

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K17913

研究課題名（和文）カーボンナノチューブセンサーを用いた大規模ACL損傷リスク評価システムの開発

研究課題名（英文）Development of a large-scale ACL injury risk assessment system using carbon nanotube sensors

研究代表者

平田 和彦（Hirata, Kazuhiko）

広島大学・病院診療支援部・部門長

研究者番号：10423352

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ACL損傷リスク評価システムの開発に向けて、測定精度が高くかつ動作の制限の少ないシステムが必要である。我々はストレッチセンサーを用いた膝関節角度測定デバイス作成と精度検証を行った。得られた値より、膝関節屈曲角度・外反角度の推定を行った。膝関節屈曲・外反角度について、線形回帰分析によって算出した予測値と画像解析によって算出した正解値を相関係数と平均絶対誤差（MAE）で比較した。結果として膝関節外反角度について、正解値に予測値の相関は認められなかった。膝関節外反時のストレッチセンサー値の変化が微小であった事が原因と考えられ、ストレッチセンサーのみでの膝関節外反運動の検出は困難であることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、CNTセンサー単独での精度の高いACL損傷リスク評価システムの構築は困難であった。CNTセンサーのみでの膝関節外反運動の検出は困難と考え、今後は加速度センサ、曲げセンサなど他のセンサとの組み合わせにて推定値の精度を向上させる取り組みを継続していけば、より精度の高いACL損傷リスク評価システムの構築が可能となると思われる。このシステムが構築できれば、スポーツ現場においてウェアラブルなACL損傷リスク評価が可能となり、ACL損傷リスクのある選手のスクリーニングができる、またACL再建術後のリハビリテーションも安全に行う事が可能となり、早期復帰へ貢献できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：To develop an ACL injury risk assessment system, a system with high measurement accuracy and less restriction of movement is needed. We created a knee joint angle measurement device using a stretch sensor and verified its accuracy. From the obtained values, we estimated the knee joint flexion and valgus angles. We compared the predicted values calculated by linear regression analysis and the correct values calculated by image analysis in terms of correlation coefficient and mean absolute error (MAE) for the knee joint flexion and valgus angles. As a result, no correlation between the predicted values and the correct values was found for the knee joint valgus angle. This may be due to the fact that the change in the stretch sensor value during knee joint valgus motion was minute, and it was confirmed that it is difficult to detect knee joint valgus motion with the stretch sensor alone.

研究分野：リハビリテーション

キーワード：膝前十字靭帯損傷 カーボンナノチューブ 膝関節外反

## 1. 研究開始当初の背景

膝前十字靭帯 (ACL) 損傷はスポーツによって頻繁に生じる外傷の一つである。日本整形外科学会によって編集された ACL 損傷診療ガイドラインによれば、日本において、ACL 損傷は年間 2 万から 3 万件発生すると推定されており、その 50 ~ 70% が再建術を受けているとされている。ACL 再建術後は、スポーツ復帰に最低でも 6 ヶ月以上要し、ACL 損傷は選手の QOL を低下させ、スポーツ生命を脅かす大きな問題である。その解決のためには、ACL 損傷の発生メカニズムの解明と予防方法の確立が急務である。

ACL 損傷の発生メカニズムに関する研究は、主にビデオ分析と三次元動作解析によって行われている。ビデオ分析での報告は、ACL 損傷は、急激な減速動作や着地動作で生じており、その際の膝関節肢位は、膝関節軽度屈曲位かつ軽度外反位であったとされている (Olsen 2004, Boden 2000)。この方法は、スポーツ現場での受傷場面を直接分析しており、使用機器も通常のビデオ映像で可能である。しかし、ビデオ分析では ACL 損傷の正確な発生メカニズムを特定するには、測定精度が不十分である。一方、三次元動作解析による ACL 損傷発生メカニズムの研究は、着地動作など ACL 損傷発生時の動作をシュミレートして行う。先行研究によると、女性は男性より膝関節屈曲角度が小さく、膝関節外反角度が大きいとされている (Lephart 2005, Decker 2003, McLean 2007, Ford 2003)。この結果より、小さな膝関節屈曲角度と大きな外反角度は ACL 損傷リスクになると推測されている。また、Hewett ら (2005) は、ACL 損傷者と非損傷者の着地動作を前向きに検討し、ACL 損傷群は非損傷群と比較して膝関節外反角度が大きいことを示した (非損傷群 3 - 5° vs 損傷群 7°)。しかし、三次元動作解析は、高額な測定機器を必要とし、被験者への負担も大きいと、大規模な前向き研究はほぼ見当たらない。また、三次元動作解析では、研究室で可能な動作に制限されるため実際のスポーツ活動の測定は困難である。申請者は、膝靭帯損傷者のパフォーマンスを検討するために、三次元動作解析を実施している (Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 23 2015)。しかし、ACL 損傷の発生率は、一般集団において 0.2-0.3 人/1000 人と報告されており (Bjordal 1997, Nielsen 1991)、前向き研究を行うためにはかなりの対象数を必要とする。そのため、ACL 損傷発生メカニズムの解明には、前向きで大規模な研究を行うことを可能とする新たな ACL 損傷リスク評価システムの開発が必要である。

