

# 歪みエネルギーの選択的制御に基づく触感提示法

## Tactile Display Based on Selective Strain Energy Control

牧野 泰才<sup>1)</sup>, 澤田 清彦<sup>2)</sup>, 篠田 裕之<sup>1)</sup>

Yasutoshi MAKINO, Kiyohiko SAWADA and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学大学院 情報理工学系研究科 システム情報学専攻, 2) 東京大学 工学部 計数工学科  
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {yasutoc, bauer, shino}@alab.t.u-tokyo.ac.jp)

**Abstract:** In this paper we show that the firing ratio of FA I receptors and SA I receptors determines perceived curvature of the touching object when the size of the contact area is smaller than the two-point-discrimination-threshold. In the case of the firing ratio of the FA I to the SA I increases, we first feel a touching object becomes sharper and finally we perceive a pinched feeling. This tactile characteristic was experimentally examined on the palm using suction pressure stimulation and shear stress stimulation by a rotating rod, varying the intensity-change rate temporally.

**Key Words:** Tactile Display, Haptic Interface, Virtual Reality

## 1. はじめに

本研究の目的は、手掌部全体という大面積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。しかし、対象とする部位が大面積であるため、必要な刺激素子の数が膨大になってしまうという問題が生じる。我々はこの問題に対し、“マルチプリミティブ触感提示法”を提案してきた[1]。これは二点弁別閾の間隔に複数自由度の刺激素子(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提示するというものである。手掌部の二点弁別閾は10mm程度であることから、必要となるプリミティブが少数であれば、少ない刺激素子で大面積をカバーできる。

先行研究では刺激の接触曲率に着目し、平面荷重と集中荷重の2刺激をプリミティブとして用いた。そして、これらを組み合わせて提示することで、中間の曲率が再現可能なことを確認した。しかし、知覚される曲率が、刺激の提示速度に依存することも確認された。これは、触覚受容器の感度が、刺激の時間パターンにより変化するためと考えられる。すなわち、“鋭い刺激と滑らかな刺激の組み合わせで任意曲率を再現する”という考え方は、時間パターンまで考慮すると必ずしも正しくない。

本稿では、知覚される鋭さを、触覚受容器の発火のレベルで検証することを目的とする。具体的には、皮膚内部の歪みエネルギー分布に着目し、“メルケル細胞”と“マイスナー小体”が、それぞれ歪みエネルギーと、その中のせん断変形による歪みエネルギーを検出していると仮定した。この仮定のもと、両受容器の発火比率に着目すると、鋭さの知覚によく対応することが確認された。従って、この比率を自在に制御できるようなプリミティブを用意す

れば、触感を幅広く生成できる。

この新たな仮説を検証するため、皮膚表面に回転する刺激素子を接着し、せん断変形のみをコントロールすることで、知覚される鋭さが変化するかを実験した。その結果、仮説から期待される知覚特性が得られたことを示す。

## 2. 先行研究

### 2.1 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、どの程度の密度で配置すれば必要十分であろうか。この問題を我々は“二点弁別閾の領域内(以下、二点弁別領域と呼ぶ)に、何自由度の応力パターンを用意すれば十分であるか”という問題として捉えた。ここで二点弁別閾とは、皮膚に同時に提示された異なる二点を弁別できる最小の距離を示す。また、このとき二点弁別領域内に用意する応力パターンの基底を「プリミティブ」と呼ぶことにする。

従来の一般的な触覚ディスプレイでは、図1(a)のように、デルタ関数状のプリミティブを密に配置することで、空間的に自由度を上げるという手法が取られていた。図に示すように二点弁別領域を $n \times n$ に分割した場合、力の方向まで考えると、二点弁別領域あたり $3n^2$ のアクチュエータを制御しなければならない。

一方、我々が提案してきた“マルチプリミティブ触感提示法”は、図1(b)のように、二点弁別領域内に質の異なる複数自由度のプリミティブを配置するという手法である。このとき適切なプリミティブを選択すれば、はるかに少ない刺激素子で触感空間を網羅できるのではないかと考えている。先行研究[1]では、曲率に着目した2自由度の

プリミティブを用意した。曲率0の極限である平面荷重 (S1) と、曲率 $\infty$ の極限を提示する集中荷重 (S2) の2自由度である。そして、これら2自由度の組み合わせにより、中間の曲率が再現できることを確認した。

