

センシング技術を用いたクロスカントリースキー競技における滑走技術の検討

～GNSS・慣性センサを用いたスケータイング走法の自動識別と評価～

藤 田 善 也

目 次

要 約	1
緒 言	2
方 法	4
結 果	9
考 察	11
結 論	12
参考文献	13
謝 辞	14

センシング技術を用いたクロスカントリースキー競技における滑走技術の検討
～GNSS・慣性センサを用いたスケーティング走法の自動識別と評価～

藤田善也¹, 桜井義久¹, 石毛勇介¹

要 約

クロスカントリースキー競技のスケーティング種目では、選手はコースの斜度や滑走速度に合わせて3種類のサブ走法（V1スケーティング走法, V2スケーティング走法, V2オルタネイトスケーティング走法）を切り替えて滑走する。これらのサブ走法は、生理学およびバイオメカニクスの観点でいくつかの違いが報告されており、選手は各サブ走法の利点を活かすことで、合理的に滑走速度を増加あるいは維持させていることが予想されるが、実際の滑走においてサブ走法の良し悪しとパフォーマンスとの関連を明らかにした研究は見当たらない。これらは、実際の滑走中の滑走速度の測定や、各サブ走法の評価方法が確立されていないためである。一方で、近年開発が進められている各種の小型センサを用いることにより、滑走中の速度や高度、選手の動きの同定が可能であることが明らかとなってきた。そこで本研究の目的は、全地球航法衛星システム（GNSS）と四肢に取り付けた慣性センサを用いて、クロスカントリースキー競技のスケーティング種目における3種類のサブ走法を自動識別し、滑走中のパフォーマンスを評価することとした。

本研究では、(1)各サブ走法を自動で識別するためのプログラム開発とそのデータ取得のための実験、(2)開発されたプログラムを用いた評価実験の2つの実験を実施した。まず、1名の対象の両前腕およびローラーズキーに慣性センサを取り付け、3種類のサブ走法中の角速度を記録した。記録された角速度の特徴をもとに各サブ走法を自動で識別するプログラムを開発した。次に自動識別プログラムの精度を評価するために、対象の胸部にビデオカメラを下向きに取り付け、実際に行ったサブ走法を記録した。対象の滑走速度および高度を評価するためにGNSSを対象に取り付け、滑走速度と高度を記録した。対象には、3.45 kmのローラーズスキー専用コースを最大努力で滑走させ、滑走中の各データを取得した。得られたデータに対して自動識別プログラムを実行し、識別結果を得た。自動識別プログラムによって得られた識別結果とビデオカメラから得られた結果より、プログラムの精度と正解率を算出した。

その結果、開発された自動識別プログラムは、平均では92.3%の高精度で各サブ走法を自動で識別できることが明らかとなった。また対象は、最大努力の滑走において、平地ではV2スケーティング走法あるいはV2オルタネイト走法が用い、上り坂では、V1スケーティング走法あるいはV2走法を用いることが明らかとなった。さらに、競技パフォーマンスの異なる2名の対象の滑走速度を比較したところ、コース前半の平地において、V2スケーティング走法中の滑走速度に違いがみられた。これらの結果より、競技パフォーマンスの低かった対象Bは、コース前半の平地において、V2スケーティング走法を用いて滑走速度をより高められるようなトレーニングを行うことが競技パフォーマンスの向上に寄与する可能性があることが示唆された。本研究によって開発された自動識別プログラムを用いることで、滑走速度と高度、サブ走法を対象ごとに比較することにより、競技パフォーマンスを高めるための具体的な方策を検討することが可能となった。

緒 言

クロスカンリースキー競技のスケーティング種目において、選手は主に 3 種類のサブ走法 (V1 スケーティング走法, V2 スケーティング走法, V2 オルタネイトスケーティング走法) をコースの斜度や速度によって使い分けて滑走する (Nilsson et al., 2004). これらのサブ走法は、スキー板を V 字に開いて一方のスキー板を用いて脚の伸展によって加速させるプッシュオフ動作を行い、他方のスキー板を滑走させるいわゆる「スケーティング」を行う点、両方のポールを用いて上肢の伸展によって後方へ押し出すことで推進力を得るプッシュ動作を行う点で共通していることが認められているが、動作のタイミングがそれぞれのサブ走法で異なっていることが知られている。

