

Title	スキー初学者のための振動フィードバックを用いたスキー動作における重心移動学習支援
Author(s)	田中, 宏明
Citation	
Issue Date	2023-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/18263
Rights	
Description	Supervisor: 金井 秀明, 先端科学技術研究科, 修士(知識科学)

修士論文

スキー初学者のための振動フィードバックを用いたスキー動作における

重心移動学習支援

田中宏明

主指導教員 金井 秀明

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
(知識科学)

令和5年3月

Abstract

In recent years, the number of people participating in skiing has been declining. According to the Leisure White Paper 2019, skiing, participation has decreased from 7.2 million in 2009 to 3.8 million in 2018, nearly half in about 10 years. The sport of skiing is a sport that takes place in nature and requires a specific location, such as a wide slope as exists in the mountains, and enough snow to run on. Therefore, novice skiers may not be able to practice in the first place because there are no ski resorts nearby or there is no snow on the mountain. Thus, the high hurdle to skiing progression is considered to be one factor in the decline in the number of people participating in skiing. Against this background, previous research has focused on training systems for beginners that utilize ski simulators and on supporting skill learning using sensors. In this study, we utilize a ski simulator to clarify the characteristics between novice and expert skiers based on the sensing data that can be obtained during use and aim to provide feedback of the acquired data to novice skiers to teach them how to improve.

In sports, since physical feedback is considered important for improvement, systems that provide real-time feedback during exercise are widely developed. There are a variety of feedback methods, including visual feedback, which provides feedback through a person's eyes, tactile feedback, which provides feedback by stimulating a person's sense of touch, and auditory feedback, which provides feedback through a person's ears. Our previous research used visual feedback to present the difference between the skier and the expert during exercise. However, visual feedback has the aspect that the feedback affects the movement itself, such as being distracted by the visual information of the feedback. Therefore, we thought that it would be better to feedback information without interfering with the skiing motion. While visual feedback is effective when the subject is in a constant state of movement, as shown in the research on core training, we thought that non-visual feedback might be more effective when the subject is moving quickly, such as in skiing. Studies on tactile feedback and auditory feedback suggest that both are effective for feedback while working. Tactile feedback can be given directly at the point where the transducer is attached to the body, and the intensity of the stimulation can be varied. Auditory feedback differs from tactile feedback in that the only part of the body that receives feedback is the ear. Therefore, in

this study, we considered the possibility of inducing the subject's movement by using vibration feedback that directly stimulates the body, considering the fact that the subject is in motion and that the point does not affect the subject's movement.

In addition, one of the important factors in the skiing motion is the motion of the center of gravity and the skis in conjunction with the skis during the transition from one turn to the next. We thought that if we could support the center of gravity movement in the skiing motion, the efficiency of skiing improvement would increase. Therefore, in this study, we utilize a ski simulator to clarify the characteristics between beginners and experts based on the sensing data that can be obtained during use and provide real-time vibration feedback of the acquired data to beginners to support their learning of center of gravity movement.

In this study, a VibroTransducer vp210 was used for vibration feedback. The amplifier required for the transducer that generates the vibration was used with a Bluetooth-capable amplifier to enable wireless communication between the vibration device and a PC. In addition, since it vibrates during skiing, it may interfere with skiing when connected by wire. Therefore, we used a Bluetooth amplifier module, XY-P15W, which enables wireless communication to minimize the impact on skiing. By using wireless communication between the amplifier and the PC that outputs the audio, wiring can be eliminated. In addition, the use of a small amplifier module instead of a large commercially available amplifier makes it suitable for vibration feedback during skiing, since it is less likely to be disturbed during exercise.

Translated with www.DeepL.com/Translator (free version)

In the experiment, novice skiers were divided into two groups: one with and one without the vibrating device, and the group with the system practiced while receiving vibration feedback during practice. The data from the test runs will be treated as an evaluation of the results. The number of experiments was one run in the condition before starting practice, seven practice runs, and seven test runs, for a total of 15 runs. Because of the large number of runs, it was deemed difficult to complete all of them in one experiment, so the number of experiments was divided into four sessions and conducted twice a week for two weeks.

The method of analyzing the experimental results was to calculate the center of gravity based on the pressure data acquired, and to calculate the error between the movement of the center of gravity of the skilled person and that of the subject. By looking at the trend of the calculated error, the presence or absence of improvement is evaluated. The error is calculated by using the average absolute error for the center-of-gravity data in the time series data. The error of each test is calculated in comparison with that of the expert, and the change is evaluated by repeating the number of trials. Calculations are performed on the x-coordinate and y-coordinate of the center-of-gravity data, respectively. Since different subjects have different physiques and weights, which can cause differences in the pressure applied to the boots, the center-of-gravity data of the skilled and the subject are normalized before calculating the error with the skilled.

In the post-experiment questionnaire, several subjects commented that it was difficult for them to move their bodies immediately after the vibration. Changing one's own movements immediately after real-time feedback is difficult and needs to be considered.

However, although it is difficult to reflect one's own movement immediately after real-time feedback, there were signs that one can improve one's movement based on feedback that comes repeatedly in the case of repetitive movements such as skiing. In addition, the results of the post-experiment questionnaire suggested that the system was able to recognize the direction of vibration during the skiing motion.

Although load data was used in the experiment with respect to the evaluation of skiing progress, feedback through vibration is a direct stimulus to the body and may lead to correction of posture in the given area. It is thought to help correct posture, but since only load data was used in this study, the effect could not be verified. Posture data could also be used to further validate the usefulness of this system.

目次

第1章 はじめに	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 本論文の構成	3
第2章 関連研究	4
2.1 スキー学習支援に関する研究	4
2.2 視覚フィードバックに関する研究	8
2.3 触覚フィードバックに関する研究	9
2.4 聴覚フィードバックに関する研究	11
2.5 本研究の位置づけ	13
第3章 振動フィードバックシステムの開発	15
3.1 概要.....	15
3.2 使用する機器	16
3.3 振動部分機材	18
3.4 振動部分システム	19

3.5 無線通信.....	22
3.6 振動制御.....	23
第4章 実験・評価.....	25
4.1 予備実験.....	25
4.1.1 予備実験1	25
4.1.2 予備実験2	29
4.2 本実験	34
4.2.1 本実験の目的	34
4.2.2 本実験の方法	34
4.2.3 本実験の分析方法.....	37
4.2.4 本実験の結果.....	38
4.2.5 アンケート結果	43
4.3 考察.....	47
第5章 おわりに	52
5.1 本研究の結論	52
5.2 今後の展望と課題	53
謝辞	55
付録	57

各被験者の重心誤差	57
参考文献	60

図目次

図 2-1:圧力分布センサ [3]	5
図 2-2 : 仮想空間の様子 [3].....	5
図 2-3:システムの使用の様子 [4].....	6
図 2-4:特徴分類を表したヒートマップ [5]	7
図 2-5 熟練者と初心者の荷重データのマッピング [6].....	8
図 2-6 三次元モデルのフィードバックの様子 [9].....	9
図 2-7:腹部触覚提示の様子 [10]	10
図 2-8:腰痛警告システムの仕組み [13].....	11
図 2-9:システム図 [7].....	12
図 2-10:ジャグリングスキル向上支援システムのイメージ [11].....	12
図 3-1:振動装置図.....	16
図 3-2:PRO SKI SIMULATOR.....	17
図 3-3: バイブロトランスデューサ Vp210	17
図 3-4:XY-P15W.....	19
図 3-5: 振動の仕組み図.....	20

図 3-6: ランニング用ベルト内側	21
図 3-7:装着の様子(前側)	21
図 3-8:装着の様子(後ろ側).....	22
図 3-9:無線通信図.....	23
図 4-1:装着パターン 1	26
図 4-2:装着パターン 2	26
図 4-3:装着方法アンケート結果	27
図 4-4:振動フィードバックの感じやすさ(前後左右)アンケート結果	28
図 4-5:振動フィードバックの感じやすさ(左前右前左後右後)アンケート結果	28
図 4-6:静止した状態での振動方向の認識アンケート結果	30
図 4-7:装着方法アンケート結果	31
図 4-8:振動フィードバックの感じやすさ(前後左右)アンケート結果	31
図 4-9:振動フィードバックされた方向(前後左右)アンケート結果	32
図 4-10:振動フィードバックの感じやすさ(前後腹部)アンケート結果	32
図 4-11: 振動フィードバックされた方向(前後腹部)アンケート結果	33
図 4-12:本実験流れ.....	37
図 4-13:x 重心誤差(システムあり).....	39

図 4-14:x 重心誤差(システムなし).....	40
図 4-15:y 重心誤差(システムあり).....	41
図 4-16:y 重心誤差(システムなし).....	41
図 4-17:トータル重心誤差(システムあり).....	42
図 4-18: トータル重心誤差(システムなし).....	43
図 4-19:振動フィードバックによるスキー動作への妨げの有無アンケート 結果.....	43
図 4-20:振動フィードバックによる混乱の有無アンケート結果.....	44
図 4-21:振動フィードバックの感じやすさアンケート結果.....	44
図 4-22:振動フィードバックされた方向の認識アンケートの結果.....	45
図 4-23:A さん重心誤差(システムあり).....	48
図 4-24:G さん重心誤差(システムなし).....	49
図 4-25:I さん重心誤差(システムなし).....	49

表目次

表 3-1: 振動フィードバックに使用する機材.....	19
表 3-2:振動方向決定式.....	24
表 4-1:予備実験 1 被験者.....	25
表 4-2:予備実験 2 被験者.....	29
表 4-3 予備実験 2 自由記述	33
表 4-4:本実験の被験者.....	36
表 4-5:本実験アンケート自由記述 1.....	46
表 4-6:本実験アンケート自由記述 2.....	47
表 4-7: 被験者インタビュー内容	50

第1章 はじめに

1.1 研究背景

近年、スキーの参加人口が減少している。レジャー白書 2019 によると、スキー、参加人口の推移は 2009 年の 720 万人から 2018 年に 380 万人と約 10 年間で半分近くまで減少している [1]。スキーというスポーツは自然の中で行うため、山に存在するような広い斜面のような特定の場所と、滑走するのに十分な雪を必要とするスポーツである。そのため、スキー未経験者が新たにスキーを始めたいとしても近くにスキー場がない、山に雪がないなどの理由でそもそも練習をすることができないといった場合がある。どのようなスポーツであってもスポーツを楽しめるようになるためには、最低限の練習が必要である。しかし、スキーでは先に挙げた理由などから練習のハードルが高いため、結果としてスキー未経験者がスキーを楽しめるレベルに上達するまでの難易度も高くなってしまっている。このスキー上達に対するハードルの高さが、スキー参加人口減少の一つの要因であると考えられる。このような背景から先行研究では、スキーシュミレータを活用した初級者向けのトレーニングシステムや、センサを用いたスキル学習支援に関する研究が行われている [2] [3] [4] [5] [6]。また、スポーツにおいて運動に対するフィードバックは上達する上で重要だと考えられているため、

運動中にリアルタイムフィードバックをするシステムの開発も行われている [6] [7] [8]。フィードバックには様々な方法が存在し、運動スキル支援や姿勢支援には視覚フィードバックを用いた研究 [6] [9]、触覚フィードバックを用いた研究 [10]、聴覚フィードバックを用いた研究 [7] [11]のように多様なアプローチがとられている。

1.2 研究目的

前節で述べたように、スキーを含むスポーツ全般において効率的なトレーニングのために、センサや機械を駆使したシステムが広く開発されている、我々の研究室においても、スキーシュミレータ上での初心者と熟練者の荷重移動の差を視覚フィードバックで提示するシステムを開発している [6]。しかし視覚フィードバックは、ユーザーがフィードバックの視覚情報に気を取られることにより、フィードバックが運動そのものに悪影響を与える可能性がある。このことから、スキー動作を妨げない新たなフィードバック機能の実現が必要だと考えた。また、スキー動作において一つのターンから次のターンへの切りかえ局面において重心とスキー板の連動した運動が重要な要素の一つとなっている [12]。そこでスキー動作における荷重データを取得し、取得した荷重データを基にスキー動作における重心移動の支援をリアルタイムフィードバックによっ

て行うことができればスキー上達への効率が上がると考えた。そこで本研究ではスキーシミュレータを活用し、圧力センサからの荷重データから初心者と熟練者間の特徴を明らかにし、取得したデータを初心者にリアルタイムに振動フィードバックし初心者の重心移動学習支援を目指す。

1.3 本論文の構成

第 1 章では研究背景と研究目的について述べた。第 2 章では関連研究についてスキー学習支援に関する研究、フィードバックの方法に関する研究の順に述べる。3 章では本研究で制作したシステムの説明や技術、使用機材について説明を行う。第 4 章では第 3 章で述べたシステムを用いて行った、予備実験、本実験について述べる。第 5 章では本研究の結論と今後の展望について述べる。

第2章 関連研究

本研究に関する関連研究について紹介する。初めに、スキー学習支援に関する研究をとりあげ、次にフィードバックの方法に関する研究を、視覚フィードバック、触覚フィードバック、聴覚フィードバック各フィードバック方法に関する研究を紹介する。

2.1 スキー学習支援に関する研究

増永ら [3]は圧力分布センサ(図 2-1)の上に立っている学習者の重心移動の様子を仮想空間内(図 2-2)の人型モデルに反映させるスキーのスキル学習支援システムを開発した。スキーの基本姿勢である前傾姿勢を定着させるため、圧力分布センサの値によって、後傾姿勢と認識した場合は人型モデルを赤く点滅させることで学習者に後傾姿勢であることを知らせる。



