

RayLeight: レイリー散乱を用いた 柔軟なタンジブルディスプレイの試作

袴田 結女^{1,a)} 沖 真帆¹ 塚田 浩二¹

概要: レイリー散乱とは、光の波長より十分に小さい微粒子に、光が散乱する現象のことであり、空の色の変化（青空、夕焼け等）の要因としても知られている。我々は、ホットボンドスティック（以下、スティック）に白色 LED を投射することで、レイリー散乱が発生することに着目した。スティックは身近な素材で入手が容易であり、柔軟かくしならせることができる特徴がある。本研究では、こうしたスティックの特徴を活かした、カスタマイズ可能なマトリクスディスプレイを提案する。本稿では、提案システムの背景、実装、応用例、今後の展望について述べる。

1. はじめに

構造色とは、微細構造による光の干渉、回折、散乱などにより生じる色のことである [9]。薄膜干渉により生じるシャボン玉の虹色や、多層膜干渉により生じる魚類の光沢、微粒子による光の散乱で生じる空の色の変化など、我々の日常生活では多くの構造色が観察できる。こうした構造色は、見る角度によって色が変わったり、極めて鮮やかな発色をするという特徴を持つ。

本研究では、構造色の中でも特に、レイリー散乱に着目した。レイリー散乱とは、光の波長より十分に小さい微粒子に光が散乱する現象のことであり、例えば、青空や夕焼けなどの空の色の変化は、大気中の微粒子に太陽光が散乱することで生じる。

こうしたレイリー散乱はフローリングワックスやホットボンドスティックなど、身近な素材と白色 LED を用いて再現できる [1], [8]。我々は、レイリー散乱を生じる材料をディスプレイの構成要素として活用することで、単純な制御で空色の変化のような印象的な表現を行えると考えた。

本研究では、ホットボンドスティック（以下、スティック）に注目する。スティックは、安価で取り回しが容易であり、柔軟かくしならせることができる。こうした特徴を活用して、レイリー散乱を用いた柔軟なタンジブルディスプレイを提案する。

2. 関連研究

本章では、本研究に関連する研究事例として、「構造色に関する研究」「柔らかい素材を使用したディスプレイ」の2つの観点から説明する。

2.1 構造色に関する研究

Saito ら [3] は、モルフォ蝶の翅の構造を応用し、光を広範囲に広げる採光窓のガラスのデザインを提案した。ガラスを通過する光は直進するため、室内を明るく照らすには、光を散乱させたり、光の経路を曲げる必要がある。モルフォ蝶の翅の微細構造には、青色の波長のみを強く反射し、経路を曲げても虹色に光らないという特徴がある。モルフォ蝶の翅の特徴を再現した微細構造を窓ガラスに取り付けることで、課題を解決した。

Amy ら [2] は、透明の液滴に着色することなく、構造色を生成する手法を提案した。半球の液滴に光を照射し、その光の屈折の仕方をモデル化することで、ある条件下で発色する構造色を予測できるようにした。

Yamada [5] は、チョコレートに手軽に構造色の模様をつける手法を提案した。分光シートに乗せ固めたチョコレートに、レーザー彫刻機で不要な箇所の微細構造を溶かすことで、見る視点によって虹色に変化する構造色の模様つきチョコレートを実現した。

このように構造色を再現する研究は広い分野で行われているが、微細構造を再現するには専門的な機材が必要である。本研究では、身近な素材とデジタル工作技術で、手軽に構造色の再現を行う。

¹ 公立はこだて未来大学

^{a)} g2122052@fun.ac.jp

我々は、先行研究 [7] において、フローリングワックスをアクリルケースに封入した部品でレイリー散乱を再現する情報提示手法を提案した。レイリー散乱の効果は観察されたが、「気泡が目立つ」「時間が経つと沈殿物が生じる」等、部品として扱いにくかったため、本研究ではホットボンドスティックを利用することにした。

2.2 柔らかい素材を使用したディスプレイ

井上ら [6] は、チューブを物体に巻き付けるディスプレイ、TuVe を提案した。ポンプからチューブへ液滴を送り込み、液滴の位置を制御することで、情報を表示している。チューブを使用することで、さまざまな3次元物体に巻き付けて、ディスプレイ化することができる。

