

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：37115

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11517

研究課題名(和文)実滑走計測・解析情報に基づくスキー・スノーボードターンの定量化に関する研究

研究課題名(英文)Studies on quantification of skiing and snowboarding based on measurement and analysis information by gliding on actual snow field

研究代表者

廣瀬 圭(Hirose, Kiyoshi)

久留米工業大学・工学部・准教授

研究者番号：50455870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、実際の雪面を滑走するスキーヤー・スノーボーダーが行っている運動、生じている現象を定量化することにより、指導方法の改良や怪我の予防に使用可能な情報を示すことを目的としている。慣性センサ・地磁気センサを用いた運動計測と力センサを用いた雪面反力計測、GPSレシーバを用いた位置計測を併用することにより、単一のセンサからでは得られない、加速要素や減速要素、ターンの特徴を表す加速度成分等について定量化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、スポーツの運動解析を加速度ベースで行うための新しい解析方法を構築し、実滑走におけるスキーヤーの運動解析に適用したものであることから、より詳細に運動解析を行うための新しい技術開発を行っている。

また、スキーにおいて求められるより高速な滑走を行うための技術開発や怪我のリスクを減らすための予防法について検討を行うために重要な定量的な情報を提供するための方法を確立することができ、スポーツ科学分野における新しい知見を示している。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to indicate analysis information that can be used to improve teaching methods and prevent injuries by quantifying the movements and phenomena generating by skiers and snowboarders gliding on the actual snow surface. The analysis information can be obtained by combining motion measurement based inertial sensors and magnetic field sensors, reaction force from snow surface using force sensors and position measurement using GPS receivers, and this information cannot be obtained from a single sensor. The analytical results indicated the acceleration and deceleration elements in turns, the acceleration component representing the characteristics of the turn by the acceleration components were quantified.

研究分野：スポーツ工学，ヒューマンダイナミクス

キーワード：慣性センサ 力センサ 加速度解析 関節トルク

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

アルペンスキーは、重力を利用してターンを行いながら雪面を滑走するスノースポーツである。競技においては定められたコースを速く滑走する必要があるため、減速が少ないターンを行う必要があることから、常に技術向上が求められており、スキーの指導方法を改善するための研究が多く行われてきた。これらの方法の評価は定性的な情報に基づくものであり、運動の適切性を確実に評価するためには、定量的な情報に基づく解析を行い、運動のメカニズムを示すことが必要不可欠である。これまでに、スキー・ターンにおける運動のメカニズムを解明するために、スキーロボットを用いた解析やターンモデルの開発やスキー用具に関する研究等が行われてきた。しかし、屋内の限られた環境における解析では、実際の運動状態をすべて想定できているわけではないため、実際の雪面を滑走するスキーヤーの運動を計測・解析することが必要である。実際の雪面を滑走するスキーヤーの運動を解析するためには、ビデオカメラを用いた DLT を用いた運動解析が行われており、スキル評価等に使用できる重要な指標が得られているが、計測範囲が広がるほど計測精度が低下すること、位置情報をベースとした解析となることから、加速度に着目した解析に使用することは難しい。

これまでに、慣性センサ・地磁気センサをスキーヤーの各身体部位に取り付け、スキーヤーの運動を定量的に捉えるための研究、慣性センサ・地磁気センサと GPS レシーバを組み合わせたことによる滑走速度推定法の開発、および実際に雪面を滑走するスキーヤーによるカービングターンとスキッピングターンの滑走速度の推定を行い、両ターンの左右方向の速度に明確な違いがあることを表しており、関節角度と連動した解析を行うことにより、そのタイミングについても定量的に表している。これらの研究ではカービングターンではスキー板の横ずれが少ないことから滑走速度の回転成分が支配的であること、スキッピングターンではスキー板の横ずれによって並進成分が多く含まれる可能性を示しており、横ずれの少ないターンを行うことによって滑走速度の回転成分を発生させ、その成分がターン速度の維持等に影響を与えていることが示されているが、それらの成分が生じることによる影響は考察の範囲に止まっており、定量的な解析が行えていないのが現状であった。

