

機関番号：22604

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20591766

研究課題名 (和文) 前十字靭帯のバイオメカニクス—線維束張力作用部位の3次元動態マッピング—

研究課題名 (英文) Biomechanics of the anterior cruciate ligament: 3-D dynamic mapping of bundle force application

研究代表者

藤江 裕道 (FUJIE HIROMICHI)

首都大学東京システムデザイン学部教授

研究者番号：20199300

研究成果の概要 (和文) : 靭帯張力を計測するために、6 軸力センサのキャリブレーションにおいて、靭帯張力作用位置近辺で精度が高まるような方法に改良した。これにより、張力作用位置付近での荷重位置解析誤差を、10 mm 程度から 1 mm 程度に減少させた。ロボットシステムにより複合荷重を膝関節に負荷し、その際の 6 軸力センサの出力を記録した。その後、大腿骨の前十字靭帯付着部近辺の形状を医用 CT で計測し、先に求めた靭帯張力作用線と、CT による靭帯付着部形状の交点を十字靭帯の張力作用点と判断した。その結果、屈曲位において脛骨に前方力が作用する際、前十字靭帯の前内側部に荷重作用位置があることが分かった。これは、別途行われた前十字靭帯張力分布の実験結果に一致するものであった。

研究成果の概要 (英文) : To determine the anterior cruciate ligament (ACL) force in the femoral insertion site, a novel calibration method was developed so that the position accuracy could be enhanced near the insertion site. The accuracy was improved from 10 mm in previous method to only 1 mm in the present study. The developed method was successfully applied to the determination of ACL force in the femoral insertion site using a 6 degree of freedom robotic system in conjunction with CT scan data. Results revealed that the ACL force passed through the anteromedial portion of the ACL insertion site in response to tibial anterior drawer load at deep flexion angles. This agreed well with a data of ACL force sharing pattern obtained in our previous study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学・整形外科学

キーワード：バイオメカニクス、膝関節、靭帯線維束、張力作用部位、ロボットシステム

1. 研究開始当初の背景

前十字靭帯 (ACL : Anterior Cruciate Ligament) は膝関節の安定性を保つ機能を有している。ACL は事故やスポーツ等で損傷してしまう頻度が高いが、その修復には ACL 再建術を行うのが一般的である。近年では ACL の解剖学的付着部に骨孔を作製する解剖学的再建術が多く行われており、臨床で良好な成績を上げている。しかし、ACL の大腿骨付着部に関して研究者間で認識の相違があり、解剖学的再建の術式に関しては医療機関ごとに異なっているのが現状である。この問題の解決には、解剖学的付着部からさらに話を進めて、ACL 張力の生体力学的な作用位置を同定し、その位置を元にした ACL 再建手法について検討することが必要だと考えられる。任意形状物体に働く荷重位置の解析に関しては 6 軸力センサの出力をもとにした方法が開発されている¹⁾。しかし、センサ近傍での解析精度を高めるキャリブレーションが用いられていたため、張力作用位置がセンサから離れると解析誤差が増大するという問題があった。

2. 研究の目的

本研究では新たなキャリブレーション方法を開発し、6 軸力センサによる計測・解析方法に導入して張力作用位置解析の精度向上をはかった。さらに、関節力学試験ロボットシステムを用いて膝関節に荷重を与え、その時の ACL 張力作用位置解析を行った。

3. 研究の方法

3-1 理論

センサ座標系に沿った 3 力・3 モーメントを列ベクトル F で表す。センサに固定された剛体に荷重 F_{in} が負荷された時の荷重出力を F_{out} とすると、その関係は、6 行 6 列の変換行列 A を用いて以下の式で表される。ただし、 F_{in} と F_{out} は線形関係にあるとする。

$$F_{out} = AF_{in} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{61} & \dots & a_{66} \end{pmatrix} F_{in} \quad \dots(1)$$

