

拡張現実を用いた姿勢可視化によるスキートレーニングシステム

松本 高* Erwin Wu*† Chen-Chieh Liao* 小池 英樹*

概要. スキーは人気の高いウィンタースポーツであり、トレーニング効率の向上を目的としたシステムが数多く提案されている。しかし、既存システムの多くは特定のシミュレータマシン上でしか使用できず、実際のトレーニングとのギャップが大きい。また、スキーの重要な要素の一つである上半身の姿勢の改善に焦点を置いたシステムは少ない。本論文では、シースルー型ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いた拡張現実 (AR) スキートレーニングシステムを提案する。提案システムでは、滑走姿勢を改善するための3種類の視覚的フィードバックをリアルタイムに提示する。評価実験によれば、ユーザの背骨を可視化する手法は従来手法よりも約7%姿勢が改善され、最も高いパフォーマンスが得られることが示された。最後に、実際のスロープ上でのパイロットテストにより、実環境においても提案システムが適用できることを確認した。

1 はじめに

仮想現実 (VR) や拡張現実 (AR) などの XR 技術の発展に伴い、仮想空間は技術習得の場面にも多く用いられるようになってきている。

アルペンスキーのトレーニングでは、場所や季節に対する制限や、リアルタイムに姿勢評価ができない問題がある。これらの課題に対する様々なシステムが提案されている [1, 2, 8, 14, 16, 18, 19, 21, 23, 28, 29]。その中には、ウェアラブルセンサ [23] や聴覚フィードバック [14] を活用して、実際のスロープ上での指導を行うものがある。しかし、スキーの効果的なトレーニングのためには、視覚的フィードバックを用いることが最適であると示唆されている [16]。

既存の視覚ベースのスキートレーニングシステムの多くは VR を用いてユーザに情報を提示している [16, 21, 29]。しかし、ユーザが周囲を見ることができない VR システムは、安全上の理由からユーザの位置が変化しない小規模なシミュレータ上のみでの使用に制限されるものがほとんどである。

本論文では、これらの問題に対処するため、ビデオシースルー型のヘッドマウントディスプレイ (HMD) を利用して、視覚的フィードバックを提示する AR スキートレーニングシステムを提案する (図 1)。提案システムの主な対象は、スラロームスキーにおける旗を通過することができる一方、滑走中に正しい姿勢を意識する余裕がない中級スキーヤーである。

提案システムを評価し、AR における最適な視覚的フィードバックを探索するための評価実験を行う。季節の制限や安全上の理由から、実験には横幅約 6m の大規模スキーシミュレータを代替として用いる。

評価実験では、3つの視覚化手法 (図 2) を比較する: Follow The Pro はコーチに追従する既存の可視

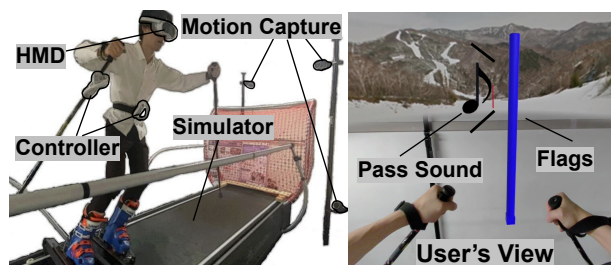


図 1. 提案システムの概要。

化手法 [29], Spine Angle Indicator はユーザの背骨を可視化するもの、Keep Horizontal Pole は仮想のポールを水平に保つことで間接的に姿勢を矯正するものである。条件間の比較として、作業負荷 [12], ユーザ経験 [25], ユーザビリティ [4] に関する複数のアンケートによる定性的評価と、滑走のパフォーマンスによる定量的評価を行う。結果として、ユーザの背骨を可視化する手法は、複数の難易度条件・評価指標において既存の可視化手法を上回り、今後の AR トレーニング開発の方向性を示唆している。

最後に、提案システムを用いて、HMD を装着した状態でも実際の雪上でターンが行えることを確認する (図 4)。

2 関連研究

2.1 AR を用いた技能習得支援

様々な分野の技術習得において、AR が活用されている。Han ら [11] は、太極拳の自己トレーニングを支援するシステムを提案した。ユーザは、シースルー型の HMD を用いて、コーチや自身の動きを観察することができる。Dorzheeva ら [6] は、AR とドローン、および触覚インターフェースを組み合わせたアーチェリートレーニングシステムを提案した。

Copyright is held by the author(s).

