

テクニカルノート

仮面劇のためのプロトタイピングが容易な動的な外見拡張手法

増井 元康^{1,a)} 竹川 佳成¹ 平田 圭二¹

受付日 2021年8月7日, 採録日 2021年10月8日

概要: 本研究では仮面劇のためのプロトタイピングが容易な動的な外見拡張手法の提案を目的とする。提案手法は、温度によって変化するサーモクロミックインクを用いる。サーモクロミックインクの下に導電性インクで回路を敷設し電流を流すことで、サーモクロミックインクを変色させる。また、サーモクロミックインクの余熱を利用して、仮面にサーモクロミックインクで描かれた部分の形状が変化したことを装着者が知覚できる機構を提案する。演技中にトラブルなく動作しているか鏡を見なくても確認しながら演技に集中できる。本研究では、典型的な利用シーンとして学芸会などの演劇を設定し、演者がストーリー中のキャラクタを再現するために仮面を手作りする状況を想定する。そのため、提案手法の有用性を4つの観点（制作にかかる費用、演技の支援、表現の多様性、変化の知覚）から検証した。

キーワード: サーモクロミックインク, 電熱回路

Dynamic Appearance Augmentation Method that Enables Easy Prototyping of Masks for Performance

MOTOYASU MASUI^{1,a)} YOSHINARI TAKEGAWA¹ KEIJI HIRATA¹

Received: August 7, 2021, Accepted: October 8, 2021

Abstract: The purpose of this study is to propose a dynamic facial expression augmentation method that enables easy prototyping of masks for performance. The proposed method uses thermochromic ink that changes according to temperature. In this study, we propose a new method to augment the facial expressions of a masked person by using thermochromic ink that changes color depending on temperature. We also propose a mechanism that allows the wearer to perceive the change in the shape of the part of the mask drawn with thermochromic ink, by using the residual heat of the thermochromic ink. During performance, the wearer can check whether the mask is working without any trouble and without looking in a mirror and can therefore concentrate on the performance. In this study, we assume that a typical use of the system is in a theatrical performance such as a school play, where the performers make masks by hand in order to reproduce the characters in the story. The usefulness of the proposed method is evaluated from four perspectives (cost, support for performance, diversity of expression, and change perception).

Keywords: thermochromic ink, electrothermal circuit

1. はじめに

古今東西、仮面は、演劇においてストーリーへの没入感を高めるための小道具として使われてきた。その利用範囲は、演劇にとどまらず、儀式・演舞・演奏・ドラマ・映画・

プロレス・コスプレなど幅広く使われている。また、顔全体を隠すフルフェイスマスク、顔の一部を隠す仮面など多種多様で、仮面が瞬間的に変わる変面といった中国の伝統芸能もある。厚紙・絵具・ハサミがあれば仮面を作れるため、その制作の手軽さゆえに、幼稚園や小学校において、演劇の小道具としての仮面を子供が自主的に制作することは一般的である。最近では、LEDやELパネルを内蔵した仮面も販売されており表現手段は多様化している。

¹ 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

^{a)} g2120045@fun.ac.jp

本研究では、典型的な利用シーンとして学芸会などの演劇を設定し、ストーリー中のキャラクタを再現するために仮面を手作りする状況を想定する。ストーリー中のキャラクタは多種多様であるが、いずれのキャラクタもダイナミックに変化する感情を持ち合わせる場合が多く、キャラクタの外見を模すだけでなく、ストーリー中のキャラクタの感情をいかに再現するかも重要である。感情を伝達する手段として、非言語情報と言語情報がある。Mehrabian [1] は、感情の伝達において言語情報よりも非言語情報の重要性を主張している。非言語情報の中でも表情や身振りといった視覚情報の方が聴覚情報よりも感情の推測において大きな役割を担っている [2], [3]。また、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といわれている [4]。また、伽話「浦島太郎」のクライマックスにおいて、浦島太郎が玉手箱を開けることによって年齢がダイナミックに変化するシーン、鶴が人に化けるといった役柄が変化するシーンといったように、仮面劇ではフィクション性の強い物語を演じることが多く現実世界ではありえない変化が期待される場合も多い。既存の仮面の外見は静的で変化しなかったため、演者は身振りや声のイントネーションなどでキャラクタの変化を表現するしかなく限界があった。制作の手軽さを失わずに動的に仮面の外見を変化させられる仕組みがあれば、演劇における表現力や説得力は高まると考えられる。

