

テクスチャ面に対する指表面挙動の観察に関する諸考察

Some Considerations for Method of Observing Finger Skin Displacement on Textured Surface

○金子征太郎（電通大）

梶本 裕之（電通大）

Seitaro KANEKO, The University of Electro-Communications,
kaneko@kaji-lab.jp

Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications,
kajimoto@kaji-lab.jp

Relationship between skin displacement and subjective sensation is indispensable for the design of tactile feeling display. Previous works on the observation of the skin displacement mainly used flat glass plate and a camera. However, the flat glass is not a representative tactile texture that we daily touch. We developed a system that can observe interaction between textured surface and finger skin by using technique known as index matching. In this paper, we report on accuracy of this measurement system and the results of skin deformation measurement using subjects.

Key Words: haptic interface, index matching, optical observation, skin displacement, textured surface

1. はじめに

近年、スマートフォン等の普及によって、平板上における触覚体験をいかに設計するかという課題が重要となっている。もしも私達が日常的に触る「ザラザラ」「ツルツル」などの言葉で表現される触覚（本論文ではテクスチャ感と定義）がスマートフォンの画面上で高品位に提示できれば、例えば商品の手触りを確認しながらオンラインショッピングを行うことが可能になると考えられる。

このテクスチャ感を再現する触覚ディスプレイの研究は多数行われている。多くの触覚ディスプレイは、指全体の振動を記録して再生したり、テクスチャ上における皮膚挙動を物理シミュレーションによって予想し、再現している。しかし、指全体の振動を提示することが、本来分布的な触覚をもつ指の触感の再現に十分であるかは未知数であり、また物理シミュレーションも、テクスチャをなぞったときの実際の皮膚挙動にもとづいておらず、どの程度正確かわからないという課題があった。

こうした課題を解決するためには、実際のテクスチャ面をなぞった際の皮膚の挙動を観察する必要がある。同時に主観的感触も記録することにより、指皮膚表面挙動のどのような特徴が主観的感触と関連しているかを明らかにすることが可能となる。

我々はその最初のステップとして、テクスチャ面をなぞった際の皮膚表面変位を時間的、空間的に高解像度で記録することを可能とする計測系を提案した[1]。通常、透明なテクスチャ面上にある指の表面をテクスチャ面越しに撮影することは屈折率の関係で曇りガラスのようになってしまうため、非常に困難である。そこで、テクスチャを持つ透明物体とほぼ等しい屈折率を持つオイルを利用し、物体をオイル中に沈めることで光学的に透明とする手法を用いる。このテクスチャ面に対して、マーカーを塗布した指でなぞり、ハイスピードカメラで計測することで皮膚表面変位を記録する。これに加え、予備的な実験として、実際の皮膚変形を追尾することができるに関して検討を行った。

しかし、この計測系がどの程度の皮膚変形を認識できるかに関しては明確にされていない。

よって本稿では、計測系全体での精度検証を行った。加えて、皮膚変形と主観的な感触の特徴量を検討するため、複数の被

験者が一次元に彫られた凹凸をなぞった際の皮膚変形を計測し、同時に主観評価を行った。

2. 関連研究

指表面変位の計測は特に触覚ディスプレイの作成のために必要な知見を得るために行われてきた。その多くは、平坦なガラス面とカメラを用いた光学的測定であった。Levesqueら[2]は汗腺のような指表面の特徴点を利用して指表面の挙動を測定した。Sonedaら[3]は、プリズムを用いて指との接触面の測定を行った。類似の光学系は指の湿り度合いと滑りにくさとの関係を測定するために用いられた。

テクスチャ面をなぞった時の指の振動も計測されてきた。Martinotら[4]はザラザラ面をなぞった時の指の振動を加速度センサを利用して計測した。Romanoら[5]は様々なテクスチャ面に対して接触した時の加速度のデータを得た。Satoら[6]は、指側面の変位を用いることにより、指表面変位を測定する手法を提案した。

以上のように触覚に関する数多くの計測研究が行われているものの、テクスチャ面での指表面変位を直接計測することはこれまで殆ど行われなかった。前述のようにLevesqueらは平面ではない面を用いた計測を行っている。しかしこの面における凹凸サイズは比較的大きく、光学的観察を妨げるものではなかった。

