

# マルチプリミティブ吸引刺激による手掌部触覚ディスプレイ

## A Whole Palm Cutaneous Display Based on Multi-Primitive Suction Pressure Stimulation

○牧野泰才 正 篠田裕之 (東京大学)

Yasutoshi MAKINO and Hiroyuki SHINODA

The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

{yasutoc, shino}@alab.t.u-tokyo.ac.jp

**Abstract:** In previous works, we have proposed two methods, “Suction Pressure Stimulation” and “Multi-Primitive Tactile Stimulation” for whole palm-covering tactile display. In those studies, we used two basic pressure patterns as primitives based on an intuitive consideration. In this paper, we show those two primitives activate two superficial mechanoreceptors FA I and SA I, respectively, based on 3D FEM analysis

**Keywords:** tactile display, haptic interface, virtual reality

## 1. はじめに

本研究の目的は、手掌部全体に多様な触感を提示する触覚ディスプレイの実現である。これまでに様々な触覚提示法が提案されてきた。例えば機械的に皮膚を変形させるもの[1][2][3]、空気圧によりゴム膜を膨らませて触感を再現するもの[4]、電氣的に神経を発火させるもの[5]、超音波の放射圧により圧覚を提示するもの[6]などが挙げられる。しかし、それらをそのまま手掌部触覚ディスプレイに適用するのは困難である。主な理由として以下の2点が考えられる。

- 大きな力を加えた際の皮膚の大変形により、精密な圧力コントロールが困難になる点
- 大面積に任意の触感を提示するには、刺激素子の個数が膨大になってしまうと考えられる点

これら問題に対し我々は、1) 吸引圧制御による安定した触覚提示、及び2) マルチプリミティブ触覚提示法による疎らな素子間隔での多様な触覚表現の2手法を提案してきた。

“吸引圧制御による触覚提示”は、穴のあいた基板上に皮膚を接触させ、その穴より皮膚を吸引することで圧覚を提示するというものである。これは「人間は応力の方向に感度を持たない」という触覚特性の発見に基づく。この手法により、周囲の刺激素子との干渉が緩和され、安定した刺激を提示可能になる。このように安定した刺激を提示可能な手法は、実用的な触覚ディスプレイとして有用であるだけでなく、触覚特性解明のためのツールとしても有効である。

“マルチプリミティブ触覚提示法”は、[7]において提案された手法である。これは、二点弁別閾の間隔で触覚に基本的な複数自由度の圧力パターン(プリミティブ)を配置し、その組み合わせにより多様な触感を表現するという手法である。このプリミティブが少数であれば、少ない刺激素子で、手掌部のような大面積を覆うことが可能になる。

これまで我々は、プリミティブとして曲率の小さな平面荷重と、曲率の大きな点荷重の2自由度を吸引刺激により用意し、その組み合わせにより中間の曲率が提示可

能なことを確認した[8]。また、平面荷重を複数配置し同時に駆動することで、大きな平面との接触感を提示することも確かめた。しかし、ここでプリミティブとして用いた2刺激は、人間の触覚特性に基づき経験的に決定したものであり、実際受容器レベルでどのように知覚されているのかは検討してこなかった。

本稿では、このプリミティブを提示した際に生じる皮膚内部のエネルギー分布について有限要素法を用い検証した結果を示す。そして、直感的に用いた刺激が、皮下の受容器マイスナー小体とメルケル細胞を、選択的に発火させる刺激であったことを示す。

## 2. 先行研究の概要

### 吸引圧制御による触覚提示

Fig. 1に模式的に示すように、基板上に皮膚を拘束した状態で、基板に設けられた穴より皮膚を吸引すると物体との接触感覚が生じる。この錯覚は、人間の触覚受容器が応力の方向に感度を持たず、歪みエネルギーを検出しているためと考えられる。

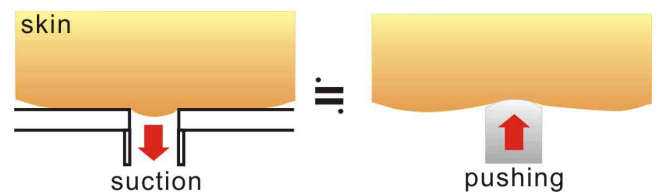


Fig. 1 Schematic illustration of suction pressure stimulation. Drawing air causes a sensation as if something is pushing up.

