

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：21201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700728

研究課題名(和文)地磁気・加速度センサによるスキージャンプ選手のモニタリングシステムの研究開発

研究課題名(英文)A Development of Monitoring System of Ski Jumper Using Terrestrial Magnetism and Acceleration Sensor

研究代表者

佐藤 永欣(Sato, Nobuyoshi)

岩手県立大学・ソフトウェア情報学部・講師

研究者番号：10385958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：当初の研究計画どおり、スキージャンプ選手の踏み切りモーションとタイミングの定量的なモニタに加え、FISの公式ルールどおりではないものの飛距離の自動測定を実現した。特に後者はスキージャンプの練習においては、極めて重要であるにもかかわらず、測定のための人員や設備が必要であり飛距離の判定自体が難しいことから実施されていなかった。

当初の研究計画の実際のジャンプ台での選手及びコーチのみによる運用と初心者に対するフィードバックの実現が達成できなかった。過労を主な原因として研究代表者が平成24年末から鬱病を発症し、長期の病気休暇と復職を繰り返し、最終年度は何もできなかったためであり無念の極みである。

研究成果の概要(英文)：As the first research plan, determinate monitoring of timings and motions of take-off on ski jump was realized. In addition to this, although it is not accords FIS official rule, automatic measurement of flying distance using video and acceleration sensor was realized. Especially, flying distance is very important in ski jumping, however, since extra person(s) and equipment are required to measure the flying distance is not measured in daily practice.

Field use by only ski jumpers and coaches and feeding back deterministic results to beginner which are in first plan could not realized. This is because the research representative was taken to melancholia or known as great depression caused by over working and a gossip which had been deliberately speeded in the university by a person. As this result, the mental disease forced the research presentative to repeat being away from the university to rest and returning. The representative most mortified to be forced this.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：スキージャンプ 踏み切りモーションの定量的モニタ 地磁気・加速度センサ 飛距離自動測定

## 1. 研究開始当初の背景

スキージャンプは、急角度の斜面として作られたスキージャンプ台で行われるノルディックスキー競技の一種である。冬季オリンピックでは花形種目の一つであるなど、注目度は高いものの、競技人口が少ない、アマチュアスポーツとしては経済的負担が大きいため、安価な強化方法が求められていた。

スキージャンプの競技では、選手はスタート台から急角度の斜面を滑走し、ジャンプ台先端の踏み切り位置でジャンプ台を蹴り上げるような踏み切り動作を行ってジャンプし、ランディングバーンに着地したのち停止する。飛行中の選手は空気による抗力を受けつつ前方に進みながら自由落下している。競技においては飛距離と飛行姿勢の美しさと着地姿勢の美しさから求めた得点を競うが、飛距離が比較的大きな比重を占めている。

飛距離を決める要因は様々であるが、踏み切りが7~8割を占めるといわれている。すなわち、踏み切り位置で可能な限り速い速度に達し、かつ、ジャンプ台先端にできるだけ近い場所を力強く蹴って飛び出さなければならない。図1に踏み切り動作における姿勢変化の概略を示す。選手は滑走時にはできるだけ低い姿勢をとり重心を後ろに置き速度を得る。踏み切り時には腰と膝ができるだけ短い時間で伸びきるような動作をする。これを選手・コーチは「力強い踏み切り」と呼んでいる。スキージャンプ選手のフォームは世界的にもビデオ画像のみによるモニタが中心であり、定性的な議論や勘・経験に頼ったコーチングも行われている。必然的に踏み切りを中心とした練習が必要であるものの、踏み切りタイミングやフォームの定量化はあまり進んでいるとは言えなかった。

スキージャンプの飛距離はスキー板全体が接地した瞬間におけるジャンパーの足の位置のジャンプ台先端からの距離である。着地する際の角度が浅いうえに速度も速く、飛距離の判定にはかなりの熟練を要する。大会ではランディングバーンに多数の判定員を数メートルごとに並べるか、遠距離のタワーから数名の審判員が目視して判定しているが、少人数で行われる練習で適用可能な方法ではない。また、選手自身も自らの飛距離は着地速度が速いため大まかな値でしか把握できない。このため、練習では飛距離は考えずに、理想的な踏み切りフォームを身につけることが中心となっている。

