

原著

新たに考案した股関節回旋角度の解析手法
—三次元動作解析における検証—森下聖^{1,2*}, 小柳磨毅^{1,2}, 向井公一³, 成俊彌¹, 越野八重美^{1,2}, 木村佳記^{1,2}¹大阪電気通信大学 医療健康科学部 理学療法学科²大阪電気通信大学大学院 医療福祉工学研究科³四條畷学園大学 リハビリテーション学部 リハビリテーション学科

要旨

【背景】

三次元動作解析装置に装備されている Plug-in Gait model (PIGM) は、股関節回旋角度の精度計測に限界があるとされる。そこで、解析ソフトウェア上の大腿骨前後軸を用いた新たな解析方法を考案し、妥当性と信頼性を PIGM と比較した。

【方法】

対象は健常男性5名（平均年齢21歳）とした。計測は VICON Nexus (OMG社製) とデジタルカメラを同期し、マーカーセットを PIGM とした。運動課題は、股関節屈伸0°位の内旋30°位と外旋30°位とし、各5回計測した。各肢位の股関節回旋角度を(1)画像解析ソフト (Image J) による水平面画像の下腿骨軸と矢状水平軸が成す角 (二次元画像角度) を基準として、(2) PIGM の算出角度 (三次元解析角度) (3) PIGM の大腿骨前後軸と矢状水平軸が成す角 (大腿骨前後軸角度) を用いて評価した。項目間の相関係数を算出し、大腿骨前後軸角度の級内相関係数 (ICC)、標準誤差 (SEM) と最小可検変化量 (MDC₉₅) を算出した。

【結果】

二次元画像と三次元解析の股関節回旋角度には相関を認めなかった。一方、大腿骨前後軸角度は二次元画像角度と強い正の相関関係 ($r=0.95\sim 0.98$) を認め、検者内と検者間の ICC は、内旋位と外旋位共に高度に一致し、SEM は 0.04 以下、MDC₉₅ は 0.12 以下であった。

【結論】

考案した大腿骨軸前後角度は、股関節の回旋運動に対する解析手法として有用である。

はじめに

着地や方向転換時に股関節の内転と内旋、膝関節外反および下腿の内側傾斜などが組み合わさり、膝が内側に変位する Knee-in は Dynamic valgus とも称され¹⁾、膝前十字靭帯 (ACL) 損傷や半月板損傷などのスポーツ損傷の発生機序となる。Koga ら²⁾は、ACL 受傷シーンにおいて股関節が内旋していることを明らかにし、膝およ

び足関節とともに下肢に内旋負荷が加わることを示唆している。Knee-in を構成する股関節の運動は、内旋と内転の組み合わせであるため、その運動特性を正確に解析することは、外傷予防や手術後のリハビリテーションにおいて、極めて重要である³⁾。

対象者の身体に取り付けた反射マーカーの空間座標を得る光学式動作解析装置は、客観的に三次元の身体運動

受付日 2023年8月22日

採択日 2023年12月23日

*責任著者

森下聖

大阪電気通信大学 医療健康科学部 理学療法学科

E-mail:

s-morisita@osakac.ac.jp

キーワード

三次元動作解析

Plug-in Gait model

股関節回旋角度

が計測できることから、スポーツをはじめ様々な分野での運動分析に利用されている⁴⁻⁹⁾。マーカーの空間座標データおよび床反力計を用いて得られた床反力データから、三次元上の関節角度や関節モーメントなどを算出するプロセスには、VICON社から提供される標準計算ソフト(Plug-in Gait model: PIGM)が広く用いられている。PIGMは、貼付するマーカー数が比較的少ないために手早く運動計測が行え、前額面や矢状面の歩行解析での高い計測精度が報告されている¹⁰⁻¹⁴⁾。しかしながらマーカーを骨盤4個と大腿骨に2個貼付するPIGMは、水平面上での回旋角度の解析に限界や誤差を示す報告が多い¹⁵⁻¹⁷⁾。一方、Andriacchiら¹⁸⁾が考案したPoint Cluster法は、下肢を取り巻く計15個(大腿9個、下腿6個)の反射マーカーを貼付することにより、膝の回旋を含めた高い計測精度が報告されている¹⁹⁾。しかし、Point Cluster法は膝関節に限定した解析手法であり、Knee-inの解析には膝関節のみならず股関節の回旋を含めた正確性の高い解析方法が必要である。そこで我々は新たな股関節回旋角度の解析方法として、PIGMにより推定された、水平面上における大腿骨の前後軸を用いた手法を考案した。本法は、PIGMにより自動算出された股関節回旋角度よりも正確であると仮説を立てた。本研究の目的は、考案した大腿骨前後軸を用いた解析方法の妥当性と信頼性を検証することとした。