実際に有限要素法を用いて歪みエネルギー分布を解析した結果を以下に示す。ここで、皮膚の厚さ、ヤング率等の詳細は、前野らの先行研究[9]を参考にした。

Fig. 2は、吸引刺激と押し込みそれぞれの、皮膚表層の受容器近傍における歪みエネルギーを示したものである。大域的な分布が異なっていることが確認される。一方、Fig. 3はFig. 2中の受容器が存在するレベル(赤いライン)における分布を示したものである。この図より、両者の分布が類似していることが分かり、このため同一の触覚として知覚されるものと考えられる。

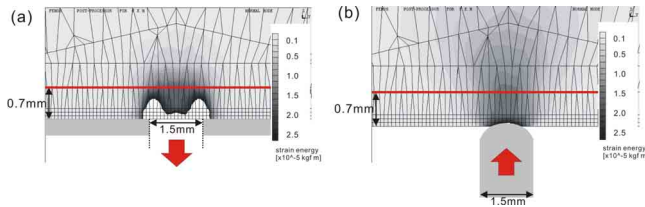


Fig. 2 Strain energy distribution by suction pressure (a) and positive pressure caused by a sticklike object (b). The distributions at the skin surface are different from each other.

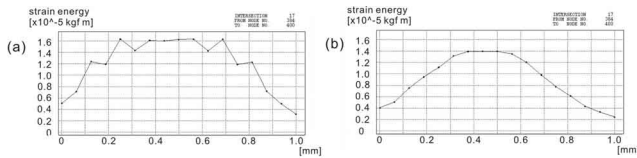


Fig. 3 Strain energy distribution near the receptors. Suction pressure (a) and positive pressure caused by a stick-like object (b). The distributions are similar to each other.

この手法の利点は安定した刺激を提示可能なことである。Fig. 4 (a) に示すように、ピンアレイでは一本のピンの大変位により周囲のピンの接触状態が変化する。よって、安定した刺激の提示が困難であった。一方吸引の場合、(b)に示すように皮膚の変形が吸引口の内部にのみ生じるため、周囲の刺激素子との干渉が生じない。よって安定した刺激を提示可能になる。

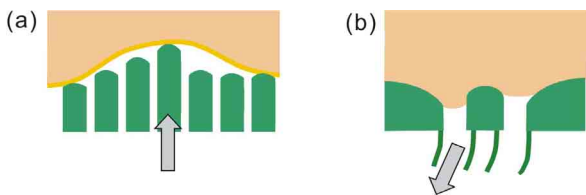


Fig. 4 (a) Large displacement of a pin in a tactile display array interferes with the neighboring pin contact to the skins. (b) Suction pressure stimulation causes no interference with neighboring stimulators.

### マルチプリミティブ触感提示法

刺激素子をアレイ状に配置する場合、その密度をどのように決定すべきか、すなわち人間の触覚解像度に関する指標として、二点弁別閾がよく知られる。これは異なる二点を同時に皮膚に接触させたとき、それが二点であると識別できる最小の距離である。指先では2mm、今回対象とする手掌部では約10mmであることが知られている。しかし、このサイズより小さな刺激に対しても、先端の形状が鋭いか丸いかといった違いは容易に見分けられるため、この間隔でピンを配置しても十分ではない。

このことを考える場合、単に「解像度」という言葉だけでは不十分であり、解像度も含む概念として刺激の「自由度」という観点で問題を整理する必要がある。すなわち二点弁別閾の領域内（以下、二点弁別領域と呼ぶ）に、何自由度の圧力パターンを用意すれば全ての触感を網羅できるか、というように問題を捉えなおしてみる。そのときに用意する圧力パターンの基底を「プリミティブ」と呼ぶこととする。

