



一次元凹凸面なぞり時の時空間皮膚ひずみの計測

金子征太郎¹⁾²⁾, 梶本裕之¹⁾

1) 電気通信大学 (〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {kameoka・kaneko}@kaji-lab.jp)

2) 日本学術振興会 (〒 102-0083 東京都千代田区麹町 5-3-1)

概要: 触覚ディスプレイ上における高品質な触感提示には実物をなぞった際の指腹の時空間的な変化から提示信号を生成することが重要である。本研究では複数の波長を持つ一次元凹凸面をなぞった際の皮膚変形計測を行い、テクスチャの形状変化に依存して変化する皮膚ひずみパターンを解析、抽出する。

キーワード: 皮膚計測, 一次元凹凸面

1. はじめに

触覚ディスプレイには多数の方式が提案されているが、現実の物体に触れたときのような写実的な触感を再現するには、触覚ディスプレイを駆動する信号をレンダリングする手法を考慮する必要がある。ここで、触覚ディスプレイの多くが「物体に触れた際に生じる皮膚変形を再現している」という考えに基づくなら、物体に触れたときの時空間的な皮膚変形を計測することは触覚ディスプレイの設計に必須であると言える。

この時空間的な皮膚変形を調査するにあたって直接カメラを用いて物体接触・なぞり時の皮膚変位が観測されてきた。例えば平板上 [1, 2] や 2mm 幅を持つなだらかな凹凸面上をなぞった際の観測 [3] が行われており、結果、空間的な局所ひずみが発生していることを示している。また、複数の凹凸面に対して指を押し付けた際の観測 [4] が行われており、主観的な粗さ知覚と静的な皮膚変形量の間には強い相関があることを示している。ただし、2mm 未満の凹凸面上を動的になぞった際の皮膚計測は光学的な観察が阻害される問題があった。

我々は先ごろ、より細かなテクスチャ面上における時空間的な皮膚変形計測を可能にする装置を作成した [5, 6]。これはアクリル面上に彫られた細かなテクスチャに対する皮膚変形計測を油中で実施することによりテクスチャ越しの皮膚の光学的観察を明瞭に可能とするものである。本論文では作成した装置を使用し、 $\lambda=0.6\text{-}4.0\text{mm}$ までの一次元凹凸を一方になぞった際、皮膚ひずみがどのように表れ出るか観察を行う。加えて主観的な粗さ知覚に関しても計測を行い、物体なぞり時の皮膚ひずみ量と粗さ知覚の間に相関関係があるかに関して調査を行う。

2. 関連研究

テクスチャ面に関する触知覚のプロセスに関わる要因は以下のようにまとめられる。すなわち 1) テクスチャ形状、摩擦係数などの物理的性質、2) テクスチャ接触による皮膚変形、3) 変形による指先の受容器活動、4) 神経、脳による高次認知、である。

テクスチャ接触時の神経活動記録に関する研究 [7] はテクスチャ表面から皮膚変形による指先の受容器活動の関係性を明らかにしてきたものであるから、1) と 3) の関係性に関して主に扱ってきている。例えば Weber ら [8] は複数のテクスチャをなぞった際の神経活動を記録することにより、各受容器がテクスチャ弁別にあたりどのような役割分担を行うかに関して議論している。またテクスチャ接触時の主観的な粗さ知覚に関する研究 [9] は 1) と 4) の関係性に関して扱っている。主にこのような研究は単純な一次元凹凸やドット面上をなぞった際の粗さ知覚変化に関して計測をおこなっており、その間には非常に高い相関があることが示されている。

一方我々が触覚ディスプレイを設計・使用する際には、望んだ触感を提示するために必要な皮膚変形を発生させる必要がある。つまりこれらの研究は 2) 皮膚変形と 3) 神経活動、並びに 4) 高次認知のプロセスを調査している事となる。これまでに様々な触感提示手法が提案されているが、その中でも近年では静電気力による摩擦係数変化 [10] や水平方向振動による触感提示ディスプレイなど、水平変位による触感提示手法 [11] をあげることができる。

以上まとめたように、対象物に接触した際の皮膚変形を直接観察することは、触覚ディスプレイによる触感提示だけでなく、神経生理学、心理物理学のギャップを埋めることから重要性が高い。もし物体接触時の皮膚変形が未知である場合、粗さ知覚及び受容器発火がどのような皮膚変形に基づいて行われるのか明らかにできず、また触覚ディスプレイの設計要件を明らかにすることも困難となる。

