

感情誘発に注目した機能性被服に関する研究

古川 貴雄

1. はじめに

2019年12月に中国武漢市において発症が確認された新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は、その後、パンデミックとなり全世界に感染が拡大した。世界保健機関（WHO）によると、2024年1月7日時点で、全世界で約7.74億人がCOVID-19に感染し、700万人を超える患者が死亡したとされる¹⁾。COVID-19感染拡大を防止するために、人との接触を避け、不要不急の外出を控える「新しい生活様式」が示され、企業や学校では会議や授業等を可能な限りオンラインで実施することが推奨されるようになった。日常生活でも、密集・密接・密閉のいわゆる「3密」を避け、ソーシャルディスタンスを確保してマスクを着用することが求められた。

被服の基本的な機能は体温調節による生命の維持と身体のプロテクトであることから、被服は「第2の皮膚」²⁾とも呼ばれている。被服には身体・生理的機能と社会・心理的機能がある、日常的に生命の危機に晒されることのない現代では自己表現や環境・社会への適応といった社会・心理的機能が重視されるようになった。幸福や健康を維持するために、他者との親密な関係を築くことは我々にとって不可欠であろう。孤独感、幸福感を減少させて、うつ傾向を引き起こし、場合によっては健康を害することが指摘されている^{3,4)}。健康的で親密な人間関係を構築して、維持することにより、外部ストレスからのネガティブな影響を緩和できる。

COVID-19の感染拡大を防止するマスクの着用は、自身の健康維持のみならず、公衆衛生の面からも行動規範となった。しかし、顔の大部分を覆うマスクは、眼や眉間に現れる表情を除いて互いの表情や感情を把握することを困難にする。結果として、人々の間に存在する心理的な距離を広げ、親密なコミュニケーションを阻害する要因の一つになっている。

本研究では、被服を外部環境と身体の間で介在するインタフェースであり、かつ、我々に不足している能力を補って増強する増幅器とみなす。ここでは、マスク着用時の感情伝達を補助し、着用者をポジティブな気分にするスマートファッションアクセサリ⁵⁾を開発し、その有効性を評価することを目的とする。

2. 関連研究

2014年に、体表面コンピューティング技術の応用としてビューティ・テクノロジーという概念が提唱され、研究が進められるようになった⁶⁾。e-makeupというシステムでは、ゴムシート製のフェースマスクにLED等の電子デバイスを実装し、筋電信号に応じてLEDの発光を制御した⁶⁾。温度に

よって発色の変化するサーモクロミック色素を用いたInteractive Cosmeticsも提案されている⁷⁾。ChromoSkinでは、電気抵抗によって発熱するフィルム状のヒーターを皮膚上に貼りつけ、加熱・放熱によりサーモクロミック色素の発色を制御することで動的に変化するアイカラーメイクアップを実現している。また、アイメイクアップを応用したユーザーインターフェースの研究も行われている。例えば、導電性素材のつけ睫毛を用いて眼瞼部に電気回路を構成し、上下つけ睫毛の接触状態によって変化する電圧を計測することで、ウイंकによってリモートコントローラを制御するシステムが提案されている⁶⁾。また、導電ワイヤーと導電フィルムを用いて瞼の上にフレキシブルなコンデンサを形成し、瞬きによって変化する静電容量を計測して、ユーザーインターフェースに応用するシステムも提案されている⁸⁾。

近年では審美補綴とメイクアップを融合するProsthetic Makeupという研究も進められている⁸⁾。Morphaseでは、肌の色を赤く変化させ、眉を変形させる補綴プリミティブを使用して、顔面の血流や顔面表情筋の収縮・弛緩に依存せずに、顔面の表情を生成する機能を実現している⁹⁾。Social Prosthesisでは、形状記憶合金のスプリングを用いて、3Dプリンタで成形した樹脂のフレームとシリコーンゴムを合わせた顔面用の装飾を動的に変形させる¹⁰⁾。また、耳の変形を支援する装置により、象のように耳を複雑に動かすことで感情の伝達を含むコミュニケーションを実現しようという研究も行われている¹¹⁾。このように、メイクアップを超えた顔表情の増強は、ビューティ・テクノロジーの方向性の一つといえる。

