

令和 4 年 6 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11491

研究課題名(和文) 姿勢動揺特性に着目した膝前十字靭帯損傷のリスク予測基盤の確立

研究課題名(英文) Risk prediction of ACL injury based on the individual postural strategy

研究代表者

小笠原 一生 (Ogasawara, Issei)

大阪大学・医学系研究科・助教

研究者番号：70443249

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：膝前十字靭帯損傷はとりわけ重篤なスポーツ外傷であり、その予防はスポーツ医学における喫緊の課題であった。本研究では、スポーツ選手の中でも前十字靭帯損傷を負う危険性が高い人を、あらかじめ特定するための動的バランステストを確立し、床反力センサデータ、小型加速度センサデータから得られた姿勢動揺に着目した解析法を提案した。特に膝部にとりつけた小型加速度センサデータが捉える急激な膝部の内側変位(危険な着地の特徴)は、安全な着地動作との判別によく貢献した。本技術は、膝前十字靭帯損傷が好発するハンドボールやラグビーの日本代表チームの動作評価にも用いられ、トップ選手のスポーツ外傷予防に貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スポーツのケガの予防を効率化するためには、あらかじめ、ケガをしやすい人を特定する手立てが必要である。足の捻挫や膝の靭帯損傷は、スポーツ中の好ましくない動き(バイオメカニクス)が引き金となる。本研究では、床反力センサや小型加速度センサを用いることで、姿勢動揺や関節の振動的な動きを定量化し、リスクの高い動作と低い動作をうまく判別できる特徴量空間や可視化法を提案した。この技術は、幅広い選手を対象に、コンディショニングチェック等でのケガリスク評価に活用が期待される。

研究成果の概要(英文)：Anterior cruciate ligament (ACL) knee injury is a severe sports injury, and its prevention has been an urgent issue in sports medicine. This study established a dynamic balance test to identify athletes at high risk for anterior cruciate ligament injury and proposed an analysis method focusing on postural sway obtained from ground reaction force sensor data and acceleration sensor data. In particular, the rapid medial displacement of the knee (a characteristic of dangerous landing) captured by the acceleration sensor data attached to the knee contributed well to classifying between safe and unsafe landing movements. This technique was also used to evaluate the movement of the Japanese national handball and rugby teams, where anterior cruciate ligament injuries are common and contribute to the prevention of sports injuries in top athletes.

研究分野：スポーツ医工学

キーワード：姿勢動揺 前十字靭帯 予防 バイオメカニクス 床反力センサ 加速度センサ 判別

1. 研究開始当初の背景

膝前十字靭帯 (ACL) 損傷は重篤なスポーツ外傷である。ACL 損傷は、片脚着地動作や方向転換動作に先行する急激な減速動作において、他者との接触なく生じるといった特徴がある。このことから、スポーツ中の ACL 損傷は他者からの直接的な外力よりも、選手自身の身のこなしの不良に起因して生じる外傷であると言える。1990 年ころより欧米を中心に、予防エクササイズによって ACL 損傷数を軽減する介入研究が盛んに実施されてきた。エクササイズによる予防は一定の効果が期待できるものの、競技練習の時間とのバランスや、コーチ側の協力大切が必要であることなど、導入にハードルがあることも指摘されてきた。このような中、本当に予防介入が必要なハイリスクな特徴を持つ個人をスクリーニングする手立ての重要性が認識されてきた。ACL 損傷のリスク定量化のためのテストバッテリーでは Drop vertical jump (DVJ) 課題 (Hewett et al., 2005) による両脚着地時の膝外反モーメントの評価がよく知られているが、このテストの有効性は後に Krosshaug et al. に否定されて以来 (Krosshaug et al., 2016)、ACL 損傷のリスク定量化は世界的に下火となっている。従来法の問題は、1) 膝のみに注目した微視的指標への依存、2) 少数指標 (1 変数) のみの表現力が低い統計でのリスク判別、3) 少ない対象者数、と考えられ、ACL 損傷の背景にある全身性や、多要因性といった性質を十分に反映できていなかった点にある。申請者らは、従来法の限界を見極めた上、より妥当な指標によるリスク予測法を提案し (Ogasawara et al. 2018)、現場実装まで繋げてきた (小笠原ら)。申請者は指標として姿勢動揺の個人特性に着目している。これは上記の膝外反モーメントに比べて全身挙動を表現する自由度が高く、あたかも指紋のような性質を有する。これを根拠に申請者らは 2011~2018 年で片脚ドロップ着地課題の床反力測定によって約 1,500 名のアスリートの姿勢動揺データを収集・解析し ACL 損傷リスクと姿勢動揺特性との関連を調べてきた。

