

視覚障害者がスキーシミュレータを用いるための 聴覚フィードバックの検討

三浦 悠輔¹ Wu Erwin² 栗林 雅希¹ 小池 英樹² 森島 繁生³

概要: 視覚障害者スキーでは、視覚障害者を声で誘導する晴眼者が不可欠であるためトレーニングの機会は限られており、スキー技術向上が困難であった。そこで本研究では、視覚障害者単独でのスキーシミュレータを用いたスキートレーニングを可能とする聴覚フィードバックの検討を行う。パイロットスタディおよび実際のブラインドスキーヤーとガイドへのヒアリングの結果から、次の3種類の音をデザインした：1) ターンに関する情報を伝達する単独音 (ATS: Advance Turn Sound)；2) ユーザの未来の位置と進行すべき位置の差に応じて出力される連続音 (CES: Continuous Error Sound)；3) 仮想ゲレンデ上の旗門を通過したことを伝達する旗門通過音。ブラインドスキーヤーおよび彼らのガイドを対象に評価実験を行ったところ、4名中3名のスキーヤーにおいてATSおよび旗門通過音が出力される条件では、ガイドが掛け声で誘導を行う条件よりも、旗門通過数が増加し、仮想ガイドとの平均距離が減少することが確認された。

1. はじめに

視覚障害者は様々なスポーツを楽しんでおり、その中の一つとしてスキーが挙げられる。視覚障害者スキー（ブラインドスキー）では視覚障害者を声で誘導する晴眼者のガイドが不可欠であり、また季節や環境の制約が厳しいことからトレーニングの機会は限られており、スキー技術向上が困難であった。スキー場においてガイドの負担を軽減する研究 [8] はされているが、視覚障害者単独でのスキートレーニングを可能とするための研究は行われていない。前述した課題の解決策として、図 1, 図 2 のような屋内スキーシミュレータの利用が挙げられる。ユーザは前方のスクリーンに表示される旗門を通過するようにシミュレータ上を移動することで、一年中屋内でスキーのターンのトレーニングを行うことができる。しかし、このようなスキーシミュレーションシステムは晴眼者を対象として設計されているため、視覚障害者がスキーシミュレータを用いて晴眼者と同様のトレーニングを行うことは困難である。そこで本研究では、視覚障害者単独でのスキーシミュレータを用いたスキートレーニングを可能とする聴覚フィードバックシステムを構築する。

視覚障害者がスキーシミュレータを利用する方法として、前方を滑走する仮想ガイドの追従を促すフィードバックの提示が考えられる。これまで視覚障害者の経路追従を



図 1 視覚障害者による実験の様子。視覚障害者は前方の映像を見ることはできないが、聴覚フィードバックによって仮想ゲレンデに配置された旗門を通過することができる。

支援するためのシステムは多く研究されてきた [7], [19] が、これらの手法はスキーの滑走のように、ユーザがスピーディな方向転換を繰り返し行う必要がある状況を想定していない。そこで本研究ではまず、Parseihian ら [19] によって提案された音を参考に、ユーザの未来の位置と進行すべき位置の差に応じて出力される連続音 (CES: Continuous Error Sound) を設計し、晴眼者を対象にスキーシミュレータ上でパイロットスタディを行った。調査の結果、スキーシミュレータ上での滑走において CES は経路追従に一定の効果を持つものの、ターンのタイミングに関する情報を含んでいないため、ユーザが適切なタイミングでターンをすることが困難であるという知見が得られた。さらに本研究では、スキーシミュレータ上でのスキートレーニングに有効なシステムをデザインするために、スキー経験のある

¹ 早稲田大学

² 東京工業大学

³ 早稲田大学理工学術院総合研究科

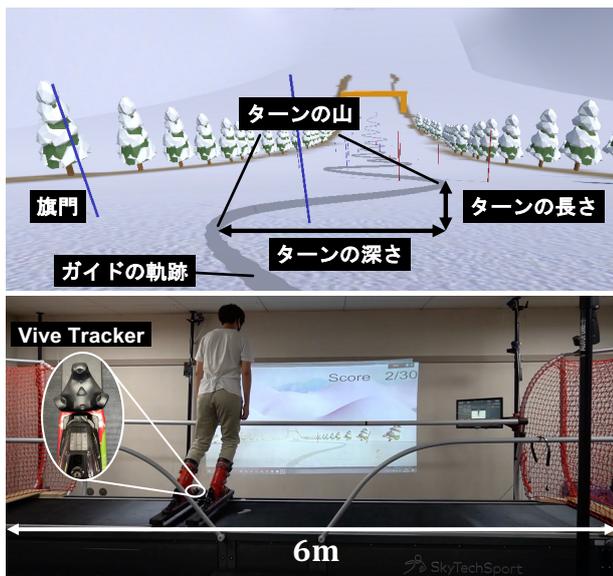


図 2 晴眼者を対象としたスキーシミュレーションシステム。

視覚障害者と彼らのガイドを対象に、実際のブラインドスキーで行われているフィードバックについてヒアリング調査を行った。ヒアリング調査の結果、視覚障害者は彼らの近くを滑走するガイドの掛け声によってターンの方向やタイミングを判断して、滑走しているということがわかった。具体的には、ガイドはターン前に「はい」あるいはターン方向に応じて「右」「左」と声をかけており、これらの掛け声の長さや強弱によって、ターンに関する情報を伝えている [3]。以上の結果を踏まえて本研究では、CES の他にターンを行うタイミングの直前にターンに関する情報を伝達する単独音 (ATS: Advance Turn Sound)、および CES と ATS を組み合わせたフィードバックをデザインした。さらに、ユーザーが旗門を通過できた場合に出力される旗門通過音もデザインし、これらのフィードバックに加えて出力した。

本研究では、これらのフィードバックの有効性を検証するために、4名のブラインドスキーヤーと3名のガイドを対象に評価実験を行った。実験では、ガイドが声掛けを行う Guide 条件、ATS のみを出力する ATS 条件、CES のみを出力する CES 条件、ATS と CES を組み合わせた Mix 条件でブラインドスキーヤーがシミュレータ上で滑走を行い、通過できた旗門数、仮想ガイドとの平均距離を算出することで、ユーザーのパフォーマンスを評価した。実験の結果、4名中3名の視覚障害者は ATS 条件では Guide 条件に比べて、旗門通過数が増加し、仮想ガイドとの平均距離が減少することが確認された。また実験参加者からは、ATS 条件では ATS によってターンを行い、旗門通過音によって事後評価を得ることで、適切なタイミング・長さ・深さのターンを行うことができる、というフィードバックが得られた。一方で、CES 条件におけるユーザーのパフォーマンスは他の条件に比べて有意に低く、CES の有効性は確認され

