



フォトクロミズムと高速光軸制御による 発色型ファブリケーションに向けた動的描画システム

Dynamic Drawing System Towards Color-Forming Fabrication
Using Photochromism and High-speed Optical Axis Control

三河祐梨¹⁾, 末石智大¹⁾, 早川智彦¹⁾, 石川正俊¹⁾

Yuri MIKAWA, Tomohiro SUEISHI, Tomohiko HAYAKAWA, and Masatoshi ISHIKAWA

1) 東京大学大学院 情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, yuri_mikawa@ipc.i.u-tokyo.ac.jp)

概要: 主にフォトクロミズムを利用した発色型描画システムの研究は、任意形状への模様付けファブリケーションとして有用である。従来研究はキャリブレーションが困難で、対象の大きさが限定される問題があった。本研究では、カメラ・レーザー同軸の光学システム及びアクティブマーキング法を用いる、多様な形状へのダイナミックな描画手法を提案する。評価実験により、平面对象の運動に依らず高精度な描画を実現することを示した。

キーワード: フォトクロミズム, ファブリケーション, 高速光軸制御, 高速画像処理, 発色型描画

1. 序論

近年、対象表面で呈色し情報提示を行う発色型 [1] 描画システムの研究が盛んである。発色型の多くは、対象面に特殊な色素を塗布し、光や熱を照射することで、非接触に可逆的な色変化を生じる仕組み（フォトクロミズム）を利用する。液晶等の従来のディスプレイとは異なり、各提示面に特別な機材を要さない上、一度提示した結果は電力なしに保持・携帯可能である。また、プロジェクションマッピングとは異なり、発光しないため目に優しく、屋外等の環境光の下でも鑑賞可能である。このような利点を有する発色型システムの一つに、3D プリントされた物体への模様付けや新時代のファッションへの応用に代表される、書き換え可能なファブリケーションに向けた研究がなされてきた。

発色型描画のファブリケーションシステムに対し、Saakesらはサーモクロミズムと熱レーザーを用いた模様付けの手法を提案した [2]。しかし、このシステムではレーザー・カメラ間のキャリブレーションの精密性や描画対象の設置精度が要請されるほか、光学系の配置により描画範囲や対象自身の大きさが限定的となる問題がある。

また、対象の全面への模様付けを考えると、対象が回転しても高速かつ高精度に姿勢トラッキングできることが必要である。従来研究において、マーカーレスの手法 [3] では、光学システムが同様に挟み込む形で大きさが限定的であり、マーカーの事前の正確な配置を要する手法 [4] は、様々な対象に対しては困難である。

ここで本研究では、大きさや形状の多様な対象の全面への発色型描画を、簡便なキャリブレーションで実現する光学システム及びアルゴリズムを提案する。本研究の独創的な点を以下に示す。

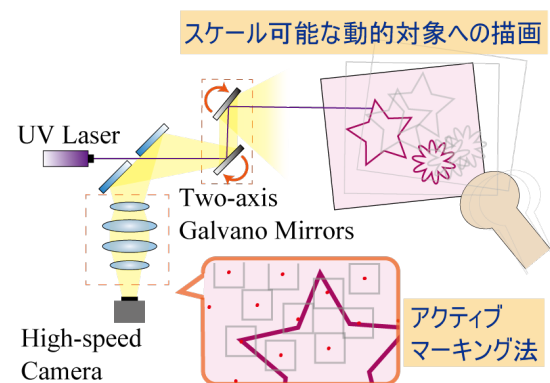


図 1: 本研究のコンセプト及び描画システムの模式図。

1. カメラと光源（レーザー）について、対象を挟みこむような従来の配置ではなく、穴あきミラーにより同軸で制御することで、広域な 3 次元形状への描画を実現する。
2. アクティブマーキング法と呼ばれるトラッキングの提案手法により、キャリブレーションは対象上の最低 4 点の位置合わせを行うだけの簡単なものとなり、マーカーの正確な配置やカメラ・ミラー間の煩雑なキャリブレーションは不要となる。
3. 最低 4 点を位置合わせすることで、軽度の運動にも追従して描画が可能であるため、人の手などで対象を回転させながら全面に描くことが可能である。

