2 主成分の寄与率を算出した。また、得られた Elevation angle がどの程度近似平面で説明できるか調べるために第 1 主成分と第 2 主成分の累積寄与

Table 1: Angles of first main component and second main component between Patient and CON [degree].

		FMC ^a	SMC ^b
Patient1	Disease	4.466	5.461
	Contralateral	7.226	5.128
Patient2	Disease	2.353	4.851
	Contralateral	2.321	6.495
Patient3	Disease	3.749	22.07
	Contralateral	3.349	12.56
Patient4	Disease	2.612	10.84
	Contralateral	3.363	14.65
Patient5	Disease	3.389	23.53
	Contralateral	4.853	20.80
CON	Mean	4.540	4.328
	SD	1.769	1.793

^a First main component.

^b Second main component.

Table 2: Contribution ratio of first main component, second main component and cumulative.

		FMC	SMC
Patient1	Disease	0.8697	0.1193
	Contralateral	0.8619	0.1304
Patient2	Disease	0.8570	0.1241
	Contralateral	0.8725	0.1134
Patient3	Disease	0.8886	0.1002
	Contralateral	0.8691	0.1171
Patient4	Disease	0.8572	0.1342
	Contralateral	0.8496	0.1400
Patient5	Disease	0.8461	0.1459
	Contralateral	0.8456	0.1395
CON	Mean	0.8900	0.0985
	SD	0.0176	0.0177

率を調べた。Table2 は健常者と患者の Elevation angle に対する主成分分析の第 1 主成分の寄与率と第 2 主成分の寄与率を示している。Table2 中の CON は CON1, 2, 3 の両脚（合計 6 脚分）の Elevation angle のデータに対して主成分分析を行った結果の平均（Mean）と標準偏差（SD）を示している。

第 1 主成分の寄与率と第 2 主成分の寄与率を健常者と患者で比較すると、患者の方がやや第 2 主成分の寄与率が高くなる傾向にあった。累積寄与率に関しては健常者群、患者群の患側と反対側で大きな差はなく、全ての被験者において 0.98 を超えているため、疾患を持っている場合でも平面法則が成り立つことを示唆している。

4 結論

変形性膝関節症患者の歩行時の Elevation angle の時系列データを主成分分析を用いて解析した。近似平面の基底ベクトルである第 1 主成分と第 2 主成分を用いて健常者と患者で比較した結果、第 2 主成分が健常者と異なることが示された。ただし、患者ごとに差があることも確認された。また、累積寄与率から患者 5 名全員で健常者と同程度の平面法則が確認された。今後は今回得られた第 2 主成分の違いが何に起因するか、疾患の判別に用いられるかを検討したい。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費新学術領域研究「脳内身体表現の変容機構の理解と制御」(課題番号 26120005) の助成およびカシオ科学振興財団の援助を受けた。

参考文献

- 1) Yoshimura N., Muraki S., Oka H., Mabuchi A., En-Yo Y., Yoshida M., Saika A., Yoshida H., Suzuki T., Yamamoto S., Ishibashi H., Kawaguchi H., Nakamura K., and Akune T.: Prevalence of Knee Osteoarthritis, Lumbar Spondylosis and Osteoporosis in Japanese Men and Women: The Research on Osteoarthritis/Osteoporosis against Disability (ROAD), Journal of Bone and Mineral Metabolism, vol.27, no.5, pp.620/628 (2009).
- 2) Ishikawa Y., An Q., Tamura Y., Yamashita A., Oka H. and Asama H.: "Effect of Mediolateral Knee Displacement on Ligaments and Muscles around Knee Joint: Quantitative Analysis with Three-dimensional Musculoskeletal Ligament Knee Model", Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-12), pp.447/459, (2012).
- 3) Henriksen M., Graven-Nielsen T., Aaboe J., Andriacchi T.P. and Bliddal H.: "Gait Changes in Patients with Knee Osteoarthritis Are Replicated by Experimental Knee Pain", Arthritis Care & Research, vol.62, no.4, pp.501/519, (2010).
- 4) Maly M.R., Costigan P.A. and Olney S.J.: "Mechanical Factors Relate to Pain in Knee Osteoarthritis", Clinical Biomechanics, vol.23, no.6, pp.796/805, (2008).
- 5) 石川, 安, 中川, 戸島, 安井, 岡, 芳賀, 山下, 浅間: Elevation angle の近似平面を用いた変形性膝関節症患者の歩容解析 (平面法則の有無と近似平面の角度差を用いた検討), 2014 年度日本機械学会年次大会講演論文集, J1620202, (2014).
- 6) Lacquaniti F., Grasso R. and Zago M.: "Motor Patterns in Walking", News in Physiological Science, vol.14, pp.168/174, (1999).
- 7) Borghese N. A., Bianchi L. and Lacquaniti F.: "Kinematic Determinants of Human Locomotion", Journal of Physiology, vol.494, no.3, pp.863/879, (1996).
- 8) Ivanenko Y.P., Cappellini G., Dominici N., Poppele R.E. and Lacquaniti F.: "Modular Control of Limb Movements during Human Locomotion", The Journal of Neuroscience, vol. 27, no.41, pp.11149/11161, (2007).
- 9) Nagano Y., Naito K., Saho Y., Torii S., Ogata T., Nakazawa K., Akai M. and Fukubayashi T.: "Association between in vivo knee kinematics during gait and the severity of knee osteoarthritis", The Knee, vol. 19, no.5, pp.628/632, (2012).