Suら [4] は、フレキシブルな8×8有機ELディスプレイを、3Dプリンタで作成する方法を提案した。押し出し印刷とスプレー印刷の2つの印刷方法を組み合わせ、6つの層を造形している。ディスプレイ全体をシリコンで覆っているため柔軟性が高く、曲げた状態でも発光することができる。

このように、柔軟なディスプレイは多数存在するが、本研究では、ディスプレイの形状を組み替える過程で、レイリー散乱の変化も体験できる点に特徴がある。

3. 提案

本研究では、スティックを部品として用いた、カスタマイズ可能なディスプレイを提案する。本デバイスは、LEDとフォトトランジスタをマトリクス状に配置し、その上に固定パーツを嵌め込むことで構成される。固定パーツにスティックを差し込むことができ、ユーザはマトリクスに自由にスティックを配置することができる。また、センシング機能を用い、スティックの配置によって点灯パターンを切り替えることで、インタラクティブな体験の提供を目指す。

3.1 スティック選定の予備実験

スティックは種類が豊富であり、素材や粘度、色などが異なる。どのようなスティックがレイリー散乱を再現するのに適しているかを調査するため、複数のスティックを用意し、レイリー散乱がどの程度発生するか確認するための予備実験を行った。

図1のように複数のスティックを用意し、スティックを底面と側面の2方向から白色LEDを照射した(図2, 図3)。実験の結果、1のスティック(モントロウ社製、直径8mm, 長さ10cm)がオレンジと青の発色を最もよく観察できたため、本ディスプレイの部品として選定した。

