

PerformEyebrow : 装着者の感情表現を拡張できる人工眉毛形状制御デバイス

増井 元康^{1,a)} 竹川 佳成¹ 新田 野乃華¹ 徳田 雄嵩² 杉浦 裕太³ 正井 克俊^{4,3} 平田 圭二¹

受付日 2021年2月1日, 採録日 2021年9月9日

概要: 心理学者の Merhrabian は, 感情の伝達において言語情報よりも非言語情報が重要であり, そのなかでも表情や身振りといった視覚情報が感情の推測において大きな役割を担っていると主張している. しかし, 自身の感情が他者から理解されず, 誤解を招く場面がある. そこで本研究では, 感情表現に関わる多様な眉毛形状を提示することで, 装着者の表現を拡張できる人工眉毛形状制御デバイス PerformEyebrow を提案する. 眉毛に着目した理由は, 口の発話や, 目の視界の確保といったような, 口や目が持つ物質や情報の入出力の機能を眉毛は持ち合わせておらず, 物質や情報の入出力の妨げにならないためである. PerformEyebrow は, 導電性インクで印刷された電熱線のパターンを動的に加熱制御することで, サーモクロミックインクで描かれた人工眉毛の形状を自在に変化させることができる. PerformEyebrow を装着して眉毛形状を変化させた場合とマスクを着用して眉毛形状を変化させた場合の各々で印象評価実験を行い, 表情拡張デバイスとしての有用性を確認した. その結果, PerformEyebrow を用いることで, 悲しみや怒りといった感情を表出できることが明らかになった. また, マスクと PerformEyebrow を併用することで, マスク非着用時の場合と比較して, 相手に与える印象が強くなることが分かった.

キーワード: 人間拡張, コミュニケーション, 認知心理学

PerformEyebrow: Artificial Eyebrow Shape Control Device to Enable Augmentation of the Wearer's Emotional Expression

MOTOYASU MASUI^{1,a)} YOSHINARI TAKEGAWA¹ NONOKA NITTA¹
YUTAKA TOKUDA² YUTA SUGIURA³ KATSUTOSHI MASAI^{4,3} KEIJI HIRATA¹

Received: February 1, 2021, Accepted: September 9, 2021

Abstract: The psychologist Merhrabian argues that non-verbal information is more important than verbal information in communicating emotions, and that visual information such as facial expressions and gestures play a major role in inferring emotions. However, there are times when our own emotions are not understood by others, leading to misunderstandings. In this study, we propose an artificial eyebrow shape control device, PerformEyebrow, which can augment the wearer's expression by presenting various eyebrow shapes related to emotional expression. The reason for focusing on eyebrows is that eyebrows do not have the input/output functions of the mouth and eyes, such as speech and vision, and do not interfere with the input/output of material and information. PerformEyebrow can change the shape of an artificial eyebrow drawn with thermochromic ink by dynamically controlling the heating of an electric heating wire pattern printed with conductive ink. We conducted an impression evaluation experiment when the eyebrow shape was changed by wearing PerformEyebrow and when the eyebrow shape was changed by wearing a mask, and confirmed its usefulness as a facial expression enhancement device. As a result, it was found that the PerformEyebrow can be used to express emotions such as sadness and anger. It was also found that using the mask and PerformEyebrow together strengthened the impression given to the other person compared to the case when the mask was not worn.

Keywords: human augmentation, communication, cognitive psychology

1. はじめに

Merhrabian [1] は、感情の伝達において、言語情報よりも非言語情報が重要であると述べている。非言語情報のなかでも聴覚情報より表情や身振りといった視覚情報の方が感情の推測において大きな役割を担っている [2], [3]。また、Ekman [4] によって、表情から喜び、悲しみ、怒り、嫌悪、恐れ、驚きの感情を判断できることが明らかとなっている。これらより、自身の感情を伝達するために表情は有効な手段である。しかし、無表情であっても怒っているのではないかと他者が誤った感情を推察したり、嬉しいという感情を表現したくても、表情変化が乏しいために他者にうまく伝わらないなどのミスコミュニケーションが生じる場合がある。特に、無表情が中立の感情と視覚認知されず、別の感情ととらえられる可能性が高いことは報告されており [5], [6], 他者に感情を明確に伝えるためには表情の豊かさが重要であると考えられる。以上のことが該当する具体的な場面としては、プレゼンテーション、演劇初心者の演出、サービス業に関わる人の感情労働などがあげられる。

表情を形成する主な顔の部位として、口・目・眉毛があげられる。口は発話を、目は視界の確保といったように表情による感情表現以外にも利用される。一方、眉毛は額と眼の間に位置し、汗やゴミを眼に入りにくくするという機能を持つが、眉毛の主要機能は表情の形成にあるといわれている [7]。また、渡邊らは表情認知に関わる顔の構造変数として、“眉・目の傾斜性”、“口部傾斜性”、“湾曲性・開示性”の3つをあげており [8]、このことから口・目・眉毛が表情伝達において重要であることが分かる。

発話や視界の確保といった行為を妨げずに、口や目の直上や周辺に拡張デバイスを設置することは難しい。口や目が持つ物質や情報の入出力の機能を眉毛は持ち合わせていない。

そこで本研究では、感情表現に関わる多様な眉毛形状を提示することで、装着者の表現を拡張できる人工眉毛形状制御デバイス PerformEyebrow を提案する。

PerformEyebrow は動的に眉毛形状を変化させるために、サーモクロミックインクで描かれた人工眉毛を用いる。導電性インクで印刷された下地の電熱線を加熱し、サーモクロミックインクの色を選択的に消すことで眉毛の形状を制御し、表情の表現力を拡張することができる (図 1)。

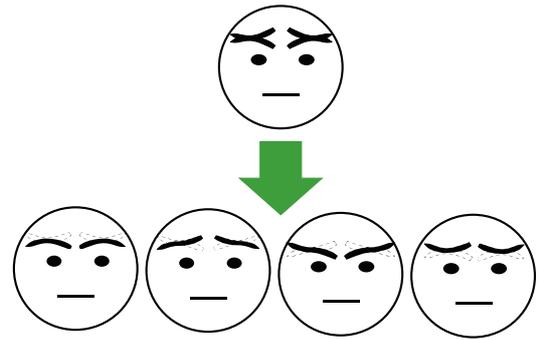


図 1 形状変化可能な眉

Fig. 1 Shape changeable eyebrows.