例えば刺激素子の配置の密度を上げて触感空間をカバーしようとする場合、各点の近傍にデルタ関数的に応力が局在したプリミティブを想定したことになる。Fig. 5に示すように二点弁別領域を $N \times N$ で分割した場合、力の方向を考慮すると1領域あたり $3N^2$ 自由度のアクチュエータで触感を制御することになる。

これに対し我々は、より一般的な応力パターンの中から適切にプリミティブを選択すれば、これよりはるかに小さな自由度のプリミティブで触感空間を網羅できるのではないかと考えている。このような考え方を“マルチプリミティブ触感提示法”と呼ぶ。もしこの考え方が正しいければ、単一の刺激素子を密に配置する従来手法に比べ、疎らな素子間隔で大面積をカバーすることが可能になる。

先行研究において我々は、物体の先端曲率に着目し、曲率の小さい平面荷重 $S1$ と曲率の大きな集中荷重 $S2$ の2刺激をプリミティブとして用いた (Fig. 6)。ここで2刺激は、吸引口のサイズを変えることで実現した。この2刺激を用い、両者を同時に提示すると、中間の曲率が提示可能なことまでを確認した。

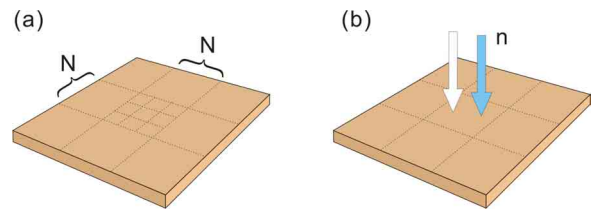


Fig. 5 Two approaches to create various sensations. (a): Using primitives of  $\delta$ -functions with a high density. (b) Using appropriate primitives with small degree-of-freedom.

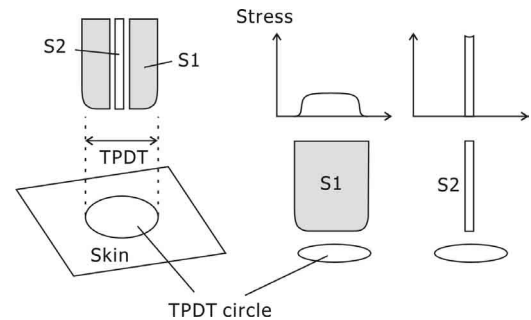


Fig. 6 Two primitives that were used in the previous studies (eg. in [8]). The S1 gives a smooth pressure distribution and the S2 gives a concentrated pressure distribution.

### 3. 吸引口の径と歪み分布の関係

先行研究においては、吸引口のサイズの違いにより2つのプリミティブを表現し、その組み合わせで中間の曲率を持つ物体との接触感を提示できることを確認した。しかし、その実験の過程で、知覚される曲率が吸引の時間変化に強く依存するという特性が新たに確認された。すなわち圧力の時間変化率が大きいほど体感される仮想物体は鋭く感じられ、複数の細い穴から同時に吸引した場合には、ゆっくり吸引した方が滑らかな大きな面との接触感が得られる、という特性が観察された。吸引口が

6 mm以上になると、圧覚から吸引感、つねり感といった感覚へと変化することも分かった。

これら現象をより詳細に理解するためには、刺激のサイズ、あるいは時間特性といった、皮膚表面に加えらるる刺激の時空間パターンと、その際の受容器の発火との関係を知る必要がある。この目的を達成するために、皮膚の簡便な3次元モデルを作成し、実際の押し込みと吸引刺激にそれぞれ対応する時空間パターンを加えた際の、皮膚の内部状態を比較することを考えた。