図 2-1:圧力分布センサ [3]

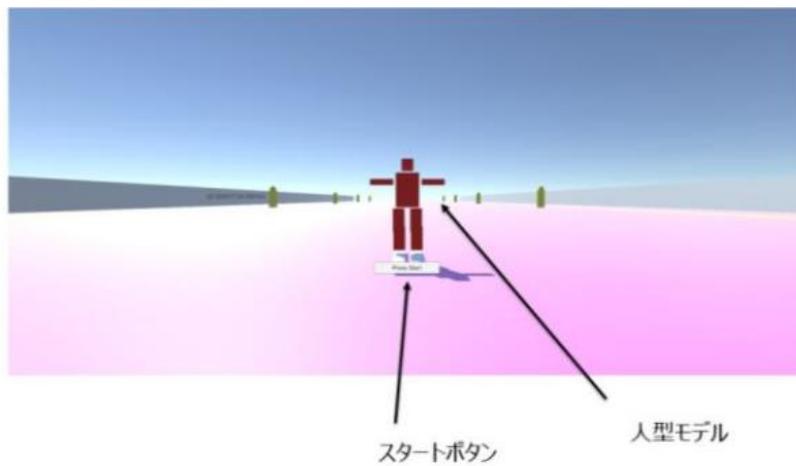


図 2-2 : 仮想空間の様子 [3]

また Wu ら [4]は屋内スキーシュミレータと VR システム(HTC Vive Pro³¹)を用いて VR スキートレーニングシステム「VizSki」を開発した。図 2-3 のように

¹ <https://www.vive.com/eu/product/vive-pro/>

使用者はヘッドマウントディスプレイ上で映しだされている模範となる白いアバターを追うようにしてスキーシュミレータ上で滑走する。前方にロールモデルを映し出すことで使用者は熟練者の真似をするようにしてトレーニングを行うことができる。



図 2-3:システムの使用の様子 [4]

渥美ら [5]は Wu ら [4]の開発した VR スキートレーニングシステム「VizSki」を基に、足の圧力や姿勢といった取得可能なセンシングデータを用いて深層学習を行い初心者と熟練者との間の特徴を段階的に分類するシステムを開発した。姿勢データについては分類できない部分もあったが、荷重データについては熟練者と初心者を高精度に分類することができた(図 2-4)。

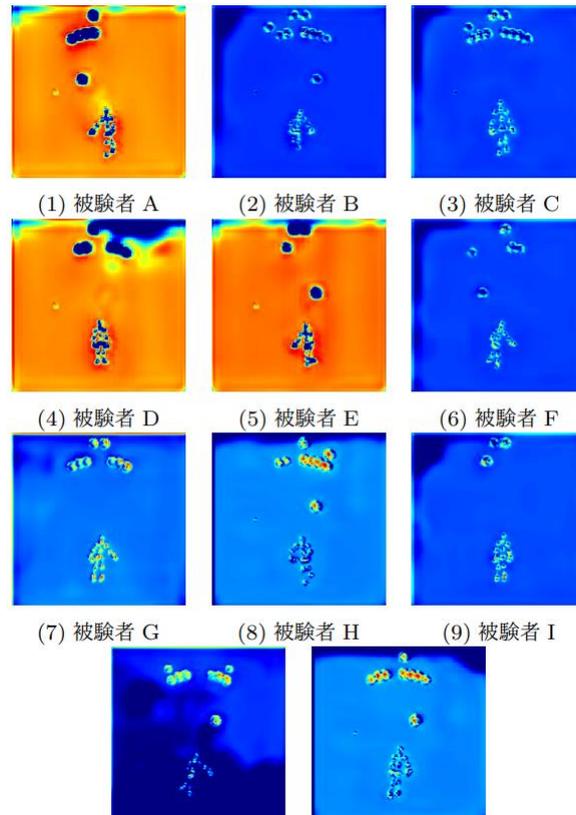


図 2-4:特徴分類を表したヒートマップ [5]

さらに小野ら [6]は渥美ら [5]の開発したシステムを基に、スキー動作中の重心の位置を熟練者の位置と被験者の位置を視覚フィードバックによって提示するスキー初学者のための学習支援システムを開発した。取得した荷重データと熟練者の荷重データをディスプレイ上にリアルタイムにマッピングすることで被験者に視覚的に荷重移動の差を提示することができる(図 2-5)。評価実験では渥美ら [5]の開発した分類したシステムを用いて初心者が上達をしているかの評価を行った。評価の結果、全くスキー経験のない被験者に対してはシステムを

使用したことによる上達傾向が見られた。



図 2-5 熟練者と初心者の荷重データのマッピング [6]

2.2 視覚フィードバックに関する研究

綿谷ら [9]はカメラ画像を用いた体幹トレーニングの姿勢支援手法を提案した。体幹トレーニングの様子をカメラで撮影し、被験者の姿勢と目標姿勢の差を三次元モデルでユーザーにフィードバックする (図 2-6)。姿勢を 3D モデルに変換することで視覚フィードバックを実現させており、生成した 3 次元モデルは前からの視点と横からの視点の 2 視点で提供している。入力画像からの視点の切り替え機能と、3D モデルによる視覚フィードバックは姿勢把握のしやすさにつながったという実験結果が報告されている。



図 2-6 三次元モデルのフィードバックの様子 [9]

2.3 触覚フィードバックに関する研究

川崎ら [10]はバランス Wii ボード²から取得した足圧中心 の位置を利用し PC を介して処理を行うことで、リアルタイムで触覚提示を行うシステムを開発した。図 2-7 に示すように振動アクチュエータを前後左右の 4 方向に取り付け、誘導する方向に振動による触覚提示を行う。バランス Wii ボードから取得した情報を基に PC 内で誘導したい方向の計算を行い、振動を発生させている。

² <https://www.nintendo.co.jp/wii/rfnj/>



図 2-7:腹部触覚提示の様子 [10]

川野ら [13]は図 2-8 に示す荷役作業をしている人に対して腰に振動子を装着し、振動フィードバックによってユーザーに危険を知らせる荷役作業中の腰痛警告システムを開発した。このシステムでは、モーションキャプチャーで作業者の姿勢を測定し、測定した姿勢から作業者への腰にかかる負担を計算することで腰痛に対する危険度を数値化している。振動による警告のため他の作業に集中していても気づくことができるといった触覚フィードバックの特徴を用いてシステムを構築している。

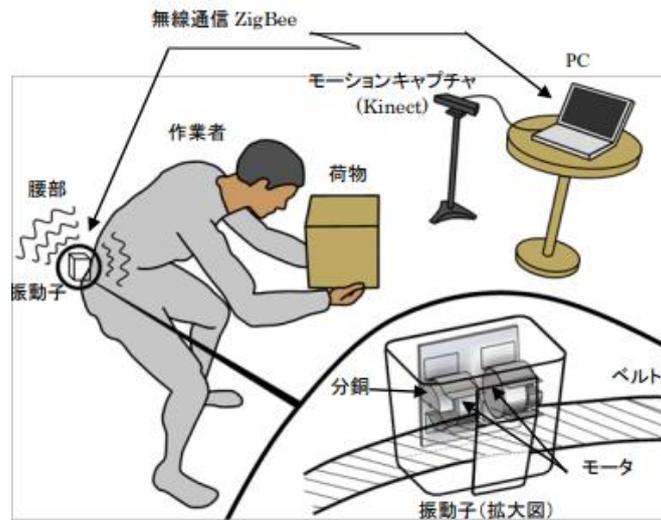


図 2-8:腰痛警告システムの仕組み [13]

2.4 聴覚フィードバックに関する研究

また、小山ら [7]はランニング中に聴覚フィードバックを行うシステムを開発した。図 2-9 に示すように、スポーツウェアの表面に取り付けているセンサによって走行中の足の繰り返し動作における動作範囲データを取得し、取得したデータを基にフィードバックを行う。一定間隔ごとに取得したデータが基準値を満たしているかどうかの判定が行われ、満たしていない場合と満たしている場合でそれぞれ対応する声掛けを行う。また、一定間隔に対して歩数が足りていない場合基準となる回数と同じテンポの tap sound が出力される。

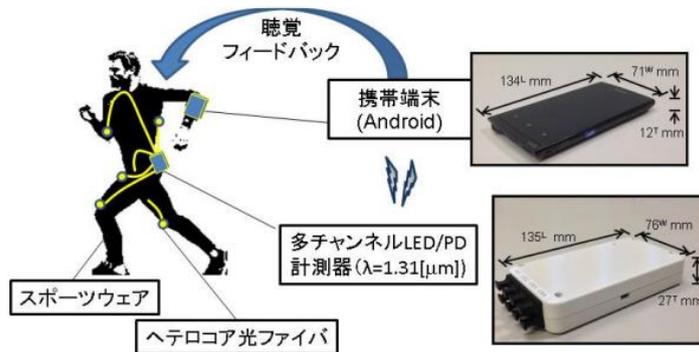


図 2-9:システム図 [7]

萬 絵ら [11]はジャグリングにおける 3 ボールカスケード動作のスキル習得支援のための聴覚フィードバックによるリアルタイムの支援システムを開発した。図 2-10 に示すように被験者の腕に加速度センサである AndroidWatch を装着し、加速度センサの情報を基にフィードバックを行う。カスケード動作に改善すべき点があった場合には改善すべき点に対応する、あらかじめ決められた音を流し、被験者にフィードバックを行う。

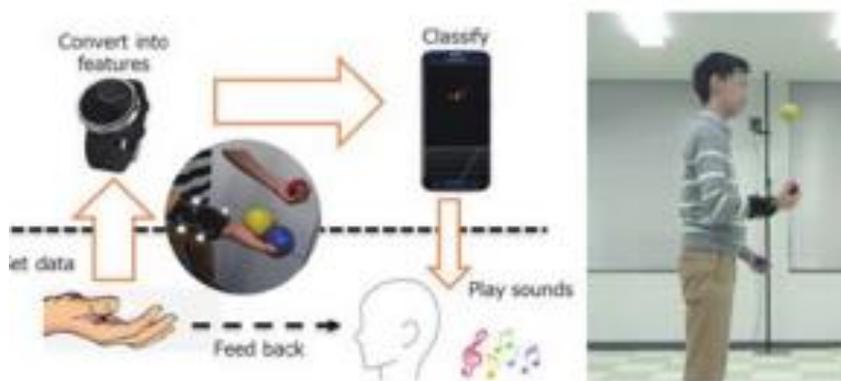


図 2-10:ジャグリングスキル向上支援システムのイメージ [11]

2.5 本研究の位置づけ

本章ではスキー学習に関する研究と視覚、触覚、聴覚を用いた 3 つのフィードバック支援に関する研究について紹介した。スキー学習に関する先行研究の知見から、スキーシュミレータなどで被験者がスキー運動をしている最中のセンサデータを取得し、そのセンサデータをもとに何らかのフィードバックを与える支援は有効だと考えられる。また、フィードバック手法に関する先行研究の知見から、視覚フィードバックは体幹トレーニング [9] のようにある程度静的な作業でのフィードバックに多く使われているのに対して、触覚フィードバックと聴覚フィードバックは荷役作業 [13] やランニング [7] など作業をしながらのフィードバックに使われていることが分かった。触覚フィードバックは振動子を着けた箇所に直接刺激を与えることができ、さらに刺激を与える強さも変えることができるという利点がある。これに対して聴覚フィードバックは耳を介してのみ刺激を与えることができる。また、聴覚フィードバックの先行研究では、被験者の状態に応じて音声を流すなどの声掛けのフィードバックのものが多く、出力の大きさを変えてフィードバックの強さを変えるような研究は見られなかった。

そこで本研究では、運動中の諸動作に悪影響の出ないフィードバック手法と

して、体に直接刺激を与える振動フィードバックを用いて、被験者の重心移動を誘導するフィードバックを介してスキー初心者の技術習得を支援する。

第3章 振動フィードバックシステムの開発

3.1 概要

本研究では、スキーシュミレータを用いて、図 3-1 のように、熟練者の荷重データを基に、スキー初心者にスキーの重心移動支援を振動によるリアルタイムフィードバックで行う。

室内にスキーシュミレータとディスプレイを用意し、スキーシュミレータの前方にディスプレイにシステムが表示される。システム上では仮想のスキー場とロールモデルが表示されており、そのロールモデルのターンの動きに合わせて被験者は滑走を行う。また、本研究のスキーシステムは先行研究 [4] [5] [6] のものを使用した。

荷重データの取得は先行研究 [5] [6] のシステムを利用し、スキーシュミレータのブーツの中に圧力センサを入れることでスキー滑走時の荷重データを取得している。フィードバックには振動を用い、図 3-2 のように振動子を体の腰の周りに前後左右の 4 方向に装着し触覚提示を行う。スキー環境については実際のスキーではなくスキーシュミレータを用いた室内で行う環境としている。

