# 双安定性サーモクロミックインクの選択的加熱を用いた 造形後に表面色・模様を制御可能な立体物造形手法

堀 悠太郎<sup>1,a)</sup> 平木 剛史<sup>1,2</sup> プンポンサノン パリンヤ<sup>1</sup> 岩井 大輔<sup>1,3</sup> 川原 圭博<sup>2</sup> 佐藤 宏介<sup>1</sup>

概要:本研究では,選択的加熱と双安定性サーモクロミックインクを用いて表面の色と模様を制御可能な 立体物造形手法を提案する.温度により色が変化し,かつその発色状態で安定である双安定性サーモクロ ミックインクと樹脂の混合物を立体物表面にピクセルとして形成し,この物体の表面を選択的に加熱する ことで,立体物の造形後に色や模様を制御することができる.本論文では,双安定性サーモクロミックイ ンクと紫外線硬化樹脂を混合,紫外線硬化させることで立体物を作製し,この立体物の発色特性と安定し て消色する温度を検証した.また,作製した立体物に対して選択的加熱を行うことで,平面及び立体造形 物の発色と消色を制御し,造形後に立体物の表面色を制御できることを確認した.

# 1. はじめに

熱融解積層 (FDM) や光造形を用いた 3D プリンタに代 表されるデジタルファブリケーション技術は、急速に発 達, 普及しており, プロダクトや服飾のデザインにおける 試作、また時には製品の生産においても利用されている. また、近年では柔軟構造をもつ立体物やフルカラーの立 体物の造形も可能となっており [1], その造形表現力も高 まっている. これまでのデジタルファブリケーション研究 では、ユーザの意図するデザインをいかに直感的に、かつ すばやく機械に伝達し、そしてそのデザイン構造を精密、 かつ高速に造形することに重点が置かれていた.一方、デ ジタルファブリケーションによって造形された物体の色や 構造はほとんどの場合不可逆であり、再度変更することは できない.そのため、造形物のデザインを変更するために は再度造形を行う必要があり、 造形時間や材料の使用量の 観点から効率的とは言えないものであった.加えて,すで に造形した物体は廃棄するしかなく、環境に対し大きな負 荷となっていた.

そこで、造形物の表面に外部刺激によって光学的な物性 が変化するクロミック素材を塗布し、ここにエネルギーを 加えることで物体表面の色や模様を変化させることで、造 形後に物体表面の色や模様を制御する手法が提案されてい る. Hand-rewriting [2] では、ユーザとコンピュータシス テムの両方が同じ紙に自由に書き込みと消去を行うことを 実現した.この手法では、サーモクロミックインクを使用 した手書きの絵や文字をガルバノスキャナによって走査さ れたレーザー光を照射して消色しており、同時に、フォト クロミックインクでコーティングされた紙に対して局所的 な紫外線照射を行い発色させることで、1 枚の紙に対して ハイブリッドな書き込みと消去を実現している.この研究 では、コンピュータシステムによる描画内容の消色は検討 されていなかった.また、Iwai et al. [3] は、フォトクロ ミックインクを投影面表面に塗布して発色させることで、 環境光や相互反射等の外乱光が存在する中でもコントラス トを損なわない新たな投影手法を提案した.この研究では、 発色の制御について検討されているものの、消色について は検討されていなかった.

ColorMod [4] は,特定波長の光を照射することで発色・ 消色するフォトクロミックインクを塗布した物体を造形す ることで,発色と消色の制御を実現している.この技術を 用いると,シアン,マゼンタ,イエローの各色のフォトクロ ミックインクを立体物表面のボクセルに混ぜ込むことで, 光造形により 3D プリントできる.その後,立体物全体に 紫外線(波長 250 nm-390 nm)を照射して発色させ,プ ロジェクタによる選択的な可視光照射(波長 390 nm-790 nm)で特定領域を消色することで,造形後での表面色・ 模様の変更を実現している.また,Photo-Chromeleon [5] は、シアン、マゼンタ、イエローのフォトクロミックイン クを単一の溶液に混合し、それぞれのインクの吸収スペク トルの違いを利用することで、溶液中の各色の発色を個別 に制御し、表面の色や模様を制御する手法を実現した.し かし、フォトクロミックインクを用いた手法には、環境光

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 大阪大学

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 東京大学

<sup>3</sup> 国立研究開発法人科学技術振興機構, さきがけ

 $<sup>^{\</sup>rm a)} \quad {\rm hori@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp}$ 

による色の減衰や太陽光に含まれる紫外線による再発色と いった課題が存在していた.