交通系カードや学生証に内蔵されているRFIDタグを使用したネイルアクセサリの研究も進められている。RFIDタグとRFIDリーダーとの距離が2cm程度まで近接すると、電磁誘導によりRFIDタグのデータを読み取れることを利用し、鍵盤は存在しないがピアノ等の鍵盤楽器のような演奏を可能にするGimikianoが提案されている⁶⁾。また、小型のカラーOLEDディスプレイ(14mm×20mm)をネイルアクセサリとして使用するNailDisplayも提案されている¹²⁾。NailDisplayのシステムはOLEDディスプレイ、加速度センサ、振動モータ、マイクロコントローラから構成され、スマートウォッチの基本的な機能を実現している。静電容量センサ、爪先サイズのマイクロコントローラ、バッテリーを層構造にしたNailOでは、小型のLiイオンポリマー電池を使用している¹³⁾。ネイルアクセサリの場合、指先の爪の部分に装着することから、バッテリーサイズのサイズと重量が問題となる。消費電力の小さなe-ink(電子ペーパー)をディスプレイに使用したAlterNailでは、バッテリーを使用せずにNFC(Near Field Communication)を用いて電磁誘導によりシステム用の電力を伝送している。

ビューティ・テクノロジー研究では、ヘアアクセサリを対象にした事例も報告されている。SmartWigでは、振動モータ、マイクロコントローラとZigbee通信モジュールをウィッグに統合し、遠隔で頭部への振動刺激を与えることでオンラインマップの情報を活用したナビゲーションを実現している¹⁵⁾。また、Hairwareでは市販のヘアエクステンションに電解メッキすることで、タッチセンサの機能をヘアエクステンションに付与している¹⁶⁾。さらに、HairIOでは、ヘアエクステンションにニッケル・チタンの形状記憶合金とサーモクロミック色素を組み合わせて、形状とカラーが

変化する機能を実現した¹⁷⁾。これまでは、HCI(Human Computer Interaction)の応用としてビューティ・テクノロジーの研究が進められてきたが、今後はインタラクティブなファッションとして研究が進展することが期待される。

3. EMGアクセサリのデザイン

本研究では、筋電センサを用いて感情が反映される顔表情を生成する表情筋の活動を計測し、マイクロコントローラ・LED等による可視化する機能をもつEMGアクセサリを検討した。まず、デザインの要件として、スマートファッションアクセサリの用途に加え、筋電センサやマイクロコントローラ等のハードウェアの装着について考慮する必要がある。頭部のEMGアクセサリとして、(a) ハット・キャップ型、(b) ファシネーター型、(c) ヘアアクセサリ型、(d) ヘッドバンド型、(e) イヤリング・ピアス型、(f) チョーカー型のデザインを検討した。デザインした6種類のスマートファッションアクセサリをシステム統合性、着脱性、安定性、コーディネート観点から評価した結果を表1に示す。

表1 各スマートファッションアクセサリの特徴

	ハット・ キャップ	ファシネー ター	ヘア アクセサリ	ヘッドバンド	イヤリング・ ピアス	チョーカー
システム統合性	○	○	×	×	×	△
着脱性	○	△	○	○	△	△
安定性	○	△	×	○	○	○
コーディネート	△	×	△	△	○	△

ハット・キャップ型の場合、マイクロコントローラ等のハードウェアを装着でき、センサを接続するケーブルの配線もしやすいという利点がある。ハット・キャップ型は着脱が容易で、装着時の安定性も優れている。ハット・キャップには装飾的な側面だけでなく、熱射病を防ぎ、怪我から頭部を保護するといった身体保護の機能もある。ただし、マナーの問題で屋内では基本的に帽子を着用しないこと、さらに、特定の帽子のデザインにフィットするファッションは限定されることもあり、使用される場所や機会などの状況が限定されるという問題がある。

ファシネーターとは女性用の軽く装飾性の高い頭部の装身具であり、結婚式などのフォーマルな場で帽子の代わりに用いられる。ファシネーター型であれば表面積を大きくとれるデザインになるため、マイクロコントローラ等のハードウェアを装着でき、センサを接続するケーブルの配線もしやすいという利点がある。しかし、ファシネーター型アクセサリの場合、着脱性や安定性に難点がある。さらに、ファシネーター型アクセサリを着用するのはフォーマルな場に限定されるため、使用される状況は限定される。