V1 スケーティング走法 (以下, “V1” とする) は、主に急な上り坂で使用されるサブ走法である。このサブ走法は、まず片方のスキー板の接地時にポールを接地する。次に下肢のプッシュオフ動作に合わせて上肢のプッシュ動作を行う。その際、反対側のスキー板を接地して滑走させる。その後、ポールを前方へ振り戻す動作に合わせて反対側の下肢のプッシュオフ動作を行い、プッシュオフ動作終了時に再度ポールを接地する。ポールの接地から次のポールの接地までを 1 サイクルとすると、その 1 サイクル中に、左右の計 2 回のプッシュオフ動作が行われている。

V2 スケーティング走法 (以下, “V2” とする) は、比較的緩やかな上り坂で使用されるサブ走法である。このサブ走法は、左右どちらか一方のスキー板が滑走している状態でポールを接地する。次に下肢のプッシュオフ動作に合わせて上肢のプッシュ動作を行う。その際、反対側のスキー板を接地して滑走させながら、ポールを素早く振り戻して接地する。1 サイクル中に、左右のどちらか 1 回のプッシュオフ動作が行われている。

V2 オルタネイトスケーティング走法 (以下, “V2A” とする) は、主に平地で使用されるサブ走法である。このサブ走法は、片方のスキー板が滑走している状態でポールを接地し、下肢のプッシュオフ動作に合わせて上肢のプッシュ動作を行う。その際、反対側のスキー板を接地して滑走させ、ポールの振り戻しと同時にプッシュオフ動作を行う。1 サイクル中に左右計 2 回のプッシュオフ動作が行われている。プッシュオフ動作の回数は V1 と V2A で類似しているが、それぞれの動作のタイミングが異なっている。

このように動作の異なる各サブ走法の比較は、生理学的な観点やバイオメカニクスの観点でいくつか報告されている。Millet et al. (2003) は、平地において V1, V2 および V2A の心拍数および酸素消費量には差がないことを示した。Bilodeau et al. (1991) は、5°の上り坂において両サブ走法の滑走速度と心拍数との間に相違がないことを示した。Kvamme et al. (2005) は、斜度の増加に伴い V2 の酸素消費量が V1 と比較して大きくなることを示した。また Stöggl et al. (2010) は、10°の上り坂において V1 の滑走速度が V2 と比較して高いこと、7-10°の登り坂において V1 の 1 サイクル中のポールおよびスキー板から発揮された力が V2 と比較して高いことを示した。これらの結果は、特に上り坂においては各サブ走法によって酸素消費量や発揮された力が異なることを示唆するものである。トップ選手が、高い滑走速度や運動効率を獲得するために、戦略に応じてサブ走法を切り替えていることを踏まえると、滑走中のサブ走法を計測することは、選手のパフォーマンスを高めるうえで重要であるといえる。

いくつかの先行研究において、全地球航法衛星システム (global navigation satellite system, 以下 GNSS とする)、ビデオカメラおよび小型センサを用いて各サブ走法の特徴や競技パフォーマンスとの関連が報告されている。Andersson et al. (2010) は、ディファレンシャル GNSS を用いて、スケーテ

キング走法によるスプリント競技中の滑走速度を測定し、ビデオカメラを用いて選手の動作を記録した。その結果、スプリント競技のパフォーマンスは上り坂でのパフォーマンスと関連しており、V2 を多用して最大速度を高めることが重要であることが明らかとなった。Bortolan et al. (2012) は、ポール反力センサと全地球測位システム (global positioning system, 以下 GPS とする) を組み合わせて使用し、クラシカル走法中の各サブ走法を識別する新手法の妥当性を検証した。その結果、ポール反力によって異なるサブ走法が高精度に識別できることが明らかとなった。Marsland et al. (2012) は、小型センサユニット (3 軸加速度センサ, 角速度センサ, GPS, 地磁気センサ) を用いて、クラシカル走法およびスケーティング走法中の動作を計測し、このユニットを使用することによって各サブ走法のサイクル運動を同定可能であることを示した。これらの先行研究は、GNSS/GPS や慣性センサを用いた滑走速度やコース状況の計測が競技パフォーマンスの評価に有効であることを示唆するものである。Myklebust et al. (2014) は、慣性センサを用いて V1 および V2 の四肢および腰部の動きを評価し、それぞれの特徴を明らかにした。しかしながらこれらの研究は、スケーティング走法中の各サブ走法の識別には至っておらず、コース滑走中に使用されたサブ走法を簡易的に測定する方法は明らかとなっていない。