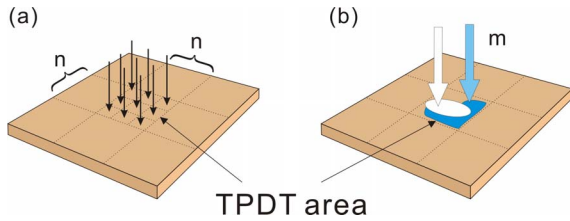


図 1 多様な触感を提示するための2つのアプローチ。(a)空間的に密に刺激素子を配置 (b)二点弁別閾の間隔に複数自由度の刺激(プリミティブ)を配置

## 2.2 吸引圧制御による触感提示

上記、マルチプリミティブ触感提示法は、各プリミティブの強度比により触感が決定されるため、実現のためには安定して強度を制御できる刺激提示法が必要となる。その手法として、我々は“吸引圧制御による触感提示”を用いてきた。この手法は図2に模式的に示すように、皮膚を基板に密着させ、基板に設けた穴より空気を介して皮膚を吸引すると、あたかも押されたような感覚が生じる、という人間の触感特性の発見に基づいている。

この特性は、人間の触覚受容器が応力の正負に感度を持たず、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。実際、吸引と押し込みの両状態における皮下の歪みエネルギー分布を有限要素法により比較した結果、触覚受容器近傍で歪みエネルギー分布がよく一致することも確かめられた。

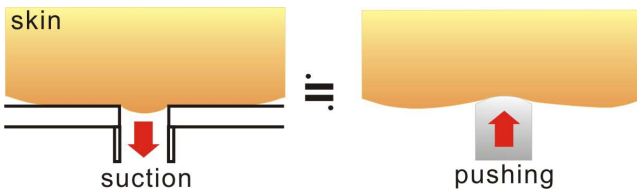


図 2 吸引圧制御による触感提示模式図

吸引刺激を用いる利点は、安定した刺激を提示可能な点である。皮膚の変形が吸引口の内部でのみ生じるため、周囲の刺激素子との干渉がほとんど生じない。また、皮膚表面の変位は異なるにもかかわらず、内部の歪みエネルギー状態を等価にすることで同様な触感を提示できるという点でも、本手法は非常に有用である。これにより触感の生成に重要な因子を検査することが可能となる。

先行研究[2]では、吸引口のサイズ、エッジの固さ、及び吸引の速度を変化させることで、前述のS1、S2という2自由度のプリミティブを表現した。しかしこれらのパラメータは、意図する触感を得られるように経験的に決定したものであり、詳細な検討はなされていなかった。

## 3. 歪みエネルギーに着目した触感の表現

### 3.1 有限要素法による解析

先行研究[2]において当初、知覚される曲率の違いは吸引口のサイズにより決定されると考えていた。しかし実際には、知覚される曲率が、吸引の速度や吸引口のエッジ部分の柔らかさに大きく影響されることが確認された。また、吸引口の直径が大きくなると、圧覚からつねり感に似た違和感へと変化することも確かめられた。

これら特性は、触覚受容器の感度が刺激の時間パターンに依存する点、あるいは受容器ごとに検出物理量が異なる点が要因と考えられる。つまり、曲率という皮膚表面の変形だけでは評価できず、時間特性までを考慮に入れた、受容器の発火のレベルで議論をしなければならないことを示すものである。

触覚受容器は4種類存在するが、細かなテクスチャ感に関しては配置密度の高いメルケル細胞 (SA I)、マイスナー小体 (FA I) によって知覚されると考えられる。従って、両受容器を選択的に刺激するような2自由度のプリミティブを用意するのが最適である。

本稿では、皮膚表面の応力分布により決定される内部のエネルギー状態と、この2受容器の発火とを対応させる。そして、両受容器の感度の時間依存性までも考慮に入れた発火比率により、鋭さが表現されることを示す。

両受容器の時間的な特性についてはよく知られている。SA I は持続的な低周波の刺激に対して感度を持ち、FA I は刺激の速度に対して感度を持つ。FA I の感度は刺激が速いほど上昇する。一方、両受容器が検出している物理量に関しては明確な知見がない。そこで先行研究を参考に、以下の仮定を設けた。

