

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25750280

研究課題名(和文)実滑走情報に基づくスキー・ターンの3次元シミュレーションモデル開発と運動解析

研究課題名(英文)Development of the 3D simulation model and motion analysis of ski turns based on the gliding information on actual snow field

研究代表者

廣瀬 圭 (HIROSE, KIYOSHI)

秋田大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：50455870

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)：本研究では実滑走におけるスキー・ターンのシミュレーションモデルを開発するために、慣性センサを搭載した身体運動計測システム、力センサを搭載した雪面反力計測システム、GPSレシーバを搭載した滑走軌跡計測システムを用いたカービングターン・スキディングターンの運動計測を行った。得られた実滑走情報を用いて運動学的解析、動力学的解析を行い、スキー・ターンのメカニズムを解析するための情報を得た。さらに、滑走速度と雪面反力を用いたカービングターンの特性モデルを開発とターンのメカニズム解析を行い、カービングターンの特徴を定量化した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we conducted the motion measurement of carving and skidding turns for developing the simulation model of ski turns in ski running on the actual snow field using the motion measurement system installing the inertial sensors, the measurement system of reaction force from snow surface installing the force sensors and the measurement system of gliding trajectory installing the GPS receiver. We conducted the kinematics and kinetics analysis using the gliding information, and we obtained the information for the mechanism analysis of ski turns. Furthermore, we developed the characteristics model of carving turns using the gliding velocity and reaction force from snow surface, and we quantified the characteristics of carving turns by the mechanism analysis.

研究分野：スポーツ工学

キーワード：慣性センサ 雪面反力 滑走速度 関節トルク 関節角度

1. 研究開始当初の背景

スキーは、冬季を代表とするスポーツであり、幅広い年齢層に親しまれ、産業規模も大きいことから、指導法の改善や怪我の防止法等、研究分野に対するニーズも多く存在し、工学、医学等様々な分野において研究が行われている。スキーヤーは、荷重移動によってスキー板のエッジング量を発生させてターンを行っており、そのメカニズムは複雑である。また、雪面を高速で滑走しているために、その運動を捉えることが非常に難しい。しかし、スキー・ターンのメカニズムを解明することは、新しいスキー用具の開発や指導法の改良等に必要不可欠である。スキー・ターンのメカニズムを解明するために、これまでにスキーロボットの開発やスキーターンのシミュレーション、用具の特性解析等が行われてきたが、これらの研究は、屋内環境の静的環境下における解析である。実際の雪面を滑走するスキーヤーは、動的環境下で運動を行っているため、実滑走における運動情報を用いた運動解析が必要不可欠であるが、雪面を高速で滑走するスキーヤーの運動を捉えるためには、映像情報によるDLT法の適用は難しい。

実際の雪面を滑走するスキーヤーの運動を明らかにするために、3次元磁気式位置センサ、ジャイロセンサを用いた運動計測、6軸力センサを併用した力学解析が行われており、申請者らは、これらの方法よりも詳細な運動情報を簡易に得るために、慣性センサ・地磁気センサを搭載したシステムを用いた運動計測やGPSレシーバを併用した滑走軌跡・滑走速度計測を行い、姿勢情報(スキーヤーがターンの各局面でどのような姿勢をとっているのか)、慣性情報(スピードや描くターン弧の違いによる並進運動、回転運動の違い)、力学情報(関節にどのような負荷がかかっているのか)等を明らかにしてきた。これらの情報はスキー・ターンのメカニズムを解明するために役立てることができる。これまで静的な条件下において行われてきたスキー・ターンのシミュレーションモデルを実滑走情報に基づいて開発することにより、スキー・ターンを行うための適切な力の加え方や異なるターンにおける運動の違い等を詳細に解析することが可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、スキー・ターンのさらなる詳細な実滑走情報を得るための運動解析、スキー・ターンの実滑走情報に基づくスキー・ターンのシミュレーションモデルの構築、試作したモデルを用いたターンのメカニズム解析を行った。先行研究における運動解析は、主にカービングターンのみに着目した解析を行っていたため、スキー板の横ずれを使用してターンを行うスキッピングターンにおける解析や異なるターンにおける運動の違いについては定量化されていなかった。ま

