

テクニカルノート

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

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

受付日 2021年5月7日, 採録日 2021年9月9日

概要: インクジェット印刷可能な導電性銀ナノ粒子インクの普及にともない, 電熱回路パターンとサーモクロミックインクを組み合わせた軽量で薄く可搬性の高いウェアラブルディスプレイが近年注目されている. 温度の変化によって可逆的に変色するサーモクロミズムを応用したディスプレイは加熱・冷却の遅延による低応答性が問題とされてきた. そこで本研究では水冷回路と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を提案する. 評価実験として, 水冷回路の有無による電熱パターン冷却時間の比較を行い, 提案手法の有用性を検証した. また, 顔表情を拡張する人工眉毛デバイス PerformEyebrow, サーモクロミズムを応用した動的なお面やアンケートといった, 本研究における高速発色制御手法を応用したアプリケーションを作成し, 新たなメディア技術としての可能性を示した.

キーワード: 電熱回路, 水冷装置

High Speed Thermochromism Control Method by Integrating Water Cooling Circuit and Electric Heating Circuit Printed with Conductive Silver Nanoparticle Ink

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

Received: May 7, 2021, Accepted: September 9, 2021

Abstract: With the widespread use of inkjet-printable conductive silver nanoparticle inks, lightweight, thin, and portable wearable displays that combine electrothermal circuit patterns and thermochromic inks have attracted much attention in recent years. Thermochromic displays, which undergo reversible color change according to temperature change, have a problem of low responsiveness due to the delay of heating and cooling. In this study, we propose a high-speed thermochromism control method that integrates a water-cooling circuit and an electric heating circuit using silver nanoparticle ink printing. As an evaluation experiment, we compared the cooling time of an electro-thermal pattern with and without the water-cooling circuit and verified the usefulness of the proposed method. In addition, we have developed applications such as PerformEyebrow, an artificial eyebrow device that extends facial expressions, and dynamic masks and questionnaires based on thermochromism, which demonstrate the potential of our high-speed color control method as a new media technology.

Keywords: electric heating circuit, water cooling system

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

² 香港城市大学
City University of Hong Kong, Kowloon Tong, Hong Kong
SAR, 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. はじめに

三菱製紙株式会社等で販売されている銀ナノ粒子インク^{*1}の普及とともに, 一般家庭用インクジェットプリンタを用いた導電性パターン印刷による, 薄くフレキシブルな電子回路の作成が容易になってきている.

また, Inkantatory Paper [1] や ChromoSkin [2], [3] など

*1 <https://www.mpm.co.jp/electronic/gin-nano/index.html>

の銀ナノ粒子インク印刷による電熱回路パターンとサーモクロミックインクを組み合わせた可搬性の高い新たな情報提示技術が注目されている。サーモクロミックインクとは、既定の温度変化を色調の変化として可視化できる感温変色液である。サーモクロミックインクの変色温度領域は数種類ある。たとえば、SFXC社は*2は15°C, 21°C, 31°C, 47°Cの4つの異なる温度領域で変色するサーモクロミックインクをそれぞれ提供している。さらに、株式会社記録素材総合研究所は*3-20°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。また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。溶液タイプは、絵具と同様に取り扱えて手軽である。紙やシリコンなどの素材にサーモクロミックインクを用いて図形を描き、電熱回路を用いて動的に図形の各領域を温度制御することにより、薄く柔らかいアナログディスプレイをデザインすることができる。しかし、従来のサーモクロミックインクによる情報提示の大きな問題として、加熱後の自然冷却をボトルネックとした発色温度制御の遅延があげられる。

そこで本研究では水冷回路と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を提案する。評価実験として、自然冷却と水冷回路による電熱パターン冷却時間の比較を行い、提案手法の有用性を検証する。また、顔表情を拡張する人工眉毛デバイス PerformEyebrow, サーモクロミズムを応用した動的なお面やアンケートといった、本研究における高速発色制御手法を応用したアプリケーションを作成し、新たなメディア技術としての可能性を示す。

本研究の貢献は以下のとおりである。

- 水冷回路を用いた高速サーモクロミズム制御手法の提案
- 送水量、水温、室温をパラメータとした水冷性能評価
- 高速サーモクロミズム制御手法を用いたアプリケーションの構築