そこで、本研究ではプロトタイプングが容易な動的仮面拡張手法の提案を目的とする。提案手法は、温度によって変化するサーモクロミックインクを用いる。サーモクロミックインクの下に導電性インクで電熱線を描き電流を流すことで、サーモクロミックインクを変色させる。また、サーモクロミックインクの余熱を利用して仮面上の色が変化したことを装着者が知覚できる機構を提案する。演技中にトラブルなく動作しているか鏡を見なくても確認しながら演技に集中できる。

本研究の貢献は以下のとおりである。

- プロトタイプングの容易さと表現力の拡張を両立させた外見拡張手法の提案
- 外見が変化したか装着者自身が知覚できる手法の提案

2. 関連事例

顔全体や顔の一部を変えるシステムやデバイスが提案されてきた。

メディアアートとして、山田太郎プロジェクト^{*1}や、TABLETMAN^{*2}といったタブレット PC を顔に装着する作品がある。山田太郎プロジェクトとは、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という一時的かつ匿名性のある演出である。TABLETMAN は、

株式会社東芝が宣伝のために作り出したキャラクタで、光るラインの入った特撮ヒーロのようなスーツに、いくつものタブレット PC を頭部や腕や腹部に搭載している。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 [5] 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明確化や身体的存在感を出すために、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。よって、代理人は遠隔ユーザへ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。本研究では仮面の拡張を目指しており、仮面そのものをタブレットで置き換えるこれらの研究とは異なる。

大澤の AgencyGlass [6] 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。液晶ディスプレイを用いる AgencyGlass とは異なり、本研究では加工のしやすさという観点から、サーモクロミックインクによる仮面の外見拡張手法に注力する。

本研究と近い研究として、ChromoSkin [7], [8] がある。ChromoSkin は拡張化粧品を提案しており、たとえば、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であるが、ChromoSkin は顔面上に直接電熱回路とサーモクロミックを貼り付けている一方、本研究では仮面上にこれらを配置するという点で、また、仮面の装着者が形状変化を知覚できるような仕組みを検討している点で異なる。

顔の外見を変化させるウェアラブルデバイスとして、筆者らは e2-MaskZ [9] や PerformEyebrow [10] を開発している。e2-MaskZ はフォトリフレクティブセンサと薄型のディスプレイによって構成された、ユーザの顔をアバタの顔にリアルタイムで置き換えることができる仮面型デバイスである。また、PerformEyebrow はサーモクロミックインクと電熱回路によって構成された人工眉毛形状変化デバイスである。電熱回路を動的に加熱制御することで、電熱回路上の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。本研究は、サーモクロミックインクで構成された仮面による動的仮面拡張手法に着目している点において e2-MaskZ と異なる。また、装着者自身がデバイス上の状態変化を知覚できる点において

^{*1} <https://vimeo.com/82250584>

^{*2} <https://www.greatworks.jp/works/tablet-man.html>

PerformEyebrow と異なる。

3. 設計

本研究では、プロトタイプが容易な動的な外見拡張手法を構築する。

本研究で想定する典型的な利用シーンとして、仮面を小道具として利用する演劇がある。演者あるいは小道具作成者が、ストーリー中のキャラクターの感情を再現するために、たとえば、眉毛・目・口、漫付、皺といった表情に影響するパーツのラフ画を描いたり、切ったり折り曲げたりしたパーツを仮面上に置いて検討している状況を想定している。ここでは、たとえば、動的に色が変わるパーツを工作室やアトリエで制作し、キャラクターの心情を表現できているか制作者自身が確認し修正するという試行錯誤もプロトタイプの一環として想定している。