本研究の貢献は以下のとおりである。

- インクジェット印刷による電熱回路を用いた動的サーモクロミズム制御手法の提案
- 装着可能な人工眉毛形状制御デバイスの提案
- 眉毛の形状変化による感情表現の有効性の検証

2. 関連研究

顔全体や顔の一部を変える様々な身体表現拡張デバイスが提案されている。

メディアアートの事例として、山田太郎プロジェクト*1や、TABLETMAN*2と呼ばれるタブレット PC を顔に装着する作品があげられる。山田太郎プロジェクトでは、iPad を用いて街中で人の顔を撮影し、それを自分の顔に投影することで一時的かつ匿名性のある演出が行われた。また一方、株式会社東芝は複数のタブレット PC を頭部や腕や腹部に搭載した TABLETMAN を広告用途で制作し、人とタブレットの融合が織りなす新たな視覚表現の可能性を示した。

テレプレゼンスシステムとして、Skype などのビデオ通話や遠隔ユーザの顔を表示する ChameleonMask [9] がある。テレプレゼンスとは、遠隔地のメンバとその場で対面しているかのような臨場感や存在感を提供する技術である。ChameleonMask では、テレプレゼンスにおいて遠隔ユーザの身体的存在感や表情を明確に表現するために、遠隔ユーザの顔が表示されたディスプレイを代理人が着用する。したがって、代理人は遠隔ユーザとの成り代わりが可能となり、遠隔ユーザとその対話者の会話に親近感や臨場感をもたらす効果がある。

対面コミュニケーションにおける使用を目的とし、対話者や自身の顔の全体や一部を仮想的に変える表情拡張ディスプレイの研究が行われている。赤池らの初対面における対面会話支援システム [10] は、拡張現実技術と HMD を用いて、対話者の顔の上に静止画のアバタを表示する。これにより、初対面での対面コミュニケーションを阻害する要

¹ 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan
² 香港城市大学
City University of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong, China
³ 慶應義塾大学
Keio University, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan
⁴ NTT コミュニケーション科学基礎研究所
NTT Communication Science Laboratories, Atsugi, Kanagawa 243-0198, Japan
a) g2120045@fun.ac.jp

*1 <https://vimeo.com/82250584>
*2 <https://www.greatworks.jp/works/tablet-man.html>

因である外見の影響を軽減する。萩原らの視線恐怖症支援システム [11] は、シースルー型 HMD を使用し、対話者の顔をモザイクで隠す機能を持つ。これを装着することで、視線恐怖症の傾向がある人は対話者と視線を合わせやすくなる。

大澤の Agencyglass [12] は、サングラスの形をしており、目と同じ大きさの液晶ディスプレイをサングラスのレンズとして埋め込んでいる。事前に撮影した装着者の目の動きを液晶に映し出す。たとえば、接客業において、店員は、落ち込んでいる場合でも、自身の感情を制御し、笑顔で顧客に接客しなければならない。このような感情労働の負担を軽減するために、店員が笑顔のときの目の動きを AgencyGlass の液晶ディスプレイに表示することで、店員は自らの感情を制御しなくてもその場に適した目の動きを表出できる。本研究では、目や顔全体を覆い隠すことなく、眉毛の形状変化のみで感情表現を豊かにする表情拡張ディスプレイを目指す。

ユーザの顔を隠すことなく、自然な表情拡張を可能にした研究事例として、ChromoSkin [13], [14] がある。ChromoSkin は拡張化粧品として、粉状のサーモクロミックを使用してアイシャドウの色を変化させるアプリケーションなどを提案している。サーモクロミックを使用して色を変化させるという点では類似しているが、本研究では眉毛の形状変化による表情拡張を目的としており、対象や目的が異なる。

眉毛の形状を物理的に変化させるアプローチとして、Maruyama の FacialMarionette [15] がある。FacialMarionette は眉毛の上に紐を取り付け、モータで糸を

引っ張ることで、眉毛の位置と動きを制御することができる。本研究では、サーモクロミックインクで描かれた人工眉毛の外見を温度変化で制御するアプローチをとることで、身体的負荷の少ない表情拡張ディスプレイを目指す。

3. 眉毛形状変化の予備実験

眉・目・口が人の感情を認識するうえで重要な要素であることが報告されている [8], [16], [17]。口は発話・呼吸・摂食において、目は見る行為全般において重要な部位である。これらの行為を妨げずに、口や目の直上や周辺に拡張デバイスを設置することは難しい。口や目が持つ物質や情報の入出力の機能を眉毛は持ち合わせていないため表情拡張部位として眉毛の形状変化に着目した。口や目と比較して、眉毛を変化させることは難しく、これまで眉毛の形状変化と感情表現の相関性については明らかでなかったため、予備実験により検証を行った。

3.1 実験方法

図 2 に示すように、目の形状が異なる絵文字、眉毛の形状が異なる絵文字、口の形状が異なる絵文字を用意し、ランダムに提示された各絵文字に対して、Ekman [4] の普遍表情である幸せ・嫌悪・怒り・驚き・恐怖・悲しみの印象評価を 5 段階のリッカート尺度 (1: 感じない~5: 感じる) で回答してもらった。好ましい顔と好ましくない顔による対人認知バイアスを回避するため、本予備実験では顔画像ではなく絵文字を採用した。これまでにも、本予備実験と同様の線画を用いて、眉・目・口における傾斜性などの顔の構造パラメータを定義し、そのパラメータの値を変える

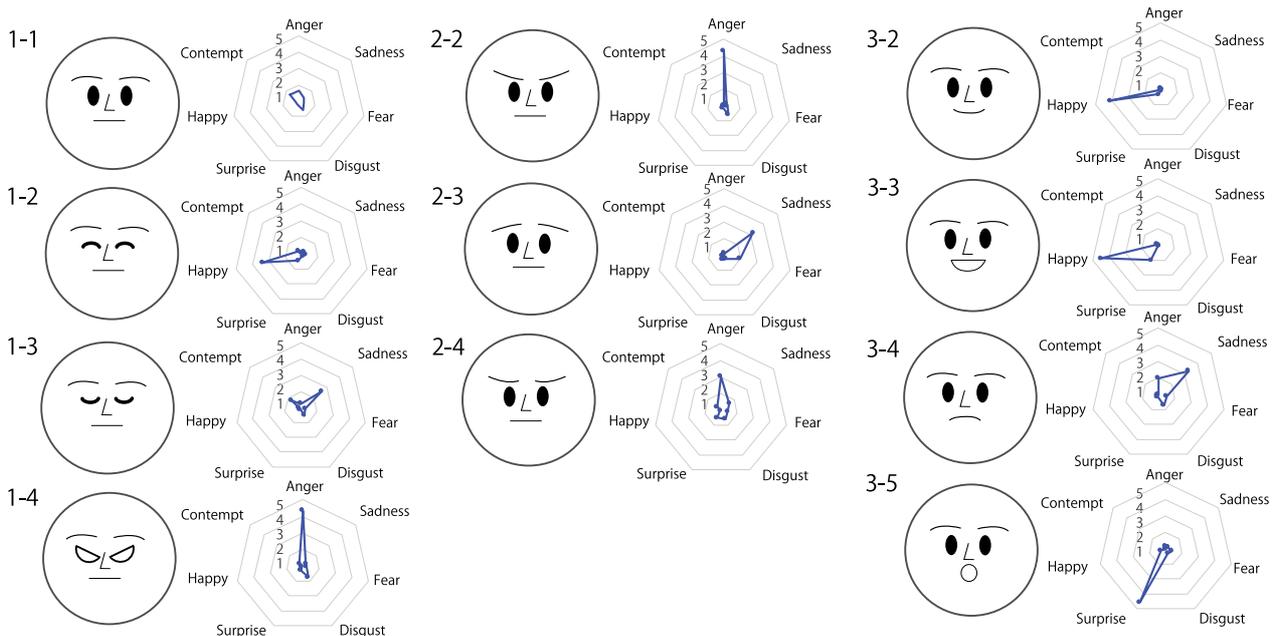


図 2 使用した絵文字と実験結果

Fig. 2 Pictographs used and experimental results.