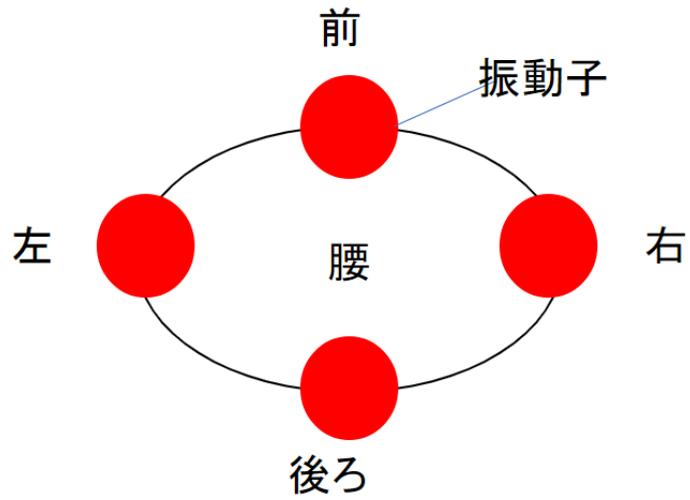


図 3-1:振動装置図

3.2 使用する機器

使用機器としてバイブロトランスデューサ Vp210(Acouve Laboratory, Inc)(図 3-3)、PRO SKI SIMULATOR(POWER SKI SIMULATOR)(図 34)を使用した。



図 3-2:PRO SKI SIMULATOR



図 3-3: バイブロトランスデューサ Vp210

3.3 振動部分機材

振動フィードバックに用いる振動子はバイプロトランスデューサ Vp210(Acouve Laboratory, Inc³)を使用している。本振動子はボイスコイル型の振動アクチュエータであり、スピーカーと動作原理が同じである。そのため、市販のオーディオアンプなどを用いて駆動することができる。岩田ら [14]はバイプロトランスデューサを用いて足裏感覚を操作し、歩行動作を変化させるシューズを開発した。関連研究では駆動に使用しているアンプを有線のものを使用しているが、本研究ではスキー動作中に振動を与えるため、有線でつなぐ場合スキー動作の邪魔になる可能性がある。そこで、スキー動作への影響が少なくするため、無線通信を行える Bluetooth アンプモジュール、XY-P15W(図 3-5)を使用した。音声を出力する PC とアンプとの間を無線にすることで配線無くすことができる。また、市販の大きなアンプではなく、小型のアンプモジュールを使用しているため運動中の邪魔になりづらくスキー動作中の振動フィードバックには適している。

³ http://acouve.co.jp/product/pd_vp2.html

表 3-1: 振動フィードバックに使用する機材

機材名	機材の種類
振動アクチュエータ	バイプロトランスデューサ vp210
アンプモジュール	XY-P15W



図 3-4:XY-P15W

3.4 振動部分システム

バイプロトランスデューサ vp210 を振動させる仕組みは図 3-6 に示すように、オーディオアンプを介して 100hz の正弦波の音を流し振動に変換させている。一つのオーディオアンプには 2 つの振動子がつながっており、振動の大きさの制御は PC から出す音の大きさを変化させることで制御している。

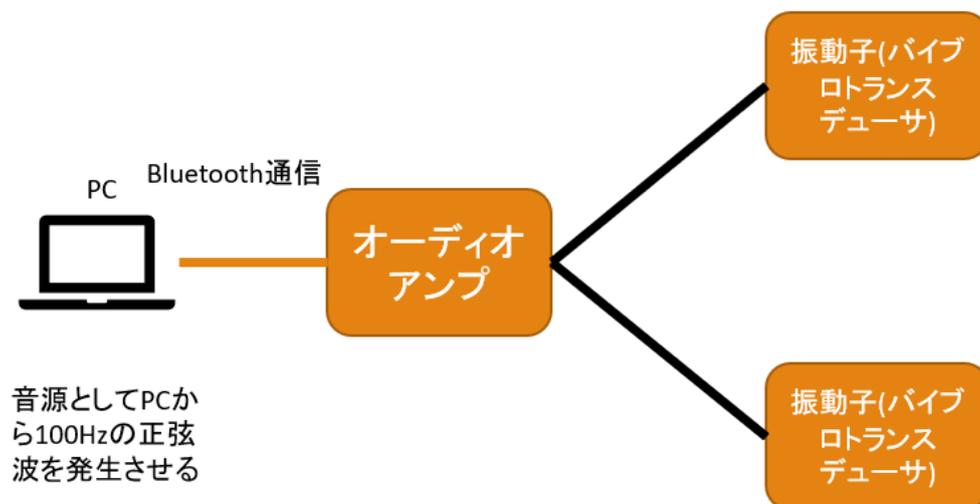


図 3-5: 振動の仕組み図

オーディオアンプの電源には充電式の 9V 電池を使用している。振動装置の装着については、振動子はランニング用ベルト(図 3-7)の内側ポケットにアンプと電池を入れ腰とランニングベルトの隙間に振動子を挟むようにする。(以下これら一体となったものを振動モジュールと呼ぶ)振動子の装着の様子は図 3-8(前側)、図 3-9(後ろ側)に示すとおりである。また、使用しているアンプモジュールはチャンネルが二つしかないため、4つの振動子を駆動させるために二つのアンプモジュールを用意した。



図 3-6: ランニング用ベルト内側

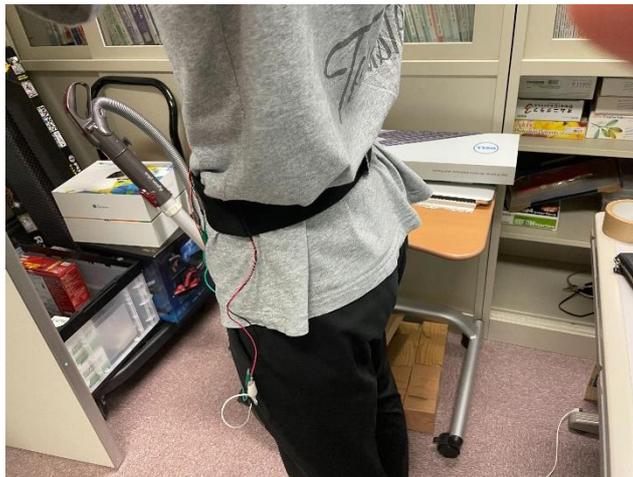


図 3-7: 装着の様子(前側)



図 3-8:装着の様子(後ろ側)

3.5 無線通信

振動モジュールはスキーの運動の妨げにならないために有線ではなく無線で PC とのやり取りを行っている。振動モジュールの中のアンプは Bluetooth 通信によって PC とやり取りを行う際、Bluetooth のプロファイルの問題のため、一つの PC には 1 つのアンプモジュールしか接続できないといった制約が存在する。本実験では 1 つのアンプモジュールに対して 2 つの振動子、4 つの振動子を使用する場合二つのアンプモジュールを必要とする。そこで 4 つの振動子を制御するために二つの PC を用意し、それぞれに Bluetooth アンプモジュールを接続することによって制御することにした。PC とアンプの接続の全体の概要は図 3-10 に示す。

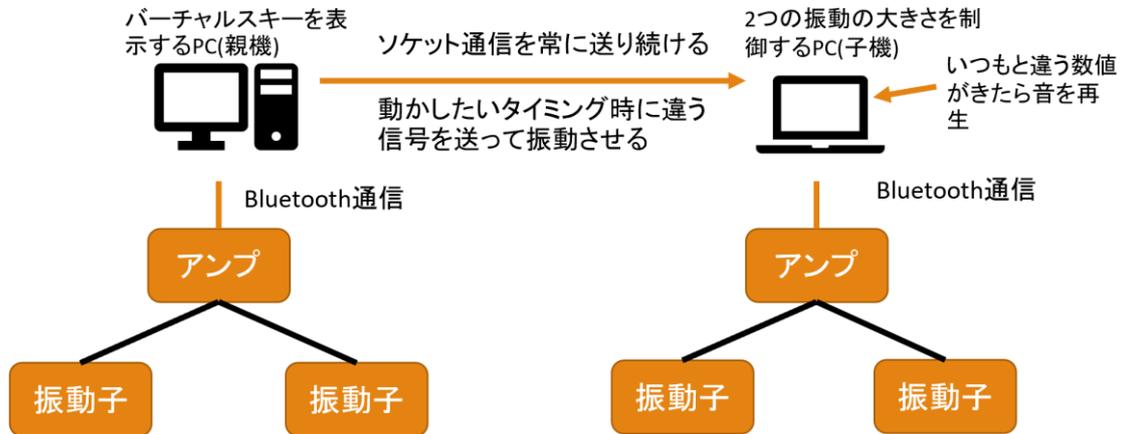


図 3-9:無線通信図

Bluetooth 接続された PC 同士の通信は異なる機器同士での通信に使えるソケット通信を用いて実装した。なお先行研究のスキーシステム [4] [5] [6]は Unity で実装されているが、ソケット通信は異なるアプリケーションでも行えるため、子機側は親機側の Unity 上で起動しているスキーシステムに依存しなくてもよいことから、本実験では Processing を用いてソケット通信を受信した。図 3-10 に示している通り、スキーシステムを表示させる方の PC を親機として、もう一方の子機側の PC に常にソケット通信で信号を送り続けている。そして、振動をさせたいタイミングになった時に通常時とは異なる信号を送り、受け取った子機側はその信号に対応する音を流して、振動子を振動させる。

3.6 振動制御

振動子が振動するタイミングは圧力センサにより取得した圧力データを基

に重心を計算し、初心者のリアルタイムの重心と熟練者の重心を比較して熟練者の重心の方向に振動を発生させている。熟練者の x 重心を `expertxcenter`、y 重心を `expertycenter` 被験者の x 重心を `beginnerxcenter`、y 重心を `beginnerycenter` として以下の表の通りに振動方向を決定した。振動の強さについては熟練者と初心者との重心の差が大きくなるほど振動の強さを強く、差が小さくなる振動の強さを弱く設定した。

表 3-2:振動方向決定式

条件式	振動方向
$\text{expertxcenter} - \text{beginnerxcenter} < 0$	右側
$\text{expertxcenter} - \text{beginnerxcenter} > 0$	左側
$\text{expertycenter} - \text{beginnerycenter} > 0$	前側
$\text{expertycenter} - \text{beginnerycenter} < 0$	後ろ側

第4章 実験・評価

4.1 予備実験

制作した振動装置の振動子をスキー動作の重心移動学習支援に使用できるのかどうかを検証するため予備実験を2回行った。

4.1.1 予備実験1

振動子の取り付け方について2通りのパターンを試し、どちらの方が効果を見込まれるのかを検証するために被験者3名に対し、予備実験を行った。表4-1に被験者のスキー経験、滑走方法を示す。

表 4-1:予備実験1 被験者

被験者	スキー経験	滑走方法
Aさん	100日以上	パラレル
Bさん	なし	—
Cさん	4日以上	ボーゲン

※滑走方法について：被験者に可能な滑走方法についてボーゲンかパラレルかを回答してもらった。また未経験者の場合には「—」と表記している。

振動子の取り付け方は装着パターン1(前後左右、図4-1)装着パターン2、(左

前右前左後ろ右後ろ、図 4-2)の 2 通りバージョンの 2 通りであり、図 4-1 である。

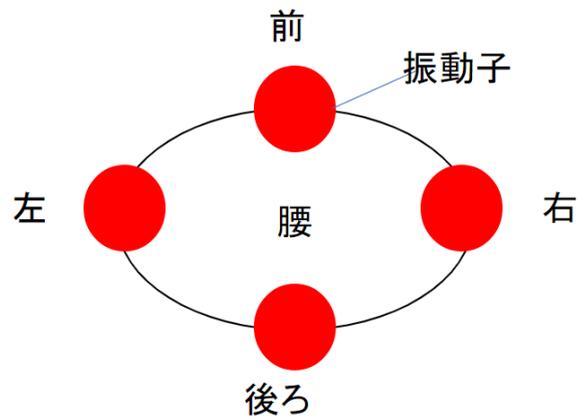


図 4-1:装着パターン 1

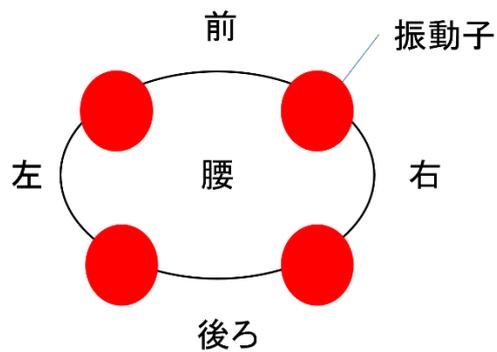


図 4-2:装着パターン 2

実験方法はシステムになれるためのテスト走行のための装着なしと、二つのバージョンをそれぞれ装着してもらい、画面前方のお手本を参考に計 3 回キーシュミレータを用いて滑走してもらおう。その際に一定時間間隔であらかじめ設定した順番に従って特定の方向に振動を送る。振動の種類は、右、左、前、後

ろ、右と前、右と後ろ、左と前、左と後ろの 8 種類を計 2 回ずつ振動させる。
ただし、装着パターン 1 では前のみが振動した時に前方向、装着パターン 2 で
は右前と左前が振動した時に前方向と解釈し、感じた方向に重心移動を行う。実
験終了後、主観的評価のアンケートを取る。実験後のアンケート結果は図 4-3、
図 4-4、図 4-5 の通りである。

