



山岳トレッキングを表現する 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⁾, ヤエム ヴィボル²⁾, 池井 寧³⁾
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: ユーザが把持したストック（ポール）とペダル、サドルによって全身に運動刺激を加え 360 度実写映像の空間での身体感覚をバーチャルに再現することにより、山岳トレッキングやスキーの体験を伝えるシステムを構築した。全方位の視聴覚情報に連動して提示される上肢運動刺激、下肢運動刺激、前庭感覚刺激および気流の触覚、さらに足底、サドル、手への振動触覚により、身体的追体験の形式で、映像の空間とそこでの全身運動への没入感を与えることが可能である。本論文では装置の構成と山岳登攀の表現手法とその初期的な評価およびストック感覚の特徴について述べる。

キーワード: 身体的追体験, 力触覚ディスプレイ, 前庭感覚ディスプレイ, スtock, 登攀感覚

1. はじめに

VR (virtual reality)によって可能となる体験の1つに身体的追体験がある[1, 2]。これは身体運動と映像音声を体験者に受動的に与える形式の新しい追体験を提案したものである。全身に身体運動感覚を提示することによって多様な感覚が得られるだけでなく、映像提示だけの場合に発生する統合不調 (VR 病) の回避にも有効である。また身体運動のトレーニングに役立つ要素も含まれ、多様な応用を見込むことができる。

本論文では山岳トレッキングの感覚を与えるシステムとしてストック（トレッキングポール）をつきながら傾斜路を登攀する感覚の提示法について述べる。山岳系の体験は、もとより魅力的な環境でダイナミックな身体運動を含

むもので再現対象として興味深い。これを実現するために本研究では山岳登攀時に記録した一人称全天実写映像を、身体運動感覚とともにユーザに伝える構成を構築している。とりわけ手にストック感覚を再現する点が特徴である。

2. 関連研究

ベルト駆動のロコモーション[3]、クライミングインタフェース、トレッドミルを垂直方向に利用したロッククライミング[4]など、自立能動歩行による VR 体験の研究は非常に多いが、ストックをつきながら傾斜を登攀する山岳体験の感覚を提示するシ VR ディスプレイは見当たらない。

3. スtockを含む登攀感覚の提示システム

設計したデバイスを図1 (左), 図2に示す。全 11 自由度の並進・回転運動と振動・皮膚刺激で登攀時の身体運動感覚を生成することを目指している。体験者はサドルに中腰で掛け、可動ペダルに両足を置き、両手でストックデバイスを把持し、HMD (head mounted display)を装着して本デバイスを使用する。サドルは上下変位で歩行と登攀時の体幹の鉛直加速度を与え、ペダルは前後並進とピッチ回転で下肢の姿勢や歩行運動感覚を生成する。ストックデバイスは伸縮、ピッチ、前後並進の運動が可能であり、地面への先端の接触感とバランス維持、駆動感などを表す。これらで 11 自由度となるほか、着地感、摩擦感のために各部に振動を提示する。また運動と気象状況を表す 3 方向の気流を提示する。これらが映像に同期・調和して身体刺激を与えることによって、登山 (山岳トレッキング) 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

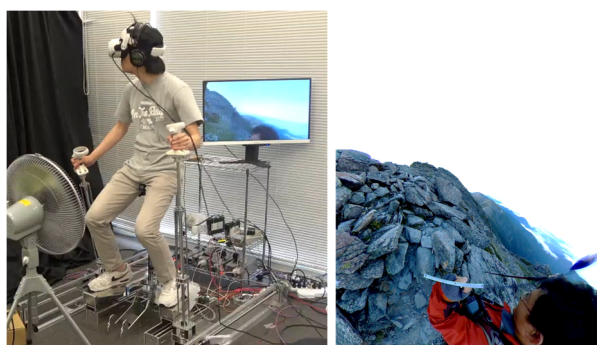


図1: バーチャルストックを含む山岳トレッキング体験 (左). 実際の北岳の登山中の全天周立体映像 (右).