2. 関連研究

2.1 銀ナノ粒子インクフレキシブルデバイス

銀ナノ粒子インクによる電子回路印刷を応用した様々なフレキシブルデバイスが提案されている [4]。Qiらは銀ナノ粒子インクを用いて絵本に静電センサを印刷し、光や音をインタラクティブに制御できる Electronic Popables を提案した [5]。Olberdingらの A Cuttable Multi-Touch Sensor は紙を切るという直感的な操作で、自由に形を変更することのできる静電容量式タッチセンサマトリクスを実現した [6]。また、Olberdingらの PrintScreen は、銀ナノ粒子インクと薄膜 EL を重ねてスクリーン印刷することで、

紙面上に EL ディスプレイを作成できることを実証した [7]。

本研究では、インクジェット印刷可能でプロトタイプングが容易な銀ナノ粒子インクを用いた電熱回路により、サーモクロミックインクの発色制御を行う。

2.2 電熱回路によるサーモクロミズム制御

van der Maas らはプリント基板に発熱パターンを描き、背面に塗布したサーモクロミックインクを発熱により発色制御するシステムを提案した [8]。辻らは紙の上に炭素ペーストおよび銀ペーストを塗布し、電熱回路として用いることで、サーモクロミックインクを発色制御するシステムを提案している [9]。また、Kao らの ChromoSkin [2], [3] は拡張可能な化粧品として、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。Tsujii らは、銀ナノ粒子インクを用いて、熱センサによる熱フィードバック制御が可能な紙面インタフェースである Inkantatory Paper を提案した [1]。また、作成したヒータの発熱性能を計測することで、電源、発熱面積および応答速度の制約条件を明らかにしている。

従来研究では発熱後の電熱回路は自然冷却され、そのほかの冷却手段については検証されていなかった。本研究では、従来の銀ナノ粒子インクの発熱制御手法に水冷回路を組み合わせた高速発色制御手法を提案し、サーモクロミズムディスプレイの応答性の高速化を図る。

2.3 マイクロ流路やソフトシリコンを用いたメディア

マイクロ流路やソフトシリコンを用いたメディア技術が提案されている。Venous Materials は、マイクロ流路を用いた新しいタンジブルなメディア表現技術である。押しやり曲げたりするなどといったユーザインタラクションに応じて、流路内の流体を変形させ提示することで、インタラクティブなアナログメディアを実現している [10]。Kobayashi らは染色された水滴とエアギャップを、画素素子として用いて構成されたマイクロ流体ベースのフレキシブルディスプレイを開発した [11]。このディスプレイはバッグ、靴、衣服といった生活用品の色を変える際に適用可能なことも明らかにしている。Inoue らの TuVe は、柔らかいチューブをディスプレイ装置として用い、チューブ内に着色液などの流体を流し込み、流体の位置やサイズを正確に制御することで様々な情報を提示できる [12]。Morin らはシリコンベースで構成された、圧縮空気を送り出すことによってタコやイカのような動きをする全長 13 センチのソフトな 4 本足ロボットを開発した [13]。ロボットに特殊シリコン製の極薄シートが組み込まれており、シートに開いた極小のマイクロ流路を色付きの液体が通ることによって、ロボットの皮膚の色や模様に変化する仕組みを持っている。

本研究ではサーモクロミズム制御の水冷回路の実装にマ

*2 <https://www.sfxc.co.uk>

*3 <https://www.kirokusozai.com/>

イクロ流路を用いることで、薄く柔らかいアナログディスプレイの実現を目指す。

3. 設計

高速サーモクロミズム制御技術の設計に際し、本研究では紙面のような平面上や人の肌の表面のような曲面上における使用を想定している。発熱した電熱回路の冷却に際し、冷却速度と薄型でフレキシブルな設計性の観点から最適な冷却素材の検討とその性能評価を予備実験を通して行った。

3.1 冷却素材の検討

紙面のような平面上や人の肌の表面のような曲面上における使用を可能にするために、薄型でフレキシブルな設計が容易であるかという観点のもと、水冷マイクロチューブ、冷却ファン、冷却シートの各発熱素材の利点欠点を分析し、使用する冷却素材の検討を行った。

水冷マイクロチューブ

サーモクロミックインクが塗布された電熱回路の裏側にマイクロチューブを張り巡らし、冷却水を流すことで、サーモクロミックインクの発色を制御できる。たとえば、Cole-Parmer社のMicrobore Tubing (内径×外形 = 0.020 inch × 0.060 inch) を用いる場合、軽量の冷却機構を実現できる。また、マイクロチューブは曲げやすく、水冷回路のデザインも多様に行える。加えて、ポンプを用いてシステム使用者の意図したタイミングでチューブに冷却水を流すことも可能である。

