

地磁気および加速度センサによるスキージャンプ選手の 動作モニターシステムの提案

及川正基 佐藤永欣 村田嘉利
岩手県立大学ソフトウェア情報学部

これまでに地磁気センサと加速度センサを組み合わせる製造工場における工員のルーティング作業モニタを行ってきた。直線的動作のモニタには不向きだが、回転運動を主とする動作に関しては高い精度でモニタ可能であることを確認している。作業モニタ技術の適用先の1つとしてスポーツが考えられる。サッカーのように動き回るスポーツについては不向きであるが、野球のピッチングやゴルフのスイングなど常に安定したフォームを要求されるスポーツには適していると考えられる。今回はその一つといえるスキージャンプ競技に関して、選手の動作モニタへの地磁気・加速度センサの適用可能性を検討した。モデルを用いた選手の滑降速度の測定、踏み切り位置の測定を行った結果、適用可能性が十分に高いことが分かった。

A Proposal of Ski Jumper's Motion Monitor System by Terrestrial Magnetism and Acceleration Sensors

Masaki Oikawa Nobuyoshi Sato Yoshitoshi Murata
Faculty of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

We have developed a monitor system of a routine work by using terrestrial magnetism sensors and acceleration sensors at an automobile factory. In this process, we found out that terrestrial magnetism sensors are not suited for linear motions, but they are very useful to monitor rotation movements. Sports are thought as one of application area of our worker's motion monitor techniques. Although sports of which players move about everywhere at playground such as soccer are not suitable for our techniques, however, our techniques seem to be suitable for sports of which players are required stable forms such as pitching on baseball, swing of golf and so on. In this paper, we targeted ski jump which requires stable forms, and discussed about possibility to apply terrestrial magnetism sensors and acceleration sensors to monitor motion of a jumper. As a result of experiment using a model, we found these sensors can be applicable for ski jump.

1. まえがき

これまでに地磁気センサと加速度センサを組み合わせる製造工場における工員のルーティング作業をモニタする研究を行ってきた[1][2][3][4]。その結果、直線的動作をモニタするには不向きだが、回転運動を主とする動作に関しては高い精度でモニタ可能であることが分かった。なお、本論文では、地磁気センサと加速度センサを組み合わせたものを地磁気・加速度センサと呼ぶ。地磁気・加速度センサを用いた作業モニタ技術の適用先の1つとしてスポーツが考えられる。工員のモニタでは固定された作業場における地球磁場に対する地磁気センサの方向の変化を利用していることから、野球のピッチングやスキーのように場所が固定的で常に安定したフォームが要求されるスポーツには適していると考えられる。一方、サッカーのように選手の動きが一定でなかったり、選手がフィールド全体を動き回るようなスポーツについては不向きと考えられる。

従来、スポーツ選手の動作をモニタする方法としては、ビデオカメラを利用する方法が一般的である。ユニフォームのいろいろな点にマーカをつけ、画像処理により各マーカの移動量を求めた上で各種データを求めていた[5]。この方法では、多量の画像処理が必要となることからリア

ルタイムなモニタが難しい点や、選手を撮影するために複数のカメラが必要であり、それらは固定されていなければならない、等の制約がある。それに対して、地磁気・加速度センサを用いた場合、各回の選手の動きの違いをリアルタイムで表示可能であり、センサを選手や道具に付けられれば測定可能であることから測定上の制約も少ない。また、マーカを用いない方法[6]では、要求される精度が得られない。

今回は、場所が固定されている安定なフォームが要求されるスポーツの一つであるスキージャンプ競技に関して、選手の動作モニタへの地磁気・加速度センサの適用可能性を検討した。具体的には、モデルのジャンプ台を使い、その上に地磁気・加速度センサを搭載した車両を滑走させることによりデータを測定した。アプローチフォームやスキーのワックスの違いによって生じるとされるアプローチスピードに関しては、地磁気・加速度センサの上に大きさの異なる帆を取り付け、それによる空気抵抗によるスピードの違いを地磁気の変化スピードの違いとして検出できるかを実験した。その結果、帆の大きさに反比例して地磁気の変化するスピードが低下していることを確認した。また、スキージャンプにおいて飛距離を左右する要因の一つといわれている飛び出し位置の測定に関しては、