Fig.1 に示すようにセンサに剛体を取り付

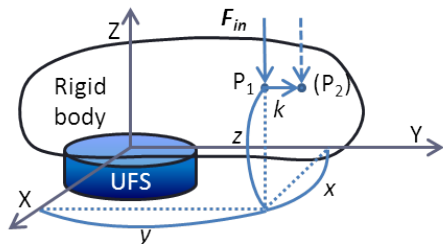


Fig.1 キャリブレーション概要図

け、剛体上の任意の点 $P_1(x, y, z)$ にセンサ座標系の Z 軸と並行な荷重 f を負荷する。この時の力/モーメント F_{1in} は $(0, 0, -f, -yf, xf, 0)^T$ となる。上付きの¹は転置を表す。次に、荷重を Y 軸と並行に距離 k だけ移動した点 $P_2(x, y+k, z)$ に負荷する。この時の力/モーメント F_{2in} は $(0, 0, -f, -(y+k)f, xf, 0)^T$ となる。ここで、 F_{1in} から F_{2in} を引くと式(2)の関係が得られる。

$$F_{1out} - F_{2out} = A(F_{1in} - F_{2in})$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{61} & \dots & a_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ kf \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} =$$

k の値を変化させて、それぞれの k に対する (2) と同様の関係を求め、 kf と $F_{1out} - F_{2out}$ の関係において近似直線を最小二乗法で求めた。その傾きは(2)式の列ベクトルであり、変換行列 A の 4 列目に相当する。同様の手法を X 軸方向と Y 軸方向にそれぞれ荷重を負荷して行い、変換行列 A の 5, 6 列目が求められる。

次いで、変換行列 A の 3 列目を求めるために、再度 P_1 に荷重 f を負荷する。この時の力/モーメント F_{1in} は式(3)で示される。

$$F_{1out} = AF_{1in} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{61} & \dots & a_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -f \\ -yf \\ xf \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -a_{13} - a_{14}y + a_{15}x \\ -a_{23} - a_{24}y + a_{25}x \\ -a_{33} - a_{34}y + a_{35}x \\ -a_{43} - a_{44}y + a_{45}x \\ -a_{53} - a_{54}y + a_{55}x \\ -a_{63} - a_{64}y + a_{65}x \end{pmatrix} f \quad \dots(3)$$

(3) 式の中で a_{i4} と a_{i5} はすでに求められているので、荷重 F_{in} と変換行列 A の 3 列目の関係が得られる。ここで、荷重 F_{in} を変化させて、それぞれの F_{in} と F_{iout} の関係を求め、最小二乗法で近似し、その傾きを変換行列 A の 3 列目として求める。同様の手法を、荷重を X 軸方向と Y 軸方向に負荷して行い、 A の 1, 2 列目の値を求める。

求めた変換行列 A の逆行列 A^{-1} を求め、(4) 式より入力された力/モーメントを求めることができる。

$$F_{in} = A^{-1}F_{out} \quad \dots(4)$$

3-2 評価試験

開発したキャリブレーション方法の評価のため、試験を行った。試験には6軸力センサ(IFS-40E 15A100-I63-EX, JR³, USA)を使用した。手順を以下に示す。

(1) センサに剛体を取り付けた(Fig. 2)。3-1のキャリブレーション手法を用いて、センサ座標系上の点 $Q(x, y, z)=(-40, -153, -190)$ において上記のキャリブレーションを行った。

(2) 点 Q に垂直荷重 100 N を負荷して、その時のセンサ出力を記録した。

(3) (2)で記録したセンサ出力に対し、3-1の方法および購入時にメーカーから提供された校正係数を用いた方法により、それぞれ校正した。

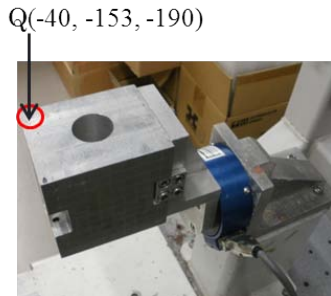


Fig.2 荷重負荷位置

3-3 評価試験結果

評価試験の結果を Fig. 3 に示す。メーカーから提供された校正係数で求められた荷重作用位置は(4, -153, -141)となり、実際の荷重作用位置からは 66 mm 程度の誤差が生じた。それに対し、開発したキャリブレーション方法では、荷重作用位置は(-40, -153, -191)であり、誤差 E は 1 mm 以下に減少した。このことから、開発したキャリブレーション方法は、張力作用位置解析の精度向上に有効な方法であることが分かった。