3.1 要件

上述した想定環境での利用を満たすための動的な外見拡張手法の要件を下記に示す。

- (1) 低コストであること：何度も作り直すことを想定しているため、金銭面において低コストで仮面が作れることが望ましい。
- (2) 演劇を妨げないこと：練習・リハーサル・本番など演者が演劇に集中していても利用できるように配慮する必要がある。仮面の外見を変化させるために頭部に大きいあるいは重いデバイスを取り付ける必要があると、演者は演技をしにくくなってしまう。
- (3) 多様な表現ができること：仮面の形や色は多種多様で、外見変化の表現は多様であるほど制作の幅が広がる。したがって、動的に変化させたい部位の形状や色を自由にデザインできることが求められる。
- (4) 変化を知覚できること：たとえば、不快を表現するために自分自身の眉を寄せる場合、驚きを表現するために口を開ける場合においては、自分の顔面上の筋肉そのものが収縮することで、意図する表情を表現できているのか、自分自身で理解できる。しかし、仮面上のある部位が変化した場合、鏡を見る以外、適切に変化しているのか確認できない。一方、演劇の中にはアクティブなダンスやパフォーマンスがあり、外見拡張モジュールそのものや、ケーブルの断線により、意図どおりの外見を表現できない場合もある。特に自由なタイミングで鏡で確認できない本番においてはその重要性は高まる。

3.2 使用する素材の検討

外見拡張手法のアプローチとして、クロミック素材・ディスプレイ・LED の 3 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

表 1 使用する素材の検討結果

Table 1 Results of the study of materials to be used.

使用する素材	(1)	(2)	(3)	(4)
サーモクロミック	○	○	○	○
フォトクロミック	○	×	×	×
ディスプレイ	×	×	◎	×
LED	×	○	○	×

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に適しているかどうか検討した結果を 3 段階 (◎ (満たす), ○, × (満たさない)) で評価し、その結果を表 1 に示す。以下、詳細に説明する。

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り、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。また、サーモクロミッ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、絵具と同様の取り扱い方法で手軽である。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、紙や布などさまざまな素材に塗布できる。また、サーモクロミックを変色させるために、電熱回路を配置する必要があるが、4.1 節に後述するように、銅テープ^{*4}に切れ込みを入れることで紙状の電熱回路を制作でき [11]、サーモクロミックインクを塗布した紙と銅テープを貼り付けるだけで、軽量・屈曲可能・色変化可能なモジュールを制作できる。サーモクロミックインクの色は数種類あり、これらを組み合わせることでさまざまな色を作れる。これらの特性より、さまざまな仮面のデザインに適用できる。さらに、電熱回路で発生した熱を熱伝導率の高い素材を介して皮膚に伝えることで、直接的に形状変化しているかどうか知覚できる。加えて、電熱回路に印加する電圧を制御することで、外見変化のタイミングや速度を制御できる。

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。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、仮面上のある部分一面を変化させるためには、外付ライトの設置や、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、変色後の色はスポットライトがあたるような明るい場所では見えにくい。さらに、変色したかどうかを装着者自身が知覚するためには、付加的デバイスが必要となる。加えて、太陽光に反応してしまうため、屋外といった日差しが強い場所で、フォトクロミック

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

^{*4} <https://www.monotaro.com/g/00007078/?t.q>

の色の制御は困難である。

ディスプレイ：ディスプレイとは、液晶ディスプレイや有機ELディスプレイを意味する。ディスプレイは加工しにくく、形状にフィットしたディスプレイの作成は難しい。しかし、多彩な色を表現できる利点がある。ディスプレイ上の映像変化を直接的に知覚することは難しい。

LED：小型軽量なLEDを形状にあわせて敷設することで、さまざまな形状を構築できるが、各LEDを制御するための配線が複雑になる。また、形状を短時間かつ手軽に変更することや、明滅の変化を直接的に知覚することは難しい。

