

自然画像を忠実に再現可能な
ジャカード組織生成

山梨大学大学院
医学工学総合教育部
博士課程学位論文

2018年3月

五十嵐哲也

要旨

織物は、経糸（たていと）と緯糸（よこいと）が直交するよう交差するパターンによって形成される平面状の構造物であるが、同時に、経糸と緯糸はその交差パターンと糸の色との組み合わせによって、織物表面上に色彩やグラフィカルな模様による意匠を現出する媒体でもある。デザイナーは、織物組織パターンを制御することにより、織物上の領域によって色糸の露出する比率を変化させ、経糸と緯糸の色の並置混色によって必要な場所に所望する色彩、あるいは階調を表現する。特に、経糸と緯糸の交差パターンを高い自由度で操作することができるジャカード織機は、デザイナーの意図を反映し複雑な意匠を織物上に表現することが可能である。本研究はこの技術の延長であり、織物組織パターンの制御によって、デザイナーが織物上に再現可能な意匠の品質を向上させることを目的としている。

伝統的なジャカード織物は、意匠をいくつかの領域に分割し、領域ごとに異なる織物組織パターンを適用することによって、領域ごとに異なる色調を表現する。大きな意匠を表現するには多数の糸が必要となるため、ジャカード組織パターンの設計は、かつては多大な労力を要するものだったが、1970年代以降はコンピュータにより省力化された。それと同時に、コンピュータによる新しいジャカード織物のデザイン、設計技術が提案されるようになり、それらはデジタルジャカードと呼ばれた。デジタルジャカードは、伝統的なジャカード織物の設計では困難だった連続階調をハーフトーニング、ディザリングなどの画像処理のコンセプトを用いて実現し、写真や絵画をモチーフとしたモノトーン及びフルカラーのアート作品、タペストリなどが数多く発表された。

しかしデジタルジャカードはタペストリや緞帳など大きなサイズでの表現を志向するものが多いため微視的な観点での改善を目指した例は少なく、またフルカラーを表現するために多数の色糸を要してコストや生地厚が増大するものが多く見られる一方、一般的なファッションやインテリアで用いられるサイズや生地厚の仕様に近いものに特化した研究は少なかった。そこで本研究では、織物組織パターンの規則性に従いながら連続的な階調を表現する伝統的な手法である増点法に着目し、これを組織的ディザ法に適用して拡張することで階調表現の品質を向上させることを目指し、新しいデジタルジャカード技術の研究開発を行った。

本研究では、組織的ディザ法で用いる閾値マトリクスの設計において、縷子組織のパターンのバリエーションが漸進的に変化するような出力結果が得られるよう、閾値を階段状に配置したステップングディザマスクを用いる手法、ステップングディザ法を提案し、またそれを基盤として議論を進めた。ステップングディザ法を用いることのメリットは、ディザマスクの設計により結果をコントロールできること、二値化処理が容易に行えること、またこの手法による出力結果が縷子組織の規則的なパターンに従うことから、そのパターンの違いを活用して階調情報の再現だけでなく、方向性や質感などの情報を重畳的に表現でき、入力画像の再現性を高める可能性を持つこと等がある。

まず現状の技術の課題として、緩やかに階調が変化する領域で発生する意図しない繰り返しパターン、アーティファクトをどのように除去するかという問題があった。本研究ではアーティファクトの発生原因を解析した結果、サイズ n のステップングディザマスクに用いる

$n(n-2)+2$ 種類の閾値が、ディザマスクの階段状構造のどの位置に配置されるかを定義するマッピングに問題があるため、閾値の配置に偏りが発生することが原因であると解明した。これを解決するため閾値のマッピングを行う最小単位として n 個の数値からなるオーダーユニットを定義し、閾値の偏りをコストとした評価関数を用いて最適化を行うことで最適なオーダーユニットを求め、これをディザマスクの設計に適用する手法である OSD (Ordered Stepping Dithering)法、及びこれを応用しディザマスクのタイリングによる外観の規則性を低減する RSSD (Random Shift Stepping Dithering) 法を提案した。これによって緩やかな階調変化のなかでもアーティファクトの発生を防ぐ結果を得ることができた。

次に入力画像の微細構造の再現性の観点から従来手法を見直し、組織的ディザ法がディザマスクの持つパターンのために、ディザマスクサイズより小さな構造の保存を保証しないことに着目した。そこで、出力結果がよりよく入力画像の微細な構造を再現するために、ディザマスクサイズ内であっても大きな階調変化がある領域では、ディザマスクのパターンよりも画素の輝度の順序を優先するよう、組織的ディザ法を拡張する手法、IFT (Intensity Forced Thresholding) 法を開発した。これによって入力画像の微細な構造はよりよく保存可能となり、織物上への意匠の再現精度を高める結果が得られた。また、画像の低周波領域に優れた OSD 法と高周波領域を再現可能な IFT 法を組み合わせるため、入力画像の画素単位に周囲との差分の大きさを閾値として OSD 法と IFT 法を選択し適用する手法を提案し、良好な結果を得た。

これまで行ってきた提案では縞子組織をディザマスクの基本構造に用いてきたが、サイズ n と飛び数 m によって定義される縞子組織のどれを使用するかはデザイナーの判断に委ねるとしてきた。本研究ではこれまでの提案手法を活用する上でのデザイナー支援のため、サイズ n と飛び数 m の変化による縞子線方向の違いなど選択に有用な情報を示すとともに、飛び数 m が一定でない変則縞子についてもそのバリエーション探索によってリストアップし、またその活用が織物上での新しい表現を促すこと、また変則縞子への IFT 法の適用が可能であることを示した。

本研究では織物の経糸と緯糸の組み合わせとして最もシンプルな形態である経糸及び緯糸が 1 色ずつの緯糸 1 丁の条件下で研究を進めてきた。しかし 1 丁織物では、経糸と緯糸が織物構造の保持と糸の露出による階調変化の双方を同時に担う必要があるため、どちらかの糸の露出を増やしてコントラストを高めようとするサイズ n を増加させる必要があるが、 n の増加により織物構造が弛緩し軟弱化することを考慮すると、デザイナーの選択肢は少ない。そこで本研究では、輝度のコントラスト向上と織物構造の緊密性保持を両立させる事例として、経糸 1 色、緯糸 2 色の 2 丁織物に研究成果を適用し、伝統的な階調表現を改善する手法を提案した。この手法では緯糸に使用された白と黒の 2 色の糸が、いずれかの露出が増えたときに他方が織物構造の緊密さを保持するよう働くことで、白～黒のコントラストを最大化することが可能である。この手法は組織変化のパターンが複雑であるため、多大な労力を要するものだったが、本研究で提案する組織的ディザ法の活用により大幅な省力化が可能となり、また OSD 法で用いた緩やかな階調変化に最適化したオーダーユニットをこれに適用することで、より豊かな階調の表現が可能であることを示した。

本研究では縞子組織の規則的なパターンを持つステップングディザマスクを、低周波及び高周波領域で改善する手法として OSD 法、IFT 法を提案し、これまでより優れた再現性を持つジャカード組織の生成を実現した。本手法により生成したジャカード組織は縞子組織の規

則性を保持するよう設計されているため、その規則性を美的な観点から活用可能であると同時に、RSSD法のようにランダム性を付加することや、誤差拡散法の閾値にOSD法によるステッピングディザマスクを適用するなど、規則性を意図的に減少させる応用も可能であることを実験により示すことができた。

キーワード

ディザ法，組織的ディザ法，ジャカード，誤差拡散法

SUMMARY

Woven fabric holds a planar structure made of warp yarns and weft yarns that cross at right angle to each other. At the same time, colored warp and weft yarns themselves can be a kind of material to express graphical patterns on the surface of the fabric. Textile designers reproduce the desired color by the juxtapositional color mixture of warp and weft yarns on certain parts of the surface of the fabric through controlling the appearance ratio of warp and weft yarns using proper weave patterns. Especially, a Jacquard weaving loom, capable of controlling the crossing relationship of the weft and warp yarns intricately, can weave the locally changing weave patterns required for reproducing the colors, shapes or patterns following the intention of designers. This thesis aims to contribute to the advance of the field by presenting new methods for rendering arbitrary given images with higher quality by controlling weave patterns in detail.

Traditional Jacquard weaving method achieves different colors or tones on each divided region of the fabric by applying different weave patterns for each region. For large sized design requiring enormous numbers of yarns, jacquard design process needs massive labors especially before computer were developed and spread in 1970's. Computers served as a catalyst for creating new textile design and expression. Computer assisted Jacquard weaving technology, so called *digital jacquard*, enabled continuous gradation expression on fabric, which could not be realized by a traditional weaving technique, by using image processing technique such as half-toning and dithering. Textile artists and designers published many art works or tapestry with a motif of photography or drawings, either in monotone or full color mode.

As typical digital jacquard works are apt to be for large-sized and full-colored expression like tapestries and stage curtains, consequently, the fabric requires numbers of color of yarns and tends to increase the thickness. Therefore little work has been directed on jacquard weave patterns with a microscopic point of view or with less colors and for thinner cloth such as those used in general fashion or interior industries. From the situation above, this study focuses on the shaded-satin technique which provides the continuous tones on fabric while keeping regularity of microscopic appearance of weave patterns, and develops new jacquard weaving methods which can obtain higher quality of delicate nuance of tones by combing the shaded satin technique with an ordered dithering method.

The proposed methods are based on "stepping dithering" which uses dither masks thresholds arranged in step-shaped distribution for obtain a continuous changing satin-based weave patterns. Basing on stepping dithering has several advantages: the controllability of resulting image by rectifying dither mask structures, the easiness of image processing process, and the possibility for incorporating information superimposition on the resulting image. The third advantage can be considered to provide the better preservation of not only the brightness, but also the direction or texture of input images using the merit of satin-based regularly structure in the resulting image properly.

The first problem of stepping dither method is the visually unappealing repetition of patterns for input images containing low frequency, smooth gradation regions. This thesis investigated the cause of the

occurrence of such a structure— namely *artifacts*. —and found that the biased distribution of thresholds derived from a naïve mapping of $n(n-2)+1$ threshold values to the corresponding positions in the dither mask with the size n

To control the mapping for avoiding introducing the artifacts, , this thesis introduces the concept of *order unit* which consists of n numbers to define the desired mapping, together with the method for searching the optimal order unit that can form the evenly distributed threshold values through an optimization process guided with a cost function evaluating the biasness of threshold values. The optimized order units are incorporated to a new method for generating artifact-free weave patterns, *OSD (Ordered Stepping Dithering)*. Besides, *RSSD (Random Shift Stepping Dithering)* is proposed as another solution which can reduce the regularity of the resulting pattern.

The second problem is the low reproducibility of small structures with high frequency relative to mask size. Focusing on that some pixels can be flipped over with regard to the order of the brightness through the ordered dithering process, a new method *IFT (Intensity Forced Thresholding)* is proposed to improve the reproducibility of fine details. IFT method preserves the satin-based patterns, the total brightness of dither mask-sized area, as well as the local fine structure by performing binarization based on the order of the brightness of the input pixel values instead of threshold values for the appropriate chosen target areas. A method combining OSD and IFT is also proposed to achieve the reproducibility in both high-frequency region and low-frequency region by adapting the binarization process to the local image feature.

Although the methods proposed in this thesis allow designers to use arbitrary size n and control number m of satin-based-structured dither masks, the selection of the parameter n and m is left to designers. For the purpose to provide a support for designers to select the numbers of n and m which help to reflect their intentions, this thesis analyzed the relationship between the direction of satin-line and the number n and m . Besides, hundreds of irregular satins which consist of unfixed value of m for each row are listed by searching for possible combination of value m , and classified from the aspect of symmetry. Experiment results demonstrated the potential of achieving new expressions by applying IFT method and other methods to irregular satin.

The above mentioned methods assume using a single color for warp yarns and weft yarns, respectively, which is the simplest combination of warp and weft yarns. In this case, because the contrast of the brightness and the firmness of the textile structure are in a trade-off relationship, designers do not have much options. In order to solve this problem, this thesis introduces an example application of the proposed methods to a traditional weaving technique which uses one color, say white, for warp yarns and two colors, black and white for weft yarns to achieve both contrast of brightness and firmness of structure. As the method uses the two colors for weft yarns, which play the role in appearance and structure alternatively, the contrast of brightness can be maximized without losing the right firmness. Using the concept of stepping dithering successfully reduced the enormous labor required in the traditional implementation of the technique and the experiment result shows that the OSD method successfully improves the reproducibility of smoothly changing tones.

To summarize, this thesis proposed OSD and IFT methods for solving the regular repetition artifact and detail lost problems found in high and low-frequency regions respectively, and showed that the methods can improve the reproducibility of fine and smooth tones of images on jacquard fabric

successfully. As these methods can preserve the regularity of satin-based pattern, designers can either make use of such regularity for an ascetical purpose, or reduce it by adding randomness with RSSD method, or by applying stepping dither mask to error diffusion algorithm, and the effectiveness of those approaches are confirmed by experiments.

Key word

dither, ordered dithering, jacquard, error diffusion

目次

要旨	3
第1章 序章	12
1-1 背景	12
1-1-1 織物と意匠	12
1-1-2 ジャカード織物と意匠	13
1-1-3 ジャカード織物による階調変化	15
1-2 本研究の位置づけと目的	17
1-2-1 研究の位置づけとアプローチ	17
1-2-2 研究のフィールドと目的	19
1-3 論文の構成	20
第2章 伝統技法と関連研究	22
2-1 ジャカード織物による意匠の表現技法	22
2-1-1 織物と綜統	22
2-1-2 ジャカード織物について	23
2-1-3 ジャカード織物設計と領域分割	24
2-1-4 多丁杼織物の設計	26
2-1-5 画像処理技術の導入と織物制約について	27
2-1-6 繻子織について	28
2-2 織物上での連続階調表現の事例及び関連研究	30
2-2-1 伝統的な連続階調の表現	30
2-2-2 デジタルジャカード	31
2-2-3 ステッピングディザ法	32
2-2-4 関連研究	33
2-3 まとめ	34
第3章 ステッピングディザ法	36
3-1 織物組織とディザ法について	36
3-1-1 組織的ディザ法の適用	36
3-1-2 組織的ディザ法について	36
3-1-3 織物組織の観点から見た組織的ディザ法	37
3-1-4 織物組織の観点から見た誤差拡散法	38
3-2 ステッピングディザマスク	39
3-2-1 ステッピングディザマスクの階段状構造	40
3-2-2 ステッピングディザマスクの閾値とスロット構造	41
3-2-3 ステッピングディザマスクのスロットの定義	42
3-2-4 製織試験及び考察	44
第4章 緩やかな階調変化における最適化	46
4-1 従来手法の課題：アーティファクトの発生	46
4-1-1 アーティファクトの発生	46
4-1-2 ステッピングディザ法でのアーティファクトの発生	46
4-2 アーティファクトの発生原因	48
4-2-1 アーティファクト発生とディザマスクの閾値	48

4-2-2	アーティファクト発生原因の分類	49
4-3	オーダーユニットとその最適化	50
4-3-1	オーダーユニット	50
4-3-2	オーダーユニットの最適化	51
4-3-3	E_{bias} の算出	52
4-3-4	$E_{proximity}$ の算出	53
4-3-5	E の最適化	54
4-4	オーダーユニットによるディザマスク生成法	54
4-4-1	OSD (Ordered Stepping Dither) 法	54
4-4-2	RSSD (Random Shift Stepping Dither) 法	55
4-4-3	拡張誤差拡散法への適用	55
4-5	オーダーユニットの最適化と試織試験	56
4-5-1	コストが最小となったオーダーユニット	56
4-5-2	実験結果と考察	56
第5章	微細構造を保存する手法	63
5-1	微細な構造の再現	63
5-1-1	微細構造の保存について	63
5-1-2	ディザ法で微細構造が保存されない原因	64
5-1-3	提案手法のコンセプト	65
5-1-4	バウンダリースロット	65
5-1-5	提案手法 (IFT (Intensity Forced Thresholding) 法) の詳細	67
5-1-6	階調差の強調効果とその制御方法の導入	69
5-2	OSD 法と IFT 法の併用	72
5-2-1	階調差の強調効果とその制御方法の導入	72
5-3	実験及び考察	73
5-3-1	試織結果	73
5-3-2	ハイブリッドイメージへの応用	75
5-3-3	専門家による評価及びコメント	78
5-3-4	考察	79
第6章	縞子線及び変則縞子の活用による発展	80
6-1	組織のバリエーションと自由度	80
6-2	縞子線について	81
6-2-1	n, m の違いによる縞子線の効果	81
6-2-2	$m \approx n/2$ となる場合について	84
6-2-3	縞子線の方向と効果	85
6-2-4	領域分割と縞子線の効果	85
6-3	変則縞子の活用について	87
6-3-1	変則縞子とは	87
6-3-2	変則縞子のバリエーション探索	89
6-3-3	変則縞子への IFT 法の活用	91
6-4	縞子組織と対称性	93
6-4-1	対称性による織物生地のカテゴリ	93
6-4-2	対称性に基づく織物生地上の意匠のカテゴリ	94

6-4-3	縺子組織の対称性による分類.....	98
6-4-4	縺子組織のファミリー.....	99
6-5	実験及び考察.....	104
第7章	OSD法の応用による輝度レンジの拡大.....	107
7-1	輝度レンジの問題.....	107
7-2	ステッピンググラフの手法について.....	109
7-2-1	ステッピンググラフとは.....	109
7-2-2	ステッピンググラフの作品例.....	109
7-2-3	作品例の組織パターン.....	111
7-3	OSD法の導入による拡張.....	114
7-3-1	二値化処理の手法について.....	115
7-3-2	ディザマスクの構造について.....	117
7-3-3	ディザマスクの閾値について.....	120
7-3-4	経糸＝黒への応用.....	123
7-4	実験及び考察.....	125
7-4-1	製織試験.....	125
7-4-2	考察.....	130
第8章	終章.....	132
8-1	結論.....	132
1)	ステッピングディザ法.....	132
2)	緩やかな階調変化における最適化.....	132
3)	微細構造を保存する手法.....	132
4)	縺子線及び変則縺子の活用.....	133
5)	OSD法の応用による輝度レンジの拡大.....	133
8-2	課題.....	133
1)	ステッピングディザ法.....	133
2)	緩やかな階調変化における最適化.....	134
3)	微細構造を保存する手法.....	134
4)	縺子線及び変則縺子の活用.....	134
5)	OSD法の応用による輝度レンジの拡大.....	134
8-3	まとめ.....	135
	謝辞.....	136
	参考文献.....	137
	付録.....	142

第1章 序章

本章では、まず織物上での意匠の表現についての背景を紹介し、その中での本論文の研究分野であるジャカード織物における階調表現についての概況を述べる。そして本研究の位置づけとアプローチの方法と目的を明らかにし、そして本論文全体の構成を概観する。

1-1 背景

1-1-1 織物と意匠

織物は我々の生活において、衣服、ネクタイなどの服飾雑貨、カーテンや座布団などのインテリア、列車や自動車の内装などのほか、フィルターなどの工業資材や炭素繊維の構造材など、多岐にわたる分野で用いられている。

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^[1-01]。

織物は、並列させた多数の経糸（たていと）に、緯糸（よこいと）を直交するように適度に交差させながら挿入することで形成される平面状の構造である。このとき、用いられる糸の素材や撚り方、太さ、縦横方向の糸密度などを適切に制御することで、織物には様々な風合いや物性の違いがもたらされる。特に経糸と緯糸の交差パターンは織物組織と呼ばれ、織物の特徴を左右する重要な要素となっている。

織物組織で経糸と緯糸が交差するパターンを図解した例を図 1-01 (a)に示す。このとき経糸が上になっている交差点を黒、緯糸が上になる交差点を白のマスを表すようにすると、図 1-01 (b)のような織物組織図として表すことができる。

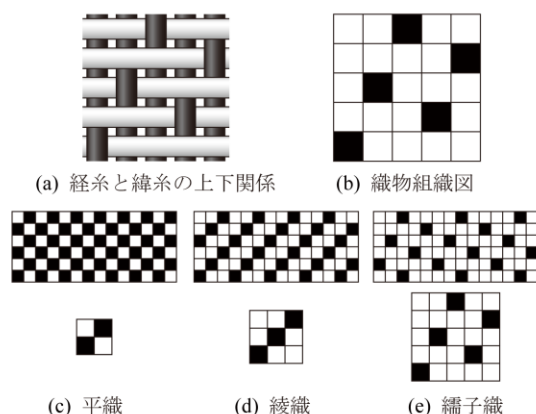


図 1-01 織物組織図と三原組織

こうした織物組織は図 1-01 (c)~(e)に示す 3 つに大別され、それぞれ平織、綾織、縐子織と名付けられている。織物組織は、こうした経糸と緯糸の交差パターンの違いによって、糸が構成する平面状の構造の緊密さや柔軟さを変化させる役割を持つ。そして織物組織のもう一つの重要な役割は、織物上に意匠を表現することである。

織物生地に意匠を施す手法には、織物生地が出来上がったあとで色や柄をつける友禅染めや絞り染めなどの染色技法、シルクスクリーンによる捺染やインクジェットによるプリント、あるいは織物生地に糸素材を付加する刺繍や刺し子、ニードルパンチなど、様々な技法が文明の発展とともに育まれてきた^[1-02]。

織物組織による意匠は、糸の色と織物組織パターンの組み合わせによって生み出される^[1-03]。そのため糸を染色してから織るものを先染め、または先染め織物といい、上に述べたように織ってから意匠を施すものを後染めと呼んで区別する。先染め織物による意匠の一例が図 1-02 に示す千鳥格子、またはハウズトゥースと呼ばれる伝統的な意匠である。図 1-02 (a)の意匠は、図 1-02 (b)の織物組織の繰り返しのみで構成されているが、図 1-02 (c)のように経糸と緯糸の色を 4 本ずつ白、黒を繰り返すように配置して織ることで、交差点での糸の上下関係から図 1-02 (d)のような特徴的なパターンが生まれる。

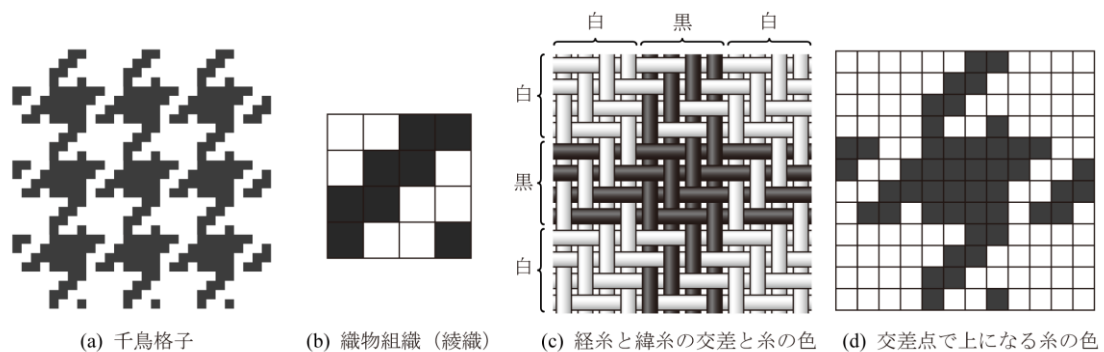


図 1-02 糸色と織物組織の組み合わせによって生まれる意匠の例

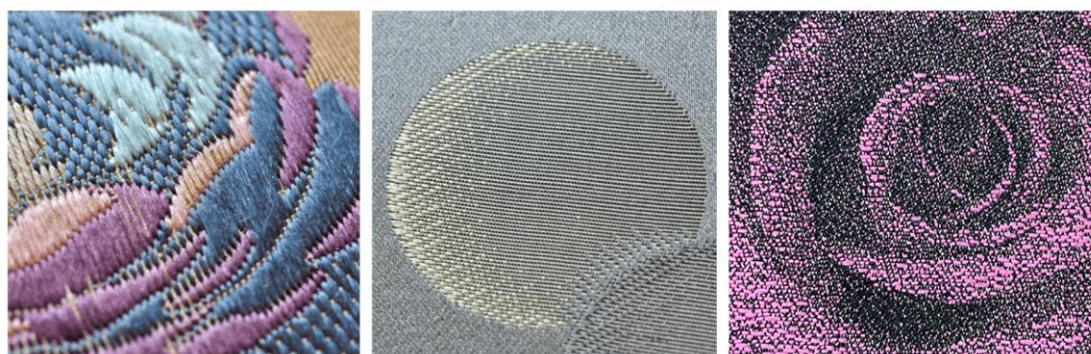
織物生地が出来上がったあとに意匠を施す捺染やインクジェットプリントなどの後染め手法と比較して、織物組織による手法は、織物生地の製造と同時に織物生地自体の構造体でもある経糸と緯糸で意匠を表現するという点に大きな特徴がある。また経糸と緯糸の方向が 90 度異なることで光学異方性が生まれ、糸色の糸だけではなく光沢感などの要素が加わることも、後染め織物との差別化の観点からも重要な要素となっている^[1-04]。

本研究の主題であるジャカード織物は、図 1-02 のような糸色と織物組織の組み合わせを駆使して複雑な意匠を織物上に表現するため、経糸と緯糸の交差パターンを任意に制御することのできる機構を備えた織機、ジャカード織機によって織られる織物である。

1-1-2 ジャカード織物と意匠

ジャカード織物が織物上に実現している意匠は、唐草や花柄の文様やロゴタイプなど具象的なものから、視覚的なテクスチャを重視した無地調のものや抽象的な幾何学文様まで、様々な種類が見られる。しかし、ほぼすべてのジャカード織物に共通して用いられている手法は、

意匠のうちあらかじめ分割された領域ごとに異なる織物組織をタイリングすることで、織物組織の違いによる領域ごとの外観の変化を活用するものである^{[1-05] [1-06]}。図 1-03 (a)はその一例である。デザイン画の領域ごとに異なる色の糸が露出するよう織物組織が選択され、領域内でそのパターンが繰り返し配置されていることがわかる。



(a) 領域分割と織物組織のタイリングによる意匠

(b) 織物組織による連続階調

(c) デジタル処理を用いた表現

生地資料出典 (a), (b)とも フランス製生地サンプル (20世紀初頭：山梨県産業技術センター所蔵) blog「シケンジョテキ」より http://shikenjyo.blogspot.jp/2014/10/blog-post_17.html
(c) 婦人服地 by 宮下織物(株)

図 1-03 ジャカード織による様々な意匠

領域分割と織物組織のタイリングによる手法では、各領域内の織物組織パターンは一定であり、塗り絵のように変化がないのが一般的である。また領域内での変化がないことは、領域同士の違いをより明瞭にする効果もあると考えられる。

その一方、連続的に階調や質感を変化させようとする手法も伝統的に行われてきた。その代表的な手法が図 1-03 (b)に見られるような、組織点を漸進的に増減させた一連の織物組織を並置するもので、一般に増点法と呼ばれている。図 1-03 (b)の例では、円形の領域の左側を中心に、明るい色の露出する割合を段階的に変化させて陰影を表すことで、意匠に描かれているモチーフが扁平な円ではなく、立体的な球状のものであることを表現している。このことから、組織を連続的に変化させる手法は、一般的な領域分割とタイリングによる手法に比べて、デザイン画に含まれる情報をより多く伝えることができることは明らかである。しかしこの手法による織物の設計にはより多くの手間がかかるため、こうした連続階調表現はジャカード織物全体のうちごく一部にとどまっていた。

1970年代以降、コンピュータの実用化によって画像のデジタル処理が容易になるとともに、伝統的なジャカード織物の設計をデジタル化して省力化を目指す動きが進み、同時に画像処理技術を応用した独特な織物デザインも生まれるようになった^[1-07]。例えば図 1-03 (c)の織物生地は、二値化処理したデジタル画像と織物組織パターンと合成することで、入力画像の連続的な階調を再現している。織物製造へのコンピュータの導入には、設計工程をデジタル化する側面と、表現内容にデジタル技術を積極的に導入する側面という二つの方向性がある。後者による新しいタイプのジャカード織物は、図 1-03 (c)に示したもののほか、様々な技法が開発されてきた。それらは一般的にはデジタルジャカード、あるいは写真織などと呼ばれて

おり、また開発者によっては”フォトジャカード PHOTO JACQUARD”^[1-08]、”フォトテックス PHOTOTEX”（登録商標）^[1-09]など独自の呼称が与えられる例も見られる。本論文では以降、これらをデジタルジャカードと総称する。

1-1-3 ジャカード織物による階調変化

ジャカード織物は通常、領域分割とタイリングによって領域ごとの差異を明確化することで意匠を表現するが、他方で連続的な階調変化を表現する技法として、伝統的な領域分割とタイリングに増点法を取り入れたものと、デジタル処理によるデジタルジャカードがあることを前節で述べた。

ここで、織物で階調を表現する手法の共通点について述べる。それは、両者が階調変化を表現するための色（グレースケールを含む）の変化に、主に並置混色が使われていることである。図 1-04 に、領域分割とタイリングによる伝統的なジャカード織物技法と、デジタルジャカードによる織物上での混色の例を示す。図 1-04 (a)は意匠の元となるデザイン画の作成段階において、階調変化にもとづいた領域分割が用いられているが、領域分割後はそれぞれの領域に組織パターンのタイリングを行う伝統的な手法が用いられている。



生地資料出典 (a) 洋傘 絵織シリーズ「ひまわり」 by (株) 横田商店（山梨県産業技術センター所蔵）
 (b) タペストリ by テキスタイルデザイナー岩室佑佳氏（本人所蔵）

図 1-04 糸の混色による階調変化の例

図 1-04 (a)の a-1 のエリアでは、濃いオレンジと黄色の 2 色の緯糸が一本ずつ繰り返し並置

され、また図 1-04 (b)の b-1 のエリアでは、同様に白と青の 2 色の緯糸が一本ずつ繰り返し並置されていることで、それぞれの例で用いられた 2 色の中間の色調が表されている。

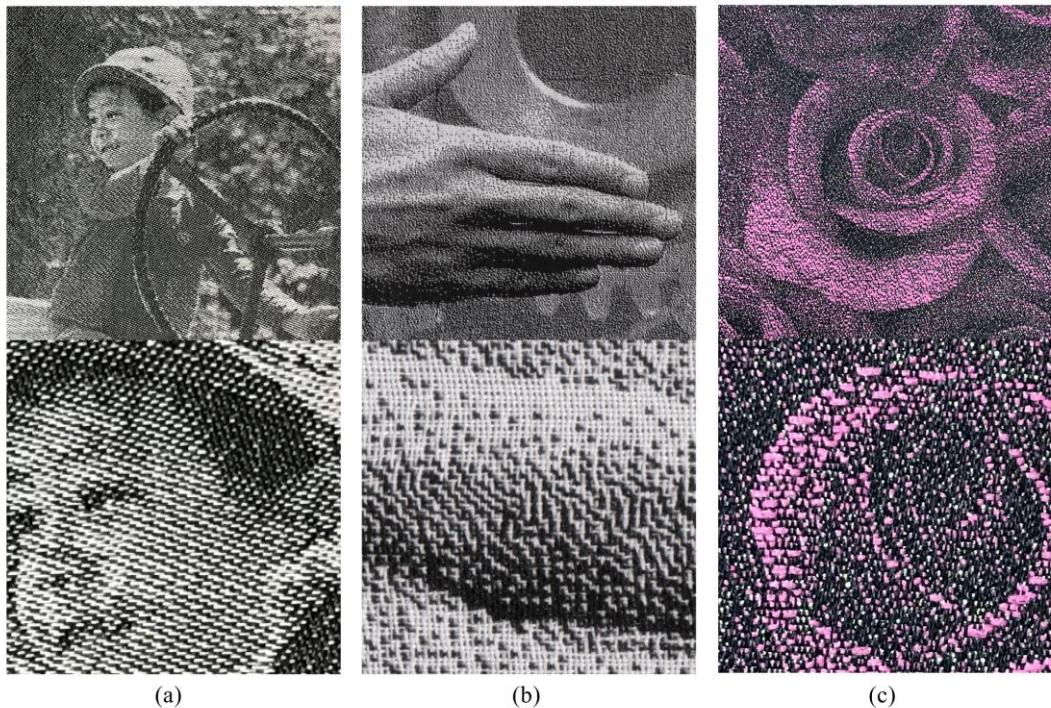
図 1-04 (a)では意匠に階調変化がある部分では、組織パターンの異なる数段階の領域を経て階調が変化していることがわかるが、図 1-04 (b)ではそうした明瞭な段階は見られない。そのような違いはあるものの、両者に共通するのは、並置混色を用いることと、並置された色糸の露出する比率を変えることで色調や階調の変化を表現することにある。並置混色による階調変化は、言い換えると一定面積の中に含まれる色糸の露出パターンの変化によってもたらされるものといえる。

織物製造ではコスト対策の観点から、望ましい色の組み合わせを表現するためになるべく少ない色糸が用いられることが一般的である。

しかし十分に色糸の数を増やし、広い色空間をカバーするよう配慮すれば、並置混色によってフルカラー写真のような織物を作ることが可能となる。例えば図 1-04 (b)ではそのために白、黒のほか黄色、黄緑、赤、青の 6 色が用いられている。

次に、色糸の露出するパターンに着目する。図 1-05 は階調変化をジャカード織物で表現した織物生地とその拡大図であり、図 1-05 (a)は増点法によるもの、図 1-05 (b)及び(c)はデジタルジャカードによるものである。いずれも濃淡 2 色の色糸が露出する比率を漸進的に変化させることで、2 色の色糸の並置混色によって中間階調を表現しているが、それぞれにその変化するパターンの違いによって視覚的効果が異なっている。図 1-05 (a)の増点法は、階調ごとに分割した領域に対して織物組織の規則的なパターンに則って組織点を増減させたものをタイリングし適用しているため、白い緯糸が多く露出した領域から、黒い経糸が多く露出する領域へと遷移する過程は、変化しながらも規則性の高いパターンとなっている。図 1-05 (b)は経糸と緯糸が白のみの明るい領域と、黒のみの暗い領域の間は、図 1-05 (a)と比較して規則性の低いパターンで遷移している。図 1-05 (c)ではさらに規則性が低く、ノイズ状のパターンとなっている。

これらの違いは、次のように記述することができると考えられる。すなわち、織物で階調を表現するためには、伝統的な領域分割とタイリングによるものにしる、あるいは画像のデジタル処理によるデジタルジャカードにしる、色糸の並置混色によって階調変化を行うことになり、それには一定面積のなかで露出する色糸の比率を制御することが求められる。そして織物上で糸の露出を制御するという事は、組織図上での組織点の配置と数を操作するという事であり、言い換えると二値情報によって連続的な階調を表現する作業である、ということができる。これは、少ない色数で連続階調を表現する必要があるインクジェットプリンタなどに用いられる、ハーフトーンやディザリングといった画像処理の概念に非常に近い。



生地資料出典 (a) 増点法による織物生地
 (b) 書籍表紙の布張り『織の記憶』, 山口英夫, (株)ネクスタイル, 1997.
 (c) 婦人服地 by 宮下織物(株)

図 1-05 織物による階調表現

1-2 本研究の位置づけと目的

1-2-1 研究の位置づけとアプローチ

本研究が主題とするのは、ジャカード織物の設計プロセスに新しい画像処理手法を導入することで、デザイナーが使用することのできる表現の幅を広げることである。具体的にどのようなアプローチを行うのかについて、前節で紹介した図 1-05 の 3 つの事例を取り上げて説明したい。

画像の二値化処理で行われるディザ法と、織物組織パターンの生成方法の類似性の観点から図 1-05 の 3 種類の結果を比べてみると、図 1-05 (a) の増点法は組織的ディザ法（オーダードディザ法）^[1-10] に近く、また図 1-05 (b) は誤差拡散法^[1-11]、図 1-05 (c) はランダムディザ法の結果にそれぞれ高い類似性を持っているといえる。

ここで、これらの 3 つについて、そのパターンを使ってデザイナーが意図するデザインを実現するときの自由度や表現力を高める観点から、それぞれについてどのような研究アプローチによるコントロールが可能かということについて仮説を立ててみる。

図 1-05 (a) は、織物組織パターンに従った配置を遵守していることから、組織的ディザ法に置き換えて生成するというアプローチが可能である。このとき適切なディザマスク（ディザ

行列) の設定によって、結果として得られる出力パターンをコントロールすることができると考えられる。

図 1-05 (b)で見られるような、不規則だが特徴的なパターンは、誤差拡散法におけるワームノイズとして見られるものと考えられる。ワームノイズの消去には誤差拡散法で行われるラスタ走査をランダムスペースフィリングカーブに基づくものにする手法が提案されており^[1-12]、これを拡張すれば類似の方法によってワームノイズ形状をある程度コントロールするアプローチも考えられるだろう。

図 1-05 (c)のようにランダム性の高いパターンは、乱数を用いたホワイトノイズを二値化プロセスに導入することによって生成可能であると考えられる。そこでノイズの種類に着目し、ヒストグラムの異なるカラードノイズの活用などの手法でテクスチャのコントロールは可能であると考えられる。

このように、織物上での階調変化を改善するためのアプローチには様々な方向性が考えられる。本研究では次の理由から図 1-05 (a)で紹介した組織的ディザ法に基づく従来手法の改善を目指すこととする。

組織的ディザ法に着目する理由の一つ目は、規則性のある離散的な信号によって連続階調を表現する手法に対する審美的な観点からの興味である。筆者は、文字どおり連続的なスムーズなものやノイズ状の階調変化よりも、黒板にチョークで描かれた図 1-06 のドローイングの空の部分で用いられているような、規則性を持った要素の集合による階調表現に強く惹かれる。この例では、水色の要素の密度を変化させることで黒から水色へのグラデーションが表現されているが、短い線描のタッチがほぼ一定に保たれているという規則性を持っている。このような規則性を持つ信号による連続階調表現は、第 6 章で述べるように銅版画やペン画など他ジャンルの芸術表現で用いられてきた手法であり、ジャカード織物の市場でも評価が期待できるものと考えられる。

また、規則性を保つことは、自由度を狭める制限にもなりうるが、逆に規則性を適切に用いることでより多くの情報を生み出すことができることに注目したい。組織的ディザ法に着目する二つ目の理由は、その点に大きな可能性を感じるためである。

すなわち、適度な規則性を信号が持つことで、階調表現と同時にそのほかの情報を重複的に示すことが可能となり、それはデザイナーの表現力



“大気の海” by 黒板当番

(https://www.instagram.com/p/BXU7heYAXsg/?taken-by=kokuban_toban)

図 1-06 規則性のあるタッチによる表現

をより高めることにつながり得るという可能性である。

このことを図 1-06 の描画法を例に補足する。図 1-06 の空の領域で見られる表現は、水色のチョークによる点が空間密度を連続的に変化させながら水色から黒へと推移する階調変化である。点の位置はランダム性の高い配置で描かれているものの、一つ一つの点の水平方向に伸びた形状は保たれており、そこから空気の層が密度を高めながら積層している様子を感じ取ることもできる。一方、海面の部分で描かれている短い線描は、若干方向や大きさがまちまちで、波頭に相当するものであることが感じられ、空の領域の点描とは明らかに描き分けられていることがわかる。

また、規則性を持った信号による連続階調のその他の例としては、ペン画や銅版画、鉛筆画などのタッチがあげられる。それらの描画法は、白（紙）と黒（インク）のような2色（二値情報）を使って連続階調が描かれている点で、織物組織による階調と同じである。画家がインクを紙の上に配置するときには、ランダムではなく、一定の規則性をもつタッチやハッチング、ストロークが用いられて、その密度による階調表現と同時に、質感や立体感が同時に表現される例が多く見られる。

それらから類推されるように、織物組織パターンの規則性も適切に用いることで、階調表現を行うと同時に、それ以外の情報を複層的に表現できる可能性がある。以上から本研究では、そのような観点によりジャカード織物の表現の高度化のためのアプローチとして組織的デザイン法に焦点を当てて研究を行う。

1-2-2 研究のフィールドと目的

前節の図 1-04 (b)で紹介したように、織物上でフルカラーの再現を目指す技法の開発事例は世界的に散見され、タペストリや緞帳のほか、アート作品としても多くの作品が高い評価を得ている^[1-07]。しかしフルカラーを目指すことは、ジャカード織物にこれまでにない表現上の可能性をもたらす一方で、次の二つの点でのリスクを持つと考えられる。

一つ目は、フルカラーに必要な色数の多さによるコスト及び生地の厚みと重量の増加である。インクジェットプリンタなどの印刷では通常 CMYK の4色が用いられるが、織物では紙媒体に相当する構造物も糸で作られるため、その分必要な色数も増加する。図 1-04 (b)の例では、経糸に白黒の2色、緯糸に白、黒のほか、イエロー、黄緑、赤、青の6色、合計8種類の色系が用いられている。また印刷ではわずかな面積の色に対してはその部分に必要な量のインクが消費されるだけだが、織物の場合、仮に織物上に露出する箇所が1か所だけの色系でも、緯糸方向には幅の長さ分が消費される。このため、フルカラーに近づけようとするれば単位面積あたりに必要な色系は増大し、前述したリスクが生じる。

二つ目は、写真織の呼び名のおり写真と見分けがつかないほど精度を高めた写真織は、織物である必要性が希薄になってしまうことである。近年、織物生地へのインクジェットプリントの技術が高まっており、ファッション業界でも利用機会が増大しつつある^[1-13]。そのため、意匠に写真調の表現が必要な場合にインクジェットプリントではなく、あえて厚さやコスト面でリスクの高い写真織を選ぶ理由はますます減ってしまうと考えられる。

以上から、本研究はデジタルジャカードの分野ではあるが、フルカラーの写真織を志向しない。上の二つのリスクポイントに対応する、次の二つの方向性によって研究フィールドを

定めることとする。

一つ目は、色系の数の少ない織物による可能性を模索することである。ファッション業界、インテリア業界など装飾性の高い織物を要する分野においても、経済性と効率性から、経糸と緯糸の色数が少ないものの方が圧倒的に多いと考えられる。また、ファッション業界では一つの織物商品に対して、配色展開と呼ばれるカラーバリエーションを数種類作成することが一般的である。そのため、写真そのもののようなフルカラー表現よりも、モノトーンや、例えば白・黒・赤の3色だけで実現される限定的なカラー表現の方が、僅かな色系の変更で配色展開が可能となるというメリットを持つと考えられる。そこで、本研究では少ない色数でのカラー表現で活用できる技術とすることを考慮しつつ、まずその基盤となる技術として、モノトーンでの表現における課題を解決する方向で検討を進めることとする。

二つ目は、組織的ディザ法の利用において、織物組織パターン、特に縞子織のパターンに着目し、そのパターンの活用によるテクスチャ表現に重点を置くことである。それは前節で述べたように、織物組織パターンを生かすことが、ペン画におけるタッチに相当するように、階調表現だけでなく、質感や立体感などの情報を付加しうると考えるからである。そうした規則性のあるパターンを重視することは、織物におけるノンリアリスティックレンダリング表現を意識することということもできる。

以上の観点を併せて、本研究の目的を次のように規定する。

本研究の目的は、デザイナー支援の観点から、ジャカード織物の表現の幅を拡張し選択肢を増やすため、連続階調を表現する技術として組織的ディザ法に着目し、織物の基盤となるモノトーン表現について現状を分析し、その課題を解決する新しい技術を開発することである。また、織物上に再現する対象となる入力画像については、最終的には技術が活用される織物デザインの現場においてデザイン画やあらかじめ処理された画像が用いられることを想定しているが、研究過程においては技術的に難度の高い自然画像を使用し、織物上への忠実な再現を可能とすることを目的とする。

1-3 論文の構成

第2章では、まず本研究の技術的な前提となる伝統的なジャカード織物の技法について概観し、またデジタルジャカードや、連続階調を表現する手法に関する関連研究について述べる。

第3章では、本研究の中心的な要素として、組織的ディザ法による織物上への連続階調を実現する技術であるステッピングディザ法について提案する。これをもとに第4章以降では本研究によるステッピングディザ法の拡張について述べる。

第4章では、ステッピングディザ法によるジャカード織物組織生成について、緩やかな階調変化の領域で発生する課題であるアーティファクト（意図しない繰り返しパターン）の発生に着目し、これを解決する手法として OSD 法、RSSD 法を提案する。

第5章では、第3章で提案したステッピングディザ法及び第4章で提案した OSD 法、RSSD 法では考慮されていなかった、マスクサイズより小さな微細構造の保存について着目し、これまでの手法に比較してより良く微細構造を織物上に再現する手法、IFT 法を新たに提案し、またその優位性を製織試験によって示す。

第 6 章では、これまでステッピングディザマスクの基本的な構造として用いてきた繻子組織について、利用可能な組織パターンのバリエーションの範囲と選択基準について確認し、繻子線という階調表現以外の情報の再現について論じるとともに、変則繻子についてタッチ、質感の違いを表現する活用手法を提案する。

第 7 章では、織物構造の緊密さを保ちつつコントラストを高める手法として、歴史的なステッピンググラフで用いられている技法を取り上げ、ステッピングディザ法及び OSD 法をこれに応用する新たな手法を提案し、その有効性を示す。

終章では、本研究の結論と今後に残された課題について述べる。

第2章 伝統技法と関連研究

本章では、まず本研究の技術的な前提となる伝統的なジャカード織物の技法について概観し、またデジタルジャカードや、連続階調を行う手法に関する関連研究について述べる。

2-1 ジャカード織物による意匠の表現技法

2-1-1 織物と綜統

織機の機構の概念図を図 2-01 に示す。織物は、水平に並列させて”おまき” (図 2-01 A) に巻かれた多数の経糸を、(1) 綜統 (そうこう) (図 2-01 C) によって選択的に持ち上げることで上下の 2 群に分け (図 2-01 D, G)、(2) その間に経糸と直交するように緯糸を挿入し、(3) 開口を閉じながら、緯糸が一定の密度となるよう筈 (おさ) (図 2-01 H) を使って緯糸を巻き取り方向へ移動させる、という 3 つの動きによって経糸と緯糸を交絡させ、平面状の構造を作り上げる。これら 3 つの動きを(1)開口、(2)緯入れ、(3)緯打ちと呼ぶ。

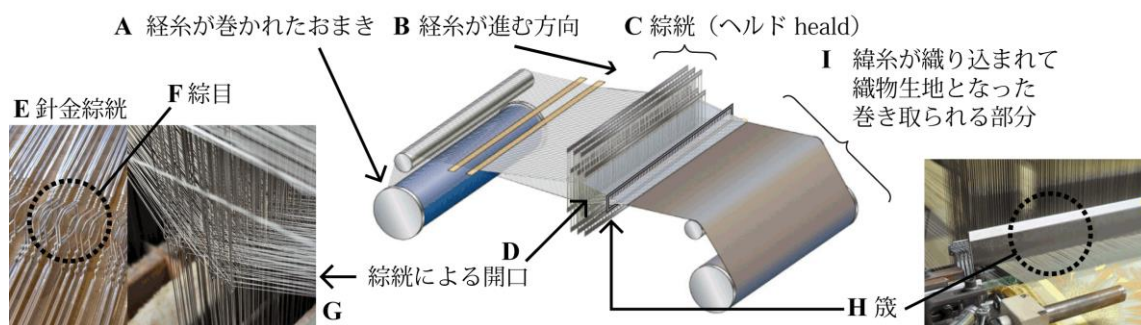


図 2-01 織機基本構造

経糸を上下に開口させる装置を綜統 (図 2-01 C) といい、経糸は針金綜統 (図 2-01 E) の中央にある綜目 (あやめ) (図 2-01 F) に 1 本ずつ通され、綜統によって上下に動いて開口 (図 2-01 D, G) を作り、これを緯糸の通り道とする。

織機でどのような織物を作ることができるかはその織機の綜統の機構に依存している。織機のうちでも代表的なドビー織機では、綜統はヘルド (heald) と呼ばれる矩形のフレーム (図 2-01 C) に数百～数千の針金綜統 (図 2-01 E) を固定したもので、織物上に現出可能な織物組織の種類は綜統枚数 (ヘルドの数) によって制限される。綜統枚数は枚数が多いほど使用できる織物組織の多様性が増すので、綜統枚数はドビー織機の仕様のうち最も重要な指標のひとつとなっている。一方、綜統枚数が多くなるほど経糸の開口が困難となるため、綜統枚数には限度があり、一般的に用いられるのは 2 枚～24 枚、最大でも 48 枚程度である。このようにドビー織機では綜統枚数の制限があるために、一定以上の複雑な柄を織物組織によって実現することができない。そこで経糸制御の自由度をより高める機構が探求された結果、ジャカー

ドビー織機が誕生することとなる。

2-1-2 ジャカード織物について

ドビー織機とジャカード織機の違いは、綜統の構造である。ドビー織機とジャカード織機の写真を図 2-02 に示す。ジャカード織機では綜統はヘルドに固定されておらず、ジャカード機構（図 2-02 (c)の上部にある装置）から直接、通糸（つうじ）という糸によって吊るされて経糸につながっている（図 2-02 (d)）。

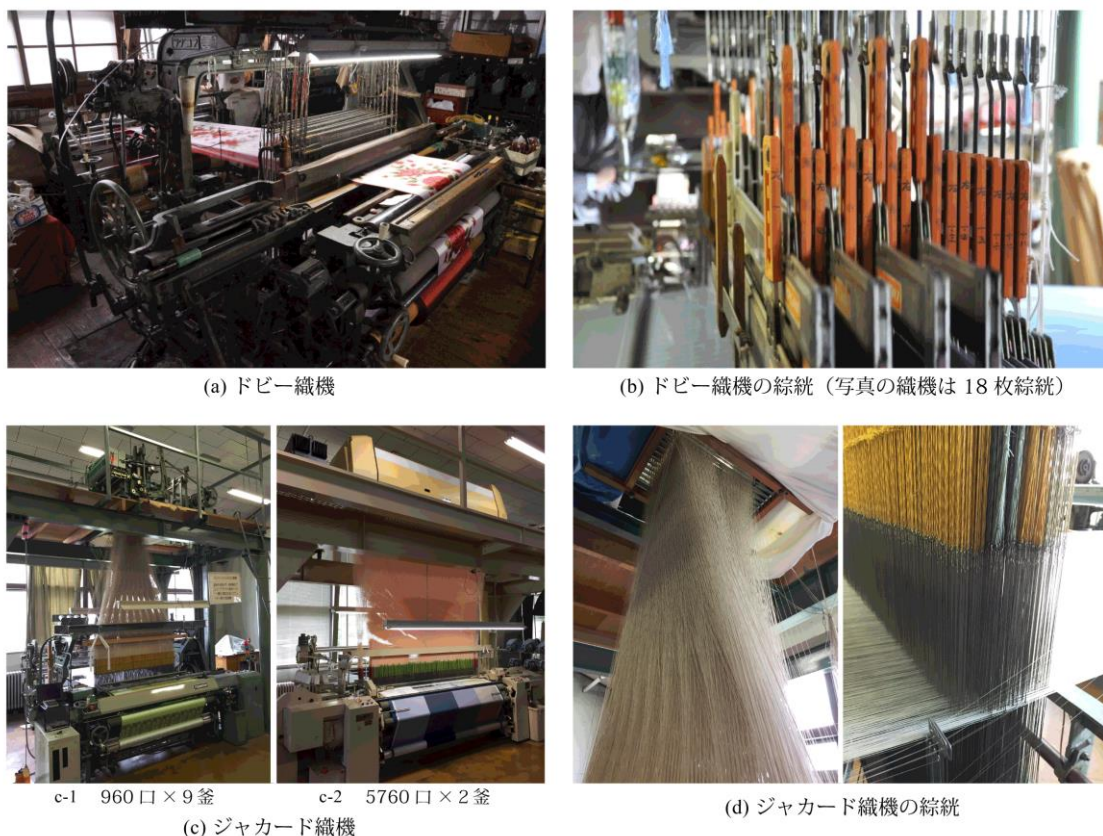


図 2-02 ドビー織機とジャカード織機

図 2-02 (d)のジャカード織機の綜統は 960 本の経糸を個別に開口制御することが可能なもので、図 2-02 (b)の綜統枚数 18 枚を持つドビー織機に比べてはるかに複雑な制御が可能となる。

960 本の経糸を制御できる織機の属性を 960 口と呼ぶ。960 本の経糸は非常に多い数にも思えるが、それでも図 2-02 (d)の織機の経糸総本数 8,640 本の 9 分の 1 に過ぎない。そこでこのジャカード織機では 960 本ずつ 9 セットの経糸が同じ動きをするようにして全経糸をカバーしている。このセッティングを 960 口 9 釜という。この織機で織ることのできる意匠の繰り返し単位となる最大の幅は 960 本分で、それを釜口（かまくち）あるいはリピート幅と呼ぶ。

このような現代の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）^[2-01]にあるとされる。それらは経糸を選択的に引き上げる役割を担う人

を織機フレームの上部に配したものであった。しかし意匠の複雑さが増すと生産効率が悪化し人為的ミスが増えるためその自由度には限りがあり、またヨーロッパではドロウ・ボーイと呼ばれた児童労働者の負担が問題視されていたため、機械化の試みが繰り返されてきた[2-02]。

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進んでいた経糸の制御を、パンチカードの読み取り機構に置き換えることによって自動化に成功した。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。

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。例えば織物組織図では経糸が上のときに黒、緯糸が上の交差は白として記述されるが、ジャカード織物用のパンチカードである紋紙の上では、黒と白は穴を開けるか、開けないかで示される。図 2-03 (a), (b)はそれぞれドビー織機、ジャカード織機により表現された意匠の例を示している。図 2-03 (c)は、織機にセットされた状態の紋紙を示している。紋紙は緯糸一本分の開口に必要な情報が一枚のカードに開けられた穴の配置で記録され、それらが必要な枚数だけ糸でつながられて、キャタピラのように織機の読取機構に順次送られていく。このパンチカードを使った情報の記録、読取りの機構はやがて C.バベッジによる階差機関のアイデアとなり、コンピュータの誕生にもつながってゆくこととなった[2-01][2-03]。

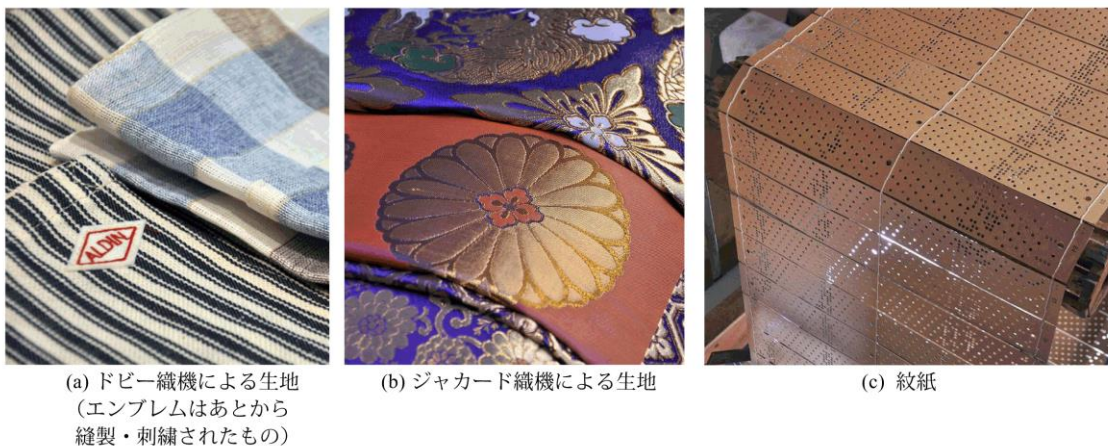


図 2-03 ドビー及びジャカード織機による生地と紋紙

2-1-3 ジャカード織物設計と領域分割

ジャカード織物では、一般的に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タイリングすることで織物上に柄を現出する(図 2-04)。図 2-04 (d)に示したジャカード織物パターン例では、「&」の形状の内側と外側の二つに分割された領域に、2 種類の縞子織がタイリングされている。図 2-04 の a-3, b-3, c-3 に示した完全組織とは、特定の織物組織パ

ターンの最小基本単位を意味し、完全組織はいずれも 1 : 1 の縦横比を持つ。以降、本論文で織物組織のサイズというときには、この完全組織の一辺に含まれるマス目の数を指すこととする。

ジャカード織物設計においては、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、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、デザイン画などの画像を減色し、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2つからなる。図 2-05 は、織物設計に用いられる意匠図の例を示す。

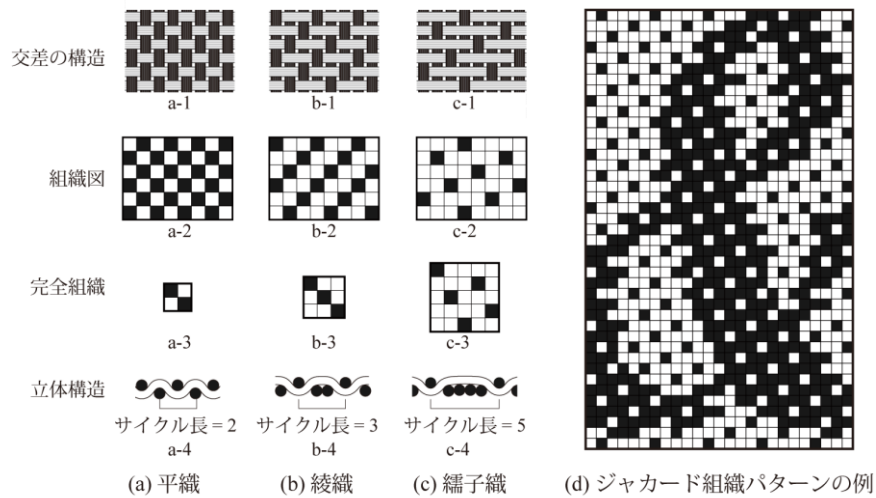


図 2-04 織物組織図と三原組織, ジャカード組織パターン



(a) 19 世紀に作られた手書きの意匠図
(株) 榎田商店所蔵

(b) コンピュータでの意匠図の編集
(宮下織物 (株))

写真 blog 「シケンジョテキ」

<http://shikenjyo.blogspot.jp/2015/01/5dec2014.html>

図 2-05 意匠図による織物設計

2-1-4 多丁杼織物の設計

序章で述べたように、織物の意匠は織物組織と色糸の組み合わせによって表現される。多くの色を現出させようとするときには、経糸及び緯糸の色数を増やす必要があり、経糸と緯糸では、色糸の交換が容易な緯糸の色を増やす事例が多い。経糸及び緯糸の色数の組み合わせの例を図 2-06 に示す。また緯糸の種類は「丁」という単位を使い 1 丁、2 丁、3 丁と数え、それぞれの緯糸を指すときは 1 丁目、2 丁目、3 丁目と呼ぶ。また複数の緯糸を操作可能な織機は多丁杼織機とも呼ばれる。

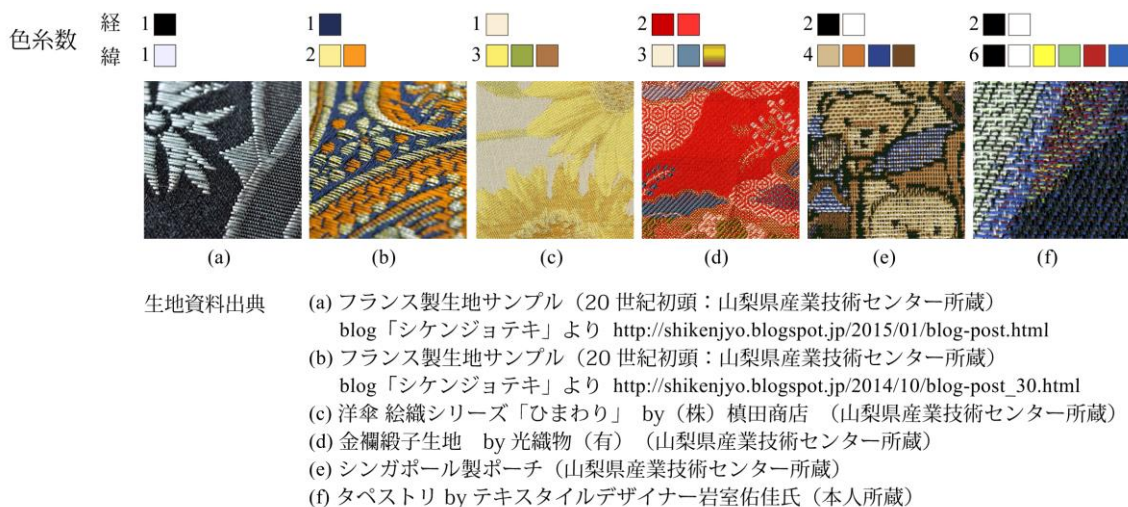


図 2-06 経糸緯糸の色数と織物の例

緯糸の色数が複数あり、それぞれに役割が異なる場合の織物組織の設計は、緯糸 1 丁目ごとの組織図を考案しこれを統合して行う必要がある。その際の設計作業の概念を図 2-07 に示す。

図 2-07 (a), (b) はそれぞれ 1 丁目 (水色), 2 丁目 (ピンク) の緯糸が織られる際の組織図で、織るときには図 2-07 (c) の組織図のように 1 丁目ごと交互に織られることで図 2-07 (d) のような結果が得られることになる。1 丁目の水色の糸は、背景部分で露出するように設計されているため図 2-07 (a) の組織の背景領域では白いマスが多くなっており、2 丁目は逆に中央の丸い領域で白いマスが多くなっている。組織図の白いマスは緯糸が露出する箇所を示しているため、背景では水色、丸ではピンクの糸が露出する。このように糸が連続して露出する状態を糸の「浮き」と呼び、例えばある色の緯糸だけが長く浮いた箇所では、その緯糸の織物の外観に与える影響が経糸やほかの緯糸に卓越し、その緯糸が織物上の意匠の色を担って表現することとなる。

次に他丁杼織物での意匠図の概念について説明する。前述したように図 2-07 (a), (b) の 2 色の緯糸はそれぞれの役割にしたがって組織図が定義されているが、1, 2 丁目がどのように経糸と交差しているかの全容は、それらを統合した図 2-07 (c) の組織図でなければ厳密には理解できない。しかしこの状態での編集や修正作業を行うことは、パターンが複雑すぎるため不可能に近い。そこで実際の織物設計では多くの場合、図 2-07 (e) のように数色で表現された”意

匠図”と、それを二値情報に変換するコード表に相当する図 2-07 (f)の”メートル表”を使って作業が行われる。図 2-07 (e)の意匠図は 1, 2 丁目の組織図の色を変えてオーバーラップしたもので、双方の緯糸の組織の仕方とその相互作用を容易に読み取ることができる。意匠図の編集が終わると意匠図に用いられた色は図 2-07 (f)のメートル表のコードを使って組織図中の白・黒に変換される。以上がジャカード織物の紋処理と呼ばれる設計手順の概略である。

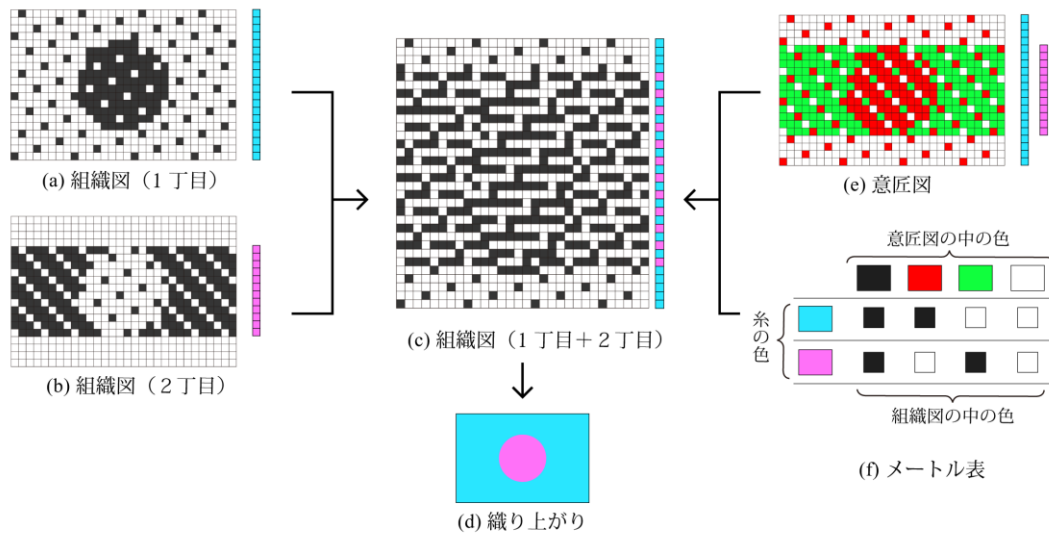


図 2-07 意匠図の仕組み

なお本研究は、序章で述べたように緯糸 1 丁を使ったモノトーンの織物を主たる対象として行ったものであるが、複数の色系を使ったカラー表現も技術の応用範囲として視野に入れたものである。それは、図 2-07 (a), (b)に示したように多丁杼織物を作成する場合でも基本となるのは緯糸 1 丁ごとの組織図であるため、モノトーンの織物で得られた研究成果は多丁杼織物の設計にも活用可能となるからである。