Sakurai et al. (2014) は、クロスカンリースキー競技のクラシカル走法において、慣性センサを用いた各サブ走法の自動識別手法を開発し、腕と脚の動作パターンの違いを評価することで、高精度にサブ走法を識別可能であることを示した。クラシカル走法と同様に、スケーティング走法の主なサブ走法は、腕および脚の動作のパターンとタイミングが異なっている。つまり滑走中の腕と脚の角速度の計測はサブ走法の識別に有効であることが予想される。さらに GNSS は、滑走速度とコース状況の評価に使用可能である。そのため、各サブ走法の識別の自動化はクロスカンリースキー競技のトレーニングや競技場面においてパフォーマンスを評価するための強力なツールになり得る。

そこで本研究の目的は、(1) 慣性センサを用いてサブ走法の自動識別手法を開発すること、および (2) GNSS と開発した自動識別手法を用いて滑走速度およびコース状況と各サブ走法との関連を明らかにすることとした。

方 法

自動識別手法の開発

前実験

自動識別手法の開発のために、前実験では各サブ走法中の全腕およびスキー板の角変化を取得した。1名のクロスカントリー競技者（年齢：22歳；身長：1.75 m；体重：71.0 kg）を前実験の対象とした。対象には、事前に実験の説明をした上でインフォームドコンセントを得た。対象は、自身の競技用ポールとローラースキー（MS610C, Marwe, Finland）を使用した。本研究では4つの慣性センサ（LP-WS0901, Accelerometer: ± 50 G; gyroscope: ± 1500 deg/s, Logical product, Japan）を用いた。2つのセンサを対象の両手首およびローラースキーに装着した。これらのセンサは、前腕の矢状面上の角速度とローラースキーの長軸回りの角速度を計測した。アスファルト路面において、対象はスケートティング走法の各サブ走法（V1, V2 および V2A）を用いて最大下の滑走速度で滑走した。滑走中の角速度データは、サンプリング周波数 100Hz で収集した。さらに、サブ走法の同定のためにデジタルビデオカメラ（HDR-CX700V, Sony, Japan）で対象を撮影した。

1 サイクルの検出

取得したデータはプログラミングソフトウェア(Matlab, The MathWorks, Inc.) を用いて分析した。センサによって取得された角速度データは、バターワース型デジタルフィルタを用いて遮断周波数 10 Hz で平滑化した。ポール接地時の衝撃によって両手首の角速度が 50 deg/s 以上変化している時点を1サイクルの検出に用いた。はじめに、1サイクルの角速度データを取出し、検出の元データとした。次に相互相関 (Li & Caldwell, 1999) を用いて、その対象の1サイクルの角速度の特徴を解析した。0.25以上の係数の極大点より相互相関係数系列を同定した。極小値に隣接した相互相関係数の最小値を1サイクルの開始および終了時点とした。

各サブ走法の角速度の特徴

それぞれのサブ走法において、前腕の矢状面上の角速度はポールのプッシュ動作に伴って減少すること、ポールの前方振り戻し動作によって増加することが示された (Fig.1, 2, 3)。また、スキー板の長軸回りの角速度は、スキー板の内側へのエッジングからプッシュオフ動作によって比較的緩やかに減少し、その後スキー板の前方振り戻し動作によって急激に増加することが示された。

V2 の定義

1サイクル中の V2 の角速度は Fig.1 に示した。V2 のスキー板の角速度は左右どちらか片方のスキー板のみに変化が確認された。V2 の角速度の特徴は、前腕の角速度の減少に合わせてスキー板の角速度が緩やかに減少することが示された。その後、前腕の角速度の増加に合わせてスキー板の角速度が増加することが示された。これらの結果より、1サイクルのうち、左右いずれか片方のスキー板の角速度が増減を示し、かつ、その増加分の最大値が他方のスキー板の角速度の最大値より2倍以上の値であるとき、その1サイクルで行われたサブ走法を V2 とした。さらに、右のスキー板の角速度が増減した場合を V2R、左のスキー板が増減した場合を V2L とした。

