時間歪曲機能を用いた VR スキートレーニングの拡張

松本 高 *　　Erwin Wu*　　小池 英樹 *

概要.　近年, VR を用いた様々なスポーツのシミュレーションが作成され, 仮想環境でのスポーツのトレーニングを行うことが可能になっている. VR を用いる利点として, 非現実的な機能を実装できるということが挙げられる. 時間の経過速度を実際よりも遅くすること (時間歪曲と呼ぶ) によって, 動作に余裕を持たせる, という機能も非現実的な機能の一つである. 本論文では, 屋内用のスキーシミュレータと VR 機器を組み合わせたスキーシミュレーションシステムを作成し, 時間歪曲機能を実装した. 時間歪曲を行う方法にも, 一定の倍率で静的に遅くする, ユーザの状況に合わせて動的に遅くする, というように複数の手法が考えられる. 時間歪曲を行わないベースライン条件と 4 つの時間歪曲条件を比較する評価実験を行ったところ, 時間歪曲がスキーにおいても有効であることが示された. また, 静的な条件の方が動的な条件と比べてより好ましい条件であるという結果が得られた.

1　はじめに

スキーは人気の高いスポーツであるが, 季節と場所に対する制限が多く, トレーニングを行うための障壁が多い. この問題を解決するため, スキーのシミュレーションシステムを作成し, 屋内でもトレーニングを行えるようにした研究は数多く行われている. 近年では特に, スキーのシミュレーションマシンと VR 機器を組み合わせることで, トレーニングへの没入感を高める研究が盛んである [10, 11, 14].

スポーツのトレーニングとして, お手本となる熟練者の動作をよく観察し, その動作を模倣するという練習方法は一般的によく用いられている. ただし, 初心者が熟練者の動作を模倣する場合など, 両者の実力の差が大きすぎる場合には, 模倣を効果的に行えない可能性が考えられる. そこで, 様々なスポーツのシミュレーションにおいて, 仮想環境内の時間の経過速度を遅くすること (以下, 時間歪曲) によって模倣を行いやすくした研究が行われており, 練習の効果が高まったという実験結果が報告されている [12, 13].

これらのことを踏まえ, 本論文では図 1 に示すようなスキーのシミュレーションにおいても, 時間歪曲を行うことがスキーの上達の手助けになることを検証する. また, 速度の変更方法にも一定の倍率で遅くする場合や, ユーザの状況に合わせて, 動的に倍率を変更する方法が考えられる. 評価実験において, 倍率の異なる 2 つの静的な条件, および 2 つの動的な条件で練習を行うことによる, スキー熟練者の滑走との差分や, ユーザの主観評価, シミュレータ酔いの観点で比較を行った.

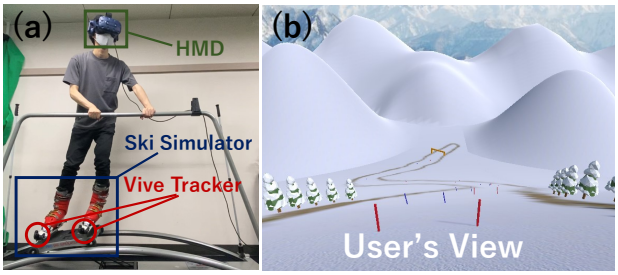

図 1. システムの概要 (a), 仮想スキーコースのユーザ視点 (b).

2　関連研究

2.1　スキーシミュレーション

スキーの技術を向上させるための, 様々なシミュレーションシステムが提案されている. Kobeissi ら [8] は, バランスボードにモーションセンサを取り付け, 検知されたバランスボードの回転によって操作を行うスキートレーニングゲームを提案した. Aleshin ら [2] は, SkyTechSport のスキーシミュレーションマシンと仮想のスキーコースを表示するスクリーンを組み合わせたトレーニングシステムを提案し, このシステムが初心者だけでなく, プロのアスリートのトレーニングにも用いられ得ると述べた. Ko ら [7] は, スキーのエクササイズゲームにおいて, VR と非 VR 環境でのユーザの運動能力や集中力がどのように影響されるかを調査した. 野澤ら [14] は, VR 空間においてユーザの前方にスキー熟練者のモーションデータをコーチとして表示し, ユーザがその動きを模倣することによってスキーのトレーニングを行うことができるシステムを提案した. このシステムでは, 様々な方法を用いてコーチとユーザとの間の差分を可視化している. 一方で, 熟練者の動きが速

