

アルペンスキー選手の関節運動に着目したターン技術のスキル解析

Skills analysis of turn technology focusing on the joint movements of the alpine skiing athletes.

○ 石橋 怜 (北見工大院) 鈴木 聡一郎 (北見工業大学) 星野 洋平 (北見工業大学)

曹 羸 (北見工業大学) 楊 亮亮 (北見工業大学)

Rei ISHIBASHI, Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology
Soichiroh SUZUKI, Kitami Institute of Technology
Yohei HOSHINO, Kitami Institute of Technology
Ying CAO, Kitami Institute of Technology
Yang Liang-Liang, Kitami Institute of Technology

Abstract: In this study, the skill of a World Cup alpine ski racer was investigated by using a 3D CAD model of a skier with focus on joint work and energy balance in the turn motion with the aim of recovery of the popularity of skiing as a leisure sport and the establishing of skiing as a lifelong winter sport in Japan. In this paper, the research focuses on the joint movements of the lower limbs in the Giant Slalom. Further, a 3D CAD model of a skier is matched to the images of the skier in broadcast videos, and the precise extraction method of the joint movements of the skiers is investigated. The results suggest that the proposed motion capture method is useful for analyzing the skill of a top-level skier without conducting an experiment on the snow.

Key Words: Lifelong sport, Alpine Skiing, Ski technique, Skills analysis, 3D CAD

1. 緒論

本研究では、レジャースキーを冬季生涯スポーツとして定着させることを目的に、アルペンスキー競技の日本代表選手が国際大会で好成績を出すことを目標としている。これまでに、本研究では滑降タイムを短縮するために日本人選手の骨格的特徴に基づいたスキーブーツの設計を実験的に検討してきた¹⁾²⁾。しかし、滑降タイム短縮のためには用具の設計だけでなく、用具を使いこなす技術の理解と実践が重要である。そのため、世界トップレベル選手の滑降技術を解析し、滑降タイム短縮のために必要なスキルを明らかにする必要がある。

その一方で、世界のトップ選手の運動解析データを雪上滑降中に直接取得することは現実的に困難である。そこで、一般に放映されている放映映像から選手の運動を高精度で取得する手法を提案し、滑降タイムの短縮に結びつくターン技術を解析する。

アルペンスキー競技においては、これまで日本人選手は回転競技でしか好成績を残せていない。冬季オリンピックやワールドカップにおいて回転競技での入賞はあるが、大回転競技では世界との差が最も大きい。そのため、日本人アルペンスキー選手の競技成績の向上のためには、大回転競技におけるターン技術のスキル解析が重要である。

本研究ではこれまでに回転競技の競技映像から映像解析を行い、ターン切り替え時の下肢の関節運動であるベンディング動作とストレッチング動作に着目し、これらの関節運動が滑降タイムに与える影響をエネルギー収支の計算から明らかにした³⁾。

本報では、ワールドカップの放映映像から大回転競技の滑降中の関節運動に着目し、選手の滑降映像にスキー選手の3DCADモデルをマッチングさせ、関節運動を高精度で抽出する手法について検討し、大回転競技におけるターンのスキル解析を行う。

2. 滑降中の関節運動

2.1 ベンディング動作とストレッチング動作

日本人選手は欧米諸国と比較して柔らかい雪のコースで練習する機会が多く、コース状況の変化に対応するため、左右のターン切り替え時にベンディングと呼ばれる下肢の抱え込み動作を多用する傾向がある。逆に欧米人選手は、ストレッチングと呼ばれる下肢の伸展動作を行うことが多い。ベンディング動作とストレッチング動作は股関節並びに膝関節の関節運動であり、ベンディング動作は下肢関節の屈曲により本来、運動エネルギーに変換されるべきターン中のスキー板の弾性ひずみエネルギーを散逸させ、逆にストレッチング動作は関節の伸展による仕事で、滑降中の運動エネルギーを増加させると予想される。これらの関節運動が滑降タイムに与える影響を検討する。

2.2 関節運動による滑降タイム予測

ベンディング動作の回数が滑降タイムに与える影響を明らかにするため、ワールドカップの回転競技の大会映像から、ベンディング動作以外のミスによるタイムロスが無く、コース状況の変化に差が認められない上位選手10名の滑降タイムを予測する。雪面の切削抵抗と滑降中の空気抵抗によるエネルギー散逸量および滑降中のターン軌道は選手間で一定とし、滑降中のエネルギー増減の差を関節運動によるものだけと仮定する。このエネルギー収支の計算から滑降タイムを推定した予測滑降タイムと公式滑降タイムの比較を図1に示す。この結果、ベンディング動作の回数と公式滑降タイムとの間に強い正の相関が認められ、さらにベンディング動作の回数から推定した滑降タイムは、公式タイムとよく一致しているといえる。以上の結果から、国際大会ではベンディング動作並びにストレッチング動作の回数により滑降中の運動エネルギーが増減することで、滑降タイムに直接影響を与えることを示唆した。