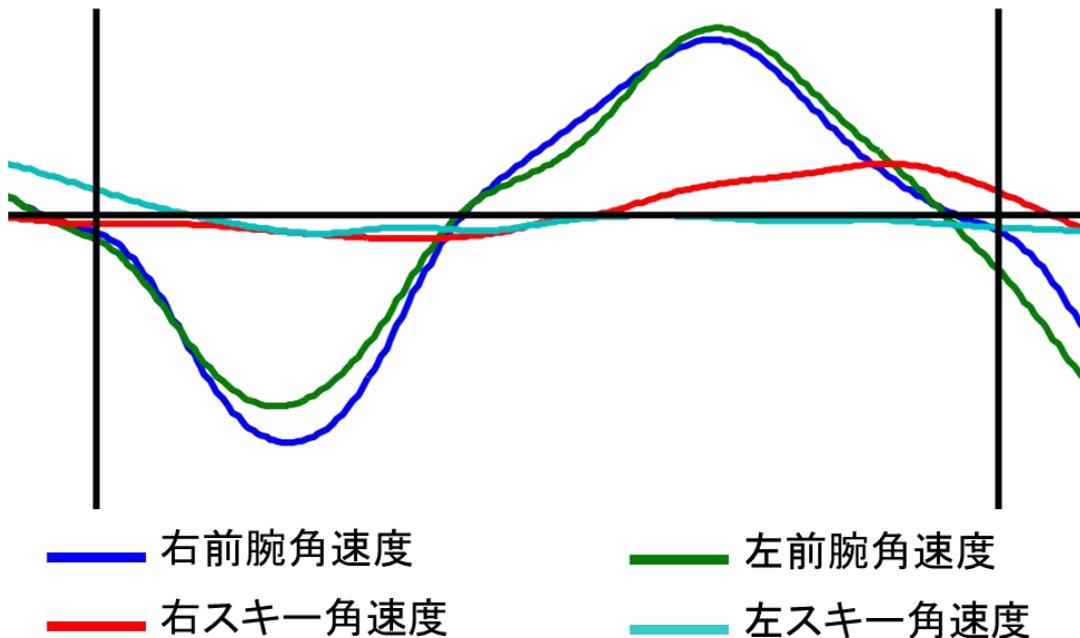


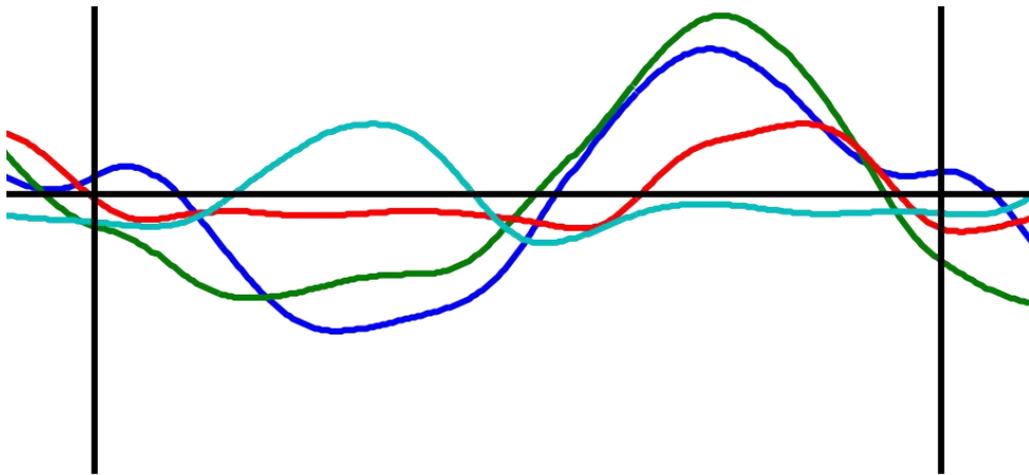
Fig.1 1サイクル中のV2Rの角速度の特徴

V1 の定義

1 サイクル中の V1 の角速度は Fig.2 に示した。V1 のスキー板の角速度は、両方のスキー板に変化が確認された。V1 の角速度の特徴は、前腕の角速度の減少に合わせて片方のスキー板の角速度が急激に増加することが示された。その後、前腕の角速度の増加に合わせて他方のスキー板の角速度が急激に増加することが示された。これらの結果より、1 サイクルのうち、左右のスキー板の角速度がそれぞれ増減を示し、かつ、始めのスキー板の増加する際に前腕の角速度が減少したとき、その 1 サイクルで行われたサブ走法を V1 とした。さらに左のスキー板の角速度が先に増加した場合を V1R、右のスキー板の角速度が先に増加した場合を V1L とした。