3. 計測系

図1に計測系を示す。テクスチャ面越しに皮膚表面変位を計測するため、鏡を用い、水槽の底面が撮影できるようにしている。

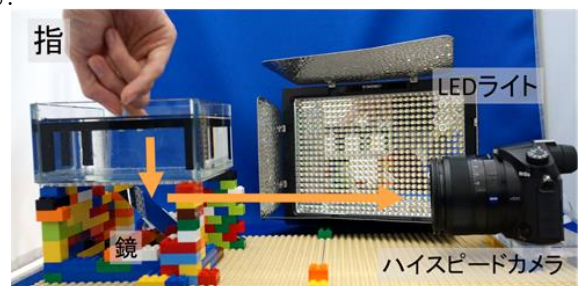


Fig. 1 Measurement system

皮膚変位計測を行う際には画像処理の際に用いるマーカーを2種類装着する。指皮膚表面に対して塗布するマーカーと爪に装着する固定マーカーである。指に塗布するマーカーは、スタンプによって塗布される。これによって皮膚表面変位を計測する。マーカーは10×16の計160個配置され、それぞれの間隔は0.5mm、点の中心間距離は1.0mmである。爪に装着する固定マーカーは、画像処理において、指全体の位置を認識させるために用いる。

マーカーの挙動はハイスピードカメラを用いて解像度1920×1080、1000fpsで測定した(SONY,RX10 II)。LEDライトは指表面の輝度を上げ、高速撮影におけるノイズを低減するために利用した。アクリル板と指表面は屈折率1.485のシリコンオイル(信越シリコン KF-53)の中に沈めて実験をおこなった。アクリル板の屈折率は1.490であるため、ほぼ光学的に消すことが可能である。

マーカーを追尾するための画像処理ソフトウェアはOpenCVを用いて作成した。処理アルゴリズムは、以下の通りである。まず、動画の最初のフレームからマーカー全体が写っている画像を切り出す。この際に、爪に装着した固定マーカーを利用する。この画像から各マーカーの初期位置を記録する。その後、動画の各フレームに対して、初期位置の記録を行ったときと同様に、マーカー全体の画像を切り出す。その後それぞれのマーカーの変位をテンプレートマッチングによって算出する。

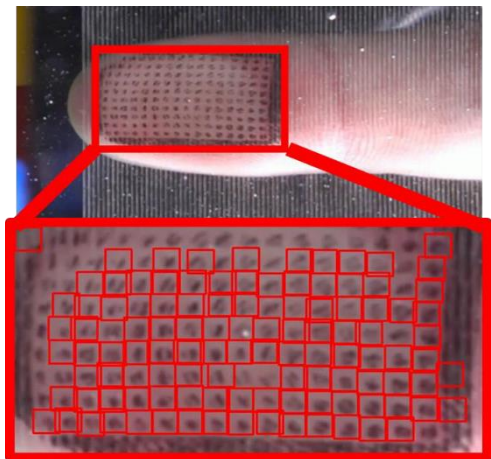


Fig. 2 Measurement Algorithm

4. 実験

3.1 計測系の精度検証

計測系全体のノイズ量を計測するために、耐油紙に印刷したマーカーを油に沈め、カメラによる撮影、及び画像処理を行った。実験に使用したマーカーを図3に示す。このマーカーは、指に塗布するマーカーと同一の寸法で印刷した。

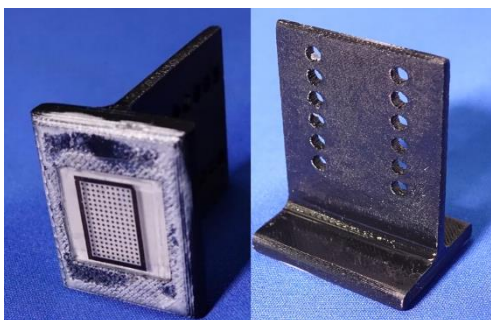


Fig. 3 printed marker

実験はマーカーを移動した状態で行った。移動には、直動リ

ニアアクチュエータ(YAMAHA,T4L)を用いた。マーカーはテクスチャ部分上を50mmの幅で約1.3Hzで左右に移動した。今回使用したテクスチャは、一次元に凹凸が彫られたものを用いた。図4に使用したテクスチャを示す。作製にはアクリル板を用いた。テクスチャ面の寸法は100mm×50mm×3mmで、テクスチャになっている部分の幅は75mmである。このピッチ幅は0.6mmとした。

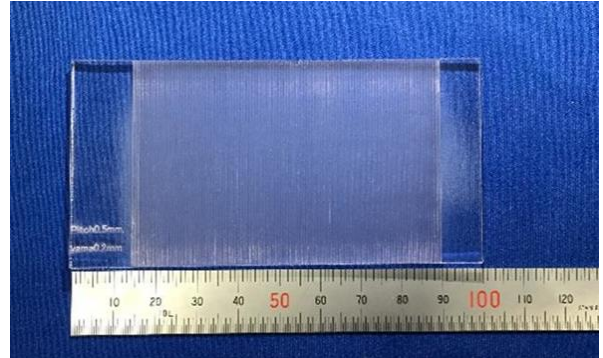


Fig. 4 An example of a textured surface

通常の計測において、指表面はテクスチャに対して密着している。このことを再現するため、印刷したマーカーを上部から押さえつけ、マーカーとテクスチャの間に空間ができないようにした。