飛び出し時の踏み切りによる加速度の変化を測定する方法が考えられるが、ここでは地磁気・加速度センサを搭載した車両をクッションに衝突させた時の加速度の変化から飛び出し位置の違いを検出することとした。その結果、停止位置の違いに応じて加速度の変化するタイミングがずれることを確認した。

次章では、スキージャンプ競技に要求されると想定される測定項目を列記する。続いて3章では、動作トレースを中心に関連研究について紹介する。4章では、地磁気・加速度センサを用いて先の測定項目を測定できるか否かをジャンプ台の模型等を用いた実験と測定結果を報告する。

2. スキージャンプのモニタに要求される項目

スキージャンプは、基本的に飛距離を競う競技であるが、得点は、飛距離、飛型、着地姿勢の3つの要素からなる。このうち、飛距離で高得点を得るためには、アプローチスピードと飛型、踏み切り位置とその方向、力が重要である。スキージャンプの1回の滑空は以下のような段階を取り、それぞれ成績に関連する要素を持つ。

- (1). アプローチ: 踏み切り直前の速度が高いほど、飛距離も伸びる。速度の違いは、滑走を開始する位置、フォームやスキーワックスに起因する。滑走を開始する位置は競技役員によって決定されるため、選手は空気抵抗、スキー板と雪面の摩擦抵抗を小さくすることにより速度を上げることになる。
- (2). 踏み切り: 踏み切りタイミング(踏み切り位置)と方向および力(加速度)。踏み切りによって、飛距離が大きく左右される。
- (3). 空中姿勢: 飛型の適正化とそれに持っていくまでの時間。飛型を適正化し、空気抵抗を小さくするとともに、選手の前からの空気の流れを利用して揚力を得るため、空中姿勢は飛距離を左右する。飛型が適正化されたあとは静止しているのがベストとされる。また、飛行中の風向きなども飛距離を大きく左右する。
- (4). 着地: テレマーク姿勢。着地の姿勢が美しいがどうかも採点の基準となる。

スキージャンプのモニタに要求される項目も各段階における成績を左右する要素によって異なる。

- (1). アプローチ:
 - ・ アプローチ開始から踏み切りまでの連続的な速度の変化
 - ・ 練習における各回の速度変化の違い
- (2). 踏み切り:
 - ・ 踏み切りタイミング
 - ・ 踏み切りの方向
 - ・ 踏み切り力
- (3). 飛行中:
 - ・ スキーの地面に対する傾き、スキーに対する下半身および上半身の傾き
 - ・ 適正と思われるフォームに持っていくまでの時間
- (4). 着地:

・ テレマーク姿勢の確立

今回、これらの項目を地磁気・加速度センサを利用して測定する手法を確立するに当たり、台車に地磁気・加速度センサを取り付けて実験を行った。よって、当然ながらテレマーク姿勢をとることはできない。また、飛行中のフォーム変化に関しても模型を利用した測定が困難であることから、本論文の対象外とする。

3. 関連研究

人の動作をモニタすると言っても、人の移動に伴う位置の推定と手足や身体の動きの変化の推定に分かれる。位置の推定に当たってはGPSを利用する方式、無線LANを利用する方式、RFIDを利用する方式などがある。GPSの適用エリアが主に屋外に限られる上に、その精度は方式によって異なるが数m以下にすることは困難である。スキージャンプに適用するには精度不足といえる。無線LANを利用した位置の研究は教室のようなところを中心に研究されており50cm程度の精度で推定可能との研究報告もある[7][8]。スキーのジャンプ台に関しては、周囲に障害物が少ないことから、無線LANの基地局を適切に配置すれば、数十cmの精度で位置を測定できる可能性はある。RFIDの利用に関しては、メッシュ状にRFタグを床等に埋め込んで位置を測定する研究が行われている[9]。

人の動作を推定する方式としては、加速度センサを利用した方法、加速度センサと地磁気センサやジャイロセンサを組み合わせた方法、ビデオカメラを利用した方法などがある。梅本らは加速度センサを利用し、同一動作を繰り返し実行可能か測定している[10]。我々は、加速度センサでは連続的に動作をモニタすることが困難であることから、地磁気センサから回転運動量を抽出すると共に加速度センサの出力と組み合わせて、自動車工場における工員の作業をモニタする研究を行ってきた[1][2][3][4]。その結果、ルーティン作業における動作は毎回ほぼ同じであり、適切な特徴値を利用することにより通常と異なった動作を行った事をリアルタイムで検出可能であることを確認している。しかし、動作における動作速度の違いやタイミングの違いについての考察は行っていない。

