拡張ディザ法を用いたジャカード織物パターンの生成

豊浦正広 [1)](正会員)　五十嵐哲也 [2)](非会員)　庄司麻由 [1)](非会員)　茅暁陽 [1)](正会員)

1) 山梨大学　2) 山梨県富士工業技術センター

Jacquard Fabric Pattern Generation with Extended Dithering

Masahiro Toyoura[1)] (Member)　**Tetsuya Igarashi**[2)] (Non Member)
Mayu Shoji[1)] (Non Member)　**Xiaoyang Mao**[1)] (Member)

1) University of Yamanashi
2) Yamanashi Prefectural Fuji Industrial Technology Center
mtoyoura @ yamanashi.ac.jp

概要
任意の画像をジャカード織物にするための新しい二値化技術を提案する．印刷などで用いる画像二値化のためには，ディザ法に代表される数多くの手法が提案されているが，いずれの手法も，一定範囲以内の間隔に経糸と緯糸を上下させる制約条件を持つジャカード織物のためには適用できなかった．この制約条件を満たさないパターンで織られた織物は，糸が長い距離を組織されずに露出することで，外力にさらされた糸の破損や切断を招くなど不都合を生じる．本研究では，ジャカード織物のための拡張ディザ法を提案する．さらに，従来のディザマスクによる二値化結果で見られるような過剰な規則性をなくす手法についても，併せて提案する．提案手法で生成された二値パターンから織り上げた複数の結果を検証することで，提案手法の有効性を示す．

1　はじめに

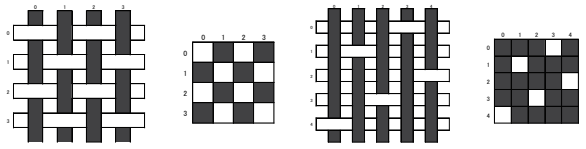
情報技術を取り入れた工芸はディジタルファブリケーションと呼ばれ，近年になって盛り上がりを見せている．国際会議SIGGRAPHでも2012年からファブリケーションのセッションが設けられている．織物は文明の初期から続く工芸として，また産業革命から近代までは経済を牽引する主要産業として，現代に受け継がれてきた．

ジャカード織物では，多数並列化された経糸 (たていと) に対して，緯糸 (よこいと) を任意に上下させて織ることで，複雑な模様を織り出すことができる．経糸と緯糸の上下関係は，パンチカードやプログラムによって，格子点ごとの上下関係による二値データとして定義することができ，これを表現した画像を組織図と呼ぶ．また組織図のうち，ジャカード織物で用いられる複雑で大規模な組織図は，ジャカード組織図と呼ばれ，単純で規則的なものとは区別されて扱われる．ジャカード組織図は，その制作過程の多くがコンピュータ化した現代においても，最終的には熟練職人の手作業でデザインされることがほとんどである．このため，完成されたジャカード組織図のひとつひとつは，それぞれの織物業者の意匠資産として大切に扱われている．これらのジャカード組織図はこれまでは設計者のスキルに頼って作られてきたが，写真やイラストなどのディジタル画像から新たなジャカード組織図を自動あるいは半自動で生成することができれば，状況や個人に応じた柔軟なジャカード組織図の生成が可能になる．そこで本研究では，ジャカード組織図の生成を画像処理技術により半自動化する手法を提案する．

2　ジャカード組織図の生成工程

図 1(a) に平織の構造図と組織図，図 1(b) に繻子織の構造図と組織図を示す．図中では黒色で経糸 (たていと)，白色で緯糸 (よこいと) を表現し，構造図中のそれぞれの格子点上の重なりが，実際の織物上で再現される．これらと綾織を含めた三つの織り方が三原組織と呼ばれ，織物を考える上で最も基本的な構造となる．一般的な織物の上では，これらの組織図がタイル状に敷き詰められることになる．どの織り方を選ぶかによって，できる織物の風合いが変わる．

それぞれの構造図をデザインするのに適した形で記述した画像が，図 1 の各右に示す組織図である．それぞれの小ブロックを明暗の二値で記述することで，対応する各格子点で経糸と緯糸のどちらが表に出るかを表現することができる．



