

令和 6 年 5 月 25 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K16717

研究課題名（和文）前十字靭帯損傷における徒手検査定量化システムの検証と確立：未固定凍結屍体での研究

研究課題名（英文）Validation of a quantitative measurement system for manual testing in anterior cruciate ligament injury using fresh-frozen cadaveric knees

研究代表者

長井 寛斗（Nagai, Kanto）

神戸大学・医学部附属病院・特命助教

研究者番号：30847372

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：膝前十字靭帯損傷における不安定性を評価において、検者が加える力の定量、および脛骨整復時の後方加速度を同時に計測する独自のシステムがより安定して計測を行えるよう改良を進めた。凍結新鮮屍体膝を用いて実験を行い、新システムは膝屈曲角度を計測する上で既存の電磁気センサシステムと同程度の精度を持つことが示唆され、脛骨加速度と膝屈曲角度だけでなく検者の加える力を同時に計測し定量化することで有用であると考えられた。本研究成果は第50回日本臨床バイオメカニクス学会学術集会で発表し、同学会誌へ投稿し採択された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

膝前十字靭帯損傷膝の徒手検査法を定量化している研究はいまだなく、本研究では非侵襲的に徒手検査法を定量化するシステムを開発し、その妥当性を検討した。このシステムを用いて今後データを蓄積することで、徒手検査と膝回旋不安定性との関連を精査し、検者が加える力の程度や検者間の差を検証し、最適な徒手検査手技の提唱が可能となりうる。また前外側回旋不安定性評価の徒手検査は習得が難しい検査のひとつであるため、本研究をもとに後期研修医に対する教育ツールの開発につながりうると考えられ、学術的意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In evaluating instability in anterior cruciate ligament (ACL) injuries, we have developed and refined a unique system that simultaneously measures the quantitative force applied by the examiner and the tibial acceleration during the pivot-shift test. Experiments were conducted using fresh-frozen cadaveric knees. The new system demonstrated comparable accuracy to existing electromagnetic measurement systems in measuring knee flexion angles. It was found to be useful in simultaneously measuring and quantifying not only tibial acceleration and knee flexion angles but also the force applied by the examiner. The results of the present study were presented at the 50th Annual Meeting of the Japanese Society for Clinical Biomechanics and the manuscript have been accepted for publication in the journal of this society.

研究分野：整形外科

キーワード：前十字靭帯 徒手検査 pivot-shift test 回旋不安定性 検者 スポーツ医学 生体医工学 屍体膝

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

膝前十字靭帯 (anterior cruciate ligament; ACL) 損傷の診断や膝前外側回旋不安定性の評価として用いられる徒手検査の一つに pivot-shift test がある<sup>1) 8)</sup>。ACL 損傷膝においては、膝伸展位で脛骨が前方に亜脱臼しており、軸圧、外反ストレス、下腿内旋の力を検者が加えながら膝関節を屈曲していくと脛骨外側プラトーが後方へ整復される「pivot-shift 現象」が生じる<sup>1)</sup>。この整復現象の大きさに応じて equal, glide, clunk, gross と検者が主観的に 4 段階評価することが一般的であるが、近年この pivot-shift test の整復現象である前外側回旋不安定性を、電磁気センサシステム (electromagnetic measurement system; EMS) や加速度計、iPad 等を用いて定量化する手法が多く研究・開発されてきた<sup>5) 6) 7) 9) 10) 11)</sup>。その一方で、pivot-shift test 手技の施設間・検者間での違いも指摘されており<sup>4)</sup>、いまだ徒手検査法が統一化されているとは言い難いのが現状である。我々は、EMS を用いて pivot-shift test 時における脛骨後方加速度を定量化してきたが<sup>7) 9)</sup>、その現象を生じさせる検者の加える力の定量化については評価できていないという課題があり、徒手検査時の検者の力のかけ方によって整復現象の大きさも変化してしまうのでは、という問いが生まれてきた。

