

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	X線CT画像を利用した織編物の構造分析に関する研究
Title(English)	Analysis of textile fabric structure using X-ray CT images
著者(和文)	篠原 寿広
Author(English)	Toshihiro SHINOHARA
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第6431号, 授与年月日:2006年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:大山真司
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第6431号, Conferred date:2006/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成17年度 学位論文

X線CT画像を利用した織編物の構造分析に関する研究

Analysis of Textile Fabric Structure Using X-ray CT Images

指導教員 大山 真司 助教授

理工学研究科 機械制御システム専攻

学籍番号 03D11030

氏名 篠原 寿広

目次

第1章	緒言	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	繊維産業における計測と自動化	1
1.1.2	織編物の組織分解	3
1.1.3	計測とエキスパートシステム	3
1.2	研究目的	8
1.3	本論文の構成	9
第2章	織編物の組織分解に関する諸検討	12
2.1	本研究で対象とする織編物の検討	12
2.1.1	対象とする糸の検討	13
2.1.2	対象とする織物の検討	16
2.1.3	対象とする編物の検討	18
2.2	従来の組織分解自動化に関する研究の問題点とその解決策の検討	20
2.2.1	従来の組織分解自動化に関する研究	20
2.2.2	従来法の課題点とその解決法としての画像の拡張	21
2.2.3	画像の拡張のための断面画像の取得方法の検討	23
2.3	組織分解のための構造分析の検討	25
2.3.1	織編物の構造分析とその役割	25
2.3.2	織編物の構造分析と医用画像における線図形抽出問題の比較	27
2.3.3	織編物の構造分析に適した心線点列推定方法の検討	33
2.4	本章のまとめ	34
第3章	断面画像を利用した織物の構造分析	35
3.1	織物糸心線点列推定のための画像利用方法の検討	35
3.2	織物糸心線点列推定法	36
3.2.1	糸断面モデル相関法による糸心線点列推定	36
3.2.2	断面画像間相関法による糸心線点列推定	38
3.2.3	糸心線点列推定法の比較実験	39
3.2.4	糸断面モデルにおける重み関数の検討	43

3.3	二重織物の構造分析実験	47
3.3.1	実験の概要	48
3.3.2	実験結果	49
3.4	モデルの役割	49
3.4.1	逆問題の計測とモデル	51
3.4.2	糸心線点列推定におけるモデル	52
3.5	本章のまとめ	53
第4章	3次元画像を利用した編物の構造分析	54
4.1	編物糸心線点列推定のための画像利用方法	54
4.2	編物糸心線点列推定法	55
4.2.1	3次元糸モデル相関法	55
4.2.2	3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定	56
4.3	編物の構造分析実験	57
4.3.1	糸心線点列推定法の検証	57
4.3.2	糸心線点列推定法の有効性の検討	60
4.4	繊維の方向に着目した糸心線点列推定法	63
4.4.1	繊維の特徴	64
4.4.2	3次元繊維モデル相関法	65
4.4.3	3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定	65
4.5	2本諸撚糸を使用した平織物の構造分析実験	66
4.6	先験情報と計測結果の利用	69
4.7	本章のまとめ	70
第5章	大局的处理による織編物の構造分析	71
5.1	構造分析法の安定性	71
5.1.1	糸断面モデル相関法と3次元糸モデル相関法の比較実験	71
5.1.2	実験結果の比較検討	73
5.1.3	局所的処理と大局的处理による構造分析	76
5.2	大局的構造分析の検討	77
5.2.1	大局的構造分析法における初期値の重要性	77
5.2.2	3次元繊維モデル相関法を利用した糸追跡法の再考	77
5.2.3	3次元繊維モデル相関法を利用した大局的構造分析の検討	78
5.3	計測における大局的处理	82
5.4	本章のまとめ	83

第6章	糸心線点列位置情報を活用した織編物構造の表現方法	84
6.1	糸心線点列位置情報活用の意味	84
6.2	組織図への活用	84
6.2.1	織物組織図	84
6.2.2	織物組織図自動作成法	86
6.3	3次元組織構造再構成への活用	92
6.3.1	糸の表現	92
6.3.2	GENERATIVE MODEL	93
6.3.3	3次元組織構造再構成法	94
6.4	本章のまとめ	97
第7章	結言	100
7.1	本論文のまとめ	100
7.1.1	織編物の狭義組織分解自動化のための計測について	100
7.1.2	計測における着眼点について	104
7.2	今後の課題	105
7.3	将来の展望	106
	参考文献	108
	謝辞	115