この実験では、印刷したマーカーを使用しているため、画像処理プログラム上では、マーカー全体の画像を切り出しても、各々のマーカーは動いていないはずである。もしマーカーが動いていると認識された場合、それはこの計測系が持つノイズと考えられる。

図5に撮影結果の1フレームを示す。これより、マーカーが明確に撮影できていることがわかる。



Fig. 5 A result of marker recognition

この座標変化の一例として、左上0番マーカーのX軸方向変位を図6に示す。この変位の各周期におけるピークトゥピークを平均すると、約20μmであることがわかった。これは、15番マーカーで約20μmの認識誤差があることを示している。すべてのマーカーに対して同様の計算を行うと、平均して約31μmの誤差があることがわかった。つまり、本計測系は31μm以上の皮膚変位に対して有効に機能すると考えら

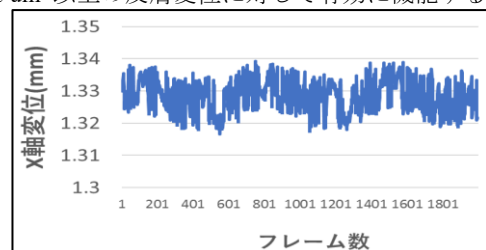


Fig. 6 displacement in X axis direction

れる。

本研究では Pacini 小体が捉えるとされる指全体の振動ではなく、Meissner 小体等で捉えられる指の局所的な振動を計測することを主眼としている（なぜなら指全体の振動は例えば爪の加速度センサによって計測できる）。このため、Meissner 小体の担当する周波数範囲での人間の知覚閾値との比較が重要となる。Miyaoka ら[8]によれば、皮膚の接面方向の振動の閾値は、2.5mm の接触子を用いた局所的な振動の状況で振幅 $1\mu\text{m}$ を 0dB として 4Hz で約 25dB($18\mu\text{m}$)、8Hz で約 17dB($7\mu\text{m}$)、16Hz で約 11dB($3.5\mu\text{m}$)、32Hz で約 3dB($1.4\mu\text{m}$)、50Hz で約 3dB($0.7\mu\text{m}$)、75Hz で約 0dB($1\mu\text{m}$)となっている。つまり今回の計測精度は人間の感覚閾値よりは精度が低いと言える。適切なフィルタリング等の処理で低減できると考えられるが、閾値より悪い計測精度であっても触感の要素はある程度再現できていると考え、以降の実験を行った。

3.2 主観的触感に基づいた異なるテクスチャ上での皮膚挙動に関する予備的な調査

皮膚変形と触感の特徴量を検討するため、予備的に被験者を用いた皮膚表面変位挙動の計測とテクスチャ面に対しての主観的触感評価を行った。本実験では、6枚のテクスチャに対して計測を行った。テクスチャの種類は、一次元に凹凸を作成した5枚とテクスチャが施されていない平板の計6枚準備した。凹凸の幅は、0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7mm の0.1mm刻みで作製した。作製には、3.1と同様、レーザーカッターを用い、テクスチャ面の寸法も同じにした。

テクスチャ面をなぞった際の主観的触感を計測するために、幾つかの形容詞対を用いたビジュアルアナログスケールをもちいた。回答は、それぞれのテクスチャ面をなぞった際の皮膚表面変位を計測した後行った。使用した形容詞対は以下の通りである。

- ・ 平らな—凹凸な
- ・ なめらかな—粗い
- ・ 粘つく—滑る
- ・ 抵抗力のない—抵抗力のある
- ・ 不規則的な—規則的な

これらの形容詞対は、清水ら[7]が抽出した形容詞対から、テクスチャ面に関係が高いとみられる5つを使用した。

被験者には6種類のテクスチャをランダムに提示し、それぞれのテクスチャに対して3回撮影を行った。撮影終了後、主観評価のアンケートを行った。被験者がテクスチャ面をなぞる際には、指全体が面に密着するように指示した。被験者は計6名（男5名、女1名）でおこなった。

図7にテクスチャ面に対する主観評価結果を示す。油中であつたとしても、凹凸の幅が大きくなることで主観的に凹凸を感じることができることがわかる。

この主観評価の中で特に凹凸な、粗いと回答された0.5mmピッチ以上のテクスチャ面において、皮膚の振動が観察された。

この振動がどのようになっているかを明確にするため、指の先端、指腹、付け根側の3つの部位における変位を確認した。図8にグラフを示す。これより、2つのことが分かる。ひとつめに、皮膚の振動は位相ずれがほぼなく、全体的に同一な振動をしていることが分かる、もう一つに指先端における皮膚変位が付け根側に比べて大きいことが分かる。

