

インデックスマッチングを用いたテクスチャ面に対する 指表面変位の測定手法

Method of Observing Finger Skin Displacement on a Textured Surface Using Index Matching

○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. The textured plate is immersed in the oil with the same refractive index, so that the texture became invisible. The finger skin is printed with markers, and its movement is analyzed by image processing. We also show a preliminary result of the observation when finger strokes on 0.5 mm interval grating.

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

1. はじめに

触覚ディスプレイの開発にあたり、現実的な触覚を想起させるために、指表面の変位とそれによって想起される触覚の関係を明らかにすることは重要である。これまでこの関係を明らかにするために、平面ガラスとハイスピードカメラを用いた指表面の皮膚変位をとる研究が多数行われてきた。しかしガラス平面は（少なくとも近代までは）我々が日常的に触る典型的な対象物ではなく、我々はより接触頻度の高い、「ザラザラ」等の言葉で表現される表面に触れた時にどのような皮膚変位を生じるのかを観察する必要がある。Levesqueらは、凹凸のついたガラス面に対する皮膚変位を観察するシステムを提案している。[1]しかしながら、この凹凸は光学的な観察を妨げない程度に大きな形状の特徴であり、たとえば紙やすりのようなテクスチャを持ったガラス表面に対しては、光学的に皮膚表面変位を撮影することは不可能である。

この問題を解決するために、我々はインデックスマッチングと呼ばれる手法を用いる。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により、細かい凹凸が存在していたとしても、テクスチャは物体とともに光学的に透明となる。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、その変位をハイスピードカメラで計測することで、テクスチャ面と指皮膚の変位との関係を調べることが可能となる。

2. 関連研究

テクスチャ面に関する触覚知覚の過程は以下のとおりである。まず、皮膚表面変位がテクスチャ面によってもたらされる。その後、機械受容器が発火し、我々の脳に触覚知覚をもたらす。これらの過程を明らかにするために様々な研究が行われてきた。

テクスチャ面から機械受容器の活動への写像を明らかにすることを目的として、多くの神経活動記録に関する研究が行われてきた。LaMotteら[2]とSrinivasanら[3]は平面、点が打たれた面、線が打たれた面の三種類に対して、猿の指がそれらの面をなぞった時にSAとRA受容器の神経活動を読み取る実験を行った。Connorら[4][5]は、点が行列上に並べられた面

でのSA、RA受容器の活動を測定し、ザラザラ面の細かさと機械受容器の活動との関係性を明らかにした。

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[1]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[6]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。こうした光学的計測はヒューマンインターフェースの技術としても用いられており、Kuritaら[7]は、指の加える力と方向を確定させるために指の接触部分を用い、Holzら[8]は、それぞれの指を特定するために、指紋の計測を用いた。

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[9]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[10]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[11]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. システム構成

3.1 原理

テクスチャ面をもつ透明物体を透過して観察することは通常極めて難しい。なぜなら、透明物体の屈折率が空間の屈折率と異なっているからである(図1)。もしテクスチャ面の表面構造が厳密にわかっていたら、撮影された画像からテクスチャ面を持つ透明物体の影響を排除することは可能である。しかしこれは一般に非常に難しく、乱雑なテクスチャ面であればほとんど不可能である。

我々はこの課題を解決するために、インデックスマッチン

グを用いる。インデックスマッチングは流体力学の分野でよく用いられる光学的テクニックである。透明な物体を同じ屈折率を持つ液体の中に沈めることにより、沈めた物体を光学的に不可視とすることが出来る。我々の場合、テクスチャ面をもつ板を液体の中に沈めることにより、板表面のテクスチャにかかわらず正確に指表面の皮膚を観察することを可能とする。

上記の方法では、屈折率を正確に合わせる事が重要である。我々は屈折率のズレの許容範囲をシミュレーションにより求めた。今回、テクスチャ面には屈折率 1.490 のアクリル板を用いた。アクリル板を用いる理由としては、レーザーカッターで自在に凹凸を掘ることが可能であり、安価であるからである。

