

拡張カルマンフィルタを用いたスキーヤーのばね・減衰係数推定に関する研究

廣瀬 圭^{*1}, 土岐 仁^{*1}, 近藤 亜希子^{*1}

A Study on Estimation Method of Spring and Attenuation Constants of Skier Using Extended Kalman Filter

Kiyoshi HIROSE^{*1}, Hitoshi DOKI and Akiko KONDO

^{*1} Aktia Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Gakuenmachi Tegata 1-1, Akita city, Akita, 010-8502 Japan

This paper proposes the estimation method of spring and attenuation constants of skier. Skier conducts ski turns three-dimensionally, and the motion is complexity. The joints of skier are used such as spring and damper in turns. Therefore, it is necessary to clarify the effect of spring and attenuation by the joints of skier gliding on the actual snow field. However, the spring and attenuation constants change during turns. In this study, we propose the estimation method of spring and attenuation method using the joint internal force, relative displacement and relative velocity. The Extended Kalman filter is used as the estimation algorithm. We applied the estimation method to the motion information of skier gliding on the actual snow field, and we estimated the spring and attenuation constants. These results indicated the major features of skier's motion.

Key Words : Sports Engineering, Human Dynamics, Sensor, Measurement, Extended Kalman filter

1. 緒 言

スキーは冬期を代表するスポーツであり、幅広い年齢層に親しまれている。スポーツ工学分野において、様々なスポーツの運動計測・解析が行われているが、スキーヤーは広大な雪面を滑走するスポーツであるため、スポーツの運動計測に主に使用されている映像情報を用いた DLT 法を用いた場合、精度が低下する。そこで筆者らは、慣性センサを用いたスキー・ターンの運動計測法を開発し、実際に雪面を滑走するスキーヤーの運動計測・解析を行うことにより、方法の有効性を示してきた¹⁾。本方法は、慣性センサをスキーヤーの身体部位に取り付けるため、計測範囲によって精度が低下する問題はなく、キャリブレーション等も比較的簡易に行うことができることから、スノースポーツの運動計測に適した方法である。さらに、センサ・フュージョン^{2), 3)}を適用することによって3次元姿勢情報を推定することが可能であり、関節角度の算出、運動学的解析を行うことができ、スキー・ターンの運動計測において誤差の原因となる動的加速度の影響にも対応している。

先行研究において、筆者らは、身体部位に取り付けている慣性センサと6軸力センサを用いた雪面反力計測を併用し、逆動力学解析を適用することによる、スキーヤーの関節トルク推定法を提案している¹⁾。ランニング等の運動において、アスリートは各関節をばねやダンパのように働かせて地面反力に対応しており、スキーにおいても、スキーヤーはターン中に各関節を動吸振器のように使用し、雪面反力の影響に対応している。しかし、関節トルクを用いた解析では、スキーヤーが雪面からの影響に対する緩衝性を定量的に示すことは難しい。地面からの影響の対応について解析するための方法として、身体をばね-マス-ダンパとしてモデル化し、推定した弾性係数、減衰係数による解析法が提案されている⁴⁾。本研究では、雪面反力からの影響に対するスキーヤーの緩衝性を示すために、スキーヤーの各関節をばね-マス-ダンパとしてモデル化した解析を行う。

^{*1} 正員, 秋田大学大学院工学資源学研究所 (〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)
E-mail: hirose@gipc.akita-u.ac.jp

2. 運動解析法

スキーヤーは、雪面に対して両足共に接地した状態でターンを行っているため、スキーヤーを図1に示す6自由度のばね-マス-ダンパからなる線形モデルと仮定すると、関節間力とばね定数、減衰係数との関係式は式(1)で表される。

$$F_i = -k_i(x_i - x_{i+1}) - c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) \quad (1)$$

ここで m_i は各身体部位の質量、 k_i はばね定数、 c_i は減衰係数、 F_i は関節間力であり、 i は各リンク、関節を示し、ベースリンクを地面ではなく、スキー板としている。先行研究における力学モデルでは、足関節をばねのみと仮定しているが、スキーの場合、スキーブーツによる減衰効果が考えられるため、本モデルでは足関節にもダンパを追加している。