冷却シート

サンワサプライ株式会社のTK-CLNP12SV^{*4}のような冷却シートを電熱回路の裏側に貼り付けることで、電熱回路の冷却を行う場合について述べる。冷却シートは薄型で軽量かつ、紙面や肌へフィットさせることやサイズを自在に変更させることが容易である。しかし、他の冷却素材とは異なり、使用者の意図したタイミングで冷却のオン・オフを操作することが難しい。

冷却ファン

冷却ファンを用いた電熱回路の冷却が考えられる。冷却ファンはシステム使用者の意図したタイミングで冷却できる。しかし冷却ファンの製造を行っている山陽電気株式会社^{*5}にもあるように、冷却ファンは一般的に円形や矩形でしか生産されていないため、デザインの多様性に欠けている。また、冷却ファン自体の厚みもあるため、紙面や人の肌にフィットさせるということも困難である。

3.2 冷却素材を用いた予備実験

冷却素材の冷却効力と冷却速度を比較検証するために、マイクロチューブを用いた水冷、冷却ファンを用いた空冷、冷却シートを冷却時の電熱回路の温度変化を測定した。マイクロチューブ、冷却ファン、冷却シートをそれぞれ電熱回路に両面テープで密着させ冷却を行った。両面テープはニチバン株式会社のナスタック NW-15 を使用した^{*6}。電熱回路のパターンは図1に示す幅1mm、長さ25mmの線分を0.25mm間隔でコの字型に8本並べたものをプリントアウトし使用した。プリントアウト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) を用いた。予備実験の手順は以下のとおりである。

- (1) 自然放置した電熱回路に対し、電圧を印加する。
- (2) 電熱回路が規定の温度に達した後、電熱回路への電圧の印加を停止する。
- (3) 電熱回路下に敷設された各冷却素材を用いて、180秒間電熱回路を冷却する。

水冷に用いた冷却水の温度は2°C、室温は20°Cである。デジタル温度計を用いて電熱回路表面の温度を測定した。温度変化の様子をビデオカメラで撮影し、電熱回路の温度を5秒ごとに記録しグラフに算出した。

図2に予備実験の結果を示す。冷却開始直後の各冷却速度は、空冷 (0.88°C/s)、冷却シート (0.74°C/s)、水冷 (0.64°C/s) と高く、自然冷却 (0.26°C/s) と比較して冷却開始直後から冷却効力に大きな差があることが分かった。いずれの素材も時間の経過とともに類似した冷却速度の減少が見られるが水冷の減少が最も低く、30°C以下の温度へ

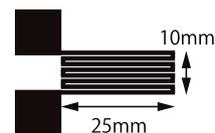


図1 電熱回路のパターン

Fig. 1 Electric heating circuit pattern.

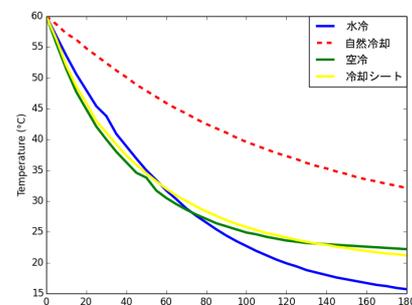


図2 各冷却素材使用時の温度変化 (室温 20°C, 水温 2°C)

Fig. 2 Temperature change when using each cooling material (room temperature: 20°C, water temperature: 2°C).

^{*4} <https://www.sanwa.co.jp/product/syohin.asp?code=TK-CLNP12SV>

^{*5} <https://www.sanyodenki.co.jp/products/index.html>

^{*6} <https://www.nichiban.co.jp/general/stationery>

の冷却では、水冷が最適手段であることが分かる。

冷却速度の安定性や制御性および構造のフレキシブル性や薄さからマイクロチューブを用いた水冷によって電熱回路の冷却を行う。

4. 実装

提案手法は図 3 に示す電熱回路層・サーモクロミックインク層・冷却層の 3 層によって構成される。実装の詳細を以下に示す。

4.1 サーモクロミックインク層

35℃ を変色温度領域として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。図 3(a) のように、電熱回路層の上に 50 mm × 50 mm の面積を持つ正方形になるようサーモクロミックインクを塗布した。