2. 研究の目的

本研究では、これまでのノウハウとデータ資産を元に、加速度センサを活用したデータ測定法の改善と、ACL 損傷の特性を踏まえた機械学習法 (リスク判別法) の組み合わせで、ACL 損傷リスクとの関連が報告されている不良な着地動作をよく判別する特徴量群の同定や可視化方法、解析法を提案することである。本研究の成果物は姿勢動揺データを入力としリスク度を戻り値とする判別アルゴリズムとする。

3. 研究の方法

(1) 対象と方法

研究期間を通じた述べ対象数は 1097 名 (2019 年 497 名、2020 年 249 名、2021 年 351 名) であった。対象には大阪大学医学部附属病院研究倫理審査委員会が承認した研究プロトコルを口頭にて説明し、書面による同意を得た (承認番号: 19465)。

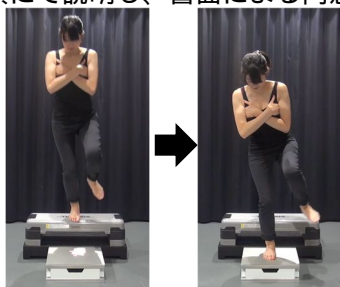


図 1 片脚ドロップ着地テスト

動的姿勢安定性を確認するための運動課題として「片脚ドロップ着地テスト」を実施した (図 1)。具体的には 20 センチの高さの台から、前方に設置した床反力センサ (TFP404011B、有限会社テクノロジーサービス社製、日本) 上に片脚で前方着地し、その後、5 秒間の片脚静止立位を保持する課題であった。着地の際、視線は対象の自由とし、また、両腕は胸の前で交差し手を腋窩に挟む形で固定した。同課題は左右脚それぞれ 6 試行実施した。着地後に静止姿勢が保てず床反力センサから降りたり、床反力センサ上で足がずれたり、腕組みが外れたりした試技は失敗とみなし、再計測を行った。また、膝部の加速度を計測するため、小型加速度センサ (DSP ワイヤレス 9 軸モーションセンサ、SS-MS-SMA16G15、株式会社スポーツセンシング社製、日本) を脛骨粗面部に取り付けた (図 2)。

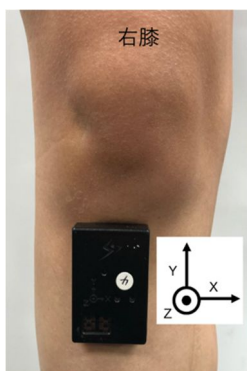


図 2 センサの貼付

センサ取り付けには幅広のフレキシブルバンドを用い、着地動作によって加速度センサと脛骨粗面の位置関係が変わらないことを確認した。取り付けの際、加速度センサの Y 軸正が鉛直方向上を、Z 軸正が脛骨の前方を、X 軸正が対象者の左側を向くように統一した。この加速度センサの軸方向は、近接する膝関節軸と一致させるように配位している (X 軸: 屈曲/伸展軸、Y 軸: 内旋/外旋軸、Z 軸: 内転/外転軸)。床反力センサと加速度センサは電気的に同期した。