これまでに行われている時空間的な皮膚変形計測はカメラを用いた直接的な観測が主に行われている。Delhaye ら [1, 2] は平板なぞり時の指先皮膚の接触面積変化、及び空間的ひずみの計測を行っている。Bochereau ら [12] はテクスチャ接触時の界面力を再現した状態での皮膚変位を捉えるシステムを作成した。Li ら [13] は弾性物体に接触した際の指表面変位をステレオカメラによって撮影した。Levesque ら [3] は汗腺や指紋内に存在する特徴点を元とする計測手法を提案し、実際に平面、大きな凸面、凹面の 3 種類に対して

皮膚変形計測挙動の測定を行った。また Okamoto ら [4] は複数の凹凸面に接触した際の皮膚変位を横から撮像し、主観的な粗さ知覚との関係を明らかにした。また、こうした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、例えば、Kurita ら [14] 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 [15] は、それぞれの指を特定するために、指紋の計測を用いている。ただしこれまで我々が作成した計測系を除き、粗いテクスチャ面上での指表面変位を直接計測することは行われてこなかった。

3. 実験

3.1 被験者

11人の大学の学生が本実験に参加した（男性9名、女性2名、22-25歳）。1名の左利きを除いて全員が右利きであった。実験前にインフォームド・コンセントを確認した。また触覚障害を持たないことを事前に確認した。

3.2 装置

実験装置の構成、及び実際に撮影される映像を Fig.1,2 に示す。先行研究 [5, 6] と同様に透明アクリル製のテクスチャをアクリルとほぼ同一の屈折率を持つオイル（信越シリコン、KF-53、屈折率 1.485）に浸した状態で計測を行う。これによりテクスチャの凹凸形状に左右されずに皮膚をテクスチャ越しに鮮明に撮影することができる。顕微鏡により拡大された映像をハイスピードカメラ（SONY, DSC-RX0, 1920x1080）によって撮影する。撮影速度は 960fps であり、1mm あたり 64pixel の解像度であることが事前の計測で判明している。テクスチャ板はなめらかに動作するスライド上に載せられ、直動リニアアクチュエータ（T4L, YAMAHA）によって駆動された。水槽下部には4つのロードセル（SC616C, Sensor and Control Company Limited）が装着されている。試料に対して指を押し付けた際の押下力はそれぞれのロードセルにかかった荷重の合計値から計算される。ロードセルの電圧変化は 500Hz カットオフ周波数を持つローパスフィルタをかけた後 12bit AD コンバータに入力されそのデータは PC 上で記録された。計測周波数は 1kHz であった。計測を行う前に水槽分の荷重を計測することでキャリブレーションを行った。後述するマーカートラッキングの際指紋部分のコントラストを高める必要があったため、計測前に指先全体にインクを塗布した。

3.3 使用刺激

実験テクスチャは一次元凹凸を持ち、それぞれの波長は $\lambda = 0.6, 1.0, 2.0, 4.0$ の4種類である (Fig.3)。凸幅及び凹幅は波長の半分であり、それぞれの凸高さは 0.14, 0.23, 0.18, 0.26mm である。これらのテクスチャは厚み 5mm のアクリル板をレーザーカッターを用いて加工することで作成された。アクリルの屈折率は 1.49 であり、計測時に使用しているシリコンオイルの屈折率とおおよそ一致する。

