IIEEJ 講座

織物製造及び設計における画像処理の役割について

五十嵐哲也† 豊浦正広†† (正会員) 茅暁陽†† (正会員)

†山梨県産業技術センター，††山梨大学

Role of Image Processing for Textile Production and Design

Tetsuya IGARASHI†, Masahiro TOYOURA†† (*Member*), Xiaoyang MAO†† (*Member*)

†Yamanashi Industrial Technology Center, ††University of Yamanashi

1. 緒言

糸から形成される平面状の構造物には大別して編物，織物，不織布（フェルト）があり，それぞれ有史以前からの歴史を持つ．なかでも織物は世界の多くの文化で受け継がれる主要な技術であり，日本でも縄文時代には織物が製造されていたとされる [1]．織物製造に関する科学はその発展過程において，染色化学，生物学，農学，工学など様々な学術分野にまたがり，織物は人類の科学技術とともに発展してきたといえる．

情報科学と織物との関わりについては，経（たて）糸を複雑に操作して柄を現出するジャカード織機の誕生に遡る．いまあるジャカード織物のルーツは，紀元前後の中国で生まれた花機または提花機（日本では空引機）[2]が存在していたが，数百本以上の経糸一本ずつを同時に制御する本格的なジャカード織機はフランスの J.M.ジャカールによって 1801 年に実用化された．ジャカールはそれまで人の手で行っていた経糸の制御を,パンチカードの読み取り機構によって自動化した．いわゆるジャカード織機の誕生は，媒体に記録された情報を読み取って機械を制御した人類初の事例と考えられる．このパンチカードによる情報処理を応用して C.バベッジはプログラム可能な計算機を世界で初めて考案した. 1887 年には H.ホレリスがパンチカードシステムを実用化し，それ以降，コンピュータ以前での情報処理の主流となった．

現在のジャカード機構は，電子制御により 1 万本以上の経糸を操作し，コンピュータ以前には不可能だった巨大な意匠を実現することができる．しかし現在でもいまだパンチカード式の織機を使用している工場は少なくない．

2. 織物製造及び設計について

2.1 紋データによる織物製造と設計画像処理による織物設計

織物製造に必要な情報を記録するうえで紋紙（日本での織物用パンチカードの呼称）という媒体が有効なのは，織物構造が経糸と緯（よこ）糸の交差における上下関係という，二値情報を最小基本単位としていることに由来する．経糸を上下だけでなく左右にも動かす紗織りのような特殊な例を除けば，織物の構造は二値情報で表すことが可能である．**図 1** に示すように，織物組織図では経糸が上の交差は「■」で，紋紙上では穴をあけることで示され，緯糸が上の交差は「□」

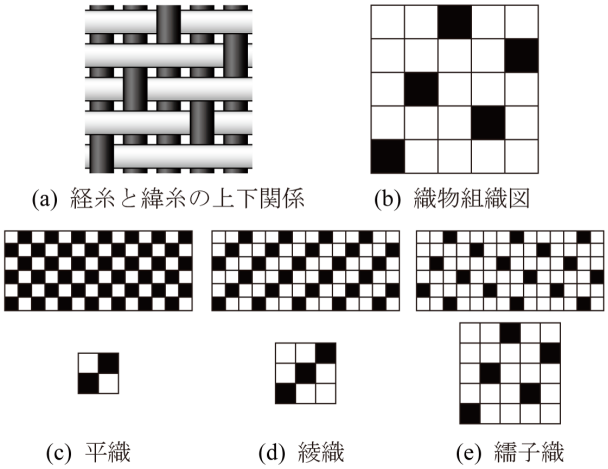


図 1 織物組織図と三原組織

Fig.1 Weave diagrams of the three basic weave patterns

で，紋紙上では穴を開けないことで示される．なお，実際には紋紙上には経糸の上下を制御する組織図だけでなく，織機の緯糸選択機構に用いる杼（ひ）替え情報，生地の巻き取りを停止させる信号など織機を制御する他の情報も記録される．

2.2　織物組織と制約画像処理による織物設計

経糸と緯糸の上下関係を示す織物組織図における「■・□」の配置パターンの違いにより，織物組織は平織・綾織（斜文織）・繻子織（朱子織）という三原組織に大別される．これらは経糸及び緯糸の本数に対応して概ね数～十数マス四方程度のマトリクスで表される「完全組織」を最小単位とし，それらを経・緯方向にタイリングして織ることで，織物組織は糸の立体構造に変換される．

