熟練者の動作の可視化による VR スキートレーニングシステム

野澤 崇行 *　Erwin Wu*　Florian Perteneder*　小池 英樹 *

概要． スキーには限られた季節と場所，指導方法が要求されることから，他のスポーツよりも練習の制約が多く，敷居が高いという問題がある．そこで，屋内スキーシミュレータを用いた VR スキートレーニングシステムを提案する．このシステムでは，屋内スキーシミュレータに取り付けられた 2 つのトラッカーからスキーの位置と回転をトラッキングする．ユーザは，仮想空間に構築されたスキースロープ上でスキーを操作したり，あらかじめ撮影しておいた熟練スキーヤーの動きを再生しながらスキルトレーニングを行う事ができる．トレーニングシステムは 3 つのモジュールで構成されている．それぞれ，熟練スキーヤーの動きを観察するためのコーチリプレイシステム，ストロボ画像の様に動作の過程を残像として表示するシステム，そしてコーチとユーザ間の動きの違いを比較するためにスキーの角度を可視化するシステムである．

1　はじめに

スキーは長い歴史を持つメジャーなウィンタースポーツであり，その練習に関する研究も数多く行われている．しかし，スキーのトレーニングには未だ多くの障壁が存在する．一つは，環境依存性の問題である．スキーには雪と傾斜のある地表が必要であり，限られた季節や場所でしか行うことが出来ない．この問題は，仮想現実とスキーシミュレータを組み合わせ，ユーザに没入型の仮想スキー環境を提供することにより解決可能である．二つ目の問題は，スキー程にプレイ位置が変動するスポーツでは，練習中に他のスポーツのように熟練者の動きを模倣することが難しい点である．特に初心者スキーヤーの場合，熟練者の速さに合わせて滑ることが困難であるため，熟練者の動きを直接観察することができない．また，他のスポーツでは熟練者の動画を見ながら自身の動きを修正する練習手法が用いられることがあるが，スキーでは滑走中における動画の再生手段がないためこの手法は適用できない．他にも，初心者にとっては自身と熟練者の動きの違いを自ら認識することが難しいため，コーチは姿勢や重心を直すよう直接指導しなければならず，一対一での指導を行う必要がある．

そこで，我々は仮想空間上のスキースロープで熟練者のモーションデータを再生する VR スキートレーニングシステムを提案する．本システムは，HMDに映し出される仮想空間上のスロープを用いることで，環境に依存しない屋内でのスキートレーニングを実現する．また，ユーザの前方には同じスキーコース上を滑走する熟練者のモーションデータが表示される．ユーザは時間の経過速度を操作して滑走する速さを変化させることもできるため，時間の流れを遅くすることによって熟練者の詳細な動きを観察したり，時間の流れを速くすることでより高いレベルに挑戦することも出来る．さらに，ユーザと熟練者の両足の角度を 2 つの時系列グラフでリアルタイムに可視化することで差分認識を支援する．両足の角度はスキーシミュレータのビンディング部位に取り付けられた Vive トラッカーから取得されるため，ユーザは体にトラッキング用の装置を取り付ける必要はない．

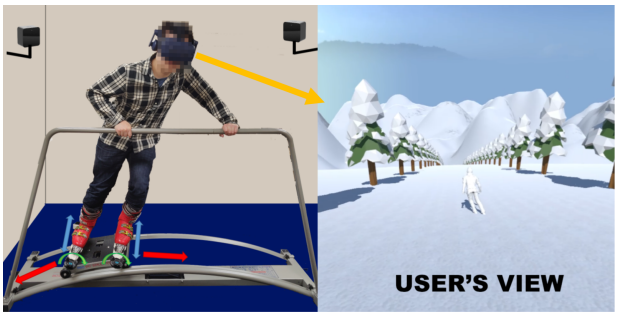

図 1: システムの概要図．ユーザは HMD を通して右図のスキー空間を見ることができる．

既存の研究ではリアルタイムのスキーコーチングが出来なかったため，本手法はリアルタイムのフィードバックを提供できる最初の VR スキートレーニングシステムである．

2　関連研究

スキーに関する研究をいくつか紹介する．Kobeissi ら [6] はバランスボードにモーションセンサ機器を取り付けスキートレーニングに適用した．長谷川ら [3] は，重心を音によってリアルタイムに教示することで，スキーヤーをガイドしたり姿勢が仰け反ることを防ぐ装置を開発した．一方で，Aleshin ら [1] はスキートレーニングにおける視覚的要因の重要性に

