



装着型 Skin-Stretch デバイスを用いた 物体の重量感提示の基礎検討

Basic study of weight presentation of objects using a wearable Skin-Stretch device

梅原路旦¹⁾, 堀江新¹⁾, 南澤孝太¹⁾

Rodan Umehara, Arata Horie, and Kouta Minamizawa

1) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 (〒 223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1,
umeharar.ab, a.horie, kouta@kmd.keio.ac.jp)

概要: xR 体験において, 物体の重量感を感じることは体験の質の向上に繋がる. 皮膚のせん断による皮膚変形分布を提示するシステムが提案されている. 一方, どのような皮膚変形分布を前腕部に提示することが重量感を生み出すかは自明でない. 本研究では皮膚変形分布を提示可能な装着型 Skin-Stretch デバイスを用いてバーチャルな物体の重量感を提示することを目指す. 本稿では重量感を生み出す皮膚変形分布の基礎検討を行う.

キーワード: 触覚, 拡張・複合現実

1. はじめに

ヘッドマウントディスプレイ (HMD) による視覚・聴覚刺激に加えて, 触覚刺激を提示することで, バーチャルリアリティ (VR) 空間の情報をリアルに伝達することが可能になった. 触覚提示手法として振動刺激を用いた手法が代表的だが, 振動刺激では実現できない様々な感覚が存在する. Minamizawa ら [1] はバーチャルな物体の把持体験を指先のせん断力で再現する手法を示した.

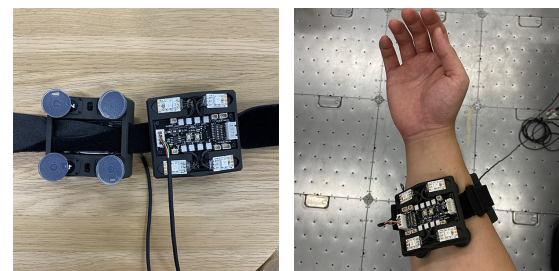
また, 拡張現実 (AR) への適用を考慮すると, 現実の物体とのインタラクションを妨げないよう, 触覚提示デバイスは掌をフリーにする必要がある. Evan ら [2] は振動刺激とスクイズ刺激を用いた手首装着デバイスによって, バーチャルな物体に触れた際の反力を提示することで, 物体の表面のテクスチャだけでなく, 物体の硬さも伝達できることを示した. Moriyama ら [3] は人差し指の先に加わる力の強さと方向を手首に提示することの有用性を示した. また, Yudai ら [4] は掌側に電気刺激を与えることができる, 手の甲側への電極の配置手法を示した. さらに, 腕部に提示する皮膚変形分布によって, 手部で発揮する把持力の調整を可能にすることが分かっている [5, 6]. 一方, どのような皮膚変形分布が物体を把持して揺動した時の感覚提示として有効かは自明ではない.

そこで本研究では, 物体の重量感を提示する上で, 前腕部への適切な皮膚変形分布を明らかにすることを目指す. 本稿では重量感提示の初期検討として, 把持した物体の慣性力と重力に応じた刺激強度を腕に与える動作モデルを構築した. 右手で物体を把持し揺らした際の慣性力と重力について, 加速度に応じた皮膚変形分布を提示し, 物体の重量感への影響を評価した.

2. 皮膚変形による重量感の提示手法

2.1 装着型 Skin-Stretch デバイス

本研究で使用する皮膚変形分布を提示する Skin-Stretch デバイスを図 1 に示す. 各モジュールは, Horie ら [6] の過去の研究と同様に回転せん断刺激を提示する素子 4 つと制御基板が搭載されているものである. 素子の表面は針入度 55, 厚さ 3 mm, 直径 20 mm のゲルシートであり, 自己粘着性によって滑りを防止するものであった. 素子を回転させるアクチュエータはサーボモータ (RSV10-1003ESG400, Orbray) を使用した. 搭載された基板は, PC から RS485 で受信したコマンドに応じて, 各アクチュエータに対して TTL レベルのコマンドを送信するものであった.



(a) 正面

(b) 装着時

図 1: 装着型 Skin-Stretch デバイス. (a) 正面図. 1 つのモジュールあたり 4 つのサーボモータを搭載している. 合計 8 つのサーボモータを配置している. (b) 装着時. 前腕部に装着している.