* 東京工業大学

† 華為技術日本株式会社

彼らの実験結果は、技能習得において仮想的な視覚フィードバックと物理的な小道具を組み合わせることの有効性を示唆している。Suzuki ら [30] は、合気道の指導において用いられる比喻表現を AR グラス上に視覚化することで、身体の動かし方に関する感覚の理解を支援するシステムを提案した。他にも、メンテナンス [15, 27]、回路基板のデバッグ [5]、ヨガ [17]、歩行リハビリ [10]、バスケットボールのフリースロー [20]、ボールジャグリング [22]、脳外科手術のカテーテル [7] などの AR システムが存在している。

2.2 スキーシミュレーション

シミュレーションを用いて、スキーのトレーニング効果を高める研究が数多く行われている。Aleshin ら [1, 2] は、屋内用スキーシミュレータと仮想スロープの投影を組み合わせたシステムを提案し、初心者とアスリートの両方に対して提案システムが有効であることを示した。Panizzplo ら [23] は、スラロームスキーにおける筋活動パターンを、自然雪上、本格的なトレッドミル、家庭用トレーニングマシンの3つの異なる条件下で比較した。Hasegawa ら [14] は、聴覚フィードバックを用いて滑走中の重心位置をリアルタイムに提示した。

VR とスキーシミュレータを組み合わせたシステムも多く提案されており、VR コンテンツによりユーザの集中力を高める [18]、様々な機能を用いてユーザとコーチの差を可視化する [28, 29]、触覚フィードバックを用いて理想的な膝の角度を提示する [16]、時間の経過速度を変化させる [21] システムなどが存在している。また、AR を用いてスロープ上に仮想の障害物を動的に生成するシステム [8] や、ユーザ間で通過ルートを共有するシステム [9] が提案されている。

しかし、既存のスキーシステムの多くは、ユーザの位置がほとんど動かない簡易的なシミュレータ上での使用のみに制限されており、実際のトレーニングとのギャップが大きい。また、足首の角度などユーザの下半身の姿勢を評価した研究 [16, 29] はあるが、上半身の姿勢が改善されたかどうかを定量的に評価したものは少ない。

3 システムデザイン

3.1 ハードウェア

提案システムは、ビデオシースルー型 HMD (PIC O4¹)、及び2つのコントローラから構成される (図 1(左))。今回は、実際のスロープの代替として、U.S. Ski Team²がトレーニングに使用している大規模な屋内スキーシミュレータ (SkyTechSport³) を用い

る。ユーザはスキーブーツを履いてシミュレータに乗り、ロール軸に足を傾げることで実際のパラレルターンに近い軌道で左右方向に移動できる。また、シミュレータの周囲には8台のモーションキャプチャカメラ⁴を設置し、ユーザの3次元姿勢を取得する。

3.2 仮想スロープ

没入感の高いスキートレーニングを実現するために、Unity を用いて仮想スキースロープを作成する (図 1(右))。スロープには仮想の旗が設置されており、一定の速度で手前に移動する。ユーザはスキーシミュレータを操作して横方向に移動し、旗の外側を通過する。ユーザが装着した HMD の横方向の座標を参照し、旗の外側を通過した際にターン成功の効果音が鳴る。

没入感を高めるため、仮想空間の背景には雪山の球体画像を投影する。ただし、球体画像の下半分は透明になっており、ユーザは HMD を装着していても自身の位置や姿勢を把握することができる。

3.3 視覚的フィードバック

スキーにおいて、姿勢は重要な要素の一つである。提案システムでは、以下の3つの視覚的フィードバックを用いてユーザの滑走時の姿勢改善を支援する。

3.3.1 Follow The Pro (Cond.F)

スキーの一般的なトレーニング方法として、コーチの動きを模倣しながら追従するものがある。Follow The Pro(Cond.F) では、Wu ら [29] の方法を参考にし、事前に記録したエキスパート1名 (ワールドカップレーサー) の全身姿勢をユーザの2.5m 前方に表示する (図 2(左))。

3.3.2 Spine Angle Indicator (Cond.S)

スキーの技術を向上させるためには、上半身を地面に対して垂直に保つことが重要である⁵。しかし、滑走中の自身の姿勢を把握し、改善することは困難である。Spine Angle Indicator(Cond.S) では、PICO4 のコントローラを腰の中心に固定し、ユーザの背骨の向き (コントローラから HMD へのベクトル) をインジケータとして可視化する (図 2(中))。インジケータは、ユーザが上半身を地面と垂直に保っている間は白色であり、一定以上の角度に傾くと赤色に変化する。事前の検証実験により、インジケータが赤色になるしきい値を10度とした。

