

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

増井 元康¹ 竹川 佳成¹ 徳田 雄嵩² 杉浦 裕太³ 正井 克俊³ 平田 圭二¹

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が市販化され、電子回路の作成が容易となっている。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近年提案されている。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、冷却時間の遅さが挙げられる。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、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ない、提案手法の有用性を立証した。また、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

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、Intaractory Paper[1] や ChromoSkin[2][3] 等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。例えば、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、絵具と同様の取り扱いが手軽である。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ない、提案手法の有用性を立証する。また、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通りである。

- 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

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ーを印刷し、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

¹ 公立はこだて未来大学

² フリーランス

³ 慶應義塾大学

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

^{*2} <https://www.sfx.co.uk>

^{*3} <https://www.kirokusozai.com/>

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事を実証した [7]. 辻井らは、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 Inkantory Paper を提案した [1]. また、作成したヒーターの発熱性能を計測することで、電源、発熱面積及び応答速度の制約条件を明らかにしている.

2.2 電熱回路によるサーモクロミズム制御

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及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]. または、Kao らは ChromoSkin[2][3] 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. 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色制御を行う.

本研究では、従来の銀ナノ粒子インクの色制御手法に水冷回路を組み合わせることで、高速発色制御手法を提案する.

3. 設計

本研究では銀ナノ粒子インクによる電熱回路の色制御手法に冷却機構を組み合わせることに伴い、高速発色制御手法を提案する. 提案手法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検討している. 以上を踏まえて、冷却機構の設計要件を定義し、冷却素材の検討をしていく.

3.1 要件

冷却機構の設計要件を以下に列挙する.

- (1) 小型・軽量：紙面や人の肌に接着させるために、軽量かつ小型である必要がある.
- (2) デザインの多様性：紙面や人の肌にフィットさせるなど、大小問わずさまざまなサイズにおいてフレキシブルにデザインできる必要がある.
- (3) 制御の容易性：システム使用者の意図したタイミングで冷却を行える必要がある.

3.2 冷却素材の検討

電熱回路の冷却素材として、ペルチェ素子、液送チューブ（以下、チューブと記述する）、冷却ファン、冷却ジェルシートが考えられる. 要件 (1) 小型・軽量、要件 (2) デザインの多様性、および、要件 (3) 制御の容易性を基準に、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.

3.2.1 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色を制御できる. 例えば、Cole-Parmer 社の Microbore Tubing（内径×外形 = 0.0020inch × 0.060inch）を用いる場合、軽量の冷却機構を実現できる. また、チューブは曲げやすく、水冷回路のデザインも多様にできる. 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. したがって、チューブは要件 (1)~(3) のいずれも満たしている.

ペルチェ素子

ペルチェ素子は液体ポンプと同様に電熱回路の冷却が実現できる素子である. ペルチェ素子メーカーの株式会社ジーマックス*4によると、ペルチェ素子は小型・軽量であること、形状が自由に選定できることが述べられている. また、ペルチェ素子は電流の制御によって冷却のタイミングを制御することが可能である. しかし、フレキシブル性の面で要件 (2) を考慮すると、ペルチェ素子は一般的に矩形でしか生産されておらず、顔のような曲面状にフィットするように屈曲させることも難しい.

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ため、要件 (3) を満たしている. 冷却ファンの製造をおこな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. したがって、冷却ファンは要件 (1) と (2) においては劣っている.

冷却ジェルシート

ライオン株式会社の冷えピタ*6のような冷却ジェルシートを電熱回路の裏側に貼りつけることで、電熱回路の冷却を行う場合について述べる. 要件 (1), (2) において、冷却ジェルシートは小型で軽量かつ、紙面や肌へのフィットやサイズを自在なデザインが容易である. しかし要件 (3) を考慮すると、他の冷却素材とは異なり、冷却するタイミングを使用者の意図したタイミングで冷却を行うことが難しい.

要件 (1)~要件 (3) を考慮して、液体ポンプによって発熱した電熱回路の冷却を行う.

