



アルペンスキーにおけるリアルタイム遠隔技能学習システム： インターフェースの検討

小野重遥¹⁾, 金井秀明¹⁾, Wu, Erwin²⁾, 小池英樹²⁾

1) 北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 (〒 923-1292 石川県能美市旭台 1-1, s2120010@jaist.ac.jp)

2) 東京工業大学 情報理工学院 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

概要: スキーシミュレータを用いたアルペンスキーのリアルタイム遠隔技能学習システムを提案する。本報告ではその初期的検討として、離れた 2 点間におけるシステム間の通信遅延を評価し、Wizard of Oz 法を用いたユーザ実験を行った。ユーザ実験の結果、提案システムによる仮想環境上でのロールモデルの提示は、実動画による提示と比較してユーザーのライントレース技術の向上に寄与した。またアンケートによる主観的評価の結果より、提案システムは有意に少ない作業負荷でロールモデルの模倣が可能であることが示唆された。

キーワード: 遠隔学習, リアルタイムインタラクション, スキー, Wizard of Oz 法

1. はじめに

COVID-19 の感染拡大以降、遠隔学習が再び注目されている。しかし、とりわけ技能学習の場面における遠隔学習システムの利用は限定的である。先行研究では、教育 [1][2] あるいはスポーツ [3][4] の分野で様々なトレーニングシステムが提供されてきたが、「人と人どうしのリアルタイムインタラクション」に着目した研究例は少ない。

スキーでは、感覚フィードバックを用いた、指導者と学習者が同一の場所（スキー場）にいることを必ずしも前提としない形式のスキートレーニングシステムが開発されているが [5][6][7]、その多くはユーザと教師のリアルタイムインタラクションには着目していない。従って本研究では、スキーシミュレータを用いたアルペンスキーのリアルタイム遠隔技能学習システムを提案する。本報告ではリアルタイムインタラクションの実現に向けた初期的検討として、離れた 2 点間におけるシステム間の通信遅延を評価し、Wizard of Oz 法を用いたユーザ実験を行った。

2. 関連研究

2.1 教育の場面における学習システム

教育の場面における学習システムとして、例えば Li ら [1] は拡張現実ベースの生物学実験教材を開発している。また、Ghalamchi・Kim[2] は実験機材を遠隔操作して機材の操作方法を学習するシステムを開発した。前者はシステムを通じた知識の習得に焦点を当てているのに対し、後者はシステムを通じた技能の習得に焦点を当てている。さらに後者はユーザと実験機器の遠隔でのリアルタイムインタラクションを実現しており、スキーを含むスポーツの遠隔技術習得においても、ユーザと教師間のリアルタイムインタラクションは効果的であると考えられる。

2.2 スポーツにおけるトレーニングシステム

スポーツの場面におけるトレーニングシステムとして、例えば Hirasawa[3] らは OpenPose を用いた姿勢検出による実動画ベースのスクワットのトレーニングシステムを開発した。同様に、Oagaz[4] は Azure Kinect を用いた仮想現実ベースの卓球時の姿勢を矯正するトレーニングシステムを開発している。しかし、これらのシステムの多くは離れた 2 点間での遠隔トレーニングには着目していないため、リアルタイムな遠隔技能学習システムの実現にあたって実動画ベースと仮想環境ベースのどちらがより効果的であるか検証する必要がある。

2.3 スキーにおけるトレーニングシステム

近年では、仮想環境やシミュレータを用いたスキートレーニングシステムが提案されている。例えば Hoffard ら [6] は振動フィードバックを用いたスキー中の姿勢を矯正するトレーニングシステムを提案している。また、Matsumoto ら [7] は時間歪曲により熟達者の動く速度を調節して提示するトレーニングシステムを開発している。これらのシステムでは初学者のスキートレーニングに焦点を当てたフィードバックが行われているが、提示されるフィードバックは予め計測された熟達者のデータに基づいており、熟達者と初学者間のリアルタイムインタラクションには着目していない。

