

吸引圧を用いるマルチプリミティブ触覚ディスプレイ

A Multi-Primitive Tactile Display Using Suction Pressure

牧野泰才, 浅村直也, 篠田裕之

Yasutoshi MAKINO, Naoya ASAMURA and Hiroyuki SHINODA

東京大学 情報理工学系研究科 システム情報学専攻

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, yasutoc@alab.t.u-tokyo.ac.jp)

Abstract: In this paper, we propose a new tactile stimulation method using suction pressure. The method is based on our discovery of a tactile illusion that we feel as if a stick is pushing a skin when we pull the skin through a hole. Another key concept of this paper is Multi-Primitive Tactile Stimulation (MPTS). In this experiment we control 2 degree-of-freedom stress distribution with intervals of two-point-discrimination-threshold for producing various touch sensation. Using the suction pressure stimulation and MPTS, we confirmed that we can produce tactile sensations from concentrated pressure to plane surface by a sparse array of suction holes. We show the principle of the tactile display and experimental results.

Key Words: tactile display, haptic interface, multi-primitive, suction pressure

1. はじめに

触感の提示には、これまで様々な手法が提案されている。例えばピンアレイによるもの[1]、電極を用いて電氣的に神経を発火させるもの[2]、あるいは超音波の放射圧により圧覚を提示するもの[3]などである。しかし、これら手法が対象とする部位は指先であり、そのまま手掌部のような大面積に対して適用可能なものとはなっていない。

大面積に刺激を提示する際に特に問題となるのは、微細なテクスチャから滑らかな物体との接触感までを提示するために、膨大な数の刺激素子のアレイを作成する必要がある点である。先行研究[4]において、この素子数の問題に対して、2自由度の刺激を疎らに配置し、その組み合わせにより任意の触感を提示する、マルチプリミティブ触覚提示法が提案された。しかしその実現には、各素子の刺激強度を厳密にコントロールする必要があり、そのことは従来手法では困難であった。

本稿では、吸引圧を用いた新しい刺激提示手法を提案する。我々は、穴の開いた基板上に皮膚を密着させ、その穴より皮膚を吸引することで、物体との接触感覚を提示可能であることを発見した。これは、人間の触覚受容器が、応力の正負に感度を持たず、その歪みエネルギーを検出しているためであると考えられる。この手法を用いると、吸引口の周りで皮膚が拘束されていることにより、隣接する刺激素子同士が干渉しない。これにより、各素子の刺激強度を安定にコントロールできるため、マルチプリミティブ触覚提示法も容易に実現されると考えている。

2. 手法

2.1 吸引圧制御による刺激提示

図1は吸引圧制御による刺激の模式図である。図に示すように、穴の開いた基板上に皮膚を押し当てた状態で、その穴より皮膚を吸引すると、あたかも棒状の物体が押し込まれたような感覚が得られる。

予備実験として、10名の被験者に直径6mmの穴を通して吸引圧刺激を提示したところ、9名が鉛筆の後ろのゴムや、ガラスの攪拌棒が接触するような触感を得た、と回答した。

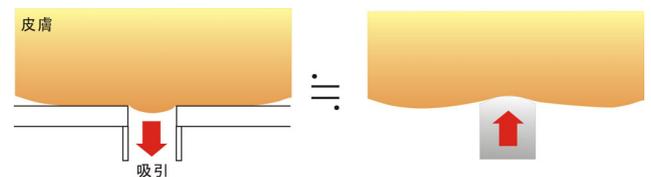


図1 吸引圧制御による刺激

吸引により接触感覚を得られる原因を解明するために、皮膚内部の応力分布、歪みエネルギー分布を有限要素法を用いて解析した。皮膚各層のヤング率、ポアソン比、厚さは前野らの研究[5]により得られた結果を使用した。

図2は、皮膚表層の歪みエネルギー分布を示す。左図が吸引時、右図が吸引と同程度のサイズの棒状物体接触時である。この図より、吸引時と接触時とで、歪みエネルギー分布が3次的には異なっていることがわかる。吸引時には皮膚表層に歪みエネルギーが局在しているのに対して、