なかった。また参加者からは、Mix 条件では ATS のみを頼りに滑走しており、CES は頼りにならなかった、というフィードバックが得られた。

2. 関連研究

2.1 視覚障害者のためのスポーツ支援

近年 HCI (Human Computer Interaction) の分野では、視覚障害者のスポーツを支援するために様々な研究が行われている。このような研究の目的は次の3つに分けることができる：1) 視覚障害者が行うことができるスポーツの範囲を広げること (e.g., ヨガ [22], バドミントン [12], [24])；2) 視覚障害者を補助するガイドがいなくとも、視覚障害者がスポーツを行うことができるようにすること (e.g., クライミング [10], [23], ランニング [7], [21], ハイキング [15])；3) 視覚障害者を補助するガイドの負担を軽減すること (e.g., スキー [1], [8])。特に、ブラインドスキーにおいては、Haladjian ら [8] や Aggravi ら [1] が触覚フィードバックを用いてガイドと視覚障害者間のコミュニケーションを円滑化するシステムを提案している。しかし、これらの研究の目的は、ガイドの負担を軽減することであり (3)、ガイド無しで視覚障害者がスキーを行うための研究 (2) は行われていない。

2.2 スキートレーニングシステム

実際のゲレンデにおいてスキーの上達を促す研究は行われている [4], [9]。例えば長谷川ら [9] は、聴覚フィードバックを用いてユーザーの重心をリアルタイムに提示し、姿勢が前かがみになることを抑制するシステムを開発した。しかしこれらのシステムは晴眼者のみを対象としており、視覚障害者を支援する研究は行われていない。

スキーシミュレータを用いたスキーシミュレーションシステムを用いて、スキーの技術の向上を図る研究は多く行われている。Aleshin ら [2] は、スキーシミュレータを用いて前方のスクリーンに仮想ゲレンデを投影するシステムを提案し、初心者からアスリートまで、スキーシミュレータはスキートレーニングに有効であることを示した。またこれまでスキーシミュレータを用いて晴眼者のスキー上達を図るために、有効な視覚的なフィードバックについての研究 [18], [27] や時間の経過速度を VR 空間上で変化させる研究 [17] が行われてきた。このようにスキーシミュレータを用いてスキー上達を促す研究は行われてきたものの、スキーシミュレータを利用した研究は全て晴眼者を対象としており、視覚障害者を対象とした研究は行われていない。

2.3 視覚障害者のための聴覚フィードバック

視覚障害者のための聴覚フィードバックに関する研究はこれまで多く行われてきた。聴覚フィードバックは音声フィードバック [5], [11], [14] と機械音によるフィード

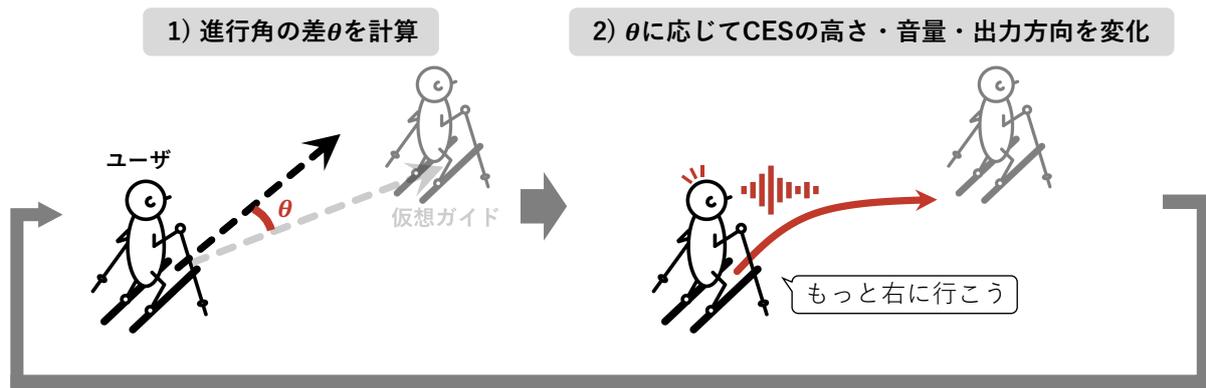


図 3 CES の概要図.

バック [19] に分けられる。機械音によるフィードバックは音声フィードバックに比べて、提示したい量に関する情報をユーザに伝えやすく [16]、認知負荷が低いというメリットがある [13]。距離や量に関する情報を音のパラメータとして符号化して伝達する手法は多くの研究に用いられている [6], [20], [28]。ブラインドスキーでは、ターンの長さや深さ、滑走させたい経路からの距離に関する情報をフィードバックする必要がある [3]。したがって本研究では、機械音を用いた聴覚フィードバックを採用した。また、機械音によるフィードバックを用いて方向を伝達する手法として、ステレオ音響・立体音響 [19], [26] が挙げられる。本研究においてもステレオ音響を用いることで、方向についての情報を伝達した。

また視覚障害者の経路追従のための聴覚フィードバックを用いた研究は多く行われている。例えば、視覚障害者が一人で自由に走ることを可能とするために、地面に引かれた線に対してランナーがどちら側にいるかを判断し、線から外れた場合に警告音をランナーに提示するシステムがある [7]。しかし繰り返しターンを行う必要があるスキーでは、次のターンの情報を理解し、準備をする必要があるため、このシステムのように現在の状態のみを考慮したフィードバックは利用できない。一方で Parseihian ら [19] は、ドライビングシミュレータにおける経路追従では、ユーザの未来の位置と進行すべき位置の差に応じた連続音が有効であることを示した。しかし、このようなフィードバックがスキーにおける経路追従で有効に働くかは検証されていない。そこで本研究では、Parseihian らによって提案される連続音である CES の有効性を検証した。

3. スキーシミュレーションシステムの作成

3.1 ハードウェア

本研究ではまず、屋内用スキーシミュレータ (SkyTechSport Ski Simulator) *1およびプロジェクター、2つの Vive Tracker を用いてスキーシミュレーションシステムを