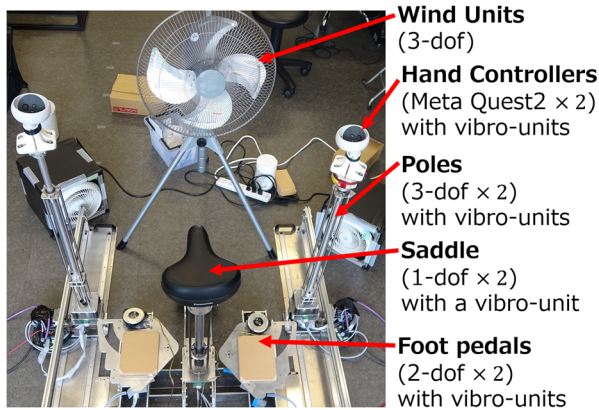


図 2: バーチャルストックを含む山岳トレッキング感覚の提示装置

は立体視用に視差を持つ画像を用いることもできる。

身体刺激を提示する装置の提示範囲は表 1 に示されるが、ストックデバイスのピッチと並進・伸縮は把持する手の位置に対して十分な範囲を持っている。サドルは、体験者の身長に適合させるために可動域が大きくなっている。ペダル前後とピッチは、小型化のためにやや小さくなっている。モータの推力は表 2 に示すが、ストックのピッチ以外は十分な大きさである。ストックデバイスのピッチは、小型化と安全性を考慮し、約 1.5 m の高さにおいて 20 N 程度（最大トルクによるもの）としている。ただし、ストックは本来、回転トルクを発生しないため本研究では十分である。各自由度の最大速度は負荷にも依存するが、本論文の実験において利用する範囲は低速であり十分であるため記載していない。

振動刺激は、本論文の実験では足底の着地感覚をそのタイミングで発生させることに用いた。波形はこの場合必ずしも重要ではないが、録音した足音の帯域を低域に修正して皮膚受容器の感度が高い波形とした。

山岳トレッキング体験の提示の制御系は図 3 に示す構成で、映像と身体刺激提示をオーサリングすることで多様な体験を提示可能としている。この制御で、体験者の身体に提示される運動のタイミング、振幅、位相を適切に構成することで、一人称の全身運動の感覚を与える構成である。

表 1: 提示可能範囲（可動域）

ストックピッチ 前, 後	83 deg, 80 deg
ストック並進	1120 mm
ストック伸縮	556 mm
サドル上下	350 mm
ペダル前後	412 mm
ペダルピッチ	14 deg
振動ユニット	16~15 kHz

表 2: 駆動モータの仕様

	サドル リフト	ストック 並進, 伸縮	ストック ピッチ
最大トルク Nm	13.1	13.1	36
出力 W	400	260	106
最大推力 N	15,638	3,909	(~20 N)
ボールねじリード mm/r	5	20	-
最大回転数 rpm	5000	5000	35

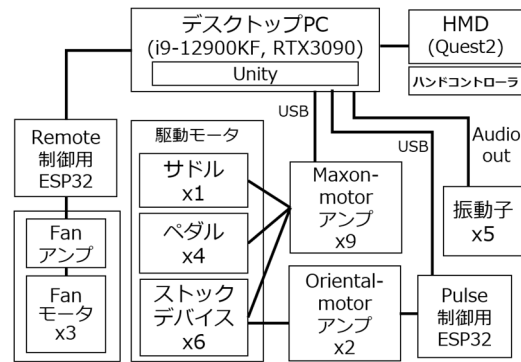


図 3: 制御システムの構成

4. 本研究で扱うストックを用いた登攀運動

本システムは、山岳トレッキングやスキーのようにストック（ポール）を使う体験を表現することを特徴としている。その際の身体運動は通常は立位で歩行に近い運動と姿勢をとることを想定しており、その中でストックを使うことを考えている。本論文では、特に山岳トレッキングに注目するが、その場合、基本的には二足歩行でその中でストックを用いて、姿勢の安定を図るとともに、身体の重心を上昇するための力を、ストックを持つ腕で分担する運動を仮定している。

ストックの利用は手で行うため、足より明らかに自由度が高いので、使用方法は必ずしも一定ではないが、ここでは定常的に反復するストックの着地運動と身体上昇補助感をまず検討した。歩行の運動と同期してストックをつくときの位相は、本論文では特に、前に踏み出す足と同側のストックをその足の外側にほぼ同じタイミングでつくことを仮定した。この場合、両方のストックが地面についた状態で、どちらかの足を遊脚として前に踏み出して着地しその横に同側のストックを突くものである。

この利用方法は、次のような登攀運動の中で発生するとみなしている。すなわち、傾斜の大きい斜面で片側の足を前方上方に踏み出して着地し、その足に重心を移動しながら、全身の重心を持ち上げる。その運動において、立脚した足の両側（左右）への転倒リスクを考えると、内側（体幹側）は他方の足があるのでその足をすばやく移動してつければ転倒しないが、外側は足がないので、復元力を与えて転倒を防ぐためには、外側にストックがあることが必要である。また、重心を立脚した足に移動して体幹を引き上げる際に、足だけでなく、同側についたストックで腕の力で引き上げることで、足への負担を減らすことが可能となる。