### 2. 研究の目的

このような背景から我々は pivot-shift test における検者の加える力と膝前外側回旋不安定性を同時に定量化する新たなシステムを慣性センサ/力センサを用いて開発した。そこで本研究の目的は、(1) 慣性センサ/力センサを用いた新たなシステムの膝屈曲角度の測定精度を、すでに臨床で使用している EMS と比較すること、(2) pivot-shift test 時に検者が加える力を定量化し脛骨後方加速度との関連を評価することである。

### 3. 研究の方法

本研究は神戸大学倫理委員会の承認を得て実施した (研究番号: B190136)。ACL 損傷のない新鮮凍結屍体 (92 歳女性) の左下肢を用い、検者は整形外科医 4 名 (医師経験: 17, 11, 11, 24 年) で実験を行った。実験では、1) ACL 損傷なし、2) ACL 切離、3) ACL 切離 + 外側半月板 (LM) 切離、計 3 つの状態を作成した。関節鏡視にて ACL 損傷がないことを確認し、2) の条件を作成するために、関節鏡下に ACL 実質部を完全に切離した。さらに 3) の条件の際には、LM 後節部を切離し、完全放射状断裂を作成した。上記 3 つの条件においてそれぞれ 4 名の検者で pivot-shift test を 3 回ずつ行い、慣性センサと力センサを用いた新システムと EMS を用いて同時に計測を行った。Pivot-shift test の手技は過去の報告<sup>1)</sup>に準じ、検者の左手で左足底部を保持し、検者の右手で左下腿近位前外側を保持して行った。

#### <力センサ/慣性センサを用いた新たな計測システム>

新システムは独自に開発したソフトウェアを用い、慣性センサ (BN0055, Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen, Germany) と力センサ (FSR406, Interlink Electronics, Inc., CA, USA) とマイクロコンピュータ (M5Stamp Pico: M5Stack Technology Co., Shenzhen, China) と Unity (ver. 2019.2.9f1, Unity Technologies, CA, USA) で構成されている。慣性センサは被検者の膝関節の動作及び検者の手の動作を計測するために使用し、力センサは検者が被検者に加えた力の大きさを計測するために使用した。慣性センサは大腿遠位外側と下腿近位外側にストラップを用いて固定した。更に、検者に取り付ける治具は力センサを両手手掌、慣性センサを右手甲に固定した。各センサの固定位置を図 1 に示す。また、新システムでは、膝関節の屈曲伸展、内外反、内外旋の角度、手と脛骨の相対角度、手の加速度、検者が加える力の大きさの数値的情報と、計測中の膝関節を再現した 3D モデルの視覚的情報の 2 種類の情報をリアルタイムで PC の画面上に表示することができる。新システムの表示画面を図 2 に示す。慣性センサは加速度と角速度を直接的に計測できる。これら値を用いて、現実空間の鉛直軸に対する慣性センサの姿勢の角度を求めることができるため、初期角度と回転させた後の角度の差分から慣性センサの回転角度が求まる。そのため、2 つの慣性センサを用いてそれぞれの回転角度を求めることで、関節角度を計算することができる。新システムで計測した pivot-shift test 時の膝屈曲角度、脛骨後方加速度、検者の加えた力の経時的变化の一例を図 3 に示す。図 3 中の (A) は左足底を保持している検者左手の加える力が減少し始めた時点、(B) は脛骨加速度が減少し始めた時点、すなわち脛骨の後方移動 (= pivot-shift 現象) が誘起した時点と考えられる。

#### EMS >

近年、EMS を用いた再現性の高い膝関節運動の定量的評価が報告されている<sup>3)</sup>。そのため、本研究では新システムの精度比較対象として EMS を使用した。EMS による計測項目は膝関節の屈曲伸展、内外反、内外旋の角度と脛骨の変位量、変位速度、変位加速度である。EMS と新システムの計測結果から、膝屈曲角度における精度比較を行った。

