



皮膚色変化による圧力分布計測手法の予備的検討

A Preliminary Study of Spatial Pressure Distribution Measurement Method by Skin Color Change

金子征太郎^{1) 2)} 梶本裕之¹⁾

Seitaro KANEKO and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 情報理工学研究所 (〒182-8585 東京都調布市調布ケ丘 1-5-1, {kaneko, kajimoto}@kaji-lab.jp)

2) 日本学術振興会

概要: 指先にかかる圧力分布の計測は触感再現等に必要となるセンシング技術の一つである。本研究では、皮膚に圧力がかかった際に色に変形することに着目し、非接触での圧力分布計測を可能にする手法を提案する。本手法は凹凸面越しの皮膚色変化をカメラによって撮影することで圧力分布の計測が可能となる。評価として皮膚の色変化がアレイセンサ上での圧力分布と対応していることを確認し、皮膚色変化が持つ空間解像度の定量評価を行った。

キーワード: 触覚センサ, 圧力分布, 皮膚色変化

1. はじめに

本研究は、指先上における圧力分布を皮膚の色変化を用いて計測する手法を確立することを目的とする。

人の指先にかかる圧力分布を計測することは触覚ディスプレイによる触感の提示やロボットのテレオペレーションなどに必要となるセンシング技術の一つである。このため指先上での圧力分布を計測するためのセンサの開発が行われてきた。例えば、アレイ状のロードセル [1] や静電容量センサ [2] を用いた計測装置が挙げられる。しかしながらこれらの計測装置は接触する部分の形状が固定化されてしまい複雑な凹凸上での圧力分布は計測できない課題が存在する。これに対応するために光学的に皮膚変形を三次元に計測する手法 [3] が挙げられるが、ステレオカメラなどを用いる必要があり簡便な計測が困難となっている。

これらの課題を解決するため、我々はヒトが発する情報を用いて圧力分布の計測を実現する。そのため我々は圧力による皮膚の色の変化に着目した。人の皮膚に対して圧力が提示されると真皮付近に存在する毛細血管中のヘモグロビン濃度が減少するため色が変化する [4]。この色変化を用いたインタフェースに関する研究として、爪に対して色の変化を計測することで指先上での押付力やせん断方向などを推定する手法 [5] が存在する。ただしこれらの計測は 6 軸の力計測までしか行えず、指先に対してかかっている力の空間的な分布までは計測できない制約が存在した。我々はこの手法とテクスチャ越しに皮膚変形計測を可能とする手法 [6] を援用し、直接皮膚の観測をすることで圧力がかかっている領域を色変化という単純な指標を用いて推定することを目標とする (図 1)。

本研究は、直接テクスチャを触った状態での圧力分布計測を可能にする手法を提案する。本論文では本手法の有効

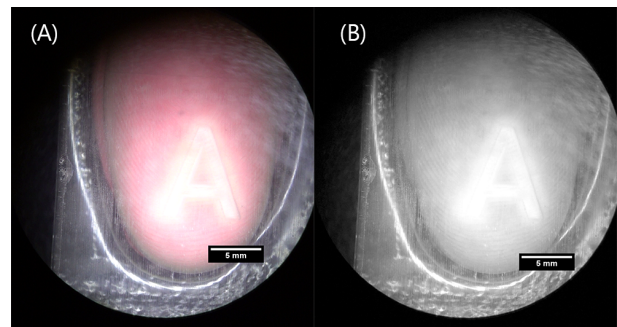


図 1: A 形状の凸に対して指先を押し当てた際の皮膚色変化。(A) 撮影結果, (B) 緑チャンネルのみ抽出した画像。

性を評価するための予備検討として 3 つの実験を実施する。

1) 凹凸面上での皮膚色変化が実際の圧力分布と対応していることをピンアレイ式圧力センサの計測と対比させて確認する。2) 圧力提示領域に対する色変化の広がりを皮膚変形シミュレーションと対比させることで検討する。3) 皮膚色変化が持つ空間解像度の定量評価を行う。

2. 実験 1

実験 1 では圧力がかかった領域に対して皮膚色変化が発生するか確認する。これには凹凸越しでの皮膚色変化計測を可能とする装置と、ピンアレイ式の圧力分布センサを用いる。それぞれの装置上で同一の凹凸に対して触れた際に、圧力提示領域と色変化領域が一致することを確認する。

2.1 実験装置

2.1.1 皮膚色変化計測装置

本装置は Tanaka ら [3] によって作成された皮膚変形計測装置を改変したものである (図 2(A))。試料に対してかかる押下力を水槽下部に設置されたロードセルによって計測す