接触時は、深部までエネルギーが分布している。また、表層受容器が存在するとされる0.7mm程度の深さにおいては、応力の方向は逆になっている。

一方図3は、図2における受容器近傍（0.7mm程度の深さ）での歪みエネルギー分布を示したものである。特定の深さで歪みエネルギーを観測する限り、受容器近傍での分布は非常に似通っていることが確認できる。人間の触覚受容器は応力の正負に感度を持たず、その歪みエネルギーを検出していると言われていた[6]。吸引による刺激と接触とを区別できないのは、このように応力の正負に感度を持たないことから説明できると考えられる。

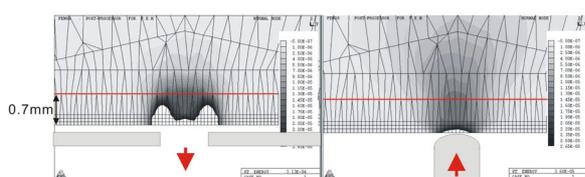


図2 皮膚表層の歪みエネルギー分布
(左：吸引刺激 右：棒状物体の接触)

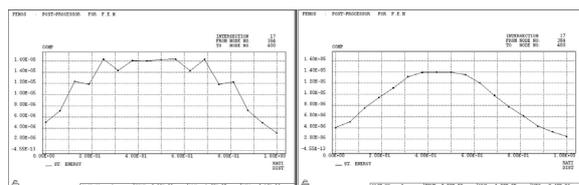


図3 受容器近傍の歪みエネルギー分布
(左：吸引刺激 右：棒状物体の接触)

本手法のメリットは、皮膚の変形が吸引口の周囲のみで完結し、近傍の刺激素子の状態に影響を及ぼさないという点である。例えばピンアレイでは、ひとつのピンの変位が大きいと、その影響によりピンが押し込まれた周囲の皮膚が大きく変形してしまう。その結果、近傍のピンは皮膚との接触状態を安定に保てなかった。本手法では変形が局所的に生じることにより、大きな力を提示しても刺激素子同士が互いに干渉せず、安定して触感を提示可能である。

また、空気を用いることにより、ポンプやバルブなどの駆動部を、チューブを介し離して配置することが可能なため、小型化、集積化が容易となる点もメリットである。刺激提示面に機械的な構造を作る必要がないため、壊れにくく柔らかな構造の実現も可能となる。

これら利点は、既に提案されている触覚の解像度に関する仮説に基づく触覚ディスプレイの実現に有用である。その仮説とは、“二点弁別閾の間隔で、少数自由度の刺激を用意し、その強度の組み合わせにより多様な触感を提示する[4]”というものである。以下この手法について説明し、吸引圧制御による刺激提示を用いることにより、これが容易に実現可能なことを示す。

2.2 マルチプリミティブ触感提示法

触覚の解像度に関する指標として、二点弁別閾が古くから知られている。二点弁別閾とは、異なる二点を同時に皮膚に接触させた際に、二点であると見分けられる最小の距離のことを言う。しかし、この二点弁別閾より狭い範囲の刺激に関しても、人間は複数のパターンを明確に見分けることができる。例えば、尖っているか、平らかというような違いは、両方が二点弁別閾より小さいサイズであっても容易に見分けられる。従って、二点弁別閾の間隔で単純にピンを並べるだけでは触感提示には不十分である。

このことは、視覚と対応させて考えると分かりやすい。仮に、十分高解像度なディスプレイがあったとしても、それだけで任意の画像が提示できるわけではない。RGBの3自由度が存在して、はじめて多様な表現が可能となる。触覚においても同様で、二点弁別閾の間隔で十分な自由度の刺激が提示されることで、多様な触感が表現可能になる。

我々は、視覚のRGBに対応する触覚の基本圧力パターンをプリミティブと呼び、この手法を“マルチプリミティブ触感提示法”と呼ぶ。この手法を用いることで、刺激素子を疎らに配置しても、多様な触感の提示が可能になることが期待できる。例えば、今回対象とする手掌部の二点弁別閾は約10mmであり、プリミティブの個数が数個以内であれば、刺激素子を十分配置可能と思われる。