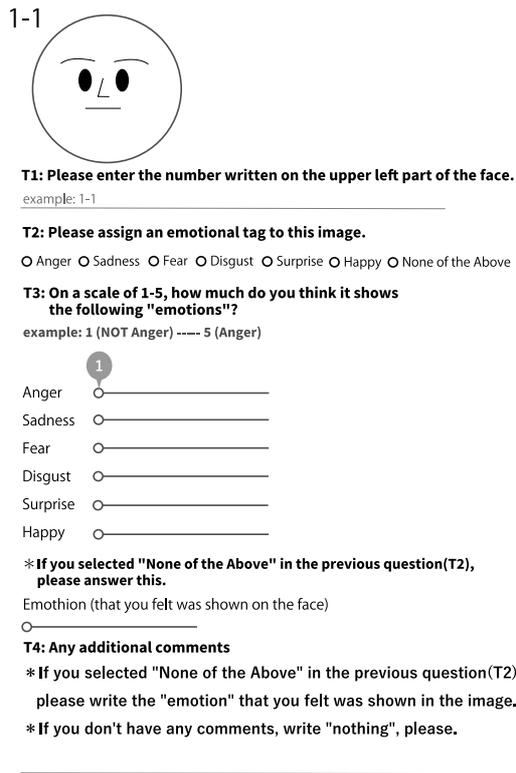


図 3 実験システムのスクリーンショット
Fig. 3 Screen snapshot of the experimental system.

ことによる印象を調査している研究がある [17]. 文献 [17] では、本予備実験のように、眉・目・口の構造パラメータを独立して制御しているのではなく、たとえば、眉と目の傾斜性を同時に変化させて実験している。本実験では、眉・目・口の構造パラメータを独立して制御することで、眉毛の形状変化が、口や目それぞれの形状変化と比較して感情の表現能力を有しているか検証する。

3.2 実験システム

図 3 に示すように絵文字を表示し、スライダーバーを用いて各感情の印象評価を入力する実験システムを Amazon Mechanical Turk を用いて構築した。絵文字とスライダーバーがセットになっており、画面をスクロールすることで次の絵文字とその絵文字に対応する感情入力用スライダーバーが表示される。また、11 種類の絵文字が表示される順番はランダムである。

3.3 被験者

Amazon Mechanical Turk を用いて 100 名の被験者に回答してもらった。1 人 11 ドルの謝礼を支払った。

3.4 結果

実験結果を図 2 に示す。ニュートラルな表情の絵文字 (1-1) と比較して、目・眉・口をそれぞれ変化させた絵文字では特徴的な感情が表出された。特に怒りの感情に関し

ては、1-4 と 2-2 の表情で最も高い印象が得られた。マン・ホイットニーの U 検定を適用した結果、1-1 ($M = 1.64$, $SD = 0.95$) と 1-4 ($M = 4.36$, $SD = 1.2$) で有意差が認められた ($U = 171$, $p < 0.01$)。1-1 ($M = 1.64$, $SD = 0.95$) と 2-2 ($M = 4.31$, $SD = 0.75$) の表情についても有意差が認められた ($U = 81$, $p < 0.01$)。1-4 ($M = 4.36$, $SD = 1.2$) と 2-2 ($M = 4.31$, $SD = 0.75$) の表情では怒りの印象評価で有意差は認められなかった ($U = 840$, $p = 0.16$)。よって、眉毛の形状は、目と同様に怒りの表現能力を有していると推測できる。また、悲しみの感情に関しては 2-3、3-4 の絵文字の印象評価が特に高く、マン・ホイットニーの U 検定を適用したところ、1-1 ($M = 1.38$, $SD = 0.82$) と 2-3 ($M = 3.18$, $SD = 1.46$) で有意差が認められた ($U = 320$, $p < 0.01$)。1-1 ($M = 1.38$, $SD = 0.82$) と 3-4 ($M = 3.29$, $SD = 1.24$) の表情においても有意差が得られた ($U = 231$, $p < 0.01$)。2-3 ($M = 3.18$, $SD = 1.46$) と 3-4 ($M = 3.29$, $SD = 1.24$) の表情では悲しみに関する有意差が認められなかった ($U = 978$, $p = 0.78$)。よって、眉毛の形状は、口と同様に悲しみの表現能力を有していることが推測できる。以上の結果から、眉毛の形状変化は怒りと悲しみの 2 つの感情表現をするうえで有効である可能性が示された。

4. 設計

本研究では装着者の表情に応じて眉毛の形状を変化させる表情拡張ディスプレイ PerformEyebrow の構築を目指す。PerformEyebrow は本論文においては眼鏡型ウェアラブルデバイスとなっているが、将来的には眉毛を覆い隠すシリコンベースの薄型人工眉毛インタフェースにすることで、人工眉毛が作り物であることが分からなくなるように、外見のクオリティを向上させることを考えている。

4.1 利用シナリオ

PerformEyebrow の主な使用場面として、装着者が感情を増幅したい場合と感情を隠蔽したい場合が考えられる。以下、これらについて詳細に説明する。

4.1.1 感情の増幅

PerformEyebrow を用いた眉毛の形状変化によって、他者から見た装着者の感情を本来よりも増幅させるという利用シナリオが考えられる。

装着者が感情を増幅したい用途として、たとえばマスク装着時のコミュニケーションが考えられる。マスク装着時においては、口が塞がるため、眉毛と目元の表情のみで感情を伝達する必要がある。

また一方で演劇初心者への演出支援への応用も考えられる。演劇を見ている聴衆が感情移入する程に物語に没入するためには、高い感情表現能力が演者に求められる。

同様に楽器演奏のパフォーマンス支援にも有用であると考えられる。楽器演奏では、演奏者が演奏に込める思いを

音楽や表情などで表現する。特に管楽器のソロ演奏においては、口は楽器によって塞がれるため、眉毛と目の変化によって感情を伝達しなければならない。

PerformEyebrow の眉毛の形状の変化によって、マスク装着時の感情表現の補助、演劇初心者の表情演出の拡張、情緒的な楽器演奏といった場面において、感情の増幅が可能となる。

4.1.2 感情の隠蔽

装着者の本来の感情を隠蔽し、別の感情へと置換するという利用シナリオも考えられる。

たとえば、感情労働の代替がある。感情労働とは、労働者の感情を抑圧することが求められる労働である。感情労働は客室乗務員や看護師、介護士、教師など様々な職種に必要不可欠となっている。このような職種の労働者は、気分が落ち込んでいるときでも、顧客に対し明るく振る舞わなければならない。

また、プレゼンテーションへの応用も考えられる。プレゼンテーションの発表者は、緊張している場合でも表情に出すことなく、堂々とした発表をすることが求められる。

さらに、麻雀や人狼ゲームのような対面心理戦ゲームがある。麻雀や人狼ゲームのような対面心理戦ゲームでは、自身の感情を隠蔽し感情を偽ることで、相手を欺かなければならない場面が存在する。

PerformEyebrow を用いた装着者の感情の隠蔽によって、感情労働の代替、プレゼンテーションの支援、対面心理戦ゲームの白熱が可能となる。

4.2 要件

上述した利用シナリオを満たす要件を以下に列挙する。

- (1) 小型・軽量：顔への装着を想定しているため、軽量かつ小型である必要がある。
- (2) デザインの多様性：眉毛は、長さ・形状・太さなど多様で、様々な眉毛形状をデザインできる必要がある。
- (3) 眉毛形状の変化：眉毛の形状を動的に変えられる必要がある。

4.3 形状変化素材の検討

表情制御手法のアプローチとして、クロミック素材・ディスプレイの2種類がある。クロミック素材としては温度変化によって反応するサーモクロミックと、赤外線や紫外線の照射によって反応するフォトクロミックの2種類がある。これらの素材が上記の要件を満たしているか検討する。