対象

対象は体幹と下肢に疾患の既往が無い健常男性5名とし、平均年齢は 21 ± 0.8 歳であった。対象者の身体特性(平均±標準偏差)は、身長 170.8 ± 5.0 cm、体重 60.8 ± 9.8 kgであった。両側股関節の回旋可動域は 40° 以上であり、股関節の回旋可動域に制限がないことを確認した。対象者にはヘルシンキ宣言に則り、本研究の趣旨と内容を書面および口頭で説明した。説明後に書面で同意を得られた者のみを対象として研究を開始した。本研究は大阪電気通信大学倫理委員会で承認された(承認番号: 21-006)。

方法

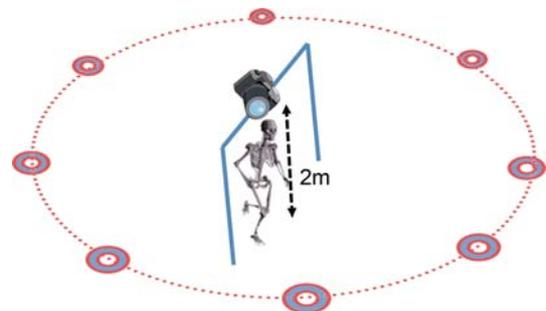
1. 運動課題

まず、原点を規定した床反力計(AMTI社製OR-6)の一辺と、骨盤の両上前腸骨棘を結ぶ直線の平行を目視で確認し、静止立位とした。次に、右股関節の中間位を保持しつつ膝関節を 90° 屈曲させ、これを開始肢位とした。その後、対象者に右股関節の内旋 30° 位と外旋 30° 位をとらせ、同一検者が角度計を用いて下腿の角度が矢状水平軸に対して 30° であることを確認した。それぞれ

の運動を後述の方法で5回ずつ計測した。

2. 測定方法

計測機器は、三次元動作解析装置(OMG社製VICON Nexus)とし、8台の光学式カメラ(OMG社製4 MEGAPIXELS, 400万画素)とデジタルカメラ1台(OMG社製Vue, 210万画素)を周波数200Hzで同期して使用した。デジタルカメラは床から2mの高さに水準器を用いて水平に設置した。大腿骨外側上顆と下腿外側中央のマーカーが画角中央に位置するように調整し、水平面の二次元動画を撮影した(図1)。赤外線反射マーカーは、Plug-in Gait full body AI(Oxford Metrics Ltd.社製)モデルに準じて、左右前頭部、左右後頭部、胸骨柄、剣状突起、第7頸椎棘突起、第10胸椎棘突起、右肩甲骨、両側の肩鎖関節、上腕部、上腕骨外側上顆、前腕部、橈骨茎状突起、尺骨茎状突起、第2中手骨頭、上前腸骨棘、上後腸骨棘、大腿部、膝関節外側、下腿部、外果、踵骨、第2中足骨頭の計39点に貼付した(図2)。



- 光学式カメラ1台(OMG社製)
- 赤外線カメラ8台(OMG社製)

図1. 計測環境
デジタルカメラは床から2mの高さに設置した。



図2. Plug-in Gait model

3. 解析方法

3.1 股関節回旋角度の算出

考案した解析手法を用いた予備実験において、着地動作の回旋角度を解析した結果、外旋と内旋共に 30° 以内であったため、内旋 30° 位と外旋 30° 位を計測肢位とした。対象者5名に対し、股関節の伸展 0° 位で内旋 30° 位と外旋 30° 位を各5回計測した。同一肢位の股関節回旋角度を、以下に示す3つの解析方法で算出した。