我々の提案する吸引圧刺激では、皮膚表層の受容器を刺激することがFig. 2により示される。すなわちメルケル細胞とマイスナー小体の2受容器である。よって、これら受容器の発火状態を比較し、触感との対応関係を確認することが望まれる。しかし、各受容器がそれぞれ検出している物理量に関する明確な知見は、現在のところ得られていない。そこで、我々は以下の仮定を設け、実際の感覚とシミュレーション結果とを比較し、その整合性を検証することを考えた。

- 1) メルケル細胞は、表皮と真皮の境界に生じる歪みエネルギーを検出する ([9]より)
- 2) マイスナー小体は上記の歪みエネルギーのうち、せん断変形により生じるエネルギーに対して感度を持つ ([11]より)
- 3) 各受容器とも二点弁別領域に生じたエネルギーの総和を検出する

有限要素法解析ソフトANSYSを用い、Fig. 7のように手掌部を三層にモデル化し解析を行った。結果として得られる歪みエネルギー、せん断歪みエネルギーの各値は、刺激提示部分の直上、直径8mmの領域（手掌部の二点弁別領域）の総和を算出した。

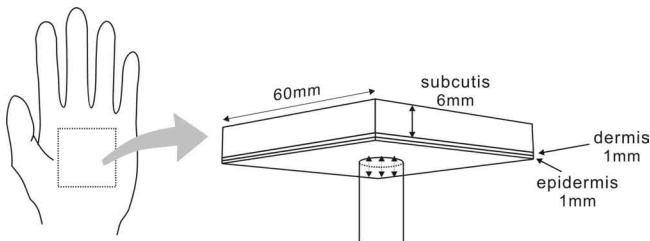


Fig. 7 Three-dimensional palm model consists of three layers.

## 4. 結果

歪みエネルギーの総和を横軸、せん断歪みエネルギーを縦軸にとり、実際の押し込み時の結果をプロットしたものがFig. 8である。ここで先述の仮定1) 2)により、各軸はそれぞれメルケル細胞、マイスナー小体の発火頻度に対応する。両軸とも対数をとってプロットしてあるため、45度のラインが発火比率一定のラインを表す。有限要素法はモデルを線形弾性体として解析することから、刺激の強度がn倍になった場合、両エネルギーともn<sup>2</sup>倍となり比率一定ライン上を右上へシフトする。従って、総歪みエネルギーの値が刺激の強度を、両エネルギーの比率が各刺激の質を決める要因になると考えられる。ここで、解析では準静的な結果が得られている。

Fig. 8で示すのは、0.3Nの力を加えた際の発火比率を、接触領域の面積を変化させながら観察した結果である。

Fig. 8右下の黄色い領域が、実際の接触時に生じうる発火比率の領域となる。注目すべきは、刺激の鋭さが増すほど、総歪みエネルギーにおけるせん断歪みエネルギーの割合が多くなる点である。このことより、接触曲率すなわち鋭さは、発火比率の違いとして知覚されると考えられる。

Fig. 9は-30kPaで吸引した場合の歪みエネルギーとせん断歪みエネルギーの比率を示したものである。ここで注目すべきは、押し込み時と異なり、吸引面積が小さくなるほどせん断歪みエネルギーの影響が小さくなる点である。図中では、直径2.5mmの吸引口までしか示していないが、これは2.5mmより小さい吸引口の場合、感覚として生じないからである。

刺激の時間変化率が大きい場合、刺激に高周波成分が多く含まれることとなる。このとき、受容器の周波数応答の特性から、マイスナー小体の感度のみが上がるということが知られている。すなわち、せん断歪みエネルギーの影響のみが大きくなり、図中に示すように上側にシフトさせた領域までが発火比率として生じうる領域になる。従って、Fig. 9の色が付いた部分が吸引刺激で提示可能な触感領域となる。

