

# 布の CG 表現のための見た目のモデリング

土橋宜典<sup>†1</sup> 岩崎慶<sup>†2</sup> 岡部誠<sup>†3</sup> 井尻敬<sup>†4</sup> 藤堂英樹<sup>†5</sup>

**概要:** 本論文では、与えられた布の見た目を表現するための双方向反射分布関数 (BRDF) を逆算する方法を提案する。布の BRDF は、布を構成する糸やその種類、また、織パターンに影響を受ける。そのため、これらのパラメータを調整して目的の見た目を表現することは容易ではない。本研究では、糸の光学的特性は既知として、織パターンを決定するという問題を解く。提案法では、この問題を最小化問題として定式化し、さらにグラフの最短経路問題に帰着する。これによって、目的の見た目を表現できる織パターンを効率よく計算することができる。提案法を用いた例を示し、その有効性について検討する。

**キーワード:** 布, レンダリング, 逆問題, BRDF

## Modeling of Cloth Appearance for Computer Graphics Applications

YOSHINORI DOBASHI<sup>†1</sup> KEI IWASAKI<sup>†2</sup> MAKOTO OKABE<sup>†2</sup>  
TAKASHI IJIRI<sup>†4</sup> HIDEKI TODO<sup>†5</sup>

### 1. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) による布の表現は、映画やビデオゲームなど、さまざまなアプリケーションに用いられている。これらのアプリケーションにおいて、布の見た目を設計できるツールは非常に有用と考えられる。布の見た目は、布表面の双方向反射分布関数 (BRDF) によって決まり、布の BRDF は、使用される糸の種類とその織パターンによって決まる。したがって、所望の見た目をもった布モデルを取得するには、糸の光学特性と織パターンを適切に設定する必要がある。本稿では、これらのうち、織パターンの設計法に着目する。

本研究では、ユーザによって与えられた画像と見た目が一致する布の織パターンを逆算する方法を提案する。布表面のある点の輝度はその点周辺における局所的な織パターンに依存する。そこで、本研究では、光源・視点・糸の種類を固定し、ユーザにより指定された目標画像が反射光として表示されるよう織パターンを算出する。提案法では、与えられた目標画像の各輝度レベルに織パターンを対応させる“マッピング関数”を求めることでこれを実現する。このマッピング関数は、可能な織パターンのうち、各輝度レベルになるべく近い輝度を与える織パターンを探索する問題として求めることができる。我々は、この問題をグラフの最短経路問題として表現し、ダイナミックプログラミングを用いて解くことで、効率的にマッピング関数を算出する。

本研究では、直交する縦糸と横糸によって織られた布を対象とし、異なる織パターンを有するブロックがタイル状に並ぶ構造を仮定し、隣接ブロック間における織りの整合性は考慮しない。したがって、提案法によって求まる織パターンをもとに実物を生成することはできない。しかし、レンダリング結果が重要な CG アプリケーションにおいては、所望の見た目を有する織りパターンを実現できる本手法は十分に有用なものと考えられる。

### 2. 関連研究

布の表現に関する研究は数多く行われているが、ここでは、本研究の目的である布の見た目の表現に関連する研究に絞って議論する。

サーフェスモデルとしてリアルな布を表現するための BRDF モデルが数多く提案されている。Adabala らは複雑な織パターンからなる布のリアルな画像をレンダリングする方法を提案している[1][2]。Irawan らは織パターンの構造から鏡面反射を表現するためのモデルを提案している[3]。この論文では、織パターンと光の相互作用を解析し、リアルな画像を表現するための BRDF モデルが提案されている。Sadeghi らは、マイクロシリンダモデルに基づく、より簡略化された BRDF モデルを提案し、さまざまな種類の布に適用できることを示している[4]。また、Velinov らはベルベットなどの起毛のある布のレンダリング方法を提案している[5]。Luan らは、手続き的な糸のモデルに基づく布の効率的なレンダリング方法を提案している[6]。また、最近では、