Copyright is held by the author(s).
* 東京工業大学

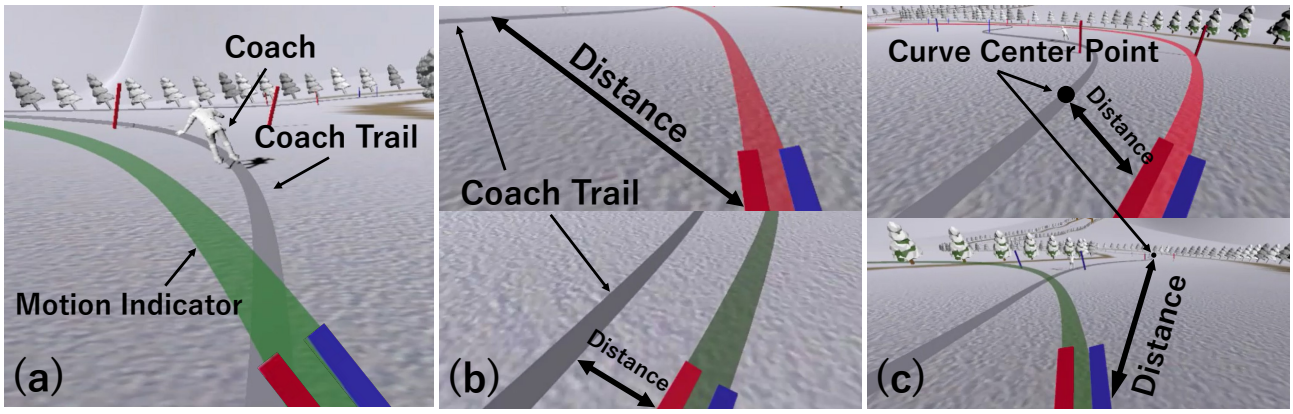

図 2. HMD に表示される情報 (a), 動的な時間歪曲条件 2 つ (b)(c).
(b) では Coach Trail との距離が大きくなるほど, (c) では Curve Center Point に近づくほど時間の経過速度が遅くなっている (経過速度が遅いほど, MotionIndicator の色が緑から赤に変化する).

すぎることによってユーザが付いていけなくなる問題が指摘されている．Wu ら [10, 11] はこのシステムを拡張し, 差分の可視化機能を追加した上で, どの機能がより高い効果を得られるかを定量的に評価した．Wu らの実験によれば, 差分を画面上のグラフにプロットするような複雑な可視化手法は, ユーザが提示された情報を上手く扱えず, 効果が低くなったことが示唆されている．

本論文のシステムは, VR を用いてコーチの動作を模倣する支援を行っている点で野澤, Wu らのシステムと類似している．一方で, ユーザが情報を処理する余裕がないという問題点を, 時間歪曲機能を実装することにより解決を図っている点で異なる．

2.2 時間歪曲を用いたトレーニングシステム

様々なスポーツにおいて, 時間歪曲を用いて動作の学習を支援する研究が行われている．川崎ら [13] は, VR 空間で再現したけん玉において玉の速度を実際よりも遅くし, 徐々に速くしていくことによってけん玉の技を練習できるシステムを提案した．川崎らの実験により, 多くのシステム体験者が 5 分間程度の練習で今までに成功したことのない技を習得できることが示された．Adolf ら [1] は, VR 環境でのボールジャグリングにおいて, 重力加速度を小さくすることによるユーザのパフォーマンスやモチベーションへの影響を調査した．濱西ら [5] は, テニスボールなどの高速で移動する物体を VR 空間では認識しにくくなる問題を, ユーザの動きに応じて時間の経過速度を制御することにより解決している．Bansal ら [3] は, 自身の動きに応じて時間の経過速度が変化するような VR 体験をする前後において, マウスカーソルをお手本と同様に動かす課題をユーザに課す実験を行った．その結果, ユーザに動作時間を短く見積もるような時間認識の調整が行われることが示され, この現象をリハビリテーションへと適用できる可能性を示唆した．Wu ら [12] は, VR 空間での卓球のスピンのかかったボールを打ち返すトレーニングにおいて, 単に時間の経過速度を遅くするだけでなく, 様々な視覚的フィードバックを提示するシステムを提案している．

