

研究報告

慣性センサーを用いた動作分析の可能性の検討

—スキーモーグルのターン動作を想定して—

安藤 優香・中島 由来・山口 瑞生・樋口 俊祐・村田 由華
大久保 薫・桜井 伸二

Examination of the Possibility of Motion Analysis Using Inertial Measurement Unit
— To Analyze the Ski Mogul Turn —

Yuka ANDO, Yura NAKAJIMA, Mizuki YAMAGUCHI, Shunsuke HIGUCHI,
Yuka MURATA, Kaoru OHKUBO, Shinji SAKURAI

I. 緒言

スキーモーグル種目では、規則的に配置されたコブがある全長 $235 \pm 35\text{m}$ で平均斜度 $28 \pm 4^\circ$ の急斜面を高速で、かつ、安定して滑走することが求められる。コブ斜面におけるスキー動作を運動学的な観点から分析した研究は少ない。その中でも例えば、コブの吸収動作に着目したもの（池上ら、1985）や、モーグルのターン動作に着目し、習熟レベルの異なる2名の動作を比較したもの（佐々木と結城、2003）がある。スキーモーグルでは、急斜面において、連続するコブから受ける衝撃を吸収しつつ、同時に、できるだけ速度を減速させないように滑走するという、極めて高度なターン技術を要する。全長 200m を越すコース全体において、このターン動作を維持することが、優秀な成績を得るために必須と考えられる。

スキーにおける高速度ビデオ映像を用いた研究はいくつかみられる。堀島(2019)は、2019年に行われた2019FIS フリースタイルスキーワールドカップ秋田たざわ湖大会に出場した男子選手14名の、ターン動作中の膝関節屈曲伸展の角度変動を明らかにした。その中で膝関節最大伸展を 0° とした場合、1ターンの動作中には $20 -$

120° の範囲内で屈曲伸展していることがわかっている。中里ら(2016)はカービングスキーによる中回りターンの3次元動作分析を行った。競技者の重心速度、エッジング角度、身体の内傾角などを求め、上級者と中級者を比較している。その中でも、身体の内傾角に違いがあることがわかり、上級者は下腿部から内傾しているのに対して、中級者は頭と体幹をターンの内側に傾けることで内傾動作を行っていることを示唆した。このように高速度ビデオ映像を用いた動作分析により、ターン動作の詳細について明らかにされてきた。しかしながら、これらの研究において分析された動作は1ターンにとどまっている。堀島(2019)・中里ら(2016)のような詳細なターン動作の分析をスキーのコース全体を通して行うことで、より高いパフォーマンスを獲得するための知見を得られると考えられる。

近年、慣性センサー(Inertial Measurement Unit, IMU)を用いた動作分析手法が発展してきている(近藤ら、2013; 廣瀬ら、2011)。慣性センサーは、センサー内に、3軸加速度、3軸ジャイロ、3軸地磁気のセンサーを内蔵している。それらの計測値を使用して、絶対座標系に対するセンサーの姿勢角、同期されたセンサー同士の

相対的な姿勢角などを算出することが可能である。さらに、本研究で用いるのはデータロガー形式慣性センサー（Vicon Blue Trident）でありデータ取得の際に場所、距離の制約を受けない。つまり、従来の高速度ビデオ分析法に比べて、複数ターン、さらにはコース全体を通してのデータ取得が可能になると考えられる。

一方で慣性センサーでの動作分析には課題が散見される。例えば、小西ら（2012）は慣性センサーと光学式動作計測装置で計測された大腿角度を比較する研究を行った。多数の反射マーカーを利用したPCT法（Point Cluster Technique）で算出された大腿角度を真値とし、慣性センサーで計測された大腿角度と、反射マーカー2点を利用した2M法（2Marker法）で算出された大腿角度の比較を行った。その結果、慣性センサーで計測された大腿角度はすべての動作について極端に推定結果が悪くなることはなかったが、2M法による推定は動作によって推定精度に差があることを報告している。しかしながら、国立スポーツ科学センター（JISS）が発行している『コーチングのためのバイオメカニクス関連機器の活用ガイドライン』によると、慣性センサーについて「ランニングや歩行などの2次元動作における座標値の精度は十分検証されているものの、投球時の肩関節の座標値の推定など、3次元動作における位置の推定精度は明らかになっていない」とされている。以上のように、慣性センサーの動作分析への応用は様々な報告がなされているため、まずは、本研究で使用するデータロガー形式の慣性センサーから得られるデータと、従来の高速度ビデオ撮影法から得られる身体情報のデータを比較し、妥当性を検証する必要があると考えられる。

