

化粧品の機能性を最大化する塗布動作の定量評価と提示方法の研究

神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科

和泉 慎太郎

This study aims to develop a system that quantitatively evaluates cosmetic application techniques and provides user feedback, thereby maximizing the functionality of cosmetics, particularly UV protection products. A compact wireless motion-sensing device was embedded into a cosmetic puff to measure hand movements during application. The device captures six-dimensional data including acceleration, angular velocity, and pressure estimations through optical deformation sensing. The data are transmitted in real-time to external devices for analysis.

To validate the system, a series of experiments were conducted using artificial skin embedded with a tri-axial force sensor. UV protection performance was assessed by applying UV-reactive agents and analyzing reflectance under UV camera imaging. Motion and tactile data were synchronized with RGB video using pose estimation algorithms, enabling detailed correlation analysis between user movement and UV protection outcomes.

Results indicated that different application styles (e.g., sliding vs. tapping) led to measurable differences in pressure distribution and UV coverage. However, using motion sensors alone proved insufficient for estimating tactile forces accurately. To address this, an optical tactile sensor was developed that measures force by detecting infrared light reflection changes from the back of the hand, based on the principles of photoplethysmography (PPG). This sensor enables force estimation without obstructing natural tactile sensations.

The integrated system was validated through further experiments, showing the feasibility of simultaneously capturing motion and tactile data without interfering with the user's natural application behavior. These findings provide a foundation for intelligent cosmetic application support systems. Future work includes implementing machine learning models for real-time feedback, and exploring applications in augmented or virtual reality environments for user guidance.

1. 緒言

本研究の目的は、センシングデバイス、信号処理、および機械学習を組み合わせることで、化粧品塗布動作の定量的評価を行い、その解析結果を使用者にフィードバックするシステムの構築である。塗布時の手の動きや触覚的要素を数値化することにより、使用者の熟練度や、対象の化粧品に適した動作が行われているかを客観的に評価できる。適切な塗布動作は、化粧品の機能性を最大限に引き出すために極めて重要である。

また、熟練者の塗布動作を収集・データベース化し、一般使用者との動作の違いを可視化・提示することで、塗布技術の向上支援にもつながる。本システムは、化粧品分野にとどまらず、障害者や高齢者、入院患者などへの支援にも応用可能であり、幅広い展開が期待される。

本研究では特にUV(紫外線防止)化粧品に着目し、その機能性を損なわない塗布動作を定量的に示すことを目指した。将来的には他の化粧品への応用も視野に入れているが、本研究では、既に一定の評価手法が確立されているUV化

粧品を初期ターゲットとした。

UV化粧品が対象とする「日焼け」は、紫外線が皮膚に照射されることで生じる炎症や色素沈着を指す^{1,2)}。紫外線の照射によって、肌の表皮細胞がプラスミンと呼ばれる物質を生成し、それが色素細胞に流入する。このとき色素細胞内のチロシンが過剰にメラニンを生成し、そのメラニンが表皮細胞に滞留することで、色素沈着やシミ・炎症の原因となる。こうした日焼けは、人体に悪影響を及ぼすものであり、適切な紫外線対策を行わなければ、光老化や皮膚がんなどの深刻な健康被害を招くおそれがある³⁾。したがって、UV対策は年間を通じて重要な課題とされている。

日焼け対策としては、主に肌を覆う衣服の着用やUV化粧品の使用が挙げられる。日焼け対策の先進国であるオーストラリアでは、1980年代に「サン・スマートプログラム」が導入され^{4,5)}、長袖シャツの着用、UV化粧品の使用、首元を保護する帽子の着用などが具体的な推奨行動として掲げられている。しかし、衣服による紫外線防御は気温や湿度の影響を受けやすく、熱中症のリスクを伴うこともあるため、年間を通じて有効な手段としてはUV化粧品の使用が現実的かつ効果的であると考えられる。

UV化粧品の効果を最大限に引き出すためには、塗布方法が極めて重要である。仮に高い紫外線防御効果を有する製品を使用している場合でも、塗布方法が不適切であればその機能を十分に発揮することはできない。現状では、塗布方法の良否は使用者の主観に依存しており、適切な塗布方法を定量的に提示する手段は確立されていない。



Quantitative Evaluation and Presentation Methods of Application Techniques to Maximize the Functionality of Cosmetics