4.3.1 サーモクロミック

サーモクロミックとは既定の温度を境界として変色する素材である。サーモクロミックが変色する設定温度は数種類ある。たとえばSFXC社のサーモクロミックインク^{*3}は

15°C, 21°C, 31°C, 47°C の4段階である。さらに、株式会社記録素材総合研究所^{*4}は-20°C~60°Cまで5°Cごとに変色する温度が異なるサーモクロミックインクを販売している。温度で変色するというサーモクロミックインクの特性を利用して、サーモクロミックインクを温めたり冷やしたりすることで、サーモクロミックインクで描かれた眉毛の形状を動的に変化させられる。サーモクロミックインクは粉末タイプおよび溶液タイプの2種類がある。溶液タイプのサーモクロミックインクは、絵具と同様に取り扱いやすい。また、インクが乾燥する時間を確保する必要があるが数分で乾燥する。さらに、紙や布など様々な素材に塗布できる。たとえば、つけ眉毛にサーモクロミックインクを塗布することも可能である。サーモクロミックインクは、インクという特性上、小型かつ軽量である。また、様々な形状の眉毛を作ることができる。

4.3.2 フォトクロミック

フォトクロミックとは、赤外線や紫外線といった非可視光の光を照射することで変色する素材である。このフォトクロミックの特性を利用することで、フォトクロミックを利用して描かれた眉毛に対して、部分的に赤外光や紫外光を照射することで、眉毛形状を動的に変えられる。また、絵具と同様の取り扱い方法で紙や布といった素材に塗布できる。しかし、色の種類は少ない。変色させるためには周波数の異なるライトを必要とし、タイル状に敷設した赤外線LEDあるいは紫外線LEDが必要で小型化が困難である。また、太陽光を遮断するような仕組みも必要になる。

4.3.3 ディスプレイ

液晶ディスプレイや有機ELディスプレイは加工しづらく、顔の形状にフィットしたディスプレイの作成は難しい。また、小型・軽量化も困難である。しかし、眉毛形状を多様に変更でき、多彩な色を表現できる利点がある。

以上の分析より、4.2節で述べた要件を最も満たす素材としてはサーモクロミックインクが適しているといえる。

4.4 発熱素材の検討

サーモクロミックインクを変色させるための素材として、電熱線、ペルチェ素子、液体用ポンプが考えられる。4.2節と同様に要件(1)小型・軽量、要件(2)デザインの多様性、および、要件(3)眉毛形状の変化を基準に、各発熱素材の利点欠点を分析し、使用する発熱素材を検討する。なお、PerformEyebrowは図4に示すように眉毛をブロックに分割し、ブロックごとに発熱させるかどうか切り替えることで、眉毛形状を変化させる。眉毛という狭い範囲に対して独立して制御可能かどうかについても検討する必要がある。

^{*3} <https://www.sfx.co.uk>

^{*4} <https://www.kirokusozai.com/>

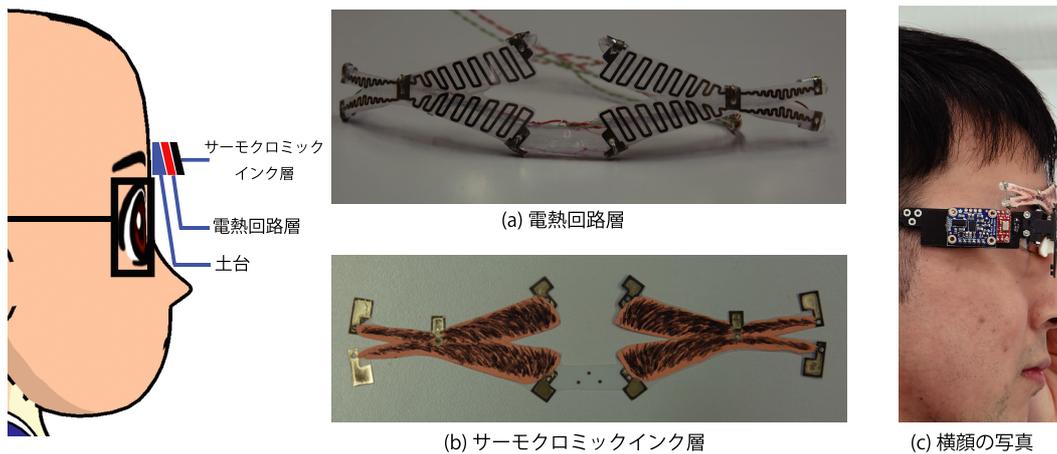


図 5 システム構成

Fig. 5 System configuration.

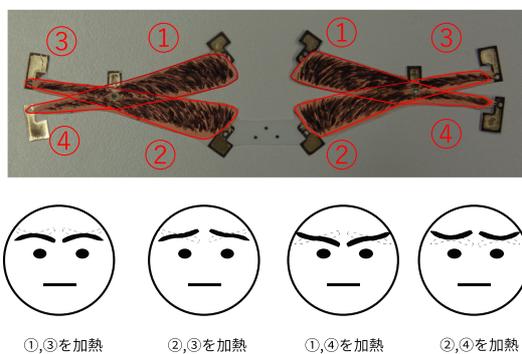


図 4 4 個のブロックに分割した眉毛

Fig. 4 Eyebrows divided into four blocks.

4.4.1 電熱線

銀ナノインクを利用すれば、市販のプリンタで精密な電熱回路を制作でき [18]、軽量・屈曲可能・多様な形状の電熱線を制作できる。同時に、コネクタを複数設けることも容易にでき、ブロックごとに電熱回路を独立して制御することができる。電熱線の欠点として、冷却するためには自然冷却させる必要がある。

4.4.2 液体ポンプ

サーモクロミックインクが塗布された眉毛部分の裏側にチューブを張り巡らし、冷却水や熱水を流すことで、サーモクロミックインクの発色や消色を制御できる。しかし、眉毛のブロックごとに独立して制御するためには多数のチューブが必要になり、小型化が難しい。

4.4.3 ペルチェ素子

ペルチェ素子は液体ポンプと同様に冷却と発熱の両方を実現できる素子である。ペルチェ素子は一般的に矩形でしか生産されておらず、眉毛にフィットする形状を作ることは難しい。また、顔にフィットするように屈曲させることも難しい。

以上の分析より、各素材は利点欠点がある。要件 (1)～要件 (3) を考慮して、PerformEyebrow では、電熱線の発熱を用いてサーモクロミックインクを変色させる。

4.5 システム構成

PerformEyebrow は図 5 に示すように、電熱回路層 (図 5(a)) とサーモクロミックインク層 (図 5(b)) の 2 層から構成される。眉の部分 (土台) の厚みは 1.0 mm で、土台とメガネのフレームや肌との位置関係は図 5(c) のとおりで、土台と肌は接触している。土台の厚みは 1.0 mm あるため、体温がサーモクロミックインクに浸透することや、ヒーターの熱による火傷などが無いことは確認できている。以下、各層について詳細に説明する。

4.5.1 電熱回路層

電熱回路層は図 5(a) に示すように、迂曲状の回路から構成される。この回路に電流を流すことで電熱回路が発熱する。

4.5.2 サーモクロミックインク層

前述した電熱回路上に、肌色のアクリル絵具を塗布し、図 5(b) に示すようにサーモクロミックインクで眉毛を描画する。

5. 実装

PerformEyebrow のプロトタイプを図 6 に示す。また、図 5 に示す電熱回路層・サーモクロミックインク層の実装の詳細を以下に示す。

5.1 電熱回路層

図 6 に示す X 型の眉毛の実装を例に説明する。X 型眉毛は形状を変更できるように 4 個のブロックから構成されている。各ブロックの電熱回路を熱するかどうかは独立して制御できる。電熱線の実装には三菱製紙株式会社の銀ナノ粒子インク (NBSIJ-FD02) および専用メディア (NB-TP-3GU100) を用いてプリントアウトした。

5.2 サーモクロミックインク層

サーモクロミックインク層は 2 層から構成されている。



図 6 プロトタイプ
Fig. 6 Prototype.