そこで本研究では、慣性センサーを身体に貼付した状態でスキーウェアを着用した被験者に、モーグルのターン動作中の下肢関節の動作を行わせ、大腿部のセンサーと下腿部のセンサーの姿勢角から膝関節角度を求めた。同時に従来のように高速度ビデオで動作を撮影し、堀島（2019）と同様の方法で膝関節角度を求めた。そして上記2つの膝関節角度を比較し、どの程

度一致するかを検証することを目的とした。2つの膝関節角度が一致することが明らかとなれば、スキーモーグル動作のデータを、全長200mを超えるコースの全区間で取得することが可能となると考えられる。

2. 方法

2.1 被験者

被験者は、モーグル競技、基礎スキーを専門とする女子選手1名（身長153cm、体重48kg、年齢26歳、競技歴23年）を対象とした。また、被験者はモーグル競技において全日本ジュニアオリンピック選手権大会、国民体育大会で優勝、基礎スキーにおいて全日本スキー技術選手権大会決勝進出、不整地小回りの種目別1位の経験を有し、スキー動作を習熟している者であった。

2.2 実験試技

被験者はスキーウェア、スキーブーツを着用し、ブーツはスキーに固定した。

図1に分析試技1~3を示す。

試技1：台上に水平に立った状態から、下肢の屈曲伸展動作を2回行った。

試技2：試技1と180°反対の方角を向いて台上に立った状態から、ターン動作を想定して左右への倒れ込みと下肢の屈曲伸展を同時に行う動作を左右各2回ずつ行った。

試技3：試技2と同じ方角を向いて、図1のようにスキーのトップを地面につけることでスキーに前下がりの傾斜をつけ、スキー場での動作を想定して試技2と同様の動作を左右各2回ずつ行った。