逆動力学解析によって算出される関節間力は、各身体の座標系となっている。本モデルに適用するために、各スキーブーツの座標系を基準座標系とし、式(2)を用いて変換する。ここで、 0R_i は身体座標系から基準座標系への回転行列である。

$${}^0F_i = {}^0R_i {}^iF_i \quad (2)$$

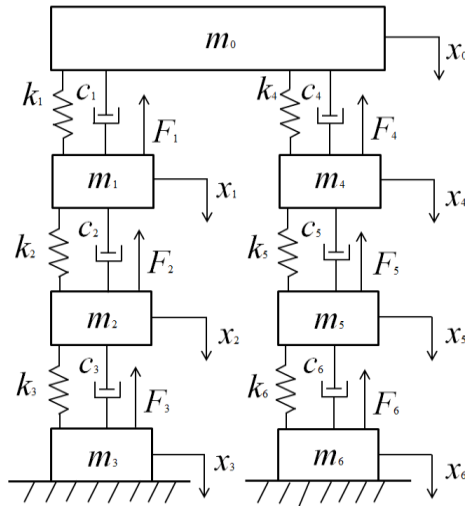


Fig. 1 Dynamic model of skier

式(1)における相対変位、相対速度は、図2に示す2リンクモデルより式(3)、式(4)を用いてそれぞれ算出する。ここで、 ${}^{i-1}p_i$ は関節 $i-1$ から関節 i までの位置ベクトル、 s_i はリンク i の重心位置、 ω_i はリンク i の角速度である。

$${}^0x_i - {}^0x_{i+1} = ({}^0R_i)^T ({}^{i-1}p_i - s_i) + ({}^0R_{i+1})^T s_{i+1} \quad (3)$$

$${}^0\dot{x}_i - {}^0\dot{x}_{i+1} = ({}^0R_i)^T ({}^{i-1}p_{i+1} - s_{i+1}) \times \omega_i + ({}^0R_{i+1})^T s_{i+1} \times \omega_{i+1} \quad (4)$$

これまでに行われてきた、ばね-マス-ダンパを用いた解析の多くは、一連の動作においてばね定数と減衰係数は一定であると仮定して同定されているが、スキーヤーはターン中に3次元的に姿勢を変化させながら滑走しているため、ばね定数、減衰係数を逐次変化させていることが考えられる。そこで、ばね定数と減衰係数は時変であると仮定し、時々刻々と変化するばね定数、減衰係数を推定する。

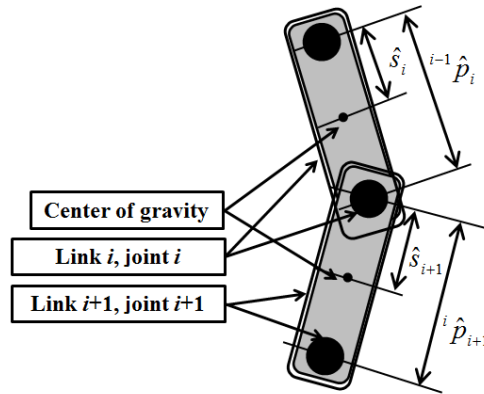


Fig. 2 Two link model

ばね定数、減衰係数の推定には、拡張カルマンフィルタを使用する。拡張カルマンフィルタは、設定した推定値をリアルタイムに推定することができるフィルタであるが、繰り返し計算を行うことにより、パラメータ推定にも使用することができ、前の推定値を初期値として次の推定値を探索できることから、時々刻々と変化するパラメータ推定に使用可能である⁵⁾。

本研究では、実滑走におけるスキーヤーの関節間力を推定するために、慣性センサを搭載した運動計測システムと6軸力センサを搭載した雪面反力計測システムを併用した逆動力学解析を行う。関節トルク（関節間力）推定のブロック線図を図3に示す。逆動力学解析に必要な姿勢情報（相対座標系の回転行列）は先行研究において開発したセンサ・フュージョンを用いて推定する³⁾。

以上より得られた関節間力、相対変位、相対速度と式(1)を拡張カルマンフィルタに適用し、ばね定数・減衰係数の推定を行う。しかし、式(1)を用いた場合、スキーヤーの関節角度が 90° 以上となり、相対変位が負となった時や相対速度が負になった時に、適切な値を推定することができない。そこで、式(1)の関節間力、相対速度、相対速度を正の値に固定した式(5)を用いて構築した、非線形状態方程式、非線形観測方程式を式(6)、式(7)に示す。