- 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[4]。
- 2) マイスナー小体は、上記エネルギーのうち、せん断変形により生じる歪みエネルギー (以下、せん断歪みエネルギーと呼ぶ) を検出する[5]。
- 3) 両受容器とも、二点弁別領域内の上記エネルギーの総和を検出する。

ここで、2) で言及したせん断変形は、皮膚表面を  $x y$  平面として座標をとった際のせん断変形と定義する。

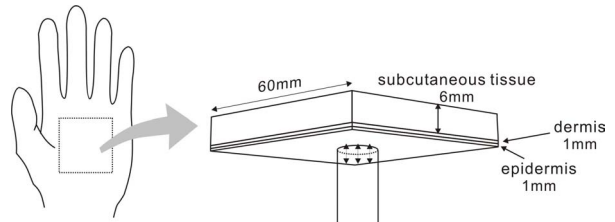


図 3 手掌部の3次元モデル

図3に示すような手掌部の簡便なモデルを作成し、皮膚内部の歪みエネルギーを有限要素法により算出した。吸引に対応する $-30\text{kPa}$ で表皮を吸引したものと、押し込みに対応する $0.3\text{N}$ で表皮を押したものとを用意し、それぞれ表皮

と真皮の境界、直径 8mm の領域内の歪みエネルギーを算出した。この領域は手掌部の二点弁別領域と同程度のサイズである。刺激提示面積を変化させることで、鋭い刺激から大きく滑らかな刺激までをシミュレーションした。

### 3.2 SS Plot (Strain energy – Shear strain energy Plot)

上記の解析を元に得られた、総歪みエネルギーとそのうちのせん断歪みエネルギーの比率を、2次元平面にプロットして評価することを考える。以後この比率を SS 比、このプロットを SS plot と呼ぶ。

図 4 は 0.3N で円柱状の物体を押し込んだ際の SS plot である。図中 45 度の直線が SS 比一定のラインを示す。従って右下の黄色い領域が、実際の棒状物体との接触時に生じる SS 比を表す。この図より、細く鋭い物体のほうがせん断エネルギーの占める割合が多いことが分かる。

図 5 は吸引口の径を変えながら -30kPa で吸引した時の SS plot である。特徴的な点は、押し込みのときとは逆に、吸引口のサイズが大きいほどせん断の影響が大きいことである。

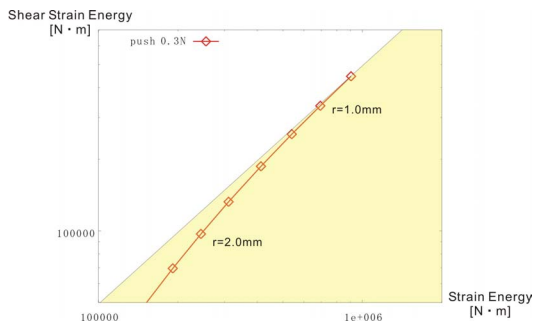


図 4 0.3N での押し込み時の SS plot

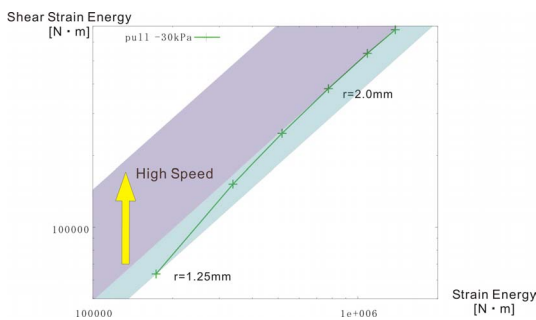


図 5 -30kPa で吸引した際の SS plot

これらプロットは、準静的な解析であるため、各受容器の刺激に対する時間依存性は考慮されていない。しかし、受容器の感度は刺激の速度によって異なるため、知覚される感覚も変化すると考えられる。実際、吸引刺激を提示した際には、速く吸引するほど鋭く感じられた。そこで、時間依存性を SS plot の中で表現することを考える。

速い刺激の場合、SA I の感度はほとんど変化しないが、FA I の感度は数倍上昇することが知られている [3]。この FA I のみの感度上昇を仮想的な SS 比の変化で表現すると、これはせん断エネルギーの影響のみが増えることに対応するので、仮想的 SS 比は SS plot 内の上方向へのシフト