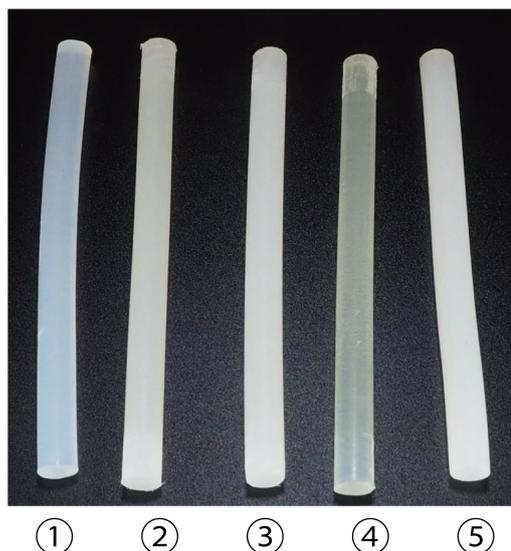


図1 予備実験に使用したスティック。

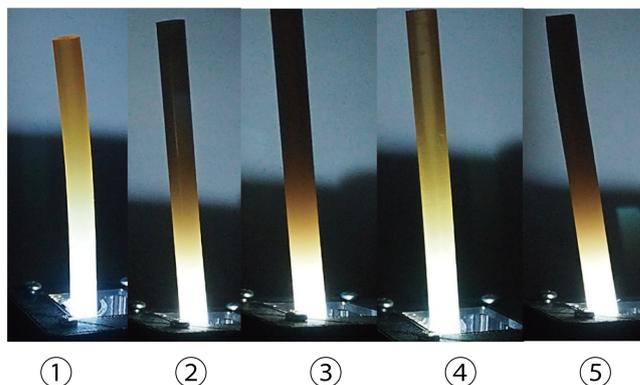


図2 予備実験：スティックの底面からLEDで照射した様子。

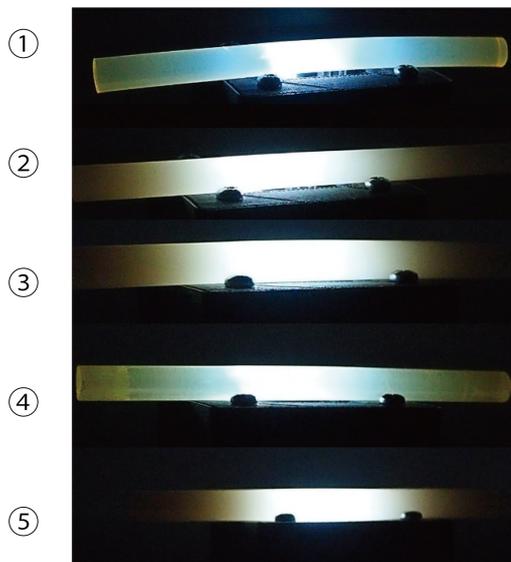


図3 予備実験：スティックの側面からLEDで照射した様子。

4. 実装

図4, 図5に, 本デバイスの外観と構成を示す. LEDとフォトトランジスタを隣接して取り付けられた5x5のマトリクス基板を実装した. 使用した白色LEDはNSPW300DS, 光度は12.9cd, フォトトランジスタはTEPT4400である. 作成した基板をArduino互換機(ELEGOO MEGA2560 R3)に接続し, LEDの点灯・消灯の制御, センシングを行っている. スティックは, モノタロウ社のホットメルト接着剤を使用した. また, スティックを固定して差し込むためのL-Sパーツと, スティック同士を接続して形状を変化させるためのジョイントパーツを作成した(図6). L-Sパーツは底面にLEDとフォトトランジスタを差し込むための穴があり, フォトトランジスタが直接LEDの光を受け取らないために仕切りがついている. 上面にスティックを差し込むための穴が開いており, 5mmの黒色アクリル板を加工したケースにはめ込むことで, マトリクス型の配置を可能にした. ジョイントパーツは, スティックのしなやかさを活かして形状を自在に変化させるために作成した. それぞれ1次元方向, 2次元方向, 3次元方向に穴が開いており, スティックを差し込むことができる.

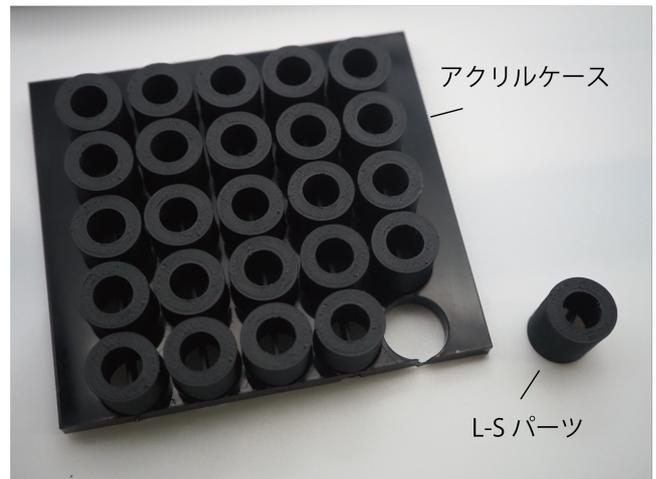
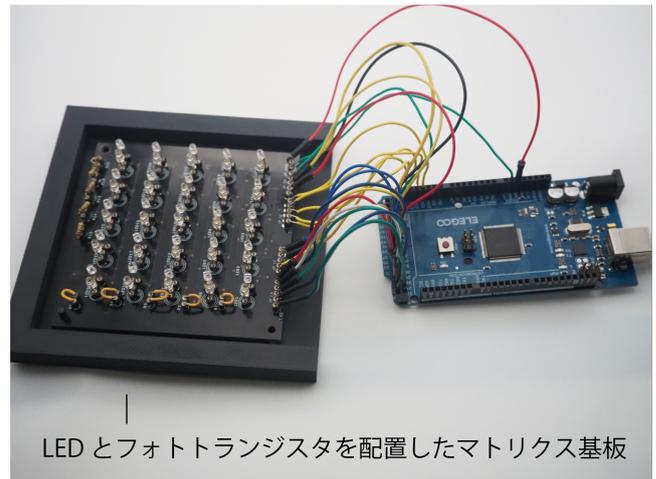


