山岳トレッキングとスキーを表現する  
バーチャルストックと身体運動感覚の研究

小島　優希也1)，岡本　正吾1)，ヤェム　ヴィボル2)，池井　寧

Yukiya OJIMA, Shogo OKAMOTO, Vibol YEM and Yasushi IKEI

1) 東京都立大学 大学院システムデザイン研究科 （〒191-0065 東京都日野市旭が丘6-6, ojima-yukiya@ed.tmu.ac.jp, okamotos@tmu.ac.jp）

2) 筑波大学 システム情報系 （〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1, yem@iit.tsukuba.ac.jp）

3) 東京大学 大学院情報理工学系研究科 （〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, ikei@vr.u-tokyo.ac.jp）

概要：両手のストックワークを含む全身の運動を体験者の身体に与えることにより，360度映像に没入して山岳のトレッキングやスキーをしている感覚を作り出すシステムを構築した．体験者は，HMDによる視聴覚情報に連動して提示される前庭刺激，下肢運動刺激，ストック操作の上肢運動刺激，および気流の触覚，足底，サドル，手への振動触覚を受けて，全身運動の没入感を得ることができる．視点運動量が小さいコンテンツも選択できる公開展示で新たな体験を提供し研究を深める．

キーワード：力覚・体性感覚，歩行感覚

# はじめに

VRは多様な体験を作り出すことができる．中でも山岳系の体験は，魅力的な空間の中でダイナミックな身体運動を含み，再現が望ましい対象の１つである．そうした体験は映像視聴によって簡便に知ることはできるが，自己の身体感覚として捉えられればトレーニング要素も含まれ，とりわけ有益である．

スキーシミュレータは，スキルを修得する目的やエンタテインメント向けに研究やゲームなどで開発が行われてきた．トレーナの場合，自己身体の能動的運動で映像空間をバーチャルに滑るが，ゲームの場合は等価な身体感覚は必要とは限らない．しかし自分で navigation する点は共通である．我々は，映像音声と身体運動を体験者に受動的に与えることで，身体的な追体験をしてもらうシステムを発表した [2]．本研究も同じ設計方針で，参加者に山岳体験の一人称実写映像を身体感覚とともに伝える構成（Figure 1）であり，手にストックワークを再現する点が大きな特徴である．

# VR SYSTEM

我々が設計したデバイスをFigure 2 に示す．11自由度の並進・ 回転運動（振動子は省略している）で身体運動感覚を生成する．これは，polesを用いて山岳トレッキングやスキーをする時の体験を，視覚だけでなく全身の感覚に対して刺激を提示することにより伝えるものである．日本で二番目に高い北岳を登山している体験と志賀高原スキー場を滑っている体験が実現されている．このほかにも多様な条件の映像を導入することが可能である．

刺激を提示するバーチャルリアリティデバイスは，視聴覚のためのHMDと手のストックワークを再現する伸縮し傾斜回転するpole，体幹の鉛直加速度を生成するsaddle，下肢の姿勢や運動を作るスライダとペダル，スキーの速度や山の天候に依存した気流発生用のfan，および pedal, saddle, hand controller に付けられた振動子からなっている． これらが映像に同期して，調和して刺激を与えることによっ て，山登りやスキーの運動状態にあることを知覚させる．HMDで提示する映像は立体視用に視差を持つペアが一部のシーンで用いられる．

Figure 3は，スケート・スキーを提示する際の各自由度の運動波形（preliminary trajectory）である．サドルの上下運動，Leg sliderの前後運動，Pedal pitchの往復回転運動が，異なる位相，異なる波形で連動することで，体幹と足の運動感覚を作っている．ストックの伸縮は途中で瞬間的に停止する部分があり，こ れにより先端が着地した感覚を与えている．その後，急速にス トックが傾斜し後方に移動することでストックによる身体駆動 感覚が生成される． VR 世界で靴が地面に着地する時，雪を踏み込むとき，スキー と雪面の接触状態が変化する時，ストックの先端が地面に接触 する時に，サドル，足底，ハンドコントローラに振動の皮膚感 覚を提示し，空間体験の品質を高める．

# EXPERIENCE AT THE VENUE

このシステムは，サドルと下肢の運動と振動刺激による歩行感覚に加えて，上肢で把持したストックの運動で上肢と上半身を使った山岳歩行の安定化やスキーにおける全身運動での手の駆動を含む運動感覚を体験させることができる．