なお、本稿では、提案システムの簡単な検証のため、対象は平面に限定したうえでシステムやアルゴリズムの動作

を確認し、実験により描画の精度を評価する。

2. 関連研究

Saakes らは、温度変化により変色する現象：サーモクロミズムを利用し、フィギュアや靴への書き換え可能なファブリケーションを提案した [2]。AR マーカーを複数貼ったターンテーブル上に対象を置いて、回転後の姿勢を逐次推定し、描画を行う。しかしこの手法では、接地面やオクルージョン領域で描画が困難となる上、対象の大きさや形状に合わせて逐一煩雑なキャリブレーションを要する。

また、発色型ファブリケーションシステムにおいて、他にも多くの手法が提案されている。Hashida らは、立体形状内で選択的にフォトクロミズムを用いて発色することで体積点を表示し、その積層でさまざまな立体を表現する手法を提案した [5]。また、Parinya らは、異なるフォトクロミック塗料を隣接するセルに格納し、選択的に紫外光を照射することで、多色表現を行う手法を提案した [6]。本研究は、既に凹凸のある形状への模様付けを行う点でこれらの研究とは異なる。

対象の高速かつ高精度なトラッキングの従来研究として、構造化照明法がある。対象にマーカーを付与しない場合は、カメラと照明で対象を挟みこむ形式となり、大きさが限定される [3]。対象にトラッキング用マーカーを付与する場合は、軽量ミラーを用いた広域トラッキングが実現されるが、形状認識のために全面にマーカーを設置する事前の手間が煩雑である [4]。

3. 提案手法

3.1 光学システム

システム模式図を図 1 に示す。フォトクロミック色素を塗布した対象表面に、紫外光レーザーを照射することで描画を行う。穴開きミラーを用いてレーザー光線をカメラの光軸と同軸化しており、レーザーによる描画位置は常にカメラの画角内で固定され、現在の描画位置周辺が高解像に観察される。取得画像について、3.3 の処理を 1 ms 以内に行い、画像内の描画位置を決定する。PID 制御により、2 光軸を乗せたガルバノミラーのパンチルト変化を指令することで、所望の位置がレーザーで描画されるほか、カメラが現在の描画位置周辺を見るように視線方向も制御される。

本システムで、紫外光源にレーザーを使用したのは、プロジェクトと比較して高速に制御が可能であり、また単位照射面積あたりのエネルギーが高く、計測結果に応じて即座に描画されるためである。よって動く対象における正確な位置の描画が実現可能となる。

従来キャリブレーションが難しいカメラとミラーについて、カメラとレーザーの 2 光軸をガルバノミラーで同軸制御することにより、3.3 のアクティブマーキング法と組み合わせ、非常に簡便なキャリブレーションが実現される。また、レーザーによる描画位置周辺の高解像度な撮像は、3.3 で示す高速かつ高精度なマーカー検出に利用されている。

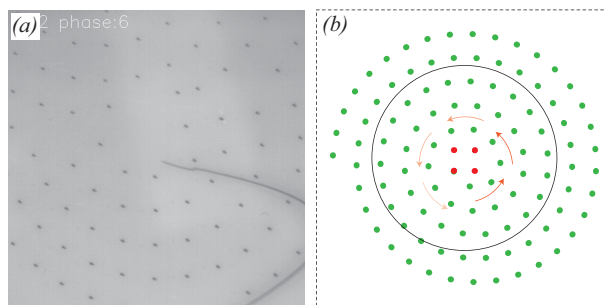


図 2: (a) アクティブマーキング法でトラッキングしながら絵を描画する様子、および (b) 本稿における暫定的なマーカー配置。

3.2 色素の選定

後述のアクティブマーキング法において、小さなドットを濃く描画するため、光や熱の比較的長い時間の照射への耐性が重要である。サーモクロミズムを利用する先行研究 [2] では熱レーザーを利用しているが、加熱により対象表面を焦がす可能性があるため、不適である。一方で、フォトクロミズムは紫外光の照射なのでそのような問題は生じない。したがって本研究では、紫外光の照射で色変化が起こるフォトクロミズムを利用し、対象表面にはフォトクロミック色素を塗布することとする。

