

不定形粘弾性体を用いた連続的変形入力インタフェースの提案

中井 遥斗^{1,a)} 新保 龍音^{1,b)}

概要: 本稿では、スライム等の不定形粘弾性体を素材とした入力インタフェースを提案する。素材のイオン伝導性を利用し、スライム内に電極を挿入した分圧回路から得られる電圧をマイコンで取得することで、「叩く」「握る」「伸ばす」「捻る」といった連続的な変形操作を時系列信号として記録する。実験では、4種の基本動作に対する波形をシリアルプロッタで観察し、立ち上がり、減衰、復元遅延などの時間的特徴が操作の違いとして現れることを確認した。以上より、粘弾性に由来する遅れやヒステリシスをノイズとして除去するのではなく、インタラクションの特徴として活用する可能性を示す。

1. はじめに

マクルーハンがその著書で指摘するように、あらゆるテクノロジーやメディアは人間の身体および神経系の「拡張」である [1]。石器が手の拡張であり、車輪が足の拡張であったように、人間は「インタフェース」という境界を介して自身の身体機能を外部化し、世界との関わり方を更新し続けてきた。特に、社会のデジタル化が急速に進展する現代において、物理的な身体を持つ人間と、論理的なデジタル空間を接続するインタフェースの役割は、単なる入力装置という枠を超え、我々の思考や知覚のあり方を規定する重要な要素となっている。

計算機内部の情報処理能力はムーアの法則に代表されるように飛躍的な向上を遂げ、AI技術の発展により機械は人間の曖昧な意図さえも解釈しつつある。しかし、その入り口となる物理的なインタフェースに目を向けると、その物質性は数十年にわたり大きな変化を見せていない。マウス、キーボード、そしてスマートフォンのタッチスクリーンに至るまで、我々が触れるデバイスの多くは依然として剛直なプラスチックやガラスで構成されており、入力操作はクリックやタップといった離散的かつ記号的なイベント処理に限定されている。

人間は本来、柔軟な皮膚と筋肉を持ち、「握る」「捻る」「押し込む」といった、力加減や時間の推移を伴う連続的で豊かな身体性を持っている。マクルーハンは、メディアによる身体の拡張が、同時にその部位の麻痺や自己切断を引

き起こすと警告した [1]。現代の剛直なタッチスクリーンは、視覚情報を拡張した一方で、我々の指先が本来持つ繊細な触覚や力加減といった身体性を麻痺させ、単なる「座標指定器」へと退化させてしまっていると言える。この身体の柔らかさと機械の硬さの間の不整合こそが、デジタルな体験から温かみや微細なニュアンスを奪っている根本的な要因である。

この課題に対し、近年では Organic User Interfaces の概念が提唱され、柔軟で変形可能な素材を用いたインタフェースの研究が行われている [2]。導電性エラストマーやハイドロゲルを用いたソフトセンサは、皮膚への追従性や安全性の観点から注目されているが、その多くは既存の剛体センサと同様の正確さや高速応答性を追求する傾向にあり、素材特有の粘りや遅れといった物理的特性を、インタラクションの表現力として積極的に活用する視点ではなかった。

そこで本研究では、不定形かつ顕著な粘弾性を持つスライムを入力媒体として利用する手法を提案する。本研究では、物理的な遅れやアナログ値を単なるノイズとして除去するのではなく、操作に伴う立ち上がり、減衰、復元遅延といった時間的特徴を含む信号として捉え直す。これにより、従来の0か1かのデジタル入力では捉えきれなかった、連続的な身体操作の表現を扱う可能性を示す。

2. 先行研究および関連研究

2.1 導電性ハイドロゲルによるセンシング

近年、柔軟な素材を用いたセンシング技術が材料工学の分野で盛んに研究されている。Wang らは、高い機械的強度と自己接着性を持つイオン伝導性ハイドロゲルを開発

¹ 東京国際工科大学
^{a)} nhew23@icloud.com
^{b)} makaroniax@gmail.com

し、皮膚に貼付して人体の動きを検出可能な歪みセンサとしての有用性を示した [3]. また、Zhang らは、ゼラチンベースのハイドロゲルを用いた電子皮膚を提案し、電気インピーダンス・トモグラフィ (EIT) 技術を用いて、接触位置を高精度に検出する手法を確立している [4].