1) 二次元画像角度

角度計で実測した股関節内旋 30° および外旋 30° の肢位をそれぞれデジタルカメラで撮影し、得られた二次元の水平面画像から以下に示す方法で、股関節内旋および外旋角度を計測した。これを最も股関節回旋角度の真値に近い基準角度とし、二次元画像角度と定義した。計測には Image J (米国国立衛生研究所) を使用し、大腿骨外側上顆と下腿外側中央のマーカを通過する直線 (A) と、矢状水平軸 (B) が成す角 (α) を求めた (図3)。

2) 三次元解析角度

光学式カメラで撮影して得られたマーカの空間座標から、VICON Nexus に標準装備された計算ソフト PIGM に準拠した解析により算出された、股関節の三次元オイラー角である回旋角度を三次元解析角度とした。PIGM の股関節中心は、左右の上後腸骨棘と左右の上前腸骨棘の合計4点から骨盤セグメントを定義し、骨盤セグメントより股関節中心を定義した。また、膝関節中心は、膝関節外側、大腿部の任意の点と股関節軸より大腿骨のセグメントと膝関節中心を定義した (図4)。膝関節中心から前後方向へのベクトルを前後軸とした。

3) 大腿骨前後軸角度

上記の三次元解析角度と同様に、PIGM の全マーカ



図3. 水平面画像による二次元画像角度の解析方法
(A). 大腿骨外側上顆と下腿外側中央のマーカを結ぶ線
(B). 矢状水平軸
二次元画像角度 (α) は、(A) と (B) とのなす角度とした。

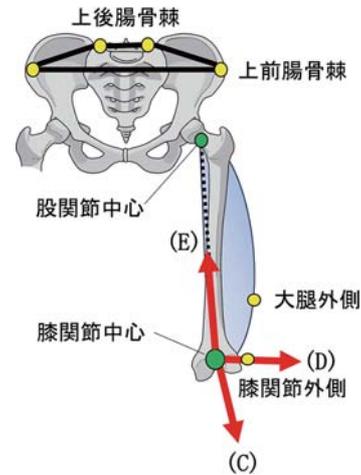


図4. 骨盤と大腿骨セグメントの定義と膝関節軸
(C) 大腿骨前後軸 (D) 大腿骨左右軸 (E) 大腿骨上下軸

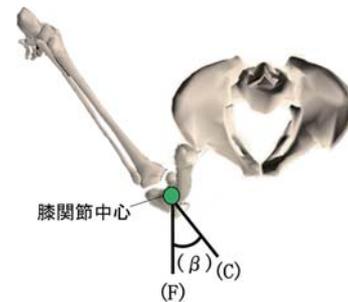


図5. 考案した大腿骨前後軸角度の解析方法
(C) 大腿骨前後軸 (F) 矢状水平軸
大腿骨前後軸角度 (β) は (C) と (F) とのなす角度とした。

を結んだスティックピクチャを作成し、骨盤セグメントと大腿骨セグメントより推定計算された膝関節中心からの大腿骨前後軸を作成した。次に、ソフトウェア上で、絶対座標系と骨盤セグメントにおける座標系の矢状前額軸を一致させ、頭上から見た二次元水平面画像を表示した。そこで描出された大腿骨前後軸 (C) と矢状水平軸 (F) とのなす角 (β) を Image J を使用して算出し、この角度を大腿骨前後軸角度と定義した (図5)。

4. 統計解析

4.1 妥当性の検討

二次元画像角度を基準とし、三次元解析角度との関係および大腿骨前後軸角度との関係を Pearson の相関係数 (r) を用いて検討した。

4.2 信頼性の検討 (大腿骨前後軸角度)

級内相関係数 (ICC) を用いて大腿骨前後軸角度の相対的信頼性を検討した。検者内信頼性を ICC (1, 1), 検者間信頼性を ICC (2, 1) により求めた。さらに、絶