図 1 は 60 度で 0.2mm の尖った凸面での状態を示している。図 2 は液体の屈折率を変えた時の指表面に塗られたマーカのズレを示したものである。これによると、液体の屈折率が 1.485 から 1.495 の間にあれば、0.001mm 以下のズレで抑えることが出来ることがわかる。これは、人間の振動知覚閾値を考えば妥当な数値であるといえる。

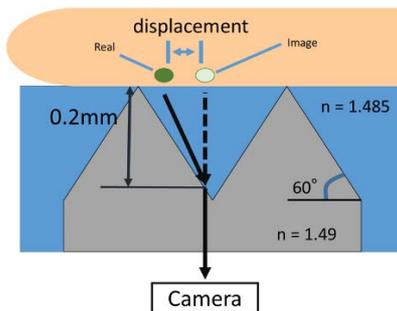


Fig. 1 Displacement of a marker image by surface texture

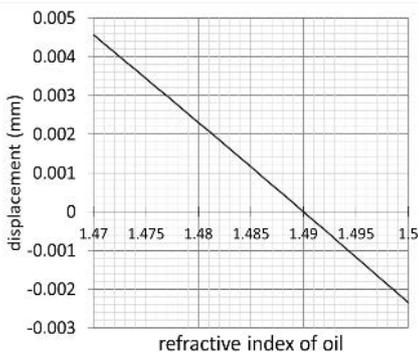


Fig. 2 Relationship between refractive index of oil and displacement

3.2 ハードウェア

図 3 と図 4 は実験機材を示している。指の表面に、防水インクでマーカ (10×16, それぞれの間隔は 0.5mm, 点の中心間距離は 1.0mm) を塗布する。今回実験に用いたアクリル板には、0.5mm 間隔で凹凸をつけ、深さを 0.125mm にした。この凹凸は、レーザーカッターによって作成した。また、この間隔と深さの測定には、3D 顕微鏡を用いた(Keyence VR-3000)(図 5,6)。マーカ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。



Fig. 3 Photograph of the experimental setup

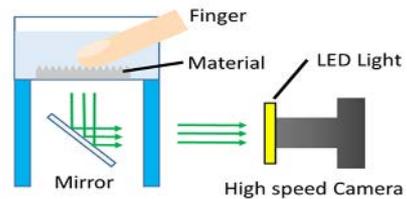


Fig. 4 Overview of the experimental setup



Fig. 5 Rough surface image

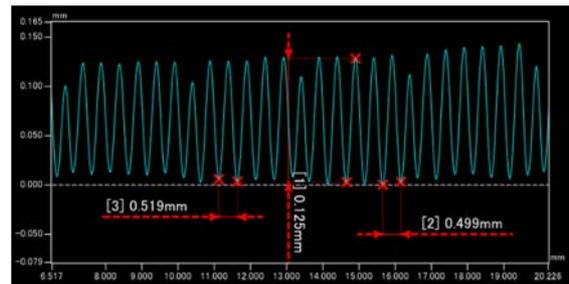


Fig. 6 Cross-sectional view of the rough surface

3.3 ソフトウェア

図 7 は画像処理プログラムのフローチャートである。今回のプログラム作成では、OpenCV(<http://opencv.org>)を用い、言語は Python で記述した。このソフトウェアは指表面のマーカの位置を認識し、測定するために作成した。まず基準となる 2 つの画像を撮影した動画内から手作業で取得する。(図 10)一つはマーカすべてが表示されている四角い画像である。これを指テンプレートと呼ぶ。もう一つはある一つのマーカ

のみが表示された画像である。これをマーカーテンプレートと呼ぶ。まず、指テンプレートを用いて、指の場所をテンプレートマッチングにより確定させる。その後マーカーテンプレートを用いてテンプレートマッチングを行い、大まかな場所を認識させる。その後各フレームに対して相互相関関数を計算し、サブピクセルのマーカーのズレを計算する。これによって計算できる流れ場を矢印を用いて示す。(図 11)

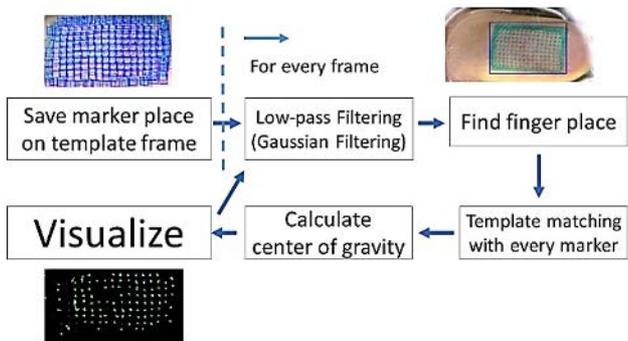


Fig. 7 Image processing flow



Fig. 8 One frame of the video. Contrast was increased by 10%.