本研究で使用した EMS (JIMI 神戸, Arthrex, Inc., FL, USA) は電磁場を発生させる 1 つの送信機と 3 つの受信機で構成されている。2 つの受信機は被検者の大腿骨と脛骨にピンで固定し、それぞれ座標系を設定した後の大腿骨と脛骨の動きを表す。大腿骨大転子、大腿骨内側上顆、大

腿骨外側上顆，内側側副靭帯と膝関節裂隙の交点，腓骨頭，足関節内果，外果の7つの下肢解剖学的指標を3つ目の受信機を用いて登録し，下肢に装着した2つの受信機の位置との相対的な3次元空間の位置情報をシステム上で記録する．膝関節運動中の2つの受信機間の相対運動は，GroodとSuntayの座標系2)に従って6自由度の膝関節運動学に変換することができる3)．よって，EMSは膝関節の屈曲伸展，内外反，内外旋及び，脛骨の変位量，変位速度，変位加速度を計測することができる．

#### <評価項目>

EMSにおける膝屈曲角度(°)，新システムにおける膝屈曲角度(°)を評価した．また，新システムにおいて，(A) 検者が左手の力を抜き始めた時点の膝屈曲角度(°)，(B) 検者が力を抜き始めた時点と脛骨後方移動が誘起した時点との時間差(ms)，(C) 力を抜き始めた時点における検者の左手が加えていた力の大きさ(最大値)(N)，(D) 脛骨後方移動が誘起した時点で検者左手が加えていた力の大きさ(N)を評価した．

#### <統計解析>

Excel(ver. 2019, Microsoft Corporation, WA, USA)を用いて統計解析を行った．EMSと新システムで測定した膝屈曲角度のスピアマンの相関係数と平均絶対誤差を算出した．各条件において検者4名が3回手技を行い，3条件で測定した(n=36)．条件1)において検者1名の計測データに欠損があったため，解析には3データを除外した33個のデータを用いた(n=33)．スピアマンの相関係数については，各計測データにおけるEMSと新システムでの膝屈曲角度の相関係数を算出し，全ての相関係数の平均値を算出した．さらに平均絶対誤差については，各計測データの平均絶対誤差を算出し，全てのデータにおける平均絶対誤差の平均値を計算し，それに対する標準偏差を算出した．

## 4. 研究成果

新システムとEMSでの膝屈曲角度の計測結果の一例を図4に示す．新システムで計測した膝屈曲角度はEMSの屈曲角度と強い正の相関を示し( $r=0.989$ )，平均絶対誤差は $8.3 \pm 5.3^\circ$ であった．新システムにおける計測結果を図5に示す．(A) 検者が左手の力を抜き始めた時点の膝屈曲角度は平均 $18.9 \pm 8.3^\circ$ ，(B) 検者が力を抜き始めた時点と脛骨後方移動が誘起した時点との時間差は平均 $211.9 \pm 80.6$  [ms]，(C) 力を抜き始めた時点における検者の左手が加えていた力の大きさは平均 $51.9 \pm 36.5$  [N]，(D) 脛骨後方移動が誘起した時点で検者左手が加えていた力の大きさは平均 $24.9 \pm 17.9$  [N]であった．

膝屈曲角度における精度比較の結果から新システムはEMSと強い正の相関関係を認め，誤差も $10^\circ$ 未満であった．過去の報告より関節角度の誤差は $5^\circ$ から $10^\circ$ 以内が許容範囲とされているため12)，新システムは膝屈曲角度の計測において十分な精度を持つことが示唆された．以前より我々が用いているEMSは，膝屈曲角度を含めた6自由度の膝関節運動や脛骨後方加速度を高精度で計測可能であるが，その現象を起こす検者の加えた力の定量化はできていなかった．慣性センサと力センサを用いた新たなシステムは膝屈曲角度や脛骨加速度に加え，検者の手が加えた力を同時に計測し定量することが可能であり，新システムの有用な点と考えられた．今回の結果からはpivot-shift現象が生じる直前に検者が足底部に加えていた力を抜く傾向が定量化できた．今後はこのシステムを用いて，検者の加えた力と脛骨後方加速度の関連性や検者間での違い等を評価し明らかにしていく必要があると考えられる．