2.2 加速度に応じた皮膚変形分布の制御

物体を把持している際、物体の加速度に応じた皮膚変形分布を提示する。図2に示すように、Unity内では手における3次元正規直交基底を容易に取得することができる。物体を把持している際の物体の加速度ベクトルを取得し、式(1)に示す行列式を解くことで直交分解を行う。ただし、 $\hat{p}, \hat{q}, \hat{r}$ はそれぞれ手における3次元正規直交基底であり、 k, l, m は直交分解した際のそれぞれの基底の定数である。また、 \mathbf{a} は物体の加速度ベクトルであり、 \mathbf{g} は重力加速度である。

$$\begin{pmatrix} \hat{p} & \hat{q} & \hat{r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} = \mathbf{a} - \mathbf{g} \quad (1)$$

直交分解をして得られた定数 i, j, k の正負に応じて図3に示すように Skin-Stretch デバイスのサーボモータを回転させる。ただし、物体の質量を $m[kg]$ 、回転角変換係数を $l[^\circ/kg]$ とし、このときの回転角はそれぞれ $lm|i|^\circ, lm|j|^\circ, lm|k|^\circ$ とする。この皮膚変形分布は慣性力が加速度方向と逆方向に作用することから、サーボモータの回転によって加速度方向と逆方向に力を生じさせることで、慣性力を感じさせることを期待してデザインした。

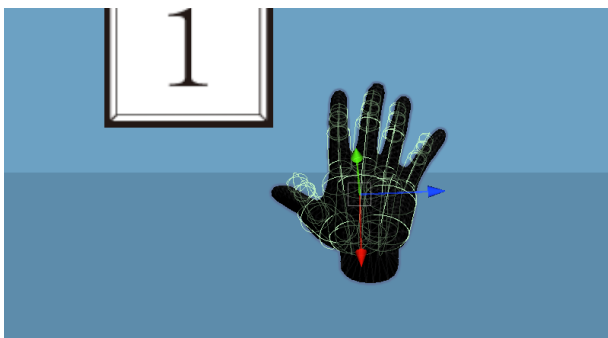


図2: 手における3次元基底ベクトル。(緑) 掌から甲に向かうベクトル \hat{p} (赤) 指先から腕に向かうベクトル \hat{q} (青) 親指から掌に向かうベクトル \hat{r}

3. 物体の揺動実験

3.1 実験環境

実験環境を図4に示す。物体の把持を認識するため、ハンドトラッキングを行うことができるHMDとしてMeta Quest2¹を使用する。Skin-Stretch デバイスは図1(b)で示した前腕部に装着している。また、サーボモータの回転による音の影響を低減するため、ヘッドホンを装着し、ホワイトノイズを聴きながら実験を行った。3D環境のレンダリングにはUnity²を用い、物体の加速度の取得にはVelocity Estimator[7]を用いた。

3.2 皮膚変形分布

実験には以下の3つの皮膚変形分布を用意した。

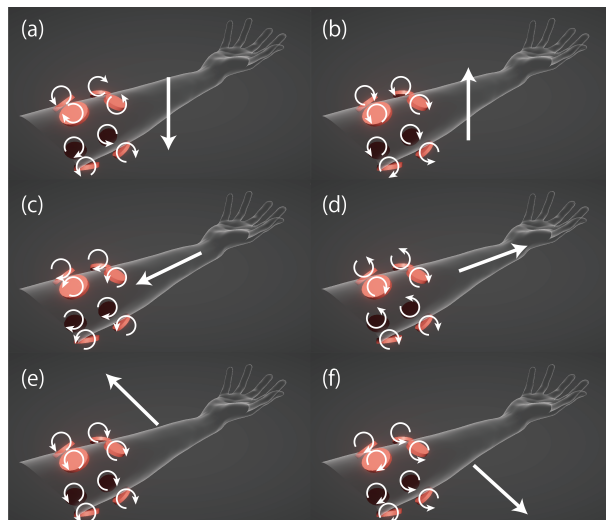


図3: i, j, k の正負による回転方向 (a) $i < 0$ のとき (b) $i > 0$ のとき (c) $j < 0$ のとき (d) $j > 0$ のとき (e) $k < 0$ のとき (f) $k > 0$ のとき