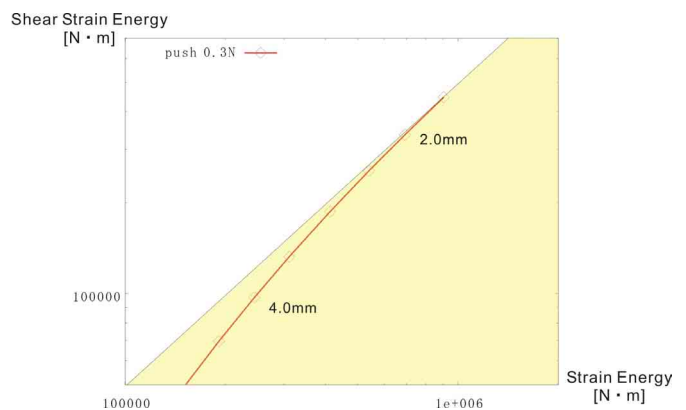


Fig. 8 Relationships between strain energy and shear strain energy at the mechanoreceptor level when a stick-like object is depressed on the palm.

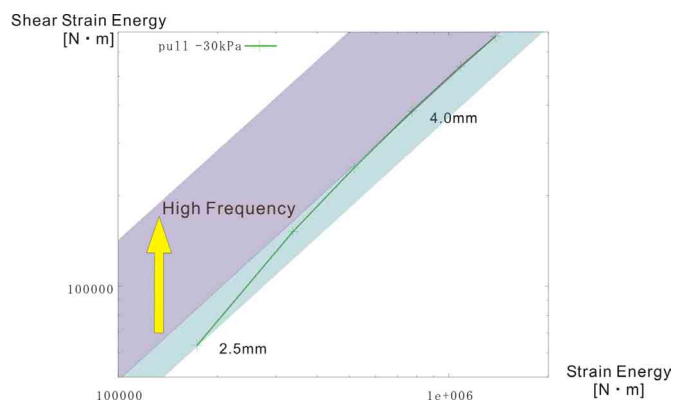


Fig. 9 Relationships between strain energy and shear strain energy at the mechanoreceptor level with suction pressure stimulation.

上記の押し込み時、吸引時のグラフを重ねて表示したものがFig. 10である。図中緑で示された部分が吸引刺激により実際の接触感を表現できる領域になっている。

この図より、実験に用いたS1, S2の鋭さの評価と、グラフ内のエネルギー比率の対応関係とを照らし合わせた結果、非常に良く一致することが確認された。先行研究



において用いた2自由度のプリミティブは、グラフとの対応からS1（平面荷重）がメルケル細胞を、S2（集中荷重）がマインナー小体を、それぞれ選択的に刺激するものであったことが示された。しかし、ここで注意しなければならないのは、吸引口のサイズによりプリミティブを表現していたと考えていたが、実はサイズではなく、経験的に決定してきた吸引の時間パターンによる影響が大きかった点である。

先述のように、刺激のサイズと発火比率の関係は、押し込みと吸引とで全く逆になっている。すなわち準静的に刺激を加えた場合、細く鋭い刺激として用意したS2（実験では2.4mmの吸引口を使用）は、4mm程度の押し込み時に生じる発火比率を表現し、平面として用意したS1（実験では4mm角の吸引口を使用）は、2mmの押し込みと等価になると示された。このようなシミュレーション結果にもかかわらず、実験において吸引口のサイズに比例した評価がなされたのは、吸引の時間パターンが影響していたからと考えられる。

先述のように、圧力の時間変化率が大きいほど体感される仮想物体は鋭く感じられる。これは、Fig. 9で示した高周波成分によるシフトの影響である。このシフトにより、鋭い物体との接触側に発火比率が変化することになるからである。逆に、細い穴からゆっくり吸引する場合は、今回解析した準静的な条件に近い状況である。よって、グラフで示されるように、4mm程度の物体との接触感と同じになると考えられ、滑らかな面との接触感が得られるという知覚特性と非常に良く一致する。

吸引口が大きくなった場合というのは、実際に起こりうる発火比率よりもせん断の影響が大きくなるため、吸引感やつねり感といった違和感として知覚されるものと考えられる。

このように、これまでの実験結果や様々な触感特性が、この結果により容易に説明できる。これは前期の仮定が正しかったことを示すものである。ただ一つ説明しがたいのは、大きな吸引口よりゆっくり吸引した場合、細い物体として知覚されるという点である。これは、二点弁別領域を超えるサイズの刺激となっており、そのために見分けられると考えられるが、今後より詳細な検討が必要である。