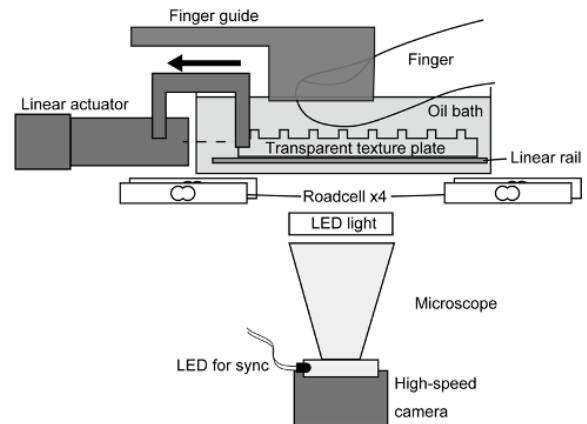


図 1: 実験装置概要図。

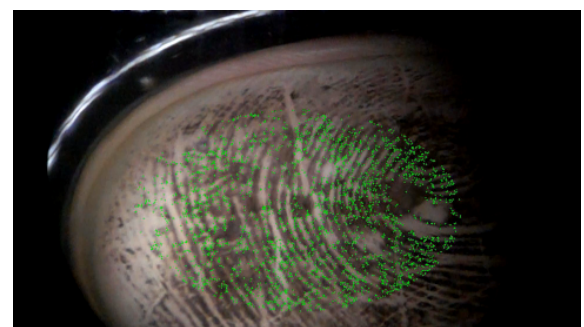


図 2: カメラによって得られた指先映像。緑色の点は画像処理によって抽出された特徴量を示す。

3.4 実験手続き

各試行時に、まず被験者は指ガイドに沿って右手人差し指をテクスチャに接触した。この際被験者は視覚的に表示

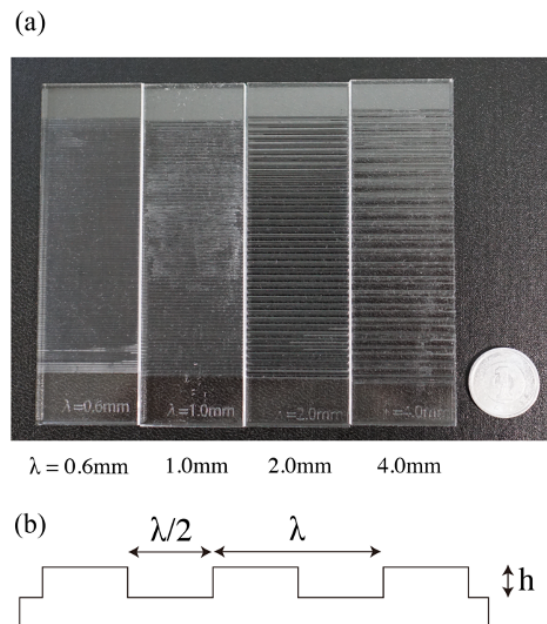


図 3: (a) 実験資料。アクリル板をレーザーカッターで加工することで作成された。(b) テクスチャ波長と凸高さの概念図。凸幅と凹幅はテクスチャの波長の半分とする。

された押下力を確認しながら 300gf になるよう被験者自ら調整を行った。その後、カメラ、直動リニアアクチュエータ、各種センサを同期的に駆動し指先の撮影、及びデータ記録を行った。駆動する時間は 1.5 秒間であった。なお、テクスチャは 20mm の距離を一定の速度 30mm/s で移動した。この距離は指先全体が完全なスリップ状態になることを確実にしている [2]。

総試行数は 1 被験者あたり 12 回 (= 4 テクスチャ × 3 回繰り返し) だった。テクスチャの提示順はランダムに行った。実験全体にはおよそ 50 分程度の時間を要した。

3.5 画像解析

指先の皮膚ひずみ計算方法は主に Delhay らの手法 [1] を参考とした。以下では本論文で使用した解析方法に関して示す。指先の皮膚ひずみの空間的変化の取得はコンピュータビジョン技術の一つであるオプティカルフローを用いて取得した。まず撮像されたカラー画像をモノクロにし、計測対象となる領域を手動で設定した。次に追跡するための点を Shi & Tomasi [16] の手法を用いて算出した。このときトラッキング点の決定はセンサ記録が開始されたフレームにおいて行われた。その後点群のトラッキングを Lucas & Kanade's algorithm [17, 18] を用いて行った。これによりサブピクセル精度でのトラッキングが可能となる。

トラッキング点を決定したフレームにおいて、特徴点を用いたデレネー三角形分割を計算した。この分割に基づき、初期フレームを基準とした各フレームにおけるグリーンラグランジュひずみを計算した。その後高周波ノイズを除去するため、各点のひずみ変化に対してカットオフ周波数 30Hz の FIR フィルタを適用した。本稿では凹凸に対して垂直方向となる X 軸（指長軸）方向ひずみのみを抽出することとする。各メッシュ上に配置されたひずみ量を再度直交座標系上に補完して配置する。その後初期せん断変化を除くために連続する 2 フレーム間のひずみ変化を全フレームに対して計算した。Y 軸（指短軸）方向にひずみの平均を取り各フレームごとの 1 次元的なひずみ変化を抽出した後、その二乗平均平方根を計算した。これらの特徴点トラッキング、ひずみ計算はすべて Matlab(Matlab 2019b, The MathWorks, Inc., USA) を用いて行われた。なお解析途中でトラッキング不能点が 1 つ以上現れた動画は今回の解析から除外した。結果 102 動画が処理の対象となった。

