

令和元年6月17日現在

機関番号：50101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06204

研究課題名(和文) 動作中の下肢アライメント評価に基づく動作異常の検出

研究課題名(英文) Motion anomaly detection based on lower limb alignment evaluation during motion

研究代表者

川上 健作 (KAWAKAMI, Kensaku)

函館工業高等専門学校・生産システム工学科・准教授

研究者番号：70353216

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、歩行動作中の下肢アライメントおよび下肢機能軸の動的な変化を評価する動作解析方法を確立し、その方法を用いた動作異常の検討を目的とした。

健康者および膝OA患者の解析により本研究の下肢機能軸解析により膝関節アライメントを評価可能であり、実際に膝関節疾患患者の動作異常を検出することが可能であることを明らかにした。また、この下肢機能軸による膝アライメント評価を視覚化するために、OpenGLを用いた描画ソフトを作成し、わかりづらかった位置関係アライメントを視覚的に比較、評価することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において提案した方法により下肢機能軸評価で膝疾患による異常動作が確認できたことから、医師や理学療法士が観察によって主観的に診断していた動作異常を誰でも客観的かつ定量的に評価できると考えられる。そのことにより、診断やリハビリテーション、予防などに極めて有効な知見が、容易に入手できる。さらに、その結果を視覚的に評価できることにより、整形外科の臨床だけでなく、スポーツ分野における傷害予防や訓練、およびその評価にも活用できる方法であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we established a motion analysis method to evaluate the dynamic change of lower limb alignment and lower limb functional axis during walking motion, and aimed at examining abnormal gait using that method.

Analysis of healthy subjects and knee OA patients revealed that knee joint alignment can be evaluated by the lower limb functional axis analysis of this study, and it was possible to actually detect abnormal movement of knee joint disease patients. Moreover, in order to visualize the knee alignment evaluation by this lower extremity functional axis, it became possible to create drawing software using OpenGL and to visually compare and evaluate the positional relationship alignment which was hard to understand.

研究分野：工学

キーワード：下肢機能軸 動作解析 バイオメカニクス 膝関節アライメント

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

前十字靭帯損傷や変形性膝関節症(以下、膝 OA)などの下肢における疾患、傷害の臨床診断やリハビリテーションでは、医師や理学療法士による主観的な動作観察に基づく異常動作の把握や術前術後における動作の比較などが大きな役割を担っている。こういった動作を客観的かつ定量的に評価することは、診断、治療およびリハビリテーションにおいて極めて有効である。このような人の運動評価には、光学式の皮膚マーカを用いた2次元または3次元動作解析が有効であり、現在、広く行われている。そんな中、傷害や疾患により関節に異常が発生すると関節の動きとして動作中に膝の外側移動(Lateral Thrust)などが動作異常として観察されている。これらの動作異常に大きく影響されるのが、下肢のアライメントや下肢機能軸であると思われるが、これらの解析は通常、静止立位のX線撮影など静的な状態において評価されることがほとんどであり、歩行中など運動中の動的なアライメントや下肢機能軸についてはあまり評価されていない。しかし、医師や理学療法士などは、まさにこの運動中の些細な変化を観察し、患者の状態を把握していることから、この動的なアライメントや力学状態が容易に視覚化、定量化できれば、診断やリハビリにおいて大きな手助けになることは間違いない。

そこで一般的に行われる日常動作の中で歩行動作に注目し、歩行中の大腿骨および脛骨の傾きである下肢アライメントの動的な変化および股関節中心と足関節中心を結んだ下肢機能軸の変化や膝関節との相対位置変化を評価する方法を検討することとした。

### 2. 研究の目的

本研究では、歩行動作中の下肢アライメントおよび下肢機能軸の動的な変化を評価する動作解析方法を確立し、その方法を用いて動作異常の検討をすることを目的として、以下の3点について検討した。

- (1) 下肢アライメントや下肢機能軸の解析を行うために各関節中心の算出方法およびそのためのマーカ配置、さらに下肢機能軸の評価方法を検討する。
- (2) 動作解析システムを用いて健常者の歩行解析を行い、歩行動作中の下肢アライメントおよび下肢機能軸を算出し、その歩行中の動的変化を評価することにより動作異常の検出が可能であるか検討する。
- (3) わかりにくいアライメント変化や下肢機能軸を視覚的するために、それを描画するソフトウェアを作成する。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 マーカ配置と歩行解析