谷口らは、複数のビデオカメラを用いて人の動きをリアルタイムにキャプチャする研究を行っている[11]。身体の上にカラーマーカを付けた上で複数のビデオカメラが必要であり、画像処理のために多大な処理能力を有するコンピュータが必要となっている。

ビデオカメラを利用したモーショントレースはスポーツにも適用されている。J.M.Baduraらは、8台の高速カメラを利用して野球のピッチャーのフォームがフラットなグラウンドとピッチングマウンドで異なることを確認している[12]。

4. 実験

ここで、実験方法とその結果について述べる。前節で述べたスキージャンプの選手の挙動を地磁気・加速度センサを用いて測定するにあたり、地磁気・加速度センサに

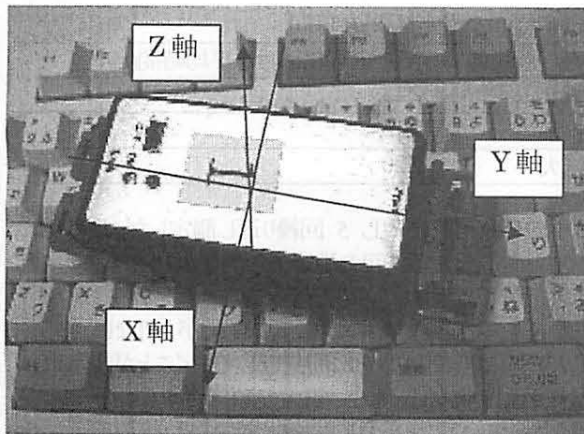


図1 台車と地磁気・加速度センサ

よる測定の再現性を検証する必要がある。実際のスキージャンプ台と選手により再現性の検証を行うことも考えられるが、実験の規模が大きくなる上に、選手が毎回まったく同じ動きをできるとは限らない。よって、本論文では、スキージャンプ台と選手を模した環境を机上で再現し、地磁気・加速度センサによる測定の再現性の検証をする。

次に、実験環境を述べる。スキージャンプ台はプラレールの直線レール、坂レールを用いて再現した。選手の代わりに、プラレールの車両から上部を取り去り、シャーシと車輪だけの台車とし、その上部に地磁気・加速度センサを貼り付けた。その写真を図1に示す。台車はスキージャンプ台の模型の上部より滑走し、台車が滑走している間の地磁気・加速度センサの出力を測定する。本論文では再現性の確認が必要であるため、台車が滑走を開始する位置には、車輪を浮かせることにより台車の滑走を停止させることができるレール(以下スタートレールと呼ぶ)を用いた。スタート時にはレバーの操作により車輪の浮き上がりを止め、滑走を開始させる。

地磁気・加速度センサは、アイチ・マイクロインテリジェント製の AMI-601CG を利用した。25ms 毎に測定された結果は CSV ファイルとして出力される。

4.1 地磁気・加速度センサによる再現性の検証

地磁気・加速度センサによる、地磁気の変化と加速度の測定により、スキージャンプ選手の挙動を測定できることを検証するため、ジャンプ台の模型をプラレールを用いて作った。その模型を図2に示す。ジャンプ台の構成は、上から、スタートレール1本、坂レール3本であり、この他にレールを支える橋脚からなっている。スタートレールはレバー操作によりレール中央にある台状の部分を上下させ、車輪を浮かせることで台車を停止させる。本来、直線レールとスプーン形状のレールの組み合わせにより、スプーンの曲線部分における地磁気ベクトルの変化をとらえるべきであるが、そのようなレールがないため、図2のように直線レールと坂レールの組み合わせに3段構成とした。これにより、曲線部分の地磁気のベクトルの変化を検出することにした。構成部品の詳細を以下に記す。

