



THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

# 視覚障害者スキーのための連続的聴覚フィードバック手法の提案

Real-Time Turn Guidance via Continuous Auditory Feedback for Blind Skiing

平野稔祐<sup>1)</sup>, Yichen Peng<sup>1)</sup>, Erwin Wu<sup>1)</sup>, 小池英樹<sup>1)</sup>

Toshihiro HIRANO, Yichen PENG, Erwin WU, and Hideki KOIKE

1) 東京科学大学 情報理工学院

(〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2 丁目 1 2 - 1, {hirano.t.ba,peng.y.ag,wu.e.aa}@m.titech.ac.jp, koike@c.titech.ac.jp)

**概要:** 視覚障害者スキーでは、声かけによる誘導を行う晴眼者の存在が不可欠であり、トレーニングの機会が限定的であった。そこで本研究では、視覚障害者が単独でスキーを行える環境の構築を目指し、連続的な聴覚フィードバックによるターン誘導手法を提案する。この手法により、誘導システムの状態とスキーヤー自身の安全性をリアルタイムで把握可能となる。視覚障害者を対象とした実験およびインタビューの結果、連続的フィードバックはシステムへの信頼感の向上に寄与することが示唆された。

**キーワード:** スキー, 聴覚フィードバック, 視覚障害者支援

## 1. はじめに

視覚障害者スキーとは、視覚障害者のスキーヤーと晴眼者のガイドがペアを組み、声かけによる誘導で滑走するスキーの一形態である。視覚障害者の生活の質の向上においてスポーツは重要な役割を担うが、ブラインドスキーは季節や環境に制約がある上、ガイドには滑走と誘導の両技能が求められるため、挑戦機会は限られている。

この問題に対し、ガイドとスキーヤーの連携支援 [1, 2] や、屋内シミュレータの活用 [3] が検討されてきた。屋内環境を利用した研究の一つとして、視覚障害者が単独で使用可能なターン誘導システムが提案されている。しかし、これらは予め定められたコースに依存しており、実環境の複雑な滑走状況における利用は困難である。そのため、より現実的な環境の設定において、視覚障害者がガイドに依存せず練習可能なシステムの開発が求められている。

本研究では、実環境への応用を見据えた初期段階として、屋内シミュレータ上でランダムな障害物が配置されたコースに対し、ターン経路の探索と音声によるリアルタイム誘導を行うシステムを提案する (図 1)。本システムは、シミュレータから取得した障害物情報に基づき、スキーヤーにターンのタイミングと方向を伝える。先行研究 [3] では、スキーターンの誘導においてターンのタイミングと方向の提示が直感的であることが示されている。さらに、本研究では、実スキー場におけるガイドの連続的な声かけが安心感を高めている点に着目し、既存の離散的な誘導に対し、ピッチの時間変化を用いた連続的なフィードバック手法を導入する。

システムの有効性を検証するため、4 組の視覚障害者スキーヤーとガイドを対象に予備実験を実施した。実験では、従来の離散的な誘導と本提案の連続誘導を比較し、さらに警告音を用いた間接的誘導も体験させ、インタビューを行っ

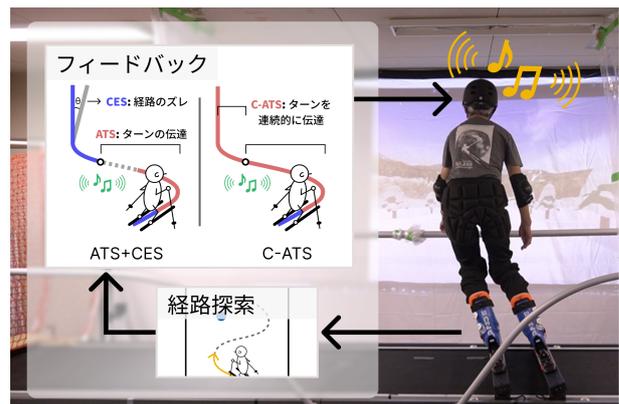


図 1: 仮想環境から取得した障害物情報をもとに経路探索を行い音によって進路を誘導する。既存手法を組み合わせたフィードバック (ATS+CES) と音が途切れない連続的なフィードバック (C-ATS) の 2 種類を実装し比較した。

