

受容器の時間的応答特性を利用する吸引圧触覚ディスプレイ

Suction Pressure Tactile Display Using Temporal Property of Mechanoreceptors

○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 former papers, we have proposed “Multi Primitive Tactile Stimulation (MPTS)” and “Suction Pressure Stimulation (SPS)” method to realize whole palm covering tactile display. In order to express many kinds of touch feelings, we prepared two different kinds of stimuli (suction holes) and realized various tactile sensations by combination of them. In this paper, we propose a new set of primitives. The difference from the former device is that single hole provides two primitives by changing the temporal profiles of suction pressure. It is expected that MPTS method is realized more stably since the identical hole provides multiple primitives. We show the basic theory and results of fundamental experiments. The result shows that spatial feature (edged of round) of virtual objects can be controlled by temporal profiles of the two primitives.

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。一般的に手掌部のような大面積に任意の触感を提示するには、膨大な数の刺激素子を配置する必要がある。この問題に対し我々は“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感表現を提案してきた。

“マルチプリミティブ触覚提示法”は[1]において提案された手法である。視覚におけるRGBのような、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）を二点弁別閾の間隔で配置し、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も十分な触感を提示できるのであれば、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。

この手法においては、プリミティブとしてどのような刺激を選択するかが重要となる。我々はこれまでに、人間が接触物体の鋭さを容易に知覚できることに着目し、曲率の異なる2自由度の刺激をプリミティブとして用いた(ex.[2][3])。滑らかな面との接触感を表現する刺激と、ピン状の物体との接触感を表現する刺激の2自由度である。それらを吸引刺激により実現し、その組み合わせにより中間の曲率を再現できることを確認した。

このように、先行研究においてマルチプリミティブ触覚提示法の実現を支持する結果は得られたものの、その再現性は十分であるとは言いがたかった。最も大きな問題は、2自由度の刺激素子が空間的に離れ、並んで配置されている点にある。異なる2点に刺激が加えられるため、2刺激の強度を精密にコントロールすることが困難であり、再現性に乏しかった。

本稿ではこの問題を解消するために、触覚受容器の時間特性に着目した新しいプリミティブを提案する。先行研究と異なる点は、吸引の時間パターンを変えることにより、単一の吸引口で2自由度のプリミティブを表現する点である。このように同一点に複数自由度の刺激を提示することで、多様な触感を安定して提示することが可能になると期待される。

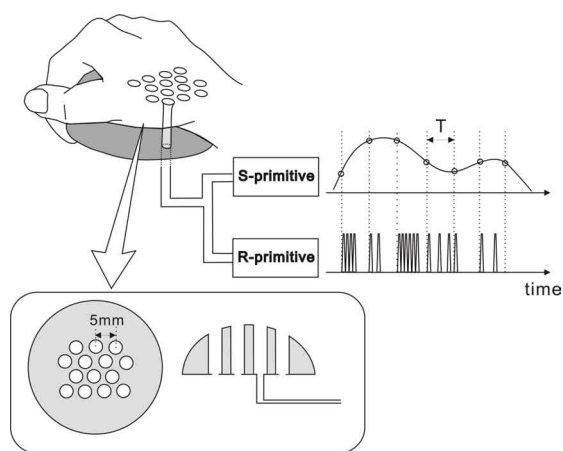


Fig. 1 Schematic diagram of the new whole palm covering tactile display system.

図1に今回提案するシステムの概要を示す。本システムでは、1つの吸引口における吸引パターンを、2つの装置によって決定する。1つはレギュレータであり、50ms程度の時定数 T で駆動される(S-primitive)。もう1つは電磁バルブであり40Hzの振動を生成する(R-primitive)。これらの刺激はそれぞれSA-IとRA-Iを選択的に刺激することを意図して用いた。このように時間的駆動パターンを変化させることにより、選択刺激する手法は、昆陽ら[2]によって提案されている。

本稿では、この触覚ディスプレイを実現するための基礎的な実験を行った。その結果、これまで空間的に複数自由度の刺激を配置することで実現していた多様な触覚提示を、時間的な刺激パターンを変化させることで、同様に提示可能なことが確認された。

2. 先行研究

これまで我々は“吸引圧による圧覚提示”を提案してきた。この手法は、人間が応力の正負に感度を持たない、という触覚特性を利用した刺激提示法である。具体的には、図2に示すように、穴の開いた基板に皮膚を密着させ、その穴より皮膚を吸引すると、あたかも押されたかのような触覚が得られるというものである。