作成した (図 2)。このスキーシミュレータの横幅はおよそ 6m であり、シミュレータ上にスキー板が平行に配置されている。ただし、スキー板同士の横方向の距離は固定されている。ユーザがスキー板を横に傾けると、傾けた方向にスキー板を滑らせるような外力が働き、ユーザはシミュレータ上を左右に移動することができる。また、ユーザの位置を検出するために、Vive Tracker をスキーシミュレータのスキー板の先端に取り付けた。

3.2 仮想ゲレンデの作成

仮想空間上でスキートレーニングを行うために、Unity 上で 30 の旗門から構成される仮想ゲレンデを作成した。この時ユーザの斜面方向の速度は一定であり、Vive Tracker によって検出されたスキーシミュレータ上でのユーザの位置が仮想ゲレンデ内での左右の位置に対応している。晴眼者のユーザはプロジェクタに投影される仮想ゲレンデの画面を見ることで、旗門との位置関係を把握した上でターンの練習を行うことができる。また、スキーシミュレータの使用経験が十分にある晴眼者が旗門を全て通過するように滑走を行い、その滑走データを仮想ガイドの軌跡として仮想ゲレンデ上に配置した。

4. 予備調査

4.1 パイロットスタディ

本研究ではまず、視覚障害者のためのスキーシミュレーションシステムのデザイン要件を整理するために、晴眼者を対象にパイロットスタディを行った。そのために、Parseihian らによる先行研究 [19] を参考に、ユーザの未来の位置と進行すべき位置に応じて出力される連続音である CES を実装した。CES の具体的な実装について説明する。まず図 3 の左に示すように、ユーザが現在移動している方向と、ユーザが y 秒後に到達すべき位置までの角度差 θ [deg] を計算する ($y = 0.74$)。次に、音の周波数 f [Hz] を θ の大きさから以下の式 1 に基づいて決定する ($f_{max} = 1500\text{Hz}$, $f_{min} = 300\text{Hz}$)。

*1 <https://www.skytechsport.com/ski-simulators-home>

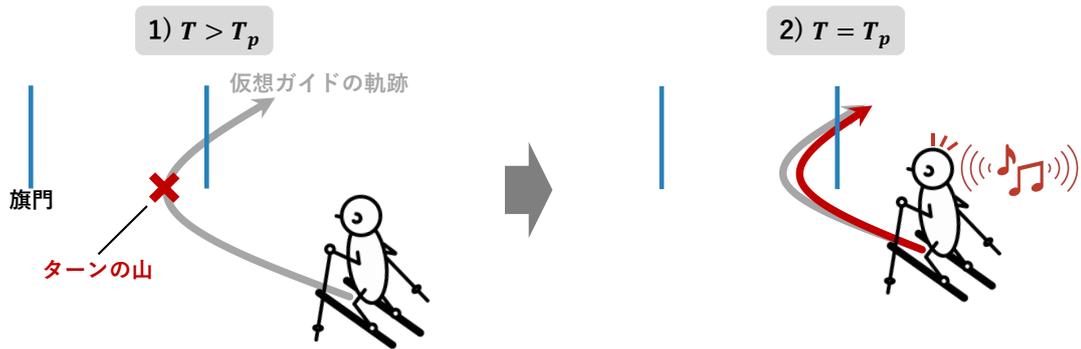


図 4 ATS の概要図. T はユーザがターンの山に到達するまでの時間を表し, T_p は一定の値を持つ. 本研究では $T_p = 0.74$ 秒とした.

$$f = f_{min} \cdot 2^{\frac{|\theta|}{90} \cdot \ln \frac{f_{max}}{f_{min}} \cdot \frac{1}{\ln 2}} \quad (1)$$

これは, 人間は音の高さを対数的に知覚することを反映している. また先行研究 [19] では音量は一定としているが, 連続即時フィードバックは運動スキルの習得を妨げる [25] ため, ユーザが正しい軌道上にいるときは音の出力を停止した. 具体的には, 音量 $V (-\infty \leq V \leq 80)$ [dB] は θ が 10° 以下のとき $-\infty$ となり, θ の絶対値の大きさに対して直線的に増加するように設定した (式 2). 以上のような実装は, 音の高さと音量の両方でユーザに移動の緊急性を把握させることも目的としている.

$$V(\theta) = \begin{cases} 80 & (90 \leq |\theta|) \\ 80 + 20 \log_{10} \frac{|\theta| - 10}{80} & (10 \leq |\theta| < 90) \\ -\infty & (|\theta| < 10) \end{cases} \quad (2)$$

また, ユーザが現在の進行方向に対して, これからどの方向に進行する必要があるかを伝えるために, ステレオ音響を用いてユーザの進行すべき方向から音を出力した. 参加者にはワイヤレスイヤホンを通じて音をフィードバックし, 実験はプロジェクタを付けた条件と, プロジェクタを消して CES を出力する条件で行った.

実験の結果, CES を出力する条件において参加者は, プロジェクタを付けた条件の約 50% の数の旗門しか通過できなかった. 旗門の通過に失敗した原因として「CES ではターンをどのタイミングで行えばよいかかわからず, 適切なタイミングでのターンを行うことができなかった」というコメントが得られた. 一方で参加者からは「軌道から大きく外れた時や比較的緩やかなターンを行う際は, CES によって経路修正を行うことができた」というコメントも得られ, CES には一定の有効性があることが示唆された.

4.2 ヒアリング調査

予備調査の結果を踏まえて本研究では, ガイドは具体的にどのような声掛けを行っており, 視覚障害者はどのよう

なフィードバックを頼りに滑走しているかについて, 実際のブラインドスキーヤーとガイドを対象にヒアリング調査を行った. 調査の結果, ガイドはコースの状況や障害物の位置に応じてスキーヤーに滑走させたいおおよそのエリアを決定し, ターンの直前に「はい」あるいは「右」「左」という声掛けを行っているということがわかった. ガイドはブラインドスキーヤーがターンに向けて準備できるように, これらの掛け声のタイミングと実際にターンを開始させたタイミングの間に猶予時間を設けている. また, ガイドは, この掛け声の強弱によってターンの深さ (図 2 上) に関する情報を伝達し, 掛け声の長さによってターンの長さ (図 2 上) に関する情報を伝達している. さらにブラインドスキーヤーは長いターンを行う際に声掛けが途切れると, 自身の滑走が正しいかわからず不安を感じてしまうため, ガイドは「そのまま」や「もっと右」「もっと左」と絶えず声掛けを行う.