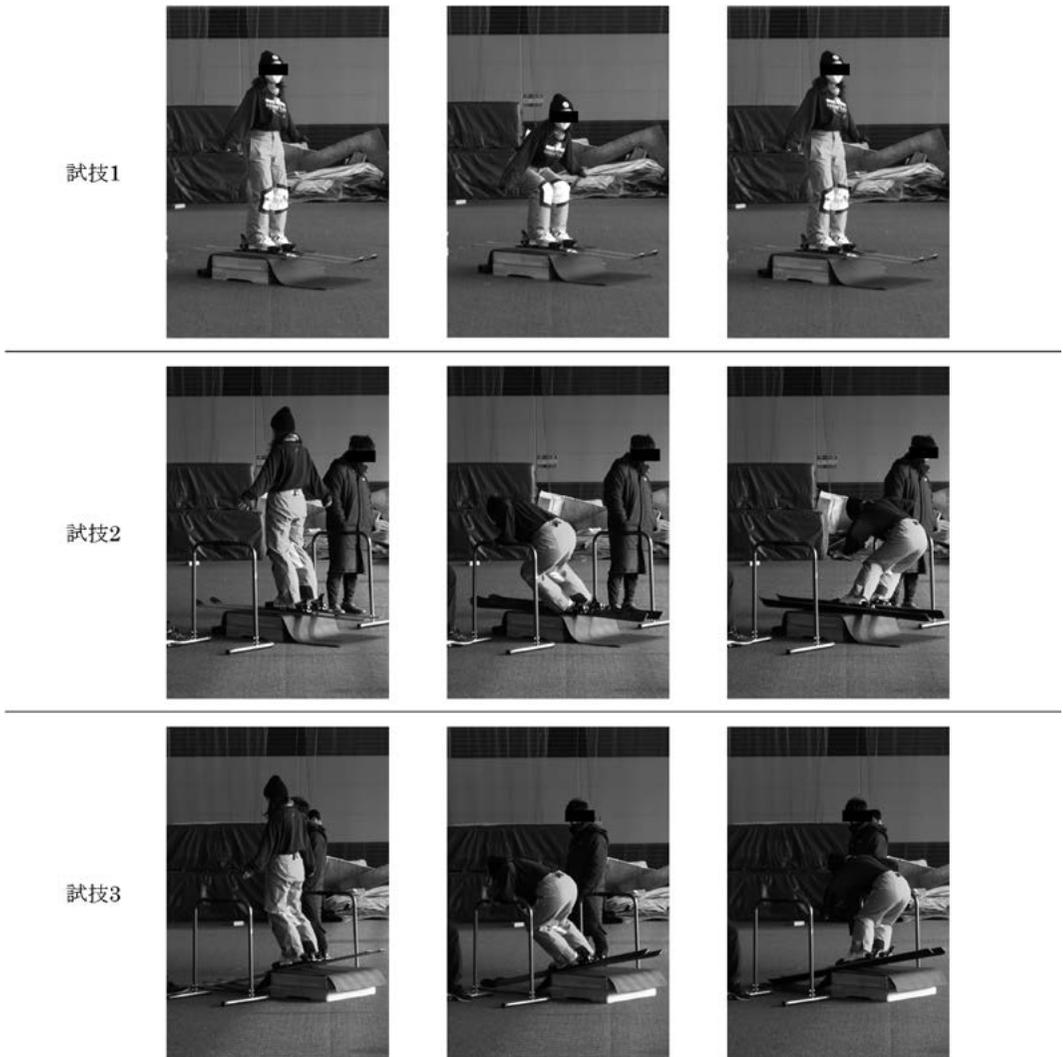


図1 分析試技

写真はすべて同じ位置のカメラから撮影し、試技1と試技2、3の被験者は180°反対の方向を向いている

2.3 データ収集・データ処理

被験者には、コンプレッションウエアの上から右脚の下腿および大腿へ慣性センサー（BLUE TRIDENT, Vicon社）を貼付し（図2）、その上にスキーウエアおよびスキーブーツ、スキー板を着用させた。図3に慣性センサーの座標系を示す。慣性センサー貼付方法は、センサー座標系のX軸を、身体表面上において大腿は膝関節中心から股関節中心へ向かう方向、下

腿は足関節中心から膝関節中心へ向かう方向に一致させた。身体へ貼付した2個の慣性センサーと1個の同期用慣性センサーを用いて3軸の加速度（990Hz）・角速度（990Hz）・姿勢角（100Hz）を収集した。

実験試技は2台のデジタルビデオカメラ（FDR-AX45A, SONY社）を用いて30Hzで撮影した。2台のカメラのビデオ映像内にLEDランプを写し込み、電気的に同期した。撮影し



図2 慣性センサー貼付位置
左：下腿部貼付位置・方向，右：大腿部貼付位置・方向

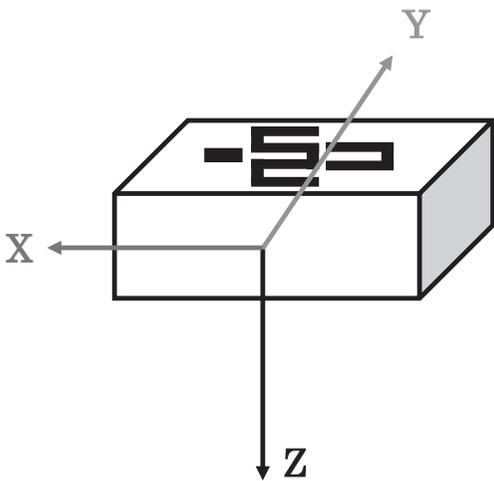


図3 慣性センサーの座標系
センサー表面のマークの頭方向がX方向である

たビデオ映像をPCに取り込み、動作解析ソフト（Frame-DIAS 6, Q'sfix社）を用いて、試技中の身体分析点3点（右股関節、右膝関節、右足関節）をデジタル化した。デジタル化によって取得した座標値から3次元DLT法によって実座標値を得た。算出した3次元座標値は、4次のButterworth low-pass filterを用いて4Hzで平滑化した。

なお、実験試技を行う前に慣性センサーに衝撃を与え、その瞬間をビデオ映像に写し込んだ。ビデオ映像の衝撃を与えた時刻と慣性センサーの3軸加速度の合成値が 100m/s^2 を超えた時刻でビデオ映像と慣性センサーを同期した。