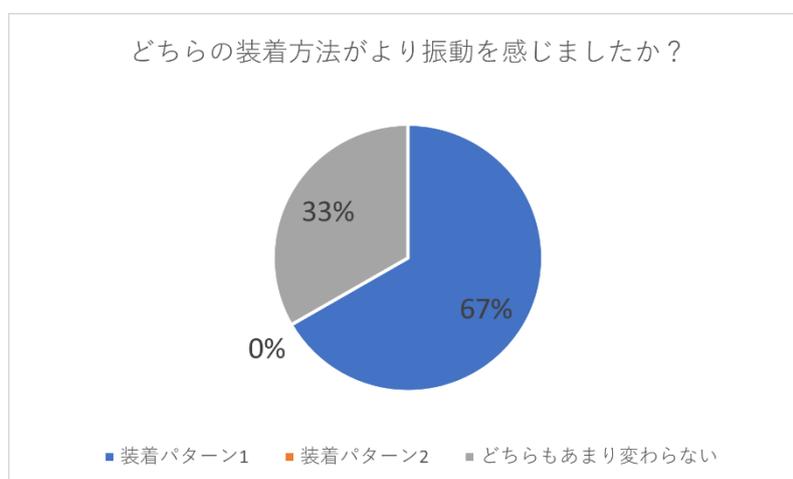


図 4-3:装着方法アンケート結果

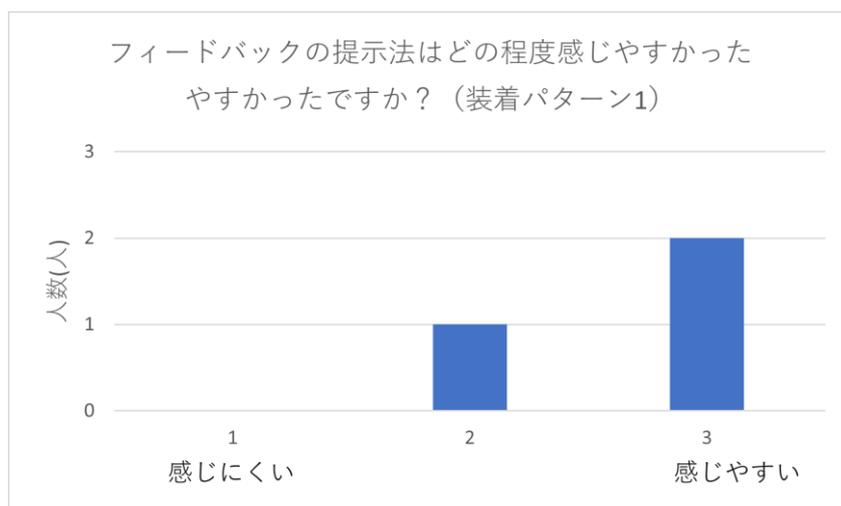


図 4-4:振動フィードバックの感じやすさ(前後左右)アンケート結果

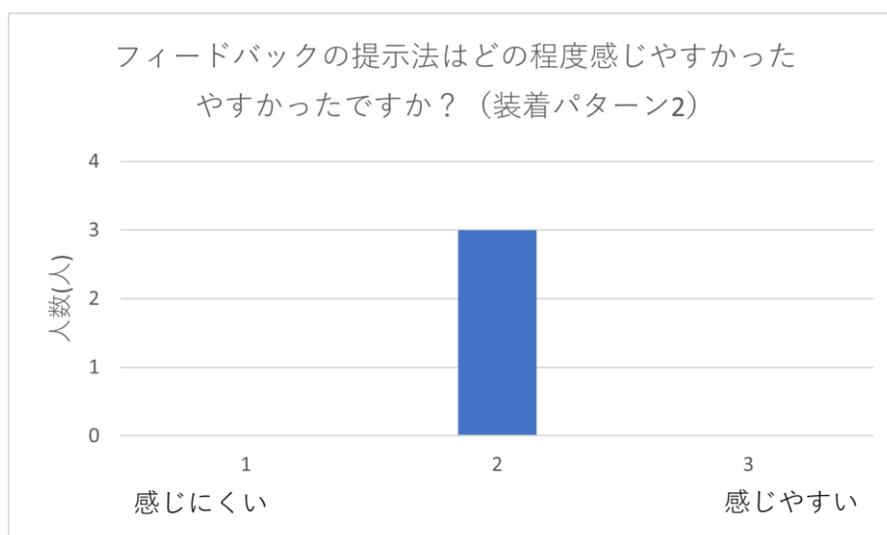


図 4-5:振動フィードバックの感じやすさ(左前右前左後右後)アンケート結果

各装着方法の個別評価(図 4-4、4-5)では、装着パターン 1 で「感じやすい」が 2 件と「どちらでもない」が 1 件、装着パターン 2 で「どちらでもない」が 3 件という結果となった。装着パターン 1 の方が感じやすいと回答した被験者が

多かったため装着パターン 1 を採用することとした。しかし、3 名ともスキー動作中に振動した方向に重心移動を行おうとするとスキー動作を中断してしまい、スキー動作中に振動した方向が認識できているのかが分からないといった課題が発生した。そこで予備実験 2 においてスキー動作中に振動した方向が認識できるのかを検証することとした。

4.1.2 予備実験 2

予備実験 2 では 4.1.1 で述べたようにスキー動作中に振動した方向が認識できるのかについて検証する。また装着方法について従来は腰回りの同一円周上に装着しているが、前後のみ腹部にするなど前後と左右でつける高さを変えることによってフィードバックをより感じやすくなるのではと考え、フィードバックの提示方法を前後のみ腹部、左右は腰の高さに装着するものと、従来の 2 パターンで検証した。今回は 3 名の被験者に対し予備実験 2 を行った。被験者のスキー経験、滑走方法を表 4-2 に示す。

表 4-2:予備実験 2 被験者

被験者	スキー経験	滑走方法
A さん	4 日以上	ボーゲン
B さん	なし	—
C さん	なし	—

※滑走方法について：被験者に可能な滑走方法についてボーゲンかパラレル

かを回答してもらった。また未経験者の場合には「—」と表記している

まず、スキー動作中の前に静止した状態で振動した方向が認識できるのかを検証した。静止した状態の結果は図 4-6 の通りである。

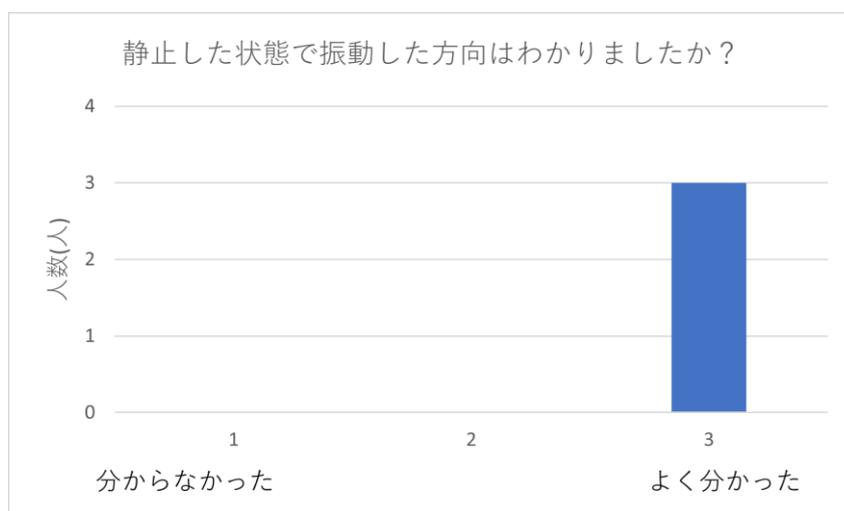


図 4-6:静止した状態での振動方向の認識アンケート結果

結果は 3 名ともしっかりと振動した方向を感じることができた。この結果から静止した状態では振動した方向が認識できることが示された。

続いてスキー動作中に振動方向が認識できるのかを検証した。その際に従来の前後左右バージョン、前後のみを腹部に装着した前後腹部バージョンの 2 パターンを試し、どちらの方が振動を感じやすいのかも検証した。アンケート結果は図 4-7~図 4.11 の通りであり、表 4-3 に自由記述の回答を示す。

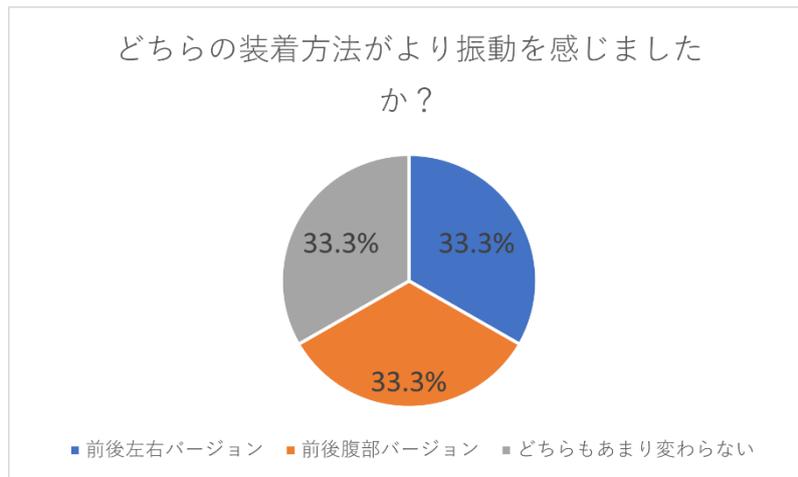


図 4-7:装着方法アンケート結果

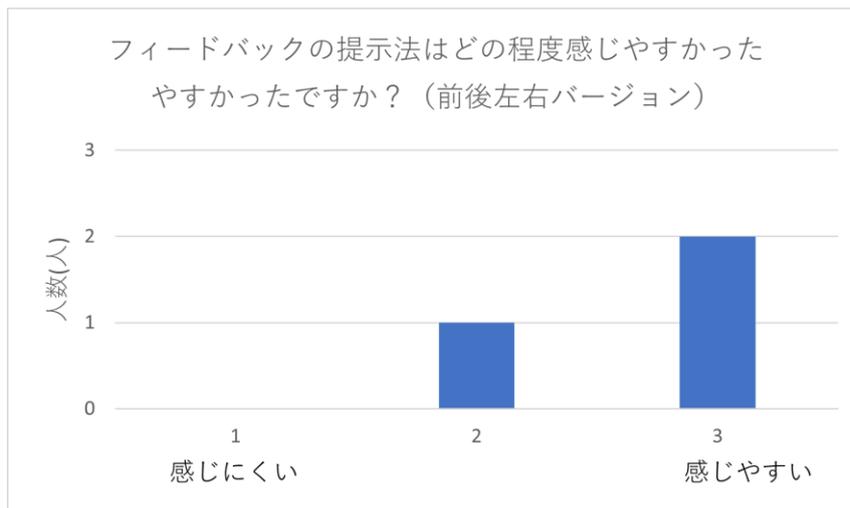


図 4-8:振動フィードバックの感じやすさ(前後左右)アンケート結果

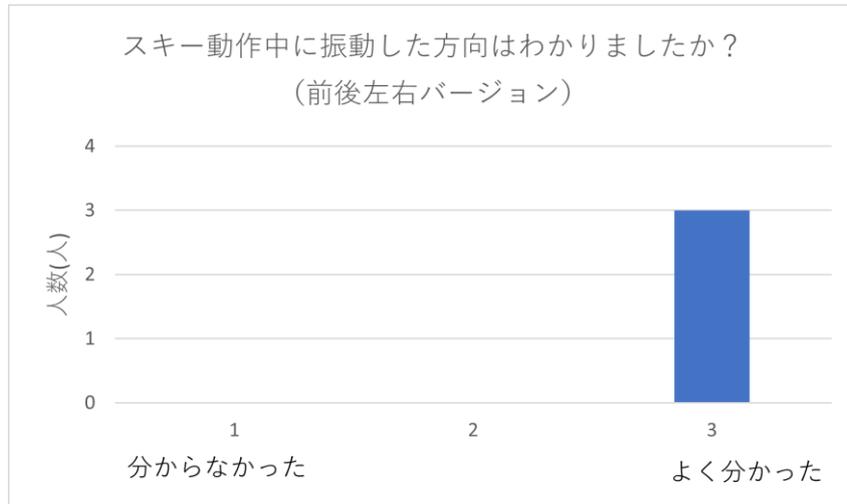


図 4-9:振動フィードバックされた方向(前後左右)アンケート結果

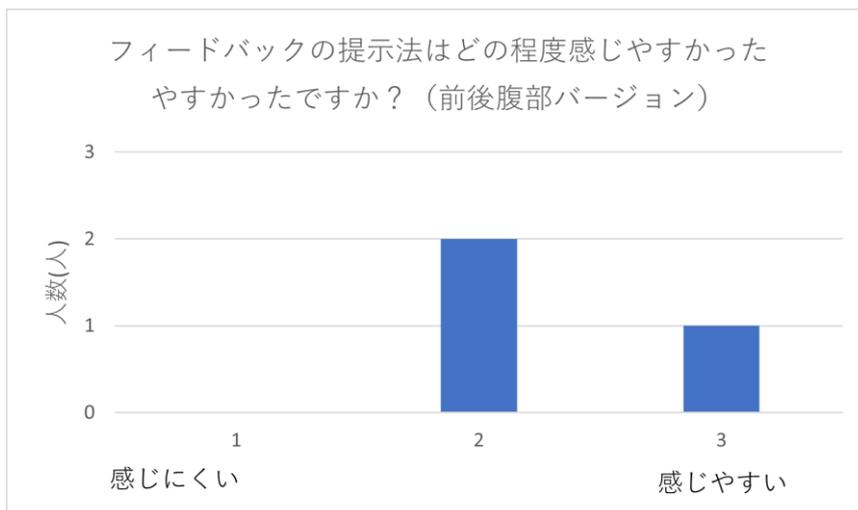


図 4-10:振動フィードバックの感じやすさ(前後腹部)アンケート結果

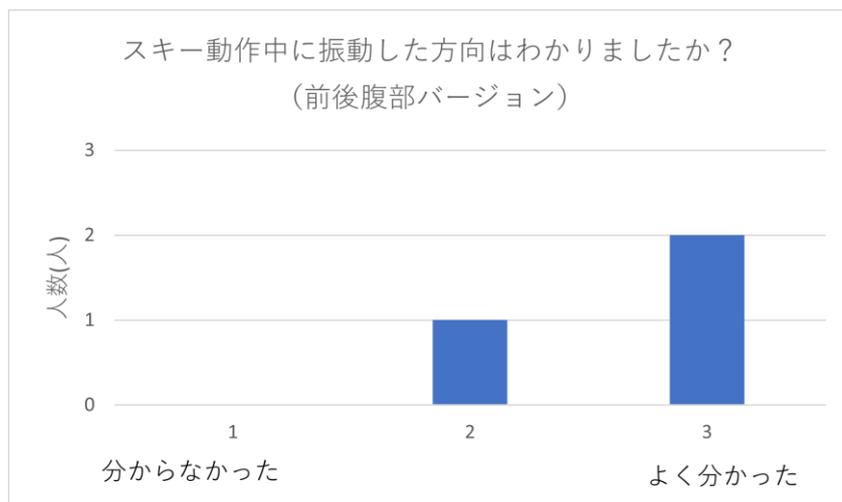


図 4-11: 振動フィードバックされた方向(前後腹部)アンケート結果

表 4-3 予備実験 2 自由記述

	自由記述
回答 1	腹筋だと振動を感じやすかった
回答 2	振動の強弱で方向の程度を変えるのは初心者には難しい と思うので、全てわかりやすく振動した方が良かった

スキー動作中に振動方向の認識はどちらの装着パターンでも可能なことが示唆された。しかし、フィードバックの感じやすさについて前後左右で「感じやすい」との評価がより多く得られたため、装着方法については前後左右のパターンを採用することとした。