(a) 平織　　(b) 繻子織 (5 枚繻子)

図 1: 平織および繻子織の構造図 (各左) と組織図 (各右)

経糸と緯糸が図のように二色の異なる色で染められている場合には，経糸と緯糸のどちらが表に表れるかで色の違いを表現することができる．図 1(b) では暗い色の経糸が多く表に表れるので，全体的に暗い色となる．

ここで注意されたいのが，経糸と緯糸のいずれもが一定間隔以内ごとに表に表れなければいけないという制約を受けていることである．たとえば，図 1(b) において緯糸が一定間隔で表に出ているが，これには経糸がほつれないように押さえる目的がある．逆に経糸をできるだけ裏に隠す場合においても，一定間隔で緯糸を裏にして経糸を押さえる必要がある．この制約を満たすパターンを生成することが，本研究で最も重要な点である．

ジャカード織物では，組織図を設計者が自由に定義することができる．上述の組織では，それぞれの小さなパターンをタイル状に敷き詰めて織るが，ジャカード織物では，数百本から数千本の経糸と緯糸から定義される格子点のそれぞれについて，経糸と緯糸のどちらを表に出すかを決めることができる．ただしこのときにも，経糸と緯糸のいずれもが一定間隔以内ごとに表に表れなければいけないという制約を通常は受ける．

図 2 は，デジタル画像からジャカード織物のパターンを生成する工程を示している．N 枚の繻子織のときには，まず，図に示すような $N-1$ 個の規定のパターンを定義する．それぞれの規定パターンは，縦横の各列・各行にある N 個の格子点のうち，1 個から $N-1$ 個の格子点で緯糸が上になるようなものである．N 個の格子点で 0 個，または，N 個の格子点で緯糸が上に来ると，経糸と緯糸が一度も交差しないことになり，織物パターンとして不適切なものになる．次に，入力パターンも明るさで $N-1$ 階調となるようにし，それぞれの明るさの領域に，対応する規定のパターンを割り当てることでパターンを生成する．単純にパターンを当てはめるだけでは図柄の境界付近ではみ出したり欠けたりするので，組織図を手作業で変更して完成する．

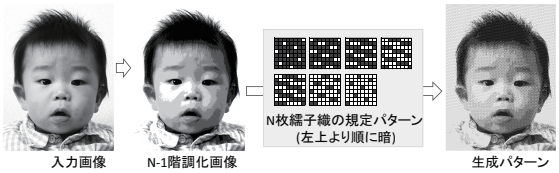


図 2: 従来の固定パターン割り当てによるパターン生成

しかしこの方法では領域ごとにしか明暗を表現できず，図に示すような簡単な画像しか表現できない．また，明るさも離散的にしか表現できないので，グラデーションを持つ図柄を表現するには，手作業でパターンを少しずつ変えながら敷き詰めていく必要があった．また，入力画像を $N-1$ 階調化することによって，特にグラデーションが現れる領域で，明るさの境界が目立つことがある．図 2 では，肌の領域で $N-1$ 階調化による境界が現れている．

3　従来研究

グレースケール画像を白と黒の二値で表現する方法として，従来から印刷などで用いられるハーフトーニングがある [1]．ハーフトーニングとは，一定領域内の白と黒の画素の面積の割合を利用して階調を表現する方法である．画素ごとにランダムな閾値を設定するランダムディザ法，ディザマスクとよばれる閾値のパターンを用いる組織的ディザ法，明るさの厳密な反映を目指す誤差伝播法などがある．