スキージャンプのトレーニングに関する科学的研究の歴史は1970年代からある。主に足の裏の荷重分布の変化に基づいて踏み切りの良否を測定するシステムが実用化されているが、踏み切りタイミングの良否をモニタすることはできない。

コーチは踏み切り位置付近で踏み切り動作を見ていることが多く、ジャンプ後に停止した選手がコーチからアドバイスを受けるには、階段を100mほど登らなければならない。特に初級者はこの間に自分が行った踏み切りを忘れていくこと

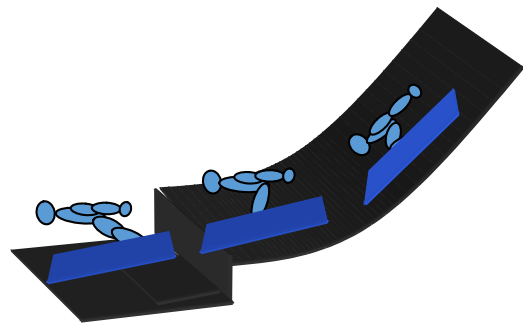


図1 スキージャンプ選手の踏み切り動作における姿勢変化

が多く、三ヶ田礼一氏、永井陽一氏のようなコーチによれば初心者への指導の障害であるとのことである。また、トップ級選手の練習でもフォームは定量的に把握されておらず、コーチングも定性的である。選手・コーチからのヒアリングによれば、コーチの指摘と選手の感覚にずれがあることが多く、感覚のずれがスランプの原因となることも多いとのことである。

スキージャンプは冬がシーズンの競技であるが、積雪地の急斜面に作られているスキージャンプ台に冬季に出入りすることは危険を伴う。大会の前には自衛隊等の援助も受けた上で入念な除雪とランディングバーンの積雪の踏み固めを行っている。このため、積雪期は試合のシーズンであり、練習のシーズンではない。一方、ジャンプ台とランディングバーンに水をまき、非積雪期にもスキージャンプは行われている。一般にサマージャンプと呼ばれている。本研究はサマージャンプを対象とする。

地磁気・加速度センサは近年量産されており選択肢も多い。地磁気について着目すると、センサ近傍の地磁気の磁北の方向と俯角を求めることができる電子コンパスである。地磁気の磁場は1人の人間の周囲では一様と考えてよい。これに基づき、センサの向きの変化および複数のセンサのなす角とその変化を地磁気センサのデータによって求める手法を開発していた。

## 2. 研究の目的

地磁気・加速度センサを利用したスキージャンプ選手のモニタシステムを開発する。本システムが対象とするのは、滑走開始、踏み切り、着地の各段階であるが、飛距離に大きな比重を閉める踏み切りを主な対象とする。スキージャンプは同じ場所で同じ動作を繰り返す競技であり、センサによる定量的なモニタは有効である。この際、スキージャンプ選手の足首よりの脛、太腿、および腰の後方に地磁気・加速度センサを装着し、ひざと腰の角度の連続的な変化を取得する。また、踏み切り位置付近を撮影しているビデオカメラと、地磁気・加速度センサのデータを同期することにより、センサにより得られる膝や腰の角度と撮影される選手の動画像での見かけ上の膝や腰の角度の関係に関する知見を得、踏み切りタイミングの良否の判定や指導に活用できるシステムの構築を目指す。これに関連して、踏み切り動作とタイミングのモニタリングのほかに、飛距