Copyright is held by the author(s).
* 東京工業大学　情報理工学院

図 2: 熟練者のモーションを捕捉する様子．OptiTrack システムを使用して 8 台のカメラから撮影している．

ついて示したが，これを考慮した既存研究は少ない．

Aleshin ら [2] は，シミュレータと仮想環境を用いたスキートレーニングシステムを提案した．同システムでは，仮想的なスキー空間をスクリーンに投影し，SkyTecSport 社製のトレーニング機材をシミュレータとして用いている． Alseshin らは，シミュレータ上でのトレーニングが実際のアルペンスキーの感覚と違うことを指摘しながらも，そのスキル向上に一定の効果を上げることが出来ると述べた．しかし，単に傾斜に複数の旗を立てた映像をスクリーンに投影しただけでは，スキートレーニングへの没入感が低く，現実感が薄い．

スキー以外では，様々なスポーツで VR を使用したトレーニングが提案されている．Ikeda ら [4] はゴルフのトレーニングに複合現実を取り入れ，ユーザに教師モーションデータを提示するトレーニングシステムを提案した. このシステムでは熟練者の全身の動きをデータ化し HMD 上で再生する．また，DP マッチングを用いてユーザと熟練者の動作差分を算出し MR HMD 上に表示する．このようにユーザが熟練者の動きを少しずつ変化させながら自身の動きとの差分フィードバックを得る手法はゴルフのトレーニングに対しては有効であることが示されているが，立ち位置が一定であるゴルフとは違い，スキーは位置を大きく変化させるため，スキーに対しては用いることができない．

3 システムデザイン

本論文では熟練スキーヤーが持つ高い技術を，全てのユーザが容易に学ぶことが出来るようにすることを目指している．一般の人にとって．世界レベルのアスリートと共に練習する機会は得難く，また，斜面を高速で滑走しながら熟練者の複雑な動きを模倣することは困難である．そのため，我々は誰でも容易に熟練者の動きを模倣することが出来るシステムの作成を試みた．本システムは，熟練者のモーションデータを記録し，学習プロセスにおいてデータを再生して，熟練者の動きを直接かつ繰り返し模倣出来る機能を提供する．システムの再現性のため，単純な構造のスキーシミュレータを用いる．

3.1 熟練者のモーションキャプチャ

熟練者のモーションデータを記録するため，元アルペンスキーワールドカップ選手の 2 名にスキーシミュレータ（SkyTechSport Alpine Simulator）上で一定間隔のターン動作を繰り返してもらい，全身のモーションデータを撮影した．データ収集は図 2 に示すように，モーションキャプチャシステムには OptiTrack の Motive を用いて，8 台のカメラ（Prime 13W）から撮影を行なった．

3.2 トレーニングシステム

本トレーニングシステムで VR を用いる利点として以下の 3 つが挙げられる．

1. 従来研究のスキートレーニングシステムに欠けていた没入感を与える．
2. スキーは元々ゴーグルが必要であるため，他のスポーツに比べて HMD の着用に伴うトレーニングの質の低下を引き起こしづらい．
3. 三次元情報の可視化（本研究においては残像システム）においては，平面ディスプレイよりも VR を用いる方が適している．

本論文で使用したトレーニングシステムは，屋内スキーシミュレータ[1]（PRO-SKI SIMULATOR）と HMD を含む VR 用機器（HTC Vive Pro），2 つのベースステーション，そして 2 つの Vive トラッカーから構成される．

システムのハードウェア設計を図 1 に示す． 2 つの Vive トラッカーをスキーに取り付け，その位置と回転情報を取得する． 本システムでは単純なスキーシミュレータ[1]を使用したため，スキーは Z 軸周りの回転のみ可能であり，体の向きが変わるようなターンを行うことは出来ないが，スキー板を横に動かして擬似的にターン動作を行うことが出来る． シミュレータの中央から離れると，ゴムの張力によって，スキーを元の位置に引き戻そうとする力が生まれる．この力の強さは使用するゴムの数を変えることによって調節することが可能である．また，本ハードウェア上では前方のバーを把持することによって安全性を保つことができる一方で，上級者はバーを持つことなく実際のスキーのような動作を行うことも可能である．