得られた床反力データは、鉛直成分が 10N を超えた時点を目部接地と定義し、その後 5 秒間のデータを切り出した後、センサ固有の振動ノイズを除去するため 2 次のパワースペクトル型デジタルフィルタ (ゼロタイムシフト、ローパス、遮断周波数 70Hz) で平滑化した。その後、足圧中心点 (Center of pressure: CoP) を算出した。加速度データも同期した床反力データの接地時刻から足部接地を同定し、接地後 5 秒間のデータを切り出した。接地後の床反力データ、CoP データ、および加速度データから姿勢動揺を表現する特徴量群を算出した。

(2) 新型コロナウイルス感染症拡大による研究への影響と計画の変更

当初予定では研究期間中に新規に発生した ACL 損傷者と非損傷者の姿勢動揺特微量を対比することにより ACL 損傷リスクの判別に貢献する特微量を同定する計画であったが、2019 年末からの新型コロナウイルス感染症拡大によって対象者のスポーツ活動が大幅に停止し、期待した新規 ACL 損傷者が発生しなかった。そのため、当初方針を変更して、計測した対象者のデータの外れ値解析や、すでに危険な片脚着地動作としてコンセンサスが得られた着地の姿勢動揺的特徴の定量などを実施した。

4. 研究成果

(1) 加速度データの主成分分析に基づく危険な下肢挙動の判別

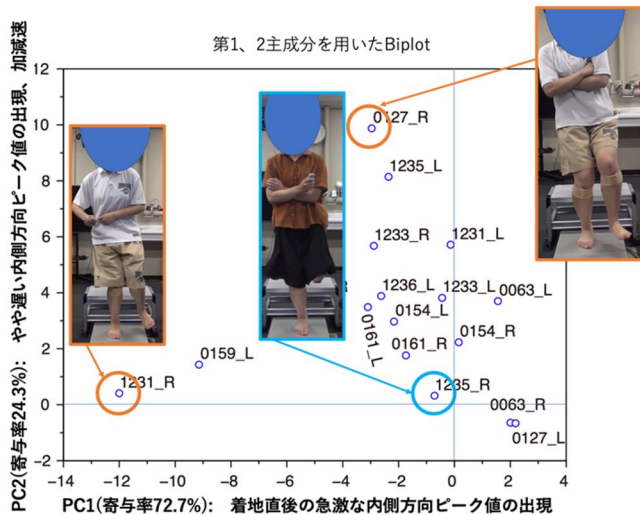


図 1 加速度波形データの主成分空間での着地タイプ判別

上記対象から同一所属チームで体格差の無い 9 名 18 脚を対象とし脛骨粗面に貼付した加速度データで得た膝部前額面上の加速度波形を接地から 200 ミリ秒分を対象に主成分分析 (Principal Component Analysis: PCA) を行った。PCA の目的は対象脚をよく分散させる加速度波形の特微量を得るためである。第 2 主成分までで全体の 99.0% を説明した。第 1、2 主成分で張られる空間にて、原点付近には、安定で膝前額面上の急峻な変位が小さい着地をした脚が集まり (図 3 水色の囲み)、原点から隔たるほどに、危険な着地と見做される膝が急峻に内側変位する脚が分布した (図 3 オレンジの囲み)。以上より片脚ドロップ着地課題における接地直後 200 ミリ秒区間の脛骨前額軸に沿う加速度センサデ

ータから PCA を通じて得た特微量空間において膝靭帯損傷のリスクとされる膝内側変位を伴う着地を判別できた (小笠原ら 2020、特許出願中)。本結果は 2 次元 (2 主成分) による可視化であるが更にマイナーな特微量を加えることで表現力の高い判別につながる。この成果は、従来法の課題であった 1 特微量による表現力の低い判別 (例えば Hewett et al. 2005) の限界の克服に貢献するものである。