<sup>†1</sup> 北海道大学/UEI リサーチ  
Hokkaido University / UEI Research

<sup>†2</sup> 和歌山大学  
Wakayama University

<sup>†3</sup> 静岡大学  
Shizuoka University

<sup>†4</sup> 芝浦工業大学  
Shibaura Institute of Technology

<sup>†5</sup> 中央学院大学  
Chuo Gakuin University

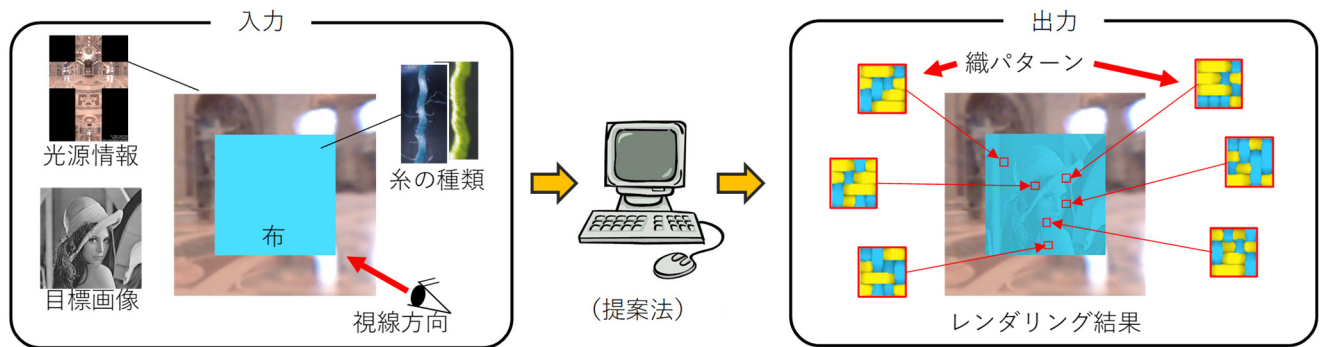


図1 本研究の目的

布表面のマイクロストラクチャをボリューム表現することでよりリアルな画像の生成を目指した研究も多く行われている[7][8]. これらの手法はリアルな布の画像を生成できるが、目的の見た目を表現するには各モデルのパラメータを手動で調整する必要がある.

画像処理技術を利用して織パターンを解析する方法がテキスタイル分野において数多く提案されている(例えば, [9][10]). これらの方法は、糸の構造を解析することが目的で、織パターンの設計は考慮されていない. そこで、遺伝的アルゴリズムを用いて織パターンを設計する手法が提案されている[11]. しかし、この方法では、システムにより提示された複数の織パターンの一つをユーザーが選択しなければならず、目的の見た目となる織パターンを逆算することはできない. また、Dasらは織パターンを設計するための最適化手法について議論している[12]. しかし、この研究は製作コストに焦点が当てられており、布の見た目については考慮されていない.

糸レベルのマイクロストラクチャをモデリングすることによって、リアルな布を表現する研究も行われている. 例えば、糸レベルのシミュレーションを行う研究[13][14], 糸レベルで織パターンを編集する研究[15], また、手続的モデリングによる研究[16]などがある. しかし、これらの方法は、幾何形状のモデリングに主眼が置かれており、目的の見た目の表現については考慮されていない.

### 3. 問題設定

図1に提案手法の概要を示す. 本研究では、光源と視点位置は固定し、また、布の形状は矩形とする. そして、ユーザーにより指定された画像が布からの反射光によって提示されるよう織パターンを求める. ただし、織パターンは局所的に繰り返しとなっているものと仮定する. また、糸の光学特性も事前に指定されているものとする. 以上の仮定の下、本研究で対象とする問題は以下の最小化問題として定式化できる(図1参照).