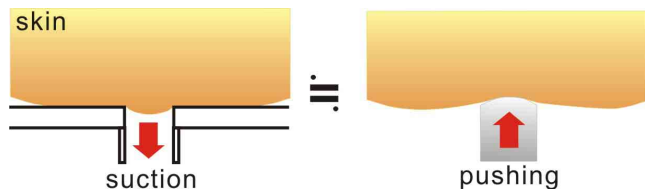


Fig. 2 Schematic illustration of suction pressure stimulation. Drawing air causes a sensation as if something is pushing up.

この刺激を提示した際に、押し込みと同一の知覚が得られることは、人間が応力テンソルそのものではなく、スカラー量である歪みエネルギーを検出していることを示唆するものである。図3は有限要素法により皮膚内部における歪みエネルギー分布を調べた結果である[3]。(a)が吸引刺激を、(b)が棒状物体の押し込みを表す。両者の大局的な分布は異なるが、赤いラインで示した触覚受容器の存在する領域における歪みエネルギー分布は非常に似通っていることが確かめられた。

この吸引圧刺激を用いる利点は、大きく以下の2点である。1つは安定した刺激を提示可能なことである。吸引刺激の場合、皮膚の変形が吸引口の内部にのみ生じる。従って周囲の刺激素子との干渉が生じず、安定した刺激を提示可能になる。2つめの利点は、皮膚深部に存在する触覚受容器、パチニ小体を刺激せずに、表層の受容器のみを刺激できる点である。図3に示すように、押し込み刺激の場合と比べ、吸引刺激では歪みエネルギーが皮膚表層に局在する。そのため、表層の受容器のみを選択的に刺激することが可能になる。

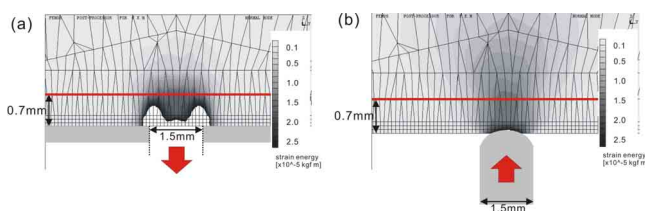


Fig. 3 Strain energy distribution by suction pressure (a) and positive pressure caused by a sticklike object (b). The distributions at the skin surface seem different between the two cases, however, when we focus on the mechanoreceptor level (shown by red lines), the distributions are similar each other.

3. 触覚受容器の時間特性に着目したプリミティブ

先行研究においては、吸引口のサイズの違いにより2自由度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[2]。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るというものである。

本稿では、この知覚の時間特性に着目し、図1に示すようなシステムを提案する。これは、時間的に大局的な圧力変化を生じさせる刺激と、振動成分を生じる刺激の2種類のプリミティブを生成するものである。これを達成するために、本システムには2つの機構が存在する。

1つはレギュレータであり、50ms程度の時定数 T で駆動さ

れる。これにより低周波に感度を持つメルケル細胞(SA-I)を選択的に刺激することが期待される。以降この刺激をS-primitiveと呼ぶ。

もう1つは電磁バルブである。これは40Hzの圧力変動を生成する。これにより、40Hzの振動成分に対して高い感度を持つマイスナー小体(RA-I)を選択的に刺激できることが期待される。この刺激をR-primitiveと呼ぶ。

各吸引口をこの2自由度の時間的プリミティブで駆動することで、従来2種類の吸引口を配置してきたものを、単一の吸引口で実現可能になる。同じ場所に2自由度の刺激を提示できることにより、安定した刺激提示が期待され、また試作も容易になる。

4. 実験

4.1. 目的

本稿では、上記の触覚ディスプレイの実現を検証するため、1つの吸引口を用い、時間的なプリミティブを単独で、あるいは組み合わせて提示した際に、どのように知覚されるかを調べた。

4.2. 実験系

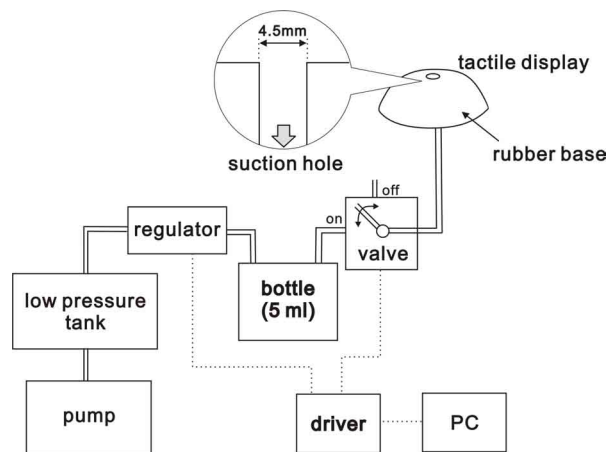


Fig. 4 Block diagram of the experimental settings.

