

三次元筋骨格韧带膝モデルの妥当性検証方法の提案

東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 ○石川雄己, 安琪, 田村雄介, 山下淳,
東京大学大学院医学系研究科 22 世紀医療センター 岡敬之,
東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 浅間一

Verification of 3D Musculoskeletal Ligament Knee Model

Department of Precision Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
Yuki ISHIKAWA, Qi AN, Yusuke TAMURA, Atsushi YAMASHITA,

22nd Century Medical and Research Center, Graduate School of Medicine, The University of Tokyo Hiroyuki OKA,

Department of Precision Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo Hajime ASAMA

Recently arthropathy has been a big problem in the elderly people. It is clinically known to be caused by a ligament and a cartilage, but its incidents pattern has not been fully clarified yet due to inaccuracy of knee joint model and lack of verification of the developed model. Therefore in this study, verification method of the model is developed to test accuracy of our previous knee joint. However there are no precise knee models which have 6 degrees of freedom, ligaments and joint cartilage. Therefore this study makes the method to verify the knee model by forward dynamics and it is proved.

1. 序論

膝関節の不安定性により、関節構造の変性と歩行障害を惹起することが臨床研究にて示唆されているものの、疾患予防につながる膝関節の状態を評価するシステムは確立していない。この一因として医師による評価のばらつきが挙げられており、工学的なアプローチによるモデルの構築と評価の標準化は疾患予防に必須の課題である。

膝関節は骨性の運動制限が少ないため、関節運動学的アプローチのように関節の遊びを考慮したモデルの構築は発症メカニズムの解明に不可欠となる¹⁾。膝関節の自由度と可動域を制限する要素として、靭帯は大きな影響を与えている。過去にも膝の靭帯の研究は行われているが、関節の遊びを考慮し、三次元で靭帯を表現したモデルは数が少ない。その一因として、再現したモデルと生体データを照合することが困難なため、モデル自体がどの程度の妥当性を有するかを検証する方法が確立していないことが挙げられる。著者らもこれまでの研究²⁾で関節の遊びを考慮した三次元筋骨格韧带膝モデルを作成したが、モデルの妥当性を検証するには至らなかった。

そこで本研究では、モデルに順動力学を用いて任意の荷重を与えた結果を屍体実験の結果と比較する手法を提案し、妥当性の検証を行えるかを確認することを目的とする。

2. 膝関節

膝関節は、大腿骨・脛骨・膝蓋骨から成り、内側大腿脛骨関節・外側大腿脛骨関節・膝蓋大腿関節の3つの関節から構成されている。関節面には関節軟骨と半月板が分布している。骨に伝わる力を軽減する働きがあり、関節可動域と動態に影響を与える。関節包は関節全体を覆い、特に上下方向の関節可動域と動態に影響を与える。

筋は大腿四頭筋（内側広筋・中間広筋・外側広筋）が膝関節を伸展させ、大腿二頭筋（短頭・長頭）・半膜様筋・半腱様筋・縫工筋・薄筋・腓腹筋が屈曲させる。大腿四頭筋は、大腿二頭筋と協調し膝関節を安定させるように働く。

靭帯は主に前十字靭帯（ACL）、後十字靭帯（PCL）、内側側副靭帯（MCL）、外側側副靭帯（LCL）の4つがある。靭帯は面を形成して骨に付着しており、靭帯束も複数存在する。

3. モデル

三次元筋骨格韧带モデルの作成と検証には、SIMM（MusculoGraphics社）を使用した。このソフトウェアは、筋骨格モデル、動態データと床反力データを与えることで、筋力などを計算することができる。また、外力を任意に与えることで、モデルがどのように変化するかを計算することもできる。

靭帯膝モデルはSIMMの既存筋骨格モデル（右脚）をベースに、体節と関節の設定を変更し、関節自由度を6自由度になるよう設計した²⁾。また、膝関節の関節中心などの機構も再現したモデルを作成した。作成したモデルの下肢筋骨格全体図は図1（左）の通りである。

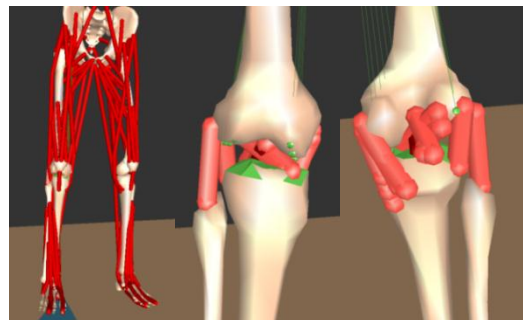


図1 下肢筋骨格全体図（左）及び靭帯付着位置（中央；前方から、右；後方から）

靭帯は図1（中央・右）の通り付加した。付着位置に関しては解剖学的位置を参照し作成した²⁾。靭帯の束数と機械的特性は文献値を参照した²⁾。関節軟骨及び半月板を表現するため、骨表面に接触した深さに応じて反力を発生する点を無数に設定し、骨表面との接触時に反力を発生させた。機械的特性は Neptune らの文献値を参照した³⁾。

4. 妥当性検証

モデルに任意の荷重を加える順動力学計算の結果と靭帯切断屍体実験の結果を比較することによりモデルの妥当性検証を行った。

Shoemaker らは ACL と MCL を切断しつつ、脛骨に前後方向の荷重を加え、それに伴う膝関節における前後方向の変位を屍体実験で計測した⁴⁾。この結果と比較するため、モデルの脛骨に前後方向に荷重を-200N~200Nを50N刻みで与える順動力学計算を行った。