4.2 電熱回路層

図 3(b) のように、幅 3 mm、長さ 50 mm の線分を 1.7 mm 間隔でコの字型に 11 本並べた電熱回路をプロトタイプとして実装した。この電熱回路に電圧を印加し発熱させる。電熱回路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。

4.3 冷却層

チューブに冷却水を流すことで加熱回路層の余熱を冷却する。チューブとして Cole-Parmer 社の Microbore Tubing（内径 × 外形 = 0.0020 inch × 0.060 inch）を用いた。また、内径が細く、長いほど強い動力が必要になるため、MicroTubing は電熱回路の部分のみで、そこから腰部に装着するポンプまでは、Cole-Parmer 社の E-3603 Non-DEHP Lab Tubing（内径 × 外形 = 1/16 inch × 1/8 inch）を用いた。これらのチューブは水が漏れないようにグルーガンを用いて接続した。また、冷却水を循環させるポンプとして Dosing Pump Peristaltic Head（12V 5000 RPM）を用い

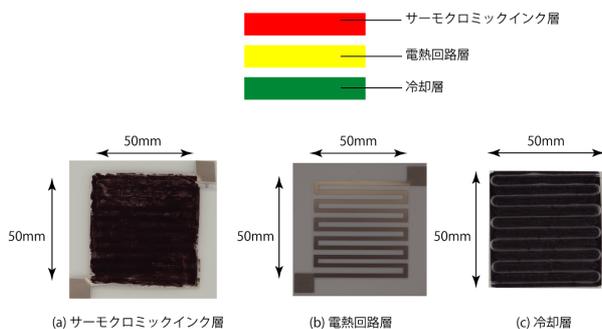


図 3 提案手法の構成

Fig. 3 Structure of the proposed method.

た。ポンプの動作電圧は 5V である。ポンプに搭載されたチューブと E-3603 Non-DEHP Lab Tubing のチューブは Cole-Parmer 社の Barbed fittings を介して接続した。

4.4 水冷回路と電熱回路の統合方法

水冷回路と電熱回路の統合方法を図 4 に示す。以下の方法で水冷回路と電熱回路を統合する。

- (1) フィラメント樹脂で作った土台にチューブをはめ込む（図 4 左上）。
- (2) 電熱回路の四隅に両面テープを貼り付ける（図 4 右上）。なお両面テープは 3.2 節と同様にニチバン株式会社のナスタック NW-15 を使用した。
- (3) (1) と (2) を、(2) で貼り付けた両面テープにより接着する（図 4 左下）。
- (4) フィラメント樹脂を剥がし、水冷回路と電熱回路が統合される（図 4 右下）。

図 4 の方法を用いて水冷回路と電熱回路を統合し、紙面や肌といった曲面に貼り付けることが可能となる。

4.5 提案手法を用いた冷却性能の予備検証

提案手法における冷却性能を検証するための予備実験を実施した。水冷を用いた場合と水冷を用いない自然冷却の場合における温度変化の様子を比較した。実験には図 3 と図 4 と同様の電熱回路や水冷回路の構成・統合方法を用いた。実験は 2℃ の冷却水を用いて実施した。

実験の様子をスマートフォン用サーモカメラ FLIR ONE Pro LT でビデオ撮影した*7。32℃ から 38℃ にかけて変色するサーモクロミックインクを使用した。そのため、本実験では 35℃ から冷却した様子を撮影した。

サーモカメラを用いて撮影した 5 秒ごとの電熱回路および水冷回路の様子を図 5 に示す。水冷なしの場合、15 秒

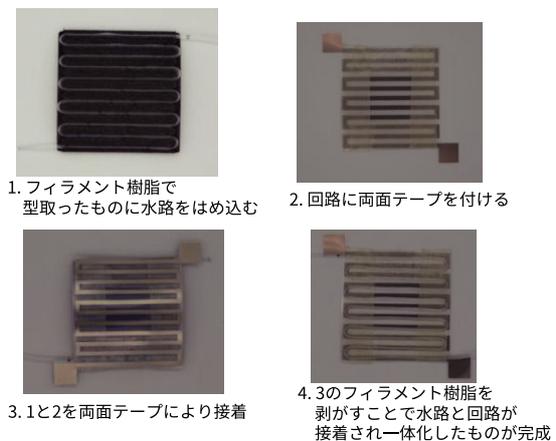


図 4 水冷回路と電熱回路の統合方法

Fig. 4 Integration method of water cooling circuit and electric heating circuit.