(2) 床反力データの主成分分析に基づく姿勢動揺パターンの分類

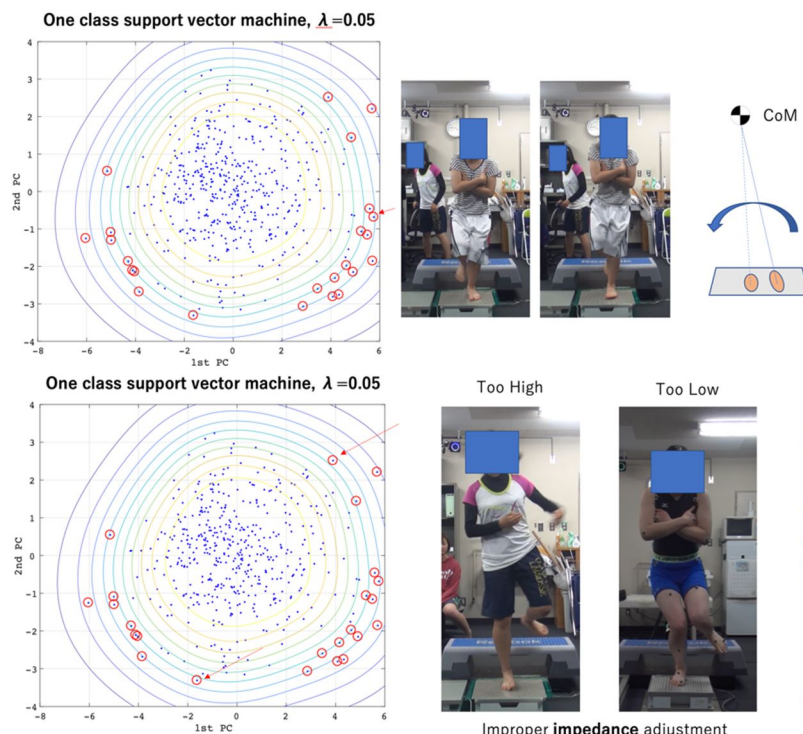


図 2 床反力波形の主成分分析と OneClassSVM による外れ値解析

上記対象より 256 名 512 脚を対象に解析を行った。床反力鉛直成分の接地後 200 ミリ秒区間の波形データを対象に PCA を行った。第 1、2 主成分を選び、外れ値解析のため One Class Support Vector Machine (SVM) を実施した。 $\lambda=0.05$ とし全体の 5% が外れ値であるとした。外れ値とされた着地試技を定性的に解析したところ、第 1 主成分が示す横軸で原点から外れる試技の特徴は、着地後に瞬間的に足をずらしたり、ホップしたりして姿勢の傾倒を立て直す動作が発現したものであり、不適切な着地位置 (足の配位) に起因した姿勢動揺パターンを示すものであった。床反力波形上では、着地衝撃を示す