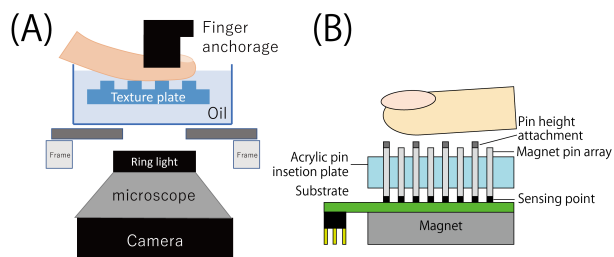


図 2: 実験装置, (A) 皮膚色変化計測装置, (B) 圧力分布計測装置.

る, また水槽下部に設置された実体顕微鏡によって指先を拡大し, カメラを用いて映像の記録を行う. 皮膚色変化は水槽に貯蔵したシリコンオイル中に沈めたテクスチャに触れる状態で計測を行う. これはテクスチャの凹凸によって指先の色変化を光学的に阻害しないためである.

2.1.2 ピンアレイ式圧力分布計測装置

本装置は Kameoka ら [1] によって作成されたピンアレイ式圧力分布計測装置である (図 2(B)). 各磁石ピンはロードセルアレイ下にあるネオジウム磁石によって与圧されている. ピン幅は 2mm である. ピン高さを変更するため, 使用する磁石ピンの半数に対して 3D プリンターで作成した高さ 1mm のアタッチメントを装着する.

2.2 計測条件

一次元凹凸形状を実験に使用した. 凹凸部それぞれの幅は 2mm, 凸部の高さを 1mm とした. 色変化計測時の試料はアクリルをレーザーカッターで加工して作成した. 圧力分布計測時には, 定めた形状になるようアタッチメントを装着したピン, 装着しないピンを交互に配置した.

被験者は 1 名 (男性, 右利き, 25 歳) で, 実験には利き手の人差し指を使用した. 面に対する押下力は 200gf とした.

2.3 実験手続き

実験手続きは皮膚色変化計測, ピンアレイ圧力分布計測ともに共通している. まず実験準備として, 実験協力者の手を洗浄し, 指先に対して傷がないことを確認した. 実験を行う前に被験者はカメラ映像を確認しながら押し付け位置の確認を行った. その後動画記録の開始とともに被験者は指先を試料に対して押し当てた. この際, 被験者はモニターに表示された押付力を確認しながら目標値である 200gf に近づけるようにした. このとき表示される値は全ロードセルの計測値の合計値である. 5 秒程度指先を押し当てたあと試料から指をはなし, 3 秒程度保持した. これを 3 回繰り返した.

2.4 結果・考察

まず 2mm 凹凸面上における皮膚色変化の計測結果を図 3 に示す. 図中 (A) はカメラによって撮影された画像, (B) は画像中の RGB チャンネル中から緑チャンネルのみを抽出した画像である. 緑チャンネルのみを抽出する理由は血中ヘモグロビンが緑波長を吸収しやすい性質を持つためである [7]. 図中黄色線の表記は後に輝度変化を解析する際に用いた抽出領域を示す. 次に画像中の緑チャンネル輝度変

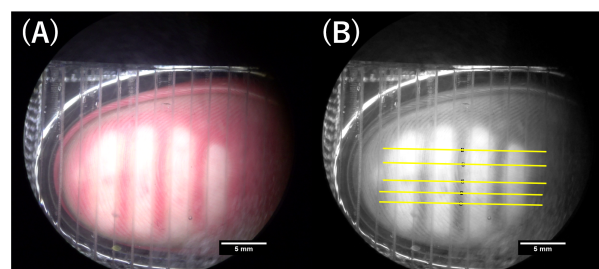


図 3: 2mm 幅の凹凸に対して指を押し当てた際の計測結果, (A) 撮影結果, (B) 緑チャンネル抽出結果. 黄線は抽出領域を示す.

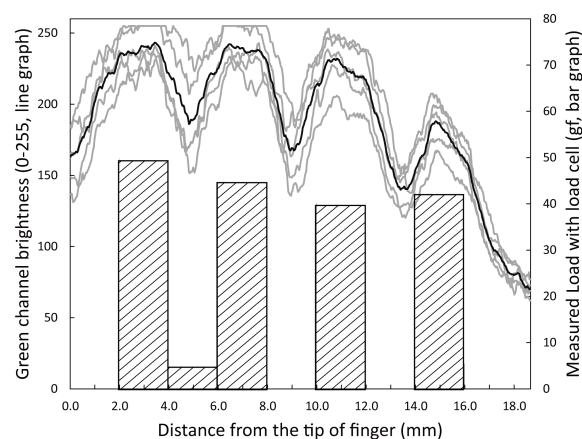


図 4: 緑チャンネル輝度変化 (線グラフ) とロードセル荷重計測結果 (棒グラフ). 黒線は輝度変化平均値を示す.