これらの関連研究は, 時間歪曲がトレーニングの効果を高める可能性を示している．一方で, これらのほとんどの研究は, 単一の時間歪曲機能のみを検証しており, 複数の時間歪曲機能を比較した研究は少ない．

3 システムデザイン

本章では, 検証に用いたシミュレーションシステムの構成および実装について説明する．

3.1 ハードウェア

本論文で作成したシミュレーションシステムは, 図 1(a) に示すように, 屋内用のスキーシミュレータ[1] (PRO-SKI SIMULATOR) 及び HMD(HTC VivePro), 2 つの Vive トラッカー, 2 つのベースステーションから構成される．Vive トラッカーをシミュレータの左右のスキー板の先端に取り付けることで, スキー板の回転を検出できるようにする．

3.2 Unity 上での実装

VR を用いてトレーニングを行うために, Unity にて図 1(b), 図 2(a) に示すようなスキーの仮想コースを作成した．ユーザは HMD を通してこのコースを見て, シミュレータのスキー板を動かすことにより仮想コース内を滑走できる．

操作性を単純にするため, 仮想コース内の移動は図 3 に示すように, スキー板の地面と垂直な方向に

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

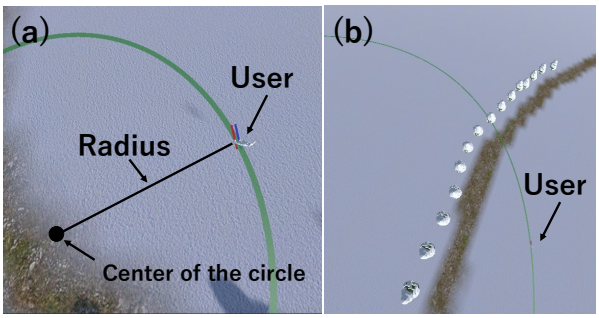

図 3. スキー板のロール角が大きい場合は急なターン (a), 小さい場合は緩やかなターン (b) となる.

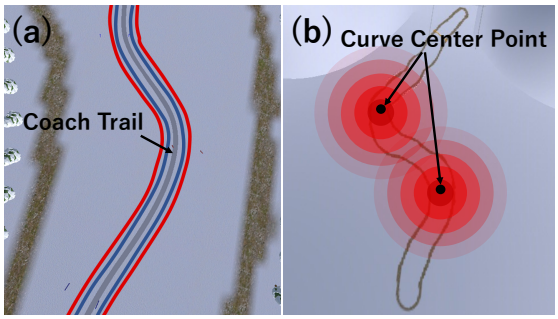

図 4. (a) では青線の内側を滑走している場合は上手く模倣が行えているとみなされ時間の速度が増加, 赤線の外側では速度が減少する. (b) では同心円の中心に近づくほど時間の速度が減少する.

対するロール角が大きくなるほど回転半径が小さくなるような水平面での円運動とした. より移動をわかりやすくするため, ユーザが現在の足の角度を固定した場合に進んでいく軌道を図 2(a) のように画面上に表示した (以下, MotionIndicator).

実際のスキーに近づけるために, ターンの前半部分 (谷回り) では加速し, ターンの後半部分 (山回り) では減速が起こるようにした. 後述するスキーの熟練者の意見を参考にし, 仮想コース内での移動の初速度は $63km/h$ とし, 初速度の 0.8〜1.2 倍の範囲で速度が変動するようにした.

3.3 熟練者データの取得

熟練のスキーヤー 1 名にこのシミュレーションシステムを使用してもらい, コーチデータとして記録した. 前述の HMD, 左右のスキー板の Vive トラッカーに加えて, 両手, 腰にトラッカーを装着し, 計 6 点のモーショントラッキングを行った. 記録したモーションデータを 3D モデルとして再生し, コーチが滑走したルート上を動かすことによって, コーチのリプレイデータとして再現ができる.