図 3 に組織的ディザ法の適用例を示す．図 3(a) に示すディザマスクを用いて図 3(b) と図 3(d) に示す入力画

像に対して閾値処理を行うと，図 3(c) と図 3(e) の二値パターンが得られる．入力画像の画素と，対応するディザマスクの画素を比較して，入力画像の画素値が大きければ白，小さければ黒を割り当てる．入力画像全体が明るければ，生成パターンに現れる白の画素は確率的に増える．またディザマスクは近い閾値がなるべく遠い位置にあるように設計されているため，図 3(b) のような輝度が一様な画像の場合，図 3(c) のような白と黒の画素が交互に現れるような二値パターンが生成される．しかし，図 3(d) のような輝度の変化がある一般的な画像に関しては，図 3(e) に示すような局所的に白と黒のかたまりがある 2 値パターンが生成されてしまう．組織的ディザ法はこのようなかたまりを極力減らすために開発された技術であり，その他の既存ディザ法ではこの問題がより顕著である．既存のディザ法では，織物における経糸と緯糸のいずれもが一定間隔以内ごとに表に表れなければいけないという制約は考慮されておらず，そのまま用いることはできない．

16	144	48	176
208	80	240	112
64	192	32	160
255	128	224	96

(a) ディザマスク

128	128	128	128
128	128	128	128
128	128	128	128
128	128	128	128

(b) 画像例 1

255	0	255	0
0	255	0	255
255	0	255	0
0	255	0	255

(c) 生成例 1

10	35	40	175
35	70	200	110
70	200	110	170
175	110	110	90

(d) 画像例 2

0	0	0	0
0	0	0	0
255	255	255	255
0	0	0	0

(e) 生成例 2

図 3: 画像へのディザマスクの適用

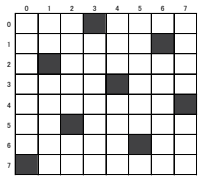
一方，竹編みによって 4 値までの画像の表現を試みた研究がある [2, 3]．竹編みでも織物と同様に一定間隔以内ごとに縦・横の竹材の交差が必要となり，繰り返し計算によってこの制約を満たすパターンを生成している．織物は竹編みよりも一般に縦・横の格子点のサイズが大きく，織物の方が細かな図柄の表現が可能である．本研究では，ディザ法の考え方を応用することで，これまでに竹編みで提案されてきたパターンよりも，より細かく，より階調の多いパターンの生成を実現する．

4 ジャカード織物のためのディザ法

4.1 ジャカード織物用ディザマスクの生成

従来の繻子織に対して，3. で述べた組織的ディザ法 [1] の考え方を導入して，ジャカード組織図を生成する手法を提案する．

提案手法の説明のために，まず繻子織の構造について詳細に見ていく．図 4(a) は 8 枚繻子織の一例を示す．縦に行番号 i，横に列番号 j を振ると，i 行 j 列の要素は，式 (1) を満たすときに黒で表され，これを満たさないときに白で表される．



(a) 8 枚繻子織組織図

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	235	130	55	0	25	100	165	255
1	85	185	255	215	150	50	0	35
2	70	0	15	105	195	255	210	160
3	255	230	140	80	0	10	115	175
4	30	95	170	255	240	125	60	0
5	145	45	0	40	90	190	255	220
6	200	255	205	155	65	0	20	110
7	0	5	120	180	255	225	135	75

(b) 織物ディザマスクとしての 8×8 閾値マトリクス

図 4: 繻子織組織図と対応する織物ディザマスク

$$\text{黒} : (5 \cdot i + j) \ mod \ 8 = 3 \tag{1}$$

この条件は，8×8 のパターンだけでなく，これをタイル状に敷き詰めた画像においても，満たされる．これをさらに一般化して，n 枚繻子織のパターンでは，n より小さく，かつ，n と互いに素な m を用いて，以下の条件を満たすときに黒を割り当てることができる．

$$\text{黒} : (m \cdot i + j) \ mod \ n = \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor \tag{2}$$

ただし，$\lfloor x \rfloor$ は x を超えない最大の整数を表す．n と m が互いに素でなければ，黒が現れない列が生じ，織物パターンとして不適切なものとなる．同様にして，一定間隔以内に白の要素も現れる必要があるので，式 (3) を白である条件として与える．

$$\text{白} : (m \cdot i + j) \ mod \ n = n - 1 \tag{3}$$

式 (2) および式 (3) を満たさないような白黒以外の要素には，組織的ディザの考え方を導入して，適当な閾値を設定する．ただしこのとき，繻子織ではできるだけ生地の表裏を糸が行き来する回数を少なくすることでなめらかな質感を表現するので，これを保存するために，式 (4) および式 (5) を制約として与える．