図5 デバイスの構成

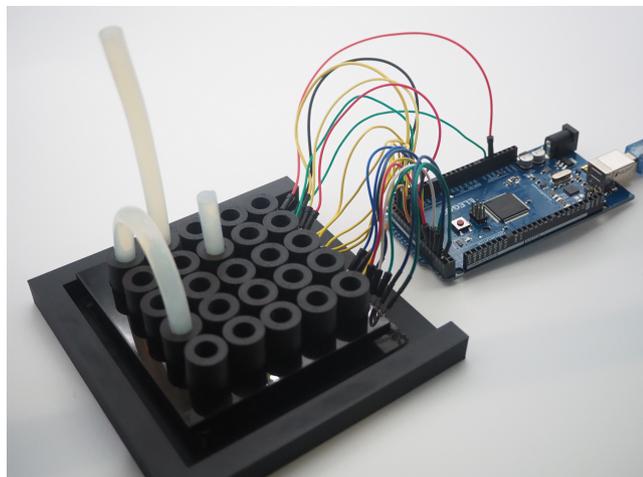


図4 デバイスの全体図

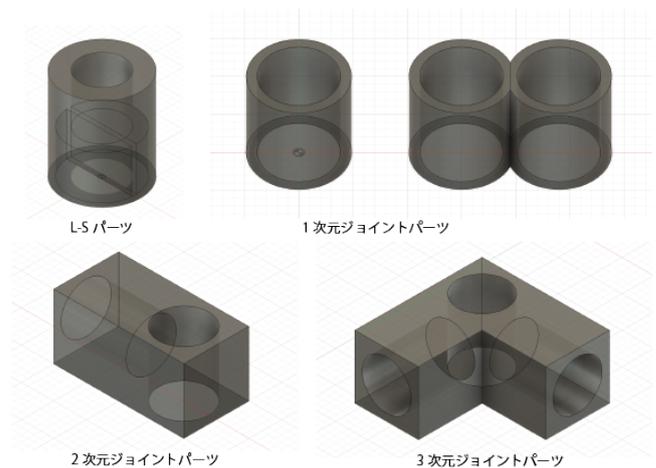


図6 L-S パーツとジョイントパーツ.

4.1 スティックの配置例

本デバイスは, 使用するスティック数や配置箇所の変更, ジョイントパーツの使用で, ディスプレイの形態を変化させることができる. マトリクス型ディスプレイとアーチ型ディスプレイについて以降で紹介する. 各表現例の撮影に

は、ミラーレス一眼 OM-D E-M10 MarkIII (OLYMPUS) を使用した。

4.1.1 マトリクス型ディスプレイ

スティックを 25 本使用した、 5×5 のマトリクス型ディスプレイを試作した。スティック上部に、5mm のアクリル板を加工して製作した整列パーツをはめ込んでいる。LED を 25 個全て点灯することで、オレンジのグラデーションを表現することができる (図 7)。

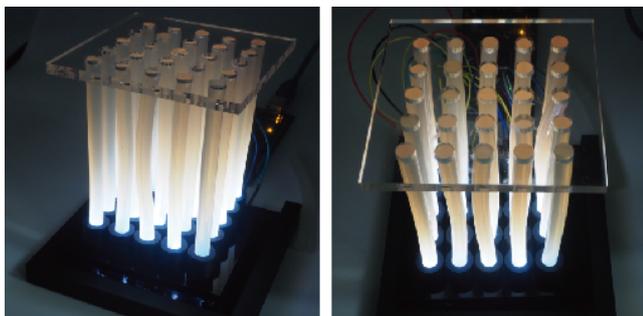


図 7 マトリクス型ディスプレイの表現例 1. 斜めから見た図 (左). 上から見た図 (右).

4.1.2 アーチ型ディスプレイ

スティックを 10 本使用し、対面するスティックをジョイントパーツで繋いだ、アーチ型ディスプレイを試作した。L-S パーツで接続されたスティックの根元の LED を点灯するとオレンジ色を、スティックが接続されていない中央部の LED を点灯すると青色を表現することができる (図 8)。

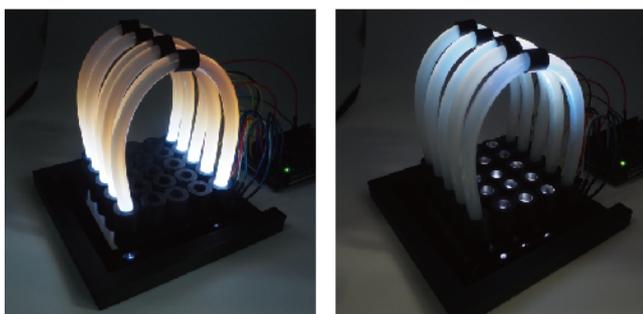


図 8 アーチ型ディスプレイの表現例.