2. 研究の目的

ターンのメカニズムを解明することを目的とし、スキーヤーがカービングターン、スキッピングターンを行うことによって得られた実滑走情報を用いてスキーヤーに生じる加速度に着目した解析を行うことにより、滑走速度を維持するために必要な要素について明らかにすること、生じる加速度によるスキーヤーの怪我の多くを占める膝前十字靭帯損傷 (ACL) への影響を明らかにすることにより、速く滑走するためのみでなく、怪我の予防を可能とするための情報を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

新型コロナウイルスの影響により新規の計測実験を行うことが難しかったため、主に先行研究によって得られている計測情報を用いた 3 次元運動解析をベースとして研究を行った。計測情報を得るために用いたシステムとして、慣性センサ・地磁気センサを搭載し、スキーヤーのブーツに取り付ける運動計測システムを図 1 に示す。本計測システムには 3 軸直交配置されたジャイロセンサ (ANALOG DEVICES, ADIS16100)、3 軸加速度センサ (日立金属, H30CD)、3 軸地磁気センサ (愛知製鋼, AMI304) が搭載されており、有線で接続する方式を取っている。スキーヤーの頭部に装着し、滑走軌跡を計測するための GPS レシーバ (ETEK NAVIGATION, EB-85A) を搭載した装置を図 2 に示す。これらの計測システムからの情報は RS232C インターフェース IC (ANALOG DEVICES, ADM3202AN) を介して計測用 PC で取得することができる。運動計測システムの大きさは 55×40×18 mm、重さは 65g である。



Fig. 1 Motion measurement system
installing inertial and magnetic field
sensors



Fig. 2 GPS receiver for measurement of
gliding trajectory

本研究では、実滑走計測情報を用いて加速度に着目した解析を主として行った。慣性センサ・地磁気センサと GPS レシーバを用いることによって得られた滑走速度と慣性センサから得られる角速度を用いて加速度成分に着目した解析を行う。滑走速度の推定には先行研究において開発した、慣性センサ・地磁気センサを用いた姿勢推定と GPS レシーバから得られる位置情報と慣性センサから得られる加速度と姿勢情報を用いて得られた絶対座標系における加速度の 2 階積分を組み合わせることにより、補正した滑走速度・滑走軌跡を推定する方法を使用した。

慣性センサに含まれる加速度センサは、取り付け位置の加速度を計測する。加速度は複数の成分で構成されており、加速度センサはその和を計測している。加速度の成分は式(1)によって表される。

$$A = a_{tr} + a_{ct} + a_{tg} + g + a_{col} = a + \omega \times (\omega \times r) + \dot{\omega} \times r + g + 2\omega \times \dot{r} \quad (1)$$

ここで、 a_{tr} は並進加速度、 a_{ct} は遠心加速度、 a_{tg} は接線加速度、 g は重力加速度、 a_{col} はコリオリの加速度であり、 ω は角速度、 r は回転半径であり、 \cdot は微分を表し、 $[\times]$ は外積である。

次に、速度は式(2)によって表される。

$$V = v_{tr} + v_{tg} = v_{tr} + \omega \times r \quad (2)$$

ここで、 v_{tr} は並進成分であり、 v_{tg} は接線速度成分である。重力加速度以外の加速度は速度を微分することによって得ることができるが、速度を微分するためには、一度、絶対座標系に変換する必要がある。スキーヤー座標系 (センサ座標系) から絶対座標系へ変換するための回転行列を 0R_s とすると、絶対座標系における速度は式(3)となる。

$${}^0V = {}^0R_s v_{tr} + {}^0R_s v_{tg} = {}^0R_s v_{tr} + {}^0R_s (\omega \times r) \quad (3)$$