鉛直成分最大値以降に、足位置の修正のために床を蹴った特徴的な波形の上下や、ホップで鉛直成分が一過性の0となるなどの変化が見られ、PCAではそのようなヘテロな波形が主成分空間上での分散を大きくしたものと考えられる。一方、第2主成分が示す縦軸に沿って原点から外れた試技の特徴は、床との衝突時に高い床反力鉛直成分(衝撃成分)を得たか否かを表すものと考えられた。着地動作では床から脚に作用する床反力の大きさを見越して、それに見合う下肢インピーダンスを予め作り上げる。つまり第2主成分方向で外れる試技は、この床反力の大きさの見立てが適切であったかどうかを判別することになると考えられる。図4下段の左側の選手は、着地に際して高すぎる下肢インピーダンスであったために、着地後に飛び上がってしまうほどであり、その後の大きな姿勢動揺につながった。一方で、図4下段右側の選手は、入力される床反力に対して低すぎる下肢インピーダンスであったために、脚が座屈して想定よりも身体重心が沈み混んでしまった。前額面では膝靭帯損傷のリスクとなる膝の内側変位が観察された。片脚ドロップ着地課題のように、動作中に外力(床反力)による外乱が作用する中で動的な姿勢安定が要求される運動では、外力の大きさや方向を見越して、それに見合う下肢姿勢、着地位置、下肢インピーダンスを予測的に生成することが求められる。片脚着地後の姿勢動揺や転倒、下肢関節の不良な挙動は、この予測的な姿勢生成の失敗やインピーダンスマッチング不良に起因するものと考えられる。床反力鉛直波形のPCAとOne Class SVMを用いた外れ値解析では、外れ値として判別されたヘテロな試技から、着地の失敗は、1)足の配位のミス、2)インピーダンスマッチングのミス、として、当初予想とよく対応した結果を示した。これらの失敗は、実際のスポーツ場面での高速度で認知負荷の高い状況で発現した場合には、下肢関節の靭帯損傷リスクを高めうるものである。特に1)足の配位のミスは、予想される床反力の作用方向に対して、適切な下肢関節のオリエンテーションを生成できていないことを表し、ACL損傷にとってリスクとなる膝外反モーメント、膝内旋モーメントや、足関節捻挫を惹起する足関節回外モーメントを増大させうる。

(3)まとめ

本研究を通じて提案した複数の解析手法は機械学習の判別手法を取り入れながらも、センサデータに解剖学的意味を持たせたり、特徴量エンジニアリング時に解剖学的、バイオメカニクスの意味を付与することで、判別アルゴリズム自体をブラックボックス化しなかった点に特徴がある。これによって、得られた判別結果を、解剖学的、バイオメカニク的に理解しやすくなり、臨床において、スポーツ外傷リスクの予測や、予防トレーニングへの落とし込みが容易となる。現場で得られる姿勢動揺データ(床反力データ or 加速度データ)に応じた解析方法を選び、外れ値を多く呈する個人を予め特定することによって、下肢外傷リスクが高い個人を見出すことに繋がる可能性がある。従来法の表現力が低い古典統計手法から、より高次元な特徴量空間での正常/不良着地動作の判別が今回の研究を通じて可能となった。研究期間中盤の新型コロナウイルス感染症によりスポーツ活動が停止したため期待した新規スポーツ外傷者が極めて少なく、新規外傷をラベルとした統計的判別まで解析が進まなかった点は課題である。

参考文献

Hewett, T.E., Myer, G.D., et al. 2005. Biomechanical Measures of Neuromuscular Control and Valgus Loading of the Knee Predict Anterior Cruciate Ligament Injury Risk in Female Athletes: A Prospective Study. *Am J Sports Medicine* 33, 492–501.

Krosshaug, T., Steffen, K., Kristianslund et al. 2016. The Vertical Drop Jump Is a Poor Screening Test for ACL Injuries in Female Elite Soccer and Handball Players. *Am J Sports Medicine* 44, 874–883.

Issei Ogasawara and Ken Nakata. A new screening concept for athletes having a high ACL injury risk. International panel discussion in JOSKAS 2018.

Issei Ogasawara, Ken Nakata, et al. A new assessment of the altered neuromuscular function of the ACL reconstructed athletes. -a pilot study-. *Med Sci Sports Exerc*, 47(5s), 793, 2015.

