

氏 名 (本 籍)	さか ね まさ たか 坂 根 正 孝 (茨 城 県)
学 位 の 種 類	博 士 (医 学)
学 位 記 番 号	博 乙 第 1,424 号
学位授与年月日	平 成 10 年 4 月 30 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学 位 論 文 題 目	脛骨前方引き出し負荷時に正常膝前十字靱帯と再建靱帯に生じる In situ Force の測定： ロボティクス技術の膝関節機能測定への応用
主 査	筑波大学教授 工学博士 大 島 宣 雄
副 査	筑波大学併任教授 工学博士 立 石 哲 也 (工業技術院産業技術融合領域研究所)
副 査	筑波大学教授 医学博士 松 下 松 雄
副 査	筑波大学助教授 医学博士 山 根 一 秀

論 文 の 内 容 の 要 旨

(目的)

前十字靱帯 (anterior cruciate ligament ; ACL) は、膝関節を構成する4つの主要膝靱帯の中で、スポーツ活動中にもっとも損傷しやすい靱帯であり、現在、若年者・スポーツ選手を中心に積極的な手術による靱帯再建が試みられている。前十字靱帯再建術の理想的目標は、正常のACL機能と膝関節キネマティクスの再構築であり、そのためには正常靱帯機能の理解が不可欠である。生体力学的手法は、靱帯の機能を調べる手段として頻用されてきたが、ヒト膝を用いた実験によって生体での状況を再現し評価できる機能測定システムはこれまでに存在していない。

本研究では、多自由度のロボット・マニピレーターと3軸方向の力と軸周りのモーメントが同時計測可能なセンサー (universal force-moment sensor ; UFS) を組み合わせた膝関節機能測定システムを開発した。次にヒトの正常死体膝関節において、異なる屈曲度で脛骨の前方引き出し負荷を前十字靱帯に加え、その時発生する in situ force の大きさと方向を、このシステムを用いて測定した。さらに、現在多用されている前十字靱帯再建術式を生体機能的観点から再検討した。その結果、前十字靱帯の機能的多様性を考慮した新しい再建術のための基礎的データが得られた。

本研究において検証すべき仮説は、1) 前十字靱帯は、機能的に2つの部分に分かれ、各膝関節位置で脛骨前方引き出し負荷に対して発生する力の大きさや方向が異なること、2) 断面積が小さく均一な膝蓋腱よりも、多重折りハムストリング (半腱様筋、薄筋) 腱の方が膝関節全域にわたって力を発生し、正常ACLにより近いこと、の2点である。この仮説を検証するために膝関節に前方引き出し外力がかかったときの多自由度での変化と、靱帯内に発生したフォースを測定するためにロボット/UFSテストシステムを用いる2種類の実験を行った。

実験1. 正常ACLの2つの線維束に発生するフォースの測定

(対象と方法)

ヒト新鮮凍結膝9体を用いた。関節周囲の筋・軟部組織は膝窩筋以外を取り除いた。関節包・両側の側副靱帯は温存し、ロボット/UFSテストシステムに固定した。受動的屈曲伸展軌道を設定した後、110 Nまでの脛骨前方引き出し力をかけ、0/15/30/60/90度での前十字靱帯とその二つの機能的線維束 (前内側束・後外側束) に発生したフォースの大きさと方向を測定した。

(結果)

膝関節角度が上がるに従って、脛骨前方引き出し負荷時のACLに発生するフォースは減少した。110 Nの負荷でACLのフォースが最大値を示したのは、膝関節15度のときであった(110.6±14.8 N)。前内側束のフォースは膝関節角度に影響されなかったが、後外側束のフォースは関節角度の上昇と共に減少した。膝関節角度が0度と15度においては、後外側束に発生するフォースが、前内側束に発生したそれより有意に大きかった。2線維束のフォースの方向は、前内側束のフォースの方向がACLの変化に類似していたのに対し、後外側束のフォースの方向はより変化の幅が大きかった。

実験2. ACL再建術間の生体力的評価：膝蓋腱とハムストリングの比較

(対象と方法)

ヒトの新鮮凍結膝8体を用いた。ロボット/UFSテストシステムを用いて手術手技のばらつきをできるだけ少なくした、ACL再建術生体力的評価システムを作成し、膝関節角度0/15/30/60/90度での正常膝の脛骨前方移動量と正常ACLに発生するフォースを測定した後、多重折りハムストリング(半腱様筋・薄筋)と膝蓋腱を用いて、鏡視下ACL再建術を行った。再建膝に前方向に5自由度で110 Nの負荷をかけ、脛骨前方移動量をロボットで測定・記録した。5つの位置でACL再建膝の脛骨移動量を測定した後、再建靱帯を抜去し、ACL不全膝とした。ロボットは、5つのACL再建膝の脛骨移動量をそれぞれの角度のACL不全膝で正確に再現し、新しく生成するフォースを記録し、それらの差分を靱帯に発生するフォースとして測定できた。

ACL再建術の評価の基準は、同一の外力下で発生するフォースが正常ACLのフォースに近く、また再建膝の脛骨前方移動度が正常膝と近い状態を良好な再建術と判定した。

(結果)

ハムストリングと膝蓋腱によるACL再建術後の脛骨前方移動は、ACLの不全膝に比べると有意に減少したが、その差は正常群と比べると3mm以内で有意に大きかった。靱帯内のフォースでは、膝蓋靱帯のフォースの変位が膝関節の位置によって大きく変化したのに比べて、ハムストリング靱帯内のフォースは、すべての膝関節位置で変化が少なかった。膝関節角度60度と90度では、ハムストリング靱帯内のフォースは膝蓋靱帯のフォースに比べ有意に大きかった。

(考察と結語)

脛骨前方引き出し負荷時にヒト正常ACLに発生するフォースは、前内側束と後外側束において各関節角度において有意な違いが見られた。膝伸展位近くでは後外側束に発生するフォースが高く、ACLの多様性を考慮した手術法の必要性が示唆された。

屈曲位での膝蓋靱帯に発生するフォースの有意な低下は、この靱帯組織の走行が均一でstiffness(剛性)は高いが、多重折りハムストリング腱に比べて断面積が小さいことに起因していると考えられた。

審 査 の 結 果 の 要 旨

本研究は、スポーツ医学の主要な課題の一つである膝関節の前十字靱帯再建術への応用を目的として、正常な靱帯に外力が負荷される機能検査法について、生体力的な機能評価の新しい手法を開発することを目的としている。特にロボット・マニピュレータと力学的センサーを組み合わせるロボティクス技術を応用して、靱帯内に発生する変位力(フォース)を測定することができる独自の方法を確立し得たことは高く評価できる。

本研究では、この新しい方法を用いて、正常前十字靱帯のバイオメカニクスの解析、前十字靱帯再建手術の生体力的評価を行い、これまでの方法では得られない新しい知見を得るのに成功している。

今後は、著者の方法を膝関節の整形外科の手術に応用する症例を蓄積することによって、新しい手術法が考案されることが期待される。

よって、著者は博士(医学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。