表1の結果を考慮して、本研究ではサーモクロミックを外見拡張手法の素材として利用する。

4. 動的な外見拡張手法

本研究で提案する動的な外見拡張手法について述べる。図1に示すように、サーモクロミックインク層、電熱回路層、余熱伝搬層から構成される。以下、その制作の流れを説明する。

4.1 制作の流れ

- (1) アクリル絵の具を使って、仮面に好きなデザインを描く。
- (2) 図1(a)のように、サーモクロミックインクで形状変化させたい部分のデザインを描いていく。サーモクロミックインクで描いた部分（サーモクロミックインク層）は、熱を加えると消えてしまうことに注意する。ドライヤーでサーモクロミックインクで描いた部分の色の変化を確認することができる。
- (3) サーモクロミックインクで描いた部分と同じ大きさの電熱回路（電熱回路層）を作る。たとえば、図1(b)

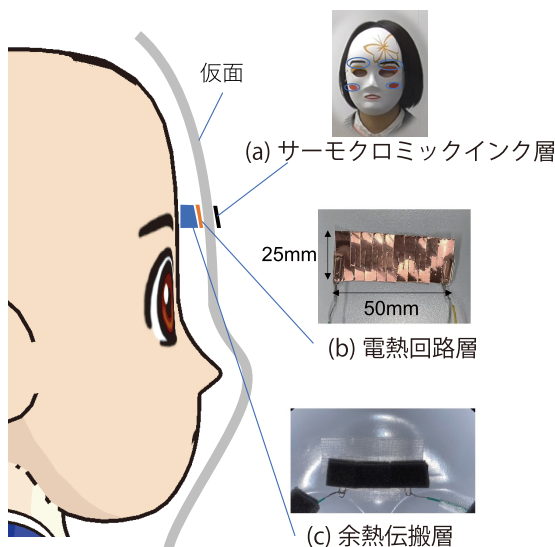


図1 システム構成

Fig. 1 System configuration.

のようにハサミを使って銅テープに同様の切れ込みを挿入することで、同様の電熱回路を作成できる。迂曲状に描かれた線によって熱を伝搬させる。眉毛・目・口、漫符、皺といったさまざまなパーツに高い汎用性で適用できるようにするために、図1(b)のサイズにしている。また、コの字型の回路にすることで、電熱回路の長さをはさみなどで容易に切断できる。これにより最適なサイズの電熱回路を作成できる。さらに、銅テープを用いる方法以外に、図1(b)と同様のサイズの電熱回路を、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て作成することも可能である。

- (4) 仮面の裏側に電熱回路を貼り付ける。
- (5) ケーブルと電熱回路をテープで止める。1度の操作で複数のエリアを制御したい場合は、ケーブルを直列に接続する。各エリアを個別に制御したい場合は、それぞれのケーブルを接続する。
- (6) 図1(c)のように、クッション（余熱伝搬層）を電熱回路に取り付ける。仮面装着時には、電熱回路加熱時に生じるクッションの熱によって、サーモクロミックインクの変化を装着者が知覚することができる。

4.2 制作された仮面の例

以上のような手順で制作された作品の例を紹介する。マスクとしてCOOKY.D社が販売しているポリスチレン素材のマスク*5を利用した。

図2(a)は、悲しみを表現するために涙マークが使われる。図2の仮面には、眉毛の形を変える機能や、悲しみや喜びを表す漫符の機能が付与されている。この作品の制作時間（企画時間を除く）は、約30分である

図2(b)も、特定のパーツが変化する仮面である。アクリルインクで顔を描いた後に、黒色のサーモクロミックインクを塗っている。

図2(c)は頬に黄色のアクリルインクで花を描いた後、橙

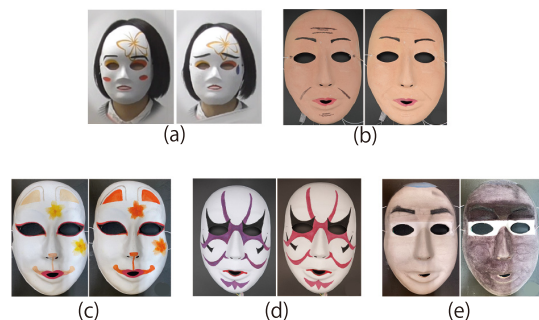


図2 制作したプロトタイプ

Fig. 2 The prototype we created.