5. 聴覚フィードバックのデザイン

予備調査の結果から CES に加えて, ターンのタイミング・深さ・長さの情報を伝達する単独音である ATS およびユーザの滑走を事後評価する旗門通過音を設計した. さらに本研究では, ATS と CES を組み合わせたフィードバックも設計した. またユーザの混乱を防ぐために, ATS と CES では異なる音色を使用した. ただし本研究では, ATS が出力される時間に関するパラメータや音の種類・長さ, ATS と CES が切り替わる条件についてのパラメータは我々が指定した.

5.1 ターンの予兆音 (ATS)

ATS は図 4 のように, 次のターンのタイミング, 長さ, 深さ, 方向についての情報を伝達する. ATS はターンをすべき方向のスピーカからターンを行うべき地点 (ガイドの軌跡の変曲点) に到達する 0.74 秒前に出力される. これは, 実際にガイドが「はい」という掛け声を行ってから視覚障害者がターンを行うまでに, 猶予時間があることを反

映している (4.2 節). またターンの長さを伝えるために、ターンの長さが長い場合は、音出力される時間が長くなるようにした. 具体的には、次のターンまでの時間が 1.30 秒以下か、2.22 秒以下か、2.22 秒よりも長いかによって音の長さを切り替えた. さらにターンの深さを伝えるために、深さが 1.5m 以上のターンをする場合は 130.82Hz の低音を、それ未満の深さのターンをする場合は 261.63Hz の高音を出力した.

5.2 旗門通過音

本研究では、ユーザが旗門を通過できたかを通知するために旗門通過音を構築した. この音によってユーザは自身の滑走に対する事後評価を得ることができる. ユーザがより詳細な事後評価を得ることができるように、ユーザが旗門を連続して通過できた場合は、通過音の音程が高くなるようにした.

5.3 ATS と CES の組み合わせ (Mix)

ATS と CES を組み合わせると、ユーザは基本的には ATS で滑走を行い、軌道から外れた場合は CES によって軌道修正することができる. しかし単なる組み合わせでは、認知負荷が高いフィードバックになってしまう. したがって本研究では、ATS と CES をユーザの位置や速度に応じて切り替えた. 具体的には、ユーザと仮想ガイドの進行角の差 θ およびユーザとガイドとの距離 d に応じて音を切り替えた (表 1). また、 $\theta \leq 60^\circ$ かつ $d \leq 1.4\text{m}$ のときは、ATS と CES がともにフィードバックされる状況は起こらないように、ATS がフィードバックされている間は CES の出力を停止した.

表 1 ユーザの状態と出力される音の関係.

		ガイドとの距離 d	
		$d \leq 1.4\text{m}$	$d > 1.4\text{m}$
進行角の差 θ	$\theta \leq 20^\circ$	ATS	ATS
	$20^\circ < \theta \leq 60^\circ$	ATS,CES	CES
	$\theta > 60^\circ$	CES	CES

6. 評価実験

本研究では、表 2 に示した 4 名のスキー経験のある視覚障害者 (年齢: 50-72 (平均 56.5) 歳, 男性 3 名, 女性 1 名) と表 3 に示した 3 名のブラインドスキーヤーのガイド経験のある晴眼者 (年齢: 46-56 (平均 50.7) 歳, 男性 1 名, 女性 2 名) を対象に実験を行った (図 1). 本実験は研究倫理委員会の審査を得た上で行った.

6.1 実験デザイン

6.1.1 実験条件

本研究では ATS, CES, Mix の有効性を検証するために、

ガイドが声掛けを行う Guide 条件, ATS のみを出力する ATS 条件, CES のみを出力する CES 条件, ATS と CES をユーザの状況に応じて出力する Mix 条件, という 4 つの条件を用意した. Guide 条件では、ガイドはスキーシミュレータの前方のスクリーンに映し出されている仮想ガイドの軌跡にできる限り沿ったルートを視覚障害者が滑走できるように声掛けを行った. また旗門通過音は Guide 条件を除く全ての条件において出力した. 参加者にはスキーシミュレータの左右に設置された 2 つのスピーカを通じて音をフィードバックした. これは、パイロットスタディにおいて用いたワイヤレスイヤホンでは遅延の問題が発生したためである.

6.1.2 コース準備

本実験では 30 の旗門から構成される C0, C1, C2 の 3 コースを用意した. C0 では、次の旗門までの秒数が 1.62 秒から 1.74 秒で、ターンの深さが 1.55m から 1.70m の値を取るようにランダムに旗門を配置した. C1 では C0 と次の旗門までの秒数の範囲は同じで、ターンの深さが 1.96m から 2.17m の値を取るようにランダムに旗門を配置した. C2 では C0 と次の旗門までの秒数の範囲は同じで、ターンの深さが 1.29m から 2.84m の値を取るようにランダムに旗門を配置した. また、両方のコースで途中で短いターン (次の旗門までの秒数が 0.78 秒から 0.90 秒で、ターンの深さが 0.98m から 1.09m) を 2 回連続で行う必要がある 2 箇所を用意した.

6.2 実験手順

実験は P1-G1, P2-G1, P3-G2, P4-G3 の組み合わせで行った. まず参加者にスキーシミュレータと実験内容についての説明とアンケートを実施後、視覚障害者はヘルメット, プロテクタ, スキーブーツを身につけた上でスキーシミュレータに乗った. その後、以下の手順で実験を行った.

- (1) スキーシミュレータに慣れるために、30 分程度の練習を行った.
- (2) 各実験条件について、具体的にどのようなフィードバックが行われるかについての説明を行った.

表 2 実験に参加した視覚障害者のデータ.

参加者	性別	年齢	視力	障害歴	スキー経験
P1	男性	50	全盲	44 年	7 年
P2	男性	72	全盲	65 年	32 年
P3	女性	51	弱視	51 年	20 年
P4	男性	53	全盲	40 年	40 年

表 3 実験に参加したガイドのデータ.