4.2 本実験

4.2.1 本実験の目的

本実験の目的はスキー動作中にリアルタイムに振動フィードバックを行うことによってスキー動作における重心移動学習の上達効果が高まるかどうかを検証する。

4.2.2 本実験の方法

予備実験と同様に POWER SKI SIMULATOR を用いて、前方のディスプレイに映しだされているロールモデルの動きに合わせて、ロールモデルとちょうど反対側のターンになるようなタイミングで滑走してもらおう。滑走する時間は一分程度である。被験者は練習の際に振動フィードバックを用いるシステムありの群と振動フィードバックを用いないシステムなしの群の二つに分けて実験を行った。システムありの群は練習の際に振動フィードバックを受けながら練習をし、テストの際にはシステムなしと同じ条件で滑走をする。実験回数は練習を始める前の状態のテスト 1 回、練習 7 回、各練習後のテスト 7 回の計 15 回滑走してもらい、テストの滑走データを結果の評価として扱う。実験回数は 4 回に分け、週に 2 回、2 週間にわたって実験を行い、実験が終わった際には主観的アンケートを実施した。本実験はスキー熟練者 1 名のデータを用い、12 人のス

スキー初心者を対象として実験を行った。しかし、実験の参加中に体調を崩した被験者 1 名と圧力データが上手く取得できなかった被験者が 2 名（システムあり 1 名、システムなし 1 名）おり、その 3 名については実験結果から除外している。よって初心者の被験者は 9 名の結果を基に評価を行っている。ただし、システムありの 1 名については 4 日間のうちの 3 日間は正常にデータを取得できていたことから、システムの使用感に関するアンケートについては結果を反映することとした。なおフィードバックの基準に用いるデータを計測した熟練者は、スキー検定 1 級を所持している。なお本実験では、スキー経験が 2 日以下の被験者をスキー初心者と定義した。各被験者のスキー経験、運動経験、現在の運動習慣を表 4-4 に示す。

表 4-4:本実験の被験者

被験者	スキー経験	運動部、運動サークルの経験	現在の運動習慣
Aさん	1日	5年以上	週5時間以上10時間未満
Bさん	なし	5年以上	週1時間以上5時間未満
Cさん	なし	5年以上	週10時間以上
Dさん	なし	5年以上	なし
Eさん	なし	1年以上3年未満	なし
Fさん	なし	5年以上	週1時間以上5時間未満
Gさん	なし	5年以上	週5時間以上10時間未満
Hさん	なし	5年以上	週1時間以上5時間未満
Iさん	1日	5年以上	週1時間5時間未満

また本実験の流れは図 4-12 示す通り、被験者はテストと練習を交互に行う。

練習のみ、システムあり、となしで方法が異なり、テストについてはシステムあり、なし共に同じ条件で滑走する。テストとはシステムなし、ありともに振動装置を装着しないで滑走をしてもらい、練習のみシステムありの群は振動装置を

着け振動フィードバックを受けながら滑走を行う。システムなしの群はテスト同様に振動装置を装着しないまま練習を行う。

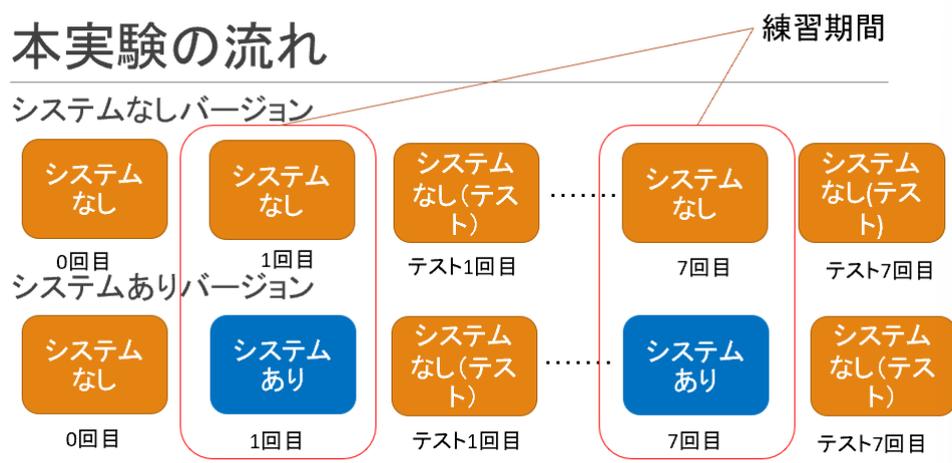


図 4-12:本実験流れ

なお、結果のフィードバックに関して、試行回数の半分程度は結果の知識 (Knowledge of result;KR)を与えない方が良いという研究 [15]がある。本研究では練習効果を高めるために結果のフィードバックを行う。ただし、テストごとに毎回ではなく、システムあり、なし共に実験を始める前に、前回の重心移動の結果をフィードバックしている。

4.2.3 本実験の分析方法

実験結果の分析方法は取得した圧力データを基に重心を計算し、熟練者の重心の動きと被験者の重心の動きの誤差を算出する。算出した誤差の推移を見る

ことで上達の有無を評価する。実験結果の分析にはプログラミング言語である python を使用した。誤差の計算方法としては時系列データの重心データに対して平均絶対誤差(Mean Absolute Error:MAE)を用いる。本実験では重心データが時系列ごとに存在し、熟練者と初心者との重心移動の変化を比較したいため、同時刻の重心データを比較していく平均絶対誤差を採用した。任意の時刻 t における熟練者の重心データを y_i 、被験者の重心データ \hat{y}_i として計算式は以下の通りである。

$$\text{熟練者との誤差} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t |y_i - \hat{y}_i|$$

上式を用いてテストごとの熟練者との誤差を計算し、試行回数を重ねることでの変化を評価する。計算は重心データの x 座標、 y 座標それぞれに行う。

また、被験者の体格や体重によってブーツにかかる圧力に差が出るため、熟練者、被験者の重心データは $0 \sim 1$ の間に正規化を行っている。正規化の計算方法は重心データのうち最大値を $\max(t)$ 、最小値を $\min(t)$ として以下の通りである。

$$\text{正規化した値} = \frac{y_i - \min(t)}{\max(t) - \min(t)}$$

4.2.4 本実験の結果

各初心者と熟練者との間での毎テストごとの重心移動の誤差の変化を評価す

るために、被験者と熟練者との時系列重心移動データの平均絶対誤差を計算し、初心者と熟練者との誤差を算出した。図 4-13、図 4-14 に回数ごとの x 軸方向の重心誤差のグラフを示す。横軸の目盛りはテスト回数、縦軸は 4.2.3 でも紹介した平均絶対誤差の値である。0 回目のテストと 7 回目のテストに注目してみると、X 重心誤差について、システムありの群は 5 名中 4 名の被験者には上達傾向がみられた。対して、システムなしの群は上達傾向がみられたのは 4 名中 1 名であった。システムありの群では回数を追うごとに誤差が小さくなる人がある一方で誤差が大きくなる被験者も存在した。また、x 重心誤差について、システムありにおける分散の値は 0.0009、システムなしは 0.0014 であった。

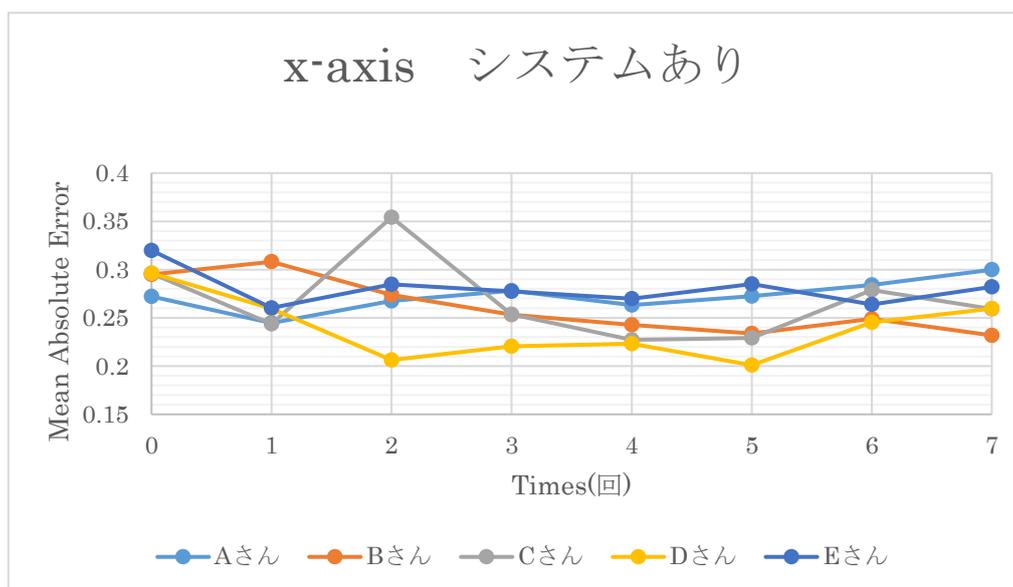


図 4-13:x 重心誤差(システムあり)

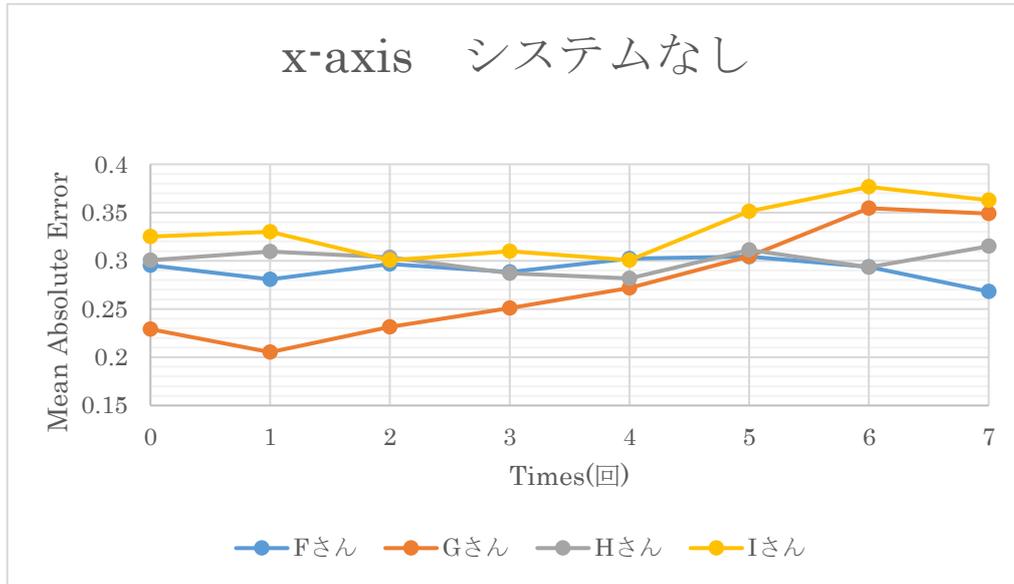


図 4-14:x 重心誤差(システムなし)

図 4-15、図 4-16 に回数ごとの y 軸方向の重心誤差のグラフを示す。Y 重心誤差について、x 軸方向と同じく、0 回目のテストと 7 回目のテストに注目してみると、システムありの群は 5 名中 1 名の被験者には上達傾向がみられた。対して、システムなしの群は上達傾向がみられたのは 4 名中 2 名であった。X 軸方向とは異なりシステムあり、システムなしの群で上達傾向が現れたが、どちらか一方に多くみられたというとはなく、システムを使ったことによる差は受けられなかった。また、y 重心誤差について、システムありにおける分散値は 0.0007、システムなしは 0.0009 であった。