4.1.3 長さの異なるスティックの組み合わせ

スティックの長さを変えることで、光がスティック内を通過する距離が変わり、発色する色が変化すると考えた。そこで、図 9 左のように、スティックを $1/3$ 、 $1/2$ 、 $2/3$ の長さにカットした。スティックが短いほど青の、スティックが長いとオレンジの割合が増えている。

また、スティックの長さによりバリエーションを出したため、立体感のある配置が可能になる (図 9 右)。長さの異なるスティックを、さらにアーチ状に配置することで、高低差のある立体的な表現を可能にする。



図 9 スティックの長さによる発色の差 (左), 底面から LED で照らしたものを真横から見た図 (左から $1/3$ 、 $1/2$ 、 $2/3$ 、1). 立体的な配置の作例 (右).

4.2 ジョイントパーツを使用した例

2次元ジョイントパーツを使用した作例を図 10 に示す。アルファベットの P のような、直線と曲線が混在する形状を造形することが可能である。また、光の通過する距離が長い縦線はオレンジに発色し、光の通過する距離が短い曲線部分は青色に発色していることが分かる。このように、ジョイントパーツを使用することで、複雑な造形が可能になり、形状により発色を変化させることができるようになる。

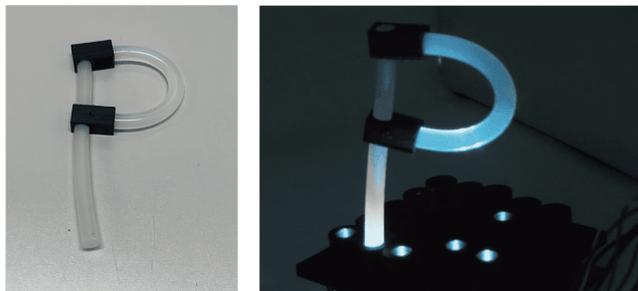


図 10 2次元パーツを使用して造形したアルファベット P (左) と、その点灯例 (右).

4.3 センシング機能

光センサを用いたスティックの設置状態の検出を行った。図 11 は、スティックの設置をセンシングしている例である。左はセンサ部分にスティックを設置していない状態、右は設置している状態である。マトリクス左手前部分をセンサとして利用しており、スティックを差し込むことで、全ての LED が点灯している。マトリクス 1 つ 1 つにフォトトランジスタを組み込んでいるため、スティックの設置箇所だけ LED を点灯させたり、スティックの有無で点灯パターンを切り替えるような、インタラクティブな機能を実装することができる。



図 11 スティックの有無で点灯パターンが切り替わる例。

5. 応用例

本章では、デバイスの応用例について、「知育デバイス」「光る楽器」を紹介する。

5.1 知育デバイス

知育デバイスとしての応用例を紹介する (図 12)。本デバイスには、以下の特徴がある。

- レイリー散乱を、身近な素材で再現できる。
- レイリー散乱を、実際に手で触れながら体験できる。
- マトリクス上で、パーツと組み合わせて自由な形状を造形できる。
- スティックの長さや角度で発色が変化することを学ぶことができる。

これらの特徴を活かすことで、光学現象を学びつつ、創造性に影響を与えることができるのではないかと考える。

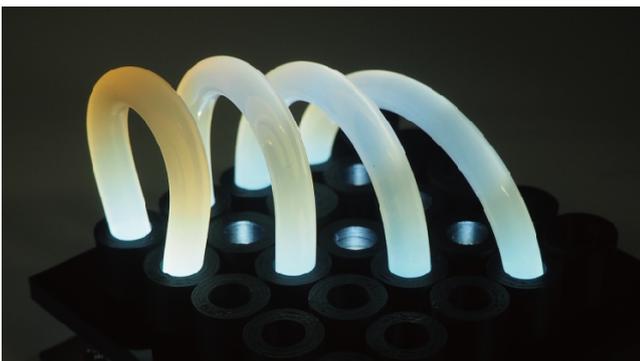


図 12 知育デバイスのイメージ。アーチの配置によって発色が変わることが学べる例。

5.2 光る楽器

光る楽器としての応用例を紹介する。本デバイスとスピーカーを組み合わせることで、スティックを挿した位置に対応する音を流すことができる。スティックを差し込むことで、光りながら音を奏でる楽器のような表現ができる。