次に、式(3)を微分すると、式(4)となる。

$${}^0\dot{V} = {}^0\dot{R}_s v_{tr} + {}^0R_s \dot{v}_{tr} + {}^0\dot{R}_s v_{tg} + {}^0R_s \dot{v}_{tg} \quad (4)$$

ここで、回転行列 0R_s の微分が式(5)で表されることに利用すると、式(4)の第 1 項、第 3 項は式(6)、式(7)となる。

$${}^0\dot{R}_s = {}^0R_s [\omega \times] \quad (5)$$

$${}^0\dot{R}_s v_{tr} = {}^0R_s (\omega \times v_{tr}) \quad (6)$$

$${}^0\dot{R}_s v_{tg} = {}^0R_s (\omega \times v_{tg}) = {}^0R_s (\omega \times (\omega \times r)) \quad (7)$$

また、第 4 項は式(8)で表される。

$${}^0R_s \dot{v}_{tg} = {}^0R_s (\dot{\omega} \times r + \omega \times \dot{r}) \quad (8)$$

ここで、式(7)は遠心加速度を表し、式(6)はコリオリの加速度の半分を表している。回転行列を消去すると、これらの和は、式(9)で表すことができる。

$$a_{ct} + \frac{1}{2} a_{col} = \omega \times v_{tg} + \omega \times v_{tr} = \omega \times V \quad (9)$$

ここで、 a_{ct} は遠心加速度、 a_{col} はコリオリの加速度である。角速度と滑走速度の外積を用いることにより、遠心加速度とコリオリの加速度の半分の和を表すことができることから、式(9)を展開すると式(10)が得られる。

$$a_{ct} + \frac{1}{2} a_{col} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_z V_y + \omega_y V_z \\ \omega_z V_x - \omega_x V_z \\ -\omega_y V_x + \omega_x V_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)の左右方向 (Y 軸) に着目すると、進行方向 (X 軸) 速度が回転方向の角速度 (Z 軸周り) によって左右方向 (Y 軸、遠心方向) の加速度となっている。この加速度が積分されると、左右方向 (Y 軸) の速度は増加することになる。さらに、進行方向 (X 軸) の加速度に着目すると、左右方向 (Y 軸) の速度が回転方向の角速度 (Z 軸周り) によって進行方向 (X 軸) の加速度に変換されている。よって、滑走速度が遠心加速度とコリオリの加速度に変換され、最終的に進行方向の加速度に変換されていることなるため、本成分が得られるほど、滑走速度を維持したターンが行えていると考えることができる。そこで、滑走速度と角速度を用いることにより、算出した遠心加速度とコリオリの加速度の半分の和を用いることにより、カービングターンと

スキッピングターンの評価を行う。なお、先行研究ではスキーヤー座標系（センサ座標系）の滑走速度を用いた解析を行っているが、スキーヤーを質点と考えた場合、スキーヤーは斜面上を移動していることから遠心加速度、コリオリの加速度は斜面に沿って生じる。スキーヤー座標系を用いて遠心加速度、コリオリの加速度を表すと、スキー板のエッジングにより遠心加速度、コリオリの加速度は左右方向（Y 軸）と上下方向（Z 軸）に分解されてしまうため、本研究では、式(11)、式(12)を用いて斜面座標系に変換した滑走速度、遠心加速度・コリオリの加速度の和を用いた解析を行う。

$$V_{inc} = R_x V \quad (11)$$

$$a_{ct,inc} + \frac{1}{2} a_{col,inc} = R_x (\omega \times V) \quad (12)$$

ここで、 V_{inc} は斜面座標系における滑走速度、 $a_{ct,inc}$ は斜面座標系における遠心加速度、 $a_{col,inc}$ は斜面座標系におけるコリオリの加速度である。 0R_x はロール角 φ （X 軸周りの角度）からなる回転行列であり、式(13)によって表される。なお、ロール角 φ はセンサ座標系から絶対座標系への姿勢情報の推定によって得られている。