ヘアアクセサリ型の場合、筋電センサだけでなくマイクロコントローラ等のハードウェアが露出することになるため、これらを接続するケーブルの配線も積極的にデザインとして取り入れること

になる。ヘアアクセサリ型の場合、表面積が小さいため、マイクロコントローラ等のハードウェアのシステム統合には問題がある。また、頭髮部分に固定することになるため、着脱性や装着時の安定性についても問題がある。

ヘッドバンド型の場合、着脱も容易で、着用時も頭部に固定しやすく安定性に優れている。また、デザインによっては、LEDと組み合わせることでエンターテイメント性の強いスマートファッションアクセサリとなるが、使用される状況は限定される。

イヤリング・ピアス型は、使用される状況があまり限定されず、ファッションアイテムの一つとして取り入れやすい。イヤリング・ピアス型の場合、ハードウェアのサイズを小型にしなければならないため、ハードウェアの装着やマイクロコントローラと筋電センサを接続するケーブルの配線といった問題がある。

チョーカー型はネックに装着するアクセサリであるため、安定性には優れているが、着脱性には問題がある。また、頸部を覆うタートルネックのような衣服の場合、装着できないという制約もある。

使用される状況があまり限定されず、ファッションアイテムの一つとして取り入れやすいイヤリング・ピアス型を中核にしたスマートファッションアクセサリをデザインし、マスクに隠された顔表情の情報を可視化する機能を実装することにした。ただし、イヤリング・ピアス型の場合、マイクロコントローラと筋電センサの増幅器の装着、および、イヤリング・ピアス部分を接続するケーブルの配線に問題があるため、マイクロコントローラをチョーカーに装着し、接続ケーブルとヘッドバンドを一体化したデザインを採用した。このような統合型スマートファッションアクセサリにすることで、着用時の安定性が確保され、着脱も容易になり、さらに頭部への荷重も分散することができる。

4. EMGアクセサリの実装

4.1 システム構成

図1に表情筋の筋電計測システムと可視化システムの構成を示す。筋電計測・可視化システムの共通部分では、導電性パッドの3端子電極で筋電位信号を取得し、筋電センシングモジュールで数mV程度の信号を数Vまで増幅し、マイクロコントローラに入力する。筋電計測システムでは、マイクロコントローラのA/D変換機能を用いて、アナログ信号を10bitのデジタルデータに変換し、USB(Universal Serial Bus)を介してデータをPCに送信する。可視化システムでは、マイクロコントローラに接続した可視化モジュールに制御信号を送信する。可視化モジュールは制御信号を受け取り、内蔵するRGB LEDの発光を制御する。

4.2 マイクロコントローラ

本研究では、図2(a)に示すArduino UNO R3を開発やシステム検証に用い、EMGアクセサリには図2(b)に示すAdafruit Gemma M0を使用することにした。これらのハードウェア仕様を表2にまとめた。現在では様々なArduino互換マイクロコントローラが市販されているが、その中でArduino UNO R3は標準とされるハードウェアである。Arduino UNO R3はGemma M0に比べて、I/O端子が多いことから複雑なシステムを構築しやすい。さらに、電源電圧5Vで接続するハードウェアに電力を供給できるためArduino UNO R3を開発やシステム検証に用いることにした。

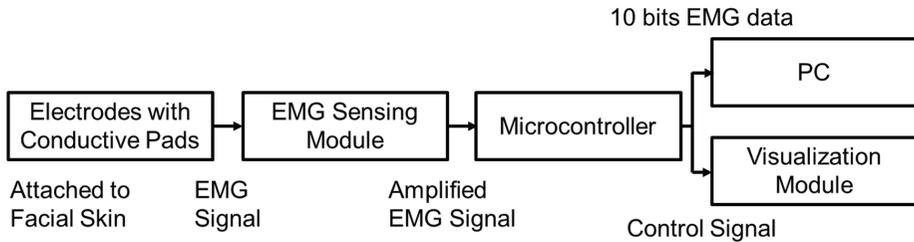
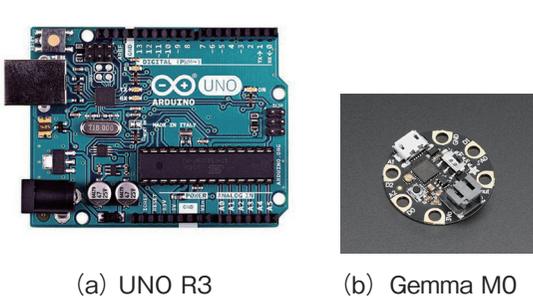