離測定の実現と初心者等への即時かつ容易なフィードバックを実現する。

上記は次の研究目的は、次のシステムの開発によって実現できる。すなわち、無線によるデータ送信の範囲が広い地磁気・加速度センサ、このデータに正確に同期したビデオ撮影が可能なシステムである。地磁気・加速度センサのデータとビデオカメラにより撮影した動画の同期の正確性はかなり重要である。すなわち、踏み切り動作が適切なタイミングで行われているかどうかを判定し、着地による主に足首に装着したセンサへの衝撃をトリガとして飛距離を自動計測するためには欠かすことができない。

これらの開発したシステムを、実際に練習に利用されているジャンプ台に設置して使用し、スキージャンプの練習における定量的なフィードバックの実現をめざす。また、小中学生などの初心者への指導等に利用可能な知見を得ることを最終的な目的とする。

### 3. 研究の方法

前節の目的を達するため、次のシステムの開発を行った。すなわち、スタート台から着地点までの範囲で、無線によるデータの送信と受信が可能な地磁気・加速度センサの開発、ビデオカメラの動画データと地磁気・加速度センサのデータの正確な同期を実現するソフトウェアの開発、および、踏み切り台脇とブレーキングゾーン脇を低遅延で結ぶネットワークの敷設、踏み切り台脇に設置した PC とランディングバーン脇に設置した PC の正確な同期の実現である。

まず、上記のシステムの実装のフィールドとして、岩手県八幡平市にある県営田山スキー場のジャンプ台のうち、K 点=50m のジャンプ台を選択した。このジャンプ台の写真を図 2 に示す。図 2 はランディングバーンの下端付近からスタート台方向を見上げた写真である。また、赤い線が引かれている位置が K 点であり、この線の踏み切り台先端からの距離が 50m である。ランディングバーンの白線、赤線、青線は 5m おきに引かれている。踏み切り位置付近に無線送受信用の機器を設置した場合に必要な無線通信の距離はおおむね 100m である。



図 2 岩手県営田山スキー場ジャンプ台



図 3 メディアコンバータ収容箱設置状況

このジャンプ台では、通常、永井陽一氏、永井秀昭氏、永井健弘氏が練習を行っており、岩手県体育協会を通じて協力を仰いだ。余談ながら、永井秀昭氏は本研究課題の終了間際にソチオリンピックに出場している。

次に、飛距離計測の自動化を実現するために、このジャンプ台に敷設したネットワーク設備について述べる。まず、踏み切り位置付近に設置する、コーチ用・制御用 PC と、ブレーキングゾーン脇に設置する飛距離測定用 PC を低遅延ネットワークで接続するため、光ケーブルをジャンプ台の管理者である八幡平市教育委員会より許可を取得し 2011 年度に設置した。簡便に使用するため光ケーブルの両端にはメディアコンバータを設置し 100Base-TX としている。メディアコンバータの設置状況を図 3 に示す。メディアコンバータと光ファイバケーブルは SCOPE による研究プロジェクトの廃品を再使用した。使用した光ケーブルは海底用光ケーブルで、耐水性及び物理的衝撃への耐性は保障されている。

地磁気の大きさや方向は場所によって若干異なる。また、鉄などの強磁性体が帯びている磁気にも影響を受ける。その一方で、強磁性体が近くでない限りは、人間一人程度の空間ではほぼ同様とみなしてよい。したがって、良く較正された二つの地磁気センサのなす角を求めることは可能である。センサ 1, 2 の XYZ 3 軸の時期の大きさをそれぞれ  $MagX_1, MagY_1, MagZ_1, MagX_2, MagY_2, MagZ_2$  としたとき、二つのセンサのなす角  $\theta$  は次の式により求めることが可能である：

$$\theta = \cos^{-1} \frac{(MagX_1 \cdot MagX_2) + (MagY_1 \cdot MagY_2) + (MagZ_1 \cdot MagZ_2)}{\sqrt{MagX_1^2 + MagY_1^2 + MagZ_1^2} \cdot \sqrt{MagX_2^2 + MagY_2^2 + MagZ_2^2}}$$