織物組織をもとに形成される生地の堅ろう性や美的な外観を保持するために，織物組織には次のような条件が求められる．

(1) 交差が起こらない個所が経糸・緯糸方向ともに一定の長さ以上続かないこと．

(2) 交差の間隔の長短の差が経糸・緯糸方向ともに一定の範囲内であること．

これらの中で(1)が守られない場合には糸の浮きが長すぎることから，糸が外力によって損傷したり引っ張り出されたりなどの弊害が起こり，(2)ではノイズ状の外観をもたらすことになる．ここでは，これらを織物制約と呼ぶ．

2.3　画像処理による織物設計

ジャカード織物では，表現しようとする図案を領域分割し，領域毎に異なる織物組織をタイリングすることで織物上に柄を現出する．ジャカード織物の設計においては図案中の領域数，使用する糸の素材，番手，密度など製織条件を勘案しながら，織物制約のもとで適切な織物組織を選択することが求められるため，設計者には，複雑な作業と高度な技術が要求される．この設計プロセスにおいて,図案と織物組織を関連付け，二値データに変換する作業を紋処理と呼ぶ．ここで行われる画像処理は，大別するとまずデザイン画などの画像を減色して領域分割することと，織物組織のタイリングを意匠図と呼ばれる表記法を用いて編集することの二つからなる．前段の処理は汎用グラフィックアプリケーションが用いられることも多いが，後段の紋処理は専用のデザインシステムを用いて行われている．紋処理はコンピュータ技術により大幅に省力化されてはいるが，基本的には 200 年前から行われていた手作業がデジタル化されたものといって良い．

3.　織物によるグラデーション表現

3.1　増点法

ジャカード織物は，前節で述べたように異なる組織を領域毎にタイリングして形作られるため，各領域の内部については平坦で一様なパターンとなっている．一方，伝統的なジャカード織物技法の中には，**図 2** に示すように段階的に階調が変化したグラデーションを表現する増点法と呼ばれる手法がある．増点法は織物制約を守りつつ，経糸・緯糸の交差における上下関係の比率が段階的に変化する織物組織を並置することにより，連続的な階調を実現する．しかし従来の増点法では用いられる段階数が少なく，緩やかなグラデーションを表現しようとする場合には，熟練した手作業での補正を要するという課題がある．

3.2　従来技術とその課題

この課題を解決し発展させる手法として写真織と呼ばれる技術が増点法をもとに提案されてきた．例えば Ng ら [3,4] は増点法の段階数を大きく増やし，データベース化した組織のバリエーションを用い，さらに緯糸に複数の色糸を使用することで，カラー写真のように連続的に変化する階調と色彩を実現する手法を示した．しかしながら，筆者らはそれらの手法では緩やかな階調のグラデーションにおいて意図しない繰り返しパターン（アーティファクト）の発生を防げないこと，また組織サイズ未満の微細構造が再現できないことなどの課題を見出した．

4.　画像をより忠実に再現する織物ディザ法

筆者らは前節で述べた課題を解決するために，新たに織物組織生成に特化したディザマスクであるステッピングディザマスクを用いた画像処理技術として，組織的ディザ法を開発した [5~7]．**図 3** にステッピングディザマスクによる二値化処理の概要を示す．ここで図 3(a)は入力画像の画素値，図 3(b)はステッピングディザマスクの閾値とその配置を示し，図 3(c)はステッピ

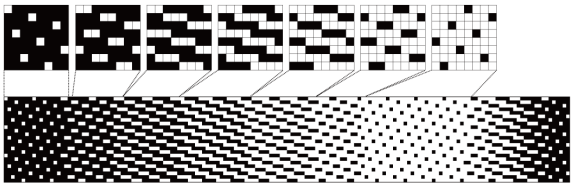


図 2　増点法

Fig.2　Example of shaded satin

ングディザマスクを用いた二値化結果を示す．図 3(e) のように出力結果が連続階調を持つ織物組織となるようステッピングディザマスクを用いて行う二値化手法全般を，織物ディザ法と呼ぶ．

