

## Brief Reports

## 足部および下腿アライメントの測定法の開発

伊藤真也,<sup>1</sup> 富田 豊,<sup>2</sup> 田辺茂雄<sup>3</sup><sup>1</sup> 富田浜病院<sup>2</sup> 藤田保健衛生大学藤田記念七栗研究所<sup>3</sup> 藤田保健衛生大学医療科学部

## 要旨

Ito S, Tomita Y, Tanabe S. Development of a method to assess alignment of the foot and lower leg. Jpn J Compr Rehabil Sci 2013; 4: 80–83.

【目的】足部から下腿の3次元解析は、大規模な研究施設に限られ、また高価であることから、計測場所が限局されず、安価なデジタルカメラを用いた静止画の3次元解析方法を開発し、臨床研究に応用させること。

【方法】対象の後方6mの距離および同じ距離で左右に45°開いた位置に3台のデジタルカメラを設置した。撮影された画像から三角測量の原理を用いて3次元座標を算出した。その精度を足部から下腿の石膏モデルに貼付けたマーカを読み取り検証した。

【結果】読み取り誤差は平均0.6mm、繰り返し誤差は最大で1.6mm、平均1.3mm、直接評価法との誤差率は最大2.3%と高い信頼性が得られた。

【結論】本法を用いた3次元解析は高い信頼性が得られた。静止画の解析に限られるという限界があるが、使用機器が安価であり、計測場所が限局されないことから、臨床現場で普及し、応用が期待される。

**キーワード:** 足部・下腿のアライメント, 3次元解析, デジタルカメラ, 精度

## はじめに

足部の運動学的解析の報告には、アーチ高率 [1, 2], 重心動揺や足圧分布 [3, 4], モーションキャプチャ [5, 6], X線画像 [7], CT [8] を使用したものが散見される。アーチ高率や足圧分布の先行研究では足部の解析はされているが、下腿の解析までは

ほとんどされていない。足部のアライメントが下腿の回旋角度に影響するという先行研究はあるが、高価で大きな計測スペースを必要とするモーションキャプチャを使用した報告である [5, 6]。足関節と下腿のアライメントの計測は臨床的にも有用であるが [9] 現状では高価で計測場所が大規模な施設に限られるモーションキャプチャを用いる方法しかない。

[10] そこでその代替技法として3台の市販のデジタルカメラを使用した三角測量法による3次元計測方法を考案した。本研究では、安価で容易に計測する方法を提案する。その一例として下腿および足部のアライメントを計測する。

## 理論と方法

本研究では三角測量法 [11] の原理を用いた。

カメラはPENTAX社製、Optio RZ18 (3465×4608画素, 焦点距離: 60.3 mm (35 mm判換算 335 mm), F5.4, シャッタ速度: 1/6 ~ 1/4 秒, ISO: 100) を3台使用した。カメラ配置は図1に示した。撮影対象の6m後方にカメラPを配置して、左右に45°開いた位置にカメラR, カメラLを配置した。

作製した校正枠を図2に示す。100mm間隔で3行3列の格子の上に直径5mmの球形マーカを9つ配置した。図に示した1~9のマーカを以下P1~P9とよぶことにする。

まず、カメラの液晶モニタから校正枠を観察し、中央前後方向にP2, P5, P8の3個のマーカが重なることを確認し、カメラPの位置を定めた。つぎにカメラRから対角方向にP3, P5, P7, カメラLから逆対角方向P1, P5, P9の3個のマーカが重なるようにカメラR, カメラLを設置した。空間軸はP5を原点とし、横、奥行き、高さ方向をそれぞれX, Y, Z軸に対応させた。

カメラPからは下腿と足部に貼付けたすべてのマーカが撮影されるように、カメラRには右側(以下, R側)のマーカが、カメラLからは左側(以下, L側)のマーカが撮影されるように配置した。

撮影された画像から得られる2次元座標を(横方向, 縦方向)=( $u_i, v_i$ ) ( $i$ はカメラ位置, R, P, L)と表記し、算出された3次元座標を( $x, y, z$ )と表記することにする。