図1 表情筋の筋電計測・可視化システムの構成



(a) UNO R3 (b) Gemma M0
図2 Arduinoマイクロコントローラ

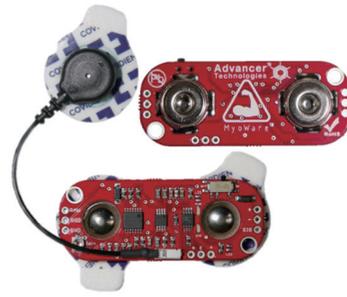


図3 筋電センサモジュール

表2 Arduinoマイクロコントローラの仕様

	UNO R3	Adafruit Gemma M0
プロセッサ	Atmega328	ATSAMD21E18
動作電圧	5 V	3 V
動作クロック	16 MHz	48 MHz
SRAM	2.0 KB	32 KB
サイズ	53.4 mm×68.6 mm	27.95 mm×27.95 mm
重量	25.0 g	2.1 g
内蔵LED	-	RGB DotStar LED

4.3 筋電センサモジュール

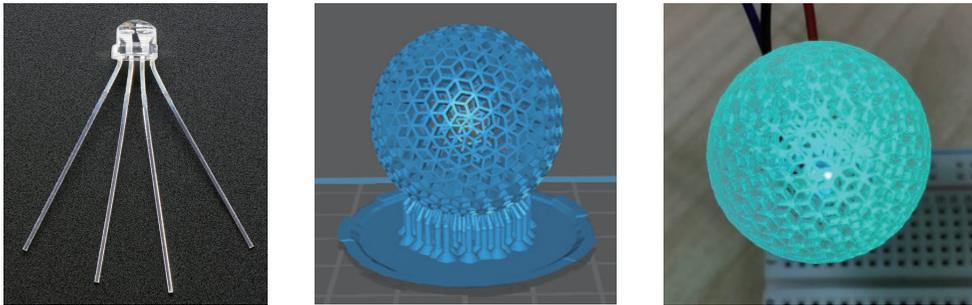
リアルタイム筋電計測システムに使用した筋電センサモジュール(Advanced Technologies MyoWare™ Muscle Sensor AT-04-001)を図3に示す。本体のサイズは52.3 mm×20.7 mmであり、

基板上に2つの電極と増幅器等の電子回路が実装されている。動作電圧は3.1~5.9 Vで、出力端子は筋電波形のEMG(Electromyography)と筋電波形包絡線のEMG Envelopの2種類が用意されている。

4.4 イヤリング型可視化モジュール

リアルタイム計測した筋電データを可視化するハードウェアとして、図4(a)の帽子型 RGB LEDユニット(NeoPixel 50AFWS2812B)をArduinoマイクロコントローラで制御するシステムを構成した。RGB 3色のLEDが統合されたNeoPixel 50AFWS2812Bは、電源(+/-)と制御信号(In/Out)の4端子をもつ。制御信号の出力端子と入力端子を接続することで、複数のLEDを接続し、容易にLEDの発色を制御する回路を構成できる。

マスクに隠された顔表情の情報を可視化するイヤリングは、RGB LEDユニットとイヤリング型シェルから構成した。図4(b)の3Dプリンタ用CADモデルが示すように、シェルは正20面体を再分割した球形の多面体形状とした。このCADモデルからボクセルデータを生成して、SLA(Stereolithography)方式の3DプリンタSpark Maker S-01を用いてシェルを作成した。図4(c)は、RGB LEDの光がUV硬化樹脂性のイヤリング型シェルで散乱していることを示している。