実際のスキーでは人々が走ったルート上の雪がかき分けられ, 跡が生じる. 初心者は熟練者の跡をなぞることにより, 適切なルートを滑走することができる. これを仮想コース内にて再現するため, コーチが通過するルートを灰色の曲線 (以下, Coach Trail) として表示した (図 2(a) 参照).

3.4 時間歪曲機能の実装

Unity のパラメータである TimeScale の値を変更することにより, シミュレータ内の時間の経過速度を変更することができる. 通常の速度の TimeScale の値を 1 として, 1 よりも小さい値に変更することで時間の経過速度が遅くなる. これにより, ユーザの移動速度やコーチの姿勢データの再生される速度が遅くなるため, ユーザの動作に余裕が生まれることが期待される. HMD の画面上では時間の経過速度が変化していることを視覚的にもわかりやすくするため, MotionIndicator を TimeScale の値が 1 の時に緑色で表示し, TimeScale の値が小さくなるにつれて赤色に変化していくようにした (図 2 参照).

時間の経過速度を変更する方法として, 一度の滑走中には一定の倍率とする方法や, ユーザの状況に合わせて, 滑走中にも動的に速度を変更する方法など, 様々な手法が考えられる. 本論文では, 以下の 4 つの時間歪曲条件を設定した.

Constant0.6 / Constant0.8
それぞれ時間の経過速度を常に 0.6 倍, 0.8 倍にする. なお, 速度倍率は, 川崎らの”けん玉できた!VR”[13] の例を参考にし, 0.2 倍刻みとした. ただし, 0.4 倍速以下では一度のカーブに掛かる時間が長すぎることによって, ユーザがカーブをするための姿勢を長時間維持する必要があり, 大きな負担が生じることが予備実験でわかったため, 今回は 0.6 及び 0.8 倍速の 2 条件と限定した.

DistanceToCoachTrail
ユーザと Coach Trail との間の距離が大きい場合, すなわちコーチの滑りを上手く模倣できていない場合に時間の経過速度を遅くする (図 2(b), 図 4(a) 参照). 毎フレーム時間の経過速度を変更するとシミュレータ酔いを激しく引き起こすことが予想されるため, 100 フレーム毎 (90Hz) にユーザと Coach Trail との間の距離の平均を計算するようにしている.

DistanceToCurvePoints
スキーのコースにおいて, カーブしている部分は直線的な部分と比べてより複雑な操作が必要となり, コーチの動作を模倣する難易度も高くなることが予想される. そのため, この条件では仮想コースのカーブの中心部分 (Curve Center Point) に近づくほど時間の経過速度を遅くする (図 2(c), 図 4(b) 参照). 時間の経過速度の倍率が一定である前者 2 つが静的な条件であるのに対し, 後者 2 つは滑走中に倍率が変化していくため, 動的な条件であるといえる. また, 動的な条件 2 つの TimeScale は 0.5 から 1.0 を 0.1 刻みで変動するようにした.

4 評価実験

4.1 仮説

本論文では, 以下の仮説を検証するために評価実験を行った.

H1: 時間歪曲による練習効果
時間の経過速度を遅くして練習することによりスキーの上達が見込める.

H2: より低い速度倍率による練習効果
時間の経過速度が遅いほどコーチの動作を模倣しやすくなり, 練習効果が高まる.

H3: 動的な倍率変更による練習効果
ユーザの状況に応じて動的に時間の経過速度を変更することにより, 練習効果が高まる.

4.2 実験手順

被験者に実験の説明をした後, スキーブーツを履きシミュレータに乗ってもらった. その後, 以下の手順にて実験を行った.

1. 事前に VR やシミュレータの動かし方に慣れてもらい, 学習率による影響を緩和するための, 5 分程度の練習を行う. この練習においてのみ, コーチの姿勢と Coach Trail を表示しないことで, 被験者がシミュレータの動かし方に慣れるための練習に集中できるようにした.
2. ベースライン条件にて計測を行う. 表示されるコーチの姿勢を参考にしながら, できる限り Coach Trail と同じルートを滑るように被験者に指示した.
3. ベースライン条件終了後に, 図 5 に記す 5 つの質問 (7 段階のリッカート尺度) 及び任意の自由記述でのコメント, シミュレータ酔いの程度を計測する質問 (SimulatorSicknessQuestionnaire(SSQ)[6]) に回答する.
4. 上述した 4 つの時間歪曲条件のうち, 1 つの条件下での練習を 2 分程度行う.
5. 再びベースライン条件の計測を行う.
6. 練習を行った条件について, 3. と同様の質問に回答する.
7. 手順 4.〜6. を, 条件を変えながら 4 回繰り返す. 練習を行う条件の順番は被験者ごとに BalancedLatinSquare[4] に従ってカウンターバランスを行った.