*5 <https://www.amazon.co.uk/COOKY-D-Plastic-Halloween-Cosplay-Costume/dp/B07H7JGNH3>

色のサーモクロミックインクを塗っている。図 2(d) は、青色のアクリルインクと赤色のサーモクロミックインクを混ぜ合わせて、模様を塗っている。制作にかかった時間（構想時間を除く）は、約 1 時間である。

図 2(e) は、顔全体が忍者（加熱前）から侍（加熱後）に変化した仮面である。仮面全体を変化させるという特徴があるため、制作にかかった時間（企画時間を除く）は約 5 時間である。

4.3 制作に必要な費用

提案手法の制作において必要な素材は、銅テープ*4、下地となる仮面*5、サーモクロミックインク*6、クッション用のスポンジ*7、アクリルインク*8、ケーブル、電池、スイッチである。銅テープ、サーモクロミックインク、アクリルインク、下地の仮面（10 個）はいずれも 1,500 円程度、クッション用のスポンジ、ケーブル、電池、スイッチはいずれも 300 円程度で買い揃えることができる。そのため提案手法はディスプレイや LED と比較して、何度も仮面を作り直すという前提において低コストな制作が可能であり、3.1 節の要件 (1) を満たしているといえる。

5. 表現の多様性の検証

3.1 節の要件 (3) に基づいて、サーモクロミックインクと電熱回路を組み合わせた際における表現の多様性について記述する。

- 新色の作成：サーモクロミックインクやサーモクロミック粉末にはさまざまな色があり、それらを混ぜることで新しい色を作り出すことができる。シアン (C)、マゼンタ (M)、イエロー (Y)、ブラック (K) の 4 種のサーモクロミックインクを一定量混ぜ合わせた結果を図 3 に示す。図 3 左側の数字が混ぜた各色の分量、右側が混ぜた結果である。本実験では容量 3ml のス

混ぜた分量 (C,M,Y,K の順) [滴]	
① 0,0,8,0	⑮ 8,4,0,0
② 0,2,8,0	⑯ 8,2,0,0
③ 0,4,8,0	⑰ 8,0,0,0
④ 0,6,8,0	⑱ 8,0,2,0
⑤ 0,8,8,0	⑲ 8,0,4,0
⑥ 0,8,6,0	⑳ 8,0,6,0
⑦ 0,8,4,0	㉑ 8,0,8,0
⑧ 0,8,2,0	㉒ 6,0,8,0
⑨ 0,8,0,0	㉓ 4,0,8,0
⑩ 2,8,0,0	㉔ 2,0,8,0
⑪ 4,8,0,0	㉕ 2,4,8,0
⑫ 6,8,0,0	㉖ 4,6,8,0
⑬ 8,8,0,0	㉗ 4,6,8,4
⑭ 8,6,0,0	㉘ 0,0,0,8



図 3 新色の作成

Fig. 3 Creation of new colors.

*6 <https://www.sfx.co.uk/collections/thermochromic-ink/products/thermochromic-screen-printing-ink-black-31-c>

*7 <https://www.monotaro.com/p/8620/0424/>

*8 <https://amzn.to/3liaOuN>

ポイトを使用した。たとえば、C, M, Y, K のそれぞれのインクを 0 滴, 8 滴, 8 滴, 0 滴の分量で混ぜた場合、図 3 右側の 5 番の色が作成される。このように、混ぜる色の配分を変えることで、色の表現のバリエーションを増やすことができる。

- アクリルインクを用いた色の変化：サーモクロミックインクとアクリルインクの組合せによる多様な色の変化が考えられる。たとえば、図 2(d) でも用いたように、赤のサーモクロミックインクと青のアクリルインクを混ぜると、紫色のインクが生成されるが、赤のサーモクロミックインクの変色温度に達したときに青のインクだけを残すことができる。

