

# 異なる荒さを持つ人工皮膚の触感再現の考察

## Consideration on reproduction of haptic sensation of artificial skin with various roughness

○学 張 建堯 (電通大) 小林 優人 (電通大)  
梶本 裕之 (電通大)  
松森 孝平 (資生堂グローバルイノベーションセンター)  
齋藤 直輝 (資生堂グローバルイノベーションセンター)

Jianyao ZHANG, The University of Electro-Communications, zhang@kaji-lab.jp  
Masato KOBAYASHI, The University of Electro-Communications, kobayashi@kaji-lab.jp  
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications, kajimoto@kaji-lab.jp  
Kohei MATSUMORI, Shiseido Global Innovation Center, kohei.matsumori@shiseido.co.jp  
Naoki SAITO, Shiseido Global Innovation Center, naoki.saito@shiseido.co.jp

We have attempted to reproduce the texture of several artificial skins by displaying horizontal vibrations and lateral forces based on recordings of the vibrations and friction generated when a finger traces these artificial skins. Our main idea was to ensure the softness and viscoelasticity of the artificial skin through use of a real smooth skin made of polyurethane, and vibration and force cues were then “superimposed” on this skin for modulation purposes. The acceleration and fine friction of the finger that traced the artificial skin was recorded using a measurement system, and was presented using the haptic device made during our previous work. A discrimination experiment was performed and we compared the result with recorded vibration to discuss the relationship between the roughness of samples and the vibration recorded from them. Evaluation experiment was also performed to confirm the reproducibility of the haptic characteristics of each artificial skin type.

**Key Words:** Human skin, Haptic reproduction, Roughness.

### 1. 緒言

人間の皮膚は加齢や健康状態により変化し、変化した皮膚表面状態は画像解析の方法で評価されていた[1][2]。しかしこういった評価は専門的な計測装置を必要とし、直観的ではない。人は皮膚を触れることで皮膚表面状態を触感として評価できる。従って、スキンケアの領域において、皮膚状態の変化に伴う触感の変化を再現できることはスキンケア商品の評価やユーザへのインストラクション等の場面で重要になる。平面への触感提示で現在有力な手法としては surface haptics として知られている硬い板に振動を付与する方法が知られている。一方で、皮膚のような粘弾性を持つ素材は通常の硬い板を振動させる手法では再現しにくいと考えられる。

一方で実物の接触対象を用意し、その触感を変調する触覚AR (Augmented Reality: 拡張現実感技術)の研究が近年行われている[3][4][5]。この観点から、皮膚らしい特徴を人工の人肌ゲルで確保した上で、触感の変化成分だけを提示することで異なる触感を再現できると考えられる。

我々は前報において、スピーカーによる水平振動とモータ付きのスライドボリュームによる力を提示できるデバイスを開発し、荒い皮膚の「ザラザラ感」と滑らかな皮膚の「スベスベ感」を再現することが可能であることを示した[6]。デバイスの模式図を図1に示す。しかし、前回の力提示は主観的に決めた一定値で、実際の静止摩擦と動摩擦の違いによる力変化を考慮していなかった。また、計測に用いた皮膚サンプルは筆者自身の前腕内側の皮膚を用いたため、再現性を確認する評価実験が行えなかった。今回は皮膚のサンプルを標準化するため、4段階の粗さを持つ、実物の人肌を模して作られた人工皮膚をサンプルとし、サンプルをそれぞれなぞる時の振動と力を計測した。触覚デバイスで振動と力を同時に提示して、人工皮膚の触感の再現性を確認する評価実験を行った。

本稿では、まずサンプルとなる人工皮膚について紹介する。これら4つのサンプルで計測した振動と力の特徴を触覚デバ

イスで再現し、実物同士の弁別実験とデバイス-実物間の弁別実験について説明する。

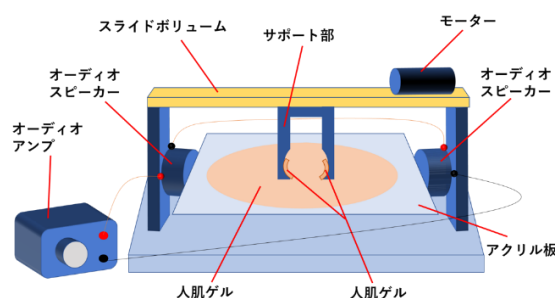


Fig. 1 Schematic diagram of the device

### 2. 人工皮膚による粗さ標準化

皮膚の状態は通常「粗さ」又は「湿りけ」により定性的に評価され、定量的に評価する標準的な方法は未だ確率していない。皮膚の表面パターンの画像を分析することにより、溝の形や数などで定量化できると考えられている。高橋は2つの画像解析システムを提案し、加齢とともに増加し、乾燥肌では不明瞭になる皮膚の溝の異方性などの特性で皮膚の粗さを定量化した[7]。