これらの研究は、主にセンサとしての「精度」や「耐久性」に焦点を当てている。対して本研究は、スライムという「不定形」かつ「高い粘弾性」を持つ素材そのものの物理的特性を、入力信号の時間応答 (立ち上がり・減衰・復元遅延) として観察し、インタラクションに活用する点に独自性がある。

2.2 HCI におけるゲル素材の活用

Human-Computer Interaction (HCI) の分野においても、ゲル素材はその柔軟性から注目を集めているが、主に出力や触覚提示 (Output/Haptics) の文脈で利用されてきた。Miruchna らが提案した GelTouch は、熱応答性ハイドロゲルを用いて部分的に硬さを変化させることで、タッチスクリーン上に物理的な触覚フィードバックを提示する [5]. Kao らの SkinMorph は、同様にゲルをプログラム可能に硬化させることで、ウェアラブルデバイスの形状や質感を動的に変化させ、身体保護やリハビリテーションに応用している [6]. また、Coe らはシリコンゲルを振動の伝達媒体として利用し、高精細な触覚通信への応用を検討している [7].

2.3 本研究の位置づけ

先行研究におけるゲル素材の利用は、主に高精度なセンシング (歪み・接触位置の推定など) か、あるいは触覚フィードバック提示 (硬さや振動の提示) に二分されてきた。これに対し本研究は、スライムのような不定形粘弾性体を、身体動作を受け止める入力媒体として捉え、その時間応答を含む信号波形を観察することを目的とする。

本稿では第一段階として、スライムに対する基本操作として叩く (Tap)、握る (Squeeze)、伸ばす (Stretch)、捻る (Twist) の 4 動作を定義し、電極を挿入した分圧回路から得られる電圧の時系列波形を記録する。得られた波形の形状 (立ち上がりの急峻さ、ピーク値、減衰の仕方、復元時の遅延など) に着目し、操作の違いが時間的特徴として現れるかを検証する。

以上により、本研究は「粘弾性に由来する遅れやヒステリシスを除去すべきノイズ」とみなすのではなく、インタラクションの特徴として観察し、評価する立場をとる。

3. 実装：スライム電極デバイス

3.1 計測原理

スライムはホウ砂由来のイオンを含み、素材自体が導電性を持つ。本研究ではスライム内に 2 本の電極を挿入

し、未知の抵抗 R_s とみなした分圧回路を構成した。一般に抵抗値 R は長さ L に比例し、断面積 A に反比例する ($R = \rho \frac{L}{A}$)。スライムを伸展させる動作は L の増大と A の減少を同時に引き起こすため、変形量に応じた電圧変化をマイコンの ADC により取得できる。

3.2 信号安定化と入力検出

導電性スライムを用いたセンシングでは、素材の接触抵抗の揺らぎや環境ノイズにより、生信号が不安定になりやすい。そのため、単一の測定値を用いた単純な閾値判定では、チャタリングや誤検知が生じる可能性がある。

そこで本実装では、信号の安定化を目的として、移動平均フィルタによる平滑化処理を導入した。具体的には、連続する N 回のサンプリング値 x_i を取得し、その平均値 V_{avg} を算出する (式 1)。本システムでは、ノイズ除去効果と応答速度のバランスを考慮し、 $N = 64$ に設定した。

$$V_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \quad (1)$$

動作判定においては、この平滑化された値 V_{avg} と、事前に設定した閾値 V_{th} を比較する。スライムセンサは加圧・接触により抵抗値が変化するため、 V_{avg} の変化を入力として検出する。本稿の実験では、波形の取得・観察を主目的とし、安定した記録を得るために平滑化処理を用いた。

4. 実験と測定

4.1 実験方法

本実験では、提案手法である不定形粘弾性体インタフェースが、ユーザーの意図的な変形操作に対してどのような波形応答を示すかを検証する。被験体であるスライムデバイス (図 1) に対し、基本的な入力操作として想定される以下の 4 種類の動作を定義した。

表 1 スライムへの基本操作と入力特性

操作	入力の特徴
叩く (Tap)	瞬間的な衝撃を与えるインパルス的な入力
握る (Squeeze)	包み込むように圧縮する入力
伸ばす (Stretch)	長手方向へ引張る入力
捻る (Twist)	逆方向へ回転させ、剪断力を加える入力