2.4 本研究の位置づけ

リアルタイムインタラクションの実現にあたって、本報告では (1) TCP 接続あるいは UDP 接続を用いたリアルタイムインタラクションは実現可能かどうか、(2) フィードバックを提供するインターフェースは実動画ベースと仮想環境ベースのどちらがより効果的であるか、について検証した結果を報告する。

課題 (2) において、Hirasawa ら [3] や Matsumoto ら [7] のシステムに見られるように、熟達者の動きをトレースさ

せることは初学者の技術習得に効果的であると考えられる。このため、実験では「トレーニングによって初学者が提示された熟達者の動きをどれだけ正確にトレースできるようになったか」を重視して検証を行った。

3. システム構成

システム構成を図1に示す。開発環境には Unity を使用し、遠隔接続に際して2組のスキーシミュレータ (POWER SKI SIMULATOR¹)、Microsoft Azure Kinect, インソール型の圧力センサモジュール [8] を用いた。提案システムは、Azure Kinect と圧力センサモジュールからそれぞれ取得した姿勢・荷重データを、システム上に配置された3Dモデルに反映させると同時にもう一方の環境にネットワークを介して送信している。なお、もう一方の環境から受信した姿勢データと荷重データについては、システム上に配置されたもう一体の3Dモデルに反映させている。

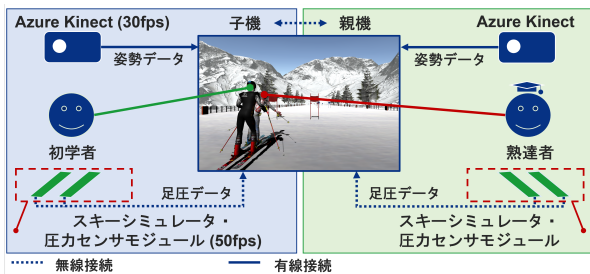


図1: システム構成

4. 通信実験

TCP 接続, UDP 接続における通信遅延調査を行った。表1に各プロトコルの各試行における通信遅延の5% トリム平均を示す (括弧内は標準偏差)。

表1: 各試行における通信遅延の5% トリム平均

試行	TCP 接続 [ms]	UDP 接続 [ms]
1	40.198 (20.671)	29.492 (13.871)
2	41.497 (20.911)	22.732 (13.169)
3	42.282 (20.656)	24.773 (14.389)
4	42.443 (21.162)	23.291 (13.511)
5	41.754 (21.019)	25.094 (15.121)
平均	41.635	25.077

本システムを使用した1試行 (約1分間) の遠隔トレーニング中における親機側データと子機側データのタイムスタンプの差分から通信遅延の平均を算出し、各プロトコルで5試行ずつ計測を行った。結果としてTCP接続とUDP接続の通信遅延に有意な差がみられた (Mann-Whitney U 検定, $U = 0, p < 0.05$)。Azure Kinect が 30[fps] で動作することから、理想的にはUDP接続を用いることでリアルタイムインタラクションを実現できると考えられる。

¹<https://www.ski-simulator.com/power-ski-simulator-en>

5. ユーザ実験

本研究では、ソロトレーニング (S)、実動画を用いたトレーニング (V)、仮想環境上の3Dモデルを用いたトレーニング (M)、の3条件について、トレーニング効果を被験者内実験計画にて検証した。図2に実験風景を示す。今回は遅延の影響を排除し、各被験者に提示する熟達者のデータを一定にするため、事前に計測した熟達者役 (男性, 30歳, スキーバジテスト²2級取得者) のデータを提示した。学習者役の被験者は12人 (男性8人, 女性4人, 平均27.167歳) で、スキー経験の平均は3.667日であった。