画像からの3次元解析において2台以上のカメラは

著者連絡先: 伊藤真也

富田浜病院

〒510-8008 三重県四日市市富田浜町 26-14

E-mail: tomireha@tomidahama.jp

2013年11月25日受理

本研究において一切の利益相反や研究資金の提供はありません。

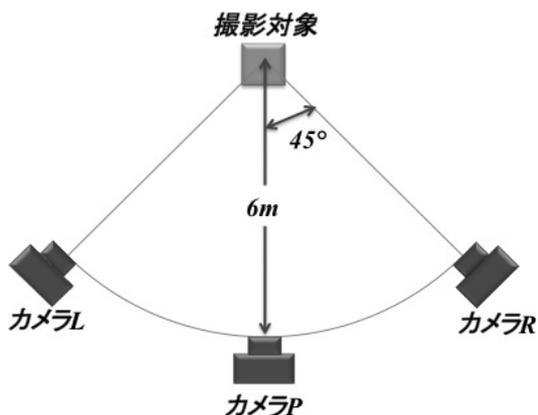


図1. カメラ配置

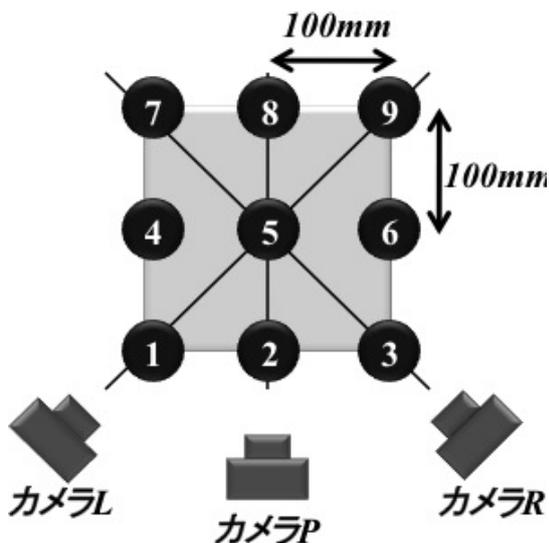


図2. 校正枠

必須であり、各々のカメラ画像に座標を求めたいマーカーが撮影されていなければならない。そして、撮影された画像からマーカーの写っている2次元座標 ( $u_i, v_i$ ) を読み取り、各々の2次元座標をもとに3次元座標 ( $x, y, z$ ) を算出する必要がある。

画像を各カメラからJPEG形式でPCに取り込み、画像上のマーカーの中心を目視にてマウスのカーソルを合わせ、クリックして座標を書き出すプログラムをLab VIEW (NATIONAL INSTRUMENTS 社) を用いて作成した。

そのようにして得られた2次元座標から幾何光学をもとに立式すると、カメラLおよびカメラPの画像から  $[x, y, z]$  を算出するときには、奥行きによる補正前の  $x$  座標を  $x'$  として、

$$\begin{bmatrix} x' \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sqrt{2} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ u_P \\ v_P \\ u_R \\ v_R \end{bmatrix}$$

また、カメラRおよびカメラPの画像から  $[x, y, z]$  を算出するときには、

$$\begin{bmatrix} x' \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ u_P \\ v_P \\ u_R \\ v_R \end{bmatrix}$$

となる。さらに、奥行き  $y$  による  $x$  の補正は、

$$x = x'(1 + y/6000)$$

となる。

原点を  $P5$  とし、 $P4$  と  $P6$  間の距離を 200 mm となるように、 $P4, P6$  のマーカーが作る線分の傾きが 0 となるように校正した。

撮影にはリモートコントローラを使用し、カメラP, R, L を同時に撮影した。

精度の検証のために、下腿～足部の石膏モデルに10個のマーカー(踵骨内側、踵骨外側、舟状骨、第5中足骨底、第1中足骨頭、第5中足骨頭、内果、外果、脛骨近位、腓骨頭)を貼付けた。10個のマーカーの座標を上記の方法で算出し、信頼性の評価として読取り精度および繰り返し精度を評価した。