一方,加熱や冷却によって発色・消色するサーモクロミッ クインクを表面に塗布した物体を作製することで,造形後 に物体表面の色や模様を制御する手法も提案されている. Inkantatory paper [6] は,導電性の銀ナノインクとサーモ クロミックインクを使用して印刷パターンの色を動的に変 化させることができる紙ベースのインターフェースを提案 した.この手法では、サーモクロミックによる消色を維持 するために,継続的な加熱が必要であるという制約があっ た.Shader Printer [7] は,双安定性サーモクロミックイン クを塗布した物体を作製し,これにレーザー照射による選 択的加熱を組み合わせることで、色や模様を制御するシス テムを提案した.この手法では、布地等に単色のサーモク ロミックインクを塗布した物体を対象にしていたため、そ の形状や表色の自由度は低いものであった.

そこで本研究では、双安定性サーモクロミックインクと 紫外線硬化樹脂の混合物(以下、本稿ではインク混合樹脂 と呼称)を立体物表面にフルカラーのピクセルとして形成 し、局所的な加熱により表面を選択的に加熱することで、 造形後に表面色・模様を制御可能な立体物造形手法を提案 する.双安定性サーモクロミックインクとして使用するパ イロット社の市販消去可能筆記具「フリクションシリー ズ」の蛍光ペンであるフリクションライトに含まれるイン ク(以下、本稿ではフリクションインクと呼称)は、発 色温度が約 –10°C、消色温度が約 60°C であり、かつこの 温度帯域においては発色と消色について双安定性を持つた め、日常環境で色や模様を維持することができる.

本稿では、提案手法を実現するため、インク混合樹脂を 用いた造形物について、消色後に常温下で消色が保たれる 条件について検討する.また、造形物の表面全体を格子状 に分割し、規則的なパターンとなる配色でそれぞれにイン ク混合樹脂を注入し、原色が並ぶピクセルとして形成する 造形物を作製する.そして、ユーザが入力したカラー画像 から消色対象となるピクセルを決定し、FDM 方式の 3D プ リンタの加熱部分を接近させて空気中を熱伝搬させること により、その表面色や模様を制御する.提案手法を用いる ことで、平面状の造形物、及びドーム状の立体造形物に対 して表面色や模様を制御させられることを確認する.

# 2. 提案手法

本研究では,以下の三つの要素技術を提案する.

- (1) フリクションインクを塗布した立体物の造形
- (2) 目標となる色・模様の入力に基づいた加熱対象ピクセ ルの決定
- (3) 選択的な加熱によるその表面色や模様の制御 提案手法の全体図を図1に示す.



図1 提案手法の全体図

# 2.1 複数色のピクセル形成による立体物造形

造形物の表面全体を格子状に分割し、規則的なパターン となる配色でそれぞれにインク混合樹脂を注入した.ま ず,3Dプリンタ (Ultimaker 2+, Ultimaker) により、ポ リ乳酸 (PLA) 樹脂を印刷材料として、格子構造を作製し た.次に、作製した造形物の表面にフリクションインクと 紫外線硬化樹脂 (Clear Resin, FormLabs)の混合物をスポ イトで各格子に手動で注入することでピクセルとして形成 した.

また本研究では,双安定性サーモクロミックインクとし て,PILOT 社の蛍光ペンであるフリクションライトのフ リクションインクを使用した.フリクションライトは6色 (イエロー,ピンク,グリーン,オレンジ,ブルー,バイ オレット)が入手可能であるが,フルカラーで造形すると いう観点から,本稿ではピンク,グリーン,ブルーの3色 を使用した.紫外線硬化樹脂とピンクのフリクションイン ク,インク混合樹脂の様子を図2に示す.

#### 2.2 目標色・模様に基づく消色対象ピクセルの決定

加熱し消色する対象のピクセルは,ユーザが目標となる 色・模様として入力したカラー画像と造形物に配置された カラーピクセルを参照して決定する.図3に消色対象の ピクセルを決定する過程を示す.まず,入力されたカラー 画像(図3a)を対象造形物と同じ分割数でピクセルに分割 する(図3b).その後,各ピクセルにおいて面積比が最も 大きい色をそのピクセルの代表色とする.対応する造形物



図 2 双安定性サーモクロミックインクを混合した紫外線硬化樹脂の 作製の様子 (a) 紫外線硬化樹脂 (b) フリクションインク (ピ ンク) (c) インク混合樹脂



図3 入力カラー画像によって消色対象ピクセルを決定するシステムの様子(a)入力カラー画像(b)入力画像のピクセル分割(c)造形物のピクセル配置(d)消色対象ピクセルの決定

(図 3c) 上のピクセルがその代表色と一致していない場合, そのピクセルを消色対象のピクセルとして決定する. これ をすべてのピクセルについて行うことで入力したカラー画 像に対応する配色が可能となる (図 3d).