*7 <https://www.flir.jp/products/flir-one-pro-lt/>

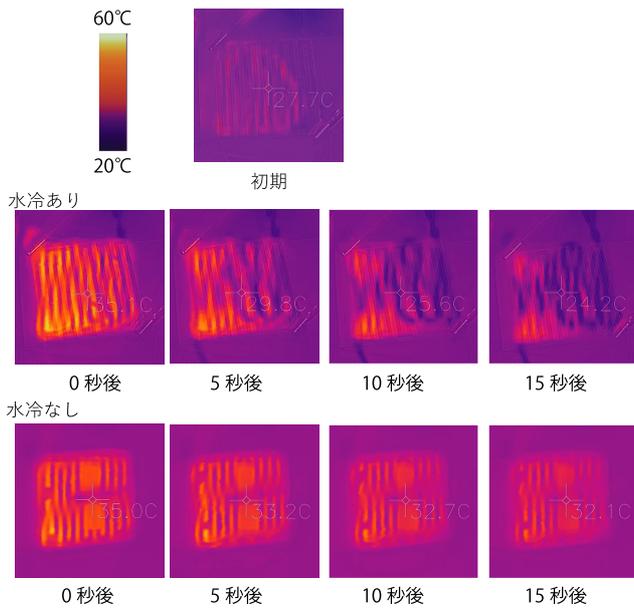


図 5 実験結果

Fig. 5 Results of experiments.

経過した時点で電熱回路の温度が 32.1°C にとどまっている。それに対して、水冷ありの場合は 5 秒経過した時点で 29.8°C まで降下した。したがって、提案手法を用いることで電熱回路の冷却性能を向上させることができることが分かった。

5. 冷却性能の測定

水冷回路の有無による冷却性能を測定するための評価実験を実施した。本実験では、以下に示す 3 つの異なる実験条件を設定した。電熱回路を一定の温度に熱した状態からチューブに冷却水を流した場合における、電熱回路の温度変化を計測した。

実験条件

水冷効果の検証として、以下の実験条件を設定した。

- 送水量：送水量を変えて冷却水を送水した場合における温度変化を測定する。40°C の温度を持つ電熱回路を冷却する。冷却用のポンプに 5V あるいは 10V の電圧を印加した場合において比較する。電熱回路の初期温度は 40°C とする。冷却水の温度は 19.5°C、室温は 20°C である。
- 水温：水温が異なる冷却水を送水した場合における温度変化を測定する。19.5°C、11.5°C、2°C の 3 種類の水温の冷却水で比較する。電熱回路の初期温度は 40°C とする。冷却用のポンプには 5V の電圧を印加し、室温は 20°C である。
- 室温：室温が異なる条件で、冷却水を送水した場合における温度変化を測定する。20°C、5°C の 2 種類の室温下において比較する。電熱回路の初期温度は 60°C とし、高温時の電熱回路の冷却性能も検証する。冷却

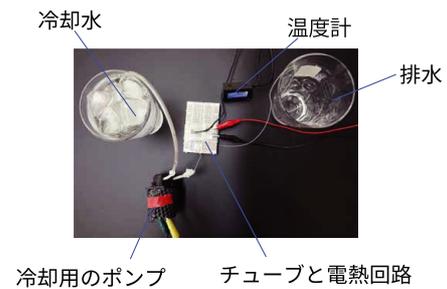


図 6 実験の様子

Fig. 6 Scene of the experiment.

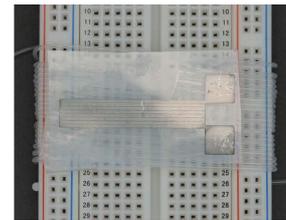


図 7 チューブと電熱回路

Fig. 7 Tubes and electric heating circuits.

用のポンプには 5V の電圧を印加し、2°C の冷却水を用いる。

実験装置

実験装置として、図 6 に示すように、水冷用のチューブおよびポンプ・温度計・電熱回路・冷却水・排水用の容器を用いる。実験で使用した水冷用のチューブおよびポンプは 4.3 節と同様である。電熱回路は図 1 の個体を使用した。電熱回路の下には、図 7 に示すチューブを巻きつけたブレッドボードを設置した。チューブと電熱回路の間を両面テープを用いて固定した。水冷に用いた冷却水はポンプとチューブを経て排水用の容器に送られる。なお、自然冷却時はポンプ・冷却水・排水は利用せず規定の温度から電熱回路を放置することで冷却を行った。