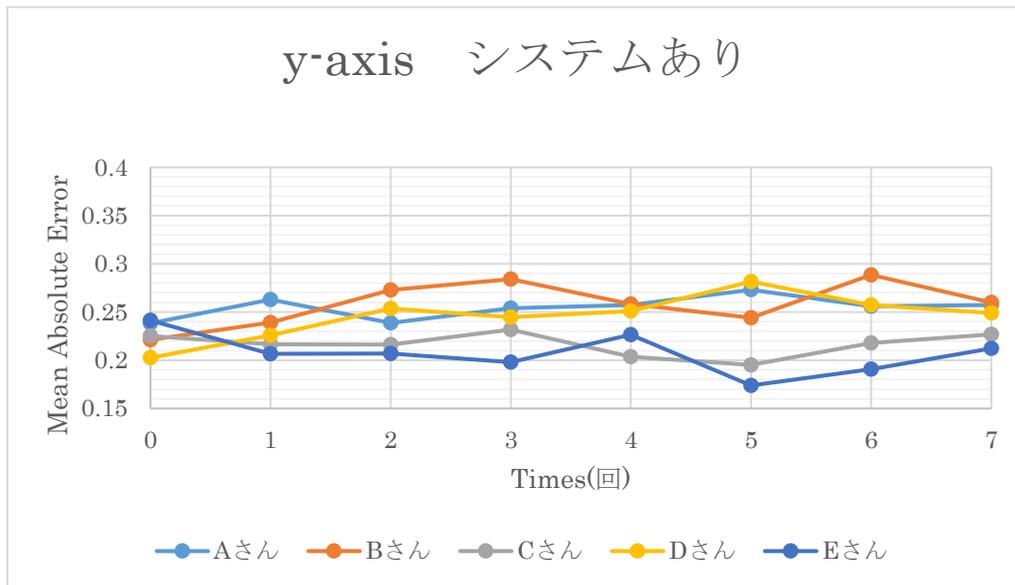


図 4-15:y 重心誤差(システムあり)

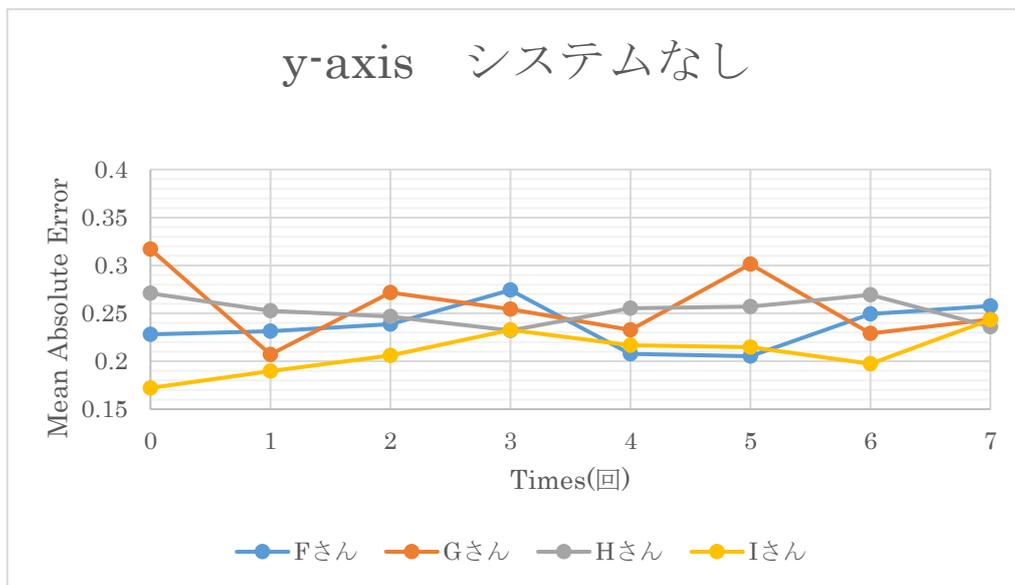


図 4-16:y 重心誤差(システムなし)

図 4-17、図 4-18 に x 軸方向の重心、y 軸方向の重心を合算して 0~1 のスコアに正規化したグラフを示す。x 軸、y 軸と同じく 0 回目のテストと 7 回目のテ

ストに注目してみると、システムありの群は 5 名中 3 名の被験者に上達傾向がみられた。対して、システムなしの群は上達傾向がみられたのは 4 名中 1 名であった。X 軸方向と同様に、システムありの群のほうがシステムなしの軍に比べて、上達傾向が現れた人数が多く存在した。また、トータル重心誤差について、システムありにおける分散の値は 0.0003、システムなしは 0.004 であった。

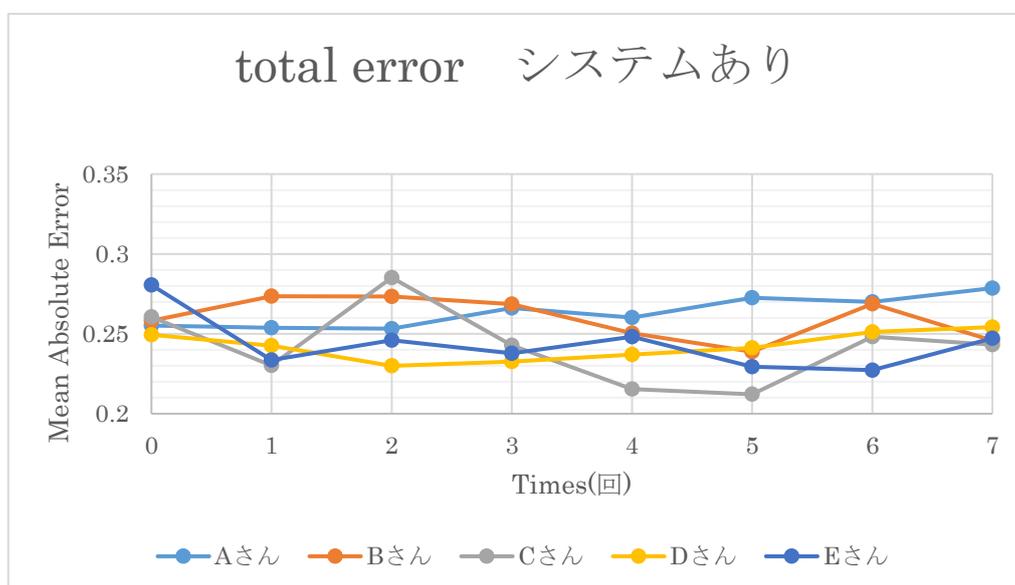


図 4-17:トータル重心誤差(システムあり)

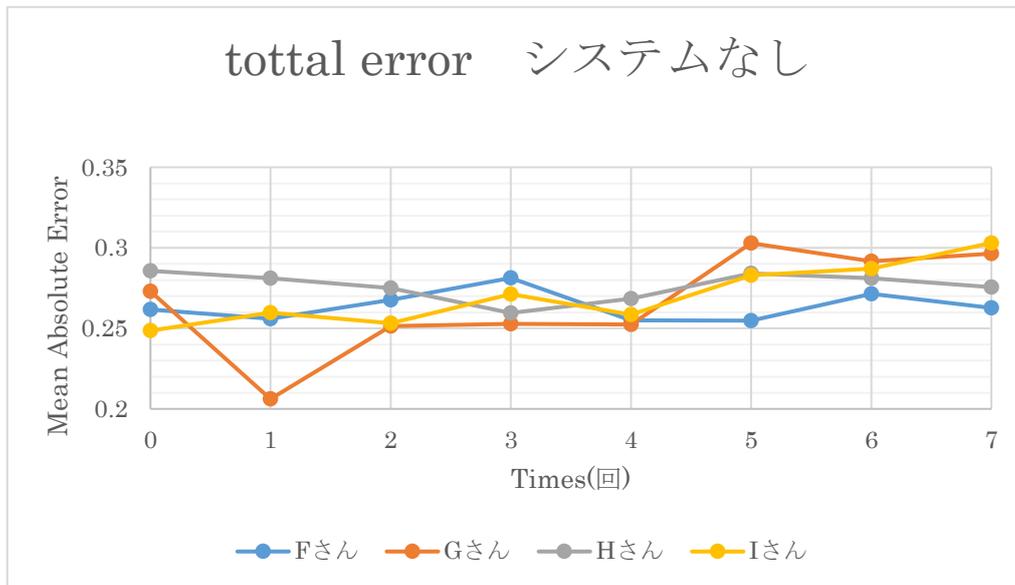


図 4-18: トータル重心誤差(システムなし)

4.2.5 アンケート結果

本実験では 2 週間の実験が終了した最終日にシステムの使用感に関するアンケート調査を行った。アンケート結果を図 4-19~図 4-22 に示す。

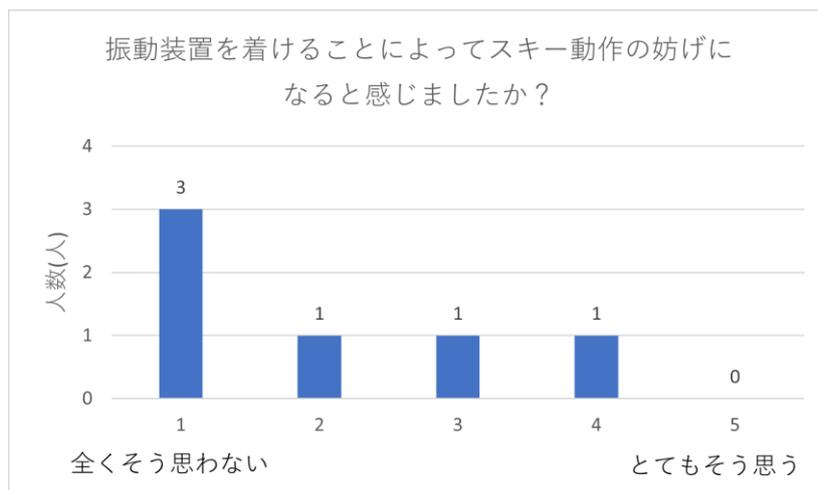


図 4-19:振動フィードバックによるスキー動作への妨げの有無アンケート結果

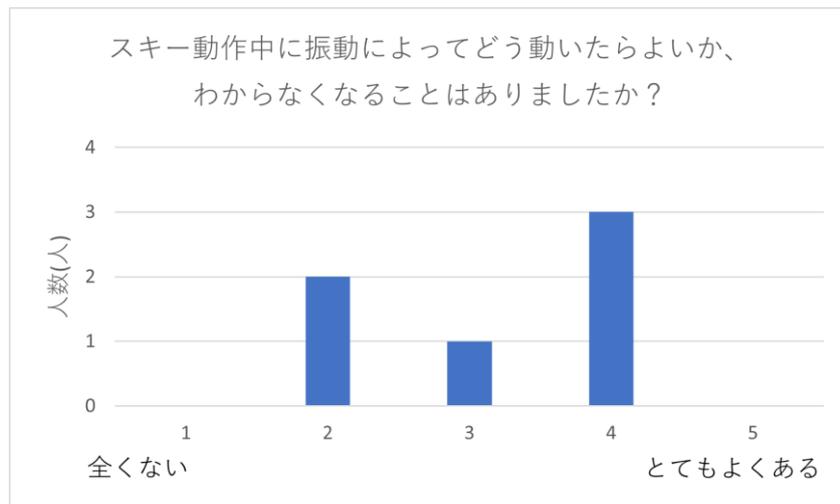


図 4-20:振動フィードバックによる混乱の有無アンケート結果

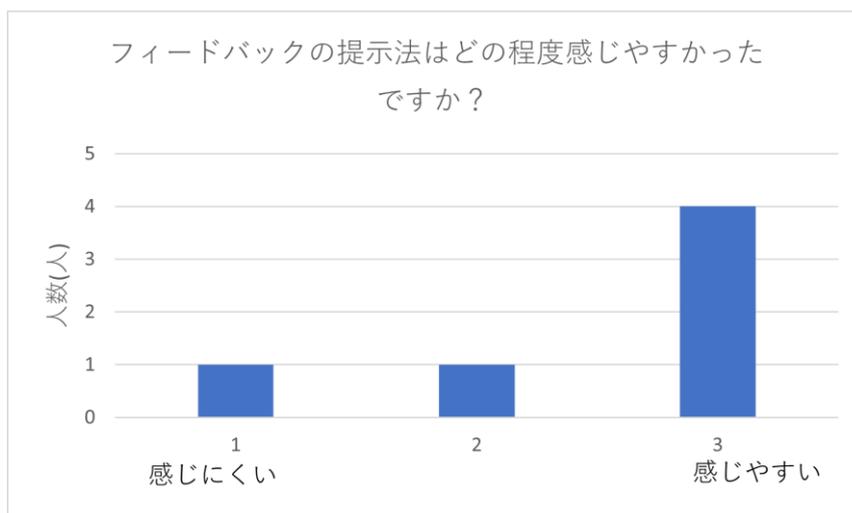


図 4-21:振動フィードバックの感じやすさアンケート結果

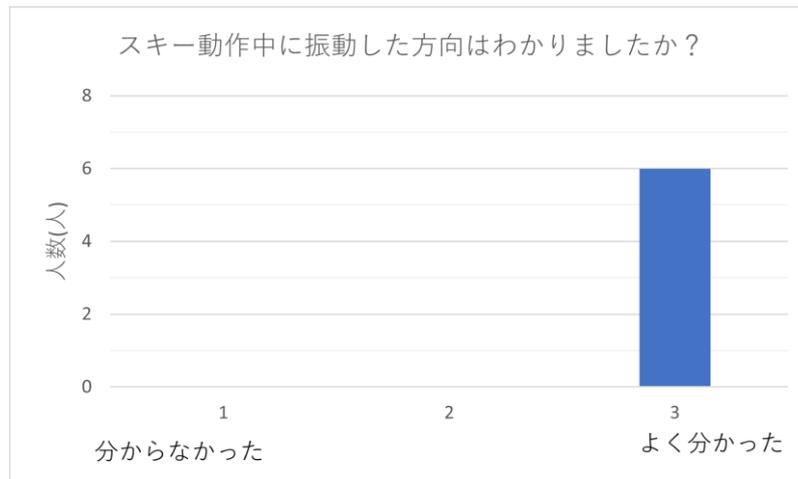


図 4-22:振動フィードバックされた方向の認識アンケートの結果

「振動装置を着けることによってスキー動作の妨げになると感じましたか？」という質問に対しては主観的評価が3以下の被験者が5名中4名であり、多くの被験者が振動装置によるスキー動作の妨げを感じなかった。「スキー動作中に振動によってどう動いたらよいか、わからなくなることはありましたか？」という問いに対しては、主観的評価が2,3,4と人によって違うという結果になった。ただし、被験者の半数は4を選択しており、スキー動作中にリアルタイムの振動フィードバックを与えると自分がどう動いてよいのかわからなくなるという現象が生じやすかった可能性が示唆される。「フィードバックの提示方法はどの程度感じやすかったですか？」という問いに対しては「感じにくい」、「どちらともいえない」と回答した被験者もいたが、過半数の被験者から「感じやすい」という回答が得られた。一部の被験者について高い評価が得られなかった原因