我々が利用する皮膚サンプルは、実物の人肌の生物学的特徴に従って作成された4つの人工皮膚(bio Skin, No.74A-D 5LV, Beaulax)で、サンプルA、B、C、Dと呼ぶ。本稿で記述する皮膚の粗さは、単位面積当たりの突出山部の頂点密度として定義される。3D計測顕微鏡(VR-3100, Keyence)を利用し、4つのサンプルの436.731mm<sup>2</sup>の領域のテクスチャと高さの画像を取得し、山の頂点密度(ピーク密度。以降Spd)を測定した。図2に示すように、サンプルA、B、C、DのSpd値はそれぞれ4.608/mm<sup>2</sup>、4.064/mm<sup>2</sup>、3.231/mm<sup>2</sup>、2.538/mm<sup>2</sup>となる。SpdはサンプルAからDにかけて減少し、突出するドット間の間隔

が広がることを意味する。ドット間の間隔を使用して、素材の粗さを評価できることが以前に示されており[8]、Spd 値が小さいほど、皮膚サンプルが粗く、皮膚状態が悪いことを示している。

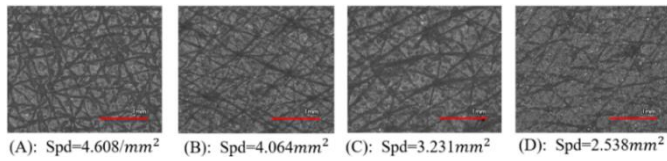


Fig. 2 Textures of artificial human skin samples acquired by a 3D measurement microscope.

### 3. 振動と力の測定

図 3 に振動と力の測定に使用した計測システムを示す。システムのメインユニットは 3 軸加速度センサ(MMA7361, Cixi Borui Technology)と 2 つの 3 軸力センサ(DSA-03A, Tec Gihan)で構成される。力センサの上に、2 つの穴のあるアクリル板が取り付けられる。横方向の力を測定できるように、力センサの円柱型検知部が穴に挿入される。人工皮膚サンプルは板の中央に貼り付けられる。スライドボリューム(RSA0N11M9A0K, ALPS ALPINE CO. LTD)は計測システムのメインユニットの前に設置される。リング状のパーツはスライドのハンドルに取り付けられ、モータにより約 50 mm/s の速度で制御される。測定中、ユーザは人差し指をリング状のパーツに入れ、加速度センサは中指の爪に貼り付けられる。スライド自体の振動を記録しないように中指でサンプルに触る。サンプルをなぞる際、振動と力を同時に 2 秒間測定し、データを別々に記録した。

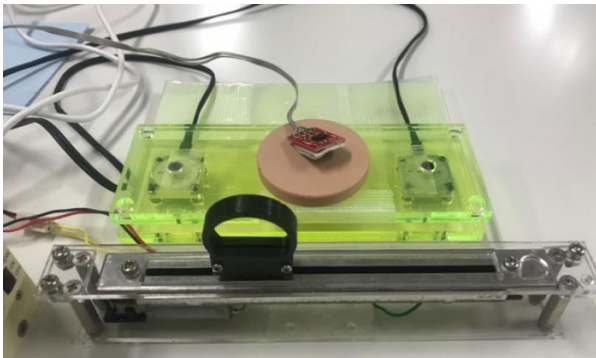


Fig. 3 Measurement system.