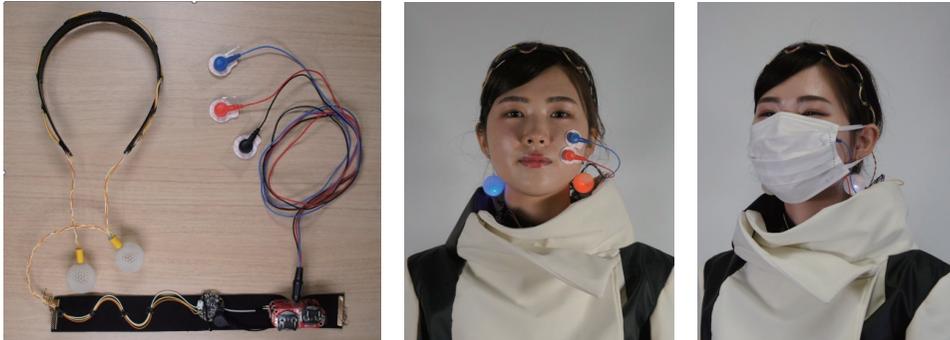
(a) RGB LEDユニット (b) 3Dプリンタ用CADモデル (c) RGB LEDを内蔵したシェル

図4 顔表情可視化イヤリング

4.5 統合型EMGアクセサリ

マイクロコントローラ(Adafruit Gemma M0)、筋電センサモジュール(The MyoWareTM Muscle Sensor AT-04-001)、帽子型 RGB LED(WS2012B)を用いて試作した統合型EMGアクセサリを図5(a)に示し、その装着例を図5(b)に示す。マイクロコントローラをチョーカー上に配置し、帽子型 RGB LED(WS2012B)と接続するカラーケーブルはヘッドバンド上で湾曲させてデザイン要素の1つとした。筋電センサモジュールにもオンボード電極が搭載されているが、ここでは、小型・計量の3端子外部電極の導電性パッドを使用した。これにより、笑顔のときに収縮する大頬骨筋と小頬骨筋に対応する顔面位置の筋電信号を計測することができる。さらに、電極部分に負荷がかからないため、筋電計測の精度と安定性の向上が期待される。イヤリング型アクセサリは市販のイヤリングを用いて耳垂に固定した。

図5(b)左は大頬骨筋・小頬骨筋が弛緩している状態で、このときイヤリング型アクセサリの色相が連続的に変化する。図5(b)右は笑顔の表情で、大頬骨筋・小頬骨筋が収縮して筋電信号が大きく変動する状態で、このときRGB LEDが白色点滅するようにした。



(a) システム全体

(b) 装着例

図5 統合型EMGアクセサリ

5. 筋電信号を用いた笑顔の検出・認識精度

5.1 表情筋による笑顔の検出

表情をニュートラルから笑顔に変化させたときに計測した大頬骨筋・小頬骨筋付近の筋電位信号を図6(a)に示す。時間0～1sにニュートラルな表情、時間1～4sに笑顔の表情をした結果で、5回の計測結果を重ねて示した。笑顔の表情になる1～4sの区間では、大頬骨筋・小頬骨筋の収縮により、筋電信号が大きく変動していることが確認できる。基本的には、表情筋の収縮が大きく、筋電信号の変動の大きい部分を抽出することで、笑顔を検出することができる。ノイズの影響を低減するために、式(1)を用いて筋電位信号を平滑化する。 $T = 0.5s$ を設定した場合、図6(b)の波形 $\bar{x}(t)$ が得られる。

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

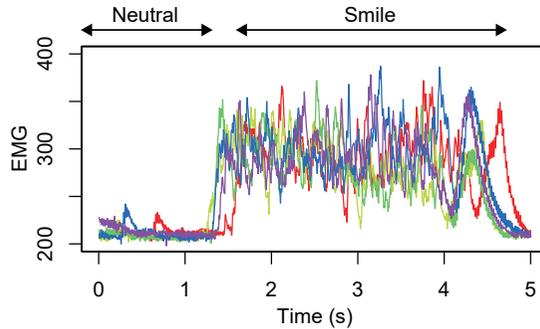
$x(t)$ と $\bar{x}(t)$ から時間平均の偏差 $\sigma(t)$ を求めると図6(c)の波形が得られる。

$$\sigma(t) = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t - \tau) - \bar{x}(t - \tau)| d\tau \quad (2)$$