先行研究では接触曲率に着目し、図4に示す2自由度のプリミティブによる触感提示を考えた。滑らかな圧力分布を与えるS1と、ピンに接触したような集中荷重を提示するS2の2種類である。この2刺激を同時に提示した際に中間の曲率を感じられれば、その強度比を変えることで、二点弁別閾内に生じる全ての曲率を表現できるため、マルチプリミティブ触感提示法の実現が見込まれる。先行研究では2自由度のピンによる刺激提示を試みていたが、接触状態を安定に保てず、試行ごとに評価が異なり、十分な確証が得られていなかった。

今回提案する吸引圧を用いる刺激提示では、刺激素子間の干渉が生じず、安定した刺激を提示可能なため、マルチプリミティブ触感提示法が実現できると考えている。

3. 実験

3.1 目的

本研究の最終的な目標は、少数のプリミティブを二点弁別閾程度の間隔でアレイ状に配置し、手掌部全体に多様な触感を提示することである。先行研究と同様に、曲率に着目した2自由度のプリミティブを用いる。

図5は試作した提示面である。中央に設けた穴が集中荷重S2に対応し、周囲4つの吸引口が平面荷重S1に対応する。ここで、S1、S2は吸引口の周囲の形状が異なる。平面に対応する刺激(S1)を提示するには、ある特定の箇所に応力が集中しないような構造が必要になる。吸引の場合、図2に示すように吸引口のエッジ部分に応力が集中することから、この部分を丸めることで、応力の集中を軽減した。

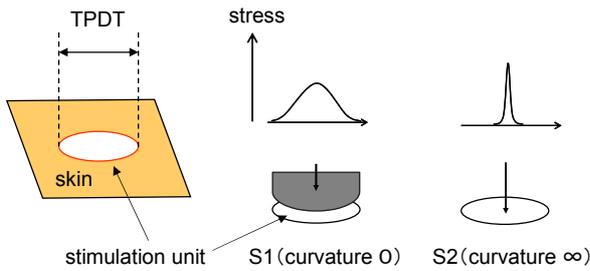


図4 2自由度のプリミティブ

一方、エッジを作ることで、集中荷重に対応する刺激 (S2) を提示する。将来的には、このような構造を並べることにより、手掌部全体を覆うことを想定している。

このとき、確認すべき点が2つある。1つは2自由度のプリミティブを組み合わせ提示することで、中間の曲率を提示できるかという点である。これで中間の曲率を表現できれば、二点弁別閾内に生じる任意の触感を提示できることになる。もう1つは、平面荷重 S1 を複数配置することで、滑らかな平面を提示可能であるかという点である。吸引により、穴のエッジ部分に応力が集中してしまうことから、多数の穴より吸引すると、デコボコ感が生じるのではないかと考えられるからである。

本稿では、前者の結果について詳細を述べる。後者については、紙数の都合上子細は省略するが、エッジを丸くした吸引口をアレイ状に配置することで、8人の被験者半数の4人が滑らかな面と同等の触感を報告している。

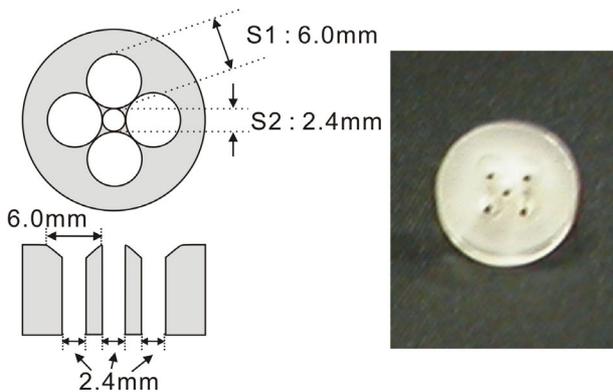


図5 刺激提示面

3.2 実験系と刺激

図6は実験系ブロック図である。ここでLPFは空気の振動の高周波成分を除去する低域通過フィルタを示す。図7は実験系の写真である。皮膚との接触を安定に保つために、刺激提示面周囲にシリコンゴムの土台を作成した。