化とロードセルによって計測された荷重変化を図 4 に示す. 線グラフは輝度変化を表し, 棒グラフがロードセルによる荷重変化計測結果を示す. 灰色線は 3 中で抽出した輝度変化, 黒線は抽出した輝度変化値の平均を示す. グラフ横軸方向に原点から凹凸が 2mm ごとに繰り返されている.

結果から形状の凸部分において皮膚の色変化, ロードセルで計測された荷重が大きくなっていることが分かる. このことから指先にかかる圧力分布と色変化の発生する領域がおおよそ一致していることが分かった. また色を抽出する部分によって凸部分からはみ出して色変化が発生していることが分かった. このことは単純に色変形領域を圧力提示領域とみなすことは困難であることを示唆している. このはみ出し量に関して実験 2 にて考察する.

3. 実験 2

実験 2 では, 圧力提示領域に対する皮膚色変化の広がりを計測する. また, 皮膚内部に対してかかる応力分布と計測された皮膚色変化の広がりの対応関係を解析的なシミュレーションの結果を元に考察する. 本実験では実験 1 で使用した皮膚色変化計測装置を使用して, 実験 1 と同一の手続きに則って皮膚色変化計測を行う.

3.1 実験条件

実験に使用する形状として平板中央部に一次元状の凸を配置した. 凸部の幅は 2mm, 高さを 2mm とした. 皮膚色

変化計測時に用いる試料を作成するために、定めた形状と同一になるようアクリルを用いて凸部をレーザーカッターで作成し、平板アクリルに対して溶着した。このとき溶着材によって皮膚色観察が妨げられないよう、凸部の両端のみを溶着することとした。

被験者は8名(男性, 右利き, 22-25歳)で、実験には利き手の人差し指を使用した。また凹凸面に対しての押下力は統制せず、2mm分押下するように指示をした。

3.2 シミュレーション条件

皮膚内部にかかる応力分布を求めるために接触力学に基づくシミュレーションを行った[8]。本解析では凸に直行する断面における皮膚の色変化に対して考察を行うため、単純なモデルとして半無限板に対して半無限平面パンチが押し込まれた状況を2次元面に対して計算する。各軸に対する主応力 σ_x 、 σ_z 及びパンチ下の圧力分布 $p(x)$ は以下の通りである。

$$\sigma_x = -\frac{2z}{\pi} \int_{-a}^a \frac{p(s)(x-s)^2}{((x-s)^2+z^2)^2} ds \quad (1)$$

$$\sigma_z = -\frac{2z^3}{\pi} \int_{-a}^a \frac{p(s)}{((x-s)^2+z^2)^2} ds \quad (2)$$

$$p(x) = \frac{P}{\pi(a^2-x^2)^{0.5}} \quad (3)$$

このとき、 x, z は2次元面上の座標[m]、 P は単位距離あたりの力[N/m]、 a は押し込むパンチの半径[m]を表す。ここでは指によってかけられる荷重を200gf、凸に並行して接触する距離を15mmと定めるため、 $P = 1.96/0.015 = 130.6\text{N/m}$ 、凸幅が2mmであることから $a = 0.001\text{m}$ として計算を行う。

3.3 結果・考察

まず1次元凸上における皮膚色変化の計測結果を図5に示す。図中(A)はカメラによって撮影された画像、(B)は画像中のRGBチャンネル中から緑チャンネルのみを抽出した画像である。次に図中赤線によって示された領域上の輝度変化を凸の中心を原点としてプロットしたグラフを図6に示す。灰色線は図5中で示した抽出領域における各データの輝度変化、黒線は抽出した輝度変化値の平均を示す。本グラフより凸部に接触している1mmより広い範囲で色変化が発生していることが分かる。また2.5mm離れたところから輝度が低下していることが観察される。

次に、計算された主応力 σ_x 、 σ_z を空間的にプロットしたものを図7に示す。これらの結果から、各主応力は深くなればなるほど広がりを持つことが分かる。また σ_x のほうが浅い部分から広がりを持ち始めていることが分かる。図6中で輝度低下し始めた2.5mm部分に着目すると、 σ_x に関しては深さ1mmまでの間に応力がかかり始めていることが分かる。これらのことから指先内にかかる応力分布の広がりや皮膚表面の色変化に関する関係があることが示唆される。これは皮膚色変化が毛細血管内の血流の低下によるものであることと整合性が取れた結果となっている。今後応力分布の深さと皮膚色変化の対応関係をより定量的な形で明らかにしてゆく。