計測システムの加速度センサで 4 つのサンプルをなぞる際の振動を 10 回別々に測定した。これらのサンプルから得られた振動の平均スペクトルを図 4 に示す。4 つ振動を触覚デバイスで提示する際には[9]に述べたイコライザをかけた。このイコライザはシステムの逆フィルタとしてシステム全体のフィルタ特性を補正するように機能する。これは振動自体のスペクトルとは関係がないため、4 つ振動を提示する際に必要なイコライザは共通の 1 つだけである。

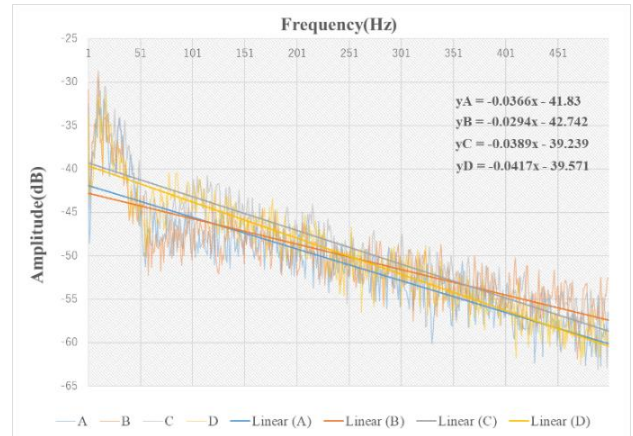
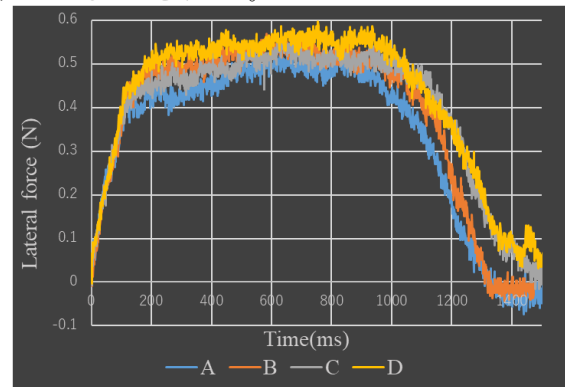
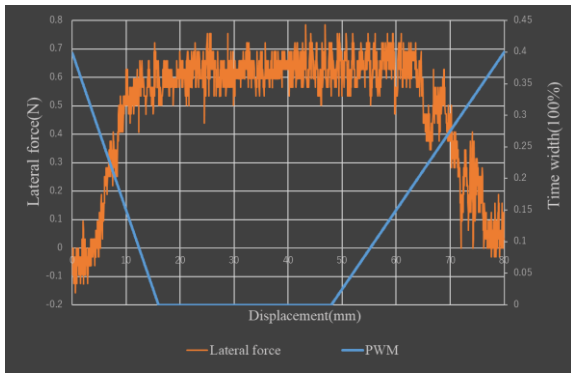


Fig. 4 Average spectra of the four samples.

サンプルをなぞる際の水平方向の力は、計測システムを使用して 10 回ずつ測定された。図 5(a)は、各サンプルから得られた水平方向の力であり、その平均値は約 0.4-0.6N であり、それらの中で明確な違いがなかったことを示している。偶然にも、この平均値はスライドが元々持つデフォルトの抵抗力とほぼ同様であることが分かった。したがって、スライドと DC モータの本来の抵抗を組み合わせることにより、摩擦感を再現することを意図した。測定された摩擦力と同様の特徴として横方向の力を提示するアルゴリズムを作成した。本アルゴリズムは、指の変位に対応するように PWM の時間幅を制御する。図 5(b)の青い線が示すように、なぞり動作の開始時に、指が抵抗を感じないように、モータが 40%の時間幅で制御され、サポート部が推進力を発揮することで既存の抵抗を消した。指が動き始めると、時間幅は 0%まで線形的に減少させることで、指が抵抗を自然な摩擦として認識できた。なぞり動作の最後に、時間幅をまた 40%まで増加させ、既存の抵抗を消した。本手法の有効性を検証するために、このアルゴリズムを使用して提示される力を測定した。触覚デバイスを計測システムの板に設置し、アルゴリズムを動作させて滑らかな人肌ゲルをなぞった。図 5(b)のオレンジ色の線が示すように、測定された横方向の力は、図 5(a)に示されたものと同様な特徴を持っていることを示した。



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Average value of lateral force measured from four samples. (b) Force output and time width of the PWM control.