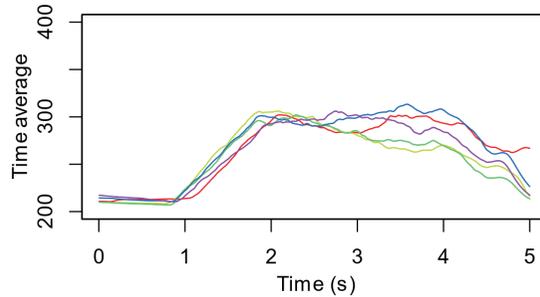
ここで、閾値を a とすると表情筋の収縮によって笑顔を検出することができる。

$$\begin{cases} \sigma(t) > a & \text{smile} \\ \sigma(t) \leq a & \text{not smile} \end{cases} \quad (3)$$

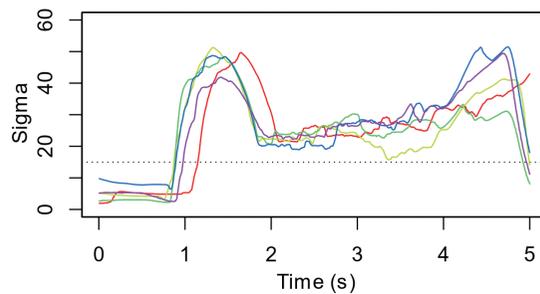
図 6(c)の場合、点線で示した閾値 $a = 15$ を設定すると、ニュートラルな表情 $\sigma(t) \leq a$ と笑顔の表情 $\sigma(t) > a$ を識別することができる。



(a) 計測した顔面表情筋の筋電位信号 $x(t)$.



(b) 筋電位信号の時間平均 $\bar{x}(t)$.



(c) 筋電位信号の時間平均の偏差 $\sigma(t)$.

図 6 表情筋の筋電位信号に基づく顔表情認識

5.2 表情筋の筋電計測による表情の認識精度

実際に計測した筋電位信号による笑顔の表情認識精度を検証するため、共立女子大学研究倫理規程に従い、女子大学生 6 名（平均年齢 19.0 歳、標準偏差 0.0）を被験者として評価実験を行った。被験者の大頬骨筋・小頬骨筋付近頬に導電性パッド付き電極を固定し、ニュートラルな表情と笑顔の表情の顔面表情筋の筋電位信号を計測した。

表2にニュートラルな表情と笑顔の表情結果の混同行列を示す。対角項のNeutral - Neutral はニュートラルな表情がニュートラルな表情と認識された結果を示し、Smile - Smile は笑顔の表情が笑顔の表情に認識された結果を示す。非対角項のNeutral - Smile はニュートラルな表情が笑顔の表情と誤認識された結果を示し、Smile - Neutral は笑顔の表情がニュートラルな表情と誤認識された結果を示す。認識精度は $69.5\% = (75+78) / (75+35+32+78)$ であった。上腕二頭筋のような大きな筋肉に比べて小さな表情筋の場合、電極の位置や接触状態の影響が小さくなく、筋電信号のノイズレベルが高くなるのが誤認識の要因と考えられる。

表2 筋電計測による表情認識結果の混同行列

		Estimation	
		Neutral	Smile
Actual	Neutral	75	35
	Smile	32	78

6. おわりに

2019年末に発生した新型コロナウイルス感染症は世界的なパンデミックとなり、感染防止のために新しい生活様式として、ソーシャルディスタンスの確保とマスクの着用が求められた。感情を表出する顔の表情が隠されることにより、人々間の心理的な距離が広がり、親密なコミュニケーションを阻害するようになった。本研究では、感情誘発に注目した機能性被服として、頭部に装着するEMGアクセサリをデザインして実際に制作した。EMGアクセサリは笑顔の表情を生成するときに収縮する大頬骨筋・小頬骨筋の挙動に応じて動作する能動的なアクセサリである。

EMGアクセサリのデザインについて、ハット・キャップ型、ファシネーター型、ヘアアクセサリ型、ヘッドバンド型、イヤリング・ピアス型、チョーカー型を検討した。次に、システム統合性、着脱性、安定性、コーディネート観点からこれらのデザイン案を評価した。検討結果に基づき、イヤリング・ヘッドバンド・チョーカーを統合したEMGアクセサリをデザインした。EMGアクセサリのシステムは筋電センサ、マイクロコントローラ、RGB LEDモジュール、イヤリング型シェルから構成した。さらに、筋電信号を用いた笑顔の検出方法について述べ、実験により笑顔の認識精度を検証した。