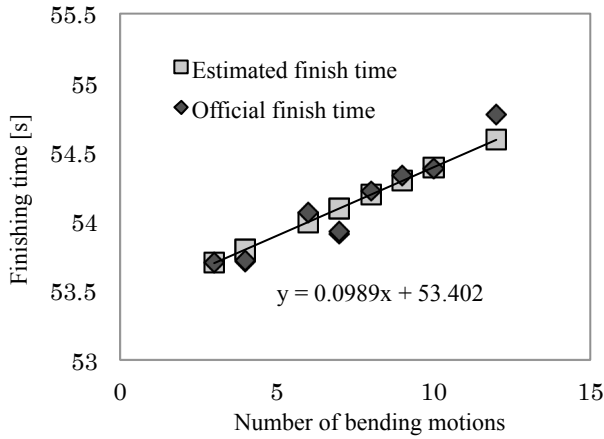


Fig.1 Relationship between number of bending motions and finishing time

3. 大回転競技の放映映像分析

3.1 大回転競技

大回転競技の旗門間距離は 15～28m，回転競技は 6～13m の範囲で旗門が設定される．そのため，大回転競技は回転競技に比べ旗門間距離が 2 倍程度長い．旗門距離の長さは図 2 に示すスキーターンの構成中，ターン切り替え動作の区間が長くなり，回転競技に比べ選手毎に用いるターン技術が異なることが予想される．そのため滑降タイムの短縮につながるスキルは単純に関節運動のみでは解析できないと考えられる．そこで，大回転競技において 1 ターンを 4 つの区間に分割し，滑降タイムの短縮に影響を与えているターン技術を分析する．

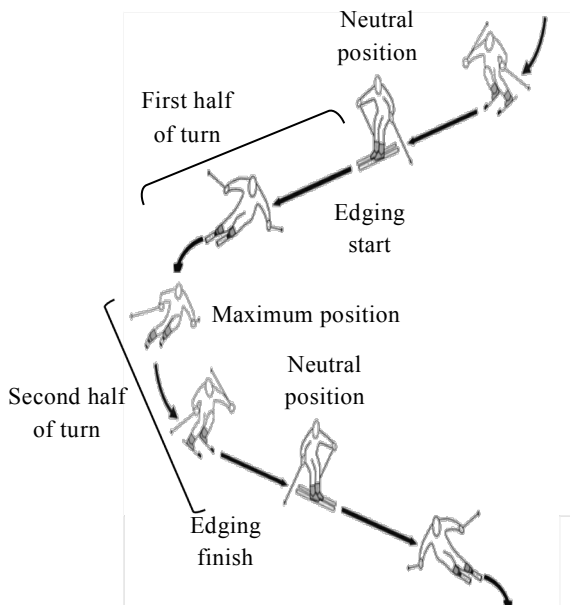


Fig.2 Components of turn motion of a skier

Table1 Finish time in each interval

	Interval time [s]			
	1	2	3	4
	NP - ES	ES - TM	TM - EF	EF - NP
European	3.83	10.43	5.93	3.72
Japanese	3.70	10.65	5.68	4.51

3.2 映像解析

2015 年に開催されたワールドカップ女子大回転競技ゾルデン大会の映像を用いて世界のトップレベル選手と日本人選手とのターン動作の違いを検討する．大会コースはスタートからゴールまでを 4 つのセクションに分けられ，各セクション通過時に公式中間タイムが計測される．ターン技術に大きな差が生じると予想される，急斜面の第 2 セクションの 15 旗門 14 ターンにおいて，1 位から 3 位の 3 選手の欧米人選手 3 名と 24 位の日本人選手 1 名の 1 ターンを 4 分割した区間毎に所要時間の割合を分析する．分割ポイントは，図 2 に示すようにターン切り替え時にスキー板の滑走面が雪面と平行になるニュートラルポジション，スキー板のエッジが雪面を捉えはじめるエッジング開始，最もスキーヤーの下肢が内傾するターンマキシマム，スキー板のエッジが雪面を捉え終わるエッジング終了の 4 つのポイントを基準に 1 ターンを分割する．1 ターンはニュートラルポジションから次ターンのニュートラルポジションまでとした．分割した区間はターン前半のニュートラルポジションからエッジング開始を NP - ES 区間，エッジング開始からターンマキシマムを ES - TM 区間，ターン後半のターンマキシマムからエッジング終了を TM - EF 区間，エッジング終了から次ターンのニュートラルポジションを EF - NP 区間と定義し 4 つの区間に分割した．