本研究では障害を有さない健常者14名(年齢20~24歳)を対象として歩行解析を行った。健常者の身体に図1の様に光学式マーカを取り付けた。歩行解析ではポイントクラスター法(以下、PCT)を用い膝関節の3次元運動を測定し、それに伴う膝関節アライメントや下肢機能軸の評価を行った。マーカ位置の詳細は、PCTに基づき腸骨稜に1点、大腿部に11点、下腿部に10点、足部に2点設置し、さらに下肢機能軸算出用に左右両方の上前腸骨棘点(以下、ASIS)と大転子(以下、Tro)にもマーカを設置した。歩行速度は被験者の任意とし、歩行動作を120Hzの赤外線カメラで撮影し、3次元解析装置(MAC3D、nac社製)を用い、マーカの3次元座標データを測定した。以下の示す定義に基づき下肢機能軸や膝関節アライメント等を算出し、評価方法、マーカ位置の妥当性について検討した。



図1 PCTマーカ位置

#### 3.2 下肢機能軸の定義

図2に下肢機能軸の定義とその下肢機能軸評価の為に提案した脛骨関節平面通過点の概略を示す。下肢機能軸は歩行解析で得られた各マーカの座標値データより算出した股関節中心(以下、HC)と足関節中心(以下、AC)を結ぶ線分と定義した。HCは臨床歩行分析研究会の股関節中心推定方法の概念に基づいて算出した。HCは図2におけるASISとTroのマーカを結んだ線上でTroから1/3の距離に位置する点を股関節点Dとし、ASISを結ぶ方向で、点Dを60mm内挿した点をHCと定義した。また、ACは足関節内外果の中点と定義した。以上のHCとACの間に成形された線を下肢機能軸と定義した。さらに膝関節と算出した下肢機能軸との位置関係の評価するために脛骨の座標系から定義した脛骨関節平面と下肢機能軸の交点を脛骨

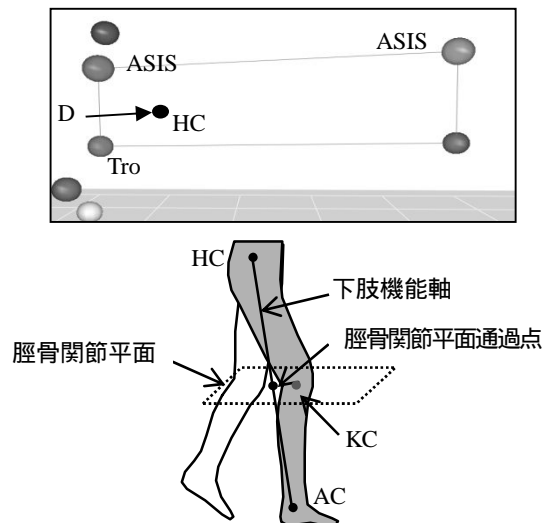


図2 脛骨関節平面通過点

関節平面通過点として算出した。

### 3.3 下肢機能軸と膝関節アライメントおよび関節モーメントの関係の検討

健常者において下肢機能軸の脛骨関節平面通過点と前額面での大腿脛骨角度（以下、FTA）の相関を評価し、下肢機能軸位置と膝関節アライメントの関係について検討した。FTAは、膝関節中心KCとし、股関節中心HC、膝関節中心KC、足関節中心ACの三つの点を結んだ線の前額面においてなす角度FTAを膝関節アライメントと定義した。また、逆動力学により算出した膝関節モーメントからアライメントや関節負荷に大きく影響していると考えられる膝関節内外反モーメント（以下、KAM）との関係についても検討した。解析としては、踵接地から同側の踵接地までを1歩行周期とし、1歩行周期の下肢機能軸の脛骨平面通過点の左右座標と前額面における膝関節FTA、1歩行周期の下肢機能軸の脛骨平面通過点の前後座標と膝屈曲角度の相関関係を検討した。相関の検定にはスピアマンの順位相関係数を用いた。

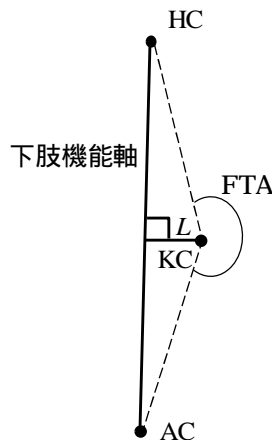


図3 FTAとHC - 下肢機能軸間距離L

また、この下肢機能軸と膝関節アライメントについて3次元動作解析システムだけでなく、正面から撮影したビデオ画像においても評価できないか検討するため、健常者の正面歩行動画を3次元動作解析と同時に撮影し、図3に示すFTAと下肢機能軸とKC間の垂直距離Lを両方法にて算出し、比較検討した。