感情を誘発するためのアクセサリの機能デザインについては、本研究を進める過程で浮かび上がった課題。この点については稿を改めて論じたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご協力いただいた共立女子大学大学院 石内 順子氏、共立女子大学 村瀬 浩貴 教授、安藤 美沙子 助手、氏平 千暁 助手、神戸芸術工科大学 甲斐 咲帆 実習助手に深謝する。本研究は共立女子大学総合文化研究所研究助成を受けた。

参考・引用文献

- 1) World Health Organization (2024). COVID-19 Epidemiological Update, Edition 163.
- 2) Horn, M., J., & Gurel, L. M. (1981). *The Second Skin: An Interdisciplinary Study of Clothing*, Houghton Mifflin School, 1981.
- 3) McAdams, D. P., & Bryant, F. B. (1987). Intimacy motivation and subjective mental health in a nationwide sample. *Journal of personality*, 55(3), 395-413.
- 4) DeLongis, A., Folkman, S., & Lazarus, R. S. (1988). The impact of daily stress on health and mood: Psychological and social resources as mediators. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54(3), 486-494.
- 5) Ishiuchi, J., et al. (2023). Design and development of a smart fashion accessory-communicating positive facial expressions hidden by face masks. *International Journal of Affective Engineering*, 22(1), 35-46.
- 6) Vega, K., & Fuks, H. (2014). Beauty technology: body surface computing. *Computer*, 47(4), 71-75.
- 7) Kao, H. L., Mohan, M., Schmandt, C., Paradiso, J. A., & Vega, K. (2016). Chromoskin: Towards interactive cosmetics using thermochromic pigments. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 3703-3706.
- 8) Luo, E., Fu, R., Chu, A., Vega, K., & Kao, H. L. (2020). Eslucnt: an eyelid interface for detecting eye blinking. In *Proceedings of the 2020 ACM International Symposium on Wearable Computers*, 58-62.
- 9) Wang, S., Fang, C. M., Yang, Y., Lu, K., Vlachostergiou, M., & Yao, L. (2022). Morphace: An integrated approach for designing customizable and transformative facial prosthetic makeup. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2022*, 58-67.
- 10) Chen, M., Zhu, J., & Kao, H. L. (2023). Social prosthesis: social interaction through 3D dynamic makeup. In *Adjunct Proceedings of the 2023 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing & the 2023 ACM International Symposium on Wearable Computing*, 296-300.
- 11) Huang, D. Y., et al. (2018). Orecchio: Extending body-language through actuated static and dynamic auricular postures. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 697-710.
- 12) Su, C. H., et al. (2013). NailDisplay: bringing an always available visual display to fingertips. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1461-1464.
- 13) Kao, H. L., et al. (2015). NailO: fingernails as an input surface. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 3015-3018.
- 14) Dierk, C., Vega Gálvez, T., & Paulos, E. (2017). AlterNail: Ambient, batteryless, stateful, dynamic displays at your fingertips. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 6754-6759.
- 15) Tobita, H., & Kuzi, T. (2012). SmartWig: Wig-based wearable computing device for communication and entertainment. In *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, 299-302.
- 16) Vega, K., Cunha, M., & Fuks, H. (2015). Hairware: the conscious use of unconscious auto-contact behaviors. In *Proceedings of the 20th International Conference on Intelligent User Interfaces*, 78-86.
- 17) Dierk, C., et al. (2018). Håiriö: Human hair as interactive material. In *Proceedings of the 12th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, 148-157.

Study on Functional Clothes Focusing on Emotional Induction

Takao Furukawa

Wearing face masks had been required to prevent the spread of the new coronavirus, which has evolved into a global pandemic. However, face masks increased psychological distance between individuals, hindering intimate communication by concealing facial expressions that convey emotions. The EMG accessory is an active device that operates in response to the contraction of the zygomaticus major and zygomaticus minor muscles, which contract to produce a smiling expression. The system of the EMG accessory consisted of an EMG sensor, a microcontroller, RGB LED modules, and an earring-type shell. Furthermore, we describe a method for detecting smiles using myoelectric signals and verify the accuracy of smile recognition through experiments.