5. バーチャル山岳トレッキングの表現方法

図 4 の 11 自由度をそれぞれ異なる波形で運動提示することにより山岳トレッキングの身体感覚を生成した。歩行を表現するペダルの運動は、概略は歩行時の足の運動と相似形の軌道で実際歩行より縮小した振幅で駆動する。ペダルが前方に移動すると同時にピッチ回転して踵が上昇する。波形は過去の研究に準じた方法で駆動しているが、本研究では中心的な論点ではないので省略する。サドルの運動は、足を前に踏み出す遊脚相の開始と同時に上昇する位相としており、実際の歩行と概略対応している。

ストックデバイスによるバーチャルストックの表現は、ハンドル（Quest コントローラがつけられた部分）の上下運動、前後運動、ピッチ運動の3自由度で実装されている。図5がデバイスの軌道の一例であるが、これにより、バーチャルストックを持ち上げて、前方のバーチャル地面に着地させる感覚を生成することができる。図6はハンドルの高さ前後の軌道である。この際ストックデバイスの収縮速度を0とすることで明確な堅い地面への着地感が提示される。バーチャルストックが着地した後は、バーチャル身体は前進し上昇するので、バーチャルストックは前方に傾き（図5のストックピッチ角が負の方向）、さらに収縮することで、バーチャルストック先端が後方下方の地面に位置することが提示される。

身体が上昇する感覚は、このバーチャルストックの感覚に、サドルの上昇（リフト）の波形を調整して加え、さらに実際の登攀時の映像を提示することで高めることが可能である。座席型のデバイスにより階段歩行を表現した場合[5]にリフトを往復運動ではなく、復路を短くすることで上昇感に適合することが示されており、そのような調整が有効と考えられる。ストックもそれと同様とする。

6. 評価実験

本システムによる登攀感覚を評価するための簡略な評価を行った。実験参加者は5名の男子大学院生（平均身長174.6 cm, 23.5 歳）である。実際のストックの感覚と比較するため、実際の階段（図7, 勾配51%）をストックを用いながら登階した場合と平面（廊下）をストックをついて歩行した感覚を評価のための標準刺激とした。ストックの使用方法は、4章に記載したものとし、同側にストックをついて身体を持ちあげる運動とした。実験参加者には、階段（27度14段）と廊下（0度7m）でストックを用いた身体感覚を2回以上、システムの刺激提示の直前に体験してもらい、それらの感覚を図8の評価用VAS（visual analog scale）の終端の定義とした。質問紙には加えてスケール外の場合として「どちらにも該当しない」という選択肢を設けた。

提示システムを体験する際の実験参加者の初期姿勢としては、肘が体の真横に位置し、肘の角度が90度、膝が少し曲がるように（図1）、実験者がデバイスの開始位置を設定した。また、刺激提示中は閉眼とした。

図5の4水準の刺激波形（A~D）を用意し、各水準は1回ずつ、各20歩分の運動を提示した。提示順序はランダムに実験参加者間でバランスさせた。各刺激提示後にストックの感覚と全体の身体の上昇感覚について図8のVASで評価してもらった。刺激Aは平地歩行相当の刺激であり、実験者（身長177cm）が適合する振幅として表3の値を設定した。刺激B, Cは中勾配、急勾配の登攀を想定した刺激であり、ストックハンドル部の降下が平地歩行より早く途中で停止して着地した地面が高くなっていることを再現している。また刺激B, Cのその他の振幅は表3の1.25倍、1.5倍として運動量を大きくした。さらにサドルとストックは、5章で述べたように変位後の戻り（復路）を90%および97%とした。刺激Dは、ストックピッチ以外のデバイスの運動をランダムに設定した振幅の波形であり、表3の変位内を1.5秒間隔でランダムになめらかに