実験では、初期形状を一定に保った状態からこれらの動作を加え、その際にセンサ回路より出力される電圧波形の変化をシリアルプロットを用いて記録する (図 2)。各動作はそれぞれ数回試行し、得られた波形を比較用データとして用いた。

4.2 測定結果

4.2.1 動作 1：叩く (Tap)

スライムに対して瞬間的な打撃を複数回与えた際の様子

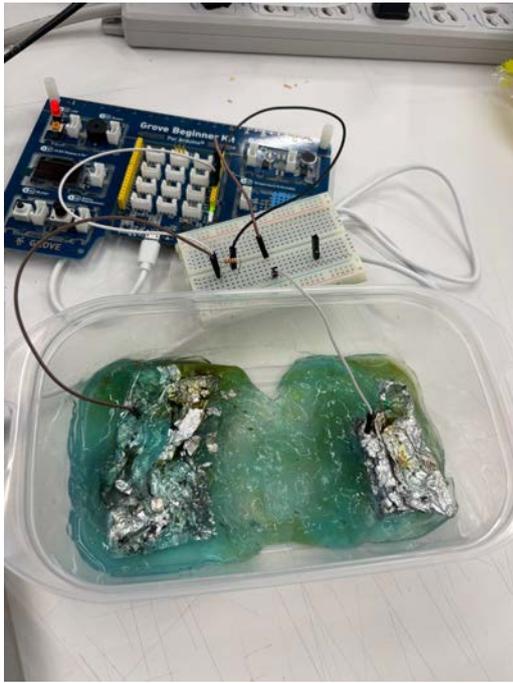


図 1 デバイスの外観

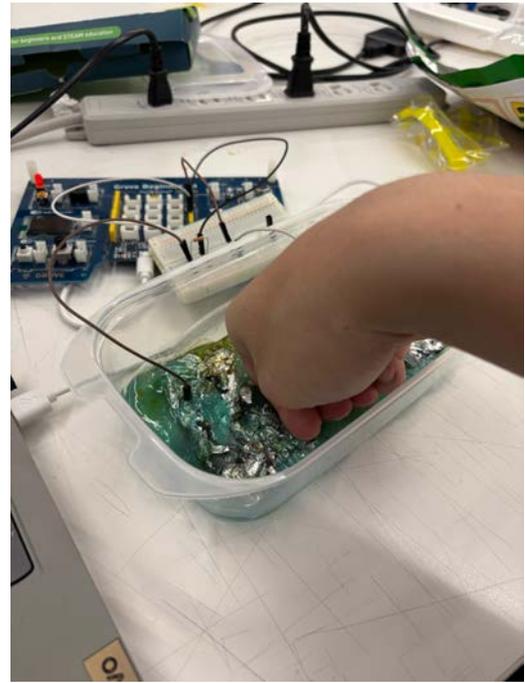


図 3 打撃入力 (Tap) の様子



図 2 通電状態のシリアルプロッタ



図 4 Tap 動作時の出力波形

を図 3 に、その時の出力波形を図 4 に示す。急峻な立ち上がりだと、その後の急速な減衰が確認できる。

4.2.2 動作 2：握る (Squeeze)

スライム中央を握り込んだ際の様子を図 5 に、出力波形を図 6 に示す。握る入力に伴い、波形の減衰が観測された。

4.2.3 動作 3：伸ばす (Stretch)

中央を保持して引き伸ばした際の様子を図 7 に、出力波形を図 8 に示す。波形の顕著な減衰が見られ、素材が伸びきった状態で 0 付近を迎える様子が確認された。

4.2.4 動作 4：捻る (Twist)

両端に剪断力を加えた際の様子を図 9 に、出力波形を図 10 に示す。小さな不規則な振動成分を含みつつ 0.4 付近で

定在する波形が得られた。

4.3 小括

本実験により、スライムへの入力操作の違いが、電圧波形の形状に顕著な差異として現れることが確認された。

- 立ち上がりの差：「叩く (Tap)」動作ではインパルス的な急峻な立ち上がりが見られた一方、「握る (Squeeze)」や「伸ばす (Stretch)」では、急速な減衰が観測された。
- 保持と減衰の挙動：「握る」動作では入力が継続している間の変化が確認でき、「伸ばす」動作ではピーク後の復元 (電圧の低下) に時間を要する傾向が見られた。
- 複雑な変動成分：「捻る (Twist)」動作では剪断力に



