



# 触覚ディスプレイのための流体金属を用いた 電磁ソフトアクチュエータの開発

Development of Electromagnetic Soft Actuator  
Including Fluid Metal for Tactile Display

新藤尚輝<sup>1)</sup>, 安藤潤人<sup>1)</sup>, 野間春生<sup>1)</sup>  
Naoki Shindo, Mitsuhito Ando, and Haruo Noma

1) 立命館大学 情報理工学部 情報理工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路 1-1-1, nshindo@mxdlab.net)

**概要:** 本研究は、仮想の物体を触ったときにその物体の表面テクスチャ感を伝える触覚ディスプレイの開発を目的としている。その触覚ディスプレイを構成する部品として、ソフトチューブと液体金属を利用したソフトアクチュエータを開発した。本論文では、このアクチュエータの構造と駆動原理について解説し、ヒトに対して触覚を提示することができるのか調査するために行った丁度可知差異(以下、JND: Just Noticeable Difference)を求める実験の結果から、このアクチュエータを触覚ディスプレイとして使用できると判断した。

**キーワード:** 機構・アクチュエータ, 感覚・知覚, 心理, 触覚

## 1. はじめに

本研究では、仮想の物体を触ったときにその物体の表面テクスチャ感を伝えることを目的として、ソフトチューブと流体金属を使用したアクチュエータを開発した。人が物をなぞるときに皮膚表面と対象物の界面には数百 Hz の微小な振動が生じており、この振動が触覚受容器を通して神経に伝えられることで触覚が発生している[1]。既存の皮膚に直接機械刺激を与える触覚ディスプレイの多くは、提示部を駆動するアクチュエータの方が大きく、アクチュエータを触覚提示する場所に置くことができない。結果的に、触覚ディスプレイ全体としては大きくなる。そこで、本研究では触覚ディスプレイを小型化するために、ソフトアクチュエータに注目した。ソフトアクチュエータは人工筋肉などで用いられる動作を変換する装置で、様々な形状のものが提案されている[2,3]。これらを参考にして、流体金属をソフトチューブに封入して触覚提示部とアクチュエータを一体化した小型のソフトアクチュエータを開発した。そして、このアクチュエータの刺激強度に対する被験者の反応から増分閾と減分閾を求め、JND [4]を測定する実験を行い、このアクチュエータを用いて触覚提示の可能性を検証した。

## 2. アクチュエータの構成

### 2.1 アクチュエータの構成

アクチュエータは図 1 のようになっている。まず、駆動部として加工したソフトチューブを固定台におき両端を固定する。固定台のソケットには大きさ 10mm×10mm×10mm のネオジム磁石をはめている。ソケットの上には、突起のついたシリコンゴム薄膜を置き、その上から指置き台で押さえる。この薄膜上の突起を介して触ることで、触感を増強するとともに、電流が流れているソフトチューブと電氣的絶縁する。

模式図を図 2 に示す。加工したソフトチューブには液体金属<sup>1)</sup>を封入している。この液体金属に電気を流す。駆動部はネオジム磁石の間に置かれているため、ローレンツ力が働く。この発生した力によってソフトチュー

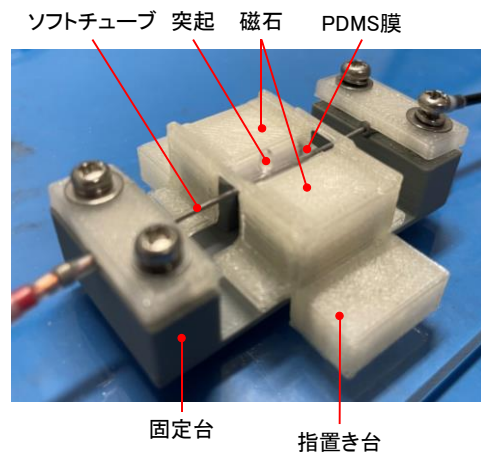


図 1: アクチュエータ

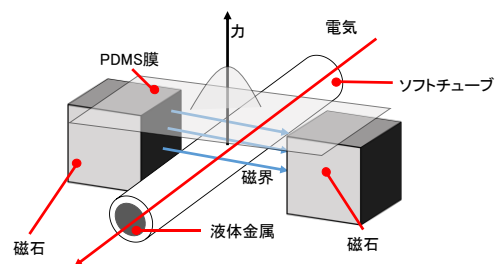


図 2: 模式図

<sup>1)</sup> 材料屋ドットコム, 「低融点合金(融点-19°C)10g」

[<https://www.zairyo-ya.com/products/311.html>] (最終検索

日: 2022 年 7 月 23 日)