*4 <https://www.z-max.jp/peltier/about/>

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

*6 <https://www.lion.co.jp/ja/products/brand/series/hiepitaa>

4. 実装

提案手法は図1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1-(a)のように、電熱回路層の上にサーモクロミックインクを塗布した。

4.2 電熱回路層

図1-(b)のように、50mm×50mmの面積をもつ紆曲状の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 = 0.0020inch × 0.060inch）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 = 1/16inch × 1/8inch）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)を用いた。また、ポンプに搭載されたチューブと、E-3603 Non-DEHP Lab Tubingのチューブを接続するために、Cole-Parmer社のBarbed fittingsを用いた。

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2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2左上）
- (2) 電熱回路の四隅に両面テープを貼りつける。（図2右上）
- (3) (1)と(2)を、(2)で貼りつけた両面テープにより接着する。（図2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2右下）

図2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。

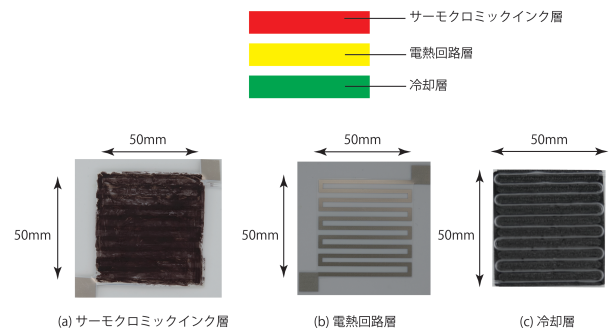


図1 構成

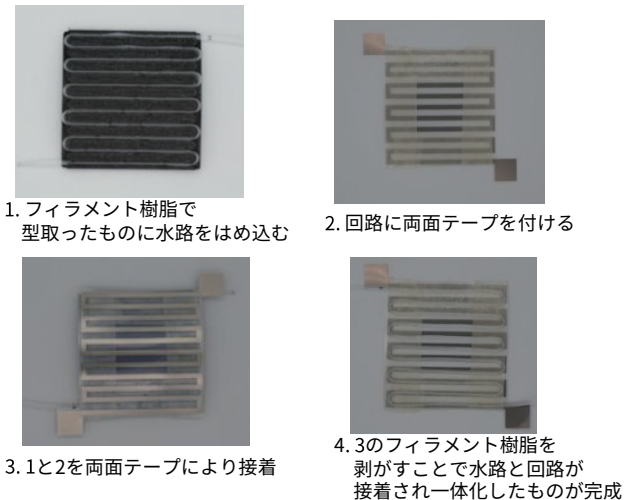


図2 水冷回路と電熱回路の統合方法

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。実験には図1と図2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。なお、今回の予備実験ではピストンによって手動で水冷回路に水を送り冷却した。

実験の様子をスマートフォン用サーモカメラであるFLIR ONEを用いて撮影した。^{*7}

実験結果を図3に示す。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。本実験では、35℃から冷却した様子を撮影した。水冷なしの場合、15秒経過した時点で電熱回路の温度が32.1℃に留まっている。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℃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れることがわかった。

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

^{*7} <https://www.flir.jp/flir-one/>

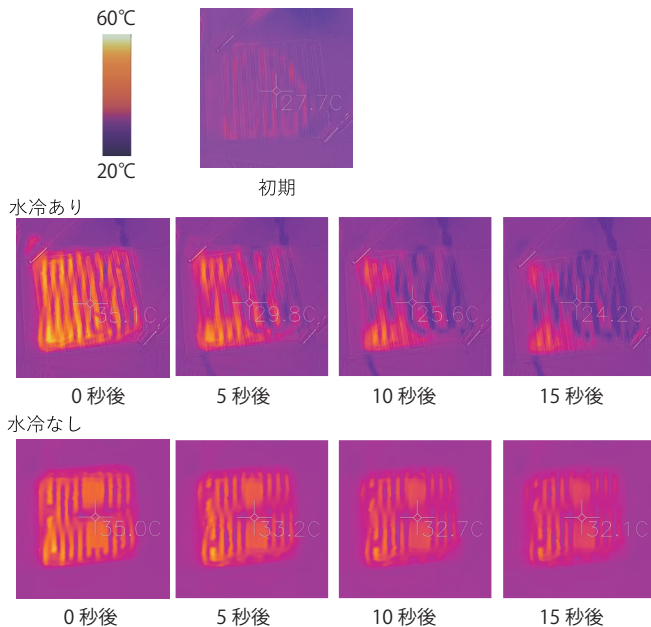


図 3 実験結果

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℃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℃とする。冷却水の温度は19.5℃、室温は20℃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℃、11.5℃、2℃の3種類の水温の冷却水を用いた場合において比較する。電熱回路の初期温度は40℃とする。冷却用のポンプには5Vの電圧を印加し、室温は20℃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℃、5℃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℃とし、高温時の電熱回路の冷却性能も検証する。冷却用のポンプには5Vの電圧を印加し、2℃の冷却水を用いる。