また，これまでに報告されている加速度計5) 10)は下腿近位に1つの加速度計を装着するのみで膝屈曲角度の同時計測はできず，pivot-shift testによる脛骨後方整復時に生じた加速度なのか，それ以外の動作による加速度なのかを判断するのが困難な点が限界として挙げられる．一方，新システムでは慣性センサを大腿と下腿に装着することで膝屈曲角度の計測が可能となり，大腿センサに対する下腿センサの相対的な加速度を計測することも可能であり，脛骨後方整復時に生じた加速度がより明確に同定できるようになる利点があると考えられる．

本研究では左膝を計測したため，右手と左手はそれぞれ下腿部と足底部を保持していたが，図3のように，脛骨後方加速度が生じる直前に，検者が足底部に加えた力が最大となり，その後力を抜く傾向が認められた．その際の膝屈曲角度は，図5-(A)の結果から，約 $20^\circ$ 前後の時から検者の力を抜く手技が行われ，図5-(B)の結果から，検者の力を抜く手技が行われてから約210 [ms]後に脛骨の後方移動が発生している所見が認められた．従来の論文でもpivot-shift testにおける脛骨外側プラトーの整復現象は膝屈曲約 $30^\circ$ と言われており8)，本研究で脛骨後方加速度が生じている膝屈曲角度もこれに沿う結果であり，新システムによってpivot-shift現象による脛骨後方加速度が定量化できていることが示唆された．

本研究の限界としては，まず対象膝が1膝のみの研究である事が挙げられ，今後は対象を増やしてデータを蓄積する必要がある．2点目として新システムの精度比較として膝屈曲角度のみをEMSと比較した点である．今後は他の計測項目についても精度を比較していく必要がある．3点目は，今回は屍体膝を用いた研究であり実際の患者での計測は行っていない点である．しかし，新システムはストラップで被検者に装着することができ，検者の手にも同様にストラップにて装着可能であり，非侵襲的に患者及び検者に装着し実臨床現場で使用が可能である．4点目として，新システムでは検者の加えた力(N)のみを定量化しており，それ以外に加えている下腿回旋の力等は定量化できていない点が挙げられる．しかし，これまで検者の加えた力を定量化したシステムはなく，力のみではあるが新システムで定量化することができており，今後はシステム

の改良を重ねることによって下腿回旋の力なども定量化していくことが可能になる可能性があると考えられる。

<参考文献>

- 1) Galway HR, MacIntosh DL: The lateral pivot shift: a symptom and sign of anterior cruciate ligament insufficiency. Clin Orthop Relat Res. 147: 45-50, 1980.
- 2) Grood ES, Suntay WJ: A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: application to the knee. J Biomech Eng. 105(2): 136-144, 1983.
- 3) Kataoka K, Nagai K et al.: Steeper lateral posterior tibial slope and greater lateral-medial slope asymmetry correlate with greater preoperative pivot-shift in anterior cruciate ligament injury. J Exp Orthop. 9(1): 117-124, 2022.
- 4) Kuroda R, Hoshino Y et al.: Similarities and differences of diagnostic manual tests for anterior cruciate ligament insufficiency: a global survey and kinematics assessment. Am J Sports Med. 40(1): 91-99, 2012.
- 5) Lopomo N, Signorelli C et al.: Quantitative assessment of pivot-shift using inertial sensors. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 20(4): 713-717, 2012.
- 6) Lopomo N, Zaffagnini S et al.: Quantifying the pivot shift test: a systematic review. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 21(4): 767-783, 2013.
- 7) Matsushita T, Oka S et al.: Differences in knee kinematics between awake and anesthetized patients during the lachman and pivot-shift tests for anterior cruciate ligament deficiency. Orthop J Sports Med. 1(1): 1-6, 2013.
- 8) Musahl V, Karlsson J: Anterior cruciate ligament tear. N Engl J Med. 380(24): 2341-2348, 2019.
- 9) Nagai K, Hoshino Y et al.: Quantitative comparison of the pivot shift test results before and after anterior cruciate ligament reconstruction by using the three-dimensional electromagnetic measurement system. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 23(10): 2876-2881, 2015.
- 10) Nakamura K, Koga H et al.: Evaluation of pivot shift phenomenon while awake and under anaesthesia by different manoeuvres using triaxial accelerometer. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 25(8): 2377-2383, 2017.
- 11) Runer A, Roberti di Sarsina T et al.: The evaluation of rolimeter, KLT, KiRA and KT-1000 arthrometer in healthy individuals shows acceptable intra-rater but poor inter-rater reliability in the measurement of anterior tibial knee translac. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 29(8): 2717-2726, 2021.
- 12) Wilmer HA, Elkins EC: An optical goniometer for observing range of motion of joints a preliminary report of a new instrument. Arch Phys Med Rehabil. 28(11): 695-704, 1947.