フォトクロミック色素の代表的なものに、紫外光の照射をやめると自然退色する T-Type と、強い可視光の照射がなければ照射後も退色しない P-Type があるが、本システムではファブリケーションに向けて絵の残存性を要するため、後者の P-Type を使用する。

3.3 アクティブマーキング法

運動対象への描画を簡便なキャリブレーションで実現するため、フォトクロミズムによりマーカーを描画しながらトラッキングを行う手法「アクティブマーキング法」を提案する。図 2(a) で示すように、多数のマーカーをフォトクロミズムを利用して描画し、そのマーカーをトラッキングすることで対象の姿勢推定を行いながら、画角内で固定されたレーザー照射位置で描画する。3.1 で示した光学システムの、同軸制御による高解像な撮像を利用したトラッキング手法であり、姿勢推定用のマーカーの個数を能動的に増やしていくため、カメラ・レーザー間のキャリブレーションが簡便となる利点を有する。また、高速処理を利用するため、軽度の運動にも対応して自由な姿勢で描画が可能である。したがって、対象を手動で回転させながら全面へ描画することを実現可能とする。

なお、フォトクロミズムを用いた発色なので、原理的にはどのマーカーも可視光で消色可能だが、本項では簡単のため省略する。

3.3.1 マーカー配置

アクティブマーキング法の本稿における暫定的なマーカー配置を図 2(b) に示す。本稿では、対象の中央に 1 辺 10mm の正方形を成すように配置された 4 点を、3.3.2 で行う位置

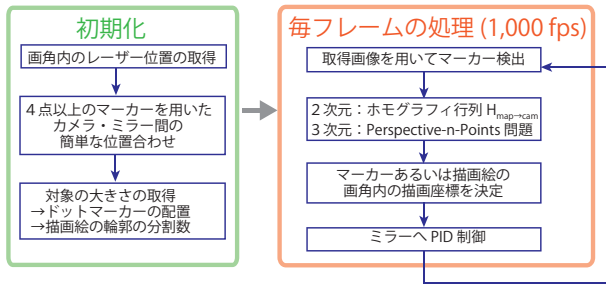


図 3: アクティブマーキング法を用いた処理の流れ。

合わせ用のドットマーカする。その位置を起点として、描画範囲を覆うように、マーカを反時計回りの螺旋状に配置する。なお、図 2(b) では、円を描画するとしてマーカの範囲を決定している。

3.3.3 で示すマーカ群のマップ・画像間のホモグラフィ変換 [7] について、マーカ群が直線上に並ぶ場合等は、特異点となり誤検出を招く恐れがある。本項では、それを避ける暫定的なマーカ配置として、螺旋状を採用した、

3.3.2 初期化

初期化と、次節の毎フレームの処理の流れを図 3 に示す。はじめに、画角内のレーザー照射位置を取得する。次に、カメラや 2 軸ミラー、マップ間の位置合わせを最低 4 点のマーカについて行う。カメラの画角に収まる範囲内で、対象上で 4 点のマーカ位置を決め、この座標を対象上（マップ）および画像上の双方で取得する。そして、これらのマーカが画角内のレーザー照射箇所と一致するときの 2 軸のミラーの指令角を取得する。ミラーの指令角通りに各マーカを描画し、適応的閾値法により閾値および画像上のサブピクセル単位の座標を取得し、これを初期値とする。最後に、対象の大きさを取得し、4 点のマーカ位置を基準としたマーカ配置や、描画線の線分の分割数を決定する。

3.3.3 マーカ検出とトラッキング

まず、画角内の全てのマーカを検出する、1,000 fps の高速撮像により、前後のフレームで同じマーカが殆ど同じ位置にあると仮定できるため、セルフウィンドウ法 [8] や適応的二値化法が利用できる。3.1 の光学システムにより、高解像度な画像を利用できるため、高速かつ高精度に推定される。次に、検出されたマーカ群について、マップ上の既知座標との対応が知られていることから、3 次元対象の場合は Perspective-n-Point (PnP) 問題を解き、2 次元対象の場合はホモグラフィ行列 [7] を算出する。そして、次の時刻で描画したい画像上の座標を、マップ上の座標から変換して算出する。これを目標位置として、画角内で固定されたレーザー光線の位置を現在位置との差分の入力とし、PID 制御により 2 軸のミラーの角度指令を行う。これにより、対象上の所望の位置への描画が可能である。これらの処理は全て 1 ms 以内で行われる。