## 2. 研究の目的

カーボンナノチューブ (CNT) とは、中空円筒の構造をした炭素の結晶であり、軽量・高強度・柔軟性に富むという特徴を持っている。さらに、高い導電性・熱伝導性・耐熱性・化学安定性を有している。CNT 歪みセンサーは、CNT を基にして開発されたセンサーであり、繰り返し歪み変化を計測することができる薄型・柔軟なセンサーである (Suzuki 2016)。計測されたデータはリアルタイムで無線通信を通してモニタリング可能である。CNT 歪みセンサーによる測定は、スポーツ環境で可能であり、使用機器も高額な機器は必要とせず、動作制限も少ない。しかし、膝関節のバイオメカニクスをどの程度の精度で測定可能かは不明である。しかし、CNT 歪みセンサーのように対象の動作を制限せずにリアルタイムで ACL 損傷リスクを計測した報告はない。

本研究の目的は、CNT 歪みセンサーを用いた新たな ACL 損傷リスク評価システムを開発し、ACL 損傷予防戦略を構築することである。具体的には以下の事を明らかにすることを目的としている。

- 1) CNT 歪みセンサーを用いた ACL 損傷リスク評価システムの測定精度を明らかにする。
- 2) 1) で測定されたパラメーターは ACL 損傷リスクと関連があるか検討し明らかにする

## 3. 研究の方法

### 1) ACL 損傷リスク評価システムの構築

ACL 損傷リスク評価システムの構成を図 1 に示す。提案デバイスではストレッチセンサと無線モジュールを備えた、バンドー化学株式会社製 C-STRETCH MEASURE を三つ使用する。三つのストレッチセンサはサポータの裏側に配置し、一つは屈伸運動をとるために膝蓋骨側に、残り二つは外反運動をとるために膝の内側に取り付けている。提案システムでは、膝サポータ上に取り付けたストレッチセンサから得られるセンサ値を無線モジュールで PC へ送信し、膝外反角度と膝屈曲角度を推定する。なお、システムではストレッチセンサ値の変化の個人差を減らすために、ユーザはシステム使用前に屈伸運動を行い、得られたストレッチセンサ値をもとに、推定に用いる値を最大最小正規化した。膝外反角度と膝屈曲角度の推定には、事前に収集したデータから算出したそれぞれの回帰式を用いる。回帰式は目的変数に膝外反角または膝屈曲角、説明変数に三つのストレッチセンサ値の瞬時値を用い、回帰分析によって作成する。膝外反角度と膝屈曲角度の正解値は、大転子、大腿骨外顆、外果のそれぞれ正面と外側の計 6 箇所にもーカをとって、図 2 のような映像から算出する。



図1 ACL 損傷リスク評価システム

図2 膝外反角度と膝屈曲角度

## 2) ACL 損傷リスク評価システムの再現性・妥当性検証

システムによる膝外反角度と膝屈曲角度の精度を確認するために、評価実験を行った。被験者は健常男性 10 名とした。実験において被験者は、デバイスを装着した状態で 30°、60°、90° の膝屈曲角度で動きそれぞれ膝外反運動を最大角度まで 3 回ずつ行った。ストレッチセンサの計測周期は 10Hz とした。

再現性の測定は、測定値との級内相関係数 (intraclass correlation coefficient : ICC) の評価を行った。妥当性の検証は、本実験で得たデータをもとに回帰式を作成し、ストレッチセンサから得られた値から推定角度を算出した。膝外反 角度と膝屈曲角度の推定精度の評価指標には、推定した角度と画像から得た正解角度の相関係数、平均絶対誤差 (MAE) と二乗平均平方根誤差 (RMSE) を用いた。

