



THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

臀部皮膚せん断変形による座面からの突き上げ感の提示

堀江新¹⁾, 永野光¹⁾, 昆陽雅司¹⁾, 田所諭¹⁾

1) 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, horie.arata@rm.is.tohoku.ac.jp)

概要: 本研究では、臀部の皮膚にせん断変形を提示することで座面から鉛直方向に突き上げられた感覚を提示する手法を提案する。我々はこれまで、臀部の皮膚をせん断変形させることでせん断力を提示し、自己運動の加速感覚を誘発する手法を提案してきた。本研究ではさらに、臀部の皮膚を瞬間的にせん断変形させることで路面の凹凸等による座面からの突き上げ感を提示する手法を提案する。実験の結果、既存手法であるステアリングの振動のみの刺激と比較して、ステアリングの振動に加えて臀部の皮膚の内側へのせん断変形を提示する刺激が有意に突き上げ感を高い臨場感で提示できることが明らかになった。

キーワード: スキンストレッチ, 力覚提示, 錯覚

1. 緒言

ヒトは移動体に搭乗して移動している際に、視覚や聴覚、触覚など、複数の感覚を統合し、自己の運動を認識する。この自己運動感覚を再現することは、全身の運動が伴う体験の臨場感を向上させる上で重要である。また、適切に自己運動に伴う感覚を提示することは、複数の感覚器間で知覚する自己運動感覚一致させることで VR 酔いの対策として効果が期待される。

これまで、視覚 [1] や聴覚 [2] によって環境との相対運動を知覚することで、自己運動感覚が誘発されることが実験的に確かめられてきた。同様に、移動体に着座している際の臀部から受ける皮膚刺激も、自己の運動情報を知覚するための要素の 1 つであると考えられる。そこで、我々はこれまで臀部の皮膚の一部をせん断変形させるデバイスを作成し、力覚提示を行うことで自己運動感覚を誘発する手法を提案した。また、実験によりヒトの肩幅方向への加速度を誘発することが可能であることを確認した [3]。

路面に凹凸がある場合、ヒトには水平方向の運動の加速感覚に加えて、座面から上方への突き上げられるような感覚を知覚する。この感覚を提示することは、路面の状態を再現することで仮想空間での没入感を高めるのに寄与することが期待される。また、視覚とその他の感覚との間で、誘発する自己運動感覚に差異があることから生じる VR 酔いに対しても、軽減されることが期待される。

これまで、路面の凹凸の状態の再現を行う手法が数多く提案されており、ステアリング [4] や座面 [5] から振動刺激を提示する手法が代表的である。これらは、路面の小さな段差や凹凸、エンジンによる車体の振動を再現する上では効果的であるが、身体に大きな上下の変位を伴うような大きな段差や凹凸を再現することは難しい。

また、身体の傾斜をモーションベッドの傾きにより起伏を提示する研究も報告されている [6]。しかし、実際にヒトを傾ける為の大きなアクチュエータや電力が必要があり、既存のモーションプラットフォーム [7] より比較的小規模ではあるものの、さらに小さい規模の装置で同様の効果をもつ手法が期待される。

我々は大きな段差に乗り上げた際の座面からの突き上げ感の再現にあたり、臀部の圧力中心の変位に着目する。大きな段差を乗り越える際には、臀部に圧力の変化が生じ、さらに左右の臀部の圧力中心に変位が生じる。その圧力中心の変位を皮膚のせん断変形によって提示することで、圧力中心が変位した際と同様の感覚を提示できる可能性がある。

臀部の皮膚変形を利用することにより、圧力中心の変位の感覚再現することができれば、本来モーションプラットフォームなどの大きなデバイスが必要であった身体の上下運動による感覚を小規模な装置で再現することが可能になる。また、ヒトの上下運動を左右方向の皮膚のせん断変形によって再現することが可能であることが確認されれば、装置の低自由度化につながり、小規模な構成で多彩な運動表現が可能となる。

本稿では臀部皮膚変形デバイスを用いた座面からの突き上げ感提示の手法について述べ、手法の有効性を実験により検証する。

2. 原理

2.1 臀部皮膚変形デバイス

2.1.1 デバイスの構成

我々は臀部の皮膚のせん断変形を提示する触覚デバイスを開発した。図 1 に開発したデバイスの外観を示す。使用者はこのデバイスの上に着座することで臀部に皮膚刺激を受ける。2つのスポンジ製のコンタクトがデバイスの上部に配置されており、それらが動作することで臀部の一部の皮