た。その結果、連続的なフィードバックにより、スキーヤーは自身とシステムの状態をリアルタイムに把握でき、信頼感の向上に寄与することが示唆された。また、インタビューからは、障害物の有無に基づく間接的な誘導よりも、ターンのタイミングと方向を直接伝える方式が好まれる傾向が確認された。これらの知見は、実環境における視覚障害者スキーの自立支援に向けた誘導システム設計における重要な要件を示している。

## 2. システム

システムは、聴覚フィードバックと、障害物回避経路の構築、それらが動作する仮想スキー環境から構成される。本章では、これらの各要素について紹介する。

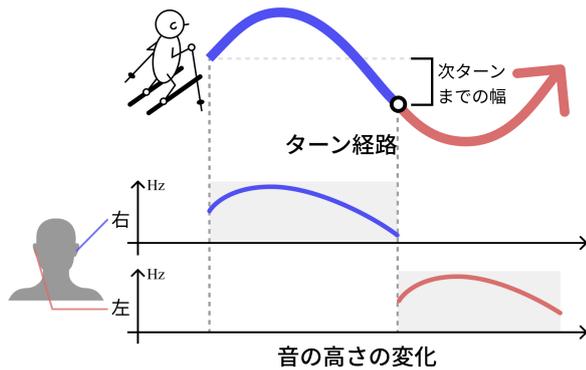


図 2: C-ATS の動作例。ターンの方向と位置に応じて音の方向と高さが変化する。

## 2.1 聴覚フィードバック

システムが構築したターン経路をスキーヤーに伝え誘導するための聴覚フィードバックを構築する。視覚障害者は音から多くの環境情報を得ていることから、フィードバックの提示には周囲の音を妨げない骨伝導イヤホン (Shokz OpenRun Pro<sup>1</sup>) を使用した。また、触覚フィードバックは、滑走中の振動との区別が困難となる可能性があるため採用しなかった。

誘導手法として、ターンの方向を直接伝える Advance Turn Sound (ATS) および Continuous Error Sound (CES) に基づく聴覚フィードバックを実装した [3]。さらに、システムの補助のため、障害物がスキーヤーの左右どちらに存在するかのみを伝える間接的な手法である障害物アラートを合わせて実装した。

### 2.1.1 ATS+CES

スキーにおける移動は、左右のターンと直線から構成される。既存のターンフィードバックでは、事前に定義されたコースに対して左右のターンのみを対象としていた。そこで本研究では、ATS をターン時に、CES を直進時を用いることで、ターンと直進の両方をカバーするフィードバックを実装した。ダイナミックな動作が求められるターンには直感的に理解しやすい ATS を用い、低速かつ細かい調整が必要な直進には微調整が可能な CES を用いている。

ATS は、ターンの方向・幅・深さをそれぞれ音の方向・高さ・長さに対応させて伝達する。方向とタイミングは、音を出す方向によって伝達する。ターンの幅は、狭い順に 261Hz, 329Hz, 391Hz の正弦波で表現した。音の長さは次のターンまでの長さに応じて、0.25 秒, 0.5 秒, 1 秒の 3 段階とした。また、CES は、現在の進行方向と目標経路との角度差に応じて、音の高さと大きさを変化させることで進路のずれを伝える。既存研究に基づき、角度差に応じて 300Hz から 1500Hz までの正弦波を対数的に変化させるフィードバックを採用した。

### 2.1.2 C-ATS

実環境での誘導を想定し、視覚障害者スキーヤーおよびガイドへのヒアリングを実施した。その結果、ガイドはターン時に声が途切れないよう語尾を伸ばすことで、視覚障害者に自身の存在や周囲の安全性を伝えていることが明らかとなった。ATS と CES の組み合わせは効率的なターン誘導を実現する一方で、ターン前にフィードバックを決定する必要があるため、ターンが予定より早い場合は音を途中で打ち切る必要があり、遅れると無音区間が生じるという課題がある。