2-1-5 画像処理技術の導入と織物制約について

本研究は、ジャカード組織パターンの生成に組織的ディザ法を中心とした画像処理技術を導入するというアプローチによって展開することはすでに序章で述べたとおりである。ここで、印刷やデジタル画像では問題にならないが、織物では重要な制約となる条件について記すことにする。

織物組織をもとに形成される生地 of 堅牢性や美的な外観を保持するため、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) (1)を満たす範囲で交差の間隔がなるべく長いこと。

これらのうち(1)が守られない場合には糸の浮きが長すぎることで糸が外力によって損傷したり引っ張り出されたりという弊害が起こり、(2)では、糸の浮きの短い箇所と長い箇所が混在することでノイズ状の外観をもたらし、織物組織パターンの規則性を損ねることになる。

もちろんデザイナーがノイズ状の外観を望む場合には(2)を無視する場合もあり得るが、本研究は織物組織の規則性に重点を置くため、条件(2)を重視する。

ここでは、これらを織物制約と呼び、(1),(2)をそれぞれ織物制約 1, 2 と呼ぶ。

2-1-6 縹子織について

ここで織物組織のうち、本論文で中心的な役割を担う縹子織について述べる。縹子織は図 2-04 (c)に示すように、組織図中に黒で示した組織点の周囲いずれの方向にも隣接する組織点がないように配置されたものである。図 2-04 (c)に示した 5×5 の大きさの時に最低限必要な綜統の枚数が 5 枚であることから、織物組織のサイズが 5 である縹子組織は通常「5 枚縹子」呼ばれる。縹子織の定義は明確にはされていないが、基本的には次の二つの条件を満たす場合に縹子織とされる。

(1) 各行・列に一つずつ組織点を有する。

(2) すべての組織点はいずれの方向でも他の組織点と隣接しない。

縹子織は基本的にサイズ n と飛び数 m の二つで定義でき、サイズ n はドビー織機の場合、経糸を上下に開口させる綜統の枚数に依存する。飛び数 m は組織点同士の間隔を示す数値で、図 2-08 に示すように、座標 (x, y) にある組織点からみて次の行の組織点の座標は連続した組織図中で $(x + m, y + 1)$ 、完全組織では $((x + m) \bmod n, (y + 1) \bmod n)$ と表すことができ、 m が n と互いに素であるときに縹子織の条件(1), (2)を満たすことができる。 n と m の組み合わせによる縹子組織のバリエーションの例を図 2-09 に示す。また、組織点の白と黒が逆転した場合も同様に縹子織の条件を満たすことができ、このときは白が組織点となる。白と黒が逆転して黒の方が支配的な縹子組織は、綜統が経糸を開口させるときに、持ち上げる経糸の方が多くなるため、「重口 (おもくち)」縹子と呼ばれ、逆に白の方が多いとき「軽口 (かるくち)」縹子と呼ばれる。組織図の定義から、軽口縹子で織ると緯糸が多く露出する織物となり、重口縹子は逆に経糸が多く露出する。その比率は $1 / (n - 1)$ となるため、サイズ n が増加したとき、組織図中の白と黒の数の比は増加し、織物全体で表現できる明暗のコントラストが高まることになる。またサイズ n が増加すると織物の面積あたりの組織点は減少するため、織物の構造は緩くなる。構造が緩くなると、緯糸の密度を高めることが可能となり、図 2-10 に示すように経糸と緯糸の露出する比率の差がさらに高まる傾向にある。これは図 2-10 (b)に示した綾織と縹子織の比較からわかるように、朱子組織では組織点が隣接しないことによって緯糸による経糸の掩蔽が起こるためである。緯糸密度の向上は、同時に面積あたりの情報量を増やすこととなるが、一方でサイズ n が大きくなると、面積あたりの組織点の減少とともに情報量は減少することとなる。このように分解能及び織物構造の緊密さと、明暗コントラストはトレードオフの関係にある。そのため、本論文の主題である織物上での画像の再現を考慮したとき、ユーザはこのことを考慮して適切なサイズ n を決定する必要がある。

本論文で縹子組織が中心的な役割を担う理由は、縹子組織が最も経糸と緯糸の比率のコントラストを高めた織物を作ることができるためである。このコントラストが高いということは、経糸と緯糸の比率を制御して表せる色あるいは輝度のレンジが広いということを意味し、1-2-2 節で述べた本論文の主題である画像を織物上に忠実に再現するという目的に合致する。

なお、織物設計では通常左下を原点として飛び数を上方向にカウントするが、本論文では

便宜上、左上を原点とし、右方向に飛び数をカウントすることとする。

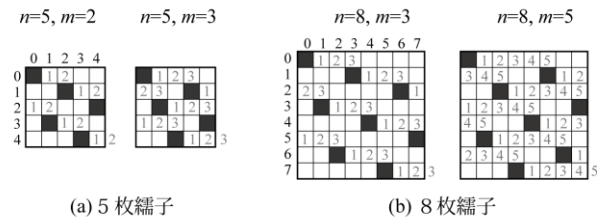


図 2-08 縴子組織と飛び数

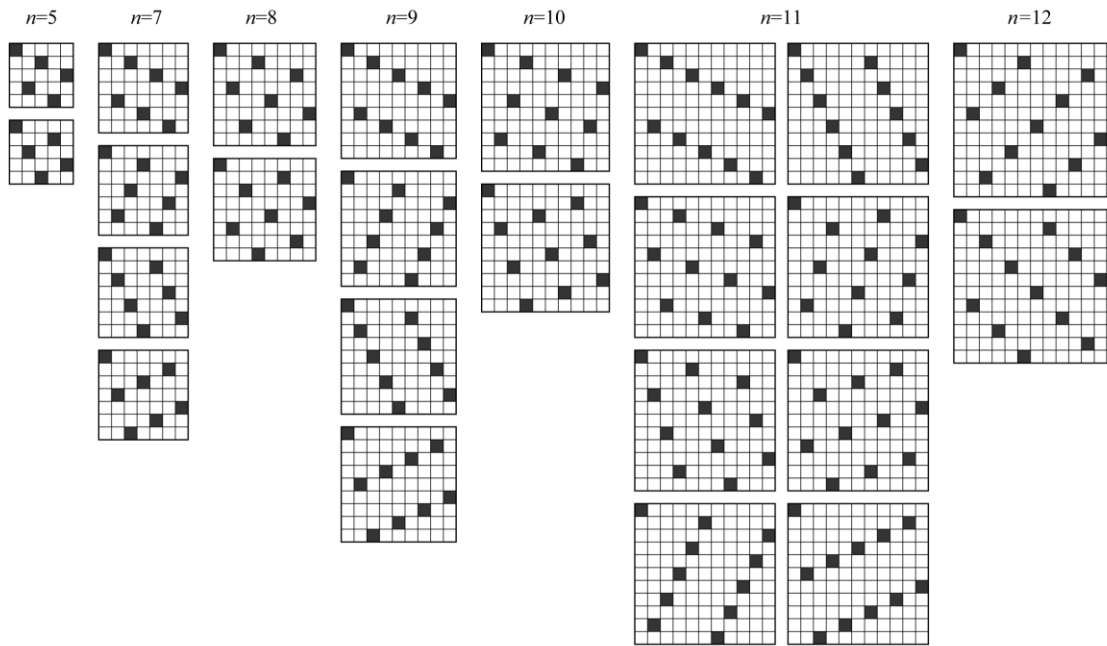
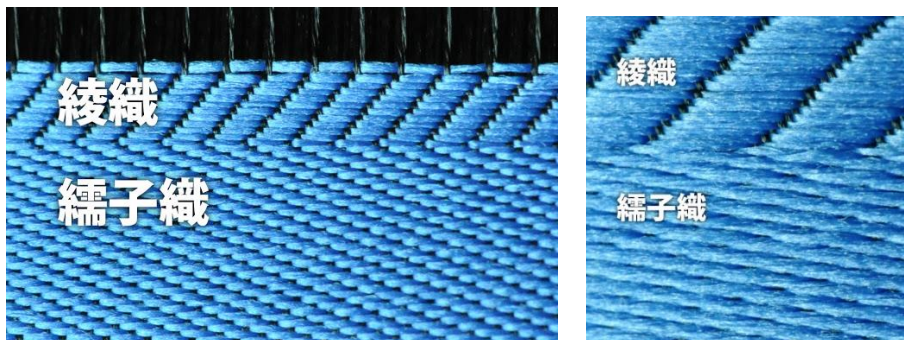


図 2-09 縴子織のバリエーション



(a) 8枚縴子(n=8)と綾織(n=8)の比較

(b) 16枚縴子(n=16)と綾織(n=16)の比較

図 2-10 緯糸による経糸の掩蔽効果

画像出典 blog「シケンジヨテキ」 by 山梨県産業技術センター (http://shikenjyo.blogspot.jp/2016/10/blog-post_28.html)

2-2 織物上での連続階調表現の事例及び関連研究

2-2-1 伝統的な連続階調の表現

伝統的なジャカード織物は前節で述べたように、領域分割された図案の領域それぞれに異なる織物組織をタイリングし、隣接する領域との違いを明らかにすることで意匠を表現するので、通常はそれぞれの領域内では単一のパターンが繰り返されることとなる。しかし織物上で表現する意匠が写実性や立体感を求められる場合などに、連続的に変化させた組織の並置によって陰影をつけて疑似的な立体感を強調するケースがある。こうしたとき多く用いられるのが、増点法と呼ばれる手法である。

増点法は縞子織の組織図中の白：黒比を段階的に変化させることで、生地表面に露出する経糸：緯糸比率を変化させ、織物上で連続的な階調変化を表現する。図 2-11 に示すのは 8 枚縞子による増点法の例である。第 1 章の図 1-05 (a) に示した例も、図 2-11 と同様の組織パターンによって織られている。

組織サイズを n とすると、図 2-11 (a) に示すように組織点を n 個ずつ変化させることで $n-1$ の段階を表現する方法が一般的である。増点法は同じ縞子織のパターンをわずかずつ変化させることで $n-1$ 段階の連続的な階調を表しているが、図案を領域分割してタイリングしている点では、通常の伝統的なジャカード織物の設計手法と大きく変わらない。

なお、経糸を黒色、緯糸を白色の糸を用いると、生地表面の外観の黒：白の比は組織図の黒：白の比と概ね等しいものになる。本論文では簡単のため、以降断りが無い限り経糸に黒色、緯糸に白色を割り当てることを前提とする。なお「概ね等しい」としたのは、前節で述べたように用いる糸の太さや密度の条件により経糸・緯糸が一方を掩蔽する状況が生まれ、組織図の外観と異なる結果をもたらす場合があるためである。

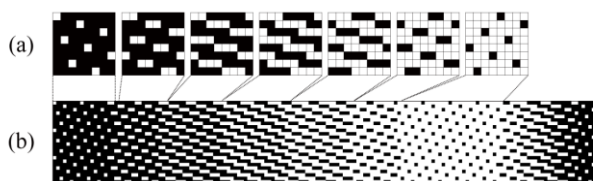


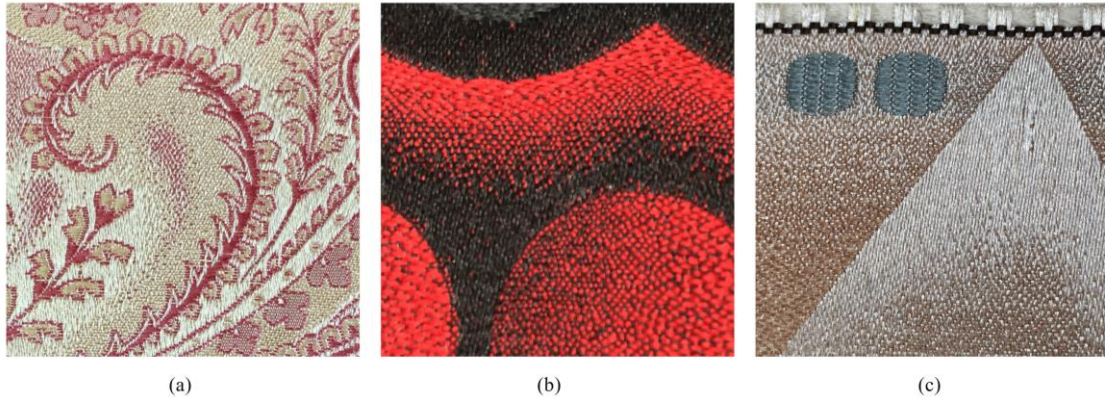
図 2-11 増点法による連続階調

図 2-11 (b) は 7 段階に領域分割したグラデーションの各領域に、図 2-11 (a) に示した 7 つの組織パターンを適用したものである。図 2-11 (b) の右端を見ると、黒→白への階調変化は連続しているように見えるが、図 2-11 (b) の左端～中央付近を見ると、領域同士の境界がどこに位置するかが、段階的に変化する組織パターンの境界として判別できてしまっている。これが段階数 $n-1$ に対して階調変化が十分に緩やかな場合、増点法で連続階調を表現しようとするときの課題である。

このとき、組織点を n 個ではなく 1 個ずつ変化させれば段階数は $(n-1)^2$ となり、 $n=8$ のときで 7 倍以上の段階数となって、より微細な階調変化が可能になる。しかしその場合には数多

くの組織パターンを扱う煩雑さが課題となる。

増点法のほかにも連続階調を表現する手法には図 2-12 のような例がある。これらはコンピュータ登場以前に作られたものであるため、織物設計は手作業によって行われた。これらのサンプルを見ると増点法のような明確な規則があるわけではなく、職人の手で自然なランダム性を持たせた階調表現が行われており、その設計には膨大な労力を要したことが伺える。



生地資料出典 (a)～(c)とも フランス製生地サンプル (19 世紀～ 20 世紀初頭：(株) 榎田商店所蔵)

図 2-12 増点法以外の連続階調の例

2-2-2 デジタルジャカード

1970 年代以降、コンピュータの普及に伴って画像のデジタル処理が容易になるとともに、ジャカード織物にもデジタル技術の導入が進んだ。従来の紋処理のデジタル化とともに、より積極的にデジタル技術を導入することで、新しい表現内容を模索する動きも生まれ、様々な技法による作品が発表されてきた。従来の手作業による手法では、絵画のような連続する多様な階調や色調の変化を再現するような織物の設計には膨大な労力が費やされたが、これをコンピュータ処理することで飛躍的な省力化が行えるので、新しい表現内容としては写真や絵画調の意匠を織物上で再現するものが注目された。

それらは一般的にはデジタルジャカード、また日本では写真織などと呼ばれ、連続的に変化する階調や色彩を織物上に表現した作品が、織物職人やファイバーアーティストの手によって発表された。

日本では、山口英夫が 1990 年代以降、織物業を営む傍らアーティストとしてデジタルジャカード作品を発表し、米国メトロポリタン美術館に収蔵されるなど高い評価を得ている^[2-01]^[2-04]。山口氏の作品はモノクロのものからフルカラー表現に発展し、印刷のインクに相当する CMYK の 4 色、モニタ表示の RGB にあたる 3 色、そして紙媒体に相当する白を加えた計 8 色でカラー写真調の織物作品を織る技術を開発した。山口はその技術をフォトテックス PHOTOTEX (登録商標) と名付け、アート作品のほか、タペストリや緞帳などにも活用している。電子ジャカード織機を使ったテキスタイル・アートのパイオニアとされるアメリカのテキスタイル・アーティスト、Lia Cook は、1997 年からデジタルジャカードによる白と黒の糸で巨大な肖像画を織り上げた作品“子供時代肖像画”シリーズなどのアート作品を発表し、

多くの受賞歴を持つ^{[2-01][2-05]}。その他、デジタルジャカード作品を発表しているテキスタイル・アーティストやテキスタイル・デザイナーとしては、Louise Lemieux Bérubé^{[2-01][2-06]}、Grethe Sorensen^[2-07]、Jon Pettersen^[2-08]、Kelly Thompson^[2-09]、Phillip Stearns^{[2-10][2-11]}、Julie Holyoke^[2-12]、Kristina Daukintytė Aas^[2-13]などがある。またオーダーメイドによるデジタルジャカードのタペストリ、緞帳などの制作を行う企業には、日本では Y's TEXTILE^[2-14]、nunoanuenue^[2-15]、坪由織物株式会社^[2-16]、株式会社丸萬^[2-17]などがある。

以上のように、モノクローム及びカラー写真のような意匠を織物上に表現するデジタルジャカードの技法はこれまで約 40 年にわたって様々な手法が提案され、コンピュータ技術によるこれまでになかった表現手法によって織物技術の可能性を広げてきた。以上の例からデジタルジャカード技術が活用される分野を見てみると、アート作品やタペストリ、緞帳など、数十 cm から数 m という大きな面積の織物生地が使われるものが多いことがわかる。その理由としては、次のような技術上の制約が考えられる。それは、織物上での色表現は並置混色であることから、複雑な階調や色調を高い精度で再現しようとするならば、ある一つの階調や色調を表現する画素に相当する単位面積あたりの色糸の数を増やさなければならないが、それには糸の密度を増やすこと、単位面積を増やすことが求められるという制約である。そのため、より複雑な意匠や滑らかな階調や色調の変化を求めれば、なるべく糸密度が高く、そして大きな面積の織物生地の事例が多くなっていくことが考えられる。また、アート作品、タペストリ、緞帳という用途が散見されることは、デジタルジャカードの多くが写真や絵画に基づく表現であることに起因すると考えられる。すなわち、写真や絵画というのは多くの場合、矩形の一定面積で完結した表現手法である。一方、通常の織物生地がファッションやインテリア用の素材として用いられるときには、シームレスに連続するよう調整された意匠が幅方向、長さ方向にタイリングされて繰り返されたものが求められる。写真や絵画のような表現方法を織物用にシームレスにリピートさせることも試みられているが (図 1-05 (c))、それよりもアート作品、タペストリなどのように繰り返し柄の一部ではなく、一定面積を持った矩形で完結した用途が多いのは自然であると考えられる。

2-2-3 ステッピングディザ法

本研究ではディザ法の一つである組織的ディザ法に着目し、デジタル技術を用いたジャカード組織生成手法としてステッピングディザ法を提案する。ステッピングディザ法は、ディザ法に用いられる閾値マトリクスの閾値配列に縞子組織の構造を適用したステッピングディザマスクを使って入力画像の二値化処理を行い、入力画像の連続階調を縞子組織の連続的な変化として再現し、シームレスな連続階調を織物上に表現するものである。^[2-20]

ステッピングディザマスクは各行で緯糸方向に閾値を 0 から 255、255 から 0 へと階段状の周期変化を持たせ、二値化結果となる縞子組織のバリエーション数が最大となるよう個々に異なる閾値を持たせる。これによって組織サイズ n のディザマスクサイズのエリアごとに $(n-1)^2$ 段階の階調数を再現することが可能となり、 $n=17$ では 8bit で表せる最大の 256 段階の階調数を再現することができる。ステッピングディザ法の詳細については、本研究の提案手法の中心的な要素として第 3 章で述べることとし、次節では関連研究について紹介する。

2-2-4 関連研究

増点法の拡張

増点法を応用したアプローチでは Ng と Zhou による手法がある^{[2-18][2-19]}. Ng らは増点法で紹介した縷子織の組織点を増減させたバリエーションのデータベースを構築し、入力画像の輝度や色調に合わせて配置することで写真調の表現を可能とした. Ng らの手法は、伝統的な増点法では組織サイズを n としたとき組織点が n 個ずつ変化させるため $n-1$ だった段階数を、図 2-13 に示すように組織点 1 個あるいは 2 個単位で変化させることによって、より多くの段階 (gamut pattern) に分解し、より微細な階調変化を可能とする手法を提案した.



図 2-13 Ng らの用いた縷子組織の階調変化

また、色分解した入力画像のチャンネル毎に対応する色糸を割り当て、それぞれのチャンネルでの階調変化に対応した組織パターンを適用したものをレイヤーとして用意し、これを統合することでフルカラー表現を行う手法を提案した. Ng らは表現可能な階調数を増やすため、 16×16 、 24×24 など大きなサイズの縷子組織を用い、各レイヤーで数十段階の階調に相当する組織パターンを設定することで豊かな色調変化を実現できることを示した.

ステッピングディザマスクの定式化

豊浦らは筆者らの提案した組織的ディザ法に用いるディザマスクの構造を定式化し、任意のサイズ n 、飛び数 m の縷子組織を基本構造としたディザマスクを自動生成して入力画像から瞬時にジャカード組織パターンを生成する手法を提案し実装した^{[2-21][2-22]}.

デジタルジャカードへの領域分割法の導入と領域境界の自動修正

豊浦らはデジタルジャカードに領域分割の手法を取り入れ、領域ごとに異なる種類の組織パターンを基本構造として採用したディザ処理を行う手法を示し、専用のデジタルジャカード用 CAD, "Photo2Fabric"として実装した^[2-21]. これによって各領域がそれぞれ階調表現をしながら、領域ごとのパターンの違いを生かした外観の操作を可能とすることで、デジタルジャカードこれまでにない表現手法を提案した. またさらに領域境界で異なる組織パターンが隣接することによるアーティファクトの発生についても配慮し、グラフ理論を応用して領域境界の組織変化を最適化する手法を提案した^{[2-23][2-24]}.

ランダムノイズの活用

豊浦らは組織的ディザ法が緩やかな階調においてディザマスクのタイリングによる繰り返しパターンを生じさせる問題に着目し、ステッピングディザマスクの階段状構造を保持する範囲でランダム値を取ることで任意の強度のノイズを付加し、二値化結果画像に過剰な規則性が生じることを防ぐ手法を提案した. また入力画像のうち微細な構造を持つ領域ではノイズによる情報の埋没を防ぐため、入力画像の輪郭検出を行ってその部分ではノイズ付加を軽

減することで微細構造を保存する手法を提案した^{[2-21][2-22][2-26]}.

誤差拡散法の応用

豊浦らは入力画像の微細な輪郭線などの構造が組織的ディザ法によって再現されにくい問題に対して、誤差拡散法^[2-25]のアルゴリズムに組織的ディザ法で用いるステップングディザマスクを閾値として適用する手法を提案した。またこの手法によって従来よりも微細構造をよく保存するだけでなく、ディザマスクのタイリングによる過剰な規則性を回避する効果があることを示した^{[2-23][2-26]}。

再現コストの低いカラー選択

豊浦らは従来のデジタルジャカードで複数の色系を用いてカラー表現を行う際に、入力画像の再現に対して寄与率の低い色系も高い色系も同様に消費しなければならないことによる製造コスト増の問題と、少ない色系でカラー表現を行うことのメリットに着目し、入力画像を解析することで再現性に高く貢献する色を貢献度順に選択するアルゴリズムを提案し、デジタルジャカード用 CAD, "Photo2Fabric"に実装した^{[2-24][2-27][2-28][2-29]}。これにより、デザインはマルチカラー表現の再現性とコストに配慮しながら、製造に使用する色数を選択することが可能となった。

絵画調パターンを生成するハーフトニング

Ostromoukhov は写真の連続階調を単色のインクで再現するハーフトニングの手法において、肖像写真を素材とし、密度、太さの違いによって階調を再現するのみならず、線描の向きやカーブを使って人物の立体的な曲面のニュアンスを表現できるようなハーフトンスクリーンを用いてデジタル銅版画といえる表現手法を提案した^[2-30]。この手法では人物の顔や髪、背景といった異なるテクスチャを持つ領域に入力画像を分割し、それぞれの領域の立体形状に合わせて銅版画のストロークを変えるような結果をもたらすハーフトンスクリーンを選択することで、階調表現に加えて領域ごとの素材の違いや立体形状、奥行き感など、様々な副次的な情報を再現できることが示された。この手法は織物を想定したものではないが、豊浦らが織物上に連続階調を再現すると同時に、組織パターンの違いによって質感や奥行き感などの情報を重層的に表現しようと提案したコンセプトにも通じるもので、今後研究を発展させるうえで示唆に富むものであると思われる。

2-3 まとめ

本章では、序章で述べた背景及び研究の位置づけについて、さらに詳細に補足することで、ジャカード織物による織物上への意匠の表出に関する技術的な背景、これまでに行われてきた技術開発や研究によって実現できたことについて確認した。それらを本研究のアプローチと目的に照らしながら総括する。

1) デジタルジャカードについて

フォトリアリスティックな意匠を織物上に再現するデジタルジャカード技術は様々な優れたアート作品や観賞用のタペストリなどに用いられているが、より広い分野で多く用いられるようにするためには、次のような課題があると考えられる。

一つ目は、フルカラー表現を行う際に色系の数を増やさなければならないことによるコス

ト及び生地の厚さの増加という制約である。二つ目は、並置混色という手法から導かれる密度と面積の制約に対応して、より小さな面積でも豊かな再現性を持つ技術開発の必要性である。三つ目は、一般の織物生地に求められるシームレスな連続性を持った意匠に写真調の表現を生かす手法である。

2) ジャカード組織パターン生成技術について

デジタルジャカード技術を簡潔に記述すると、次のように表現できる。デジタルジャカードは、色糸の並置混色という、離散的な信号で連続階調を表現するための量子化に必要なハーフトニング及びディザリング技術である。どのような技術を採用するか、あるいはその技術を意匠に施してから組織パターンをタイリングするのか、それともその技術で組織パターンそのものを生成するのかは、デジタルジャカードの手法によって違いがある。どの手法が優れているかは、どんな目的で織物を作るかによって導かれるだろう。しかし1)で指摘したように、より小さな面積でも豊かな再現性を持つことを目指す観点からは、組織的ディザ法を用いた手法に可能性があると本研究では仮定し研究を行った。その理由としては、1-2-2節で述べたように組織的ディザ法は、用いるディザ行列の設計によって結果をコントロールできる自由度が高いことと、そのパターンによってペン画や銅版画のタッチのように、階調表現と同時に様々な情報を重複した表現が可能であることが挙げられる。

第3章 ステッピングディザ法

本章では、本研究の中心的な技術として、ジャカード織物による階調表現を高度化かつ省力化する手法であるステッピングディザ法について提案する。まず画像処理における基本的な二値化手法である組織的ディザ法について、これを織物に適用することの利点を他の代表的な二値化手法である誤差拡散法と比較して述べる。そしてステッピングディザ法に用いるステッピングディザマスクの定義を明らかにし、製織試験に基づき他の手法に比較した優位性を示す。

3-1 織物組織とディザ法について

3-1-1 組織的ディザ法の適用

従来の増点法、あるいは増点法を拡張して段階を細分化した手法では次のような課題があった。まず基本的な増点法では、階調を表す段階数が完全組織のサイズを n としたとき $n-1$ しかなく、階調変化の緩やかな領域では連続階調が $n-1$ 個の飛び飛びの輝度に分割されてしまうこと、そして段階を細分化すればするほど作業が煩雑化してしまうことであった。これらの課題は、デザイン画を領域分割してそれぞれの領域に組織パターンをタイリングするという、伝統的なジャカード織物の設計手法が持つ制約でもある。そこで本研究では、組織的ディザ法^[3-01]を用いた二値化処理に着目し、組織的ディザ法を用いて画像からジャカード組織パターンを生成する手法であるステッピングディザ法^{[3-02][3-03]}を基礎として議論を進め、この手法の課題を解消して有効性をできる限り高めることを本論文の主題としたい。

3-1-2 組織的ディザ法について

組織的ディザ法は、離散的な値を持つ複数の閾値を配置したマトリクスをフィルターとして画像を二値化し、一定面積単位でみたときの入力画像の輝度をを特定のパターンに従って再現するよう出力するアルゴリズムである。画像信号を $0\sim 255$ としたとき、一定面積のマトリクスに閾値 $t: \{0 \leq t \leq 255\}$ を配置した閾値のマトリクスを用い、これを入力画像サイズにタイリングしたものと入力画素値を比較して閾値処理することで、二値画像を得る。この処理においては、入力画素値は閾値との大小関係により量子化されるため、画素単位で入出力を比較すると輝度が反転する場合が起り、画素単位に見たとき大きな量子化誤差が生じ得ることになる。しかし、図 3-01 (b)に示す Bayer パターンの例のように、 $0\sim 255$ のレンジを均等に分割するよう定められた閾値が空間的に配置されていることによって、出力画像は一定面積で見たとき、入力画像のローカルな輝度を確率的に保つことが可能となる。このように離散的な画素値を持つ一定面積の領域単位で連続した階調を再現する処理をディザ、閾値のマトリクスをディザマスクと呼ぶ。代表的なディザマスクの例として、図 3-01 (d), (g)にそれぞれ Bayer 型、渦巻型のディザマスクと、それらを用いた組織的ディザ法による二値化結果の例を図 3-01 (b), (e)に示す。図 3-01 (b), (e)はそれぞれ図 3-01 (d), (g)に示すディザマスクをタイリングして閾値処理をした結果であるため、二値化結果はディザマスク内に配置された閾値の

配列構造に従ったパターンとなっている。

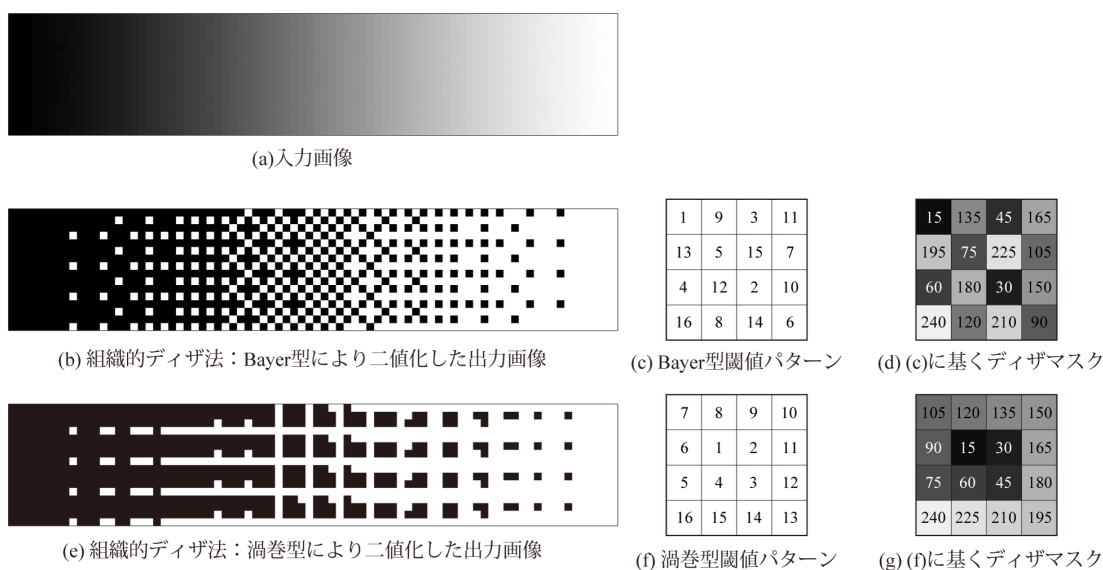


図 3-01 組織的ディザ法と誤差拡散法, 増点法の比較

3-1-3 織物組織の観点から見た組織的ディザ法

本論文の主題である織物組織生成の観点から, 組織的ディザ法を見直してみよう. まず, 図 3-01 に示した例から, 組織的ディザ法の基本的な 5 つの要素に着目する.

- (1) ディザマスクの閾値の配列パターンによって, 出力画像の 0 と 255 の配列パターンが定められる.
- (2) ディザマスクのタイリングで処理されるため, 出力画像を縦横方向に見たとき類似した 0 と 255 の配列パターンがディザマスクサイズで繰り返し出現する.
- (3) 出力画像の一定面積内における 0 と 255 の出現比率によって, ローカルな中間階調が再現される.
- (4) ディザマスクの閾値が 0~255 内で均等な間隔を持つことにより, 入力画像の階調が出力画像に直線関係 (比例関係) をもって再現される.
- (5) 出力画像の階調数はディザマスクのサイズとともに増加し, ディザマスクの一辺の長さを n としたとき $(n-1)^2$ となる.

このうち要素 1 は, 織物組織生成のための手法としてみたとき, 閾値の配列パターンを織物組織パターンに基づいたものに応用できる可能性を包含し, 要素 2 は, 織物制約 1 及び 2 を保つ可能性を示唆する. 要素 3, 4 は組織的ディザ法が織物組織パターンに基づいて中間階調を表現する適性を示し, 要素 5 は基本とする織物組織サイズの調整によって階調数を制御できることを示している. これらは, 組織的ディザ法が織物組織生成を行う手法として適していることを表している.

では逆に図 3-01 に示した組織的ディザ法の例には、織物組織生成の観点からみてどんな欠点があるだろうか。図 3-02 (a), (b)では、Bayer 型、渦巻型による二値化結果について、「■」あるいは「□」が連続して現れる個所を破線で示した。これらの組織的ディザ法による出力画像を織物組織として製織した場合、経糸あるいは緯糸が破線で示したような箇所では長い距離を交差せずに浮いてしまうことによって、織物としての品質を保つことが困難となり、織物制約 1 を満たさないことがわかる。

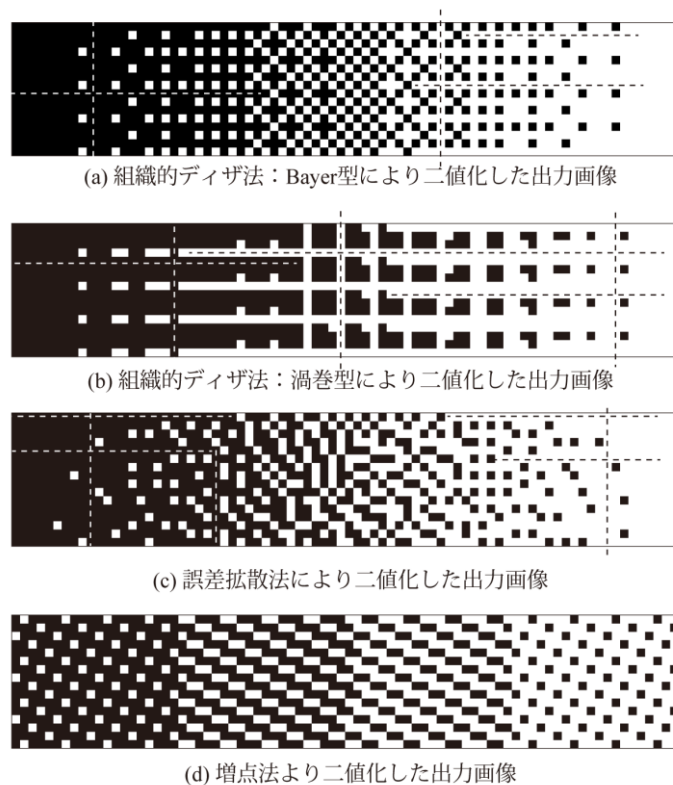


図 3-02 織物組織生成の観点から見た二値化手法の適正

3-1-4 織物組織の観点から見た誤差拡散法

図 3-02 (c)に、二値情報で中間階調を表す組織的ディザ法以外の手法の例として、誤差拡散法^[2-25]による二値化結果を示す。誤差拡散法は、組織的ディザ法と違ってディザマスクは用いず、画素単位で一定の閾値を基準に二値化処理を行う。誤差拡散法では二値化処理の際に、量子化誤差を次のように隣接する画素に配分し画素値を加減処理することによって、一定面積単位で見た時の量子化誤差を減少させる。Floyd-Steinberg の手法では、式 3-1 により星印(*)にある画素の誤差は次のように隣接する画素へ配分される。

$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} * & 7 \\ 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

この手法の例では星印(*)にある画素に 0 あるいは 255 を割り当てた際、量子化誤差として生まれる入力画素値との差分の $7/16 \sim 1/16$ を、それぞれ式(3-1)の星印に当たる画素から見て 7~1 の位置にあたる画素に対し加算する。図 3-02 (c)に示した誤差拡散法による結果では、0 から 255 へ至る中間階調がよく再現されているが、図 3-02 (a), (b)の例と同様、破線で示したように縦横方向に「■」あるいは「□」の画素が連続して並んでおり、また「■」と「□」が入れ替わる間隔は広いレンジに分布している。したがって誤差拡散法も織物制約を満たすことはできない。

また、前章で示した増点法を用い、5 枚縺子を基本として生成した組織を図 3-02 (d)に示す。ここまで見てきた図 3-01 (a), (b), (c)とは異なり、図 3-02 (d)のあらゆる箇所の縦横方向それぞれについて、「■」と「□」の画素はここでは最大 4 つまでの連続しかなく、また「■」と「□」の入れ替わるサイクルは 5 マスに統一されている。ゆえにこの結果は織物制約 1, 2 をそれぞれ満たしているが、しかしながら階調は離散的な 4 段階に限られている。

3-2 ステッピングディザマスク

本論文では組織的ディザ法に増点法の考え方を導入し従来の増点法の段階数を最大化して $(n-1)^2$ 段階とし、また織物制約を満たす二値画像を出力するステッピングディザ法^{[3-02][3-03]}を、研究の中心的な要素として提案する。この節ではステッピングディザ法に用いるディザマスクである、ステッピングディザマスクの詳細と、ステッピングディザ法の従来手法に対する優位性について述べる。

図 3-03 にステッピングディザ法による二値化処理の概要を示す。図 3-03 (a)は入力画像の画素値、図 3-03 (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 3-03 (c)はステッピングディザマスクを用いて図 3-03 (a)の画像を閾値処理した二値化結果を示す。

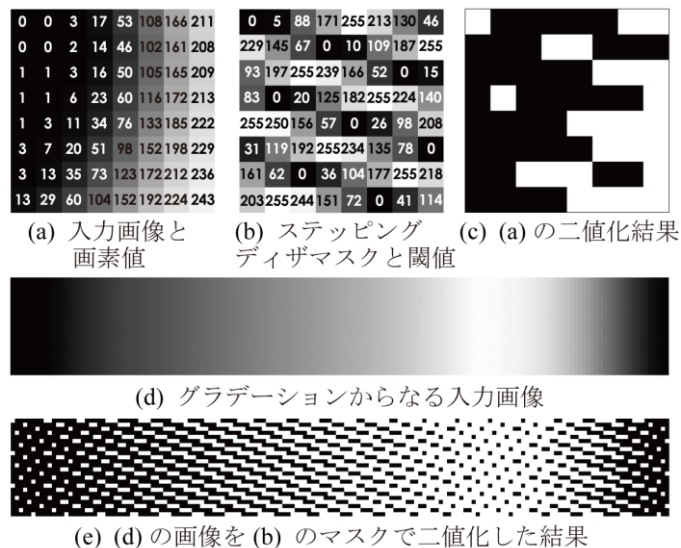


図 3-03 ステッピングディザマスクと二値化結果

3-2-1 ステッピングディザマスクの階段状構造

ステッピングディザマスクは2-1-5節で紹介した制約を満たしつつ、図3-03(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な二値化結果を得るために次のような構造を備える。

まず各行・列に一度の交差が起こるよう0と255の閾値を各行・列に一つずつ含む。これにより $n \times n$ サイズのディザマスクの場合、最大でも n 本毎に経糸と緯糸の交差が起こることが保証され、織物制約1を満たす。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、閾値は緯糸方向に向かって0から255へと増大し、255から0に向かって減少するというサイクルを備える。この閾値の階段状のサイクルにより、緯糸方向での経糸・緯糸の交差の間隔は、図3-04に示すように n 本の間隔毎に1回だけ起こる確率を高める。入力画素の輝度のばらつきが大きい場合には、緯糸方向で n 本の範囲内に2回以上の交差が起こることは防げないが、これにより緯糸が交差する回数は抑制され、糸の交差する間隔の長短の差は一定範囲内に留められるので、2-1-5節で紹介した織物制約2を満たすことができる。

図3-04に、こうした階段状の構造を持つ閾値を備えたステッピングディザマスクによる二値化処理のモデルを示す。図3-04(a),(b)を比べてみると、異なる画素値に対応して出力結果の「■」と「□」の比率は変わっているが、「■」と「□」が一定のサイクルで繰り返し、それぞれの連続する長さはサイクルの長さを超えない結果となっていることがわかる。

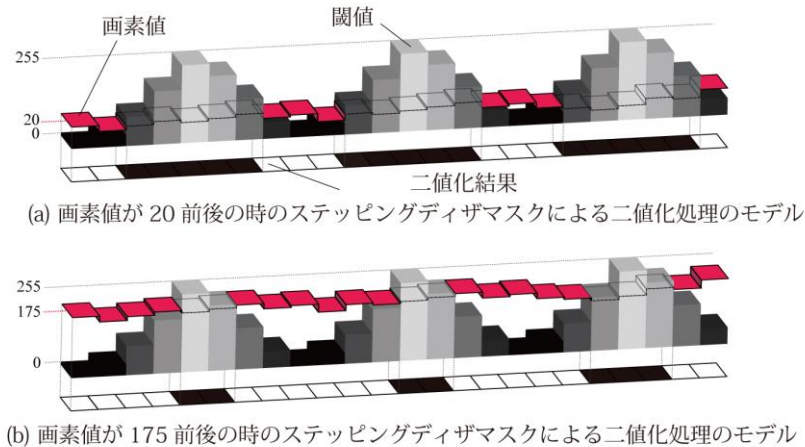


図 3-04 ディザマスク内の階段状の閾値の配置と出力結果

また、閾値が上昇・下降を繰り返す階段状に配置されていることは、閾値が片側方向に上昇する場合に比べて、入力画像の対称性が保存されやすくする効果を持つ。図3-05にこの両者を比較した結果を示す。図3-05(a)の入力画像を、閾値が上昇・下降を繰り返すステッピングディザマスク(図3-05(b))と閾値が一方向にだけ上昇するステッピングディザマスク(図3-05(c))でそれぞれ二値化した結果、図3-05(e)では左右で形状が大きく異なっているのに対して、図3-05(d)では入力画像のシンメトリーな構造がより良く保たれていることがわかる。

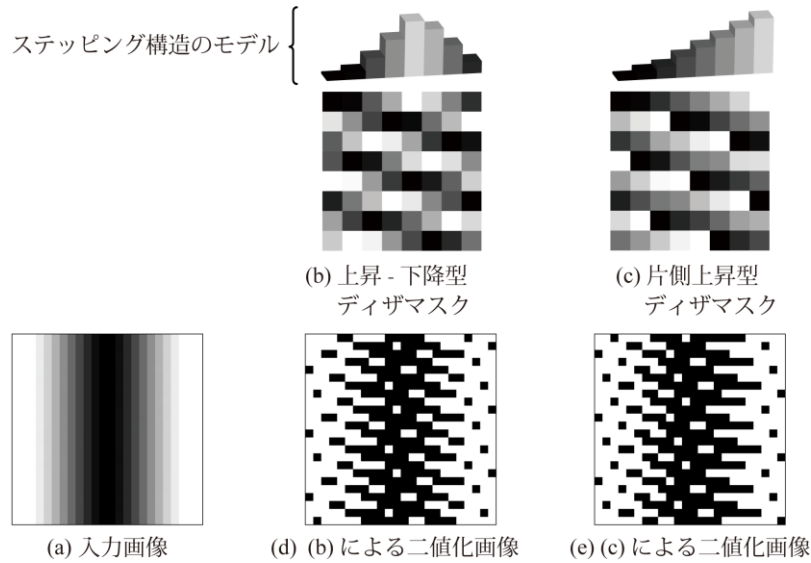


図 3-05 ディザマスク内の階段状の閾値の配置とシンメトリーの保存

なお、縹子組織は緯糸方向、経糸方向のどちらから見ても同じサイクルで組織点が配置するような構造を持っているので、ステッピングディザマスクの階段状の構造は、緯糸方向だけでなく、経糸方向でも同様に成り立つ。第7章で経糸方向の階段状構造をもった手法に触れるが、当面は緯糸方向のステッピングディザマスクを扱うものとする。

3-2-2 ステッピングディザマスクの閾値とスロット構造

$n \times n$ サイズのディザマスク内にある n^2 個の要素は、図 3-06 に示すように $V^0 \sim V^{n-1}$ の n 個のグループに分けられ、図 3-07 に示すように、各行における階段状配列の同じ段数に相当する位置を示すグループであるスロット $S^0 \dots S^{n-1}$ に割り当てられる。閾値のグループのうち、 V^0 はすべて 0、 V^{n-1} は 255 からなるため、閾値の値のみをカウントすると全部で $n(n-2)+2$ 種類となり、最大で 256 種類となる。 $V^1 \sim V^{n-2}$ は、互いにオーバーラップしないレンジを持つように $n(n-2)$ 個の閾値が割り当てられ、また閾値の間隔はできる限り均等に設定するものとする。

スロット $S^0 \dots S^{n-1}$ は前述したように、各行における階段状配列の同じ段数に相当する位置を示すグループである。例えばスロット $S^1 = \{s^1_0, s^1_1, s^1_2, \dots, s^1_{n-1}\}$ は図 3-07 (b) に示すように S^0 の右隣に位置し、そこに閾値のグループ $V^1 = \{v^1_0, v^1_1, v^1_2, \dots, v^1_{n-1}\}$ が割り当てられることになる。以降、スロット内の n 個の位置をスロットセルと呼び、単にスロットと呼ぶときは n 個のスロットセルのグループを指す。 $n \times n$ サイズのディザマスクには n 個のスロットと、 $n \times n$ 個のスロットセルが含まれることになる。図 3-07 (a) の太枠で囲んだ S^1 の配置が示すように、それぞれが縹子織の組織パターンの形状に配置される。

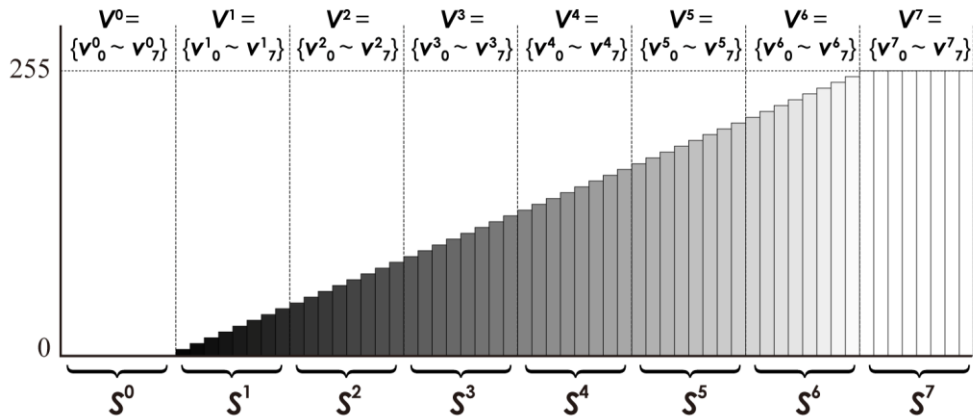
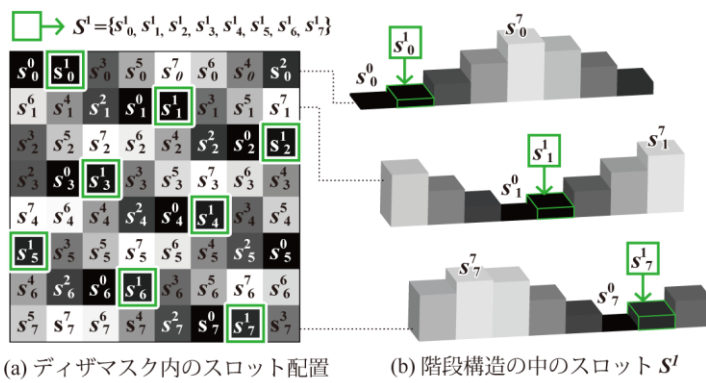


図 3-06 ステッピングディザマスクとスロット (n=8 のとき)

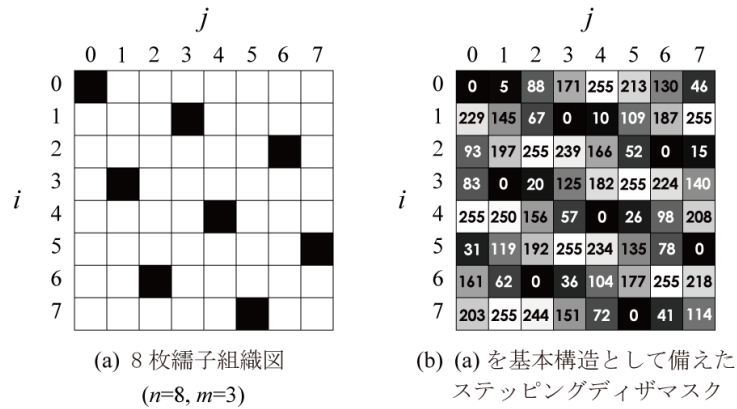


(a) ディザマスク内のスロット配置 (b) 階段構造の中のスロット S^1

図 3-07 ステッピングディザマスクとスロット

3-2-3 ステッピングディザマスクのスロットの定義

ここで、より詳細にステッピングディザマスクの構造を定義する。まず縞子織の組織パターンを図 3-08 に示す。



(a) 8 枚縞子組織図 (n=8, m=3) (b) (a) を基本構造として備えたステッピングディザマスク

図 3-08 縞子織の組織とステッピングディザマスク

通常の織物設計の分野では左下を原点とする座標系を用いるのが一般的だが、ここでは左上を原点として議論を進める。図 3-08 (a)は 8 枚縺子の一例を示す。縦に行番号 i ，横に列番号 j を振ると， i 行 j 列の要素の値 P_{ij} は，式(3-2)で決定される。

$$P_{ij} = \begin{cases} \text{黒 (■)} : (3 \cdot i - j) \bmod 8 = 0 \\ \text{白 (□)} : (3 \cdot i - j) \bmod 8 \neq 0 \end{cases} \quad (3-2)$$

この条件は， 8×8 のパターンだけでなく，これをタイリングし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 枚縺子のパターンでは， n より小さくかつ n と互いに素な m を用いて， i 行 j 列の要素の値 P_{ij} は，式(3-3)で決定される..

$$P_{ij} = \begin{cases} \text{黒 (■)} : (m \cdot i - j) \bmod n = 0 \\ \text{白 (□)} : (m \cdot i - j) \bmod n \neq 0 \end{cases} \quad (3-3)$$

m は縺子組織の「飛び数」にあたり，ここでは座標 $(0,0)$ にある「■」を起点とすると，下の行の「■」は座標 $(1, m)$ ，その下の行では座標 $(2, (m \times 2) \bmod n)$ にあるような位置関係をとる。 n と m が互いに素でなければ，「■」が現れない列が生じ，2-1-5 節で紹介した織物制約 1 を満たさない不適切なものとなる。

図 3-08 (b)は，図 3-08 (a)の 8 枚縺子組織を基本パターンとして生成したステッピングディザマスクの例を示している。図 3-08 (b)での 0 を割り当てられた要素がスロット S^0 に相当し，255 が割り当てられた要素がスロット S^{n-1} に相当する。また i 行 j 列の要素の値 P_{ij} は，次の条件で 0 または 255 が割り当てられる。

$$P_{ij} = \begin{cases} 0 : (m \cdot i - j) \bmod n = 0 \\ 255 : (m \cdot i - j) \bmod n = \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \end{cases} \quad (3-4)$$

ただし， $\lfloor x \rfloor$ は x を超えない最大の整数を表す。式(3-4)で定義された位置に 0 と 255 が割り振られることにより，ステッピングディザマスクには各列・各行に最低一つの 0 及び 255 が存在することとなり，これによって織物制約 1 が満たされる。

式(3-4)を満たさない，スロット $S^1 \dots S^{n-2}$ の要素には， $V^1 \dots V^{n-2}$ の閾値が割り当てられる。このとき，できるだけ緯糸と経糸が互いの交差回数を少なくして織物制約 2 を満たすために，閾値はスロットの配列に従って上昇・下降型の階段状の構造を取る。このとき，左から右へと閾値が上昇する要素は式(3-5)，同様に下降する要素は式(3-6)をそれぞれ満たす位置にある。

左隣りより大きい要素：

$$\frac{n}{2} < (m \cdot i - j) \bmod n < n \quad (3-5)$$

左隣りより小さい要素：

$$0 < (m \cdot i - j) \bmod n < \frac{n}{2} \quad (3-6)$$

また、座標 (i, j) におけるスロット S^k_i のスロット番号 k , ($k=0, 1, \dots, n-1$) は次の式で与えられる。

$$k = n - \left| n - 2 \cdot ((n - m) \cdot i + j) \bmod n \right| - \left\lfloor 2 \cdot (n - (n - (m \cdot i - j) \bmod n) / n) \right\rfloor \quad (3-7)$$

以上が、ステッピングディザマスクの定義となる。ステッピングディザマスクを用いた織物組織生成手法を、ここでは織物ディザ法と呼称する。

3-2-4 製織試験及び考察

ステッピングディザマスク及び従来手法を用いて画像を二値化し実際に製織した結果を図 3-09 に示す。図 3-09 (a) の増点法と図 3-09 (b), (d) のステッピングディザマスクは 8 枚罫子 ($n=8$, $m=3$) に基づいている。

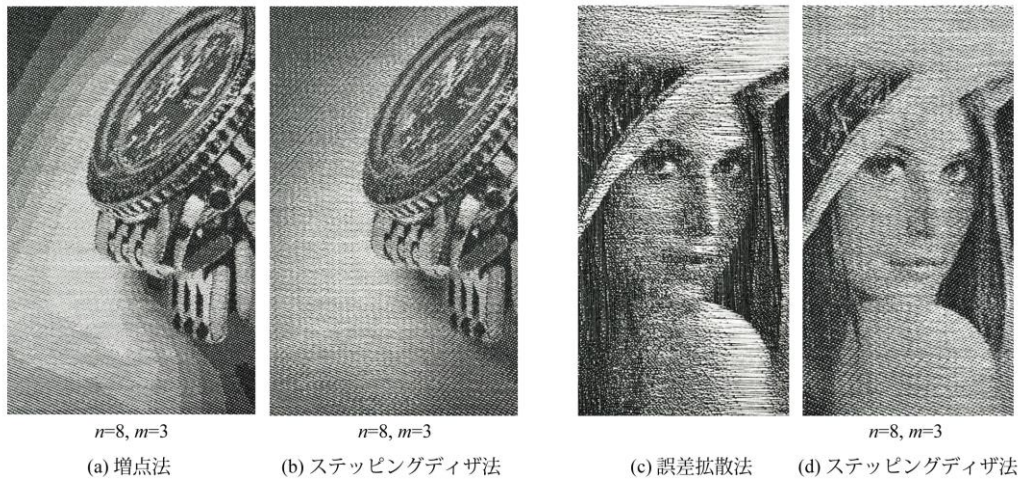


図 3-09 ステッピングディザ法による織物組織生成と製織結果

図 3-09 (a) は前章で示した増点法によるもので、7 段階の比較的少ない階調数による濃淡であるため、背景の緩やかな階調変化において領域の境界が際立ってしまった結果となっている。図 3-09 (c) は誤差拡散法によるもので、2-1-5 節で紹介した織物制約を考慮していないために、二値化結果が良好な結果に見えていても、製織後の外観は再現性において著しく劣化してしまっている。これは主に経糸と緯糸の交差の間隔が広すぎる箇所があること、頻繁すぎる箇所があることが原因となり、織物制約 2 を満たしていないことによる。図 3-09 (b), (d) のステッピングディザ法では、他の手法で見られた課題は見られず、最も良好な結果が得られている。

以上より、ステッピングディザ法では織物制約 1, 2 に従いながら入力画像の階調変化を再現することができ、また従来手法に比較して次の点が優れていることがわかる。一つ目は再現可能な階調数を最大化できること、二つ目は入力画像の左右のシンメトリーをより良く保

つことができること、三つ目は組織的ディザ法により容易に織物組織パターンを生成できることである。

しかしながら、ステッピングディザ法では閾値グループ V^k , ($k=0,1,\dots,n-1$)とスロット S^k , ($k=0,1,\dots,n-1$)のグループ単位での対応については明示しているものの、個々の閾値とスロットセルの対応は図 3-10 に示すように明らかではない。

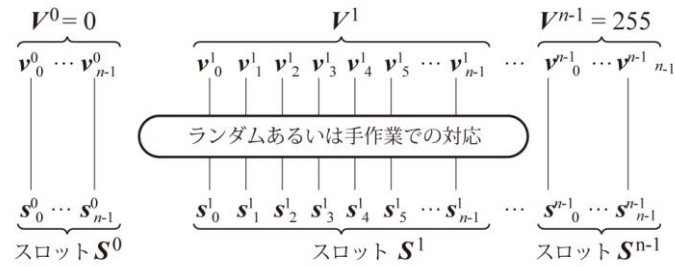


図 3-10 閾値とスロットセルの対応

次章では、図 3-10 に示したように、閾値とスロットセルの対応が明確化されていないことで発生する問題とその解決方法について述べる。

第4章 緩やかな階調変化における最適化

本章では、ステッピングディザ法によるジャカード織物組織生成について、緩やかな階調変化の領域で発生する課題であるアーティファクト（意図しない繰り返しパターン）の発生に着目し、これを解決する手法について述べる。まず課題解決のためのコンセプトとして閾値とスロットセルのマッピングを定義するための「オーダーユニット」を提案する。次にオーダーユニットを用いたディザマスクの評価方法を提案し、それをもとに最適化したオーダーユニットをステッピングディザ法に導入することで、緩やかな階調変化に最適化した二値化手法である OSD (Ordered Stepping Dithering) 法、また RSSD (Random Shift Stepping Dithering) 法^{[4-01][4-02][4-03]}を新たに提案し、またその優位性を製織試験によって示す。

4-1 従来手法の課題：アーティファクトの発生

4-1-1 アーティファクトの発生

前章で述べたステッピングディザ法による二値化結果は、使用するディザマスクの閾値配列パターンおよび入力画素値の相互関係に基づいて、0 と 255 の値が配列されたものとなる。ディザマスク内の閾値を均等に設定することで、ディザマスク単位で入力画像の輝度は確率的に保たれる。しかしディザマスクサイズの領域内において入力画素の画素値がほぼ一定で空間的な偏りが見られないとき、出力画像の 0 および 255 が偏った存在比率で配置されてしまった場合、どのような結果が得られるだろうか。その場合、出力画像はディザマスクサイズ内の 0 と 255 の偏ったパターンがタイリングされることとなり、結果として入力画像には存在していない視覚的な繰り返しパターンを持つこととなる。入力画素値がほぼ一定だったり、緩やかなグラデーションのように画像値に大きな変化のない領域では、そうした視覚的パターンの影響は大きなものとなることが考えられる。

図 4-01 では、それぞれ異なる 7 種類の輝度を持つ入力画像に対して、3 つのディザ法を用いて二値化した結果を示す。全体的にみると 0 および 255 の偏りが目立たないものが多いが、図 4-01 c3 で見られる横方向のストライプ、図 4-01 d7 に見られる横方向のドットの並びのように、明らかに形状を識別できる偏りが生じる場合があることがわかる。これらの現象を防ぐことは、織物上で画像を忠実に再現しようとする本論文の目的上、非常に重要な課題であると言わざるをえない。本論文では、こうした二値化結果が偏りを持つことによって生じる視覚的な繰り返しパターンを“アーティファクト”と呼び、本章ではアーティファクトの発生を防ぐことを目的として議論を進める。

4-1-2 ステッピングディザ法でのアーティファクトの発生

図 4-02 に、図 4-02 (a)の入力画像を元に従来手法及び提案手法によってジャカード組織パターンを生成した結果を示す。図 4-02 (b)は Ng らの手法^{[2-18] [2-19]}、図 4-02(d)は前章で示した織物ディザ法^{[2-20] [2-21] [2-22]}の結果を示しており、いずれも基本となる織物組織として 8 枚縺子

の3飛び ($n=8, m=3$) に基づいている。図 4-02 (c), (e)は、生成した組織パターンにガウシアンフィルタをかけたものである。

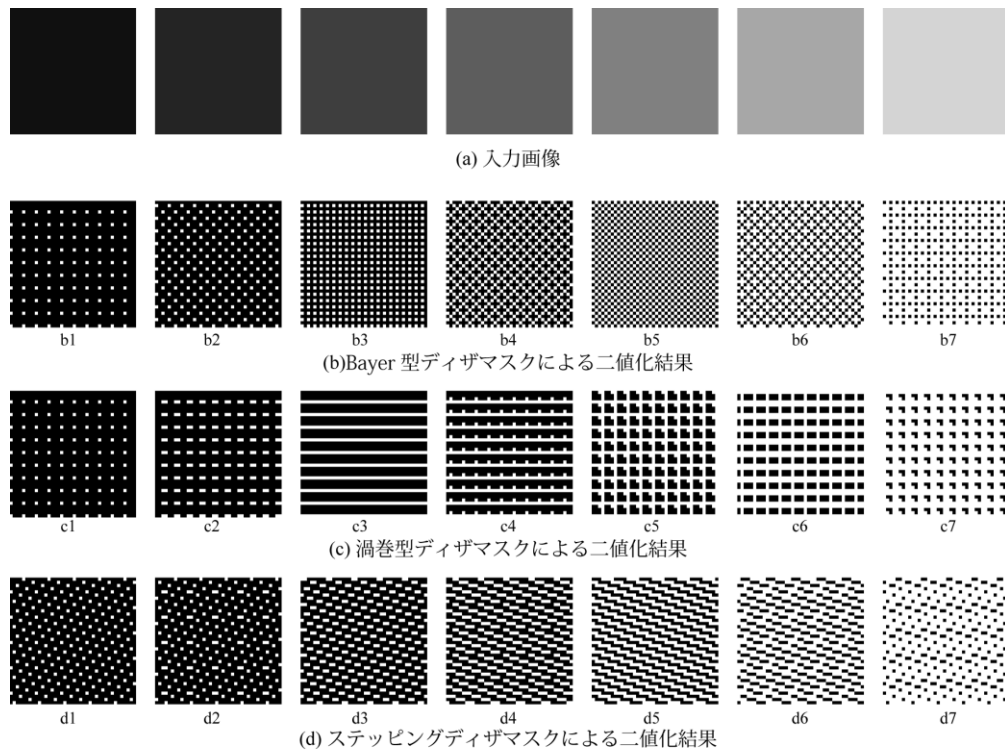


図 4-01 アーティファクトの発生

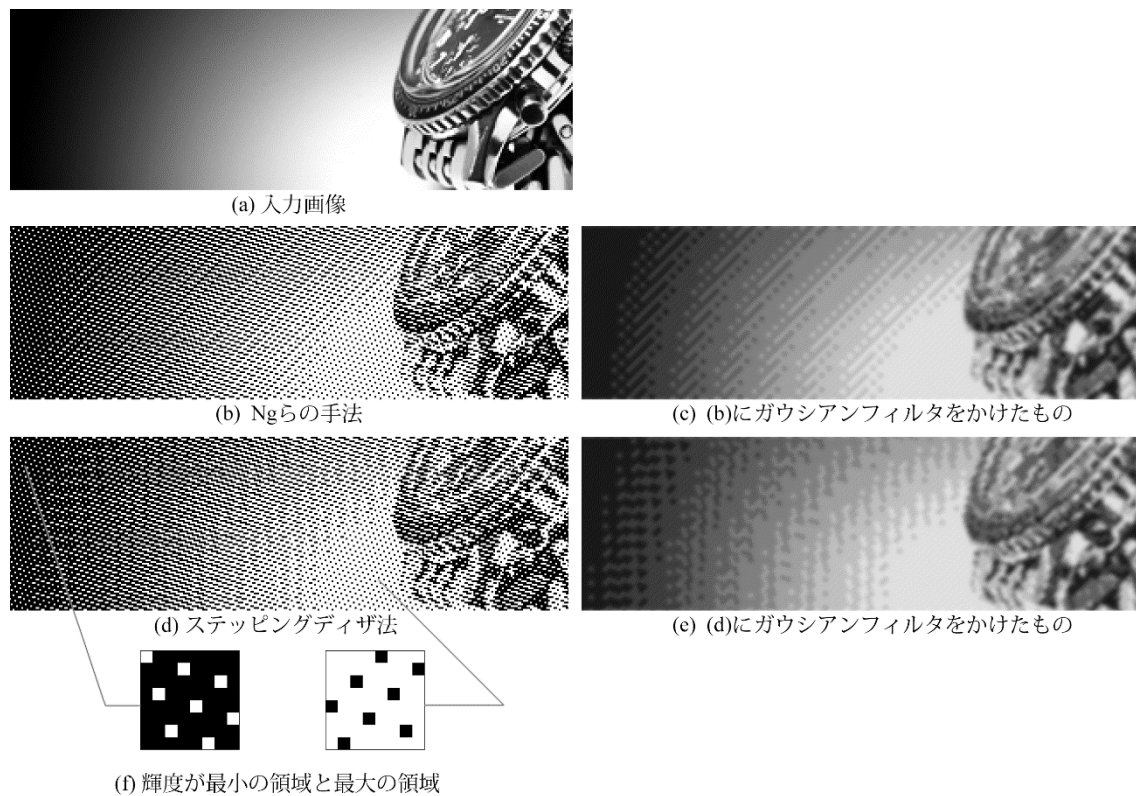


図 4-02 アーティファクトの発生

図 4-02 (b), (d) に示したジャカード織物パターンは、それぞれ入力画像の中間階調を再現しているが、緩やかなグラデーションの領域に着目すると、図 4-02 (b) では 45 度の角度で右上がりの斜線状の構造が目立ち、図 4-02 (d) では縦及び横方向へのクサビ形の規則的なパターンが生じていることがわかる。これらのアーティファクトの発生は、ガウシアンフィルタを加えた図 4-02 (c), (e) ではより容易に識別できる。このようなアーティファクトは画像の再現性と織物の美観を損ねるため望ましくないものであるが、従来技術や第 3 章で述べたステッピングディザ法ではアーティファクトの発生を防ぐことができなかった。