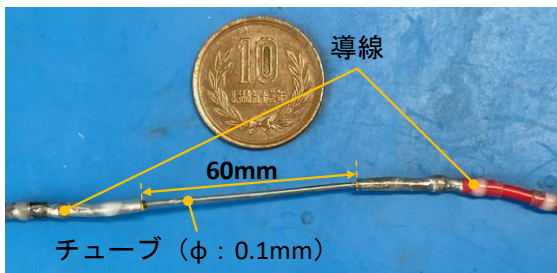


図 3: アクチュエータ部

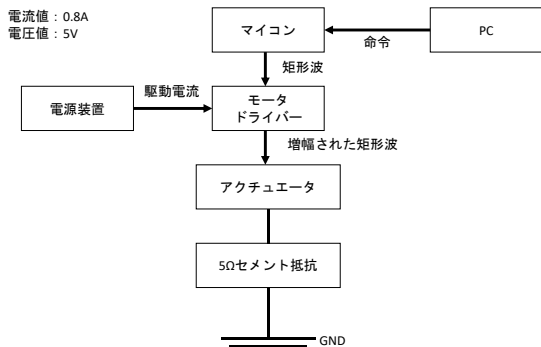


図 4: 実験装置の構成

ブが変形する。このソフトチューブの変形を利用して、上にかぶせてある突起を上下に動かす。

アクチュエータとなるソフトチューブ部を図 3 に示す。ソフトチューブは直径 2.0 mm、内径 1.0 mm のシリコンゴム製で、一端から注射器で流体金属を封入する。次に、左右からソフトチューブより外径の細い銅線で蓋をする。最後に、熱収縮チューブで銅線と太い導線を接続する。アクチュエータ部は 60 mm の長さで、電気抵抗は 0.5 Ω となる。

2.2 駆動原理

実験装置の構成を図 4 に示す。PC から駆動周波数を指示すると、マイコンが適切な周期の矩形波を生成する。ここでは Arduino UNO を制御装置として用いた。この矩形波を DC モータドライバに入力し、アクチュエータに特定の周期を持つ電流を流す。モータドライバで順方向と逆方向に交互に電気を流し、図 5 のように電圧値に指定した周期を与えた。ON の状態でのアクチュエータ部の電流は 0.8A、モータドライバの電源電圧値は 5V である。

3. 実験

3.1 実験の目的

開発したアクチュエータを用いて触覚提示が可能なのかを調査するために JND を求め、提示可能な触覚刺激の段階を求める。この実験における JND の値は増分閾と減分閾の平均値とする。

3.2 実験方法

実験では被験者にはアクチュエータによって連続して二つの刺激を与え、その大きさの比較結果を答えさせた。この実験で提示する刺激は比較の基準となる刺激(以下、基準刺激)と比較の対象となる刺激(以下、比較刺激)の 2 つとした。被験者にはこの 2 種類の刺激の組み合わせをランダムに提示した。被験者には提示した 2 つの刺激のうち、「刺激が大きかった方」で回答するよう教示した。