右隣より大きい要素：

$$0 \leq (m \cdot i + j) \ mod \ n \leq \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor - 1 \quad (4)$$

右隣より小さい要素：

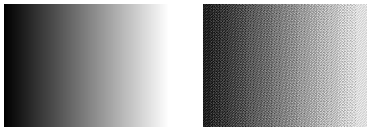
$$\left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor + 1 \leq (m \cdot i + j) \ mod \ n \leq n - 2 \quad (5)$$

式 (2) から式 (5) を満たすパターンの例が図 4 に示す閾値マトリクスである [1].

ただしこのとき，入力画像に 0 や 255 の値があると，二値化パターンに 0 や 1 が現れず，式 (2) や式 (3) を満たさないパターンが生成されることがある．入力画像の値を 1 から 254 に制約するために，0 と 255 の値を持つ画素をそれぞれ 1 と 254 に変更するものとする．これにより，入力画像の見た目をほとんど変化させることなく，提案するディザパターンが織物として有効な二値化パターンを生成できるようにできる．

4.2 過剰な規則性の削減

図 4 の閾値マトリクスによって二値化されたパターンでは，入力画像が単調であるときに問題が起こることがある．図 5 はグラデーションパターンを入力としたときの生成パターンである．閾値マトリクスが規則的に繰り返して配置されているために，ある一定の輝度を持つ範囲において，縦横で白または黒の出現の繰り返しが目立つようになる．繰り返しのパターンは人工的な感じを与えるために，織物パターンとしては不適切である場合がある．



(a) 入力画像　(b) 生成組織図

図 5: グラデーションパターンに対する二値化結果

この問題に対して，白・黒以外の各画素に平均 0，分散 σ^2 のガウス分布 $G(0, \sigma^2)$ に従うランダムな値 v を付加することで解決する．

$$v = \alpha \ G(0, \sigma^2) \quad (6)$$

[1] 山梨県による発明「ジャカード織物の製造方法（特許第 2013-5311092 号）」として特許登録されている．

ただし，α は全体のノイズレベルを上下する定数係数である．また，以降の実験結果は $\sigma = 1.0$ として生成した．ランダムな値を与えた結果，輝度値が式 (4) および式 (5) の規則に従わなければ，左右の画素値を入れ替える．$\left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor$ 回以内の画素値の入れ替えによって，式 (4) および式 (5) の規則に従うパターンを得ることができる．

4.3 エッジ強度に応じた規則性の自動調整

式 (6) によってノイズを加えた閾値マトリクスで二値化した画像を図 4(a) に示す．グラデーションパターンに対して周期的な白・黒の画素が表れることは避けることができているが，エッジ付近で白黒の順序が崩れることによって，エッジがぼやけたようなパターンが生成されてしまう．

我々は，入力画像のエッジ画像をまず求め，エッジ強度に適応してノイズレベルを自動的に調整し，エッジ強度が大きい領域では閾値マトリクスに与えるノイズレベルを下げることで，この問題を解決する．

入力画像のノイズに対して頑健にエッジを抽出するために，前処理としてガウシアンフィルタによる平滑化を行う．エッジ画像生成には，ラプラシアンフィルタを用いた．エッジ画像に基づいてノイズレベルを調整することで，エッジの上の画素についてはノイズレベルが調整されるが，そのすぐ隣に位置する画素に大きなノイズが与えられることがあり，この場合には隣接画素の白黒の順序が崩れてしまう．これを解決するために，エッジとその周辺で大きな値を持つエッジ膨張画像を生成し，これに基づいてノイズレベルを調整することとする．