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (13)$$

本研究において用いた実滑走計測情報は、計測システムをスキーヤーに取り付けて計測実験を行ったものであり、被験者は身長 180cm、体重 70kg、スキー歴 17 年、全日本スキー連盟準指導員資格を有しているスキーヤーである。計測時間は 30 秒とし、姿勢計測装置のサンプリング周波数は 100Hz、軌跡計測装置のサンプリング周波数は 1Hz とした。スキーヤーは計測開始時にスキー板を斜面に対して平行になるようにした状態で約 5 秒間静止し、その後、一定区間の助走を経て左右ターンを繰り返しながら滑走を行い、異なるターンによる滑走軌跡、速度の違いを計測するために、スキッピングターンとカービングターンによる計測を行った。なお、本実験で用いたコースの平均斜度は約 10° である。

4. 研究成果

滑走速度と角速度を用いることにより算出した遠心加速度とコリオリの加速度の和の結果を図 3～図 5 に示す。進行方向成分（X 軸）の結果では、カービングターン、スキッピングターンともに一部を除きほぼ正の値となっており、カービングターンのほうが最初の一部を除き全体的にスキッピングターンよりも高い値を示した（図 3）。本結果は、遠心加速度とコリオリの加速度を生じさせることにより、摩擦や空気抵抗によって生じる減速要素を低減させることができること、一部区間においては高い加速度が生じていることから、加速効果が得られていることを示している。

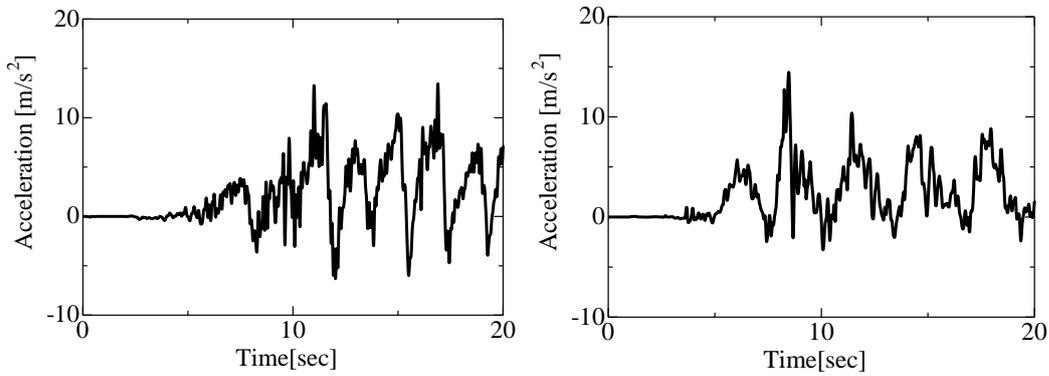
横方向成分（Y 軸）の結果では、カービングターン、スキッピングターンともにターンに合わせて比較的周期的な変化が得られているが、進行方向の結果と同様にカービングターンの結果はスキッピングターンの結果よりも高い値が得られている（図 4）。また、カービングターンの結果では、ターン中では比較的高いがスキッピングターンの結果よりも横方向成分は遠心力が作用する方向であることから、スキー板の横ずれが少ないターンを行うことにより、高い遠心加速度が生じること、スキッピングターンではスキー板をずらした時点で遠心加速度を保持できずに減少していることを示している。

上下方向成分（Z 軸）において、カービングターンの結果ではターン毎に負の値（上方向）に加速度が生じているが、スキッピングターンの結果では、特徴的な加速度は得られなかった（図 5）。上下方向成分は回転軸周りの運動ではないことから遠心加速度は生じにくい。しかし、ターン切り替えに向かってスキー板を斜面と並行にするために回転させた際に、回転半径における公転成分は減少し、自転成分のみとなることから、回転半径はゼロに近づくことになる。右ターン時からターン切り替えに向かうと、スキー板を立てる方向の角速度（X 軸）は正方向、回転半径（Y 軸）の微分値は負方向に変化し、左ターン時からターン切り替えに向かうと、スキー板を立てる方向の角速度（X 軸）は負方向、回転半径（Y 軸）の微分値は正方向に変化することから、上下方向（Z 軸）におけるコリオリの加速度は重力とは反対の負方向に働くため、重力とは逆向きに力が作用することとなり、摩擦力の低減効果が得られていることが考えられる。上下方向（Z 軸）のコリオリの加速度と角速度（X 軸）、回転半径（Y 軸）との関係式を式(14)に示す。