対的信頼性は、Bland-Altman 分析²⁰⁾にて系統誤差の有無を確認した。固定誤差は、1 回目の解析と 2 回目の解析の差の平均 (\bar{d})、標本数 (n)、 d の標準偏差 (SD_d)、自由度 $n - 1$ の t 値より以下の式から 95% 信頼区間を求めた。また、比例誤差は、単回帰分析を行った。標準誤差 (SEM) と最小可検変化量 (MDC_{95}) を算出した^{21~24)}。統計ソフトは IBM SPSS statistics 27.0.1 を用いた。

$$\text{式: } \bar{d} \pm t \times \sqrt{\frac{SD_d}{n}}$$

5. 結果

5.1 妥当性

同一の股関節回旋肢位について、基準とした二次元画像角度と三次元解析角度の散布図を図 6 に、二次元画像角度と大腿骨前後軸角度の散布図を図 7 に示す。

三次元解析角度は、内旋 30° 位を外旋位、外旋 30° 位

を内旋位と算出した。一方、大腿骨前後軸角度と二次元画像角度の内旋肢位は一致し、さらに誤差も小さく、両者には強い正の相関を認めた (内旋 30° 位 $r=0.95$, $p<0.001$, 外旋 30° 位 $r=0.98$, $p<0.001$)。

5.2 信頼性 (大腿骨前後軸角度)

1) 相対的信頼性

ICC (検者内/検者間) は、内旋 30° 位 (0.73/0.70)、外旋 30° 位 (0.83/0.80) であった (表 1, 2)。

2) 絶対的信頼性

Bland-Altman 分析において、内旋 30° 位と外旋 30° 位の検者内および検者間ともに固定誤差と比例誤差は認められなかった。大腿骨前後軸角度における SEM/ MDC_{95} は、検者内が内旋 30° 位 (0.04/0.12)、外旋 30° 位 (0.03/0.09)、検者間では内旋 30° 位 (0.04/0.10)、外旋 30° 位 (0.04/0.10) であった (表 1, 2)。