3.3.3 Keep Horizontal Pole (Cond.K)

初中級者の場合、自分の姿勢を把握していても、それを改善する余裕がないことが考えられる。これに対し、フィードバックを間接的なものに置き換え

¹ <https://www.picoxr.com>

² <https://www.simsportsarena.com/us-ski-team>

³ <https://www.skytechsport.com>

⁴ <https://qualisys.archivertips.com>

⁵ <https://ltad.alpinecanada.org/coaches>

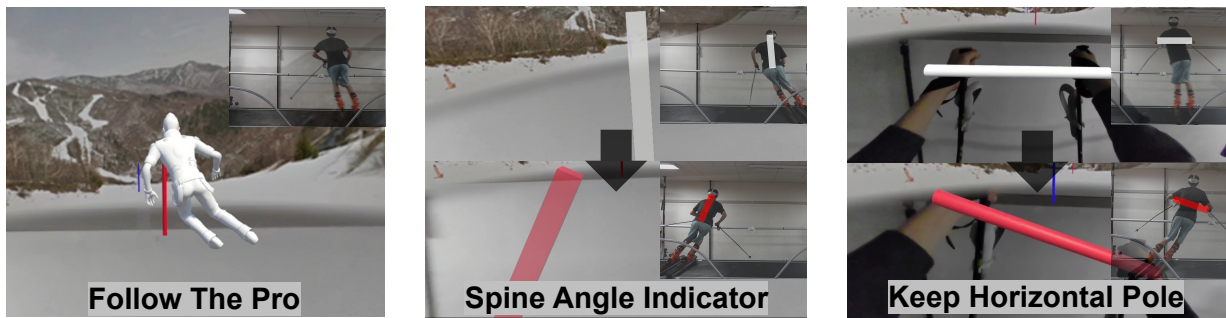


図 2. 提案システムの 3 つの視覚的フィードバック。

ることより、姿勢改善を支援するアプローチが考えられる [30]. Keep Horizontal Pole(Cond.K)では、Alpine Canada⁵が提唱するトレーニング法を参考にし、ユーザの手元に仮想のポールを表示する(図 2(右)). このポールを水平に保つことで、間接的な上半身の姿勢の改善を促す. ユーザの手の位置は 2 本のスキーストックに取り付けられたコントローラを用いて追跡する. (1) 手の位置が頭から 50cm 以上低い, (2) 左右の手の高さが水平から 20 度以上傾いている, (3) 手が前方に 35cm 以上伸びていない, のいずれかの場合に、ポールが白色から赤色に変化する. 各しきい値は Cond.S と同様に決定された.

4 評価実験

提案システムの評価および、3 つの視覚的フィードバックの有効性を比較するための評価実験を行った.

本実験は、東京工業大学倫理審査委員会の承認を受け実施された.

4.1 仮説

本実験では、以下の仮説を立て、後述する評価指標を用いて検証を行った:

H1: 抽象的な姿勢可視化によるトレーニング効果
コーチの全身姿勢をそのまま提示する Cond.F に比べ、ユーザの姿勢を抽象化して提示する Cond.S と Cond.K はより効果的である.

H2: 間接的な姿勢可視化によるトレーニング効果
直接的に姿勢を提示する Cond.S に対し、間接的に姿勢を提示する Cond.K はより効果的である.

すなわち、3 つの視覚的フィードバックは Cond.F < Cond.S < Cond.K の順に効果が高い.

4.2 実験参加者

18 名のスキー経験者(女性 5 名, 男性 13 名, 年齢 19~28 歳, 平均 21.7, 標準偏差 2.05) が本実験に参加した. 参加者のうち、2 名が 2 年以上 5 年未満のスキー経験があり、残りの 16 名は 5 年以上の経験があった. 参加者全員が実際のスロープ上でパラレルターンができると回答しており、スキー中級者と

みなせる. XR 機器の使用経験は、4 名が年に 1 回程度、1 名が週に 1 回程度の経験があり、残りの 13 名は全くの経験がなかった. 参加者には謝礼として 2,000 円が支払われた.

4.3 評価指標

各条件を、滑走時のパフォーマンスを用いて定量的に、かつ質問票により定性的に評価した.

4.3.1 定量的指標

Number of Passed Flags (N.P.F): 30 本の旗を 1 セットとして、正しく通過することができた旗の本数. 値が大きいほど良い.

Mean Spine Angle (M.S.A): 参加者の背骨(モーションキャプチャによって計算される骨盤から胸部へのベクトル)のロール方向の傾きと、地面に垂直な方向がなす角の平均値. 1 セット(旗 30 本)を通過するまでの全フレームの背骨の角度が使用される. 値が小さいほど良い.