VR 上でトレーニングを行うために，Unity 3D で 2 つのスキーコースを作成した． あらかじめ設

[1] https://www.ski-simulator.com/power-ski-simulator-en

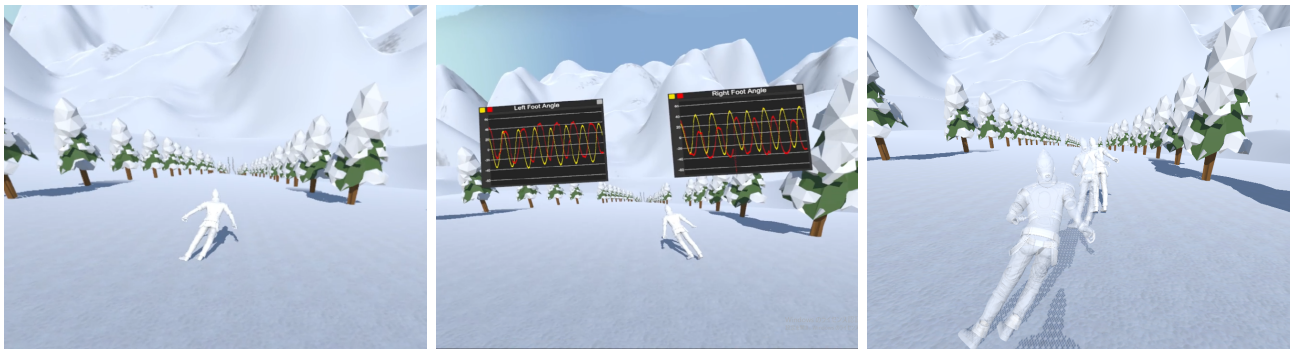

図 3: 3 つの可視化手法: コーチリプレイ機能 (左), グラフ可視化機能 (中央), ストロボ残像機能 (右)

計したコースに沿ってユーザに動いてもらうため，スプライン曲線を使用してカメラを動かしている．ユーザはシミュレータ上である程度横方向に動くことができ，熟練スキーヤーの横方向の動きと足の動きを模倣することが出来る．

3.3 可視化機能

撮影した動作をユーザが模倣しやすいよう可視化するために,（1）コーチリプレイ機能,（2）グラフによる足角度の可視化機能,（3）ストロボ残像機能の 3 つの機能を実装した．以下，各可視化機能について述べる．

3.3.1 コーチリプレイ機能

本機能は実際のスキーでは困難な，初心者が常に熟練したスキーヤーの後ろに付いて動きを観察することを可能にする．この機能はユーザの前方に 1 秒後のコーチの動きを再生する．また，図 3（左）に表示されている 3 D モデルのように，地表の凹凸など滑走する場所に適した動きをするよう通るコースを調整している．実際のスキーのように他のスキーヤーや地形による制限が無く，熟練者の位置は常にユーザの前に固定されているため，ユーザは動きを模倣することにより集中できる．

3.3.2 グラフによる可視化機能

本機能は，ユーザが熟練者と自身の動きの違いを理解しやすいよう，ユーザと熟練者の足の角度をグラフにして HMD に表示する．データは VR トラッカーの回転からリアルタイムに取得され，横軸を時間軸にして 2D 座標でプロットされる． 図 3（中央）の上の 2 つのグラフは，それぞれユーザの左右の足の角度（赤線）と熟練者の足の角度（黄線）を表している． 足の角度はグラフ上のプロット位置で表されるため，ユーザは自分と熟練者の足の角度が同じ位置にプロットされるようにすることで姿勢を学習出来る．また，1 つのグラフ上から，動きの速さ（周波数），回転の強さ（振幅），および回転の同期（位相シフト）に関するデータを得る事ができる．パイロットテストを実施したところ，初心者のグラフは非周期的であるのに対して，熟練者は常に綺麗なサインカーブを描くことが分かった．また，ユーザがグラフに集中してコーチの動きを見なくなることを避けるため，グラフを画面の端に固定し視界の隅で認識できるようにした．