電熱回路層のシート全体を肌色（アクリルインク）に塗った。これによりサーモクロミックインクが消えても電熱回路が見えることは防げる。さらに、 35°C を境に黒色から透明に変色する株式会社記録素材総合研究所のサーモクロミックインク（水性スクリーンインキ）を利用した。リアルな眉毛を再現するために golden maple 社の 5/0 サイズの筆を利用した。

5.3 形状変化にかかる時間

PerformEyebrow を用いて、眉毛の形状変化にかかる時間を測定した。図 4 に示す ①～④ の抵抗値について、①と②は平均 $6.5\ \Omega$ 、③と④は平均 $18.5\ \Omega$ となった。また、図 4 の各電熱回路に対してデューティ比が ①:②:③:④ = 96:96:255:255 となるよう PWM 制御を適用した。眼鏡からコードを経て外部電源の電源装置につなぎ、各回路には 5V の電圧を印加した。

眉毛の形状が初期状態（図 1 の矢印より上部の状態）から完全に变化するまで（図 1 の矢印より下部の状態）にかかった時間は平均 9 秒であった。眉毛が完全に变化した後の状態から、電熱回路が自然冷却され初期状態に戻るには 90 秒かかる。対策として、電熱回路層と土台の間に新たにマイクロチューブから構成される冷却層を追加し、マイクロチューブに冷水を流す方法 [19] や、ウェアラブル扇風機を装着し眉毛部分に送風する方法が考えられる。冷却機構の実装は今後の課題である。

5.4 応用

眉毛の切替え方は、Arduino Nano により制御されており、コンピュータのキーボードによってシリアルモニタに入力された番号のコマンドに応じて眉毛の形状が変化する。たとえば、コンピュータのキーボードで 1 を入力すると図 4 下部左から 1 番目の形状の眉毛、2 を入力すると図 4 下部左から 2 番目の形状の眉毛、といったように眉毛の形状を変化させることができる。そのため、装着者自身が眉毛の形状を切り替えるだけでなく、他人が眉毛の形状を切り替えることも可能である。将来的には指定した時間で眉毛形状を変化させるというタイマー機能や、筋電や近接センサにより表情を認識して自動的に眉毛形状を変化させるといった応用も考えられる。さらに、コンピュータのキーボードによる操作だけでなく、眼鏡に切替ボタンを内蔵させることによる操作、ウェアラブルウォッチによる操作など、可搬性の高いユーザインタフェースの導入も考えられる。

PerformEyebrow は眉毛の形状変化に一定の時間がかかる。このため、リアルタイムに眉毛の形状を変化させることを想定した利用には不向きで、シーンごとに眉毛の形状を変えるという利用が適している。4.1 節で PerformEyebrow の利用シナリオを説明したが、たとえば、楽器演奏者が PerformEyebrow を装着して、演奏者の感情を表現する場合、曲ごとに眉毛の形状を変化させるといった利用方法が考えられる。具体的には、曲に合わせて眉毛形状のアニメーションをプログラムできるコンポーザを実装することで曲の演奏に応じた眉毛形状の自動操作などの利用方法も考えられる。また、演劇では場面ごとに眉毛の形状を変化させる。舞台袖で演者が待機している間に、眉毛の形状を変化させる。さらに、感情労働が求められる職種においては顧客ごとや業務内容（クレーム対応は悲しい印象を表す眉毛形状など）ごとに眉毛の形状を変化させる。加えて、プレゼンテーションでは眉毛の形状を変化させた後に発表するという利用方法が考えられる。

6. 眉毛形状の変化が与える印象評価実験

PerformEyebrow は、図 7 に示すように主に 7 種類の眉毛の形状に変化させることができる。PerformEyebrow を用いた 7 種類の眉毛の形状変化によって、他者に与える印象が変化していることを評価するために、評価実験を実施した。

眉毛の位置関係と印象の相関性については顔学やメイクなどの分野ですでに議論されている [20], [21]。文献 [20] では、目と眉の間隔を操作し生成された顔画像をもとに、「明るい-暗い」のような形容詞対を複数用いて評価し、目と眉の間隔が印象形成に及ぼす影響を明らかにしている。また文献 [21] では、化粧の違いにおける対人印象の評価を行っている。本研究では、これらの研究とは異なり、眉毛の形

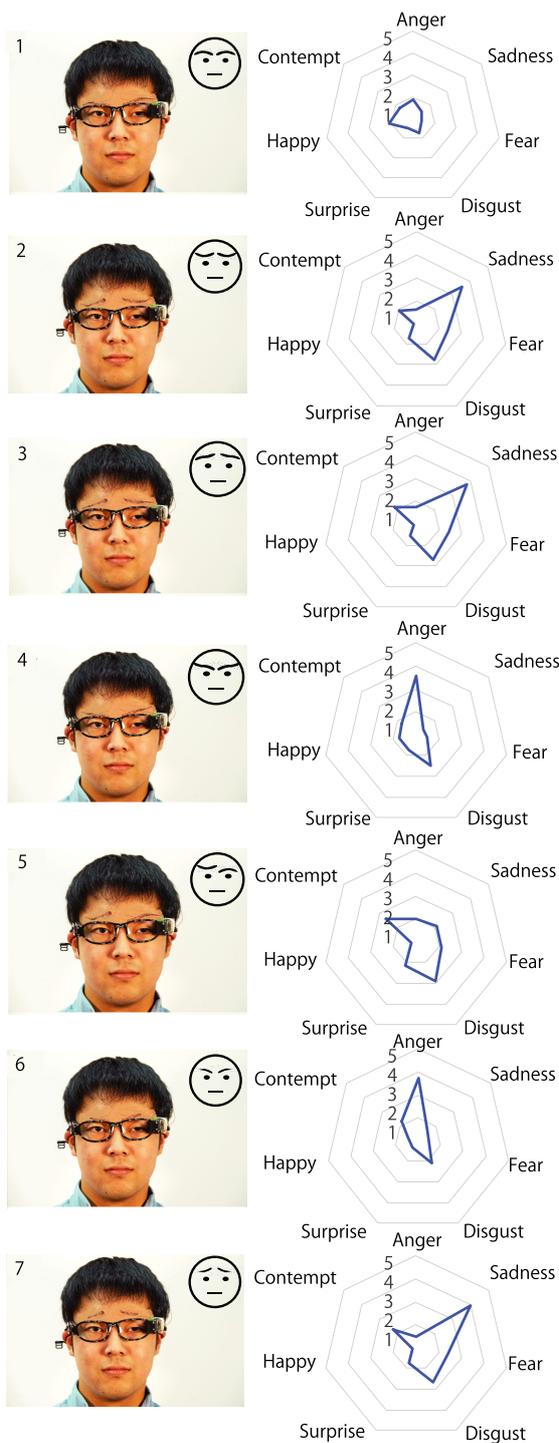


図 7 使用した顔写真と実験結果
 Fig. 7 Facial images used and experimental results.