Shintaro Izumi

Graduate School of Science, Technology and Innovation, Kobe University

そこで本研究では、化粧道具や手指に装着可能な6軸モーションセンサと無線通信機能を備えた小型計測デバイスを開発・実装し、塗布動作を可視化・数値化することで、適切なUV化粧品の塗布を支援するシステムの構築を目指した。

2. 方法

2.1. 小型ワイヤレスモーションセンサの開発と動作の可視化

本研究では、市販の化粧用パフに小型モーションセンサ、バッテリー、および無線通信ICを組み込んだセンサーデバイスを開発した。本デバイスを用いて塗布動作を計測し、その結果をリアルタイムでスマートフォンやゲートウェイに送信する。UV化粧品塗布後の紫外線防御効果は、紫外線反応剤とUVカメラを用いて評価した。最終的には、アプリケーション操作パターンと紫外線防御効果の相関を明らかにすることを目的とした。

図1に提案システムの概略図を示す。ユーザーは化粧用パフを用いてUV化粧品の塗布し、その動作情報(加速度・角速度)を、内蔵されたモーションセンサおよび無線通信機能によりPCへ送信する。将来的なアプリケーションでは、機械学習によって取得した動作データからUVカット

性能を予測し、その結果をユーザーにフィードバックする機能の実装を目指している。

紫外線防御性能の予測には、塗布動作中の速度、加速度、圧力などの多様なデータの取得が不可欠である。これにより、ディスプレイ上の視覚的な表示や触覚刺激を通じて、ユーザーに対してより適切な塗布動作を誘導することが可能となる。また、熟練者や専門メイクアップアーティストの動作をデータベース化し、それを一般ユーザーに提示するような応用も視野に入れている。

機械学習による紫外線防御性能推定の実現には、センサーデータと防御性能評価結果のペアデータが必要である。図2に示すような測定環境を構築し、データ収集を実施した。市販のパフを改造し、中央部に6軸モーションセンサ(加速度・角速度)を埋め込んだ。パフ部分は衛生面から使い捨てとし、既製品をベースに改造することで低コスト化を図った。

市販デバイスではパフ内部への実装が困難であったため、専用の小型センサーデバイス(図3)を新たに試作した。センサー回路基板の寸法は $15 \times 20 \times 30 \text{ mm}^3$ であり、パフ内部に挿入しても5mm程度の緩衝層を確保できる。複数の被験者による使用感評価の結果、使用感や操作性への影響は見られなかった。本デバイスは、モーションセンサおよび無線通信ICを内蔵し、底面から容易に取り外し可能