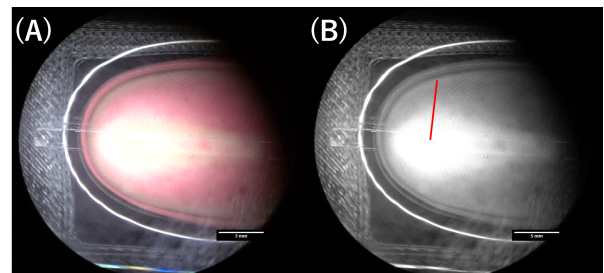


図5: 1次元凸に対する皮膚色変化計測結果の一例, (A)撮影結果, (B)緑チャンネル抽出結果. 赤線は抽出領域を示す。

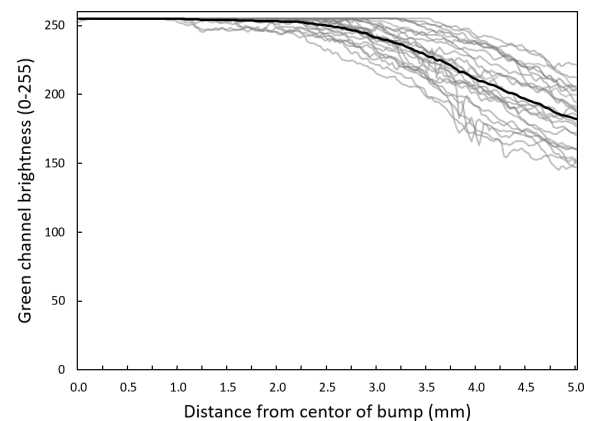


図6: 抽出領域の輝度変化値. 灰線: 各データ結果, 黒線: 全データ平均。

4. 実験3

実験3では、皮膚色変化によって計測可能な圧力分布の空間解像度の定量評価を行う。凹凸幅の異なる複数のテクスチャに対して指を押し付けてもらい、その色変化をカメラの空間解像度の指標を用いて解析する。本実験では実験1で使用した皮膚色変化計測装置を使用して、実験1と同一の手続きに則って実験を行う。

4.1 実験条件

実験に使用する形状として5種類の一次元凹凸を使用した。凹部、凸部の幅をそれぞれ1,2,3,4,5mm、凸部の高さを1mmとした。皮膚色変化計測時に用いる試料を作成するために、定めた形状と同一になるようアクリルをレーザーカッターで加工した。実験時の計測順は幅1mmから昇順に行われた。

被験者は5名(男性, 右利き, 24-44歳)で、実験には1

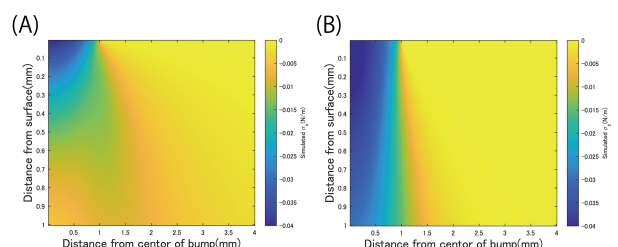


図7: 主応力シミュレート結果. (A) σ_x , (B) σ_z .