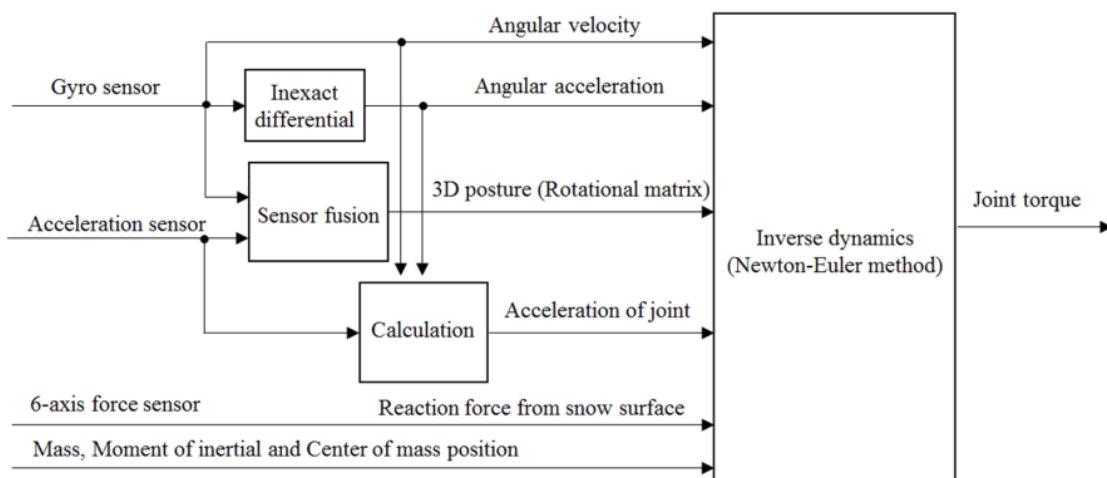


Fig. 3 Block diagram for estimation of joint torque

$$|F_{i(t)}| = k_{i(t)}|x_{i(t)} - x_{i+1(t)}| + c_{i(t)}|\dot{x}_{i(t)} - \dot{x}_{i+1(t)}| \quad (5)$$

$$x_{t+1} = F(x_t) + w_t \quad (6)$$

$$x_t = \begin{bmatrix} k_t \\ c_t \end{bmatrix}, F(x_t) = \begin{bmatrix} k_t \\ c_t \end{bmatrix}$$

$$y_t = H(x_t) + v_t \quad (7)$$

$$y_t = \begin{bmatrix} |F_t| \end{bmatrix}, H(x_t) = \begin{bmatrix} k_t|x_i - x_{i+1}| \\ c_t|\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}| \end{bmatrix}$$

構築した非線形状態方程式，非線形観測方程式に拡張カルマンフィルタアルゴリズムを適用し，一定値に収束するまで繰り返し計算を行うことにより，ばね定数・減衰係数を推定する．ただし，推定値が負の値にならないように補正しながら計算を行う．

3. 計測実験

実際の雪面を滑走するスキーヤーによるカービングターンの計測実験を行った．慣性センサを搭載した運動計測システムをスキーヤーの各身体部位（上体部，腰部，大腿部，下腿部）に，力覚センサをスキーブーツとスキー板の間に搭載した雪面反力計測システムをそれぞれ取り付けた．計測システムの取り付け位置を図4に示す．スキーヤーは，若干の助走を経て左右ターンを繰り返しながらカービングターンを行った．計測時間は30秒，サンプリング周波数は100Hzである．

4. 解析結果

計測実験より得られたスキーヤーの運動情報より関節角度，関節速度，関節間力よりばね定数，減衰係数の推定を行い，0.1秒間隔で計算を行った．推定したばね定数の結果を図5に示し，減衰係数の結果を図6に示す．ばね定数の結果より，左股関節のばね定数が最も大きく，右股関節のほうが柔軟な対応を行っていた．減衰係数の結果より，左右足関節ともに減衰係数が変化しており，スノーブーツによる減衰効果が表れていた．また，左ターン中は右股関節，右膝関節の減衰係数が増加し，右ターン中は，左股関節，左膝関節，左足関節の減衰係数が増加しており，外足となった側の関節がターン中に発生する雪面反力による影響（振動等）を減衰させていた．以上より，推定したばね定数，減衰係数を用いることにより，カービングターンを行うスキーヤーの緩衝性を示した．