4-2 アーティファクトの発生原因

4-2-1 アーティファクト発生とディザマスクの閾値

前節で触れたようなアーティファクトの発生原因について考察した結果、ディザマスク内の閾値の配置に問題があると推測することができた。織物ディザ法におけるアーティファクトの発生原因について図 4-03 に図示する。

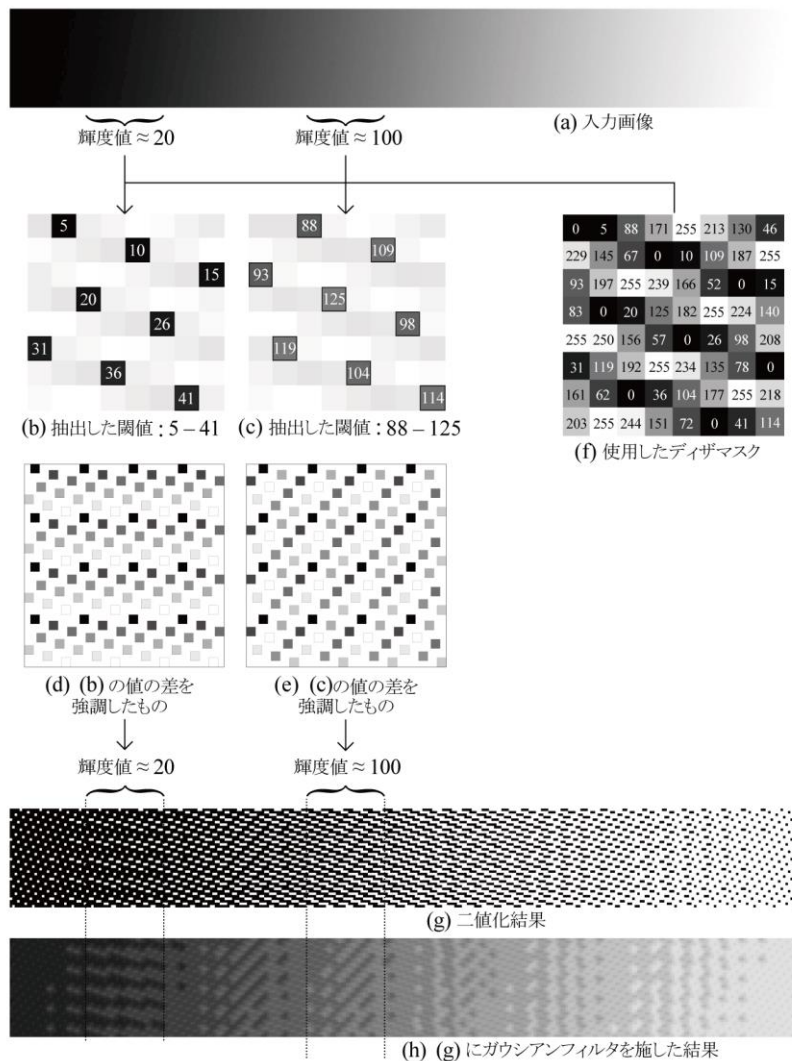


図 4-03 アーティファクト発生原因

図 4-03 (a)は入力画像，これを図 4-03 (f)のディザマスクを用いて二値化した結果が図 4-03 (g)，それをガウシアンフィルタでぼかした画像が図 4-03 (h)である．元画像の輝度が 20 及び 100 の周辺に着目すると，図 4-03 (h)では輝度 20 周辺で横向きのクサビ形，輝度 100 周辺では右上がり 45 度のアーティファクトが顕著であることがわかる．これらのアーティファクトの発生に影響を与えていると考えられる閾値とその配置を図 4-03 (b), (c), (d), (e)で示す．図 4-03 (b), (c)は，二値化処理で用いた図 4-03 (g)のディザマスクのうち，輝度 20 及び 100 周辺に相当する閾値のみを抜き出したものである．図 4-03 (d), (e)は，抜き出した閾値の値の大きさをグレースケールの濃度で強調し，タテヨコ 4 個ずつ並べたものである．図 4-03 (d), (e)では，それぞれ横方向，および右上がり 45 度の構造が識別できるが，これらは図 4-03 (h)の輝度 20 及び 100 周辺に相当する領域で発生しているアーティファクトと同様の構造であることが見て取れる．これらから，アーティファクトの発生は，その輝度に相当する閾値がどのようにディザマスクの中で配置されているかによって起こると推測するのが最も自然である．

4-2-2 アーティファクト発生原因の分類

前節での検討結果をもとに，アーティファクトの発生原因を図 4-04 に示すように大きく 2 つに分類した．一つ目は図 4-04 (a), (b)に示したような水平及び垂直方向でのディザマスク内の閾値配置の偏りであり，もう一つは図 4-04 (c), (d)に示したような斜線上での近接した閾値の値の偏りである．これらの斜線は，製織後の織物生地上に視認できる斜線状のテクスチャ，いわゆる織物業界でいう縷子線を生じさせうる織物組織上の斜線状パターンのうち，最も代表的な 3 方向を示している．縷子線は縷子織組織の構造そのものに由来するもので，そのサイズ n と飛び数 m により方向は変化する．ここではディザマスク内での 3 つの斜線方向についても縷子線と呼称する．ステッピングディザ法での二値化処理において，ステッピングディザマスク内の閾値が水平垂直方向，あるいは縷子線方向の偏りを持つときに，アーティファクトが発生すると考えられる．

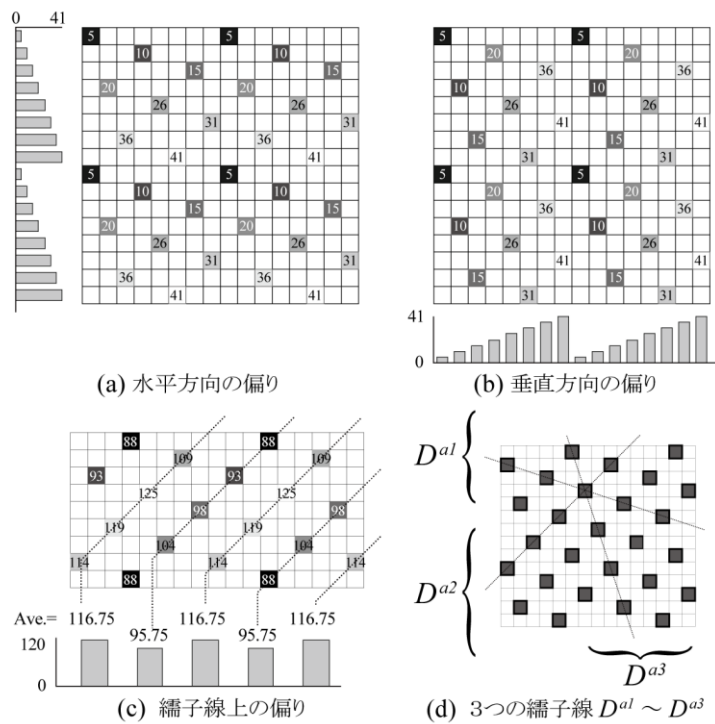


図 4-04 アーティファクト発生原因の分類

4-3 オーダーユニットとその最適化

4-3-1 オーダーユニット

ディザマスク内の閾値の配置を改善し、前節の問題を解決するため、ここでオーダーユニットという概念を新たに導入する。オーダーユニットは、ディザマスクの各スロットにおける閾値の順序を示す数列である。まずスロットは 3-2-3 節及び図 3-07 で示したように、ディザマスクを行ごとに見たとき、各行内で同じ順序にあたる閾値が位置する場所である。ディザマスクのサイズを n としたときスロットは n グループあり、それぞれのスロットグループ内には n 個のスロットが存在する。例えば図 3-07 では $n=8$ の場合を示しており、スロットグループ 1 ($=S^1$) は、スロットグループ 0 ($=S^0$) の右隣に位置する。

前章で述べたように、ステッピングディザマスクでは、行ごとに見たときの階段状の構造はスロットグループの配置として定義されていたが、ディザマスク内の閾値 0 と 255 以外の $n(n-2)$ 個の各閾値について画素単位でみたとき、どのスロットセルに対応するかは明確な定義がなかった。これを明らかにし、閾値とスロットセルの対応を示すのが、新たに定義するオーダーユニットである。図 4-05 に示すように、オーダーユニット O は n 個の値を持つ連続した自然数で構成される。

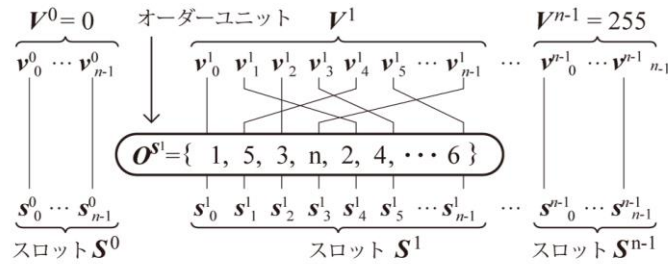


図 4-05 オーダーユニットによるマッピングの一例

スロットグループ S^i 内のスロットセル $s^i_0, s^i_1, \dots, s^i_{n-1}$ に対応する閾値グループ V^i 内の閾値 $v^i_0, v^i_1, \dots, v^i_{n-1}$ は、オーダーユニット

$$O^i = \{o^i_0, o^i_1, \dots, o^i_{n-1}\} \quad i=0, 1, \dots, n-1 \quad (4-1)$$

により定義される。ここで o^i_j ($j=0, 1, \dots, n-1$) は、閾値グループ V^i の o^i_j 番目の要素がスロットグループ S^i 内のスロットセル s^i_j に対応していることを示す。

4-3-2 オーダーユニットの最適化

本論文では、サイズや元の織物組織のタイプが異なる様々なディザマスクについて、最適なオーダーユニットを算出するため、図 4-04 に示した水平垂直方向での閾値の偏り、縺子線上の近接値の連続があった場合にコスト値が高くなるよう、コスト関数

$$E = E_{bias} + E_{proximity} \quad (4-2)$$

を用いてオーダーユニットの最適化を図る。二つの要素 E_{bias} と $E_{proximity}$ は、それぞれ前述したアーティファクト発生の原因となる二つの閾値の偏りに対応しており、偏りが大きいとときに増加する。オーダーユニットをどのように用いて E_{bias} と $E_{proximity}$ について計算するかを述べる。図 4-03、図 4-04 で見たように、アーティファクトは緩やかな階調変化の領域、言い換えると画素値が狭いレンジに分布するエリアで発生する。緩やかな階調変化におけるアーティファクト発生を抑止という目的を考慮すると、入力画素値がある一定の狭い範囲内に収まっている場合を想定し、ある一定の狭い画素値のレンジに対応した閾値の偏りを評価して最適化すればよい。すなわち、その輝度の領域に対応した閾値グループと、対応するスロットグループについてのマッピングを最適化するオーダーユニットが求められたとき、そのオーダーユニットは他の閾値レンジを担当するスロットグループに適用することが可能となる。それゆえ、これ以降は同一のオーダーユニットを S^0, S^{n-1} 以外のすべてのスロットに適用することを前提として議論を進める。ここでオーダーユニットの評価は、ディザマスク内の閾値の間隔がすべて均等であるとみなして、オーダーユニット内の数値、すなわち閾値の大小の順序を示す序数のみを用いて行う。 $n=8$ のとき、その値は1から8までとなる。二つの閾値がどの程度近接しているかは、オーダーユニット内の二つの数値がどの程度近接しているかを計算することで導かれる。

4-3-3 E_{bias} の算出

E_{bias} はディザマスク内における水平方向および垂直方向での閾値の偏りを表し、次の式で与えられる。

$$E_{bias} = E_{lo} + E_{la} \quad (4-3)$$

E_{lo} と E_{la} はそれぞれ垂直方向(longitudinal), および水平方向(latitudinal)での閾値の偏りを表す。これらはそれぞれ行または列方向に位置する、「 $n/2-1$ 」個の連続するオーダーユニット値の総和の偏差を示しており、式(4-4)から式(4-6)で定義される。ここで「 $n/2-1$ 」は $n/2-1$ を超えない範囲で最も大きな整数を表す。図 4-06 は式(4-4), (4-5)における L_i^o , L_i^a の算出方法を 8×8 サイズのディザマスク ($n=8$, $m=3$) の場合を例に図示したものである。 L_i^o , L_i^a は、それぞれ i 列目, $(i \times m) \bmod n$ 行目に対応するオーダーユニット値からスタートして、行または列方向に 4 つの連続して位置するオーダーユニット値の総和である。式(4-6)は、 L_i^o , L_i^a の平均値に相当する。もしも閾値に偏りがあった場合、大きな閾値を持つ領域の「 $n/2-1$ 」個の閾値の総和は、それ以外の領域に比べて大きく、また両者の差分は偏りが強いほど大きくなることになる。それゆえ閾値の偏りが強くなるとともに総和の標準偏差は増大し、 E_{bias} もまた増大することになる。

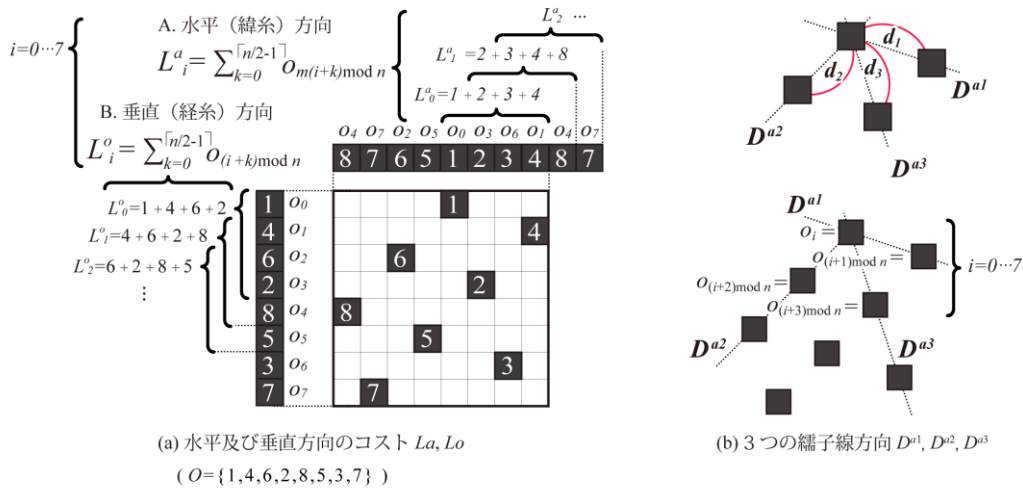


図 4-06 水平垂直方向及び縞子線方向でのコスト関数の算出方法

$$E_{lo} = \sqrt{1/n \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (L_i^o - \bar{L})^2} \quad (4-4)$$

$$E_{la} = \sqrt{1/n \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (L_i^a - \bar{L})^2}$$

$$L_i^o = \sum_{k=0}^{\lceil n/2-1 \rceil} o_{(i+k) \bmod n} \quad (4-5)$$

$$L_i^a = \sum_{k=0}^{\lceil n/2-1 \rceil} o_{m(i+k) \bmod n}$$

$$\bar{L} = \frac{\lceil n/2-1 \rceil}{n} \sum_{i=0}^{n-1} o_i \quad (4-6)$$

4-3-4 $E_{proximity}$ の算出

$E_{proximity}$ は、縷子線方向において近い値を持つ閾値が近接して存在するような偏りを反映し、3つの縷子線方向 D^{a1} , D^{a2} , D^{a3} における偏りを表すコスト E_{a1} , E_{a2} , E_{a3} によって式 (4-7) のように定義される。 E_{a1} , E_{a2} , E_{a3} は、図 4-06(c) に示すようにディザマスクにおける閾値同士の縷子線上の距離 d_1 , d_2 , d_3 と、オーダーユニット値同士の差分 $|o_i - o_{(i+1) \bmod n}|$ を用いて式 (4-7)~(4-9) により定義される。アーティファクトが発生するのは、近い値の閾値がある方向において特に近接して存在するときと考察できる。そこで3つの縷子線方向について、式 (4-9) で隣接する閾値との差分と閾値同士の距離を考慮した値 a_1 , a_2 , a_3 を求め、式 (4-7), (4-8) によりそれらの偏差から $E_{proximity}$ を導いた。これらの式は、3つの縷子線方向において近い値を持つオーダーユニット値が近接して存在するときに増加するコストを求めることができるよう設定したものである。

$$E_{proximity} = \sqrt{(E_{a1} + E_{a2} + E_{a3})/3} \quad (4-7)$$

$$E_{a1} = (a_1 - \bar{a})^2 \quad (4-8)$$

$$E_{a2} = (a_2 - \bar{a})^2$$

$$E_{a3} = (a_3 - \bar{a})^2$$

$$a_1 = \sqrt{\frac{d_1 + d_2 + d_3}{d_1} \sum_{i=0}^{n-1} (n - |o_i - o_{(i+1) \bmod n}|)^2} \quad (4-9)$$

$$a_2 = \sqrt{\frac{d_1 + d_2 + d_3}{d_2} \sum_{i=0}^{n-1} (n - |o_i - o_{(i+2) \bmod n}|)^2}$$

$$a_3 = \sqrt{\frac{d_1 + d_2 + d_3}{d_3} \sum_{i=0}^{n-1} (n - |o_i - o_{(i+3) \bmod n}|)^2}$$

式(4-9)では、 o_i は*i*番目のオーダーユニット値を示し、ディザマスクにおける*i*行目の閾値を特定する。図4-06(c)に示したように、 $o_{(i+1) \bmod n}$ 、 $o_{(i+2) \bmod n}$ 、 $o_{(i+3) \bmod n}$ は、それぞれ o_i から見て D^{a1} 、 D^{a2} 、 D^{a3} の方向の隣接するオーダーユニット値を表す。また d_1 、 d_2 、 d_3 は、 o_i からのそれぞれ $o_{(i+1) \bmod n}$ 、 $o_{(i+2) \bmod n}$ 、 $o_{(i+3) \bmod n}$ までの距離を表す。

4-3-5 Eの最適化

アーティファクトの発生しやすさを意味するコスト*E*を最小化することで、緩やかな階調変化におけるアーティファクト低減の観点からディザマスクの最適化が可能となる。

$$\tilde{O} = \arg \min_o E \tag{4-10}$$

コスト関数*E*を最小化する手順として、まずあり得るオーダーユニットの組み合わせのリストアップを行った。ただしディザマスクがタイリングして用いられるときオーダーユニットは並進対称性を持つので、重複を避けるため最初のオーダーユニット値は1に限定した。そのうえですべてのオーダーユニットを評価し、コスト関数が最小となるオーダーユニットを求めた。オーダーユニットは、ディザマスクのサイズ*n*および飛び数*m*毎に異なるため、*n*、*m*の組み合わせ毎に最適化されたオーダーユニットを算出することが求められる。最適化されたオーダーユニットを探索するこれらのプロセスは前処理段階であり、後述するように一旦その結果として最適化されたオーダーユニットが得られたのちは、ステッピングディザ法のプロセスに用いるディザマスクの各スロットにその結果を適用すればよい。

4-4 オーダーユニットによるディザマスク生成法

4-4-1 OSD (Ordered Stepping Dither) 法

コスト関数*E*を最小化するオーダーユニットを図4-05に示したように閾値とスロットセルのマッピングに用いて、緩やかな階調変化に最適化したステッピングディザマスクを作成することができる。図4-05に示したように、各スロットに対しては、レンジがオーバーラップしていない閾値グループのひとつがマッピングされ、それによって各スロットはそれぞれが対応する輝度レンジの二値化処理に影響を与える。それゆえ、各スロットに最適化したオーダーユニットを適用することで、全レンジにわたる緩やかな階調変化に対してもアーティファクトを生じさせないジャカード織物組織パターンを生成することができる。

最適化したオーダーユニットを用いてステッピングディザ法によるディザマスクを設計しジャカード組織パターンを生成する手法を、オーダードステッピングディザ(以降、OSD)法と呼ぶこととする。

4-4-2 RSSD (Random Shift Stepping Dither) 法

OSD 法は $n \times n$ サイズの同じディザマスクを多数繰り返して全体のディザマスクを生成する手法である。そのため、アーティファクトが発生しなくても繰り返しパターンであることは認識できてしまう。特定のパターンの繰り返しはデザイン意図に悪影響を及ぼさない場合もあるが、そうでない場合も考えられる。そこで同一のパターンの繰り返しを避けたい場合のために、OSD 法にランダム処理を導入し、同一パターンの繰り返しを避ける手法を提案する。

まず数値 R^o ($0 \leq R^o \leq n$) の範囲の乱数を用いて図 4-07 に示すように各スロットにおけるオーダーユニットの開始点をシフトさせてディザマスクを生成し、さらにこのシフト処理はディザマスクをタイリングする毎に行う。これによってスロット毎、またタイリングされたディザマスク毎にオーダーユニットの起点が変化するため、閾値の偏りを引き起こさずに繰り返しを避けることが可能となる。これをランダムシフトステップングディザ (以降、RSSD) 法と呼ぶ。

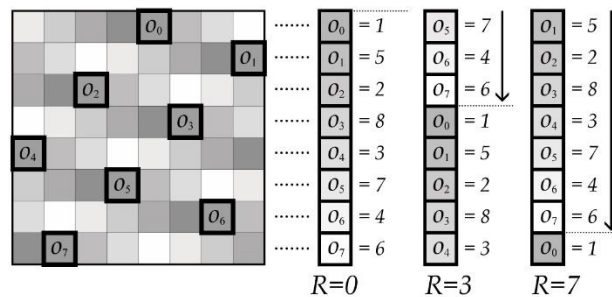


図 4-07 R^o によるオーダーユニットのシフト

4-4-3 拡張誤差拡散法への適用

前節までで述べた OSD 法、および RSSD 法は、いずれもコストが最小となるオーダーユニットを使用することで、ステップングディザマスクを緩やかな階調変化に最適化することを意図している。ここで、前章で紹介した拡張誤差拡散法に着目する。拡張誤差拡散法では、誤差拡散法のアルゴリズムに用いる閾値にステップングディザマスクを適用することで、より入力画像の情報を保存することを実現しているが、ステップングディザ法と同様、ディザマスクのスロット内での閾値の偏りについては考慮されていない。そこで、拡張誤差拡散法で用いるディザマスクに、本章で提案する最適化したオーダーユニットを活用することで、拡張誤差拡散法においてもアーティファクトの低減ができると考えられる。本論文では、最適化したオーダーユニットによるステップングディザマスクを従来の拡張誤差拡散法に適用し、OSD 法と拡張誤差拡散法の併用と、RSSD 法と拡張誤差拡散法の併用の、2つの手法も併せて提案する。

4-5 オーダーユニットの最適化と試織試験

4-5-1 コストが最小となったオーダーユニット

4-3節で示したコスト関数により、緩やかな階調変化でアーティファクト発生の原因となる閾値の偏りが最も少なくなる最適なオーダーユニットを求めた。表 4-1 にその主な結果を示す。なお表の n はディザマスクサイズを表し、 m は縞子組織の飛び数を表す。

4-5-2 実験結果と考察

図 4-08 に、入力画像図 4-08 (a) をステッピングディザ法により二値化し、ジャカード組織パターンに変換した結果を示す。このとき、ステッピングディザマスクに表 1 に示したコストが最小となるオーダーユニットを用いたものを図 4-08 (b), (d), (f) に、最適化されていないオーダーユニットを用いたものを図 4-08 (c), (e), (g) に示す。また図 4-08 (b), (c) は $n=7$, $m=3$, 図 4-08 (d), (e) は $n=8$, $m=3$, 図 4-08 (f), (g) は $n=10$, $m=3$ の織物組織パターンをそれぞれ使用している。図の左側 (A 列) に示した、コストが最小となるオーダーユニットによる二値化結果には、特に目立った繰り返しパターンは見いだせないが、右側 (B 列) に示した最適化されていないオーダーユニットによる二値化結果では、クサビ形が連続するようなアーティファクトが発生していることがわかる。

表 4-1 コストが最少となった主なオーダーユニット

n	m	コストが最少となったオーダーユニット
5	2	1 3 5 2 4
5	2	1 4 2 5 3
5	3	1 3 5 2 4
5	3	1 4 2 5 3
7	2	1 4 6 2 7 3 5
7	3	1 3 6 4 2 7 5
7	4	1 3 5 7 2 4 6
7	5	1 5 3 7 2 4 6
8	3	1 3 7 5 2 4 8 6
8	5	1 3 7 5 2 4 8 6
9	2	1 5 8 2 9 4 6 3 7
9	4	1 3 5 7 9 4 2 8 6
9	5	1 3 5 7 9 4 2 8 6
9	7	1 6 3 7 4 9 2 5 8
10	3	1 3 10 5 7 2 4 9 6 8
10	7	1 6 9 4 7 2 5 10 3 8
11	2	1 6 11 2 7 5 8 4 9 3 10
11	3	1 8 6 3 11 2 9 5 7 4 10
11	4	1 3 5 8 11 4 6 2 9 7 10
11	5	1 3 7 10 5 2 8 6 4 11 9
11	6	1 4 9 7 5 3 8 11 2 6 10
11	7	1 4 7 11 3 6 9 5 2 8 10
11	8	1 6 8 3 11 5 2 10 4 7 9
11	9	1 6 11 2 5 9 4 8 3 7 10
12	5	1 3 10 12 5 7 2 4 9 11 6 8
12	7	1 8 10 3 5 12 2 7 9 4 6 11
13	2	1 7 13 2 8 3 11 5 9 4 10 6 12
13	3	1 8 3 13 4 11 7 2 10 5 12 6 9
13	4	1 8 3 7 11 6 13 4 2 5 9 12 10
13	5	1 3 8 10 12 6 2 4 13 5 7 9 11
13	6	1 3 12 10 8 6 2 4 9 13 5 7 11
13	7	1 7 13 2 8 10 3 5 9 11 4 6 12
13	8	1 8 10 4 7 12 5 2 13 6 3 9 11
13	9	1 6 13 2 10 4 7 11 3 8 12 5 9
13	10	1 7 13 3 10 6 2 9 5 12 8 4 11
13	11	1 7 13 2 6 12 4 9 5 10 3 8 11
14	3	1 8 13 6 11 4 9 2 7 14 5 12 3 10
14	5	1 3 12 10 13 7 5 2 4 11 8 14 9 6
14	7	1 6 9 14 3 8 11 2 5 10 13 4 7 12
14	9	1 8 13 4 9 6 11 2 7 14 3 10 5 12
15	4	1 9 2 12 5 15 7 11 3 6 4 10 14 8 13
15	11	1 10 5 11 6 15 4 7 14 3 8 13 2 9 12
16	3	1 7 14 5 15 10 3 11 2 8 13 6 16 9 4 12



(a) 入力画像

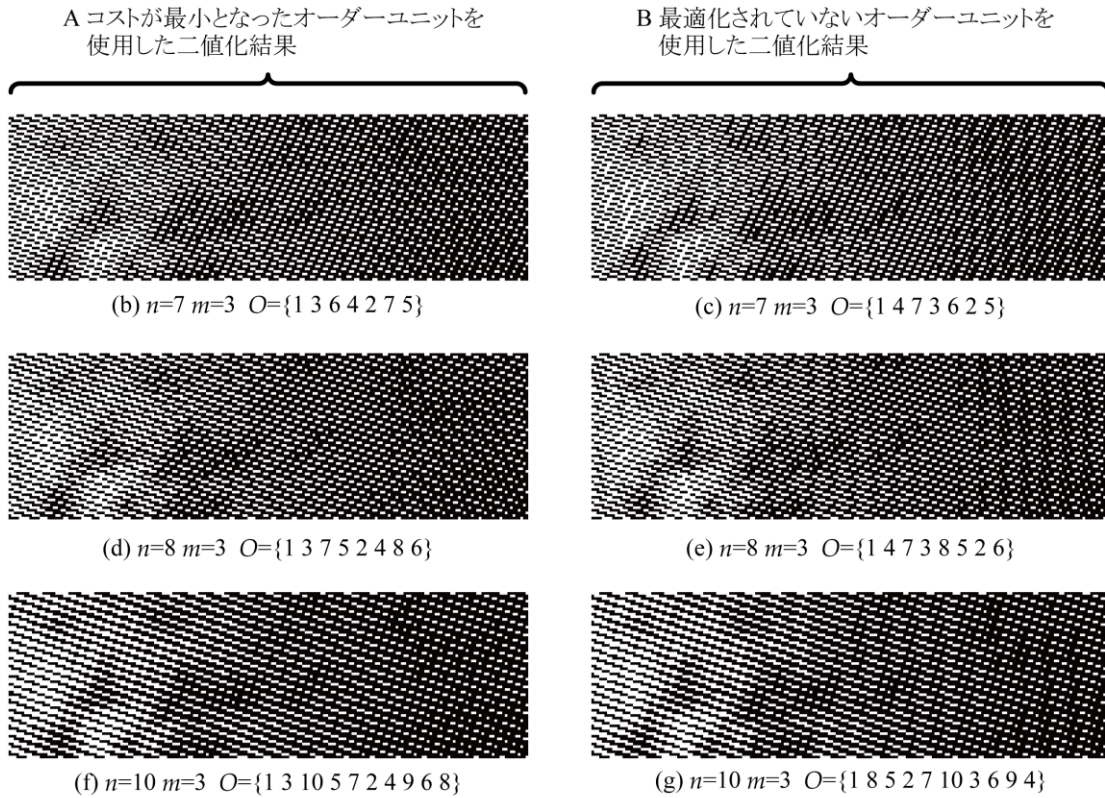


図 4-08 コストが最小となったオーダーユニットによる二値化結果

図 4-09 では、入力画像図 4-09 (a)をステップングディザ法により二値化し、ジャカード組織パターンに変換した結果を示す。図 4-08 と同様に、図の左側 (A 列) にコストが最小となるオーダーユニット、右側 (B 列) に最適化されていないオーダーユニットを用いた二値化結果を示す。A 列と B 列を比較すると、まず図 4-09 (b)を見ると、最適化されていないオーダーユニットを用いた B 列では、縦方向のクサビ型、あるいは水玉が連続したようなアーティファクトが発生していることがわかる。

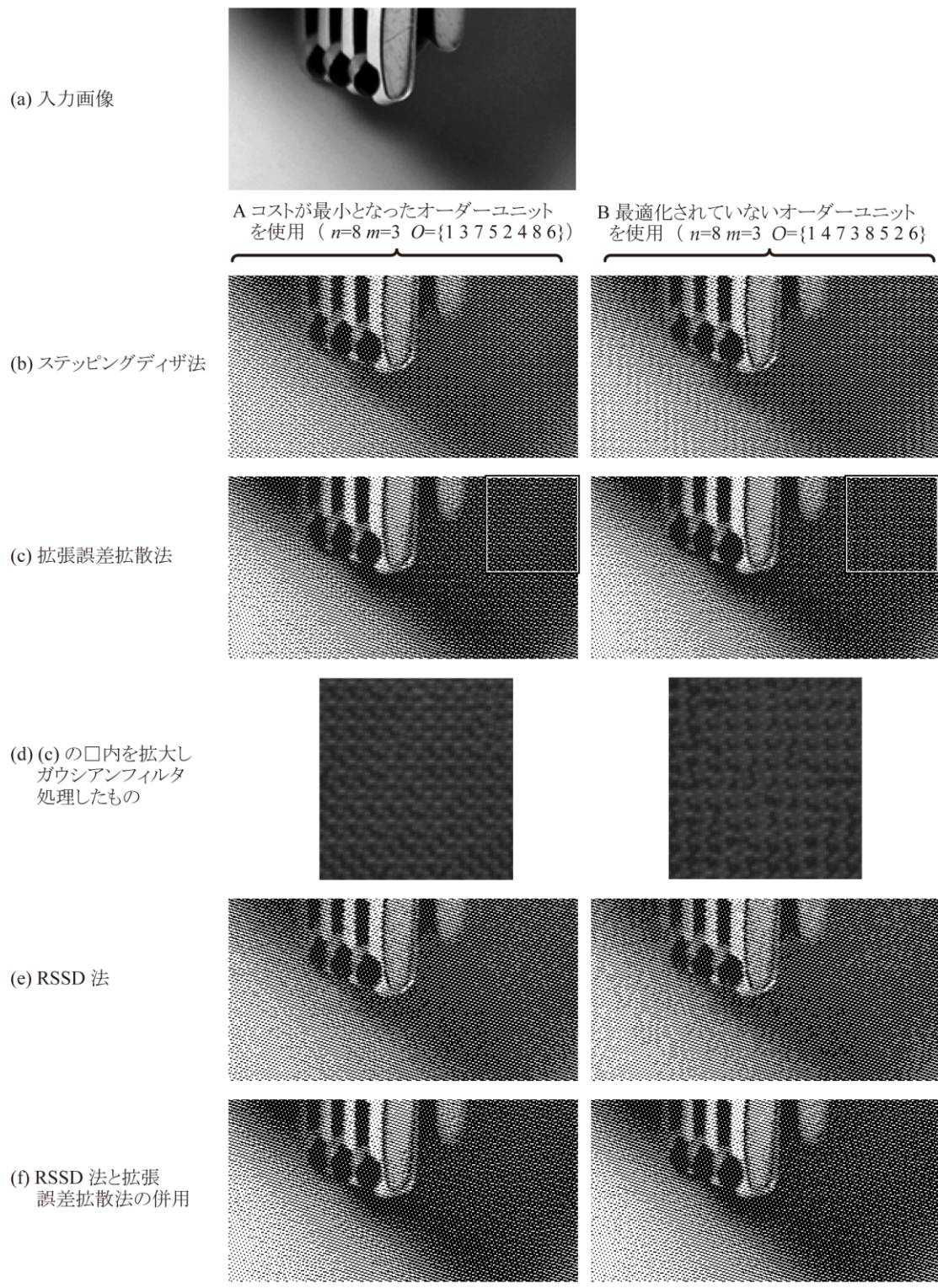


図 4-09 最適化したオーダーユニットの拡張誤差拡散法への適用

図 4-09 (c)では, A, B 列でそれぞれ図 4-09 (b)と同じステッピングディザマスクを拡張誤差拡散法に適用した結果を示している. また口型に囲んで示した部分をそれぞれ拡大し, ガウシアンフィルタをかけたものを図 4-09 (d)に示した. 図 4-09 (d)の B 列では, 図 4-09 (b)の B 列

で見られたのと同様の、縦方向の楔型が連続したパターンが確認できるが、一方、図 4-09 (d) の A 列では目立った形状のパターンは見られず均一さで優っていることが確認できる。このことから、最適化したオーダーユニットを用いることで、拡張誤差拡散法の結果を改善できることが明らかとなった。

図 4-09 (e)は RSSD 法で、図 4-09 (f)は RSSD 法と拡張誤差拡散法を併用した手法で、それぞれ A, B のオーダーユニットを比較したものである。図 4-09 (e)では、縦方向に細長いパターンが左下の緩やかなグラデーション領域に発生していることがわかる。これにより、RSSD 法でも、最適化されたオーダーユニットによる A 列のものに比べて、B 列ではオーダーユニットの偏りの影響を受けてしまうことがわかる。しかし図 4-09 (f)の RSSD 法と拡張誤差拡散法を併用した手法では、A, B 列で明瞭な違いは見られなかった。

図 4-10 では、図 4-10 (a)の入力画像をそれぞれの手法で二値化した結果と、提案手法による二値化結果をジャカード組織パターンとして用いて製織試験を行った結果を示す。試織結果を見ると、どのサンプルでも目立ったアーティファクトの発生は見られず、提案手法の有効性が確認できた。

図 4-11 は、本章での提案手法を活用してデザインした織物生地による商品の例である。ここではすべてが緩やかなグラデーションで構成された意匠として、木漏れ日が地面に落とした影をモチーフとして用いた。

表 4-2, 4-3 は本章での試織試験の製織条件を示す。なお密度で用いた長さの単位である鯨寸 (=3.7878cm) は、古くから日本では織物の単位として用いられ、例えば山梨県織物産地では現在も主として用いられている単位である。

製織試験の結果、提案手法によって緩やかな階調変化の領域においてもアーティファクト発生を防いだジャカード組織生成を行えることを示すことができた。実験で用いたような自然画像の再現を行う目的以外にも、この手法を活用することで、これまでアーティファクトの発生が原因で実現できなかったグラデーションで構成された抽象的な意匠などが新たに製造可能となり、ジャカード織物による意匠の可能性を拡大することができると思われる。

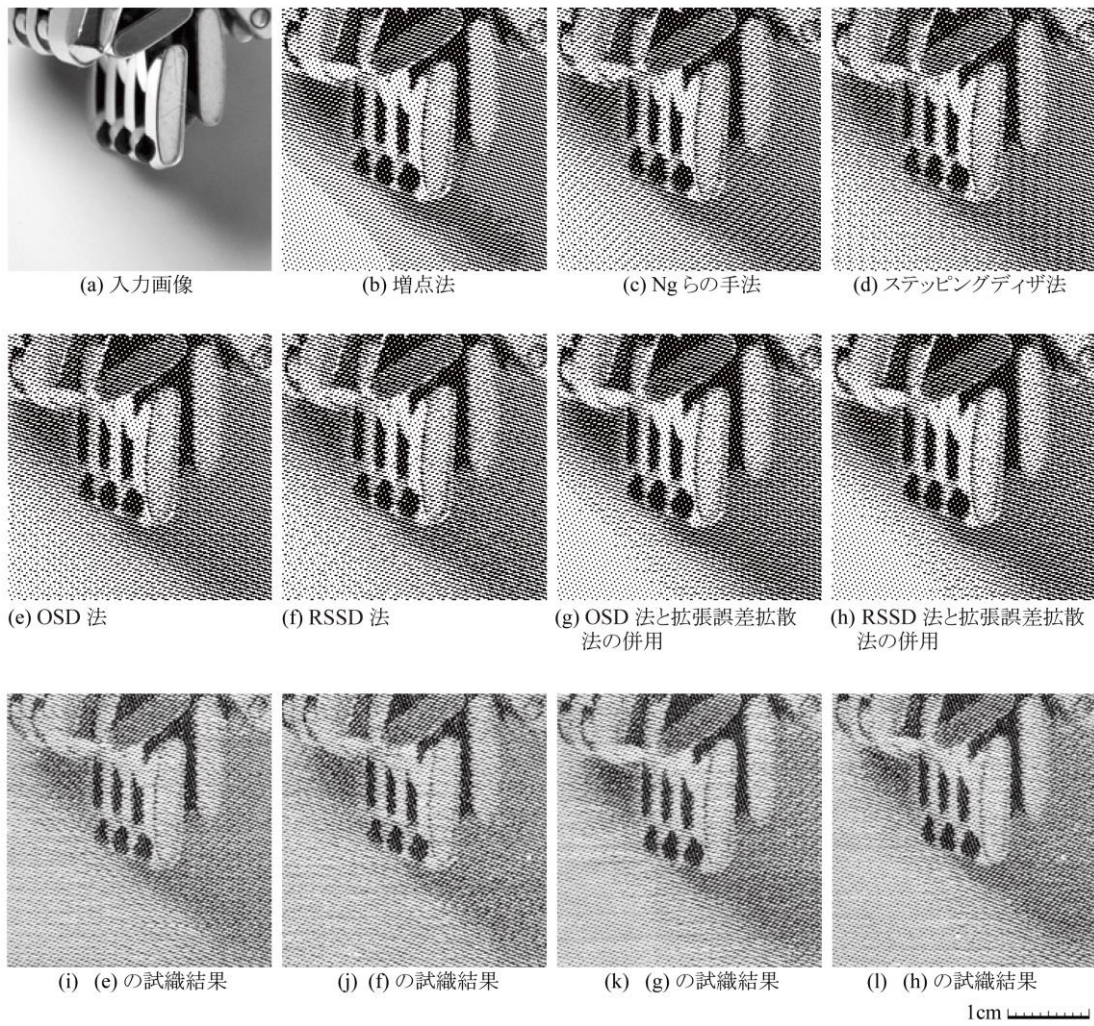


図 4-10 試織結果

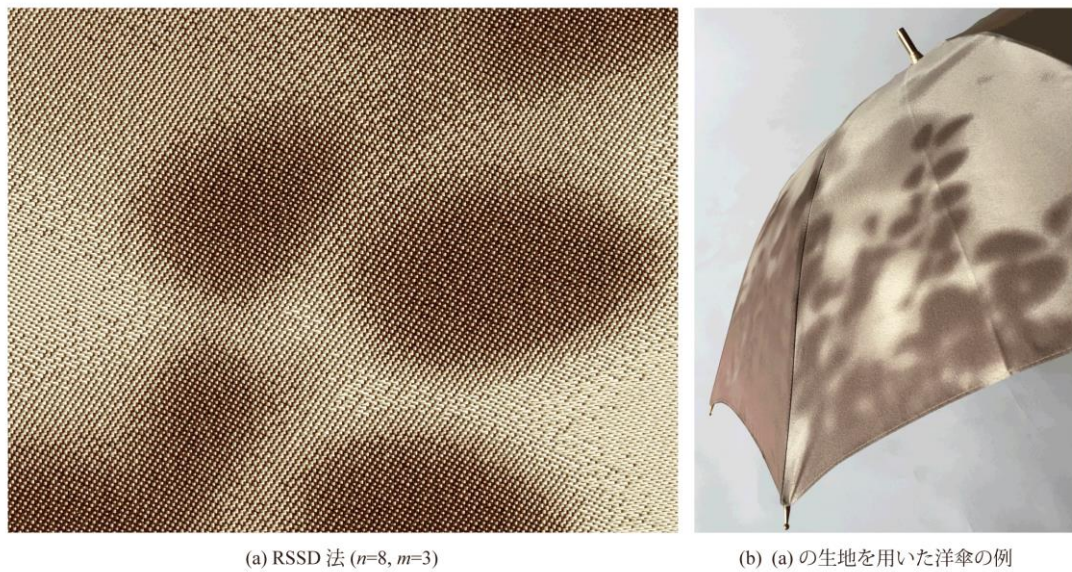


図 4-11 試織結果と製品化の例

表 4-2 製織条件 (図 4-10)

製織条件	経糸	緯糸
素材	ポリエステル 100%	綿 100%
織度	50d/2	40s/1 (EC)
密度	234本/鯨寸	220本/鯨寸
ジャカード機	Stäubli JC5	

表 4-3 製織条件 (図 4-11)

製織条件	経糸	緯糸
素材	ポリエステル 100%	ポリエステル 100%
織度	30d/2	60d/1
密度	300本/鯨寸	160本/鯨寸
ジャカード機	Stäubli JC5	

第5章 微細構造を保存する手法

本章では、第3章で紹介したステッピングディザ法、第4章で紹介した OSD 法、RSSD 法では考慮されていなかった、マスクサイズより小さな微細構造の保存について着目し、これまでの手法に比較してより良く微細構造を織物上に再現する手法、IFT (Intensity Forced Thresholding) 法^[5-01]を新たに提案し、またその優位性を製織試験によって示す。

5-1 微細な構造の再現

5-1-1 微細構造の保存について

図 5-01 は、本研究のコンセプトを示すため、図 5-01 (a)を入力画像とした複数の手法による二値化結果を図示したものである。ステッピングディザ法は、前章で述べたように、スロット内の閾値の偏りを最小化するオーダーユニットを適用することで、緩やかな階調変化の領域におけるアーティファクト発生を防ぐことが可能となり、連続階調を織物上で表現するうえでより効果的な手法となった。

では緩やかな階調変化と正反対の、微細な領域での階調変化についてはどうだろうか。図 5-01 (d)が示すように、ステッピングディザ法ではディザマスクサイズ毎に入力画像の輝度を反映するよう設計されているため、背景を含む全体的な階調は保存され、織物組織に適した結果が得られている。しかしながら、入力画像内の右斜め上へ向かう何本かの太い枝は確認できるが、細い枝は埋もれてしまっており、微細構造がよく保存されているとは言い難い。

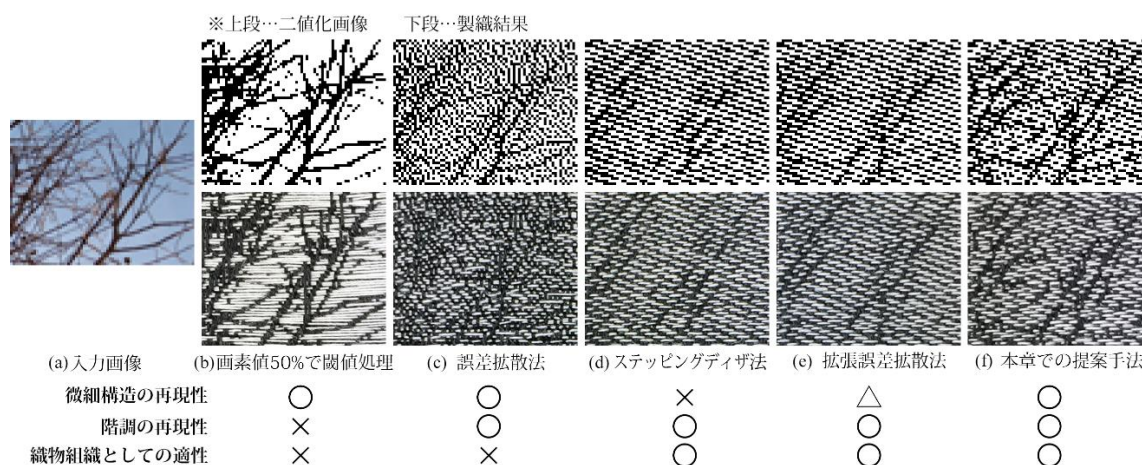


図 5-01 微細構造、階調の再現性と織物組織としての適性の比較

一方、入力画像の微細構造を最もよく再現しているのは図 5-01 (b)の、輝度 50%を閾値として全画素を二値化したものである。図 5-01 (c)は誤差拡散法によるもので、微細構造と階調が

ある程度保存されている。ただし、これらの例では長すぎる糸の浮きがあり (図 5-01 (b), (c)), また不規則でノイズ状の構造が画像の再現を妨げている状況 (図 5-02 (c)) が見られるなど, 2-1-5 節で紹介した織物制約を満たしておらず, ジャカード組織パターンの生成法としては不適である。輪郭等の情報をよりよく保存するための手法として提案された拡張誤差拡散法による結果 (図 5-01 (e)) では, ステッピングディザ法に比較して, 水平に近い枝が確認できるなど向上が見られるが, その差はわずかである。

図 5-01 (f)は本章で提案する手法を用いたもので, 織物上には階調とともに細い枝がより多く再現され, 織物制約を満たしながら階調の再現性と微細構造の再現性を両立することが可能であることを示している。

1-2-2 節で述べた本論文の主題から, いかに多くの入力画像の情報を織物上に再現するかが重要であるため, 微細構造の再現性を高めることは避けて通ることのできない課題である。そこで本章では, 階調の再現性と織物制約に従うことを最優先としつつ, 微細構造の再現を実現する手法を見出すことを目的とし, まずステッピングディザ法などの二値化手法で微細構造が保存されない原因を探り, 検討を行った。

5-1-2 ディザ法で微細構造が保存されない原因

まず, ステッピングディザ法で入力画像の微細構造が保存されない原因について考察し, これを解決するための方向性を提示する。図 5-02 は, ステッピングディザ法のフローチャートとともに, ディザ法によって入力画像の輝度の情報が局所的に失われるメカニズムを示している。図 5-02 (a)-D に示した出力画像は, 縺子織の織物組織パターンを保持しつつ, 図 5-02(a)-A の入力画像の輝度をマスクサイズ全体として保存するのに必要な数の黒と白で構成されている。しかし詳細にみると, 入力画像における明暗の関係が局所的に反転してしまう結果が見られる。例えば, 図 5-02 (a)-D のスロット S^1 に位置する画素を抜き出した図 5-02 (b)-D では, 点線で囲まれた領域は周囲より暗いが, 入力画像ではその領域は周囲より明るくなっている。このような明暗反転が, 微細構造の再現を妨げる主たる要因になっていると考えられる。

ではなぜこのような反転が起こるのだろうか。この問題は, ディザ法そのものに起因しているといえる。ディザ法とは, ディザマスクサイズ単位で入力画像の輝度を保つよう, 値 0 と 255 の画素の望ましい配置パターンによる二値画像を生成するプロセスといえることができる。この要請に従うために, 局所的に入力画像の明暗を反転することはディザ法そのものに組み込まれており, またそれが微細構造の再現を妨げる主要因にもなっていると考えられる。

この問題に対処するため, 既にいくつかの解決法が提案されている。その一つが誤差拡散法 (図 5-01(c)) であるが, すでに述べたように織物組織には不適である。また誤差拡散法を織物ディザ法に導入した拡張誤差拡散法は, 微細構造の再現を向上させてはいるが, 図 5-01 (e)に見るように本研究の提案手法 (図 5-01 (f)) と比較するとその効果は十分とはいえない。

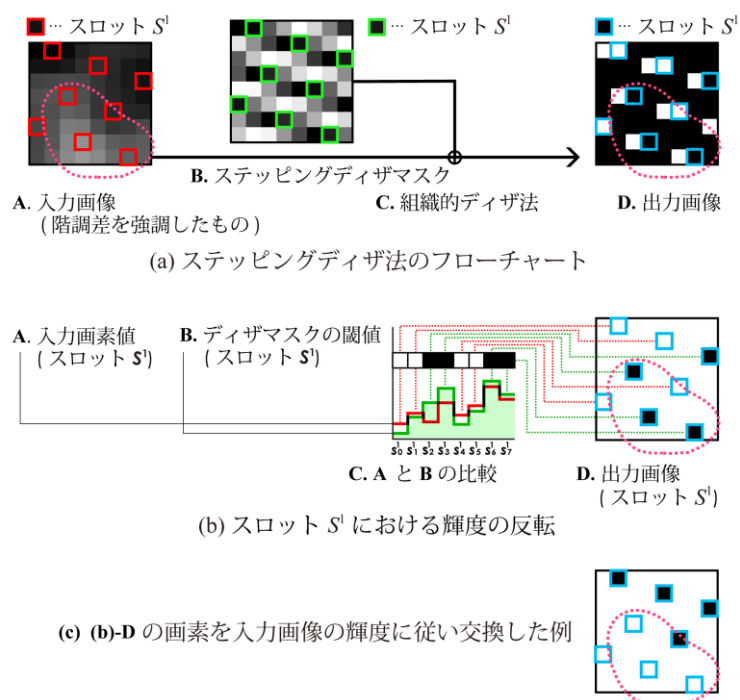


図 5-02 ステッピングディザ法のフローチャートと輝度の反転

5-1-3 提案手法のコンセプト

本章では、微細構造と階調の保存，織物制約を満たす織物組織パターン，それぞれの要請を満たす結果をもたらす新たな手法について検討した。

基本的なアイデアは，ある限られた領域について入力画像の明暗に従った二値化を行い，それ以外の領域では階調と織物組織パターンの保存を優先するという選択的な手法を用いることにある．画素の明暗に応じた二値化を行う限られた領域は，階調表現と織物組織パターンの保持に影響を及ぼさないよう注意深く選択する必要がある．本論文ではそのために新しい概念“バウンダリースロット”を導入し，これを用いた二値化のアルゴリズムを提案する．

5-1-4 バウンダリースロット

本節では，入力画素値の明暗に従った二値化を行うためのターゲットとなる領域として，バウンダリースロットを定義する．バウンダリースロットは，ステッピングディザマスク内の閾値レンジ及びその配置と，それに対応するサイズの入力画素値との相互関係をもとに定義される．図 5-03 に示すように，織物ディザ法で用いられるステッピングディザマスクの階段状に配置された閾値は，周期的な白と黒の繰り返しの構造の二値化結果をもたらし，このときの白と黒の画素の比率で入力画像の輝度を再現する（図 5-03 D）．ここでスロット S^3 の二値化結果（図 5-03 F）を見てみよう． S^3 以外のスロットの結果（図 5-03 D）ではそれぞれ白か黒の画素のみが含まれていることに対して，スロット S^3 では白と黒の画素が混在して

いることがわかる。白と黒が混在する理由は、ほかのロットではすべての画素が閾値のレンジより大きいか小さいかのどちらかのみであるのに対して、ロット S^3 では閾値のレンジ内に画素が含まれるため、個々の閾値より大きい画素と小さい画素が混在しているからである。

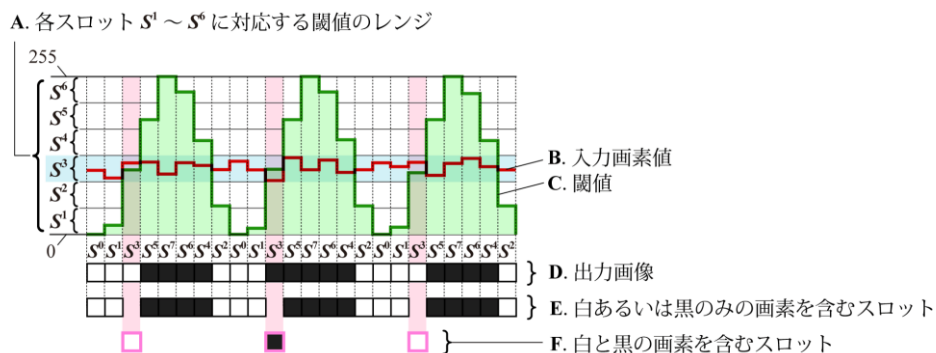


図 5-03 ステッピングディザ法による二値化プロセスのモデル

図 5-04 A, B, C はステッピングディザ法のフローチャートを表す。ここでは、図 5-04 A の入力画素値と図 5-04 B のステッピングディザマスク内の閾値とを比較する組織的ディザ法により、二値化結果として出力画像 (図 5-04 C) が得られることを示している。図 5-04 D はディザマスクサイズの出力量像 (図 5-04 C) におけるロット S^3 の配置を示している。図 5-03 F で見たのと同様に、図 5-04 D でもロット S^3 には白と黒の画素が混在している。

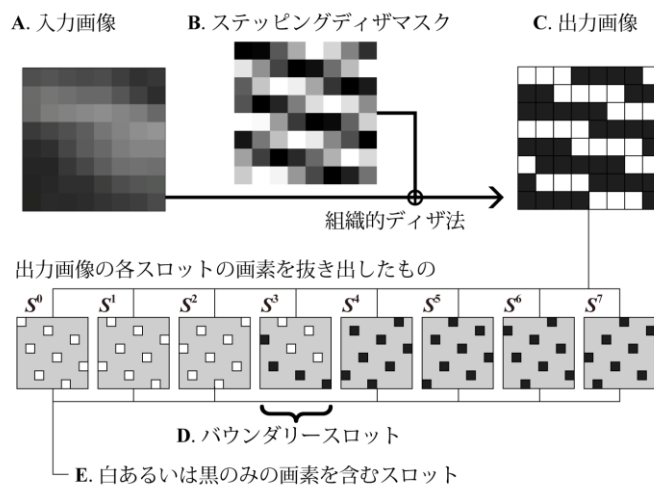


図 5-04 ステッピングディザ法とバウンダリースロット

ここで着目したいのは、このときたとえロット S^3 に含まれる白と黒の画素を入れ替える操作を行ったとしても、全体の輝度と周期的な白と黒の繰り返し構造は損なわれず、2-1-5 節で紹介した織物制約を満たすことができる、ということである。つまり、このときのロット S^3 は、画素値の明暗に従った二値化を行うターゲット領域の有力な候補となりうる条件

を備えているといえる．このようなスロットを，白と黒の境界に相当する閾値のレンジを担うスロットという意味から“バウンダリースロット”として，次のように定義する．バウンダリースロットは，そのスロットに対応する空間的配置にある入力画素の画素値のレンジが，そのスロットの担う閾値レンジと重なる領域を持つスロットである．図 5-05 A, B はバウンダリースロットをより詳細に説明するための一例を示している．ここで示したスロット S^3 のうち，スロットセル s^3_0, s^3_3, s^3_4 では入力画素値が閾値レンジよりも高い値を持つため出力結果はすべて 255，白となる．逆に s^3_2, s^3_7 では入力画素値は閾値レンジよりも低い値を持つため，出力結果はすべて 0，黒となる．残る s^3_1, s^3_5, s^3_6 では，入力画素値が閾値レンジに含まれているため，スロット S^3 の出力結果は個々の閾値との比較により 0 あるいは 255 のどちらかが決定されるため，ここでは出力画像が白，黒どちらかの可能性を持つことをピンク色で示している．なお，図 5-03 では入力画素値と閾値の大小関係が図によって明示されているため，出力画像の白と黒は確定されているが，図 5-05 A では個々の閾値が明らかでないため，出力画像中の白と黒の比率や位置は特定することができない．

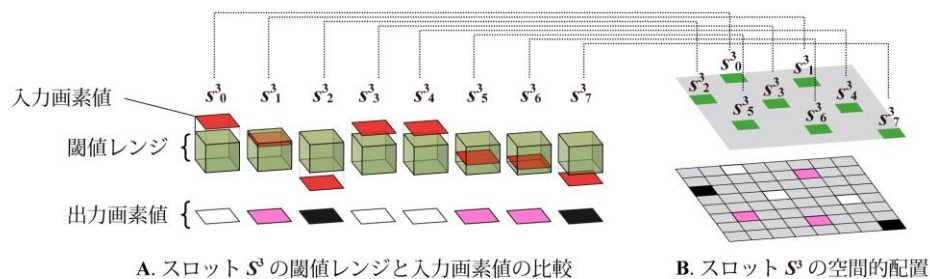


図 5-05 バウンダリースロットの概念図

ここまで見てきたことから，微細構造が保存されない原因である画素値の反転が起こっているのは，まさにバウンダリースロット内であるということが出来る．ステッピングディザ法では，均等に配置された閾値に基づき，個々の閾値と入力画素値の相互関係によって出力結果が白となるか黒となるかが決定され，入力画像の輝度をディザマスクサイズで確率的に保存される．このとき，バウンダリースロット内の個々の閾値と入力画素値の大小関係が反する場合には，画素の反転が起こって入力画像の微細構造が失われ，逆の場合には入力画素値の情報は保存されて微細構造が再現され得る．

本章で提案する手法の基本的なコンセプトは，微細構造を保存するために，バウンダリースロット内に限って二値化処理をディザマスクの閾値によってではなく，入力画素値の大小関係に基づいて行い，結果的に全体として入力画像の輝度を保存するよう，バウンダリースロット内の白と黒の数を調整するというものである．

5-1-5 提案手法（IFT（Intensity Forced Thresholding）法）の詳細

本章で提案する織物組織生成手法は，閾値が階段状の構造を持つステッピングディザマスクを用いる．そして，微細構造の保存，階調の保存，織物制約の保持という条件を満たすために，図 5-06 に示すフローチャートに示すように，バウンダリースロットの中と外という

条件分岐により，異なる2つの二値化手法を選択的に採用する．

バウンダリースロットの外では，入力画素に対してステッピングディザマスクの各スロットの閾値レンジを用いた閾値処理を行う．バウンダリースロットの定義上，この処理の対象画素の値は，当該スロットの閾値レンジ内に存在しないため，スロットの閾値レンジのどちら側にあるかを見ればよい．この処理の結果は図 5-07 (e)に示されるように白と黒の画素の周期的なパターンとなり，入力画像の輝度と織物組織パターンの保持に寄与する．

そしてバウンダリースロットの内部では，まず画素値をリストアップし，輝度順にソートする．そして入力画像の明暗の反転が起こって微細構造の再現が妨げられないよう，明るい方からカウントして k 個の画素の二値化結果を白とする．ここで k の値は，ディザマスクサイズ全体の輝度を保つのに必要な，黒い画素に対する白い画素の比率 (R_{WB}) によって求められる． R_{WB} は，すでにバウンダリースロットの外で行われた閾値処理の出力結果と，ディザマスクサイズの画素値の平均値から計算され，バウンダリースロット内に必要となる白い画素の比率として計算される．バウンダリースロット内の画素数を N_{bs} としたとき，降順にソートした画素のうち上から $N_{bs} \times R_{WB} / (R_{WB} + 1)$ 個の画素を白とし，残りを黒とする．そしてバウンダリースロットの中と外の二値化結果を統合する．

ステッピングディザマスクを用いつつ，このように輝度を重視した二値化処理を選択的に行うことから，本手法を Intensity Forced Thresholding(以降，IFT)法と呼称する．

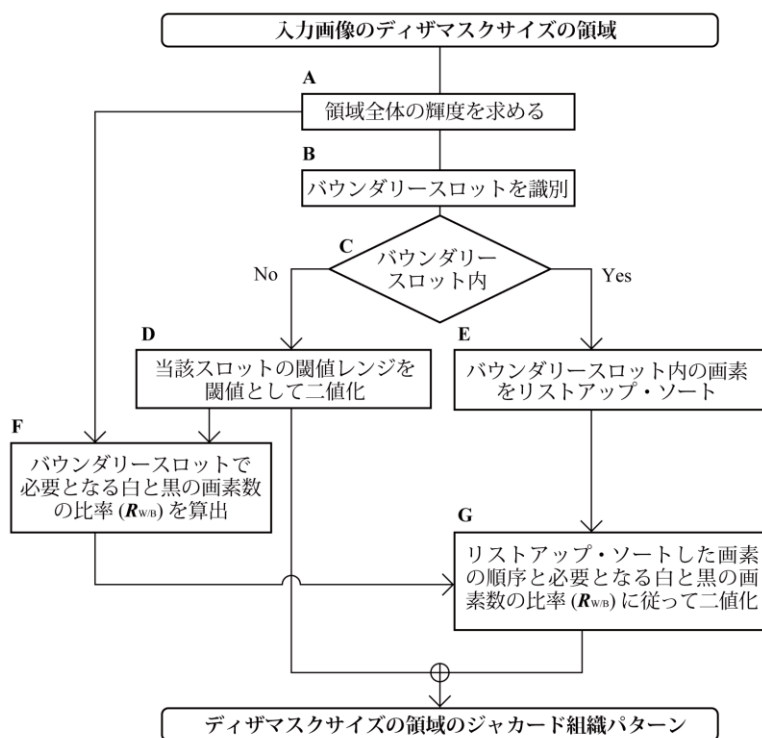


図 5-06 IFT 法のフローチャート

また，本手法においては，使用するステッピングディザマスクには個々の閾値は不要とな

り、ただ階段状の構造を持つスロットごとの閾値レンジのみがあればよい。その理由の一つ目は、前述したようにバウンダリースロット内では個々の画素はディザマスクによる閾値処理ではなく、バウンダリースロット内に必要な白と黒の画素の比率 R_{WB} に基づき画素値の大小のみで決まるからである。二つ目の理由は、バウンダリースロット外では、バウンダリースロットの定義から入力画素値が閾値レンジと重なりあうことはないため、閾値処理に必要な情報は、入力画素値がその画素に対応しているスロットの閾値レンジ全体より上か、あるいは下かだけしかないのである。それゆえ、本手法ではディザマスクは個々の閾値を持たず、スロットごとに担う閾値のレンジが重要な役割を担う。

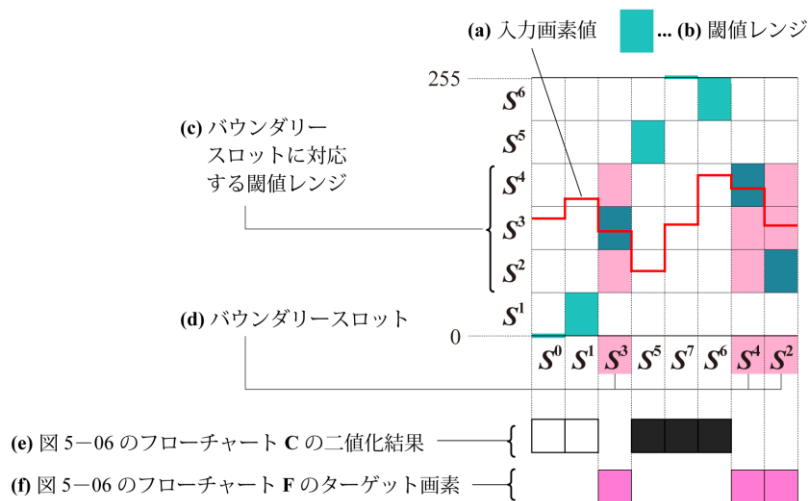


図 5-07 IFT 法のプロセスの例

なお図 5-07 (f)の二値化結果が白と黒のいずれかではなくピンクで示されているのは、図 5-06 F で必要となる白と黒の画素数の比率 R_{WB} がこの図だけでは得られないためである。こうして得られた二値化結果を統合することで、所望する織物組織となる出力画像が生成される。