3.3.3 ストロボ残像機能

コーチの動きの時間的および空間的情報をより明瞭に可視化するために，コーチの連続的な残像を表示する機能を実装した．ユーザは，レースゲームでアイテムを集める時と同じように，各残像ごとに自分の動きと位置を合わせることができる．この機能は，ユーザがコーチの姿勢に過度に注意を払いすぎて，軌道を正しく辿れないという問題を避けることが可能である．また，何らかのモーションキャプチャシステムを用いることで，ユーザがゴーストと衝突した際の姿勢の一致度を評価し，点数などのフィードバックを与えることで，システムをより直感的にすることが可能である．

4 評価

本評価では，可視化手法の開発の動機となった仮定を検証し，各手法の利点と欠点をよりよく理解することを目指す．

4.1 仮説

本論文ではまず以下の仮定を実験によって検証し，仮説を導き出すこととする．

H1: 動きの模倣による学習： 熟練者の動きの模倣によってある程度の技術の上達が見込める．

H2: フィードバックによる学習： グラフによる身体動作の可視化によって単純な模倣以上のフィードバックを与えることができる．

H3: 時系列情報の提示による学習： ストロボ残像はコース上の特定の位置での姿勢情報を示すことから．

より適切な姿勢の模倣を支援することが出来る．

4.2 実験手順

評価実験は国際学会 IEEE VR 2019 のデモ会場にて行なった．ここでは日頃から VR に慣れている人からのフィードバックを多く得ることができた．一方で，時間が限られていたため被験者一人あたりに要する時間は短く，各被験者の一連の所要時間は，準備，実験，実験後アンケートを含めて約 8 分であった．まず被験者には実験の流れを説明し，同意書に署名するよう求めた．被験者にはスキーブーツを履いてシミュレータに乗ってもらい，VR ヘッドセットを着用させた．各被験者には，フィードバックの無いベースライン条件（**可視化なし**）と 3 つの可視化手法を体験してもらった．実験をなるべくシンプルなものにするためスキースロープには勾配が一定の直線コースを使用した．また，後の分析のために，同意を得られた全ての被験者について実験中の様子を動画で撮影した．全実験を終えた後には，被験者にアンケートの記入を求めた．このアンケートの質問には 6 段階のリッカート尺度で回答してもらい，その他に自由コメント欄を設けた．

4.3 被験者

被験者 81 人からデータを取集した．被験者は皆 VR 技術に精通していた．スキー経験は初心者がほとんどであり，全く経験したことがない人も多かったが，少数ながら経験豊富なスキーヤーもいた．しかし，本格的な大会に参加する様なプロのスキーヤーはいなかった．

4.4 実験結果

アンケートを元にユーザがどういった機能を好むのか概観する．質問（Q1〜Q5）と回答の結果を図 4 に示す．また，フリードマン検定を実行したところ，5 つの質問すべてに有意差が見られた (Q1: $\chi(3) = 33.70, p < .001$，Q2: $\chi(3) = 87.77, p < .001$，Q3: $\chi(3) = 28.24, p < .001$，Q4: $\chi(3) = 82.54, p < .001$，Q5: $\chi(3) = 26.33, p < .001$)．各質問の条件間の有意差を示すために，事後分析にはペアワイズウィルコクソンの符号順位検定を行った．結果は図 4 に示し，以下に仮説 (H1-H3) についての検証結果を述べる．81 人の参加者のうち 41 人（50.6 %）がコメントを記入した．長文のコメントは各主張ごとに細かく分割し，共通のテーマを識別するため，オープンコーディングのアプローチ [7] に従ってクラスター化した．

4.4.1 H1: 動きの模倣による学習

コーチリプレイは，Q5 の総合評価の質問で 4〜6 評価が 82.7 %を占めたことから概ね好評であったと言える．UI は分かりやすく（Q3:評価 4〜6 が 79.0