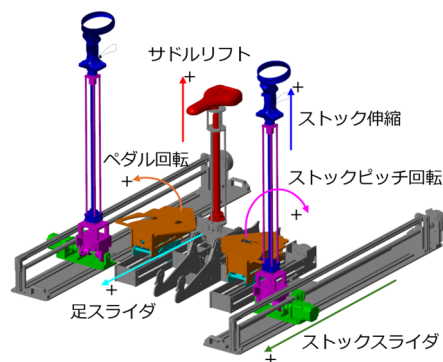


図4: トレッキング感覚提示システム（振動部は省略）

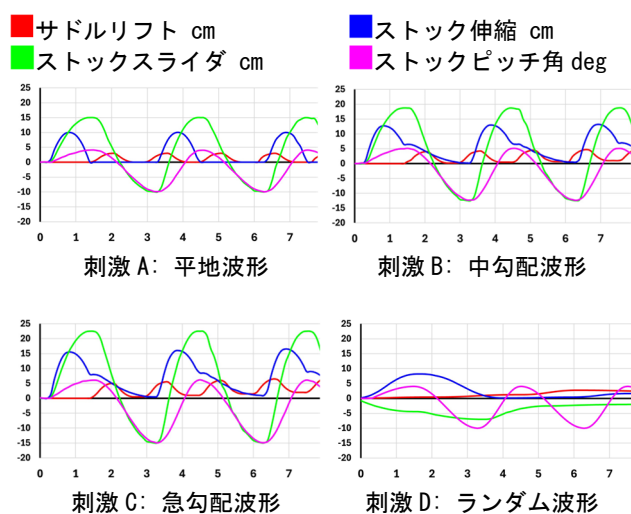


図5: 提示波形。横軸は時間(s)

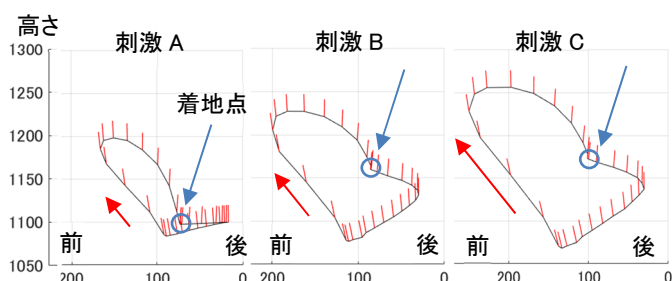


図6: スtockハンドル前後-高さの軌道(mm)と方向(針)

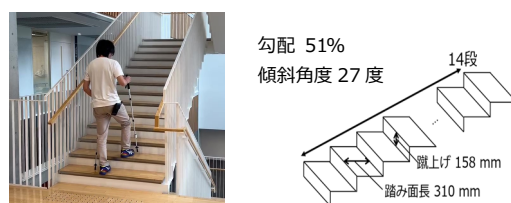


図7: 階段登階(左)と階段の寸法

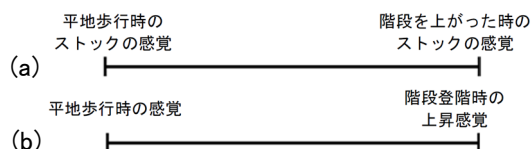


図8: スtockの感覚と全身上昇感覚の評価尺度

表 3: 平地波形の変位 (振幅)

サドル上昇	30 mm
ストック伸縮	100 mm
ストック並進 前, 後	150, 100 mm
ストックピッチ 前, 後	4, -10 deg
ペダルピッチ回転	14 deg
ペダル前, 後	100, 50 mm

変位させた軌道である。

7. 実験結果

実験参加者が感じた各刺激のストックの感覚を図 9 に示す。誤差棒は標準誤差である。繰り返し無し被験者内分散分析の結果、刺激要因(A,B,C)の差は有意であった($F(2,8)=17.28$, $p=0.0012$)。多重比較 (Holm 法 5%水準)では $A < B$ ($p=0.0397$), $A < C$ ($p=0.0097$)である。D 条件は全ての参加者が「どちらにも該当しない」と回答した。全身の上昇感覚が最も高い刺激を 5 人が選択した結果は平地刺激 A: 0 人, 中勾配刺激 B: 2 人, 急勾配刺激 C: 3 人, ランダム刺激 D: 0 人であった。この最大上昇感覚刺激に関して図 8(b)の尺度の回答は図 10 となった。(平地: 0, 階段 1.0)