6. 実運用

図 2 で示すマスクを用いて実運用した。図 4 は仮面を装着し実運用した際の一部である。また、表 2、表 3、表 4 は、当該マスクの外見が変化するシーンを抜粋した台本である。「装着時は動きやすく、1つの仮面で簡単に感情などを表現できるため、演技しやすいと感じた」というコメントが得られた。また、「演技中に外見が変化したかどうか分かることは安心する」というコメントが得られ、提案手法の特徴である外見の変化の知覚に関してポジティブなコメントが得られた。また、「演劇中の役柄のイメージや表現は講演を重ねるにつれ変化する。ステージの大きさや、演者と観客の近さによって、仮面に求める外見は変わってくる。仮面の色や皺の数などを簡単に修正できることはうれしい」とプロトタイプの容易さに関してポジティブなコメントが得られた。以下に実運用の詳細を示す。

6.1 感情の操作

図 4(a) は図 2(d) の仮面を用いた場合の運用を撮影している。台本は表 2 のとおりである。男と仮面を被った女の感情の変化を描写している。仮面の色を変化させる前は図 4(a)-①の状態、仮面の色を変化させた後は図 4(a)-②と



図 4 実運用

Fig. 4 Actual operation.

表 2 心情の操作 (図 4(a)) における台本の例

Table 2 Examples of scripts involving emotional manipulation.

発話者	台詞
女	あの、すみませんが
男	おい！バケモン！
女	どうしてそんなことばかり言われなきゃいけないの！ 毎日毎日もう嫌！ (数日後)
女	また来たの！？刺すわよ！！ (図 4(a)-①)
男	違うよ、そうじゃない。
女	え？何よ？
男	惚れてしまったんだ。
女	だから優しくしてくれるの？
男	付き合ってくれないか。
女	もちろん…！
男	また来るね。 (数日後) (仮面の色を変化)
男	来たよ。
女	ねえ、このお花摘んできたの。(図 4(a)-②) もらってくれない？

表 3 役の操作 (図 4(b)) における台本の例

Table 3 Example of a script involving role manipulation.

発話者	台詞
忍者	殿、報告に参りました。(図 4(b)-①) こちらの軍の方がやや優勢、 あちらの城を落とすのにも時間はかからないでしょう。 早くあいつらを倒しましょう。 私はまた支度をし、行ってまいります。 少しでもいい報告ができるように戦ってまいります。 失礼いたします。 (暗転) (仮面の色を変化)
殿様	優勢か… (図 4(b)-②) ここまで来るのにどれだけの犠牲を出してしまっただろうか… あいつもいついなくなるかわからない。 少しでも早くこの戦いに勝ち、 これ以上の犠牲を出さないようにしなければ…

表 4 年齢の操作 (図 4(c)) におけるシナリオの例

Table 4 Example of a scenario involving age manipulation.

発話者	台詞
男	おい、いいものを持ってきたぞ。
女	え？何あら！かっこいい箱ね！何が入っているの？
男	わからん、隣の家から取ってきた。旅行の土産って言っていた。 きつといらぬものなんだろう。ほれ、開けてみよう。(図 4(c)-①)
女	ええ！早く開けましょう。 (仮面の色を変化)
男	え？なんだ？ (図 4(c)-②)
女	あなた！顔が…
男	お前こそ！
女	メガネかけないととはっきりと見えないわ…
男	こんなもの盗まなきゃよかった！

なっている。以上のように、ナイフと花のような小道具と仮面を組み合わせることで、演者の感情表現を高められる。

6.2 役柄の操作

図 4(b) は図 2(e) の仮面を用いた場合の運用を撮影している。台本を表 3 に示す。図 2(e) の仮面の装着者が 1 人 2 役で殿様と忍者を演じており、戦いのシーンにおける忍者 (図 4(a)-①) と殿様 (図 4(a)-②) のやりとりが表現



図 5 実験で加熱した箇所

Fig. 5 Points heated in the experiment.