手順 2. 及び 5. にて計測したベースライン条件の結果を比較することにより, 時間歪曲条件による練習効果を検証することができる. また, 4 つの時間歪曲条件の順番を被験者間でカウンターバランスを行い, 結果を比較することにより, 異なる速度倍率での練習効果や, 動的な倍率変更による練習効果の検証が可能となる.

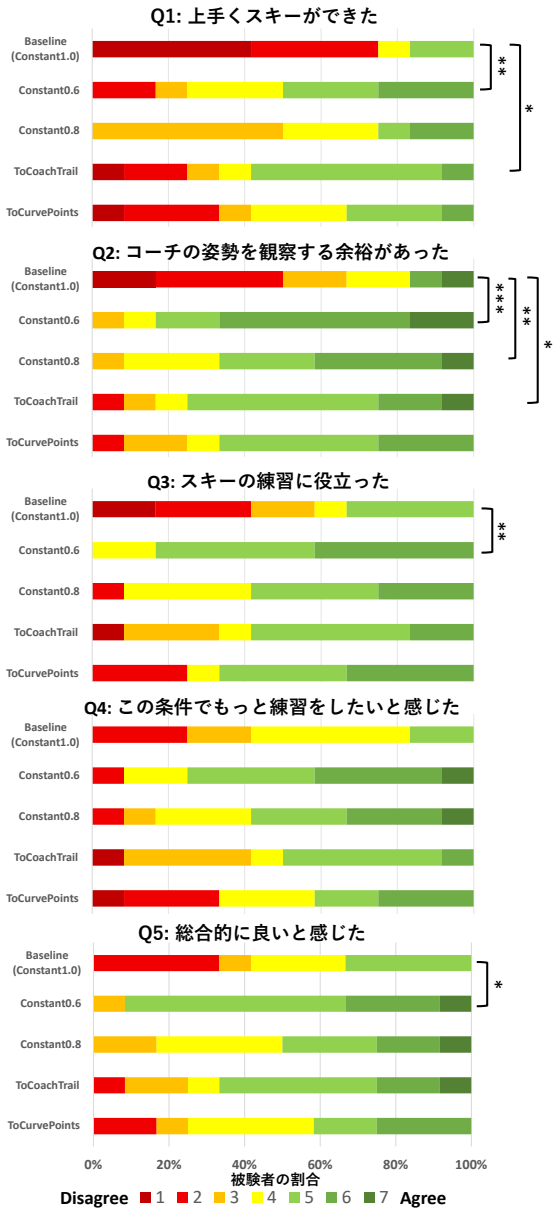

図 5. ユーザの主観評価による 5 つの質問への回答, グラフは 7 段階評価の分布を表す (1:「強く否定する」, 7:「強く同意する」). 右の括弧は各条件間の有意差を表す: * ($p < 0.05$), ** $p < 0.01$), * ($p < 0.001$)**

他の条件で行った練習の影響を軽減するため, 手順 3. と 6. においては質問への回答が早く終わった場合でも, 5 分以上の間隔を空けてから次の条件での練習に移るようにした. また, 被験者は実験中の任意のタイミングで休憩及び水分補給を行うことができた.