5-1-6 階調差の強調効果とその制御方法の導入

IFT 法による処理結果を図 5-08 (e)に示す。図 5-08 (b)～(d)に示した従来手法に比べ、入力画像（図 5-08 (a)）中の微細な構造がより明確に再現されていることがわかる。ただし、ここではディザマスクサイズでの明度は保存されているものの、バウンダリースロットに含まれるすべての入力画素の輝度の違いは、白と黒の二極に拡大されて二値化が行われているため、ローカルな階調差の強調が行われているケースがある。この階調差の強調はデザイナーの意図を超えた過剰なものである場合も考えられるため、ここで強調度合を制御する手法を提案する。

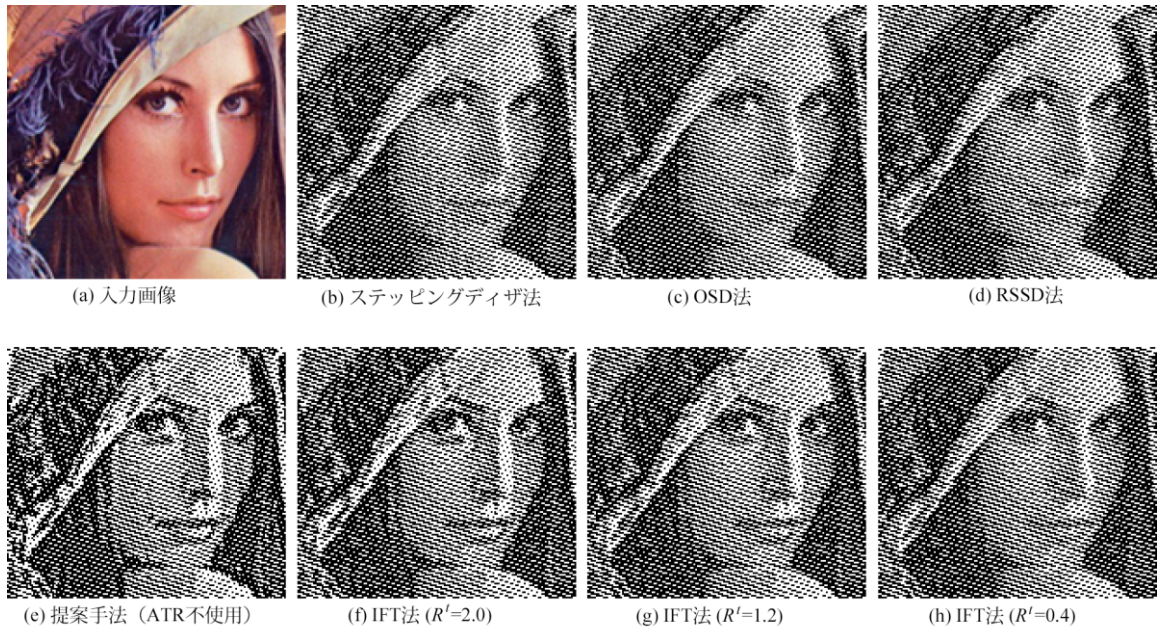


図 5-08 IFT 法による処理結果の例

制御方法は、輝度順に二値化処理を行う対象となる画素を、任意に減少できるようにすることである。前節で述べた IFT 法における輝度順の二値化処理を行う対象画素は、バウンダリースロット (図 5-07 (d)) に含まれる画素すべてだったが、ここで新たに対象画素を制限する概念、“ATR (Adjusted Target Range)” (図 5-09 a-B) を導入する。ATR は、バウンダリースロット内の各スロットに対応する閾値レンジの中央値 (図 5-09 a-C) を基準として、上下に d の幅をもつレンジであり、 d は式(5-1)で定義される。

$$d = R' * S / (n - 2) \quad (5-1)$$

図 5-09 (b)の例では、スロット S^2 に位置する画素 (図 5-09 b-G) は、バウンダリースロットに属する画素だが、ATR の導入によって輝度順の二値化処理の対象からは除外されることになる。

図 5-09 (b)のスロット S^2 の画素の二値化は、フローチャートの図 5-06 D における当該スロットの閾値レンジを閾値として行った閾値処理と同様に、スロット S^2 の ATR を閾値とした入力画像の閾値処理により行われる。

式(5-1)において R' は、デザイナーが階調差の強調度合を制御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。値 n はディザマスクサイズ、値 $(n-2)$ は $0 \sim 255$ の画素値を分割する閾値レンジの数にあたり、 n が増えて各スロットの閾値レンジが狭くなったときに d を狭めることで、 n が変化しても R' の効果が大きく変わらないよう作用する。図 5-08 (f), (g), (h) は、ATR を導入した IFT 法による処理結果を示している。係数 R' を変化させることで階調差の強調が制御できていることがわかる。以降、ATR を導入した手法を IFT 法と呼ぶこととする。図 5-10 に、ATR を導入した IFT 法のフローチャートを示す。

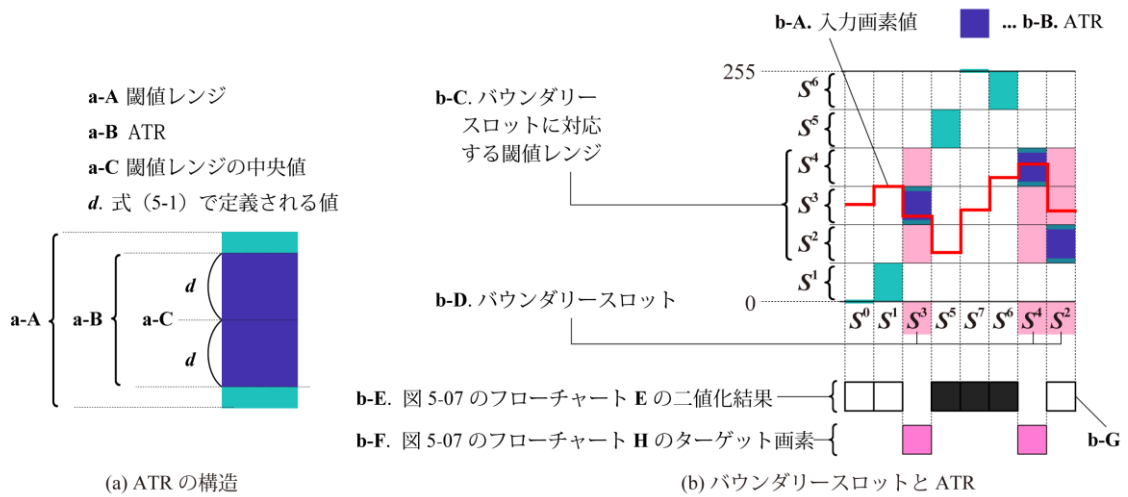


図 5-09 IFT 法の階調差強調の制御

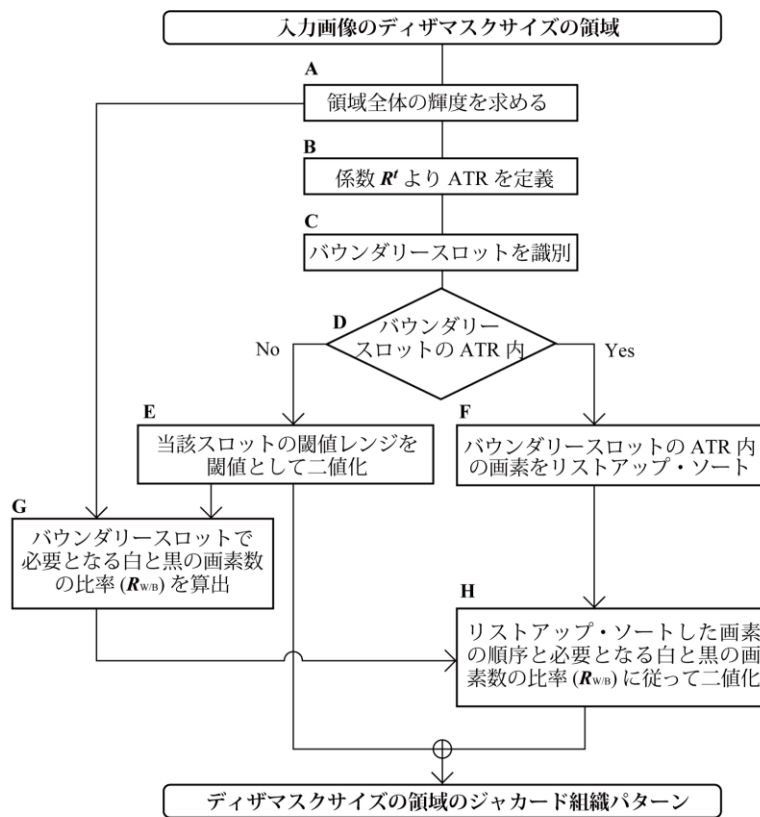


図 5-10 ATR を導入した IFT 法のフローチャート

5-2 OSD 法と IFT 法の併用

5-2-1 階調差の強調効果とその制御方法の導入

本章で提案した IFT 法では、微細構造の再現性を向上させることで、高周波領域に対応したステップングディザ法の拡張を行った。一方、前章で提案した OSD 法は、画像の緩やかな階調変化でのアーティファクト発生を防ぐことで、ステップングディザ法に対して、低周波領域に対応した拡張を行った。IFT 法及び OSD 法がそれぞれ入力画像の高周波領域、低周波領域へのステップングディザ法の拡張を行っていることを踏まえ、OSD 法と IFT 法を併用する手法を提案する。

まず入力画像に対して OSD 法と IFT 法の双方を用いた結果画像のレイヤーを用意し、次に入力画像のローカルな画素値の変化の度合いをもとに閾値処理をすることで、OSD 法と IFT 法のどちらの結果を採用するかを決定する。その判定には入力画像の座標 (x, y) における画素値 $p(x, y)$ と周囲の画素値との差分を用いることとする。画像の変化の度合いを

$$A^p(x, y) = \frac{1}{24} \sum_{i=-2}^2 \sum_{j=-2}^2 |p(x, y) - p(x+i, y+j)| \quad (5-2)$$

とし、閾値は T^p として、 $A^p \geq T^p$ となったとき IFT 法が用いられる。

図 5-11 は $T^p=6$ として処理を行った例を示す。また図 5-12 には T^p の違いによる変化の例を示した。

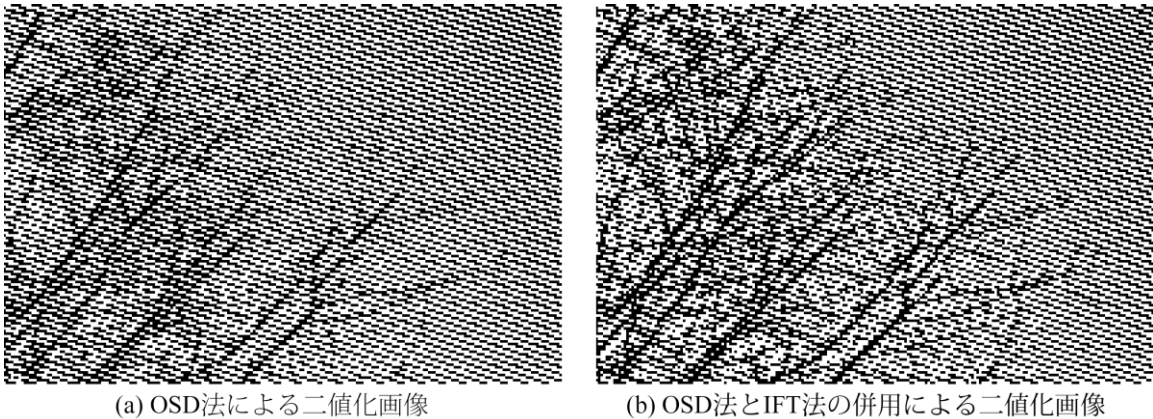


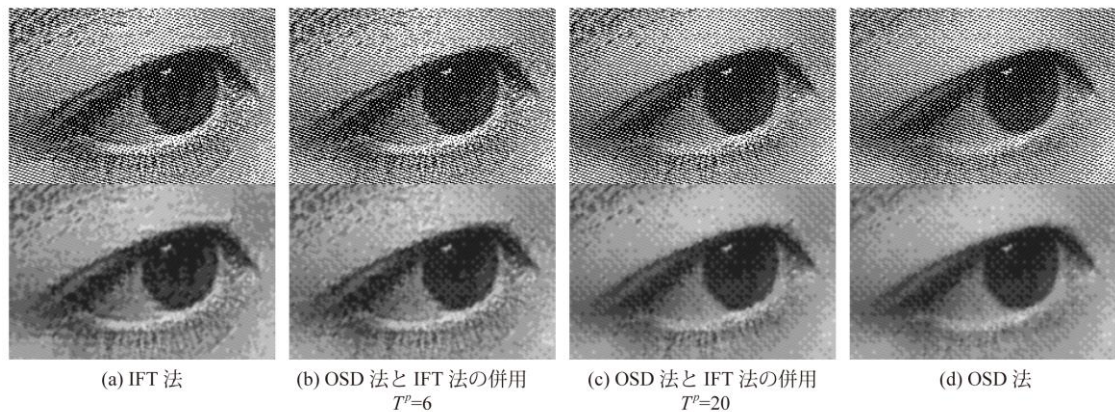
図 5-11 OSD 法と IFT 法の融合を行った例

$$n=8, m=3, R^t=2.0$$

通常、隣接した領域に異なるディザ法を用いたときにはその境界にアーティファクトが発生してしまうことが多い。しかし図 5-11, 図 5-12 が示すように、本章で提案した手法ではそうしたアーティファクトの発生が見られない。それは次のような理由によるものと考えられる。一つ目は、二つの異なる二値化手法はそれぞれ同じ縞子組織をベースにしたステップン

グ構造を持つディザマスクによるもので、出力結果も基本的に構造を持つよう誘導されるからである。二つ目は、微細構造を保存する IFT 法は画素の複雑さが増すに従ってその効果が漸進的に高まるよう設計されているためである。三つ目は、ユーザは係数 TP によって二つの手法のどちらが選択されるかの基準を変化させることによって明瞭な境界が生じないように調整できるためである。

図 5-12 では、IFT 法と OSD 法の併用における係数 TP の違いと IFT 法及び OSD 法による結果を比較したものを示す。まつ毛のような高周波領域の再現性は IFT 法に近い(b)の $TP=6$ が高い結果が示されているが、まぶたのような低周波領域では OSD 法に近い(c)の $TP=20$ の方が肌の滑らかさがよく示されている。この比較から、係数 TP はすべての条件で最適な値があるわけではなく、入力画像のどの要素を重視するかというデザイナーの意図をもとに決められるべきであるということが出来る。



上段が二値化処理結果を示し、下段がそれぞれにガウシアン処理を施したもの。
(a)~(d) はいずれも $n=8, m=3$, (a)~(c) はいずれも $R'=2.0$ の条件で処理した。

図 5-12 TP の違いによる処理結果

5-3 実験及び考察

5-3-1 試織結果

図 5-12~5-15 は従来技術と本論文の提案手法による処理結果を織物組織データとして試織した結果を示す。図 5-13 は 2 つの異なる係数 R' による微細構造の再現性を従来技術と比較したものである。提案手法によるものは R' の増減によって細部の再現性が変化し、いずれも従来技術 (図 5-13 (a), (d)) よりも再現性が優れていることがわかる。図 5-14 は低コントラストの入力画像における微細構造の再現性を係数 R' の違いによって示したものである。 R' が増えるにつれ富士山の雪渓部分の細部が明瞭になっていることがわかる。図 5-15 はディザマスクサイズ n が 8, 11, 16 のときの結果を比較したものである。ディザマスクサイズが変化したときにも微細構造が保存されていることがわかる。

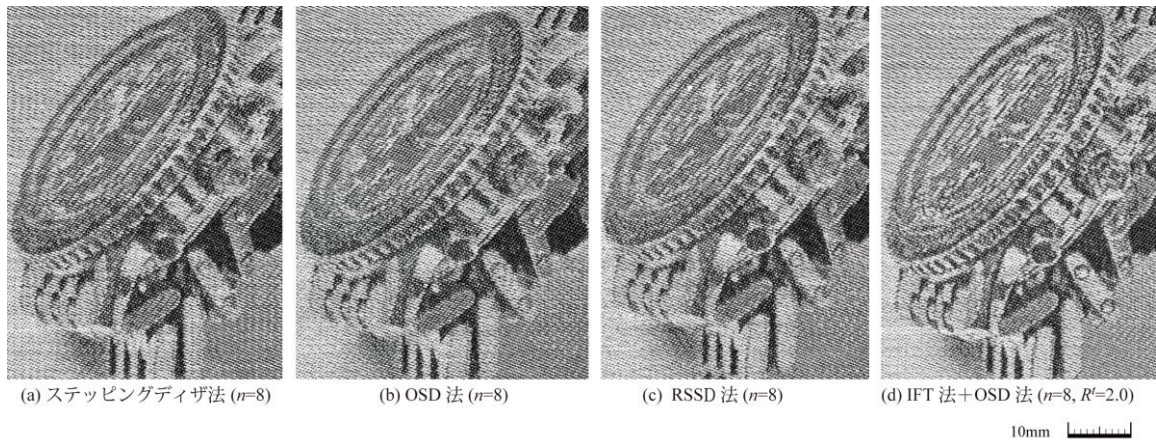


図 5-12 製織試験結果

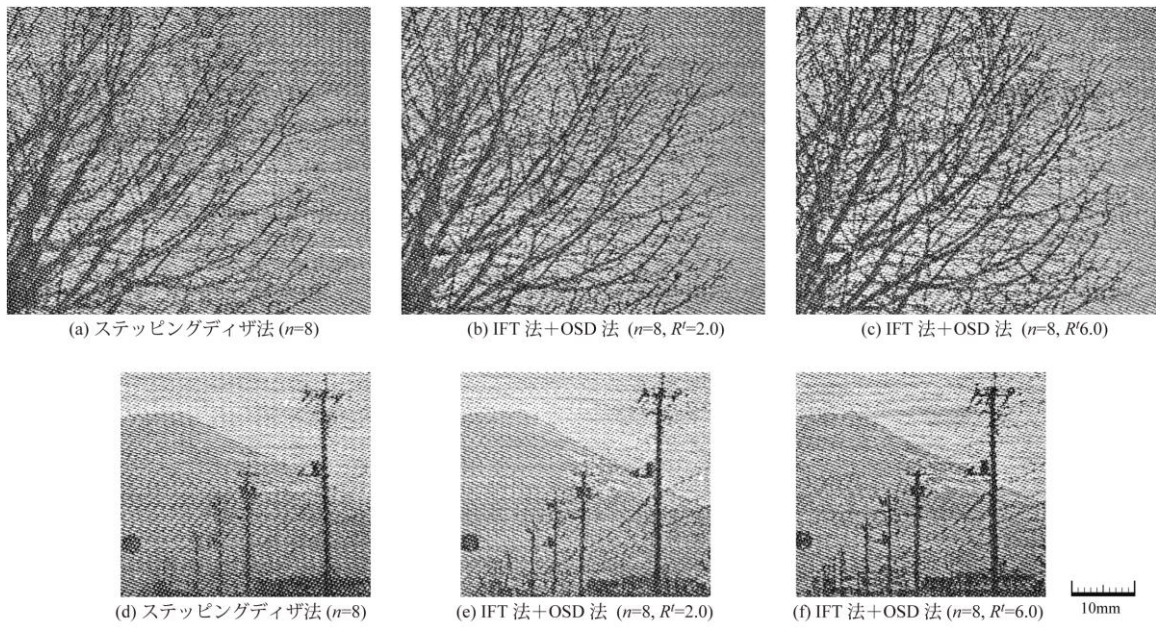


図 5-13 製織試験結果

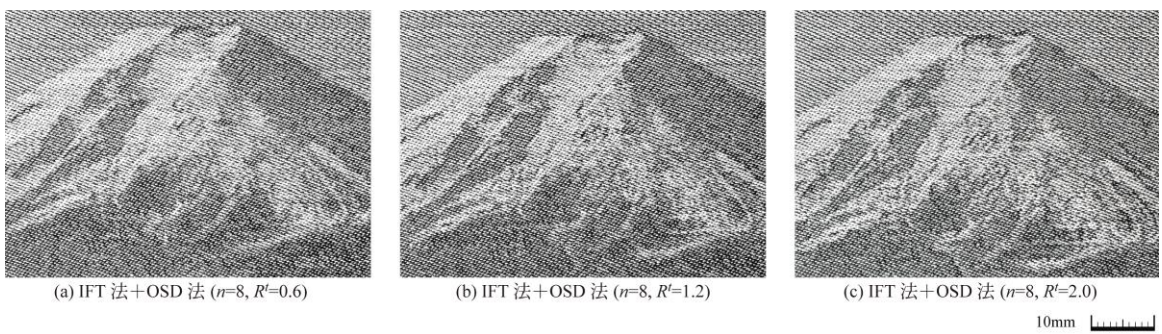


図 5-14 製織試験結果

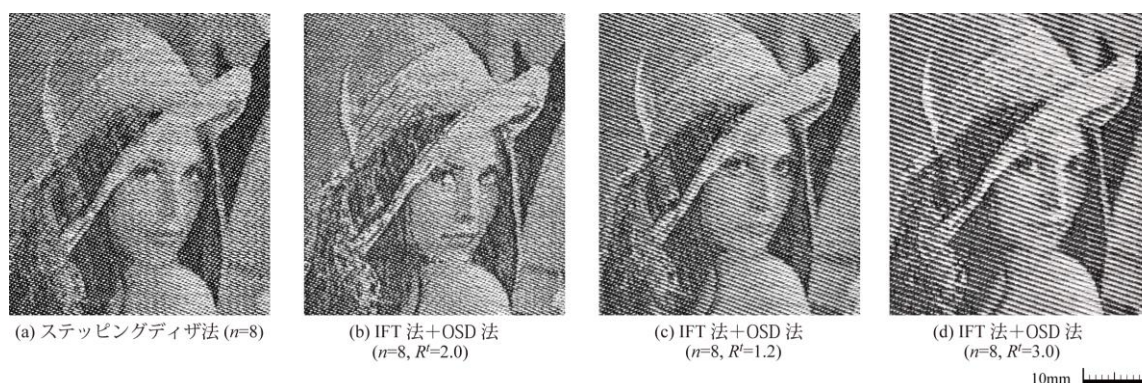


図 5-15 製織試験結果

本研究で開発し提案した手法、IFT 法及び IFT 法と OSD 法の併用手法は、試織結果から、自然画像のうちスムーズな領域、微細に変化する領域の双方に対して再現性が向上する結果が示されたことで、低周波領域、高周波領域について従来の織物ディザ法を拡張することに成功したといえる。この技術はジャカード織物の持つ表現力を高めるツールとなることが期待できる。

5-3-2 ハイブリッドイメージへの応用

本章では、微細構造の再現と、スムーズな階調変化の双方を改善するため、IFT 法、OSD 法の併用による手法を提案し、その効果を実証する実験結果を示した。織物製品を創作する上で、この技術によって生まれる価値を最も有効に活用できる手法の一つとして、ハイブリッドイメージ^[5-02]への応用が考えられる。

ハイブリッドイメージは、一つは高周波成分、他方は低周波成分からなる二つの画像を重ね合わせたもので、一枚の画像が違った画像に見えるトリックアートの効果をもたらす。人の視覚特性から高周波成分は近距離、低周波成分は離れた距離から認識しやすいため、合成された二つの画像は距離によってどちらが見えるかが決まる。この距離による見え方の違いを視力の測定に利用する方法など様々な用途が検討されている^[5-03]。

本研究で提案する IFT 法、OSD 法がそれぞれ画像の高周波成分、低周波成分の再現に適した技術であることから、ハイブリッドイメージは最も提案手法の効果が顕著に伝達できる事例として取り上げることとする。

図 5-16 に、IFT 法を用いてハイブリッドイメージを二値化した例を示す。図 5-16 (b) はフリーソフト HYBRiDiMAGE^[5-04]を用いて作成したハイブリッドイメージで、図 5-16 a-1「NEWS」の低周波画像と図 5-16 a-2「東西南北」の高周波画像とのハイブリッドである。図 5-16 (b) では「NEWS」、拡大した図 5-16 (c) では「東」の方がよりよく視認できる。図 5-16 (d), (e) はそれぞれ OSD 法、OSD 法と IFT 法の併用により二値化した入力画像の一部を示しており、それぞれの試織結果を図 5-17 に示す。図 5-16、図 5-17 の双方とも、IFT 法を用いた方で高周波成分の「東西南北」がよりよく再現されていることがわかる。また低周波成分による「NEWS」は

図 5-17 下段に示すようにどちらも視直径が小さいときに「東西南北」よりも視認性が卓越している．図 5-18 は他のハイブリッドイメージを製織した例を示す．



a-1 低周波成分用



a-2 高周波成分用

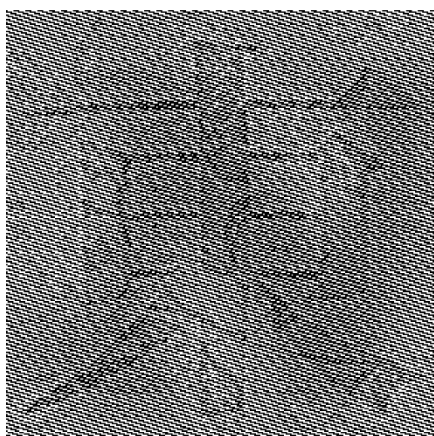
(a) 本章提案手法のための入力画像として用いた
ハイブリッドイメージを作成するための入力画像



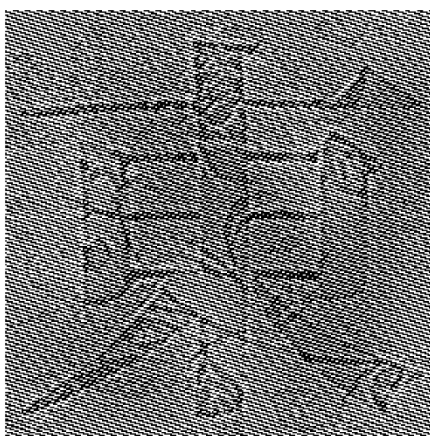
(b) 入力画像



(c) 入力画像 (部分)



(d) OSD法による二値化画像 (部分)



(e) OSD法とIFT法の併用による二値化画像 (部分)

図 5-16 IFT 法を用いてハイブリッドイメージを二値化した結果

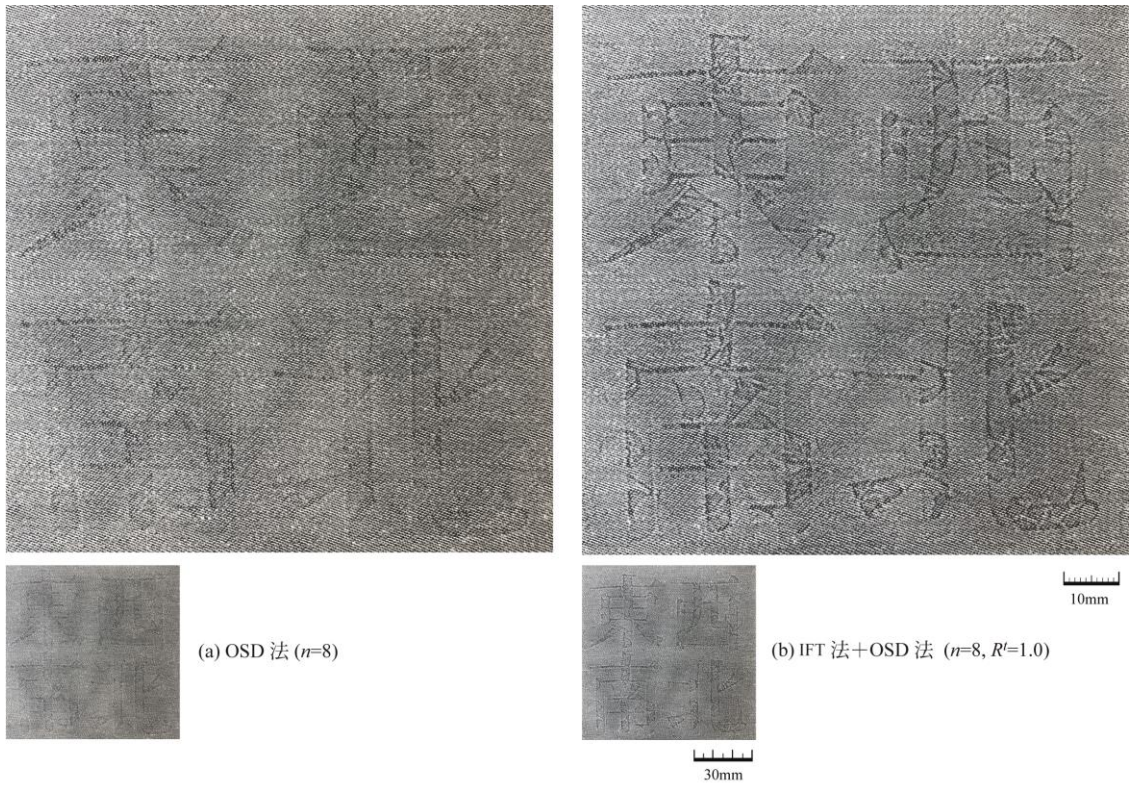


図 5-17 IFT 法を用いてハイブリッドイメージの製織結果

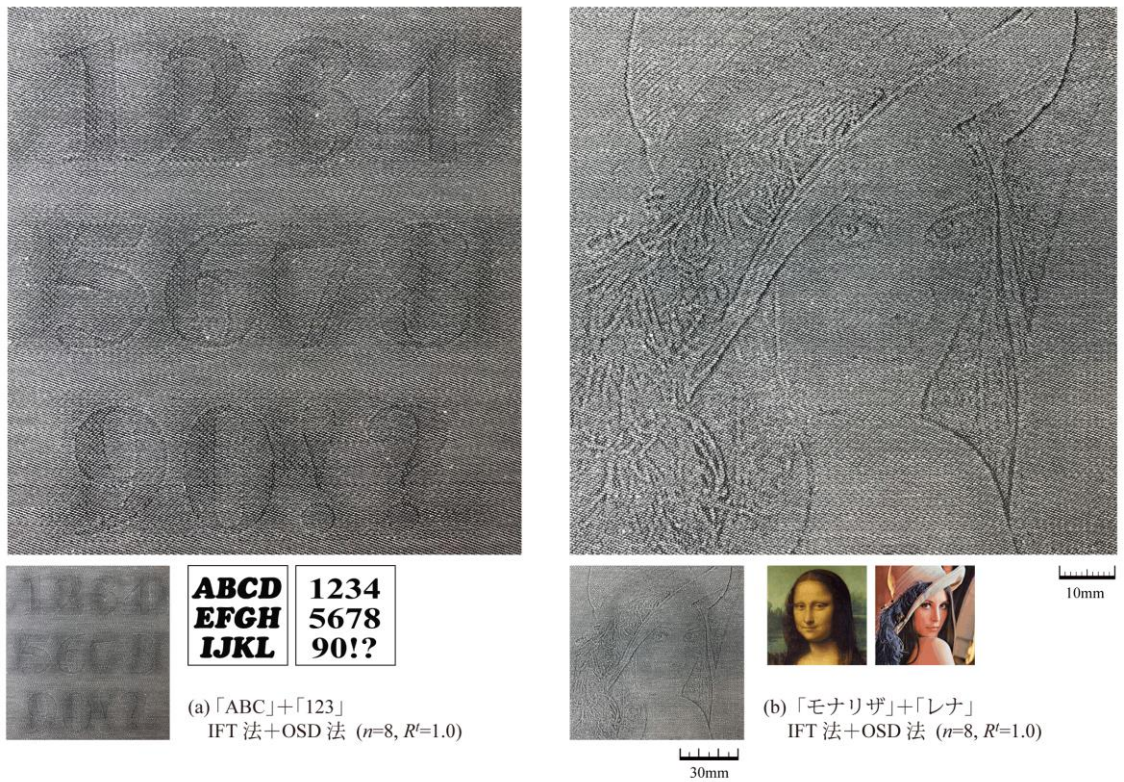


図 5-18 IFT 法を用いてハイブリッドイメージの製織結果

表 5-1 は本章での試織に用いた製織条件を示す。

表 5-1 製織条件

製織条件	経糸	緯糸
素材	ポリエステル 100%	綿 100%
織度	50d/2	60s/1 (EC)
密度 (n=8)	234本/鯨寸	195本/鯨寸
密度(n=11)	234本/鯨寸	209本/鯨寸
密度 (n=16)	234本/鯨寸	234本/鯨寸
ジャカード機	Stäubli JC5	

ハイブリッドイメージを織物生地上で表現することは、本研究の効果を顕著に示すものである以上に、織物生地を使った衣服やインテリアなどの製品としても付加価値を高める手法となり得ると考えられる。なぜなら、本研究で扱う技術分野の先染めジャカード織物は、糸の微視的な構造から角度によって見え方や光沢感が異なる効果^{[5-05] [5-06]}が付加価値となっているが、これに距離によって違った意匠が現れる効果をさらに付け加えることは、ほかの手法では得られない価値を織物に付与することになると考えられるからである。

5-3-3 専門家による評価及びコメント

第 4 章、第 5 章で紹介した提案手法の OSD 法、RSSD 法、IFT 法による試織結果の評価について、ジャカード織物の企画・デザイン・設計の専門家である(株)榎田商店の田村知恵巳氏、宮下織物(株)の宮下珠樹氏にヒアリングを行った結果、次のような評価とコメントを得た。

(1) (株)榎田商店 田村知恵巳氏

- ・ IFT 法では細かいニュアンスをよりはっきりと表現できていることが確認できる。(OSD 法を用いた緩やかな階調変化による) ぼかしについても、ノイズ状ではなく織物組織パターンを生かしたものは美しさを感じる。
- ・ 水彩画のようなぼかしをジャカード織物で表現してほしいとクライアントから要求される。水彩画のような表現をやろうとしているが、ノイズディザ法だとふんわりときれいなぼかしにならない。研究では白と黒の糸で試織しているが、多色のジャカードでこの効果が得られるとありがたい。

(2) 宮下織物 (株) 宮下珠樹氏

- ・ いまはノイズディザを使ってデジタル画像のジャカード織物を設計している。それ以外の表現方法が得られるのは表現の幅を広げるために有益だと思う。
- ・ ハイブリッドイメージのように、目の錯覚のような効果を利用した表現は面白いと思う。織物生地に接近してプライベートゾーンに入れた人だけが見えるなら、メッセージ性のあるデザインなどの利用方法が考えられる。
- ・ もしもプリントによるハイブリッドイメージでも得られる効果が同じだとすれば、コスト面でハンデのあるジャカード織物で織る意味が失われる。ジャカード織物ならではの

良さ、ジャカード織物だからできる表現ができるが良い。

- ・研究では経糸が黒、緯糸が白の 2 色で試織しているが、以下のような異なる組み合わせでどうなるのかに興味がある。

① 高周波成分と低周波成分をそれぞれ異なる色の緯糸で表現すること

② 経糸と緯糸を全く同じ色で織ること

①の場合、それぞれの緯糸の色で表現されたハイブリッドイメージになるのであれば、先染めジャカード織りならではの表現ということができる。②の場合、それでもハイブリッドイメージの効果がわかれば、それは色ではなく織物組織パターンに基づく糸の構造によるものであるため、プリントでは実現できない、ジャカード織物ならではの表現ということができる。

5-3-4 考察

本章で提案した IFT 法は、ステッピングディザマスクのスロット構造を保持するよう調整された範囲で選択的に入力画素の輝度の順序を優先する二値化処理と組織的ディザ法による閾値処理を併用することで、微細構造の再現を改善しながら、織物組織パターンに従うような結果を得られることを示すことができた。

また、前章で提案した緩やかな階調に出力結果を最適化する OSD 法を併用することで、入力画像の低周波及び高周波領域の双方をよりよく再現する結果を示すことができ、従来手法の持っていた再現可能な空間周波数のレンジを広げることができた。またその効果を顕著に示すことのできる例として、5-3-2 節でハイブリッドイメージを利用した試織で示したように、織物上で意匠を再現する上で新しい表現方法の幅を広げる可能性を示すことができたと考える。

ただし 5-3-3 節で専門家の指摘があったように、ジャカード織物に新たな表現技術を付け加えただけではなく、それがジャカード織物ならではの表現でなければならないということに留意する必要がある。とはいえ、もともと本研究の対象分野である先染めジャカード織物は、糸の微視的な構造の違いと角度による見え方や光沢感の違いがもたらす外観上の視覚効果^{[5-05][5-06]}がその価値の重要な要素であり、またそれはプリントでは得られないものである。しかし専門家の指摘は、それが一見して顕著に分かるようなものでなければ消費者やバイヤーに訴求できず、いかに従来手法を改善したものであったとしても利用価値を見出せないという評価であった。そのためにはコメントにあったように色糸の変更や多色化などの観点から技術を発展させていくことが今後の課題である。

次章以降では、これまで提案した手法のもつメリットを顕著に表し伝達するための手法として、織物組織パターンのバリエーションを駆使すること、表現可能な明暗のコントラストを高めて糸の光沢をハイライトで効果的に活用することという二つの角度から、本研究の提案手法を補足する提案を行う。

第6章 縹子線及び変則縹子の活用による発展

本章では、これまでステッピングディザマスクの基本的な構造として用いてきた縹子組織について、デザイナーにより織物設計とデザインの自由度を高める観点から、利用可能な組織パターンのバリエーションの範囲と選択基準について確認する。まず縹子組織における異なるサイズ n 及び飛び数 m による縹子線の方向の違いとその効果について取り上げ、縹子線という階調表現以外の情報の再現を観点に論じながら、これまでの手法の発展について考察する。また縹子組織として通常用いられる正則縹子だけでなく、変則縹子についても論じ、これまで提案してきた手法への適用について検討するほか、入力画像の領域分割手法等との併用による試織結果をもとに、変則縹子を用いることによるタッチ、質感の違いを表現する活用手法を提案する。

6-1 組織のバリエーションと自由度

織物上への画像の忠実な再現のための技術開発としてこれまで論じてきた手法は、サイズ n と飛び数 m で定義される縹子組織のパターンを基本構造として用いてきた。異なる n と m による縹子組織のバリエーションについて、数多くの種類が存在することはすでに 2-1-6 節及び図 2-09 に示した。2-1-3 節で述べたように、デザイナーは織物上への画像の再現に適した織物組織を選択するとき、織物生地 of 風合いや使用する糸の種類など様々な要素を勘案して n 及び m を決定する。

本論文で提案する手法をデザイナーが用いることを考えたとき、デザイナーがステッピングディザマスクのベースとなる縹子組織をどのような観点から選択すればよいかを考えたとき、縹子組織ごとの違いや特徴を明らかにすることは、本研究にとって重要な点となると考えられる。

また、デザイナーの選択肢の幅、デザインの自由度の観点からみたとき、織物組織のバリエーションが多いことはデザイナーにとってより有利に働くと考えられるので、選択可能な組織の種類を明らかにし、また選択可能な組織の数を増やすことも、本論文の目的から重要であると考えられる。

以上から、本章では次の二つの観点からステッピングディザマスクのベースとなる縹子組織に着目して議論を発展させる。

まず一つ目は、デザイナーが選択可能な縹子組織が種類ごとにどのように異なるかを、組織サイズ n 、飛び数 m を変化させたときの結果とその違いについて着目して明らかにする。ここでは縹子織の特徴のひとつである縹子線に着目し、 n 、 m を変化させたときの縹子線の方向のバリエーションに着目し、デザイナーが組織を選択する際の判断基準を整理する。

二つ目は、飛び数 m が一定ではなく不規則に変化する”変則縹子”に着目し、その特性を生かした表現の可能性を考察することである。サイズ n が変化したときの変則縹子のバリエーションの広がりをも明らかにするとともに、どの変則縹子を選択するかを判断するときの材料の一つとして組織の対称性に着目し、変則縹子の分類方法を提案する。

本章では次節以降，次のように議論を展開する．

まず 6-2 節では n, m の違いによる縷子線の方向の違いとその利用方法について考察する．6-3 節では，飛び数 m が一定ではない変則縷子に着目してその効果について考察し，また変則縷子の n ごとのバリエーションを把握するための探索手法を紹介する．6-4 節では織物の対称性に着目して正則縷子及び変則縷子の分類整理を行い，デザイナーが組織を選択する際の判断基準となる分類方法を提案する．6-5 節では前章で提案した IFT 法への変則縷子の適用について触れ，6-6 節で試織結果をもとにした考察を行う．

6-2 縷子線について

6-2-1 n, m の違いによる縷子線の効果

2-1-6 節では，主に織物組織サイズ n の変化による経糸＝緯糸比率のレンジの違いが表現可能な色や輝度のレンジに与える影響と織物生地 of 構造の柔らかさへの影響について述べた．それを簡潔にまとめると次のようになる．

緯糸方向の階段状構造をもったステッピングディザマスクでサイズ n が増えたとき，経糸と緯糸の比率は最大で $1:n-1$ であるため，経糸：緯糸比で再現できる色のレンジも増すことになる．その反面，緯糸と経糸の交差のサイクルは n に等しいため，1 サイクルに要する糸本数が増えることで，糸本数あたりで表現可能な画像の複雑さは減少する．それらの結果，再現できる明暗コントラストと分解能はトレードオフの関係となる．一方， n の増加に従って織物の構造は緩くなり，緯糸の密度（打ち込み）を高めることが可能となるが，このことは n の増加で減少した分解能をある程度補う効果をもたらす．以上は，サイズ n が変化したときの違いである．

本節では，次に飛び数 m が変化した場合の効果として縷子線について述べる．まず図 6-01 に，サイズ $n=7$ のときに飛び数 m を変化させてできる縷子組織のバリエーションを示す．サイズ $n=7$ のとき，縷子組織の条件を満たす飛び数 m は 2-1-6 節で触れたように 2, 3, 4, 5 の 4 つが存在する．図 6-01 では，ステッピングディザマスクの階段状構造を緯糸方向としたもの（図 6-01 (a)～(d)）だけでなく，経糸方向にしたものを用いた結果も示している（図 6-01 (e)～(h)）．

図 6-01 に示したいずれの飛び数 m でも，同じ閾値のセットを持つディザマスクを使用しているため，ディザマスクサイズ単位でみたときの二値化結果の輝度は，それぞれ入力画像の階調変化に従って同様に反映されている．このとき，飛び数 m の違いによって大きく異なるのは，縷子線の方向と現れ方である．

縷子線は，一般の織物製造においては，近接した白あるいは黒の組織点が点線状に連なって見える直線を指し，図 6-01 でいうと組織図中で輝度が最低（左端）と最高（右端）のときの，白と黒の比が最大となった状態で見られるものをいう．しかし本論文では，それだけでなく図 6-01 (a)の中央付近に見られるような，生成されたジャカード組織パターンのうち，入力画像の輝度に応じた組織点の増加によって現れる直線も同様に縷子線と呼ぶものとする．

図 6-01 のそれぞれのジャカード組織パターンに見られる縷子線の方向と現れ方に着目する．まず緯糸方向に階段状の閾値配置を持ったステッピングディザマスクを用

いた図 6-01 (a)~(d)をみると、飛び数 $m=2, 5$ のときには緯糸方向のすべての輝度で明瞭な縺子線を持ち、その方向はそれぞれの画像内で一定であるが、飛び数 $m=3, 4$ では中央部分ではっきりした縺子線は見られない。逆に、経糸方向に階段状の閾値を持つステッピングディザマスクによる図 6-01 (e)~(h)では、飛び数 $m=3, 4$ のとき明瞭な縺子線を持ち、飛び数 $m=2, 5$ では中央部分ではっきりした縺子線は見られない。

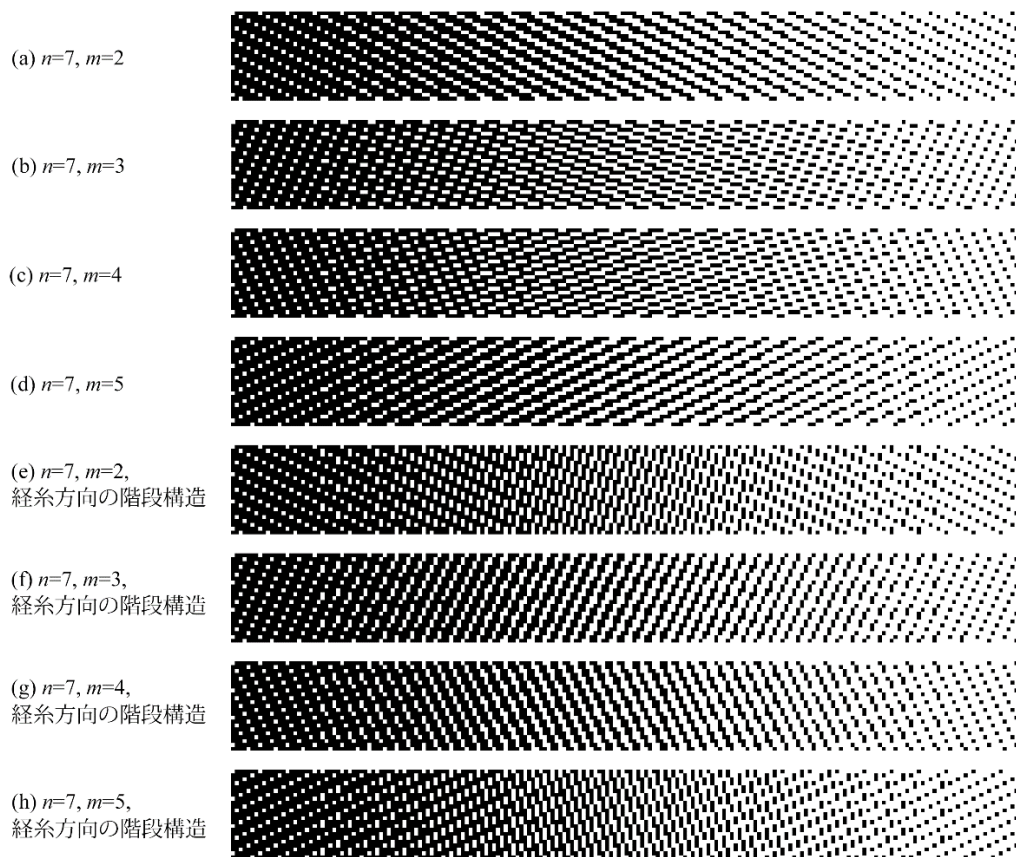


図 6-01 $n=7$ のバリエーションによるジャカード組織パターン

一貫して明瞭な縺子線を持つときと、持たないときの違いを明らかにするため、次に同じ飛び数 $m=5$ でサイズ n を変化させたときのバリエーションを図 6-02 に示す。

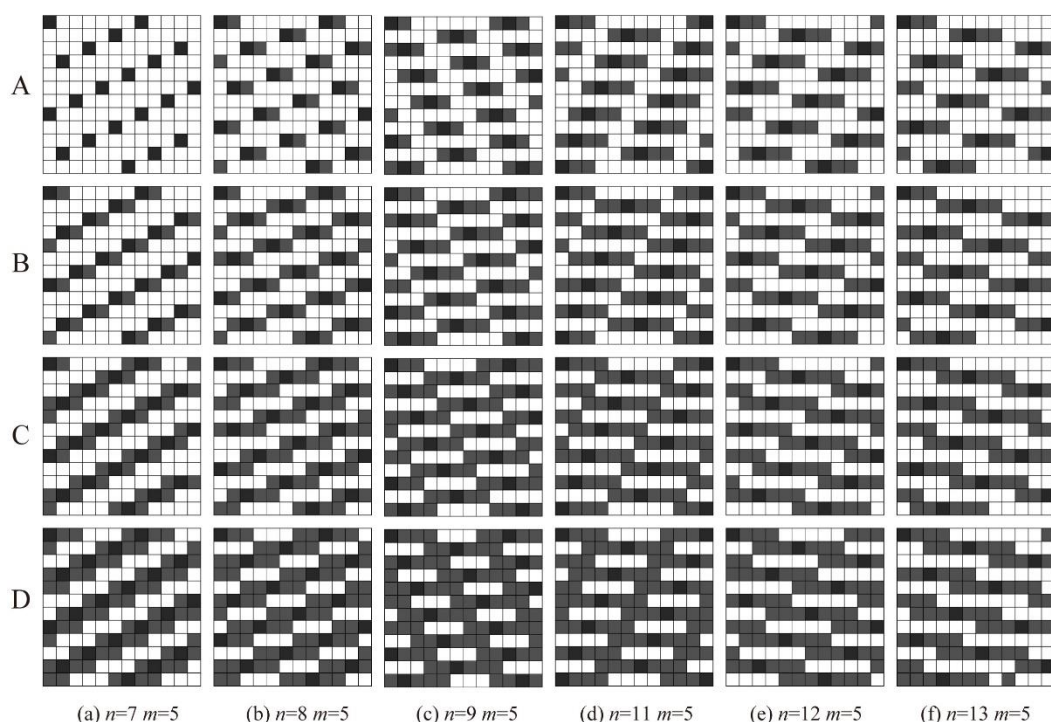


図 6-02 $m=5$ のときの縷子線の方向

A~D は, (a)~(f)それぞれの n, m の条件下で,
各行 n マスあたり 1 つずつ組織点を増加させたものを示す.

図 6-02 を全体的にみても気づくのは, 図の左右中央, 図 6-02 (c)と図 6-02 (d)を境にして縷子線の向きが反転していることである. 図 6-02 (a)~(c)では縷子線は右上がりとなり, 図 6-02 (d)~(f)では右下がりとなっている. この境界は, 飛び数 m がサイズ n に対して $m < n/2$ か, あるいは $m > n/2$ であるかの境界であり, その時の水平右方向を基準とした縷子線の角度 θ は,

$$\begin{cases} m < n/2 & : \quad \theta = 2\pi - a \tan(1/m) \\ m > n/2 & : \quad \theta = a \tan(1/(n-m)) \end{cases} \quad (6-1)$$

のようになる.

表 6-01 にサイズ n , 飛び数 m の組み合わせによる角度 θ を度数法で示し, また図 6-03 に図示する. 図 6-03 では, 飛び数 $m=1$ の場合の結果も示している. 飛び数 $m=1$ では 2-1-6 節で紹介した縷子組織の 2 つ目の条件を満たさないが, 2-1-5 節で紹介した織物制約は満たすことができる. 結果は三原組織の綾織となり, このとき 45 度の角度で組織点が接することとなる. 綾織では組織点が 45 度で接するために常に明瞭な綾目 (縷子織の縷子線に相当する) が現れることを除けば, 縷子組織と同様に綾織りの構造をベースとして階段状構造の閾値を持つステップングディザマスクを形成した場合も, 同様に階調表現を行うことは可能である. 本研究では, 縷子組織を基本として議論してきたが, ここでは綾織りも縷子組織の特殊な一形態とみなして扱うこととする.

表 6-01 n, m と縹子線の方向

m	n	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2		26.6	26.6	-	26.6	-	26.6	-	26.6	-	26.6	-
3		333.4	18.4	18.4	-	18.4	18.4	-	18.4	18.4	-	18.4
4		-	341.6	-	14.0	-	14.0	-	14.0	-	14.0	-
5		-	333.4	341.6	346.0	-	11.3	11.3	11.3	11.3	-	11.3
6		-	-	-	-	-	348.7	-	9.5	-	9.5	-
7		-	-	-	333.4	341.6	346.0	348.7	350.5	-	8.1	8.1
8		-	-	-	-	-	341.6	-	348.7	-	351.9	-
9		-	-	-	-	-	333.4	-	346.0	348.7	350.5	351.9
10		-	-	-	-	-	-	-	341.6	-	-	-
11		-	-	-	-	-	-	-	333.4	341.6	346.0	348.7
12		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	341.6

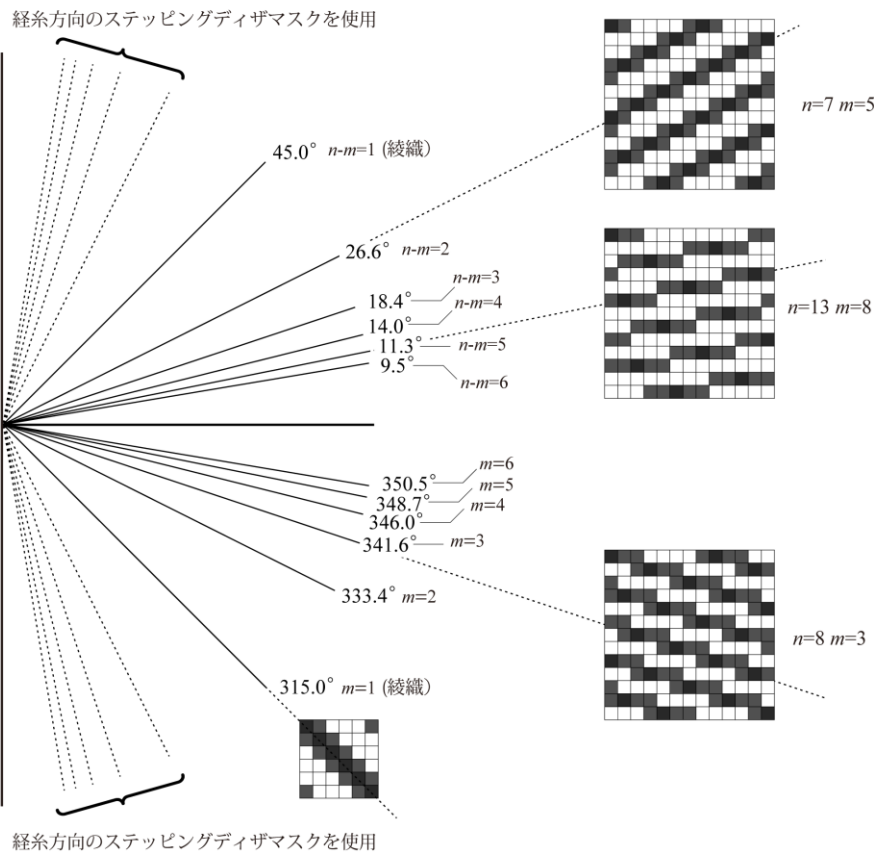


図 6-03 n, m と縹子線の方向

6-2-2 $m \approx n/2$ となる場合について

図 6-01 (b)の $m=3$, 図 6-01 (c)の $m=4$ では, 中央付近の輝度で縹子線が明瞭でなくな

っていることを示した。同様に図 6-02 (c)の $n=9, m=5$, 図 6-02 (d) の $n=11, m=5$ でも、組織点が水平に近い緩やかな角度で並ぶ斜線と同時に、アルファベットの「V」の斜線のように垂直に近い方向の斜線状の構造が目立つようになっていることがわかる。これらに共通するのは、サイズ n と飛び数 m が $m \approx n/2$ という関係にあることである。これらのとき、緯糸方向ではサイズ n に等しいサイクルで経糸と緯糸が交差している一方、経糸方向に見ると緯糸 1 本おきのサイクルで頻繁に上下が入れ替わる個所が V 字斜線上に連続して並び、それが目立ってしまうと考えられる。

このことより、デザイナーは組織選択の際に、 $m \approx n/2$ となるときに入力画像の輝度が 50%付近で視覚的に縷子線が明瞭でなくなり、こうした状況となることをあらかじめ認識しておく必要がある。なお表 5 のうち、グレー背景で示した欄は、 $m \approx n/2$ となる個所を示している。

6-2-3 縷子線の方向と効果

入力画像の再現にふさわしい織物組織をデザイナーが選ぶ際には、組織の違いから生まれる縷子線の角度の違いを配慮に入れることで、より適した織物組織を選択し、再現性を向上させることができると考えられる。

縷子線の活用方法はデザイナーの表現意図により様々な可能性があると思われるが、例えるならば入力画像に含まれる情報を縷子線によってより強めたり、逆に不要な情報を弱めたりする効果が考えられる。そのような効果の一例を図 6-04 に示す。

図 6-04 (a)の入力画像に対して異なる飛び数 m を用いて処理を行った結果である。入力画像にある右斜め上に向かった斜線の細部が最もよく再現されているのは、図 6-04 (a)の $m=2$ か、(c)の $m=3$ であると思われる。しかし、入力画像の細部の保存よりも織物組織パターン自体に右斜め上への構造を持たせることで入力画像を再現しようとする意図を持ったデザイナーは、図 6-04 (d)の $m=5$ を選択し得る。また、右斜め上への斜線と縷子線をなるべく直交させる意図があれば、図 6-04 (e)が選ばれることになる。

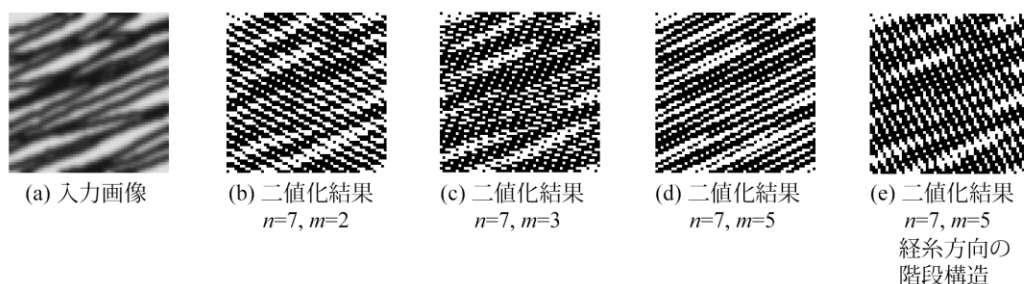


図 6-04 異なる n, m を活用したジャカード組織パターンの例

6-2-4 領域分割と縷子線の効果

本節では、前節までの知見をもとに、異なる特徴を持った縷子組織を領域毎に適用する手法について紹介する。領域毎に異なる織物組織を用いるという手法は、2-3 節で述べたように伝統的なジャカード織物で用いられるものだが、ここで述べるのは領

域毎に異なる織物組織を適用したステッピングディザマスクによって二値化処理を行う手法である。

基本となるアイデアは、伝統的な芸術表現手法である鉛筆画、ペン画、銅版画で見られる、ペンなどの画材によるストローク、ハッチングなどの表現である。これらの手法では、図 6-05 に示す例のように、階調変化と同時に、描画者が画材を操る際のタッチによって描画対象の文様や質感などを表現することが珍しくない^{[6-01][6-02]}。

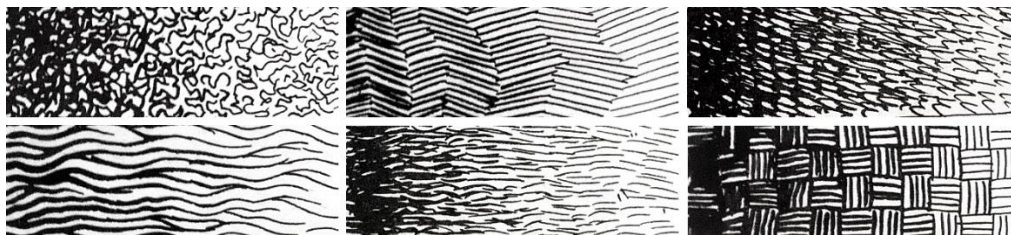


図 6-05 パターンやタッチの違いで質感と階調変化を表したペン画の例

従来研究では、入力画像のランダムディザ法による二値化結果をもとに LIC (Line Integral Convolution) を用いて入力画像のベクトル場から鉛筆画のストロークを導く手法^[6-03]や、さらにこれを動画の生成に用いた例がある^[6-04]。

Ostromoukhov は伝統的な銅版画の技法をモデルとし、領域分割によって階調表現と入力画像のローカルな情報の双方を同時に再現した画像を生成する手法を提案した^[2-30]。Ostromoukhov の手法は、階調変化を太さの異なる曲線あるいは直線の線描で表すという銅版画で用いられる手法をもとにして、生成画像が描画対象の三次元曲面を表すのに適した曲線となるよう、あらかじめ変形させたマスクをそれぞれのレイヤーに適用し、あたかも銅版画家のストロークを描かれたかのような表現を実現する。

ジャカード織物では、豊浦らによって入力画像を領域分割し、それぞれの領域に異なるステッピングディザマスクを適用するコンセプトが示された^[2-21]。

ここでは豊浦らの手法をもとに、本章で述べたサイズ n 、飛び数 m による効果の違いを応用する手法を提案する。この手法は、本章で述べた縷子線やサイズ n による再現可能な色のレンジの違いを、銅版画やペン画のストロークのように活用し、領域毎に異なるパターンを生成することで、織物上への入力画像の再現をより高度化するものである。

この手法によるジャカード組織パターンの生成例を図 6-06 に示す。図 6-06 は同一の風景写真をもとに生成したジャカード組織パターンである。図 6-06 (a)は同一の縷子組織 ($n=8, m=5$)を用いたもので、図 6-06 (b)は領域ごとに異なるサイズ n 、飛び数 m を持つ複数の縷子組織を適用した例を示している。また図 6-06 (c), (d), (e), (f)は部分拡大図である。

図 6-06 (d)では、遠景の空と近景の屋根で異なるサイズ n を用いて、 n の違いによる縷糸と経糸が交差する周期の差を利用して被写体の遠景と近景を区別することにより、遠近感を表現している。

図 6-06 (f)では、屋根の斜面の角度に合わせた縷子線が現れるよう考慮してサイズ

n , 飛び数 m を選択し, 入力画像の輝度だけでなく被写体の三次元構造を同時に再現している.

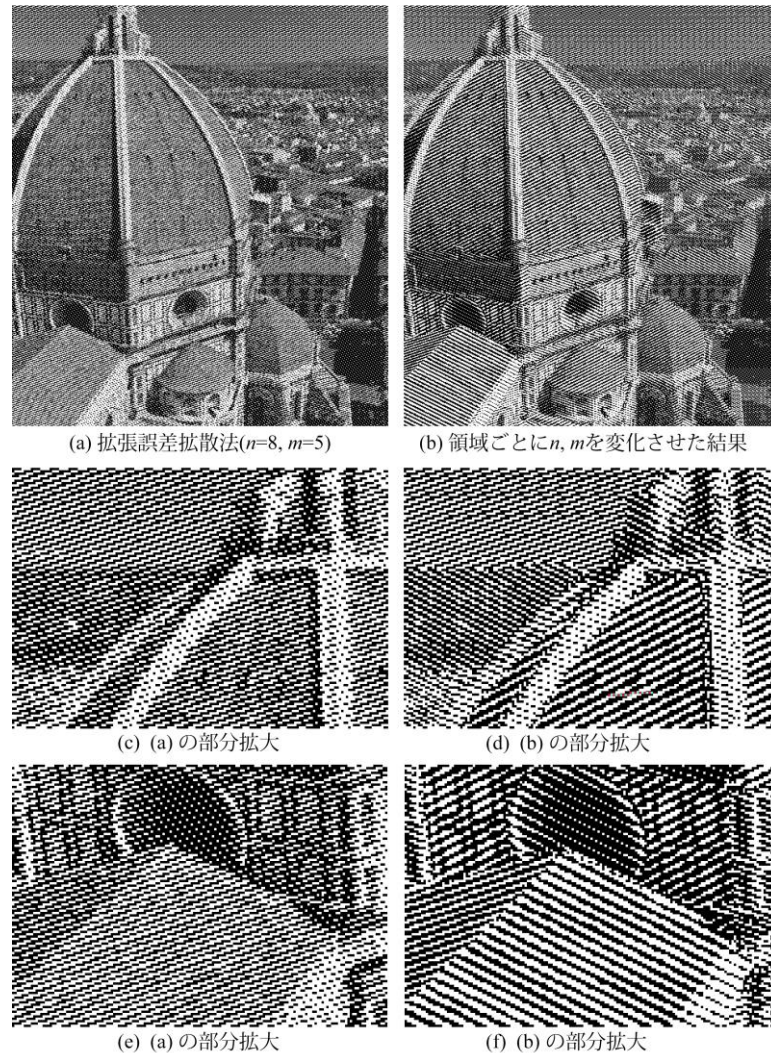


図 6-06 領域毎に n, m を変化させる手法の例

デザイナは, 第 5 章, 第 6 章で提案した本研究による手法を用いる際に, 本節で述べたサイズ n , 飛び数 m により異なる組織ごとの特徴を生かすことで, よりジャカード織物の表現を豊かなものにすることが可能であると考えられる.