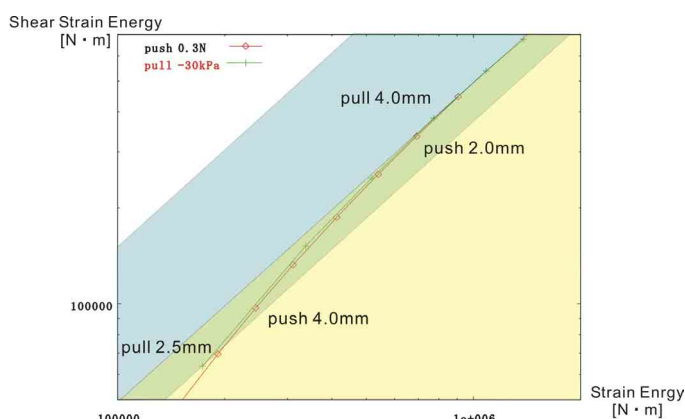


Fig. 10 Merged graphics of pushing pin stimulation and suction pressure stimulation.

## 5. まとめ

本研究では、手掌部全体に刺激を提示する方法として、“吸引圧制御による触感提示”に基づく安定した刺激の提示、及び“マルチプリミティブ触感提示法”による疎らな刺激素子での大面積への多様な刺激提示の二つを提案してきた。これらの組み合わせにより、より少ない刺激素子で多様な触感を安定に提示可能になる。

本稿では、吸引刺激と押し込みとの知覚の対応関係をエネルギー比率により評価した。これまでの実験で基本的な圧力パターン（プリミティブ）として用いた2刺激は、押し込みとどのように対応しているかを明らかにした。S1がメルケル細胞を、S2がマインナー小体を選択的に刺激していたということが確認された。また、様々な触感特性についても今回のモデルで説明可能なことも示した。

## 参考文献

- [1] Y. Ikei, K. Wakamatsu and S. Fukuda: "Image Data Transformation for Tactile Texture Display," *Proc. VRAIS '98*, pp.51-58, 1998.
- [2] M. Konyo, S. Tadokoro, T. Takamori, K. Oguro: "Artificial Tactile Feeling Display Using Soft Gel Actuators", *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3416-3421, April, 2000.
- [3] J. Pasquero and V. Hayward: "STReSS: A Practical Tactile Display System with One Millimeter Spatial Resolution and 700 Hz Refresh Rate," *Proc. of Eurohaptics 2003*, 2003.
- [4] G. Moy, C. Wagner, R.S. Fearing: "A Compliant Tactile Display for Teletaction," *Proc. IEEE Int Conf. Robotics and Automation*, pp. 3409-3415, 2000.
- [5] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda and S. Tachi: "Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation," *Proc. 1999 ICAT*, 1999.
- [6] T. Iwamoto, T. Maeda and H. Shinoda: "Focused Ultrasound for Tactile Feeling Display," *Proc. 2001 ICAT*, pp. 121-126, 2001.
- [7] 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.
- [8] 牧野, 浅村, 篠田: "吸引圧を用いるマルチプリミティブ触覚ディスプレイ," 日本バーチャルリアリティ学会第8回大会, pp.243-246, 2003.
- [9] T. Maeno, K. Kobayashi and N. Yamazaki: "Relationship between the Structure of Human Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors," *Bulletin of JSME International Journal*, Vol. 41, No. 1, C, pp. 94-100, 1998.
- [10] K. Dandekar, B.I. Raju and M.A. Srinivasan: "3-D Finite-Element Models of Human and Monkey Fingertips to Investigate the Mechanics of Tactile Sense," *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 125, pp. 682-691, 2003.
- [11] 奈良: "触覚情報処理の理論及びその触覚ディスプレイへの応用," 東京大学大学院博士論文, 2000