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{w}} \|I_c(\mathbf{x}, \mathbf{W}, \mathbf{q}, \mathbf{L}, \mathbf{v}) - I_u(\mathbf{x})\|$$

ここで、 $I_c$ は方向 $\mathbf{v}$ から見た時の点 $\mathbf{x}$ における布の輝度、 $I_u$ は

ユーザーに指定された目標画像を表す. 本研究では、 $I_c$ と $I_u$ はいずれも0から1の値となるよう正規化されているものとする.  $\mathbf{W}$ は布全体の織パターン、 $\mathbf{q}$ は糸の光学パラメータ、 $\mathbf{L}$ は環境光源、 $\mathbf{v}$ は視線方向である. 未知変数は $\mathbf{W}$ のみとし、それ以外は指定されるものとする.

本研究では、直交する縦糸と横糸によって織られた布を対象とする. 布全体の織パターンは各画素の値が0または1である高解像度の2値画像としてあらわすことができる. ただし、0は縦糸が上で横糸が下、1はその逆を表す. 提案法では、この全体のパターンを表す画像を $m \times m$ ピクセルからなるブロックに分割し、各ブロックの局所的な織パターンをテクスチャに格納する. すなわち、このテクスチャの各テクセルにはパターン番号が格納され、その値は0から $2^{m \times m} - 1$ の範囲の整数値となる. 本稿では、 $m = 4$ とする. この場合、 $2^{16} = 65,536$ パターンが存在するが、その中には、縦糸と横糸が交差しないパターンも存在する. それらの織パターンとして無効なものを除くと、22,874パターンが存在する. この有効なパターン数を $N_w$ とあらわすことにする. この $N$ 個の中から指定された画像を表示するために最適なパターンを選択する.

提案法では、輝度レベル $l$ に最も近い輝度となるパターン $\mathbf{w}$ を返すマッピング関数 $\mathbf{w} = T(l)$ を求める. ここで、 $\mathbf{w}$ は $m \times m$ の局所的な織パターンを表す. このマッピング関数は次式を最小化することによって求めることができる.

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{w}} \sum_{l=0}^{L-1} |I_l - I_c(\mathbf{w}_l)|$$

ここで、 $W = \{\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_{L-1}\}$ はすべての輝度レベル $L$ に対する織パターンの集合を表す.  $I_l$ は $l$ 番目の輝度レベルを表す.

上記の最小化問題は、全ての織パターンについて布をレンダリングし、最適な織パターンを探索することで解くことができる. しかし、この単純な方法では、視点を変更した際にノイズが生じることがある. 図2にその例を示す. 図2(a)は最適化結果を示しており、与えられた視点位置から見た場合は、非常によい結果が得られる. しかし、視点を少しでも変更すると、図2(b)のようにノイズが現れる.



図2 相違度による正則化の効果。(a)は最適化結果。(b)および(c)は視点を変更した結果。(b)は近傍のBRDFの相違度を考慮しなかった場合、(c)は考慮した場合。相違度を考慮することでノイズが除去できる。

この原因は隣接する輝度レベルにおいて、BRDF が不連続となっているためである。そこで、隣接する輝度レベルではBRDFが類似するような正則化項を追加した以下の問題を解く。

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{w}} \sum_{l=0}^{L-1} |I_l - I_c(\mathbf{w}_l)| + \lambda \sum_{(a,b) \in L_N} D(f_r(\mathbf{w}_a), f_r(\mathbf{w}_b))$$

ここで、 $f_r(\mathbf{w})$ は $\mathbf{w}$ から決まるBRDF、 $D$ はBRDFの相違度を表す関数、 $L_N = \{(l, l+1) | l \in 0, 1, \dots, L-2\}$ は隣り合う輝度レベルの集合である。 $\lambda$ は第1項目と第2項目を調整するための係数でユーザにより指定する。図2(c)は正則化項を追加した結果であり、ノイズが除去できていることが確認できる。