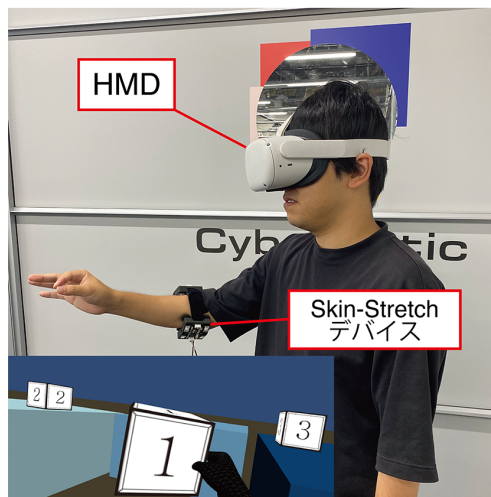


図4: 実験環境とオブジェクト把持の様子

1. 加速度方向と逆方向に力が作用する正分布 (図3で示した分布)
2. 加速度方向に力が作用する負分布
3. 全て同じ方向に回転し、力の方向を互いに打ち消し合う分布 (基本分布)

3.3 実験手順

実験手順は以下の通りである。本稿の実験でのBoxの質量 m の値は1とし、 l の値は0.75とした。また、本稿の実験において、回転角は最大で約 12° であった。なお、被験者は学生5名とした。

- (1) 装置を装着し、図4に示すような数字付きの正六面体の物体を掴む。
- (2) 掴んだ物体を前後上下左右に振り、皮膚変形分布を確認する。
- (3) 図4に示すような3種類のテーブルに並び替えて置く。なお、重量感に最も近いと感じた物体は最も色の

¹<https://www.meta.com/jp/quest/products/quest-2/>

²<https://unity.com/ja>

濃いテーブルに、重量感に最も遠いと感じた物体は最も色の薄いテーブルに置くこととした。

- (4) それぞれの皮膚変形分布を 0-100 で点数評価をする。ただし、0 は重量感から最も遠く、100 は重量感に最も近い点数とする。
- (5) (1)-(4) を物体に対応する皮膚変形分布を変えて 3 セット繰り返す。
- (6) 実験に関するアンケートを行う。内容は以下の通りである。
- (a) 何セット目が皮膚変形分布の違いを理解しやすかったか。
- (b) 前後上下左右どの方向に振ると皮膚変形分布の違いがわかりやすかったか。
- (c) 本来手部に提示すべき刺激を前腕部へ提示したが、違和感があったか。
- (d) その他コメント

3.4 結果

図 5 に各分布に対する 5 人の重量感評価の箱ひげ図を示す。ただし、各実験参加者の各分布の評価点は 3 セットの平均値とした。また、主観評価値をウィルコクソンの順位和検定で比較した。有意水準は $\alpha < 0.05$ とした。しかし、全ての群間に有意差は確認できなかった (正分布-負分布: $p = 0.5476$, 正分布-基本分布: $p = 1.0$, 負分布-基本分布: $p = 0.8413$)。

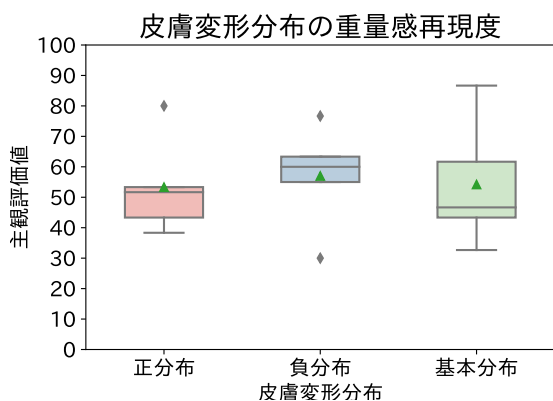


図 5: 皮膚変形分布ごとの評価。三角 (緑) は各分布の主観評価点の平均値を表す。菱形 (灰) は四分位範囲 1.5 倍を超える外れ値を表す。

さらに、実験手順 (6) で行ったアンケート結果を表 1 に示す。(a) において、「刺激の違いは 2 セット目と 3 セット目が同程度でわかりやすかった」と回答した参加者がいたため、それぞれに 0.5 票分追加することとした。

4. 考察

図 5 より、統計学的に有意差は認められなかったが、各分布の評価の中央値を比較すると、負分布の評価が他 2 分布より高い傾向が示唆される。原因として、分布提示のタイムラグが挙げられる。本稿における実験では、スムーズ