読取り精度は、1組の画像から、上記10個のマーカーの座標を10回繰り返し読取った。読取り精度は平均値からのずれの性質が重要なので10回のデータから2乗平均平方根を算出し、指標とした。

繰り返し精度は、被験者が脚を置き直す時の位置や角度の変化と同程度となるよう、石膏モデルを試行ごとに位置や角度が変わるように無作為に置き直した。ただし、カメラPに全てのマーカーが写るようにした。10組の画像から座標を算出し、その座標からマーカー間距離を算出し、精度の指標として評価した。算出したマーカー間距離はX方向に距離が大きい踵骨内側～踵骨外側、第1中足骨頭～第5中足骨頭を、Y方向に距離が大きい踵骨内側～第1中足骨頭、踵骨外側～第5中足骨頭を、Z方向に距離が大きい内果～脛骨近位、外果～腓骨頭の6項目を代表値として採用した。

また、上記6項目の距離を直接評価法としてノギスやメジャーを使用し計測して比較した。

### 結果

同じマーカーの座標をカーソルで10回測定した。読取り精度を表す2乗平均平方根を表1に示す。平均値は0.6 mmであった。

マーカーを貼付した石膏モデルの位置・角度を変えて、10回置き直してマーカー間距離の誤差を測定した。結果を表2に示す。繰り返し精度は最も大きい値でY方向に長い踵骨内側～第1中足骨頭、踵骨外側～第5中足骨頭で1.6 mmであった。また、直接評価法との誤差率は最大で2.3%であった。

### 考察

読取り精度の検証実験から、精度は0.6 mm程度と験者がマーカーを読取る際のカーソル設定位置の精度は高いことが示された。石膏モデルを試行ごとに置き直し、石膏モデルの位置や角度が異なった場合でも、同程度で計測される事が示された。また、ノギスやメ

表 1. 読取り精度

|          | (mm)       |              |             |
|----------|------------|--------------|-------------|
|          | x<br>(横方向) | y<br>(奥行き方向) | z<br>(高さ方向) |
| 踵骨内側     | 0.5        | 0.7          | 0.7         |
| 踵骨外側     | 0.6        | 1.0          | 0.7         |
| 舟状骨      | 0.5        | 0.7          | 0.7         |
| 第 5 中足骨底 | 0.5        | 0.6          | 0.4         |
| 第 1 中足骨頭 | 0.3        | 0.7          | 0.4         |
| 第 5 中足骨頭 | 0.4        | 0.8          | 0.5         |
| 内果       | 0.5        | 0.7          | 0.7         |
| 外果       | 0.4        | 0.5          | 0.4         |
| 脛骨近位     | 0.6        | 0.7          | 0.4         |
| 腓骨頭      | 0.7        | 0.7          | 0.5         |

表 2. 繰り返し精度

|                 | (mm)      |           |       |
|-----------------|-----------|-----------|-------|
|                 | 本 法       | 直接評価法     | 誤 差 率 |
| 踵骨内側—踵骨外側       | 44.9±0.8  | 45.3±0.8  | -0.9  |
| 第 1 中足骨頭—5 中足骨頭 | 101.9±0.8 | 102.7±0.7 | -0.8  |
| 踵骨内側—第 1 中足骨頭   | 170.9±1.6 | 166.9±1.0 | 2.3   |
| 踵骨外側—第 5 中足骨頭   | 165.8±1.6 | 163.3±1.1 | 1.5   |
| 内果—脛骨近位         | 295.9±1.3 | 296.4±1.2 | -0.2  |
| 外果—腓骨頭          | 311.9±1.3 | 312.6±1.0 | -0.2  |

ジャーで計測した直接評価法との誤差率は最大で 2.3%であった。以上のことより、本システムの信頼性は高く評価される。従来の装置と比べても、たとえば、キネマトレーサでは全長 500 mm を撮影したときに読み取り誤差が 5 mm 程度、直接評価法との誤差率が 1% 程度である。VICON の読み取り精度や直接評価法との誤差率は公表されていないが、同程度と考えられる。