6-3 変則縺子の活用について

6-3-1 変則縺子とは

本節では, デザイナの選択肢の幅や表現の自由度を増やす観点から, 新たに変則縺子に着目し, 1-2-2 節で述べた本論文の目的である自然画像を忠実に織物上に再現す

るために変則縺子を活用する手法を提案する。

まず変則縺子に先立って、ここで再び第2章 2-1-6 節で触れた縺子組織の条件、

- (1) 各行・列に一つずつ組織点を有する。
- (2) すべての組織点はいずれの方向でも他の組織点と隣接しない。

と、サイズ n が飛び数 m と互いに素であるときに縺子組織の条件(1), (2)を満たすことができることについて取り上げ、飛び数について再考する。

サイズ $n=6$ のとき、 n と互いに素となる m は存在しないため、「6 枚縺子」はルール上存在できないことになる。しかし飛び数 m が一定でなければならないという前提を無視すれば、 $m=\{3, 2, 2, 3, 4, 3\}$ のように行ごとに異なる飛び数を与えたとき、図 6-07 (a)に示すように縺子組織の条件を満たす 6 枚縺子があり得る。

このように、飛び数 m を行ごとに変化させることで縺子組織の条件を満たす組織は、変則縺子と呼ばれる。これに対して、これまで見てきたように m が一定なものは正則縺子と呼ばれる。 $n=6$ のときには、縺子組織の条件を満たすのが変則縺子のみであるため、綜統枚数が 6 枚のドビー織機で縺子組織が必要なときには、この 6 枚変則縺子を用いるほかない。6 枚以外の枚数の時にも変則縺子があることは知られているが、唯一の例外として $n=5$ のときは正則縺子しか存在しない。 $n=8$ のときの変則縺子の一例を図 6-07 (b)に示す。

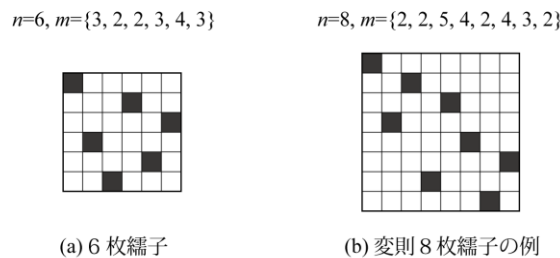


図 6-07 変則縺子の例

本節では、変則縺子をステップングディザマスクのベースとなる組織として用いる手法を提案する。飛び数は変則であっても、各列、行毎に見たとき組織点が距離 n のサイクルで現れる構造は同じであるため、変則縺子を用いても正則縺子と同様、行ごとに階段状の閾値を持たせたステップングディザマスクを作成することができる。図 6-08 に変則縺子を用いたステップングディザ法による二値化結果を示す。

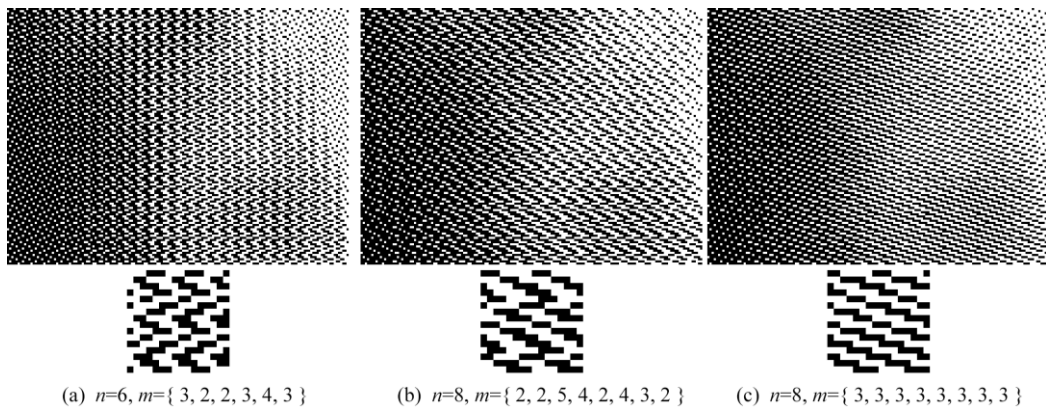


図 6-08 変則織子を用いたステッピングディザマスクによる二値化結果

図 6-08 (a)及び(b)は、図 6-07 に示した 6 枚及び 8 枚の変則織子をステッピングディザ法のベースとして用いた二値化結果であり、下段の小さな画像はそれぞれの部分拡大である。

図 6-08 (a)及び(b)は、図 6-08 (c)に示した $n=8, m=3$ の正則織子による OSD 法を用いた結果と比較して、均一な平坦さは失われるが、例えて言えば表面に凹凸パターンが刻まれたガラスを通して見た風景のように、階調変化と同時に特徴的なパターンの繰り返しが表示されていることがわかる。このようにテクスチャと同時に階調変化を表すことは、図 6-05 に示した例のように、ペン画家がパターンやタッチの違いで質感を表現するように、デザイナーが織物上で様々な質感の違いを表現することを支援する有効な手段になると考えられる。

第 4 章で述べた意図しない繰り返しパターンは除去すべきアーティファクトであったが、これらのパターンはデザイナーが表現上の意図に応じて選択することのできるものである。それぞれ特有のテクスチャを持つ変則織子をリストアップし分類することは、デザイナーの選択肢を広げる上で有益であると考えられる。では、変則織子の種類はどのくらい存在するものだろうか。次に、変則織子のバリエーションについて考察する。

6-3-2 変則織子のバリエーション探索

本節では、変則織子のバリエーション探索方法を提案し、その結果について考察する。

変則織子のバリエーションを探索することは、織子組織の条件を満たす飛び数の組み合わせを求めるという制約充足問題であり、与えられた制約を満たすすべての組み合わせの可能性についてバックトラックを用いて探索することで解が与えられる^{[6-05][6-06]}。

図 6-09 に変則織子の条件を満たす制約について図示した。図 6-09 (a)はいわゆる 8-クイーン問題として知られるもので、チェス盤上に 8 つのクイーンを互いに取られないよう配置するパターンを探索する制約充足問題である。図 6-09 (a)の Q の位置にクイーンがあったとき、ほかのクイーンを配置できるのは白いマスだけとなる。変則織子の制約条件は図 6-09 (b)に示すように、対角線方向については、一つ以上離れてい

れば配置を許されることがクイーンとは異なっている。これは将棋でいうと飛車が敵陣に入り成ったときの「龍」の動きと同じであり、いわば「八龍」問題を解くことで変則繻子は探索することができる。ただし盤上のゲームと違って、織物は図 6-09 (c) のように周期性を考慮することが必要となる。

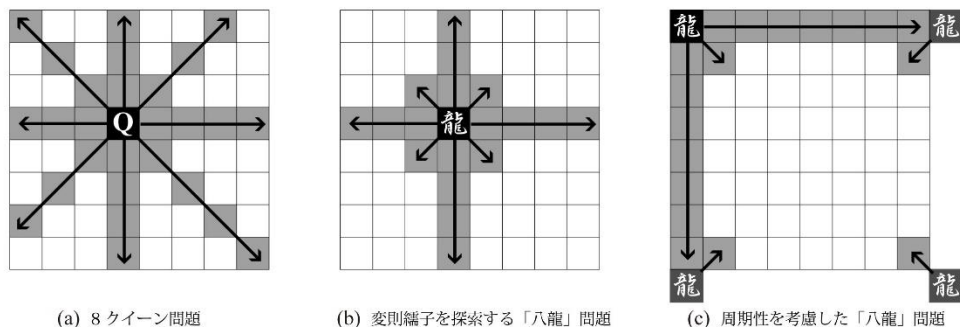


図 6-09 8クイーン問題と変則繻子の探索

バックトラックアルゴリズムを活用して探索した変則繻子の解の数を表 6-02 に示す。表 6-02 (a)に示す解は、座標(0,0)の位置に組織点があるときの基本解である。併進操作により同一となる解を除去した、併進対称性を考慮した解の数は表 6-02 (b)のようになる。ただし $n=11$ 以上については計算を行っていない。

これらのうち、 $n=5$, $n=7$ の解を図 6-10 に示し、 $n=5\sim 10$ の解については付録で示す。図 6-10 にあるように、 $n=5$, $n=7$ のいずれの時にも正則繻子が解に含まれる。以降、本章では繻子組織というとき、正則繻子と変則繻子の両方を含んだものを全体をさす。

$n=10$ までに限っても、これまでは 14 種の正則繻子が知られていたが、新たに 3,400 種もの変則繻子のバリエーションが、デザイナーの行使しうる選択の範囲に追加されたこととなる。デザイナーはこれまでの正則繻子に加え、これらのリストアップされたバリエーションをステッピングディザマスクに用いることができる。

表 6-02 縹子組織のバリエーション

n	(a)	(b)
	(0,0)に組織点があるバリエーションの数	併進対称性を考慮したバリエーションの数
5	2	2
6	6	1
7	46	10
8	354	46
9	3,106	350
10	29,926	3,005
11	315,862	-
12	3,628,906	-
13	45,132,474	-
14	604,534,846	-
15	8,680,957,902	-
16	133,082,437,730	-

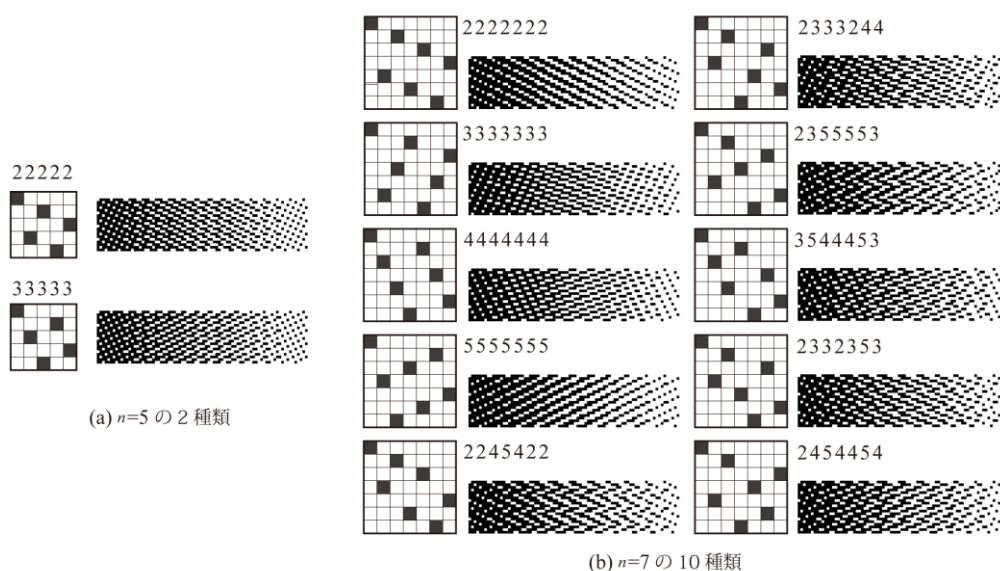


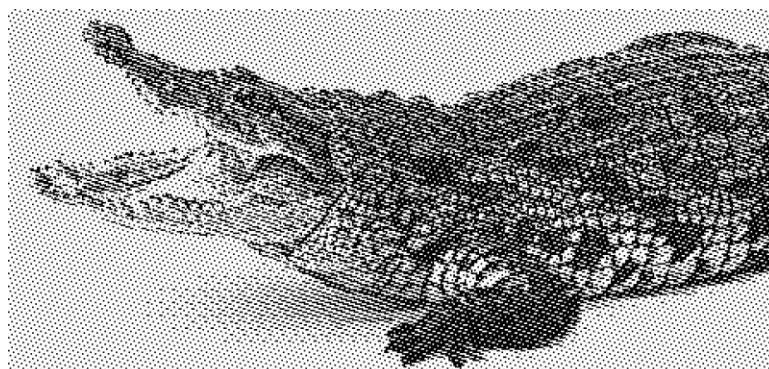
図 6-10 $n=5$ 及び $n=7$ の縹子組織のバリエーション

6-3-3 変則縹子への IFT 法の活用

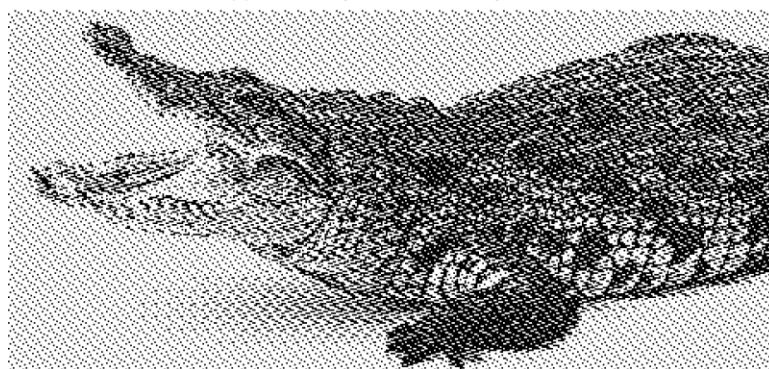
変則縹子にもステッピングディザ法が適用できることはすでに 6-3-1 節で示した。本節では、第 6 章で提案した微細構造を保存する IFT 法を変則縹子に適用する手法を提案する。変則縹子は一定ではない飛び数 m を持つが、2-1-5 節で紹介した織物制約及び 2-1-6 節で紹介した縹子組織の条件を満たしているため、緯糸方向に階段状の閾値を持つステッピングディザマスクでは、緯糸方向にサイズ n に等しいサイクルの階段状のスロット構造を持っている点で、正則縹子と変わらない。このため、変則縹子

をベースにした IFT 法による画像の二値化処理は容易に行うことができる。図 6-11 に、同じ入力画像から作成したジャカード組織パターンを示す。

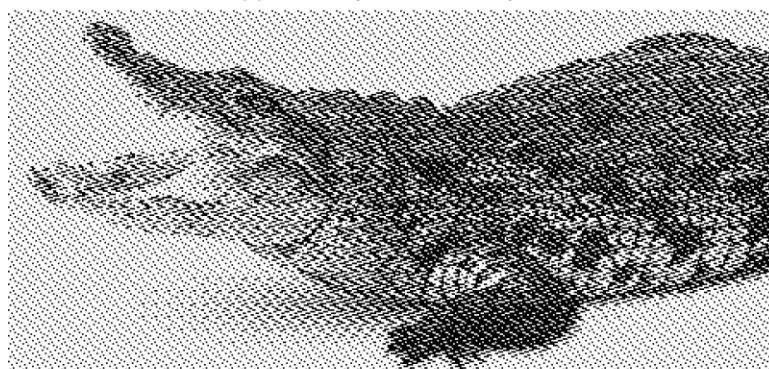
図 6-11 (a)は $n=8, m=3$ の正則繻子をベースにした IFT 法による処理結果、図 6-11 (b) は $n=8, m=\{ 2,2,5,5,5,4,6,3 \}$ の変則繻子をベースにした IFT 法による処理結果である。また図 6-11 (c)は図 6-11 (b)と同じ組織をベースにしているが、IFT 法ではなく固定した閾値によるステッピングディザ法による結果である。



(a) $n=8, m=\{ 3,3,3,3,3,3,3,3 \}$ IFT法



(b) $n=8, m=\{ 2,2,5,5,5,4,6,3 \}$ IFT法



(c) $n=8, m=\{ 2,2,5,5,5,4,6,3 \}$ ステッピングディザ法

図 6-11 変則繻子に IFT 法を適用した二値化結果

入力画像の出典:”Crocodile Free Png Image”

FreePNGimg.com

(<http://www.freepngimg.com/animals/crocodile>) (PD)

この結果からは、正則繻子を使用した図 6-11 (a)による微細構造の再現には及ばないものの、IFT 法が正則繻子とほぼ同様に変則繻子においても微細構造の再現性を高

める効果があることは明らかであると思われる。

しかし、ここで二つの問題が考えられる。一つは、飛躍的に増えた選択肢からデザイナーは求める解をどのように選ぶべきか、ということである。本論文でリストアップした縞子組織のバリエーションは数多くあるため、その中から意図に沿うものを選ぶためにデザイナーは多くの労力を要することが考えられる。この問題を解決するためには、縞子組織の外観情報だけでなく、何らかの選択基準を示すことが有効だと考えられる。もう一つは、変則縞子が持つ対称性である。これまでの正則縞子はすべて、上下反転しても同じパターンとなる対称性を持っているため、織物生地は上下を区別することなく裁断・縫製して製品の製造に用いることができた。しかし変則縞子にはその対称性があるかどうかは、単なるリストアップでは明らかではない。

そこで、本研究ではこれら二つの問題への対策として、縞子組織のバリエーションについて対称性の観点から分類整理を行うことで、デザイナーの用いるデータベースとしての利便性を高めることを目指す。

6-4 縞子組織と対称性

6-4-1 対称性による織物生地の分類

縞子組織のバリエーションに関する対称性について考察する前に、まず議論の出発点として、織物生地の対称性について検討する。なぜなら、裁断、縫製などの利用時に、織物生地はそれ自体が持つ対称性の範囲で利用時の自由度が制限されるからである。

図 6-12 は、意匠の施されていない無地の織物生地がどのような対称性を持つかについて示している。ここでは無地というのは、まず織物組織のパターンは無視したうえで、織物生地の表面上のどこを見ても識別可能な意匠がなく（併進対称性を持つ）、また上下方向及び左右方向に入れ替えても違いがあらわれない（水平軸及び垂直軸の鏡映対称性を持つ）ことを示す。無地の織物生地は、それ以外の要素である、経糸と緯糸が同じかどうか、表と裏が同じかどうかによって区別される。

例えば図 6-12 (a)に示すように、経糸と緯糸の区別がつかない生地では、90 度回転、あるいは 180 度回転をしても元の状態と区別はつかず、同一性は保たれる。しかし図 6-12 (b), (d)のように、そうでない場合は 90 度回転操作によって違いが生じ、対称性が保たれない。

こうした自由度の違いは、完成した織物生地を使って衣服などを製造する際に、どのような方向で裁断するかを決定する、マーキングとよばれる工程に大きな影響を与えるため、織物の設計をするうえでも無視することはできない。織物組織や意匠を設計する者は、こうした織物生地の対称性を意識する必要がある^{[6-07][6-08]}。

図 6-12 に示した恒等変換を含む 8 種類の変換操作（ここでそれぞれ E , R^{90} , R^{180} , R^{270} , M^h , M^v , M^{he} , M^{hw} と表す）は、正方形がもとの形と区別がつかない操作、すなわち正方形の対称操作群を示している。このうち鏡映操作 M^h , M^v , M^{he} , M^{hw} は、実際の生地の取り扱いに関しては、鏡に映したように反転させることは三次元空間内では不可能であるため、それぞれの軸で生地を三次元空間内で 180 度回転させて表裏を反転させる操作を示す。表裏の違いを問わない場合、これらの変換は鏡映操作とみな

すことができる。

また鏡映操作 M^v , M^{ne} , M^{nw} は、垂直軸で生地を 180 度回転させる鏡映操作 M^h と回転操作 R^{90} , R^{180} , R^{270} の積として

$$\begin{aligned} M^h &= M^v \cdot R^{180} \\ M^{nw} &= M^v \cdot R^{90} \\ M^{ne} &= M^v \cdot R^{270} \end{aligned} \tag{6-2}$$

表すことができ、実際の生地の取り扱いにおいても、表裏反転 (M^v) した後に回転操作 R^{90} を行うことで、鏡映操作 M^{nw} と同じ結果を得ることができる。

なお対称操作のうち併進操作については、本論文では無視するものとする。それは織物生地においては上下左右方向に連続して同じ特徴や意匠が繰り返されるのが普通であるためである。またこのことから、すべり鏡映あるいは映進と呼ばれる対称操作は、鏡映操作と併進操作の積として表せるため、併進操作を無視する以上、すべて鏡映操作に含むものとして取り扱う。

生地への操作		回転操作			表裏反転を含む操作			
		恒等変換	180度回転	90度・270度回転	垂直軸鏡映	水平軸鏡映	北西・北東軸鏡映	
変換操作		E	R^{180}	R^{90} R^{270}	M^v	M^h ($M^v \cdot R^{180}$)	M^{ne} ($M^v \cdot R^{270}$)	M^{nw} ($M^v \cdot R^{90}$)
無地の織物の対称性	(a) 経=緯 表=裏							
	(b) 経=緯 表≠裏							
	(c) 経≠緯 表=裏							
	(d) 経≠緯 表≠裏							

図 6-12 無地の織物の対称性

図 6-12 は、図 6-12 (a)~(d) の 4 種類の織物生地が、それぞれの対称性に基づいて異なる対称操作群を持っていることを一覧できるように示したものである。最も対称性の高い図 6-12 (a) はすべての操作について対称性を保つ。図 6-12 (b) は 90 度単位の回転対称性を持つが表裏反転を含む操作は許されない。図 6-12 (c) は 180 度の回転と、水平軸及び垂直軸での表裏反転の三つの対称操作群を持つ。経糸と緯糸が異なり表裏も異なる図 6-12 (d) の場合では、対称性を保つ操作は恒等操作を除けば 180 度回転の 1 つしかない。

6-4-2 対称性に基づく織物生地上の意匠の分類

前節で述べたように、織物生地は無地であってもその対称性に従って対称操作群が異なり、裁断・縫製など生地を取り扱う際には、その制限を守る必要がある。

デザイナー、パタンナは、織物上に意匠を配する場合には、図 6-12 で示したような織物自体の対称性と、織物生地上に配される意匠の持つ対称性の両方を考慮する必要がある。さらに意匠に用いられる織物組織も、その対称性の制限を考慮して選択する必要がある。例えば、デザイナーが 180 度回転対称を持つ意匠をデザインしようとする場合、織物生地は 180 度回転対称以上の対称性を持たなくてはならず、またそこに用いられる織物組織にも、同様に 180 度の回転対称が求められる。

このため、本章で取り上げる縷子組織からデザイナーがどれか一つを選択しようとするとき、織物生地と同時に意匠の対称性を意識していることがこうした観点から前提として求められる。なお、本研究は自然画像の忠実な再現が可能な織物組織の生成手法を目指すものだが、冒頭で述べたように研究の意図は抽象的な幾何学柄などのあらゆる意匠に対しても技術が活用され得ることを想定しているため、自然画像以外の対称性の高い意匠にも本技術が活用されることを前提として議論を進める。

次に、織物生地上に配される意匠自体の対称性について考えてみる。織物生地の意匠は、ジャカード織でもプリントものでも、上下、左右方向に同じ意匠が繰り返されるのが一般的であるため、その分類にあたっては、平面上に同じ文様が繰り返される文様群の概念を適用することが可能である。

平面上の文様群は、対称性から分類すると 17 種類に集約できることがロシアの結晶学者フェドロフにより 19 世紀に発見された^[6-09]。表 6-03 は 17 種の文様群を X 線結晶学で用いられる分類記号により示したものである。

これらの 17 種の文様群のうち、60 度回転、120 度回転に関する表 7 (D), (E) の 5 つの文様分類 {p3, p31m, p3m1, p6, p6m} は考察から除外する。なぜなら、織物は直交する経糸と緯糸による構造物であるため、織物生地の取り扱い上の回転操作は基本的に 90 度単位、ネクタイ生地などの例外的なものでも 45 度単位であるためである^[6-10]。

図 6-13 は、60 度回転対称、120 度回転対称を除外した残り 12 種の文様分類の対称性を持つ意匠について、織物生地の取り扱いに関連した対称操作をまとめたものを示す。

表 6-03 17種の文様群分類

(A) 回転を含まない。	
p1	鏡映、映進を含まない。
pm	鏡映を含む。映進軸は必ず鏡映軸でもある。
pg	鏡映を含まない。映進を含む。
cm	鏡映を含む。映進軸は必ず鏡映軸でもある。鏡映軸ではない映進軸がある。
(B) 180度回転を含む。90度、60度回転を含まない。	
p2	鏡映、映進を含まない。
pmm	鏡映を含む。映進軸は必ず鏡映軸でもある。
pgg	鏡映を含まない。映進を含む。
cmm	鏡映を含む。鏡映軸ではない映進軸がある。映進軸には必ずそれに平行な鏡映軸がある。
pmg	鏡映を含む。鏡映軸ではない映進軸がある。 鏡映軸ではない映進軸には必ずそれに平行な鏡映軸がない。
(C) 90度回転を含む。	
p4	鏡映、映進を含まない。
p4m	90度回転の中心を通る鏡映軸がある。
p4g	鏡映を含む。90度回転の中心を通る鏡映軸がない。
(D) 120度回転を含む。60度回転を含まない。	
p3	鏡映、映進を含まない。
p31m	鏡映を含む。映進軸を通らない120度回転の中心がある。
p3m1	鏡映を含む。どの120度回転の中心にもそれを通る鏡映軸がある。
(E) 60度回転を含む	
p6	鏡映を含まない。
p6m	鏡映を含む。

無地の織物の 対称性による分類	織物上の意匠の対称性による分類	意匠の対称性による分類	それぞれの分類に該当する対称操作群								
			回転操作			表裏反転を含む操作					
			恒等変換	180度回転	90度・270度回転	垂直軸鏡映	水平軸鏡映	北東軸鏡映	北西軸鏡映		
			E	R^{180}	R^{90} R^{270}	M^v	M^h ($M^v \cdot R^{180}$)	M^{ne} ($M^v \cdot R^{270}$)	M^{nw} ($M^v \cdot R^{90}$)		
「経」緯の織物	回転してよい	(a) p4g, p4m 90度回転・鏡映・映進あり									
		(b) p4 90度回転あり、鏡映・映進なし									
全ての無地の織物	180度回転してよい	(c) cmm, pgg, pmg 180度回転あり、鏡映・映進の両方またはいずれかあり									
		(d) p2 180度回転あり、鏡映・映進なし									
	回転できない	(e) cm, pg, pm 回転なし、鏡映・映進の両方またはいずれかあり									
		(f) p1 回転・鏡映・映進なし									

図 6-13 意匠の分類と対称操作群

意匠の対称性を織物生地の対称性と合わせて考え、その取扱い方法を基準に図 6-13 (a)~(f)の文様群を以下の3つに分類する。

(1) 90度単位の回転操作が可能なグループ

まず一つ目は、90度単位の回転操作が可能なグループである。図 6-13 (a)の p4g, p4m と、図 6-13 (b)の p4 の対称性を持つ意匠は、90, 180, 270度回転が可能で、裁断・縫製時の自由度が最も高く、さらに p4g, p4m の場合は水平、垂直、北東軸、北西軸のいずれの軸で表裏反転しても対称性を保つ。このグループは、経糸と緯糸が等価である必要がある。

一つ目のグループの対称性を保つことのできる織物組織は、同様の対称性を持った組織に限られる。最も代表的なものは平織り (p4g) で、平織りは90度単位の回転操作、表裏反転を含む対称操作群を持つ。変則縞子のバリエーションの中から選択する

際には、このグループに属する $p4g$, $p4m$, $p4$ と同じ対称性を持つものから選ばばよいことになる。このことは、二つ目以降のグループについても同様のことがいえる。

(2) 180度の回転操作が可能なグループ

二つ目は、180度回転操作が可能なグループである。図 6-13 (c)の cmm , pgg , pmg と図 6-13 (d)の $p2$ は、180度回転が可能で、 cmm , pgg , pmg の場合は水平、垂直軸で表裏反転しても対称性を保つ。

市場に流通する織物生地ではこのグループが最も多く見られる。その理由としては、経糸と緯糸は織物上で違う役割を担うことが多く、密度、素材、番手（太さ）が異なっていることが標準的である（一般に経糸の方が緯糸よりも密度が高く、番手が小さい）ことと、幅に対して丈（高さ）方向が著しく長いのが一般的なためである。

そのため上と下が逆転する 180度回転は許される、二つ目のグループにあたる織物生地が大多数を占めており、大半の織物生地は 180度回転に対して対称性を持つようデザインされている。これはジャカード柄のような意匠だけでなく、幾何学的な縞模様や、織物組織についても同様のことがいえる。

例えば、ネクタイ柄のレジメンタルといわれるボーダー柄は、英国や日本では伝統的に右上がりの「ノ」の字の方向が基本的であり、逆方向のストライプは米国式とされて、左右の区別がある^[6-11]。またジーンズなどデニム生地に用いられる綾織の斜線（綾目）の方向も、ライトハンドツイル（同様に右上がり）が一般的である^[6-12]。これらの例はいずれも左右非対称だが、180度回転に対して対称性を持っている。

(3) 回転操作が不可能なグループ

三つ目は、回転操作が不可能なグループである。残る 4 種、図 6-13 (e)の cm , pg , pm と図 6-13 (e)の $p1$ は、一切の回転が不可能な意匠だが、 cm , pg , pm の場合は水平、垂直、北東、北西軸のいずれかの軸で表裏反転すれば対称性を保つことができる。

このグループは少数派だが、カーテンのように設計の初期条件から上下を意識した用途の織物生地などでは多く見られる。また、一般にはパネル柄と呼ばれる、大きなサイズの意匠を一枚の絵のように配したスカートや傘、寝具など、繰り返しの併進対称を持たない例もある。このグループでは、回転などの操作を前提としないため、用いられる織物組織も対称性を考慮する必要はない。

6-4-3 縺子組織の対称性による分類

6-3-2 節で求めた縺子組織のバリエーションとなる飛び数 m の解がそれぞれどんな対称性を持つかは、6-3-3 節で示した 8 つの変換操作と併進操作をある組織パターンに加えたときに、どの変換操作で元の組織パターンと一致するかを求めればよい。図 6-14 は、 $n=7$ のときの解について対称性を調べた結果を示している。

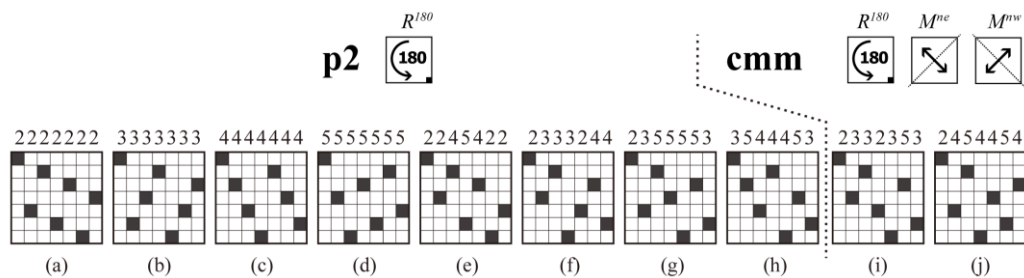


図 6-14 $n=7$ の縺子組織の対称性

図 6-14 (a)~(h)は 180 度回転対称の p2, 図 6-14 (i), (j)の二つは 180 度回転対称と北東、北西軸での鏡映対称を持つ cmm であることが分かった. 同様に, 6-3-2 節で求めた縺子織の解すべてについての対称性の種類を求めることができる. 対称性の種類が分かれば, 作ろうとしている織物生地及びその意匠が, 図 6-13 及び 6-3-4 節で示した 3 つのグループのどれに属するかを考慮し, 同じ対称性の縺子組織を選べばよい.

ここで, 図 6-14 (a)~(h)の 8 種類について着目する. これらは同じ p2 の対称性を持つので, 180 度回転のできるグループに属する. しかしこれらのうち図 6-14 (a)~(d)の 4 つは正則縺子で, 残る 4 つは変則縺子である. このことからこれらの 8 種類の縺子組織は最低でも 2 つのグループに分けられることは明らかだが, 対称性の種類の探索では同一の結果となっている. そこで, どのような方法を用いればこうした縺子組織をさらに分類することが可能かを考察した.

6-4-4 縺子組織のファミリー

図 6-14 (a)~(d)の 4 つは p2 の対称性を持つ正則縺子であり, それぞれ 180 度回転すると元の組織パターンに重ねることができる. では, 垂直軸鏡映, あるいは 90 度回転したときはどうなるだろうか. これらは p2 の対称性を持つため, 鏡映操作, 90 度回転操作では元の組織パターンに一致することはない. しかし, 図 6-14 (b)を 90 度回転すると図 6-14 (a)となり, 図 6-14 (a)を垂直軸鏡映したら図 6-14 (c)となることは容易に予想できる.

本節では, このような操作を行ったとき一致する組み合わせを縺子組織のファミリーと名付け, 分類整理することを提案する.

ある図形 A に対してその形を変えない等距離変換, すなわち平行移動, 回転移動, 対称移動 (鏡映) というユークリッドの運動群の組み合わせによる変換 f を行ったとき, $f(A)=B$ となる図形 B があつたとき, A は B と合同であると定義することができる^{[6-13][6-14]}.

ファミリーは回転や鏡映などの変換操作に対して対称性を持たないが, 互いに合同な幾何学的パターンであることから, 織物に適用した際にほぼ同等の外観的特徴を持つグループであるということが出来る. このようなグループ化をしておくことは, 数多くのバリエーションから望ましいものを選択する際のプロセスを単純化し, 選択に要する労力を軽減させることができると考えられる. 例えば図 6-14 で p2 に分類された 8 つのバリエーション図 6-14(a) ~ (h)は, 後述するように 2 つのファミリーに分類

され、それぞれが4つのバリエーションで構成されている。デザイナーは8つのバリエーションそれぞれの違いを把握して選択するのではなく、まず2つのファミリーどちらかを選び、次に4つのバリエーションから望むものを選べばよい。

ある縞子組織のバリエーションに対して、6-3-3節で示した正方形の8つの対称操作群と同じ操作を与え、その結果どの縞子組織と等しくなるかを調べることで、合同な縞子組織のグループ、すなわちファミリーを求めることができる。

本研究では、6-3-2節で求めた縞子組織の解すべてについてこの処理を行い、 $n=10$ までのサイズの縞子組織のファミリーを明らかにした。

図6-15は、 $n=7$ の4つの正則縞子がどの操作によって同一のものとなるかを示したもので、 $n=7$ の4つの正則縞子が一つのファミリーのバリエーションであることがわかる。

p2 [180度回転してよい]		2222222	3333333	4444444	5555555
$m=\{2222222\}$		E R^{180} 	R^{90} R^{270} 	M^{ne} M^{nw} 	M^e M^h
$m=\{3333333\}$			E R^{180} 	M^e M^h 	M^{ne} M^{nw}
$m=\{4444444\}$				E R^{180} 	R^{90} R^{270}
$m=\{5555555\}$					E R^{180}

図 6-15 $n=7$ の正則縞子のファミリー

図6-16は、 $n=7$ の変則縞子のファミリーを示す。図6-16(a)はp2の対称性を持つ $m=\{2,2,4,5,4,2,2\}$ と合同な縞子組織のファミリーで、図6-16(b)はcmmの対称性を持つ $m=\{2,3,3,2,3,5,3\}$ と合同な縞子組織のファミリーである。これらより、 $n=7$ の縞子組織はp2の正則縞子、p2の変則縞子、cmmの変則縞子、の3つのファミリーに分類できることがわかる。

(a) {2245422} ファミリー		2245422	2333244	2355553	3544453
p2	[180度回転してよい]				
$m=\{2245422\}$			E R^{180}	R^{90} R^{270}	M^c M^b M^{nc} M^{nw}
$m=\{2333244\}$			E R^{180}	M^{nc} M^{nw}	M^c M^b
$m=\{2355553\}$			E R^{180}	R^{90} R^{270}	
$m=\{3544453\}$					E R^{180}

(b) {2332353} ファミリー		2332353	2454454
cmm	[180度回転してよい]		
$m=\{2332353\}$			E R^{180} M^{nc} M^{nw} R^{90} R^{270} M^c M^b
$m=\{2454454\}$			E R^{180} M^{nc} M^{nw}

図 6-16 $n=7$ の変則縞子のファミリー

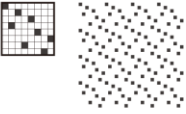
図 6-17 は、その他の $p1$, pg , cm , pgg , $p4$, $p4g$ の対称性を持つ縞子組織のファミリーの例を示している。

図 6-18 に、10 種類の対称性による分類毎の回転操作の可否とファミリーの構成要素数を整理したものを示す。

表 6-04 は、表 6-02 に示した縞子組織のバリエーション数にファミリー数を加え、また対称性による分類ごとにバリエーション数を示したものである。

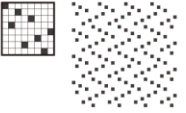
また本研究で探索した $n=10$ までのすべての縞子組織のバリエーションとファミリー、対称性による分類については付録に示す。

(a) {22566632} ファミリー [回転できない]



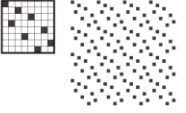
p1	22542432	22234245	23465255	23633654	24563363	25525643	34645666	36665464
22542432	E	R^{180}	R^{270}	M^{ne}	M^{nw}	R^{90}	M^h	M^v
22234245		E	R^{90}	M^{nw}	M^{ne}	R^{270}	M^v	M^h
23465255			E	M^v	M^h	R^{180}	M^{ne}	M^{nw}
23633654				E	R^{180}	M^h	R^{90}	R^{270}
24563363					E	M^v	R^{270}	R^{90}
25525643						E	M^{nw}	M^{ne}
36665464							E	R^{180}
34645666								E

(b) {22566632} ファミリー [回転できない]



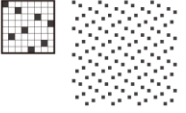
pg	22566632	22236665	23456345	25436543
22566632	E	M^v	R^{180}	M^h
22236665			E	M^v
23456345				E
25436543				

(c) {22555463} ファミリー [回転できない]



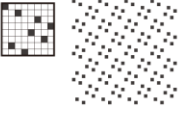
cm	22555463	22364555	24333665	25663334
22555463	E	M^{nw}	R^{180}	M^{ne}
22364555			E	M^{nw}
24333665				E
25663334				

(d) {23246564} ファミリー [180度回転してよい]



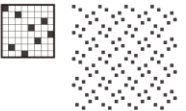
pgg	23246564	33345554
23246564	E	R^{180}
33345554		

(e) {23252325} ファミリー [90・180・270度回転してよい]



p4	23252325	34435775
23252325	E	R^{90}
34435775		

(f) {24636425} ファミリー [90・180・270度回転してよい]



p4g	24636425
24636425	E

図 6-17 異なる対称性をもつ繻子組織のファミリーの例











縹子組織の例	対称性による分類	回転操作	ファミリーの構成要素数
$m=\{2272327483\}$	 p1 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^c M^b M^{ac} M^{bc}$ 鏡映、映進対称を含まない。	回転できない	8つの合同な縹子組織からなるファミリーを持つ
$m=\{2275386575\}$	 cm $E R^{90} R^{180} R^{270} M^c M^b M^{ac} M^{bc}$ 北西軸鏡映対称		
$m=\{2248526885\}$	 pg $E R^{90} R^{180} R^{270} M^c M^b M^{ac} M^{bc}$ 上下映進対称		
$m=\{2234257474\}$	 cm $E R^{90} R^{180} R^{270} M^c M^b M^{ac} M^{bc}$ 北東軸鏡映対称		
$m=\{2232688784\}$	 pg $E R^{90} R^{180} R^{270} M^c M^b M^{ac} M^{bc}$ 左右映進対称		
$m=\{2277722434\}$	 p2 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^c M^b M^{ac} M^{bc}$ 鏡映、映進対称を含まない。	180度回転してよい	2つの合同な縹子組織からなるファミリーを持つ
$m=\{2584485266\}$	 pgg $E R^{90} R^{180} R^{270} M^c M^b M^{ac} M^{bc}$ 上下左右映進対称		
$m=\{3535353535\}$	 cmm $E R^{90} R^{180} R^{270} M^c M^b M^{ac} M^{bc}$ 北東・北西軸鏡映対称		
$m=\{2277722777\}$	 p4 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^c M^b M^{ac} M^{bc}$ 鏡映、映進対称を含まない。	90度・180度・270度回転してよい	1つの縹子組織のみのファミリー
$m=\{3357777533\}$	 p4g $E R^{90} R^{180} R^{270} M^c M^b M^{ac} M^{bc}$ 上下左右映進, 北東・北西軸鏡映対称		

図 6-18 縹子組織の対称性による分類

表 6-04 縐子組織のファミリー数および対称性による分類ごとのバリエーション数

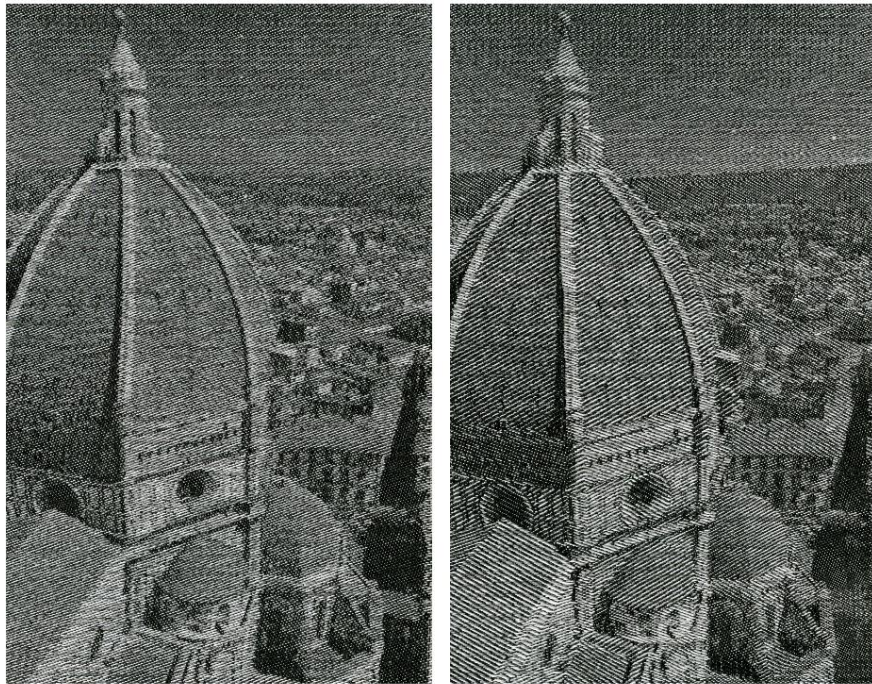
n	(0,0)に組織点があるバリエーションの数	併進対称性を考慮したバリエーションの数	ファミリーの数	対称性による分類別のバリエーションの個数 ※()内はそのうち正則縐子の数							
				回転できない			180度回転してよい			90・180・270度回転してよい	
				鏡映・映進なし	北西or北東軸鏡映	上下or左右映進	鏡映・映進なし	上下左右映進	北東・北西軸鏡映	鏡映・映進なし	上下左右映進, 北東・北西軸鏡映
p1	cm	pg	p2	pgg	cmm	p4	p4g				
5	2	2	1						2 (2)		
6	6	1	1							1	
7	46	10	3				8 (4)		2		
8	354	47	12	16	8	8	8	2	2 (2)	2	1
9	3,106	350	63	224	28		84 (4)		6	8	
10	29,926	3,005	432	2624	92	104	156	6	16	4 (2)	3

6-5 実験及び考察

本章に関連した試織結果を図 6-19, 6-20 に示す. 図 6-19 は, 6-2-4 節の図 6-06 で示したジャカード組織パターン²¹⁾の製織結果である. 図 6-06 と同様に, 組織サイズ n の違いによる経糸緯糸の交差する周期の違いや, 飛び数 m の変化による縐子線の角度の違いが, 階調の情報と合わせて, 入力画像の被写体が持つ奥行き感や立体感の表現に寄与していることがわかる.

図 6-20 は, 図 6-11 で示したジャカード組織パターンと, その他の変則縐子を用いたものの製織結果である. 正則縐子による IFT 法を用いた図 6-20 (a)と比較しても, 変則縐子を用いた IFT 法の結果は微細構造を再現する効果をほぼ保ちながら, 変則的に変化する飛び数²¹⁾がもたらす文様状の様々なテクスチャが現れている.

これらの結果から, 豊浦らの提案する領域毎に異なる複数の組織を併用する手法²¹⁾に, 本論文で触れたパラメータ n, m の違いによる効果, また変則縐子によるテクスチャの効果を適用することで, デザイナはこれまで以上に的確にデザイン意図を織物上に再現し, また部分的に異なる質感を表現できるようになり, デザイナの選択しうる表現のバリエーションを拡張することが可能であると思われる.



(a) 拡張誤差拡散法 ($n=8, m=3$)

(b) 領域ごとに n, m を変化したもの

図 6-19 領域ごとに n, m を変化した効果

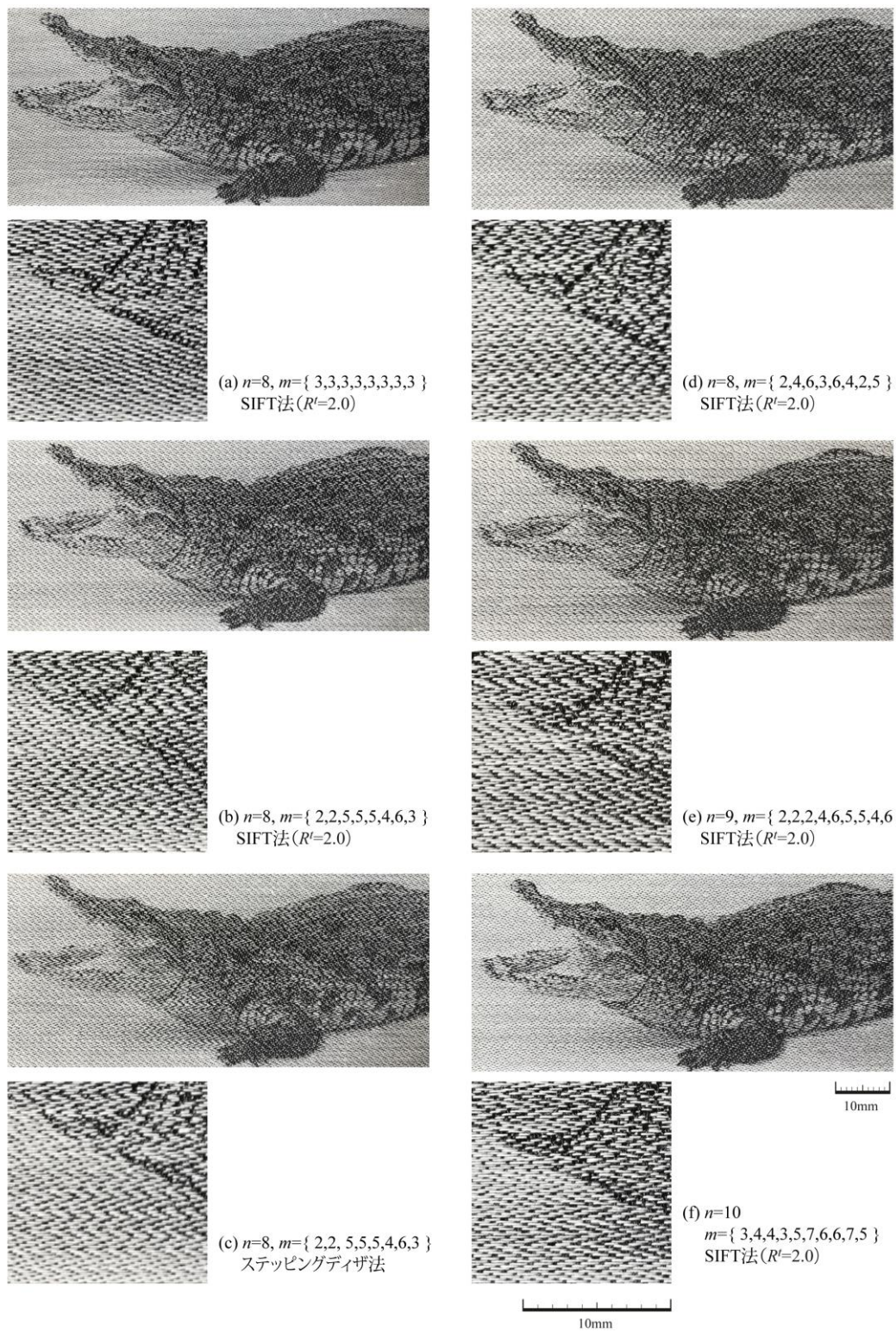


図 6-20 変則織子に IFT 法を適用した試織結果

第7章 OSD法の応用による輝度レンジの拡大

本章では、織物上に再現された画像の明暗比に着目する。これまでの手法においては、再現される輝度のレンジを広げ、明暗のコントラストを高めるためにディザマスクサイズ n を上げると、組織点の減少によって織物構造が弛緩した軟弱なものとなることが避けられない。そこで織物構造の緊密さを保ちつつ輝度レンジを拡大する手法として、歴史的なステッピンググラフの技法を取り上げ、ステッピングディザ法及び OSD 法をこれに応用する新たな手法を提案し、その有効性を示す。

7-1 輝度レンジの問題

これまで紹介してきた経糸に黒、緯糸に白を用いたジャカード織物による画像の再現では、織物制約にしたがい一定範囲内で経糸と緯糸が交差する組織点を作らなければならないため、輝度が最高となる領域でも白糸だけでなく黒糸を用いなければならない。また同様に最も暗い領域でも白糸が露出することは避けられない。このことは織物上に再現される輝度のレンジが、ディザマスクサイズ n の大小によって制限されることを示している。

図 7-01 は、異なるサイズ n をもつ織物組織をベースとして、明るさが最小、最大となる状態と、画像を RSSD 法により二値化した結果である。サイズ n が大きくなるほど、再現可能な明暗コントラストの向上が可能であることがわかる。

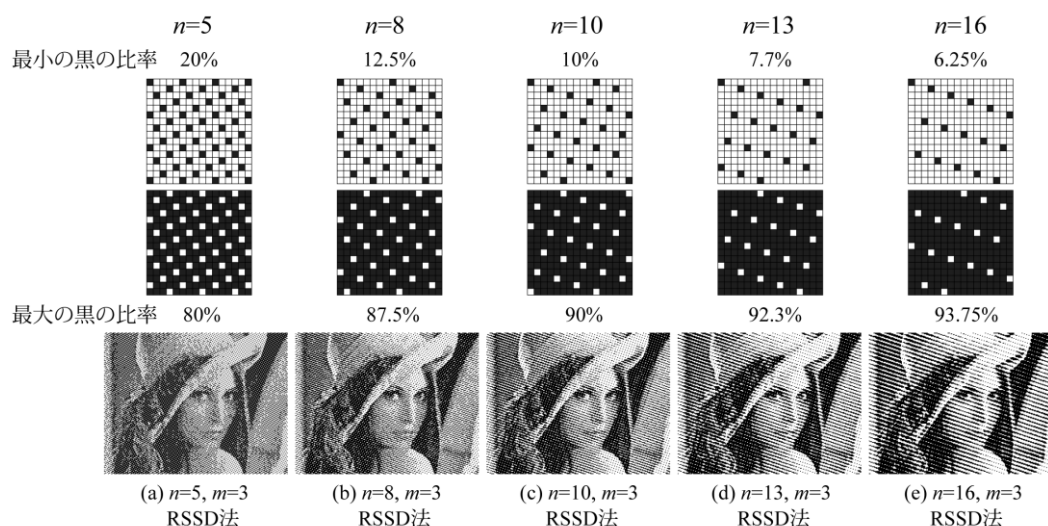


図 7-01 サイズ n と明暗コントラストの比較

なお図 7-01 で示した二値画像上での白黒の比率と、実際に製織した結果は、製織条件によって異なることが考えられる。それには二つの相反する理由が考えられる。一つ目は 2-1-6 節で述べたように、例えば経糸の露出が最小であるとき、十分に緯糸密

度が高ければ経糸は緯糸に隠される効果があるため、再現される明暗の差はサイズ n が大きくなるとさらに高まる可能性があるからである。二つ目は逆に、最大の明るさや暗さは糸の状態や種類によって低下してしまうことである。白糸の輝度は 100% の純白ではなく、同様に黒糸も完全な黒でないため、織物上に再現される明暗の差は二値画像のものよりも低下してしまうことが考えられる。これら二つの理由により二値画像とそれをもとにした製織後の織物上の輝度に違いが生じることは自明であるが、ここでは概ね両者の大小が一致するものとして議論を進める。

織物上で再現可能な明暗の差のレンジはサイズ n の増大によって高められることを示したが、一方、織物は経糸と緯糸の交差による構造物である以上、サイズ n の増大による交差回数の減少は、構造に大きな影響を与える。すなわち、面積あたりの交差回数の減少は織物の構造を弛緩させるので、軟弱な風合いとなり、経糸及び緯糸がずれる「目寄り」というトラブルが発生する可能性を高めてしまうのである。サイズ n が大きくなったとき、経糸及び緯糸の交差がどのように変化するかを $n=5$ 、 $n=12$ の比較によって図 7-02 に示す。図 7-02 の a-2、b-2 に示した図は経糸（黒）と緯糸（白）の交差を織物生地の断面を見る視点から図解したものである。

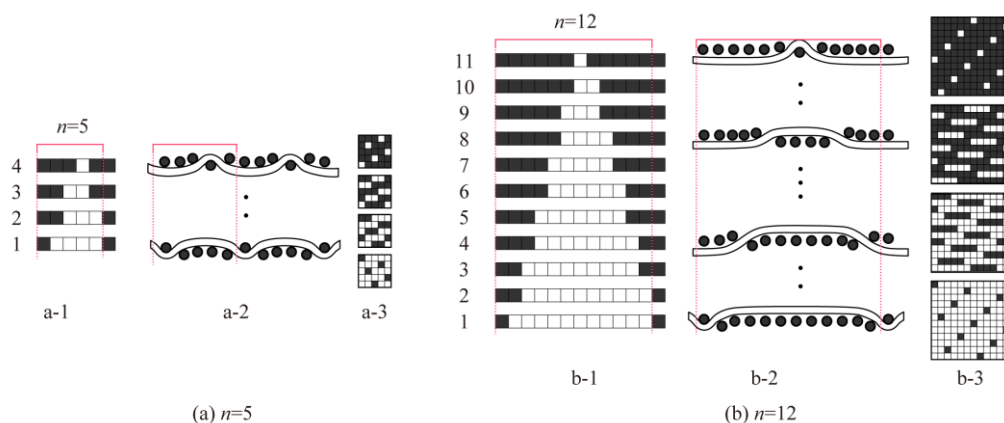


図 7-02 ステッピングディザマスクの階調変化パターン

赤い線は組織サイズ n の幅を示し、緯糸が経糸と交差する周期に対応する。

構造が緩くなってしまうことへの対策としては、緯糸密度を高めることが挙げられる。それによって織物を構成する単位面積当たりの糸を増やし、密にすることで織物構造の緊密さを保持することが可能だが、しかしそれにも限界がある。

これまで見てきた手法では、織物上に表現できる輝度のレンジと織物生地の構造の緊密さは、トレードオフの関係にあるため、両者を同時に満たすことは困難である。そのため、デザイナーが明暗コントラストの向上を意図するときにはサイズ n を増加させる必要があるが、必要とする織物生地の物性を実現するための織物構造の緊密さに配慮しながら、適切な n の値を求めなければならない。

例えば、傘に用いる生地は、防水性能を保持する観点から、織物構造の緊密さが強く求められる。そのため、通常の織物サイズは $n=5$ の 5 枚縺子が用いられており、 $n=8$ よりも大きい組織が用いられる事例は一般に見られない。

それでは、織物構造の緊密さを保持しながら、輝度レンジをより広げたい場合にはどうすればよいのだろうか。その解決法の一つが、二系統の緯糸を使い、視覚的な効果を担う緯糸と、織物構造を担う緯糸の2つの役割にそれらを分担させる手法である。これは緯糸が2丁以上の多丁杼織物による伝統的なジャカード織物の設計で行われている手法である。この方法では、2-1-4 節で述べたように見せたい色の糸には多く露出するよう浮きの多い組織を適用する一方、見せたくない色の糸は裏面に回るような組織を適用するだけでなく、必要に応じてその組織サイズを小さくし、緊密な交差によって織物構造を保持できるよう配慮している。

しかしこれまでも述べてきたように、これらの手法は領域分割とタイリングに基づくものであり、微妙な階調変化の再現には向いていない。それでは、自然画像の忠実な再現を行おうとする 1-2-2 節で述べた本論文の目的に沿った形で、織物構造の緊密さと明暗コントラストの向上を同時に満たす手法は他に残されていないのだろうか？

7-2 スティーブングラフの手法について

本節では、前節で提示した輝度レンジの問題を解決する観点から、連続階調の技法を取り入れて絵画や風景などを織物上に再現した伝統的なジャカード織物、“スティーブングラフ”を取り上げ、本研究の提案手法を用いた新たなジャカード織物組織の生成手法を提案する。

7-2-1 スティーブングラフとは

“スティーブングラフ (stevengraphs)”は、19世紀後半にイギリス、コヴェントリーのリボン織物業者 Thomas Stevens が考案した絵画調のジャカード織物で、本の葉のほか、肖像画、ポストカードなどの形で商品化された。スティーブングラフは厳密には Thomas Stevens の商品を指すが、同様の織物は Willam H Grant など多くの織物業者により19世紀後半から20世紀中葉にかけて製造され、それらを総称してスティーブングラフと呼ぶこともある^{[7-01][7-02][7-03]}。スティーブングラフには風景、人物などが描かれ、写真風の外観を実現するためにしばしば階調変化に重点を置いた技法が用いられた。コンピュータ以前の手作業による設計を行っていた当時、領域分割とタイリングによる伝統的な技法によって豊かな階調表現を行うには多くの労力が必要で、一人の職人が数か月掛かって設計を行ったとされる^[7-04]。

7-2-2 スティーブングラフの作品例

本節で取り上げるのは、図 7-03 に示すフランスの Neyret Frères 社によるスティーブングラフの作品「Le Printemps」と、その技法である。Le Printemps はフランスの画家 Pierre Auguste Cot の同名の油絵をもとにした作品で、その製作年代は1899年、もしくは1908年とされている^[7-05]。



図 7-03 スティーブングラフ作品「Le Printemps」の全体像及び部分拡大

この作品では、白と黒の絹糸を用いたモノクロームの階調表現によって作品全体が形作られており、また同時に明暗のコントラストの高さが際立っている。特に図 7-03 の部分拡大図の、少女の髪ハイライトの白い部分と、少年の洋服の黒い部分を見ると、白い領域で黒い糸は全く視認できず、その逆の状態も見られない。この作品では、織物組織と糸の太さ、密度などの条件を調整することで、白と黒の糸で表現する輝度レンジを最大限に引き出しているといえる。

またこの作品の注目すべき点は、輝度レンジを広げることと同時に、織物構造における緊密さの実現にも成功していることであり、本章でこの作品を取り上げた理由もここにある。ここで、本研究の提案手法をこの手法に応用し発展させることを前提として、この作品はどのような織物組織で作られているかを観察結果から以下に示す。

なお、この作品の技法はスティーブングラフと呼ばれる織物すべてに共通するものではない。

7-2-3 作品例の組織パターン

まずこの作品は白い経糸と、白い緯糸、黒い緯糸の3種類の糸が用いられている。緯糸は白と黒が交互に織られる2丁織物である。原画のうち最も明るい領域では白い経糸と白い緯糸が露出して黒い緯糸は背面に沈み、最も暗い領域では黒い緯糸が最大限に露出している。明暗の両極端とその中間の階調は、図7-04に示すように白い経糸と白と黒の緯糸が組織するパターンがA~Gのステージに分類した変化によって生み出されている。ステージA~Gまでのそれぞれの組織パターンは、ここでは白と黒の緯糸1本ずつを取り出して示した。組織図全体については図7-06に示す。

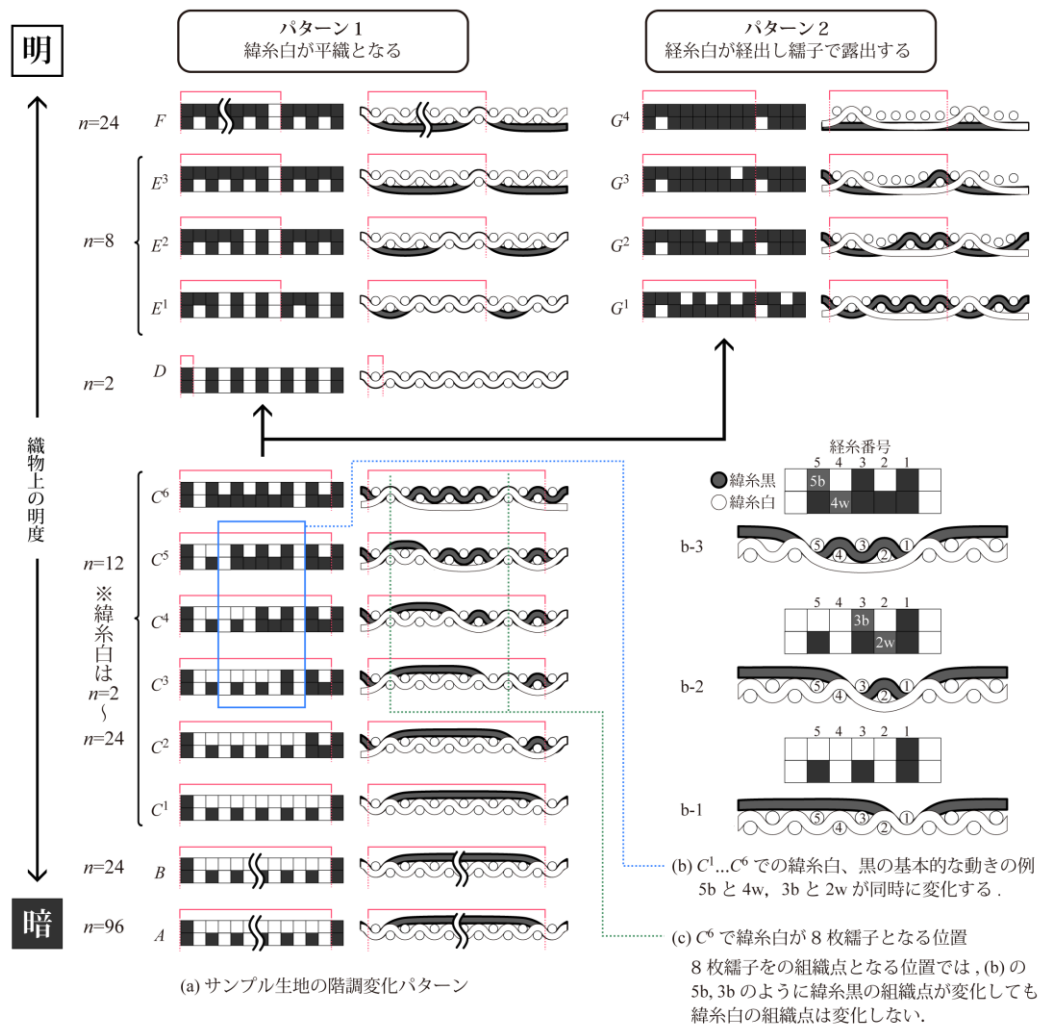


図 7-04 階調に応じた組織構造の変化

赤い線は緯糸が経糸と交差する周期の長さを示す。

なお、前章までと違って白い経糸を用いているため、組織図中の黒いセル「■」のある個所では白い経糸が上となり、白いセル「□」では黒い緯糸が上になる場合と、白い緯糸が上になる場合の両方がある点に留意されたい。

この図で示した組織構造の変化による織物上での階調表現手法について、要約すると次のような特徴がある。

①：明るい領域での分岐

図 7-04 (a)では、織物上の明度が暗→明となる変化が、図の下から上へ向かうように配置している。まず前述した少年の左襟の白い領域は、図 7-04 のステージ G^4 に相当する。 G^4 の領域は織物上でも最も輝度の高い部分と識別できる。その次に明度の高い領域は、明瞭な違いのない二種類のパターンに分類できる。「パターン 1」と名付けた $E^1 \sim F$ の変化と、「パターン 2」と名付けた $G^1 \sim G^3$ の変化の二つのパターンである。これらの領域は明度の上下関係にあるとは考えにくい。おそらく背景とモチーフなどの違いを表現する意図で使い分けられていると考えられるため、ここではパターンの分岐があるとした。

②：平織を経由する増点法

図 7-04 (a)のステージ $A \sim F$ における黒い緯糸の動きに見られるように、 A 及び F では縷子組織だが、平織を経由するように組織点が増加する。また白い緯糸では、 $C^2 \sim C^6$ と $G^1 \sim G^4$ 以外では平織で、 $C^2 \sim C^6$ でも平織から縷子織へと至る増点法となっている。

③：緯糸白と黒の漸進的な役割の逆転

上述したように、緯糸の白と黒は縷子織～平織の間で変化するが、図 7-04 (b)に示すように、緯糸黒の縷子織→平織への変化に対応するように、その箇所は緯糸白は平織→縷子織へと変化する。このように、緯糸白と黒は互いに平織と縷子織の役割を段階的に入れ替えることで、片方がサイズ n の大きな縷子織になったときに他方は平織となる。②及び③の特徴は、白と黒の緯糸が補い合うようにして織物構造の緊密さを保つ工夫であると考えられる。