表 1: アンケート結果

	Q(a)			Q(b)			Q(c)	
	1	2	3	前後	上下	左右	あり	なし
票数	0	1.5	3.5	1	2	2	4	1
Q(d) コメント一覧	<ul style="list-style-type: none"> ・本来のものを持つ感覚とは違う ・提示された刺激は腕の腱を使う刺激に近い ・バーチャルな物体を容易に運べるため、軽く感じる ・刺激提示位置に距離を感じ、刺激にズレを感じる ・手首に装着するとどう感じるか気になる ・評価点が低い刺激は他方向に回転するため、均等に刺激を与えているようだった ・リアルさを感じる要因が刺激の強さなのか、刺激を提示するタイミングなのかわからなかったが、刺激が強いと感じたものの評価点を高くした ・オブジェクトの外観より柔らかい刺激に感じた 							

な分布提示のため、過去 0.06 秒間のデータを用いて加速度の平滑化を行った。そのため、サーボモータの回転角取得にタイムラグが生じる。刺激提示のタイムラグが生じる問題に関しては、加速度取得方法の改善で解決できると考える。

実験参加者 5 人のうち 1 人が「刺激が強いほど重量感の再現率が高く、最も評価点の高い刺激は強い刺激と捉えた」と述べた。その実験参加者は 3 セットとも全て基本分布を最も評価点の高い皮膚変形分布に選択していることから、基本分布による刺激が最も強い刺激であると感じていることがわかる。基本分布は回転方向を全て同じ方向にしていることから、力の方向を互いに打ち消し合うようデザインしたが、実際は力を打ち消し合わず、強め合っていた可能性がある。このことから、サーボモータの回転によって生じる力を打ち消し合う皮膚変形分布を調査する必要があると考えられる。

また、実験参加者 5 人のうち 4 人がアンケート (c) で「違和感がある」と回答した。前腕中部への分布提示はリアルな重量感提示のための分布提示位置に適さないことが示唆される。回転せん断刺激を提示するためにゲルシートが皮膚に密着している必要があったため、手首ではなく前腕中部に分布を提示した。分布提示位置の違和感を軽減するために 4 つの素子の間隔を狭め、分布提示位置を手首に変更する必要がある。

否定的なコメントとして「オブジェクトの外観より柔らかい刺激に感じた」という意見が得られた。原因として、バーチャルな物体のテクスチャを意識してしまうことが挙げられる。本デバイスではバーチャルな物体のテクスチャを皮膚変形分布として提示していない。このことにより生じた違和感が把持体験の現実感を減少させている可能性がある。振動刺激との組み合わせを行うことにより、現実感を向上させることが可能だと考える。

5. おわりに

本稿では、前腕部にどのような皮膚変形分布を与えると物体の重量感を生み出すのかを探求した。検証の結果、本稿で提案した皮膚変形分布は物体の重量感の提示に有効ではなかった。今後の展望として、加速度の取得方法を見直し、再実験を行う予定である。また、振動刺激と組み合わせ

せる手法の開発も予定している。

謝辞

本研究は、JST ACT-X (JPM-JAX21KG) の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 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*, SIGGRAPH '07, p. 8-es, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery.
- [2] Evan Pezent, Aakar Gupta, Hank Duhaime, Marcia O'Malley, Ali Israr, Majed Samad, Shea Robinson, Priyanshu Agarwal, Hrvoje Benko, and Nick Colonese. Explorations of wrist haptic feedback for ar/vr interactions with tasbi. In *Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22 Adjunct, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [3] Taha K. Moriyama, Ayaka Nishi, Rei Sakuragi, Takuto Nakamura, and Hiroyuki Kajimoto. Development of a wearable haptic device that presents haptics sensation of the finger pad to the forearm. In *2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 180–185, 2018.
- [4] Yudai Tanaka, Alan Shen, Andy Kong, and Pedro Lopes. Full-hand electro-tactile feedback without obstructing palmar side of hand. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [5] 堀江新, 下林秀輝, 齊藤寛人, 稲見昌彦. 回転の皮膚せん断変形に基づく分布型触覚ディスプレイの設計. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 402–411, 2020.
- [6] Arata Horie, Yunao Zheng, and Masahiko Inami. A wearable system integrating force myography and skin stretch feedback toward force skill learning. *Proceeding of IEEE World Haptics Conference 2023*, pp. 190–196, 2023.
- [7] Velocity Estimator. https://valvesoftware.github.io/steamvr_unity_plugin/api/Valve.VR.InteractionSystem.VelocityEstimator.html. Access July 18, 2023.