2.4 分析方法・分析項目

本研究は、前述の通りビデオ映像と慣性センサーの2つの異なる算出手法による関節角度の比較を行うことが目的である。

ビデオ映像からは、得られた身体3点の3次元座標値より、右膝関節角度を右膝関節と右股関節を結ぶ線分および右膝関節と右足関節を結ぶ線分がなす角度として算出した。

慣性センサーからは、得られた姿勢角値より、右膝関節角度を、大腿に貼付した慣性センサーのX軸に正の単位ベクトルと下腿に貼付した慣性センサーのX軸に負の単位ベクトルがなす角度とし算出した。本研究で用いた慣性センサーでは、計測された姿勢角値がクォータニオン（四元数）によって表されている。矢田部（2007）をもとに、慣性センサーの静止座標系におけるX軸の単位ベクトル（ e_x , e_y , e_z ）は式（1）、（2）、（3）の式を用いて算出を行なった。

$$e_x = q_x^2 - q_y^2 - q_z^2 + q_r^2 \quad \dots (1)$$

$$e_y = 2 (q_x q_y + q_z q_r) \quad \dots (2)$$

$$e_z = 2 (q_x q_z - q_y q_r) \quad \dots (3)$$

q_x, q_y, q_z, q_r : 慣性センサーの姿勢を示すクォータニオン

3. 結果

図4に試技1~3のビデオ映像 (digitize) およ

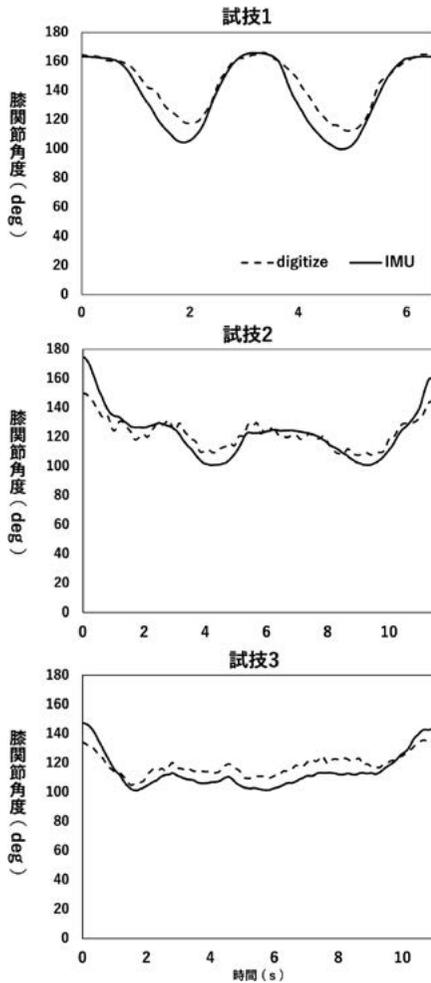


図4 各試技の膝関節角度の時系列変化

び慣性センサー (IMU) によって算出した膝関節角度の結果を示した。

試技1において、伸展位での膝関節角度はIMUとdigitizeにおいてよく一致していた。一方で動作中はIMUの方がdigitizeと比較して屈曲位で計測されるという違いがみられた。

試技2, 3において、動作開始, 終了時の膝関節伸展角度はIMUの方がdigitizeと比較して伸展位で計測されるという違いがみられた。一方で動作中の膝関節屈曲角度変化はIMUとdigitizeにおいておおよそ一致しているが、IMUの方がdigitizeと比較してやや屈曲位に計測された。

すべての試技を通してIMUとdigitizeは類似した波形を示していた。また、すべて試技を通して、IMUはdigitizeと比較して角度変化が大きかった。

4. 考察

本研究の目的は、慣性センサーで算出される膝関節角度とビデオ分析で算出される膝関節角度がどの程度一致するかを明らかにすることが目的であった。

すべての試技を通して、慣性センサーとビデオ分析から得られる膝関節角度変化は類似した波形を示していた。特に、下肢の屈曲伸展のみの動作 (試技1) を行った際の伸展角度はほぼ誤差がないと考えられる。一方で、膝関節を屈曲位に変化させた場合には慣性センサーとビデオ分析に違いがみられた。これは慣性センサーを身体に貼付する際の位置や向きが影響していると考えられる。コンプレッションウェアを着用した被験者の大腿部、下腿部に直接慣性センサーを貼付しているため、膝関節を屈曲した際の筋肉や衣服の動きを反映する可能性がある。今回は図2のようにそれぞれのセグメントのやや前面にセンサーを貼付したため、大腿四頭筋等の筋収縮およびコンプレッションウェアの動きによって、慣性センサーはビデオ分析と比較して、屈曲角度が大きく計測されたと考えられる。より精度よく計測するために、筋肉の収縮による変化が極力少ない体側の皮膚上に直接セ