た、先行研究において用いた運動解析法は、高速な雪面滑走に対応していなかったため、高速滑走においては解析に必要な姿勢情報が正確に得られない可能性があった。そこで、相対座標系の運動情報に着目することにより、高速滑走においても姿勢情報を得ることができる姿勢計測法を開発し、開発した姿勢推定法を用いた運動解析を展開する。シミュレーションモデルの開発においては、スキーヤーは位置エネルギーを運動エネルギーに変換しながら滑走を行っていることに着目したターンの定量化モデルを開発する。

3. 研究の方法

実滑走におけるスキーヤーの運動情報を得るために、慣性センサをベースとした運動計測システムを用いる。スキーヤーが滑走中にどのような運動を行っているかを明らかにするためには、運動学的解析や動力学解析を行う必要があるが、慣性センサから得られる計測情報は角速度と加速度であることから、解析に必要な姿勢情報を直接得ることはできない。姿勢情報を得るためには角速度や重力加速度から変換する必要があるが、積分演算によるドリフト誤差や動的加速度による誤差によって長時間の計測においては精度が低下する。ドリフト誤差を補正した姿勢情報を得るための方法として、センサ・フュージョンが提案されているが、スキーのような高速に雪面を滑走するスポーツの計測への適用は想定されていなかった。先行研究において動的加速度による影響を軽減したセンサ・フュージョンを提案し、スキー・ターンの運動計測・解析への適用を行っているが、より高速な滑走への対応は難しい。そこで、相対座標系に着目することによって動的加速度の影響を相対的にキャンセルし、姿勢情報を推定するセンサ・フュージョンを提案した。本センサ・フュージョンは、図1に示す2リンクモデルを用いて構築しており、式(1)に示す加速度の関係式と式(2)、式(3)に示す角速度から相対座標系における姿勢情報の計算式から構成されている。

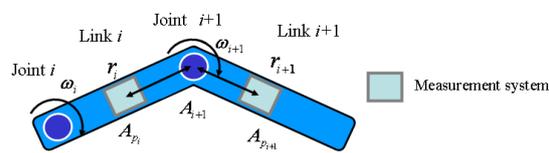


図1 2リンクモデル

$${}^i A_{i+1} + {}^i g = {}^i C_{i+1} ({}^{i+1} A_{i+1} + {}^{i+1} g) \quad (1)$$

$$q = \omega_i^{-1} C_i^T \omega_{i-1} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} {}^i \dot{\psi}_{i+1} \\ {}^i \dot{\theta}_{i+1} \\ {}^i \dot{\phi}_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin^i \varphi_{i+1} \sec^i \theta_{i+1} & \cos^i \varphi_{i+1} \sec^i \theta_{i+1} \\ 0 & \cos^i \varphi_{i+1} & -\sin^i \varphi_{i+1} \\ 1 & \sin^i \varphi_{i+1} \tan^i \theta_{i+1} & \cos^i \varphi_{i+1} \tan^i \theta_{i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $A$  は加速度、 $g$  は重力加速度、 $C$  は姿勢を表す回転行列、 $\omega$  は角速度、 $q$  は関節角速度、 $\varphi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$  はロール・ピッチ・ヨー角である。

これらの関係を用いることにより非線形状態方程式(式(4))、非線形観測方程式(式(5))を構築したが、非線形観測方程式内に加速度が含まれ、非線形性が強いことから、アルゴリズムには非線形性が強い場合においても性能が期待できるアンセンテッドカルマンフィルタアルゴリズムを用いた。

$$x_{t+1} = F(x_t) + w_t \quad (4)$$

$$x_t = \begin{bmatrix} {}^i\varphi_{t+1} \\ {}^i\theta_{t+1} \\ {}^i\psi_{t+1} \end{bmatrix}$$

$$F(x_t) = \begin{bmatrix} u_x + \sin^i\varphi_{t+1} \tan^i\theta_{t+1} q_y + \cos^i\varphi_{t+1} \tan^i\theta_{t+1} q_z \\ \cos^i\varphi_{t+1} q_y - \sin^i\varphi_{t+1} q_z \\ \sin^i\varphi_{t+1} \sec^i\theta_{t+1} q_y + \cos^i\varphi_{t+1} \sec^i\theta_{t+1} q_z \end{bmatrix}$$

$$y_t = H(x_t) + v_t \quad (5)$$

$$y_t = \begin{bmatrix} A_{pi} + A_{ci} \\ A_{pi+1} + A_{ci+1} \end{bmatrix}$$

$$H(x_t) = \begin{bmatrix} {}^iC_{i+1}(A_{pi+1} + A_{ci+1}) \\ {}^iC_{i+1}^T(A_{pi} + A_{ci}) \end{bmatrix}$$