実験装置

実験装置として、図4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5に示す幅1mm、長さ25mmの線分を0.25mm間隔で8本並べた10mm×25mmの面積をもつ個体を使用した。電熱回路の下には、図6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う。

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上で、3分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7に示す。図7の横軸は電熱回路の冷却開始から経過した時間(秒)、縦軸は各時間毎における電熱回路の温度(℃)である。5Vの電圧をポンプに印加した場合の送水量は0.03mL/秒、10Vの電圧をポンプに印加した場合の送水量は0.19mL/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℃、11.5℃、2℃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8に示す。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時間が可能であることがわかる。また、冷却直後は3種類の間電熱回路の温度変化に大きな差は見られないが、40秒程度経過した後は、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。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℃、3℃の室温で冷却した場合における実験結果を図9に示す。最も効果的に冷却された条件は室温3℃で水冷を実施した場合、次点で室温3℃で自然冷却を実施した場合と室温20℃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℃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℃において自然冷却した場合と、室温20℃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℃下げることと同じ効果があるといえる。さらに、



図 4 実験の様子

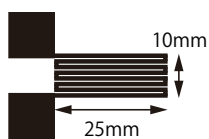


図 5 電熱回路のパターン

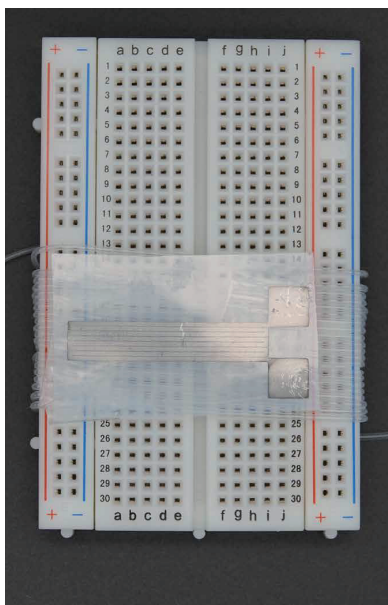


図 6 チューブと電熱回路

60℃付近の電熱回路の温度推移と、40℃付近の電熱回路の温度推移を比較して、電熱回路は高温の状態ほど冷却が高速になることもわかった。

6. PerformEyebrow への拡張

本研究における高速発色制御手法を筆者らが開発した PerformEyebrow[10] に適用する。

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

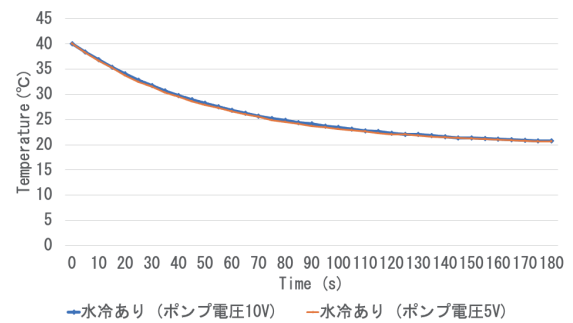


図 7 ポンプに異なる電圧を印加した場合の温度変化

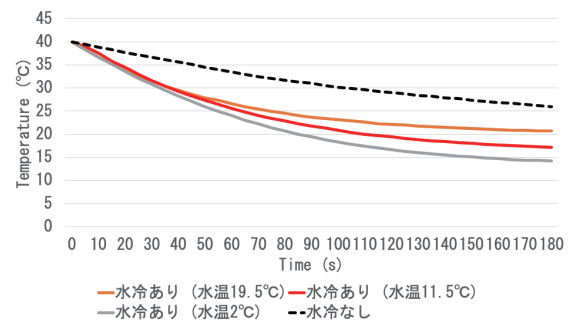


図 8 異なる水温の冷却水を用いた場合の温度変化

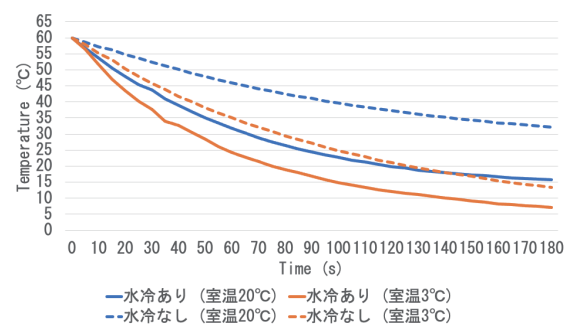


図 9 室温が異なる場合の温度変化

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。そこで図 10 に示すように、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、図 10-(c) のように、4.3 節と同様のチューブを土台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。