描画対象が絵とマーカのどちらであっても、各時刻で常に画角内に 4 点以上のマーカが見えるよう描画順序を

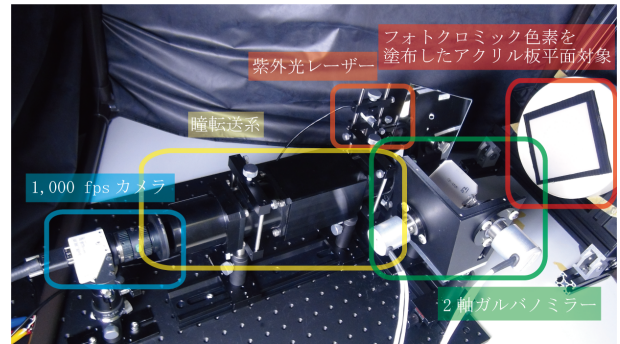


図 4: 評価実験で使用した装置の概観。

設計することで、現在の位置から近傍を新たに描く限りは、対象の姿勢推定と対象への描画を継続して行うことが可能となる。なお、本項では、簡単のため、まずマーカを全て描画してから絵を描画する順序としている。

4. 評価実験

本節では、本手法による描画線の精度を、対象が静止及び運動する各場合について、実験により評価する。

4.1 実験手法

評価実験のシステム概観を図 4 に示す。P-Type フォトクロミック色素（ジアリールエテン、山田化学工業 DAE-0012）を、100 mm 四方・2 mm の厚さの平面アクリル板の片面に塗布した。アクリル板は立て掛けたターンテーブル上に設置され、自由に回転可能とした。高速カメラは Photron IDP-Express R2000 (8bit 512×512 px, 1,000 fps) を使い、焦点位置を仮想的に移動させるため、レンズの前に瞳転送系を設置した。紫外光は 375nm 波長の高出力レーザー（キヨー技研, MLX-B 13-375-20-EOC, クラス 3B）を用いた。双方の光軸が直交する場所に、45 度傾けて穴あきミラーを配置することで同軸化する。この光軸について、2 軸のガルバノミラー（Novanta M3）により視線及び光線方向を制御された。

まずアクティブマーキング法によりマーカを全て描き、その後すぐに、対象が静止、或いは手で回転する状態で、半径 30 mm の円を描いた。なお、今回の系では並進は回転時と同様な評価ができるとみなし、運動条件は回転に限定した。描画後、すぐに対象をスキャナで読み取り、対象の四隅で正規化した画像により、半径方向の描画誤差を評価した。

4.2 結果と考察

静止及び回転の双方の描画結果と、半径方向の誤差のグラフを図 5 に示す。回転速度は約 40 deg/sec であった。図 5 の上の写真より、静止及び回転どちらでも見た目で違いはなく、図 5 の下側のグラフにより、誤差はどちらも 1 mm 以下の範囲に収まっており、対象の運動によらず高精度な描画を実現したといえる。