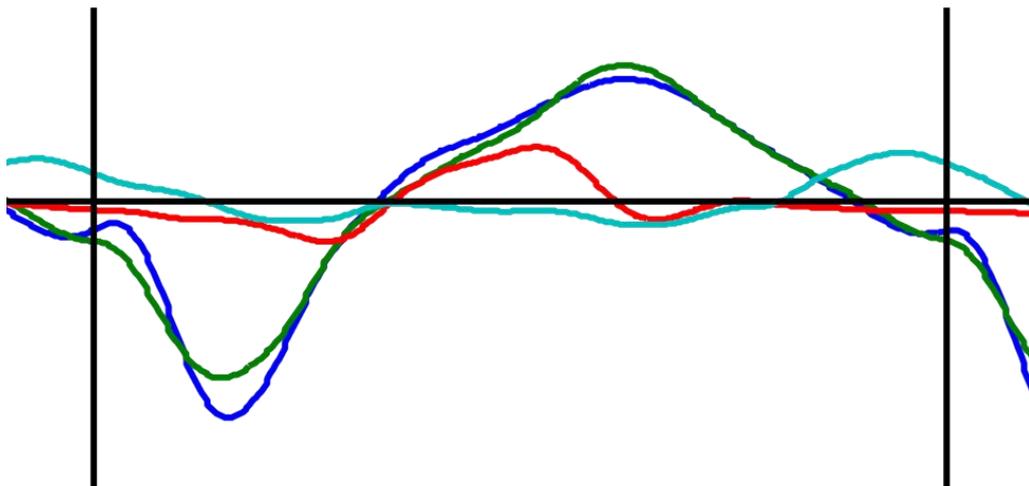
V2A の定義

1 サイクル中の V2A の角速度は Fig.3 に示した。V2A のスキー板の角速度は、両方のスキー板に変化が確認された。V2A の角速度の特徴は、前腕の角速度の増加に合わせて片方のスキー板の角速度が急激に増加することが示された。その後、1 サイクルの終了時に他方のスキー板の角速度が急激に増加することが示された。これらの結果より、1 サイクルのうち、左右のスキー板の角速度がそれぞれ増減を示し、かつ、始めのスキー板の増加する際に前腕の角速度が増加したとき、その 1 サイクルで行われたサブ走法を V2A とした。さらに右のスキー板の角速度が先に増加した場合を V2AR、左のスキー板の角速度が先に増加した場合を V2AL とした。



— 右前腕角速度 — 左前腕角速度
— 右スキー角速度 — 左スキー角速度

Fig.2 1サイクル中のV1Rの角速度の特徴



— 右前腕角速度 — 左前腕角速度
— 右スキー角速度 — 左スキー角速度

Fig.3 1サイクル中のV2ARの角速度の特徴

例外処理

スケーティング走法においては、主要となる上記の3種類のサブ走法のほかに、あるサブ走法から他のサブ走法に切り替えるために通常の1サイクルの動作とは異なる動作を行う切り替え動作、カーブ滑走中のターン動作が存在する。そのため、自動識別の結果が必ず切り替え動作を行う必要があるサブ走法の組み合わせ (V1R (V1L) の前後が V1R (V1L) 以外となる) や、通常は行われるはずのないサブ走法の組み合わせ (V2R (V2L) が連続する) の場合は、その組み合わせの始めの1サイクルのサブ走法をターンと定義し、自動識別結果を変更した。変更した組み合わせは表1に示した。

表1 例外処理に使用された組み合わせ一覧

A	B	C
V1R	V1R	V1L, V2R(L), V2AR(L)
V1L	V1L	V1R, V2R(L), V2AR(L)
V2R	V2L, V2AL	V1R(L), V2R, V2AR
V2L	V2R, V2AR	V1R(L), V2L, V2AL
V2AR	V2L, V2AR	V1R(L), V2L, V2AL
V2AL	V2R, V2AL	V1R(L), V2R, V2AR

A: 例外処理の対象となるサブ走法

B: Aからの切り替え動作が不要なサブ走法

C: Aからの切り替え動作が必要なサブ走法

※上記の判定基準に基づき、自動識別結果がA→Cの順に並んでいた場合、Aがターンであると再判定した。

表2 対象の身体的、体力的特徴

	男子 (n=9)	女子 (n=5)
年齢 (歳)	19.3±1.5	20.2±1.6
身長 (cm)	173.0±5.9	160.3±6.5
体重 (kg)	66.2±6.2	52.2±4.0
最大酸素摂取量 (ml/kg/min)	66.8±4.2	58.1±7.1

本実験

対象

対象は、公益財団法人全日本スキー連盟に所属する14名のクロスカンントリー競技者およびノルディック複合競技者とした。対象の身体および体力的特徴は表2に示した。実験前に、本研究の目的と方法を説明したうえで、書面によるインフォームドコンセントを得た。なお本研究は、国立スポーツ科学センター倫理審査委員会の承認を受けて実施した。