参加者	性別	年齢	ガイドした視覚障害者	ガイド経験
G1	女性	50	P1, P2	15 年
G2	男性	46	P3	20 年
G3	女性	56	P4	30 年

- (3) 練習開始時点でのパフォーマンスを実験条件ごとに揃えるために、練習用のコース C0 において 30 ある旗門のうち 20 旗門を通過できるまで、各条件ごとに練習を行った。
- (4) コース C1 について、4 つの実験条件でそれぞれ 4 回ずつ練習滑走を行った。
- (5) コース C1 について、4 つの実験条件でそれぞれ 2 回ずつテスト滑走を行った。
- (6) コース C2 について、4 つの実験条件でそれぞれ 4 回ずつ練習滑走を行った。
- (7) コース C2 について、4 つの実験条件でそれぞれ 2 回ずつテスト滑走を行った。
- (8) 計測終了後、参加者に対して実験に関するアンケートおよびインタビューを行った。

実験時には、安全のためにスキーシミュレータの幅の長さの間隔をつかむまでは、参加者はシミュレータの前方に設置された手すりから手を離さないように移動した。また、参加者が左右のネット（図 2）に衝突することを防ぐために、手すりの中央部にビニールを巻き、さらに天井から目印となるものを吊り下げ、シミュレータ上の中心位置が分かるようにした。さらにユーザがコースを記憶して滑走することを防ぐために、手順 (4)～(7) では、各コース（C1, C2）のルールに基づいて生成されたコースの中からランダムなコースを選んだ。

6.3 評価指標

6.3.1 旗門の通過数

仮想ゲレンデ上に配置された 30 の旗門を通過した数を「旗門の通過数」と定義し、各滑走におけるユーザの位置情報結果から算出した。

6.3.2 仮想ガイドとの平均距離

仮想ゲレンデ上に配置された仮想ガイドの軌跡とユーザとの水平方向の距離の平均を「ガイドとの平均距離」と定義し、各滑走におけるガイドに対するユーザの位置情報結果から算出した。

6.3.3 システムの主観評価

実験終了後、参加者にそれぞれの実験条件に関する主観評価アンケートを行った。表 4 の質問文に対し、同意するかどうかを 7 段階のリッカート尺度（1：全く同意しない、7：強く同意する）で回答する形で集計した。さらに、それぞれのコンディションの利点、欠点、改善案などについてインタビューを行った。

6.4 結果

6.4.1 定量評価結果

図 5, 6 に各条件、各コースにおける定量評価指標の結果を示した。マン・ホイットニーの U 検定（有意水準：5%）を用いて各条件の比較を行ったところ、C1 では CES 条件

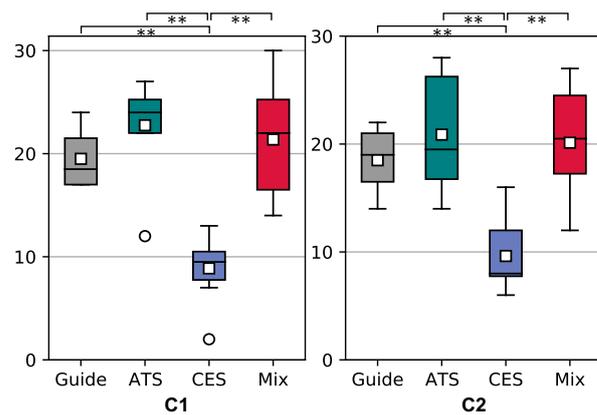


図 5 各実験条件における旗門通過数. 上の括弧は各条件間の有意差を表す: *($p < .05$), **($p < .01$).

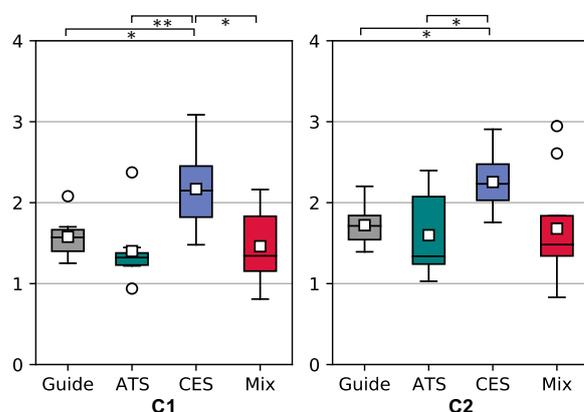


図 6 各実験条件における仮想ガイドとの平均距離. 上の括弧は各条件間の有意差を表す: *($p < .05$), **($p < .01$).

に比べて、Guide 条件、ATS 条件、Mix 条件の方が旗門の通過数が有意に大きくなる ($p=0.0009, 0.002, 0.0009$) という結果が得られ、C2 でも同様の結果が得られた ($p=0.002, 0.002, 0.004$). また、C1 では CES 条件に比べて、Guide 条件、ATS 条件、Mix 条件の方が仮想ガイドとの平均距離が有意に小さくなる ($p=0.02, 0.005, 0.02$) という結果が得られた。一方 C2 では、CES 条件に比べて、Guide 条件、ATS 条件の方が仮想ガイドとの平均距離が有意に小さくなる ($p=0.02, 0.03$) という結果が得られたが、Mix 条件との間に有意差は確認されなかった ($p=0.08$).

また参加者ごとの定量評価結果を図 7 と図 8 に示した。P3 以外の参加者は P1 の C2 での仮想ガイドとの平均距離を除いて、どちらの評価指標においても Guide 条件に比べて ATS 条件の方が旗門通過数が増加し、ガイドとの平均距離が小さくなるという結果が得られた。一方どの参加者においても、CES 条件では他の条件と比べてほとんどの場合で旗門通過数が減少し、仮想ガイドとの平均距離が大きくなるという結果が得られた。また ATS 条件と Mix 条件における参加者ごとの各評価指標はほとんど同じ結果であった。