実験手順

実験手順を以下に示す。

- (1) 自然放置した電熱回路に対し、電圧を印加する。
- (2) 電熱回路が規定の温度に達した後、電熱回路への電圧の印加を停止する。
- (3) 各実験条件を適用したうえで、180 秒間電熱回路を冷却する。

5.1 実験結果

送水量

異なる送水量における実験結果を図 8 に示す。図 8 の横軸は電熱回路の冷却開始から経過した時間 (秒)、縦軸は各時間ごとにおける電熱回路の温度 (°C) である。5V の電圧をポンプに印加した場合の送水量は 0.03 mL/秒、10V の電圧をポンプに印加した場合の送水量は 0.19 mL/秒であった。送水量を変えた場合に電熱回路の温度変化に違い

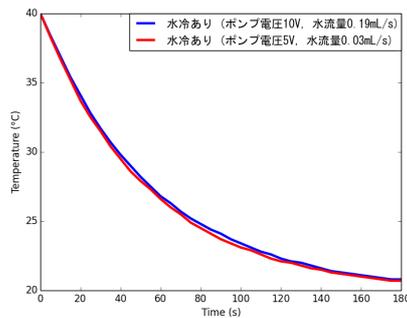


図 8 ポンプに異なる電圧を印加した場合の温度変化 (室温 20°C, 水温 19.5°C)

Fig. 8 Temperature change when different voltages are applied to the pump (room temperature: 20°C, water temperature: 19.5°C).

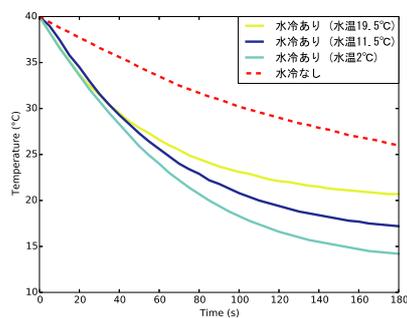


図 9 異なる水温の冷却水を用いた場合の温度変化 (室温 20°C, ポンプ電圧 5 V)

Fig. 9 Temperature change when using cooling water of different water temperatures (room temperature: 20°C, pump voltage: 5 V).

は観測されなかった。原因として、送水量を変えたとしてもチューブ表面の温度は変化せず、電熱回路の冷却には直接影響しないことが考えられる。

水温

19.5°C, 11.5°C, 2°C の冷却水を用いた場合と、水冷を用いずに自然冷却した場合における実験結果を図 9 に示す。冷却直後の冷却速度は 19.5°C, 11.5°C, 2°C の冷却水を用いた場合は 0.34°C/s, 自然冷却時は 0.12°C/s であった。このように本実験においても、水冷を用いることで、自然冷却よりも高速な電熱回路の冷却が可能であることが分かる。また、図 9 にもあるように、冷却直後は 3 種類の冷却水の間で電熱回路の温度変化に大きな差は見られなかったが、40 秒経過した後は、水温が低いほど電熱回路の温度が下がりやすくなる傾向が観測された。冷却時間に着目すると、40°C から 25°C まで冷却する場合、19.5°C の冷却水使用時には 75 秒かかるのに対し、2°C の冷却水使用時には 55 秒となり、20 秒の差が生じている。したがって、水温は電熱回路の冷却時間に影響を与える重要なパラメータであると考えられる。

室温

20°C, 3°C の室温で冷却した場合における実験結果を

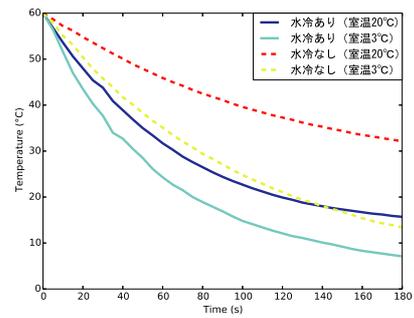


図 10 室温が異なる場合の温度変化 (水温 2°C, ポンプ電圧 5 V)

Fig. 10 Temperature change at different room temperatures (water temperature: 2°C, pump voltage: 5 V).