4. 結果

4 種のテクスチャ上における X 軸方向ひずみのフレーム間変化の一例を Fig. 4 に示す。図左側は $t = 0.50s$ のときのひずみの空間的な変化を表し、右側は Y 軸（指短軸）方向のひずみを平均したものを示す。横軸は X 軸（指長軸）方向の位置、縦軸は X 軸方向ひずみのフレーム間変化を表す。時間的な変化を説明するために 0.50s と 0.52s 時の空間的ひずみ量を表す。この結果から、0.6-4.0mm 波長の矩形テクスチャを皮膚がなぞった場合、テクスチャ波長とほぼ同一の波長で縞状に X 軸方向ひずみが発生することがわかる。加

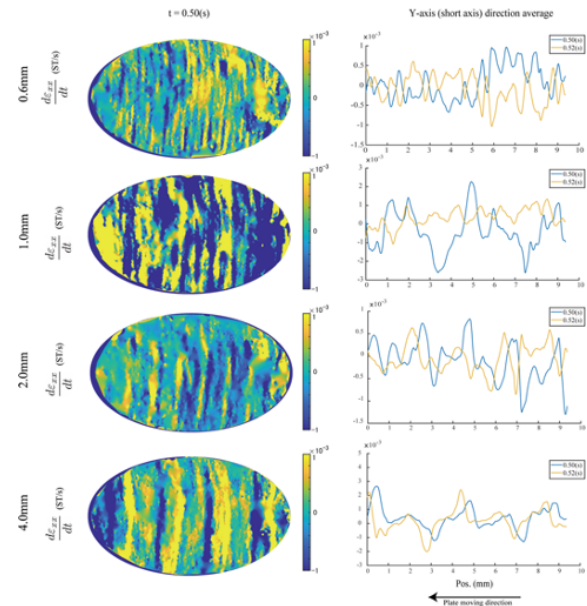


図 4: 被験者 H.A の皮膚ひずみのフレーム間差分。上からテクスチャ波長ごとの変化を表す。(左) 4 種のテクスチャをなぞった際のひずみ変化量 ($t=0.50s$) をヒートマップとして図示している。(右) Y 軸方向にひずみ平均をとった結果。グラフ間の時間差は 0.02s である。

えて時間的経過に伴って波形は変化せずに位相のみがずれていくことがわかる。また 0.02s での波形の移動量およそ 0.6mm は板の移動速度 30mm/s と同一の速度であることから、板凸部の移動と波形の位相ズレが符合していることが見て取れる。

5. 考察

我々はグループを持つ 4 種の凹凸面上をそれぞれなぞった際の皮膚の局所ひずみをハイスピードカメラによって撮影し、その際の主観的粗さの計測を行った。結果、テクスチャ波長とほぼ同一波長で X 軸方向ひずみが局所的に発生していることが観測され、ひずみの空間的変化は板が動く速度と同一であることが示された。このように空間的なひずみが生じる結果は静的に押し付けた場合の皮膚変形と同様の結果になっている [4]。また神経学的な研究は非常に粗い (Coarse) テクスチャは空間的な神経コーディングがなされることを示しており [8]、本実験結果は皮膚ひずみの側面からこの仮説をサポートしている。また指先上での 2 点弁別閾である 2mm 以下の波長を持つテクスチャ上においても空間的に同一パターンでひずんでいることは注目に値する。

本研究ではグループの波長が 0.5mm 未満のテクスチャに対しての計測結果を含んでいなかった。これはレーザーカッターによるテクスチャ作成に限界があったためである。したがって、将来的にはアクリル樹脂とモールド型を用いたより細かなテクスチャ作成を行い計測の実施が必要である。また一次元的な凹凸だけでなく、二次元的なパターン (例えば点字パターン、紙やすりなどの粗い面) に対しての計測を行ってゆく必要がある。最後に、ここで得られた皮膚