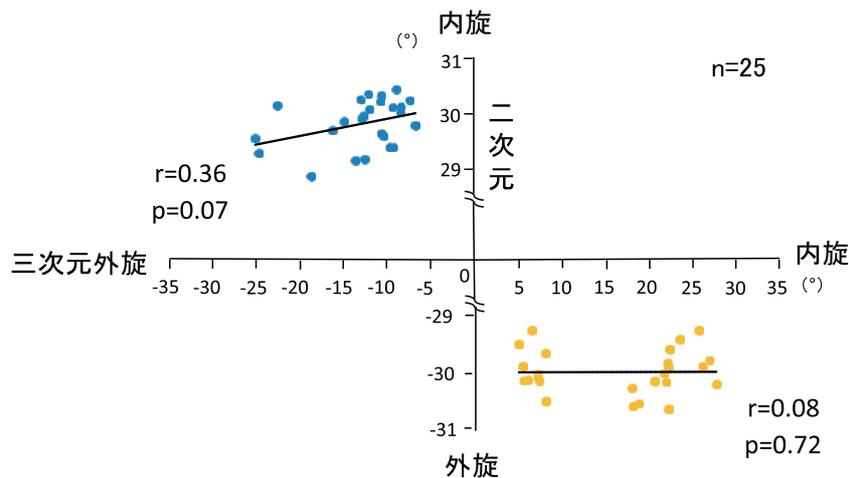


図 6. 三次元解析角度と二次元画像角度の散布図
内旋 30° 位と外旋 30° 位は共に相関関係は認めなかった。

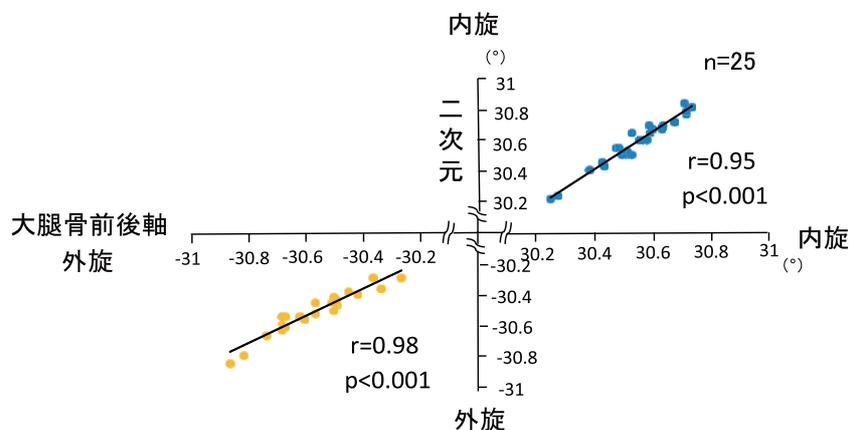


図 7. 二次元画像角度と大腿骨前後軸角度の散布図
内旋 30° 位と外旋 30° 位は共に強い相関関係を認めた。

表 1. 大腿骨前後軸角度の検者内信頼性

ICC (1.1)	Bland-Altman分析					SEM	MDC95	
	固定誤差		比例誤差					
	95%CI	有無	回帰直線の傾き	有無				
内旋30°位	0.73	-0.11-0.02	無	-0.02	P=0.92	無	0.04	0.12
外旋30°位	0.83	-0.04-0.08	無	-0.01	P=0.67	無	0.03	0.09

表 2. 大腿骨前後軸角度の検者間信頼性

ICC (2.1)	Bland-Altman分析					SEM	MDC95	
	固定誤差		比例誤差					
	95%CI	有無	回帰直線の傾き	有無				
内旋30°位	0.70	-0.06-0.07	無	0.13	P=0.54	無	0.04	0.10
外旋30°位	0.80	-0.01-0.12	無	0.28	P=0.17	無	0.04	0.10

考察

本研究の結果から、新たに考案した大腿骨前後軸角度は、真値に近い二次元画像角度との間に強い正の相関を認め、計測の信頼性も有することから、股関節回旋角度の解析手法として有用であると考えられた。以下にその要因、臨床的意義および研究の限界について述べる。

1) 妥当性

三次元解析の精度を研究対象としたシステムティックレビューでは、股関節回旋角度の妥当性は低いとされる⁴⁾。本研究の結果からも、基準とした二次元画像角度に対して三次元解析角度は相関を認めず、内旋と外旋が逆転して算出された。一方、新たに考案した大腿骨前後軸角度は二次元画像角度との間に強い正の相関を認め、三次元解析角度に比べて明らかに高い正確性を示した。その要因として、いずれの手法も PIGM の骨盤帯 (4点) と大腿骨上マーカー (2点) に貼付するマーカーにより大腿骨の原点と方向が定義されているが (図4)^{25, 26)}、大腿骨前後軸のみが正確に股関節の回旋を反映していたことから、三次元解析角度の誤差は、骨盤帯と大腿骨の相対的な回旋 (オイラー角) を処理する過程で生じたと考えられた。

2) 信頼性

Okahisa らは、PIGM により三次元解析した股関節回旋角度の検者内 ICC は、内旋 0.3、外旋 0.2 であったと報告した¹⁷⁾。一方、本研究で用いた大腿骨前後軸角度 (内旋・外旋) の検者内および検者間 ICC はいずれも、高度の一致 (substantial) とされる²⁷⁾0.7 以上であり、高い再現性を示した。

Bland-Altman 分析の結果、検者内、検者間ともに系

統誤差を構成する固定誤差、比例誤差を認めなかった。次に測定標準誤差である SEM と最小可検変化量 MDC₉₅ を検証した。PIGM (三次元解析) の測定誤差を報告した先行研究²⁸⁾では、SEM が内旋 6.1°、外旋 6.0°、MDC₉₅ は内旋 16.9°、外旋 16.7° であった。これに対し、大腿骨前後軸角度の SEM と、MDC₉₅ は、いずれも 1° 未満であり、従来の三次元解析角度と比較し、高い精度を有することが示唆された。

3) 臨床的意義

従来、PIGM による股関節回旋角度の解析には正確性の課題があった。本研究結果は、PIGM による股関節回旋運動の解析における正確性の低さを、補完できる可能性を示した。今後、本解析手法による様々な肢位での計測の信頼性が確立されれば、比較的簡易な解析手法を用いて、Knee-in における股関節運動の特性を明らかにし、外傷予防やリハビリテーションに貢献できると考える。