## 4. 実験

### 4.1 実物間の弁別実験

再現性の評価のために用意されたサンプルの粗さは、A から D にかけて粗くなる。しかし、粗さの違いがわずかであるため、サンプルを区別することは困難である。被験者がどの程度サンプルを区別できるかを確認するため、予備実験として実物間の弁別実験を実施した。

被験者は 22 歳から 24 歳の 5 人の男子生徒で、すべての被験者は右利きだった。最初に、被験者の前にサンプルの 1 つが提示され、被験者は目を閉じて 3 秒間なぞるように指示された。次に、4 つのサンプルが提示され、被験者は各サンプルを 5 秒未満でなぞるように指示された。最後に、被験者は、A、B、C、D と答えることによって、最初になぞったサンプルを選択した。各サンプルはランダムな順序で 5 回ずつ提示され、実験は合計 20 回行った。

結果を図 6 に示す。A または B が提示されたとき、正答率は 50% 未満であった。A が提示された場合、回答の 40% が B であり、B が提示された場合、他の回答の割合は B に近かった。これは、サンプル A を B と混同しやすく、サンプル B は他のサンプルと混同しやすいことを示している。一方、C または D が提示された場合、正解率は 60% を超えたことが分かった。また、C が提示されたときの回答の 24% が D であり、D が提示されたときの回答の 20% が C であった。回答 C と D の割合は回答 A と B の割合より明らかに高かった。結果として、サンプル C と D を区別するのは容易であり、C と D はやや類似していることが分かった。

本結論は、サンプルから測定された振動の平均スペクトルを分析することでも検証できる。図 4 は、4 つのスペクトルの線形近似曲線と数式を示す。これらの近似曲線は各周波数範囲の振幅の分布特徴を表す。特に低周波数範囲(100Hz 以下)の振動は、表面の凸凹が 100 $\mu$ m から 1 mm よりも大きい間隔で形成するマクロ粗さを持つ素材をなぞる時に生じたもので、振幅の強さは素材表面のマクロ粗さを表示できる。低周波数範囲の近似曲線から見ると、A と B の振幅は C と D より弱いことが分かった。また、A と B の振幅は近く、C と D の振幅はほぼ同様であることが分かった。それに対して、高周波数範囲(100Hz 以上)の振動は、表面の凸凹が 100 $\mu$ m 以下の間隔で形成するミクロ粗さを表示できる 450Hz 周辺の A と D の振幅は同様で、B の振幅が一番強いことが分かった。つまり、サンプル A と B は主にミクロ粗さ、C と D は主にマクロ粗さを持っているので、被験者にとって、4 つのサンプルは「A と B が滑らか、C と D が粗い」という 2 組に分けられているように知

覚されていたと考えられる。また、B の近似曲線は 150~350Hz の範囲で A、C、D と紛れているように見えるので、この辺りの振動で知覚できる粗さはランダム性を持ち、サンプル B は他のサンプルと混同しやすいことを説明できると考えている。

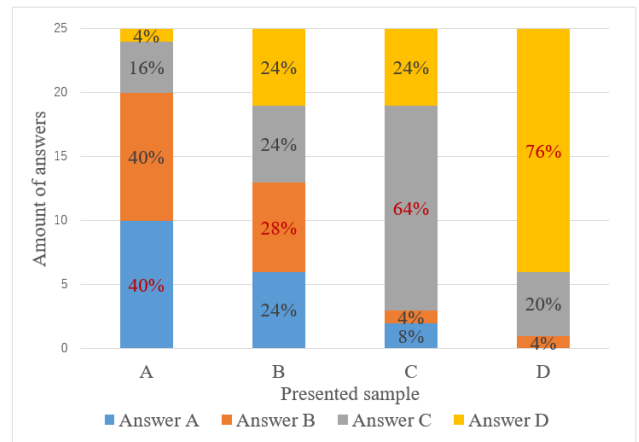


Fig. 6 Results of discrimination experiment

### 4.2 評価実験

触覚デバイスの再現性を検証するために、評価実験を実施した。被験者は 22 歳から 25 歳の 10 人の男子生徒で、すべて右利きである。デバイスを使っている様子を図 7 に示す。