そこで本研究では、ATS [3] を拡張し、ターンの方向・タイミング・幅を継続的に伝達可能な聴覚フィードバック手法 C-ATS (Continuous-ATS) を開発した。C-ATS は、音の方向の変化によりターンの方向とタイミングを、連続的なピッチ変化によりターンの幅を伝達する。ターンの方向に対応した方の耳に音声を流し、音の方向の切り替わりによってターンのタイミングを提示する。次のターンまでの距離に応じて正弦波の周波数を変化させ、スキーヤーの移動に伴って音の高さが連続的に変化することで、ターンまでの残距離や進行度を直感的に伝える。音の周波数  $f$  は、次のターンまでの距離  $w$  に基づき、式 1 に従って計算される ( $f_{\max} = 1500\text{Hz}$ ,  $f_{\min} = 300\text{Hz}$ )。

$$f = f_{\min} 2^{w \cdot \ln\left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}}\right)} \quad (1)$$

図 2 に、C-ATS におけるターンに応じた音の高さ変化を示す。C-ATS は、スキーヤーの現在位置とターン方向に応じて音をリアルタイムで更新する。この一連の変化は、次のターンが検出されるまで継続的に更新され、スキーヤーは自己の移動状況と誘導情報を常に把握できる。C-ATS ではフィードバックが次のターンまで継続するため、無音区間なくターンの誘導が可能である。

### 2.1.3 障害物アラート

障害物アラートは、スキーヤーの周囲に回避すべき障害物が存在することを伝える間接的なフィードバックである。その主な目的は、スキーヤーに障害物の存在を認識させ、より正確な回避行動を促すことである。アラート音には、0.1 秒周期で再生と停止を繰り返す 440Hz の三角波を用いた。スキーヤーの進行方向に障害物がある場合、障害物の位置に応じて左または右のイヤホンから 0.6 秒間警告音を再生することで、回避すべき方向を提示した。

## 2.2 経路探索と障害物回避

障害物の位置に基づき、回避可能なターン経路を探索した。スキーは直進ではなく左右のターンを繰り返す特性を持つため、スキーヤーの状態を「左」「右」「直進」の 3 状態に分類し、左右ターンが交互に現れるよう制約を課して経路探索を行った。

経路探索は動的計画法を用いて行う。進行方向に沿って 1m 間隔でサンプリングした点に対して、状態遷移図に基づく全遷移を評価し、累積コスト最小の経路を選択する。サンプリング点間の軌跡は過去の滑走データをもとに 3 次関

<sup>1</sup><https://jp.shokz.com/products/openrun-pro>

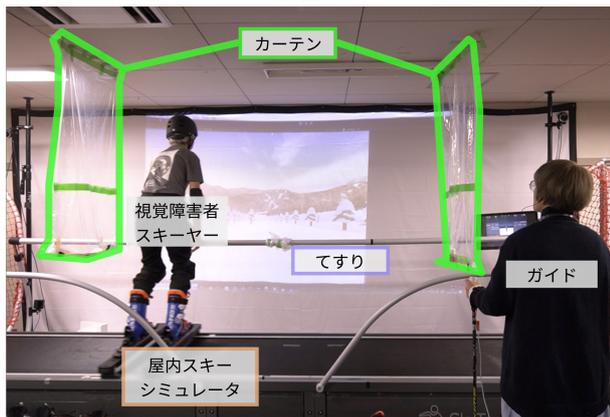


図 3: 構築した屋内スキー環境.

数で補間した。計算負荷と応答性のバランスから、シミュレータ実験では最大 20m 先までを探索範囲とした。

経路コストは (1) 軌跡の滑らかさ、(2) 障害物との距離、(3) コース中心線からの偏差の 3 項の重み付き和で定義した。経路の滑らかさは進行方向の変化率で評価される。また、障害物との距離コストは、距離 4m 以上では 0 とし、これより近づくにつれて線形に増加するよう設計した。

### 2.3 屋内スキー環境

実験のため、図 3 に示す屋内スキー環境を構築した。本環境では、仮想的な斜面上に障害物が配置されており、物理的な衝突の危険なくターン操作が可能である。実際のスキーを再現するため、スキーチームでも利用されている SkyTechSport 社<sup>2</sup>のシミュレータを使用した<sup>3</sup>。スキーヤーはスキーブーツを履き、スキー板に装着した上で、足を傾けることでパラレルターンを行う。スキー板の傾きに応じて板が横方向に移動するため、実際のスキー動作が再現可能である。

