

## 現実味のある布地表面の要素

櫻井快勢<sup>†</sup> 廣川慧吾<sup>†</sup>

写実的な CG の制作は高コストであり、低コスト化が制作の課題となっている。筆者らは写実的ではなく、人間が現実的だと感じることを重視し、現実味のある CG 制作で低コスト化を目指す。本報告では、身近にあり、AR アプリケーションの対象になりやすい織物の布地に注目し、現実味の要素を明らかにして、テクスチャ生成に応用する。まず、布地の質感を表現する専門家である写真家と DTP オペレーターに聞き取り調査を実施し、現実味の要素を絞る。この調査により、コントラストと表面のテクスチャ、ドレープが現実味に貢献すると仮定した。これを確かめるために、一対比較での知覚実験を行った。結果、テクスチャが現実味に寄与する要素であることが明らかになった。次に現実味を持つテクスチャの要素を探る。ぼかしをかけた織物テクスチャで恒常法による知覚実験を行い、texton の知見と組み合わせることで、動径基底関数状の要素と輪郭がぼけた長い要素が現実味の織物の要素であることが明らかになった。また、周期性が確認できたため、要素を周期的に配置することで、現実味のある織物テクスチャを生成できると仮定した。生成したテクスチャで知覚実験を実施し、現実味のある織物として知覚されることを示された。

## Exploring texture element of realistic cloth

Kaisei Sakurai<sup>†</sup> Keigo Hirokawa<sup>†</sup>

Creating photorealistic CG, which requires a high cost with long time, is an important problem. We assume that the workload for producing high quality CG will be reduced by considering human perception. For this, we attempt to use realistic CG considering human perceptions, instead of photorealistic CG. This report presents exploring elements of realistic woven cloth surface for revealing elements contribute the perceptions. First, we interviewed photographers and desktop publishers to know candidate elements. Next, a psychophysical experiment reveals texture the most contributing element from these candidate elements. In addition, we explore elements for realistic woven texture by a psychophysical experiment of textures. We define a radial basis function shape and an elongated blob as the elements because of knowledge of texton. We reveal periodically positioning represents woven textile textures from the psychophysical experiment. Finally, we demonstrate generated textures consisting of these elements periodically, and several generated textures are perceived realistic surfaces.

### 1. はじめに

研究機関だけではなく、産業においても CG を現実にも重ねる AR アプリケーションが活発に提案されている[1]。高品質な AR アプリケーションの提案のために写実的な CG は必須であると考えられており、多くの技術者が写実的な CG を求めている。しかしながら、写実的な CG の制作は以下の理由で難しく、アプリケーション開発の障壁になっている。まず、モデリングの期間が長期になりがちである。次に、物理法則に従ったアニメーション[2]や、グローバルイルミネーション[3, 4, 5]、双方向反射率分布関数[6, 7]、双方向テクスチャ関数[8, 7]のような光学特性をレンダリングに反映させる必要があり、高速に応答するシステム開発が困難である。また、物体の反射特性や光源環境の計測が必要であり[9]、技術の整備に多大な費用を要する。

筆者らは、この問題を再考し、高品質の CG を制作するために、現実味に注目する。現実味を与える要素にのみに制作の力を注ぐことで、短時間で高品質な CG 制作が可能になると予想する。これを実現するために、現実味を与える要素を明らかにする。本報告では、AR アプリケーションの対象になりやすい布に注目し、布に現実味を持たせる要素を探る。ここでは、頻繁に目にする織物を対象とする。

また、得られた要素を構成することで、自動的に織物のテクスチャを生成する手法を提案する。

### 2. 関連研究

これまで、石目や木目などの有機性に富む模様は、観察から得られた構成要素を手続き的に生成することで所望の模様を表現し、経験的に現実味を与えていた[2,10]。また、織物テクスチャの手続き的な生成手法も提案されている[11,12]。これらは、物理法則に従わないにも関わらず、現実味を感じるが必要な要素を特定しておらず、所望のテクスチャを得るために多くの試行錯誤や計算時間を必要とする。