小笠原一生ら. 片脚ドロップ着地における女子運動選手の下肢前額面動揺の個人特性 ウェラブル加速度センサデータの主成分分析による. *臨床バイオメカニクス*40 213-220 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 小笠原一生, 鶴野裕基, 梅垣果歩, 南保恵, 近田彰治, 前達雄, 中田研	4. 巻 41
2. 論文標題 片脚ドロップ着地における女子運動選手の下肢前額面動揺の時間パタン特性 ウェアラブル加速度センサデータの主成分分析による	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 南保恵, 小笠原一生, 前達雄, 鶴野裕基, 梅垣果歩, 近田彰治, 大堀智毅, 廣瀬毅人, 下村和範, 金本隆司, 中田研	4. 巻 40
2. 論文標題 加速度センサによる片脚ドロップ着地後の下腿近位部の前額面加速度評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス学会誌	6. 最初と最後の頁 221-226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 梅垣果歩, 小笠原一生, 前達雄, 鶴野裕基, 南保恵, 近田彰治, 大堀智毅, 廣瀬毅人, 下村和範, 金本隆司, 中田研	4. 巻 40
2. 論文標題 加速度センサを用いた片脚ドロップ着地時の接地時刻推定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス学会誌	6. 最初と最後の頁 209-212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogasawara Issei, Shimokochi Yohei, Mae Tatsuo, Nakata Ken	4. 巻 76
2. 論文標題 Rearfoot strikes more frequently apply combined knee valgus and tibial internal rotation moments than forefoot strikes in females during the early phase of cutting maneuvers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Gait & Posture	6. 最初と最後の頁 364 ~ 371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gaitpost.2019.11.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogasawara Issei, Shimokochi Yohei, Konda Shoji, Mae Tatsuo, Nakata Ken	4. 巻 7
2. 論文標題 Effect of Rearfoot Strikes on the Hip and Knee Rotational Kinetic Chain During the Early Phase of Cutting in Female Athletes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sports Medicine - Open	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40798-021-00368-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wakabayashi Kaito, Ogasawara Issei, Suzuki Yasuyuki, Nakata Ken, Nomura Taishin	4. 巻 116
2. 論文標題 Causal relationships between immediate pre-impact kinematics and post-impact kinetics during drop landing using a simple three dimensional multibody model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 110211 ~ 110211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbiomech.2020.110211	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uno Yuki, Ogasawara Issei, Konda Shoji, Wakabayashi Kaito, Miyakawa Motoi, Nambo Megumi, Umegaki Kaho, Cheng Haotian, Hashizume Ken, Nakata Ken	4. 巻 136
2. 論文標題 Effect of the foot-strike pattern on the sagittal plane knee kinetics and kinematics during the early phase of cutting movements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 111056 ~ 111056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbiomech.2022.111056	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件(うち招待講演 1件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 小笠原一生, 前達雄, 中田研
2. 発表標題 片脚ドロップ着地テストの失敗試技出現パターンに基づく着地課題への適応能の評価
3. 学会等名 第31回日本臨床スポーツ医学会学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Issei Ogasawara
2. 発表標題 Biomechanics and risk prediction of ACL injury
3. 学会等名 Japan Orthopaedic Society of Knee Arthroscopy and Sports Medicine 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Issei Ogasawara, Yohei Shimokochi, Ken Nakata
2. 発表標題 Classification Of Lower Limb Frontal Plane Excursion During Single-legged Landing Using Principle Component Analysis Of Inertia Sensor Data
3. 学会等名 American college of sports medicine annual meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小笠原一生, 鶴野裕基, 梅垣果歩, 南保恵, 近田彰治, 前達雄, 中田研
2. 発表標題 加速度データの主成分分析による片脚ドロップ着地時の膝前額面動揺のパターン 分類
3. 学会等名 第46回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小笠原一生, 鶴野裕基, 梅垣果歩, 南保恵, 近田彰治, 前達雄, 中田研
2. 発表標題 ウェアラブル加速度センサを用いた片脚ドロップ着地時の床反力推定と着地衝撃の定量化
3. 学会等名 第46回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Issei Ogasawara, Yohei Shimokochi, Ken Nakata
2. 発表標題 Classification Of Lower Limb Frontal Plane Excursion During Single-legged Landing Using Principle Component Analysis Of Inertia Sensor Data
3. 学会等名 American college of sports medicine annual meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 関節評価装置、方法及びプログラム	発明者 小笠原一生	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、20200415	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------