として表現される。それを同一 SS plot 内で示したのが図 5 の濃青部分である。つまり吸引刺激では、図 5 の色の付いた領域の触感を再現可能であると考えられる。

### 3.3 先行研究のプリミティブの検討

図 6 は上記の 2 つの図を重ねて描いたものである。図中緑で示した領域に対応する押し込み感覚を、吸引刺激で表現できるということになる。

このグラフを用いて、先行研究において用いられていたプリミティブを評価した。紙数の都合上詳細は省くが、吸引の速度の影響や、エッジを柔らかくしたことによるせん断エネルギーの低減などを考慮すると、このプロット上での対応関係と、知覚された触感とが非常によく一致することが分かった [6]。また、平面荷重として用いた S1 はより SS 比の小さな刺激であり、逆に集中荷重として用いた S2 は SS 比の大きな刺激であったことも示された。つまり、先行研究で用いた 2 つのプリミティブは SA I と FA I とを、より選択的に刺激していたということが確認された。

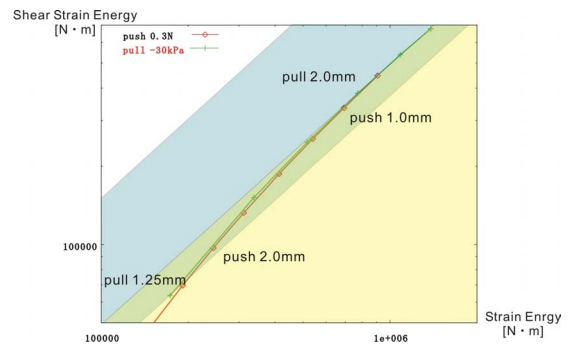


図 6 押し込み刺激と吸引刺激を重ね合わせた SS plot

## 4. 回転子によるマイスナー小体刺激

### 4.1 概略

これまでの議論が正しいのであれば、せん断変形のみが生じるような刺激を加えた場合、FA I をより選択的に刺激できる。このことを検証するために、我々は回転するロッドによって皮膚表面にせん断変形のみを生じさせる刺激を考えた。その際の変形の時間変化率によって、感じる鋭さが変化するかを検証した。

実験系ブロック図を図 7 に示す。手掌部に直径 4mm の円柱状の刺激素子を瞬間接着剤により接着し、それを回転させることにより触感を提示する。回転角と速度はモータにより制御し、速度一定で回転角を変化させた場合と、角度一定で速度を変化させた場合の 2 条件で実験を行った。

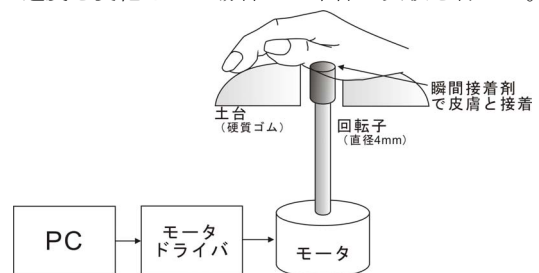


図 7 回転刺激実験系

## 4.2 実験1 回転速度一定

速度一定の条件下では FA I の感度は変化しない。従って SS 比は変化しないまま、歪みエネルギーが増加する。つまり、知覚される刺激の強度が変化すると予想される。そこで、回転速度を 1300 度/s で固定し、ステッピングモータを用い回転角を 7.5 度、15.0 度、22.5 度、30.0 度の 4 段階に変化させた。そのとき知覚される刺激の強度、及び鋭さの評価を行った。

**刺激の強度：**4 種類の刺激のうち 1 つをランダムに参照用刺激として提示し、回転を戻してから再び 1 種類の刺激を比較用刺激として提示。どちらの刺激のほうが強く感じたかあるいは同程度かで評価してもらった。

**刺激の鋭さ：**参照用に接触部の曲率が異なる実際の棒を用意した。右手に回転子による刺激を提示し、左手に提示された参照刺激から同程度の鋭さの物体を選んでもらった。

## 4.3 実験2 回転角度一定

角度一定で速度を変化させた場合、FA I の感度が回転速度に依存することから、仮想的に SS 比が変化し、それに伴い知覚される鋭さが増えることが予想される。実験条件としては、回転角度を 20 度で固定し、回転速度に 1500 度/s、400 度/s、150 度/s の 3 種類用意した。評価方法は実験 1 の鋭さ比較のときと同様に、曲率の異なる参照用刺激との比較を行い、最も近い曲率を持つ参照刺激を選択してもらった。実験 1 は 20 代男性 5 名。実験 2 は 20 代男性 6 名の被験者でそれぞれ実験を行った。