一方で、人間の知覚が解明されており、物理的に不正確でも、物体の光学的性質を知覚することが発見され[13, 14, 15]、物理的な正確さが現実味の大きな要素でない可能性が示された。このような知覚研究において、布の質感に注目した研究がいくつかある。Asano らは、平らな布と湾曲したドレープある布の知覚実験を行い、光の当たった時にドレープを有する布の素材を知覚することを明らかにした[16]。この結果は、スペキュラが形状知覚に寄与する実験結果[17]の支持している。Anitawati と Nor Laila は、ウェブサイトでの衣類の質感知覚とウェブサイトから与えられる感性は相関することを示した[18]。石川らは、複数種類の布の物質的特徴と呈示画像から創発される視覚的記憶と

<sup>†</sup> 大日本印刷株式会社(株)  
Dai Nippon Printing Co., Ltd.

の関連を知覚実験により明らかにした[19]。この研究で、ドレープを有する布の画像は、素材を推定しやすいことを導いた。また、画像のヒストグラムの歪度[15]との関連も考察しており、布でも同様に歪度が質感知覚に寄与する結果を示した。しかしながら、以上の研究では、素材の特性を考慮しているが、現実味は考慮されておらず、CG制作に応用できない。

### 3. 織物の知覚

織物の現実味の要素は不明であり、手がかりを得るために、多くの布を観察している従事者に聞き取り調査を実施した。対象は、商業撮影の写真家4名とデスクトップパブリッシング(DTP)オペレーター2名に、出版時に注意する点を聞き取り調査した。彼らは月間2千枚程度の織物やニットでの衣類を2年以上撮影しており、布の観察経験は十分であると判断した。

調査により、3要素に注意を払っていることがわかった。まず、照明の数と位置、方向を変え、コントラストを調整する。次に、照明を調整し、表面の微細な凹凸を撮影しやすくする。最後に、衣類を意図的にピン止めし、ドレープを付与する。以上のことから、画像に現れる要素の候補を1)コントラスト、2)テクスチャ、3)ドレープとした。

まず、静止画で現実味に最も寄与する要素を抽出し、ARなどの動画に活用するために、同様の要素を動画にて確認する。

#### 3.1 静止画での実験

要素の有無の画像を作り、順位をつけることで、有効な要素を明らかにする。

##### 3.1.1 実験法

表1に示すような3つの要素の有無の組み合わせを作る。ただし、Cはコントラスト、Tはテクスチャ、Dはドレープを指し、コントラストは高低とした。これらの全ての組み合わせである図1に示す8種類の画像を制作した。再現性を考慮して、画像はCGで制作する。撮影では、意図的にピン止めをしたことから、CGでも手付のドレープ形状を与える。色味は、DTPオペレーターによってYMCKとHSV空間で調整されていた。色味を変えても現実の布地であるため、色の変化は、本質的ではないと考え、無彩色の画像を用いた。色を評価しないため、色の心理的物理量を考慮せずに、中間値法で求めたグレースケール画像で実験する。このとき、知覚の要素を絞るために、平均輝度値を127とする。用いるテクスチャは、接写した写真から輝度値のみ算出し、制作する。

候補の中で現実味に最も有効に貢献する要素を探すために、サーストンの一対比較法[20]を用いる。この手法を用いることで、対象刺激を現実味の軸で並べることができる。ただし、一つの画像は3つの要素を持つため、一回の投票につき、3要素の有無に加算される。たとえば、図1(a)

表1 刺激要素の値.

	C	T	D
(a)	高	有	有
(b)	高	有	なし
(c)	高	なし	有
(d)	高	なし	なし
(e)	低	有	有
(f)	低	有	なし
(g)	低	なし	有
(h)	低	なし	なし