Arata HORIE, Hikaru NAGANO, Masashi KONYO, and Satoshi TADOKORO

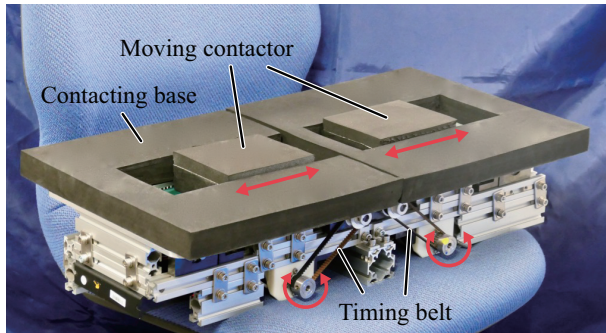


図 1: 臀部皮膚変形デバイス

膚を変形させる。外縁部のスポンジによって臀部の外周は支持される。それぞれのコンタクタはデバイス内部のベルトコンベアに接着されており、ベルトコンベアはそれぞれモータ (Maxon RE25, Maxon Motor), モータードライバ (ESCON 50/5, Maxon Motor), 及びエンコーダ (RE30E, Nidec Copal Corp.) によって位置制御した。

2.1.2 デバイスの制御

コンタクタの位置はエンコーダからの値を用いてフィードバック制御された。エンコーダの分解能はコンタクタの移動量に換算すると 0.3mm であった。エンコーダは Arduino Uno によってサンプリングされ、その周期は 100Hz であった。

2.1.3 デバイスのキャリブレーション

臀部力覚提示装置を用いる上で、我々は以下に述べる 2 点に留意しなければならない。まず、コンタクタの接触する位置を使用者の臀部の形状に応じて変えなければならないということである。そして、コンタクタと臀部との間で滑りが起きないようにすべきであるということである。そのため、本稿では使用者が着座した際に座面で最も圧力の高くなる点をコンタクタの初期位置となるように定めた。

図 2(a) に示すように使用者が着座した際の座面の圧力分布は一般的に 2 つの圧力のピークを持つ。圧力分布は図 2(b) に示す圧力センサシート (BIG-MAT2000P3BS, Nitta Corp, size: 440 × 480 mm, resolution: 10 × 10 mm) を用いて測定した。

臀部とコンタクタとの滑りを防ぐため、コンタクタと外縁部の素材としてゴムスポンジ (クロロプレンゴム) を使用した。コンタクタの移動量も経験的に滑らない程度の距離 (最大で 5mm) とした。既存の力覚提示装置と異なり、臀部力覚提示装置のコンタクタは衣服を介して皮膚の変形を制御する。このため、衣服と皮膚との間で生じる滑りを排除することはできない。しかし、座位においては座面に十分な圧力がかかり、本稿で用いた変形量においてはほぼ滑りは生じないと考えられる。

2.2 突き上げによる臀部の圧力中心の変位

予備実験として 69 kg の被験者 1 名が圧力シートを敷いた椅子に着座し、座面の高さ調節機能を利用して上下の運動を行った。その結果、図 3 に示すように、ヒトが座面に座った状態で身体の上下の運動が生じると、臀部の圧力分布に変化が生じることが確認された。特に左右の臀部の圧力中心は、身体中央の方向に移動していることがわかる。こ