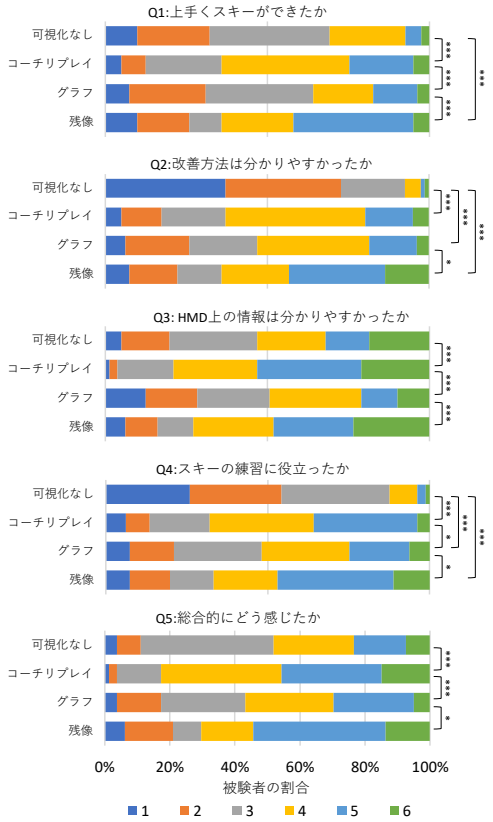

図 4: 5 つの質問からなるアンケートの結果．各グラフは 6 段階評価の分布を示している．右の括弧は各条件の有意を表している: * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$), *** ($p < 0.001$)

%），4 条件の中で最もスキーの練習に役立つ（Q4: 評価 4〜6 が 67.9 %）という結果になった．検定の結果，**可視化なし** (Q3: $Z = -4.506, p < .001$，Q4: $Z = -6.648, p < .001$，Q5: $Z = -4.866, p < .001$) と**グラフ** (Q3: $Z = -5.038, p < .001$，Q4: $Z = -2.023, p < .05$，Q5: $Z = -3.810, p < .001$) に対して統計的に有意であった．熟練者の動作を見ることで改善方法の理解に繋がる（Q2:評価 4〜6 が 63.0 %）ことが分かった．これはベースライン条件に対して有意に優れている（$Z = -6.860, p < .001$）が，まだ改善の余地があると考えられる．多くの被験者がこの機能に肯定的である中，被験者 6 人は熟練者の動きが速すぎるため付いて行けないと述べた．しかし，肯定的な回答が多いため，仮説 1 を確認することができた．

4.4.2 H2: フィードバックによる学習

グラフは自身と熟練者の足の角度を視覚的にフィードバックすることで動作の比較を可能にする．しかし，被験者の多くはグラフを読み取ることに苦慮した．Q2 の評価 4〜6 が 50 %以上であることから，この条件によって改善方法が理解しやすくなるとの結

果になったが，**コーチリプレイ**の方がわずかに高く，さらに**ストロボ残像** ($Z = -2.512, p < .05$) の方が有意に優れていた．また，グラフが分かりやすかったと答えた被験者はわずか 49.4 %であった（Q3）．これは**コーチリプレイ**（$Z = -5.038, p < .001$）や**ストロボ残像**（$Z = -3.601, p < .001$）よりも有意に劣っている．さらに**グラフ**は，図 4 に示すように，他の質問（Q1、Q4、Q5）に関してはより低いスコアを示した．グラフが難解であることは，コメントでも指摘されていた．被験者 7 人は，**グラフ**は「情報が多すぎる」と述べており，グラフの表示位置に不満を示す回答が同数あった．一方で，スキー経験が豊富な被験者の多くはグラフに対してスキーの改善に有効であると肯定的な回答をした．**グラフ**は動きの違いに関する詳細なフィードバックを提示するが，現在のところグラフによる可視化はほとんどのユーザにとって理解が非常に難解である．従って，仮説 2 は棄却される．