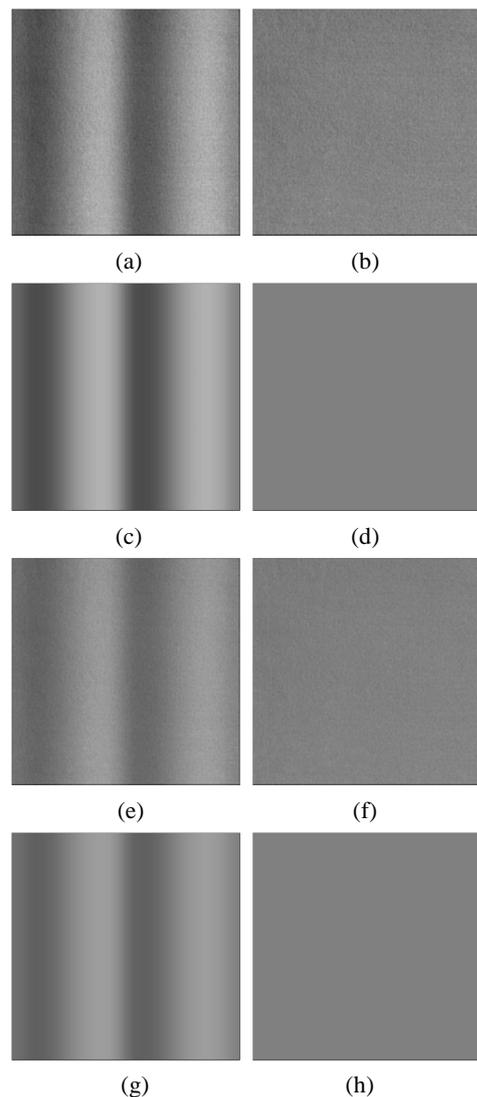


図1 呈示刺激

に投票された場合、高コントラスト、テクスチャあり、ドレープありに投票される。8画像での一対比較であるため、すべての組み合わせである28試行で実験する。選定の基準を本物の布に見えるほうを選定の基準としてもらった。刺激は3秒間呈示し、3秒間の黒背景の呈示を1枚の画像に対して行い、この間に選定させる。

### 3.1.2 結果

6名の被験者に対して、上記一対比較法で評価した。最も寄与する要素を知るために、予測値  $e$  である 0.5 と投票の平均値  $m$  の距離を評価する。平均値  $m$  と予測値  $e$  の差の最大  $d$  は 0.29 であり、 $d$  に対する差の割合を表 2 に示す。結果から、テクスチャの貢献が最大であることが明らかになった。

表 2 結果

項目	$m$	$ x-e $	$100 x-e /d[\%]$
C	0.512	0.012	4.16
T	0.768	0.268	93.75
D	0.506	0.006	2.08

### 3.2 動画での実験

本節では、テクスチャの重要性を動画にて確かめる。3.1 節の実験後の聞き取り調査にて、無彩色でも布と知覚できたことがわかった。このことから、織物は、明度のみ依存し、色相と彩度に依存しないといえる。そのため、HSV 色空間にて明度を保ち、色相を変えても、布と知覚すると考えられる。

#### 3.2.1 実験法

色相を変化させる機能とテクスチャを見えなくするためにぼかしとして移動平均フィルターをかける機能を持ち、それらを描画するインタラクティブな装置(図 2)で刺激を呈示した。テクスチャを視認できる程度の解像度を持たせるために、フル HD で描画できるディスプレイを用いた。動画の一部を抜き出した例を図 3 に示す。この動画に対して、(a)(b)、(a)(d)、(c)(d)、(c)(b)の一対ずつで最も布に見える動画を選択させた。ここでは、ぼかしていない動画どうしとぼかした動画どうしの比較は対象としない。

#### 3.2.2 結果

6名の被験者に対して、この実験を行った結果すべての被験者が、ぼかしていない動画を選択した。これから、動画でも、テクスチャが最も寄与することがわかった。ぼかした画像は、布ではなくやわらかいビニールシートでできているように見えるとの意見があり、テクスチャが織物の見た目に寄与していることを定性的にも示した。

## 4. 織物テクスチャの要素

以上の実験から、静止画と動画に関わらず、織物の現実味には、テクスチャが寄与することが明らかになった。次に、テクスチャの要素を探る。まず、実際の織物で解析を進める。3.2 節で先述した実験で、高周波数成分を減らすようなぼかしを使ったことで、織物に見えなくなった。そのため、低周波数成分しか残っていないぼかし画像では、現実味の要素はない判断できる。つまり、中から高周波域に現実味の要素があると予想できる。本章では、現実味の要素