Fig. 9 The picture of finger without oil

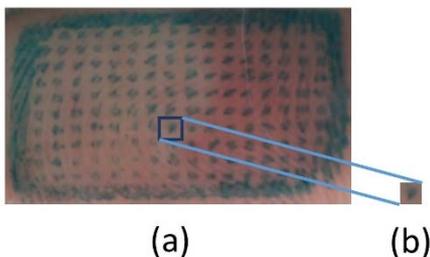


Fig. 10 Example of (a) the finger template and (b) marker template

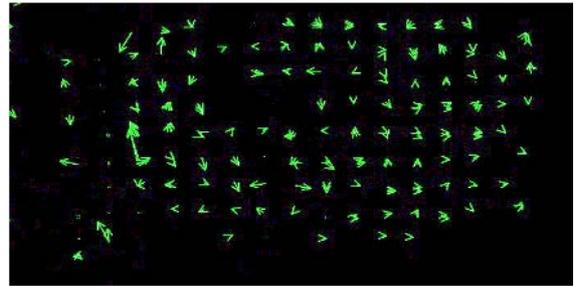


Fig. 11 Example of the flow field

4. 実験結果

図 12 は高速カメラによって得られた各フレームである。この画像より、インデックスマッチングによって指のマーカーが歪みなく綺麗に観察できていることがわかる。それぞれのマーカーを見ると、指先端部分で小さな変位を観察することができた。これは、指の付け根の方がしっかりとザラザラ面に接触できていなかったことが原因として考えられる。次に、画像処理の結果を示す。図 13 はそれぞれのマーカーのラベル付けされた結果を示している。図 14 は指座標系でのマーカーの挙動を示している。この挙動には、3 フレーム単位での平滑化処理がなされている。

結果、66Hz での振動が 0.031 秒から 0.0121 秒の間で観測された。これは、一種のスティックスリップ現象ではないかと考えられる。

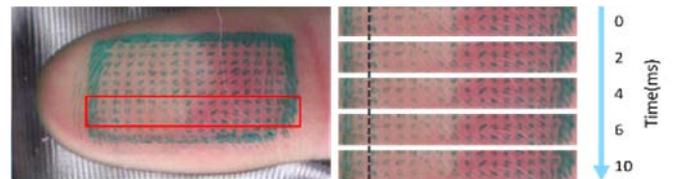


Fig. 12 Continuous photographs of the finger marker

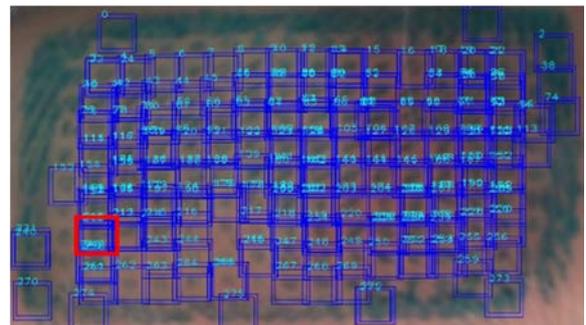


Fig. 13 Result of finger marker detection

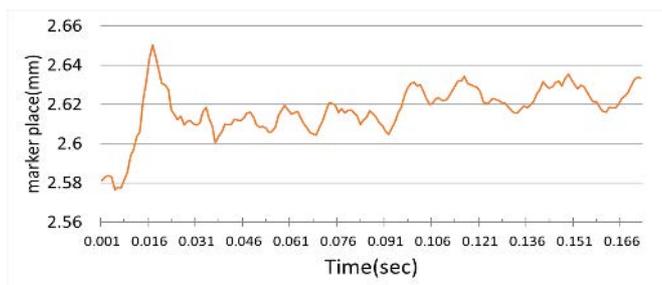


Fig. 14 Movement of one marker relative to the finger coordinates

5. おわりに

テクスチャ面をなぞった時の指の空間的・時間的挙動を観測するために、我々はインデックスマッチングと呼ばれる方法を利用した。まずシミュレーションによりオイルとテクスチャ面の屈折率が0.005未満のズレであれば、人間の受容器のしきい値を考えれば許容できる範囲であることをシミュレーションにより示した。これに基づき、計測系を構築し、実際の計測例を示した。