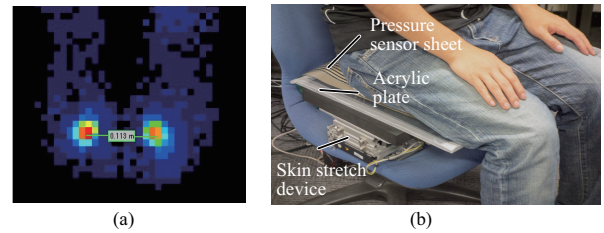


図 2: (a) 計測した臀部の圧力分布 (b) キャリブレーション時の環境

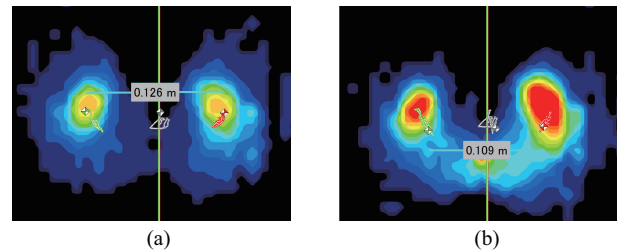


図 3: (a) 低圧状態 (b) 高圧状態

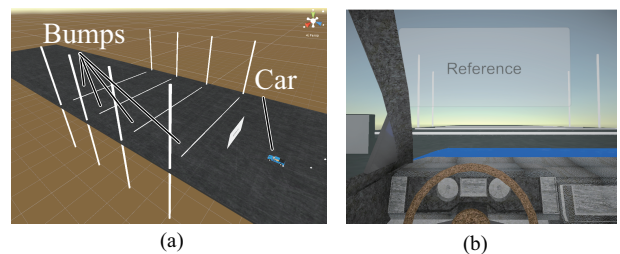


図 4: (a) Unity の環境 (b) 被験者の視点

れは、臀部に加わる圧力が高くなることによって、体重を支持する臀部の部位が坐骨周辺の皮膚のみの状態から尾てい骨周辺の皮膚も加わることによると考えられる。

本稿では左右の臀部の圧力中心が尾てい骨に向かう圧力中心の変位を皮膚せん断変形によって提示する。

3. 実験

3.1 参加者

実験の参加者は、著者らを除く本研究室の健康な男子学生 6 名であり、刺激の順番や提示方法については把握していない。

3.2 刺激

視覚刺激はヘッドマウントディスプレイ (HTC VIVE, HTC, 以下 HMD) によって提示される。映像は図 4(b) に示す Unity によって構築した環境の自動車の運転席からの視野であり、頭を動かすことで視線を変化させることが可能である。環境は図 4(a) に示すように地面と段差があり、段差は位置が視覚的に認識できるように地面と異なる色を用いた。

聴覚刺激はノイズキャンセリングヘッドホン (QuietComfort 35 wireless headphones II, Bose) によって、エンジン音と乗り上げの際の衝突音が提示される。

触覚刺激として、手掌部への振動刺激と、臀部への皮膚せん断変形を用いた。手掌部への振動刺激は、ステアリングホイール (レーシングホイールエイベックス, HORI, 以下

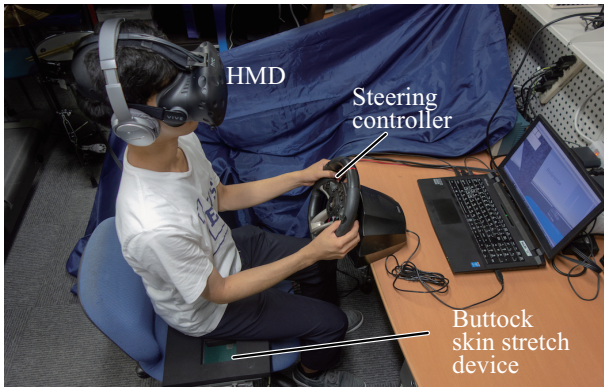


図 5: 実験環境

ステアリング)に内蔵されている振動モジュールを利用して振動提示を行った。

また、臀部皮膚変形デバイスによる皮膚せん断変形は、外側への変位(以下 BSS Outer)と、内側への変位(以下 BSS Inner)の2種類の刺激を用いる。各皮膚変形刺激は初期位置から0.3秒で最大変位に達し、0.8秒で初期位置に戻る。各最大変位は5mmであった。

視聴覚刺激のみの条件を基準刺激として用い、表1に示す視聴覚刺激と触覚刺激を組み合わせをテスト刺激として用いた。

3.3 方法

被験者は図5に示すように臀部皮膚変形デバイスの上に着座し、HMDとヘッドホンを装着した上で、ステアリングコントローラを把持した。

まず基準刺激として、視聴覚刺激を提示する。被験者はハンドル右手奥側に配置されたレバーを手前に引くことによって加速し、最高速度に到達した状態で4つの段差を乗り越えていく。被験者には刺激が提示されている時はレバーを常に引くよう指示した。最初の段差にはレバーを握ってから3.5秒で到達し、以後2.5秒毎に段差に到達する。4つ目の段差を乗り越えた後、2秒後にテスト刺激に移る。