3.3 区間タイムの分析

分割した各ターン区間における 14 ターン分の区間タイムを表 2 に示す．表 2 の結果から，日本人選手は EF - NP 区間のタイム差が最大となることが示された．さらに日本人選手と 2 位の欧米人選手について第 2 セクション公式タイムと分割したターン区間の所要時間の割合を図 3 に示す．ここで図 3(a)は日本人選手 1 名の解析結果，図 3(b) は欧米人選手 1 名の解析結果である．2 選手のターン割合はほぼ同様の割合を示しているにもかかわらず，公式タイムには 0.56 [s] のタイム差が生じている．この結果から，日本人選手は世界トップレベル選手とタイム差はあるが，ほぼ同様の割合でターンを構成していることが分かる．1 位と 3 位の欧米人選手との比較においても同様の結果が得られた．図 4 に比較する 4 選手のターン区間毎の区間タイムと第 2 セクション公式タイムとの関係を示す．ここで図 4(a)は EF - NP 区間における区間タイムの結果，図 4(b)は EF - NP 区間を除いた 3 区間の結果を示す．図 4 の結果から，滑降タイムが短縮している選手ほど，エッジングを終了してから次のニュートラルポジションに移行するまでの EF - NP 区間における区間タイムが短縮されており，公式タイムとの間に強い正の相関が認められた．他のターン区間と比較しても大回転競技において，EF - NP 区間における区間タイムの短縮が滑降タイムを短縮する事に強く影響を与えることが示された．そこで，この区間における関節運動による滑降タイムへの影響を 3DCAD モデルを用いて解析する．

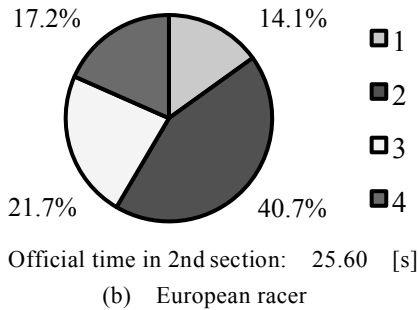
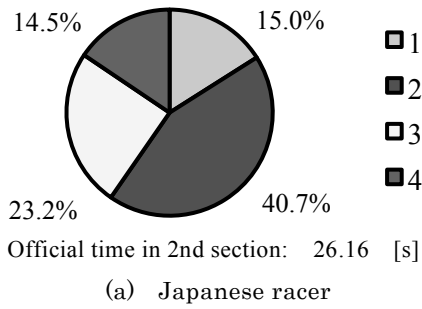
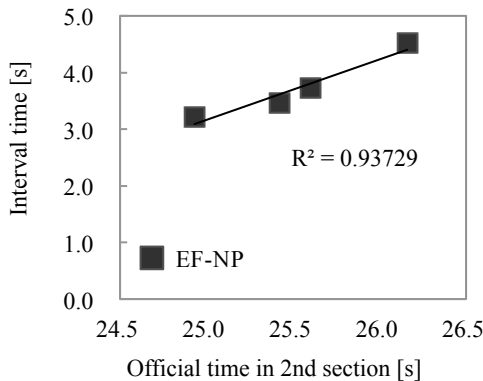
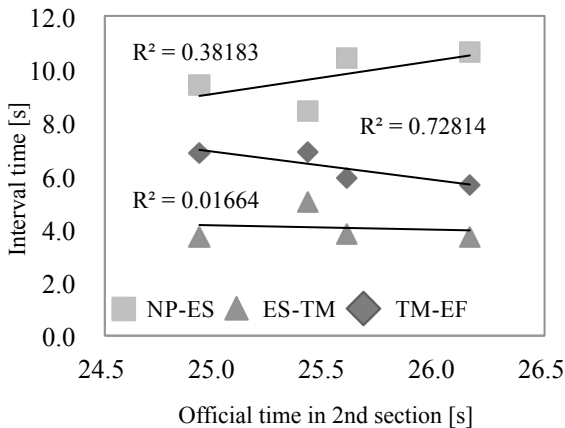


