



# 臀部皮膚せん断刺激を用いた個人差を考慮した傾斜感覚の提示

Presentation of Tilt Perception with Buttock Skin Stretch  
Considering Individual Differences

矢内智大<sup>1)</sup>, 堀江新<sup>2)</sup>, 昆陽雅司<sup>1)</sup>, 田所論<sup>1)</sup>

Tomohiro YANAI, Arata HORIE, Masashi KONYO, and Satoshi TADOKORO

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,  
yanai.tomohiro@rm.is.tohoku.ac.jp)

2) 東京大学 大学院工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, arata.horie@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 自己が傾いた際の感覚を提示することは、バーチャルな空間で姿勢が変化する感覚を提示する上で重要である。その傾斜感覚を誘発する手法としてモーションプラットフォームなどがある。本稿では臀部皮膚をせん断変形させることによって傾斜感覚を誘発させる手法を提案する。臀部の体型には個人差があり、傾斜感覚の知覚にも個人差があると考えられる。そのため、個人ごとに臀部刺激に対する傾斜感の特性を求め、個人差の補正を試みた。

**キーワード:** 力覚・体性感覚, 提示, スキンストレッチ, 錯覚

## 1. 緒言

近年、VR の普及により臨場感のある体験が求められており、没入感を高めるためには運動や重力に依存した加速度や傾きなどの自己運動感覚の再現が重要である。

自己運動感覚を誘発する手段として数多くの手法が提案されている。中でも代表的なモーションプラットフォームによる運動再現は、大型の装置で実際に人を動かすことで、自己運動感覚を再現する [1]。また、ヒトの傾きや加速度を知覚する前庭に対して電気刺激を提示する手法 [2] や振動の仮現運動を用いた手法 [3] など、様々なアプローチで研究がなされてきた。

我々はこれまで、着座した移動体が運動した際に臀部に生じる力に着目して研究を行ってきた。指腹部 [4] や腕部 [5] への力覚提示手法として提案されているスキンストレッチと呼ばれる手法を臀部に適用し、臀部に皮膚のせん断変形を提示することによって並進の自己運動の加速感覚が誘発されることを確認した [6] [7]。この手法では、人を持ち上げるほどのアクチュエータを必要とせず、実際に生じている力としての感覚を提示できる。

自己運動は並進方向だけではなく、回転方向にも生じる。回転方向の運動に応じた自己の傾斜感覚を提示することは、立体的な動きを伴うコンテンツを体験する際に、臨場感の向上に寄与する可能性が高く、重要な課題であると言える。

そこで本研究では臀部に皮膚のせん断変形を提示することによって、着座状態で自己が傾斜した際の感覚の提示を行う手法を提案する。着座状態で座面が傾斜すると、重力の分力によってヒトの身体は動こうとし、それに対する座面からの摩擦力によって臀部に力が生じる。このせん断力

を再現することで傾斜した際の感覚を実現できる可能性がある。また、本稿では体型の違いによって起こると考えられる個人差にも着目し、個人差を解消するための刺激生成モデルの作成手法に関しても実験を通じて検討を行う。

## 2. 臀部力覚提示装置

### 2.1 デバイスの概要

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タ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 (ESCON50/5, Maxon Motor), 及びエンコーダ (RE30E,

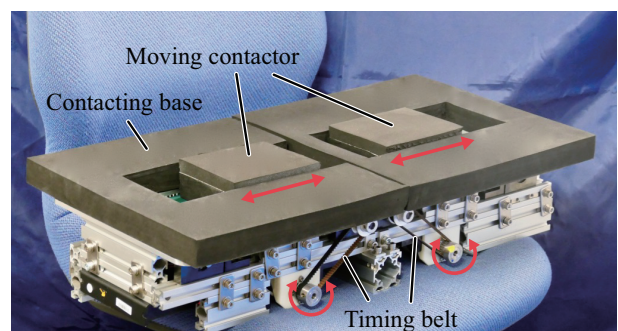


図 1: 臀部皮膚変形デバイス

Nidec Copal Corp.) によって制御した。

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低反発マットを用いて測定し、コンタクタの初期位置となるように定めた。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（クロロブレンゴム）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 9 mm）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 コンタクタ移動量の制御

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 0.3 mm 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 100 Hz であった。