状と対人印象に着目して評価する。

加えて、PerformEyebrow の利用シーンの 1 つであるマスクを装着した場合における PerformEyebrow による印象の変化を調査した。評価に使用する感情は、Ekman らが提唱した 6 つの普遍表情 (幸せ、嫌悪、怒り、驚き、恐怖、悲しみ) [4] と Matsumoto が普遍的であると主張した表情 (軽蔑) [22] である。また、実験はマスクを装着した場合とマスクを装着しない場合の 2 種類の条件のもと行った。マ

スク装着時の実験においては、マスク装着時とマスク非装着時における印象を比較するうえで、実験を統制するためにイラストのマスクを用いた。

6.1 実験方法

PerformEyebrow を用いて眉毛の形状を変化させた、図 7 に示す表情 7 種をアンケート形式で評価してもらった。実験は画像を用いて行った。実際の装着者を対面で見ながら印象評価を行う方法も考えられるが、対面で実験する場合、装着者に真顔の維持を依頼したとしても、目つきや口元の微妙な変化が生じると考えられ実験条件を統制するために画像を用いた。アンケートでは、各表情から受ける印象を、Ekman と Matsumoto による普遍感情である Anger (怒り)・Sadness (悲しみ)・Fear (恐怖)・Disgust (嫌悪)・Surprise (驚き)・Happy (幸せ)・Contempt (軽蔑) の 7 種の感情によってそれぞれ 5 段階のリッカート尺度 (1: 感じない~5: 感じる) でどの程度感情を感じるかを回答してもらった。各表情を提示する順番はランダムである。

6.2 被験者

マスクを装着しない場合の実験は大学生 86 名を対象に、マスクを装着した場合の実験は大学生 11 名を対象に実施した。

6.3 マスクを装着しない場合の結果

PerformEyebrow を装着し、マスクを装着していない場合の実験結果を図 7 に示す。各表情の感情の平均値をレーダチャートでまとめたものである。ニュートラルな表情 1 に対して、眉毛の形状を変えたそれぞれの表情で特徴が表出される結果となった。表情 2, 3, 7 などの下がった形状の眉毛では悲しみが強く見られた。悲しみにおいてマン・ホイットニー U 検定を適用したところ、表情 1 ($M = 1.48, SD = 0.76$) と表情 2 ($M = 3.35, SD = 1.26$) で有意差が観測された ($U = 1,412, p < 0.01$)。また、表情 1 と表情 3 ($M = 3.62, SD = 1.33$) で有意差が観測された ($U = 1,213, p < 0.01$)。さらに、表情 1 と表情 7 ($M = 3.78, SD = 1.25$) でも有意差が観測される結果となった ($U = 1,007, p < 0.01$)。よって、表情 1 と比較して、下がった眉毛は悲しみを感じる表情だといえる。

次に、表情 4, 6 などの上がった形状の眉毛では、特に怒りが強く見られる結果となった。同様にマン・ホイットニー U 検定を適用したところ、表情 1 ($M = 1.81, SD = 1.08$) と表情 4 ($M = 3.38, SD = 1.46$) で有意差が観測された ($U = 1,611, p < 0.01$)。また、表情 1 と表情 6 ($M = 3.31, SD = 1.47$) の有意差が観測された ($U = 1,669, p < 0.01$)。よって、表情 1 と比較して、上がった形状の眉毛は怒りを感じる表情だといえる。

さらに、片眉が表情 2 の眉毛と同じように下がってい

る表情5の場合、両眉が下がっている表情ほど悲しみが強く現れない結果となった。表情5と表情2、表情3、表情7でカイ二乗検定を適用したところ、有意差が観測され ($\chi^2(3) = 31.791, p < 0.01$)、残差分析の結果、表情5の悲しみは有意に弱く ($p < 0.05$)、嫌悪が有意に強い ($p < 0.05$) 結果となった。よって、表情5は、下がった眉毛と比較して嫌悪のみ感じる表情だといえる。

眉毛の形状によりまとまりを持って特徴が分かれていることから、眉毛の形状の変化により、印象が異なって見えるということが検証できた。

6.4 マスクを装着した場合の結果

PerformEyebrow およびマスクを装着した場合の結果を図8に示す。レーダチャートの赤線がマスク装着時の結果で、レーダチャートの青線がマスクを装着していない場合の結果である。マスクを装着した場合、どの表情においても感情が強く出る結果となった。

特に下がった眉毛を持つ表情2、表情3、表情7では、マスクなしの場合と比較して悲しみの感情が強くなった。下がった眉毛の3表情(表情2, 3, 7)において、悲しみに対してマン・ホイットニーU検定を適用したところ、表情2のマスクなしの表情 ($M = 3.35, SD = 1.26$) とマスクありの表情 ($M = 4.55, SD = 0.50$) で有意差が観測された ($U = 206, p < 0.01$)。また、表情3の表情でマスクなし ($M = 3.62, SD = 1.33$) とマスクあり ($M = 4.73, SD = 0.62$) で有意差が観測された ($U = 234, p < 0.01$)。さらに、表情7の表情ではマスクなし ($M = 3.78, SD = 1.25$) とマスクあり ($M = 4.18, SD = 1.19$) で有意差は確認できなかった ($p = 0.27$)。しかし、恐れに対する有意差 ($U = 266, p < 0.05$) が確認できた。そこで、表情2、表情3において、恐れに対するマン・ホイットニーU検定を適用したところ、表情2のマスクなしの表情 ($M = 2.3, SD = 1.15$) とマスクありの表情 ($M = 3.18, SD = 0.94$) で有意差が観測された ($U = 473, p < 0.05$)。また、表情3のマスクなしの表情 ($M = 2.33, SD = 1.23$) とマスクありの表情 ($M = 3.45, SD = 1.08$) で有意差が観測された ($U = 473, p < 0.01$)。マスクの有無で印象を比較すると、表情7の短い眉毛では、悲しみは強くならなかったが、表情2、表情3で悲しみが強くなっていることが検証できた。また、恐れに対しては3表情とも感情が強くなっていることが検証できた。よって、下がっている眉毛では、マスクを装着することで眉毛の形状による印象がさらに強くなるといえる。

次に、上がった眉毛である表情4と表情6では、怒りが強調されただけでなく、嫌悪と軽蔑も強くなる結果となった。怒りに対してマン・ホイットニーU検定を適用したところ、表情4のマスクなしの表情 ($M = 3.38, SD = 1.46$) とマスクありの表情 ($M = 4.36, SD = 1.15$) で有意差が観測された ($U = 473, p < 0.05$)。表情6のマスクな