されている。提案手法を用いることで、忍者と殿様のような、役柄の操作が可能である。

6.3 年齢の操作

図 4(c) は図 2(c) の仮面を用いた場合の運用を撮影している。台本を表 4 に示す。ストーリーのはじめは図 4(c)-①の状態では、小道具の黒色の玉手箱を開けると同時に、仮面のスイッチを押し仮面を変化させることで、図 4(c)-②の状態のような、登場人物の男の顔には皺ができ、女の顔にはメガネがかかった描写になる。このように仮面を用いた年齢の操作も可能となる。

7. 電熱回路の発熱の知覚実験

電熱回路が発熱したことを知覚できるか検証するために実験した。

被験者

被験者は成人 11 名で、全員が初めて提案手法を適用した仮面を装着した。眼鏡の上からは装着できないため、眼鏡をかけている被験者には、眼鏡を外すように指示した。

実験内容

図 5 に示すように、額の右側、左眉、左目の下、右頬、顎の 5 カ所を個別に制御できる仮面を作成した。また、35°C で変化するサーモクロミックインクを使用した。

実験の手順

実験は以下の手順で行った。

- (1) 被験者は椅子に座り仮面を装着する。
- (2) 実験者は仮面の加熱したい箇所の電熱回路に電圧を印加する。
- (3) 被験者は仮面のどの部分が加熱されたかを答える。
- (4) 実験者は仮面のサーモクロミックインクが消えたことを確認した後、仮面の加熱していた箇所への電圧印加を停止する。
- (5) 回答後、被験者は加熱された場所のサーモクロミックインクが元に戻るまで待つ。加熱する部分をランダムに変えながら、2 と 5 を繰り返し行った。

被験者への指示

被験者には、「顔のどの部分が温かいかを言ってほしい」、「電熱回路が熱くなりすぎたら、すぐに実験者に伝えてほ

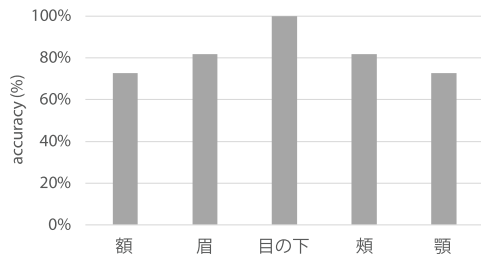


図 6 実験の結果

Fig. 6 Results of the experiment.

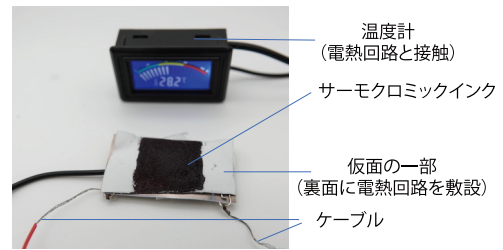


図 7 実験キット

Fig. 7 Experiment kit.

しい」と伝えた。

結果

電熱回路の発熱の知覚実験における被験者全体の正答率の平均を図 6 に示す。全実験箇所において 70%以上の正答率となった。最も正答率が高い部分は目の下の部分である。目の下は頬骨の上にあたり仮面への密着が高かったからと考えられる。一方、頬や顎はマスクとの隙間が生じたため、熱くなっていることに気づけなかった。また、3名の被験者は、鼻や口による呼吸により頬や顎付近が温まり回路が熱くなっていることに気づけなかったとコメントしていた。額や眉毛部分は、髪や眉毛により熱が遮られてしまい、回路が熱くなっていることに気づけなかった。

マスクと肌との隙間に関しては、単純な方法としては、スポンジを分厚くすることで解決できるが、分厚くすることで熱の伝導性が弱まるというトレードオフが生じてしまう。スポンジの分厚さと熱の伝導性の関係や、熱くなっていると肌で感じる事ができるスポンジの分厚さの上限を調べる必要がある。これらは今後の課題である。また、息に関しては、仮面に息を排出する穴をあけることで解決できる。さらに、額に関しては仮面装着時に髪がスポンジと肌の間にはさまならないように工夫してもらうことで解決できる。加えて、眉毛に関しては、回路を若干大きくして、眉毛以外付近の皮膚にスポンジが密着することで解決できると考えられる。