4.3 被験者

主に研究室内の学生 12 人 (年齢 21-32 歳, 平均 23.6, 標準偏差 3.15, 女性 3 名, 男性 9 名) からデー

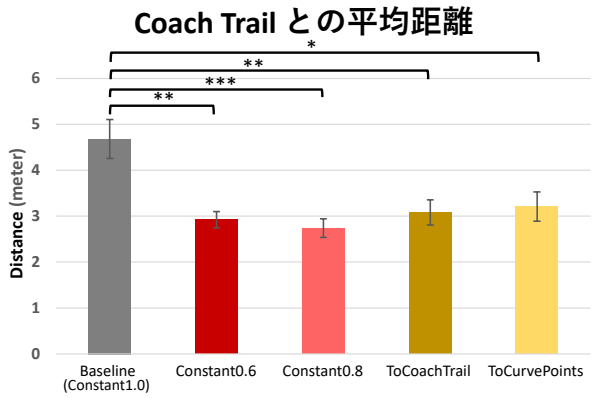

図 6. 各条件での練習後に計測したベースライン条件におけるユーザと Coach Trail とのフレーム毎の平均距離．上の括弧は各条件間の有意差を表す: * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$), * ($p < 0.001$)**

タを収集した．被験者のうち, 6 人は実際のスキーをした経験が一度もなく, 4 人は 2 年未満の経験があり, 2 人は 5 年以上の経験があった．また, VR の使用頻度についても尋ねたところ, 3 人は年に 1 回程度, 7 人は月に 1 回程度, 2 人は週に 1 回以上の頻度で VR の使用経験があった．

4.4 実験結果

4.4.1 Coach Trail との距離

最初に計測したベースライン条件および 4 つの条件で練習した直後に計測したベースライン条件における被験者と Coach Trail との距離の, フレーム毎の平均を図 6 に示す．one-way ANOVA を実行したところ, 条件間に有意差があることがわかった ($F_{4,55} = 6.4275, p < .001$)．そこで, どの条件間で有意差があるかを示すために Tukey HSD[9] を行った．結果は図 6 に示す．どの時間歪曲条件においても, ベースライン条件と比べて有意に高いパフォーマンスが得られ, Constant0.8 条件では最も強い有意差が得られた (Constant0.6: $p < .01$, Constant0.8: $p < .001$, ToCoachTrail: $p < .01$, ToCurvePoints: $p < .05$)．一方で, 時間歪曲条件の間では有意差が見られなかった．

4.4.2 被験者の主観評価によるアンケート

被験者の主観評価によるアンケートの回答結果を図 5 に示す．one-way ANOVA を実行したところ, Q1,Q2,Q3,Q5 において有意差があることがわかった (Q1: $F_{4,55} = 3.6396, p < .05$, Q2: $F_{4,55} = 5.4573$, $p < .001$, Q3: $F_{4,55} = 3.7942$, $p < .01$, Q4: $F_{4,55} = 2.4962$, $p = .05318$, Q5: $F_{4,55} = 2.7626$, $p < .05$)．そこで, これらの質問のどの条件間で有意差があるかを示すために Tukey HSD を行った．

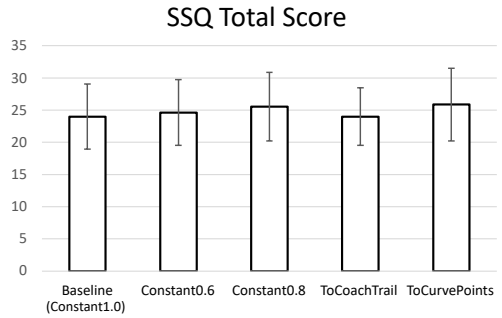

図 7. 各条件後の Simulator Sickness Questionnaire の Total Score の値

結果は図 5 に示す．Constant0.6 条件については Q4 以外の質問においてベースライン条件と比べて優位に高い評価が得られており (Q1: $p < .01$, Q2: $p < .001$, Q3: $p < .01$, Q5: $p < .05$), 強く否定する回答 (評価 1 と 2) の割合も他の条件と比べて低い．動的な条件については DistanceToCoachTrail 条件ではパフォーマンスに関する Q1 と Q2 でベースライン条件と比べて有意に高い評価が得られている (Q1: $p < .05$, Q2: $p < .05$) 一方, DistanceToCurvePoints 条件では有意な差は得られなかった．

4.4.3 シミュレータ酔い

シミュレータ酔いの程度を表す指標となる SSQ の TotalScore の結果を図 7 に示す．one-way ANOVA を実行したところ, 各条件間には有意差が得られなかった ($F_{4,55} = 0.0263, p = .9986$)．