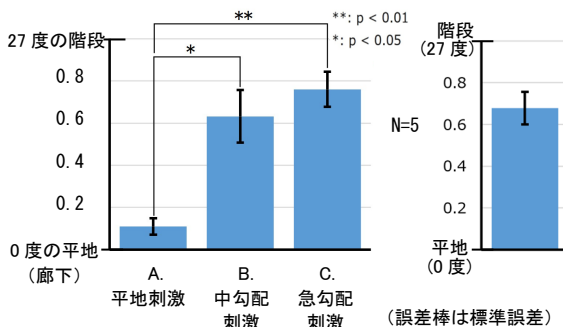


図 9: ストックの感覚

図 10: 上昇感覚

8. 考察

8.1 ストックの感覚

刺激 A は平地歩行のストック感覚として実験者が設定した軌道であり、図 9 の結果から実験参加者は平地歩行時のストックの感覚に近いと判断している。これはストックが地面をつく高さが一定であり、歩行提示の過程で平坦な地形であることが分かることによると考えられる。

それに対して刺激 B, C ではストックの持ち上げ量が、図 6 に示すように約 150 mm, 225 mm となり階段の蹴上げ 158 mm に近く設定され、平地歩行時より階段歩行時のストックの運動感覚に近づいている。さらにストックが上昇後に 3%程度最下点が高くなることも貢献している。この上昇は知覚できる量であるが、その累積には制限があるため、トレッキング過程で低勾配のシーンにきた時にウォッシュバックにより初期位置に戻すことが必要である。

さらに興味深いのは、ストックの運動に対して能動的な操作を誘発することである。著者らの観察に基づく考察としては、以下の観点がある。

・**把持反射の誘発**: 把持したストックが着地するときに衝突感が生じ、腕の運動が急停止した際のモーメントの効果が手の皮膚に感じられると同時に把持力を強めて滑り

を防ぐ反射が起こる。把持も能動だがこの反射が能動感を強める。足底の着地時の振動より強い能動感と考えられる。

・**能動的な身体バランス維持**: 中腰でのサドル利用は、上半身の自由度が大きく安定ではない。加えて脚・足の運動も装置から加えられるため、上半身を中心とした身体の安定化のために、(本来の目的としての) ストックに能動的に反力を求めることは発生の確度が高い。すなわち姿勢反射の一部として能動的にストックを利用することになる。

・**手の探索機能の特性**: 把持した道具からの感触によって能動的に地面状態の知覚・探索を行うことも手の機能の一部である。ストックの先端に注意を向けて行う、そうした能動行動が含まれる可能性も小さくない。

8.2 全身の上昇感覚

図 10 に示す上昇感覚は 27 度の階段の 67%となった。階段の蹴上げ 158 mm に対してサドル上昇の前庭感覚刺激は 45 mm (刺激 C)で 28%であるため、ストックが上昇感覚を高めたと考えられる。また、上昇感覚が高い刺激として C または B が選ばれており、少しでも大きい刺激量が上昇感覚を高めるとは現時点では言えない。サドルとストックの各周期毎の上昇運動も寄与しており、統合運動の設計に依存すると考えられる。

9. おわりに

本研究ではストックを含む身体運動提示デバイスにより、山岳トレッキングの感覚を与える手法を示した。提示運動刺激を適切に設定することで登攀感覚が高まることがわかった。従来の身体的追体験[1]では、着座安定姿勢での受動的な運動体験であったが、ストックデバイスの場合は、把持反射、身体バランス維持、探索機能などの手の特性に依存して、能動的関与が高まることが観察された。

謝辞 本研究は科研費 JP19K20325, 21H04883, 18H04118, 21K19785, 東京都立大学ローカル 5G プロジェクトおよび電気通信普及財団の助成を受けたものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] 池井ほか, 身体的追体験の概念の提案と一部機能の試験実装—多感覚・運動情報提示による歩行・走行体験の共有, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2019, 24(2), pp. 153-164, doi.org/10.18974/tvrsj.24.2_153.
- [2] K. Shimizu, et al., FiveStar VR: shareable travel experience through multisensory stimulation to the whole body. In SIGGRAPH Asia 2018 (SA '18). ACM, Article 2, 2 pages. doi.org/10.1145/3275495.3275502
- [3] 岩田, 全方向無限平面を用いたロコモーションインタフェース, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2000, 5(2), pp. 853-862, doi.org/10.18974/tvrsj.5.2_853
- [4] F. Kosmalla, et al. 2022. InfinityWall – Vertical Locomotion in Virtual Reality using a Rock Climbing Treadmill. CHI EA '22. ACM, Article 280, 1–6. doi.org/10.1145/3491101.3519654
- [5] K. Shimizu, et al., “Rendering of virtual walking sensation by a vestibular display,” in Human Interface and the Management of Information. Information in Intelligent Systems (Yamamoto and Mori, eds.), pp. 36–46, 2019