ステッピングディザマスクは増点法の段階数を最大化した場合と同等の二値画像を出力するよう設計されたディザマスクである．ステッピングディザマスクは織物制約を満たす二値化結果を得るために，各行・列に一度の交差が起こるよう 0 と 255 の閾値を各行・列に一つずつ含み，またその中間の閾値についてはその名が示すように階段状に配置される．$n \times n$ のディザマスク内にある閾値は，**図 4** に示すように互いにオーバーラップしないレンジを持つ $V^0 \ldots V^{n-1}$ のグループに分けられ，それらはマスクの各行における同じ段に相当するステップを示すグループ，スロット $S^0 \ldots S^{n-1}$ に割り当てられる．例えばスロット $S^1=\{s^1{}_0,\ s^1{}_1,\ s^1{}_2, \ldots s^1{}_{n-1}\}$ は図 4(b) で示すように S^0 の右隣に位置し，そこに閾値のグループ $V^1=\{v^1{}_0,\ v^1{}_1,\ v^1{}_2, \ldots v^1{}_{n-1}\}$ が割り当てられることになる．

4.1　緩やかなグラデーションへの最適化

筆者らは，ステッピングディザマスク内の閾値がディザマスク内に均等に分散していないと，緩やかなグラデーションなど低周波領域において織物生地上に好ましくない外観を与える繰り返しパターン，アーティファクトが発生してしまうことを見出した．そこで，スロットと閾値の対応を評価しステッピングディザマスクを最適化することでアーティファクトの発生を妨げることを目的とし，**図 5** に示すように n 個の自然数からなる数列，オーダーユニット $O^n=\{o^n{}_0,\ o^n{}_1,\ o^n{}_2, \ldots o^n{}_{n-1}\}$ を定義した．そしてオーダーユニットを変化させたときのステッピングディザマスク内の閾値の偏りを数値化したコスト関数が最小となるオーダーユニットを求め，これをステッピングディザマスクに適用することで，アーティファクトの発生を防止する手法を開発した [8]．この二値化技術を，ここでは OSD (Ordered Stepping Dithering) 法と呼称する．また OSD 法ではオーダーユニットは各スロットで同一のものを用いるが，その数列の開始順序にランダム処理を加えることにより，同一のディザマスクのタイリングがもたらす外観の規則性の強さを緩和させる手法として，RSSD (Random Shift Stepping Dithering) 法を提案する．**図 6** に示すのは，RSSD 法を用いた試織結果である．