実験系を図4に示す。レギュレータは図中のボトル内の圧力を50msの時定数で変化させることが出来る。バルブはボトルと触覚ディスプレイの吸引口との間の接続をオンオフできる。“オン”状態は、吸引口が低圧のボトルと接続された状態であり、“オフ”状態は、吸引口が外圧に開放された状態である。この実験系を用い、以下の3種類の刺激を用意した。

・ 刺激(1) – S-primitive

バルブをオンにした状態で、レギュレータのみを駆動し、吸引口の内圧を徐々に減じていく。ボトルを配することで振動成分が除去されるため、SA-Iが選択的に刺激されると考えられる。

・ 刺激(2) – S-primitive + R-primitive

レギュレータによりボトルの内圧を下げながら、バルブを40Hzで2回振動させる。その後バルブをオンにした状態でレギュレータにより減圧を続ける。大局的な圧力変化と、振動成分とを組み合わせた刺激である。

・刺激(3)－R-primitive

はじめにバルブをオフにした状態で、ボトル内の圧力をレギュレータにより減じる。その後、バルブを40Hzで二回振動させ、再びオフ状態にする。低周波の刺激を少なくすることで、RA-Iを選択的に刺激することが期待される。

図5に実際の皮膚表面における圧力変化を示す。最大到達圧力として、痛覚が生じず、且つ十分触覚が感じられる強度となるような値(約-30kPa)を、予備実験により決定した。ここで痛覚を生じる圧力の平均値は、刺激(1)の約2倍の-60kPa程度であった。吸引口は図4に示したように、エッジを持った直径4.5mmの穴をアクリルにより試作した。この条件下では、全ての被験者において吸引感覚は生じず、圧覚のみが得られた。

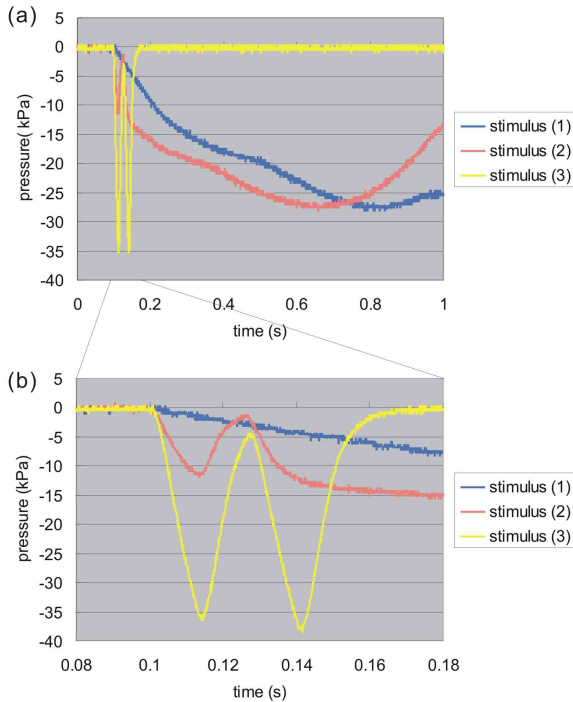


Fig. 5 Three pressure patterns used in the experiment. (a) shows the overall profiles of the stimuli. (b) is zoomed graphics at the rising edge for 0.1s. The stimulus (1) is S-primitive and the stimulus (3) is R-primitive. The combinations of two primitives are shown as the stimulus (2).