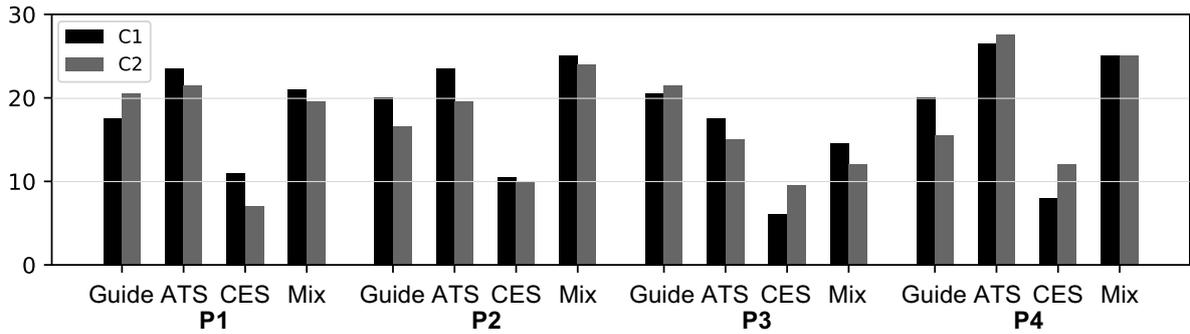


図 7 参加者ごとの各実験条件における旗門通過数。

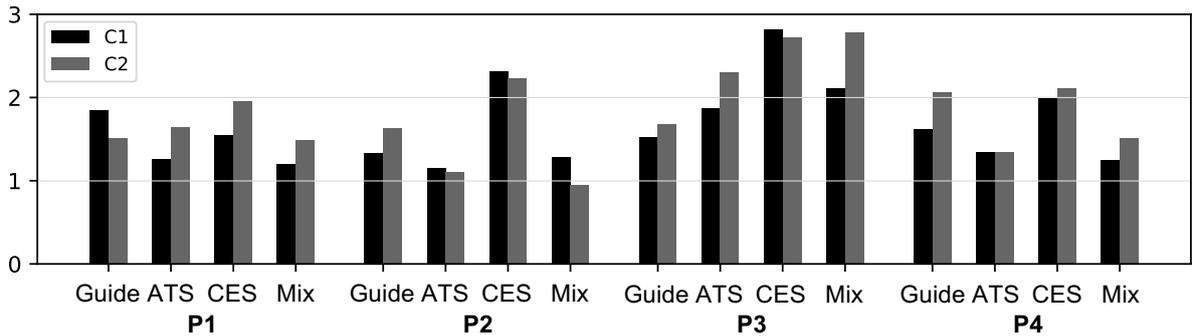


図 8 参加者ごとの各実験条件における仮想ガイドとの平均距離。

6.4.2 主観評価結果

アンケート結果を表 4 に示した。Q1-4 全てにおいて、CES 条件は他の条件に比べて評価が低かった。また 4 名中 3 名は、Guide 条件と ATS 条件は、Mix 条件に比べると全体を通してわかりやすいと回答した (Q2)。しかし、その他の質問項目に関しては、Guide 条件、ATS 条件、Mix 条件においてほとんど同じような回答が得られた。

インタビューでは、参加者全員がスキーシミュレータを使用したスキートレーニングは楽しく、日常的にシミュレータを用いたトレーニングを行いたいと回答した。特に旗門通過音に対しては、参加者全員がモチベーションが高まったとコメントした：A1：「旗門の通過音が鳴ると、うまくターンを行うことができていることがわかり、楽しく滑走することができた。そういった意味では、Guide 条件では自分がうまく旗門を通過できているかわからなかったため、他の条件のほうが楽しかった」(P1)。

また 4 名中 3 名の参加者からは、Guide 条件とその他の条件におけるフィードバックの方法の差について、ガイドの音声フィードバックに比べて、ステレオ音響を用いたフィードバックは直感的でわかりやすかったとコメントした。一方で 1 名の参加者からは、次のような否定的な意見が得られた。：A2：「普段ブラインドスキーをする際は、ガイドの声掛けを頼りにしており、それに慣れているので、音声フィードバックのほうがわかりやすかった」(P3)。

全ての参加者は、ATS は次のターンについての情報を

事前に理解し、準備するために役に立ったと回答した。また、4 名中 3 名の参加者からは、ATS の長さの変化はわかりやすく、次のターンまでの時間を理解することができたという意見が得られた。一方 ATS の高さの変化については、3 名の参加者はわかりにくかったと回答した：A3：「音の高さの違いが明確でなかったため、そのことを反映した滑走を行うことができないことがあった。音の高さの違いをもっと明確にしてほしかった」(P4)。また ATS がどのような状況で役に立ったかについてインタビューを行ったところ、次のようなコメントが得られた：A4：「正しく軌道に乗れている時は、旗門通過音と組み合わせて聞くことでリズムに乗って正しく滑走することができた。正しい軌道から外れてしまった場合でも、ATS に合わせて滑走することで、再び軌道に乗ることができた」(P4)、A5：「正しい軌道から外れた場合は、自分がどのように軌道から外れているかわからず、軌道修正することが難しかった」(P1)。しかしながら 1 名の参加者は、本来は ATS が出力されてから 0.74 秒後にターンを行う必要があるにもかかわらず、ATS の出力に合わせてターンを開始してしまっており、次のようなコメントが得られた：A6：「ATS の意味は理解することができたが、出力されてから少し待ってターンをすることができなかった。もう少し練習をして慣れればできるようになると思う」(P3)。

また全ての参加者は、CES は仮想ガイドの追従のためにほとんど役に立たなかったと回答した。具体的には、CES

表 4 アンケート項目と結果.

質問項目	実験条件	P1	P2	P3	P4	平均	標準偏差	中央値
Q1: 自信を持って滑走することができた.	Guide	6	5	7	5	5.75	0.83	5.5
	ATS	6	5	6	7	6.00	0.71	6
	CES	1	4	4	2	2.75	1.30	3
	Mix	4	5	6	7	5.50	1.12	5.5
Q2: フィードバックはわかりやすかった.	Guide	6	7	7	5	6.25	0.83	6.5
	ATS	6	5	7	7	6.25	0.83	6.5
	CES	1	1	2	1	1.25	0.43	1
	Mix	5	1	5	7	4.50	2.18	5
Q3: 次のターンについて理解し, 準備することができた.	Guide	6	7	7	4	6.00	1.22	6.5
	ATS	6	5	7	7	6.25	0.83	6.5
	CES	1	2	4	3	2.50	1.12	2.5
	Mix	6	5	6	7	6.00	0.71	6
Q4: 軌道から外れてしまった時に, 軌道修正に役立った.	Guide	1	7	7	4	4.75	2.49	5.5
	ATS	1	1	7	7	4.00	3.00	4
	CES	2	1	4	4	2.75	1.30	3
	Mix	3	1	6	7	4.25	2.38	4.5

によって自分が軌道修正を行う必要があるということはわかるものの、修正のためにどのように移動すればいいかがわからなかった、というコメントが参加者全員から得られた：A7：「CESによって自分が軌道から外れていることはわかったが、その修正のためにどのように滑走すればいいかがわからなかった」(P2)。一方で、コースの初めにある緩やかなターンではCESは役に立ったという意見が得られた：A8：「1つ目の旗門に関しては、CESによって通過することができた」(P1)。

またATSとCESを組み合わせた条件については、参加者全員はATSのみを頼りに滑走し、CESは頼りにならなかったとコメントした：A9：「ほとんどATSを聞いていて、CESは判断に活かすことができなかった」(P3)、A10：「CESがあることで、ATSに集中することができず、むしろCESは邪魔だった」(P4)。