Ahrens らは膝関節の屈曲角度を0°（伸展）・30°・90°と変え、ACL を切断しつつ、脛骨軸周りにトルクを与え、脛骨軸周りでの角度変化を屍体実験で計測した⁵⁾。この結果と比較するため、モデルの脛骨軸に内転外転方向にトルクを-20Nm~20Nmを5Nm刻みで与える順動力学計算を行った。全ての靭帯を付与したモデルを Intact, ACL を切断したモデルを ACL, MCL を切断したモデルを MCL, 両方切断したモデルを Both と表記した。

5. 結果と考察

図2には縦軸に荷重、横軸に変位をとり、脛骨に前後方向の荷重を加える順動力学計算結果と屍体実験結果を示した。結果のスケールに着目すると、計算結果では前後に3mm程度の変位しか起こっていないのに対し、屍体実験では前後10mm程度の変位が見られる。この点から、作成したモデルの靭帯のStiffnessは屍体における値よりも高く設定されていることが示唆される。

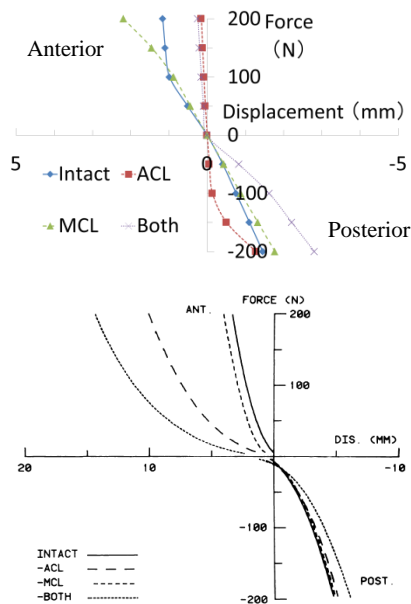


図2 前後方向の荷重と変位
(上；順動力学計算，下；屍体実験結果⁴⁾)

図3には縦軸にモーメント、横軸に回転角度をとり、脛骨軸周りにトルクを加える順動力学計算結果と屍体実験結果を示した。膝関節の屈曲角度に関わらず、計算と屍体実験結果は概ね一致した。これより、脛骨軸周りの運動に関しては、モデルは表現できていると考えられる。

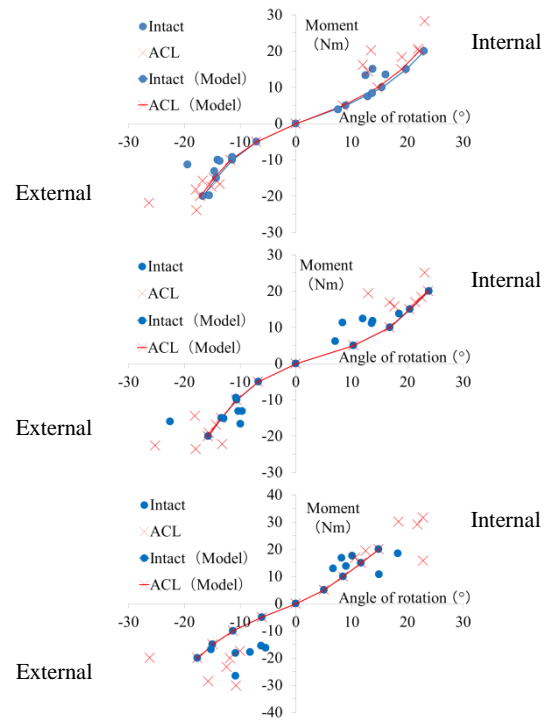


図3 脛骨軸周りのモーメントと回転角度
(上；膝関節の屈曲角度0°，中央；30°，下；90°
点と実線；計算結果，点；屍体実験結果⁵⁾)

6. 結論・今後の展望

三次元筋骨格靭帯モデルを作成し、モデルの妥当性を検証した。順動力学計算結果と靭帯切断屍体実験結果との比較により、前後の変位方向に関してモデルの精度が不十分であるが、脛骨軸周りのトルクと回転角度は文献値と概ね一致しており、本手法がモデルの妥当性検証に有効であると考えられた。今後は本手法を活用してパラメータを決定し、モデルの精度を上げたい。

謝辞

株式会社ナックイメージテクノロジーの藤田氏には膝関節作成にあたり多大な御協力をいただきましたことを明記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 博田節夫: 関節運動学的アプローチ AKA, 医歯薬出版, pp. 1-13, 32-36, (1990) .
- 2) 石川雄己, 安琪, 田村雄介, 岡敬之, 浅間一: 関節の遊びを有する三次元筋骨格靭帯膝モデルの開発, 第32回バイオメカニズム学術講演会予稿集, pp. 129-130, (2011) .
- 3) Neptune R. R., Wright I. C. and Van Den Bogert A. J.: A Method for Numerical Simulation of Single Limb Ground Contact Events: Application to Heel-Toe Running, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, Vol. 3, No. 4, pp. 321-334, (2000) .
- 4) Shoemaker S. C. and Markolf K. I.: Effect of Joint Load on the Stiffness and Laxity of Ligament-Deficient Knees, Journal of Bone and Joint Surgery, Vol. 67 (A), No.1, pp. 136-146, (1985) .
- 5) Ahrens P, Kirchoff C, Fischer F, Heinrich P, Eisenhart-Rothe R, Hinterwimmer S, Kirchoff S, Imhoff AB, Lorenz SG: A novel tool for objective assessment of femorotibial rotation: a cadaver study, International Orthopaedics, Vol. 35, No. 11, pp. 1611-20, (2010) .