6. 議論

本章では、本デバイスの表現の可能性を追求するための検討・試作について議論する。

6.1 光を伝達する工夫

光の伝達距離を伸ばすための工夫として、光ファイバとスティックを組み合わせる試作を行った (図 13 左)。スティックにドリルで穴を開け、そこに光ファイバを通すことで、光ファイバ入りスティックを作成する。光ファイバを貫通させたものと、半分だけ通したものの2つを作成した (図 13 中央, 右)。光の伝達距離を伸ばすことで、例えば 4.2 の図 10 で光が届いていない左上に光を届けられる可能性がある。

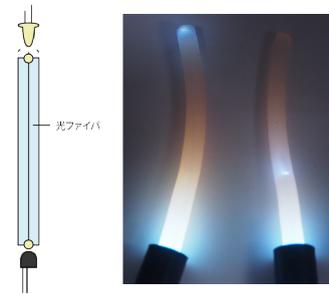


図 13 光ファイバ入りスティックの模式図 (左)。光ファイバを貫通させたスティック (中央) と半分だけ通したスティック (右) を LED で照らした様子。

6.2 新素材の検討

より柔軟な設計を実現するために、レイリー散乱を 3D プリンタの造形物で表現する方法を検討した。その結果、光造形式の 3D プリンタ Form3 と、デュレブルレジンの組み合わせでレイリー散乱を再現できることを確認した (図 14)。一方、デュレブルレジンはホットボンドより硬質で柔軟に曲げることは難しいといった問題がある。デュレブルレジンをを用いた様々な構造体を実装することで、スティックでは難しい直線的な表現や、細かい形状の造形が可能になると考える。スティックとデュラブルレジンを組み合わせた、表現の可能性を追求する。



図 14 デュラブルレジンで造形した例 (左)。スティックとデュラブルレジンの点灯の比較 (右)。

7. まとめ

本研究では、レイリー散乱を用いたタンジブルディスプレイを提案した。スティックを素材として用いることで、手軽さと形状の自由度を持ち合わせたディスプレイとなっている。スティックの長さを変更したり、パーツと組み合わせて形状をカスタマイズすることで、それぞれ異なる表現ができることを確認した。これらの表現を組み合わせることで、知育デバイスや楽器として応用することができる可能性がある。今後は、光ファイバとスティックの組み合わせや、デュラブルレジンを用いた3Dプリンタでの造形についても検証し、新たな表現の可能性を追求する。

謝辞

本研究の一部は、科研費 20H04231 の支援を受けた。

参考文献

- [1] Exploratorium Teacher Institute Project: Glue-Stick Sunset (online). 入手先<<https://www.exploratorium.edu/snacks/glue-stick-sunset>>. (2023-11-14 アクセス).
- [2] A. E. Goodling, S. Nagelberg, B. Kaehr, C. H. Meredith, S. IkCheon, A. P. Saunders, and M. K. D. Zarzar. Colouration by total internal reflection and interference at microscale concave interfaces. *Nature*, pp. 523–527, 2019.
- [3] A. Saito, K. Yamashita, T. Shibuya, and Y. Kuwahar. Daylight window based on the nano-disorder inspired by Morpho butterflies' coloration. *Journal of the Optical Society of America B*, , 38(5):1532–1537, 2021.
- [4] R. Su, S. H. Park, X. Ouyang, S. I. Ahn, and M. C. McAlpine. 3D-printed flexible organic light-emitting diode displays. *SCIENCE ADVANCES*, 8(1), 2022.
- [5] Y. Wataru. M&M: Molding and Melting Method Using a Replica Diffraction Grating Film and a Laser for Decorating Chocolate with Structural Color. In *The Adjunct Publication of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–3, 2022.
- [6] 井上佑貴, 伊藤雄一, 尾上孝雄. TuVe: チューブを用いたフレキシブルなディスプレイ. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 24(3):293–301, 2019.
- [7] 袴田結女, 沖真帆, 塚田浩二. RayLeight: レイリー散乱を用いたマトリクスディスプレイの提案. *第63回エンタテインメントコンピューティング研究会*, 2022(12):1–7, 2022.
- [8] 馬目秀夫. 「青空と夕日の実験機」の制作 (online). 入手先<<http://www6.plala.or.jp/maamu/seisaku.pdf>>. (2023-11-14 アクセス).
- [9] 木下修一. 発色原理が異なる色—構造色—. *日本画像学会誌*, 50(6):543–555, 2011.