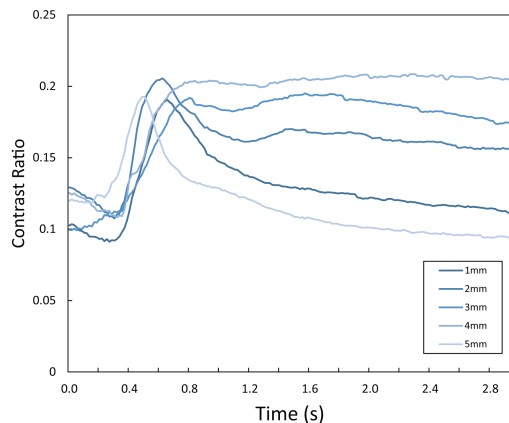


図 8: コントラストの時系列変化の一例。コントラストが増加した後一定の値で収束することが観察される。

名を除き利き手の人差し指を使用した（1名は指のサイズの影響で指ガイドに収まらなかったため薬指を使用）。また凹凸面に対しての押下力は 200gf とした。

4.2 解析方法

空間解像度の定量評価を行うにあたり、皮膚色変化の出力コントラストを計測指標として用いる。解析手順は以下の通りである。まず、各テクスチャに対して押し付けられたときの皮膚色変化動画の緑チャンネルのみを抽出し、指領域 300x400pixel をトリミングした。トリミングした動画の各フレームを画像として抽出し、各行に対して出力コントラストを計算した。最後にすべての行の平均値を求め、それを画像の出力コントラストとした。予備的な解析の結果、時間的に大きく出力コントラストが異なっていたため（図 8 参照）、1) 各動画中最大のコントラスト、と 2) 最大コントラストを原点とした際の 1-2 秒間のコントラスト値の平均、を用いて各テクスチャごとにコントラスト比較を行った。

4.3 結果・考察

図 9 にそれぞれの解析方法を用いて計算したコントラスト値の被験者間平均を示す。エラーバーは標準偏差を表す。黒線は 1-2 秒間のコントラスト値の平均を用いて計算したコントラスト変化、点線は各動画中最大のコントラスト値を表す。最大コントラスト値に関しては凹凸幅間において大きな変動は見られなかった。またコントラスト平均値に関して、3mm, 5mm 幅においてコントラストが悪くなる傾向が見られた。映像ディスプレイにおけるコントラスト変化は一般的に空間周波数が高くなるにつれコントラストが悪くなる傾向があるが、本計測結果ではそのような傾向は見られなかった。このことはある特定幅における圧力分布計測精度が悪くなる可能性を示唆している。ただし、押下力の変化など他要因によってコントラスト値が大きく異なってくる可能性があるため、その点に関して将来的に調査をしていく必要がある。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 20J23128 の助成を受けたものです。

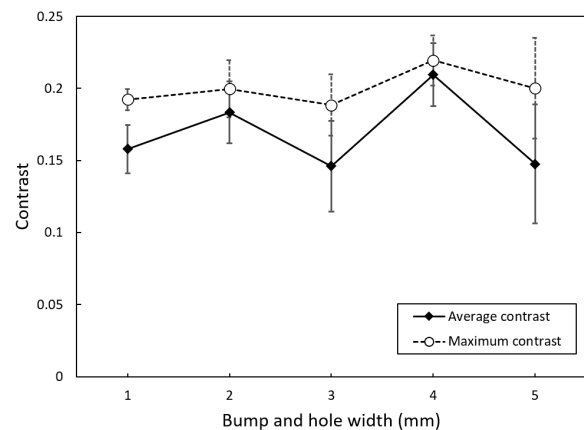


図 9: 最大コントラスト、コントラスト平均の凹凸幅間における変化。

参考文献

- [1] Takayuki Kameoka, Akifumi Takahashi, Vibol Yem, Hiroyuki Kajimoto, Kohei Matsumori, Naoki Saito, and Naomi Arakawa. Assessment of stickiness with pressure distribution sensor using offset magnetic force. *Micromachines*, Vol. 10, No. 10, p. 652, 2019.
- [2] Byeong Wan An, Sanghyun Heo, Sangyoon Ji, Franklin Bien, and Jang-Ung Park. Transparent and flexible fingerprint sensor array with multiplexed detection of tactile pressure and skin temperature. *Nature communications*, Vol. 9, No. 1, pp. 1–10, 2018.
- [3] Satoshi Tanaka, Seitaro Kaneko, and Hiroyuki Kajimoto. Three-dimensional measurement of skin displacement. In *2020 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 794–800. IEEE, 2020.
- [4] Anna Matas, Michael G Sowa, Vern Taylor, Geoff Taylor, Bernhard J Schattka, and Henry H Mantsch. Eliminating the issue of skin color in assessment of the blanch response. *Advances in skin & wound care*, Vol. 14, No. 4, pp. 180–188, 2001.
- [5] Stephen A Mascaro and H Harry Asada. Photo-plethysmograph fingernail sensors for measuring finger forces without haptic obstruction. *IEEE Transactions on robotics and automation*, Vol. 17, No. 5, pp. 698–708, 2001.
- [6] Seitaro Kaneko and Hiroyuki Kajimoto. Measurement system for finger skin displacement on a textured surface using index matching. *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 12, p. 4184, 2020.
- [7] Bernard L Horecker. The absorption spectra of hemoglobin and its derivatives in the visible and near infra-red regions. *Journal of biological chemistry*, Vol. 148, No. 1, pp. 173–183, 1943.
- [8] Kenneth Langstreth Johnson and Kenneth Langstreth Johnson. *Contact mechanics*. Cambridge university press, 1987.