④：緯糸白の $C^6 \sim D$ における非線形的な変化

通常増点法では、組織点は線形的に変化するが、緯糸白は明度の上昇に対応して $C^2 \sim C^6$ で増加してきた組織点が、 C^6 から D への変化において失われ、 C^2 の平織の状態に逆行する。 D では緯糸の白と黒が全く同じ動きをする平織となり、白と黒が 50% ずつ露出する状態となる。

⑤：異なるサイズ n の併用

作品のほとんどを占める中間調の領域である $C^1 \sim E^3$ では黒い緯糸が $n=12$ 、あるいは $n=8$ となっているが、明暗の両極端に近い箇所では、 A では $n=96$ 、 B では $n=24$ 、 G^4 では組織点がないか、確認できる範囲に組織点がない、というように組織サイズ n が大きく変化する。これは輝度レンジを最大化するための工夫であると考えられる。

⑥：注意深く設計された下絵

図 7-03 の部分拡大画像を見ると、この作品が領域分割とタイリングによってジャカード組織パターンが作られていることが推測できる。例えば少年の帽子やベストの明るさが変化する箇所では、組織パターンが変化する境界線が明確に認識できる。とはいえ、作品全体を見たときには気づかないレベルであり、一般の鑑賞者には問題にされることはないと考えて差し支えない。作品の元となった Paul H Wagner の作品か

ら領域分割した下絵を作る際には、①～⑤のような階調変化が目立たないように、細心の注意が払われたと考えるのが自然である。

ここで、上述した技法の参考として、図 7-05 に画家アルフォンス・ミュシャの「イヴァンチツェの思い出」という絵画作品を紹介する。この作品では、中央の領域ではベージュ～黄色の色付きの台紙の上に、白い画材で明るい光を、黒い画材で暗い影を描く、という技法が用いられている。一方、スティーブングラフの作品「Le Printemps」の手法においては、上の④で述べたステージ *D* の平織の状態は、図 7-05 のミュシャの作品における色付きの台紙に相当する基底状態ともいえるものと解釈することが可能である。*D* の状態を基準点として、白糸の露出が増える方向には $D \rightarrow E \rightarrow F$ と変化し、逆に黒糸の露出が増える方向には $C^6 \rightarrow C^1 \rightarrow B \rightarrow A$ と変化すると考えると、 $C^6 \sim D$ の間に非線形的な変化があることも納得しやすくなる。

図 7-06 は図 7-04 で記した組織変化パターンをそれぞれ完全組織で記したものである。(a)及び(d)は緯糸黒のみ、(b)及び(e)は緯糸白のみ、(c)及び(f)は緯糸黒と白が一行ずつ交互に織られる状態を示している。ただし、 $n=96$ となるステージ *A* の状態はスペースの都合から省略した。

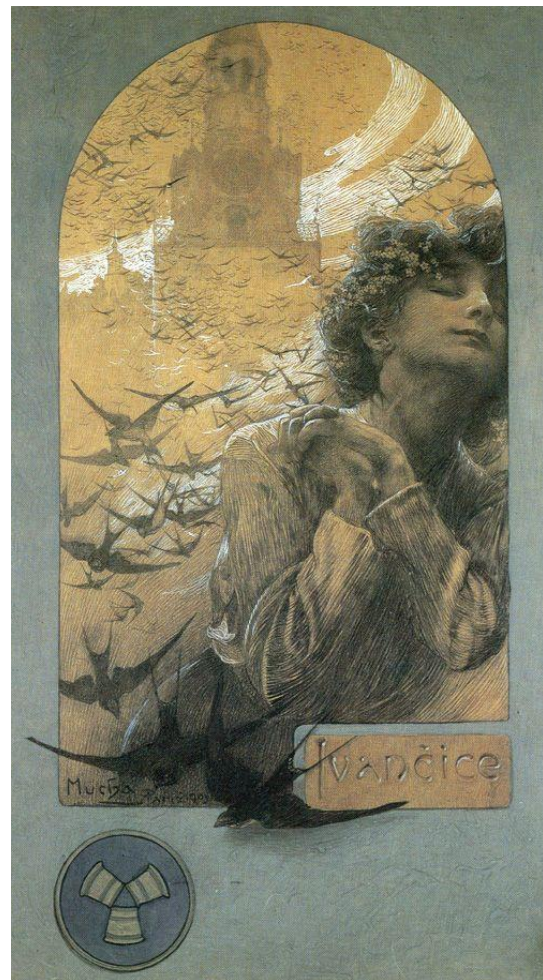


図 7-05 基調トーン+明暗階調による作品

“Memory of Ivancice”

出典 : <https://theartstack.com/artist/alphonse-mucha/memory-ivancice> (PD)

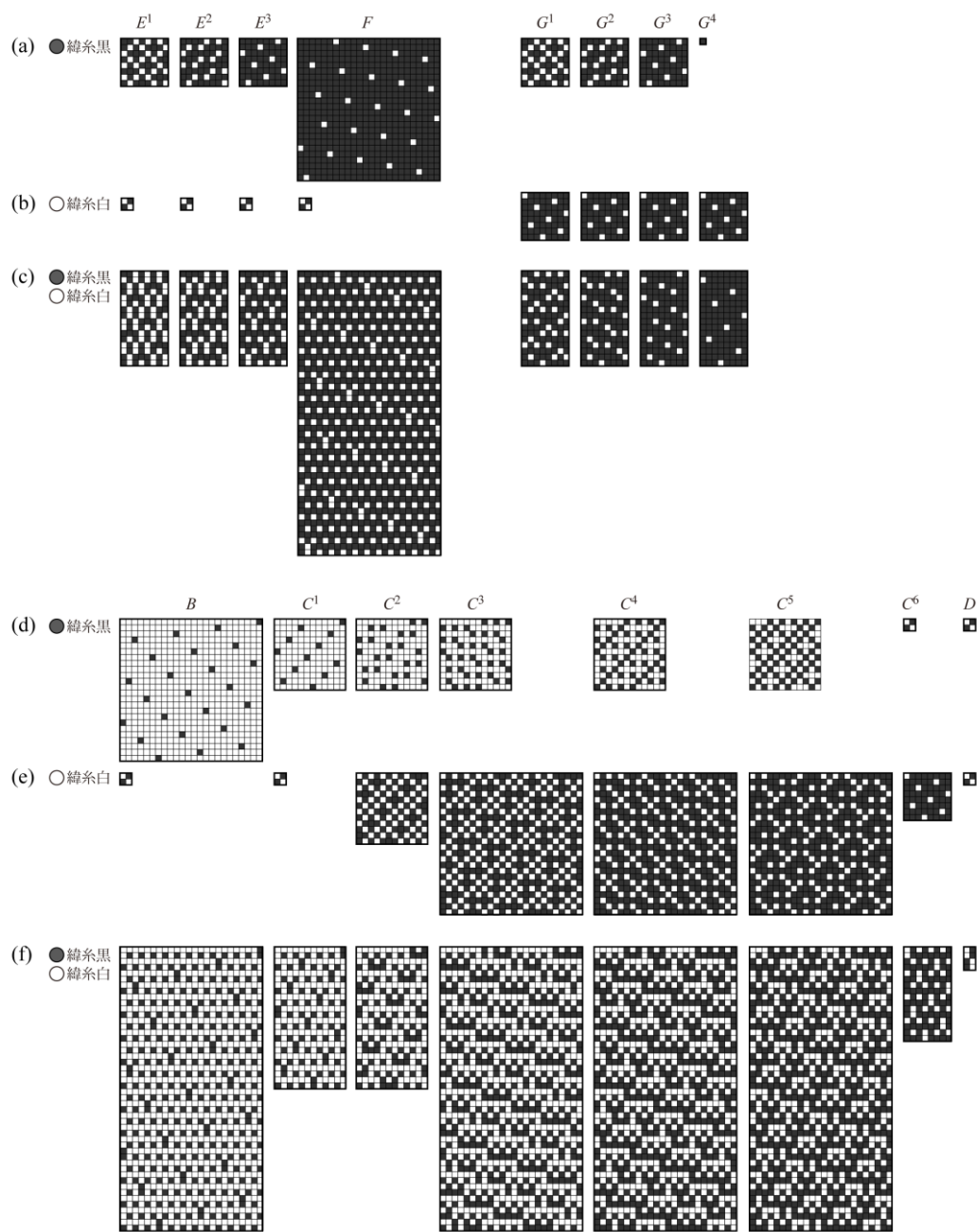


図 7-06 階調に応じた組織パターンの変化

7-3 OSD 法の導入による拡張

前節で紹介したスティーブングラフの技法は、白と黒の緯糸を用いて階調変化と輝度レンジの拡張、そして織物構造の緊密性保持を実現しているもので、表現された階調は織物組織の規則性を生かした緻密な階調変化を備え、その審美的な価値は 100 年を経た現在も収集家を魅了していることから明らかである。しかし、それでもこの技法は領域分割とタイリングによる伝統的なジャカード織物の手法の範疇にあるこ

とは前節⑥で述べたとおりである。

本節では、本研究で提案したステップングディザ法の考え方をこの技法に適用し、伝統的な増点法が OSD 法に至ったのと同様に、これを改善し発展させる手法を提案する。これによってジャカード組織パターンの生成を省力化し、また入力画像の再現性の向上に貢献することを本章の提案手法とその目的とし、以降の議論を続ける。

7-3-1 二値化処理の手法について

まず前節で紹介した手法にディザ法を導入するため、ディザマスクの構造について検討する。図 7-07 は、図 7-04 及び図 7-06 に示した組織パターンをもとにして本節で提案する手法について、各ステージに該当する緯糸黒及び白のそれぞれ一行目のみを抜き出してその概略を記したものである。

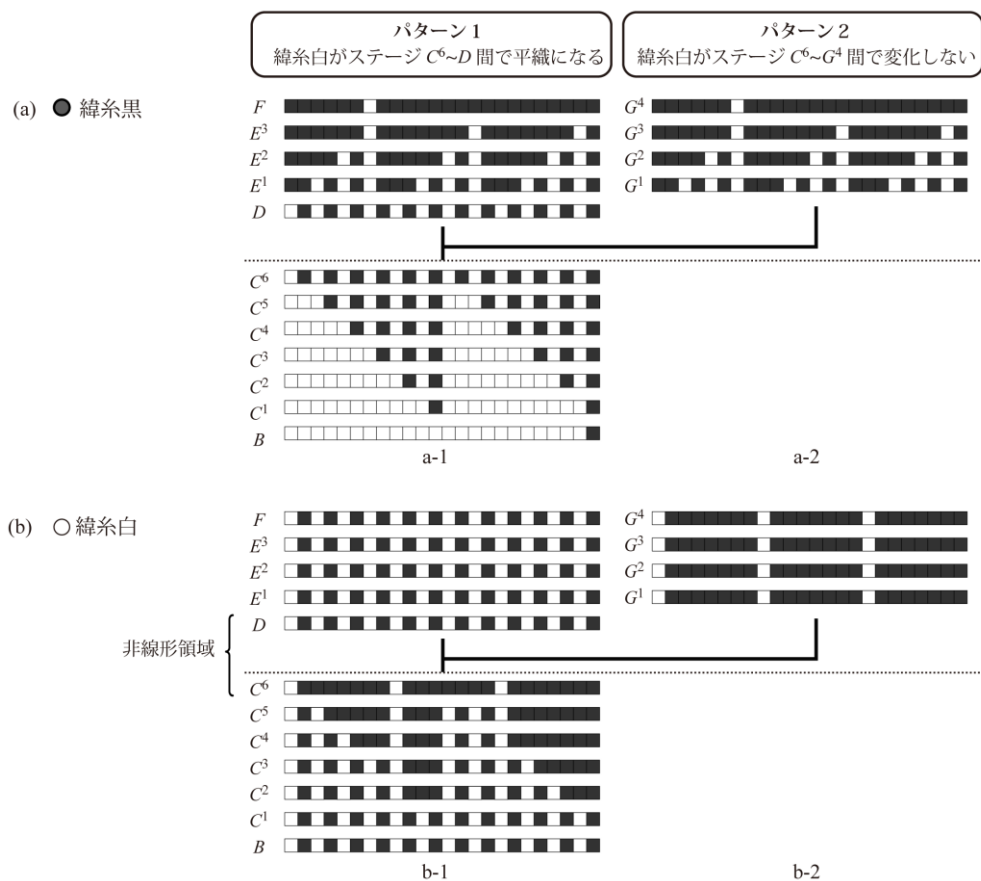


図 7-07 階調変化に応じた組織点の変化

図 7-07 に示した提案手法によるパターンは、図 7-04, 7-06 で示したステップンググラフの事例の手法に次の二点の修正を加えたものである。一つは緯糸黒の浮きが長いステージ A の 96 枚縞子を除外したこと、もう一つは組織点のなかった（浮きの長さが不定の）ステージ G⁴ を 24 枚縞子にしたことである。これらは糸の浮きの長さを一定範囲にしないという織物制約に基づき、最大を 24 本周期のサイクル

とする意図に基づく。

図 7-07 に示したパターン変化は、図 7-07 (b)の緯糸白で $C^6 \sim D$ の間に見られる非線形領域を除けば、 $B \sim F$ の間で組織点が増加あるいは減少する変化であることがわかる。そのため、これを利用することで組織的ディザ法を適用した二値化処理によって、ステージ $B \sim F$ の出力結果を得ることが可能である。

ただし、緯糸黒の露出が増していくときに組織図上では白いマスが増加するように増えるため、出力組織パターンの白と黒は入力画素値のネガに相当する配置を示すこととなる。そのため、提案手法による二値化処理では、あらかじめ入力画素値 v について $255-v$ に変換する必要がある。

これに基づき、次の手法でディザマスクを作成し画像処理を行うことを提案する。またその処理のフローチャートを図 7-08 に示す。また処理についての補足説明を下記(1)~(3)に示す。

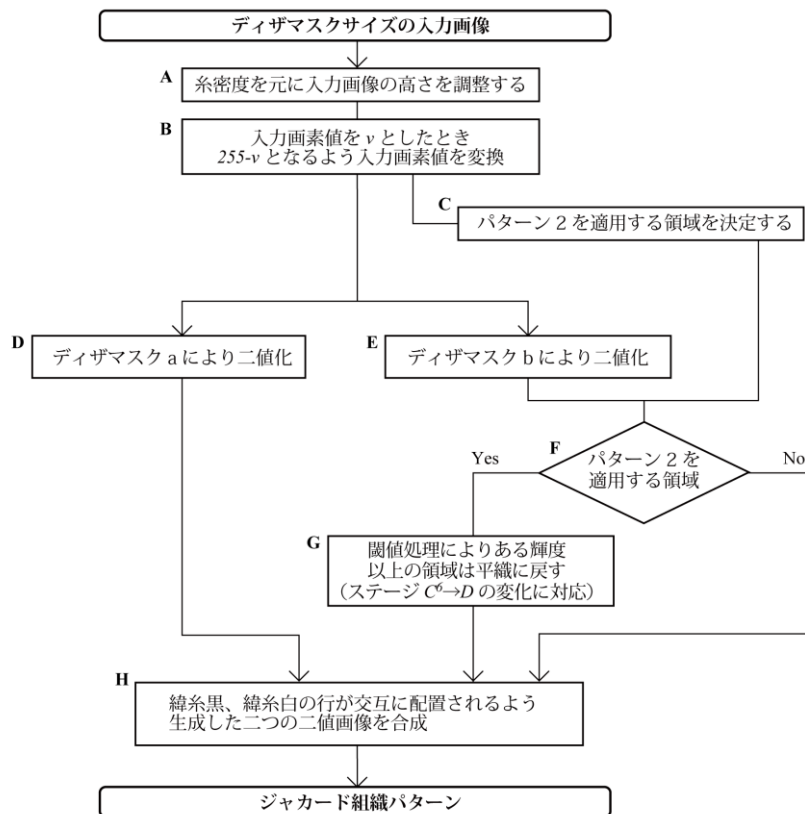


図 7-08 提案手法のフロー

(1) 画像の前処理工程

図 7-07 (a)に示した緯糸黒に対応するディザマスク a、図 7-07 (b)に示した緯糸白に対応するディザマスク b を作成する。入力画像は、ディザマスク a、b により二つの二値画像を得るディザ処理を行い（図 7-08 D, E）、それらを一行ずつ交互に組み合わせ

せるよう合成する（図 7-08 H）ため、その合成後の行数によって生成される織物生地が入力画像に等しい縦横比を持つよう、あらかじめ入力画像の高さを調整する処理を行う（図 7-08 A）。また、前述したように黒い緯糸に対応するディザマスク a は、入力画素の輝度と逆の出力を行う必要があるため、入力画素値 v を $255-v$ に変換する（図 7-08 B）。次にデザイナーの意図により入力画像のどの領域をパターン 1 及び 2 がそれぞれ適用するかをあらかじめ決定する（図 7-08 C）。

(2) 二値化処理

ディザマスク a, b により前処理後の入力画像を二値化する（図 7-08 D, E）。次に条件岐（図 7-08 F）に従い、あらかじめ決定したパターン 2 の適用領域について、緯糸白におけるステージ $D \sim G^4$ の間での非線形な変化に対応し、平織に変化する処理を行う（図 7-08 G）。

(3) 二値化画像の合成

最後に得られた二つの画像が一行毎に交互に重なるよう合成する（図 7-08 H）。

従来のステッピンググラフの技法をディザ処理に置き換えたことに加え、ここで本研究による新たな要素として、これまでに述べたスロット構造とオーダーユニットをディザ処理に適用することを提案する。スロット単位にグループ化されたスロットセルに対して、第 5 章で緩やかな階調変化に最適化したオーダーユニットに従って、可能な限り異なる閾値を配置することにより、従来の技法では十数段階にとどまっていた階調の段階数を飛躍的に拡大することが可能となる。

7-3-2 ディザマスクの構造について

ディザマスクの基本構造を設計するうえで、第一の目標は 7-2-3 節で紹介した従来手法を組織的ディザ法によって実現することである。第二の目標は、スロット構造とオーダーユニットの導入によって、入力画像の再現性を高めることである。まず、第一の目標を達成するため、次によりディザマスクの基本構造を設計する。

ディザマスク a 及び b のサイズは図 7-07 に示したようにそれぞれ $n=24$ とする。前述したように、 $n=96$ となるステージ A は、緯糸の浮きが長すぎて実用的な織物に使用が困難になることが想定されるため除外し、同様のステージ G^4 は $n=24$ の縞子組織とする。

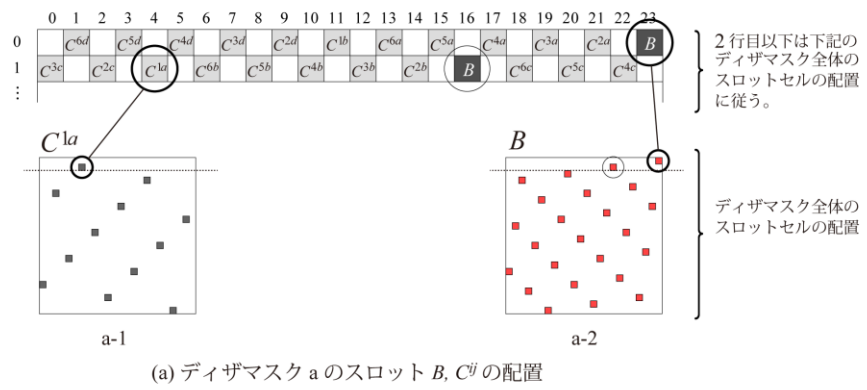
マスクの設計にあたっては、ステッピングディザマスクで用いたスロットの概念を応用して適用する。ディザマスク a は図 7-07 (a) のステージ $B \sim F$ のそれぞれに対応して変化する画素をスロット $B \sim F$ とし、ディザマスク b は図 7-07 (b) のステージ $C^1 \sim C^6$ それぞれに対応して変化する画素をスロットとして扱う。ディザマスク a 及び b の各スロットの配置は図 7-04 及び図 7-06 に示した従来手法での組織の変化パターンに従うものとし、図 7-09 及び図 7-10 に示すとおりとする。また最も明るい領域に対応した閾値 255 のみからなる画素をスロット G とする。

全スロットの構成を表 7-01 に示す。表 7-01 及び図 7-09, 図 7-10 に示すように、C のスロットは C^{ij} ($i=1 \dots 6, j=a \dots d$) に細分化し、それぞれ 12 のスロットセルが最大 12 の閾値を持ち、 $n=12, m=5$ の縞子組織の配置となっている。ただし $n=24$ のサイズになるよう組織点の間隔は 2 倍に拡大されている。スロット $E^1 \sim E^3$ はそれぞれ図 7-09

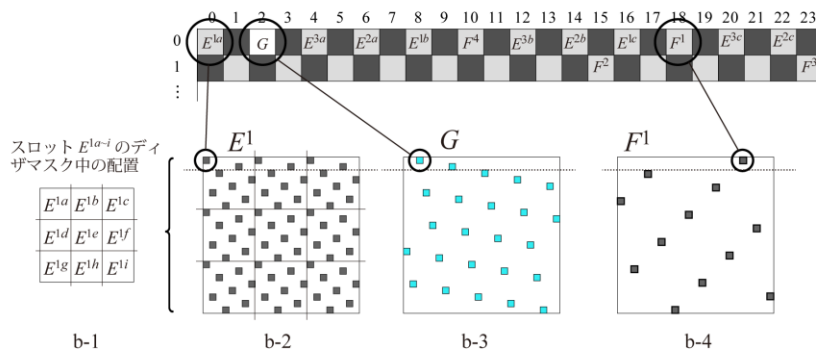
(b)の b-1, b-2 に示すように $n=8$, $m=5$ の縺子組織 9 セットで合計 72 のスロットセルから構成されている。これら 9 セットには同じ閾値を与えるので, $E^1 \sim E^3$ はそれぞれ 8 段階の閾値を持つ 72 のスロットセルを持つことになる。 $F^1 \sim F^4$ の 4 つのスロットは, それぞれの各スロットセルが同じ閾値を持つ。これは後述するようにスロット $F^1 \sim F^4$ が担う輝度のレンジが狭いためである。スロット B, G は閾値 0 及び 255 を持ち, 明暗の両極端で縺糸黒が $n=24$ の縺子組織となるよう配置する。

表 7-01 ディザマスク内のスロット

スロット	ディザマスクa		ディザマスクb	
	閾値の段階数	スロットセルの数	閾値の段階数	スロットセルの数
G 閾値=255		24		72
F^4	1	12		
F^3	1	12		
F^2	1	12		
F^1	1	12		
E^3	8	72		
E^2	8	72		
E^1	8	72		
D				
C^{6d}	12	12	12	12
C^{6c}	12	12	12	24
C^{6b}	12	12	12	12
C^{6a}	12	12	12	24
C^{5d}	12	12	12	12
C^{5c}	12	12		
C^{5b}	12	12	12	12
C^{5a}	12	12		
C^{4d}	12	12	12	12
C^{4c}	12	12	12	12
C^{4b}	12	12	12	12
C^{4a}	12	12	12	12
C^{3d}	12	12		
C^{3c}	12	12	12	12
C^{3b}	12	12		
C^{3a}	12	12	12	12
C^{2d}	12	12	12	12
C^{2c}	12	12	12	12
C^{2b}	12	12	12	12
C^{2a}	12	12	12	12
C^{1b}	12	12		
C^{1a}	12	12		
B 閾値=0		24		288



(a) ディザマスク a のスロット B, C^{ij} の配置



(b) ディザマスク a のスロット E, F, G の配置

図 7-09 ディザマスク a のスロットの構造

パターンについて試織し、測色計 (X-Rite 社製 ColorMunki Design) を用いて製織結果の輝度を実測した。測定には1つのパターンについて3回測定し、RGB値の平均を測定値とした。測定値をもとに32のパターンに対応するスロットセルの閾値を設定した。このとき隣接する閾値が近接しすぎて同一の閾値が連続しないよう若干の修正を行い、また実測していないパターンに該当する閾値は線形補間により設定した。

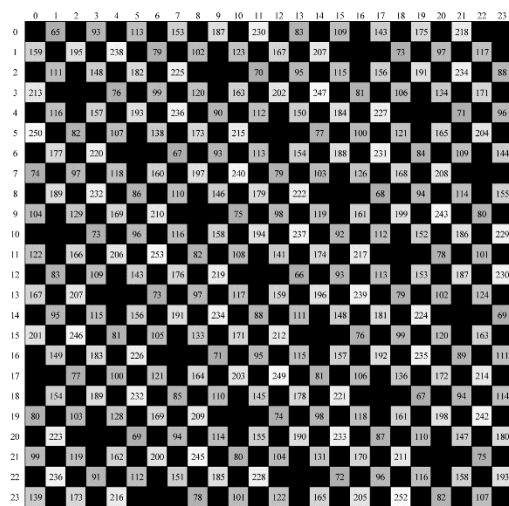
この実験により得られた閾値の値をディザマスク a 及び b にマッピングしたものを図 7-12、またその構造を大別したスロット毎に抜き出したものを図 7-13 に示す。なお、図 7-13 (f)は、緯糸白におけるステージ C⁶~D での画素の非線形的な変化に対応した処理を行う際に、プロセスを一括に行うのではなく、3段階に分けて閾値処理するための閾値として用いるものとして設定したものである。

0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0	55	65	43	93	30	113	0	153	50	187	39	230	23	83	2	109	46	143	34	175	15	218	9	255
1	159	20	195	4	238	51	79	40	102	25	123	0	167	45	207	32	255	13	73	6	97	49	117	37
2	2	111	46	148	34	182	15	225	9	255	48	70	25	95	18	115	0	156	53	191	42	234	27	88
3	213	39	255	23	76	6	99	49	120	37	163	20	202	4	247	55	81	43	106	30	134	0	171	50
4	13	116	0	157	53	193	42	236	27	90	2	112	51	150	40	184	25	227	9	255	45	71	32	96
5	250	50	82	39	107	23	138	0	173	46	215	34	255	15	77	6	100	48	121	35	165	18	204	4
6	43	177	30	220	9	255	45	67	32	93	13	113	0	154	49	188	37	231	20	84	2	109	55	144
7	74	6	97	48	118	35	160	18	197	4	240	53	79	42	103	27	126	0	168	51	208	40	255	25
8	53	189	42	232	27	86	2	110	55	146	43	179	30	222	9	255	50	68	39	94	23	114	0	155
9	104	13	129	0	169	50	210	39	255	23	75	6	98	51	119	40	161	25	199	4	243	45	80	32
10	9	255	45	73	32	96	13	116	0	158	46	194	34	237	15	92	2	112	48	152	35	186	18	229
11	122	43	166	30	206	4	253	48	82	35	108	18	141	0	174	49	217	37	255	30	78	6	101	55
12	35	83	2	109	55	143	43	176	30	219	9	255	53	66	42	93	27	113	0	153	51	187	40	230
13	167	51	207	40	255	25	73	6	97	50	117	39	159	23	196	4	239	46	79	34	102	15	124	0
14	37	95	20	115	0	156	46	191	34	234	15	88	2	111	45	148	32	181	13	224	9	255	49	69
15	201	4	246	49	81	37	105	20	133	0	171	48	212	35	255	18	76	6	99	53	120	42	163	27
16	45	149	32	183	13	226	9	255	49	71	37	95	20	115	0	157	48	192	35	235	18	89	2	111
17	255	30	77	6	100	48	121	35	164	18	203	4	249	53	81	42	106	27	136	0	172	55	214	43
18	0	154	55	189	43	232	30	85	2	110	50	145	39	178	23	221	9	255	51	67	40	94	25	114
19	80	34	103	15	128	0	169	51	209	40	255	25	74	6	98	45	118	32	161	13	198	4	242	46
20	20	223	9	253	46	69	34	94	15	114	0	155	48	190	35	233	18	87	2	110	49	147	37	180
21	99	49	119	37	162	20	200	4	245	55	80	43	104	30	131	0	170	53	211	42	255	27	75	6
22	39	256	23	91	2	112	53	151	42	185	27	228	9	255	51	72	40	96	25	116	0	158	50	193
23	139	0	173	50	216	39	255	23	78	6	101	46	122	34	165	15	205	4	252	45	82	32	107	13

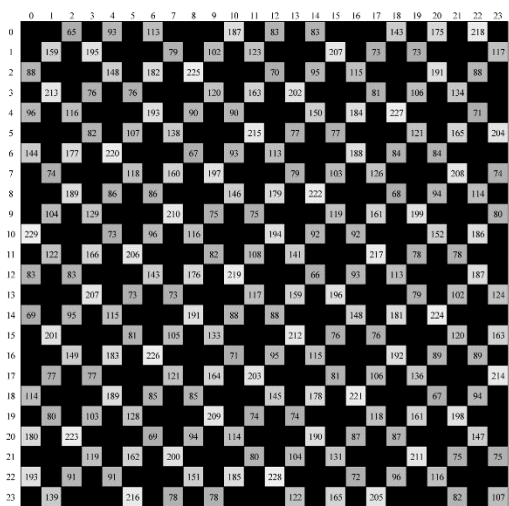
(a) ディザマスク a (緯糸黒)

(d) ディザマスク b (緯糸白)

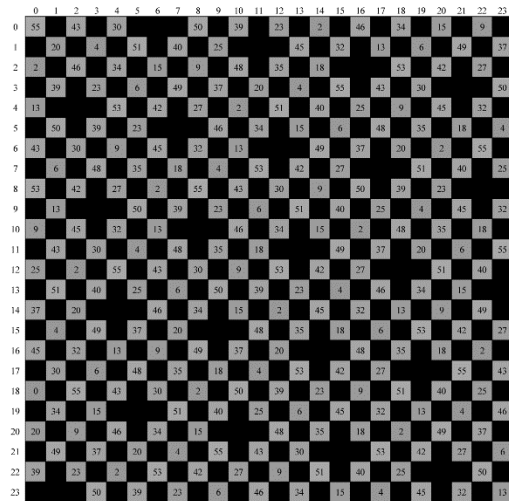
図 7-12 ディザマスク a 及び b



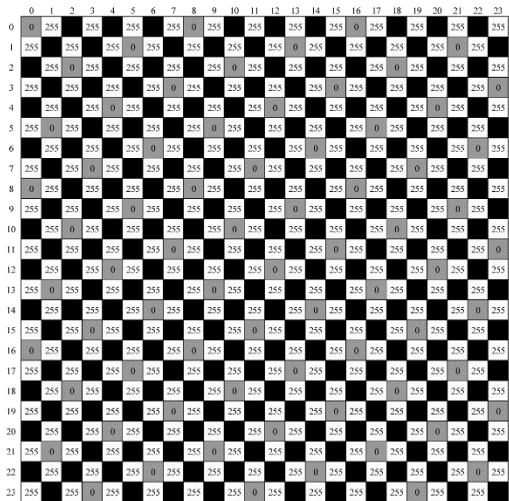
(a) ディザマスク a のスロット C



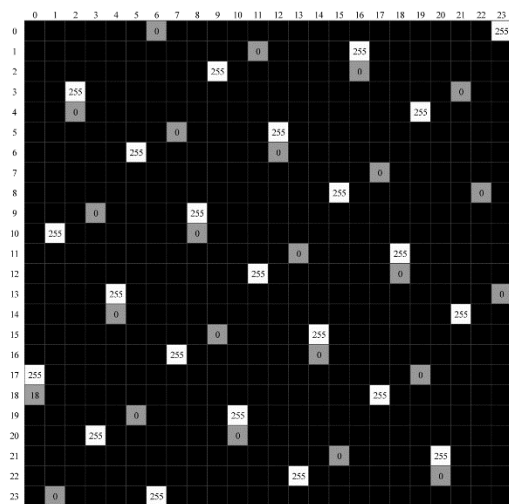
(d) ディザマスク b のスロット C



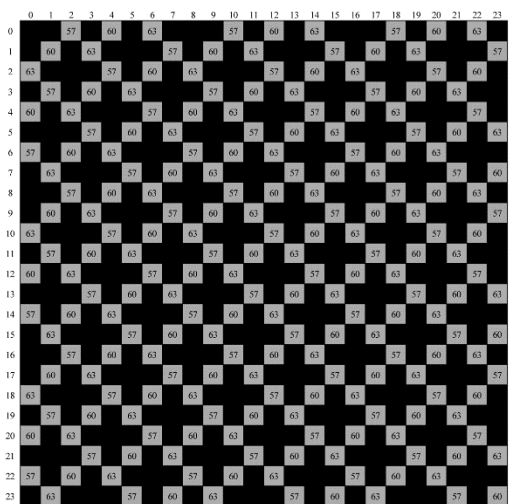
(b) ディザマスク a のスロット E および F



(e) ディザマスク b のスロット B および G



(c) ディザマスク a のスロット B および G



(f) ディザマスク b のステージ C⁰ ~ D を 3 段階に補間する閾値

図 7-13 ディザマスク a 及び b を大別したスロット毎に抜き出したもの

なおディザマスク a は、表 7-1 から読み取れるように、スロット B~G までを合計すると最大で 293 段階の閾値を持つことができるが、入力画像は 256 段階のグレー

スケールであるため、いくつかのスロットセルは同じ閾値を共有している。

7-3-4 経糸=黒への応用

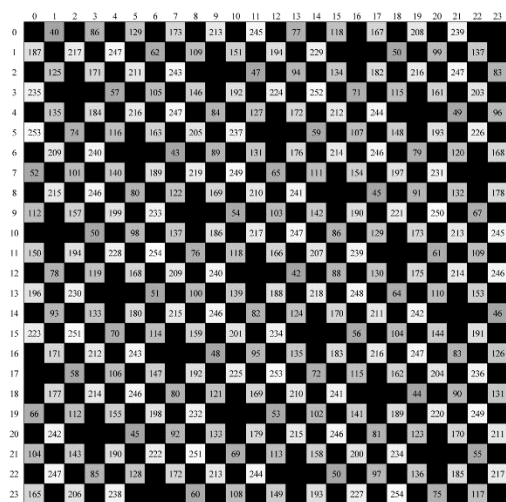
前節までで提案した手法は、7-2-2 で示したステーブングラフの事例と同様に経糸=白と、緯糸=白及び黒によるものであった。ここで、経糸を白から黒に替えて、経糸=黒と緯糸=白及び黒としたときへの応用方法を合わせて提案する。経糸=黒の場合には、図 7-08 の処理フローのうち、図 7-08 B の画素の反転処理を無視し、また前節で行った実測による閾値の設定を行ったディザマスクを用いることで、入力画像を反映したジャカード組織パターンを生成することが可能となる。このときのディザマスクを図 7-14、図 7-15 に示す。

0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	0	255	40	255	86	255	129	255	0	173	26	213	18	245	11	77	2	118	23	167	16	208	8	239	5	255	
1	187	10	217	3	247	27	62	19	109	12	151	0	194	22	229	15	255	7	50	4	99	25	137	18	1	255	187	255	217	255	0	255	62	255	109	255	151	255	0	255	229	255	50	255	60	255	0	255	137	18		
2	2	125	23	171	16	211	8	243	5	255	24	47	17	94	9	134	0	182	28	216	20	247	13	83	2	83	255	0	255	171	255	211	255	243	255	0	255	47	255	94	255	134	255	0	255	216	255	83	255			
3	235	18	255	11	57	4	105	25	146	18	192	10	224	3	252	30	71	21	115	14	161	0	203	26	3	255	235	255	57	255	37	255	0	255	146	255	192	255	224	255	0	255	71	255	115	255	161	255	0			
4	7	135	0	184	28	216	20	247	13	84	2	127	27	172	19	212	12	244	5	255	22	49	15	96	4	96	255	135	255	0	255	216	255	84	255	84	255	0	255	172	255	212	255	244	255	0	255	49	255			
5	253	26	74	18	116	11	163	0	205	23	237	16	255	8	59	4	107	24	148	17	193	9	236	3	5	255	0	255	74	255	116	255	163	255	0	255	237	255	59	255	59	255	0	255	148	255	193	255	236			
6	21	209	14	240	5	255	22	43	15	89	7	131	0	176	25	214	18	246	10	79	2	120	30	168	6	168	255	209	255	240	255	0	255	43	255	89	255	131	255	89	255	131	255	0	255	214	255	79	255	79	255	0
7	52	4	101	24	140	17	189	9	219	3	249	28	65	20	111	13	154	0	197	27	231	19	255	12	7	255	52	255	0	255	140	255	189	255	219	255	0	255	65	255	111	255	154	255	0	255	197	255	231	255	52	
8	28	215	20	246	13	80	2	122	30	169	21	210	14	241	5	255	26	45	18	91	11	132	0	178	8	0	255	215	255	80	255	80	255	0	255	169	255	210	255	241	255	0	255	45	255	91	255	132	255			
9	112	7	157	0	199	26	233	18	255	11	54	4	103	27	142	19	190	12	221	3	250	22	67	15	9	255	112	255	157	255	0	255	233	255	54	255	54	255	0	255	142	255	190	255	221	255	0	255	67			
10	5	255	22	50	15	98	7	137	0	186	23	217	16	247	8	86	2	129	24	173	17	213	9	243	10	10	245	255	0	255	50	255	98	255	137	255	0	255	217	255	86	255	86	255	0	255	173	255	213	255		
11	150	21	194	14	228	3	254	24	76	17	118	9	166	0	207	28	239	18	255	10	61	4	109	30	11	255	150	255	194	255	228	255	0	255	76	255	118	255	166	255	0	255	239	255	61	255	61	255	0			
12	12	78	2	119	30	168	21	209	14	240	5	255	28	42	20	88	13	130	0	175	27	214	19	246	12	78	255	78	255	0	255	168	255	209	255	240	255	0	255	42	255	88	255	130	255	0	255	175	255	214	255	
13	196	27	230	19	255	12	51	4	100	26	139	18	188	11	218	3	248	23	64	16	110	8	153	0	13	255	0	255	230	255	51	255	51	255	0	255	139	255	188	255	218	255	0	255	64	255	110	255	153			
14	18	93	10	133	0	180	23	215	16	246	8	82	2	124	22	170	15	211	7	242	3	255	25	46	14	46	255	93	255	133	255	0	255	215	255	82	255	82	255	0	255	170	255	211	255	242	255	0				
15	223	3	251	25	70	18	114	10	159	0	201	24	234	17	255	9	36	4	104	28	144	20	191	13	15	255	223	255	0	255	70	255	114	255	159	255	0	255	234	255	56	255	56	255	0	255	144	255	191			
16	22	171	15	212	7	243	5	255	25	48	18	93	10	135	0	183	24	216	17	247	9	83	2	126	16	0	255	171	255	212	255	243	255	0	255	48	255	93	255	135	255	0	255	216	255	83	255	83	255			
17	255	14	58	4	106	24	147	17	192	9	225	3	253	28	72	20	115	13	162	0	204	30	236	21	17	255	58	255	58	255	0	255	147	255	192	255	225	255	0	255	72	255	115	255	162	255	0	255	236			
18	0	177	30	214	21	246	14	80	2	121	26	169	18	210	11	241	5	255	27	44	19	90	12	131	18	131	255	0	255	214	255	80	255	80	255	0	255	169	255	210	255	241	255	0	255	44	255	90	255			
19	66	16	112	8	155	0	198	27	232	19	255	12	53	4	102	22	141	15	189	7	220	3	249	23	19	255	66	255	112	255	155	255	0	255	232	255	53	255	53	255	0	255	141	255	189	255	220	255	0			
20	10	242	5	255	23	45	16	92	8	133	0	179	24	215	17	246	9	81	2	123	25	170	18	211	20	211	255	242	255	0	255	45	255	92	255	133	255	0	255	215	255	81	255	81	255	0	255	170	255			
21	104	25	142	18	199	10	222	3	251	30	69	21	113	14	158	0	200	28	234	20	255	13	55	4	21	255	0	255	142	255	199	255	222	255	0	255	69	255	113	255	158	255	0	255	234	255	55	255	55			
22	18	247	11	85	2	128	28	172	20	213	13	244	5	255	27	50	19	97	12	136	0	183	26	217	22	217	255	85	255	85	255	0	255	172	255	213	255	244	255	0	255	50	255	97	255	136	255	0				
23	165	0	206	26	238	18	255	11	60	4	108	23	149	16	193	8	227	3	254	22	75	15	117	7	23	255	165	255	0	255	238	255	60	255	60	255	0	255	149	255	193	255	227	255	0	255	75	255	117			

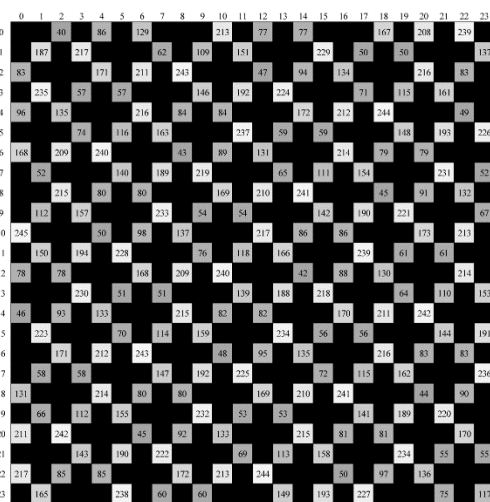
(a) ディザマスク a (緯糸黒)

(d) ディザマスク b (緯糸白)

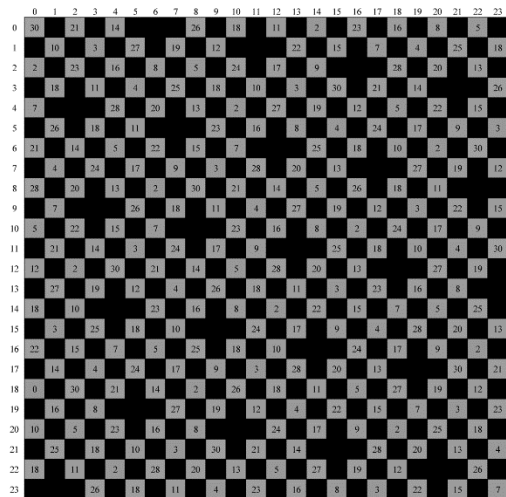
図 7-14 経糸=黒のときのディザマスク a 及び b



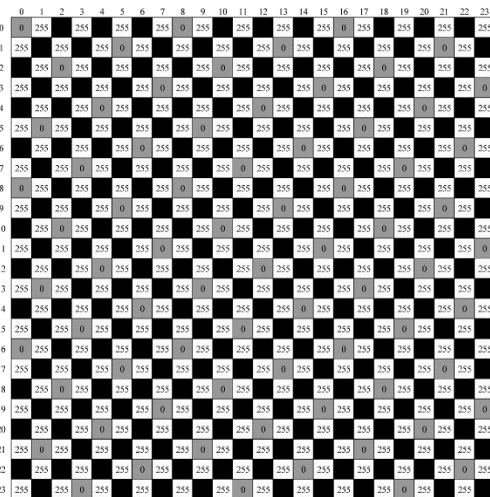
(a) ディザマスク a のスロット C



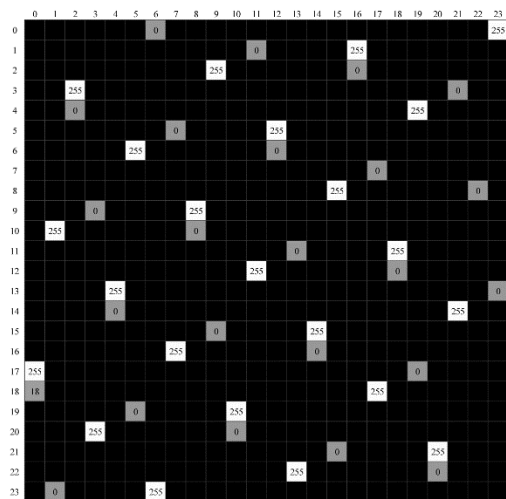
(d) ディザマスク b のスロット C



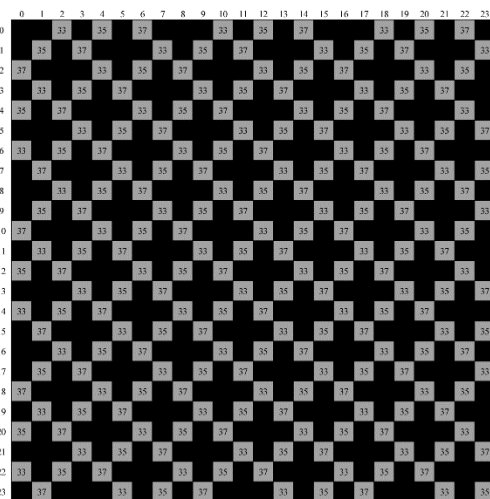
(b) ディザマスク a のスロット E および F



(c) ディザマスク b のスロット B および G



(e) ディザマスク a のスロット B および G



(f) ディザマスク b のステージ C⁶ ~ D を 3 段階に補間する閾値

図 7-15 経糸 = 黒のときのディザマスク a 及び b を大別したスロット毎に抜き出したもの

7-4 実験及び考察

本節では、前節で示したディザマスク及び画像処理方法を用いて試織を行い、本研究で提案する手法の効果を検証する。

7-4-1 製織試験

図 7-16 は入力画像に対する製織結果の輝度を示したものであり、図 7-16 (a)が経糸=白、図 7-16 (b) が経糸=黒のときの結果を示している。測定には X-Rite 社製 ColorMunki Design を用い、測色結果の RGB 値の平均を測定値とした。

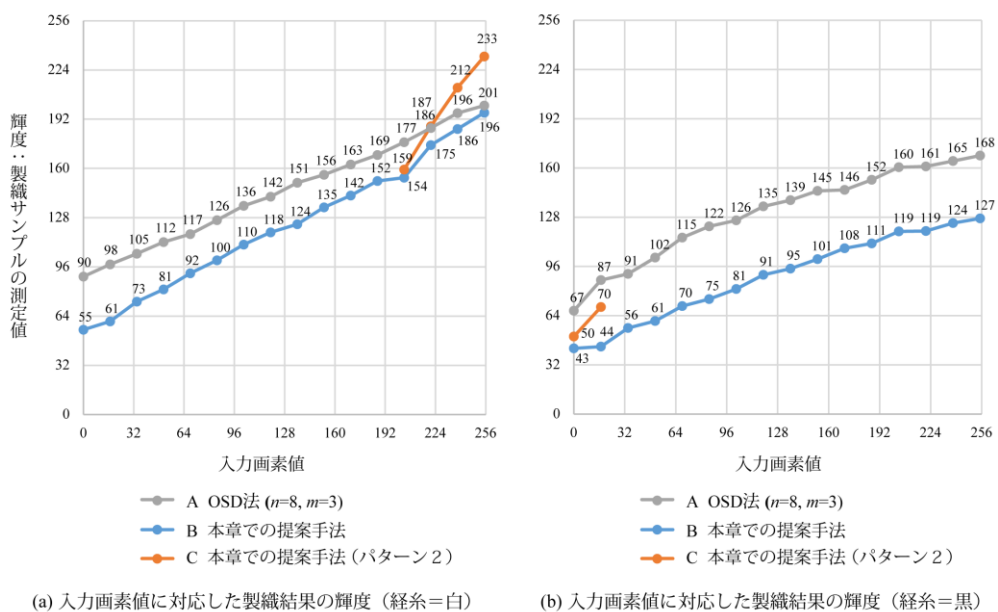


図 7-16 入力画素値と製織結果の比較

図 7-16(a)が示すように、緯糸一丁による OSD 法での出力輝度レンジを上下に拡大する結果が得られた。一方、図 7-16(b)では、輝度のレンジはむしろ減少しており、この実験からは明暗コントラスト強調の効果が経糸=黒のときには得られないことが明らかとなった。またパターン 2 に該当する箇所では、図 7-16 (a)の経糸=白のときと違って、図 7-16 (b)では輝度レンジを拡大できていないことが分かった。しかし目視による観察では測定値とは異なり、パターン 2 による領域では黒さが増しているように感じられた。この主観的印象と測定値の違いの原因は、糸の光沢度や形状などの諸条件が影響して輝度が高く計測されることが考えられる。

図 7-17 は、そのような主観と測定値の違いに影響を与えていると思われる、輝度の反転現象を示したものである。

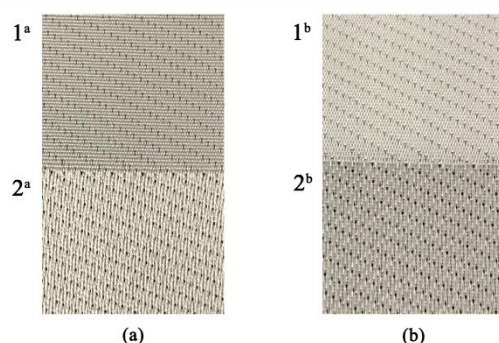


図 7-17 観察する角度による輝度の逆転

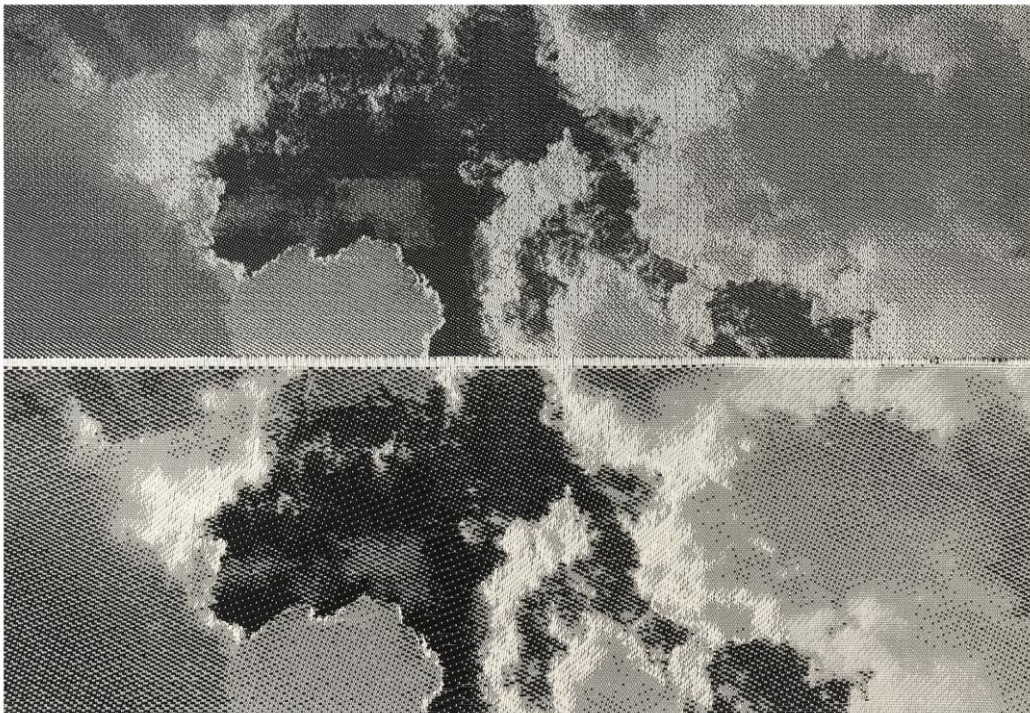
図 7-17 (a), (b)はいずれも生地同一箇所を異なる角度から撮影したもので、図 7-17 1a, 1b はパターン 1 による領域、図 7-17 2a, 2b はパターン 2 による領域を示している。パターン 1 は経糸 = 白と緯糸 = 白が同等に露出する平織りで、パターン 2 は経糸 = 白の露出が緯糸 = 白に比べて多い縹子組織となっているため、外観を構成する繊維の方向には違いがあり、こうした光学異方性を示していると考えられる。こうした外観の違いを詳細に評価し、あるいは制御するための手法は、本論文では取り上げないが今後の研究課題としたい。またこうした輝度の反転は、1-1-1 節や 5-3-2 節で述べたように織物生地へのプリントでは得られない、先染ジャカード織物ならではの特征である。パターン 1 と 2 を使い分けることは、それを生かす手法の一つとして位置づけられると考えられる。

図 7-18, 図 7-20 は前節で示した提案手法と、第 5 章での提案手法による製織結果を比較したものである。またそれぞれの製織条件は表 7-02 及び表 7-03 に示す。

図 7-18 は図 7-18 (a) を入力画像とする処理に基づく試織結果を示し、図 7-18 (b)は、第 5 章で示した IFT 法と OSD 法により生成したジャカード組織パターンにより製織した結果を示し、図 7-18 (c)は本章での提案手法による製織結果を示している。図 7-18 の二つの結果を比べると、まず微細構造の再現においては、図 7-18 の二つの織物は同じ緯糸密度（鯨寸あたり 187 本）で織られているが、図 7-18 (b)の方が優れていることがわかる。その理由としては次の二つが考えられる。一つ目は、図 7-18 (b)は図 7-08 のフローチャート A で示したように入力画像は二値化処理過程で高さを調整する際に製織条件に従い経糸方向に圧縮したためその分の情報が減少していることと、二つ目は、図 7-18 (a)は $n=8$ 、図 7-18 (b)は $n=24$ という糸の交差周期の差があることである。次に再現された明暗のレンジについてみると、明暗それぞれの領域で本章の手法が優れていることがわかる。特にパターン 2 の組織パターンを適用した中央の雲では、白い経糸によるハイライトが際立っており、提案手法による輝度レンジの拡大の効果が観察できる。



(a) 入力画像



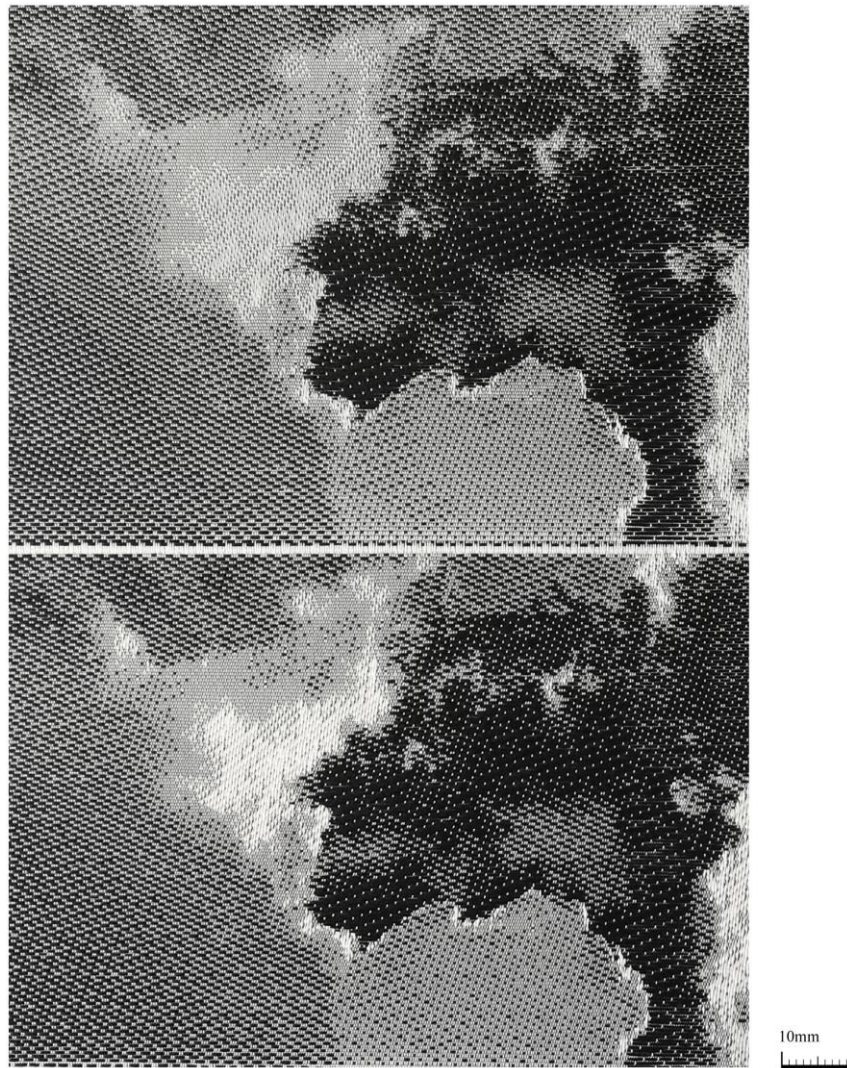
(b) 第5章での提案手法による製織結果(経糸=黒、緯糸=白によるIFT法+OSD法 ($n=8, R'=1.2$))

(c) 本章での提案手法(経糸=白、緯糸=白、黒2丁)による製織結果

図 7-18 経糸:白による製織結果

図 7-19 は図 7-18 (a)を入力画像とする製織結果を示し、図 7-19 (a)は、図 7-03 で示した伝統的なステューピンググラフの作品で用いられる手法と同じ階調の段差数となるよう、提案手法のディザマスク a 及び b の閾値を変更したものにより生成したジャカード組織パターンを使って製織した結果を示す。図 7-19 (b)は本章での提案手法による製織結果を示している。

従来手法による図 7-19 (a)は、雲の影になった部分などで階調の段差が顕著に表れているが、提案手法による図 7-19 (b)は、階調は連続的であり階調差を示す明瞭な境界線は確認できず、提案手法が入力画像の微細な連続階調の再現において改善できていることが認められる。



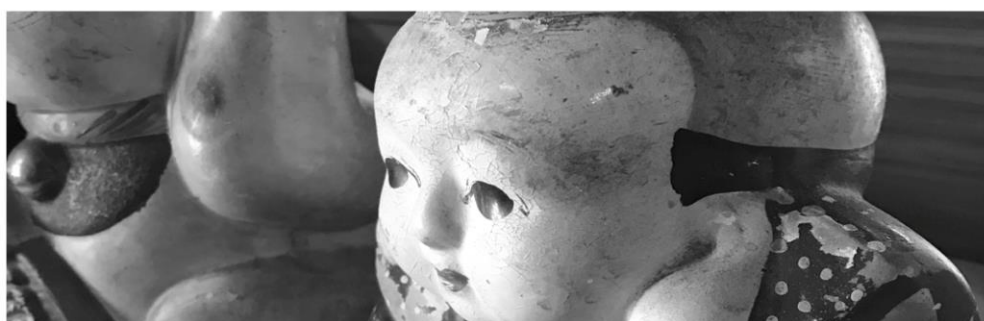
(a) 7-2-2節のスティブングラフ事例の技法をシミュレートした製織結果

(b) 本章での提案手法(経糸=白、緯糸=白、黒2丁)による製織結果

図 7-19 経糸=白による製織結果

図 7-20 は、図 7-20 (a)を入力画像とした製織試験の結果を示し、図 7-20 (b)は、第 5 章で示した IFT 法と OSD 法により生成したジャカード組織パターンにより製織した結果を示し、図 7-20 (c)は本章での提案手法による製織結果を示している。

経糸=白で実験した結果を示した図 7-18 と比較して、図 7-20 (c)のトーンは従来手法よりも輝度レンジの改善も特に見られないが、入力画像のうち最も暗い部分に対応する領域の輝度がかなり低いことは、より黒に近い領域に表現可能なレンジを広げることができたとも評価できる。また白い緯糸の露出する点が増減して階調変化を表しているパターンが、織物組織の規則的な配置に従っていることが図 7-20 (b)よりも顕著であり、またオーダーユニットの活用による緩やかな階調変化をもたらす効果も確認できる。このような外観を装飾的なパターンとしてとらえてデザインに生かすことで、経糸=黒の条件でも新しい選択肢をデザイナーに提供することが可能だと思われる。



(a) 入力画像



(b) 第5章での提案手法による製織結果(経糸=黒、緯糸=白によるIFT法+OSD法 ($n=8$, $R^2=1.2$))

(c) 本章での提案手法(経糸=黒、緯糸=白、黒2丁)による製織結果

図 7-20 経糸=黒による製織結果

表 7-02

製織条件：本章での提案手法

(図 7-16 (a)-B, 7-16 (a)-C, 7-16 (b)-B, 7-16 (b)-C, 7-18 (c), 7-18 (a), 7-18 (b), 7-20 (c))

製織条件	経糸	緯糸
素材	ポリエステル 100%	ポリエステル 100%
織度	50d/2	黒 135d/1 白 75d/1
密度	234本/鯨寸	186本/鯨寸
ジャカード機	Stäubli JC5	

※ただし、経糸＝黒のときは緯糸の黒と白の織度は逆転する

表 7-03

製織条件： $n=8$ での OSD 法及び IFT 法と OSD 法の併用

(図 7-16 (a)-A, 7-16 (b)-A, 7-18(b), 7-20(b))

製織条件	経糸	緯糸
素材	ポリエステル 100%	ポリエステル 100%
織度	50d/2	110d/1
密度	234本/鯨寸	186本/鯨寸
ジャカード機	Stäubli JC5	

7-4-2 考察

20 世紀初頭には職人が数か月かけたといわれる伝統的なスティブングラフの設計は、領域分割とタイリングによるものだが、数多くの段階数に応じた組織パターンを用いているため望ましい効果が得られるよう設計を行うには、コンピュータ化した織物設計システムを活用しても手間のかかる作業になるものと思われる。本章で提案したディザマスク a 及び b による画像処理手法を導入することにより、この作業を瞬時に行えるだけでなく、さらに階調変化の段階数の増加によって再現性についても改善可能であることを示すことができた。

また本章の冒頭で述べた、輝度レンジを広げるためにサイズ n を増加させると織物構造が弛緩してしまう問題についても、緯糸に 2 丁の糸を用いて階調変化と織物構造保持の役割を補完し合う手法を適用することで解決可能であることを示すことができた。

今後の課題としては次のようなものが考えられる。

(1) 入力画像と製織結果の階調変化の相関について

ここで取り上げたスティブングラフの手法は、緯糸に白黒 2 丁を用いてそれぞれに階調変化と織物構造の緊密さという別の役割を持たせることと、経糸に白糸を用いるため、全体として白糸と黒糸の比率が等しくないことによって、組織点の増減と織物上に再現される輝度が比例関係になく、組織点の増加による輝度の変化は非線形

なものとなっている。そのためディザマスクの閾値が均等な間隔を持っている場合、入力画像と織物上の再現結果の輝度に不一致が生じてしまう。そこで実験によってキャリブレーションを試み、閾値の調整を行ったことで、図 7-16 で示した入力画像と製織結果の階調変化に見られるように、概ね直線的な相関が得られた。しかしながらこのキャリブレーションの精度はまだ向上の余地があり、また糸の太さ密度などの製織条件が変わった場合にもその都度キャリブレーションを行う必要がある。そのためキャリブレーションの精度向上と省力化のための研究を今後行う必要があると思われる。

これまでは入力画素値と製織結果の輝度の相関を直線的にすることを暗黙の前提としてきたが、視覚の弁別閾を考慮して閾値の間隔を調整することでより微細な階調変化を再現するという角度からも検討していく必要があると思われる。

また糸の種類によって織物に光学異方性が与えられる場合には観察方向によって輝度が異なる結果となるため、これを考慮した設計支援方法についても検討すべきであると思われる。

(2) ステージ D に相当する輝度の操作について

本章での提案手法は、これまでのステッピングディザマスクを用いた手法と違い、ステージ D の平織の状態を基準点として、明るい領域と暗い領域では組織パターンや織物組織構造が異なる。そのため、例えばデザイナーはステージ C の組織パターンはデザイン画のもっと明るい領域まで適用したいのでステージ D の平織になる輝度をもっと下げたい、などのように考えることがあったとしても不思議ではない。そのため、入力画像のどの領域の輝度でステージ D の状態となることが望ましいかは、デザイナーの表現意図により選択可能となるべきではないかと考えられる。デザイナーが入力画像のヒストグラムを編集することでも対応できると思われるが、提案手法に閾値の操作を組み入れるような拡張を加えることでデザイナー支援が可能ならば、検討する価値があると思われる。

(3) ディザマスク a 及び b のバリエーションについて

本章で提案した手法に用いるディザマスク a 及び b は、ステージ B~G の間に $n=2$ (平織) , $n=8$, $n=12$, $n=24$ という 4 種類のサイズをもつ組織パターンが用いられていた。他の組み合わせで同様の処理を行うことが可能かどうかは本研究では触れていないが、異なる組み合わせによる効果について検討することで新しい表現手法をもたらすことのできる可能性があると考えられる。

第8章 終章

8-1 結論

連続的な階調変化を織物上に表現可能なジャカード組織パターンの生成について、縞子組織の規則性を生かした組織的ディザ法によるアプローチについて研究を行い、それぞれの側面から次のような結果を得た。

1) ステッピングディザ法

ジャカード織物による階調表現を行ううえで、縞子組織パターンをベースにしたディザマスクを用い組織的ディザ法を適用した画像処理を行うことよって、増点法を拡張し、織物制約を保ちつつ再現可能な階調変化を最大化するとともに、上昇-下降型の階段状構造をもつ閾値配置によって左右のシンメトリーの保存を可能とするジャカード組織パターンを迅速に生成する技術を確立した。