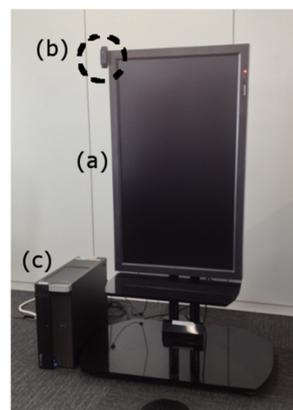


図 2 システム構成。(a)フル HD ディスプレイ、  
 (b) ウェブカメラ、(c) コンピュータ

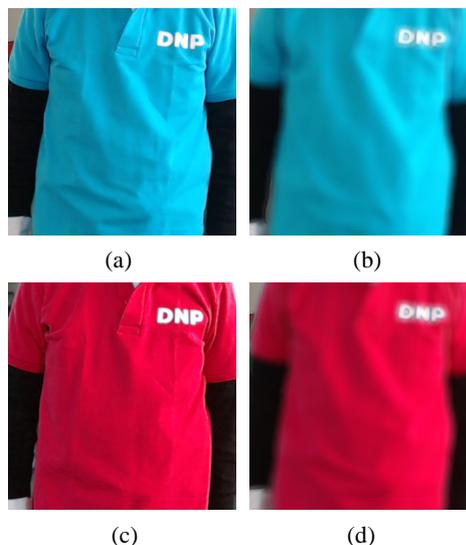


図 3 刺激例。(a) 入力、(b) ぼかし、  
 (c) 色相変化、(d)色相変化とぼかし

の周波数域を明らかにする。

これまで、*texton* と呼ばれるテクスチャの視認される要素の研究がされ、確率分布の違いと長い形状が *texton* であることが示され[21]、その後、フィルターにより機械的に抽出する手法が提案された[22]。本研究でも、*texton* を考慮してテクスチャを比較することで、現実味の要素を抽出できると予想する。ただし、フィルター[22]は、エッジなどを捉え、本目的と異なるため、使用しない。

3.2 節で静止画と動画でテクスチャが重要であることが明らかになったため、要素も同様と仮定し、本章では静止画のみを対象とする。

#### 4.1 実験法

実験は恒常法(Method of Constant stimuli)[23]を用いて絶対閾[23]を探る。恒常法は、被験者が予想できないようにランダムに刺激を呈示するため、結果の信頼性が高い手法である。本報告では、呈示回数を被験者 1 名につき 300 回とした。

ここでは2種類の実験を行う。刺激には、図4を加工した画像を用いる。これらは実際の織物からウェブサイトCG Texture (www.cgtextures.com) から無作為に選定し、中間値法でグレースケール化した。

(実験1) 10名の被験者で、図4の各画像に対して、移動平均フィルター窓を半径0,2,4,6,8ピクセルとしたぼかした画像を刺激とする。

(実験2) 画像の大きさと拡大の現実味への影響を確認するために、別の7名の被験者で、大きさを半分(256x256ピクセル)にクリッピングした画像Aとピクセル数を半分にした画像B(256x256ピクセル)を刺激とする。

#### 4.2 評価

窓の大きさと現実の織物と知覚した関係を図5と図6に示す。ただし、横軸( $u$ 軸)をぼかしの窓の大きさとし、縦軸を現実味のある織物と知覚した割合とする。結果から、窓が大きくなるにつれて、現実味が減衰することがわかる。予想どおり、低周波数域は現実味に寄与しないことが明らかになった。中から高周波数域に現実味の要素があることがいえる。

また、実験2では、画像Aを含めて、知覚実験を実施した。その結果、(a)が1.0、(b)が0.42、(c)が0.57となり、おおむね図1の $u=0$ と同等の値が示された。これから、呈示される画像の大きさが違っていても、知覚は変わらないことが示された。一部分でも知覚が変わらないことから、現実味の要素は、大域的な特徴ではないことがいえる。

実験1と実験2に共通して、(b)の $u=0$ が低く、 $u=2$ で高くなった。これから、 $u=0$ では存在せず、 $u=2$ に存在する要素があると考えられる。そのため、現実味の要素は、高周波数域にはないといえる。