テスト刺激でも同様の操作で段差を乗り越えた。テスト刺激の後、2秒後に評価フェーズに移った。

評価フェーズではハンドル右部に配置されたボタンを用いて評価用シーンを操作し、回答する。評価項目は表2に示す4つの項目である。被験者は各項目について、基準刺激を5として9段階のリッカート尺度(1:全くそう思わない - 5:基準刺激と同じ - 9:強くそう思う)で評価した。被験者が回答を終了し次第、次の基準刺激に移行した。

刺激は各条件で1回ずつ提示した。

3.4 結果

各条件毎の回答項目についての回答の結果を図6に示す。検定には多重比較(Tukey-Kramer法)を用いた。

基準刺激は視聴覚刺激のみ条件であるため、同一の刺激であるNo tactileの条件ではSensory以外の項目で5を回答している。また、Sensoryにおいては、視聴-触覚刺激間の同期具合に関して回答するため、No tactileではスコアが1となった。

Confort以外の全ての項目で、BSS inner + Steering vib

表 1: 条件

Conditions	Steering vib	Buttock skin stretch
No tactile	Off	Off
Steering vib	On	Off
BSS inner	Off	Inner
BSS inner+Steering vib	On	Inner
BSS outer	Off	Outer
BSS outer+Steering vib	On	Outer

表 2: 評価項目

Factor	Question
Realism	How strong was your feeling of bump?
Sensory	Were the haptic and visual feedback synchronized together?
Confort	Was the system comfortable?
Satisfaction	How much did you enjoy using the system?

の条件がNo tactileの条件との間で有意差が確認された。また、Steering vibのみの条件と比較してBSS inner + Steering vibの条件はConfort以外の全ての条件で有意差が認められた。

全ての条件でBSS inner + Steering vibの条件が最も高い中央値であった。また、BSS outerを含む条件はBSS innerを含む条件と比較してスコアが低くなる傾向があることが認められた。

4. 考察

Steering vibのみの条件と比較してBSSを含む刺激はスコアが高くなる傾向があることから、臀部皮膚変形デバイスを使用することは段差乗り越えの再現の手法として有効であると考えられる。また、Satisfactionにおいても臀部の皮膚変形を含む条件は高いスコアを回答する傾向にあり、臀部皮膚変形デバイスが段差のある状況での体験の質を向上させる上で有効であることがわかる。

ほぼすべての項目でBSS innerを含む条件がBSS outerを含む条件と比較して高い中央値が認められるのは、提示される刺激が、それぞれの臀部の圧力中心が身体中央方向に遷移する現象と近いからであると考えられる。

BSS outerを含む条件について、触覚刺激なしの条件に対して低いスコアを回答した被験者も確認されたのは、圧力中心の移動方向に対して逆向きにコンタクターが移動するため、視覚刺激との不整合が発生したためであると考えられる。本実験では視覚刺激での段差が、凸の形状をしていた。実際に凸形状の段差を乗り越える際は、車体の上昇に伴い、臀部全体に高い圧力が加わると考えられる。したがって、逆に凹形状の段差である場合は臀部全体に加わる圧力は減少し、より外側へ圧力分布の中心が遷移すると考えられる。その際には、BSS outerの刺激が視覚刺激との整合性が取れる可能性が高く、この点についてさらなる調査が必要である。