Fig.3 Time rate of each turn interval



(a) Relationship between Official time in 2nd section and Interval time in EF-NP



(b) Relationship between Official time in 2nd section and any other Interval time

Fig.4 Relationship between Official time in 2nd section and Interval time

4. 3DCAD モデルによるスキル解析

4.1 CAD モデルマッチング手法

大回転競技は回転競技に比べ旗門間距離が異なるため、滑降中の選手間の関節運動が大きく異なることが多い。そのため、スキル解析のためには選手の滑降中の運動を正確に抽出する必要がある。そこで、欧米人の身体データの統計値⁴⁾を基に 3DCAD を用いてアルペンスキー選手のモデルを作成し、モデルと映像から取得した選手の滑降姿勢を一致させることで 2 次元映像から関節運動を精度よく取得する手法を提案する。3 次元 CAD ソフト「Autodesk Inventor Professional 2015」を用いて CAD モデルを作成する。モデルは頭部、胴体部、骨盤部、上腕部×2、前腕部×2、手部×2、大腿部×2、下腿部×2、足部×2 の計 15 個のパーツから成り、各関節をボールジョイントで接合し、スキー板と足部を拘束する。この 3DCAD モデルを画像透過ソフトにより透過した選手の滑降姿勢画像と CAD ソフトのアセンブリ画面上で、各関節をマッチングさせる。股関節角度は骨盤部の軸と大腿部のなす角度とし、膝関節角度は大腿部の軸と下腿部の軸の成す角度として 3DCAD ソフトの角度計測ツールにより取得する。

4.2 3DCAD モデルによる運動解析の精度

選手の滑降映像と 3DCAD モデルの姿勢をマッチングする方法により股関節並びに膝関節の角度変化を精度よく獲得できるかを予備的に評価する。モーションキャプチャシステム VICON460 を使用し、屈伸運動を含めた試技を 3 種類行い関節角度変化を計測する。同時に、それぞれの試技をビデオカメラで別の角度から撮影する。得られた映像と 3DCAD モデルの姿勢を一致させ、左右の股関節並びに膝関節の角度変化を算出し、VICON460 で計測したデータと比較する。3DCAD モデルは VICON460 で計測した被験者の身体寸法を基に作成し、図 5 に映像から切り出した被験者の画像と 3DCAD モデルの姿勢をマッチングした様子を示す。表 2 に、3DCAD モデルと VICON データの関節の角度変化を比較して算出した誤差量と角度変化に対する誤差の割合の平均値と最大値を示す。この結果、最も誤差が大きかった試技 3 の関節であっても、角度変化に対して誤差の割合は最大で 0.8%であり、平均値でも 0.5%と十分に一致していると言える。よって、3DCAD モデルによる伸展量並びに屈曲量の推定は可能であることを示した。

Table2 Error ratio 3DCAD model and VICON data

Trial	Error [deg]		Ratio for the angle change [%]	
	Average	Maximum	Average	Maximum
1	0.2	0.3	0.3	0.5
2	0.2	0.5	0.3	0.6
3	0.3	0.6	0.5	0.8



Fig.5 Accuracy of estimation by the CAD model compared with that by VICON

Table3 Coefficient of viscosity and Moduls of elasticity

Coefficient of viscosity [N·m·s/rad]		Moduls of elasticity [N·m/rad]	
Hip Joint	Knee joint	Hip Joint	Knee joint
34.80	60.83	275.5	637.0

4.3 関節運動の抽出

3DCAD モデルを用いた解析手法を適用し，3DCAD モデルと映像に映しだされる選手の滑降姿勢とのマッチングにより取得した股関節並びに膝関節の角度変化量を取得する．取得した関節角度から下肢関節が屈曲している場合ベンディング動作を行っているとし，式(1)からベンディング動作による仕事量 ΔW_B を算出する．下肢関節が伸展している場合はストレッチング動作を行っているとし，式(2)からストレッチング動作による仕事量 ΔW_S を算出する．

$$\Delta W_B = -\int_{\theta_H} c_1 \dot{\theta} d\theta - \int_{\theta_N} c_2 \dot{\theta} d\theta \quad (1)$$

$$\Delta W_S = \int_{\theta_H} k_1 \theta d\theta + \int_{\theta_N} k_2 \theta d\theta \quad (2)$$