また、実験2の(c)の $u=0$ 以外では、両者はおおむね似た傾向を示し、解像度が知覚に貢献するとは考えにくい。ただ、実験2の(c)の $u=0$ に存在し、実験1にはない要素が織物の知覚に貢献する可能性がある。ピクセル数を半分にしたことで、高周波数成分が減る可能性があるため、現実味の要素が高周波数域にないことを後押しする。

閾値に関して、すべての結果において、窓の大きさによる際立った違いは見られず、3ピクセル周辺が閾値である。このことから、3ピクセル以上のぼやけでは、現実味が減少するといえる。

図7に、ぼかしていない図4の画像をフーリエ変換した画像を示す。図7(b)では、高周波が見られるが、(a)と(b)では高周波がなく、周波数は中から低域に分布しているように見える。ぼかしていない図4(b)では、現実味が落ちていることから、ここでも、際立った高周波数成分が不要であることを示した。

また、フーリエ変換にて、ピークが視認できることから、周期性が強いことを示した。

以上のことから、現実味は、高周波数成分が際立たない

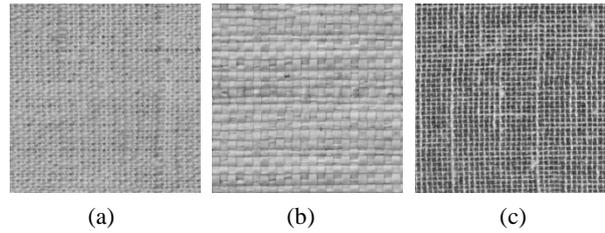


図4 刺激の元画像。

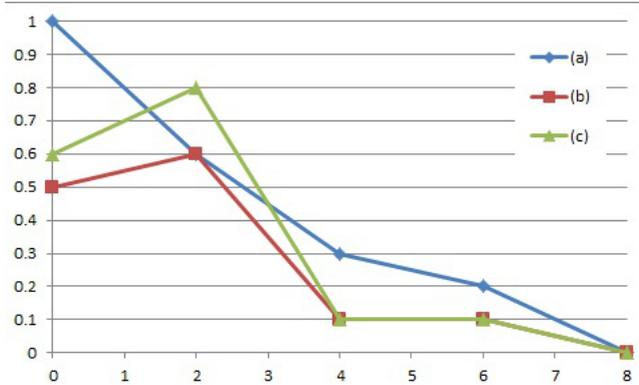


図5 実験1のぼかしと織物と知覚した割合。

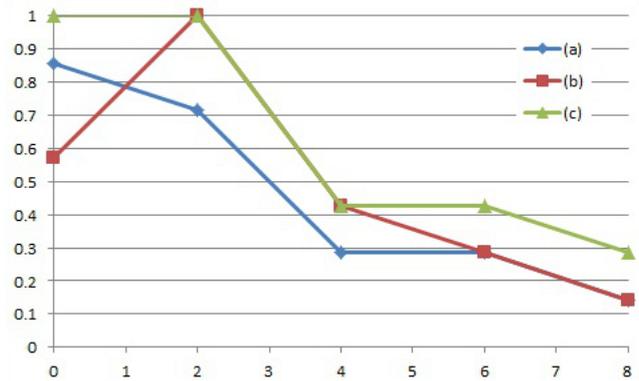


図6 実験2のぼかしと織物と知覚した割合。

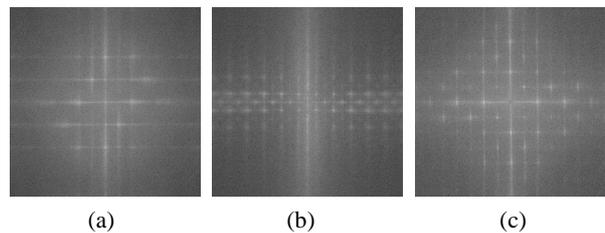


図7 刺激のフーリエ変換の例。

程度の小さな形状が、中域に分布されるような周期性を持った状態から得られるといえる。

#### 4.3 要素

Texton 研究[21]から、織物においても局所的な確率分布と長い形状が知覚に寄与することが考えられる。ただし、織物の糸などの構成物と、視覚的な要素は独立して定義できると仮定する。図7には、織物の基本構成である格子状