本法の開発にあたっては「誰でも」「何処でも」計測可能であることを目的とした。したがって、必要な物品はすべて市販されているものを使用しており、価格は合計 36,000 円 (US\$ 379, on March 12, 2013) 程度である。さらに画像解析プログラムを自作することによりコストを低減した。装置は可搬であり、一般病院や老人保健施設などどこでも計測が可能である。安価かつ測定場所の制限が少ない、さらに十分な精度が得られる計測方法であることから、実用的な計測手段となり得ると考えられ、これまであまり研究されていなかった下腿の回旋など水平面の解析の臨床データが得られることが期待される。

また、本法ではマーカを貼付後、立位を取り、カメラ P で全てのマーカが撮影できるよう、位置決めが必要がある。被験者はいす座位にてマーカを貼付するために 1 分、立位にて位置決め 10 秒、撮影時間は約 5 秒を要した。

一方で、本法は静止面の解析に留まり、アライメントの評価は可能であるが、関節運動など経時的なデータは得られないという限界があるため、研究デザインを工夫する必要がある。

## 結論

本法は静止面の解析に限られるが、足部および下腿アライメントの評価法として適している。これまで一般病院など計測機器が十分に備わっていない施設において、アライメント評価は目視による主観的评价に限られていた。市販のデジタルカメラを使用し、高い信頼性が得られた本法により、客観的评价が可能となった。

## 文献

1. Kinosita S, Tanabe Y, Ito S, Sasaki S, Kimura S. Change of navicular bone height and leg-heel angle before and after total knee arthroplasty. *Hokkaido Rigakuryouhou Gakkaishi* 2008; 25:51-5. Japanese.
2. Miaki H, Kato I. Center of foot pressure in a mediolateral direction and arch ratio as a reliable measure for flat-footedness. *Rigakuryouhou Kagaku* 2007; 22(3):409-12. Japanese.
3. Takeuchi Y. Effect of stimulus on mechanical sensory receptors on shift area of the center of foot pressure. *Rigakuryouhougaku* 2002; 29(7): 250-4. Japanese.
4. Hasegawa M, Shimatani K, Kanai S, Oki S, Shimizu ME, Muguruma A, Otsuka A. The effect on gait of the lack of fround connection by the toes in standing. *Rigakuryouhou Kagaku* 2010; 25(3):437-41. Japanese.
5. Kuroyanagi Y, Nagura T, Matsumoto H, Otani T, Suda Y, Nakamura T, Toyama Y. Lateral wedge insole with subtalar strapping significantly reduce dynamic knee load

- in the medial compartment gait analysis on patients with medial knee osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage* 2007; 15: 932-6.
6. Kernozek TW, Ricard MD. Foot placement angle and arch type: Effect on rearfoot motion. *Arch Phys Med Rehabil* 1990; 71: 988-91.
  7. Ito D, Teramoto T, Nakamura S, Iwasaki K, Suzuki R. Relationship between elevation of medial arch of the foot with the windlass action and inversion of the posterior foot. *Orthop Surg Traumatol* 1996;45(1):69-72. Japanese.
  8. Kii Y, Suzuki T, Miyoshi T, Watanabe K, Yamashita T. Evaluation of transverse metatarsal arch of foot and its change with load: 3 dimensional analysis with CT. *Hokkaido J Orthop Traumatol* 2011;53(1):91-4. Japanese.
  9. Sarranfan SK. Anatomy of the foot and ankle. In: Braddom RL, editor. *Descriptive, Topographic, Functional*. 2nd ed. Philadelphia: JB Lippincott Co; 1993. p.398-9.
  10. Internet Committee of Medical Journal Editors (ICMJE). Photogrammetry. Available from: [http://www.vicon.com/\\_pdfs/low-resViconFootModel.pdf](http://www.vicon.com/_pdfs/low-resViconFootModel.pdf) (cited 2013 July 24).
  11. Internet Committee of Medical Journal Editors (ICMJE). Photogrammetry. Available from: [http://www.cc.u-ryukyu.ac.jp/~h061649/lecture\\_3/3\\_10.pdf](http://www.cc.u-ryukyu.ac.jp/~h061649/lecture_3/3_10.pdf) (cited 2013 May 11).