7. 議論

7.1 ATSの有用性

ATSを用いた条件(ATC条件およびMix条件)とGuide条件の間には、コースや定量評価指標によらず、有意差は確認されなかった。一方で、P3以外の参加者では、Guide条件と比べてATS条件の方が平均的に旗門通過数は増加し、仮想ガイドとの平均距離は小さくなった。またアンケート調査を通じて、ATSは全体を通してわかりやすく、次のターンについての情報を理解し、それに向けて準備をすることが可能となったという結果が全員の参加者から得られた。さらにインタビュー結果(A4)から、ATSだけでは軌道から外れた場合に軌道修正を行うことはできないが、旗門通過音と組み合わせて聞くことで、軌道修正が可能となることがわかった。以上のことからATS条件では、ユーザは慣れるとガイドによるフィードバックと同等のパ

フォーマンスを行うことができる可能性がある。

7.2 CESの課題と有用性

CES条件では、他の条件と比べてユーザのパフォーマンスが有意に低下した。さらにインタビュー(A7)では、CESは軌道修正を行う必要がある方向は通知してくれるが、具体的にどの程度修正すればいいかわからないという意見が得られた。以上のことから、CESはスキーシミュレータ上での経路追従タスクに対しては有効でないことがわかる。これはCESの性質上、CESが進行方向と逆方向のスピーカから出力された場合、必ずしも逆方向にターンを行う必要があるとは限らないためである。例えば、ユーザの進行方向と逆の方向からスピーカからCESが出力されたシチュエーションでは、ユーザは逆方向にターンをする必要がある場合と、進行方向を維持しつつ逆方向に少しずれる必要がある場合が考えられる。しかし、そのようなシチュエーションで参加者は、CESが聞こえた瞬間に逆方向にターンを行っていた。CESはその音量や音高でユーザがどの程度軌道を修正すべきか伝えていたが、スキーシミュレータにおける練習では運転のようにハンドルを経由した方向転換とは違い、体全体を使った方向転換をするため、CESに対する適切な反応が困難であった。したがって、CESはスキーシミュレータにおけるスキートレーニングのように、急な方向転換が困難なタスクでは効果的でないといえる。一方で、コースの初めにある比較的長く浅いターンについては、全員が正確に仮想ガイドを追従できており、参加者からもコースの初めではCESは役に立ったという意見が得られた(A8)。したがって、CESは頻繁なターンを必要とせず、簡単に進行方向を変化することができる状況においては効果的であるといえる。

7.3 ATS と CES の組み合わせの有用性と課題

Mix 条件と ATS 条件との間には、コースや定量評価指標によらず、有意差は確認されなかった。またインタビュー結果 (A9) から、全てのユーザは ATS のみを頼りに滑走しており、CES は全く頼りにしていなかったことがわかった。またインタビュー (A10) において、CES が組み合わせることでむしろ集中の妨げとなったという意見が得られたことから、ATS と CES の組み合わせは有効に働かなかったといえる。これらの結果は、7.2 節での考察からも裏付けられる。

7.4 今後の発展

7.4.1 システムの改善案

参加者からは ATS と旗門通過音は高く評価された一方で、これらの音には改善の余地が存在する。例えば、P3 が ATS のタイミングに合わせてターンを行うことに慣れなかったように (6.4.2 項)、音が出力されてから実際にターンを行うまでの最適な時間はユーザによって変わりうる。またインタビュー (A3) にて、ATS の高さの変化がわかりにくいという意見が得られたことから、音の高さについてはより明確な差をつけることで、さらなるユーザのパフォーマンスの向上が期待される。さらに実験では、ターンを行う頻度が高いコースを用いたことで ATS の有効性が示されたが、そうでないコースにおける有効性については検証を行っていない。また本研究で我々が指定した ATS が出力されるタイミングや音の種類・長さは、本来は視覚障害者による実験を通してデザインされるべきである。今後はこれらを変化させた実験を行うことで、ユーザごとに最適な ATS をデザインするとともに、様々なコースを用いて ATS が有効に働く状況について検証したい。

また、旗門通過音についても改良の余地がある。実験から旗門通過音にはユーザの軌道修正を促す効果があることが示唆されたが、現状は旗門を通過できなかった場合に得られる情報はなく、旗門を通過できた場合も旗門内のどの位置を通過したかはわからない。そこで今後は、単に旗門を通過したかをフィードバックするのではなく、ターン毎のパフォーマンスを評価する役割を明示的に持たせた音を設計するという方向性が考えられる。例えば、旗門通過に失敗した場合も、通過のタイミングで旗門からどの程度離れていたかをフィードバックし、旗門通過に成功した場合も、旗門の内側からどの程度離れた場所を通過したかをフィードバックすることで、ユーザのパフォーマンスの向上が期待される。今後はこのような旗門通過音のさらなる拡張についても検証を行いたい。

7.4.2 スキー場での応用

本研究によって、ターンの頻度によって ATS と CES の有効性が変化することが示唆された。したがってこれらの音を実際のスキー場における視覚障害者の滑走に応用する

際には、スキーヤに滑走させたいコースによって、ATS と CES を出力する条件を変化させる必要がある。例えばターンを頻繁に行う必要があるようなコースでは ATS を、そうでないようなコースでは CES を主に出力することで、ユーザを誘導することが可能となると考えられる。そこでターンの頻度と ATS・CES それぞれの有効性の対応関係については、今後より詳細に探求する必要がある。さらに、実際に視覚障害者が単独で滑走するためには、スキー場における周囲の状況を把握したり、ユーザの位置や姿勢、速度といった情報を獲得したりする必要も生じる。今後は ATS や CES の実環境での有効性についての検証を行いつつ、コンピュータビジョン技術を利用したスキー場での周囲の情報の検出およびユーザの情報の獲得に取り組みたい。

8. まとめ

本研究では、視覚障害者単独でのスキーシミュレータを用いたトレーニングを可能とする聴覚フィードバックについて検討を行った。本研究ではパイロットスタディおよび実際のブラインドスキーヤとガイドへのヒアリング結果から、CES、ATS および旗門通過音をデザインした。本研究では4名の視覚障害者と3名のガイドによって評価実験を行い、これらのフィードバックの有効性を検証した。実験の結果、ATS をフィードバックする条件では、ガイドが掛け声を行う条件に対して4名中3名のパフォーマンスが向上した。この結果から、ATS は次のターンについての情報を理解し、それに向けて準備をすることが可能とすることがわかった。一方で、スキーシミュレータを用いたスキートレーニングでは全身を使った方向転換を繰り返し行う必要があり、進行方向を瞬時に変更したり固定したりすることが困難であるため、CES の有効性は確認されなかった。今後は、要求されるターンの頻度が低いコースやユーザの移動範囲が広がった環境で、CES と ATS の有効性がどのように変化するかを検証し、視覚障害者の実環境における単独でのスキー滑走の可能性についても模索したい。