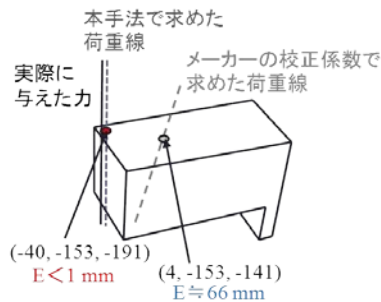


Fig.3 評価試験結果

3-4 関節力学試験ロボットシステム

試験には、Fujie らによって開発された関節力学試験ロボットシステム²⁾を用いた(Fig. 4)。このシステムは 6 自由度の機構を有し、位置制御及び力制御を組み合わせたハイブリッド制御により膝関節の運動にかかる荷重を生体外でシミュレートすることが可能である。さらに試験時の膝関節の動きを記憶することで、記憶した膝関節の動きを繰り返し再現することも可能である。

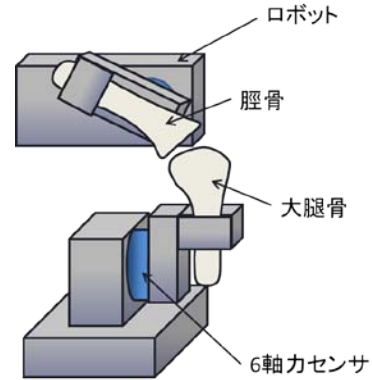


Fig.4 関節力学試験
ロボットシステム概要図

3-5 試料

試験には八王子食肉処理場協同組合より購入したブタ膝関節を用いた。

3-6 解析手順

ACL 張力作用位置解析の手順を以下に示す。

(1) ロボットシステムに膝関節を取り付け、伸展位に固定した状態で関節を 20° 内旋させた。その後、前後方向に 50 N かかるまで前後方変位させた。この時、膝の生理的な状態を再現するために、前後方、内外旋および屈曲伸展を除く残りの 3 自由度には力/モーメントが生じないように制御した。試験中、膝関節の 6 自由度に生じる変位を記録した。

(2) (1)と同様の試験を、関節を 90° 屈曲位にて行った。

(3) ACL 以外の靭帯、腱、軟骨等を切除し、大腿骨と脛骨が ACL だけで連結される状態にした。

(4) (1)で記録した膝関節の 6 自由度変位データを元に、膝の 3 次元運動を再現した。この時の大腿骨側に取り付けられた 6 軸力センサの出力を記録した。

(5) (4)のデータより、センサ座標系での張力作用線を求めた。

(6) 大阪大学医学部整形外科の協力のもと、膝関節の CT 画像を撮影した。撮影は Activision 16(東芝メディカルシステムズ)を用いて行い、分解能は 0.5 mm とした。

(7) (5)で求めた張力作用線をアフィン変換を用いてセンサ座標系から CT 座標系に座標変換した。CT 座標系上に描かれた張力作用線と、大腿骨との交点を張力作用位置として求めた。

4. 研究成果

4-1 解析結果および考察

解析結果を Fig.5 に示す. 伸展位の解析結果では張力作用線が, 実際の ACL の向きと異なる方向に算出された. この原因として, 伸展位では大腿骨と脛骨が非常に近い状態であり, 付着部と ACL のなす角度も小さいため, 試験時に ACL のみに荷重がかからず, 誤差が増加したと考えられる. 屈曲位での解析結果では, 張力作用線が AM 束の付着部を通り, ACL の向きと同じ方向であるという結果を得た. 屈曲位での前後方試験では, 脛骨が大腿骨と離れ, ACL が付着部面となす角も増大するため, 正確に ACL 付着部にかかった張力が測定されたためと考えられる. Fujie らはロボットシステムを用いた実験で, 屈曲位では AM 束に張力が集中するという結果を得ており³⁾, 本結果と一致する.