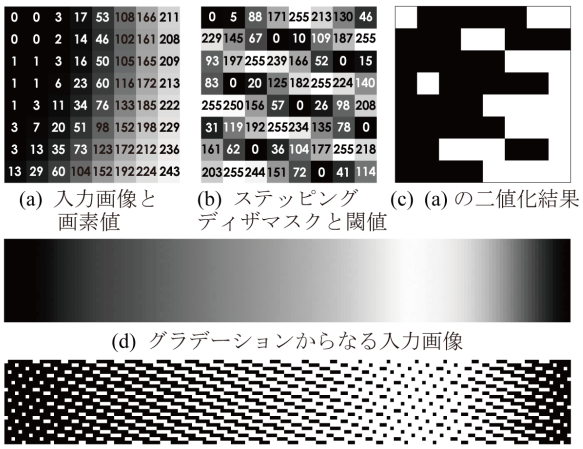


図 3　ステッピングディザマスクと二値化結果

Fig.3　Example of Stepping dithering

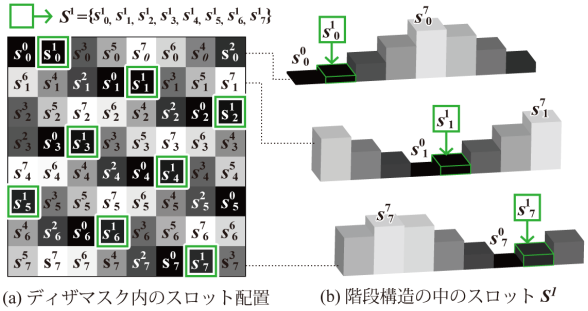


図 4　ステッピングディザマスクとスロット

Fig.4　Slots in a stepping dither mask

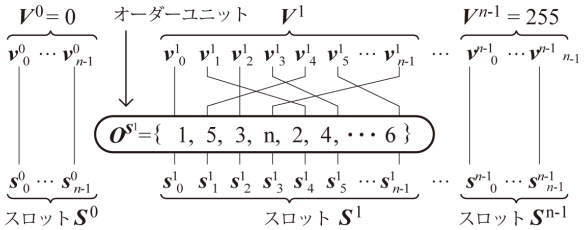


図 5　**オーダーユニットによるマッピング**

Fig.5　Mapping of threshold values and slots

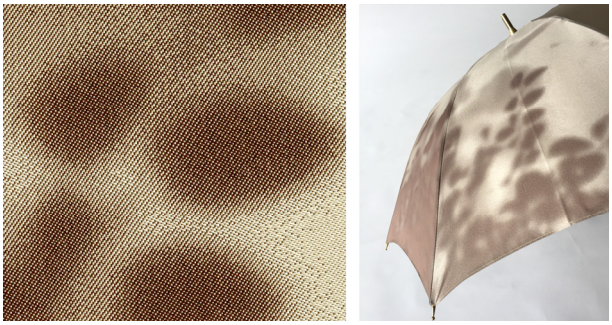


図 6　RSSD 法による製織結果

Fig.6　Resulting woven fabric via RSSD method

4.2　微細構造の再現手法

OSD 法などの組織的ディザ法は，一つのディザマスクのブロック全体として，その領域の輝度を確率的に再現するが，マスクサイズよりも小さな視覚的構造はディザパターンの構造に埋没し，そのため入力画像の高周波成分が再現されにくいという課題があった．そこで，ステッピングディザマスクを使った組織的ディザ法のプロセスに，織物制約を尊重しながらローカルな明暗情報を優先する二値化プロセスを組み込み，微細構造をよりよく再現する手法を開発した．具体的には，ある限定された領域において，画素単位で閾値を定めた通常の組織的ディザ法の代わりに，マスクサイズ全体として輝度を保存するよう配慮しながら入力画素の輝度の明暗に応じて出力画素を 0 と 255 へ振り分ける二値化を行う．その領域を定義するために，まず**図 7**(a)に示すような，境界スロットという概念を用いる．

図 7(a)で C を閾値として同図 B で示す入力画像を二値化すると，同図 D に示すように白と黒が周期的に繰り返される出力画像となる．同図 A に示す各スロットのうち，同図 F のように白と黒の両方の出力結果をもたらすスロットを，ここでは境界スロットとする．そして境界スロットにおける各スロットのうち，次の式で定められた範囲内にある画素値を持つ画素を，画素の明暗に応じた二値化処理を行う対象画素とする．

$$d = R^t \times S/(n-2) \tag{1}$$

数式 (1)において R^t は，この処理によって生じ得る階調差の強調度合をユーザが制御可能とするための係数である．S は入力画像のディザマスクサイズ内にある画素の標準偏差を表し，入力画像に含まれる微細構造の複雑さに応じて対象画素を増やす作用をもたらす．

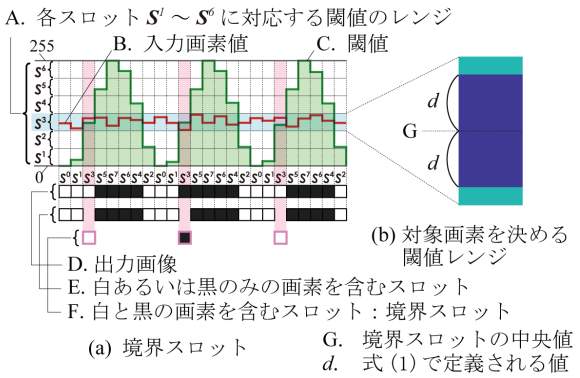


図 7　境界スロット

Fig.7　Boundary slot and limited range of threshold

値 n はディザマスクサイズにあたる．対象画素は，図 7(b)に示すように各スロットの閾値レンジの中央値から上下に d の幅の範囲に画素値を持つ画素とする．この手法では，ディザマスクによる閾値処理を基本的に用いることで織物制約を尊重しつつ，境界スロットにおいて d で定義されたレンジの範囲にある画素に対しては入力画像の輝度の大小に従い二値化することで，微細構造をよりよく反映した出力画像を得ることができる．この手法を，閾値のレンジに応じて異なる処理を選択的に適用する二値化手法であることから TVR (Threshold Value Range) 法と呼称する．