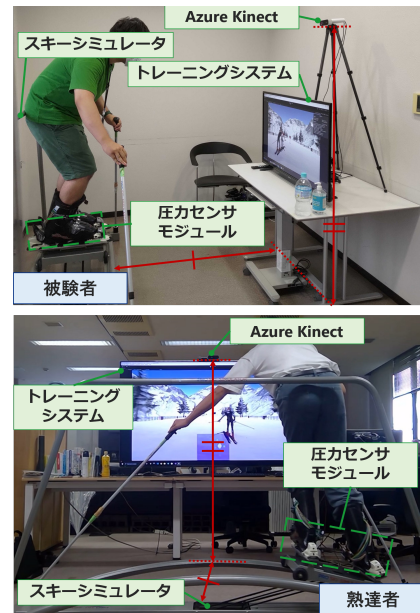


図2: 実験風景

被験者は各条件で10分間のトレーニングを行い、条件 (V), (M) では、被験者には提示される熟達者の動きに合わせて動くよう指示した。各条件のトレーニングの前後に姿勢・荷重データ測定を3試行を行い、情報提示に用いた熟達者のデータとの動きの差 (Mean Per Joint Position Error (MPJPE), Mean Per Joint Angle Error (MPJAE), 2次元重心位置の平均ユークリッド距離 (GCP)) を比較した。

また主観的評価として、NASA-Task Load Index (NASA-TLX), System Usability Scale (SUS), Intrinsic Motivation Inventory (IMI), Interactive Realization Score (IRS) を各条件で比較した (SUS, IRS は条件 (V) と (M) 間のみ)。IRS は独自の指標であり、感覚共有に関する次の質問に対する7段階のリッカート尺度による評価の合算値で構成される: (このシステムを使用すると,) (1) 自分がどのように動いているのかが確認しやすい, (2) 先生がどのように動いているのかが確認しやすい, (3) 自分と先生の動きにどのような差があるのかが確認しやすい, (4) 自分の環境でどのくらい動けば先生の動きに合わせることができるのかが確認しやすい, (5) いずれ先生と同じ動きを再現できるようになると思う。

²<https://snowjapanlicence.com/5-1test/>

表 2: 実験結果の平均と標準偏差

評価指標	条件		
	S	V	M
MPJPE	0.018 (0.211)	-0.119 (0.257)	0.379 (0.275)
MPJAE	0.566 (3.700)	-2.009 (5.179)	1.406 (3.713)
GCP	-369.833 (2594.118)	-1326.75 (2747.806)	913.141 (2262.268)
NASA-TLX	47.333 (21.269)	60.444 (9.605)	42.528 (13.273)
IMI Enjoyment	32.25 (10.043)	35.917 (8.607)	39.833 (5.177)
IMI Perceived Competence	26.667 (8.537)	28.667 (8.003)	32.833 (4.723)
IMI Tension	13.333 (6.223)	13.333 (6.737)	9.167 (3.184)
SUS	-	65 (14.965)	78.333 (9.204)
IRS	-	21.75 (4.146)	26.333 (5.437)

6. 実験結果

表 2 に各条件の実験結果を示す。上部 3 項目が客観的指標、下部 6 項目が主観的指標であり、各指標の平均と標準偏差を示している。客観的指標の値はトレーニング前後の差を表し、正値はトレーニングによって当該指標が改善されたことを示す。なお、検定には一元配置分散分析 (sAB デザイン)、多重比較には Bonferroni の補正を用いた。以下に有意差が認められた指標を示す。

MPJPE 3 条件の指標値に有意差が認められた ($F = 10.812, p = 0.0005$)。多重比較の結果、条件 (S) と条件 (M) ($p = 0.029$)、条件 (V) と条件 (M) ($p = 0.004$) の間に有意差が認められた (図 3 (a))。

NASA-TLX 3 条件の指標値に有意差が認められた ($F = 4.699, p = 0.020$)。多重比較の結果、条件 (V) と条件 (M) ($p = 0.048$) の間に有意差が認められた (図 3 (b))。

IMI IMI Enjoyment ($F = 6.746, p = 0.005$) と IMI Perceived Competence ($F = 5.047, p = 0.016$) において 3 条件の指標値に有意差が認められた。また多重比較の結果、いずれも条件 (S) と条件 (M) の間に有意差が認められた (IMI Enjoyment: $p = 0.015$, IMI Perceived Competence: $p = 0.037$, 図 3 (c), 図 3 (d))。