$$a_{col(z)} = \omega_x \dot{r}_y \quad (14)$$

以上より、斜面座標系における滑走速度の結果を用いることにより、スキー板のエッジングに

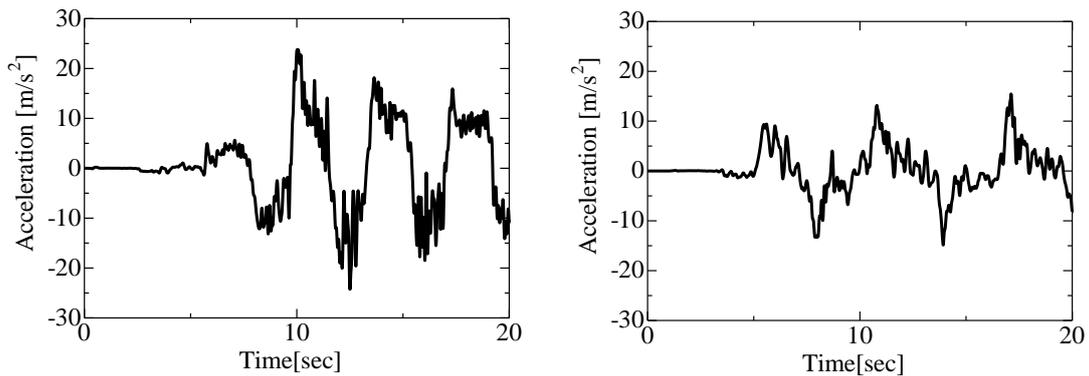
よる影響を除去した滑走速度を得ることができること、遠心加速度とコリオリの加速度の和を用いることにより、遠心加速度やコリオリの加速度がターンを行った際に大きく作用していること、カービングターンにおける滑走速度の確保のために、遠心加速度・コリオリの加速度が重要であることを示しており、遠心加速度、コリオリの加速度をより大きくすることにより、より高速なカービングターンを行うことが可能であることが考えられる。また、本方法を応用することによって斜面座標系における加速度を得ることができるため、重力による加速効果を示すこと、滑走速度が推定できていることから、進行方向に対するスキーヤーの前方投影面積を近似的に計算することができれば、空気抵抗による減速要素を示すことが可能であることから、スキー・ターンを定量的に評価するための新しい方法を開発するとともに、今後のさらに発展した科学的解析を行うための足掛かりを示すことができた。



(a) Carving turns

(b) Skidding turns

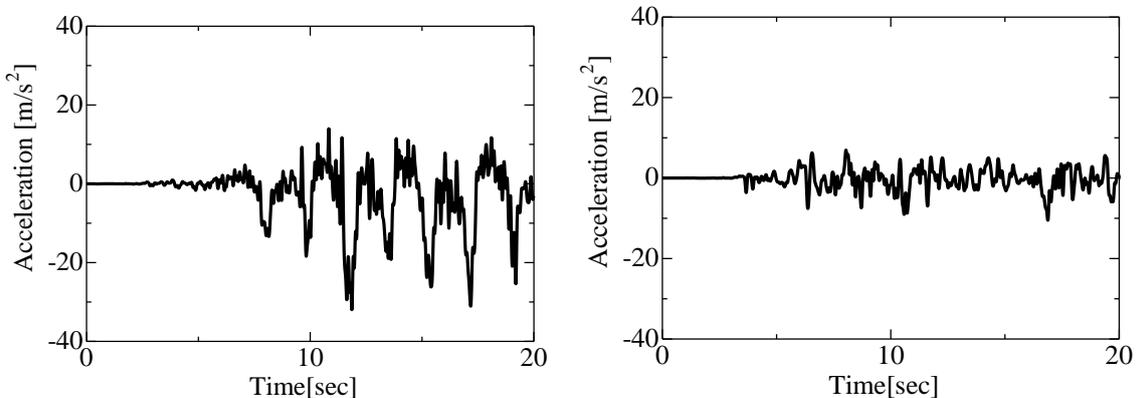
Fig. 3 Results for traveling direction component (X-axis) of centrifugal and Coriolis accelerations by a skier