### 3.4 下肢機能軸位置による膝疾患患者の歩行評価

膝OAの動作異常であるLateral thrustと呼ばれる歩行の荷重応答期に見られる膝の横ぶれ現象を有する膝OA患者において、上記3.2節で示した下肢機能軸位置を解析し、健常者と比較することにより、膝OAにおける動作異常が確認できるか検討した。

### 3.5 下肢機能軸の視覚化

OpenGLを用いて下肢機能軸および膝関節アライメントをフレーム毎に描画するプログラムを作成した。読込データは各マーカの3次元座標値から下肢機能軸を算出する時に計算する各下肢関節の中心の座標値であり、HCとACを結ぶ下肢機能軸、HCとKCを結ぶ大腿セグメント、KCとACを結ぶ下腿セグメントを線分としてフレーム毎に描画した。これにより膝関節アライメントと下肢機能軸の位置関係を視覚的にとらえ、その変化を時系列で比較、検討できるようにした。

## 4. 研究成果

### 4.1 3次元下肢機能軸の動的評価

図4に健常者における下肢機能軸の脛骨平面通過点軌跡の典型例を示す。図の原点は膝内外果の midpoint である膝関節中心である。グラフはそれぞれの被験者の脛骨関節平面を示しており、グラフの縦軸が前後方向（前方+）、横軸が内外側方向（外側+）を表している。単位はいずれもmmである。健常者の歩行動作時、歩行周期における初期接地から踵離地までは膝関節内側に位置する傾向がみられ、初期接地から反対脚のつま先離地にかけて後方に移動し、その後、前方に一度戻った後、つま先離地にかけて大きく後方に移動する傾向がみられた。この傾向は、本研究における被験者全てで同様の傾向を示しており、また、K. Nishinoらの研究報告<sup>1)</sup>における健常者の歩行解析と骨モデルの解析から得られたデータとも一致していたことから、本方法で得られた結果は妥当であり、動的な下肢機能軸を評価可能であると考えられる。

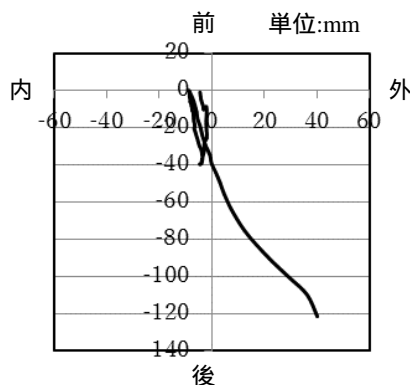


図4 健常者の下肢機能軸関節平面通過点（典型例）

### 4.2 下肢機能軸とFTA、KAMの関係

表1に立脚期の下肢機能軸の脛骨平面通過点内外位置とFTAの相関関係を示した。表1の立脚期で下肢機能軸と膝関節アライメントの相関結果としては、負の相関で優位に相関があることが

表1 下肢機能軸の内外側位置とFTAの相関

解析範囲	相関係数
立脚期	-0.62 **
範囲1	-0.90 **
範囲2	-0.91 **

\*\* p<0.01

確認できた。下肢機能軸の脛骨平面通過点内外位置と FTA との相関係数は立脚期を通して-0.62 と中程度の相関関係であった。このことから立脚期の期間では中程度の相関しか見られなかったため、中期立脚までの期間に着目し、その範囲内で細かく分けて検討を行った。範囲 1 は初期接地から荷重

表 2 下肢機能軸と膝関節モーメントの相関

下肢機能軸通過位置	屈伸モーメント	内外反モーメント	内外旋モーメント
前後位置	0.25	0.02	- 0.36
内外位置	- 0.34	- 0.09	0.35

応答までの初期立脚の期間、範囲 2 は初期立脚と立脚中期を含めた期間で解析した。範囲 1 の下肢機能軸の脛骨平面通過点左右位置と FTA との相関係数は-0.90、また範囲 2 の下肢機能軸の脛骨平面通過点左右位置と FTA の相関係数は-0.91 となり、負の優位な相関があることが確認できた。下肢疾患患者は、これらの脚に大きな荷重が作用する範囲の中で異常動作を起こしていることが知られており、これらの範囲では下肢機能軸の位置と FTA に高い相関があったことから、下肢機能軸のみで膝関節アライメントを評価できることが示唆された。