2) 緩やかな階調変化における最適化

本研究以前の連続階調を表現するジャカード組織パターンの生成手法では、緩やかな階調変化の際に特定の組織パターンのタイリングによって意図しない繰り返しパターン、アーティファクトを発生させるのを防ぐことができなかった。

アーティファクト発生の原因がステッピングディザマスクの閾値配置の偏りであること明らかにし、閾値の配置を定義する数列として新たに導入した概念、オーダーユニットを用いて、閾値の偏りを評価するコスト関数を提案した。この関数を用いて閾値に偏りを生じさせないようオーダーユニットの最適化を行い、アーティファクト発生を抑えたジャカード組織パターンを生成できる OSD 法を提案した。

またディザマスクサイズ毎の規則性を目立たなくする手法として、OSD 法を応用しディザマスクサイズ毎にオーダーユニットの起点をランダムにシフトさせる RSSD 法を提案した。

拡張誤差拡散法に用いるディザマスク生成に OSD 法、RSSD 法を適用し、拡張誤差拡散法においてもアーティファクト発生を抑える手法を提案した。

3) 微細構造を保存する手法

OSD 法など提案手法を含む組織的ディザ法を用いたジャカード組織パターンの生成では、ディザマスクサイズ単位の階調変化は確率的に保存されるが、ディザマスクサイズ以下の微細構造は保存されにくいという課題があった。

微細構造が失われる原因について検討し、二値化処理の過程で画素の輝度とそれに対応する閾値との組み合わせが画素の反転を生じさせるためであることに着目した。そして解決方法として、輝度がバウンダリースロットの特定のレンジ内にある画素に

については平均輝度から算出する白と黒の画素数の割合に従って画素値の大きさを優先した二値化処理をステップングディザ法のアルゴリズムに組み込むことで、織物上に微細構造をより良く保存することが可能な IFT 法を提案した。

また画像情報の解析による閾値処理によって OSD 法と IFT 法を併用し、緩やかな階調でのアーティファクト発生を防ぎつつ微細構造を保存する手法を提案した。

4) 縞子線及び変則縞子の活用

本研究の提案手法をはじめとするステップングディザマスクを用いたジャカード組織パターンの生成手法では、縞子組織のパターンをベースにして二値化処理を行うが、数ある縞子組織からどれを選ぶかはデザイナーの選択にゆだねられており、明確な選択基準が示されていないかった。

そこで縞子組織を定義する組織サイズ n と飛び数 m と縞子線の角度に着目し、それぞれがどう変化したときに所望の角度の縞子線が得られるかをデザイナー支援の観点から整理して示した。

また飛び数 m が行ごとに変化したときに得られる変則縞子について、これまで明らかにされてこなかった組織サイズ n 及び飛び数 m 毎のパターンのバリエーションを示し、また正則縞子を含めてそれらの対称性に基づく分類を行った。さらに IFT 法による微細構造の再現が変則縞子にも適用できることを示した。

5) OSD 法の応用による輝度レンジの拡大

織物組織において、組織点の減少は織物構造の軟弱化をもたらすため、組織サイズ n の増大による輝度レンジの拡大には限度があり、連続階調の再現において織物構造の緊密さの保持と広い輝度レンジは両立が難しかった。一方、伝統的なスティーブンググラフの技法ではその両立が可能だったが、多大な労力を要する複雑な設計工程が課題であった。

そこでスティーブンググラフの技法に本研究が提案する OSD 法を導入する手法を提案し、緯糸が白と黒の 2 丁によって織物構造の緊密さ、広い輝度レンジを実現するとともに、入力画像から容易にジャカード組織パターンを生成する手法を提案した。また OSD 法の応用によって従来手法よりも微細な階調の再現を可能とした。

8-2 課題

1) ステップングディザ法

緩やかな階調変化でのアーティファクト発生、ディザマスクサイズ以下の微細構造の保存が考慮されていないという課題があり、これらについては第 4 章及び 5 章で解決手法を提案した。

今後の課題としては、多色ジャカードへの応用のほか、領域分割と連続階調の併用による応用など、研究領域を広げていくことが課題として挙げられる。

また本研究では組織サイズ n が一定の縞子組織について限定した検討を行ってきた

たが、過去の織物の事例では図 2-12 (b)の生地に見られるような、組織サイズ n と飛び数 m の双方を固定せずに連続階調を再現するというアプローチも見られる。このようなアプローチについても今後の研究課題としたい。

2) 緩やかな階調変化における最適化

ここでは 2-1-5 節で紹介した織物制約と 2-1-6 節で紹介した縷子組織に従った組織的ディザ法について、緩やかな階調変化でアーティファクトの発生をもたらさない閾値配置を定義するためのオーダーユニットをコスト関数により求めることができたが、その結果は主観的な評価によってしか検証されていない。コストを最小とするオーダーユニットが他のオーダーユニットに比べてどの程度アーティファクト発生を防止する効果を持つかという客観的な評価手法を見出すことが今後の課題として挙げられる。

また、第 6 章で取り上げた変則縷子を用いた際のアーティファクト発生やオーダーユニットの違いによる影響についてはまだ取り組みがなされておらず、今後検討していく必要がある。

3) 微細構造を保存する手法

提案手法では、画像のうち微細な階調変化がある部分について任意の度合いで強調する手法を示したが、この手法は画面全体に行われる。一方、絵画やデザインされた意匠は中心的なモチーフやデザイン意図から重要性の高い要素を、画家やデザイナーの手で強調して行われることが普通である。そこで今後は、本手法においても必要性の高い部分について階調変化の再現性をより高めるような手段が求められると考えられる。同様の研究では、畠らが鉛筆画及び鉛筆画風動画の自動生成を行う中で、画像に含まれる情報のみから注意すべき焦点を推測する手法を示した^[6-04]。畠は、画像の中の輝度や色、方向性の変化などから人間の視覚的な注意を集める部分を推定する Itti らが提案した Saliency Map を用いた^[8-01]。こうした手法の導入により、提案手法の拡張が可能であると考えられる。

4) 縷子線及び変則縷子の活用

ここでは、異なるサイズ n や飛び数 m の縷子組織についての分類整理や、飛び数 m が変化する変則縷子についてのバリエーション探索について、その結果をデザイナーがデザイン意図に従い好ましいものを選択するための支援を目的として行った。また様々な角度から選択する上での判断材料については提供を試みたが、実際にどの組織パターンを選択するか最終的な判断基準や、選択した組織パターンが意図に沿ったものだったかどうかの評価については、デザイナーに委ねられているのが現状である。将来的には、デザイナーの意図に従い、入力画像の特徴などの情報をもとに最適な組織パターンを自動的に選択する技術や、それを客観評価する手法の開発が必要となると思われる。

5) OSD 法の応用による輝度レンジの拡大

入力画像と製織結果の階調変化の相関について、本研究での試みによってある程度

は直線に近い結果を得ることができたが、今後織物生産にこの技術を応用する際には、経糸及び緯糸密度、糸の素材や番手が変化した場合などに対応した実験とデータ収集が必要であると思われる。それとともに視覚の弁別閾を考慮した調整の必要性と効果の検証、光学異方性を考慮した設計支援手法の検討も併せて取り組むべきと考えられる。

ここで取り上げた手法は、ステージ D とした平織の状態を基本として、そこから明暗の変化に従い黒い緯糸、あるいは白い緯糸の露出する比率が増えるよう設計されていたが、輝度の低い側では $n=12$, $m=5$ の縞子組織、高い側へは $n=8$, $m=5$ の縞子組織を用いた。この組み合わせだけでなく、他のサイズ n や飛び数 m の縞子組織を用いる試みや、それらを任意に変化させたディザマスクを自動的に生成する手法についても取り組むことで表現手法を拡大することができると考えられる。

8-3 まとめ

本研究では、縞子組織をベースとした組織的ディザ法について、緯糸 1 丁の条件下で、緩やかな階調をスムーズに表現する手法、微細構造をよりよく再現する手法、縞子線や変則縞子を活用して表現力を高める手法によって、自然画像をより忠実に織物上に再現可能な技術を向上する提案を行った。また緯糸 2 丁の条件下ではステイブングラフの技法を拡張することでより豊かな階調表現とともに広い輝度レンジの実現と織物構造の緊密さを保持できる手法を示すことができた。

これらの手法は自然画像のような前処理が行われていない画像に対しても優れた再現性を実現できる技術を開発しようという意図から生まれたものである。今後は織物設計の現場において、デザインされた意匠や、デザイン意図に沿った最大の効果が得られるよう編集された画像に対して活用し、また色糸の数を増加したカラー表現にも応用されることで、ジャカード織物による表現力を高めることに貢献できると思われる。

謝辞

本研究は、著者が山梨大学大学院博士課程在学中に、同大学医学工学総合研究部茅教授、および豊浦准教授の指導のもとに行ったものです。本研究の実施及び論文執筆にあたりお世話になった皆様に感謝を申し上げます。

茅教授には研究や論文執筆にあたって、いつも情報科学の観点から客観的で的確なご指導をいただきました。また織物という研究分野を研究室のテーマとしても展開し取り組んでくださったことで、大変心強い思いで研究を進めることができたことにも心より感謝しております。茅教授の研究への情熱と、明るく前向きなお人柄に接しながら研究を行えたことは得難い経験となりました。また筆者の職務上の都合から通常のリミットの時間に参加が難しかったため、休日や深夜などにメールのやり取りで多くのご指導をいただきましたが、いつも快く対応して下さったことは何よりの励ましとなりました。貴重な時間を惜しみなく注いで研究のご指導をいただいたことに心より感謝しお礼を申し上げます。

豊浦准教授には織物と画像処理を結びつける示唆に富んだアドバイスやアイデアをいただけたことで研究を大きく推進することができました。ご自身のテーマとしても織物を取り上げていただき、研究を共にできたことは自分の研究を進めるうえでも心強く、また大いに刺激となる経験でした。研究調査や学会参加など様々な場面でも心配りをいただき、貴重な経験をご一緒させていただけたことにも感謝を申し上げます。

論文審査委員を務めてくださった宮田教授、郷教授、渡辺准教授、小俣准教授、そして豊浦准教授には、少ない時間の中で審査をいただいたことに心より感謝を申し上げます。

研究と論文執筆を行う上では職場の理解と協力が不可欠でした。日々の業務をサポートしてくれた秋本さん、製織試験を手伝ってくれた高山さんをはじめ、山梨県産業技術センター富士技術支援センターの皆様にお礼を申し上げます。

最後に、家庭での時間の多くを研究に費やすことを認め暖かく支えてくれた妻と息子に感謝を表します。

参考文献

序章

- [1-01] 福井貞子, “もの与人間の文化史 123・染織”, 第1刷, 東京: 法政大学出版局, 2004, p.1-3.
- [1-02] 成田典子, “テキスタイル用語辞典”, 第1刷, 東京: テキスタイル・ツリー, 2012, p.284-393.
- [1-03] Glassner A, “Andrew Glassner's Notebook: Digital Weaving, Part 1”. *IEEE Comput Graph Appl.* 2002; 22(6): 108-118.
- [1-04] Zhao S et al., “Structure-aware Synthesis for Predictive Woven Fabric Appearance”. *ACM Trans. Graph.* 2012; 31: 75:1-75:10.
- [1-05] Jiang GM et al., “Automatic Identification of Jacquard Warp-knitted Fabric Patterns Based on the Wavelet Transform”. *FIBRES TEXT EAST EUR.* 2014; 22(2): 53-56.
- [1-06] Zhang Y et al., “Intelligent segmentation of jacquard warp-knitted fabric using a multiresolution Markov random field with adaptive weighting in the wavelet domain”. *Textil Res J.* 2014; 84: 28-39.
- [1-07] 阿久津光子, “ジャカードという表現, 総合文化研究所年報” 2012; 20: 35-58.
- [1-08] 株式会社丸萬. “MARUMAN”, Archive, <http://maruman-inc.jp/archives/photo-jacquard.html>
- [1-09] 株式会社織元山口, “ORIMOTO YAMAKUCHI, 技術解説”, <http://www.yamakuchi.co.jp/kaisetu/kaisetu2.html>
- [1-10] Bayer BE, “An optimum method for two-level rendition of continuous-tone pictures”. *IEEE ICC* 1973; 11-15.
- [1-11] Floyd RW and Louis S. “An Adaptive Algorithm for Spatial Grayscale”. *Proc SID* 1976; 17: 75-77.
- [1-12] 浅野哲夫, “デジタル・ハーフトーニング: アルゴリズム工学の視点, 情報処理学会” 2002; 43 卷 5: 554-561.
- [1-13] JAGAT, “ファストファッションを影で支えるインクジェット捺染”, <https://www.jagat.or.jp/archives/22942>

第2章

- [2-01] 阿久津光子, “ジャカードという表現”, 総合文化研究所年報 2012; 20: 35-58.
- [2-02] エリック・シャリーン, “図説 世界史を変えた50の機械”. 第1刷. 2013, 東京: 原書房, 2013, p.8-11.

- [2-03] エリック・シャリーン, “図説 世界史を変えた 50 の機械”. 第 1 刷. 2013, 東京: 原書房, 2013, p.30-35.
- [2-04] 株式会社織元山口, “ORIMOTO YAMAKUCHI, 技術解説”, <http://www.yamakuchi.co.jp/kaisetu/kaisetu2.html>
- [2-05] Lia Cook, “Lia Cook”, <https://www.liacook.com>
- [2-06] Louise Lemieux Bérubé, “Louise LEMIEUX BÉRUBÉ”, <http://www.lemieuxberube.com>, 2015
- [2-07] Grethe Sorensen, “GRETHE SORENSEN”, <http://www.grethesorensen.dk>
- [2-08] Jon Pettersen, “Jon Pettersen”, <http://www.jonpettersen.com>
- [2-09] Kelly Thompson, “Kelly Thompson”, <http://www.kellythompson.org>
- [2-10] Phillip David Stearns, “PHILLIP DAVID STERNS”, <http://www.phillipstearns.com/artwork>
- [2-11] Textile Museum TxtileLab, “Yearbook TextileLab 2013”. 1st ed. Tilburg: Stichting Mommerskwartier and TextileMuseum, 2014, p.22.
- [2-12] Julie Holyoke, “Textile Design”, http://jholyoke.com/news_engl.html
- [2-13] Kristina Daukintytė Aas, “Kristina D. Aas”, <http://www.kristina-aas.com>, 2016
- [2-14] Y's TEXTILE, “Y's TEXTILE”, <https://www.ystextile-ori.com>, 2017
- [2-15] nunoanuenue, “nunoanuenue”, <http://nunoanuenue.com>, 2017
- [2-16] 坪由織物株式会社, “坪由織物のデジタルジャカード”, <http://www.tsuboyoshi.com/contents/business/jacquard.html>
- [2-17] 株式会社丸萬, “MARUMAN, *Archive*”, <http://maruman-inc.jp/archives/photo-jacquard.html>
- [2-18] Ng F and Zhou J, “Innovative jacquard textile design using digital technologies”. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013, p.27-48.
- [2-19] Ng F and Zhou J, “Digital jacquard textile design in a colorless mode”. *Res. J. Text. Apparel Research* 2006; 10: 36-42.
- [2-20] 五十嵐哲也, 吉村千秋, 中村聖名, “ジャカード織物の製造方法”, 特許 5311092 号, 日本, 2007.
- [2-21] 豊浦正広, 五十嵐哲也, 庄司麻由 et al., “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 2014, Vol.13 3: 124-133.
- [2-22] 豊浦正広, 五十嵐哲也, 庄司麻由 et al., “拡張ディザ法を用いたジャカード織物パターンの生成”. In: *NICOGRAPH*, 山梨, 日本, 8 November-9 November 2013, pp.9-16. 東京: 芸術科学会.
- [2-23] 豊浦正広, 五十嵐哲也, 庄司麻由 et al., “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”. In: *Visual Computing/グラフィクスと*

CAD 合同シンポジウム, 東京, 日本, 29 June-30 June 2014. 東京: 情報処理学会.

- [2-24] 豊浦正広, 五十嵐哲也, 寺田貴雅 et al., “計算処理による写真からの対話的織物パターン作成”. In: スマートテキスタイル研究会, 京都, 日本, 26 August 2016. 大阪: 日本繊維機械学会.
- [2-25] Floyd RW and Louis S. “An Adaptive Algorithm for Spatial Grayscale”. *Proc SID* 1976; 17: 75-77.
- [2-26] 豊浦正広, 五十嵐哲也, 庄司麻由 et al., “ジャカード織物パターンの生成法, 装置およびプログラム”, 特許 6152520 号, 日本, 2017.
- [2-27] 豊浦正広, 五十嵐哲也, 茅 暁陽, “ジャカード織物多色織パターンの生成法, 装置およびプログラム”, 特願 2016-015779, 日本, 2016.
- [2-28] 豊浦正広, 五十嵐哲也, 齋藤 豪 et al., “写真からの多色織パターン生成”. In: *Visual Computing/グラフィクスと CAD* 研究会, 東京, 日本, 8 February 2016, Article 1. 東京: 情報処理学会.
- [2-29] 豊浦正広, 五十嵐哲也, 茅 暁陽, “ジャカード織物パターン作成のための画像処理”. *加工技術* 2016; Vol.51 3: 34-39
- [2-30] Ostromoukhov V, “Digital Facial Engraving”. *COMPUTER GRAPHICS Proceedings Annual Conference Series* 1999; 417-424.

第 3 章

- [3-01] Bayer BE, “An optimum method for two-level rendition of continuous-tone pictures”. *IEEE ICC* 1973; 11-15.
- [3-02] 五十嵐哲也, 吉村千秋, 中村聖名, “ジャカード織物の製造方法”, 特許 5311092 号, 日本, 2007.
- [3-03] 豊浦正広, 五十嵐哲也, 庄司麻由 et al., “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* 2014, Vol.13 3: 124-133.

第 4 章

- [4-01] Igarashi T, Toyoura M, Mao X, “Optimizing Dither Mask for Rendering Smooth Tone on Fabric”. In: *Nicograph International*, Hangzhou, China, 6 July-9 July 2016, pp75-82. Tokyo: The Society for Arts and Science.
- [4-02] Igarashi T, Toyoura M, Mao X, “Dithering method for reproducing smoothly changing tones and fine details of natural images on woven fabric”. *Textil Res J* 2017.
- [4-03] 五十嵐哲也, 茅 暁陽, 豊浦正広, “織物製造及び設計における画像処理の役割について”. In: 画像電子学会研究会, 山梨, 東京, 1 September 2017, Article 4, pp.13-16. 東京: 画像電子学会

第 5 章

- [5-01] Igarashi T, Toyoura M, Mao X, “Dithering method for reproducing smoothly changing tones and fine details of natural images on woven fabric”. *Textil Res J* 2017.
- [5-02] Oliva A, Gist of the scene. “Neurobiology of Attention”. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2005, p. 251-256.
- [5-03] Sripian P. “Toward using hybrid image as a visual acuity assessment tool”. In: *Nicograph International*, Hangzhou, China, 6 July-9 July 2016, pp171-177. Tokyo: The Society for Arts and Science.
- [5-04] Jun’ichiro Seyama, “パンサーガールの作り方 : HYBRiD iMAGE”, <https://teachme.jp/contents/12814>, 2013
- [5-05] Irawan P and Marschner S, “Specular Reflection from Woven Cloth”. *ACM Trans Graph* 2012, Vol. 31, No. 1, 11:1-20.
- [5-06] Zhao S et al., “Structure-aware Synthesis for Predictive Woven Fabric Appearance”. *ACM Trans Graph* 2012; Vol. 31, No. 4, 75:1-10

第 6 章

- [6-01] A. L. グプティル, “鉛筆画で描く一スケッチから細密描写まで一”. 第 22 刷. 東京:マール社, 1978, p.25-31.
- [6-02] A. L. グプティル, ”ペンで描く一スケッチから細密描写まで一”. 東京:マール社, 1979, p.29.
- [6-03] Mao X, Nagasaka Y and Imamiya A, “Automatic generation of pencil drawing from 2D images using line integral convolution”. *Proceedings of the International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics (CAD/GRAPHICS)* 2001; 240-248.
- [6-04] 畠康高, “LIC 法を用いた鉛筆画及び鉛筆画風動画の生成法”. 博士論文, 山梨大学, 日本, 2015.
- [6-05] 永井安夫, “制約充足問題への近似解法の適用検討 -N-クイーン問題を中心として-”. 東京情報大学研究論集 2005; Vol.8, 2: 59-66.
- [6-06] 狩野 均, “特集 : 制約充足問題の基礎と応用”. 人工知能学会誌 1997; Vol.12, 3: 359 - 365.
- [6-07] CAMPFIRE, Inc., “STARted, デザインをデータに書き起こす服の設計士「パタンナー」. パターンメイキングについて” <https://started.jp/375>, 2015
- [6-08] 株式会社ファインズ東京, “FINES TOKYO-ファインズ東京がお届けするアパレル業界メディア, マーカーの仕事内容”, <http://www.fines-net.com/media/マーカーの仕事内容>, 2014
- [6-09] 藤田伸, “17 種のウォールペーパー・パターンについての市場における調査報告”. デザイン学研究 BULLETIN OF JSSD , 2006; Vol.53 3: 31-40.
- [6-10] タイ工房 富田有子, “タイ工房, タイレシビ”, <http://www.tai-kobo.com/page/9>

- [6-11] BEYONDAGE INC, “男前研究所, レジメンタルストライプのネクタイは誤解を招く!?”, <https://otokomaeken.com/mensfashion/10050>
- [6-12] ハセオー, “DENIM LIFE 『きまぐれ日記』, 左綾 ♪♪”, <https://blogs.yahoo.co.jp/hasetaka26/28365888.html>, 2012
- [6-13] Wikipedia, “ユークリッドの運動群”, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ユークリッドの運動群>, 2017
- [6-14] Wikipedia, “Euclidean plane isometry”, https://en.wikipedia.org/wiki/Euclidean_plane_isometry, 2017

第7章

- [7-01] Peter Daws, “Stevengraph silks”, <http://www.stevengraph-silks.com> , 2017
- [7-02] Malcolm J Roebuck, “Stevengraphs Bookmarks & Postcards Etc.”, <http://stevengraphs.com>, 2017
- [7-03] Stevengraphs Collectors Assotiation, “Stevengraphs Collectors Assotiation, *Stevengraphs and more*”, <http://stevengraph4u.com>
- [7-04] Stevengraphs Collectors Assotiation, “Stevengraphs Collectors Assotiation, *Stevengraphs - What are they?*”, <http://www.stevengraphcollectors.com>
- [7-05] Musée d’Art et d’Industrie de la ville de Saint Etienne, “Musée d’Art et d’Industrie de la ville de Saint Etienne, Parcours de visite Rubans”, <http://www.musee-art-industrie.saint-etienne.fr/decouvrir/musee/parcours-de-visites/parcours-rubans/printemps-tableau-tisse>, 2012

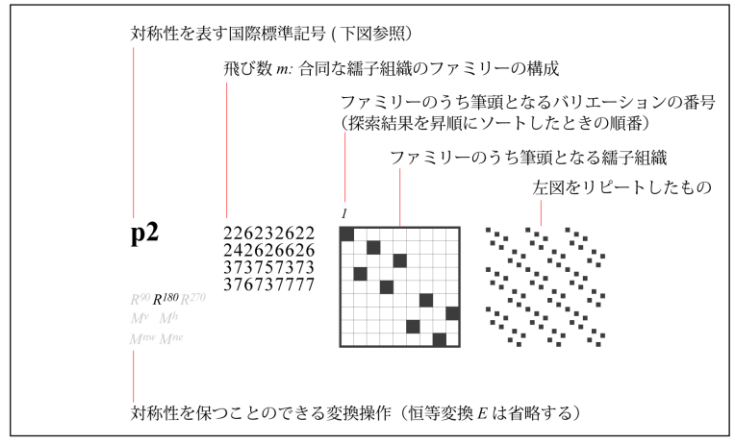
第8章

- [8-01] Itti, Laurent, Koch C et al., “A Model of Saliency-Based Visual Attention for Rapid Scene Analysis”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1998; Vol. 20, 11: 1254 – 1259.

付録

付録として，6-3 節で触れた変則繻子のバリエーション探索の結果について，次ページ以降に組織サイズ $n=5\sim 10$ の範囲でのすべての探索結果を掲載する．

ここで掲載するのは，6-3 節で述べたように繻子組織の条件を満たすすべてのバリエーションのうち，座標(0,0)の位置に組織点があり，かつ併進操作により同一となる解を除去したものである．記載した情報についての説明と，対称性分類に基づく可能な回転操作については次頁に記すとおりである．



縹子組織の例	対称性による分類	回転操作	ファミリーの構成要素数		
$m=\{335777533\}$	p4g $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 上下左右映進, 北東・北西軸鏡映対称	90・180・270度 回転してよい	1つの縹子組織のみのファミリー		
$m=\{227772277\}$	p4 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 鏡映、映進対称を含まない。				
$m=\{353535353\}$	cmm $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 北東・北西軸鏡映対称				
$m=\{2584485266\}$	pgg $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 上下左右映進対称				
$m=\{2277722434\}$	p2 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 鏡映、映進対称を含まない。				
$m=\{2234257474\}$	cm $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 北東軸鏡映対称	180度回転してよい	2つの同様な縹子組織からなるファミリーを持つ		
$m=\{2275386575\}$	cm $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 北西軸鏡映対称				
$m=\{2232688784\}$	pg $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 左右映進対称				
$m=\{2248526885\}$	pg $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 上下映進対称				
$m=\{2272327483\}$	p1 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 鏡映、映進対称を含まない。			回転できない	4つの同様な縹子組織からなるファミリーを持つ
$m=\{2272327483\}$	p1 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 鏡映、映進対称を含まない。				
$m=\{2272327483\}$	p1 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 鏡映、映進対称を含まない。				
$m=\{2272327483\}$	p1 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 鏡映、映進対称を含まない。				
$m=\{2272327483\}$	p1 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 鏡映、映進対称を含まない。	回転できない	8つの同様な縹子組織からなるファミリーを持つ		
$m=\{2272327483\}$	p1 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 鏡映、映進対称を含まない。				
$m=\{2272327483\}$	p1 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 鏡映、映進対称を含まない。				
$m=\{2272327483\}$	p1 $E R^{90} R^{180} R^{270} M^x M^y M^{xy} M^{yx}$ 鏡映、映進対称を含まない。				

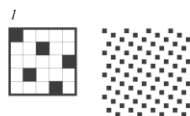
図 6-17 を改変し、付録で掲載する縹子組織と同様に対称性の高い順序に改変したもの

$n=5$

p4

22222
33333

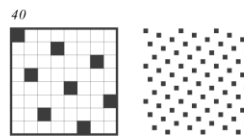
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



cmm

33333333
55555555

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

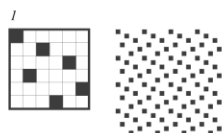


$n=6$

p4g

223443

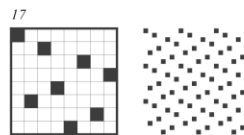
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



pgg

23246564
33345554

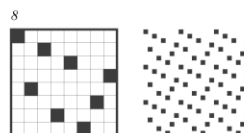
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



p2

22325523
22343343
36566563
45545665

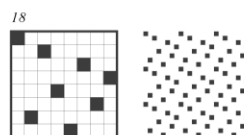
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



p2

23243334
23255555
36563333
45554656

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

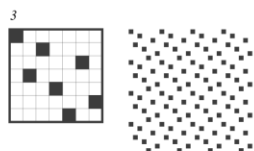


$n=7$

cmm

2332353
2454454

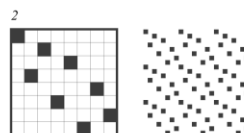
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



cm

22555463
22364555
24333665
25663334

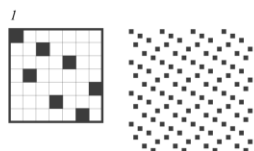
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



p2

2245422
2333244
2355553
3544453

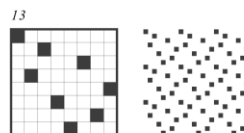
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



cm

23464364
24564254
24524654
24634643

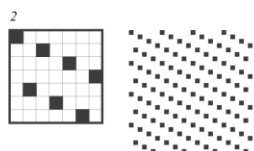
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



p2

2222222
3333333
4444444
5555555

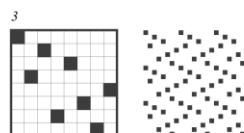
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



pg

22566632
22236665
23456345
25436543

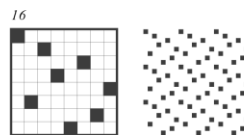
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



pg

23642564
24346454
24546434
24652463

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

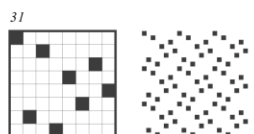


$n=8$

p4g

24636425

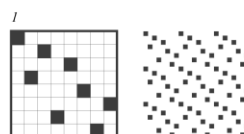
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



p1

22542432
22234245
23465255
23633654
24563363
25525643
36665464
34645666

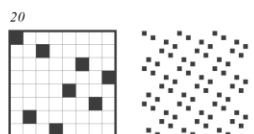
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



p4

23252325
36563656

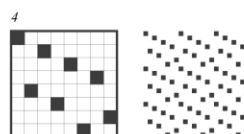
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



p1

22232463
22236423
23455454
24545543
24656665
25666564
33434654
33456434

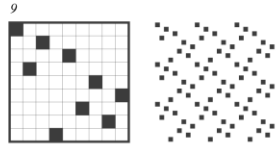
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



$n=9$

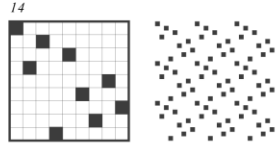
p4 226526256
374377347

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



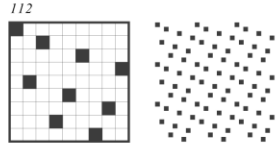
p4 226673766
233773326

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



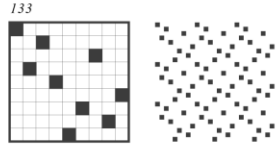
p4 233233533
466766766

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



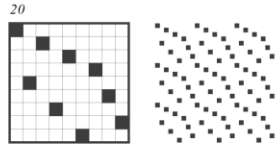
p4 244256265
373475574

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



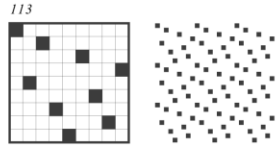
cmm 222465564
344357775

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



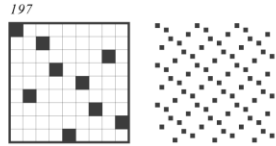
cmm 233256465
347667435

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



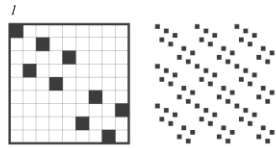
cmm 255255255
474474474

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



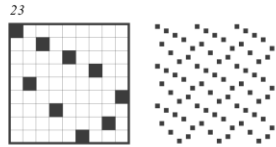
p2 226232622
242626626
373757373
376737777

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



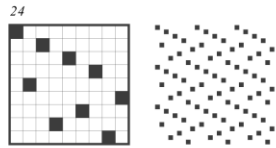
p2 222474474
255257775
255344355
465644474

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



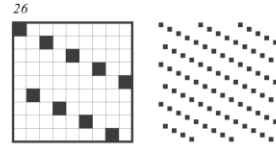
p2 222476742
232577775
335343355
465644664

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



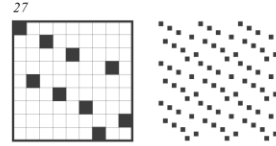
p2 222222222
444444444
555555555
777777777

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



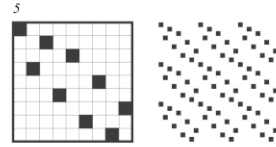
p2 223322373
244246464
267766776
335575575

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



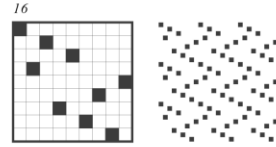
p2 226565622
253435266
374656473
377773434

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



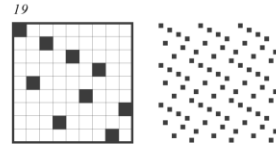
p2 226776222
223777773
244426446
375557355

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



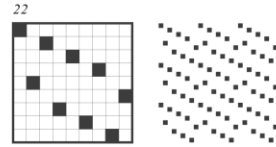
p2 222443442
242653356
375734664
556557777

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



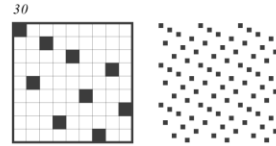
p2 222474222
257777775
344444355
465555564

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



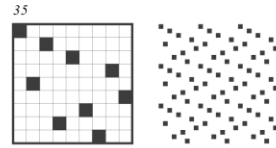
p2 223343433
334334664
335665665
565667766

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



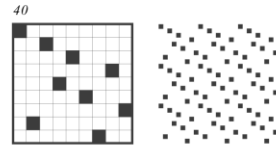
p2 223376733
232667766
244664424
335575755

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



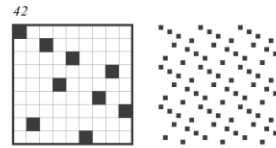
p2 223523253
266566266
373343373
467764767

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



p2 223532244
233266266
373376673
467755776

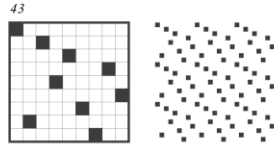
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{wv}$



$n=9$

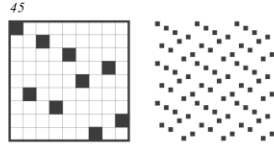
p2 223556553
247337424
257575266
344677644

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



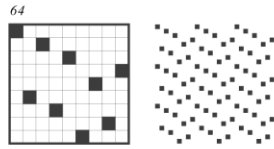
p2 223752573
244425555
247426776
475557444

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



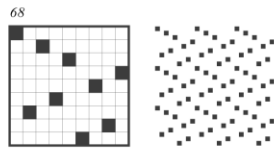
p2 224742474
257525775
344443464
356555565

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



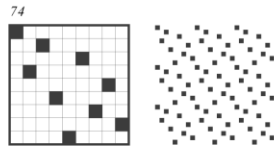
p2 224767674
232325775
334643355
356644665

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



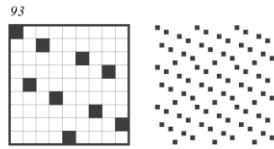
p2 235653255
237433473
256652676
346744764

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



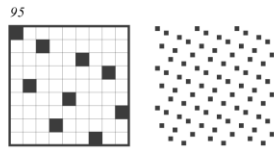
p2 232323255
246433464
356653575
476767674

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



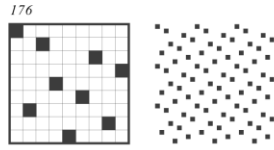
p2 232334433
233566533
334667664
556676766

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



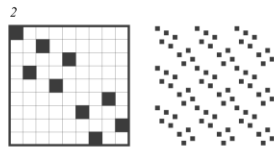
p2 242425665
334433565
334757574
346655664

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



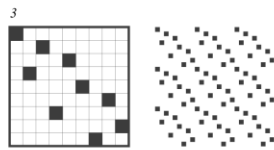
cm 226247373
223737426
257377626
262677375

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



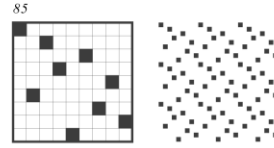
cm 226425573
223755246
244753776
267735744

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



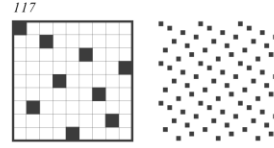
cm 237435255
253473255
256474476
267447465

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



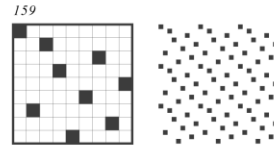
cm 233434665
256643433
334766565
335656674

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



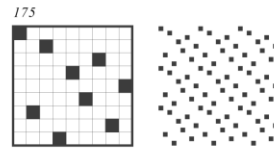
cm 246565665
256656564
334343574
334753434

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



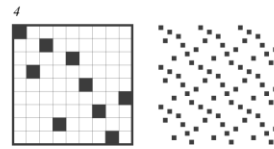
cm 247465656
253434375
257343435
265656474

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



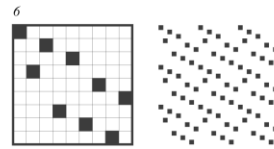
cm 226437642
222467346
235777356
265377753

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



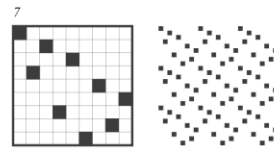
p1 226524222
222425622
244435356
265353444
375556464
377777574
346465557
347577777

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



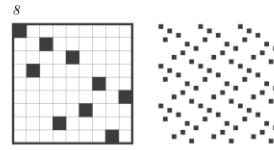
p1 226524474
224744256
244346256
255743775
257734755
264344265
374375565
347356557

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



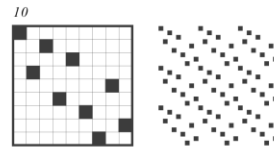
p1 226526742
222476256
235525356
237437775
255326535
257734773
376447464
346474467

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



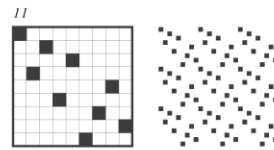
p1 226652373
223732566
235246473
237464253
253574676
267433776
267647535
267733476

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



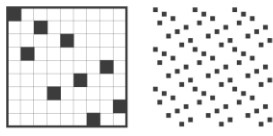
p1 226653264
226762533
223352676
224623566
237766473
237466773
376433775
334673577

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

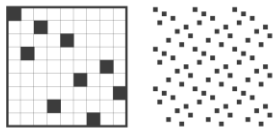


$n=9$

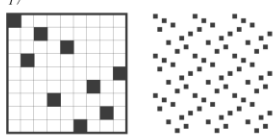
p1 226677573
223377624
223757766
224267733
235335573
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 237553353
 $M^v M^h$ 244664676
 $M^{vw} M^{vh}$ 267646644



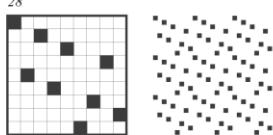
p1 226673433
223343766
235664766
233764335
233776656
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 253346733
 $M^v M^h$ 265667733
 $M^{vw} M^{vh}$ 266746653



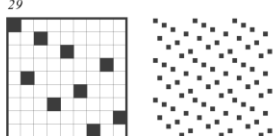
p1 226776474
223525773
223775253
224746776
244337346
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 264373344
 $M^v M^h$ 265375566
 $M^{vw} M^{vh}$ 266557356



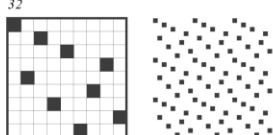
p1 223323264
224623233
235753533
233535753
246766464
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 246466764
 $M^v M^h$ 376766775
 $M^{vw} M^{vh}$ 357766767



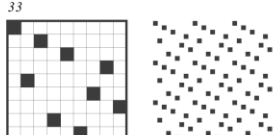
p1 223347573
223757433
244335564
246553344
242566776
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 242677665
 $M^v M^h$ 344665575
 $M^{vw} M^{vh}$ 357556644



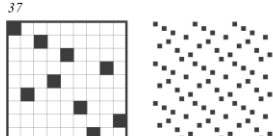
p1 223356564
224656533
233443575
246556674
247665564
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 257534433
 $M^v M^h$ 343466775
 $M^{vw} M^{vh}$ 343577664



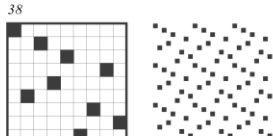
p1 223352424
224242533
233533566
266533533
376646643
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 334664667
 $M^v M^h$ 466775757
 $M^{vw} M^{vh}$ 475757766



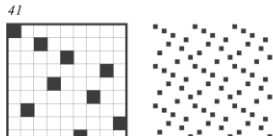
p1 223574373
223734753
244247355
244255374
246776265
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 256267764
 $M^v M^h$ 257557446
 $M^{vw} M^{vh}$ 264475575



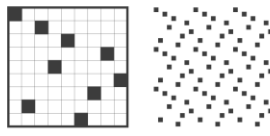
p1 223575264
224625753
235744623
232644753
246767355
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 246775374
 $M^v M^h$ 247357764
 $M^{vw} M^{vh}$ 255376764



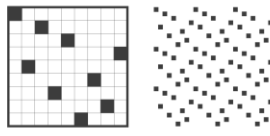
p1 223534764
224674353
235776465
233257356
233265375
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 247667346
 $M^v M^h$ 256467753
 $M^{vw} M^{vh}$ 264376674



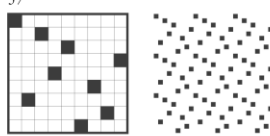
p1 223557444
224447553
237526623
232662573
244677555
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 247337676
 $M^v M^h$ 255577644
 $M^{vw} M^{vh}$ 267673374



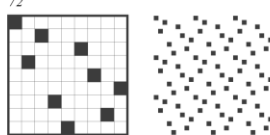
p1 224256474
224746524
253475775
256465566
257757435
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 266556465
 $M^v M^h$ 374335443
 $M^{vw} M^{vh}$ 334435347



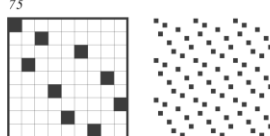
p1 224434674
224764344
235655775
233743356
256643766
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 257755653
 $M^v M^h$ 265334733
 $M^{vw} M^{vh}$ 266734665



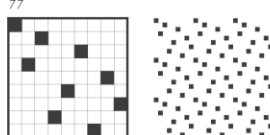
p1 235524465
237437523
232573473
247676256
255325644
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 265267674
 $M^v M^h$ 347644755
 $M^{vw} M^{vh}$ 355744674



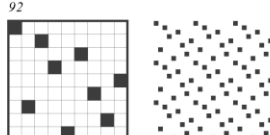
p1 235655523
232555653
233742465
247332564
257534766
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 266743575
 $M^v M^h$ 344476764
 $M^{vw} M^{vh}$ 346767444



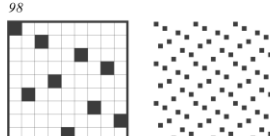
p1 235664433
232334766
232667433
233446653
233767665
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 256676733
 $M^v M^h$ 334676655
 $M^{vw} M^{vh}$ 335566764



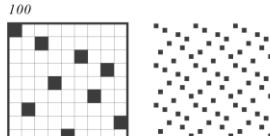
p1 237574665
233524656
242533476
242674335
253326564
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 256647573
 $M^v M^h$ 376647534
 $M^{vw} M^{vh}$ 343574667



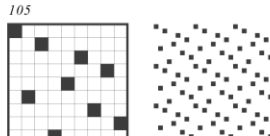
p1 232575255
232552575
246434355
247674474
247447674
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 255343464
 $M^v M^h$ 356564475
 $M^{vw} M^{vh}$ 357446565



p1 232534755
232557435
244767465
247334346
256476744
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 257356566
 $M^v M^h$ 264343374
 $M^{vw} M^{vh}$ 266565375



p1 232665246
232642566
244753524
246475755
242535744
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 255757464
 $M^v M^h$ 376733475
 $M^{vw} M^{vh}$ 376735743

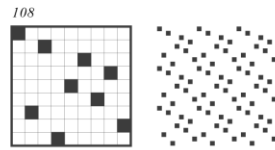


$n=9$

p1

232624746
232647426
247375746
242537526
242625735
253767375
257376735
264757374

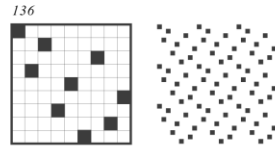
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{we}$



p1

244344474
246524265
247444344
242564256
255565575
257556555
375743574
347534757

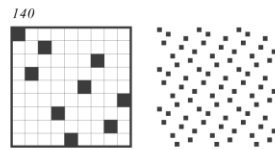
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{we}$



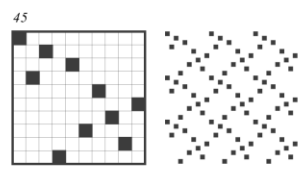
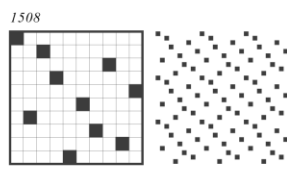
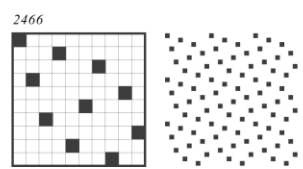
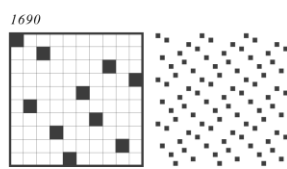
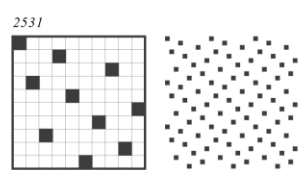
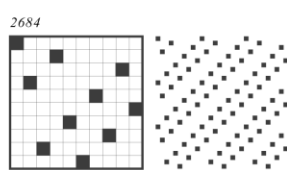
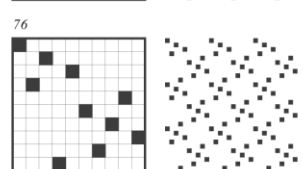
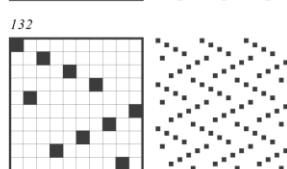
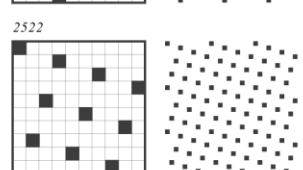
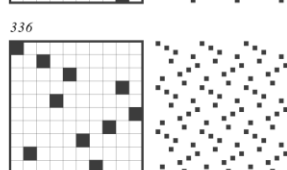
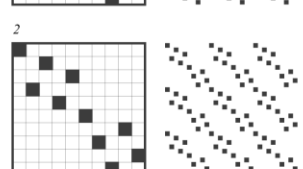
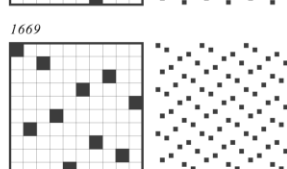
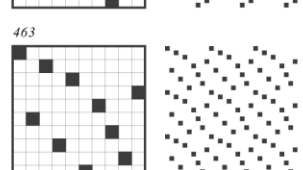
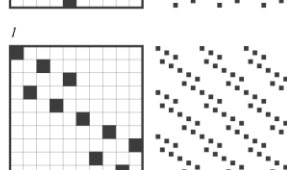
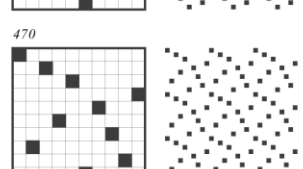
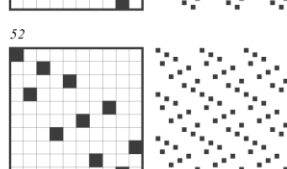
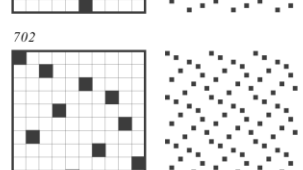
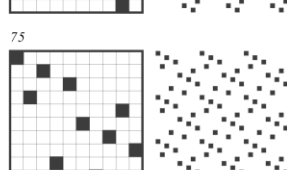
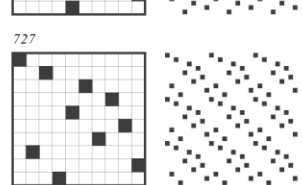
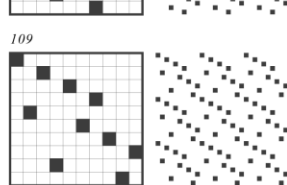
p1

244434465
247424256
247426524
256443444
257574375
257347575
347555655
355655574

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{we}$



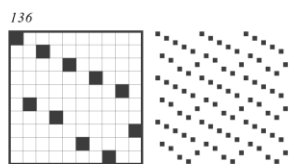
$n=10$

<p>p4g 2275388357</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>45</p> 	<p>cmm 2566665266 4854444584</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>1508</p> 
<p>p4g 3357777533</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>2466</p> 	<p>cmm 2526657566 3544858445</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>1690</p> 
<p>p4g 3443576675</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>2531</p> 	<p>cmm 3535353535 5757575757</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>2684</p> 
<p>p4 2277722777 3883338833</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>76</p> 	<p>pgg 2225888852 3365477456</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>132</p> 
<p>p4 3333333333 7777777777</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>2522</p> 	<p>pgg 2245688654 2583385277</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>336</p> 
<p>cmm 2272238383 2727883887</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>2</p> 	<p>pgg 2584485266 4444566665</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>1669</p> 
<p>cmm 2257566575 3544535885</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>463</p> 	<p>p2 2272222722 2727727277 3838338383 3888838888</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>1</p> 
<p>cmm 2257744775 3358853366</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>470</p> 	<p>p2 2276886722 2243888834 2547745277 3856336583</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>52</p> 
<p>cmm 2326535356 4878457575</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>702</p> 	<p>p2 2277722434 2367632777 3874347833 3886768833</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>75</p> 
<p>cmm 2327485847 2526387836</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>727</p> 	<p>p2 2225422452 2763367277 3833834774 5688658888</p> <p><i>R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰</i> <i>M^v M^h</i> <i>M^{rw} M^{re}</i></p>	<p>109</p> 

$n=10$

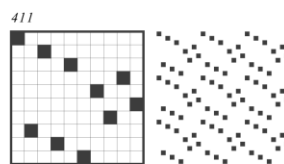
p2 2222326623
3356566565
4878888784
4454577545

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



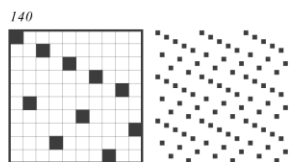
p2 2248384225
2574747527
2688588627
3853636358

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



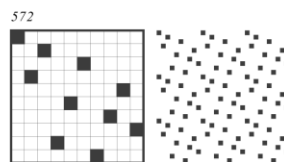
p2 2222344443
3356744765
3457754366
6666788887

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



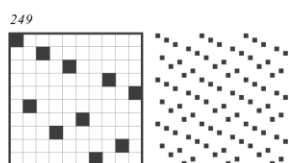
p2 2367632434
2333332777
3877777833
3478676874

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



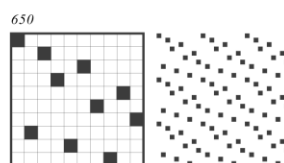
p2 2232248584
2526887886
3456656654
4454456765

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



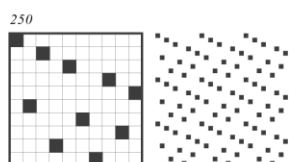
p2 2385832333
2474254345
2527877787
3685676586

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



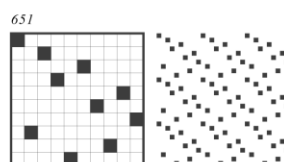
p2 2232243534
3447656744
3454366766
5768878867

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



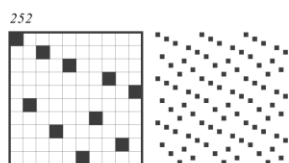
p2 2385832676
2474263336
2527843487
3684777486

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



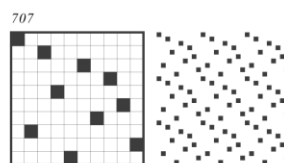
p2 2232257575
3354454453
3535887885
5665665777

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



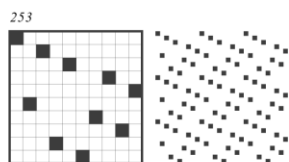
p2 2326585856
2327435347
2548784525
3878367576

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



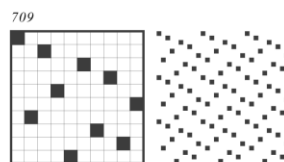
p2 2232252525
3363454363
4765674777
5887885858

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



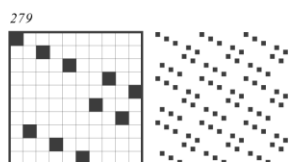
p2 2326625266
3535657565
3545757545
4858448784

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



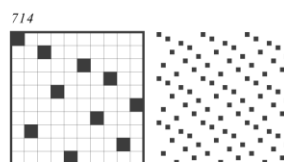
p2 2232723225
2436363427
3867474768
3878858878

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



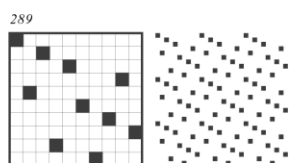
p2 2326675766
3448784435
3475757435
3535367576

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



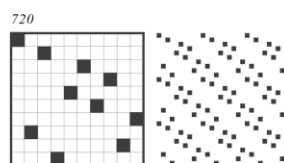
p2 2243422434
3367633676
3477434774
6768867688

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



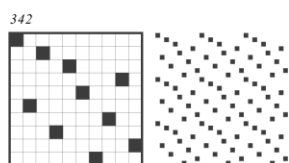
p2 2327232757
2526362527
3858474858
3878353878

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



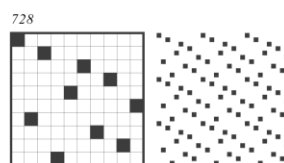
p2 2247666674
2566525775
3358544585
3444436886

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



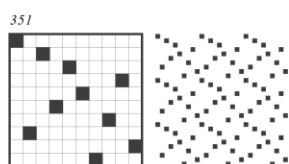
p2 2327525257
2545354525
3878358585
5657565858

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



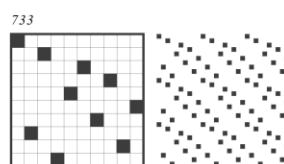
p2 2247844874
2368863266
2577527447
3853358366

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



p2 2327575757
2526353536
3878353535
4757574858

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



$n=10$

p2 2333233533
343443474
3676676676
5778777877

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

734

p2 2333247574
2474257775
3358636853
3536877786

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

736

p2 2333242524
3367636763
3477743474
5868777868

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

737

p2 2333323443
3367667633
3443477774
6678777787

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

742

p2 2333332434
3367633333
3477777774
6768777778

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

744

p2 2335332676
3353474353
3487757784
3675777576

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

787

p2 2474266766
2475742676
3448636844
3486353684

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

1085

p2 2483842757
2484748427
2636268386
2683538627

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

1148

p2 2485842575
2526853586
3366656663
4777444544

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

1197

p2 2425242676
3457636754
3474356765
3486858684

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

1217

p2 2248384225
2574747527
2688588627
3853636358

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

1260

p2 2367632434
2333327777
3877777833
3478676874

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

1324

p2 2385832333
2474254345
2527877787
3685676586

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

1577

p2 2385832676
2474263336
2527843487
3684777486

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

1578

p2 2326585856
2327435347
2548784525
3878367576

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

1597

cm 2275757483
2238475757
2635353887
2788353536

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

28

cm 2234257474
2247475243
3586788636
3636887685

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

180

cm 2234435674
2247653443
3457667886
3688766754

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

184

cm 2236878365
2256387863
2324788547
2327458874

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

209

cm 2362562383
2383265263
2784584787
2787485487

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}

517

$n=10$

cm 2363487683
2386784363
2342787476
2432674787

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2333574256
2475333265
3577784586
3685487775

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2335356256
2652653533
4854877575
4575778458

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2335338436
2634833533
2674877577
2775778476

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2458448366
2568447266
2662744865
2663844854

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2474842766
2484742667
2636844386
2683448636

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2475766256
2652667574
3448548635
3536845844

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2476624766
2667426674
3448634486
3684436844

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2484366665
2566663484
2674444586
2685444476

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2484724847
2638626386
2683626836
2748427484

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2435766575
2575667534
3445358675
3544357685

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2275386575
2257568357
2453588357
2753885354

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2278638743
2234783687
2367883247
2388763274

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2234774434
2243447743
3366768876
3367886766

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2238356254
2245265383
2754856887
2788658457

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2324753356
2326533574
3577548786
3687845775

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2333534476
2674435333
3487775766
3667577784

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

cm 2348457566
2653544876
2665754843
2678445356

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

pg 2272688384
2248388627
2583835727
2727538385

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

pg 2278888322
2222388887
2456836547
2745638654

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

$n=10$

pg 2232688784
2248788623
3445667456
3654766544

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

267

pg 2474486366
2484562685
2586265484
2663684474

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

1078

pg 2243688674
2247688634
2476543685
2586345674

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

303

pg 2425486856
2426586845
2583675347
2743576385

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

1221

pg 2248588625
2252688584
3456747536
3574765436

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

386

pg 2426386847
2427486836
2583625847
2638527485

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

1250

pg 2362687484
2484786263
2753833577
2775338357

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

523

pg 2434486766
2667684434
3357743576
3367534775

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

1309

pg 2384487266
2635748456
2654847536
2662784483

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

621

pg 2435386757
2584775336
2633577485
2757683534

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

1330

pg 2335687754
2457786533
2583335777
2777533385

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

807

pg 2272583885
2258838527
2338387727
2727783833

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

10

pg 2336787743
2347787633
2434567685
2586765434

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

816

pg 2275388852
2225888357
2365387457
2754783563

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

44

pg 2348687624
2426786843
3456763574
3475367654

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

962

pg 2277533885
2258833577
2633384777
2777483336

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

70

pg 2453586575
2435768357
2575685354
2753867534

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

995

pg 2243576885
2258867534
3453676574
3475676354

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

295

pg 2454486566
2485268357
2584275386
2665684454

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

1006

pg 2248526885
2258862584
3454576365
3565675454

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vw}$

375

$n=10$

pg 2456844566
2484386267
2665448654
2683484276

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

pg 2475368456
2484586265
2562685484
2654863574

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

pg 2425868456
2426548685
2563585475
2574585365

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

pg 2584435766
2667534485
3444476666
3666674444

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2272327483
2274858383
2238385847
2238472327
2526388727
2527278836
2638783887
2788387836

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2272338832
2274383867
2276838347
2277838887
2278883877
2223883327
2438836727
2727638834

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2272484722
2274847222
2483833847
2638627277
2638888386
2683627277
2683888836
2748338384

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2272426384
2248362427
2583834836
2584726277
2638438385
2688386847
2727627485
2748683886

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2272427275
2272672723
2232727627
2257272427
3838683885
3838788384
3834838878
3835883868

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2272572274
2275272247
2276272787
2278727267
2388348383
2383843883
3853883688
3883583886

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2272583623
2232638527
2338386836
2427277847
2427487727
2583887847
2638683833
2748788385

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2274266722
2276624722
2474833856
2548636277
2636845277
2658338474
3888834486
3888836844

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2274224322
2222342247
2458636367
2474743865
2568347474
2763636854
3888876886
3688678888

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2274224584
2247224854
2458547267
2568348365
2568863886
2563843865
2688368865
2745854276

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2274227752
2225772247
2368726367
2384743874
2478347483
2763627863
3886388853
3358883688

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2274353383
2238335347
2362326583
2385623263
2548784787
2775763887
2787487845
2788367577

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2274354274
2278725485
2247245347
2258452787
2388526583
2385625883
3865763886
3675683688

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2274387683
2236323865
2238678347
2256832363
2342788367
2458874787
2432763887
2787478854

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2274383443
2234438347
2236233874
2247833263
2368874877
2766788367
2763887667
2778478863

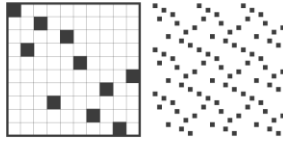
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2274472543
2278863275
2234527447
2238853874
2247835883
2257236887
3856788366
3887658366

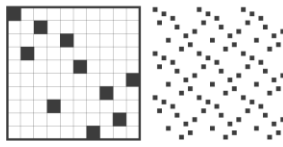
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

$n=10$

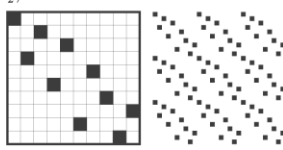
p1 2274486322
2222368447
2458627457
2478888366
2483653865
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 2568356384
 $M^v M^h$ 2663888874
 $M^{vw} M^{vh}$ 2685427547



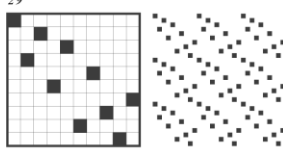
p1 2274486584
2248568447
2452688366
2458538357
2542663886
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 2568357275
 $M^v M^h$ 2572753865
 $M^{vw} M^{vh}$ 2753835854



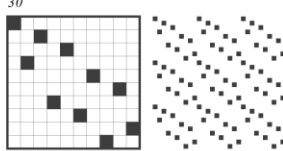
p1 2275742632
2223624757
2383384766
2634487277
2667483383
2772784436
 $R^{90} R^{180} R^{270}$ 3888748635
 $M^v M^h$ 3536847888
 $M^{vw} M^{vh}$



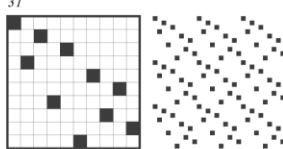
p1 2275768832
2278883534
2223886757
2243538887
2366748347
2634478367
2743847663
2763874436
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



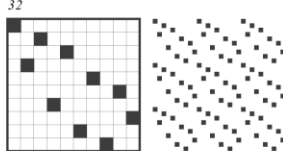
p1 2275252483
2238425257
2365756583
2385657563
2545354787
2685853887
2787453545
2788358586
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



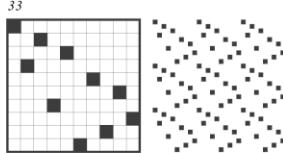
p1 2275254265
2256245257
2383576583
2385675383
2543572787
2753452787
3885486585
3585684588
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



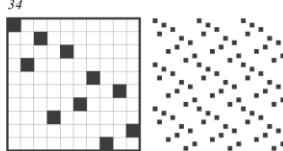
p1 2275256623
2232665257
2338566656
2544454877
2656665833
2778454445
3887844585
3585448788
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



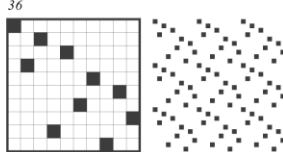
p1 2275256885
2245853885
2258865257
2258835854
2338567547
2543563877
2745765833
2778365345
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



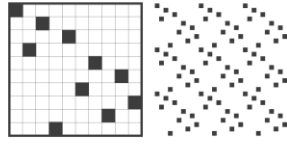
p1 2275278683
2238687257
2365845683
2385388724
2386548563
2456254787
2427883583
2654278745
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



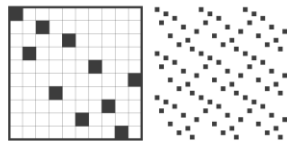
p1 2275274443
2234447257
2366254877
2338744856
2658447833
2663277845
3853887666
3583666788
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



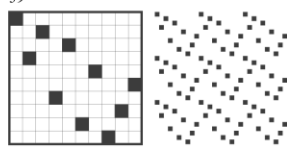
p1 2275274867
2276847257
2276263877
2277836267
2338834847
2438835836
2638538834
2748438833
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



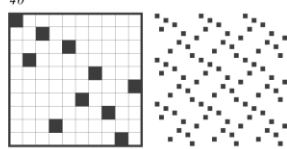
p1 2275344832
2223844357
2366658356
2544478457
2653856663
2667538887
2754874445
2788835766
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



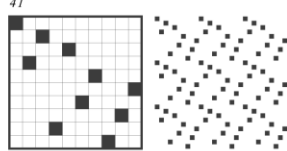
p1 2275345723
2232754357
2254445275
2257254445
3856665885
3878835765
3887835675
3588566658
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



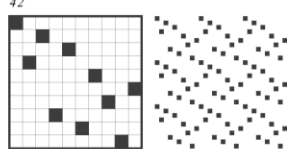
p1 2275362652
2225626357
2366278457
2384478356
2653874483
2663275487
3888548475
3574845888
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



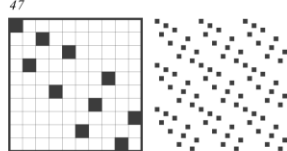
p1 2275363543
2234536357
2252663275
2257236625
3874485885
3887657475
3574756788
3588584478
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



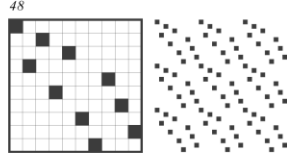
p1 2275386232
2223268357
2365386566
2454487457
2487888357
2665683563
2753888784
2754784454
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



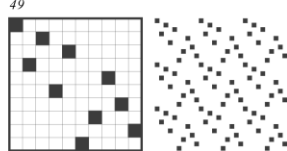
p1 2276633632
2223633667
2243627725
2252772634
3847688583
3858867483
3888747744
3447747888
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



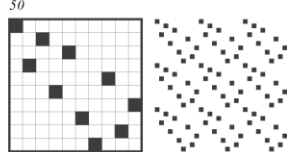
p1 2276657474
2225257483
2223847525
2247475667
2635858887
2788858536
3886363544
3445363688
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



p1 2276658365
2278774832
2223847787
2256385667
2388872633
2336278883
2544388547
2745883445
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