## 3. 実験：臀部皮膚せん断刺激と傾斜感の一致

本実験では、5 段階の臀部皮膚せん断変形量それぞれに一致する傾斜感を調査した。

### 3.1 参加者

参加者は 21 歳から 24 歳までの計 5 名の男性を対象とした。すべての被験者からは皮膚の疾患や知覚的な障害に関する自覚症状は報告されていない。

### 3.2 刺激

図 2 に本実験で用いた 5 種の触覚刺激を示す。各刺激は異なる最大変位をもつ ( $d = 3, 4.5, 6, 7.5, 9$  [mm])。各刺激はそれぞれ合計 12 秒である。最初の 3 秒間は初期状態を保ち、次の 2 秒間で 1 次関数的に変位が大きくなり最大変位に達する。次の 5 秒間は最大変位を維持し、最後の 2 秒間で 1 次関数的に変位が小さくなり、初期位置に戻る。これらの刺激の最大変位は、著者が変位を知覚でき、なおかつ臀部とコンタクタとの間で滑りが生じない範囲で経験的に決定した。視覚刺激に対しても、触覚刺激と同じタイミングで図 3 のように提示する。視覚的に傾斜感を提示する手法として図 4 のような映像をディスプレイにて再生する。

### 3.3 手順

実験を開始する前に、コンタクタの初期位置を被験者ごとに調整した。また、聴覚刺激を遮断するためにノイズキャンセリングヘッドフォンを装着し、ピンクノイズを再生した。さらに、被験者の顔を顎台に乗せ、ディスプレイと目の距離を被験者間で違いがないようにした。実験の様子を図 5 に示す。

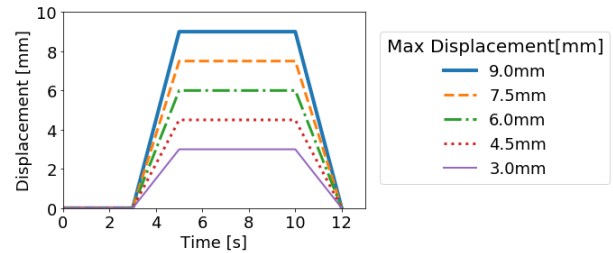


図 2: 臀部皮膚せん断変化量のタイムチャート

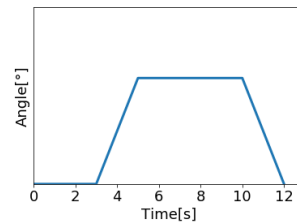


図 3: 視覚的な角度提示のタイムチャート

本実験では、5 段階の臀部刺激それぞれに一致する傾きを階段法で見つけ、その結果を基に補正を行い、被験者に所望の傾斜感を感じさせられるようにする。まず、最大変位 3 mm の臀部刺激に対して一致する傾きを見つける。臀部刺激を図 2 のタイムチャートに従って提示し、それと同時に、最大角度 30° の傾きを図 3 のタイムチャートに従って図 4 のような映像を提示する。刺激が終わると、被験者にディスプレイの傾きは臀部刺激の傾き感と比べて大きいかわりかをマウスのクリックで答える。ここで大きいと答えた場合は次の視覚刺激の傾きを小さくし、小さいと答えた場合は次の視覚刺激の傾きを大きくする。ここでは階段法を利用するので、回答が反転すると傾き変化幅が徐々に小さくなっていき、8 回目の反転が行われたところで臀部刺激と一致する傾き感を決定する。これらを他の種類の臀部刺激に対しても同じように実験を行う。

その結果から被験者それぞれの臀部皮膚せん断変形量と傾き感の関係を表した近似曲線を求め、スティーヴンスのべき法則 [8] に従って定式化する。

$$F(x) = ax^b \quad (1)$$

なお、 $a$ ,  $b$  は実験結果から求められる定数、 $x$  は臀部皮膚のせん断変形量、 $F(x)$  は知覚する傾きである。定式化することで、被験者に所望の角度を提示することができるようになる。