SUS 条件 (V) と条件 (M) の間に有意差が認められた ($F = 7.049, p = 0.022$, 図 3 (e))。

IRS 条件 (V) と条件 (M) の間に有意差が認められた ($F = 10.086, p = 0.009$, 図 3 (e))。

7. 議論

仮想環境上の 3D モデルを用いたトレーニングは、客観的指標と主観的指標の両面で優れていることが示唆された。以下に結果に基づく議論を示す。

客観的指標 MPJAE, GCP の比較結果より、3 条件は姿勢と荷重移動の模倣に役立たなかった。これは 3 条件ともこ

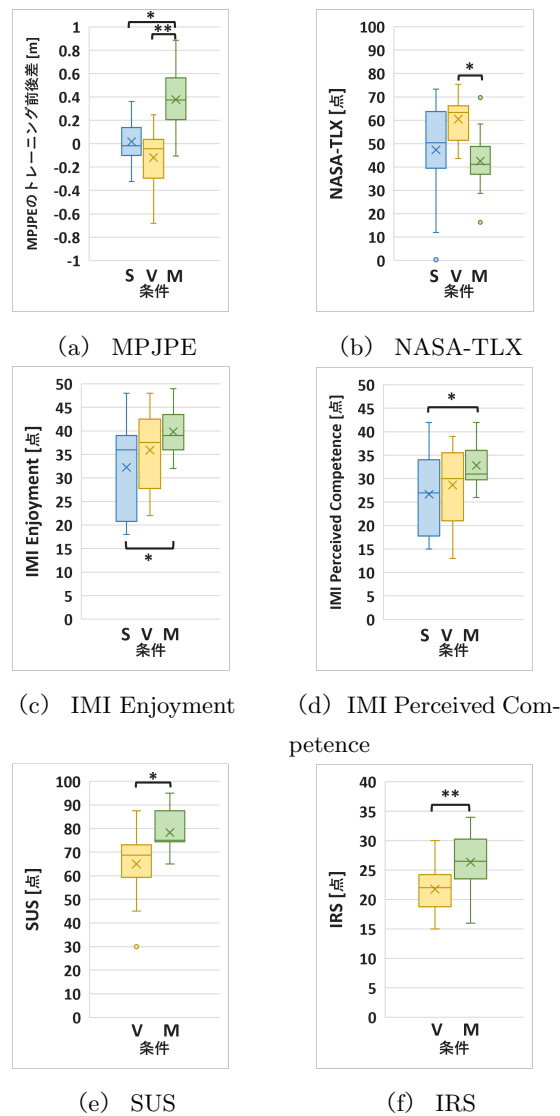


図 3: 有意差が認められた指標, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

これらの技術を矯正するフィードバックを提供しなかったことが理由として考えられる。ただし、条件 (V) と条件 (M) では模倣する対象がユーザに提示されるため、この結果から、初学者向けのシステムには初学者が理解しやすいフィー

ドバックを与えることがより重要であることが示唆される。

しかし MPJPE の結果より、条件 (M) は他の条件と比較してライントレース技術が有意に改善された (MPJPE は MPJAE と異なり位置関係を比較しているため、ターン時の位置誤差が結果に影響している)。条件 (V) と条件 (M) で提供される実動画データと姿勢データは同一の試行において計測されたものであるため、この結果から、熟達者とユーザの動きを同一の環境上、同一のスケールで配置することは、技術の模倣に効果的であることが分かった。

主観的指標 NASA-TLX では、11 人の被験者が条件 (M) と比べて条件 (V) のトレーニングは作業負荷が高いと評価した。全被験者のうち 4 人の被験者が「実動画の熟達者の動きを見ながら同時にシステム上で自分の動きを確認するのは難しい」とコメントした一方、別の 4 人の被験者は「細かな熟達者の動きを確認するには実動画の方がよい」とコメントしており、フィードバックの細かさや作業負荷はトレードオフの関係であることが示唆される。このためか、SUS では 10 人の被験者が条件 (V) と比べて条件 (M) のトレーニングシステムはより扱いやすいと評価した。全被験者のうち 10 人の被験者は条件 (M) のシステムに対して 68 点以上の評価 [9] を与えており、仮想環境ベースのトレーニングはより低作業負荷で初学者にとって扱いやすいシステムであったといえる。