●スタートレール

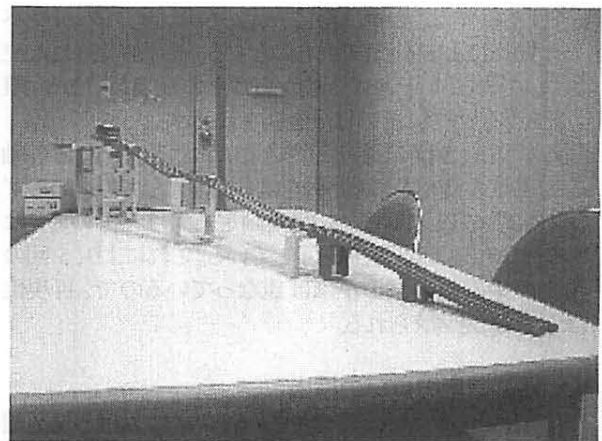


図2 ジャンプ台の模型

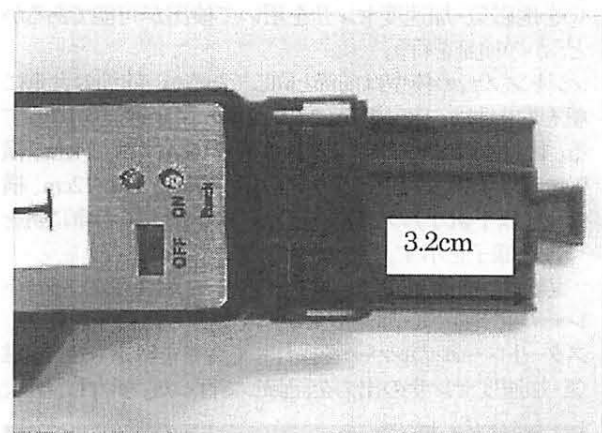


図3 スタートレールの固定位置に設置した台車の様子

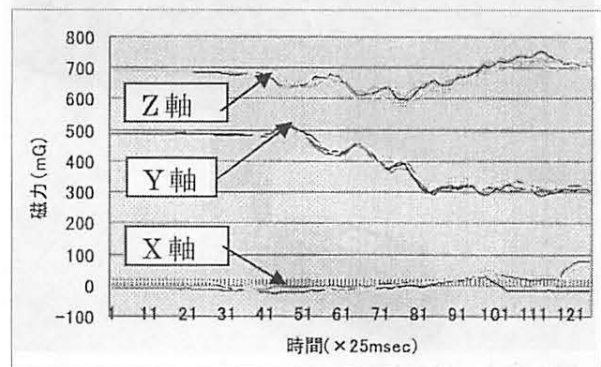


図4 再現性の検証の実験結果(地磁気)

- ・ 全長 21.4cm、滑走部 18cm

●坂レール

- ・ 全長 43cm、滑走部 43.8cm、落差 6.5cm

実験は、スキージャンプ台上部のスタートレールに地磁気・加速度センサを固定した台車を停止、スタートレールのレバーを操作して台車を滑走させ、地磁気・加速度センサの出力を記録して行った。測定は、レバーを操作してから滑走した台車がレールの終端を過ぎるまでの区間を測定した。この測定を5回繰り返した結果を、図4に示す。

なお、この実験を含めたこれ以降すべての台車をスタ

ートする操作は、台車は常に一定の位置からスタートレバーの操作により発進させるものとする。その固定された位置は、スタートレールの上端から台車の後端が 3.2cm 離れたところとする。その様子を図3に示す。

図4では、5回の滑走実験結果におけるX、Y、Z各軸の地磁気の変化を、時間軸を同じ間隔にしてひとつのグラフにプロットしている。5回の測定結果は多少のズレはあるもののほぼ同じ波形を示している。これにより、5回の滑走の地磁気の波形がほぼ重なっているの、再現性は十分あると考えられる。

4.2 滑降速度の違いの検出

以前にも述べたようにスキージャンプにおける飛距離の変動要因は滑走時のスピード、踏み切りのタイミング、飛形、風向きなどである。ここでは滑走時のスピードの違いを地磁気・加速度センサを用いて検出が可能であるかどうかの検証を行う。

ジャンプ台の模型は前節と同じであるが、前節の台車に帆を取り付け、空気抵抗により台車の滑走速度を調節する。帆はダンボールにより、面積 216cm²(縦 24cm、横 9cm)(以下帆大)とこの半分面積 108cm²(縦 12cm、横 9cm)(以下帆小)の2種類を作成した。図5に台車に帆をつけた様子を示す。