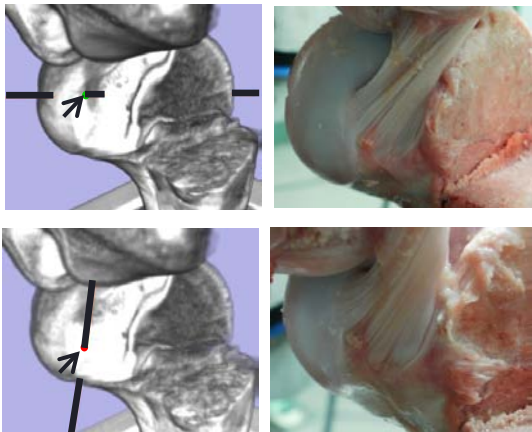


Fig.5 張力作用位置解析結果
(上: 伸展位, 下: 屈曲位)

4-2 結論

ACL 張力作用位置解析の精度向上のために, 6 軸力センサの新たなキャリブレーション方法を開発した. 後に, ブタ膝関節の前後方引出試験における ACL 張力作用位置解析を行った結果, 以下のことが分かった.

(1) 開発した手法で 6 軸力センサをキャリブレーションすると, センサ座標系上の任意位置での測定精度を向上させることができる. これにより, 荷重作用線の測定誤差は 1 mm 以下に減少する.

(2) 新手法でキャリブレーションした 6 軸力センサとロボットシステムを組み合わせ力学条件を純化できる膝の, 屈曲位においては ACL 張力作用位置解析が ACL の AM 束付着部近辺であることが分かった.

4-3 参考文献

1) Fujie H, et al., ASME J Biomech Eng., Vol.117, 1995

2) Fujie H, et al., ASME J Biomech Eng., Vol.129, 2004

3) Fujie H, et al., ORS, 2010

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1) Mechanical functions of the three bundles consisting of the human anterior cruciate ligament, Fujie H, Otsubo H, Shino K, et al. (3 名), Knee Surgery, Sports Traumatology and Arthroscopy, in press.

2) The effect of calcium phosphate hybridized tendon graft on biomechanical behavior in anterior cruciate ligament reconstruction in a goat model: Novel technique for improving tendon-bone healing, Mutsuzaki H, Sakane M, Fujie H, et al. (3 名), American Journal of Sports Medicine, doi:10.1177/0363546510390427, 2011.

3) Optimization of graft fixation at the time of anterior cruciate ligament reconstruction, Part I: Effect of initial tension, Mae T, Shino K, and Fujie H, et al. (4 名), American Journal of Sports Medicine, Vol.36, 1087-1093, 2008.

4) Optimization of graft fixation at the time of anterior cruciate ligament reconstruction, Part II: Effect of knee flexion angle, Mae T, Shino K, and Fujie H, et al. (4 名), American Journal of Sports Medicine, Vol.36, 1094-1100, 2008.

[学会発表] (計 18 件)

1) A novel robotic system capable of simulating physiological knee motions using a high-speed displacement/force control, International Symposium on Ligaments and Tendons, Fujie H (1 番目), et al. (4 名), Irvine, CA, USA 2011.

2) Resident's ridge formation is explained by stress/strain-induced bone remodeling, International Symposium on Ligaments and Tendons, Fujie H (1 番目), et al. (2 名), Irvine, CA, USA 2011.

3) A novel robotic system and ACL force-induced ridge formation, International Symposium on Ligaments and

Tendons, Fujie H(1 番目), et al. (4 名), Irvine, CA, USA 2011.

4) High-accurate analysis of the point of application of ligament force: A novel calibration method of the universal force-moment sensor, International Symposium on Ligaments and Tendons, Fujie H(2 番目), et al. (4 名), Irvine, CA, USA 2011.

5) Biomechanical assessment of the anatomical rectangular tunnel ACL reconstruction using a BTB graft, Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society, Fujie H(1 番目), et al. (4 名), Irvine, CA, USA 2011.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

研究結果の一部を下記に掲載

<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1028/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤江 裕道 (FUJIE HIROMICHI)
首都大学東京システムデザイン学部教授
研究者番号：20199300

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

史野 根生 (SHINO KONSEI)
大阪府立大学総合リハビリテーション学部教授
研究者番号：40135679

中田 研 (NAKATA KEN)
大阪大学大学院医学系研究科講師
研究者番号：00283747

大坪 英則 (OTSUBO HIDENORI)
札幌医科大学医学部整形外科医師
研究者番号：10468085