#### 4. 最小化問題の解法

前節で定義した最小化問題の解法について述べる。まず、与えられた照明条件と視線方向について、 $N_w$ 個のすべてのパターンの輝度 $I_c(\mathbf{w})$ を計算する。次に、すべてのパターンを $L$ 個のグループに分類する。各パターン $\mathbf{w}$ は輝度差 $|I_l - I_c(\mathbf{w})|$ が最小となるグループ $l$ に分類される。各グループ $l$ に分類された $k$ 番目のパターンを $\mathbf{w}_{kl}$  ( $k = 0, 1, \dots, n_l - 1$ )と表す ( $n_l$ はグループ $l$ のパターン数)。次に、図3に示すように、隣接するグループを接続したグラフを構築する。グラフの各ノードは織パターンを表し、隣接するグループのすべてのノードに接続されている。また、グラフの両端には仮想ノードAおよびBを設置する。これらは、それぞれ、輝度レベル0および $L-1$ に対応する。ノードを結ぶ各エッジには以下のように重みを設定する。仮想ノードを除くエッジには、以下の重みを与える。

$$\alpha_{(k,l),(k',l')} = \frac{|I_l - I_c(\mathbf{w}_{kl})| + |I_{l'} - I_c(\mathbf{w}_{k'l'})|}{2} + \lambda D(f_r(\mathbf{w}_{kl}), f_r(\mathbf{w}_{k'l'}))$$

次に、仮想ノードに接続されているエッジには以下の重みを付与する。

$$\alpha_{A,(k,0)} = \frac{|I_0 - I_c(\mathbf{w}_{k0})|}{2}$$

$$\alpha_{B,(k,L-1)} = \frac{|I_{L-1} - I_c(\mathbf{w}_{k,L-1})|}{2}$$

このグラフにおいて、仮想ノードAからBへの最短経路を

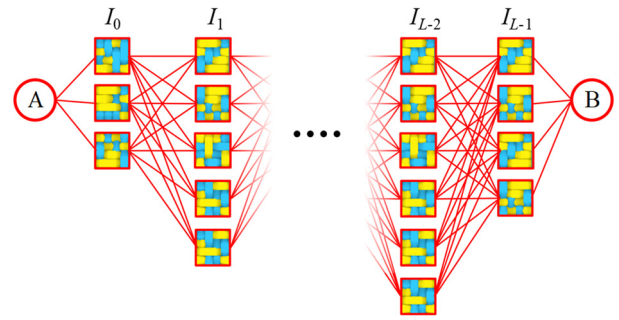


図3 最適な織パターンを決定するためのグラフ

求め、その経路上の各グループのノードに対応するパターンによってマッピング関数 $\mathbf{w}_l = T(I_l)$ が定義される。

以下、各パターンに対するBRDFの計算方法およびBRDFの相違度を表す関数 $D$ について説明する。

#### 4.1 BRDFの計算

BRDFはSadeghiのモデルを用いて計算する[4]。このモデルでは、糸は円柱状であると仮定し、糸の光学的特性と織パターンからBRDFを計算する。以下では、糸を表す円柱の半径は既知とする。

まず、織パターンから局所的な3次元構造を生成する。本研究では、図4に示す簡易的な方法によって生成する。図4(a)に示す0/1の織パターンは図4(b)のようなパターンと解釈できる。図4(c)は図4(b)の点線部の断面図を示す。図4(c)に示すように、糸が重ならないように糸の中心位置に円柱の半径分だけ上下にオフセットを加える。そして、図4(d)に示すように、糸の中心を結んだスプライン曲線を生成することで3次元構造を生成する。