ここで， θ_H ， θ_N [rad]はそれぞれ3DCADモデルから取得したモデルの股関節並びに膝関節角度， c_1 ， c_2 [N·m·s/rad]は各関節の粘性係数， k_1 ， k_2 [N·m/rad]は各関節の弾性係数を表す．各関節の粘弾性係数は表3に示すように，室内実験で計測した6名の被験者の平均値³⁾を代表値として適用する．3DCADモデルとのマッチングにより取得した，股関節並びに膝関節の角度変化から算出した第2セクションにおける総仕事量と第2セクション公式タイムとの関係を図6に示す．この結果より，滑降タイムが短い選手ほどEF-NP区間での関節運動による滑降中に行った仕事量が多いことが示され，滑降タイムと強い負の相関が認められた．

4.4 大回転競技のスキル解析

関節運動を抽出した4選手の第2セクションに行ったストレッチング動作の回数と各関節の平均伸展角度並びに平均伸展角速度を表4に示す．この結果より，滑降タイムが短縮されている選手ほど，ストレッチング動作の回数が多く，1回当たりの平均伸展角度と伸展角速度も大きい傾向がある．このことから，滑降タイムを短縮するためには，滑降中にストレッチング動作の回数を増やすと同時に，1回当たりの伸展量を大きくすることが重要であることが示された．また，区間タイムが短い選手ほど伸展角速度が大きいことから，スキルレベルの高い選手ほど大きなストレッチング動作を短時間で行っていることが考えられ，関節を伸展する際に雪面をより強い力で蹴ることで加速度を生み出していると言える．

Table4 Relationship between the number of stretching motion and angle, angular velocity

Time in 2nd section [s]	Stretching motion					times
	angle [deg]		angular velocity [deg/s]			
	Hip joint	Knee joint	Hip joint	Knee joint		
24.50	20.15	7.458	85.13	31.51	6	
25.44	23.43	6.070	82.20	21.30	4	
25.60	17.43	5.569	62.82	20.07	4	
26.16	16.18	-0.3767	48.06	-1.120	3	

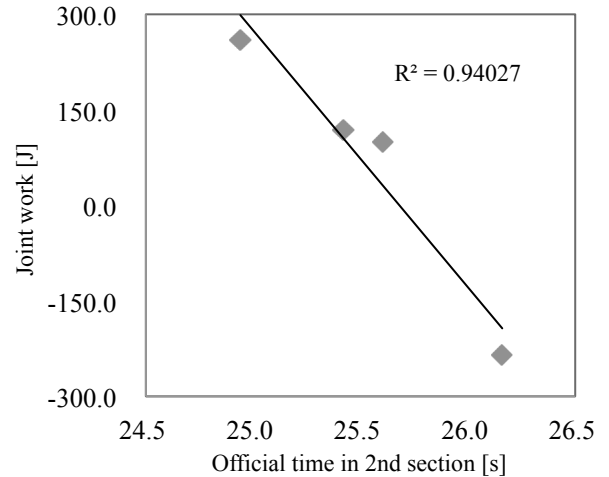


Fig.6 Relationship between Joint work and Official time in 2nd section

5 結論

本報では，放映映像と3DCADモデルを用いて大回転競技における滑降タイム短縮に結び付くスキルを解析した．結果として，1ターンを4分割したターン区間におけるエッジングを終了してからニュートラルポジションまでの区間の区間タイムが滑降タイムに影響を与えていることを明らかにした．また，この区間で大きなストレッチング動作を短時間で，多く行うことが滑降タイムを短縮するために必要なスキルであることを示した．

謝辞

本研究は，日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(C)(平成26-29年度：26420191)の助成を受けて実施されたものである．また，本研究をすすめるにあたり，実験協力者としてアルペンスキー選手の石井智也選手，武田竜選手，大村和哉選手にご協力を頂きました．ここに記して深い感謝の意を表します．

参考文献

- 1) 鈴木聡一郎，林末義 “骨格に基づくスキーブーツ設計に関する基礎的検討”，スポーツ産業学研究，Vol.19，No.1 (2009) pp.1-8.
- 2) 鈴木聡一郎，林末義，柴又勇，“日本人アルペンスキー選手に適した下肢骨格に基づくスキーブーツ設計”，スポーツ産業学研究，Vol.1，No.20 (2010) pp.9-18.
- 3) 古賀 歩，鈴木聡一郎，林末義，“アルペンスキー競技における関節粘弾性に着目したターン技術のスキル解析”，バイオメカニズム学術講演会．35，(2014) pp.179-182. (3)
- 4) Contini, R. “Body Segment Parameters, Part II,” *Artificial Limbs* 16 ,(1972) , pp1-19.