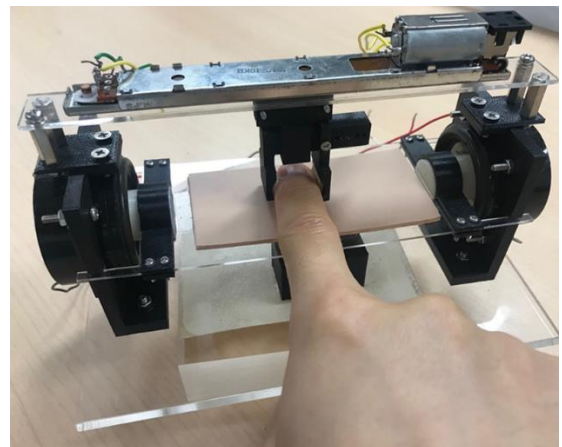


Fig. 7 Appearance when using the haptic device in experiment

まず、実験者は椅子の高さを調整して、被験者の指がデバイスに簡単に移動できるようにした。次に、被験者はホワイトノイズを再生するノイズキャンセルヘッドフォンを着用して、外部環境音、振動音及びモータ駆動音を遮断した。次に、被験者は指をデバイスのサポートに入れて、約 1N の押圧力で滑らかな人肌ゲルをなぞるように指示された。次に、触覚デバイスに水平方向の振動と力を同時に提示した。なぞる動作が終わってから、被験者は 4 つの人工皮膚サンプルをなぞり、デバイスが再現したテクスチャと最も近いサンプルを A、B、C、D と答えることで選択した。実験で使用した振動は、4 つのサンプルにおいて次の 2 条件で被験者に提示した。

条件 1: 計測した 1 つ振動を、イコライザを使用して、平均スペクトルと同じようなスペクトラムを持つように変換した振動信号。

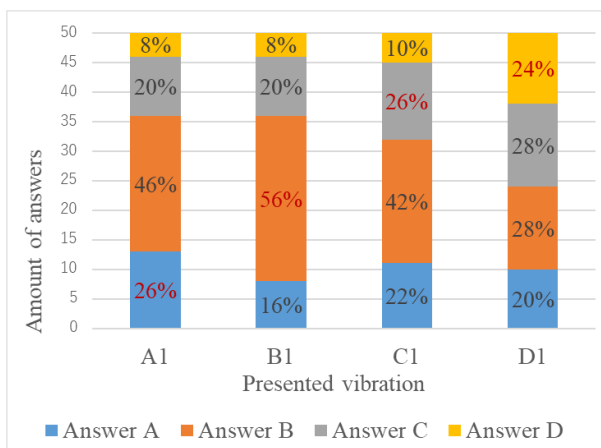
条件 2: 明らかなノイズのない生の振動信号。

どちらの場合も、[9]で説明したイコライザが適用された(つ

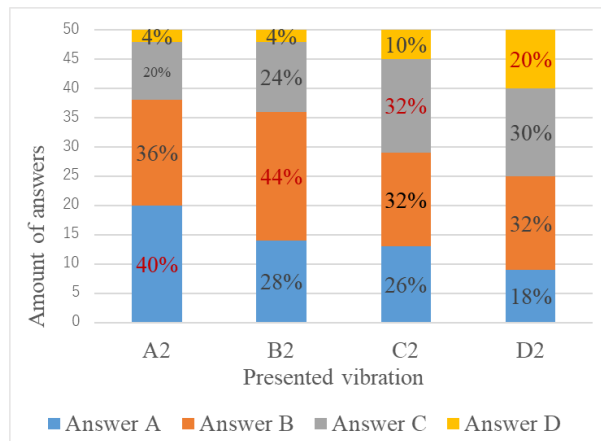


まり条件 1 では異なるイコライザが 2 回適用された)。また、3 章で説明した力のアルゴリズムを使用して水平方向の力を常に提示していた。各振動はランダムに 5 回ずつ提示され、実験は合計 40 試行で行った。

結果を図 8 に示す。条件 2 では、各サンプルの正解率は 50% 未満であったが、サンプルの粗さが増加するにつれ、回答 A と B の割合が減少し、回答 C と D の割合が増加したことが分かった。条件 1 では、回答率の傾向は条件 2 の場合と同様であったが、サンプル B の正解は 56% に達した。条件 2 と比べると、A、B、D の振動が提示されたとき、D の回答数がより多いことが分かった。結果として、平均のスペクトラムを持つ振動はサンプル B と一番近く、条件 2 より粗く感じられる場合もあった。本手法では皮膚の異なる荒さを再現できたが、2 つの条件はいずれにおいても、A または B を回答する割合は圧倒的に多く、被験者はより滑らかな皮膚サンプルを選択する傾向があったことが分かった。



(a)



(b)

Fig. 8 Results of evaluation experiments. A, B, C, and D denote the sample types. (a) Condition 1, (b) Condition 2.