として、本実験は被験者によって振動の出力の大きさを変えず一定としたため、同じ出力であっても被験者によって大きく感じたり、小さく感じたりしてしまったことが考えられる。「スキー動作中に振動した方向はわかりましたか？」という問いに対してはすべての被験者が主観的評価 3 を選択し、予備実験と同様の結果が得られた。

なお、重心誤差の評価のみ除外した被験者のアンケート回答は「振動装置を着けることによってスキー動作の妨げになると感じましたか？」は 1、「スキー動作中に振動によってどう動いたらよいか、わからなくなることはありませんでしたか？」は 2、「フィードバックの提示方法はどの程度感じやすかったですか？」は 3、「スキー動作中に振動した方向はわかりましたか？」は 3 と回答している。

自由記述回答は以下の表 4-5、表 4-6 の通りである。自由記述で得られた回答から、リアルタイムフィードバックの直後に自分の動きを変えることについては難しく、検討が必要であることが明らかになった。

表 4-5:本実験アンケート自由記述 1

	感じなかった、感じやすかった部分について（自由記述）
回答 1	初めてシステムの振動を感じた際は、戸惑ってしまい、スキー動作に集中できませんでしたが、回数を重ねると振動に慣れて、フィードバックを受け付けることが少しできるようになりました。
回答 2	振動によるフィードバックを感じやすかった部分は、前方に取り付けたものが特に姿勢の修正に役立った気がする。

表 4-6:本実験アンケート自由記述 2

	使用していて違和感を感じた部分について（自由記述）
回答 1	スキーの棒を使うのが難しかったです。
回答 2	違和感ではないが、振動場所とタイミングの転換が早く、振動を感じてもすぐに対応しきれない難しさがあった
回答 3	違和感ではないですが、振動を感じた後すぐさま振動通りに体を動かすのが難しかったです
回答 4	左右が基本鳴りっぱなしだったので、こういった動きをとれば改善されるのかが分からなかった

4.3 考察

4-2 で記載した通り、本システムは振動を感じた直後に自分の体を振動方向に動かすことは難しいという評価が得られた。しかし、スキー運動の妨げのなにくさと、振動方向の認識については比較的高い結果が得られた。アンケート結果と併せて考えると、システムありの群では x 軸方向の重心移動の上達傾向がみられたことからフィードバックはリアルタイムに感じるが、フィードバック直後に体を動かすのではなく、何度も反復運動の中で同じように振動フィードバックを受けることで徐々に重心移動を修正したと考えられる。

また、システムあり、なし共に一定数熟練者との誤差が大きくなる、すなわち下達傾向がみられた者も存在した。図 4-23、図 4-24、図 4-25 にその傾向がみられた者の x 軸、y 軸、トータル重心誤差のグラフを示す。グラフには散布図の値

を基に近似直線を図示した。Aさんの傾きはx軸、0.00466、y軸、0.00243、トータル誤差、0.00354である。Gさんの傾きはx軸、0.02173、y軸、-0.00400、トータル誤差、0.00886である。Iさんの傾きはx軸、0.00763、y軸、0.00651、トータル誤差、0.00707である。グラフの通り、トータルの重心誤差については回を追うごとに上昇し、Gさん以外はx軸、y軸ともに上昇している。Gさんについてはx軸方向とy軸方向が回数を追うごとに反比例するようにx軸誤差が上昇し、y軸誤差が減少した。また他の被験者の近似直線のグラフに関しては付録に掲載している。

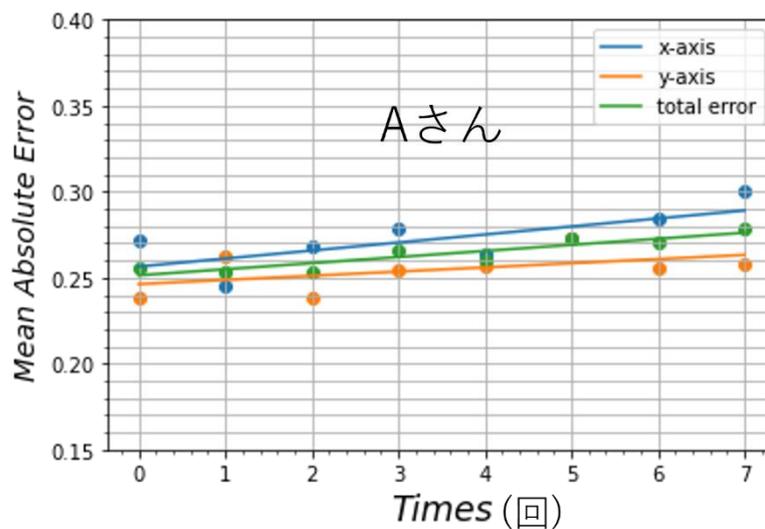


図 4-23:A さん重心誤差(システムあり)

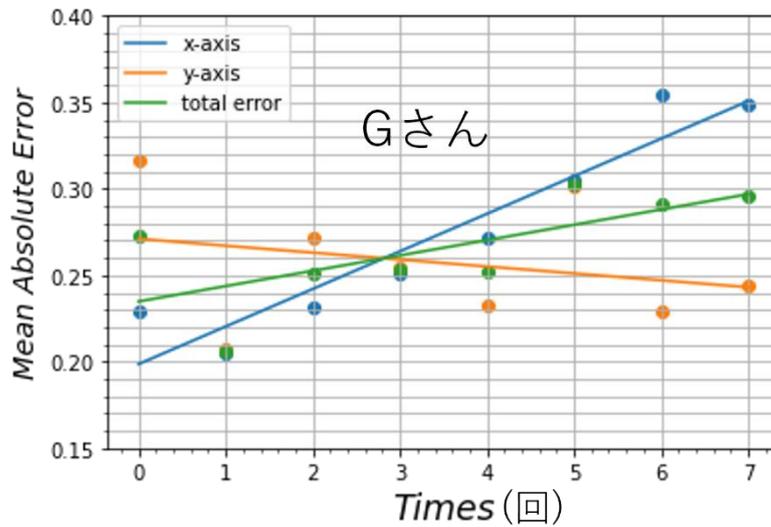


図 4-24:G さん重心誤差(システムなし)

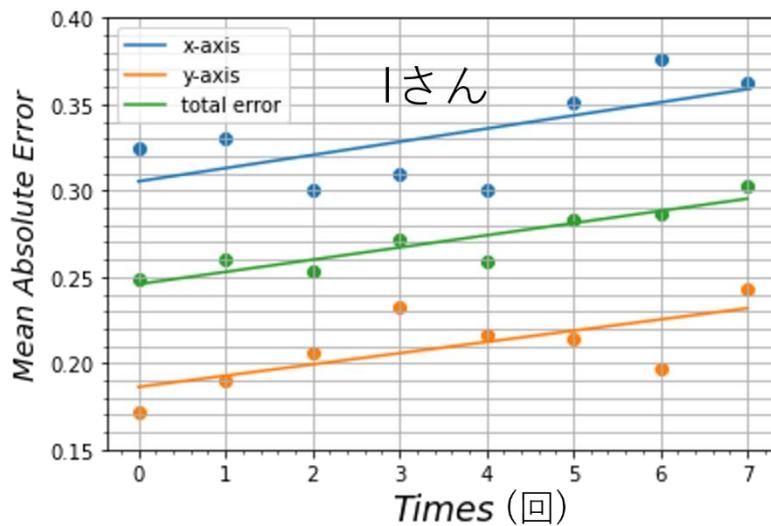


図 4-25:I さん重心誤差(システムなし)

下達傾向が見られた原因を考察するため、下達傾向がみられた 3 名に追加でインタビューを行った。3 名の内訳はシステムありの A さんと、システムなしの G さん、I さんである。インタビューの方法としては、システムありの A さ

んはアンケートの回答を中心に行い、システムなしの G さん、I さんは実験を通して意識したことを中心にインタビューを行った。表 4-7 にインタビュー内容を示す。

表 4-7: 被験者インタビュー内容

被験者	コメント
A さん	<ul style="list-style-type: none"> ・振動装置がしっかり装着できてなくて、振動子が落ちそうなのが気になって、大きく動けなかった。 ・横がよく分かったが、縦方向がよく分からなかった。縦方向に関してはずっとなくてよく分からなかった。
G さん	<ul style="list-style-type: none"> ・序盤のテスト結果のフィードバックが良かったのでその動きを意識して実験を続けた ・テスト結果を見ても自分のどこが良くてどこが悪いのかが分からなかった ・滑走中にスキーシュミレータの後ろのバーに尻が当たる。
I さん	<ul style="list-style-type: none"> ・途中からおなかに力を入れて滑ることを意識した ・一日の実験の中で3回目くらいから疲れてきた

インタビューを行った結果システムありの A さんについては振動のフィードバックによってどう動いたらよいか分からなくなったため、上達に支障が出たのではないかと考えられる。システムなしの G さん、I さんについてはどちらも共通して自分の中で上手くなるための意識がみられた。しかし G さんのコメントにあったように自分のどこが良くてどこが悪いのかが分からないため、意識したことがモデルに近づくのとは逆の行動になってしまったことが、下達傾向がみられた原因だと考えられる。今回の上達・下達判断は重心移動についての

みで判断しているため、姿勢や膝の角度などについては判断基準には採用していない。したがって、重心移動においては下達傾向がみられた行動が他の姿勢や膝の角度に関しても上達から離れているのかについては判断することはできなかった。

第5章 おわりに

5.1 本研究の結論

本研究ではスキーシュミレータを活用し、圧力センサによって取得した熟練者の重心移動データを基に、振動によるリアルタイムフィードバックを行い初心者に重心移動学習支援システムを提案した。3.2 で述べたように振動子には、関連研究で振動フィードバックのためによく用いられるバイプロトランスデューサ vp210 を使用し、振動を発生させる振動子に必要なアンプを Bluetooth 通信が可能なものを用いることで振動装置と PC 間でのやり取りの無線通信を実現した。

4.2.2 で述べたように、実験には 9 名のスキー初心者に対してシステムを使用する群と使用しない群に分け、2 週間の継続的なトレーニングの中で熟練者のデータを基に上達の有無を評価した。図 4-17、図 4-18 のトータル重心誤差のグラフから、システムを使用した群の中には上達傾向がみられた被験者もいる一方で下達傾向がみられた被験者も存在した。表 4-5、表 4-6 の本実験アンケートの自由記述より、提案したシステムによる振動でどう動いたらよいのかが分からなくなるという被験者もいたため提案システムには課題が残る結果となった。しかし、上達した被験者について考慮すると、スキーのような反復運動の場合に

においては同様に繰り返されるフィードバックを基に動きを改善できる可能性が示唆される。また、図 4.22 の振動フィードバックされた方向の認識アンケート結果より、スキー運動中に振動している方向についてはアンケートの結果全員が認識をすることができたため、本システムがスキー動作中に振動方向の認識が可能であることが示唆された。

5.2 今後の展望と課題

振動装置について、本実験では振動子を合計 4 つ使用し、腰あたりの前後左右に当たるように装着した。このため、後ろの左部分などのようなより詳細なフィードバックをすることが難しかったという課題がある。また、今回制作した振動装置はブーツの圧力センサの値をリアルタイムに PC に送信し、センサ値を基に熟練者との誤差を計算し、振動を発生させるという流れのため、センサ値を取得してから、振動するまでに多少の遅延が発生する。遅延の改善についても改善すべき課題の一つである。

また、フィードバックの感じやすさについては「感じるもののもっと強くて
も良い」という意見も得られたため、振動子の数を増やしたことでより大きく、
詳細な振動フィードバックの実装についても検討の余地がある。振動子の増設
については、現在使用しているソケット通信が親機からの信号を複数の端末に

送信も送ることができるので、アンプと接続する端末を増やすことで現在と同じ方法で実現可能である。また、今回使用した振動子はヘッドフォンまたはスピーカーに置き換えることで聴覚フィードバックにも応用することができる。