山岳歩行では，比較的ゆっくりとした周期と大きな振幅でサドルと足が動き，ストックによる硬い地面の手ごたえも明確に感じられる．ストックの伸縮運動は，先端が着地する地面の高さの変化を再現し，着地位置とストックの角度を任意に設定できる．上昇感覚はサドルによる前庭感覚と足の運動，および着地の振動で与えられている．

スキーの運動は，現在は歩行に近いクロスカントリー競技に似た形態がシステムの構成に適している．交互に足を前に出してスケーティングをするか，足を揃えてストックで漕いで進む運動である．または，直滑降のように足をそろえたままで滑る体験である．

Figure 4は，主観視点の全方位4K映像の1シーンである．このような没入映像はベクションを誘導し，身体運動と身体刺激によって統合知覚が促進される．いずれの場合も，ストックを握る手にストックワークと地面の感覚と振動，全身の歩行感覚と地面の着地感が，スキー場や山岳の気流感覚とともに提示され，没入した映像空間での運動のリアリティを高めている． Conference参加者には，視点移動が遅くベクションが少ない体験と，やや視点移動が速い体験を選べるようにする．すなわち，ハイキングのような傾斜の緩い山間部の歩行や緩斜面のク ロスカントリー歩行では，映像酔いをかなり抑制した体験が可能である．急こう配の山岳歩行（北岳）と速度が速いスキー体験は視点移動が大きいが，そのどちらかを選んで体験することができる．体験時間は，各３分間程度として待機時間が長くなりすぎないように注意する．我々は現地での参加者のコメントを期待している．本システムは正しい運用をする限り安全性の問題はないが，万全の安全対策を講じる．

# 刺激

条件を4つ設定．

1. 平地条件：スケール1倍
2. 緩い坂条件： スケール1.25倍．ストックは段付き．1歩ごとに2mm上昇
3. 急坂条件：スケール1.5倍．1歩ごとに5mm上昇
4. ランダムに動く

条件4では動作範囲は条件1と同じで，目標位置及び動作時間がランダムである．開始タイミングは直前の動作が終了したらすぐに始まるため，装置は止まることなく動きつづける．

条件2ではスティックが3モーションとなり，下がる途中80mmにて急激に停止する．これは地面の突く感覚を提示するためである．条件3では下がる途中120mmにて急激に停止する．

姿勢は肘が体の真横に位置し，肘の角度が90度になる．サドルの位置は上昇するため，初期位置は装置の一番低い位置．

今回は座席とストックの運動に注目した．実験時は閉眼である．条件ごとの座席とストックの軌道を図3-7に示す．

|  |  |
| --- | --- |
| サドル上昇 | 30mm |
| ストック伸縮 | 100mm |
| ストックスライド前方/後方 | 150/100 mm |
| ストック前後回転 | 4/-10deg |
| ペダル | 40deg |
| 足スライダ前方/後方 | 100/50 mm |

# 結果

結果を図に示す．参加者内の1元配置分散分析の結果，有意差が見られなかった．

# 考察

## 平地条件

平地条件では最もストックの感覚が平地に近い結果となった．これはサドルの上昇とストックを突く高さが一定であるためと考えられる．

## 坂条件

坂条件｛緩い坂，急坂｝では有意差が見られなかった．平均値の比較では急坂条件の方がストックの感覚が強くなった．これは振幅と上昇が大きいためと考えられる．

謝辞　謝辞は結論の後に書いてください．

付録　付録は参考文献の前に書いてください．

参考文献

1. Takashi Matsumoto, Erwin Wu, and Hideki Koike. 2022. Skiing, Fast and Slow: Evaluation of Time Distortion for VR Ski Training. In Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2022 (Kashiwa, Chiba, Japan) (AHs ’22). ACM, New York, NY, USA, 142–151. https://doi.org/10.1145/3519391.3519402
2. Koichi Shimizu, Gaku Sueta, Kentaro Yamaoka, Kazuki Sawamura, Yujin Suzuki, Keisuke Yoshida, Vibol Yem, Yasushi Ikei, Tomohiro Amemiya, Makoto Sato, Koichi Hirota, and Michiteru Kitazaki. 2018. FiveStar VR: shareable travel experience through multisensory stimulation to the whole body. In SIGGRAPH Asia 2018 Virtual & Augmented Reality (Tokyo, Japan) (SA ’18). ACM, New York, NY, USA, Article 2, 2 pages. https://doi.org/10.1145/3275495.3275502