計測プロトコル

実験において、対象は自身の競技用ポールと競技用ローラースキー (MS610C, Marwe, Finland) を装着した。前実験と同様、2つのセンサを対象の両手首およびローラースキーに装着した。自動識別結果と比較するために、小型デジタルビデオカメラ (HDR-AS15, Sony, Japan) を対象の胸部に下向きに取り付けることで、実際に行ったサブ走法を記録した。それぞれの被験者の滑走速度および滑走中の斜度は、d-GNSS モジュール (SX blue II, GENEQ inc., Canada) と受信機 (TNJ32, Trimble, United States) を用いてサンプリング周波数 20 Hz で記録した。d-GNSS モジュールと受信機は、小型バックパックに入れて被験者の背部に取り付けた。

実験は、3.45 km の起伏のあるローラースキー専用コースを対象に1周させて行った。それぞれの被

験者に最大努力のスケーティング走法での滑走を行わせ，各種データを記録した．

データ分析

各被験者の慣性センサのデータは，PC に取り込み，予備実験の定義をもとに作成したプログラムを用いてサブ走法を自動で識別した．また，実際に行われたサブ走法は，ビデオ映像の四肢の動作を目視で確認して判定した．自動識別によるサブ走法の総数，サブ走法ごとの回数，ビデオ映像をもとにしたサブ走法の総数，走法ごとの回数を求め，混同行列を用いて自動識別の精度を求めた．

結 果

表 3 には、ビデオ判定結果と自動識別プログラムによる結果を示した。全対象が実験中に実施したサブ走法は 6741 回であった。自動識別プログラムの精度（自動識別したサブ走法が正しく判定できた割合）は、主要な 3 種類のサブ走法のうち、V2 が最も高く（V2R: 97.5%, V2L: 97.8%）、次いで V2A が高く（V2AR: 92.1%, V2AL: 92.0%）、V1 が最も低い（V1R: 87.6%, 87.0%）ことが示された。また正解率（実際に行われたサブ走法が自動識別によって正しく判定できた割合）は、V2 が最も高く（V2R: 98.6%, V2L: 98.8%）、V1 と V2A が同程度（V1R: 94.5%, V1L: 97.6%; V2AR: 95.3%, V2AL: 93.6%）であった。すべてのサブ走法において、ターンが最も間違えやすいサブ走法であることが示された。

表3 各サブ走法の識別精度および正解率

		自動識別結果								
ビデオ判定結果		V1R	V1L	V2R	V2L	V2AR	V2AL	ターン	合計	正解率
	V1R	120	1	1	0	3	0	2	127	94.5
	V1L	0	40	0	0	0	0	1	41	97.6
	V2R	0	0	1920	1	0	7	20	1948	98.6
	V2L	0	0	0	1932	3	0	20	1955	98.8
	V2AR	0	0	7	0	767	0	31	805	95.3
	V2AL	0	0	3	15	1	587	21	627	93.6
	ターン	17	5	39	27	59	44	1047	1238	84.6
	合計	137	46	1970	1975	833	638	1142	6741	
	精度	87.6	87.0	97.5	97.8	92.1	92.0	91.7		

図 4 には、対象 A がコース滑走中に使用した全サイクルの斜度と滑走速度をサブ走法ごとに示した。対象 A が最も高い滑走速度で使用したサブ走法は V2A であり、次いで V2, V1 であった。また、最も急な斜度で使用したサブ走法は V2 であり、次いで V1, V2A であった。

図 5 は、本研究において平均速度が最も高かった対象 B と、最も低かった対象 C の滑走中の速度を比較したものである。対象 A は、コース前半の平地およびその後の下り坂において滑走速度を大きく高めていることが示された。なおコース前半の平地において、両対象は V2R および V2L を使用していたことが示された。