ここで、 $w_t$ 、 $v_t$  はノイズ、 $A_p$  は加速度センサ出力、 $A_c$  は遠心・接線加速度を示す。

構築した姿勢推定法と逆動力学解析を用いてスキーヤーの動力学的解析を可能とし、スキーヤーの各身体部位（上部、腰部、左右大腿部、左右下腿部、左右足部）に慣性センサを取り付け、雪面反力計測が可能な6軸力センサをビンディングとスキーブーツの間に搭載することにより、スキーヤーの関節角度、関節トルク（腰椎関節、股関節、膝関節、足関節）が推定可能となる。本方法を用いることによって、高速で滑走するスキーヤーの運動においても関節角度、関節トルク推定が可能となった。

スキー・ターンの特性モデルを開発するために、先行研究において開発したGPS レシーバから得られる位置情報と慣性センサの計測情報を用いて推定した滑走速度と雪面反力に着目したターンの特性モデルを提案した。モデルを式(6)に示す。

$$V_y = aF_y + bF_z + c \quad (6)$$

ここで、 $V_y$  は横方向の滑走速度、 $F_y$  は雪面反力の横方向成分、 $F_z$  は雪面反力の垂直方向成分を示し、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  は未知パラメータである。

横方向の滑走速度は、ターン速度を、雪面反力の横方向の成分はスキー板のサイドカーブを雪面に押さえるための力、垂直方向成

分は板をたわませるための力を示し、 $a$  はスキー板のサイドカーブを抑えるための力によるターン速度への影響を示すパラメータ、 $b$  は板のたわみによってターン速度への影響を示すパラメータを示す。計測実験によって得られた実滑走における滑走速度と雪面反力情報からカルマンフィルタアルゴリズムを用いてパラメータ  $a$ 、 $b$  を推定することにより、ターン速度に対するサイドカーブと板のたわみの影響について調べることができる。

#### 4. 研究成果

スキーヤーに慣性センサ・力センサを搭載し、カービングターン、スキッピングターンの運動計測・解析を行い、実滑走におけるスキーヤーの関節角度、関節トルクを推定した。ジャイロセンサの角速度から直接関節角度を計算した結果と本センサ・フュージョンを用いて推定した腰椎関節角度の結果を図2に示す。ジャイロセンサ出力から直接計算した関節角度にはドリフトによる誤差が発生しているが、本姿勢推定法を用いることにより、ドリフトによる誤差を補正した結果が得られ、静的な条件だけでなく実滑走においても本姿勢推定法の有効性を示すことができた。右股関節角度の結果を図3に示す。慣性センサを用いることにより3自由度関節における関節角度計測が可能であり、実滑走においてもスキーヤーの3自由度関節角度の計測を行うことができた。

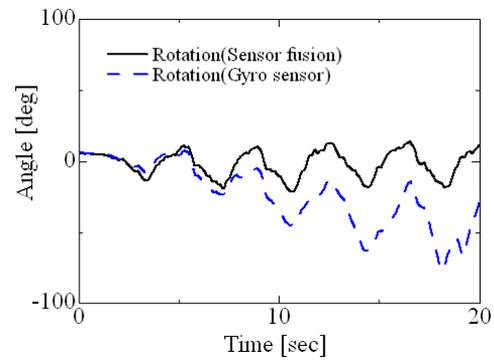


図2 腰椎関節角度の比較

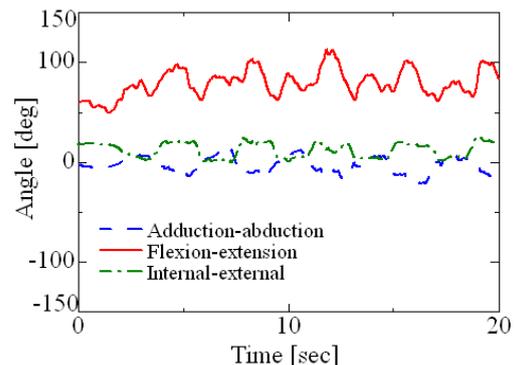


図3 右股関節角度の結果

本姿勢推定法とニュートン・オイラー法による逆動力学解析を併用することにより、関節トルクを推定し、カービングターンとスキッピングターンにおける関節トルクの比較を行った。カービングターンにおける右股関節トルクの結果を図4に、スキッピングターンにおける右股関節トルクの結果を図5に示す。なお、本結果では詳細なトルクの変化を分析するために1ターン分を抽出した結果を示している。