安全対策として、スキーヤーの前面に手すり、両側面にはセーフティネットを設置した。さらに、誤誘導による衝突を防ぐため、セーフティネットの内側 1メートルにカーテンを設け、スキーヤーが可動範囲の限界を触覚的に認識できるようにした。

仮想スキー環境は、Unity (バージョン 2022.3.35f1) を用いて構築し、人や木などの障害物を配置した。スキー板に取り付けた VIVE トラッカーにより、スキーヤーの位置を取得し、仮想空間にリアルタイムで反映させている。誘導システムは、この位置情報を基に、ターン誘導および障害物との接触時のフィードバックを提供した。

## 3. 予備実験

動的経路設計における連続的フィードバックの有効性を評価するため、視覚障害者を対象とした予備実験を実施した。本実験では、先行研究に基づき実装された ATS+CES 条件と、本研究で新たに提案した連続的フィードバック手法である C-ATS 条件を比較した。実験中は、ターン誘導に

焦点を当てるため、障害物アラートのフィードバックは無効化した。また、障害物アラートの効果について評価するため、実験後に C-ATS にアラートを追加した条件を体験してもらい、インタビューを行った。

実験は、4名の視覚障害者スキーヤー (全盲、43~62歳、男性3名・女性1名) と、4名のガイド経験を持つ晴眼者 (50歳~61歳) の協力のもと実施した。本実験は学内倫理審査委員会の承認を得て実施し、実験時間は約3時間、参加者には1組あたり9000円の謝礼を支払った。

### 3.1 実験タスク

スキーヤーは、スキーシミュレータ上でターンを行いながら障害物を回避するタスクに取り組んだ。本実験では、ATS と CES の組み合わせによる誘導 (ATS+CES 条件)、連続的な ATS (C-ATS 条件)、そして従来の人間によるガイド (Guide 条件) を比較した。Guide 条件では、ガイドが「右」「左」といった指示を口頭で与え、ターンの方向を示した。この手法は、実環境のスキー場で視覚障害者に対して用いられる一般的なガイド方法を再現したものである。各タスクでは、10個の障害物がランダムに配置されたシーンを用いた。

### 3.2 評価指標

評価は、安全性と主観的安心感の2側面から行った。安全性の定量的評価指標として、障害物の回避成功率および回避時の最短距離を測定し、条件間で比較した。また、主観的な負荷と安心感を把握するために、実験終了後に参加者へアンケート調査を実施した。具体的には、システムの使いやすさを評価する SUS (System Usability Scale) [4] と、精神的・身体的負荷を測定する NASA-TLX [5] の質問項目を用い、ユーザビリティおよび主観的負荷の度合いを明らかにした。さらに、安心感に関する項目について、5段階リッカート尺度を用いた追加質問を行い、システム誘導中の安心度合いを詳しく分析した。最後に、半構造化インタビューを通じて聴覚フィードバックの印象・理解しやすさ・好みなどを聴取し、システム改善に向けた要件抽出を行った。

### 3.3 実験手順

実験の手順は以下のとおりである：

1. スキー経験に関するアンケートおよび実験内容の説明。
2. 各条件 (ATS+CES, C-ATS, Guide) について、参加者は 20 分間の障害物回避練習を実施。
3. 各条件で 3 回ずつ本番計測を行い、条件ごとに信頼感に関する調査を実施。
4. C-ATS に障害物アラートを追加した条件を体験。
5. 聴覚フィードバックに関するインタビューを実施。

システムの学習効果の影響を最小限に抑えるため、実験条件 (ATS+CES, C-ATS, Guide) は被験者ごとにランダムな順で行う。また、インタビューは視覚障害者スキーヤーとガイドを別室で待機させた上で、個別に口頭で実施した。