## 5. 結果

### 5.1 回転速度一定

強度比較の実験では、どの角度同士を比較した場合でも回転角度の大きいほうを強いと答える割合が 90% 程度であった。逆に答える被験者はおらず、残りの 10% は、同じ強さと答えたものであった。一方鋭さの比較に関しては、回転角度の違いによる有意な差は得られなかった。この結果は SS plot を元に予想される結果と一致しており、SS plot による評価が妥当であることを示す結果といえる。

### 5.2 回転角度一定

回転角度一定の元、回転速度を変化させたときに知覚された鋭さを、ヒストグラムで示したものが図 8 である。横軸が評価された曲率半径、縦軸がその回答総数を示す。グラフより明らかに、回転速度の違いにより感じられる鋭さが増えていることがわかる。速い刺激（青）が最も鋭い物体として知覚されており、遅い刺激（黄）になるほど知覚される曲率半径は大きい。この知覚される鋭さの違いは、FA I の感度の速度依存性によると考えられ、SS plot から予想される結果と一致している。このように、せん断変形のみが生じる回転刺激で有意な差が得られたということは、少なくともマイスナー小体はせん断変形に感度を持つことを示す結果でもある。

しかし一方で、今回提示した直径 4 mm の円柱では、鋭くても 3 mm 程度にしか感じられなかった。SS plot の仮説で

はより鋭い針のような刺激を提示できるはずであるが、それは困難であった。また今回提示した回転刺激に対し、皮膚と回転子を接着しているにもかかわらず、ザラザラしたテクスチャのある物体の押し込みを感じるという報告が多かった。これらの結果は SS plot を導く際に立てた仮説が不十分であったことを示唆するものである。新たな自由度の導入なども考慮に入れ、今後検討する必要がある。

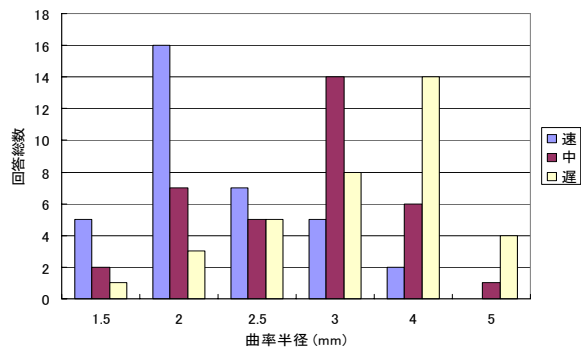


図 8 角度一定で速度を変化させた際の知覚される鋭さ

## 6. まとめ

手掌部全体という大面積を、少ない刺激素子でカバーする手法として、我々は“マルチプリミティブ触感提示法”を提案してきた。本稿では、先行研究で経験的に選択してきた 2 自由度のプリミティブを、歪みエネルギーとせん断歪みエネルギーの比率に着目し評価した。そして、それらがマイスナー小体と、メルケル細胞を選択的に刺激するものであったことを示した。また、マイスナー小体のみを選択的に刺激する手法として回転子による刺激法を提案し、上記評価法で期待される結果を得た。

### 参考文献

- [1] 牧野泰才, 浅村直也, 篠田裕之: 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 7 回大会論文集, pp.243-246, 2003.
- [2] Y. Makino, N. Asamura and H. Shinoda: “A Whole Palm Tactile Display Using Suction Pressure,” *IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp.1524-1529, 2004.
- [3] S.J. Bolanowski, Jr., G.A. Gescheider, R.T. Verrillo and C.M. Checkosky: “Four Channels Mediate the Mechanical Aspects of Touch,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 84, No. 5, pp.1680-1694, 1988.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Y. Makino and H. Shinoda: “Selective Stimulation to Skin Receptors by Suction Pressure Control,” *Proc. SICE2004*, 2004.