<図表>

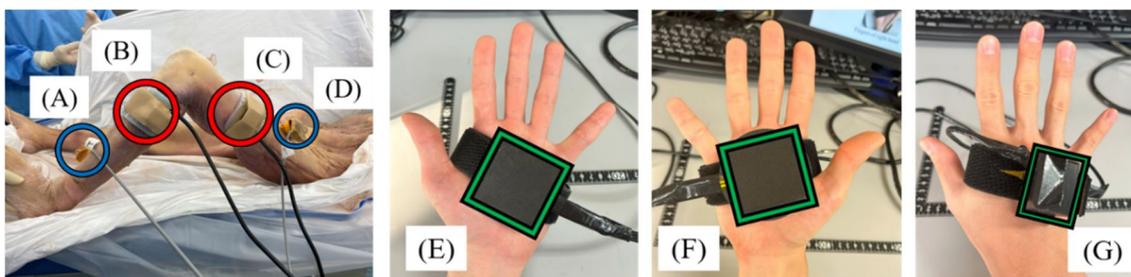


図 1. 各センサの固定位置

センサの種類と固定位置を以下に示す。(A)EMSのセンサ:脛骨,(B)慣性センサ:下腿近位外側,(C)慣性センサ:大腿遠位外側,(D)EMSのセンサ:大腿骨,(E)力センサ:左手掌,(F)力センサ:右手掌,(G)慣性センサ:右手甲