実験方法については、被験者の少なさが課題としてあげられる。9名という人数では個人個人のデータの振れ幅が大きくシステムの評価をするには不十分であったことが考えられる。併せて実験回数についても、中長期的な学習効果を検証するためには練習回数を増やす必要がある。また、本実験ではスキー検定1級を所持する1名の被験者の重心データを採用したため、その被験者特有の癖がデータに含まれている可能性がある。本来なら複数人数の熟練者のデータを平均するなどして熟練者同士の偏りを無くす必要がある。しかし、スキーの経験者同士であっても、経験者同士でスキー技術の差があることもある。そのため、同じレベルの熟練者データが集めづらく、今回は1名の熟練者データを使用した。

本実験ではスキーの上達の評価に関して荷重データを使用した。振動によるフィードバックは身体に直接刺激を与えるものであり、与えられた部分の姿勢の矯正にもつながることが考えられる。したがって、重心データに加えて姿勢データを評価に使用すると重心移動と姿勢との関係性が分かり、より正確な評価が可能になると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、東京工業大学情報理工学院の小池英樹研究室で開発された VR スキーを使用しました。

主指導の金井秀明先生には大変お世話になりました。定例のミーティングでは様々な助言を頂きました。自分ではなかなか思いつかない視点からの助言によってつまづいていた問題を解決し研究を進めることができました。また本研究を行うにあたり、PC、スキーシュミレータ、振動子、アンプ、センサ等など様々な機材を用意していただきありがとうございます。心から感謝申し上げます。

藤波先生、王先生には中間審査の際にお世話になり、貴重なご意見ありがとうございました。中間審査の助言によって自分の研究の気づいていない問題点に気づくことができました。

研究室の先輩である小野重遥さんにはプログラム開発のアドバイスや実験方法への助言などお忙しい中たくさんサポートしていただきありがとうございました。先輩のサポートのあり研究をここまで進めることができました。

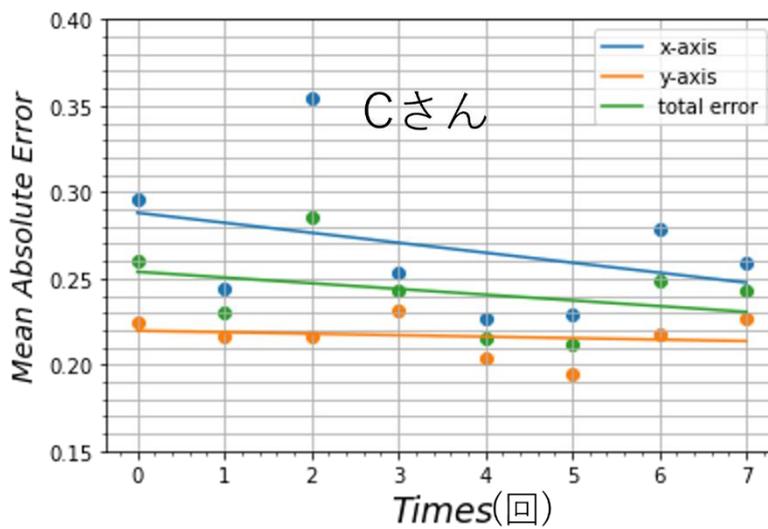
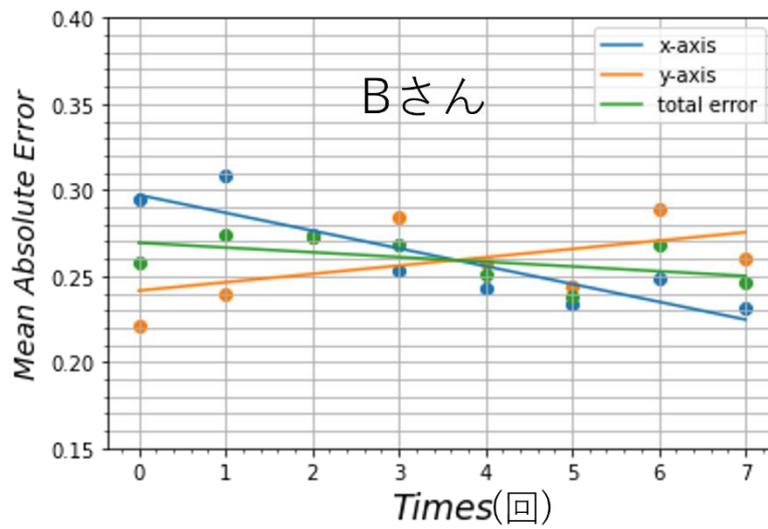
スキー熟練者としてデータを使わせていただいた澤田健太郎君や他のスキー経験者の方々には、スキーの経験者としての目線から実験方法についての助言をしていただき実験を進める上で大変参考にさせていただきました。

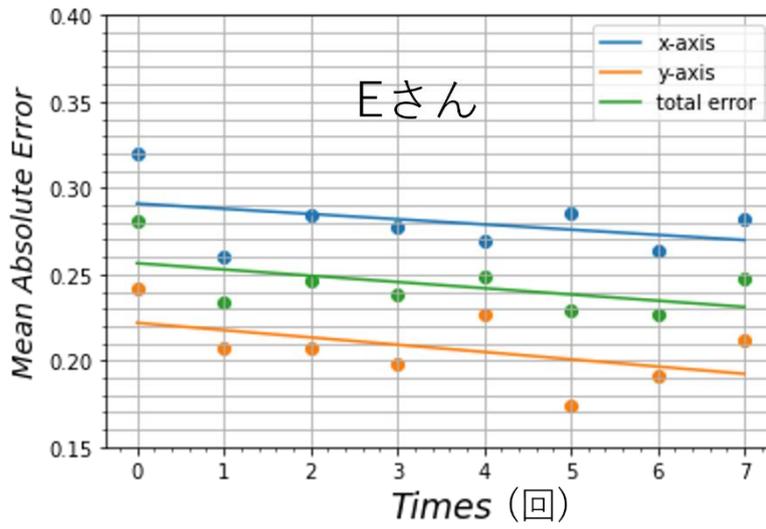
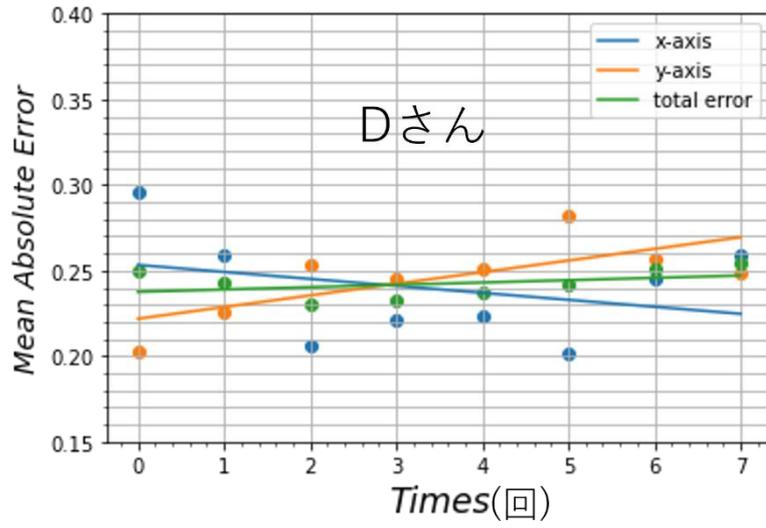
また、2週間という長い期間にわたって実験参加して下さった皆様のおかげで本研究を進めることができました。実験に協力して下さった皆様本当にありがとうございました。

付録

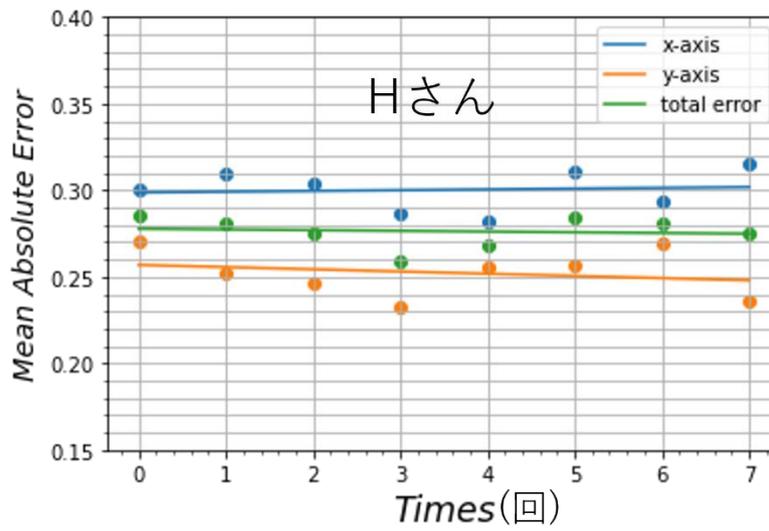
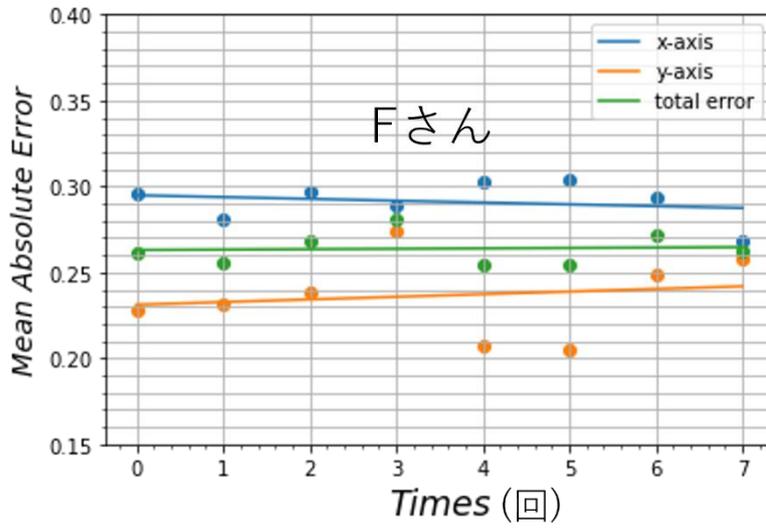
各被験者の重心誤差

・システムあり





・システムなし



参考文献

- [1] 公益財団法人日本生産部, レジャー白書 2019, 生産性出版, 2019.
- [2] 多田憲孝, "シミュレータを用いたスキー指導システムの開発," *スポーツ産業*, vol. 21, no. 1, pp. 19-26, 2011.
- [3] 増永倫大 and 曾我真人, "圧力分布センサを用いた重心移動学習支援システムの実装," *2019 年度 情報処理学会関西支部 支部大会 講演論文集*, 第 9 巻 2019, 9 2019.
- [4] Erwin Wu, Florian Perteneder, Hideki Koike, and Takayuki Nozawa, "How to VizSki: Visualizing Captured Skier Motion in a VR Ski," *In The 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*, no. 5, pp. 1-9, 2019.
- [5] 渥美亮祐 and 金井秀明, "深層学習を用いたスキーシミュレータ利用時における初心者と熟練者の運動特徴抽出手法," *情報処理学会研究報告グループウェアとネットワークサービス (GN)*, vol. 110, no. 15, pp. 1-7, 2020.
- [6] 小野重遥, 金井秀明, 西本一志, 渥美亮祐, "スキー初学者のための荷重移動の提示によるスキー技能学習支援: 『内面化 AI』の実現に向けた初期的試み," *情報処理学会研究報告*, vol. 191, no. 4, pp. 1-8, 2021.
- [7] 小山勇也, 渡辺一弘, "ウェアラブル光ファイバを用いたランニング支援のための聴覚フィードバックシステムの開発," *情報科学技術フォーラム講*

演論文集, vol. 13, no. 4, pp. 221-222, 2014.

- [8] D. Spelmezan, “ An investigation into the use of tactile instructions in Snowboarding,” *Proceedings of the 14th international conference on Human-computer interaction with mobile devices and services.*, pp. 417-426, 2012.
- [9] 綿谷惇史,謝浩然,宮田一乘,, "カメラ画像を用いた体幹トレーニングの姿勢支援手法の提案," *情報処理学会研究報告*, Vols. CVIM-216, no. 14, 8 3 2019.
- [10] 川崎 陽平, 杉浦 裕太, “腹部触覚提示を用いた足圧中心位置の誘導システム,” *エンタテインメントコンピューティングシンポジウム論文集*, pp. 335-339, 2021.
- [11] 萬 絵, 加藤岳大, 横窪 安奈, ロベズ ギヨーム, “聴覚フィードバックを用いたジャグリングスキル向上支援システム,” *マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2018)シンポジウム*, pp. 798-803, 7 2018.
- [12] 服部 英一 , "切りかえ局面を基礎としたスキー指導方法について," *拓殖大学論文集 人文・自然・人間科学研究*, no. 40, pp. 208-226, 2018.
- [13] 川野常夫, 福井 裕, 奥野竜平, 横田 祥, 村松十和, 小崎篤志, “腰への振動触覚フィードバックによる作業中の腰痛警告システム,” *精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集*, pp. 547-548, 2013.

- [14] 岩田悠, 稲蔭正彦, “足裏感覚を操作することで歩行動作を変化させるハプティックシューズ,” 修士学位論文.2016 年度メディアデザイン学, 第 515, 2016.
- [15] Winstein, C.J. & Schmidt, R.A., "Reduced Frequency of Knowledge of Results Enhances Motor Skill Learning," *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, vol. 16, pp. 677-691, 1990.