センサーを貼付することを検討する必要があると考えられる。

また、スキーモーグルのターン動作は2次元的な屈曲伸展だけでなく下肢を左右に倒すような3次元的な動作であることから、試技2, 3の動作についても検証する必要がある。試技2, 3は試技1と比較してよりスキーのターン動作に近い動作であり、常に屈曲位で角度変化をしている。慣性センサーはビデオ分析と比較して、より屈曲位に計測されているものの、試技1と比較するとその差は小さいことがわかる(図4)。

一方で、本研究ではここまでビデオ分析で求めた関節角度を基準として扱ってきた。しかしながら、真値と仮定してPCT法に比べ2M法で得られた値に差異が認められた。(小西ら, 2012) このように、関節中心と思われる3点のビデオ・デジタイズから得られた関節角度が真の値である保証はない。

以上のことから、慣性センサーによる膝関節角度の評価は、関節角度を従来のビデオ分析と同じ角度値として求めることは難しいが、スキーモーグルのターン動作中の関節角度の変化パターンを捉えることが十分にできる可能性が示唆された。留意点としては、センサー貼付位置や向きを一定にすることがあげられる。さらに、JISS (2022) では、慣性センサーを用いた動作分析の留意点として、動作の計測時間が長くなる場合、経過時間に伴って徐々に値が真値から外れていくドリフト誤差をあげている。本研究の計測時間はひと試技あたり20秒程度であり、すべての試技においてドリフト誤差は確認されなかった。スキーモーグル競技の競技時間もおよそ20秒であることから、全長235 ± 35mのコース全体でデータを取得できる可能性があると考えられる。

5. まとめ

本研究の目的は慣性センサーで算出される膝関節角度とビデオ分析で算出される膝関節角度がどの程度一致するかを明らかにすることが目的であった。

結果として以下の可能性が示唆された。

- ① 慣性センサーによる膝関節角度の評価は、ターン動作中の関節角度の変化パターンを捉える可能性があること。
- ② 膝関節角度を従来のビデオ分析と同じ角度値として求めることは難しいこと。
- ③ スキーモーグル競技を想定した場合、計測時間は20秒程度であればドリフト誤差の影響はないこと。
- ④ 慣性センサーを身体に貼付する際に、筋肉や衣服の影響が少ない箇所にする必要があること。

参考文献

- 池上久子, 三浦望慶, 袖山紘, 池上康男, (1985). 不整地滑走における衝撃吸収動作について, 第36回日本体育学会大会号437, 一般社団法人 日本体育学会.
- 独立行政法人日本スポーツ振興センター ハイパフォーマンスセンター 国立スポーツ科学センター (2022) コーチングのためのバイオメカニクス関連機器の活用ガイドライン, 33-38,
- 廣瀬圭, 土岐仁, 佐藤伸幸, 村田浩(2011), スキーヤーの姿勢・滑走軌跡計測を用いたスキー・ターンの運動解析に関する研究, スキー研究, 8 (1), 21-27.
- 堀島有紗 (2019) 男子モーグルワールドカップ世界トップ選手のターン動作の特徴, 中京大学審査修士論文
- 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭(2013), 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), 19-26
- 小西和宏, 佐川貢一, 石橋恭之, (2012), 動作解析用慣性センサの大腿部および下腿部への最適装着位置推定, 日本機械学会論文集C編, 78 (786), 352-361.
- 中里浩介, 池上康男, 湯浅景元, (2016), カービングスキーにおける中回りターンの3次元動作分析, スキー研究, 13 (1), 13-21.

佐々木誠互, 結城匡啓(2003)モーグル競技における習熟レベルの異なるターン動作の3次元解析, 第54回日本体育学会大会号, 391, 一般社団法人 日本体育学会.
Vicon BlueTrident インターリハ株式会社ホーム

ページ <http://www.vicon.jp/products/vicon-devices/blue-trident.html>
矢田部学 (2007) クォータニオン計算便利ノート. MSS技報, 18, 29-34.