Error (E.R.R): M.S.A を旗の通過率で割った値. 背骨の角度に対し旗の通過率が低い分のペナルティを与えることになり、値が小さいほど良い. 例えば、M.S.A が 10, N.P.F が 15 の場合、E.R.R は $10 \div (15/30) = 20$ となる.

4.3.2 定性的評価

定性的評価には System Usability Scale(SUS)[4], User Experience Questionnaire(UEQ)[24], NASA-TLX[13] 質問票を用いた. ただし、実験手順の簡略化のため、Short version UEQ(UEQ-S)[25] と RAW NASA-TLX[12] を使用した.

4.3.3 難易度設定

本実験では、1 セット 30 本の旗を奥行き 15m 間隔、横幅 1m で左右交互に設置した. 複数の難易度におけるパフォーマンスを測定するため、Easy Level(時速 60km, 中級者がある程度余裕を持って旗を通過できる速度)と Hard Level(時速 80km, 上級者でないといふ全ての旗を通過するのが難しい速度)の 2 つの難易度を設定した.

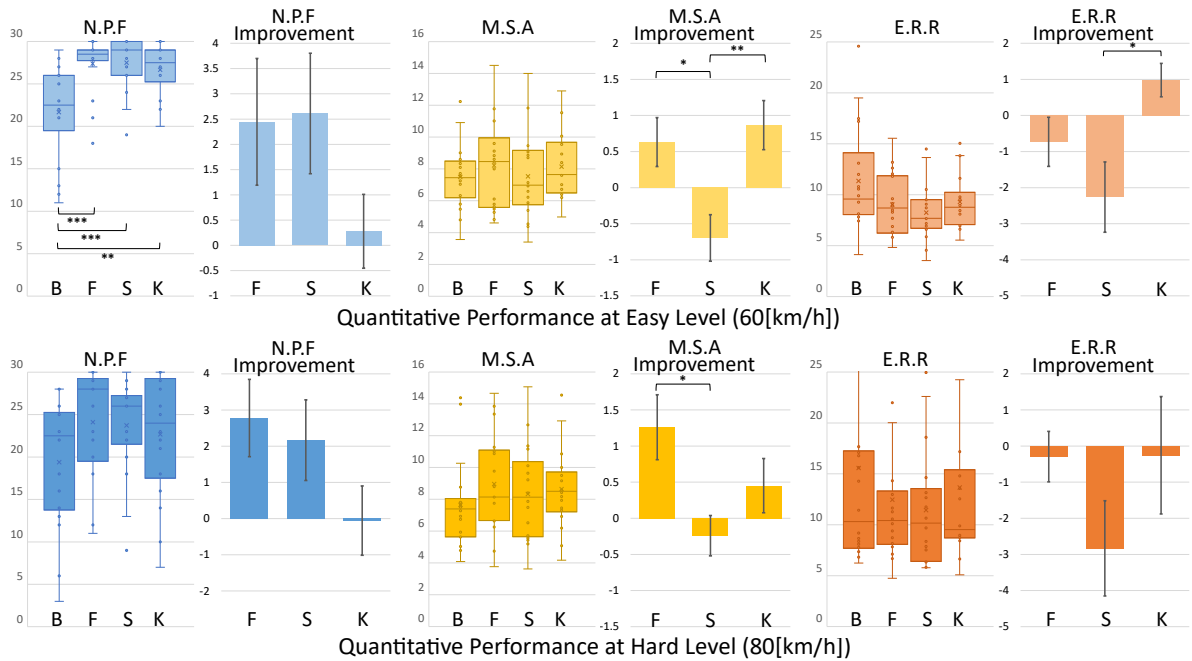


図 3. 定量的結果 (* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$). N.P.F は値が大きいほど良く, M.S.A 及び E.R.R は値が小さいほど良い。

4.4 実験手順

参加者への説明の後, 以下の手順で実験を行った。

- (1) シミュレータに慣れるための約 15 分間のウォーミングアップを行う。
- (2) HMD を装着し, 参加者が提案システムに慣れるまで視覚的フィードバックのない基本条件 (Cond.B) で初期トレーニングを行う。
- (3) 3 つの視覚的フィードバックのうち 1 つの条件で Easy Level の練習を 3 セット行う。
- (4) Cond.B の 1 セットを (3) と同じレベルで行う。
- (5) Hard Level で (3) と (4) を繰り返す。
- (6) その条件についての質問票に回答する。
- (7) 最低 10 分間の休憩を取り, 直前に行った条件の学習効果を軽減する。
- (8) (3)~(7) を 3 つの条件で繰り返す。条件の順番は参加者ごとにカウンターバランスする。
- (9) システム全体と各条件の有効性や改善点についての口頭インタビューを行う。