実験は、前節と同じく、スキージャンプ台上部のスタートレールに地磁気・加速度センサを固定した台車を停止、スタートレールのレバーを操作して台車を滑走させ、地磁気・加速度センサの出力を記録して行った。帆なし、帆大、

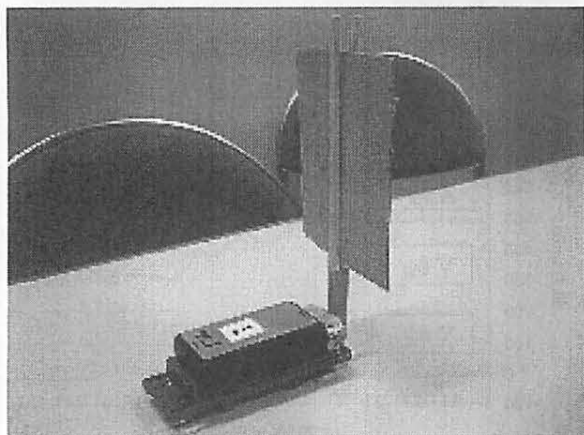


図5 帆をつけた台車

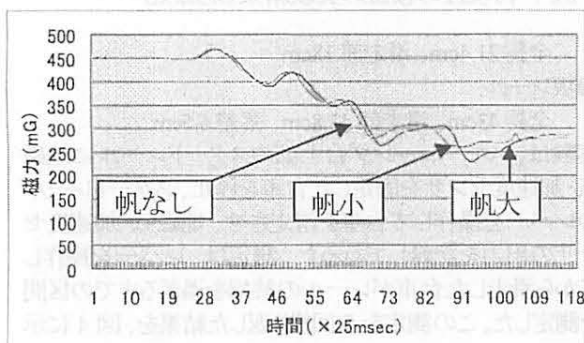


図6 滑降速度の違いの検出

表1 台車の滑走区間の時間

台車の状態	滑走区間における平均時間(秒)
帆なし	2.13
帆小	2.15
帆大	2.20

帆小のそれぞれに対し5回繰り返し測定した。地磁気のY軸方向に対する5回の地磁気センサの出力を平均した結果を図6に示す。

図6をみると、Y軸の地磁気の変化が、帆なし、帆小、帆大の順に時間軸方向に間延びしていくことが読み取れる。これは、帆なし、帆小、帆大の順に台車の滑走速度が遅くなっていることを意味する。おおむね帆の面積に比例する滑走時間である。ただし、各軸の波形は、時間軸方向の長さを無視したとしても、概形が一致していない。これは、台車の大きさに比べて大きな帆を使用したため、空気抵抗や帆を台車に取り付けたときの左右のバランスなどにより、台車の挙動が変わったためと考えられる。これらの実験結果から、スキージャンプにおける滑降速度の違いの検出は十分可能である。

また今回、滑走区間(全長 148.8cm)において、台車が滑走を開始してから終端に達するまでの時間をストップウォッチを用いて測定した。帆なし、帆小、帆大のそれぞれについて、スタートレールのレバーを操作した動作と同時にストップウォッチをスタートさせて測定した。それぞれ5回ずつ測定した結果の平均を表1に示す。地磁気・加速度センサのデータを利用して、滑走区間を通過する時間を求めることができる。その結果、帆なし、帆小、帆大の順に2.13秒、2.15秒、2.20秒となり、ストップウォッチで計測した結果と一致する。ただし、有効数字以下の桁数に若干の誤差が見られた。地磁気・加速度センサのデータから台車の滑走時間を求めることは十分に可能である。

4.3 踏み切りタイミングの違いの検出

本節では、スキージャンプにおける飛距離の変動要因のひとつである、踏み切りタイミングの違いの検出を検証する。ここでジャンプ台の模型は、前節まで使用したものとは異なる形を用いた。これは、前節までのジャンプ台模型はスタート位置から終端までの長さが大きすぎることや、実験の設置環境上傾斜での踏み切りのタイミングが測定しにくく正確なデータが取りにくいためである。よって図7のように、シンプルに踏み切りのタイミングを計れるように、坂レール1本の後に直線レール1本設置して踏み切りのタイミングはクッションの位置で調整する。