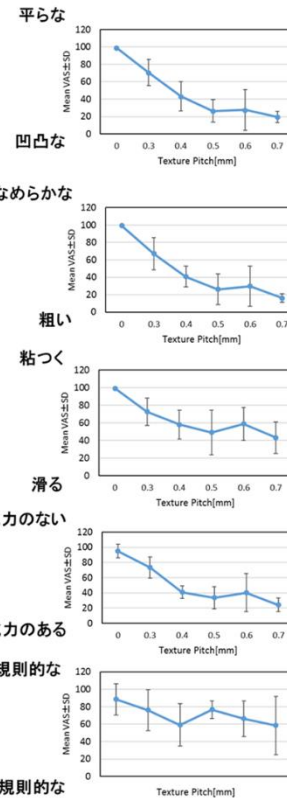


Fig. 7 The result of Subjective Evaluation

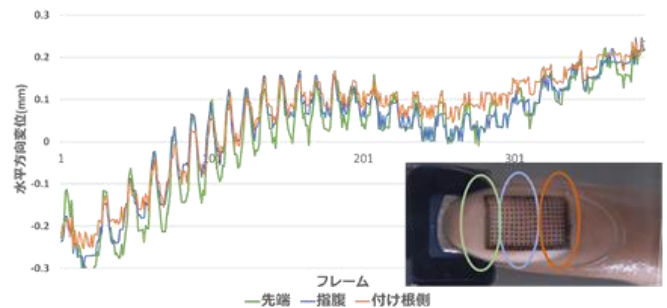


Fig. 8 Finger Surface displacement result

5. おわりに

我々は研究目標を、指がテクスチャ面をなぞった際の皮膚表面変位を時間的、空間的に高解像度で記録することとした。この目標を達成するため、今まで計測されていなかったテクスチャ面上における皮膚表面変位を精度良く計測することを目標とし新たな計測系を作成した。本稿では、作成した計測系の精度検証と複数の被験者を用いて一次元テクスチャ面上における皮膚表面変位の予備的な計測を行った。精度計測の結果、約 $30\mu\text{m}$ 以上の皮膚変位を計測することが可能であることがわかった。また、皮膚表面変位と予備的な計測の結果、皮膚は全体的に同一な振動をしていることがわかった。また、振動の振幅は指腹より指先端のほうが大きいことがわかった。

今後は、計測系の精度向上を行うことを目標として改善を行う予定である。また、一次元テクスチャだけではなく、ドット面などに対しても計測を行っていききたい。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 15H05923 (新学術領域研究「多物質感知」) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] K. Kaneko, S., Kajimoto, H.: "Method of Observing Finger Skin Displacement on a Textured Surface Using Index Matching." In: Haptics: Perception, De-vices, Control, and Applications: 10th International Conference, EuroHaptics 2016, London, UK, July 4-7, 2016, Proceedings, Part II., pp. 147-155. Springer International Publishing, 2016
- [2] V. Levesque and V. Hayward, "Experimental Evidence of Lateral Skin Strain During Tactile Exploration," In *Proc. Of Eurohaptics*, Ireland., 2003
- [3] T. Soneda and K. Nakano, "Investigation of vibrotactile sensation of human fingerpads by observation of contact zones," *Tribology International*, vol. 43, no. 1-2, pp. 210-217, January 2010.
- [4] F. Martinot, A. Houzefa, M. Biet, and C. Chaillou, "Mechanical Responses of the Fingerpad and Distal Phalanx to Friction of a Grooved Surface: Effect of the Contact Angle," In *Proc. Of VR '06 Proceedings of the IEEE conference on Virtual Reality*, VIRGINIA, USA, p. 99., 2006
- [5] J. M. Romano and K. J. Kuchenbecker, "Creating Realistic Virtual Textures from Contact Acceleration Data," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 5, no. 2, pp. 109-119, 2012
- [6] S. Sato, S. Okamoto, Y. Matuura, and Y. Yamada, "Wearable finger pad sensor for tactile textures using," In *Proc. Of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Hong Kong, pp. 893-896., 2015
- [7] 清水 祐一郎, 土斐崎 龍一, 鍵谷 龍樹, 坂本 真樹, "ユーザの感性的印象に適合したオノマトペを生成するシステム," *人工知能学会論文誌*, 第 30 卷, 第 1 号, pp. 319-330, 2015.
- [8] T. Miyaoka, "Mechanoreceptive mechanisms to determine the shape of the detection-threshold curve presenting tangential vibrations on human glabrous skin." *Proceedings of the 21st annual meeting of the international society for psychophysics*. Vol. 21. 2005.