3.3 実験条件

実験装置は、2ms(500Hz)~1000ms(1Hz)の間で刺激を提示することができるが、予備実験の結果を踏まえて、基

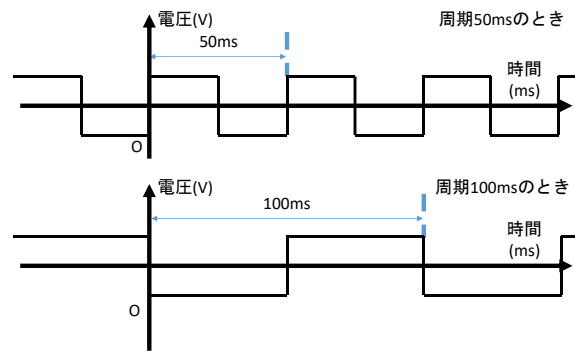


図 5: モータドライバで生成する電圧

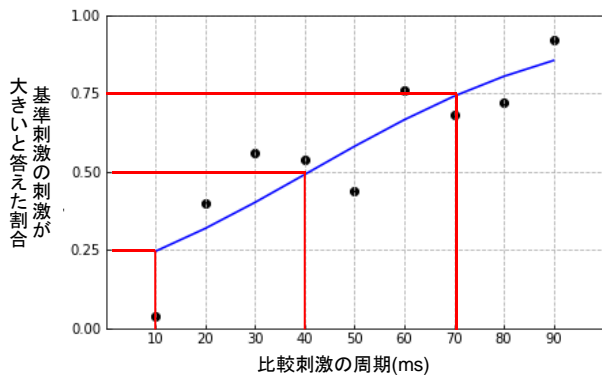
表 1: 基準刺激に対する比較刺激の組み合わせ

基本刺 の 周期(ms)	比較刺激の周期(ms)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
50	10	20	30	40	50	60	70	80	90
100	30	45	60	85	100	115	130	145	160
150	30	60	90	120	150	180	210	240	270

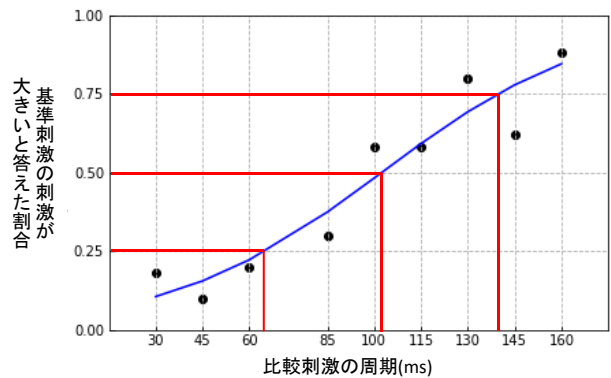
準刺激を 50ms(20Hz)、100ms(10Hz)、150ms(約 7Hz)の 3 種類とした。基準刺激に対する比較刺激の周期は表 1 の通りである。表 1 に示すように 1 つの基準刺激に対して 9 組の組み合わせがある。提示する刺激には、「基準刺激から比較刺激」、「比較刺激から基準刺激」の 2 つの順序を設けた。それぞれの順序で 5 回ずつ、合計 270 回刺激を提示した。この実験の被験者は 5 名(20 代男性 4 名、20 代女性 1 名)である。アクチュエータの駆動音を聞こえないようにし、皮膚感覚だけで回答させるために、被験者は触覚を提示している間は閉眼で、両耳にイヤホンさせた。

3.4 結果

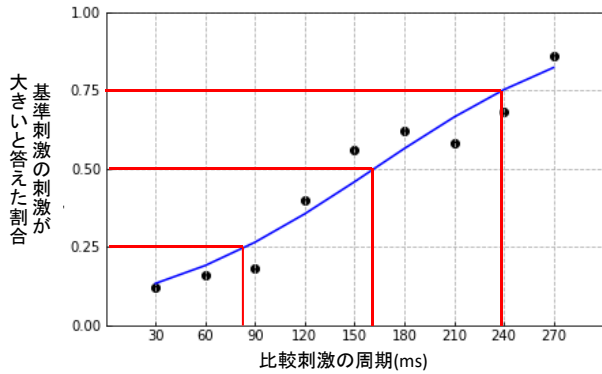
回答結果を集計して、基準刺激に対して比較刺激が小さいと回答した人数と大きいと回答した人数で比率を算出し JND を求めた。実験結果を図 6 に示す。図 6-a、図 6-b、図 6-c において、縦軸は「基準刺激の刺激が大きいと答えた割合」で、横軸は「比較刺激の周期」を表している。図中の点が実験で取得したデータの平均値を示している。実線はロジスティック回帰によって得た書き結果である。増分閾は割合が 0.75、減分閾は割合が 0.25 の時のシグモイド曲線で近似した比較刺激の周期から求めた。このとき、各基準刺激に対する JND は基準刺激が 50 ms では 31 ms、100 ms では 38 ms、150ms では 77ms となった。この値を図 6-d に図示する。これより、周期が大きくなるほど、JND の値も増加していることがわかる。刺激の要素は様々だがウェーバー則によると、弁別閾は刺激の強さに比例して大きくなる[4]ため、この結果は妥当であり、さらに基準刺激の周期が小さい値であるほど、弁別閾も小さくなると思われる。この実験の結果から、対象とした周期 50ms(20Hz)~150ms(7Hz)の間では 5 段階程度の刺激を識別可能だと考えられる。前述のように本アクチュエータでは 2ms から 1000ms の刺激が出力可能であり、より広く刺激提示範囲を確保できる。一方で、今回の実験では被験者に対しては「刺激の強さの比較」を求めたが、これが機械的な刺激感覚として、突起が当たる強さであるか、あるいは、周波数に起因するかが不明である。実際に、周波数が低い場合は被験者にとって感覚では、振動感が強まる傾向がみられた。この点については、刺激の感じ方に関する調査が必



