1 方向 X 線動画を用いた深屈曲動作における健常膝蓋骨の機能評価

The functional assessment of natural patella during deep flexion using the X-ray images from a single-plane flat panel detector

○正 白石 善孝 (愛媛大) 石丸 雅巳 (愛媛大) 三浦 裕正 (愛媛大) 正 日垣 秀彦 (九産大)
学 池部 怜 (九産大) 学 西松 和穂 (九産大) 正 中西 義孝 (熊本大) 田代 泰隆 (九州大)
岩本 幸英 (九州大)

Yoshitaka SHIRAISHI, Ehime University, 454, Shitsukawa, Toon, Ehime
Masami ISHIMARU and Hiromasa MIURA, Ehime University
Hidehiko HIGAKI, Satoru IKEBE and Kazuho NISHIMATSU, Kyushu Sangyo University
Yoshitaka NAKANISHI, Kumamoto University
Yasutaka TASHIRO and Yukihide IWAMOTO, Kyushu University

Key Words : 6-DOF Motion Analysis, Single-Plane FPD, *In Vivo*, Image Correlation, Natural Patella, Deep Flexion

1. 緒言

生体内における人工関節置換膝や生体膝を対象とした動態解析は様々な研究グループにより盛んに行われている^{1, 2)}。しかし、人工膝関節を対象とした動態解析手法はコンポーネントの輪郭像を用いたパターンマッチング手法が多く用いられているが、膝蓋骨コンポーネントにおいては多くが超高分子量ポリエチレン製であるためX線動画撮影時に明瞭な輪郭像を得ることができず生体内での評価は困難である。生体膝蓋骨を対象とした動態解析には2方向X線動画を用いた高精度な解析技術³⁾も散見されるが、特殊機器が必要であることが問題として挙げられる。そのため、多くが大腿脛骨関節における評価であり膝蓋骨を含めた機能評価は少ない。膝蓋骨は膝関節を構成する大きな部位であるためスムーズな深屈曲動作や膝の安定性などに大きく関与していると考えられ、人工膝関節のデザインにおいても重要であると言える。そこで、私たち研究グループでは、開発したウィンドウ解析技術と生体関節を対象とした1方向X線動画を用いる画像相関イメージマッチング手法^{4, 5)}を応用することで高精度な動態解析が行えると考えた。本報では健常膝蓋骨を対象とした動態解析を行い、アジア人の日常生活動作である正座等にあたる深屈曲動作について6自由度運動および膝蓋大腿関節の軟骨下骨間距離を評価した。

2. 手法

2.1 対象と撮影方法

被験者は成人男性3名の健常な3膝を対象とした(被験者A~C)。平均年齢 29.7 ± 1.2 歳、平均体重 68.0 ± 8.6 kgであった。対象動作はアジア人の日常生活動作である正座等にあたる深屈曲動作とした。CTの撮影範囲は膝関節を中心に約200mmとした(画素数 512×512 pixel, 画素サイズ 0.351×0.351 mm, スライス厚さ 1.0mm)。フラットパネルディテクター (Flat panel detector, FPD) による1方向X線動画の撮影方法は、図1に示すようにX線源と平面センサーの間において被験者が屈曲角度約90degで跪いた状態を初期姿勢とし、被験者自身が曲げることができる最大屈曲位までの過程を側面1方向より連続撮影した(画素数 1536×2046 pixel, 画素サイズ 0.353×0.353 mm, フレームレート 3fps)。

2.2 動態解析手法

動態解析手法⁴⁾は、コンピュータ上においてCT画像ベースのグレースケール3次元モデルから得られる投影シミュレーション像と1方向X線動画の画像相関により行う。本手法の精度は、精度検定において整形外科領域で有効とされる平均誤差1.0mm、1.0deg以内に収まっていることを

Fig. 1 X-ray images of the natural knee joints during deep flexion with the single-plane FPD

確認している⁴⁾。脛骨と大腿骨の座標系は過去の研究⁵⁾と同様にした。膝蓋骨の座標系は、図2に示すように膝蓋骨の重心を原点O、膝蓋骨内側を点Aおよび外側を点B、膝蓋骨遠位を点Cおよび近位を点Dとする。このとき、2直線ABおよびCDが原点Oを通り直交し、かつ2直線上の距離LとMの和が最大となる軸をそれぞれX軸およびZ軸と定義した。さらに、X軸とZ軸の外積をY軸と定義した。膝蓋骨座標系におけるX軸、Y軸およびZ軸の正回転はそれぞれ屈曲、内側回転および内側傾斜と定義した。