4.4.4 自由記述によるコメント

静的な条件について, Constant0.6 は「コーチの姿勢の観察がしやすい」(P4,P7) というコメントがあった一方で,「簡単すぎて練習にならない」(P1) というコメントがあった．Constant0.8 は「ちょうどよいスピードだと感じた」(P1,P3,P7) というコメントが多く得られた．動的な条件では,「滑走中に速度が変化することに対応がしにくい」(P1,P7) や「速度変化によって酔いを感じた」(P2,P6) といったコメントがあった．また, 条件に関わらずシミュレータ酔いについて言及したコメントが多く得られた (P2,P5,P8,P10,P12)．

5 議論

5.1 仮説の検証

5.1.1 H1: 時間歪曲による練習効果

図 6 に示すように, 最初に計測したベースライン条件に対し, 4 つの条件下にて練習を行った直後のベースライン条件では被験者と Coach Trail との

距離が有意に小さくなったことから, どの条件下でも, よりコーチと近い滑走が行えていたことがわかる．図 5 に示すアンケートについて, Constant0.6 では練習へのモチベーションに関する Q4 以外の質問において有意差が得られている．特に Q5 の総合評価については評価 5〜7 の回答が 91.7%を占めたことから概ね好評であったことがわかる．これらのことから時間の経過速度を遅くすることが被験者のスキーの上達に繋がったと考えられるため, 仮説 H1 は支持される．

5.1.2 H2:より低い速度倍率による練習効果

図 5 に示すアンケートについて, Q4 以外の質問において, Constant0.6 は Constant0.8 と比べて, ベースライン条件とより強い有意差が得られている．一方で, この 2 つの条件間では有意差が得られておらず, 図 6 の Coach Trail との距離については Constant0.8 の方がベースライン条件に対し, より強い有意差を得られていることから, 時間の経過速度を遅くするほど練習効果が高まるかどうかの検証は不十分であり, 仮説 H2 は支持されない．

5.1.3 H3: 動的な倍率変更による練習効果

図 6 の Coach Trail との距離について, 動的な条件 2 つはベースライン条件に対して有意差が得られてはいるものの, その有意差は静的な条件 2 つに対して弱いものとなっている． また図 5 に示すアンケートについては, いずれの質問でも強く否定する回答 (評価 1 と 2) が静的な条件よりも多い傾向にあり, 被験者に不評であったことがわかる．よって動的に時間の経過速度を変更することが練習効果を高めるとは言えないため, 仮説 H3 は棄却される．

5.2 考察

実験の結果をもとに, 4 つの時間歪曲条件の有用性について考察を行う．我々の予想に反し, 動的な条件の結果が静的な条件に対して良くなかった．滑走している間に時間の経過速度の変更を行うことで, 被験者は変化後の速度に対応する必要があり, 負担が生じてしまった．これにより練習やコーチの姿勢の観察に集中できなかった可能性が考えられる．

動的な条件では滑走中に速度の変化が生じるため, 比較的強いシミュレータ酔いが発生することが予想されていた．しかし, 図 7 に示すように, SSQ の結果としては有意差が得られなかった．一方で, どの条件においても SSQ のスコアの平均が 20 を超えており, 自由記述のコメントにおいてもシミュレータ酔いについて言及したものが多く得られている．そのため, 動的な条件が酔いを増加させなかったのではなく, 条件に関わらず一定程度の酔いが引き起こされていたため, 有意差が生じなかったことが可能性として考えられる．

被験者の主観評価によるアンケートでは Constant 0.6 が最も高い評価であったのに対し, 図 6 によれば, Constant0.8 の方が被験者がよりコーチと近い滑走を行えていたのは興味深い結果である．速度倍率が低いほどコーチの動作の模倣は行いやすくなるものの, コーチの動作自体が実際のものと大きく変わってしまうため, 練習としての効果は低くなってしまった, ということが原因として考えられる．

5.3 今後の課題

本論文で検証に用いたスキーシミュレーションシステムは, 実際のスキーを忠実には再現ができておらず, これがユーザのパフォーマンスやシミュレータ酔いなどに影響を与えた可能性が考えられるため, システムの全体的な改善が必要である．仮想コース内のカーブを緩やかにして直線部分を増やすなど, より現実に近いコースに変更する．スキー板を傾けた場合のユーザの曲がりやすさが, より現実的になるようにパラメータを調整する．などの改善点が挙げられる．