4.3　スムースな階調と微細構造の両立

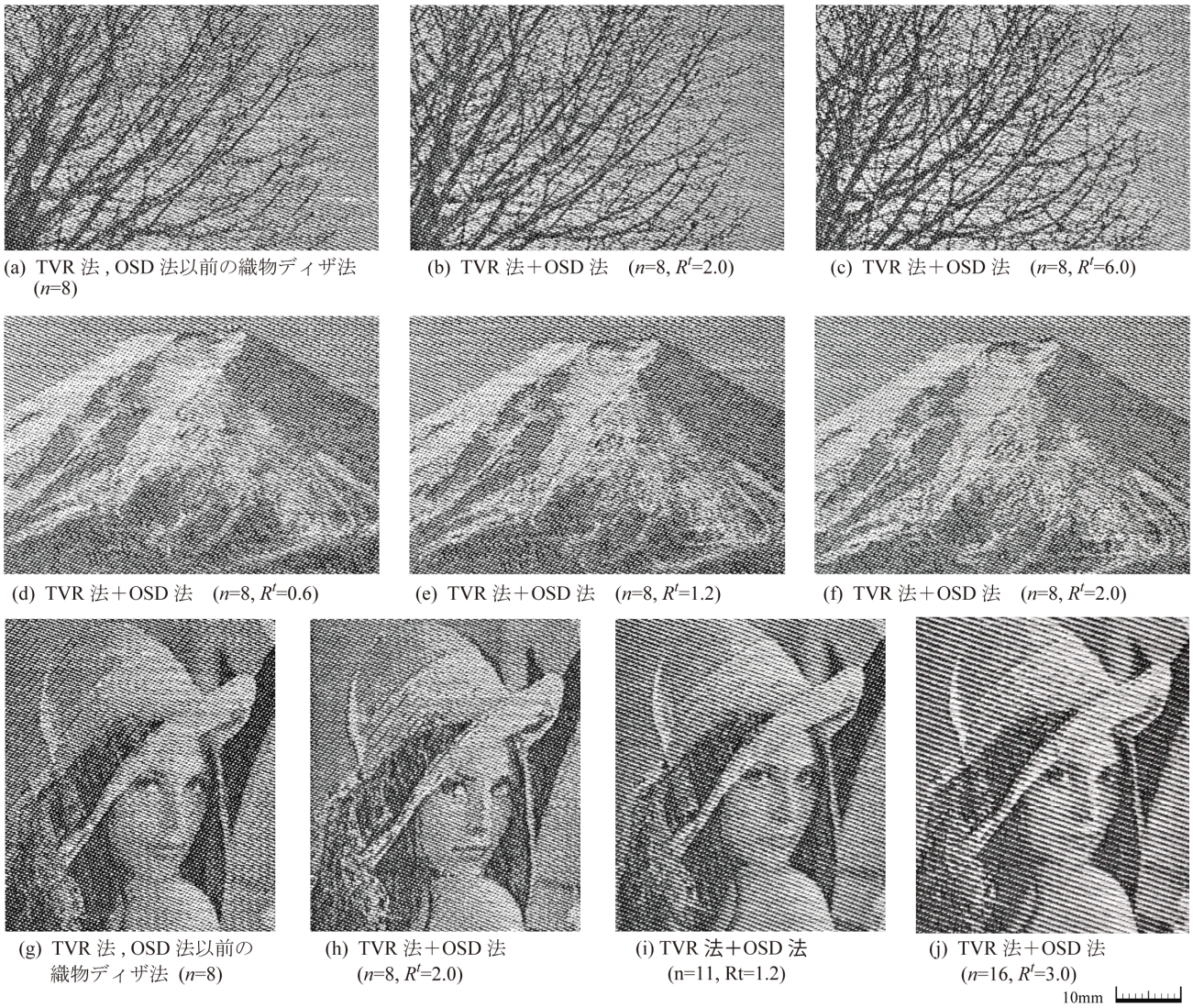
より広いレンジの空間周波数に対応した織物ディザを行うことを目的とし，前節までに述べた 2 つの手法を併用する手法を開発した．併用にあたって，ある画素において入力画像の変化の度合いを基準として画素単位での閾値処理を行うことで OSD 法と TVR 法のどちらの結果を採用するかを決定する．入力画像の変化の度合いは数式(2)の A^p を用い，閾値を T^p として $A^p \geqq T^p$ となったとき TVR 法が用いられる．ここで，$p(x, y)$ は座標(x, y)の画素値とし，T^p は実験結果をもとに $T^p = 6$ として試織を行った．

$$A^p(x,y) = \frac{1}{24}\sum_{i=-2}^{2}\sum_{j=-2}^{2}\left|p(x,y) - p(x+i, y+j)\right| \tag{2}$$

本手法による試織結果を**図 8** に示す．図 8(a)にはオーダーユニットによる最適化を行っていないステッピングディザマスクによる結果を，図 8(b)，(c)には OSD 法と TVR 法を併用し，係数 R^t による枝の細部の再現性の違いを示すとともに，低周波領域でのアーティファクト除去の効果も示している．図 8(d)～(f)はいずれも OSD 法と TVR 法を併用し，係数 R^t による山腹の雪渓の細部の再現性の違いを示したもので，コントラストの低い入力画像にも微細構造の再現に効果があることを示した．図 8(h)～(j)は異なる n による違いを示している．これらの結果にあるように，織物上で入力画像を再現するうえで低および高周波領域での課題を解決し，より広いレンジの空間周波数に対応した織物表現が可能となった．