また、表 2 に下肢機能軸の脛骨平面通過点の前後、内外位置と各膝関節モーメントの相関を示す。下肢機能軸の内外方向位置と KAM の相関係数は-0.09 であり、有意な相関関係は認められなかった。このことより下肢機能軸と膝関節との位置関係は膝関節モーメントにあまり影響しておらず、下肢機能軸による幾何学的なアライメント評価では直接的な関節負荷を検討するのは難しいと考える。

#### 4.3 下肢機能軸を用いた正面動画による膝関節アライメント評価

3次元動作解析システムと正面動画から得られた立脚期における FTA 変化を図 5 に示す。グラフの横軸は測定の時間であり、縦軸は FTA である。図 5 より正面動画の結果と 3次元動作解析システムの結果は定性的に一致しており、同様な変化傾向がみられた。このことから歩行中の様な動的な状況下であっても正面動画による歩行解析で 3次元動作解析システムと同様に FTA 変化をとらえられると考えられる。また、立脚期における KC と下肢機能軸との距離 L の変化を図 6 に示す。グラフの横軸は測定の時間であり、縦軸は KC と下肢機能軸との距離 L である。図 6 より KC と下肢機能軸の距離 L においても正面動画の結果と 3次元動作解析システムの結果は定性的に一致しており、立脚中に差異はみられなかった。従って、KC と下肢機能軸の距離 L においても正面動画による歩行解析で 3次元動作解析システムと同様に解析が可能であると考えられた。

#### 4.4 膝 OA 患者の下肢機能軸位置

図 7 に Lateral thrust を有する膝 OA 患者の立脚期における下肢機能軸脛骨平面通過点を示す。比較のため健常者のデータもともに示す。膝 OA 患者では、下肢機能軸の脛骨平面通過点は健常者に比べ前後移動範囲が小さくなっており、全体的に内側に移動していた。また、初期接地から荷重応答期にかけての内側移動量が健常者に比べて有意に増加していた。この荷重応答期における下肢機能軸の急激な内側移動が、Lateral thrust により膝関節が外側に横ぶれしている影響であると考えられる。したがって、実際に Lateral thrust のような歩行異常を有する場合、本研究における下肢機能軸評価によりその異常動作をとらえることが可能であることが明らかとなった。

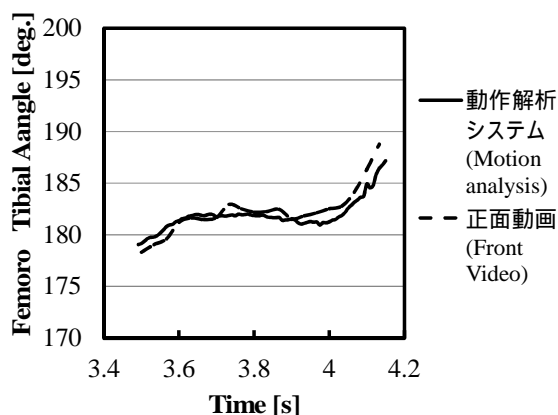


図 5 立脚期における FTA 変化 (典型例)

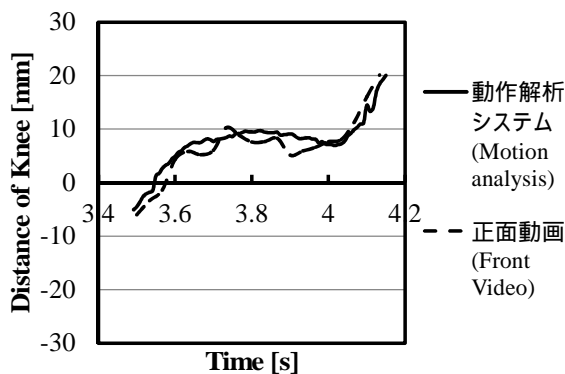


図 6 立脚期の KC と下肢機能軸の距離 L (典型例)