今回の実験では動的な条件がユーザに不評であったが, 速度を変更する方法を改善することによって, 静的な条件よりも良い結果が得られる可能性がある．滑走中に速度変更を行うのではなく, 一度滑り終わった後にその滑走のパフォーマンスを評価し, 評価に応じて次回の速度倍率を決定するような動的条件が考えられ, 今後実装していくことを考えている．

今回の実装では, ユーザとコーチとの間の距離が広がりすぎた場合に, コーチの姿が見えにくく, 模倣が行えなくなる問題があった．コース上だけでなく, HMD の画面上の固定された位置にコーチの姿勢を表示することにより, 改善が可能であると考えられる．

6 まとめ

本論文では, スキーのシミュレータと, VR 機器を組み合わせたシミュレーションシステムを作成し, 時間の経過速度を変更する複数の時間歪曲機能を実装した。評価実験の結果より, 他のスポーツと同様にスキーにおいても時間歪曲が上達の手助けになることが確認できた．一方で, ベースライン条件との比較以外では有意差を得ることは出来なかったが, ユーザに好まれやすい時間歪曲条件の傾向をつかむことができた．

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] J. Adolf, P. Kán, B. Outram, H. Kaufmann, J. Doležal, and L. Lhotská. Juggling in VR: Advantages of Immersive Virtual Reality in Juggling Learning. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

[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. Bansal, S. Weech, and M. Barnett-Cowan. Movement-Contingent Time Flow in Virtual Reality Causes Temporal Recalibration. *Scientific Reports*, 9:4378, 03 2019.

[4] A. L. Edwards. Balanced Latin-Square Designs in Psychological Research. *The American Journal of Psychology*, 64(4):598–603, 1951.

[5] N. Hamanishi and J. Rekimoto. TTT: Time Synchronization Method by Time Distortion for VR Training Including Rapidly Moving Objects. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

[6] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, and M. G. Lilienthal. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3):203–220, 1993.

[7] 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.

[8] 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.

[9] J. Tukey. Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 5 2:99–114, 1949.

[10] 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.

[11] 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.

[12] E. Wu, M. Piekenbrock, T. Nakumura, and H. Koike. SPinPong - Virtual Reality Table Tennis Skill Acquisition using Visual, Haptic and Temporal Cues. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(5):2566–2576, 2021.

[13] 川崎 仁史, 脇坂 崇平, 笠原 俊一, 齊藤 寛人, 原口 純也, 登嶋 健太, 稲見 昌彦. けん玉できた！VR：5 分間程度の VR トレーニングによってけん玉の技の習得を支援するシステム. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2020 論文集, pp. 26–32, 2020.

[14] 野澤 崇行, E. Wu, F. Perteneder, 小池 英樹. 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. WISS2019 論文集, pp. 19–24, 2019.

未来ビジョン

本論文では, 場所や季節への制限が多いスキーを題材として, VR 機器を用いた仮想トレーニングシステムの開発を行った. with コロナ, after コロナの時代では, 現地で直接コーチから指導を受けるような他の様々なスポーツのトレーニングの代用として, このような仮想トレーニングの需要が増していくと考えられ, 本論文の結果を応用できる可能性が高い. また, 本論文では, 時間歪曲というシミュレーションならではの非現実的な機能を実装することによって, VR を単なる実際の環境でのトレーニングの代用とする以上の効果が得られる可能性についての模索も行った.

本論文では簡易的なスキーシミュレータマシンを用いたため, 足の角度のみを基準として仮装コース内の移動を決定していたが, 今後はより高度なシミュレータを用いることで, スキー板を踏み込む強さ等の計測が可能であり, それに応じた仮想コース内の動きを制御すればより現実のスキーに近づけることができると考えられる.

今回の実装では, 時間の経過速度を遅くして練習を行いやすくする, という初心者向けの実装をしたが, 逆に, 経過速度を実際よりも早くすることによって, トレーニングの負荷をより高め, 通常の速度におけるパフォーマンスを向上させる, という中級者や上級者向けの実装も可能である.