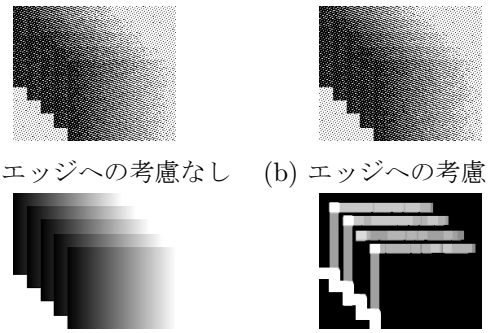
ラプラシアンフィルタによって得られるエッジ画像 $E(x, y)$ に対して，エッジ膨張画像 $E_e(x, y)$ を以下の式により求める．

$$E_e(x, y) = \max_{(s,t) \in N(x,y)} E(s, t) \quad (7)$$

ただし，$N(x, y)$ は画素 (x, y) の近傍画素の集合を表す．以降の実験結果は，L^∞ ノルムが 7 までである画素を近傍画素として処理を行った．さらに，ある一定以上の強度を持ったエッジのみを考慮するために，閾値 th_e を設定してエッジ膨張画像の小さな値を持つ画素を 0 にする．

$$E'_e(x, y) = \begin{cases} E_e(x, y) & (E_e(x, y) \geq th_e) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (8)$$

図 6(c) に入力画像，図 6(d) に対応するエッジ膨張画像，図 6(b) にエッジ強度によって与えるノイズレベルを調整した結果を示す．図 6(b) に示す結果では，本原稿の図の解像度に限界があるために一瞥して判断できる程度ではないものの，エッジがやや明確になっている．



(a) エッジへの考慮なし　(b) エッジへの考慮あり

(c) 入力画像　(d) エッジ膨張画像

図 6: エッジ強度に応じた規則性の調整結果

正規化されたエッジ強度を $p\ (0 \leq p \leq 1) = \frac{E'_e(x,y)}{255}$，減衰係数 β として，新たなガウスノイズを定義する分散 σ' を式 (9) によって定義する．

$$\sigma' = \sigma\ exp(-\beta p) \tag{9}$$

4.4　対話的織物組織パターン生成システム

上述のパラメタ α，β，th_e を対話的に変更して，織物組織パターンを生成するシステムを実装した．図 7 にシステムの処理の流れを示す．システムでは，まず，入力画像中の 0 を 1 に，255 を 254 に変更する階調補正を行う．次に，新しく提案した織物用ディザパターンを適用することで，二値化を行う．さらに，どの程度のノイズパターンを加えるか，どの程度境界を保持するか，どの程度の強度の境界まで保持するかについて，α，β，th_e の 3 つのパラメタによって制御し，生成パターンを見ながら対話的に調整ができるようにした．

5　実験

織物作成には，電子ジャカード付レピア織機 (ツダコマ FLEX ／ストーブリ CX960 ELJ-W SERIES) を用いた．織物作成に用いた経糸・緯糸の番手比率と組織パターンから導かれる適切な製織条件では，緯糸密度が経糸密度に比較して 0.76 倍となるために，あらかじめ入力画像を縦に 0.76 倍したのちに，上述の方法で織物組織パターンを生成した．図として記載している組織パターン画像はいずれも生成パターンを横に 0.76 倍したものであり，各画素が縦長の長方形となっていることに注意されたい．