また IRS では、9 人の被験者が条件 (V) と比べて条件 (M) のトレーニングシステムはより感覚を共有していると評価した。個々の設問で条件 (V) が条件 (M) の平均評価を上回ったのは (2) だけであり、条件 (V) は初学者にとって細かな熟達者の動きは確認できるが、どの程度動かせば一致する動きになるのかは分かりづらい可能性が示唆される。

さらに IMI Enjoyment と IMI Perceived Competence の結果から、それぞれ 10 人の被験者が条件 (S) と比べて条件 (M) のトレーニングはより楽しく、よりパフォーマンスの満足感が得られたと評価した。特に IMI Enjoyment の結果は Hamada ら [10] による結果を支持するものである。

8. 制限と今後の課題

本報告のユーザ実験では Wizard of Oz 法を用いており、実際接続環境におけるスキーインストラクターと初学者間のリアルタイムインタラクションについては検証しなかった。また、本報告で使用したシステムではインターフェースの違いによるトレーニング効果の差を検証するため、熟達者のモデルを提示すること以外のフィードバックを用いなかった。このため、今後は感覚フィードバックの実装と実際の接続環境における効果検証を行う予定である。

謝辞 本研究は JST CREST (JPMJCR17A3), JST SPRING (JPMJSP2102), JSPS 科研費 (JP22K12288), 柏森情報科学振興財団, 澁谷学術文化スポーツ振興財団, JAIST リサーチコア「協生 AI ×デザイン拠点」より支援を受けた。

参考文献

- [1] Li, J., Xiang, H. and Cai, S.: The Influence of Learning Style on Biology Teaching in AR Learning Environment, in *2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology & Education (TALE)*, pp. 1–7 (2021).
- [2] Ghalamchi, B. and Kim, D.: Learning by Doing from Afar: Mobilizing the Internet of Things to Enrich Remote Learning, in *2021 IEEE International Conference on Engineering, Technology & Education (TALE)*, pp. 494–499 (2021).
- [3] Hirasawa, Y., Gotoda, N., Kanda, R., Hirata, K. and Akagi, R.: Promotion system for home-based squat training using openpose, in *2020 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)*, pp. 984–986 (2020).
- [4] Oagaz, H., Schoun, B. and Choi, M.-H.: Real-time posture feedback for effective motor learning in table tennis in virtual reality, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 158, (2022).
- [5] Hasegawa, S., Ishijima, S., Kato, F., Mitake, H. and Sato, M.: Realtime sonification of the center of gravity for skiing, in *Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference*, pp. 1–4 (2012).
- [6] Hoffard, J., Nakamura, T., Wu, E. and Koike, H.: PushToSki - An Indoor Ski Training System Using Haptic Feedback, in *ACM SIGGRAPH 2021 Posters*, pp. 1–2 (2021).
- [7] Matsumoto, T., Wu, E. and Koike, H.: Skiing, Fast and Slow: Evaluation of Time Distortion for VR Ski Training, in *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2022*, pp. 142–151 (2022).
- [8] Ono, S., Kanai, H., Atsumi, R., Koike, H. and Nishimoto, K.: Learning Support and Evaluation of Weight-Shifting Skills for Novice Skiers Using Virtual Reality, in *Adaptive Instructional Systems: 4th International Conference, AIS 2022, Held as Part of the 24th HCI International Conference*, pp. 226–237 (2022).
- [9] Bangor, A., Kortum, P. and Miller, J.: Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale, *J. Usability Studies*, Vol. 4, No. 3, pp. 114–123 (2009).
- [10] Hamada, T., Hautasaari, A., Kitazaki, M. and Koshizuka, N.: Solitary Jogging with A Virtual Runner using Smartglasses, in *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 644–654 (2022).