Fig. 2 Relative coordinate systems in the patella of the natural knee joints (Right knee)

3. 結果・考察

深屈曲動作における膝蓋骨の動態解析結果は、脛骨から見た膝蓋骨の相対関係を膝屈曲角度に対する膝蓋骨の6自由度で評価し、特徴的な変位が確認できた3自由度を図3に示す。最大膝屈曲角度は被験者Aでは約161deg、被験者Bでは約159deg、被験者Cでは約154degを示した。膝蓋

骨の最大屈曲角度は被験者 A では約 66deg, 被験者 B では約 61deg, 被験者 C では約 60deg を示した。内側/外側回転の結果では全被験者とも外側回転位よりの変位が確認できた。被験者 A では膝屈曲角度約 135deg まで約 5deg の内側回転が確認でき、膝屈曲角度約 135deg 以上においては約 11deg の外側回転が確認できた。被験者 B では変位量を維持している傾向が確認できた。被験者 C では膝屈曲角度約 120deg まで約 7deg の内側回転が確認でき、膝屈曲角度約 120deg 以上においては変位量を維持している傾向が確認できた。内側/外側傾斜の結果では全被験者とも外側傾斜位での変位が確認でき、屈曲に伴い約 3~14deg の外側傾斜が確認できた。内側/外側の並進運動における結果では全被験者とも内側位よりの変位が確認できた。被験者 A では膝屈曲角度約 145deg まで約 3mm の外側変位が確認でき、膝屈曲角度約 145deg 以上においては約 5mm の内側変位が確認できた。被験者 B では屈曲に伴い約 11mm の内側変位が確認できた。被験者 C では変位量を維持している傾向が確認できた。内側/外側回転および内側/外側の並進運動における結果から外側回転位よりの変位や内側位よりの変位が確認できたことは、本研究グループが行ったスクワット動作の結果と比較してもそれぞれ顕著な外側回転位および内側位での変位が確認できる。これは、スクワット動作に比べ深屈曲動作では大腿四頭筋の緊張度の低下や荷重軸が膝蓋骨方向にあることが影響しているためと考えられる。

深屈曲動作における膝蓋大腿関節の軟骨下骨間距離の結果は、被験者ごとに等高線分布として評価し、最小膝屈曲位と最大膝屈曲位について図 4 に示す。全被験者とも最小膝屈曲位では膝蓋面中央部に最接近位置が分布している傾

向が確認できた。さらに、最大膝屈曲位では大腿骨に対する膝蓋骨の分布量が全被験者とも内側顆に比べ外側顆の方が大きな傾向が確認できた。このことから、大腿骨の外側顆に対して膝蓋骨から受ける荷重が大きくなり、健康膝で見られる屈曲運動に伴う大腿骨の外旋運動を補助的に促していると推察できる。これにより、人工膝関節に健康膝の安定した機能性を持たせるには、屈曲時に膝蓋大腿関節の接触面分布量を外側顆に変位させるようなデザインが重要であると考えられる。

4. 結言

健康膝蓋骨を対象とした動態解析を行い、アジア人の日常生活動作である正座等にあたる深屈曲動作について 6 自由度運動および膝蓋大腿関節の軟骨下骨間距離を評価した。被験者数の蓄積や様々な動態を解析することが必要であるが、結果より深屈曲動作の肢位による特徴的な動態を評価することができたと考えられる。さらに、人工膝関節の動態解析結果と照査することで、人工膝関節デザインの開発支援技術としても期待できる。

参考文献

- 1) Kozanek, M., et al., J Biomech., 42(12), 1877-1884, (2009).
- 2) Banks, S.A., et al., J Bone Joint Surg Am., 85-A(4), 64-72, (2003).
- 3) Ohnishi, T., et al., Radiol Phys Technol., 3(2), 151-158, (2010).
- 4) 日垣秀彦, 他, 日本機械学会論文集 (C 編), 75(755), 2044-2050, (2009).
- 5) 白石善孝, 他, 臨床バイオメカニクス, 30, 215-221, (2009).

Fig. 3 Translations and rotations of the patella with respect to the tibia during deep flexion (Right knee)

Fig. 4 Contour line of the distance between femur and patella during deep flexion