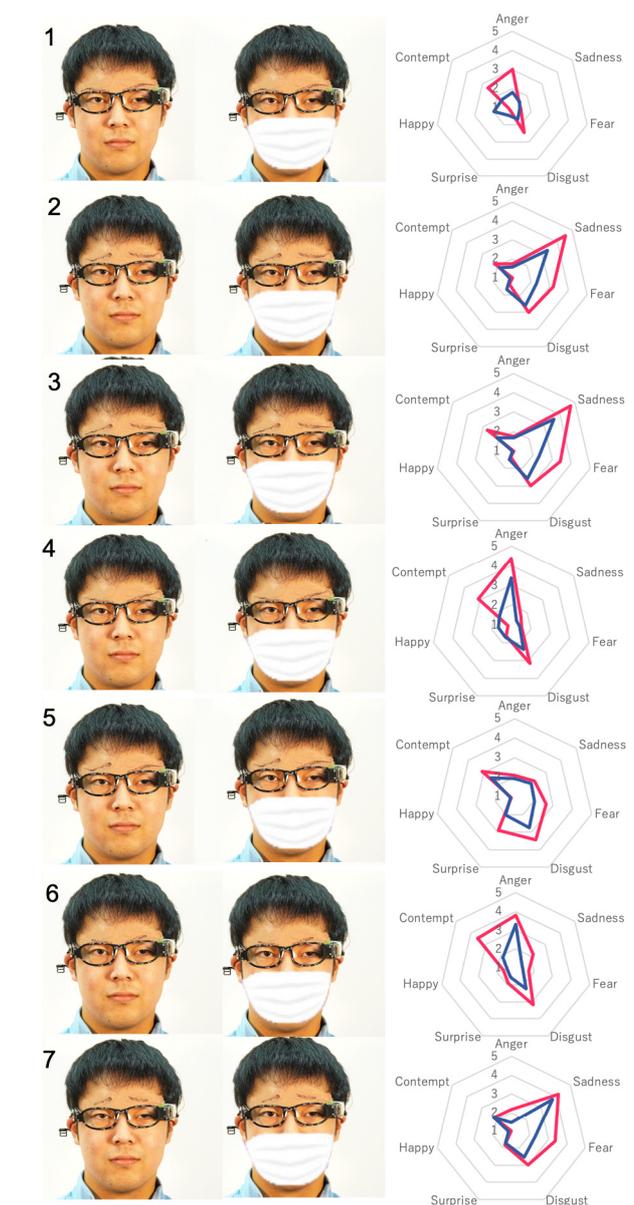


図8 マスク有無の顔写真と実験結果

Fig. 8 Experimental results using facial images with/without mask.

しの表情 ($M = 3.31, SD = 1.47$) とマスクありの表情 ($M = 3.82, SD = 1.27$) では有意差は観測されなかった ($p = 0.30 > 0.1$)。また、嫌悪に対してマン・ホイットニーU検定を適用したところ、表情4のマスクなしの表情 ($M = 2.40, SD = 1.23$) とマスクありの表情 ($M = 3.18, SD = 1.34$) で有意差が観測された ($U = 473, p < 0.01$)。表情6のマスクなしの表情 ($M = 2.26, SD = 1.19$) とマスクありの表情 ($M = 3.18, SD = 1.11$) で有意差が観測された ($U = 473, p < 0.05$)。さらに、軽蔑に対してマン・ホイットニーU検定を適用したところ、表情4のマスクなしの表情 ($M = 1.73, SD = 0.96$) とマスクありの表情 ($M = 3.09, SD = 1.08$) で有意差が観測された ($U = 473, p < 0.01$)。表情6のマスクなしの表情

($M = 1.87$, $SD = 1.03$) とマスクありの表情 ($M = 3.55$, $SD = 0.78$) で有意差が観測された ($U = 473$, $p < 0.01$). 上がっている眉毛では、短い眉毛は怒りが強調されない結果となったが、長い眉毛では怒りは強調され、嫌悪・軽蔑はどちらも強調される結果となった。上がっている眉毛では、マスクを装着することで怒りとともに嫌悪・軽蔑の印象も強くなるといえる。

また、片眉が上がり、片眉が下がっている眉毛である表情 5 では、特に驚きや嫌悪の値が高くなっている結果が見られた。驚きに対してマン・ホイットニー U 検定を適用したところ、マスクなしの表情 ($M = 2.03$, $SD = 1.08$) とマスクありの表情 ($M = 2.91$, $SD = 1.50$) で有意差が観測された ($U = 250$, $p < 0.01$). また、嫌悪に対してマン・ホイットニー U 検定を適用したところ、マスクなしの表情 ($M = 2.74$, $SD = 1.25$) とマスクありの表情 ($M = 3.45$, $SD = 1.23$) では有意差は観測されなかった ($p = 0.12$). よって、片眉が上がって片眉が下がっている眉毛では、マスクを装着することで驚きが強調されるといえる。

ニュートラルな形状の眉毛である表情 1 の場合、怒りや軽蔑に対して感情が強くなっている結果が見られた。怒りに対してマン・ホイットニー U 検定を適用したところ、マスクなしの表情 ($M = 1.81$, $SD = 1.08$) とマスクありの表情 ($M = 3.00$, $SD = 1.28$) で有意差が観測された ($U = 250$, $p < 0.05$). また、軽蔑に対して適用したところ、マスクなしの表情 ($M = 1.69$, $SD = 0.98$) とマスクありの表情 ($M = 2.64$, $SD = 1.37$) で有意差が観測された ($U = 296$, $p < 0.05$). よって、ニュートラルな形状の眉毛ではマスクをつけることで怒りと軽蔑が強くなっていることが検証できた。

マスクと PerformEyebrow を併用することで相手に与える印象がマスクなしの場合と比較して強くなることが分かった。

7. まとめ

本研究では、表情拡張可能な人工眉毛形状制御デバイス PerformEyebrow を構築した。人工眉毛はサーモクロミックインクで描かれており、導電性インクで印刷された電熱線に電圧を印加することで、人工眉毛の形状をダイナミックに変化させる。PerformEyebrow のプロトタイプを実装し、PerformEyebrow を装着して眉毛形状を変化させた場合における、印象評価実験を実施し、悲しみや怒りといった感情を表出できることが明らかになった。

今後の課題としては、異なる眉毛形状を用いた場合における印象評価実験の実施、PerformEyebrow の形状変化速度の向上とその妥当性の評価がある。さらに、今回の実験では 6 章において静的な眉毛の比較によって PerformEyebrow を印象評価したが、今後は図 7 の表情 2 から表情 4 に変化させたときなど動的に眉毛を変化させた場合における印

象評価に取り組みたい。また、マスク装着時の実験においてはイラストのマスクを用いて実験を行ったが、実物のマスクを用いた場合における比較実験も行う必要がある。さらに、PerformEyebrow は本論文においては眼鏡型ウェアラブルデバイスとなっているが、将来的には眉毛を覆い隠すシリコンベースの薄型人工眉毛インタフェースにすることで、人工眉毛が作り物であることが分からなくなるように、外見のクオリティを向上させることを考えている。