手順 (2) の最後の 1 セットと (4) で記録された Cond.B (視覚的フィードバック無し) のパフォーマンスを用いて, 各条件のトレーニング効果を比較する。

4.5 結果

4.5.1 定量的結果

図 3 の箱ひげ図は定量的指標の結果を示し, 棒グラフは直前に行った条件と比較した改善度合い (Im

provement) を示す。ただし, 3 つの条件のうち, その参加者の最初に行った条件の場合, 実験手順 (2) の最後の 1 セットの結果 (Cond.B) と比較する。

Easy Level に関して, One-way ANOVA により, N.P.F ($F_{3,68} = 9.220, p < 0.001$), M.S.A Improvement ($F_{2,51} = 6.004, p < 0.01$), E.R.R Improvement ($F_{2,51} = 4.569, p < 0.05$) に条件間の有意差が見られた。他の指標では有意差は見られなかった (N.P.F Improvement: $F_{2,51} = 1.539, p = 0.266$, M.S.A: $F_{3,68} = 0.455, p = 0.715$, E.R.R: $F_{3,68} = 6.004, p = 0.0682$)。

Hard Level に関して, M.S.A Improvement において条件間の有意差が見られた ($F_{2,51} = 3.801, p < 0.05$)。他の指標では有意差は見られなかった (N.P.F: $F_{3,68} = 1.795, p = 0.156$, N.P.F Improvement: $F_{2,51} = 1.910, p = 0.159$, M.S.A: $F_{3,68} = 0.692, p = 0.560$, E.R.R: $F_{3,68} = 0.685, p = 0.564$, E.R.R Improvement: $F_{2,51} = 1.268, p = 0.290$)。

有意差が見られた指標については, Tukey HSD [26] を用いてどの条件間に有意差があるかを調べた。その結果を図 3 に角括弧で示す。

4.5.2 定性的結果

各質問票の結果を表 1 に示す。One-way ANOVA の結果, UEQ-S の Pragmatic Quality ($F_{2,51} = 3.815, p < 0.05$) と Overall ($F_{2,51} = 3.663, p < 0.05$) に有意差が見られた。Raw NASA-TLX ($F_{2,51} = 1.236, p = 0.299$), SUS ($F_{2,51} = 1.680, p = 0.197$),

表 1. 定性的結果 (# : $p < 0.1$, * : $p < 0.05$).

Condition	Raw NASA-TLX		SUS		UEQ-S Pragmatic Quality		UEQ-S Hedonic Quality		UEQ-S Overall	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Cond.F	57.13	13.70	63.61	17.46	0.50	1.41	1.04	1.49	0.77	1.12
Cond.S	56.48	12.01	70.00	14.88	* # [1.65	1.16	1.81	1.10	* # [1.73	1.01
Cond.K	62.92	13.65	60.00	15.88	0.64	1.40	1.26	1.28	0.95	1.16

UEQ-S の HedonicQuality ($F_{2,51} = 1,555, p = 0.221$) には有意差が見られなかった. Tukey HSD の結果を表 1 に角括弧で示す.

4.6 参加者からのコメント

口頭インタビューにより各条件に対する参加者のコメントが得られた:

Follow The Pro (Cond.F): Cond.F の大きな利点は、コーチの動きを観察することで、ターンのタイミング (P1,P7,P12,P17) や旗を通過する際の適切な位置 (P2,P3) を参考にできることであった. 特に、コーチの膝の傾け具合が参考になったというコメントがあった (P4, P8).

一方、コーチが少し前方を走っているため、完全に動きをトレースすると旗を通過できないのが難しい (P4, P6, P14), コーチと旗が重なってしまい見難い (P4, P5, P11), 特に Hard Level ではコーチの動きを観察する余裕がない (P3, P5, P10) といった意見があった. さらに、自分の姿勢に対するフィードバックがなく、姿勢改善には繋がらない (P12, P18) というコメントもあった.

Spine Angle Indicator (Cond.S): Cond.S の利点として最も多く挙げられたのは、実際の雪上トレーニングでは不可能な自身の姿勢をリアルタイムに確認できることであった (P1, P3, P6, P7, P11, P15, P16, P18). その結果、上半身のぶれを軽減する (P1, P4, P5, P12) だけでなく、重心移動を最小限に抑えたコンパクトなターンが可能になった (P5). また、ターンが左右非対称になっていることを認識できた (P13, P15, P18) というコメントもあった.