8. 変色速度の検証

実験によってサーモクロミックインクの変色速度を調査した。

実験キット

実験で用いた電熱回路は図 1 (b) と同様のものである。50 mm × 25 mm の銅テープに 2.5 mm 間隔で切り込みを入れ電熱回路を作成した。また、図 7 のように、プロトタイプと同じ仮面の一部を切り取り、35℃ で色が変わるサーモクロミックインクを塗った。電熱回路の上には、仮面の一部と温度計を設置した。本論文では、これを「実験キット」と呼ぶ。

実験中の様子をビデオカメラで撮影した。

実験の手順

実験は以下の手順で実施した。実験は室温 27℃ の室内で行った。

- (1) 自然な状態の実験キットに電圧を印加する。
- (2) サーモクロミックインクが消失する温度である 35℃ で電圧を停止する。同時にサーモクロミックインクが消えたことを確認する。
- (3) 電圧印加開始から終了までの時間を記録する。
- (4) 仮面の一部の温度計の温度が、電圧印加開始時の温度に戻ったことを確認する。

結果

サーモクロミックインクの変色温度である 35℃ に達するのにかかる時間は 12 秒であった。サーモクロミックインクの変色時間を短縮するために、今後は電熱回路の線の太さや長さを調整し、最適な電熱回路の形状を調べる必要がある。また、変色速度の制御を容易に行えるようにするために、今後は室温が異なる場合や、異なる形状の電熱回路を用いた場合における詳細な変色速度の検証を行う必要がある。

9. おわりに

本論文では、試作が容易で、動的な外見拡張が可能であり、変化を知覚できる制御手法を構築した。提案手法の有用性を 4 つの観点（制作にかかる費用、演技の支援、表現の多様性、変化の知覚）から検証した。提案手法を実現するために必要な費用は安価で、演者が簡単にマスクを制作できる。また、サーモクロミックインクの色を混ぜることで、さまざまな色を作り出すことができる。実際にマスクを試作し、その効果を確認した。また、提案手法は、出演者がマスクの色の変化を知覚できる機構を持ち合わせている。評価実験の結果、額の右側、左眉、左目の下、右頬、顎の 5 カ所において 70%以上の精度で変化を知覚できることを図 6 から確認した。変色速度について検証を実施したところ、変色時間は 12 秒であることを確認した。

今後の課題として、変色速度の制御性に関する詳細な評価実験があげられる。また、サーモクロミックインクは紙状の面の上に塗布したが、仮面の素材は、布・プラスチックなど多種多様である。サーモクロミックインクを塗布す

る下地となる素材を変えた場合における表現の多様性や、変色速度の制御性に関する検証などがあげられる。

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, pp.248–252 (1967).
- [4] Ekman, P.: Facial expressions of emotion: New findings, new questions, *Psychological Science*, Vol.3, No.1, pp.34–38 (1992).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] Umezawa, A., Takegawa, Y., Suzuki, K., Masai, K., Sugiura, Y., Sugimoto, M., Tokuda, Y., Plasencia, D.M., Subramanian, S., Takahashi, M., Taka, H. and Hirata, K.: E2-MaskZ: A Mask-Type Display with Facial Expression Identification Using Embedded Photo Reflective Sensors, *Proc. Augmented Humans International Conference, AHs '20*, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/3384657.3385332 (2020).
- [10] 増井元康, 竹川佳成, 新田野乃華, 徳田雄高, 杉浦裕太, 正井克俊, 平田圭二: PerformEyebrow: 表情拡張可能な人工眉毛形状制御デバイスの提案, 情報処理学会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-HCI-189, No.10 (2020).
- [11] 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).



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

2007年大阪大学大学院情報科学研究科博士課程修了。同年より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年より公立はこだて未来大学システム情報科学部准教授，現在に至る。2011年にはMIT Media Lab.にてAssistant Visiting Professorを兼務。2019年にはUniversity of Sussexにて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。



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。