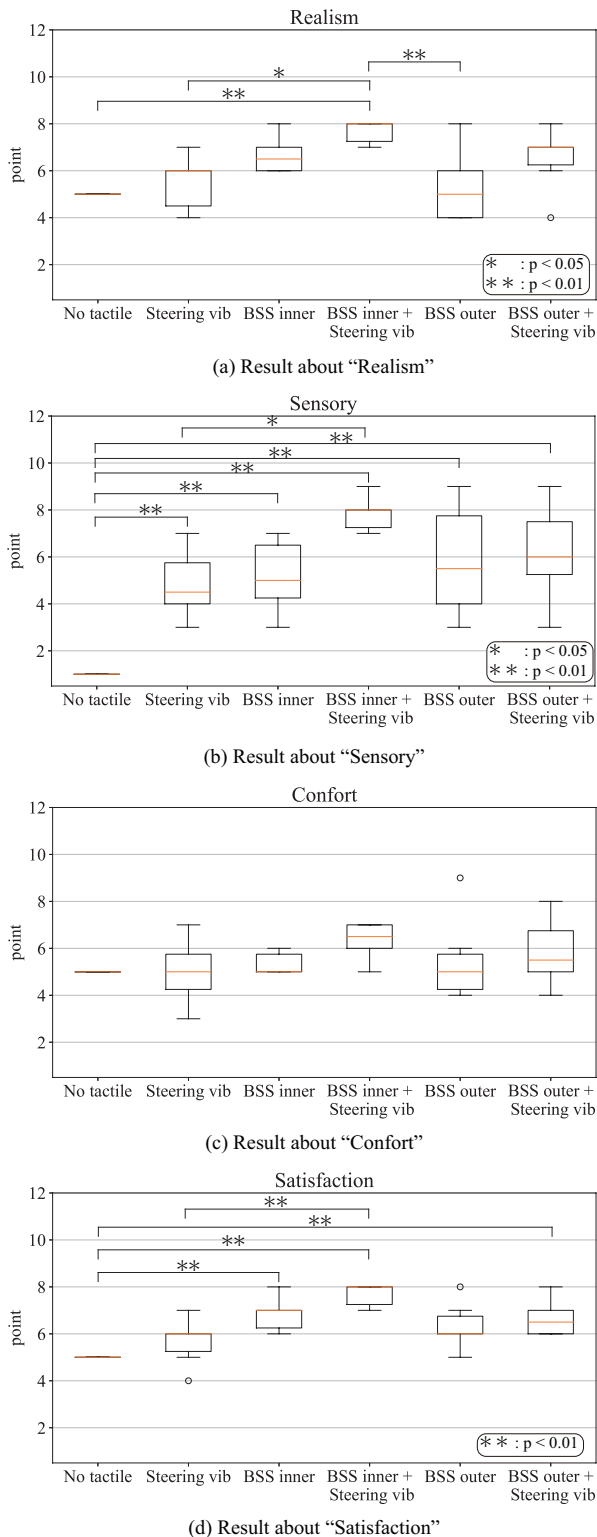


図 6: 実験結果

5. 結言

我々は、臀部に対する座面からの突き上げ感を再現する手法として、臀部の皮膚を内側にせん断変形させる手法を提案した。また、提案手法が座面からの突き上げ感を再現する上で有効であるかを評価するため、臀部皮膚変形デバイスと、振動する機能をもったステアリングコントローラ

を使用して実験を行った。

実験の結果、既存手法であるステアリングの振動のみの刺激と比較して、ステアリングの振動に加えて臀部の皮膚の内側へのせん断変形を提示する刺激が有意に突き上げ感を高い臨場感で提示できることが明らかになった。また、内側へのせん断変形と外側へのせん断変形の間では各評価項目で傾向が異なり、異なる刺激として知覚されていることが示唆された。

謝辞

本研究は、ImPACT プログラム「タフ・ロボティクス・チャレンジ」の支援を受けたものである。および JSPS 科研費 JP18H01401, JP18K13722 の助成を受けた。

参考文献

- [1] A Berthoz, B Pavard, and LR Young. Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linearvection) basic characteristics and visual-vestibular interactions. *Experimental brain research*, Vol. 23, No. 5, pp. 471–489, 1975.
- [2] Aleksander Valjamae, Pontus Larsson, Daniel Vastfjall, and Mendel Kleiner. Travelling without moving: Auditory scene cues for translational self-motion. Georgia Institute of Technology, 2005.
- [3] Arata Horie, Hikaru Nagano, Masashi Konyo, and Satoshi Tadokoro. Buttock skin stretch: Inducing shear force perception and acceleration illusion on self-motion perception. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 135–147. Springer, 2018.
- [4] Eleventh Meeting, International Conference, and Auditory Display. Proceedings of ICAD 05-Eleventh Meeting of the International Conference on Auditory Display, Limerick, Ireland, July 6-9, 2005. *Names*, pp. 99–104, 2005.
- [5] Ali Israr, Seung-Chan Kim, Jan Stec, and Ivan Poupyrev. Surround haptics: Tactile feedback for immersive gaming experiences. In *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '12*, pp. 1087–1090, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [6] 雨宮智浩, 広田光一, 池井寧. 着座型揺動装置のピッチ回転による擬似的な起伏形状知覚. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 2, pp. 359–362, 2016.
- [7] Satoshi Tadokoro, Yoshio Murao, Manfred Hiller, Rie Murata, Hideaki Kohkawa, and Toshiyuki Matsushima. A motion base with 6-dof by parallel cable drive architecture. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, Vol. 7, No. 2, pp. 115–123, 2002.