生成した3次元構造からSadeghiのモデル[4]に従ってBRDFを計算する。このモデルではBRDFは縦糸と横糸のBRDFの平均値として与えられる。すなわち、布のBRDFは $f_r = a_1 f_r^1 + a_2 f_r^2$ と表される。ただし、 $a_1, a_2$ は、それぞれ、縦糸と横糸の割合、 $f_r^1, f_r^2$ は縦糸と横糸のBRDFを表す。 $f_r^1$ は次式によって表される ( $f_r^2$ も同様)。

$$f_r^1(\omega_i, \omega_o) = \frac{1}{QN} \sum_{t \in C_1} f_s(t, \omega_i, \omega_o) P(t, \omega_i, \omega_o) M(t, \omega_i, \omega_o)$$

ここで、 $t$ は糸の接線方向、 $C_1$ は糸上に生成したサンプル点での接線方向の集合、 $\omega_i$ および $\omega_o$ は光の入射および反射方向、 $Q$ は正規化因子、 $N$ はサンプル点数、 $f_s$ は糸の散乱関数、 $P$ は投影後の糸の長さを考慮するための補正関数、 $M$ はシャドウイングとマスキングのための関数である(詳細は文献[4]を参照)。BRDFを計算するために必要な接線方向は上述の方法で生成した3次元構造を表す円柱上にサンプル点を生成して計算する。

#### 4.2 BRDF間の相違度の計算

BRDF間の相違度を計算する最も単純な方法は、全ての入射方向と反射方向に対する反射率の差の平均値を求めることである。しかし、この場合、二つの4次元関数の差を数値積分によって計算しなければならず、極めて計算コスト

トが高い。本研究では、Sadeghi の BRDF モデル[4]を用いていることから、その特徴を利用してより効率的に相違度

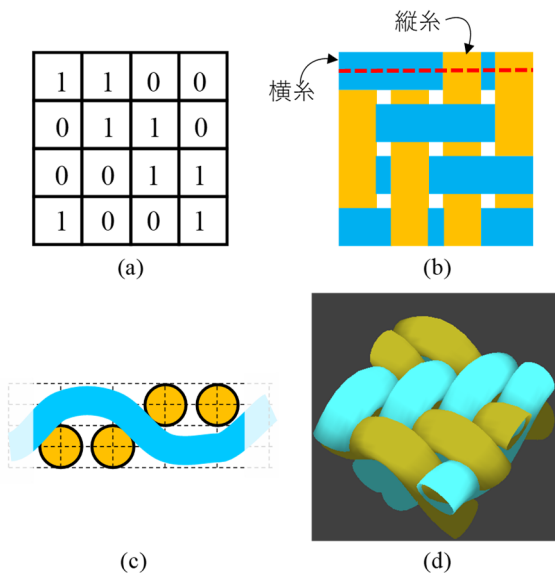


図4 織パターンからの3次元構造の生成

$D$ を計算する。

4.1 節で述べたように、布の BRDF は  $f_s, P, M$  などの関数によって表現されている。これらはいずれも接線方向  $t$  の関数となっている。また、接線方向について総和を求めていることから、接線方向のヒストグラムが異なれば BRDF は異なるものとなることがわかる。そこで、提案法では、各織パターンについて、接線方向のヒストグラムを求め、その差分によって相違度  $D$  を評価する。接線方向は布を表す平面からの仰角によって表し、各パターンについて、縦糸と横糸それぞれに対する二つのヒストグラムを計算する。ただし、ヒストグラムはすべてのビンについての総和が 1 となるよう正規化する。そして、この二つのヒストグラムの差分の平均値を用いて相違度  $D$  とする。この場合、 $D$  は 0 から 1 の範囲の値をとる。

## 5. 実験結果

提案法の実験結果を示す。計算には、Intel Core i7 4790K(CPU)および NVIDIA GeForce GTX TITAN X(GPU)を搭載したデスクトップ PC を用いた。計算時間は、数秒から数十秒の範囲であった。

図 5 は提案法によってレナ画像(図 5(a)) および Stanford Bunny の画像(図 5(b)) を表示するよう織パターンを設計した例である。目標画像と光源として用いた環境マップを図の左側に示している。真ん中の図は、BRDF の相違度に関する正規化を行っていない結果、右の図は正規化を行った結果である。相違度を考慮することによって、ノイズが除去されていることがわかる。