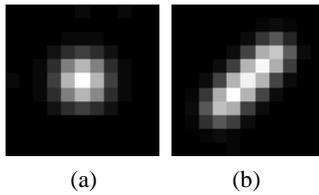


図 8 織物の要素 (11x11 ピクセル)

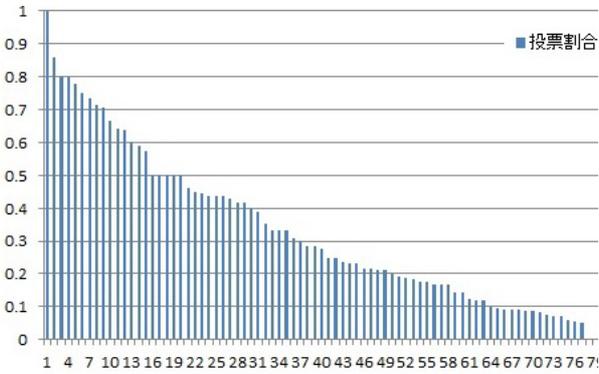


図 9 投票割合 (降順).

以外の周波数も示されているため、2 種類以上の要素があると考えられる。また、4.2 節の通り、高周波数成分が少なく、輪郭がぼやけた要素と考えられる。

これらから考えられる簡易的な現実味の要素を図 8 に示す。図 8(a)と(b)はそれぞれ、確率分布に影響するぼやけた要素と長い形状を持つぼやけた要素である。ぼやけは、動径基底関数を用いる。ここでは一般的な関数であるガウス関数を用いる。これまでの texton 研究では位相が議論されていないため、位相が無視できると考える。そのため、凸形状か凹形状のみで構成されたとしても現実味を持つと考える。凹形状は、画素値を負として扱うことで得る。

本稿では、このような形状の要素をブロッブと呼ぶ。

## 5. 織物の要素を考慮したテクスチャ表現

以上の実験により、図 8 に示したブロッブを周期的に配置することで現実味を持つ織物を生成できると予想する。

### 5.1 テクスチャ生成

本テクスチャ生成は、ブロッブを指定した  $x$  軸と  $y$  軸の間隔(以下  $dx, dy$ )で配置する。重なる画素値は加算する。整然すぎる配列を避けるために、配置にて 1 ピクセル程度の微量の揺らぎを加える。Intel Core i7 2.10GHz と RAM 8GB で構成された Windows 7 の環境で、512x512 ピクセルの画像を一枚当たり平均 21.4ms で生成した。

### 5.2 知覚実験

ブロッブの値は反転せずに、凸形状を配置する。配置の間隔  $xd, yd$  は 3,5,7 ピクセルとした。両ブロッブの組み合わせ 81 例を恒常法で呈示し、投票された結果を図 9 に示す。これらのテクスチャに対して、5 名の被験者で知覚実験を実施した。5 割以上投票された画像は 15 例であった。それらの間隔を表 3 に示す。図 10 に上位の 4 例を示す。上記

表 3 投票上位の間隔. ピクセル単位.

順位	図 8 (a)		図 8 (b)	
	$dx$	$dy$	$dx$	$dy$
1	3	5	7	5
2	3	5	7	3
3	3	7	7	3
4	5	3	5	7
5	3	3	7	7
6	7	7	3	7
7	3	3	7	5
8	3	3	5	7
9	7	7	7	3
10	3	3	7	3
11	3	7	7	5
12	5	3	3	7
13	7	3	3	7
14	7	3	5	5
15	5	5	5	7