5.　結言

ジャカード織物は，互いに直交する経糸・緯糸の色と互いの交差構造により視覚効果を布上に表現する．ここで述べたような，織物制約を考慮しながら視覚情報の再現を高度化するための研究は，画像処理をとおして視覚情報だけでなく媒体である織物構造の設計を



(a) TVR 法 , OSD 法以前の織物ディザ法 (n=8)
(b) TVR 法＋OSD 法 (n=8, R^t=2.0)
(c) TVR 法＋OSD 法 (n=8, R^t=6.0)
(d) TVR 法＋OSD 法 (n=8, R^t=0.6)
(e) TVR 法＋OSD 法 (n=8, R^t=1.2)
(f) TVR 法＋OSD 法 (n=8, R^t=2.0)
(g) TVR 法 , OSD 法以前の織物ディザ法 (n=8)
(h) TVR 法＋OSD 法 (n=8, R^t=2.0)
(i) TVR 法＋OSD 法 (n=11, Rt=1.2)
(j) TVR 法＋OSD 法 (n=16, R^t=3.0)

図 8　製織結果

Fig.8　Resulting woven fabric

同時に行い最適化しようとする試みであるといえる．媒体そのものの構造が視覚的な情報を表現する役目も担うという意味で，紙やモニタスクリーンを媒体として表現される印刷やデジタル画像などと大きく異なっている．ジャカード織物の誕生時に画像処理という言葉はなかったが，織物構造を考慮しつつ手描きの図案を方眼紙上の二値情報に変換する作業は，人の手によるデジタルな画像処理のさきがけであったといえるのではないか．本稿でジャカード織物の歴史とともに概観し，また近年の織物ディザ法から OSD 法，TVR 法の研究例で示したように，織物における画像処理の役割は，今後も新たな視点からの探求により様々な可能性を持つものと思われる．

謝辞

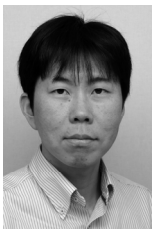
本研究の一部は JSPS 科研費 JP16H05867 の助成を受けたものである．

参考文献

1) 福井貞子：“ものと人間の文化史 123・染織”，法政大学出版局, pp. 1-3(2004)
2) 阿久津光子：“ジャカードという表現”，総合文化研究所年報，第 20 号，pp. 35-58 (2012).
3) F. Ng, J. Zhou: “Innovative Jacquard Textile Design Using Digital Technologies”, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, pp. 27-48 (2013).
4) F. Ng, J. Zhou: “Digital Jacquard Textile Design in a Colorless Mode”, Res. J. Text. Apparel Research, 10, pp. 36-42 (2006).

5) B. E. Bayer: “An Optimum Method for Two-Level Rendition of Continuous-Tone Pictures”, Proc. of IEEE ICC’73, pp. 11-15 (1973).
6) 豊浦正広，五十嵐哲也，庄司麻由，茅暁陽：“ジャカード織物作製のための制約付き画像二値化”，芸術科学会論文誌，Vol.13，No.3，pp. 124-133 (2014).
7) 豊浦正広，五十嵐哲也，庄司麻由，茅暁陽：“ジャカード織物作製のための領域内パターン生成と領域間パターン最適化”，Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2014，No.11 (2014).
8) T. Igarashi, M. Toyoura, X. Mao: “Optimizing Dither Mask for Rendering Smooth Tone on Fabric”, Proc. of NICOGRAPH International 2016, pp.75-82 (2016).

五 十 嵐　哲 也
1992 年 千葉大学工学部工業意匠学科卒．現在 山梨県産業技術センター富士技術支援センターに勤務．コンピュータ活用による織物産地のデザイン支援のほか，産地企業のブランド力向上のための各種支援事業に従事．



豊 浦　正 広　（正会員）
2008 年 京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了．2009 年 山梨大学大学院医学工学総合研究部 助教．現在 山梨大学大学院総合研究部/大学教育センター 准教授．ディジタルファブリケーション，コンピュータグラフィックス，画像・映像処理，教育工学に関する研究に従事．

茅　暁 陽　（正会員）
1987 年 東京大学大学院理学研究科博士課程修了．現在 山梨大学 大学院医学工学総合研究部教授．画像処理，コンピュータグラフィックス，可視化の研究に従事．