この方法により、足首と太腿にそれぞれ装着したセンサにより膝の角度を、太腿と腰の後ろ側に装着したセンサにより腰の角度を求めることができる。図 4 にセンサを装着して滑走姿勢をとっているスキージャンプ選手の例を示す。

地磁気・加速度センサは、腰と太腿には図 5 に示すセンサの大きさに合わせたポケットを縫い付けたサポータを介して装着する。足首にはブーツの外側に装着し、ベルクロテープで固定する。これにより、センサを装着する際のセンサの角度は毎回ほぼ同じになる。

次に、踏み切りタイミングを特定するためのカメラの設置方法について述べる。ジャンプ台の踏み切り位置付近には、踏み切り動作をコーチ

が観察するための台が設けられている。ここに、センサの測定周期と同じ 25ms ごとに、すなわち 40fps で撮影可能なビデオカメラを設置し、PC からセンサとともに制御する。踏み切り位置の手前 10m の範囲とした。これは、スキージャンプ選手は、R1 カーブと呼ばれる急斜面から踏み切り台直前の緩斜面に移行するカーブを過ぎた付近から踏み切り動作を開始するためである。

本件課題採択以前に開発していた、踏み切り台付近でのビデオ制御と地磁気・加速度センサのデータを受信し記録するソフトウェアに、飛距離測定用のカメラとネットワーク越しに同期する機能等を追加実装した。カメラの制御には OpenCV を用い、動画像の描画には DirectX を使用する構成である。このほかに、踏み切り動作を比較するための確認用ソフトウェアの開発を行った。このソフトウェアには、後に飛距離を自動的に推定する機能が追加された。図 6 にこのソフトウェアの実行画面を示す。

飛距離計測の方法であるが、飛行中のスキージャンプ選手は基本的に自由落下しているため、無重量状態に近いこと、及び足首に装着した地磁気・加速度センサにより検出する着地の衝撃を用いる。すなわち、加速度センサデータの XYZ3 軸の合成力が明らかに小さくなった後、瞬間的な立ち上がりをしている時点に着地の瞬間と判断する。このとき、ランディングバーン脇から、センサによるデータ計測と同期させて、着地の模様を動画撮影しておく。そして、着地の衝撃があった瞬間に選手がいた位置と飛距離を表

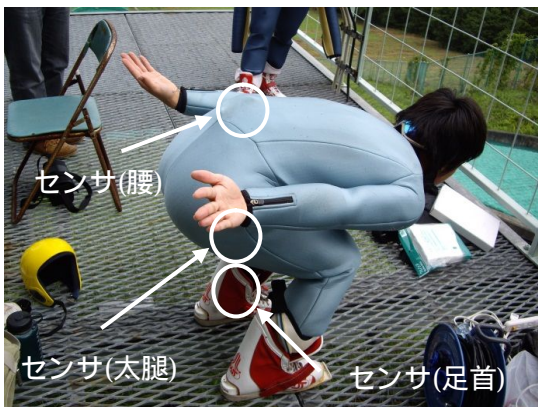


図 4 スキージャンプ選手にセンサを取り付け、滑走姿勢をとっている状態



図 5 センサ装着用サポータ

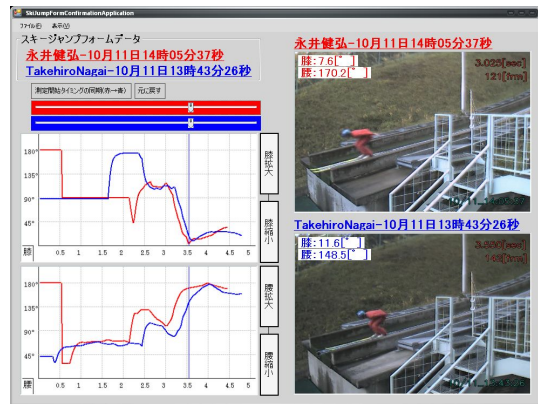


図 6 開発したジャンプ姿勢モニタシステムの実行画面

す横線の位置関係から飛距離を求める。飛距離を示す横線は、OpenCV のライン認識機能を用いて検出する。ただし、各横線が示す飛距離はあらかじめ設定しておく必要がある。また、着地するスキージャンプ選手は OpenCV で背景差分法による動体検出機能を用いて検出する。これにより、着地の瞬間に動画上で検出されたスキージャンプ選手の位置と検出された各距離を示す横線との相対的な位置関係により、飛距離を測定する。