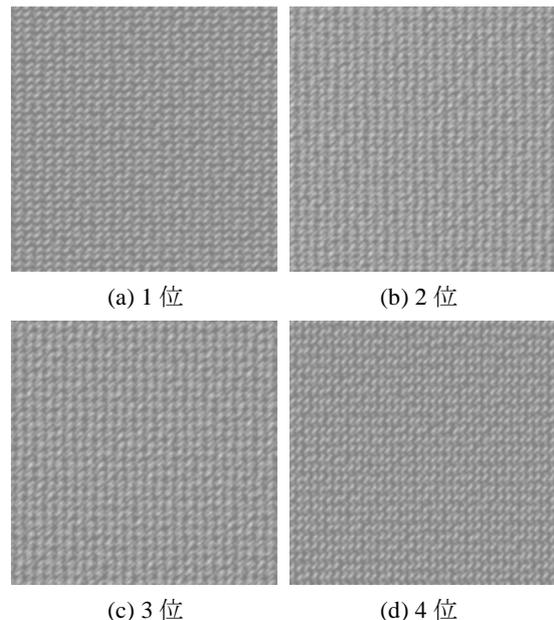


図 10 投票上位(1-4 位)の生成画像例.

の知覚実験から、ブロッブを周期的に配置することで、現実味を持つ織物を生成できたことを示された。現実味を持った間隔に、正方格子はなかった。加えて、同じ間隔で各ブロッブが配列されることはなかった。凸形状のみで構成した場合に、糸のような連続的な見目が好まれたためと考えられる。

また、凹形状を付与しないテクスチャでも、現実味を持つことが明らかになった。このことから、現実味には、texton の基本的な形状で十分であることがいえる。

一方、凹形状を配置することも可能である。図 8 (a)を凹

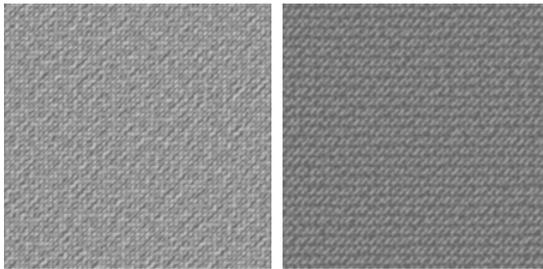


図 11 凹形状を含む生成例

形状として生成した例を図 11 に示す。ただし、このように反転した要素を用いてテクスチャを生成すると組み合わせが膨大になるため、知覚実験は実施していない。

## 6. 考察とまとめ

本報告では、現実味のある織物の要素であるブロップを明らかにし、それらを配置することで、実物と同等の現実味を有する織物テクスチャを生成した。ブロップは糸の構造を考慮しておらず、微細な繊維や糸の構造自体は知覚に寄与しないことがいえた。ただし、それらの構造から得られる視覚的特徴が、知覚に寄与する可能性は否定しない。

ブロップを周期的に配置することで織物を生成したが、現実味を持たない周期があることも明らかになった。今後、現実味のある周期が明らかになることで、より簡単に織物テクスチャを生成できると予想する。

現実味のある織物のブロップを示したが、角度や長さなどのパラメータを固定した。パラメータの異なるブロップを用いることで、多様性を表現できる可能性がある。今後、多様な表現のために、追求する。

本報告では、影などの物理的な特徴は考慮していないが、現実味を示せた。ただし、シーン内でのオブジェクトに反映させると結果が異なる可能性があるため、今後、それらを含めて実験する。

本報告で提案した織物テクスチャ生成は、CPU のみの実装でも高速であり、リアルタイムで編集できた。既存の織物テクスチャ生成[11,12]のような複雑なパラメータ調整が必要なく、ブロップと周期の定義のみで現実味を持たせることが可能であり、AR アプリケーションへ応用が期待できる。

生成した画像すべてに知覚実験を行うのは、量が多く、困難であった。そのため、要点を絞り実験したが、今後、予想の検証を行うために、凹形状の要素を含んだテクスチャでの知覚実験を行う。

## 参考文献

- 1) 進藤: 特集ビジネスを変えた AR, 日経コンピュータ, 第 833 号, pp. 54-61, (2013)
- 2) O. Deussen, D. S. Ebert, R. Fedkiw, F. K. Musgrave, P. Prusinkiewicz, D. Roble, J. Stam, and J. Tessendorf: The elements of nature: interactive and realistic techniques, SIGGRAPH '04 ACM SIGGRAPH 2004 Course Notes, 2004