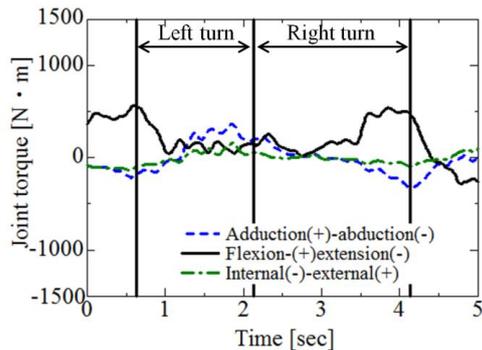


図4 右股関節トルクの推定結果 (カービングターン)

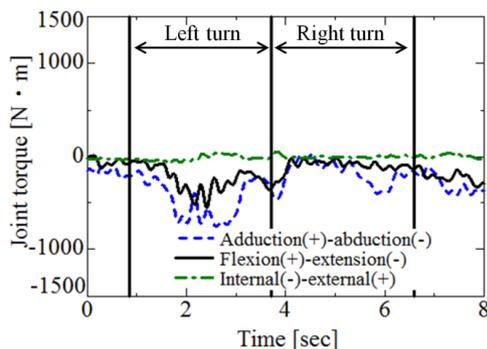


図5 右股関節トルクの推定結果 (スキッピングターン)

カービングターンでは、ターンを行うために、内転トルクを使用しているが、スキッピングターンでは、スキー板の横ずれを発生させるために伸展トルク、外転トルクが使用されており、ターンを行うために使用されているトルクが異なることを示した。

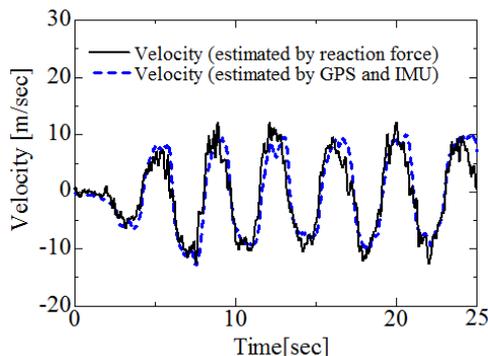


図6 滑走速度の比較

実滑走情報を用いて推定したモデルパラメータと雪面反力情報を用いて推定した滑走速度(横方向成分)と慣性センサ・GPS レシーバを用いて推定した滑走速度の比較結果を図6に示す。両結果は良く一致しており、本モデルが適切であることを示した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4件)

1. 近藤亜希子, 廣瀬圭, 土岐仁, 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運動力学解析に関する研究, スキー研究, 11-1, pp.3-12, 2014.

2. 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 実滑走におけるスキーヤーの3次元姿勢計測とターンの運動解析に関する研究, スキー研究, 10-1, pp.19-26, 2013.

3. Kiyoshi Hirose, Hitoshi Doki, Akiko Kondo, Dynamic analysis and motion measurement of ski turns using inertial and force sensors, The Impact of Technology on Sport V, pp.355-360, 2013.

4. Akiko Kondo, Kiyoshi Hirose, Hitoshi Doki, Motion analysis and joint angle measurement of skier gliding on the actual snow field, The Impact of Technology on Sport V, pp.307-312, 2013.

[学会発表] (計 3件)

1.廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, 拡張カルマンフィルタを用いてスキーヤーのばね・減衰係数推定に関する研究, スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2013, 2013.

2. 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子, 実滑走におけるスキーヤーのばね・減衰係数推定に関する研究, 日本スキー学会 2013 年度研究会, 2014.

3. 廣瀬圭, 近藤亜希子, 土岐仁, 実滑走情報を用いたスキー・ターンのメカニズム解析に関する研究, 日本スキー学会第25回大会, 2015.

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

廣瀬 圭 (HIROSE KIYOSHI)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・講師

研究者番号：50455870