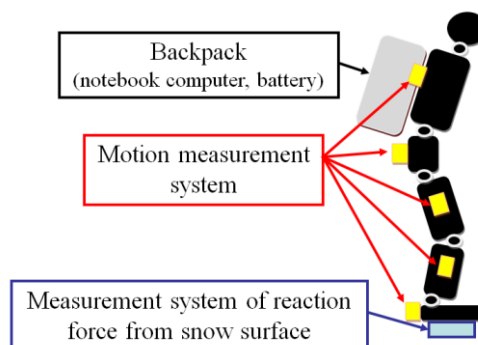
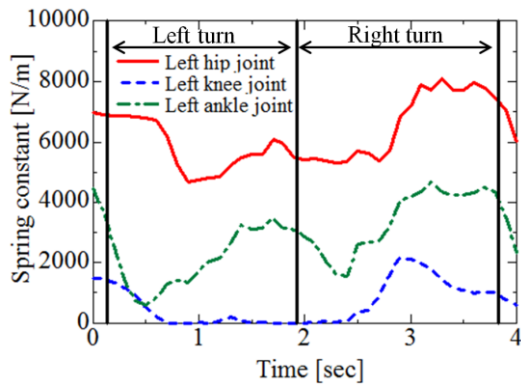
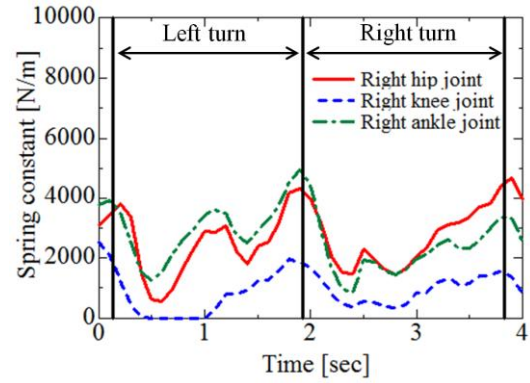


Fig. 4 Setting position of measurement systems

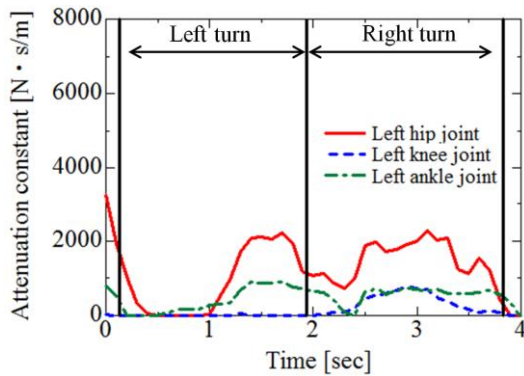


(a) Left joint

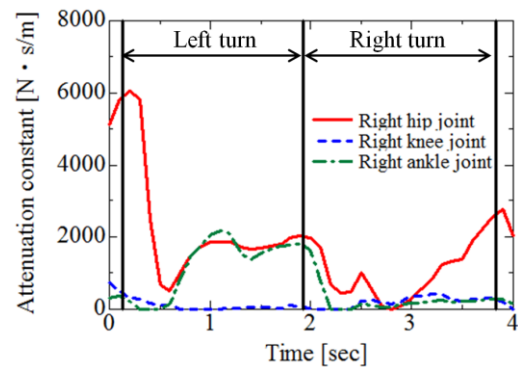


(b) Right joint

Fig. 5 Spring constant



(a) Left joint



(b) Right joint

Fig. 6 Attenuation constant

5. 結 言

本研究では、スキーヤーの関節をばね-マス-ダンパと仮定し、ターン中に時々刻々と変化する各関節のばね定数、減衰係数を推定するために、拡張カルマンフィルタを用いたばね定数・減衰係数推定法を構築し、実滑走においてカービングターンを行うスキーヤーへの適用を行った。推定したばね定数、減衰係数を用いた解析を行った結果、雪面反力に対する関節の緩衝性について示すことができた。今後の展開として、スキーヤーは3次元的に運動していることから、3次元運動に対応した力学モデル、解析法の構築や異なるターンにおけるばね定数・減衰係数の違いに着目した、より詳細な解析を行う。

文 献

- (1) 廣瀬圭, 土岐仁, 小田紳介, 永作清 “拡張カルマンフィルタを用いたスキー・ターンの運動計測と力学解析に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 774 (2011), pp. 470-480.
- (2) 廣瀬圭, 土岐仁, 近藤亜希子 “慣性センサ・地磁気センサを用いたスポーツにおける姿勢計測に関する研究”, スポーツ産業学研究, Vol. 22, No. 2 (2012), pp. 255-262.
- (3) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭 “慣性センサを用いた身体運動計測における3次元姿勢推定法に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79, No. 803 (2013), pp. 2351-2361.
- (4) 湯川治敏, 小林一敏 “可変質量粘弾性モデルによるランニング中の着地衝撃のパラメータ同定”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 61, No. 587 (1995), pp. 2862-2868.
- (5) 谷萩隆嗣, “カルマンフィルタと適応信号処理”, (2005), pp.47-59, コロナ社.