- 3) H. W. Jensen: Global illumination using photon maps, Proceedings of the eurographics workshop on Rendering techniques '96, pp. 21-30, (1996)
- 4) P. H. Christensen, D. Lischinski, E. J. Stollnitz and D. H. Salesin: Clustering for glossy global illumination, ACM Transactions on Graphics, vol. 16, no. 1, pp. 3-33, (1997)
- 5) T. Nishita, I. Okamura and E. Nakamae: Shading models for point and linear sources, ACM Transactions on Graphics, vol. 4, no. 2, pp. 124-146, (1985)
- 6) Y. Dong, J. Wang, X. Tong, J. Snyder, Y. Lan, M. Ben-Ezra and B. Guo: Manifold bootstrapping for SVBRDF capture, ACM Transactions on Graphics, vol. 29, no. 4, (2010)
- 7) K. J. Dana, B. van Ginneken, S. K. Nayar and J. J. Koenderink: Reflectance and texture of real-world surfaces, ACM Transactions on Graphics, vol. 18, no. 1, pp. 1-34, (1999)
- 8) J. Filip and M. Haindl: Bidirectional Texture Function Modeling: A State of the Art Survey, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 31, no. 11, pp. 1921-1940, (2009)
- 9) Bimber O. and Raskar R.: Spatial augmented reality, Siggraph 2005 Course, (2005)
- 10) D. S. Ebert, F. K. Musgrave, D. Peachey, K. Perlin, S. Worley: Texturing and Modeling, Third Edition: A Procedural Approach (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics), ISBN-13: 978-1558608481, Morgan Kaufmann, (2002)
- 11) K. Sakurai and K. Matsufuji: A procedural modeling of woven textiles with fuzz, ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Posters, (2009)
- 12) N. Adabala and N. Manenat-Thalmann :A procedural thread texture model. journal of graphics, gpu, and game, tools 8, 3, 33-40, (2003)
- 13) I. Motoyoshi: Highlight-shading relationship as a cue for the perception of translucent and transparent materials, Journal of Vision, vol. 10, no. 9, pp. 1-11, (2010)
- 14) H. E. Adelson: On seeing stuff: The perception of materials by humans and machines, Proc. of the SPIE 4299: Human Vision and Electronic Imaging, pp. 1-12, (2001)
- 15) I. Motoyoshi, S. Nishida, L. Sharan and E. H. Adelson: Image statistics and the perception of surface qualities, Nature, vol. 447, pp. 206-209, (2007)
- 16) C. Asano, M. Murakami and T. Fujimoto: Assessment of visual impression of fabrics with curved surfaces, Proc. of International conference on Kansei engineering and emotion research 2010, (2010)
- 17) R. W. Fleming, A. Torralba and E. H. Adelson: Specular reflections and the perception of shape, Journal of Vision, vol. 10(9), no. 6, pp. 798-820, (2004)
- 18) M. L. Anitawati and M. N. Nor Laila: Kansei engineering: a study on perception of online clothing websites, Proc. of the 10th International Conference on Quality Management and Operation Development 2008, (2007)
- 19) 石川, 佐藤, 松本, 佐々木, 清水, 阿山: 布地画像と実物の質感認識に関する基礎的研究, 日本感性工学会論文誌, 第 10 巻, 第 4 号, pp. 497-504, (2011)
- 20) L. L. Thurstone: The Measurement of Psychological Value., Essays in Philosophy by Seventeen Doctors of Philosophy of the University of Chicago, Thomas Vernor Smith and William Kelley Wright (eds), Chicago, pp. 157-174, (1929)
- 21) B. Julesz: Textons, the elements of texture perception, and their interactions, Nature, Vol. 290, pp. 91-97, March (1981)
- 22) T. Leung and J. Malik: Representing and Recognizing the Visual Appearance of Materials using Three-dimensional Textons, International Journal of Computer Vision, Vol. 43, No. 1, June, (2001)
- 23) W. H. Ehrenstein and A. Ehrenstein: Psychophysical methods, Modern Techniques in Neuroscience Research, pp. 1211-1241, (1999)