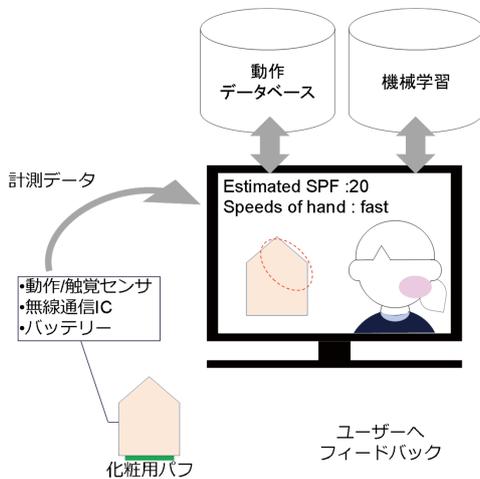


図1 提案システムの概要

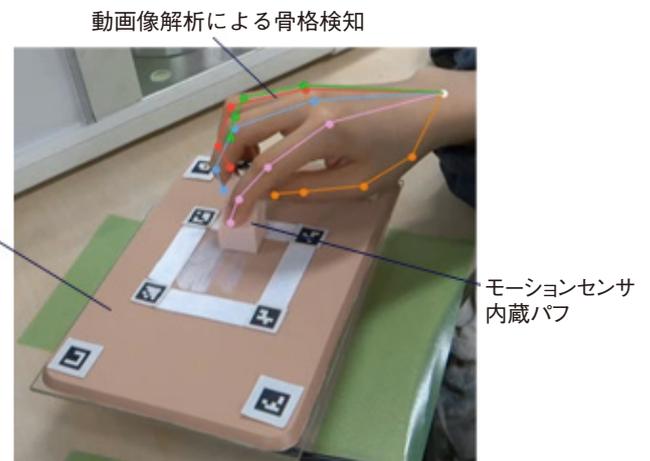


図2 測定環境

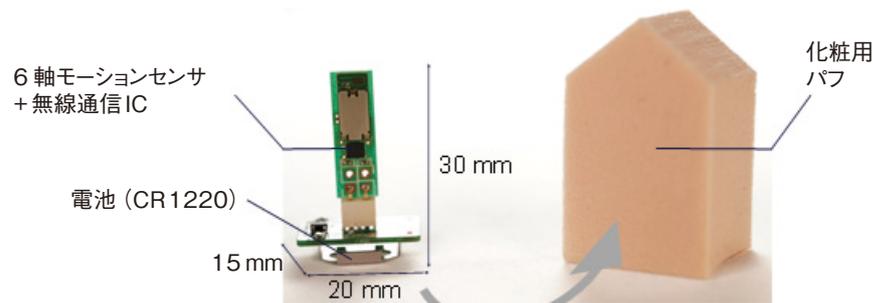


図3 モーションセンサ基板

なボタン電池を電源として使用する。センサは3軸加速度、3軸角速度、センサ周辺の温度を取得可能である。加えて、パフの変形を光学的に測定することで、皮膚にかかる圧力を推定した。これにより、合計6種類のパフ塗布データが取得可能となった。

次に、モーションセンサの出力と塗布結果との関係性を検証するための評価実験を行った。図4に評価環境を示す。本実験の目的は、人工皮膚に加わる圧力の絶対値とその変化、ならびに塗布後の紫外線防御性能の評価である。評価には、人工皮膚、紫外線照射装置、力覚センサを組み合わせたシステムを用いた。

人工皮膚には、ウレタンエラストマー製の高弾性素材を加工した厚さ10mm、硬度E22のサンプル（バイオスキン、ビューラックス株式会社製）を使用した。これを5mm厚の亚克力板に接着し、力覚センサ（SFS100YA500U6、株式会社レプリーノ）上に固定した。力覚センサは、加わる外力および回転モーメント（トルク）を3軸に分解して電気信号に変換・計測する装置であり、本実験では人工皮膚にかかる3軸方向のせん断力を定量化した。

塗布後の紫外線防御性能の評価は、紫外線カメラを用いて行った。紫外線照射中は外光を遮断した暗箱内で観察を行い、UV化粧品により反射された紫外線の画像を解析し、塗布量とそのばらつきを評価した。

以上の環境を用いて、提案システムの性能評価を実施した。評価実験の目的は、(1)リアルタイムな塗布動作の計測精度、(2)紫外線防御性能との相関を有するセンサデータの同定、(3)個人差の影響評価、の3点である。具体的には、紫外線防御性能に影響を与えられ3種類のデータ（塗布量、塗布中の加速度および角速度、人工皮膚に加わる圧力）を測定し、UVカメラで得られた紫外線防御性能の定量指標と比較した。

実験ではまず、塗布前のUV化粧品の重量を測定し、被験者がセンサーデバイスを装着したパフで、人工皮膚上にマーキングされた50×50mm²の領域へ塗布を行った。塗布中の加速度・角速度データはモーションセンサよりリア

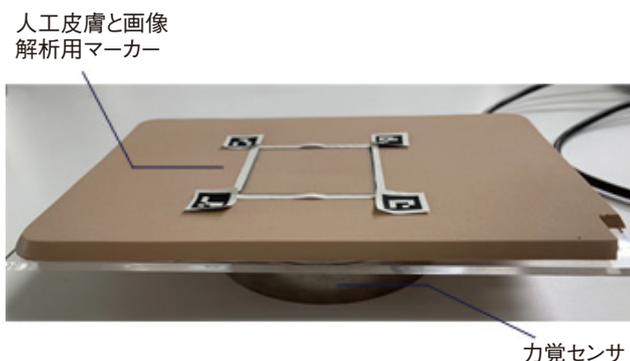


図4 リファレンスデータ計測のための人工皮膚と力覚センサ

ルタイムで無線伝送し、圧力データは人工皮膚下の力覚センサから有線で取得した。塗布後には再度化粧品の重量を測定し、使用量を記録した。

紫外線防御性能については、人工皮膚に紫外線を照射し、紫外線カメラで取得した画像をもとに画素単位で色情報を解析した。画像補正にはARUCOマーカーを用いて歪みを補正し、対象領域の正確な抽出を実施した。加えて、塗布動作をRGBカメラで撮影し、動画に対して骨格検出を行うことで手指の位置推定も実施した。