ポンプとバルブの間のLPFはポンプの振動成分を除去する役割を果たす。これにより、安定した定圧源が実現される。任意の圧力を提示するため、各吸引口の圧力をバルブの開閉時間によりコントロールした (図8参照)。

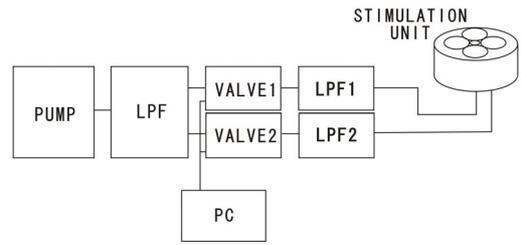


図6 実験系ブロック図

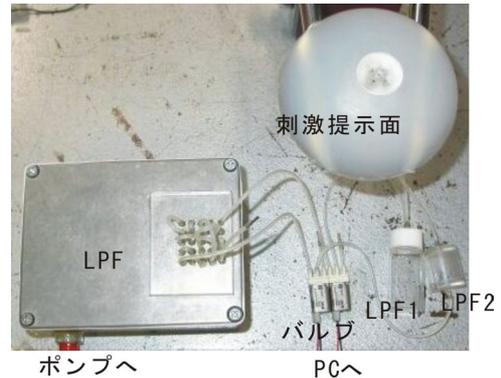


図7 実験系写真

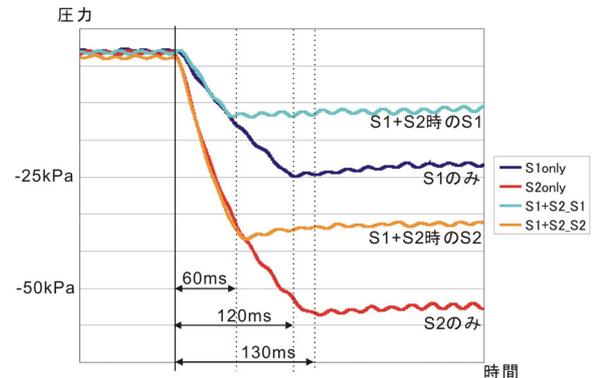


図8 3種類の刺激圧力の時間変化

3種類の刺激を以下の吸引方法で提示した。図8は各刺激の時間的な圧力変化、図9は駆動される吸引口を示す。それぞれの吸引圧力、到達時間は実験的に決定した。

1) 平面荷重 (S1)

周囲4つの吸引口より皮膚を吸引。到達圧力は-23 kPaであり、この圧力に達するまでに120msかかる。

2) 集中荷重 (S2)

中央の吸引口のみ吸引。到達圧力は-60 kPa、この圧力に達するまでの時間は130msであり、平面荷重よりも吸引圧の変化が急峻になっている。

3) 中間曲率 (S1+S2)

中央と周囲の4つの吸引口より同時に皮膚を吸引。それぞれの吸引圧はS1が-14 kPa、S2が-37 kPaであり、この圧力に到達するまでに、どちらも60ms要する。

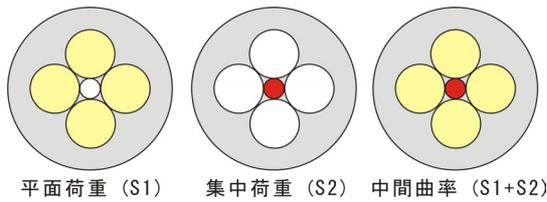


図9 3種類の刺激時の駆動吸引口

3.3 実験方法

今回心理物理実験を、以下のような手順で行った。まず被験者の左手掌部に、S1のみ、S2のみ、S1+S2の3種類の吸引刺激(図6)のうち一つを提示する。その後右手掌部に曲率半径が、A:0.7mm、B:1.5mm、C:3.0mmの3種類の実物のうち1つをランダムに押し当てる。被験者には左右の刺激の鋭さ(曲率)について、どちらが鋭いか、あるいは同程度かを回答してもらった。この試行を3種類の刺激に対しランダムに5回ずつ行い、吸引刺激を表1に示すように7段階に分類する。例えば、曲率半径0.7mmの実物より平らで、かつ1.5mmより鋭いと判断された吸引刺激は、3に分類される。20代の男性5名、女性1名の被験者に対し実験を行い、評価が7段階のどこに対応するかを見た。