謝辞 本研究は、JST CREST JPMJCR17A3 の支援を受けている。

参考文献

- [1] M. Aggravi, G. Salvietti, and D. Prattichizzo. Haptic assistive bracelets for blind skier guidance. In *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, AH '16, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [2] V. Aleshin, S. Klimenko, M. Manuilov, and L. Melnikov. Alpine skiing and snowboarding training system using induced virtual environment. *Science and Skiing IV*, 4:137-144, 2009.
- [3] K. B. S. Club. Blind ski support guideline. Retrieved in October 10, 2022 from https://kanagawa-blindski.com/wp-content/uploads/2018/04/Guideline_2017ver1.pdf, 2017.
- [4] A. Colley, J. Väyrynen, and J. Häkkinen. Skiing in a

- blended virtuality: An in-the-wild experiment. In *Proceedings of the 19th International Academic Mindtrek Conference*, AcademicMindTrek '15, page 89–91, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [5] N. Fallah, I. Apostolopoulos, K. Bekris, and E. Folmer. The user as a sensor: Navigating users with visual impairments in indoor spaces using tactile landmarks. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, page 425–432, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [6] A. Fiannaca, I. Apostolopoulos, and E. Folmer. Headlock: A wearable navigation aid that helps blind cane users traverse large open spaces. In *Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ASSETS '14, page 19–26, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [7] Google. Project guideline. Retrieved in October 10, 2022 from <https://japan.googleblog.com/2021/08/project-guideline.html>, 2021.
- [8] J. Haladjian, M. Reif, and B. Brügge. Vihapp: A wearable system to support blind skiing. In *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, page 1033–1037, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [9] S. Hasegawa, S. Ishijima, F. Kato, H. Mitake, and M. Sato. Realtime sonification of the center of gravity for skiing. In *Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference*, AH '12, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [10] M. Ilich. Metaholds: A rock climbing interface for the visually impaired. *Ilich M*, 2008.
- [11] S. Kayukawa, T. Ishihara, H. Takagi, S. Morishima, and C. Asakawa. Blindpilot: A robotic local navigation system that leads blind people to a landmark object. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, page 1–9, New York, NY, USA, 2020. ACM.
- [12] S. Kim, K.-p. Lee, and T.-J. Nam. Sonic-badminton: Audio-augmented badminton game for blind people. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, page 1922–1929, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [13] R. L. Klatzky, J. R. Marston, N. A. Giudice, R. G. Golledge, and J. M. Loomis. Cognitive load of navigating without vision when guided by virtual sound versus spatial language. *Journal of experimental psychology: Applied*, 12(4):223, 2006.
- [14] M. Kuribayashi, S. Kayukawa, H. Takagi, C. Asakawa, and S. Morishima. Linechaser: A smartphone-based navigation system for blind people to stand in line. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, May 2021. ACM.
- [15] S. K. Long, N. D. Karpinsky, H. Döner, and J. D. Still. Using a mobile application to help visually impaired individuals explore the outdoors. In *Advances in design for inclusion*, pages 213–223. Springer, Cham, 2016.
- [16] S. Mascetti, L. Picinali, A. Gerino, D. Ahmetovic, and C. Bernareggi. Sonification of guidance data during road crossing for people with visual impairments or blindness. *International Journal of Human-Computer Studies*, 85:16–26, 2016. Data Sonification and Sound Design in Interactive Systems.
- [17] T. Matsumoto, E. Wu, and H. Koike. Skiing, fast and slow: Evaluation of time distortion for vr ski training. In *Augmented Humans 2022*, AHs 2022, page 142–151, New York, NY, USA, 2022. ACM.
- [18] T. Nozawa, E. Wu, F. Perteneder, and H. Koike. Visualizing expert motion for guidance in a vr ski simulator. In *ACM SIGGRAPH 2019 Posters*, SIGGRAPH '19, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [19] G. Parseihian, M. Aramaki, S. Ystad, and R. Kronland-Martinet. Exploration of sonification strategies for guidance in a blind driving game. In *International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research*, pages 413–428, Cham, 2017. Springer.
- [20] G. Presti, D. Ahmetovic, M. Ducci, C. Bernareggi, L. Ludovico, A. Baratè, F. Avanzini, and S. Mascetti. Watchout: Obstacle sonification for people with visual impairment or blindness. In *The 21st International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ASSETS '19, page 402–413, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [21] K. Rector, R. Bartlett, and S. Mullan. Exploring aural and haptic feedback for visually impaired people on a track: A wizard of oz study. In *Proceedings of the 20th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ASSETS '18, page 295–306, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [22] K. Rector, C. L. Bennett, and J. A. Kientz. Eyes-free yoga: an exergame using depth cameras for blind & low vision exercise. In *Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ASSETS '13, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [23] M. Richardson, K. Petrini, and M. Proulx. Climb-o-vision: A computer vision driven sensory substitution device for rock climbing. In *Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '22, New York, NY, USA, 2022. ACM.
- [24] M. Sadasue, D. Tagami, S. Sarcar, and Y. Ochiai. Blind-badminton. In *International Conference on Human-Computer Interaction*, pages 494–506, Cham, 2021. Springer.
- [25] R. A. Schmidt and G. Wulf. Continuous concurrent feedback degrades skill learning: Implications for training and simulation. *Human Factors*, 39(4):509–525, 1997. PMID: 9473972.
- [26] B. A. Smith and S. K. Nayar. The rad: Making racing games equivalently accessible to people who are blind. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, page 1–12, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [27] E. Wu, F. Perteneder, H. Koike, and T. Nozawa. How to vizski: Visualizing captured skier motion in a vr ski training simulator. In *The 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, VRCAI '19, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [28] C. Yoon, R. Louie, J. Ryan, M. Vu, H. Bang, W. Derksen, and P. Ruvolo. Leveraging augmented reality to create apps for people with visual disabilities: A case study in indoor navigation. In *The 21st International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ASSETS '19, page 210–221, New York, NY, USA, 2019. ACM.