今回その設置位置は坂レールの下端から7cm、21cm、35cmとする。これは最初の7cmを固定とし、そこから等間隔でクッションをずらした場合の、台車が止まるタイミングの違いを測定するためである。

クッション以外にも例えば本や雑誌などでも台車を停止させることができるように思われるが、これらは固いため、台車がぶつかったときの跳ね返りがクッションに比べ大きく、衝突した衝撃で脱線し停止のタイミングが分からない。よって、跳ね返りの衝撃による脱線为了避免するため本

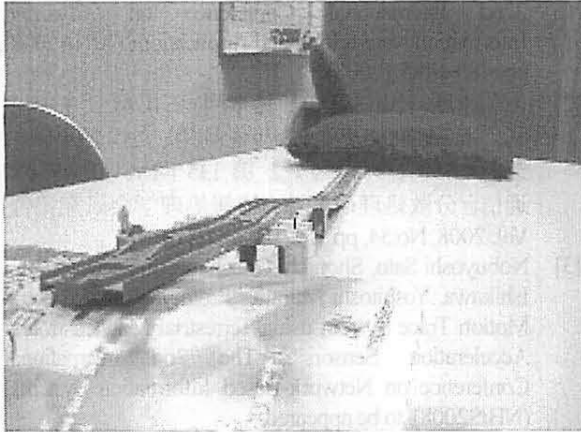


図7 踏み切りタイミング測定用のジャンプ台と踏み切り位置を模したクッション

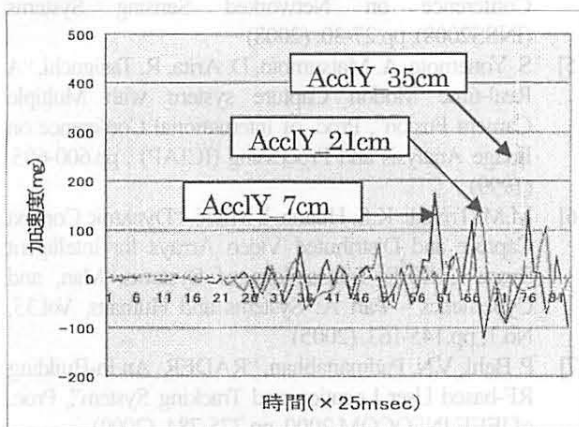


図8 それぞれの踏み切りタイミングの違いの検出

や雑誌に比べて柔らかいクッションを用いることにした。

台車は、帆を取り付けてのスピード調整は必要ないので、6.1節の実験でも使用した図1の台車と同じとした。

この実験においては、踏み切りのタイミングを測定する上で一番関係するY軸方向(すなわち進行方向)の加速度の変化を検証する。この実験は先のクッションに台車が衝突したタイミングがスキージャンパーの踏み切りのタイミングの変化に相当すると考えているため、台車の進行方向の加速度が重要と考えられるからである。

実験は、図7のレール上部に取り付けたスタートレールに地磁気・加速度センサを固定した台車を停止、スタートレールのレバーを操作して台車を滑走させ、加速度センサの出力を記録して行った。踏み切りタイミングの幅を、坂レールの下端から7cm、21cm、35cmと変化させそれぞれ5回繰り返し測定し、それぞれ5回の加速度センサのY軸の平均を求める。この結果を図8に示す。

図8を見ると、7cm、21cm、35cmそれぞれの加速度の最初の大きなピーク(図8で矢印をつけた箇所)がほぼ等間隔ずつずれていることが読み取れる。これは台車がそれぞれの踏み切り位置(クッションの位置)に対して、どこで衝突したかの違いが、Y軸方向の加速度のピークのタイミングの違いとして現れていることを意味する。またそれぞれの加速度が大きく違っている。台車はクッショ