図 5 圧縮入力 (Squeeze) の様子



図 7 伸展入力 (Stretch) の様子



図 6 Squeeze 動作時の出力波形



図 8 Stretch 動作時の出力波形

伴う不規則な変動が含まれており、単純な圧縮・伸展とは異なる波形傾向が観測された。

以上より、粘弾性体の入力操作は波形形状として違いが現れ得ることが示された。今後、これらの時間的特徴を特徴量として整理し、自動識別やアプリケーション設計へ展開する。

5. 評価および考察

5.1 波形形状の観察に基づく操作差の確認

実験結果 (図 4~10) より、提案手法はスライムに対する入力操作の違いを、電圧波形の時間的特徴として捉えられることが確認された。特に、「叩く (Tap)」における急峻な

立ち上がり、「握る (Squeeze)」における緩やかな応答の対比は、粘弾性体が入力の時間プロファイルを保持する媒体となり得ることを示唆している。また、「捻る (Twist)」で見られた振動波形は、単純な圧力センサではノイズとして処理されがちな成分であるが、本手法では操作の違いを反映する波形特徴として観察可能である。

5.2 「遅れ」と「粘性」の再評価

工学的なセンサ設計において、ヒステリシスや応答遅延は通常、排除すべき「誤差」や「欠陥」として扱われる。しかし本研究において、スライムの粘弾性が生み出す「反応の遅さ」は、操作に含まれる時間的ニュアンス (余韻や



図 9 剪断入力 (Twist) の様子



図 10 Twist 動作時の出力波形

復元遅延など)を保存する情報媒体として機能し得る。

マクルーハン¹⁾は、テクノロジーによる身体の拡張が、同時にその部位の感覚を「麻痺 (自己切断)」させると論じた [1]。既存の剛直なタッチスクリーンが、指先の触覚的なフィードバックを排除し、接触の事実のみをデジタル化した「麻痺」の状態にあるとすれば、本デバイスは、粘り気のある抵抗感と遅れた応答を通じて、身体感覚をデジタル空間へ再接続する試みであると言える。

6. おわりに

本稿では、スライムの粘弾性を利用した不定形な変形入力インターフェースを提案した。安価な材料を用いながら

も、基本的な 4 動作に対して電圧波形の時間的特徴が観察できることを示し、粘弾性体を入力媒体として用いる可能性を示した。

今後は、電極配置の最適化による多自由度入力 (マルチタッチ等) の実現や、波形特徴量に基づく自動識別、時系列信号の非線形性を活かした物理リザバーコンピューティングへの応用を検討する。

謝辞 本研究の材料選定およびサーベイにおいて協力いただいた友人に深謝する。

参考文献

- [1] マーシャル・マクルーハン: メディア論: 人間の拡張の諸相, みすず書房 (1987).
- [2] Holman, D. and Vertegaal, R.: Organic User Interfaces: Designing Computers in Any Way, Shape, or Form, *Communications of the ACM*, Vol. 51, No. 6, pp. 48–55 (2008).
- [3] Wang, Z., Chen, J., Wang, L., Gao, G., Zhou, Y., Wang, R., Xu, T., Yin, J. and Fu, J.: Flexible and wearable strain sensors based on tough and self-adhesive ion conducting hydrogels, *J. Mater. Chem. B*, Vol. 7, No. 1, pp. 24–29 (2019).
- [4] Zhang, H., Kalra, A., Lowe, A., Yu, Y. and Anand, G.: A Hydrogel-Based Electronic Skin for Touch Detection Using Electrical Impedance Tomography, *Sensors*, Vol. 23, No. 3 (2023).
- [5] Miruchna, V., Walter, R., Lindlbauer, D., Lehmann, M., von Klitzing, R. and Müller, J.: GelTouch: Localized Tactile Feedback Through Thin, Programmable Gel, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, pp. 3–10 (2015).
- [6] Kao, H.-L. C., Bamforth, M., Kim, D. and Schmandt, C.: Skinmorph: texture-tunable on-skin interface through thin, programmable gel, *Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '18, pp. 196–203 (2018).
- [7] Coe, P., Evreinov, G. and Raisamo, R.: Gel-based Haptic Mediator for High-Definition Tactile Communication, *Adjunct Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19 Adjunct, pp. 7–9 (2019).