本計測系において一つ考えられる問題点として、オイルの中に指を入れて実験しているため、通常我々が感じるテクスチャの感覚とは多少なりとも異なるのではないかという疑問がある。しかし我々のアプローチの目標は面の形状と触覚との関連性を明らかにするものではなく、あくまで指表面変位と触覚との関連性を明確とすることを目的としたものである。なぜなら、指を変位させ、触覚を提示する触覚ディスプレイでは、後者の関係性のほうが重要であるからである。したがってオイルを利用することは、これらの議論より問題では無いことがわかる。

我々の次のステップは画像処理でのノイズの量を画像フィルタや、さらに綺麗なマーカーを利用することによって低減することである。また、様々なテクスチャ面、例えば平面や凹凸、柔らかい材質や硬い材質での指表面変位の計測が課題となってくる。加えて、指表面変位と触覚との関係性を明らかにするために、これらの計測での主観的評価を行う。

引用文献

- [1] V. Levesque and V. Hayward, "Experimental Evidence of Lateral Skin Strain During Tactile Exploration," In *Proc. Of Eurohaptics*, Ireland., 2003
- [2] R. H. LaMotte and M. A. Srinivasan, "Tactile Discrimination of Shape: Responses of Slowly Adapting Mechanoreceptive Afferents to a Step Stroked Across the Monkey Fingerpad," *The Journal of Neuroscience*, vol. 7, no. 6, pp. 1655-1671, June 1987.
- [3] M.A.Srinivasan, J.M.Whitehouse, and R.H.LaMotte, "Tactile Detection of Slip: Surface Microgeometry and Peripheral Neural Codes," *Journal of Neurophysiology*, vol. 63, no. 6, pp. 1323-32, June 1990.
- [4] C. E. Connor and K. O. Johnson, "Neural Coding of Tactile Texture," *The Journal of Neuroscience*, vol. 12, no. 9, pp. 3414-3426, September 1992.
- [5] C. E. Connor, S. S. Hsiao, J. R. Phillips, and K. O. Johnson, "Tactile roughness: neural codes that account for psychophysical magnitude estimates.," *The Journal of neuroscience*, vol. 10, no. 12, pp. 3823-3836, December 1990.
- [6] 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.
- [7] Y. Kurita, A. Ikeda, J. Ueda, and T. Ogasawara, "A Fingerprint Pointing Device Utilizing the Deformation of the Fingertip during the Incipient Slip," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 5, pp. 801 - 811., November 2005.
- [8] C. Holz and P. Baudisch, "Fiberio: A Touchscreen that Senses Fingerprints," In *Proc. Of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, ST ANDREWS, UK, pp. 41-50., 2013
- [9] 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
- [10] 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.
- [11] 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
- [12] Y. A. Hassan and E.E. Dominguez-Ontiveros, "Flow visualization in a pebble bed reactor experiment using PIV and refractive index matching techniques," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238, no. 11, pp. 3080-3085, November 2008.
- [13] T. Iwamoto and H. Shimoda, "Estimation of the Deformation of the Skin Using Finger Vein Image," In *Proc. Of SICE SI2007*, Hiroshima, pp. 503-504., 2007
- [14] R. Budwig, "Refractive index matching methods for liquid flow investigations," *Experiments in Fluids*, vol. 17, no. 5, pp. 350-355, August 1994.
- [15] M. J. Adams et al., "Finger pad friction and its role in grip and touch," *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 10, no. 80, December 2013.
- [16] L. A. Jones and S. J. Lederman, *Human Hand Function*, 1st ed. USA: Oxford University Press, 2006.