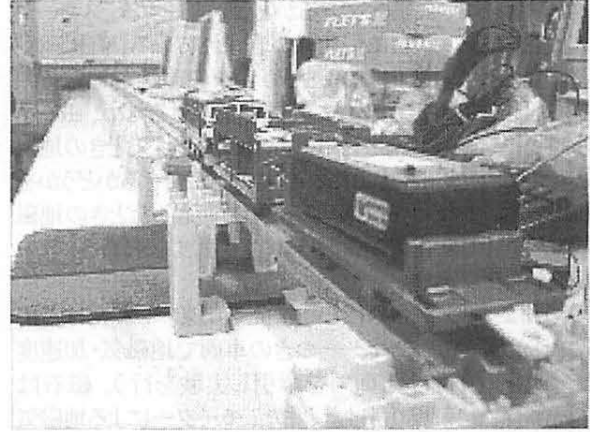


図9 直線運動の速度を検出するための模型

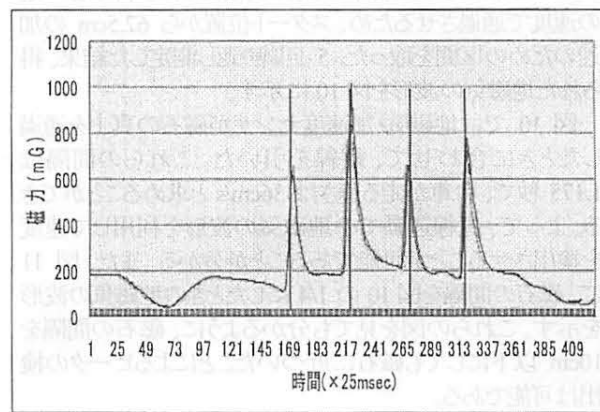


図10 磁石による直線運動の速度測定(43cm 間隔)

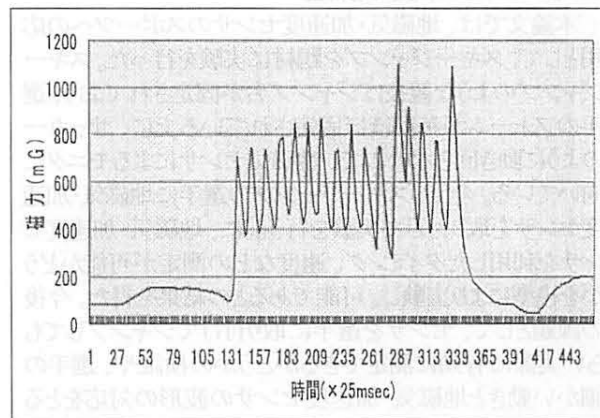


図11 磁石による直線運動の速度測定(10.75cm 間隔)

ンに衝突後、跳ね返されて脱線するが、脱線のしかたは毎回同じではなく、脱線するときに横転したりしなかったりするため、衝突の際の加速度の大きさの違いとして現れると考えられる。この実験では踏み切り位置の違いを加速度のピークの位置、すなわちタイミングの違いとして、地磁気・加速度センサで測定することが可能であるかを検証することが目的であり、加速度の大きさは問題ではない。

4.4 直線運動の時の速度の検出

本節では、直線運動において、スキージャンプにおける飛距離の変動要因のひとつである速度を地磁気・加速

度センサを用いて測定できるかどうか検証する。スキージャンプのジャンプ台にも直線が含まれている。直線運動の場合、方角の変化がないため台車の運動が地磁気の変化として検出できない。この問題を避けるため、磁石を等間隔にレールに貼り付け、台車が通過するときの地磁気のグラフの変化を利用し、速度を測定できるかどうかを確認する。すなわち、磁石の直上を通過したときの地磁気のグラフの変化の時間間隔により速度を求める。その様子を図9に示す。

今回はジャンプ台の代わりに全て直線レールだけで構成された環境で、モーターつきの車両で地磁気・加速度センサを取り付けた車両を牽引し実験を行う。磁石は43cm間隔で4個貼り付けた。また、モーターによる地磁気センサへの影響を減らすため、牽引車と地磁気・加速度センサを取り付けた台車の間に1両挟んだ。台車を一定の速度で通過させるため、スタート位置から62.5cmの加速のための区間を取った。5回繰り返し測定した結果、得られた地磁気の波形を図10に示す。

図10では地磁気・加速度センサが磁石の真上を通過したときに合わせて、縦線を引いた。これらの間隔は1.175秒で、台車が走る速さは36cm/sと求めることができる。よって、直線運動での地磁気の波形を利用して速度を検出させることが可能であることが分かる。また、図11に、磁石の間隔を図10の1/4にしたときの地磁気の波形を示す。これらの図を見ても分かるように、磁石の間隔を10cm以下にしても磁石に近づいたことによるピークの検出は可能である。