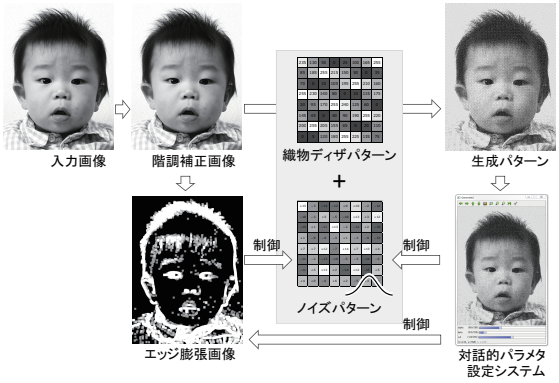


図 7: 提案する対話的パラメタ設定による織物ディザパターン適用によるパターン生成

5.1　織物パターン作成結果

図 8 および図 9 に提案手法によって製作した織物を示す．図 8(e) の幾何模様の入力画像に対して，従来の $N-1$ 階調化によって固定パターンを割り当てる方法では，図 8(a) に示すような入力画像にはない境界が存在するパターンが生成される．提案する織物ディザマスクによって得られた生成パターンが図 8(b) であり，余分な境界がなく，なめらかな明るさ変化が表現できている．図 8(b) のパターンでは，グラデーション領域の中で過剰に規則的なドットの並びが見て取れるが，ランダムなノイズを加える α の値を調整することで，図 8(c) に示すような過剰な規則性がないようなパターンが得られる．一方で，ランダムなノイズを加えたことで入力画像のエッジ境界がぼやける問題が起こる．エッジ膨張画像に基づいてエッジを保存する効果を施すことで，図 8(d) に示す最終的なパターンを得る．図 8(f)，(g)，(h) に示す織物として製作した結果からも，過剰な規則性の削減と入力画像のエッジの保存の傾向が確かめられた．

図 9(a) の入力画像に対しても，従来の $N-1$ 階調化によって固定パターンを割り当てる方法では，図 9(b) に示すような肌の一部で明るさ境界が強調されてしまうパターンが生成される．提案する織物ディザマスクによって得られた生成パターンが図 9(c) であり，肌の明

るさ境界がなく，なめらかな明るさ変化が表現できている．図 9(c) のパターンでは，背景の壁の領域で規則的なドットの並びが見て取れるが，ランダムなノイズを加える α の値を調整することで，図 9(d) に示すような過剰な規則性がないようなパターンが得られる．ランダムなノイズを加えたことでエッジ境界がぼやける問題が起こるが，図 9(e) に示すエッジ膨張画像に基づいてエッジを保存する効果を施すことで，図 9(f) に示す最終的なパターンを得る．図 9(g)，(h)，(i) には，図 9(b)，(c)，(f) に示すパターンを実際に織物とした結果を示すが，従来の 7 階調化により生成されるパターンによる結果や，織物ディザマスクを適用しただけの結果と比較して，パラメタを適切に設定したパターンで作成した結果では，平坦な部分での輝度が過剰な規則性なく表現され，また，エッジがやや保存された結果となっていることが見て取れる．

5.2　写真画像への適用結果と鑑賞者の反応

写真家高橋恭司氏による写真作品をグレースケール画像にしたものを本研究で提案した手法によりジャカード組織図に変換し，織物製造業の槙田商店株式会社が製織したものが，高橋恭司氏の作品としてギャラリー TRAUMARIS で行われた展示「自由について 3」(2013 年 9 月 10 日 (火) から 10 月 6 日 (日)）において展示された．その作品を図 10 に示す．高橋恭司氏は写真表現の媒体として印画紙以外にレーザープリントやモノクロコピーを用いるなど様々なテクスチャの魅力を追及しており，今回の織物による表現はその一環として行われた．高橋氏からは，プリント生地と違った深みがあり可能性を感じる，また経糸と緯糸のスクエアな組み合わせでありながら柔らかな表現ができていることが面白い，とのコメントを受けた．ギャラリーの鑑賞者へのヒアリングからは，織物で作られたということを聞いてもなお信じられないくらいに写実的で，またプリントとも違う深みが感じられる，など好ましい反応が得られた．

6　おわりに

本研究では，ジャカード織物のための拡張ディザ法を提案した．一定範囲以内の間隔に経糸と緯糸を上下させる制約条件を保ちながら，エッジ強度に適応して規則性を制御できるシステムを作成した．今後の課題として，繻子織以外でも閾値マトリクスが作成できるようにし，画像に合わせた織り方のパターンを選択できるようにすることを挙げる．また，より細かな修正をあとから手作業で加えるようにできる方法の開発も進める．

図 10: 写真展における織物の作品例

本研究の提案手法は，白黒の 2 色だけでなく，たとえば，青赤の 2 色のジャカード織にも適用可能である．さらにカラー画像を色分解した複数のチャンネルに本手法を活用して二値化し，それぞれのチャンネルを対応させた緯糸を交互に織り込むなどの手法で，異なる色相を織物上で混色させることも可能だが，複数チャンネル用いるとそれぞれの織物密度が低下し解像度に影響が生じるなどの課題があり，拡張手法の提案が望まれる．今後の課題として，多色のジャカード織への適用も試みたい．