3. 結果

前述の評価環境において、被験者3名（いずれも23～24歳の女性）を対象に塗布実験を実施した。各被験者には、異なる2種類の塗布動作で人工皮膚にUV化粧品を塗布するよう指示した。1回目は、パフを滑らせる「スライド動作」、2回目はパフで叩くように動かす「タッピング動作」を行わせた。これらの動作の一例を図5および図6に示す。

各測定の前および終了後に、UV化粧品の包装を含む重量を測定し、その差分から塗布量を算出した。図5および図6は、それぞれスライド動作およびタッピング動作における計測結果を示している。モーションセンサおよび力覚センサのデータは、直流オフセットおよび電気的ノイズの影響を排除するため、デジタルフィルタ処理を施した。具体的には、1 Hzのカットオフ周波数を持つハイパスフィルタ、および45 Hzのカットオフ周波数を持つローパスフィルタを適用している。

パフの人工皮膚上での軌跡は、RGBカメラで撮影した動画画像に対して、深層学習に基づく骨格推定アルゴリズム⁶⁾を適用することで推定した。

使用したUV化粧品は紫外線を反射する性質を有しており、紫外線照射下で撮影した人工皮膚画像では、塗布部分が白く描出された。これらの画像に対して画像処理を実施し、人工皮膚上を10×10mm²のグリッドに分割した上で、領域ごとに平均輝度および輝度分散を評価した。

また、モーションセンサ、力覚センサ、およびRGBカメラから得られたデータは、塗布動作中の特徴的な動作タイミング（例：パフの接触や動き出し）を基準として時刻同期を行った。これにより、人工皮膚上の各位置に対応するマルチモーダルなセンサーデータを高精度に対応付けることが可能となった⁷⁾。

4. 考察

プロトタイプを用いた実験により、提案デバイスを用いて塗布動作時の手の動き（位置と加速度）を可視化できることを示した。しかし、リファレンスの力覚センサで記録されたデータを6軸モーションセンサで記録されたデータのみで推定することは困難であった。これは、パフの変形