<sup>2</sup><https://www.skytechsport.com>

<sup>3</sup><https://www.simsportsarena.com/us-ski-team>

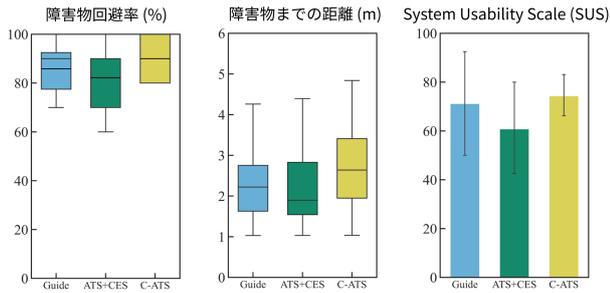


図 4: 滑走経路の安全度評価とユーザビリティ調査の結果。

#### 4. 結果と考察

図 4 に実験結果を示す。C-ATS 条件での障害物回避率は 90.0% であり、ATS+CES 条件 (82.2%)、Guide 条件 (85.8%) を上回った。同様の傾向は、障害物までの最短距離にも見られた。C-ATS は仮想環境上の障害物の正確な位置情報に基づく誘導が可能であり、プロジェクタ映像を参照する人間のガイドとの直接比較は困難ではあるが、本実験環境においては同等以上の安全性が確認された。

ユーザビリティ評価 (SUS) では、C-ATS 条件が最も高く 74.3 を記録し、Guide 条件 (71.3) をわずかに上回った。また、ATS+CES 条件は 60.8 と低い評価となり、信頼性に関するアンケート結果も同様の傾向を示している。これは経路探索の精度にも依存するが、連続的なフィードバックの有無が大きく影響していると考えられる。実験後のインタビューでも、複数の参加者から「無音の区間が不安」という声があり、これは事前ヒアリングの内容とも一致していた。C-ATS によって常時フィードバックが提供されることで、スキーヤーはシステムの動作状況と自身の滑走が適切であることを確認でき、安心感の向上に寄与していると考えられる。

Guide 条件では、ペアの相性やガイドの技量の違いにより SUS スコアに大きなばらつきが見られた。インタビューでも「慣れたガイドの方が滑りやすい」といった意見があり、相性とガイドの技能の影響が示唆されている。また、一部のガイドは「システムは決められた地点への誘導に長けている」と述べており、将来的にはガイドの技量差や相性問題を補完する支援技術としての活用の可能性が示された。

一方、障害物アラートに対する評価は概ね否定的であった。複数の参加者が「障害物の存在を意識すると恐怖からターン操作に集中できない」と回答しており、現在のフィードバックでは障害物の距離や大きさが十分に伝わっていない可能性がある。また、ある参加者は「障害物がなければリフトの音を頼りに滑れる」と述べており、コース形状や環境音を含めたフィードバック設計が今後の課題である。

#### 5. おわりに

本研究では、連続的な聴覚フィードバックによるターン誘導手法を実装し、従来手法の組み合わせによる誘導手法との比較検証を行った。屋内スキーシミュレータを用いた

被験者実験の結果、連続的な誘導は従来手法に比べてシステムへの信頼感を高める可能性が示唆された。ただし、本検証は屋内環境に限られており、実際のスキー場における有効性は未確認である。今後、誘導経路の最適化とシステムの改良によって実環境で独立してスキー可能な環境の構築を進める予定である。

**謝辞** 本研究は JST CRONOS JPMJCS24N8, JST ASPIRE JPMJAP2404 および JST ムーンショット型研究開発事業 JPMJMS2012 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] Haladjian, J., Reif, M. and Brügge, B.: VIHapp: A Wearable System to Support Blind Skiing, *Proceedings of the 2017 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers*, UbiComp '17, New York, NY, USA, p. 1033–1037, 2017.
- [2] Aggravi, M., Salvietti, G. and Prattichizzo, D.: Haptic Assistive Bracelets for Blind Skier Guidance, *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, AH '16, New York, NY, USA, , 2016.
- [3] Miura, Y., Wu, E., Kuribayashi, M., Koike, H. and Morishima, S.: Exploration of Sonification Feedback for People with Visual Impairment to Use Ski Simulator, *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2023*, AHs '23, New York, NY, USA, p. 147–158, 2023.
- [4] Brooke, J.: SUS: A quick and dirty usability scale, 1996.
- [5] Hart, S. G. and Staveland, L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, *Human Mental Workload* (Hancock, P. A. and Meshkati, N., eds.), *Advances in Psychology*, Vol. 52, North-Holland, pp. 139–183, 1988.