4) 研究の限界

本研究は、基準となる回旋角度値を二次元画像により設定したため、非荷重位での股関節 0° 伸展位の内外旋 30° 位での解析に限定した。そのため、他の肢位や Knee-in などの荷重位で股関節が屈曲する肢位での妥当性と信頼性については、更なる検証が必要である。また、サンプルサイズも増加する必要がある。回旋角度に影響する大腿骨前捻角も考慮されていないため、今後、計測条件を統一する必要がある。

結語

妥当性と信頼性を認めた大腿骨前後軸角度は、股関節回旋角度の解析手法として有用である。

利益相反

開示すべき利益相反はない。

謝辞 (研究助成金など)

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (21k11434) の助成を受けたものである。

文献

- 1) Hewett TE, Myer GD, Ford KR, et al: Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes a prospective study. *Am J Sports Med* 33: 492-501, 2005
- 2) Koga H, Nakamae A, Shima Y, et al: Hip and Ankle Kinematics in Noncontact Anterior Cruciate Ligament



- Injury Situations Video Analysis Using Model-Based Image Matching. *The American Journal of Sports Medicine* 46: 333-340, 2018
- 3) Mclean SG, Walker K, Ford KR, et al.: Evaluation of a two dimensional analysis method as a screening and evaluation tool for anterior cruciate ligament injury. *Br J Sports Med* 39: 355-362, 2005
 - 4) McGinley JL, Baker R, Wolfe R, et al.: The reliability of three-dimensional kinematic gait measurements: A systematic review. *Gait & Posture* 29: 360-369, 2009
 - 5) 青木慶：使いたい！教えて最新技術：動作解析装置編. *バイオメカニズム学会誌* 32: 167-172, 2008
 - 6) 江原義弘：使いたい VICON. *バイオメカニズム学会誌* 32: 107-111, 2008
 - 7) Kainza H, Grahama D, Edwards J: Reliability of four models for clinical gait analysis. *Gait Posture* 54: 325-331, 2017
 - 8) Schwartz MH, Trost JP, Wewey RA: Measurement and management of errors in quantitative gait data. *Gait & Posture* 20: 196-203, 2004
 - 9) Kaufman K, Miller E, Kingsbury T et al.: Reliability of 3D gait data across multiple laboratories. *Gait & Posture* 49: 375-381, 2016
 - 10) Syam PN, Sheila G, Graham A, et al.: A method to calculate the centre of the ankle joint: A comparison with the Vicon® Plug-in-Gait model. *Clinical Biomechanics* 25: 582-587, 2010
 - 11) Paterson KL, Hinman RS, Metcalf BR, et al.: Plug-in-Gait calculation of the knee adduction moment in people with knee osteoarthritis during shod walking: comparison of two different foot marker models. *Journal of Foot and Ankle Research* 10: 362-367, 2014
 - 12) 奈良雄斗, 齊藤亜由子, 木澤 悟・他：Plug-in Gait マーカ貼付位置の違いによる計測精度への影響. *日本機械学会* : J16315, 2020
 - 13) Al-Amri M, Nicholas K, Button K et al.: Inertial Measurement Units for Clinical Movement Analysis: Reliability and Concurrent Validity. *Sensors (Basel)* 28: 719, 2018
 - 14) Ferrari A, Benedetti MG, Pavan E, et al.: Quantitative comparison of five current protocols in gait analysis. *Gait & Posture* 28: 207-216, 2008
 - 15) Gorton G, Hebert D, Gannotti ME: Assessment of the kinematic variability among 12 motion analysis laboratories. *Gait & Posture* 29: 398-402, 2009
 - 16) 岡久哲也, 佐藤 紀, 加藤真介：Plug In Gait と Point Cluster Technique の精度検証. *四国理学療法士会学会誌* 39: 212-213, 2017
 - 17) Okahisa T, Matsuura T, Tomonari T, et al.: Between-day reliability and minimum detectable change of the Conventional Gait Model 2 and Plug-in Gait Model during running. *Gait Posture* 100: 171-178, 2023
 - 18) Andriacchi TP, Alexander EJ, Toney MK, et al.: A point cluster method for in vivo motion analysis: applied to a study of knee kinematics. *J Biomech Eng* 120: 743-749, 1998
 - 19) Alexander EJ, Andriacchi TP: Correcting for deformation in skin-based marker systems. *J Biomech* 34: 355-361, 2001
 - 20) J. Martin Bland, Douglas G. Altman: Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1: 307-310, 1986
 - 21) Faber MJ, Bosscher RJ, van Wieringen PC: Clinimetric properties of the performance-oriented mobility assessment. *Phys Ther*, 86: 944-954, 2006
 - 22) 下井俊典：評価の絶対信頼性. *理学療法科学* 26: 451-461, 2011
 - 23) 下井俊典, 谷浩明：最小可検変化量を用いた2種類の継ぎ足歩行テストの絶対信頼性の検討. *理学療法科学* 25: 49-53, 2010
 - 24) Joseph PW: Quantifying test-retest reliability using the intraclass coefficient and the SEM. *Journal of Strength and Conditioning Research* 19: 231-240, 2005
 - 25) Croce UD, Leardini A, Chiar L, et al.: Human movement analysis using stereophotogrammetry. *Gait Posture* 21: 226-237, 2005
 - 26) McFadden C, Daniels K, Strike S: The sensitivity of joint kinematics and kinetics to marker placement during a change of direction task. *J. Biomech* 101: 109635, 2020
 - 27) Landis JR, Koch GG: The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33: 159-174, 1977
 - 28) Meldrum D, Shouldice C, Conroy R et al.: Test-retest reliability of three dimensional gait analysis: Including a novel approach to visualising agreement of gait cycle waveforms with Bland and Altman plots. *Gait & Posture* 39: 265-271, 2014