図 6 は最適化時とレンダリング時で異なる照明条件を用いた場合の例である。織パターンの計算は平行光源を用いて設計しており、図 6(a)はその結果を示している。図 6(b)

から(f)は同じ織パターンの布を環境照明の下でレンダリングした例である。照明条件が異なるにも関わらず、目標画像が提示されているのが確認できる。

図 7 は、提案法を用いてドラゴンの画像が表示されるような旗を設計した例である。表と裏とで異なるドラゴンの画像が表示される。ただし、表と裏では全く独立に織パターンを設計している。

最後に、図 8 は提案法をドレスのデザインに応用した例である。この場合は、矩形の布を用いて織パターンを決定し、その結果求めた織パターンのテクスチャをドレスの表面にマッピングすることでレンダリングした。

## 6. まとめと今後の課題

ユーザに指定された目標画像をレンダリングで再現可能な織パターンを逆算する方法を提案した。布表面の各点の輝度が局所的な織パターンで与えられることに着目し、各輝度レベルに織パターンを対応させるマッピング関数を計算することでこれを実現した。このマッピング関数の算出はグラフの最短経路探索問題として表現でき、効率的に求めることができる。また、CG アプリケーションとしての布の質感表現において、さまざまな見た目の布をデザインできることを示した。

今後の課題として、実際に制作可能な織パターンを設計できるよう手法を拡張することが挙げられる。提案法では、隣接する織パターンにおける糸の接続性は考慮していない。これを解決するためには、布全体に渡って一貫した織パターンを求めるアルゴリズムを開発する必要がある。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 JP15H05924 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] N. Adabala, N. Magnenet-Thalmann, G. Fei, "Real-time Rendering of Woven Cloth," Proc. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology 2003 (VRST'03), pp. 41-17 (2003).
- [2] N. Adabala, N. Magnenet-Thalmann, G. Fei, "Visualization of Woven Cloth," Proc. 14th Eurographics Workshop on Rendering (EGWR'03), pp. 178-185 (2003).
- [3] P. Irawan and S. Marschner, "Specular Reflection from Woven Cloth," ACM Trans. On Graphics, Vol. 31, No. 1, pp. 11:1-11:20 (2012).
- [4] I. Sadeghi, O. Bisker, J. de Deken, H. W. Jensen, "A Practical Microcylinder Appearance model for Cloth Rendering," ACM Trans. On Graphics, Vol. 32, No. 2, pp. 14:1-14:12 (2013).
- [5] Z. Velinov and M. B. Hullin, "An Interactive Appearance Model for Microscopic Fiber Surfaces," Proc. Vision, Modeling, and Visualization 2016 (2016).
- [6] F. Luan, S. Zhao, K. Bala, "Fiber-level on-the-fly Procedural Textiles," Computer Graphics Forum, Vol. 36, No. 4, pp. 123-135 (2017).
- [7] S. Zhao, W. Jakob, S. Marschner, K. Bala, "Building Volumetric Appearance Models of Fabric Using Micro CT Imaging," ACM Trans. On Graphics, Vol. 30, No. 4, pp. 44:1-44:10 (2011).
- [8] S. Zhao, W. Jakob, S. Marschner, K. Bala, "Structure-aware Synthesis for Predictive Woven Fabric Appearance," ACM Trans.