### 5. まとめ

本論文では、異なる荒さを持つ人工皮膚の質感を再現する手法を紹介した。評価実験により、作成した触覚デバイスは、皮膚サンプルのテクスチャと摩擦感のある程度再現できることが示された。しかし、被験者は再現されたテクスチャを弁別できない可能性があり、正答率は低かった。これは、予備実験で示されたように、サンプル間の差異が微妙なためであり、平

均スペクトルに対する分析は、この結論を裏付けている。主観的な評価実験では 2 つの振動アルゴリズムを使用した。1 つは測定された平均のスペクトラムを持つ振動によって駆動され、もう 1 つは生振動データを使用した。2 つの間に大きな差は見つからなかった。

なお、本デバイスの振動提示で変調した質感はサンプル D のような粗さを表現できないことが分かった。提示した振動が粗いサンプルによるものであっても、被験者はより小さい粗さを知覚する傾向性があった。今回触覚デバイスに載せられたのはポリウレタン製の溝や凹凸のない人肌ゲルで、凹凸のある最も粗い皮膚サンプル D を再現するには元のテクスチャが滑らかすぎたと考えている。

マクロ粗さとマイクロ粗さの知覚機序の違いも今回の実験結果に影響したと考えられる。マクロ粗さは素材をなぞらずに、表面を触れて押下するときの圧力分布知覚が関与していると考えられる。これに対してマイクロ粗さは皮膚振動を感応することで知覚できると考えられる[10]。本デバイスは主に振動を利用しているので、マイクロ粗さ知覚に寄与する方法でマクロ粗さを再現することには限界があると考えられる。したがって、マクロ粗さの再現方法として、ベースとなる人肌ゲルを溝のあるサンプル A に変えて、A の触感から B、C、D の触感に変調するのが望ましいと考えている。一方で、横方向の力を提示することで凹凸感を再現できるとの報告もあり[11]、本デバイスも横方向の力提示機能を持つので、マクロ粗さの誘因である凹凸感の再現の参考になるのではと考えている。

謝辞：本研究の一部は JSPS 科研費 JP15H05923 の助成を受けたものです

### 参考文献

- [1] R. Murphy, D. W. K. Cotton, A. L. Wright, S. S. Bleehen, "Computer-assisted image analysis of skin surface replicas.", *Br. J. Dermatol.*, 124, 571-575 (1991).
- [2] P. Corcuff, J. L. Leveque, G. L. Grove, A. M. Kligman, "The impact of aging on the microrelief of peri-orbital and leg skin.", *J. Soc. Cosmet. Chem.* 82, 145-152 (1987).
- [3] S. Asano, S. Okamoto, Y. Yamada, "Vibrotactile stimulation to increase and decrease texture roughness.", *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.* 45, 393-398 (2015).
- [4] T. Maeda, R. Peiris, M. Nakatani, Y. Tanaka, K. Minamizawa, "HapticAid: Wearable haptic augmentation system for enhanced, enchanted and empathised haptic experiences.", In: *Proceedings of SIGGRAPH Asia 2016 Emerging Technologies*, No.4, pp. 1-2 (2016).
- [5] S. Yoshimoto, Y. Kuroda, M. Imura, O. Oshiro, "Material roughness modulation via electrotactile augmentation." *IEEE Trans. Haptics* 8, 199-208 (2015).
- [6] 張建堯, 小林優人, 梶本裕之, 松森孝平, 齋藤直輝, "異なる皮膚状態の触感再現に関する研究", 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集(2019 年 9 月), 4A-04, 2019.
- [7] M. Takahashi, "Image analysis of skin surface contour.", *Acta Derm. Venereol. (Stockh.) Suppl.* 185, 9-14 (1994).
- [8] G. D. Lamb, "Tactile discrimination of textured surfaces: Psychophysical performance measurements in humans.", *J. Physiol.* 338, 551-565 (1983).
- [9] 張建堯, 小林優人, 梶本裕之, 松森孝平, 齋藤直輝, "皮膚状態の違いによる触感再現の予備的検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 講演論文集, 2A1-T02, 2019.
- [10] 岡本正吾, 永野光, 山田陽滋, "素材の触知覚を構成する 5 種の材質感次元", 第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集(2011 年 9 月), 21A-1, 2011.
- [11] S. Saga, R. Raskar, "Simultaneous geometry and texture display based on lateral force for touchscreen", In *Proceedings of IEEE World Haptics 2013* pp.437-442, 2013