7. まとめと今後の課題

本論文では、地磁気・加速度センサのスポーツへの応用として、スキージャンプを題材に実験を行った。スキージャンプのような競技はジャンプ台が固定されており、選手のフォームが毎回ほぼ固定されている上に、サッカーのように動き回らないので、地磁気センサによるモニタに向いている。今回、スキージャンプの選手に地磁気・加速度センサを取り付けて実験を行う前に、地磁気・加速度センサを利用したタイミング、速度などの測定が可能かどうかを模型により実験し、可能であるとの結果を得た。今後の課題として、センサを選手に取り付けてジャンプしてもらい実際に有効に測定できるかどうかの検証や、選手の細かい動きと地磁気・加速度センサの波形の対応をとるためのカメラとの連携などが考えられる。また今回はスキージャンプにおける飛距離の変動要因のひとつである空中姿勢に関しての検証は行っていない。空中での測定が可能であるかどうかの検証をするにあたり、スキージャンプ選手を模した模型に地磁気・加速度センサを貼り付けての空中での挙動の測定を考えている。

参考文献

[1] Nobuyoshi Sato, Yoshitoshi Murata, "Quality Control Schemes for Industrial Products by Workers' Motion Capture", The 2nd International Workshop on Telecommunication Networking, Applications and Systems (TeNAS2008), in conjunction with The IEEE

22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2008), pp.1480-1485. (2008)

[2] 佐藤永欣、小田島昌一、鈴木潤、石川泰二、村田嘉利、『地磁気・加速度センサを利用した作業トレースシステムのプロトタイプ』第135回マルチメディア通信と分散処理研究会、情報処理学会研究報告、Vol. 2008, No.54, pp.153-158 (2008.6)

[3] Nobuyoshi Sato, Shouichi Odashima, Jun Suzuki, Taiji Ishikawa, Yoshitoshi Murata, "Prototype of a Workers' Motion Trace System using Terrestrial Magnetism and Acceleration Sensors", The 2nd International Conference on Network-Based Information Systems, (NBIS2008), to be appeared.

[4] Yoshitoshi Murata, Nobuyoshi Sato, "Production Management System in an Assembly Plant by Terrestrial Magnetism Sensors", Fifth International Conference on Networked Sensing Systems (INSS2008), pp.27-30. (2008)

[5] S. Yonemoto, A. Matsumoto, D. Arita, R. Taniguchi, "A Real-time Motion Capture system with Multiple Camera Fusion", Proc. of International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP) . pp.600-605. (1999)

[6] M.M. Trivedi, K.S. Huang, I. Mikić, "Dynamic Context Capture and Distributed Video Arrays for Intelligent Spaces", IEEE Transactions of Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans, Vol.35, No.1, pp.145-163. (2005)

[7] P. Bahl, V.N. Padmanabhan, "RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System", Proc. of IEEE INFOCOM 2000, pp.775-784. (2000)

[8] T. Kitasuka, T. Nakanishi, A. Fukuda, "Wireless LAN Based Indoor Positioning System WiPS and Its Simulation", Proc. of 2003 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers, and Signal Processing, pp.272-275. (2003)

[9] 小倉正利、峰野博史、寺島美昭、徳永 雄一、水野忠則: RFIDを利用した物品管理システムの精度向上手法に関する研究、情報処理学会マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2007)シンポジウム論文集, pp.1793-1799(2007.7)

[10] 梅本功太、西垣正勝: 人間の動作を用いた認証方式に関する検討、情報処理学会マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2007)シンポジウム論文集, pp.1338-1346(2007.7).

[11] Yonemoto, S. Matsumoto, A. Arita, D. Taniguchi, R.-I, "A real-time motion capture system with multiple camera fusion", in Proc. of International Conference on Image Analysis and Processing, 1999. pp.600-605. (1999)

[12] J. M. Badura, W. G. Raasch, M. P. Barber, G. F. Harris, "A Kinematic and Kinetic Biomechanical Model for Baseball Pitching and its Use In the Examination and Comparison of Flat-Ground and Mound Pitching", IEMBS 2003, Sep. 2003, pp. 1803 - 1806 vol. 2