4.3. 実験手順

実験は以下の手順で行った。

- 1) 被験者は楽な姿勢で椅子に座り、左腕を肘掛で支えながら、手掌部を触覚ディスプレイの上に乗せる。このときヘッドフォンにより白色雑音を聞いてもらい、音による手掛かりを除去する。
- 2) 3種類の刺激の中から1種類をランダムに提示する。必要に応じて、被験者は何回でも刺激を知覚することが可能である。
- 3) 被験者は右手を使って、実際の物体と左手に提示された吸引刺激とを比較し、最も似通った刺激をそれらの中から選ぶ。
- 4) 一人の被験者に対し、3種類の刺激を各5回ずつ計15回提示し、上記の比較を繰り返す。

図6は今回用いた参照刺激である。参照刺激1,2及び3は半球状の物体であり、その曲率半径 r が異なる。それぞれ2.5mm, 2.0mm, 1.5mmである。参照刺激6,7は円柱状の物体で、その半径がそれぞれ1.5mm, 2.0mmとなっている。参照刺激4,5は半球の先端部分を切り取ったものである。これは予備実験において被験者が、刺激(2)に対しこのような物体を知覚したため、より比較をしやすいように用意した刺激である。半球の半径はそれぞれ1.5mmと2.0mmであり、先端部分の平坦部の半径が1.0mm, 1.5mmとなるように作られている。一見、参照刺激2,5,7などはそれぞれ区別がつかない程度の差に見えるが、予め被験者に参照刺激同士を比較してもらったところ、容易に見分けることが出来た。実験は男性6人、女性1人の計7名の被験者で行った。

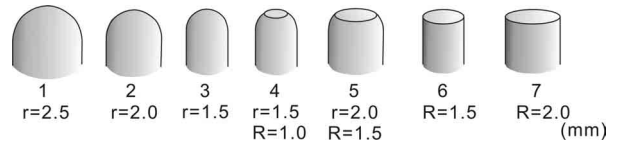


Fig. 6 Seven references used in the experiment. Reference No. 1,2,3: hemispherical objects. No. 4, 5: truncated cone-like reference. No. 6, 7: cylindrical objects. In the picture, "r" indicates the curvature radius and "R" represents the radius of the top circle.

5. 結果

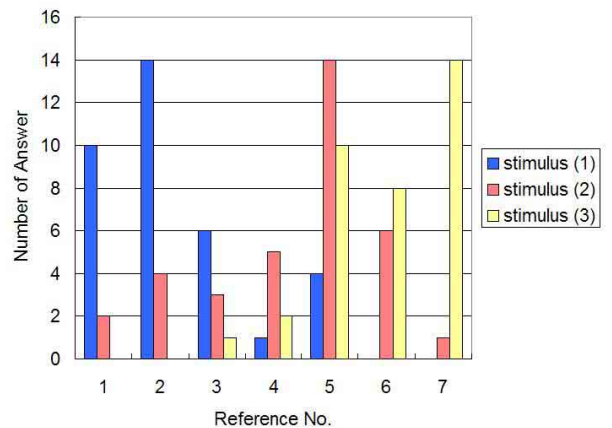


Fig. 7 Results of the comparison between SPS and actual reference objects.

図7は比較実験の結果である。横軸が参照刺激の番号を、縦軸が回答総数を示す。S-primitiveとして用意した刺激(1)は参照刺激1,2に似通った、半球状の刺激として知覚された。一方、R-primitiveとして用意した刺激(3)は、参照刺激5,6,7と似通った、円柱状の刺激として知覚された。そしてS-primitiveとR-primitiveの組み合わせとして用意した刺激(2)は主に、先端を切り取った半球である参照刺激5として知覚された。

このとき、比較の手掛かりは何であったかを質問したところ、「知覚されるエッジ感が異なる」という意見が大半を占めた。R-primitiveの方が、円柱のエッジ部のような尖った感じを得たのに対し、S-primitiveではそのような感覚は生じず、滑らかな半球との接触感を得たという意見が多かった。また両者の組み合わせが参照刺激5と判断された理由も同様に、「半球ほど滑らかではないが、円柱ほどエッジ感

がなく、ちょうどその中間である」という意見が大半を占め、「エッジ感」により判別していることが報告された。

6. 考察

前節において我々は、時間的な駆動パターンの異なるS-primitiveとR-primitiveの2自由度を用意することにより、半球状の滑らかな物体との接触感から、エッジ感のある円柱状の物体との接触感までを再現可能なことを確認した。本節では、時間的な圧力変化の差が、どうして空間的な物体形状の違い(丸いか、エッジ感があるか)として知覚されたかを検証する。