表1 比較刺激の曲率半径と評価との対応

曲率半径	←1	A 0.7mm	↔3	B 1.5mm	↔5	C 3.0mm	→7
評価	1	2	3	4	5	6	7

4. 結果

図10が評価結果をヒストグラムで示したものである。左に行くほど鋭い接触曲率を持つと評価されたことになる。これより、集中荷重S2の評価(青)と、平面荷重S1の評価(黄色)のちょうど中間に、S1+S2の評価(赤)が分布していることがわかる。よって、吸引圧により2自由度のプリミティブを提示することで、その中間の曲率を表現できることが示された。

ここで、ひとつ言及しておくべき点がある。今回我々は、S2が中央に配置されていることから、S1+S2により中間の鋭さを感じるのではないかと考え、曲率半径による評価を行った。しかし、6人の被験者中2名がS1+S2の刺激時に、円柱のようなエッジのある棒状物体との接触を感じ、曲率による評価は困難と回答した。このことは、二点弁別閾内の2刺激の位置関係まで把握できないために、先端の鋭い物体と、エッジのある円柱とを混同したものと考えられる。実際には両者の接触は、2自由度のプリミティブで展開した際に時間的な変動が異なると考えられる。被験者ごとの時間方向の感度差により、このような結果になったと思われる。今後この点についての考察と、個人差に対応したキャリブレーション方法の検討が必要である。

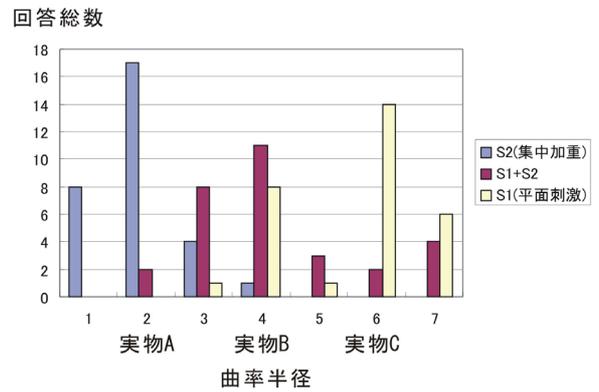


図10 評価結果

5. まとめ

本稿では、手掌部全体に触感を提示するための手法として吸引圧制御による刺激提示法を提案した。この手法を用いると、各刺激素子を安定してコントロールできることから、マルチプリミティブによる、疎らな刺激素子アレイでの大面積への触感提示の実現が期待できる。

この考えに基づき触覚ディスプレイを試作した。心理物理実験により、平面荷重と集中荷重を二点弁別閾内に同時に提示することにより、中間の曲率を提示可能という結果を得た。また、平面荷重に対応する刺激をアレイ状に配置することで、滑らかな平面が提示できることも確認し、鋭いピンから滑らかな平面までを提示可能なことを示した。

参考文献

- [1] M. Shimojo, M. Shinohara and Y. Fuyuki: "Shape Identification Performance and Pin-matrix Density in a 3 Dimensional Tactile Display," *Proc.1997 VRAIS*, pp.180-187, 1997.
- [2] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda and S. Tachi: "Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation," *Proc. 1999 ICAT*, 1999.
- [3] T. Iwamoto, T. Maeda and H. Shinoda: "Focused Ultrasound for Tactile Feeling Display," *Proc. 2001 ICAT*, pp. 121-126, 2001.
- [4] N. Asamura, T. Shinohara, Y. Tojo, N. Koshida, and H. Shinoda: "Necessary Spatial Resolution for Realistic Tactile Feeling Display," *Proc. 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1851-1856, 2001.
- [5] 前野 隆司, 小林 一三, 山崎 信寿: "ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係," 日本機械学会論文集(C編), 63巻 607号, pp.881-888, 1997.
- [6] M. A. Srinivasan, K. Dandekar: "An Investigation of the Mechanics of Tactile Sense Using Two-Dimensional Models of the Primate Fingertip," *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, Vol.118, pp.48-55, 1996.