図 10 に示す。最も効果的に冷却された条件は室温 3°C で水冷を実施した場合、次点で室温 3°C で自然冷却を実施した場合と室温 20°C で水冷を実施した場合、最も冷却に時間がかかった条件は室温 20°C で水冷を実施した場合となった。室温を下げた場合においても電熱回路の温度は下がりやすくなる傾向が観測された。したがって、水温と同様に室温も電熱回路の冷却時間に影響を与える重要なパラメータであると考えられる。また、室温 3°C において自然冷却した場合と、室温 20°C において水冷により冷却した場合で、冷却の変化がほぼ同じになった。このことから、水冷は室温を約 20°C 下げることと同じ効果があるといえる。さらに、室温 20°C における水冷時の電熱回路の冷却速度を比較すると、電熱回路が 40°C 付近の冷却速度は 0.34°C/s, 60°C 付近の冷却速度は 0.64°C/s となり、電熱回路は高温の状態ほど冷却が高速になることも分かった。

6. アプリケーションの構築

6.1 PerformEyebrow への拡張

本研究における高速発色制御手法のアプリケーションとして、筆者らが開発した PerformEyebrow [14] の応答速度向上を検証した。

PerformEyebrow はダイナミックかつ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。人工眉毛の直下に導電性インクでプリントアウトされた電熱回路を敷設し、人工眉毛に塗布されたサーモクロミックインクを変色させる。

PerformEyebrow においても、電熱回路加熱後の自然冷却をボトルネックとした発色温度制御の遅延が課題となっていた。そこで PerformEyebrow に従来のサーモクロミックインク層・電熱回路層に加えて、新たに冷却層を実装した。冷却層の実装方法として、4.3 節と同様のチューブを人工眉毛の輪郭上に張り巡らせた。

図 11 は電熱回路を 1 分間加熱後に冷却したものである。従来の水冷を用いない自然冷却の場合、図 11 に示すように、人工眉毛の形状復元にかかる時間は 90 秒程度であった。それに対して、冷却層を設けることで、人工眉毛の形

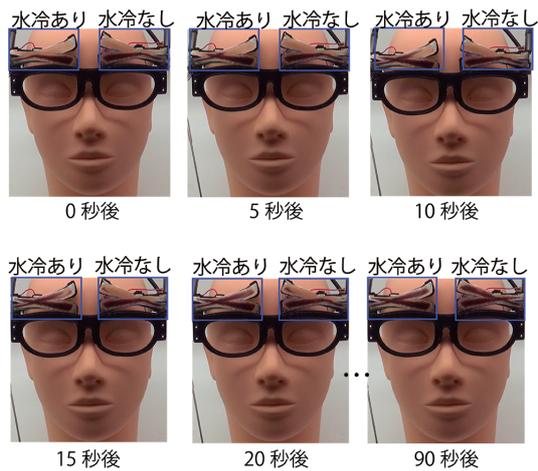


図 11 PerformEyebrow を冷却した様子
Fig. 11 A cooled PerformEyebrow.

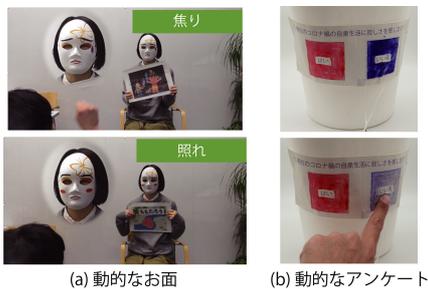


図 12 アプリケーション
Fig. 12 Applications.

状復元にかかる時間は 15 秒程度となり、冷却の大幅な時間短縮が可能となった。

6.2 動的なお面

図 12 (a) のように、サーモクロミックインクと電熱回路を用いて涙や照れといった漫符を表示や消滅させることができる動的なお面を筆らは提案している [15]。元の形状に戻るために自然冷却の場合 90 秒かかるのに対し、水冷を用いる場合は 10 秒となり、大幅な時間短縮が可能となった。PerformEyebrow と同様に、提案手法がサーモクロミックインクを用いた顔表情拡張ディスプレイへの応用に有効であることが分かる。

6.3 動的なアンケート

図 12 (b) のように、紙面上にサーモクロミックインクを塗布し、紙の裏側に敷設された電熱回路によって透明に変色させる動的なアンケート [1] への応用も考えられる。ベースが紙媒体であるため、図 12 (b) のように柱状の物体に巻きつけることも可能である。元の形状 (図 12 (b) 上側の写真の状態) に完全に戻るために自然冷却では 150 秒かかったのに対し、水冷を用いると 20 秒となり、水冷による効果が確認できた。紙などをベースとしたアナログメディアにおけるサーモクロミックディスプレイの応答性向上に