ただし、上半身の姿勢を意識する必要があるのは主に初心者であり、意図的に反対方向に姿勢を傾けることがある上級者には効果がないという指摘があった (P2, P8). また、Hard Level では、旗を通過することだけに意識が向いてしまい、姿勢を気にすることが難しい参加者もいた (P13, P17).

Keep Horizontal Pole (Cond.K): Cond.K の主な利点は、両腕を水平に伸ばした状態を維持することにより、上半身を垂直に保つことを意識できることであった (P1, P2, P8, P11, P12). また、肩を地面と水平に保つことを意識するようにもなった

(P5, P8, P13). さらに、普段無意識に動かしてしまう腕の動きを視覚化することが効果的である (P10) というコメントもあった.

一方、HMD では視野が制限されるため、ポールを視界に入れ続けるのが難しいという指摘があった (P2, P3, P5). さらに、コントローラを装着したことによりスキースtockが重くなったり (P6, P7, P13), 競技シーンでは旗を叩くように腕を振るため、そのためのトレーニングにはならない (P3, P5, P14) という問題が挙げられた.

4.7 考察

全体として、3つの可視化フィードバック条件下でのトレーニング後の N.P.F はいずれもトレーニング開始時 (Cond.B) よりも増加しており (図 3), 一定のトレーニング効果を示されている. 本節では、各条件の長所と改善点について述べる.

4.7.1 Follow The Pro

Cond.F はコーチに追従する一般的なトレーニング方法であり、新規性に乏しいため、参加者からの主観評価は高くなかった. 一方で、Hard Level の N.P.F については、Cond.F が最も高く、旗を通過するという点で優れている. しかし、旗の通過を優先するあまり姿勢が崩れてしまい、M.S.A が悪化している. 長時間トレーニング行う場合、姿勢の悪さによる悪影響を発生する可能性が考えられる.

Cond.F では、上半身の姿勢のみに注目している他の2つの条件とは対照的に、コーチの全身姿勢を観察することができる. 実際、Cond.F では下半身 (膝や脚) を意識していたとコメントした参加者が多く見られた. したがって、コーチの下半身の動きを参照し、ターンのタイミングを把握することをトレーニングの目的とする場合には、Cond.F が良いと考えられる.

4.7.2 Spine Angle Indicator

Cond.S は、3条件の中で唯一 SUS スコアが平均である 68[3] を上回っており (表 1), 参加者の主観的评价が最も高い. また、実際に姿勢改善につながる事が確認された (図 3 の M.S.A). 特に、普段は

アルタイムに確認することができない背骨を可視化することが高く評価されており、3つの条件の中で最もARを活用できていると考えられる。

一方、より上級者向けには、別の部位を可視化すべきであるという意見があった。例えば、肩や太ももなども可視化することで、より高度なトレーニングが可能になる。ただし、画面上の情報量が多くなると、ユーザが処理しきれない可能性がある点に注意が必要である。例えば、姿勢の悪い部位だけを表示するなどの工夫が考えられる。

4.7.3 Keep Horizontal Pole

Cond.KもCond.Fと同様に、実際に用いられているトレーニング方法であるが、ポールの色が変化することにより問題点が認識しやすく、斬新であったと評価されている。また、腕だけでなく肩の姿勢の意識にもつながったというコメントがあり、一定の間接的な姿勢改善効果が見られた。ポールの表示位置を肩の位置に固定するなどの工夫により、ポールが見えにくいという課題を解決することができ、トレーニング効果の向上につながると考えられる。

Cond.Kでは、腕を高く水平に保ちながら旗を通過する必要があるため、N.P.Fが低く、Raw NASA-TLXのスコア(作業負荷)が高くなったと考えられる。Cond.Kは、競技シーンで用いるのではなく、トレーニングの初期段階における正しい姿勢の意識づけとして使用するのが望ましいと考えられる。

4.8 仮説の検証

上記の結果より、本実験の仮説を検証する:

H1: 抽象的な姿勢可視化によるトレーニング効果
Cond.FとCond.Sを比較すると、Cond.Sの方が定量的かつ定性的に優れている(図3,表1)。一方で、Cond.FとCond.Kを比較すると、UEQ-SはCond.Kの方が高いものの、他の指標においてCond.KがCond.Fよりも優れているとは言えない。

ユーザの姿勢を抽象化して可視化することは有効であるが、その可視化方法には注意が必要である。したがって、H1は部分的に支持される。

H2: 間接的な姿勢可視化によるトレーニング効果
Cond.SとCond.Kを比較すると、Cond.Sの方が滑走時の姿勢が改善しており、参加者からの定性的評価も高くなっている(図3,表1)。