なお、静止と回転で描画結果や精度が変化しないのは、描画系が常に対象に対して運動し、静止であれど相対的に対象の姿勢が変化するが、提案手法が高精度にトラッキング

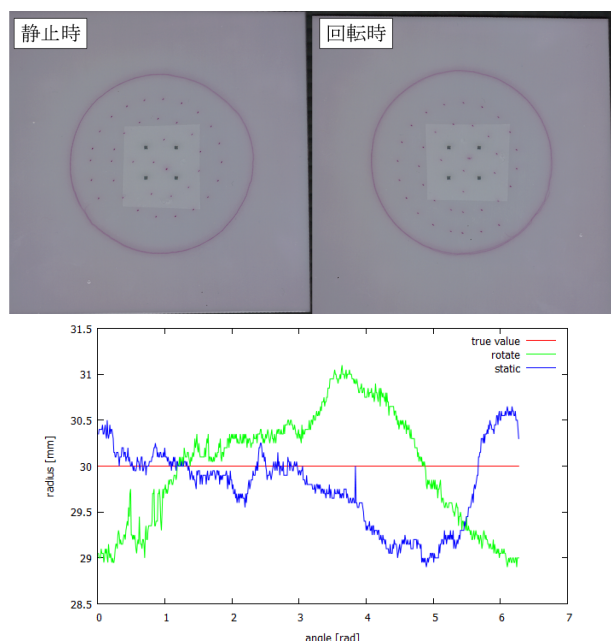


図 5: 静止及び回転運動する対象への描画精度の実験結果。

するからだと考えられる。

5. デモンストレーション

図 6(a) のように、異なる大きさの対象へも対応して描画可能であり、図 6(b) のように、低速に回転運動する対象へも絵を描画できる。原理的に 3 次元形状に対応して描画可能なため、今後は様々な形状の対象の両面に回転しながら描くなど、立体形状への模様付けの応用が期待される。

6. 結論・今後の展望

本研究では、軽度運動する対象への発色型描画を実現する光学システムと、マーカーを描画しトラッキングを行うアクティブマーキング法を提案した。実験により、平面が静止及び回転運動する場合の双方で、誤差 1 mm 以下の高精度な描画が実現されることを示した。

今後は 3 次元形状への PnP 問題による対応や、広域描画時の誤差蓄積、運動により頑健となるためのレーザー出力制御、カメラの浅い被写界深度の問題に対応するほか、アクティブマーキング法のマーカー配置や描画順序、描画マーカーの可視光による消色アルゴリズムを検討する。

参考文献

- [1] 橋田朋子, 寛康明, 苗村健. 紫外プロジェクタを用いた発色型映像投影. 電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎, Vol. 111, No. 101, pp. 13–14, jun 2011.
- [2] Daniel Saakes, Masahiko Inami, Takeo Igarashi, Naoya Koizumi, and Ramesh Raskar. Shader Printer. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, p. 18. ACM, 2012.

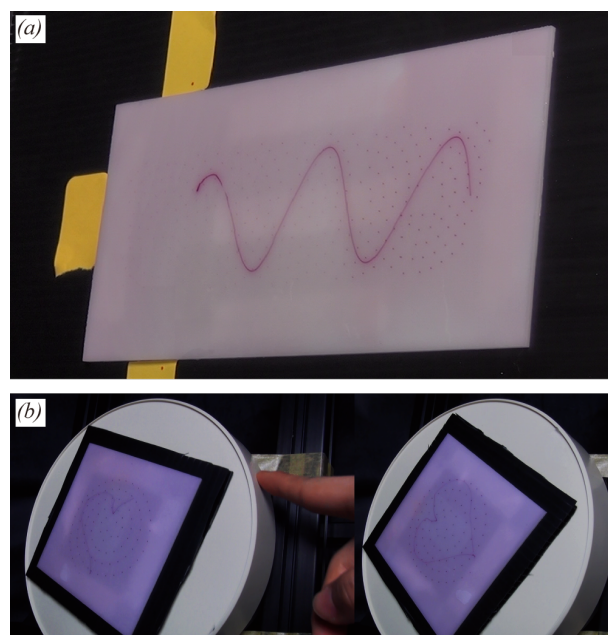


図 6: (a) より大きな対象 ($100 \times 200 \text{ mm}^2$, アクリル板) への描画を実現した例, (b) 高速カメラからのアクティブマーキング法による描画の様子 (視認性向上のため画像の輝度を調整済)。

- [3] Satoshi Tabata, Shohei Noguchi, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. High-speed 3D Sensing with Three-view Geometry using a Segmented Pattern. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3900–3907. IEEE, 2015.
- [4] Yuri Mikawa, Tomohiro Sueishi, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. VarioLight: Hybrid Dynamic Projection Mapping Using High-speed Projector and Optical Axis Controller. In *SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies*, p. 17. ACM, 2018.
- [5] Tomoko Hashida, Yasuaki Kakehi, and Takeshi Nae-mura. Photochromic sculpture: Volumetric color-forming pixels. In *ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, p. 11. ACM, 2011.
- [6] 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*, p. 213. ACM, 2018.
- [7] Richard Hartley and Andrew Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.
- [8] Idaku Ishii and Masatoshi Ishikawa. Self-windowing for high speed vision. In *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1916–1921. IEEE, 1999.