#### 2.3 選択的加熱による表面色と模様の制御

消色対象となったピクセルについて,選択的な加熱に よって加熱,消色させることで造形物の表面色と模様を制 御する.選択的な加熱を実現する装置として,FDM方式 の 3D プリンタ (Ender-3, Creality 3D)のヒータを内蔵し た加熱ノズルを流用する形で使用した.FDM方式の 3D プリンタは材料を出力するノズルを高温で加熱するため, 材料を挿入せずにノズルを加熱対象となるピクセルに近づ け,接触しない距離で熱伝播させることで選択的な加熱を 実現できる.3D プリンタを用いた選択的加熱の概要を図 4 に示す.

3D プリンタを用いた選択的加熱手法は, Shader Printer [7] で用いられたレーザーによる選択的熱照射手法 と比較して, 安価で安全, 簡便なシステム構築が可能であ







図 5 3D プリンタの標準ノズル(左)と選択的加熱用途に作製した ノズル(右)の様子

る.一方で,複雑な形状の造形物に対する加熱が困難であ り,また空気中の熱伝播を用いるために,加熱に要する時 間も長くなるという欠点が存在する.また,図 5a に示す ように、3D プリントで使用する印刷用途のノズルは直径 が大きく,熱が周辺のピクセルに意図せず伝播してしまう. そこで,加熱対象となるピクセルの選択的な加熱に適した 形状のノズルを作製した(図 5b).作製したノズルの先端 は直径 1.2 mm,高さ 4 mm の円柱構造となっており,一 般的なノズルに比べ熱伝播を意図した形で制御できる.

## 3. 実験

#### 3.1 インクの混合比率とインク混合樹脂の透過性の関係

本稿で使用した紫外線硬化樹脂は無色透明であるため, サーモクロミックインクの含有率によって造形物を構成す るインク混合樹脂の透過性が変化する.そこで,インク混 合樹脂のインク含有率とこの透過性の関係を明らかにする ために実験を行った.本実験では,3種類のインク混合樹 脂のうち,ピンクのフリクションインクを混合したインク 混合樹脂を使用した.実験条件として,紫外線硬化樹脂に 対するフリクションインクの体積比を20:1,10:1,5:1 の3つの混合比率に設定した.実験では,黒色のPLA材 料を用いて3Dプリンタ(Ultimaker 2+, Ultimaker)で作 製した10 mm四方の皿状構造に,それぞれのインク混合 樹脂を注入し,紫外線を照射,硬化させてサンプルを作製 した.また,混合比率が5:1の条件については,透過性を 比較するために白色のPLA材料を用いて作製した皿状構 造に注入したサンプルも合わせて作製した.



 図 6 紫外線硬化樹脂とサーモクロミックインクの混合比率を変化 させた造形物の様子 (a) 混合比率が 20:1 のサンプル (b) 混 合比率が 10:1 のサンプル (c) 混合比率が 5:1 のサンプル (黒 色の構造上に注入) (d) 混合比率が 5:1 のサンプル (白色の 構造上に注入) 図 6 に作製したサンプルを示す. インクの含有率が大き くなるにつれて,サンプルの透過性が低下し,明瞭な発色 となっている様子が見て取れる.また,それぞれの発色に ついて定量的な評価を行うため,それぞれのサンプルにつ いて,分光放射輝度計 (SR-LEDW,トプコンテクノハウ ス)を用いて,室内照明下で CIE XYZ 表色系の三刺激値 X,Y,Zを計測し,式(1)に示す変換式を用いて 256 階調 の CIE RGB 表色系における R,G,Bをそれぞれ求めた.

$$\begin{cases} R = 2.3655X - 0.8971Y - 0.4683Z \\ G = -0.5151X + 1.4264Y + 0.0887Z \\ B = 0.0052X - 0.0144Y + 1.0089Z \end{cases}$$
(1)

測定結果を図 7 に示す. インクの含有率が大きくなるに つれて, R の計測値が上昇している様子が見て取れる. 加 えて,体積比が5:1のサンプルについては,注入した対象 の色に関わらず,ほぼ同一の計測値を示しており,注入し た対象の色によらず一定の発色が得られている.本実験の 結果を踏まえ,以後の造形においては紫外線硬化樹脂とフ リクションインクの体積比を5:1と設定して立体物の造 形を行った.