においても提案手法が有効であることが分かった。

このように、チューブによる水冷を用いることで薄型でフレキシブルな冷却手法が実現できる。サイズや形をカスタマイズできるという特長により、紙や人の肌といった平面・曲面状に応用可能である。そのほかにも、ぬいぐるみのような布製品やシリコンといった柔軟物体への応用も考えられる。

7. まとめ

本研究では、水冷回路と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ック制御手法を提案した。提案手法によって、自然冷却よりも高速な電熱回路の冷却が可能となった。電熱回路の冷却時の送水量、冷却水の温度、室温における、冷却性能について検証した。その結果、電熱回路の冷却時間は送水量によって左右されないという一方で、冷却水の温度や室温が冷却時間を構成するパラメータであることが分かった。また、人工眉毛デバイス PerformEyebrow をはじめとして、提案手法を適用したアプリケーションを提案した。

今後の課題としては、異なる形状など詳細な冷却性能評価実験、提案する高速サーモクロミック制御手法の数理モデルの構築、作成したアプリケーションの評価などがあげられる。

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いたします。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] 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).
- [2] Kao, C.H.-L., 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).
- [3] 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).
- [4] Kawahara, Y., Hodges, S., Cook, B.S., Zhang, C. and Abowd, G.D.: Instant inkjet circuits: Lab-based inkjet printing to support rapid prototyping of UbiComp devices, *Proc. 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp.363–372 (2013).
- [5] Qi, J. and Buechley, L.: Electronic popables: Exploring paper-based computing through an interactive pop-

- up book, *Proc. 4th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp.121-128 (2010).
- [6] Olberding, S., Gong, N.-W., Tiab, J., Paradiso, J.A. and Steimle, J.: A cuttable multi-touch sensor, *Proc. 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.245-254 (2013).
- [7] Olberding, S., Wessely, M. and Steimle, J.: PrintScreen: Fabricating Highly Customizable Thin-Film Touch-Displays, *Proc. 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '14*, Association for Computing Machinery, pp.281-290 (online), DOI: 10.1145/2642918.2647413 (2014).
- [8] van der Maas, D., Meagher, M., Abegg, C. and Huang, J.: Thermochromic information surfaces: Interactive visualization for architectural environments, *Computation: The New Realm of Architectural Design, Proc. 27th eCAADe Conference*, pp.491-496 (2009).
- [9] 辻 航平, 脇田 玲: Material Syncretism: 紙とコンピューターシヨンの調和による表現の開拓, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.18, No.3, pp.305-314 (2013).
- [10] Mor, H., Yu, T., Nakagaki, K., Miller, B.H., Jia, Y. and Ishii, H.: Venous Materials: Towards Interactive Fluidic Mechanisms, *Proc. 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '20*, Association for Computing Machinery, pp.1-14 (online), DOI: 10.1145/3313831.3376129 (2020).
- [11] Kobayashi, K. and Onoe, H.: Microfluidic-based flexible reflective multicolor display, *Microsystems & Nanoengineering*, Vol.4, No.1, pp.1-11 (2018).
- [12] Inoue, Y., Itoh, Y. and Onoye, T.: TuVe: A Flexible Display with a Tube, *SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies, SA '18*, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/3275476.3275487 (2018).
- [13] Morin, S.A., Shepherd, R.F., Kwok, S.W., Stokes, A.A., Nemiroski, A. and Whitesides, G.M.: Camouflage and display for soft machines, *Science*, Vol.337, No.6096, pp.828-832 (2012).
- [14] 増井元康, 竹川佳成, 新田野乃華, 徳田雄嵩, 杉浦裕太, 正井克俊, 平田圭二: 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, *情報処理学会論文誌*, Vol.62, No.11, pp.1817-1828 (2021).
- [15] 増井元康, 竹川佳成, 平田圭二: 仮面劇のためのプロトタイプが容易な動的表情拡張手法の提案, *情報処理学会研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC)*, Vol.2021-EC-60, No.15, pp.1-7 (2021).



増井 元康

2020年公立ほ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年より公立ほこだて未来大学システム情報科学部助教。2014年より公立ほ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.でAssistant Visiting Professorを兼務。2019年には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。



徳田 雄嵩

香港城市大学クリエイティブメディア学部助理教授。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」の研究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、現在に至る。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4月より慶應義塾大学理工学部情報工学科助教，2018年4月より同専任講師，2020年4月より同准教授。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。1990～93年（財）新世代コンピュータ技術開発機構（ICOT）に出向。2011年より公立ほ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。