具体的な手順は次のとおりである。

1. 着地した瞬間の動画像に対して、背景差分法を用いて選手の位置を検出する。
2. 検出された動体のピクセルの Y 軸方向における中間点  $y_{land}$  を求める。
3. 次の式により、着地した距離  $d_{land}$  を求める。ただし、 $y_{upper}$  と  $y_{lower}$  はそれぞれ飛距離を表す横線の動画像中の Y 座標の値、 $d_{upper}$ 、 $d_{lower}$  はそれぞれ、 $y_{upper}$  と  $y_{lower}$  があらわす飛距離である。動画像の左上を原点とすると、 $y_{upper} \leq y_{land} \leq y_{lower}$ 、 $d_{upper} \leq d_{land} \leq d_{lower}$  である。

$$d_{land} = \frac{y_{land} - y_{upper}}{y_{lower} - y_{upper}} (d_{lower} - d_{upper})$$

ただしこの方法は FIS ルールに基づく方法とは若干異なる。

次に、地磁気・加速度センサの開発について述べる。従前の研究では AMI602、加速度センサとして Bosch Sensortec GmbH の BMA150 を使用したセンサを開発していた。このセンサは、別の共同研究の一環として開発され、本研究でも使用していた。長時間の練習でも使用できるようにバッテリーを交換式としたが、振動により瞬断が発生することがある、バッテリーを交換すると地磁気センサの較正が必ず必要になるなどの問題があった。正しい較正手順を実施しなければ、地磁気センサの測定値が不正確となり、その結果、腰やひざの角度を測定できなくなってしまう。一方、正しい較正手順の実施はかなりの手間であり、選手とコーチだけによる練習での使用という場面を考えると問題である。

センサの製造メーカーである(株)東北 TKR と岩手県工業技術センターの協力により、バッテリー表

表 1 岩手県工業技術センターによるバッテリー表面の磁化状況(数値に単位表示がない部分の単位はガウス)。太線がバッテリーの外周を示す。赤いセルが+端子、黒いセルが-端子である。

位置	-10mm	0mm	10mm	20mm	30mm	40mm
-10mm	-0.04	-0.03	-0.01	0.02	0.04	0.07
0mm	-0.05	-0.19	-0.17	-0.03	0.06	0.06
10mm	-0.06	-0.19	-0.96	-0.06	0.12	0.06
20mm	-0.05	-0.15	-0.63	0	0.16	0.05
30mm	-0.03	0.17	0.82	0.06	0	0.03
40mm	-0.03	0.2	0.89	0	-0.51	0.01
50mm	-0.05	-0.01	0.04	0.01	-0.04	0.02

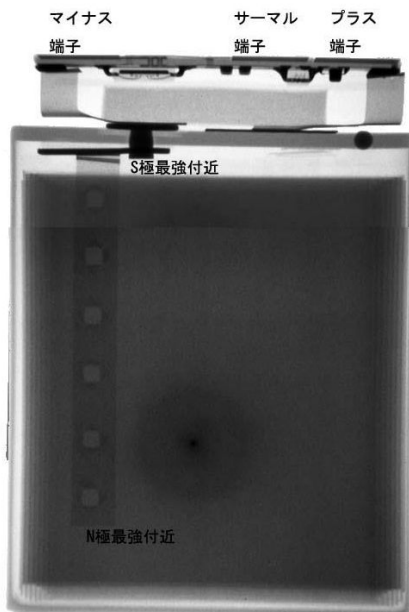


図 7 バッテリーの X 線写真

面の磁気を 10mm の升目で測定し、バッテリーの X 線写真(図 7)とあわせて検討したところ、電極付近が充電時の比較的大きな電流により磁化され、一方で放電時には弱い電流しか流れないため、充放電を繰り返すと電極付近が強く磁化されることが判明した。バッテリーの表面の磁気を測定した結果を表 1 に示す。

