

【課題番号：EECS2518】

ステレオグラフィック投影法を用いた三次元動作解析 —膝関節の関節運動の新たなアプローチ—

賣井坂健太¹⁾*、大西智也²⁾、森拓海¹⁾、高橋咲樹¹⁾、梅崎泰侑¹⁾、川村大地¹⁾、篠原博¹⁾

1) 青森県立保健大学大学院、2) 宝塚医療大学和歌山医療保健学部

Key Words ①三次元動作解析②ステレオグラフィック投影法③膝関節

I. はじめに

三次元動作解析は、スポーツ動作における全身のバイオメカニクスの特徴を客観的に評価できる手法として広く用いられている。特に、ジャンプ着地や方向転換といった動作では、膝関節に対して前額面および水平面を含む複合的な力学的負荷が加わり、前十字靭帯 (Anterior Cruciate Ligament; ACL) 損傷などの外傷発生と関連することが報告されている¹⁾。これらの受傷メカニズムを理解するためには、動作中の関節運動を正確に捉えることが重要である。

三次元動作解析における関節角度の算出には、回転列に基づくオイラー角が一般的に用いられている。オイラー角は解剖学的運動と対応づけやすいという利点を有する一方で、回転順序依存性や特異点 (ジンバルロック) といった構造的課題があり、前額面および水平面における関節運動の解釈に影響を及ぼす可能性が指摘されている²⁾。

このような背景から、三次元空間における回転情報を異なる枠組みで表現する手法として、ステレオグラフィック投影法を提案する。本手法は球面上の方向情報を二次元平面に写像する等角写像であり、回転方向や変化の特徴を幾何学的に把握できる特性を有する。しかし、三次元動作解析データへの適用およびその妥当性については十分に検証されていない。

II. 目的

本研究の目的は、三次元動作解析における関節運動の表現方法としてステレオグラフィック投影法を適用し、その基礎的妥当性を検証することである。既知角度条件を設定した角材モデル実験により、オイラー角との対応関係および真値との一致性を明らかにすることを目的とした。

III. 研究方法

1. 研究デザイン

本研究は、角材モデルを用いた基礎的検証を目的とした実験研究とした。

2. 測定環境

赤外線カメラ 7 台から構成される光学式三次元動作解析装置 (OptiTrack 社製) を用い、反射マーカの三次元座標データを取得した。

3. 測定条件

*連絡先：〒030-8505 青森市浜館間瀬 58-1 E-mail: a_bcde@auhw.ac.jp

角材モデルに対し X 軸 (0/30/60/90°), Y 軸 (0/10/20/30/40°), Z 軸 (5 つの回旋軸) の既知角度条件を設定し、三次元動作解析装置で取得した座標からオイラー角とステレオグラフィック投影法による角度を算出した。Z 軸では複数の回旋中心を設定した動的条件でデータを取得した。

4. 関節角度算出

関節角度は、回転列に基づくオイラー角およびステレオグラフィック投影法により算出した。ステレオグラフィック投影法では、関節の方向ベクトルを単位球面上に写像し、二次元平面へ投影した後、ベクトル間のなす角として定量化した。

5. 統計解析

X 軸および Y 軸では、真値と各手法による算出値との差を誤差と定義し、平均誤差および一貫性を Bland-Altman 解析により評価した。各手法間の対応関係は Pearson の相関係数を用いて検討した。Z 軸については、動的条件における平均値・最大値・最小値を用いて相関解析を行った。

IV. 結果

屈曲伸展運動 (X 軸) および内外反運動 (Y 軸) において、オイラー角とステレオグラフィック投影法の算出値の間にはいずれも極めて強い正の相関が認められた ($r=0.999$)。

一方、回旋運動 (Z 軸) においては、平均値、最大値、最小値のいずれにおいても両手法間に有意な相関は認められなかった。(表 1)

Bland-Altman 解析の結果、X 軸では両手法とも真値に対して一定のばらつきを示したが、オイラー角の方が平均差および一致限界幅は小さい傾向であった。Y 軸では、ステレオグラフィック投影法はオイラー角と比較して平均差および一致限界幅が小さく、より狭い範囲で分布する傾向が認められた。(表 2)

表 1 各条件における関節角度の記述統計

軸	真値 (°)	Euler(°)	Stereo(°)
X	0	0.473 [*]	0.58 [*]
	30	31.97±0.29	29.98 ± 0.38
	60	56.89±0.063	52.47 ± 0.10
	90	85.16±0.096	77.41 ± 0.95
Y	0	5.60±0.13	0.77±0.10
	10	15.07±0.45	8.98±0.54
	20	23.68±0.19	17.93±0.13
	30	33.33±0.17	28.13±0.15
	40	41.20±0.52	36.83±0.80
Z	平均値	2.27±1.52	7.42±1.53
	最大値	7.69±1.46	14.58±1.46
	最小値	-4.51±2.27	2.14±2.08

平均値±標準偏差.

表 2 真値を基準とした関節角度算出の一致性 (Bland-Altman 解析)

軸	比較対象	n	平均差 (°)	LoA 下限 (°)	LoA 上限 (°)
X	真値-Euler	7	-1.64	-7.66	4.38
	真値-Stereo	7	-5.67	-17.17	5.83
Y	真値-Euler	10	3.78	0.56	6.99
	真値-Stereo	10	-1.47	-4.26	1.32

V. 考察

本研究の結果より、静的条件下における屈曲伸展および内外反運動では、ステレオグラフィック投影法はオイラー角と同様の変化傾向を示すことが明らかとなった。一方で、真値に対する一致性は運動軸ごとに異なる特性を示し、相関の高さが必ずしも一致性の高さを意味しないことが示唆された。特に内外反運動においては、オイラー角とステレオグラフィック投影法で系統誤差の方向が異なっており、これは回転順序依存性やクロストークの影響を受けやすいオイラー角の特性が関与している可能性が考えられる³⁾。一方、回旋運動では両手法間に明確な対応関係は認められなかった。これは、三次元的な回旋運動を単一の角度として表現すること自体に方法論的な制約があることを示唆している。

以上より、ステレオグラフィック投影法は従来の角度表現を代替する手法というよりも、三次元運動の方向情報や変化の特徴を幾何学的に捉える補助的手法として有用である可能性が示された。

VI. 文献

- 1) Besier, T. F., Sturnieks, D. L., Alderson, J. A. & Lloyd, D. G. Repeatability of gait data using a functional hip joint centre and a mean helical knee axis. *J. Biomech.* **36**, 1159-1168 (2003).
- 2) Grood, E. S. & Suntay, W. J. A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: application to the knee. *J. Biomech. Eng.* **105**, 136-144 (1983).
- 3) Leardini, A., Chiari, A., Della Croce, U. & Cappozzo, A. Human movement analysis using stereophotogrammetry Part 3. Soft tissue artifact assessment and compensation. *Gait Posture* **21**, 212-225 (2005).

VII. 発表

2026年度学会発表予定。