#### 3.2 安定して消色可能な温度の測定

本稿では、消色後に常温下で消色が保たれることを安定 した消色と定義する. インク混合樹脂を用いた造形物につ いて、安定して消色可能な条件を明らかにするために実験 を行った. ピンク、グリーン、ブルーのインク混合樹脂を、 白色 PLA 材料で 3D 印刷した皿状構造に注入して測定用 のサンプルを作製した. 3D プリンタ (Ender-3, Creality 3D) の造形領域はホットプレートとしても機能するため、 本実験ではこの造形領域上にサンプルを設置することで、 温度制御を伴う加熱を行った. また、加熱中にサーモグラ フィカメラ (PI-450i, Optris)を用いてサンプルの表面温 度を計測し、表面温度が設定温度に到達した際にはサンプ ルを造形領域から取り出し、常温で1分間放置した. その 後、室内照明下で分光放射輝度計を用いて各サンプルを測 定し、256 階調の CIE RGB 表色系での計測値を記録した.



図7 分光放射輝度計で測定した各サンプルの計測値



図8 分光放射輝度計で測定したサンプル(ピンク)の計測値と加熱 温度の関係



図 9 分光放射輝度計で測定したサンプル(グリーン)の計測値と加 熱温度の関係



図 10 分光放射輝度計で測定したサンプル(ブルー)の計測値と加 熱温度の関係

各サンプルについて加熱温度を変化させて測定した結果 を図 8- 図 10 に示す.また,各サンプルの色変化の様子を 図 11 に示す.全てのサンプルにおいて,58°C付近から消 色を開始し,61°C に達した際の色で安定した.これは前 述したフリクションインクの消色温度(約 60°C)と合致 しており,樹脂を混合したインクについても同様の消色特 性を持つことがわかった.また,インクの色ごとに安定し て消色可能な温度に大きな違いは見られなかったが,消色 後の色は使用したインクの種類によって違いがみられた. 図 11 からもわかるように,ブルーのサンプルについては, 消色後に白色となったが,ピンクのサンプルにおいては淡



図 11 各サンプル (ピンク, グリーン, ブルー) の加熱に伴う色変 化の様子

黄色となった.

# 造形物の選択的な消色による色と模様の 制御

## 4.1 平面造形物

平面状の造形物として、8×8の格子構造(26 mm 四方, 厚さ5 mm)をPLA 樹脂を用いて作製し、ピンクとブルー のインク混合樹脂を交互に注入することでピクセルを持つ 造形物を作製した.ここで、造形物の外縁部の厚みは1.5 mm,各ピクセルは2.5 mm 四方であり、ピクセル間の間 隔は0.5 mmとした.また、樹脂注入部分の厚みは1 mm である.作成した造形物の様子を図12 に示す.

造形物の加熱については、3.2 項と同様に、加熱用 3D プ リンタ (Ender-3, Creality 3D) のプレート部分に造形物 を設置した.実験環境の様子を、図 13 に示す.次に、設 置された造形物データと入力されたカラー画像を基にプロ



図 12 作製した平面造形物



図13 造形物の加熱を行う実験環境

グラム上で消色対象ピクセルを決定した. その後,加熱用 3D プリンタのノズルを 250 ℃ に加熱し,消色対象となっ たピクセルに対して,ノズルを上部から表面の1 mm 上方 まで接近させることで,それぞれのピクセルを 10 秒間ず つ選択的に加熱した.

入力したカラー画像と消色後の造形物の様子を図 14 と 図 15 に示す.これらより,所望のピクセルが概ね消色し, 入力したカラー画像に対応した造形物の色分けを実現でき ることがわかる.一方で,各ピクセルが正方形であるのに 対し,熱がピクセル中心から円状に伝導すること,表面の 一部に凹凸があることにより一部のピクセルで消色してい ない部分が存在した.