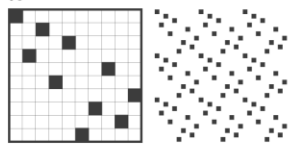
p1 2276666384
2248366667
2548438475
2574834845
2635856267
2658536276
2688344447
2744443886
 $R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{vw} M^{vh}$



$n=10$

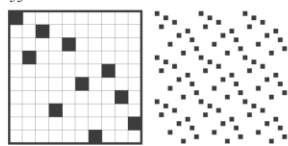
p1 2276667275
2257276667
2362672633
2336276263
3834443885
3835883444
3847787484
3484787748

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



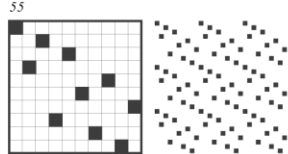
p1 2276835674
2225435683
2223865345
2247653867
2457658887
2457658887
2438863457
2754368834
2788856754

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



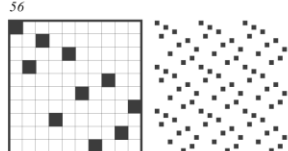
p1 2276844322
2222344867
2457745367
2438888766
2667888834
2763547754
3865336574
3356834756

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



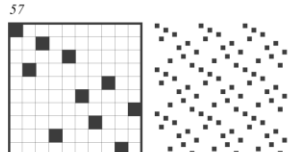
p1 2276844584
2248544867
2457656267
2438862566
2656754276
2665268834
3865345484
3484543568

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



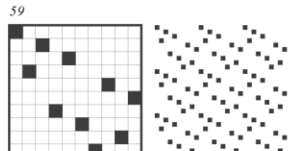
p1 2276847752
2225774867
2367835367
2347834757
2438885336
2633588834
2757438743
2763538763

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



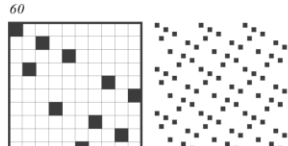
p1 2276242384
2248324267
2545856357
2547538565
2565835745
2688348687
2753658545
2786843886

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



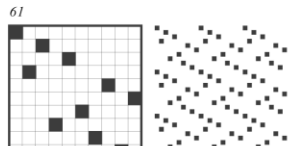
p1 2276243275
2257234267
2363572543
2345275363
3856787475
3876843885
3486783588
3574787658

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



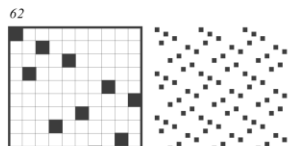
p1 2276268322
2222386267
2456835656
2456845457
2484388887
2656538654
2754548654
2788883484

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



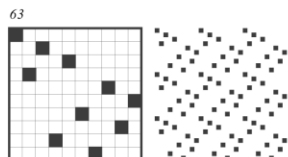
p1 2276268584
2248586267
2456756357
2484388625
2526883484
2753657654
3865435475
3456835745

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



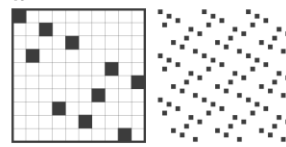
p1 2276263534
2243536267
2366757257
2757663275
3853874435
3886757484
3447835835
3484757688

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



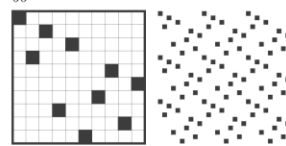
p1 2276277232
223277267
2245427545
2254572454
3843888783
3865688565
3878883483
3565886568

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



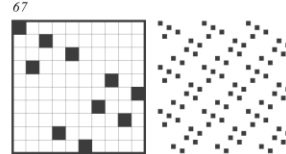
p1 2276277575
225757267
2335427536
2453326357
3843885353
3865778475
3353588348
3574877568

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



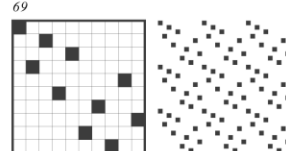
p1 2276272525
2252527267
2363327257
2336327527
3843885858
3858588348
3853874778
3877478358

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



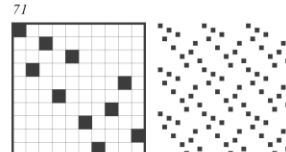
p1 2277533623
2232633577
2436277757
2634275777
3847683533
3867483335
3887847753
3357748788

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



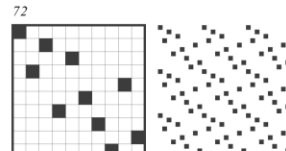
p1 2277548474
2247484577
2384752784
2385362786
2487257483
2635832687
2636883356
2653388636

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



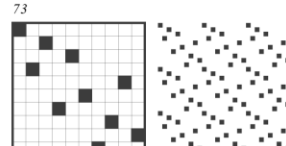
p1 2277783383
2236583245
2238338777
2254238563
2333887277
2547885687
2772788333
2786588745

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



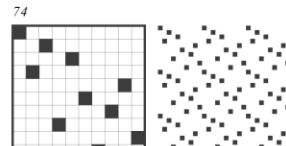
p1 2277784274
2247248777
2368725476
2385634874
2333886386
2478436583
2674527863
2683688333

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



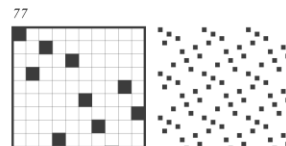
p1 2277726674
2247662777
2367542786
2386534784
2457632687
2487435683
3844368833
3886344833

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



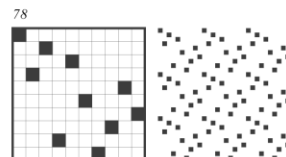
p1 2277747743
2234774777
2234783425
2252438743
2367885867
2768588763
3887633633
3363367883

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



p1 2277748634
2243684777
2367623867
2476883336
2438743487
2633388674
2676327683
2784347834

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

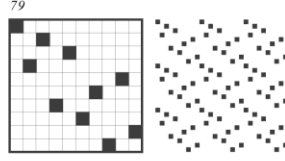


$n=10$

p1

2277872483
2238427877
2385658454
2386278833
2338872683
2454856583
2545265687
2545278656

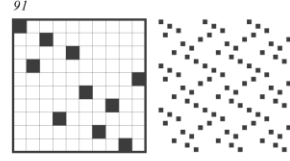
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2278626322
2222362687
2388887484
2457727547
2484788883
2745727754
3833568365
3835638653

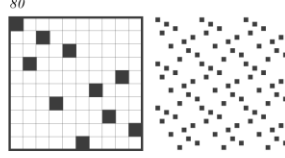
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2277874265
2256247877
2368458833
2385676274
2338854863
2472676583
2543483687
2786384345

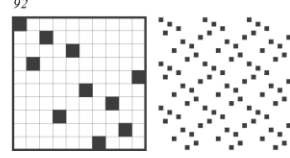
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2278626584
2248562687
2388625484
2457638447
2484526883
2663865347
2743568366
2744836754

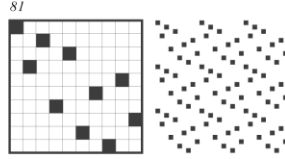
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2277876623
2232667877
2338878443
2344878833
2544365777
2777563445
3856674533
3354766583

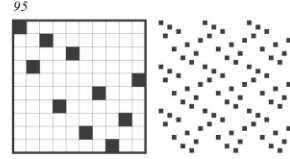
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2278775723
2232757787
2388783533
2335387883
2347254436
2634452743
3856674876
3678476658

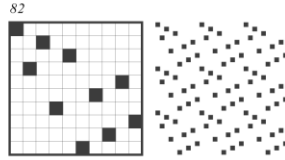
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2277876885
2243233885
2258867877
2258833234
2543474777
2777474345
3856763633
3363676583

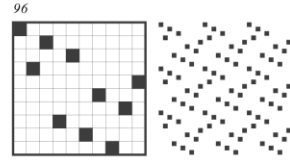
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2278725223
2232252787
2363454274
2388788583
2385887883
2454363247
3865674786
3687476568

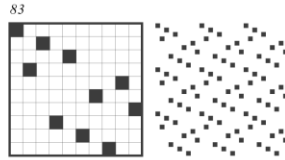
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2277834223
2232243877
2338878867
2454365867
2438656745
2547656834
2768878833
2768563454

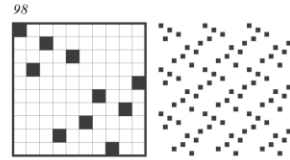
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2278727843
2234872787
2362563274
2365263247
2388762383
2383267883
3874584786
3687485478

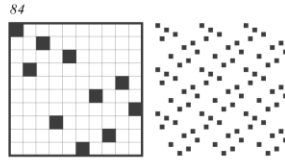
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2277834485
2258443877
2338852667
2453474867
2438657636
2588332766
2636756834
2768474354

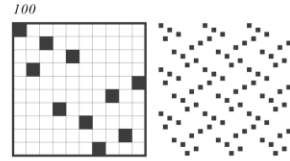
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2278862384
2238862784
2248726883
2248326887
2545847447
2565836636
2636638565
2744748545

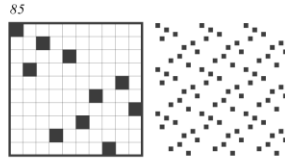
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2277836843
2234863877
2365265867
2338876247
2438745845
2548547834
2563276856
2678833274

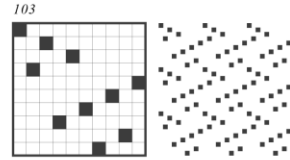
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2278888584
2225268832
2222388625
2248588887
2456747447
2744747654
3865436366
3456836636

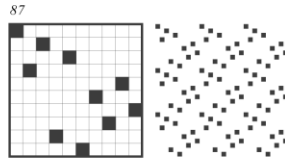
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2277838625
2252683877
2363483867
2338858427
2485883327
2438747627
2674783427
2768384363

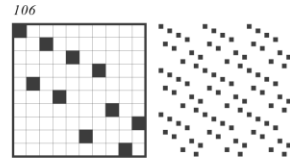
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2225242632
2222362425
2763634577
2775436367
3833567474
3834747653
478885868
4868588887

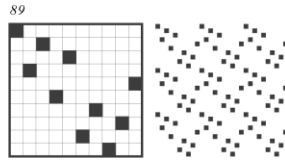
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2278432723
2232723487
2388783876
2347263427
2436274327
2678387883
3847683876
3867483678

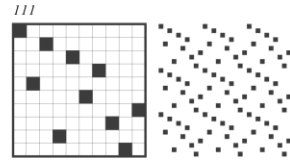
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2225448652
2225684452
2458888566
2483477447
2665888854
2683663367
2744774384
2763366386

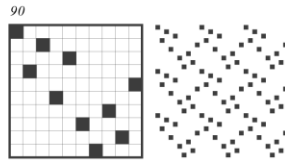
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2278448384
2248384487
2388627266
2574836627
2635838447
2662726883
2663847527
2744838536

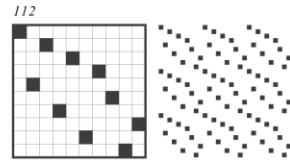
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1

2225666632
2222366665
2483475665
2566574384
2685445367
2763544586
4788885444
4444588887

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



$n=10$

p1 2225624232
2222324265
2474476565
2565674474
3454586366
3663685454
4868788885
4588887868

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2225624575
2225754265
2384476574
2475674483
2663453687
2786354366
3568458885
3588854865

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2225626852
2225862652
2474477456
2484588885
2588885484
2654774474
3365486366
3366368456

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2225752483
2223842575
2366656574
2475656663
2685358887
2788853586
3545444786
3687444545

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2225756623
2223266575
2347566566
2665665743
3544544876
3544878885
3588878445
3678445445

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2225756885
2225886575
2245358885
2258885354
2347567457
2754765743
3876354365
3453678356

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2225778683
2223868775
2366745674
2335888724
2476547663
2427888533
3447863456
3654368744

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2225774443
2223444775
2347744766
2667447743
3358887666
3366344876
3366678885
3367844366

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2225844832
2222384485
2456657456
2588887266
2654756654
2662788885
3544568456
3654865445

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2225845723
2223275485
2245445365
2256354454
2588878356
2653878885
4756656885
4588656657

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2225863543
2223453685
2243663365
2256336634
2475678885
2588876574
4768854774
4774588674

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2225886232
2222326885
2248788885
2258888784
3356567456
3365476565
3454577456
3654775454

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2222322483
2222384223
2456656565
2565656654
2688788887
2788887886
4454545865
4456854545

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2222348683
2222386843
2456745665
2426788887
2427888876
2566547654
3456854456
3654458654

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2223225723
2223275223
2345454454
2454454543
3878887885
3588788878
5656656876
5656786566

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2223243543
2223453423
2345436634
2436634543
4765678674
4768765674
5678887867
5768788876

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2223277843
2223487723
2338788876
2344563454
2454365443
2678887833
4765687665
4566786567

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2223423363
2223633243
2342763634
2342436367
3867867474
3474768768
4778678887
4788876877

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2223457663
2223667543
2344536724
2427635443
3868766574
3447888765
3475667868
3567888744

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

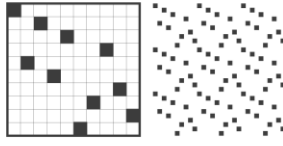
p1 2223685363
2223635863
2342754724
2478887475
2427457243
2574788874
3867868365
3868768356

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

$n=10$

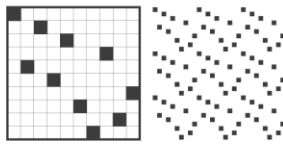
p1 2234258365
2236877474
2247477863
2256385243
2336368874
2478863633
2586788547
2745887685

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



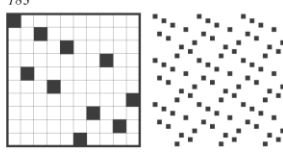
p1 2234266384
2248366243
2458447475
2568536366
2574744854
2663635865
2688768447
2744867886

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



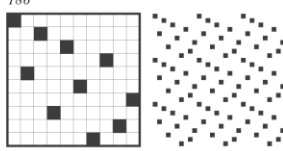
p1 2234267275
2257276243
2336366254
2452663633
3834867885
3835887684
4747786584
4744856877

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



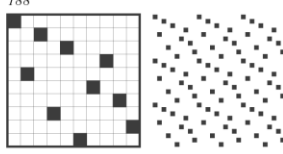
p1 2234444584
2248544443
2566667886
2566754366
2663457665
2688766665
3445844765
3567448544

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



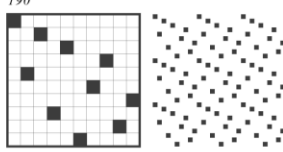
p1 2234525665
2238675674
2247657683
2256652543
2435436887
2788634534
4458567885
4458876585

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



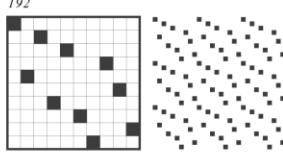
p1 2234534575
2257543543
2435436625
2526634534
3567567885
3588765765
4765768584
4858675674

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



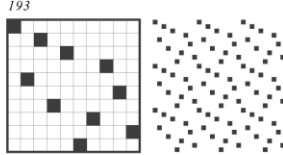
p1 2234752474
2247425743
2324256574
2324756524
3545868786
3586368876
3678863685
3687868545

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



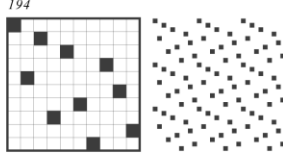
p1 2234753365
2256335743
2324756786
2326876574
2345368784
2487863543
3577458876
3678854775

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



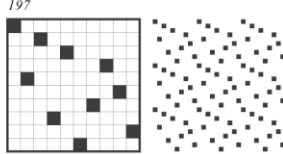
p1 2234778674
2247687743
2324345674
2324765434
2336788634
2436887633
3456768786
3687867654

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



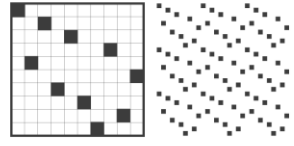
p1 2234787665
2256678743
2367885443
2324765777
232775674
2344588763
3878634533
3354368783

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



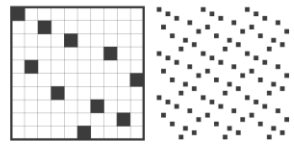
p1 2234842384
2248324843
2457547565
2565745754
2678862786
2687268876
3545865356
3568545365

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



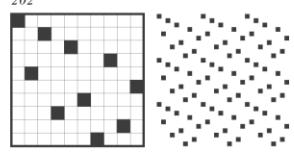
p1 2234843275
2257234843
2345365354
2453563543
2678853876
2678358876
4756786575
4575687657

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



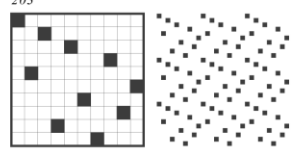
p1 2234868584
2248586843
2425268876
2426788625
3456765356
3456745754
3457547654
3567654365

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



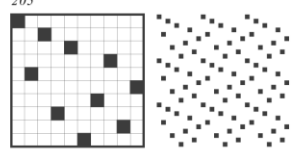
p1 2234863534
2243536843
2475768876
2563366766
2667663365
2678867574
3447745844
3448547744

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



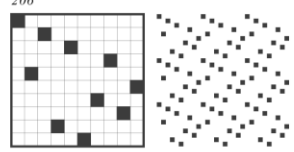
p1 2234877575
2257577843
2335358876
2678853533
3353563453
3354365353
4765777575
4575777567

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



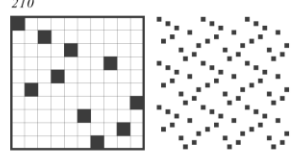
p1 2234872525
2252527843
2385858876
2563363336
2633363365
2678858583
4774584777
4774777485

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



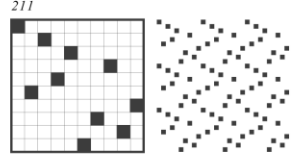
p1 2236886384
2247886274
2247268874
2248368863
2458456385
2568527456
2586526547
2583654854

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



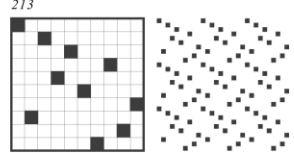
p1 2236887275
2238358874
2247885383
2257278863
2324526547
2327456254
3878658456
3654856878

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



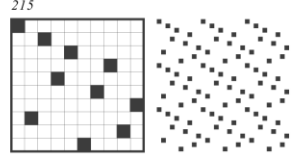
p1 2236242784
2248724263
2386847886
2566727636
2636727665
2688748683
3834458474
3834748544

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1 2236332775
2257233363
2342526367
2432763625
3876858474
3877478853
3358874778
3474858678

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



$n=10$

p1 2236534474
2247443563
2324258356
2326538524
2586878457
2754878685
3667547886
3688745766

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2236535365
2256353563
2324878457
2326878356
2326538786
2327548784
4757547885
4575745887

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2236576874
2247867563
2368874534
2324348347
2327438434
2435478863
2676878367
2763878676

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2236574254
2238338434
2243483383
2245247563
2676887277
2772788676
3547886586
3685688745

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2236585865
2256858563
2327778347
2327438777
2333878367
2458874525
2547885425
2763878333

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2236624384
2248342663
2457565385
2586535457
2583565754
2688744867
2754535685
2768447886

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2236625275
2257252663
2324535457
2327545354
3858447885
3878657565
3565756878
3588744858

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 223666784
2248766663
2344447886
2676535367
2688744443
2763535676
3843457574
3475754348

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2236663354
2245336663
2526676277
2527726766
3843448583
3858443483
4775688744
4788657744

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2236675775
2257757663
2333535367
2763535333
3877757574
3353447885
3358874435
3475757778

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2236672345
2254327663
2333625277
2526333277
3858477783
3876588744
3877748583
3447885678

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2238684584
2248548683
2426526887
2427886256
2545845665
2565854456
2566548545
2654458565

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2238332674
2247623383
2324525656
2326565254
2778436887
2788634877
4878658545
4545856878

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2238422584
2248522483
2545756565
2565657545
2588627886
2688726885
3545458565
3565854545

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2238427534
2243572483
2475658445
2544856574
2545368566
2665863545
2683576887
2788675386

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2238448784
2248784483
2326887266
2326627886
2545757456
2654757545
3535658456
3536548565

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2238445354
2245354483
2544858356
2526658457
2527548566
2653858445
2665756887
2788657566

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2232484384
2248348423
2456665475
2574566654
2672688786
2687886276
3586544456
3654445685

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

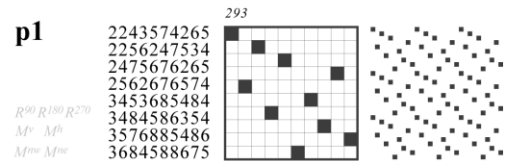
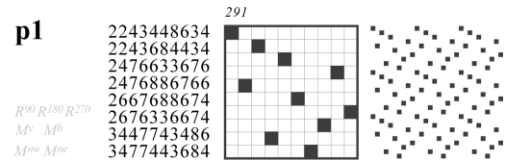
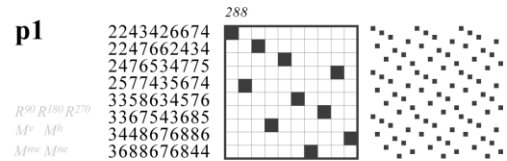
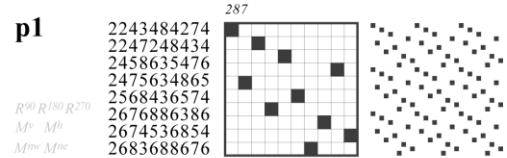
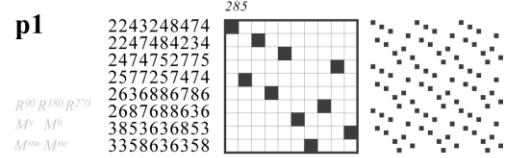
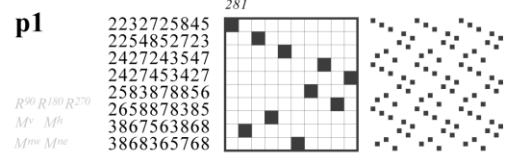
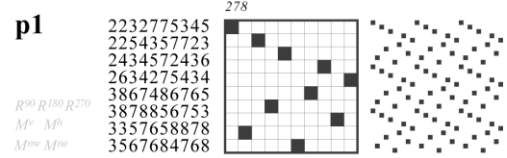
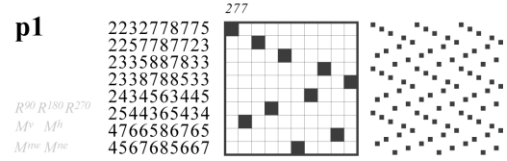
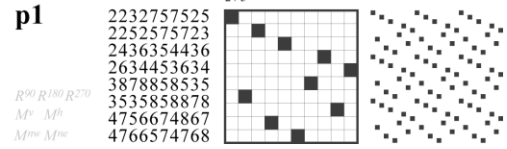
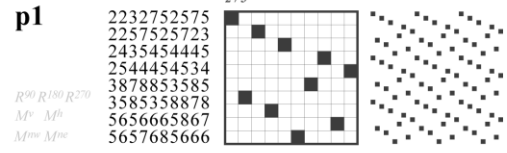
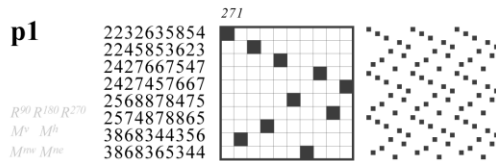
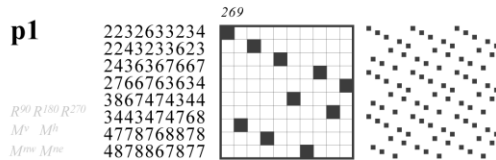
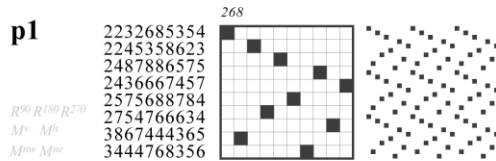
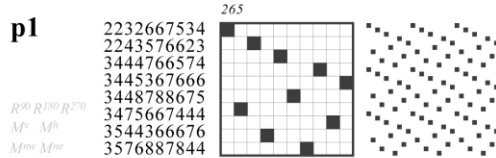
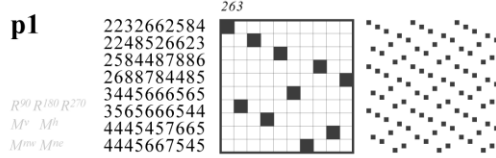
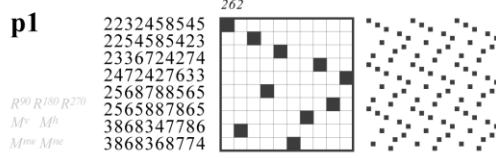
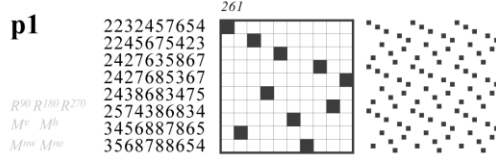
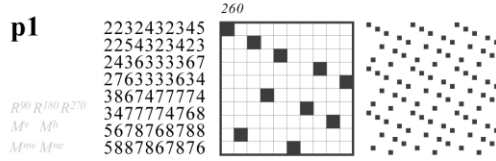
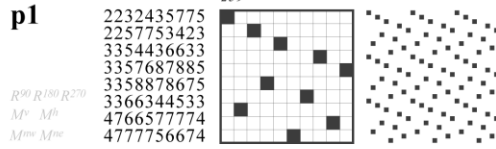
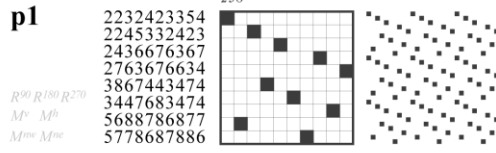
p1 2232485275
2257258423
2336544454
2454445633
2583588786
2687885385
4778656665
4566656877

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2232426784
2248762423
2348687886
2688786843
3445676366
3456674474
3474476654
3663676544

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

$n=10$



$n=10$

p1 2243534485
2258443534
2588675766
2667576885
3447657635
3453475766
3536756744
3543667574

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2243538625
2252683534
2485886757
2634477476
2674774436
2757688584
3363484766
3366748436

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2243662474
2247426634
2475652685
2485453685
2565742586
2586354584
3684476886
3688674486

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2243626834
2243862634
2484768867
2485633667
2547744386
2683447745
2766336584
2768867484

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2243877485
2258477834
2336258867
2547657725
2527756745
2633276885
3858563453
3354365858

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2245868474
2247486854
2425688636
2426368865
2563852775
2577258365
2583358547
2745853385

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2245266274
2247266254
2458457276
2568438356
2653834865
2672754854
3844856886
3688658448

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2245224874
2247842254
2368865886
2577438347
2688568863
2743834775
2763358367
2763853367

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2245248454
2245484254
2476277276
2656886586
2672772674
2685688656
3833843684
3834863483

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2245356265
2256265354
2348458457
2562678356
2652653876
2754854843
4845756885
4845886575

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2245332685
2258623354
2347576367
2487756885
2588657784
2763675743
3876353474
3474353678

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2245338445
2254483354
2348476277
2634833876
2665886577
2678338436
2674843277
2775688566

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2245444474
2247444454
2485275485
2586258356
2584258457
2653852685
3666656886
3688656666

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2245486874
2247868454
2368865624
2476276385
2426568863
2586348347
2583672674
2743843685

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2245426654
2245662454
2485277267
2583384386
2584276277
2683483385
4865688654
4456886568

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2245675685
2258657654
233885367
2453456885
2574387725
2588654354
2527783475
2763585833

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2247624274
2247242674
2458545485
2568526565
2565625865
2584545854
3868436886
3486836886

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2248524265
2256242584
2563576565
2565675365
2586845886
2688548685
3454585475
3574585454

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2248566665
2256666584
2544445886
2566575275
2572575665
2688544445
3853544585
3585445358

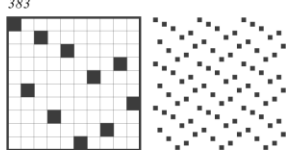
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

p1 2248562425
2252426584
2548685886
2574765347
2688586845
2743567475
3853634576
3583675436

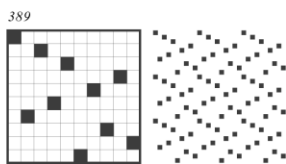
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

$n=10$

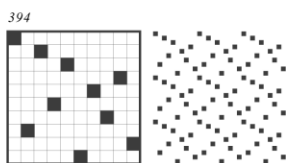
p1 2248584485
2258448584
2588625266
2526885266
3456657545
3544567565
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se} 3545756654
3565765445



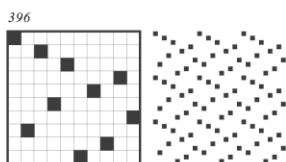
p1 2248786265
2256268784
2324845886
2326885484
2563577456
2654775365
3357458456
3365485475
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



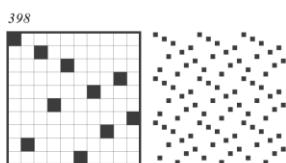
p1 2248744865
2256844784
2366245886
2577447257
2663268854
2744775275
3853366385
3358358366
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



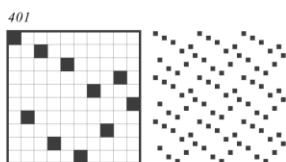
p1 2248762685
2258626784
2348425886
2484326885
3356576366
3366367565
3474477545
3545774474
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



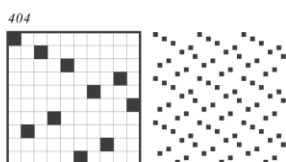
p1 2248768445
2254486784
2342665886
2432688566
2674753367
2763357476
3843635774
3477536348
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



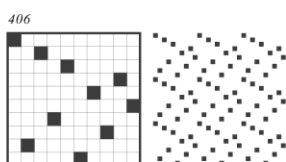
p1 2248326625
2252662384
2565747536
2635747565
2688584487
2784485886
3545847536
3574854536
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



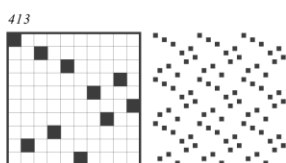
p1 2248348685
2258684384
2425886276
2426726885
2545765475
2574567545
3456358565
3565853654
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



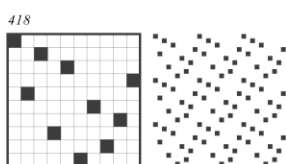
p1 2248344445
2254444384
2583567536
2584753457
2635765385
2688566667
2754357485
2766665886
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



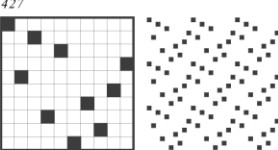
p1 2248386845
2254868384
2426588627
2427268856
2575638527
2583657527
2583853547
2745358385
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



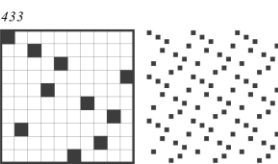
p1 2252525485
2258452525
2336345347
2588585856
2658585885
2743543633
3877476576
3675674778
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



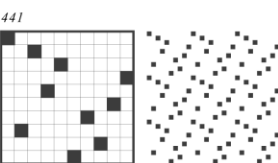
p1 2252787485
2258478725
2362588583
2363453383
2383354363
2385885263
2775674787
2787476577
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



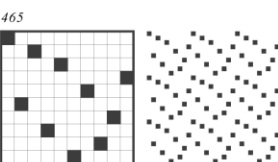
p1 2254323685
2258632345
2333672347
2478765885
2588567874
2743276333
3876387774
3477783678
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



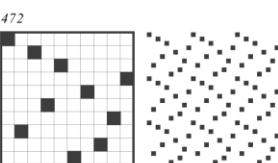
p1 2254585685
2258658545
2383327633
2336723383
2452565885
2542588565
2778347787
2787743877
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



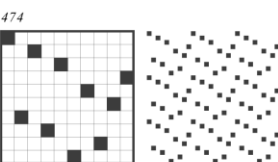
p1 2257575485
2258457575
2335445356
2588535356
2653535885
2653544533
4877566575
4575665778
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



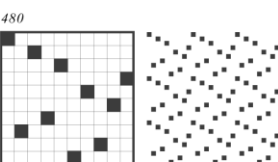
p1 2257753685
2258635775
2333663356
2475335885
2588533574
2653366333
4775487774
4777845774
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



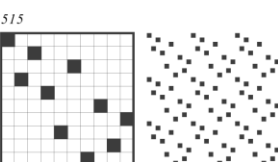
p1 2257232485
2258423275
2365354543
2345453563
2588538786
2687835885
4787656575
4575656787
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



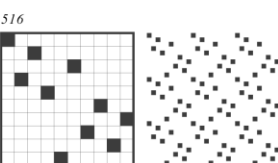
p1 2257258685
2258685275
2365345633
2336543563
2425835885
2425885385
4778457565
4787745675
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



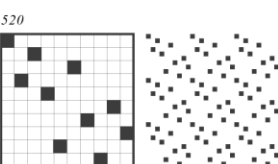
p1 2362425484
2484524263
2658684786
2672775347
2687486856
2743577276
3833576384
3834836753
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



p1 2362427266
2426326627
2575727627
2672757527
3834838535
3835358384
3844874868
3868478448
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



p1 2362583533
2335385263
2338344436
2584787757
2634443833
2757787485
2766674877
2778476667
R⁹⁰ R¹⁸⁰ R²⁷⁰
M^v M^h
M^{sw} M^{se}



$n=10$

p1 2362583876
2338353427
2348748527
2435383327
2584784327
2632678385
2757683877
2778386757

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2363324584
2336324854
2342762743
2347267243
2568774786
2687477865
3843867876
3483678768

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2363483443
2338768436
2342674877
2344384363
2432778476
2634867833
2674787667
2766787476

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2363586584
2338357243
2342753833
2452687475
2485685363
2542574786
2753867877
2778768357

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2365254256
2383233583
2383238533
2452563265
2577872787
2787752787
4784586585
4874585685

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2365256533
2335652563
2338524256
2425833265
2586854877
2778458685
4787754585
4577874585

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2365256876
2335833274
2338533247
2348745854
2458547843
2563267865
2577863877
2778368775

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2365265443
2324854877
2327784584
2338786256
2344562563
2652687833
4787665485
4566787458

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2366665484
2483484575
2484566663
2575484384
2653586276
2654444786
2672685356
2687444456

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2366667266
2635766276
2667536267
2667536267
2662766663
3844357484
3844874444
3444478448
3448348475

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2366754584
2335626724
2485457663
2427626533
2565344786
2687443565
3868775484
3484577868

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2366243266
2342663266
2577536357
2753635775
3853357475
3358357475
4784487684
4867844874

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2366245624
2475385385
2426542663
2572586357
2583583574
2752753685
4786845684
4865486874

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2366254534
2324357257
2327527534
2435452663
3853878675
3576878358
4786756584
4856576874

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2366277566
2348475386
2487626357
2663266577
2678427536
2683574843
3844784453
3354487448

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2367538583
2384254354
2385835763
2453452483
2527534787
2527874357
2685675687
2786576586

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2367533533
2335335763
2676675777
2777576676
3843443533
3353443483
3478775775
3577577874

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2367533876
2348743577
2434483336
2633384434
2667684777
2678335763
2775347843
2777486766

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

p1 2367547574
2384257784
2335862786
2475745763
2487752483
2685332687
3478635365
3536874356

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

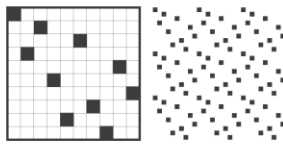
p1 2367542524
2336762777
2457632425
2676332777
3843477833
3877434833
3478685865
3568586874

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

$n=10$

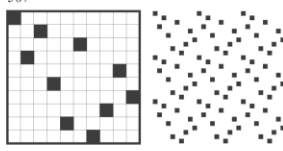
p1 2367567833
2338765763
2345347877
2438434525
2543483425
2676585867
2768585676
2778743543

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



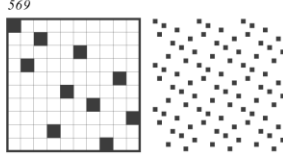
p1 2367568724
2367627683
2386726763
2386874354
2453478683
2427865763
2438434787
2787434834

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



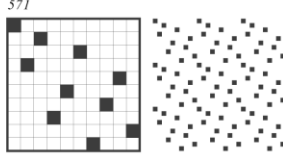
p1 2367623443
2333675777
2344326763
2777576333
3877743533
3353477783
3478766784
3487667874

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



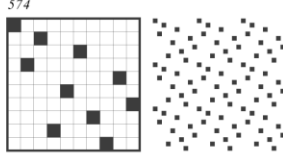
p1 2367636674
2386877784
2333242786
2333268724
2476636763
2487778683
3447434786
3474436874

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



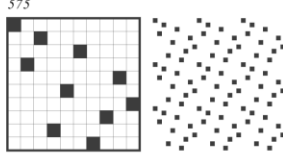
p1 2367657743
2333585867
2347756763
2438777525
2577783425
2768585333
3354347876
3367874345

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



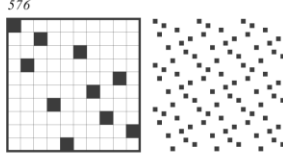
p1 2367658634
2386723333
2333327683
2476874345
2436856763
2438777787
2543478674
2787777834

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



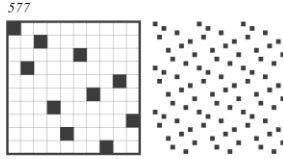
p1 2367874256
2368548743
2385333274
2333583247
2347845863
2478763265
2577783687
2786387775

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



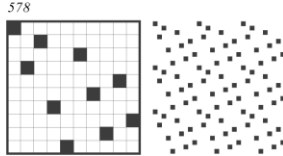
p1 2367876533
2335678763
2345778743
2347877543
2434533385
2586765777
2583335434
2777567685

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



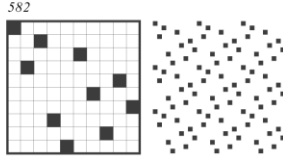
p1 2367876876
2342348743
2347843243
2577774777
2678678763
2777477775
3853333633
3358333633

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



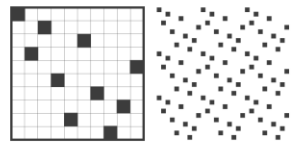
p1 2367834476
2333624386
2347843667
2487774867
2633326834
2674438763
2766348743
2768477784

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



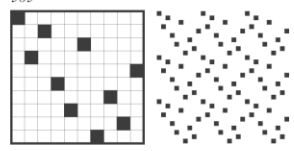
p1 2368432633
2336234863
2347267667
2478774876
2678477874
2743276676
3843443876
3443483678

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



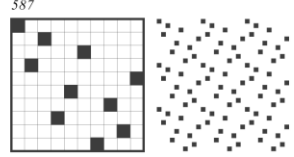
p1 2368447484
2478626366
2483662775
2484744863
2577266384
2663626874
2685338447
2744833586

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



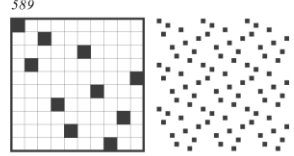
p1 2368536584
2333844724
2478625475
2485635863
2427448333
2574526874
2663868777
2777868366

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



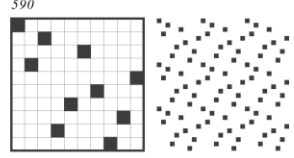
p1 2368775633
2335477874
2336577863
2347258676
2478774533
2434876385
2583678434
2676852743

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



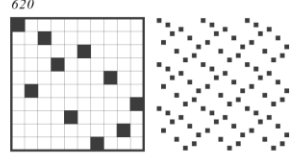
p1 2368784543
2324762347
2324787656
2326567874
2327432674
2345487863
3878634876
3678436878

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



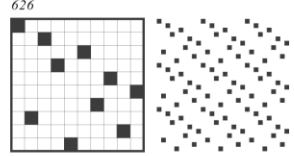
p1 2384485484
2457548456
2484584483
2562687266
2652662786
2653568456
2654865356
2654845754

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



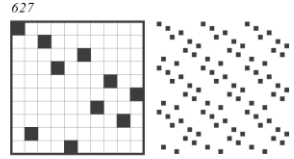
p1 2384275766
2475748436
2483266757
2634847574
2635368476
2674863536
2683534487
2784435386

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



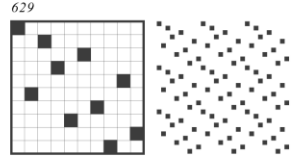
p1 2384272336
2385838436
2483263327
2527847627
2527267487
2634838583
2683877487
2784778386

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



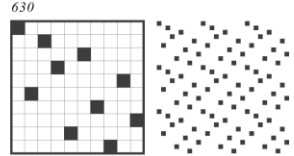
p1 2385358583
2385853583
2453454265
2454354256
2575252787
2575278725
4865675685
4586576568

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1 2385353533
2335353583
2544353356
2575757787
2653353445
2787757575
4856675775
4577576658

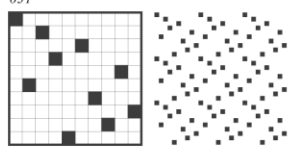
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



$n=10$

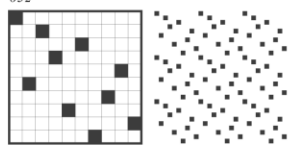
p1 2385353876
2348725757
2436265336
2633562634
2678353583
2757527843
4768477548
4845774867

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



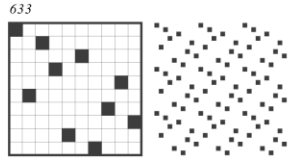
p1 2385367574
2335684586
2457784256
2475763583
2487754265
2574353687
2685486533
2786353475

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



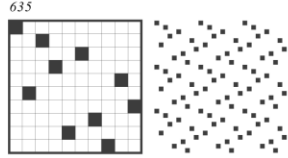
p1 2385362524
2336584577
2425263583
2547783356
2574858687
2653387745
2775485633
2786858475

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



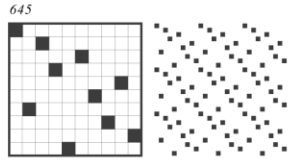
p1 2385387833
2327787257
2327527877
2338783583
2456254525
2545265425
4856585865
4568585658

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



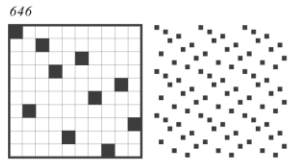
p1 2385856256
2336256247
2548548725
2527845845
2633274265
2658583265
3877485486
3684584778

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



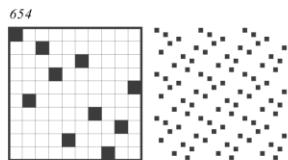
p1 2385858533
2335858583
2543453365
2563354345
2577872525
2525278775
4775676585
4585676577

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



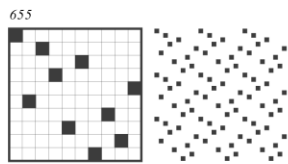
p1 2386252633
2336252683
2345485667
2485847787
2544387656
2656783445
2766584543
2787748584

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



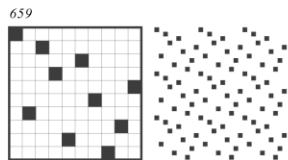
p1 2386267484
2457726656
2484362687
2484762683
2634842786
2656627754
3844548653
3356845448

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



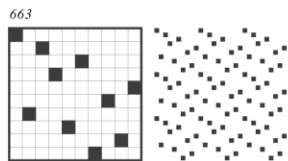
p1 2386757633
2336757683
2344585676
2435347787
2543487665
2566784345
2676585443
2787743534

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



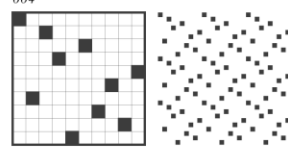
p1 2386843484
2457636665
2484348683
2426762687
2427862676
2566636754
3474445865
3568544474

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



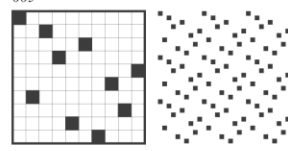
p1 2386845266
2426584487
2427844856
2548683266
2566638536
2574854447
2635836665
2744458475

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



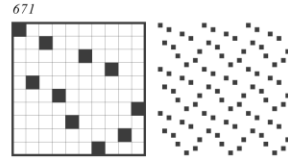
p1 2386847624
2426748683
2426348687
2427868436
2547627665
2566726745
3843658544
3445856348

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



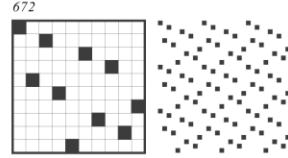
p1 2324265484
2324845624
2474485475
2563586366
2574584474
2654868786
2663685365
2687868456

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



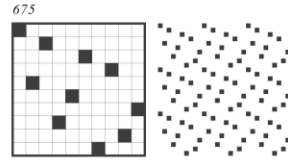
p1 2324267266
2326627624
2545766366
2663667545
3844878684
3447448565
3486878448
3565844744

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



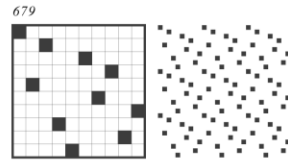
p1 2324354584
2324854534
2336526634
2436625633
2565768786
2687867565
4768774584
4778674485

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



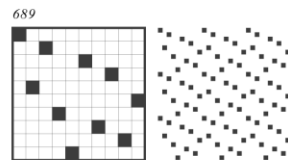
p1 2324534566
2326654354
2338584476
2526634877
2527784366
2674485833
4878657654
4456756878

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



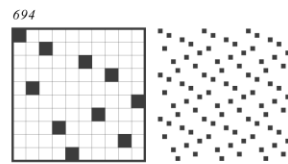
p1 2324843266
2326623484
2678448786
2687844876
3356575475
3357457565
3545775365
3563577545

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



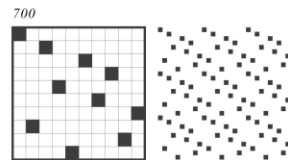
p1 2324877566
2326657784
2335448786
2347575476
2674575743
2687844533
3487635356
3536784365

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



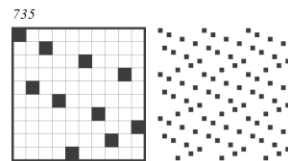
p1 2326332766
2326672336
2526367577
2527757636
3858474353
3877487844
3353474858
3448784778

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



p1 2333233876
2333267833
2348777877
2434474345
2543474434
2778777843
3667685676
3676586766

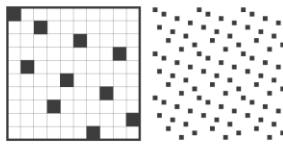
$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$



$n=10$

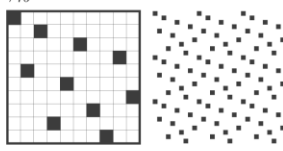
p1 2333336674
2333358634
2476633333
2476877775
2436853333
2577778674
244777786
368777744

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



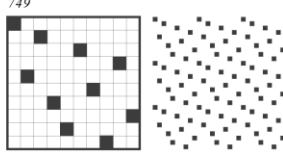
p1 2333357743
2347753333
2434477775
2577774434
335777876
3358676633
3366768533
336787775

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



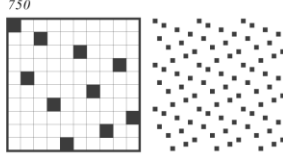
p1 2333576533
2335675333
2434443475
2574344434
3457787775
3577787754
3586766676
3676667685

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



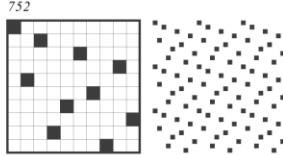
p1 2333576876
234877534
243577843
2678675333
3354347533
3357434533
357775676
3676577775

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



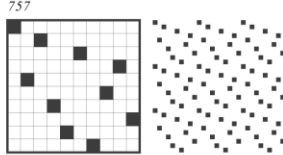
p1 2333585443
2336766674
2344585333
2476667633
2566787775
257787665
344434786
3444368774

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



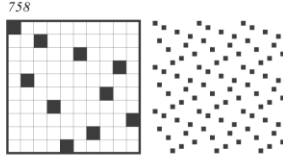
p1 2333666524
2476843475
2425666333
2436853676
2574348674
2676358634
4777868544
4445868777

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



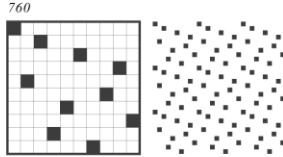
p1 2333666786
234447784
2347753676
248774443
2676357743
2687666333
3357434876
3367843475

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



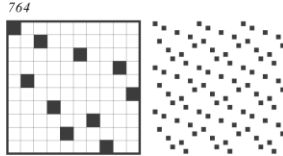
p1 2333675434
2336762434
2434267633
2434576333
347786765
3477867684
3486768774
3567687774

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



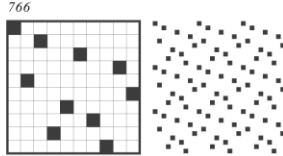
p1 2333843833
2338348333
2452425475
2425425745
2672778777
2762778777
3586586856
3658685685

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



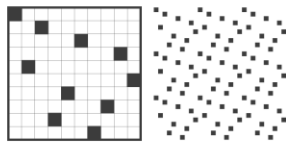
p1 2333852743
2336586854
2347258333
2458685633
2425477865
2425687745
2583678777
2777876385

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



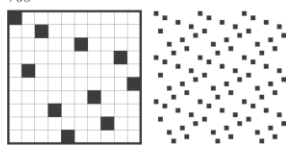
p1 2333853634
2336584234
2485633243
2436358333
2547786786
2574768777
2687687745
2777867475

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



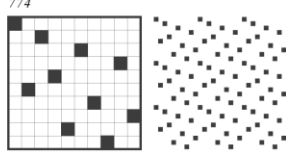
p1 2333877476
2336348777
2342525476
2432674525
2674778333
2777843633
3487685856
3658586784

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



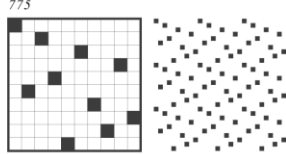
p1 2335853533
2335358533
2577877575
2575778775
3443444365
3443563444
4766676675
4576676667

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



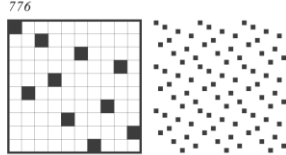
p1 2335853876
2348775257
2435365345
2543563534
2577843275
2678358533
4757685675
4576586757

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



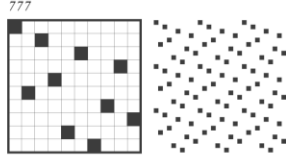
p1 2335867574
2475768533
2435368775
2563357775
2577753365
2577863534
3357745853
3358547753

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



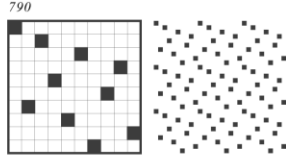
p1 2335862524
2485868775
2425268533
2577868584
3366745763
3367547663
3447743356
3477744365

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



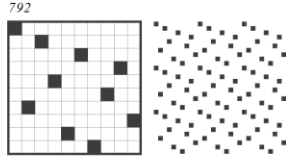
p1 2335443574
2475344533
2435775485
2586753356
2584577534
2653357685
3576657786
3687756675

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



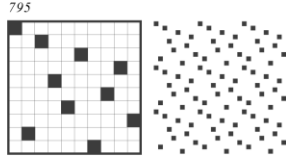
p1 2335448524
2425844533
2436675476
2586877566
2665778685
2674576634
3447684365
3486744356

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



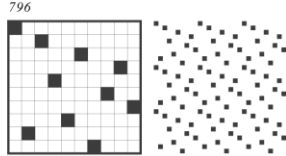
p1 2335475254
2338348676
2452574533
2434877276
2676843833
2672778434
3585687756
3657786585

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



p1 2335425754
2453324575
2435777267
276277534
3843867533
3357683483
3568775685
3586577865

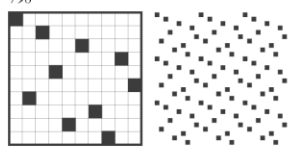
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{vw}



$n=10$

p1 2335625833
2338526533
2425443565
2425653445
2584577877
2778775485
4576658685
4586856675

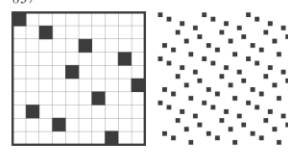
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



798

p1 2336575243
2342575633
2434867475
2436358676
2574768434
2676853634
3547787685
3586787745

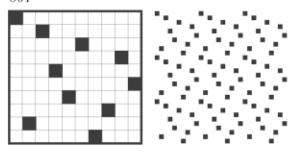
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



837

p1 2335653454
2338526876
2348772584
2454356533
2485277843
2583326786
4576568777
4577865675

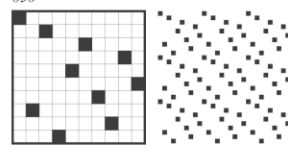
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



801

p1 2336575667
2485847525
2574858425
2526858536
2526358586
2766575633
3877453544
3445354778

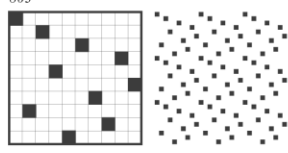
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



838

p1 2335675676
2435347525
2574353425
2676576533
3453457784
3487754354
3585867576
3675768585

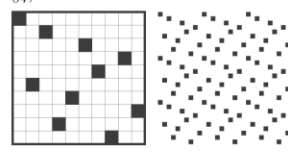
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



803

p1 2338535443
2344535833
2345766584
2485667543
2544356786
2575667877
2687653445
2778766575

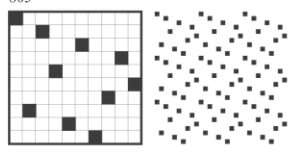
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



847

p1 2335684324
2348653324
2457786876
2574344777
2678687754
2777443475
3853676633
3366763583

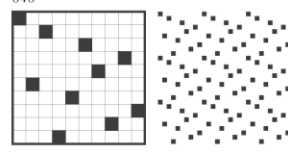
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



805

p1 2338535867
2348656754
2454356876
2457656843
2438772575
2575277834
2678653454
2768535833

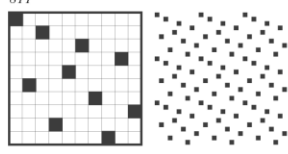
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



848

p1 2336753443
2344357633
2434576676
2676675434
3443486765
3443567684
3477876675
3576678774

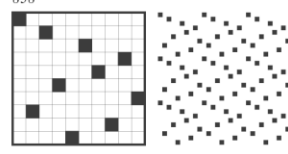
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



811

p1 2338762676
2344474354
2348434877
2453474443
2676267833
2778434843
3666786376
3675687666

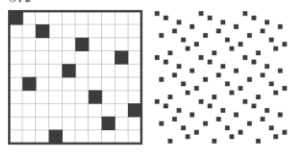
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



858

p1 2336753867
2457658625
2485865345
2438774357
2543568584
2526856754
2753477834
2768357633

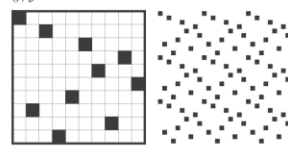
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



812

p1 2338357667
2348658536
2452574876
2542678475
2635856843
2753443877
2766753833
2778344357

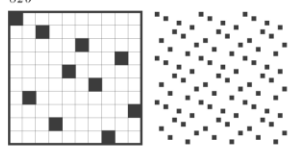
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



873

p1 2336258443
2344852633
2435476667
2584778766
2667877485
2766674534
3867563444
3444365768

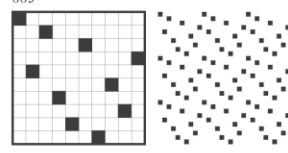
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



820

p1 2342665624
2476267475
2426566243
2574762674
3484363586
3484368536
4867868454
4868768445

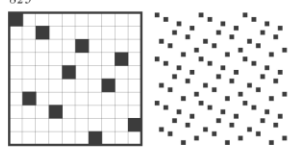
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



883

p1 2336342674
2342584543
2345485243
2476243633
2586787656
2656787685
3486747786
3687747684

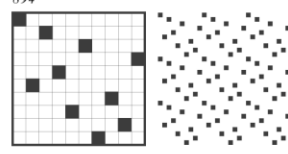
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



825

p1 2344867484
2484768443
2436268766
2575633577
2634266786
2775336575
3853547753
3357745358

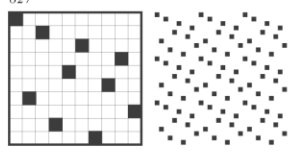
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



894

p1 2336348434
2342674534
2432435476
2434843633
2676877476
2674778676
3486786756
3657687684

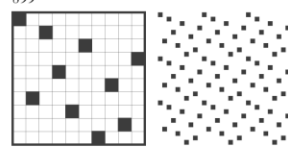
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



827

p1 2344443484
2484344443
2676666786
2687666676
3356753675
3357635765
3457753475
3577543574

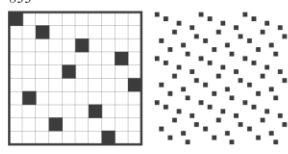
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



899

p1 2336525743
2347526633
2425867565
2425657685
2435458685
2586854534
3585477876
3678774585

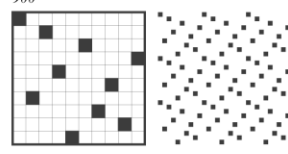
R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}



833

p1 2344445266
2544443266
2575754357
2753457575
3853535675
3535835765
4856666784
4876666584

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{mv} M^{mh}

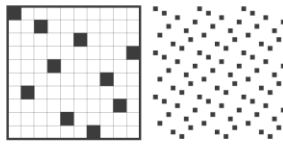


900

$n=10$

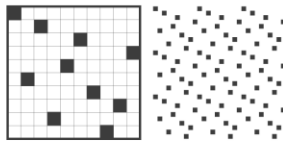
p1 2344447624
2426744443
2676534476
2674435676
3457663484
3486876666
3484366754
3666678684

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



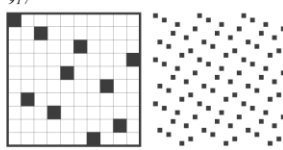
p1 2345752543
2345257543
2434534276
2435434267
3867567684
3486765768
3567876585
3585678765

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



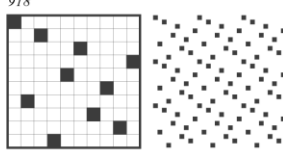
p1 2345342584
2345435743
2347534543
2485243543
2586756786
2687657685
3576567876
3678765675

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



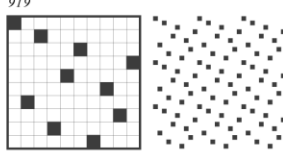
p1 2345345257
2543543275
2543572525
2525275345
3858585675
3876576585
3576585858
3585675678

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



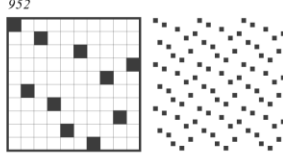
p1 2345347534
2348434534
2435743543
2435434843
2676576876
2678675676
3576876576
3675678675

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



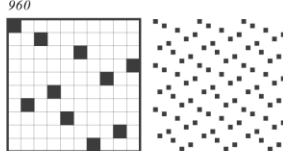
p1 2348425624
2475367565
2484324265
2565763574
2678684586
2685486876
3475368545
3545863574

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



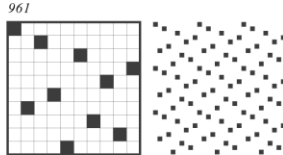
p1 2348683484
2456754575
2484386843
2426786267
2427626876
2575457654
3456853565
3565358654

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



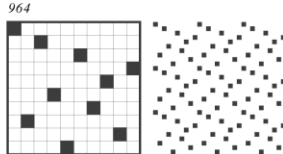
p1 2348685266
2425844876
2426784485
2586843266
3445675475
3456675365
3563576654
3574576544

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



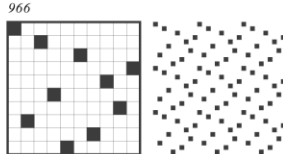
p1 2348635766
2475344876
2653366676
2667536843
2676663356
2678443574
3444775484
3484577444

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



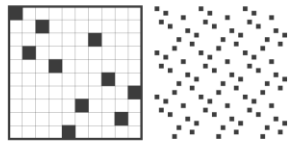
p1 2348653586
2457524876
2575426784
2663444777
2685356843
2777444366
3844766633
3366674483

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



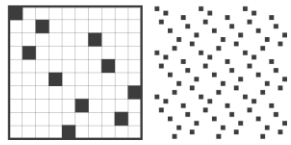
p1 2452426366
2425426636
2577267275
2572762775
3834833585
3835853384
4748685684
4744865868

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



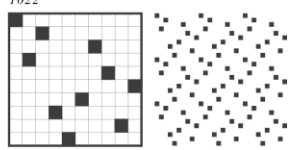
p1 2456666366
2484384485
2586267266
2584483484
2662762685
2663666654
4744445684
4744865444

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



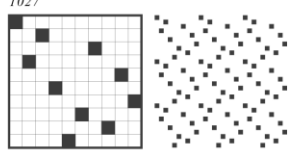
p1 2456268566
2475386276
2483486357
2484568445
2544865484
2654266586
2672683574
2753684384

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



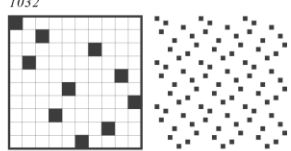
p1 2457566276
2438448566
2544867266
2662768445
2665754267
2665844834
3844535684
3486535448

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



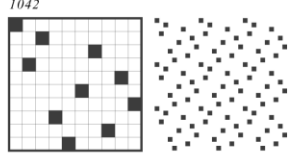
p1 2457654485
2426744867
2427684476
2438684366
2586534566
2584456754
2663486834
2665435685

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



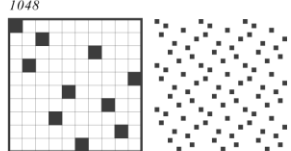
p1 2457744476
2484344867
2438626766
2667626834
2674447754
2768443484
3356843666
3366634865

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



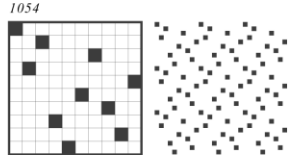
p1 2458536575
2426768447
2427448676
2434868366
2568535475
2574535865
2575635854
2663868434

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



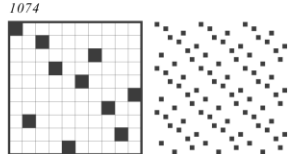
p1 2458626566
2476268366
2484368447
2484544865
2568445484
2663862674
2665626854
2744863484

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



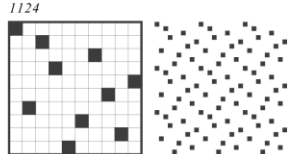
p1 2472484766
2475724856
2548635386
2634486386
2658427574
2667484274
2683536845
2683684436

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



p1 2476844366
2485444775
2436844766
2366633586
2577444584
2667448634
2663448674
2685336665

R^{90} R^{180} R^{270}
 M^v M^h
 M^{vw} M^{mw}



$n=10$

p1 2484362425
2426348425
2674534577
2674868586
2685868476
2775435476
3843657653
3356756348

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

1158

p1 2485266575
2436666566
2575662584
2584453586
2665666634
2685354485
4768445444
4867444454

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

1184

p1 2485844357
2544477566
2526675386
2526835766
2665774445
2753448584
3354485666
3366658445

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

1198

p1 2425266256
2426526625
2565765356
2653567565
3457548545
3545845754
4854868584
4858684584

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

1214

p1 2425444456
2426544445
2572584575
2575485275
2583585356
2653585385
4868566665
4566665868

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

1219

p1 2425624276
2426724265
2545854575
2565358565
2565853565
2575458545
3868458684
3486854868

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

1224

p1 2425666676
2426766665
2566753475
2574357665
3444458684
3445853675
3486854444
3576358544

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

1228

p1 2425662436
2426342665
2583357656
2584543577
2656753385
2775345485
4768445868
4867486854

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

1229

p1 2426344447
2427444436
2548527575
2575725845
2583535856
2658535385
3868476666
3666674868

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

1246

p1 2426566667
2427666656
2566258475
2574852665
2584458536
2635854485
3868454444
3444454868

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

1258

p1 2434444366
2577534575
2575435775
2663444434
3357653585
3358535675
4766667684
4867666674

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

1306

p1 2435344357
2543577575
2575775345
2753443534
3867576675
3353585675
3357658535
3576675768

$R^{90} R^{180} R^{270}$
 $M^v M^h$
 $M^{mv} M^{mh}$

1325