(a) Carving turns

(b) Skidding turns

Fig. 4 Results for lateral direction component (Y-axis) of centrifugal and Coriolis accelerations by a skier



(a) Carving turns

(b) Skidding turns

Fig. 5 Results for vertical direction component (Z-axis) of centrifugal and Coriolis accelerations by a skier

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 廣瀬圭, 近藤亜希子, 白石元, 伏見知何子	4. 巻 18
2. 論文標題 実滑走情報を用いたアルペンスキーにおけるカービングターン・スキッピングターンの加速度成分解析に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 スキー研究	6. 最初と最後の頁 1-8
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 廣瀬圭, 近藤亜希子, 藤田裕, 伏見知何子
2. 発表標題 実滑走情報を用いたカービングターンにおける 膝関節負荷の定量化と股関節運動による影響に関する研究
3. 学会等名 日本スキー学会第31回大会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤和郎, 廣瀬圭, 伊藤彰人, 辻内伸好, 近藤亜希子, 仲道泰洋
2. 発表標題 ウェアラブルセンサを用いた関節トルク推定の歩行解析への適用に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣瀬圭, 近藤亜希子, 山脇恭二, 名和基之, 西脇一宇
2. 発表標題 慣性・地磁気センサを用いたあん馬・旋回動作の姿勢推定に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤亜希子, 友野一希, 北野敬祐, 廣瀬圭, 竹田正樹
2. 発表標題 慣性センサを用いたフィギュアスケート・ジャンプにおける3次元加速度解析に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣瀬圭, 友野一希, 近藤亜希子, 辻内伸好, 北野敬祐, 竹田正樹
2. 発表標題 慣性センサ・地磁気センサを用いたIEKF・クォータニオンによるフィギュアスケート・ジャンプにおける回転軸推定の3次元化に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤亜希子, 廣瀬圭, 千葉遥, 伏見知何子
2. 発表標題 実滑走情報を用いたカービングターンにおけるメカニズムのモデル化に関する研究
3. 学会等名 日本スキー学会第30回大会
4. 発表年 2019年~2020年

1. 発表者名 廣瀬圭, 近藤亜希子, 千葉遥, 伏見知何子
2. 発表標題 実滑走計測によるカービングターン・スキッピングターンの加速度解析に関する研究
3. 学会等名 日本スキー学会第30回大会
4. 発表年 2019年~2020年

1. 発表者名 廣瀬圭, 近藤亜希子, 千葉遥, 伏見知何子
2. 発表標題 実滑走情報を用いたカービングターンにおける並進・回転加速度成分の解析に関する研究
3. 学会等名 日本スキー学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 廣瀬 圭, 近藤 亜希子, 藤田 裕, 伏見 知何子
2. 発表標題 実滑走情報を用いたカービングターンの遠心加速度成分による膝関節負荷の定量化に関する研究
3. 学会等名 日本スキー学会第32回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤亜希子, 廣瀬圭, 伏見知何子
2. 発表標題 スキー板のエッジングを考慮したカービングターン における回転半径の推定と検証に関する研究
3. 学会等名 日本スキー学会第32回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣瀬圭, 近藤亜希子, 藤田裕, 伏見知何子
2. 発表標題 実滑走情報を用いたスキー・ターンにおける遠心加速度解析と関節負荷への影響
3. 学会等名 日本スキー学会秋季大会講演論文集
4. 発表年 2021年

〔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
---------	---------