対象は、健常男性 10 名とし再現性・妥当性検証を行った。

## 4. 研究成果

健常男性 10 名 (平均年齢 21.5±5.0 歳、身長 172.8±6.9cm、体重 62.1±8.4kg) を対象として、膝関節屈曲 30°、60°、90°での膝関節最大外反運動を CNT 歪みセンサーと三次元動作解析装置により測定を行った。

### 1) ACL 損傷リスク評価システムの再現性

システムによる膝外反運動の測定の再現性は全ての角度において ICC が 0.969 ~ 0.998 と非常に高い再現性を示した (表 1)

表 1 膝外反時のシステムにより算出した測定値の ICC

項目	ICC (1.3)	95%信頼区間 [下限~上限]
最大膝外反 (30 度屈曲位)	0.993	[ 0.975~0.992 ]
最大膝外反 (60 度屈曲位)	0.992	[ 0.969~0.990 ]
最大膝外反 (90 度屈曲位)	0.999	[ 0.995~0.998 ]

### 2) 測定の妥当性検証

システム妥当性の検証は

本実験で得たデータをもとに回帰式にて推定値を算出し、ストレッチセンサから得られた値と画像分析から得られた値を評価した。推定値については、事前に集めたデータから線形回帰分析で算出した回帰式を用いて膝外反角度と膝屈曲角度を推定した

目的変数(y): 膝外反角度または膝屈曲角度

説明変数(x): 三つのストレッチセンサ値の瞬時値

回帰式 :  $y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + d$

膝外反角度と膝屈曲角度の推定精度の評価指標には推定した角度と映像から得た正解角度の相関係数、平均絶対誤差 (MAE) と二乗平均平方根誤差 (RMSE) を用いた。下図に実際の測定結果の一例を示す (図 3、図 4)。

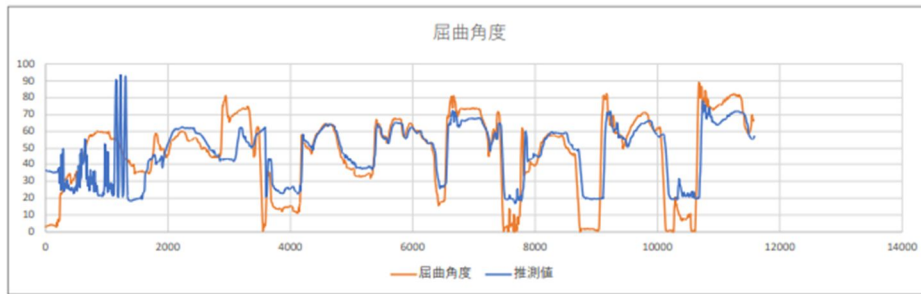


図 3：膝屈伸運動時の膝屈曲角度と推計値の時系列結果

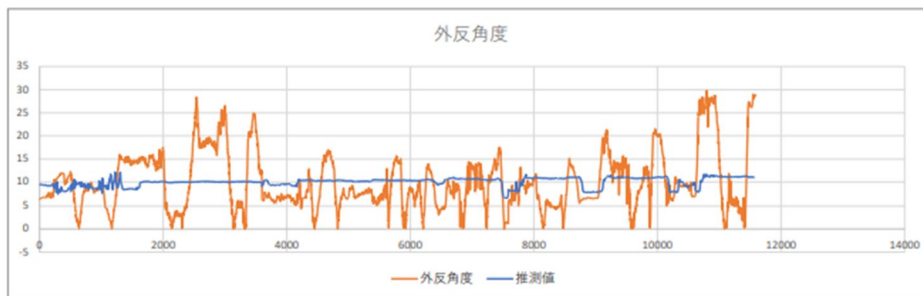


図 4：膝外反運動時の膝屈曲角度と推計値の時系列結果

膝屈曲運動時の画像から算出した膝屈曲角度と推計値は相関係数 0.74、MAE10.6°、RMSE15.3°であった。膝外反角度と推計値は、相関係数 0.15、MAE4.8°、RMSE6.1°であった。

推定誤差が大きくなったのは当初、ストレッチセンサの位置が膝外反角度を推定するために適切な位置に配置されていない事が原因と考え、センサ位置の変更を繰り返し検証を行ったが、膝外反角度の誤差を少なくすることは困難であった。また、サポーターと皮膚間のズレなども課題として挙げた。大きな要因としては、膝関節外反時のストレッチセンサ値の変化が微小であった事が原因と考えた。この事より、ストレッチセンサのみでの膝関節外反運動の検出は困難と考え、今後は加速度センサ、曲げセンサなど他のセンサとの組み合わせにて推定値の精度を向上させる取り組みを継続していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (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
---------	---------