以上から、2012 年度に新規地磁気・加速度センサの開発に踏み切った。本課題で開発した地磁気・加速度センサを図 8 に示す。本センサでは、バッテリーとセンサを別の筐体に収容して距離を開けることで、バッテリーが磁化される影響を地磁気センサが受けないように工夫している。また、自動較正が可能な InvenSense 社の MPU-9150 を採用した。また瞬断対策としてバッテリーボックスのコネクタを二重化した。

本研究では、地磁気・加速度センサのデータと、ビデオ録画画像のデータを正確に同期する必要がある。ここで、正確な同期とは、本研究ではおおむね 25 ミリ秒以下の誤差に収まることとする。これはジャンプ台の規模と踏み切り時の速度を根拠としている。

同時に使用する地磁気・加速度センサ 3 個とビデオカメラ 2 台は、それぞれ独自の周波数源を持っていることに注意しなければならない。す



図 8 本件課題で開発したセンサ右側がバッテリーボックス。センサ本体と接続するコードは脱着式

なわちスキージャンプ選手が滑走を開始してから着地するまでの十数秒の間に、1~2 コマ程度のずれが発生してしまう。1~2 コマ程度のずれは飛距離では 5 メートル程度に相当する。各カメラ、及び地磁気・加速度センサの周波数源は温度補償されていないため、コマのずれ方は一定ではない。このため、各地磁気・加速度センサからのデータと書くビデオカメラからのデータを一旦バッファリングし、バッファ内のデータ数がずれた時点で、数が少ないデータまたは動画像にあわせる処理を行う。具体的には、ずれた位置にその旨マーキングし、後で自動的に除去する方法を採用した。これにより、データ同期処理が誤っていた場合でも、マーキング位置を変えるだけで同期を取りなおせる。

最終年度の計画として、開発した本センサをフィールドテストし、面倒な較正なしで使用可能かどうか、小中学生を中心とした初心者へのフィードバックに有効に利用できるかどうかを、実際に田山スキー場ジャンプ台で土日や平日の夜間を中心に行われている練習において検証する予定であった。しかし、2013 年度報告書に述べたとおり、研究代表者が過労を主な原因としてうつ状態になり、長期にわたる病気休暇後に復職、病気休暇を繰り返し、復職後も 1 日数時間程度の勤務を余儀なくされたためまったく果たせなかった。やむをえない状況によるものとはいえ、誠に遺憾とするところである。

#### 4. 研究成果

まず、本件課題の実施によって実現できた成果の概要を述べる。スキージャンプ選手の踏み切りタイミングや踏み切り動作のモニタ、特に腰やひざの角度の変化のモニタは正確に行われているとは言いがたかった。素早く、力強い、踏み切りをすると良いといわれている程度であった。図 9 に示すように、角度の変化の定量的な変化を把握できるようになった。また、100m の通信距離を実現したことにより、踏み切り姿勢の変化やタイミングの変化を定量的に把握できるようになった。また、実験に協力をいただいた永井陽一氏、永井秀昭氏、永井健弘氏の三兄弟でも、かなり癖が異なることが判明した。この癖と飛距離の違いなどには興味深い関係がある可能性があるが検証は実施できていない。

次に、飛距離の自動測定を実現した。これは前節で述べた方法によるものであり、FIS による公式の測定方法とは異なる。しかし、スキージャ

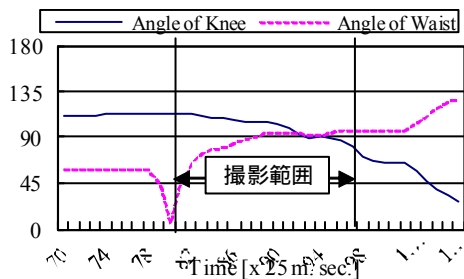


図9 永井陽一選手によるジャンプの腰とひざの角度の変化



図10 検出された着地するスキージャンプ選手(黒)と認識していた横線(赤)