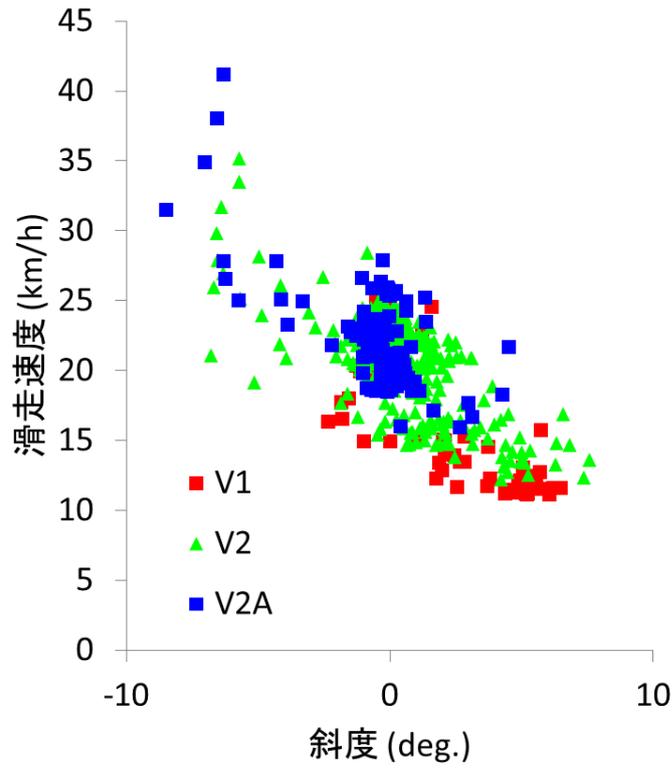


図4. 各サブ走法の滑走中の斜度と速度との関係

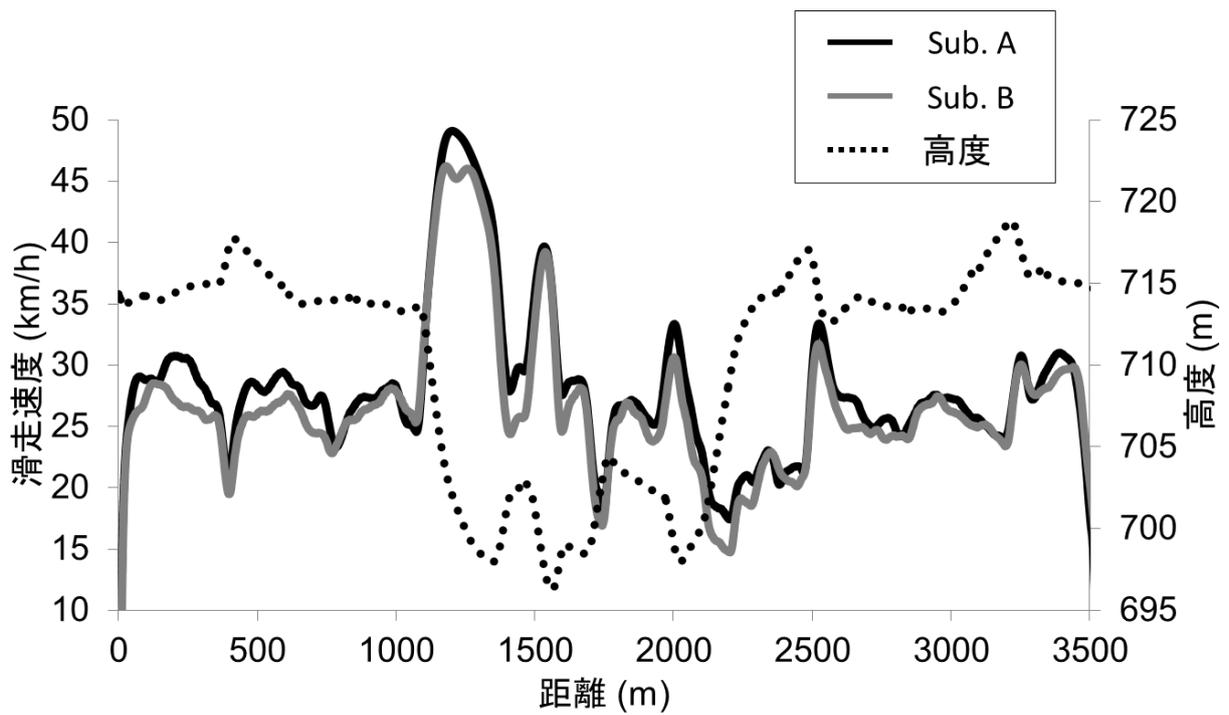


図5. 対象A, Bの滑走速度の比較

考 察

本研究の目的は、スケーティング種目において主に使用される 3 種類のサブ走法を、四肢の動きに着目して自動識別することであった。その結果、平均では 92.3 %の精度、96.4 %の識別率で計 6 種類のサブ走法を識別することが可能となった。Sakurai et al. (2014) は、クラシカル種目において主に使用される 3 種類のサブ走法を同様の手法を用いて自動識別し、98.5 %の精度で識別可能であることを示したうえでパフォーマンスを評価した。本研究においても高精度で識別ができていることを踏まえると、ある一定の距離を滑走した際のパフォーマンスを本プログラムを用いて評価することは有用であるといえよう。一方で、最も間違えやすいサブ走法はターンであることが示された。本研究の自動識別プログラムでは、ターンを直接的に識別する手順を設けておらず、他のサブ走法との組み合わせをもとにした例外処理によってターンを識別することとした。そのため、ターン時の動作をもとに自動識別プログラムを再開発することができれば、より精度の高い識別が可能となろう。しかしながら、ターン動作はあるサブ走法を用いながら運動の方向を変える目的で行われることも多いため、実際には各サブ走法とかなり近い動作で行われる場合がある。そのため、誤ってターンと識別している場合においても、実際には誤識別されたサブ走法とかなり近い動きを行っていることが推察される。他のサブ走法同士の誤識別が少ないことを踏まえると、自動識別プログラムを用いたパフォーマンス評価をする際には、ターン動作を含めた各サブ走法の評価をすることが、より評価を正しく行ううえで必要なこととなろう。

また本研究において、2 名の対象の滑走中の速度を比較した結果、対象 A は、V2 を使用してコース前半の平地において滑走速度を高めたことが示された。この結果は、対象 B が特にコース前半において V2 での滑走速度を高めるようなトレーニングを実施することで、より高いパフォーマンスを獲得できることを示唆するものである。このことは、本研究で使用されたシステムが、選手のパフォーマンスの評価やトレーニングの示唆に有効であることを示すものである。本プログラムを用いた雪上におけるパフォーマンスの評価や、得られた結果をトレーニングした場合の縦断的な評価に期待したい。

結 論

本研究の目的は、GNSS と慣性センサを用いて、クロスカンリースキー競技のスケーティング種目における 3 種類のサブ走法を自動識別し、滑走中のパフォーマンスを評価することであった。実験の結果、以下のことが明らかとなった。(1)四肢に装着した慣性センサを用いて得られたデータをもとに開発された自動識別プログラムは、平均 92.3 % の高精度で各サブ走法を識別できることが示された。(2)さらに GNSS を用いた滑走速度および高度の評価によって、対象のパフォーマンスを高めるための具体的な方策を検討することが可能となった。

参考文献

- Andersson, E., Supej, M., Sandbakk, Ø, Sperlich, B., Stöggl, T., Holmberg, H. -C. Analysis of sprint cross-country skiing using differential global navigation satellite system. *European Journal of Applied Physiology*, 110, 585-595.
- Bilodeau, B., Roy, B., Boulay, M. R. (1991) A comparison of three skating techniques and the diagonal stride on heart rate responses and speed in cross-country skiing. *International Journal of Sports Medicine*, 12, 71-76.