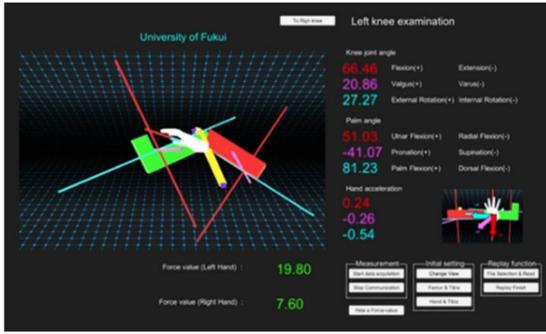


図 2 . 新システムにおける表示画面

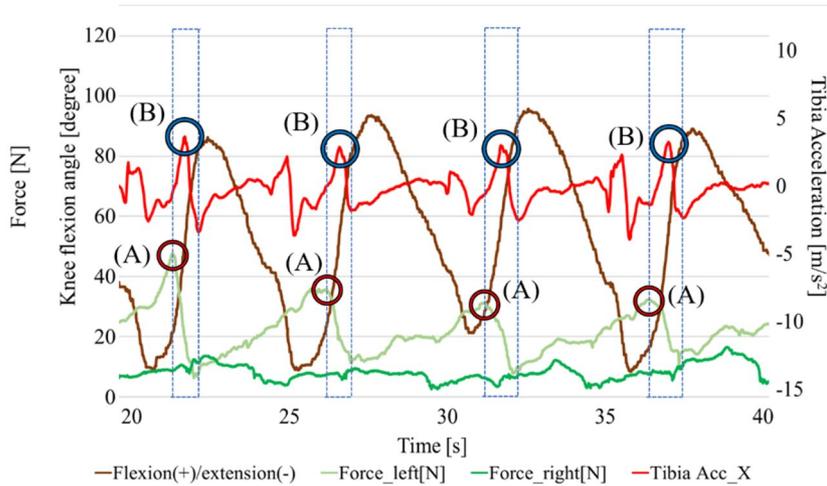


図 3 . ACL 切離時における pivot-shift test の計測結果の 1 例  
(A) 検者左手掌の加えた力が減少を始める時点, (B) 脛骨後方移動が誘起した時点

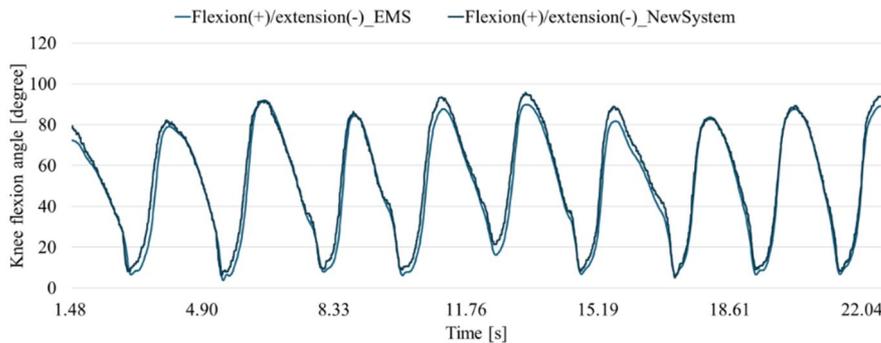


図 4. EMS と新システムを用いた膝屈曲角度の計測結果の 1 例

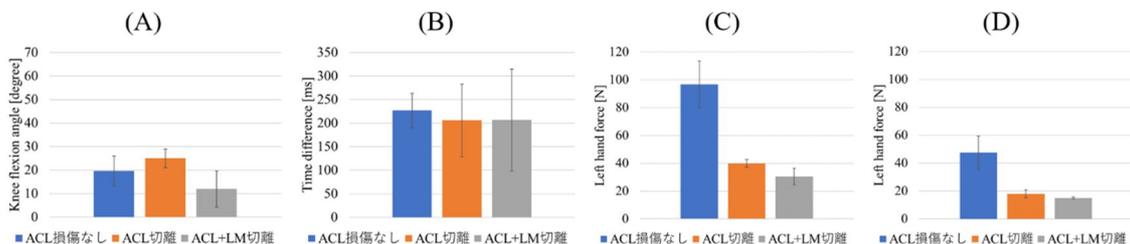


図 5. Pivot-shift test 時の解析結果  
(A) 検者が左手の力を抜き始めた時点の膝屈曲角度 ( ° ), (B) 検者が力を抜き始めた時点と脛骨後方移動が誘起した時点との時間差 ( ms ), (C) 力を抜き始めた時点における検者の左手が加えていた力の大きさ ( N ), (D) 脛骨後方移動が誘起した時点で検者左手掌の加えた力の大きさ ( N )

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>加藤大稀, 長井寛斗, 十倉健男, 長田尚介, 大月悠平, 西田京平, 星野祐一, 松下雄彦, 黒田良祐, 長宗高樹 |
| 2. 発表標題<br>ACL損傷膝における力センサと慣性センサを用いたpivot-shift test定量化の試み             |
| 3. 学会等名<br>第50回日本臨床バイオメカニクス学会学術集会                                     |
| 4. 発表年<br>2023年                                                       |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|