謝辞 本研究に取り組むにあたり、助言をくださった寺井あすか准教授に深く感謝致します。また、本研究は JSPS 科研費 19H04157 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Mehrabian, A.: Nonverbal betrayal of feeling, *Journal of Experimental Research in Personality*, Vol.5, No.1, pp.64-73 (1971).
- [2] Mehrabian, A.: *Nonverbal Communication*, Transaction Publishers (1972).
- [3] Mehrabian, A. and Ferris, S.R.: Inference of attitudes from nonverbal communication in two channels, *Journal of Consulting Psychology*, Vol.31, No.3, p.248 (1967).
- [4] Ekman, P.: Facial expressions of emotion: New findings, new questions, *Psychological Science*, Vol.3, No.1, pp.34-38 (1992).
- [5] 渡邊伸行, 前田亜希, 山田 寛: 表情認知における物理変数と心理変数の対応関係: Affect Grid 法を用いた検討, 電子情報通信学会技術研究報告. HCS, ヒューマンコミュニケーション基礎, Vol.103, No.410, pp.1-6 (2003).
- [6] Shah, R. and Lewis, M.: Locating the neutral expression in the facial-emotion space, *Visual Cognition*, Vol.10, No.5, pp.549-566 (2003).
- [7] Godinho, R.M., Spikins, P. and O'Higgins, P.: Supraorbital morphology and social dynamics in human evolution, *Nature Ecology & Evolution* (2018) (online), available from (<http://www.nature.com/articles/s41559-018-0528-0>).
- [8] 渡邊伸行, 鈴木竜太, 山田 寛: 表情認知に関わる顔の視覚的構造変数の再検討, 認知心理学研究, Vol.3, No.2, pp.167-179 (2006).
- [9] Misawa, K. and Rekimoto, J.: ChameleonMask: Embodied Physical and Social Telepresence Using Human Surrogates, *Proc. 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.401-411, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/2702613.2732506 (2015).
- [10] Akaike, Y., Komeda, J., Kume, Y., Kanamaru, S. and Arakawa, Y.: AR Go-Kon: A System for Facilitating a Smooth Communication in the First Meeting, *2014 IEEE 11th Intl. Conf. on Ubiquitous Intelligence and Computing and 2014 IEEE 11th Intl. Conf. on Autonomic and Trusted Computing and 2014 IEEE 14th Intl. Conf. on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops*, pp.120-126 (2014).
- [11] 萩原早紀, 栗原一貴: シースルー型 HMD を用いた社会福祉学的アプローチに基づく視線恐怖症のコミュ障支援システムの開発と検証, コンピュータソフトウェア, Vol.33, No.1, pp.52-62 (オンライン), DOI: 10.11309/jssst.33.1.52 (2016).
- [12] Osawa, H.: Emotional Cyborg: Complementing Emotional Labor with Human-Agent Interaction Technology,

- Proc. 2nd International Conference on Human-Agent Interaction*, pp.51–57, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/2658861.2658880 (2014).
- [13] Kao, H.-L.C., Mohan, M., Schmandt, C., Paradiso, J.A. and Vega, K.: ChromoSkin: Towards Interactive Cosmetics Using Thermochromic Pigments, *Proc. 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.3703–3706, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/2851581.2890270 (2016).
- [14] Kao, C.H.-L., Nguyen, B., Roseway, A. and Dickey, M.: EarthTones: Chemical Sensing Powders to Detect and Display Environmental Hazards through Color Variation, *Proc. 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.872–883, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/3027063.3052754 (2017).
- [15] Maruyama, E. and Kakehi, Y.: FacialMarionette: An On-Skin Interface for Controlling Facial Expressions and its Applications, *Proc. CHI 2017 Workshop on Amplification and Augmentation of Human Perception* (2017).
- [16] 渡邊伸行, 鈴木竜太, 山田 寛: 表情の知覚的判断に関わる視覚情報: 3次元構造の検討, 電子情報通信学会技術研究報告. HCS, ヒューマンコミュニケーション基礎, Vol.102, No.598, pp.43–48 (2003).
- [17] 渡邊伸行, 鈴木竜太, 山田 寛: 表情認知における心理物理的關係の再検討, 日本認知心理学会発表論文集, Vol.2003, p.178 (2003).
- [18] Tsujii, T., Koizumi, N. and Naemura, T.: Inkantatory paper: Dynamically color-changing prints with multiple functional inks, *Proc. Adjunct Publication of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.39–40 (2014).
- [19] 増井元康, 竹川佳成, 徳田雄嵩, 杉浦裕太, 正井克俊, 平田圭二: 水冷回路と導電性銀ナノ粒子インク印刷による電熱回路を統合した高速サーモクロミズム制御手法の提案, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), Vol.2020, No.3, pp.1–7 (2020).
- [20] 加藤徹也, 青木滉一郎, 菅原 徹, 村上智加, 宮崎正己: 目と眉の間隔の違いが顔の印象に及ぼす影響, 日本感性工学会論文誌, Vol.14, No.3, pp.419–424 (2015).
- [21] 九島紀子, 齊藤 勇: 化粧が対人印象に及ぼす影響, *Japanese Journal of Applied Psychology*, Vol.41, No.1, pp.39–55 (2015).
- [22] Matsumoto, D.: More evidence for the universality of a contempt expression, *Motivation and Emotion*, Vol.16, No.4, pp.363–368 (1992).



増井 元康

2020年公立はこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科卒業。2022年同大学大学院博士前期課程システム情報科学研究科修了予定。XR（エクステンデッド・リアリティ）に関する研究に興味を持つ。



竹川 佳成（正会員）

2007年大阪大学大学院情報科学研究科博士課程修了。同年神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部助教。2012年公立はこだて未来大学システム情報科学部助教。2014年同大学システム情報科学部准教授、現在に至る。

2011年MIT Media Lab.でAssistant Visiting Professorを兼務。2019年University of SussexでVisiting Readerを兼務。博士（情報科学）。ヒューマンコンピュータインタラクション、音楽情報科学、学習支援の研究に従事。



新田 野乃華

2021年公立はこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科卒業。認知心理学に関する研究に興味を持つ。



徳田 雄嵩

2006年Purdue大学（米）理学部応用物理学科卒業。2008年東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了。同年同大学院工学系研究科先端学際工学博士課程進学、CREST「デジタルパブリックアートを創出する技術」のリサーチアシスタントとして公共空間における実空間ディスプレイの研究に携わる。2010年東京インタラクションセンター設立。2011年東京大学大学院博士課程休学。同年パナソニック株式会社デザインカンパニー、2012年グーグルジャパン勤務。2013–2014年度マイクロソフト研究所（米）インターンとして再帰性反射型空中像ディスプレイ（pAIRR）の研究に携わる。2015年宇都宮大学大学院工学研究科産学官連携研究員として空中像ディスプレイ実用化に関する研究に従事。2016–2019年サセックス大学（英）科学技術学部研究員として形状変化ディスプレイの研究に従事。2020年東京大学大学院工学系研究科先端学際工学より博士号（工学）を取得。同年、株式会社パリティ・イノベーションズ研究員を経て現在、香港城市大学クリエイティブメディア学部助理教授。実空間型ディスプレイ、音響メタマテリアル、液体金属を用いた形状変化ディスプレイ等物理世界とデジタル世界の融合を可能にするメディア表現技術の研究に従事。ACM会員。



杉浦 裕太

2013年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科博士後期課程修了。博士（メディアデザイン学）。同大学特任助教，産業技術総合研究所特別研究員等を経て，2016年慶應義塾大学理工学部情報工学科助教に就任。2018年同専任講師，2020年同准教授。実世界計測技術を基盤として医工連携に関する研究に従事。



正井 克俊

2018年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了。博士（工学）。日本学術振興会特別研究員（DC2），慶應義塾大学理工学部情報工学科助教等を経て現在，日本電信電話株式会社NTTコミュニケーション科学基礎研究所リサーチアソシエイト。人の非言語動作をセンシングするウェアラブルインタフェースに関する研究に従事。



平田 圭二（正会員）

1987年東京大学大学院工学系研究科情報工学専門課程博士課程修了。工学博士。同年NTT基礎研究所入所。1990～1993年（財）新世代コンピュータ技術開発機構（ICOT）に出向。2011年公立はこだて未来大学教授。2020年より同大学副学長，理事。1993年音楽情報科学研究会初代主査。2005～2007年，2011～2013年本会理事。2010～2015年デジタルプラクティス誌編集委員長。2001年度，2011年度論文賞，2003年度山下記念研究賞。現在，知能メディア処理，MaaSの研究に従事。本会シニア会員。