- Bortolan, L., Pellegrini, B., Impellizzeri, F. and Schena, F. (2012) Automatic detection of technique during on snow cross-country skiing. In: *Science and Skiing V*. Eds: Muller, E., Lindinger, S., Stöggl, T. Meyer & Meyer Sport (UK) Ltd. 483-491.
- Kvamme, B., Jakobsen, V., Hetland, S. (2005) Ski skating technique and physiological responses across slopes and speeds. *European Journal of Applied Physiology*, 95, 205-212.
- Li, L. and Caldwell, G.E. (1999) Coefficient of cross correlation and the time domain correspondence. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 9, 385-389.
- Marsland, F., Lyons, K., Anson, J., Waddington, G., Macintosh, C. and Chapman, D. (2012) Identification of cross-country skiing movement patterns using micro-sensors. *Sensors (Basel)* 12, 5047-5066.
- Millet, G. P., Boisseere, D., Candau, R. B. (2003) Energy cost of different skating techniques in cross-country skiing. *Journal of Sports Sciences*, 21, 3-11.
- Myklebust, H., Losnegard, T., Hallén, J. (2013) Differences in V1 and V2 ski skating techniques described by accelerometers, *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 24, 882-893.
- Nilsson, J., Tveit, P. and Eikrehagen, O. (2004) Effects of speed on temporal patterns in classical style and freestyle cross-country skiing. *Sports Biomechanics*, 3, 85-108.
- Sakurai, Y., Fujita, Z., Ishige, Y. (2014) Automated identification and evaluation of subtechniques in classical-style roller skiing. *Journal of Sports Science and Medicine*, 13, 651-657.
- Stöggl T., Kappel, W., Müller, E., Lindinger, S. Double-push skating versus V2 and V1 skating on uphill terrain in cross-country skiing. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42, 187-196.

謝 辞

本研究の実施にあたり、ご支援を賜りました一般財団法人 上月財団に心から感謝の意を表します。
また本研究の実験に協力いただいた、早稲田大学スキー部の選手の皆様にこの場を借りて御礼申し上げます。