したがって、本実験の結果はH2を支持しない。しかし、4.7.3節で述べたように、より旗の速度が低く負荷が小さいタスクの場合や、姿勢の提示方法を変更した場合には間接的な姿勢可視化が効果的に働く可能性が考えられるため、詳細な検証が必要である。

5 今後の課題

第一に、本論文では既存の可視化手法との包括的な比較は行われていない。また、今回の評価実験で

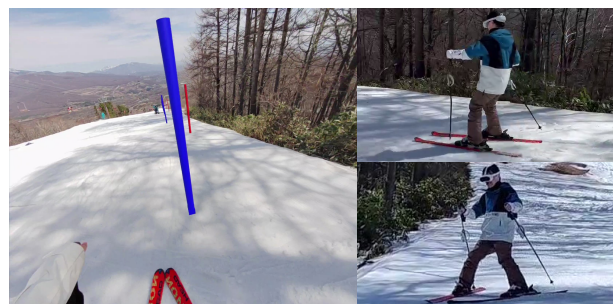


図4. 実際の雪上にて行われたパイロットテストの様子。

はCond.SとCond.Kを別々に表示していたが、これら2つの可視化を同時に行うことが考えられる。

第二に、難易度の設定が適切であったかを検討する必要がある。評価実験では、Easy Level(時速60km)とHard Level(時速80km)の2つの難易度を設定しているが、中間のレベル(時速70km)を追加したり、より細かく難易度を分割することが考えられる。さらに、旗の通過率に応じて速度を動的に調整することで、最適な難易度でのトレーニングが可能になる。

第三に、今回の実験は短期的なトレーニング効果を検証するものであり、長期的な効果は検証されていない。特に、Cond.SとCond.Kはユーザに正しい姿勢を意識させることを目的としており、短期的には意識の改善による効果が表れない可能性がある。

6 実環境でのパイロットテスト

小規模なパイロットテストにより、提案システムが実環境にも適用できることを確認した(図4)。2人のスキーヤーが実際の雪上で提案システムを用いて仮想の旗を通過するターンを行うことができた。

しかし、HMDのトラッキングが屋内での使用に比べて不正確になる場合があった。現在のHMDの多くは屋内でのみの使用が想定されており、太陽光の影響を強く受けってしまうことが原因であると考えられる。ただし、LiDARセンサーなどを搭載した屋外でも使用可能なHMDの開発が進むことにより、これらの問題は解決できると考えられる。

7 まとめ

本論文では、滑走時の姿勢改善を目的とした、実環境のトレーニングとのギャップが小さいARスキートレーニングシステムを提案した。評価研究では、3つの視覚化フィードバック条件を比較した。その結果、ユーザの背骨を可視化する条件が定量的かつ定性的に優れていることが示された。最後に、提案システムが実環境でも適用できることを確認した。