そこでまず表層の2受容器がどのような物理量を検出しているかを検証する。Dandekarら[5]は、指先の3次元有限要素法モデルを作成し、実際の神経発火と比較することで、SA-Iが歪みエネルギーを検出しているのではないかという結果を示している。一方、奈良ら[6]は、マイスナー小体の螺旋構造に着目し、皮膚表面に平行な座標系におけるマイスナー小体のせん断変形の共振周波数が、最も感度の良い40Hzに対応することを示している。

そこで我々は、表層受容器が各物理量(歪みエネルギーとせん断歪みエネルギー)を独立に検出すると仮定した[7]。そして各物理量が接触物体の形状によりどのように変化するかを調べた。図8はある範囲内に均一な圧力を与え、皮膚を変形させた際の、受容器近傍における歪みエネルギーと(横軸)、せん断変形により生じた歪みエネルギー(縦軸)をプロットしたものである。圧力を加える領域のサイズが変化すると、両者の比率が変化することが分かる。これは、空間的な形状(サイズ)の変化が、両受容器の発火比率の変化として知覚されるであろうことを示すものである。逆に言えば、両受容器の発火比率をコントロールできれば、知覚される形状を変化させることが可能になると期待される。

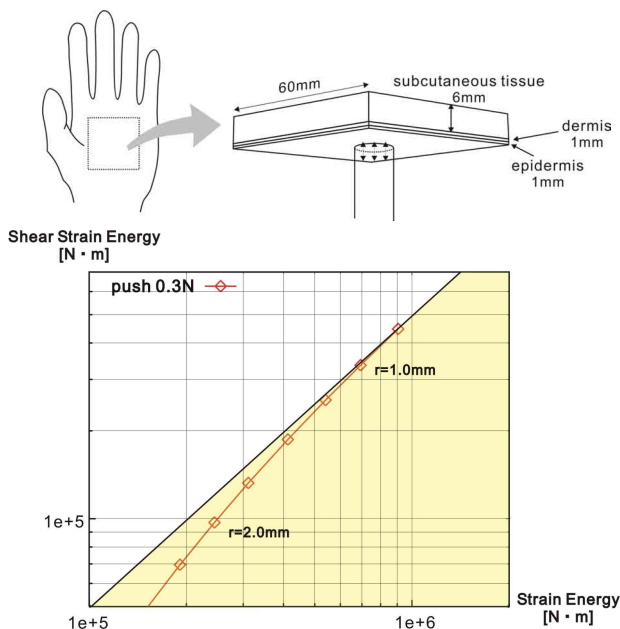


Fig. 8. FEM results of strain energy at the superficial receptor level. We calculated the sum of the strain energy and the shear strain energy (strain energy calculated only by the shearing components) for various diameters of uniform circular pressure distributions. The results are plotted in a logarithmic 2D space spanned by the two parameters.

今回用意したプリミティブは、各受容器が選択的に反応する周波数の刺激を用いており、これにより両受容器の発火比率をコントロールできたことで、知覚される空間的な感覚が変化したと考えられる。

SA-Iが主に反応するS-primitiveでは、歪みエネルギーの比率がせん断歪みエネルギーよりも大きいため、図8で示すように、広い物体の接触感(滑らかな曲面)として知覚された。一方RA-Iが主に反応するR-primitiveでは、鋭いエッジ感のある物体として知覚され、エッジを持った円柱状の物体として知覚されたと考えられる。

これらの対応関係については、パチニ小体の発火を生じないという吸引刺激の特長も含め、今後より詳細な検証が必要である。

7. まとめ

本研究では、新しいプリミティブとして、受容器の時間特性に着目した2自由度のプリミティブを提案した。レギュレータとパルスという異なる駆動方法を組み合わせることで、単一の吸引口により複数自由度の刺激を提示可能なことを示した。そしてそれらの組み合わせにより、中間の感覚(中間のエッジ感)を提示可能なことも確認した。今回提案したように、時間パターンの異なる刺激を提示することで、同一点に安定して複数自由度の刺激を提示可能になり、より多様な触感の提示が可能になると期待される。

参考文献

- [1] 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
- [2] 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.
- [3] Yasutoshi Makino, Naoya Asamura and Hiroyuki Shinoda: "Multi Primitive Tactile Display Based on Suction Pressure Control," *Proc. IEEE 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, (Haptic Symposium 2004)*, pp. 90-96, 2004.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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
- [7] 牧野泰才, 篠田裕之: 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, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 1P1-H-2(1-4), 2004.