歪みパターンを再現することによって同等の粗さ知覚が得られるかどうかに関して検証を行ってゆく必要があると考える。

6. おわりに

本稿では、我々が作成したテクスチャ面上における皮膚変形計測装置を用いて、 $\lambda=0.6\text{--}4.0\text{mm}$ までの一次元凹凸を一方向になぞった際、皮膚ひずみがどのように表れ出るか観察を行った。結果、空間的にテクスチャ波長と同一波長で皮膚ひずみが発生し、板の移動に伴って同速度でひずみ発生位置が変化していくことが判明した。今後はより大量のテクスチャサンプルに対する皮膚変形記録、および主観的な報告との対応付を行い、触覚ディスプレイ上にて希望の触感を生成するための要件を明らかにする。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP15H05923, JP20J23128 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] B. Delhaye, A. Barrea, B.B. Edin, P. Lefevre, and J.L. Thonnard, “Surface strain measurements of fingertip skin under shearing,” *J. R. Soc. Interface*, vol. 13, no. 115, pp. 20150874, Feb. 2016.
- [2] B. Delhaye, P. Lefevre, and J.L. Thonnard, J. L., “Dynamics of fingertip contact during the onset of tangential slip,” *J. R. Soc. Interface*, vol. 11, no. 100, pp. 20140698, Nov. 2014.
- [3] V. Levesque and V. Hayward, “Experimental evidence of lateral skin strain during tactile exploration,” in *Eurohaptics*, vol. 2003, pp. 261–275, Jul. 2003.
- [4] S. Okamoto and A. Oishi, “Relationship between spatial variations in static skin deformation and perceived roughness of macroscopic surfaces,” *IEEE Trans. Haptics.*, vol. 13, no. 1, pp. 66–72, Jan. 2020.
- [5] S. Kaneko and H. Kajimoto, H., “Measurement System for Finger Skin Displacement on a Textured Surface Using Index Matching,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 12, pp. 4184, Jan. 2020.
- [6] S. Kaneko and H. Kajimoto, “Method of observing finger skin displacement on a textured surface using index matching,” in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, Springer, Cham, Jul. 2016, pp. 147–155.
- [7] C.E. Connor and K.O. Johnson, “Neural coding of tactile texture: comparison of spatial and temporal mechanisms for roughness perception,” *J. Neurosci.*, vol. 12, no. 9, pp. 3414–3426, Sep. 1992.
- [8] A.I. Weber, H.P. Saal, J.D. Lieber, J.W. Cheng, L.R. Manfredi, J.F. Dammann, and S.J. Bensmaia, “Spatial and temporal codes mediate the tactile perception of natural textures,” *Proc Natl Acad Sci*, vol. 110, no. 42, pp. 17107–17112, 2013.
- [9] K. Drawing, “Judged roughness as a function of groove frequency and groove width in 3d-printed gratings,” in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, Springer, Cham, Jun. 2018, pp. 258–269.
- [10] O. Bau, I. Poupyrev, A. Israr, and C. Harrison, “TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces,” in *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, Oct. 2010, pp. 283–292.
- [11] Q. Wang, and V. Hayward, V., “Compact, portable, modular, high-performance, distributed tactile transducer device based on lateral skin deformation,” in *2006 14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, IEEE, Mar. 2006, pp. 67–72.
- [12] S. Bochereau, B. Dzidek, M. Adams, and V. Hayward, V., “Characterizing and imaging gross and real finger contacts under dynamic loading,” *IEEE Trans. Haptics.*, vol. 10, no. 4, pp. 456–465, Jul. 2017.
- [13] B. Li, S. Hauser, and G.J. Gerling, “Identifying 3-D spatiotemporal skin deformation cues evoked in interacting with compliant elastic surfaces,” in *2020 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, IEEE, Mar. 2020, pp. 35–40.
- [14] Y. Kurita, A. Ikeda, J. Ueda, and T. Ogasawara, “A Fingerprint Pointing Device Utilizing the Deformation of the Fingertip during the Incipient Slip,” *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 21, no. 5, pp. 801–811, Sep. 2005.
- [15] C. Holz and P. Baudisch, “Fiberio: A Touchscreen that Senses Fingerprints,” *Proc. ACM UIST*, pp. 41–50, Oct. 2013.
- [16] J. Shi, “Good features to track,” in *1994 Proceedings of IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, IEEE, 1994, pp. 593–600.
- [17] B.D. Lucas and T. Kanade, T., “An iterative image registration technique with an application to stereo vision,” 1981.
- [18] J.Y. Bouguet, “Pyramidal implementation of the affine lucas kanade feature tracker description of the algorithm,” *Intel corporation*, vol. 5, no. 1–10, pp. 4, May 2001.