ジャンプ選手は着地時には飛距離を把握できないこと、踏み切り台付近のコーチングボックスからは着地点付近は死角となっており、コーチも飛距離を目視できないことから、正式のルールと若干異なる方法であっても、飛距離の自動測定を実現したことには意義がある。着地する瞬間のスキージャンプ選手を自動的に検出している様子を図10に示す。赤線が飛距離を示す横線の認識状況、および、黒い部分が動体として検出されたスキージャンプ選手である。撮影する角度にも依存するが、両画像を比較するとおおむね検出された動体のピクセルの範囲の上下方向の中間程度の位置に足があることがわかる。そこで、前節で述べた方法により、検出された動体の上下ピクセル幅の中間点のXY座標を画面上で求め、あらかじめ検出しておいた飛距離を示す横線と比較し、飛距離を求めた。図10の例の場合では、47メートルという計算結果を得たが、実験に協力を得た選手に着地動画を見てもらい飛距離を判定してもらったところ、46メートル、または47メートルであった。

踏み切りタイミングと腰、ひざの角度の変化を定量的に把握できることは選手およびコーチからも好評であり今後のスキージャンプ競技の強化に生かせる。本来は、小中学生などの初心者への指導に生かす予定であった。特に小学生では、ジャンプ後に着地、停止した後にコーチがいる場所まで登る間に、自分のジャンプの滑走姿勢や踏み切りを忘れてしまっていることが多く、指導が難しいとのことである。

このほか、副次的効果であるが、磁気センサをリチウムイオン電池で駆動する機器に搭載する場合に重要な知見が得られた。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計7件)

佐藤永欣, 及川正基, 高山 毅, 村田嘉利, 磁気センサによるスキージャンプの踏切モーションモニタシステムにおける角度測定方式の評価, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ, pp.134-139. (2011.10)

N. Sato, M. Oikawa, T. Takayama, Y. Murata, An Angle Measurement Method by Using Terrestrial Magnetism Sensors on a Ski Jumper's Motion Monitoring System, NBIIS 2011, pp.60-67. (2010.9)

高間木遼太, 佐藤永欣, 高山 毅, 村田嘉利, 地磁気・加速度センサとカメラを用いたスキージャンプ選手の指導者支援システムにおける加速度とカメラを利用した距離推定, 情報処理学会第74回全国大会, 5Z-6 (2012.3)

N. Sato, R. Takamagi, T. Takayama, Y. Murata, A Proposal of a Simplified Jumping Distance Measurement Method for Ski Jumper's Motion Monitoring System using Terrestrial Magnetism and Acceleration Sensors, ITIS2012-3, pp.1005-1010. (2012.3)

佐藤永欣, 高山 毅, 村田 嘉利, 地磁気・加速度センサを用いたスキージャンプ選手のモーションモニタシステムにおける距離測定方式, DICOMO2012, pp. 2122 - 2128 (2012.7)

N. Sato, T. Takayama and Y. Murata, On Automatic Flying Distance Measurement on Ski Jumper's Motion Monitoring System, ITIS 2012-9, pp.603-609 (2012.9)

N. Sato, T. Takayama, Y. Murata, Early Evaluation of Automatic Flying Distance Measurement on Ski Jumper's Motion Monitoring System, AINA2013, pp.838-845. (2013.3)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 角度測定装置及び方法

発明者: 村田 嘉利, 佐藤 永欣

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許開 2012-154817

出願年月日: 平成 23 年 1 月 26 日

国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤永欣(SATO, Nobuyoshi)

岩手県立大学・ソフトウェア情報学部・講師

研究者番号: 10385958