謝辞

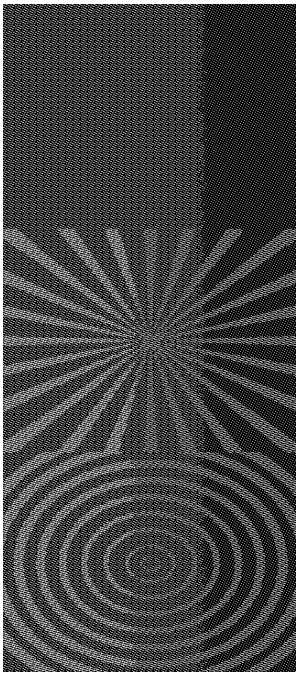
研究の一部は，科学研究費補助金基盤研究 (B)（課題番号:25280037）の補助を受けた．写真家高橋恭司氏および槙田商店株式会社からは，写真展資料の提供を受けた．

参考文献

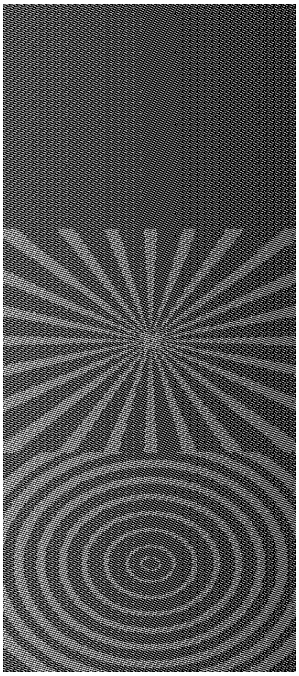
[1] R. Ulichney, “A Review of Halftoning Techniques,” Proc. SPIE, Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy, and Graphic Arts V, vol.3963, pp.378-391, 2000.

[2] 松島ら，“直交線ディザによる竹編み風画像の生成”，画像電子学会誌，vol.38, no.1, pp.24-30, 2009.

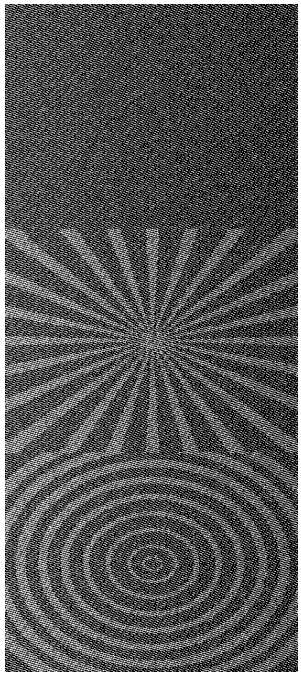
[3] 王ら，“リバーシブル竹編み画像の生成”，映像情報メディア学会誌，vol.63, no.9, pp.1252-4, 2009.



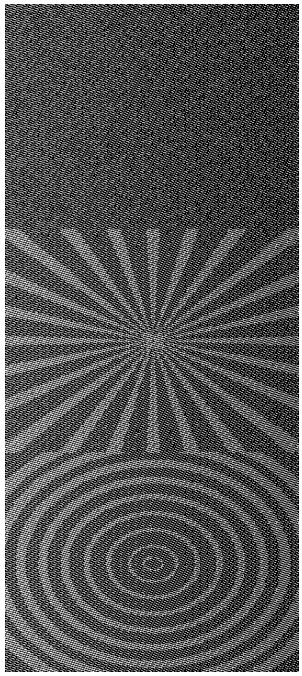
(a) 生成パターン (7 階調化)