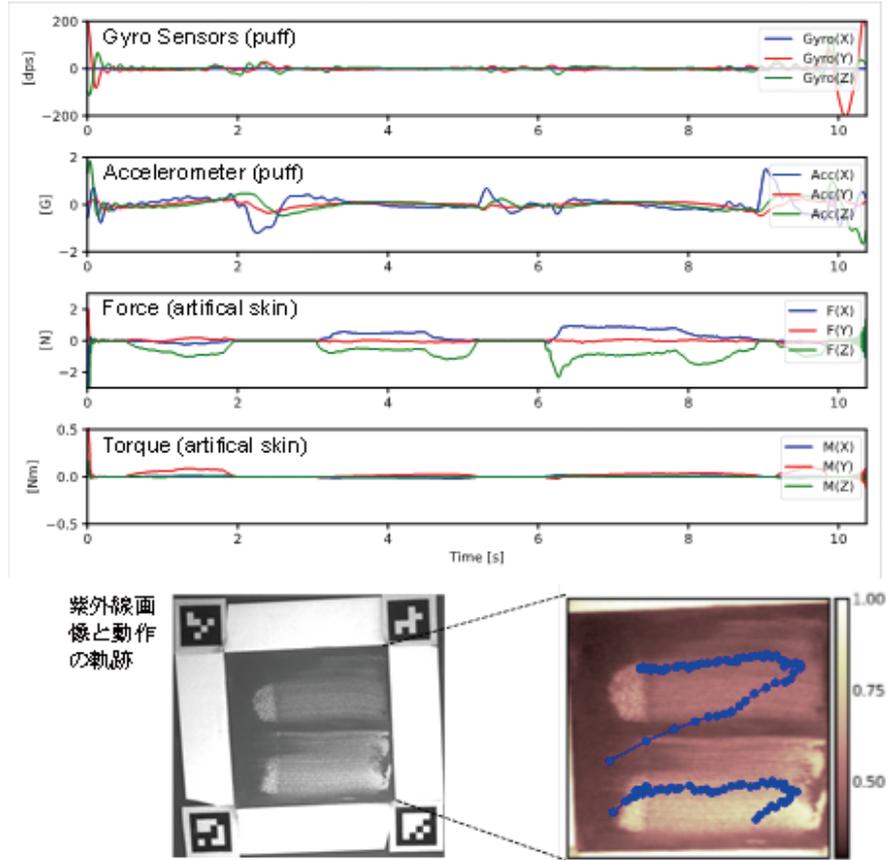


図5 スライド動作時の計測結果の一例

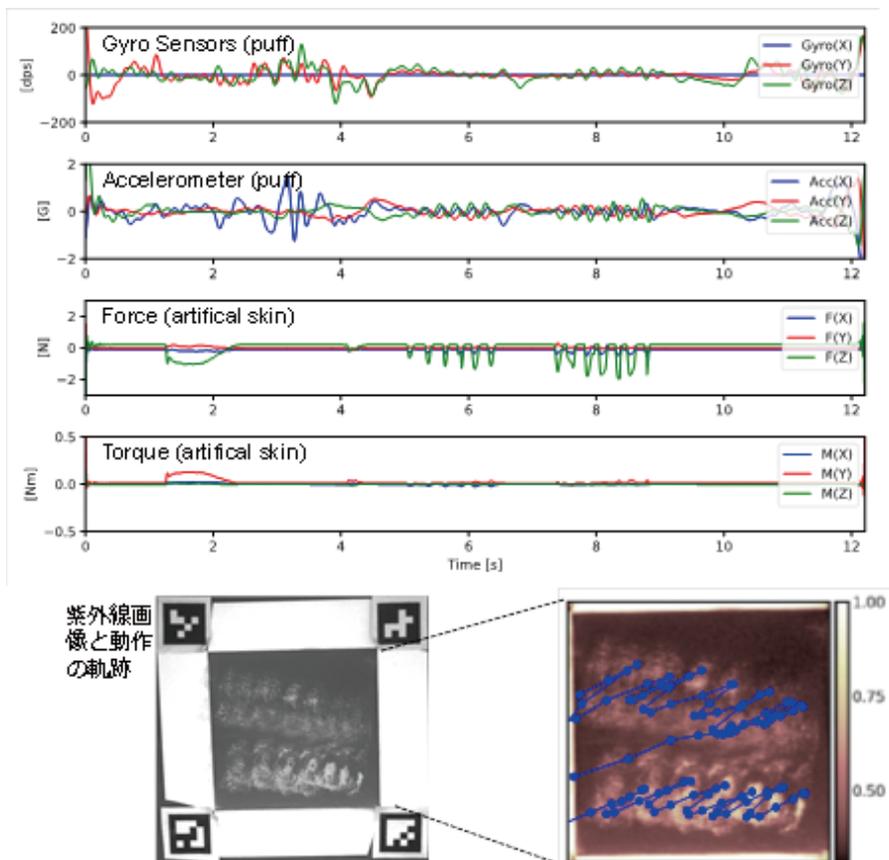


図6 タッピング動作時の計測結果の一例

や皮膚からの応力をモーショセンサだけでは推測できないことを示しており、異なるモダリティのセンサを追加し、手指の触覚を計測する必要がある。

この課題に対処するため、我々は触覚・力覚センサの新規開発を行った。既存の指に装着して触覚を計測することを目的としたセンサには様々な手法があり、そのうちの一つに、手袋型の触覚デバイス⁸⁾がある。これは、指先ではなく手のひら全体に装着し、自由に触覚刺激を提示することが可能である。しかし、この方法ではデバイスを手のひら全体に装着しているため、物体そのものに触れるといった触覚を妨害していることになる。そのため、指の触覚を妨げないセンサが求められており、指の側面や爪、手の甲のみを利用したセンサが開発されている。先行研究によると、ひずみセンサを使用することで、爪のひずみを検出し、物体に触れた際の接触力の大きさと方向を検出できる測定方法が提案されている⁹⁾。また、指や爪の色の変化を測定し、触覚を妨げずに圧力と力の方向を推定する技術も研究されている¹⁰⁾。

しかし、これらの技術には、いくつかの課題が存在する。まず、接触面が指の爪といった特定の部位に限定されているため、指全体の触覚情報を取得することが難しい。爪から取得できる情報はわずかであり、複雑な動作や速い動きを捉えるには、測定範囲の制限が測定精度に影響を及ぼす可能性がある。さらに、センサを指や爪に物理的に装着する必要があるため、装着による不快感が生じる場合がある。このような装着の影響により、自然な動作が妨げられる可能性があり、計測結果に影響を与えることが考えられる。これらの課題を解決するために、指の一部にとらわれず、広範囲な触覚情報を取得しながら、装着時の不快感を最小限に抑える触覚センサが求められる。