Original article

A new analysis method for hip joint rotation angle validation in a three-dimensional motion analysis

Satoshi Morishita^{1, 2*}, Maki Koyanagi^{1, 2}, Kouichi Mukai³, Junpil Song¹, Yaemi Koshino^{1, 2}, Yoshinori Kimura^{1, 2}

¹ Department of Physical Therapy, Faculty of Medical Science and Health-Promotion, Osaka Electro-Communication University

² Division of Biomedical Engineering, Graduate School of Biomedical Engineering, Osaka Electro-Communication University

³ Department of Rehabilitation, Faculty of Rehabilitation, Shijonawate Gakuen University

ABSTRACT

【Background】

The integration of the Plug-in Gait model (PIGM) into the VICON Nexus three-dimensional motion analysis system has limitations in measuring hip joint rotation angles. Consequently, a new analysis method using the anterior-posterior axis of the femur within a motion analysis software is proposed. This method's validity and reliability are compared to those of the PIGM using a rotation angle on a two-dimensional image as a reference.

【Methods】

The study involved five healthy male subjects (mean age: 21 years). Measurements were synchronized between VICON Nexus (OMG Corporation) and a digital camera using a marker set of the PIGM. The motion tasks included internal and external rotations of 30° from the neutral hip flexion/extension position (0°). Each task was measured five times. For each limb position, the hip joint rotation angles were evaluated using: (1) the angle between the femur shaft and the sagittal horizontal axis of the horizontal plane image, analyzed using an image analysis software (ImageJ) (two-dimensional image angle); (2) angle calculated using the PIGM (three-dimensional analysis angle); and (3) angle between the femur anterior-posterior axis and the sagittal horizontal axis of the PIGM (femur anterior-posterior axis angle). Correlation coefficients between the parameters were computed, and the intraclass correlation coefficients (ICCs), standard error of measurement (SEM), and minimum detectable change at 95% confidence level (MDC95) were calculated for the femur anterior-posterior axis angle.

【Results】

No significant correlation was observed between the hip joint rotation angles obtained from two- and three-dimensional analyses. In contrast, a strong positive correlation was observed between the femur anterior-posterior axis angle and the two-dimensional image angle. ICCs for intra- and inter-rater reliability were high for both internal and external rotation positions, with SEM < 0.04 and MDC95 < 0.12.

【Conclusion】

The devised femur anterior-posterior axis angle-based method can effectively assess hip joint rotation motion.

Key words: Three-dimensional motion analysis, Plug-in Gait model, Hip rotation angle