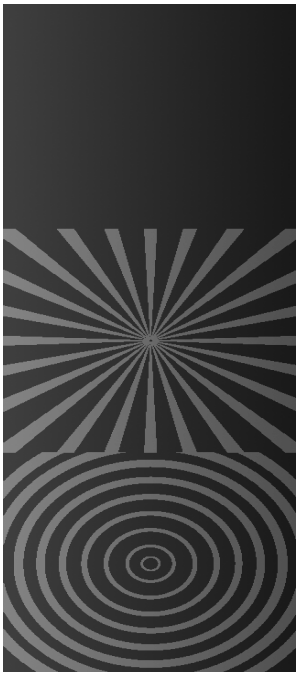
(b) 生成パターン (ノイズ付加なし)



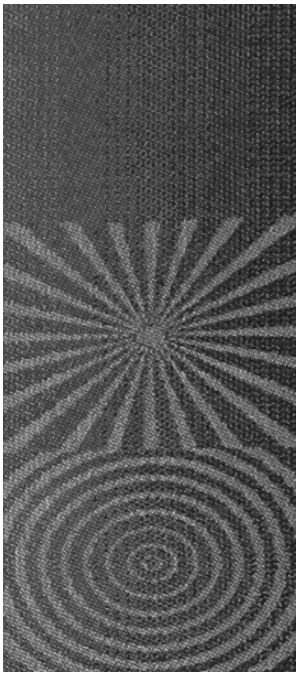
(c) 生成パターン ($\alpha = 12.0$)



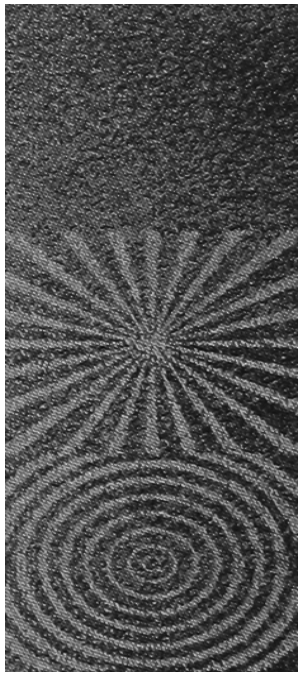
(d) 生成パターン ($\alpha = 12.0$, $\beta = 2.0$)



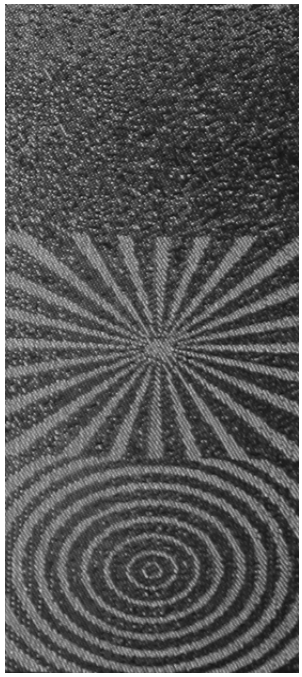
(e) 入力画像



(f) 製作結果 (ノイズ付加なし)



(g) 製作結果 ($\alpha = 12.0$)



(h) 製作結果 ($\alpha = 12.0$, $\beta = 2.0$)

図 8: 織物製作結果 (幾何模様)

(a) 入力画像

(b) 7 階調化画像

(c) 生成結果 (ノイズ付加なし)

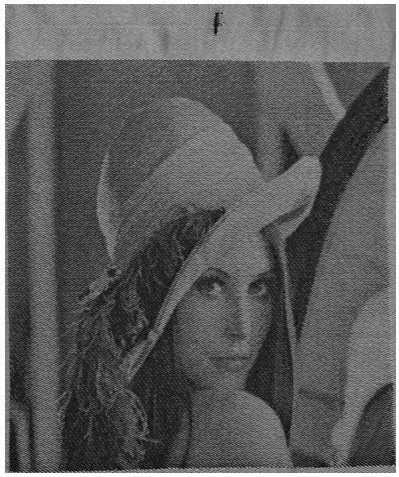
(d) 生成結果 ($\alpha = 8.0$)

(e) エッジ膨張画像

(f) 生成結果 ($\alpha = 8.0, \beta = 2.0$)

(g) 7 階調化画像

(h) 製作結果 (ノイズ付加なし)



(i) 製作結果 ($\alpha = 8.0, \beta = 2.0$)

図 9: 織物製作結果 (Lenna)