このように、提案手法はサーモクロミックインクと電熱回路を用いたアプリケーションに対して有効である。

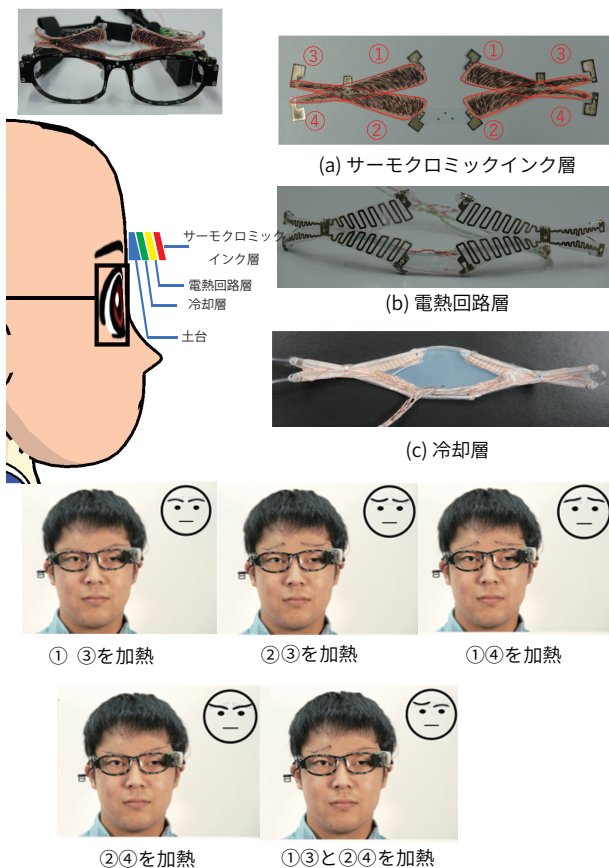


図 10 PerformEyebrow

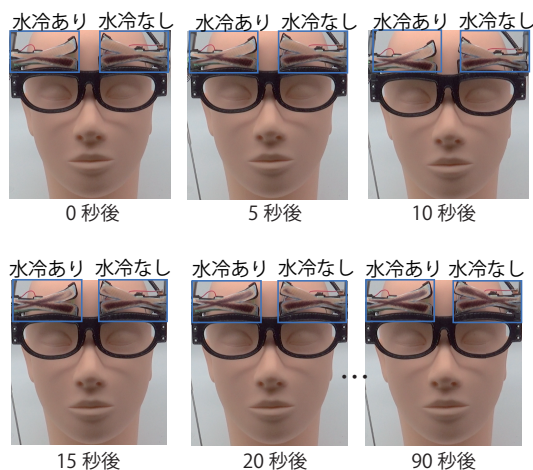


図 11 PerformEyebrow を冷却した様子

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ズム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わかった。また、人工眉毛形状デバイス PerformEyebrow をベースに提案手法を適用したアプリケーションを実装した。さらに、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ズム制御手法の数理モデルの構築、アプリケーションの構築とそ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] Tsujii, T., Koizumi, N. and Naemura, T.: Inkantatory paper: dynamically color-changing prints with multiple functional inks, *Proceedings of the adjunct publication of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 39–40 (2014).
- [2] Kao, H.-L. C., Mohan, M., Schmandt, C., Paradiso, J. A. and Vega, K.: ChromoSkin: Towards Interactive Cosmetics Using Thermochromic Pigments, *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 3703–3706 (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, *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 872–883 (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, *Proceedings of the 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, *Proceedings of the fourth 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, *Proceedings of the 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, *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 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 (2009).
- [9] 辻 航平, 脇田 玲: Material Syncretism: 紙とコンピュ

- テーショ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] 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: 表情拡張可能な人工眉毛形状制御デバイスの提案, 技術報告 10 (2020).