4.4.3 H3: 時系列情報の提示による学習

熟練者の 3D モデルの位置を考慮し，**ストロボ残像**は各ターンでユーザが取るべき姿勢情報を明確にすることを目的としているが，結果は様々であった．多くのユーザが，4 条件のうち最も上手く滑る事が出来たと回答し（Q1 : 評価 4〜6 が 64.2 %），スキーを改善する方法が理解しやすかったと述べた（Q2 : 評価 4〜6 が 64.2 %）．しかし，いずれの質問でも**コーチリプレイ**より多くの強い否定の回答（評価 1 および 2）が存在し，2 つの機能の間に有意差はなかった．このことは図 5 を見ると明らかである．**ストロボ残像**の Likert-Scale の回答が U 字型を形成するのに対して，他の条件は単一のピークを持つことが多い．コメントでは，ストロボ残像が有効であるという意見もあったが，否定的な意見の方が多く書かれた．被験者 10 人はコメントで，この機能が「邪魔である」または「混乱を招く」ことを述べ，人の残像にぶつかることは不自然だという意見もあった．総括すると，**ストロボ残像**は潜在的な可能性がありながらも，現在の形式では多くのユーザにとって使いにくいものとなった．従って，仮説 3 を条件付きで確認するに留め，将来の研究においてこの機能を改善することを計画している．

4.5 考察

評価の結果から可視化の有用性に関する様々な知見が得られた．最も基本的な手法である**コーチリプレイ**条件はほとんどの参加者に肯定的に受け入れられたが，**グラフ**と**ストロボ残像**の結果は賛否両論であった．

多くの被験者は，トレーニングの最中にグラフから情報を読み取ることに苦戦していた．問題の一つはグラフの配置であった．ユーザはグラフを見ようとする際に顔を動かすため，グラフを視界に固定することは逆効果になった可能性がある．

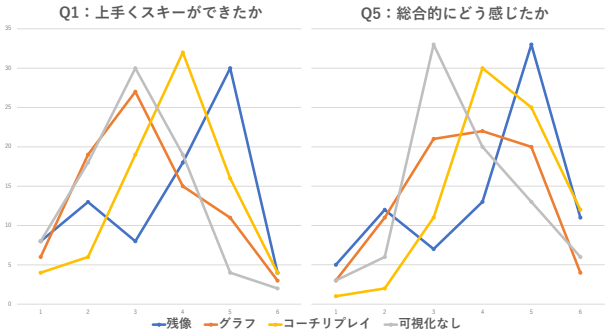

図 5: Q1 と Q5 のアンケート結果をグラフに表す．グラフは **ストロボ残像**が被験者によって肯定と否定の両方に偏ったことを示している．

ストロボ残像に関する報告では，時系列的なフィードバックを提供するというアイデアは高く評価されたが，熟練者の残像をユーザが通過するような実装は物議を醸していた．従って，目標姿勢の情報を提示するより良い方法を検討する必要がある．

最後に，多くの被験者は熟練者が速すぎると述べた．これはプロのスキーヤーのモーションデータを使用しているためである．最初のプロトタイプ用に時間制御機能を設計したが，被験者は自分で動きを遅くすることは出来なかった． これらのことから，シミュレータ上でシステムを操作する方法を検討する必要があると考えられる．

本論文の残りの部分ではプロトタイプの欠点に対処する方法の可能性について，いくつかの適応と変更を検討することによって調査する．

5 システムの改善

実験の結果より得られた知見から，システムを改善する追加機能を実装した．

グラフの問題点として，表示位置が挙げられる．被験者からはグラフの位置が高すぎる，グラフによって視界が遮られるといった意見が寄せられた．これを解決するため，グラフをシーンに固定した．

また，**ストロボ残像機能**による情報提示は賛否両論であった。そのため，コース上の障害物とならずに同様のフィードバックを示す方法を検討する．解決策の一つは，熟練者の通った軌跡を表示することと 3D モデルの影を地面に置くことで姿勢情報を提示することである．影を使って熟練者の動きを学習する手法は，ゴルフのような他のスポーツで既に効果を上げており [5]，スキーにおいても有効である可能性がある．