図 14 平面造形物の表面色・模様制御の様子 1 (a) 入力カラー画像(b) 消色後の造形物



図 15 平面造形物の表面色・模様制御の様子 2(a) 入力カラー画像
(b) 消色後の造形物



図 16 加熱対象の立体造形物(a)造形物の外観(b)上方からみた 造形物



図 17 ドーム状造形物の表面色・模様制御の様子(a)入力カラー画像(b)消色後の造形物

### 4.2 立体造形物

立体造形物として,図16に示すようなドーム状の構造物(直径30mm,中心部の高さ11.25mm)を4.1項と同様の手法で作製した.

造形物の加熱についても、4.1 項と同様に、入力したカ ラー画像を基に消色するピクセルを決定した.その後、造 形物データを基に消色対象のピクセルの高さを決定し、選 択的な加熱を行った.入力したカラー画像と加熱後の造形 物の様子を図 17 に示す.これより、立体造形物において も所望のピクセルが概ね消色し、入力したカラー画像に対 応した造形物の色分けを実現できることがわかる.

#### 5. おわりに

本稿では、双安定性サーモクロミックインクを含む構造 を立体物表面にフルカラーのピクセルとして形成し、非接 触な加熱により表面を選択的に加熱することで、造形後に 表面色・模様を制御可能な立体物造形手法を提案した. 3D プリンタで出力した格子状の構造に対し、規則的なパター ンとなる配色でそれぞれにインク混合樹脂を注入し、原色 が並ぶピクセルとして形成する造形物を作製した. そし て、ユーザが入力したカラー画像から消色対象となるピク セルを決定し、FDM 方式の 3D プリンタの加熱部分を接近 させて空気中を熱伝搬させることにより、その表面色や模 様を制御できることを確認した. また、提案手法を用いる ことで、平面状の造形物、及びドーム状の立体造形物に対 して表面色や模様を制御できることを確認した. 加えて、 インク混合樹脂を用いた造形物に対して選択的加熱を行う ことで、平面及び立体造形物の発色を制御し、入力したパ ターンに対応した色や模様を制御できることを確認した.

今後の展望としては現在手動で行っている樹脂注入の過程を光造形 3D プリンタによるプリントで実現するとともに、Laser Pouch Motors [8] で使用されている、レーザーとガルバノスキャナを用いた加熱システムを用いて選択的な加熱を行うことで、より高速かつ空間解像度の高い色と模様の制御手法の構築を目指す.

**謝辞**本研究は, JST ERATO 川原万有情報網プロジェ クト (JPMJER1501), JST ACT-X JPMJAX20AK, JSPS 科研費 JP19J00101 の助成を受けた.

#### 参考文献

- Patrick Baudisch and Stefanie Mueller. Personal fabrication. Foundations and Trends (R) in Human-Computer Interaction, Vol. 10, No. 3–4, pp. 165–293, 2017.
- [2] 橋田朋子,西村光平,苗村健. Hand-rewriting:紙面上にお ける人とコンピュータの協調的な加筆と消去(<特集>サー ビス現場・日常生活に浸透する VR/AR).日本バーチャル リアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 3, pp. 367–375, 2014.
- [3] Daisuke Iwai, Shoichi Takeda, Naoto Hino, and Kosuke Sato. Projection screen reflectance control for high contrast display using photochromic compounds and uv leds. *Opt. Express*, Vol. 22, No. 11, pp. 13492–13506, 2014.
- [4] Parinya Punpongsanon, Xin Wen, David S Kim, and Stefanie Mueller. Colormod: Recoloring 3d printed objects using photochromic inks. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1–12, 2018.
- [5] Yuhua Jin, Isabel Qamar, Michael Wessely, Aradhana Adhikari, Katarina Bulovic, Parinya Punpongsanon, and Stefanie Mueller. Photo-chromeleon: Re-programmable multi-color textures using photochromic dyes. In Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '19, p. 701–712, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [6] 辻井崇紘, 小泉直也, 苗村健. Inkantatory paper: 銀ナノ 粒子インクを用いた発熱制御に基づく発色式紙面インタ フェース (<特集> デジタルファブリケーションと VR). 日 本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 20, No. 2, pp. 107–113, 2015.
- [7] Daniel Saakes, Masahiko Inami, Takeo Igarashi, Naoya Koizumi, and Ramesh Raskar. Shader printer. In ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies, pp. 1–1. 2012.
- [8] Takefumi Hiraki, Kenichi Nakahara, Koya Narumi, Ryuma Niiyama, Noriaki Kida, Naoki Takamura, Hiroshi Okamoto, and Yoshihiro Kawahara. Laser pouch motors: Selective and wireless activation of soft actuators by laserpowered liquid-to-gas phase change. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 3, pp. 4180–4187, 2020.