- On Graphics, Vol. 31, No. 4, pp. 75:1-75:10 (2012).
- [9] J. Zhang, B. Xin, X. Wu, "A Review of Fabric Identification based on Image Analysis Technology," Textiles and Light Industrial Science and Technology (TLIST), Vol. 2, No. 3, pp. 120-130 (2013).
- [10] R. Zhang and B. Xin, "A Review of Woven Fabric Pattern Recognition based on Image Processing Technology," Research Journal of Textile and Apparel, Vol. 20, No. 1, pp. 37-47 (2016).]
- [11] J. J. Lin, "A GA-based Search Approach to Creative Weave Structure Design," J. Inf. Sci. Eng., Vol. 24, No. 3, pp. 949-963 (2017).
- [12] S. Das, A. Ghosh, D. Banerjee, "Engineering Design of Woven Fabrics Using Non-traditional Optimization Methods: A Comparative Study," Fibers and Polymers, Vol. 14, No. 9, pp. 1562-1567 (2013).
- [13] J. M. Kaldor, D. L. James, S. Marschner, "Efficient Yarn-based Cloth with Adaptive Contact Linearization," ACM Trans. on Graphics, Vol. 29, No. 4, pp. 105:1-105:10 (2010).
- [14] G. Cirio, J. Lopez-Moreno, D. Miraut, M. A. Otaduy, "Yarn-level Simulation of Woven Cloth," ACM Trans. on Graphics, Vol. 33, No. 6, pp. 207:1-207:11 (2014).
- [15] C. Yuksel, J. M. Kaldor, D. L. James, S. Marschner, "Stitch Meshes for Modeling Knitted Clothing with Yarn-level Detail," ACM Trans. on Graphics, Vol. 31, No. 3, pp.37:1-37:12 (2012).
- [16] S. Zhao, F. Luan, K. Bala, "Fitting Procedural Yarn Models for Realistic Cloth Rendering," ACM Trans. on Graphics, Vol. 35, No. 4, pp. 51:1-51:11 (2016).

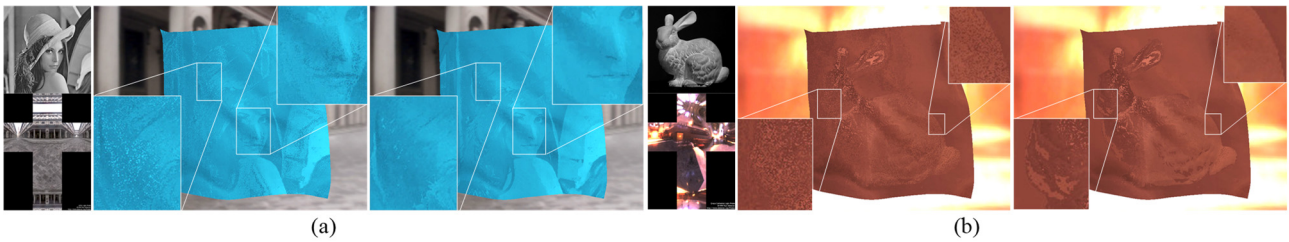


図5 提案法により織パターンを設計した例。

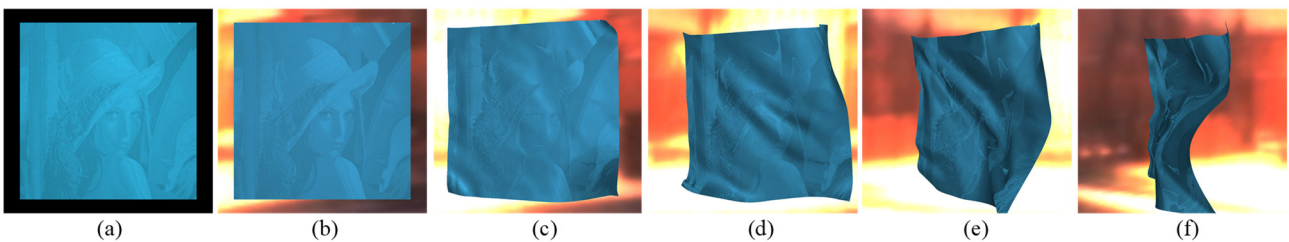


図6 照明条件を変更した例



図7 ドラゴンの旗の例



図8 ドレスのデザインへの応用例