これらの課題を解決し、モーショセンサと組み合わせることで塗布動作を計測する手法として、我々は光学式力覚センサ^{11, 12)}を開発した(図7)。提案センサは手指の内部での赤外光の反射を利用することで手の甲や指の背面に装着して力覚を計測することが可能である。指と他の物体との接触面には干渉しないため、触覚を妨害することなく触覚を



図7 新規開発中の力覚+モーショセンサ

計測できる。

センサの構造を図8に示す。本センサは、従来のひずみゲージ、つまり指の変形を直接測定するのではなく、LED (Light Emitting Diode, 赤外線発光ダイオード) とSiPD (Silicon Photodiode, シリコンフォトダイオード) を用いて指の変形を間接的に測定する。LEDから放射された光は、皮膚内外で反射や吸収、透過を行う。皮膚内で散乱して吸収されなかったLEDの光をSiPDで受光することで、センサ値に検出されるようになる。この仕組みは、PPG (Photoplethysmogram, 光電脈波法) を用いており、人体の心拍数や血圧、血中酸素飽和度などの生体情報の変化を測定することが可能である。この原理は、スマートウォッチやパルスオキシメーターなどの生体情報をモニタリングするデバイスに多く用いられている。PPGはランベルト・ベールの法則 (Lambert-Beer law) に基づいており、指の形状と血液量、および血中酸素飽和度に応じてセンサの出力値が変化する。脈拍や血中酸素飽和度を計測するときは指の形状変化はノイズとなるが、触覚・力覚を計測する目的ではその成分を利用することができる。指の形状変化はLEDからSiPDまでの光路長の変化を伴うため、複数の素子を組み合わせることで指にかかる力の方向も推定することができる。

提案する力覚センサを装着して図5、図6と同様の実験を行い、動作時に指先にかかっていた圧力を測定した。実験で得られたモーショセンサデータに対してカルマンフィルタを適用し、3次元空間上の位置を推定した結果を図9に示す。各軸は人工皮膚表面を基準面とした座標を示しており、線の色はその時計測されていた力覚センサの出力電圧を示している。キャリブレーション技術が開発中のため现阶段では圧力値を示せていないが、皮膚表面で圧力に比例するセンサ出力が大きくなっており、正しく計測できていると考えられる。さらに皮膚から離れた位置でパフにかかっていた微妙な圧力も捉えることができています。