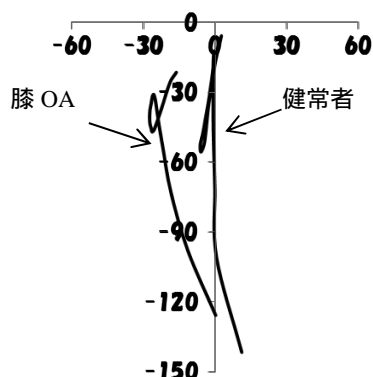
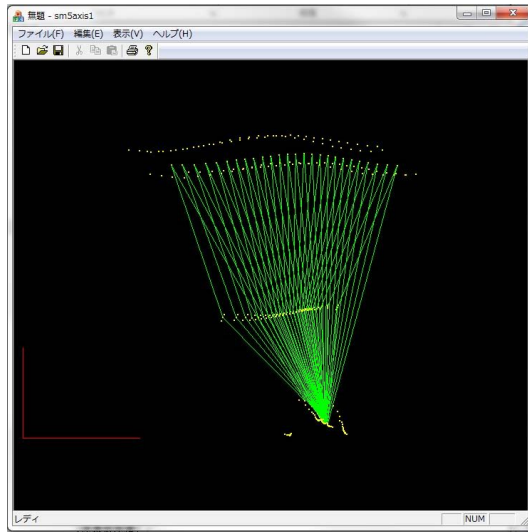
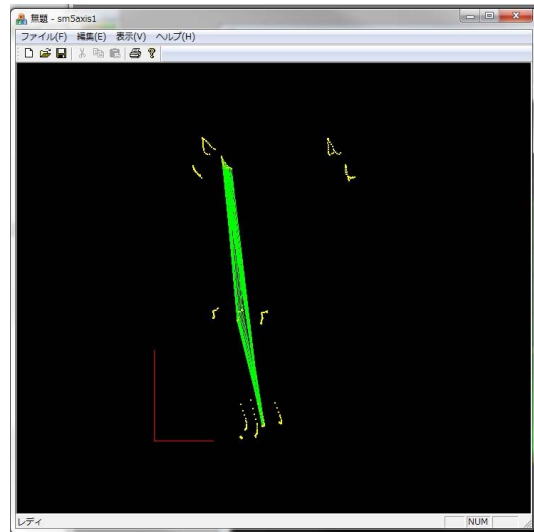


図 7 健常者と膝 OA 患者の下肢機能軸位置



a) 矢状面方向



b) 前額面方向

図8 可視化プログラムの出力画面

#### 4.5 膝関節アライメントと下肢機能軸の可視化プログラム

図8に作成したプログラムの出力表示を示す。図8a)は矢状面での表示であり、図8b)は前額面での表示である。プログラムでは、読込ファイルとして下肢機能軸や大腿、下腿セグメントを構成するそれぞれの関節中心であるHC、KC、ACの座標値およびそれぞれの関節中心を算出するために用いた両ASIS、両大転子、膝関節内外顆、足関節内外果の座標値とした。これらの座標値からHCとKC、KCとACを結ぶ線分を描画し、大腿セグメントと下腿セグメントとした。また、HCとACを結ぶ線分で下肢機能軸を描画した。これらを各フレームで描画することにより、大腿、下腿セグメントの関係性からの膝関節アライメントや下肢機能軸の位置、機能軸とKCの関係、さらにはそれらの空間的な位置や傾きなども視覚化し、その上、それらの変化を可視化することができた。また、表示方向や大きさは任意で変更することができ、確認しにくい所も回転や拡大などを行うことで確認しやすくしている。このプログラムにより、目で見ることのできない下肢機能軸や膝関節アライメントを視覚的に検討することができた。

#### <引用文献>

- 1) Katsutoshi Nishino, Go Omori, Yoshio Koga, Koichi Kobayashi, Makoto Sakamoto, Yuji Tanabe, Masaei Tanaka, Masaaki Arakawa, Three-dimensional dynamic analysis of knee joint during gait in medial knee osteoarthritis using loading axis of knee, Gait and Posture, 42, pp.127-132, 2015.

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表](計4件)

Calvin Anak Rigar、川上 健作、健常歩行における下肢荷重線の3次元解析、日本機械学会北海道学生会第46回学生員卒業研究発表講演会、2017

Calvin Anak Rigar、川上 健作、歩行における3次元下肢機能軸の解析、Japn ATフォーラム2017、2017

川上 健作、CALVIN Anak Rigar、杉本 大昂、小山 祐人、大越 康充、3次元下肢機能軸を利用した膝関節アライメントの動的評価法の提案、日本福祉工学会九州支部大会2017、2017

鈴木 颯、川上 健作、正面動画による歩行中の膝アライメント評価、日本機械学会北海道学生会第47回学生員卒業研究発表講演会、2018

#### 6. 研究組織

##### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）:

(2)研究協力者

研究協力者氏名：大越 康充

ローマ字氏名：OKOSHI Yasumitsu

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。