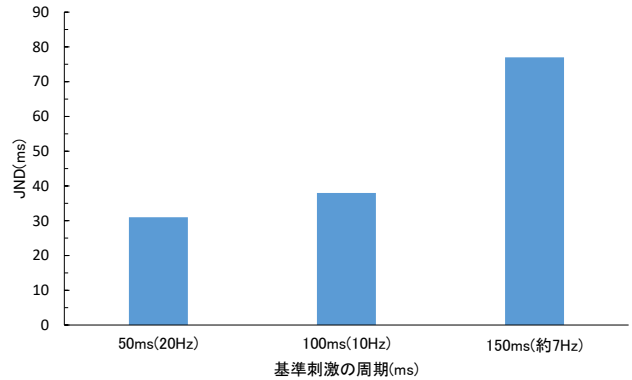
a: 基準刺激 50 ms (20 Hz) に対する JND の結果



b: 基準刺激 100 ms (10 Hz) に対する JND の結果



c: 基準刺激 150 ms (約 7 Hz) に対する JND の結果



d: 基準刺激とおおよその JND の値

図 6: 実験結果

要であると考えられる。一方で、実際に触覚刺激提示を行う場合に今回用いたような静的な刺激よりは、時間とともに波形変化する音波のような時系列刺激を提示すると、被験者にとっての感覚が異なると思われる。さらに、今回の開発したアクチュエータは小型であり、これを複数本並べて空間的にも刺激を拡張することが可能である。これらのような、時間的・空間的な多重性を施すことによって、このアクチュエータを触覚ディスプレイとして今後発展できる。

#### 4. おわりに

この実験では提案したアクチュエータの JND を求め、新たな触覚ディスプレイとしての可能性を探った。実験結果から、現状でも 5 段階以上の刺激をヒトに識別させることが可能であるため、開発したソフトアクチュエータで刺激を出し分けられることがわかった。開発したアクチュエータを用いた触覚提示の際、ヒトが刺激の強さを感じる時に重要な刺激の要素は不明である。回答内容を工夫して、ヒトが刺激のどの要素を感じ取っているのか確かめることも必要となる。被験者数も少ないため人数を増やして実験の正確さをあげる必要がある。また、矩形波の周期をより精密に制御する装置の

改善も必要である。

今後は、装置と実験方法の改善を行い、このアクチュエータを使って触覚を提示する際、刺激の強さとして最も貢献する刺激の要素を調査する。その後、複数のソフトチューブを並べたアクチュエータを作成し、1 本だけでなく複数のソフトチューブを用いて時間的・空間的に多重性をもたせた触覚提示を試みる。さらに、専用アクチュエータの動作を制御するアプリケーションを作製し、仮想の物体を触ったときにその物体の表面テクスチャ感を伝えられるようにする。

#### 参考文献

- [1] 下条誠:皮膚感覚の情報処理, 計測と制御, Vol. 41, No. 10, pp. 723-727, 2002.
- [2] GUO Rui et al.:Liquid metal spiral coil enabled soft electromagnetic actuator, SCIENCE CHINA, Vol.61, No.4, pp.516-521, 2018.
- [3] Guoyong Mao et al.:Soft electromagnetic actuators, SCIENCE ADVANCES, Vol.6, No.26, pp.1-9, 2020.
- [4] 岡嶋克典ら:感覚・知覚実験法, 朝倉書店, 第 1 版, 朝倉書店, 2008.