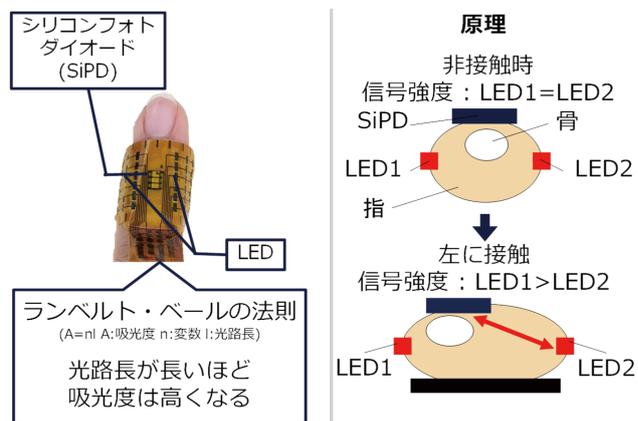


図8 光学式力覚センサの原理

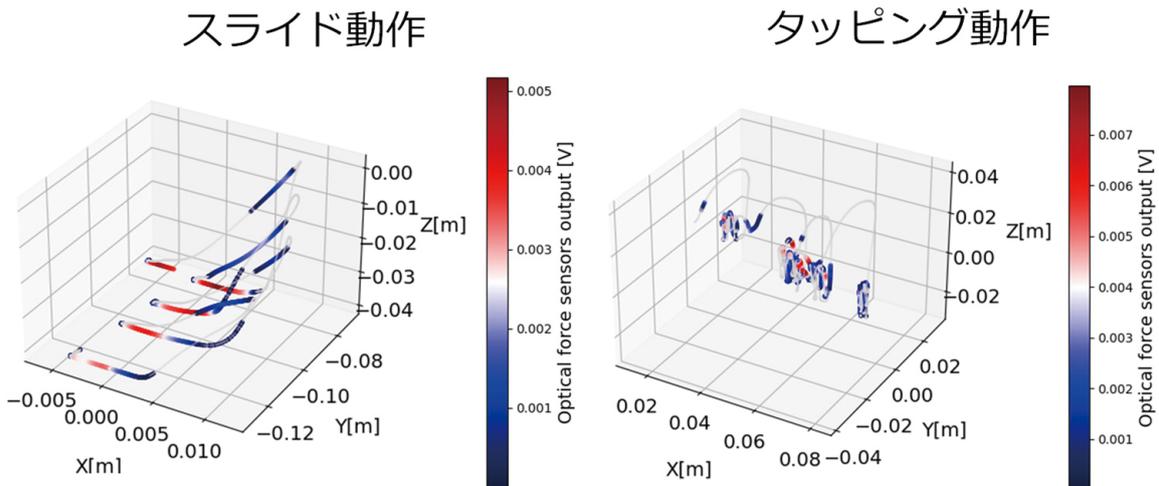


図9 3次元での動作と圧力可視化の一例

5. 総括

本研究では、UV化粧品の塗布動作を可視化することを目的とし、化粧用パフに埋め込み可能な計測デバイスを開発した。実験結果からモーションセンサのデータが塗布状態に影響することを確認したが、より詳細な推論のためには、時系列のセンシングデータをニューラルネットワークベースの機械学習を用いて評価する必要があると考えている。また、力覚センサの追加開発と、動画解析技術の統合、紫外線防御性能評価環境の改善にも取り組んだ。現在開発中のシステムではパフに埋め込むことなく、手背に装着したセンサで加速度、角速度、力覚を同時計測できる手法を構築している。

本研究の成果は2件の国際学会で発表を行い^{7, 11)}、計測技術に関する英文論文誌に採択された¹²⁾。

今後は計測結果に基づくユーザーへのフィードバック方法についても、さらなる研究が必要である。そのための手法としては、スマートフォンやPCの画面上で結果や動作パターンを提示し、バーチャルリアリティ (VR) や拡張現実 (AR) の技術と組み合わせることを検討している。触覚刺激技術の応用も考えられる。

(引用文献)

- 1) Sánchez-Pérez, J. F., et al., Relationship between ultraviolet index (UVI) and first-, second- and third-degree sunburn using the Probit methodology. *Scientific reports*, 9 (1), 733 (2019).
- 2) Elwood, J. M., et al., Sunburn, suntan and the risk of cutaneous malignant melanoma—The Western Canada Melanoma Study. *British journal of cancer*, 51 (4), 543-549 (1985).
- 3) Brenner, M., and Hearing, V. J., The protective role of melanin against UV damage in human skin. *Photochemistry and photobiology*, 84(3), 539-549 (2008).
- 4) Whiteman, D. C., et al., When to apply sunscreen: a consensus statement for Australia and New Zealand. *Australian and New Zealand Journal of Public Health*, 43 (2), 171-175 (2019).
- 5) Dobbinson, S. J., et al., Weekend sun protection and sunburn in Australia: trends (1987-2002) and association with SunSmart television advertising. *American journal of preventive medicine*, 34 (2), 94-101 (2008).
- 6) Jiang, T., et al., RTMPose: Real-Time Multi-Person Pose Estimation based on MMPose, arXiv:2303.07399v1 (2023).
- 7) Yoshikawa, R., et al., Visualization and Evaluation Method for UV Cosmetics Application Using Motion Sensors. *The 33rd IFSCC Congress* (2023).
- 8) 家室 証, et al., GhostGlove: 手全体への力覚提示を行うグローブ型ハプティックディスプレイ. *日本バーチャルリアリティ学会第13回大会論文集*, pp. 213-214, (2008).
- 9) Maeno, T. and Sato, T., 爪のひずみを利用した触覚センサ. *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会* (2000).
- 10) Yu Sun, Hollerbach, J. M., and Mascaro, S. A., Estimation of Fingertip Force Direction With Computer Vision. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 6, pp. 1356-1369 (2009).
- 11) Kushihashi, M., et al., Analysis and Visualization of UV Cosmetics Application Using Multimodal Tactile Sensors. *The 34th IFSCC Congress* (2024).
- 12) Ando, K., et al., Flexible Optical Tactile Force Sensor to Conduct Measurements from the Back of the Hand. *IEEE Sensors Journal*, (2025). (Accepted).