他にも，熟練者の動きが速すぎることによって被験者が付いて行くことが出来なくなる問題があった．

このため，ユーザに適した速さとなるようゲームの時間速度を変更する**時間制御機能**を実装した．この機能には，自動と手動の 2 つのモードがある．自動モードでは，ゆっくりとした動きから徐々に速さを増していき，ユーザが熟練者に付いて行くことが出来なくなる速さまで動的に変化させることでユーザに適したレベルを設計する．ユーザが熟練者に付いて行くことが出来ているかを判断するため，足の角度を比較する． 手動モードでは，ユーザはスライドバーによって時間速度を制御する．0.5 倍速にして熟練者の動作を詳細に観察したり，時間を巻き戻して同じ動作を何度も練習することも可能となる．また，動きを速くしてより高いレベルに挑戦することも可能である．

6 議論

本システムではユーザに熟練者の動きを模倣してもらうことに焦点を当てていたが，その性質上，どの程度模倣できているかを何らかの形でユーザにフィードバックする必要がある．現在フィードバックを実現する方法は，グラフ上に足の角度を可視化することのみであるため，他の方法を検討する必要がある．例として，体の各部位の差分に合わせて，コーチモデルの対応する部位の色をヒートマップ的に変化させる方法が挙げられる．他にも，角度に加えて足の位置も合わせて比較することでより分かりやすいフィードバックを与えることが出来る可能性がある．

本研究で 82 人の被験者に行った実験の結果によると，初心者に対しては技術習得に対する効果は薄いが，スキーに対する恐怖心を克服し自信を与えることに繋がるといった意見があった．また，中級者は熟練者のスキー動作を見ることでスキーをより理解しつつ，自身の改善点を見つけることに繋がり，上級者には他者と比較することで客観的に自分を見直す効果が期待できる．

他にも，本システムには HMD を装着することによって自身の身体動作を視覚的に認識する事が出来なくなる問題がある．これに対しては，外部カメラからユーザを撮影した映像を HMD に映して補うこともできるが，VR の没入感を損なう恐れがある．より良い方法としては全身をトラッキングしてユーザの姿勢情報を取得し，VR 内の 3D モデルに当てはめることである．全身トラッキングの方法としては，慣性センサを用いた方法や赤外線センサを用いた方法が考えられるが，スポーツトレーニングという観点から，センサがトレーニングの邪魔にならないことや，トラッキング精度，レイテンシの問題などを考慮する必要がある．

7 まとめと展望

本論文では，スキーの環境的制約を受けない VR 上でのトレーニングシステムを提案し，ユーザがより容易に正しいスキー動作を理解出来るよう複数の可視化機能を実装した．また，このシステムを用いて熟練者の動きを模倣してもらう被験者実験を行い，システムを評価した．テスト実施後に行ったアンケートによると，すべての被験者が可視化について肯定的な反応を示し，ほとんどの被験者はシステムがスキーの練習に役立つと述べた．今後の展望として，本システムの定量評価を行う必要がある．学習率は個人で異なるため，本システムを利用したユーザがより効率よく学習できているか定量的に評価することは難しく，現時点ではアンケートによる定性評価しか行なっていない．しかし，システムを利用する/利用しないで，ユーザが熟練者の動きを一定以上模倣することができるようになるまでの時間を評価すれば，定量評価をすることが出来ると考えられる．

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 *Cyberworlds (CW), 2011 International Conference on*, pp. 222–226. IEEE, 2011.

[2] V. Aleshin, S. Klimenko, M. Manuilov, and L. Melnikov. Alpine skiing and snowboarding training system using in-duced virtual environment. *Science and Skiing IV*, 2009.

[3] 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*, p. 11. ACM, 2012.

[4] A. Ikeda, D. H. Hwang, and H. Koike. AR based Self-sports Learning System using Decayed Dynamic TimeWarping Algorithm. In G. Bruder, S. Yoshimoto, and S. Cobb eds., *ICAT-EGVE 2018 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments*. The Eurographics Association, 2018.

[5] A. Ikeda, D.-H. Hwang, and H. Koike. Real-time Visual Feedback for Golf Training Using Virtual Shadow. In *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '18, pp. 445–448, New York, NY, USA, 2018. ACM.

[6] 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 *Microelectronics (ICM), 2017 29th International Conference on*, pp. 1–4. IEEE, 2017.

[7] A. L. Strauss and J. M. Corbin. Grounded theory research: Procedures, canons, and evaluative criteria. *Qualitative Sociology*, 13(1):3–21, 1990.