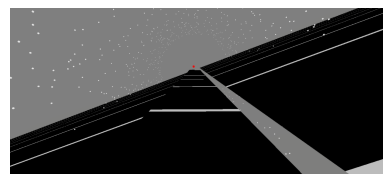


図 4: 視覚刺激

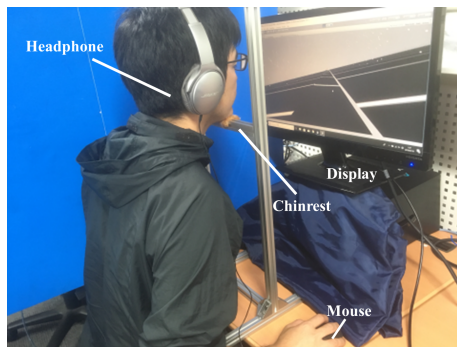


図 5: 実験の様子

#### 4. 結果

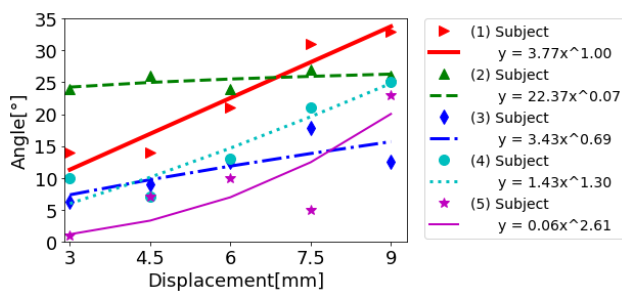


図 6: 実験結果

表 1: 誤差の平均

subject	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
標準偏差	2.186	0.798	1.920	2.063	3.708

図 6 は 5 種類の臀部皮膚せん断変形量にそれぞれ一致する傾きを調査した結果とそれにスティーヴンスのべき法則に従った近似曲線を引いたものである。臀部皮膚せん断変形量が増加するにつれて一致する傾きが増加する傾向にある。しかし、(2)の被験者は臀部に 3mm と 9mm の刺激を加えた時にほぼ同じ傾きを感じたと回答している。また、(3)の被験者は臀部に 7.5mm の刺激と 9mm の刺激を加えた時に 7.5mm の刺激のほうが 9mm の刺激よりも約 5° 傾いていると回答している。(5)の被験者も 6mm と 7.5mm の刺激の間で同様の回答をしている。

表 1 に図 6 で描いた近似曲線を基準としたプロットデータの誤差の平均を示す。

#### 5. 考察

最初に、臀部皮膚による傾き感の知覚について考察する。図 5 の近似曲線より、臀部皮膚せん断変形量が大きくなればなるほど傾き感が大きくなる傾向がある。このことから、ヒトは臀部皮膚のせん断変形量から傾斜感の強さを識別していることが示唆される。

しかし、図 6(2)の被験者に関しては、異なる臀部刺激を提示しても、ほぼ同じ強さの傾斜感を感じていた。これは、

傾き感を体感しにくい実験であったことが理由として考えられる。

次に、得られた特性から各個人に適合した臀部刺激を提示できるかについて考察する。臀部皮膚せん断変形量と知覚する傾きの関係について近似曲線を引き、被験者 5 人分の誤差の平均をそれぞれ見たところ、約 0.8~3.7 [mm] の範囲の平均のばらつきが見られた。被験者 (2) は、ここでは除外して考えると、誤差の平均は約 1.9~4.8 [mm] の範囲になる。よって (2), (3), (4), (5) の被験者は近似式による個人差の補正が有効であると考えられる。

また、本実験の傾斜感を誘発させる手法が十分ではなく、傾斜感を感じられない人もいたので、実験方法の再検討が必要である。

#### 6. 結言

我々は、臀部皮膚をせん断変形させることによって個人差によらず同じ傾斜感覚を誘発させる手法を提案した。手法の効果、及び個人差の補正手法を検証するために、5 段階の臀部皮膚せん断変形量それぞれに一致する傾斜感を調査した。その結果、ヒトは臀部皮膚のせん断変形量から傾斜感の強さを識別していることが示唆された。

#### 参考文献

- [1] Stewart, D.: A platform with six degrees of freedom. Proceedings of the institution of mechanical engineers 180(1) (1965) 371–386
- [2] Misha Sra, Abhinandan Jain, Pattie Maes, "Adding Proprioceptive Feedback to Virtual Reality Experiences Using Galvanic Vestibular Stimulation", in CHI 2019, 2019
- [3] Masataka Niwa, Yasuyuki Yanagida, Haruo Noma, Kenichi Hosaka, and Yuichiro Kume, "Vibrotactile Apparent Movement by DC Motors and Voice-coil Factors", in ICAT 2004, 2004
- [4] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. In ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies, p. 8. ACM, 2007.
- [5] Jason Wheeler, Karlin Bark, Joan Savall, and Mark Cutkosky. Investigation of rotational skin stretch for proprioceptive feedback with application to myoelectric systems. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 58–66, 2010.
- [6] Arata Horie, Hikaru Nagano, Masashi Konyo, 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, pp135–147, Springer, 2018

[7] Arata Horie, Akito Nomura, Kenjiro Tadakuma, Masashi Konyo, Hikaru Nagano, Satoshi Tadokoro, “Enhancing Haptic Experience in a Seat with Two-DoF Buttock Skin Stretch”, in AsiaHaptics 2018,

2018

[8] Stevens, S. S. (1957). On the psychophysical law. *Psychological Review* 64(3):153–181.