謝辞

本研究はJST CREST JPMJCR17A3およびJST
ムーンショット型研究開発事業 JPMJMS2012 の支
援を受けている。

参考文献

- [1] V. Aleshin, V. Afanasiev, A. Bobkov, S. Klimenko, V. Kuliev, and D. Novgorodtsev. Visual 3D Perception of the Ski Course and Visibility Factors at Virtual Space. In *2011 International Conference on Cyberworlds*, pp. 222–226, 2011.
- [2] V. Aleshin, S. Klimenko, M. Manuilov, and L. Melnikov. Alpine skiing and snowboard training system using induced virtual environment. *Science and Skiing IV*, pp. 137–144, 01 2008.
- [3] A. Bangor, P. Kortum, and J. Miller. Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale. *J. Usability Studies*, 4(3):114–123, may 2009.
- [4] J. Brooke. SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, 189, 11 1995.
- [5] I. Chatterjee, T. Pforte, A. Tng, F. Salemi Parizi, C. Chen, and S. Patel. ARDW: An Augmented Reality Workbench for Printed Circuit Board Debugging. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '22*, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [6] E. Dorzhieva, A. Baza, A. Gupta, A. Fedoseev, M. Cabrera, E. Karmanova, and D. Tsetserukou. DroneARchery: Human-Drone Interaction through Augmented Reality with Haptic Feedback and Multi-UAV Collision Avoidance Driven by Deep Reinforcement Learning. In *2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 270–277, Los Alamitos, CA, USA, oct 2022. IEEE Computer Society.
- [7] S. Eom, D. Sykes, S. Rahimpour, and M. Gorlatova. NeuroLens: Augmented Reality-based Contextual Guidance through Surgical Tool Tracking in Neurosurgery. In *2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 355–364, 2022.
- [8] K. Fan, J.-M. Seigneur, J. Guislain, S. Nanayakkara, and M. Inami. Augmented Winter Ski with AR HMD. In *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, AH '16, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [9] A. Fedosov, I. Elhart, E. Niforatos, A. North, and M. Langheinrich. SkiAR: Wearable Augmented Reality System for Sharing Personalized Content on Ski Resort Maps. In *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, AH '16, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [10] A.-L. Guinet, G. Bouyer, S. Otmane, and E. Desailly. Towards an AR game for walking rehabilitation: Preliminary study of the impact of augmented feedback modalities on walking speed. In *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, pp. 264–268, 2020.
- [11] P.-H. Han, Y.-S. Chen, Y. Zhong, H.-L. Wang, and Y.-P. Hung. My Tai-Chi Coaches: An Augmented-Learning Tool for Practicing Tai-Chi Chuan. In *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, AH '17, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [12] S. G. Hart. Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(9):904–908, 2006.
- [13] S. G. Hart and L. E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In P. A. Hancock and N. Meshkati eds., *Human Mental Workload*, Vol. 52 of *Advances in Psychology*, pp. 139–183. North-Holland, 1988.
- [14] 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. Association for Computing Machinery.
- [15] S. Henderson and S. Feiner. Exploring the Benefits of Augmented Reality Documentation for Maintenance and Repair. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(10):1355–1368, 2011.
- [16] J. Hoffard, T. Nakamura, E. Wu, and H. Koike. PushToSki - An Indoor Ski Training System Using Haptic Feedback. In *ACM SIGGRAPH 2021 Posters*, SIGGRAPH '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [17] H.-Y. Jo, L. Seidel, M. Pahud, M. Sinclair, and A. Bianchi. FlowAR: How Different Augmented Reality Visualizations of Online Fitness Videos Support Flow for At-Home Yoga Exercises. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [18] J. Ko, S.-w. Jang, H. Lee, H.-K. Yun, and Y. S. Kim. Effects of Virtual Reality and Non-Virtual Reality Exercises on the Exercise Capacity and Concentration of Users in a Ski Exergame: Comparative Study. *JMIR Serious Games*, 8:e16693, 10 2020.
- [19] A. H. Kobeissi, H. Chible, R. Berta, A. De Gloria, and F. Bellotti. Design and implementation of an IoT system for enhancing proprioception training. In *2017 29th International Conference on Microelectronics (ICM)*, pp. 1–4, 2017.
- [20] T. Lin, R. Singh, Y. Yang, C. Nobre, J. Beyer, M. A. Smith, and H. Pfister. Towards an Under-

- standing of Situated AR Visualization for Basketball Free-Throw Training. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [21] 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, p. 142–151, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [22] B. Meyer, P. Gruppe, B. Cornelsen, T. C. Stratmann, U. Gruenefeld, and S. Boll. Juggling 4.0: Learning Complex Motor Skills with Augmented Reality Through the Example of Juggling. In *Adjunct Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18 Adjunct, p. 54–56, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [23] F. Panizzolo, G. Marcolin, and N. Petrone. Comparative Evaluation of Two Skiing Simulators as Functional Training Devices for Recreational Skiers. *Journal of sports science & medicine*, 12:151–8, 03 2013.
- [24] M. Schrepp, A. Hinderks, and J. Thomaschewski. Applying the User Experience Questionnaire (UEQ) in Different Evaluation Scenarios. In A. Marcus ed., *Design, User Experience, and Usability. Theories, Methods, and Tools for Designing the User Experience*, pp. 383–392, Cham, 2014. Springer International Publishing.
- [25] M. Schrepp, A. Hinderks, and J. Thomaschewski. Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 4:103, 01 2017.
- [26] J. Tukey. Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 5 2:99–114, 1949.
- [27] S. Webel, U. Bockholt, T. Engelke, N. Gavish, M. Olbrich, and C. Preusche. An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(4):398–403, 2013. Models and Technologies for Multi-modal Skill Training.
- [28] E. Wu, T. Nozawa, F. Perteneder, and H. Koike. VR Alpine Ski Training Augmentation using Visual Cues of Leading Skier. In *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, pp. 3836–3845, 2020.
- [29] 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. Association for Computing Machinery.
- [30] 鈴木 湧登, 坂本 大介, 小野 哲雄. Gino .Aiki: 合気道の身体の使い方の習得を支援するMR ソフトウェア. WISS 第30回 インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, pp. 46–55, 2022.