目 次

1.1	Composition of expert system	5
1.2	Structure of this thesis	11
2.1	Classification of yarn	13
2.2	Twist directions of yarn	14
2.3	Examples of twisted yarns	15
2.4	Examples of Fancy yarn	15
2.5	Filament yarn constructed by twisted filaments	16
2.6	Classification of woven fabric structure	17
2.7	Double-layered woven fabric structure	17
2.8	Cross-section of pile woven fabric	18
2.9	Examples of Loop of knitted fabric	18
2.10	Classification of knitted fabric structure	19
2.11	Example of weft knitted fabric	19
2.12	Example of warp knitted fabric	19
2.13	Two loops of warp knitted fabric	20
2.14	Extension of image media	22
2.15	Extension of textile fabric image	23
2.16	Example of grinded cross-sectional image of plain woven fabric	24
2.17	Twill fabric structure reconstructed by volume rendering with its CT images	26
2.18	Twill fabric structure reconstructed from positional information of each yarn estimated by proposed method	26
2.19	Independent expression of each yarn	27
2.20	Example of extracting line figure	29
2.21	Yarn cross-sections of plain knitted fabric	33
3.1	Profile of the weighting function $h(r)$, a yarn cross-section, its center, the calculating region, and the correlation value J_2 , which are respectively described in two-dimensions	37

3.2	Photograph of the sample twill fabric	40
3.3	Example of CT images of the sample twill fabric	40
3.4	Twill fabric structure reconstructed by volume rendering with CT images (Dotted line indicates the portion for which the CT image of Fig.3.3is used)	40
3.5	Twill fabric structure reconstructed from the positional information of each yarn estimated by the yarn cross-sectional model correlation method	41
3.6	Twill fabric structure reconstructed from the positional information of each yarn estimated by the cross-sectional images correlation method	42
3.7	Profile of a rectangular weighting function	43
3.8	Profile of a triangular weighting function	44
3.9	Influence of other yarn cross-section or noise	45
3.10	Profile of the improved weighting function of the yarn cross-sectional model, $h(r) = -2 \exp\{-s r^2\} + \exp\{-t r^2\}$	45
3.11	Influence of other yarn cross-section when a weighting function $h(r) = -2 \exp\{-s r^2\} + \exp\{-t r^2\}$ is used	46
3.12	Twill fabric structure reconstructed from the positional information of each yarn estimated by the yarn cross-sectional model correlation method using the improved weighting function	47
3.13	Photograph of the sample double-layered woven fabric	48
3.14	Example of CT images of the sample double-layered woven fabric	48
3.15	Structure of the double-layered woven fabric reconstructed by volume rendering with CT images (Dotted line indicates the portion for which the CT image of Fig.3.14is used)	49
3.16	Structure of the double-layered woven fabric reconstructed from the positional information estimated by the yarn cross-sectional model correlation method using the improved weighting function	50
3.17	Independent expression of warp of the under layer and weft of the upper layer of the sample double-layer woven fabric	50
4.1	Model of bent yarn	55
4.2	Photograph of the sample plain knitted fabric	58
4.3	Example of CT images of the sample plain knitted fabric	58

4.4	Structure of the plain knitted fabric reconstructed by volume rendering with CT images (Broken line indicates the portion for which the CT image of Fig.4.3is used)	59
4.5	Structure of the plain knitted fabric reconstructed from the positional information estimated by the 3-d yarn model correlation method	59
4.6	Photograph of the sample knitted fabric of a net stitch	60
4.7	Example of CT images of the sample knitted fabric of the net stitch	60
4.8	Structure of the knitted fabric of the net stitch reconstructed by volume rendering with CT images (Broken line indicates the portion for which the CT image of Fig.4.7is used)	61
4.9	Structure of the knitted fabric of the net stitch reconstructed from the positional information estimated by the 3-d yarn model correlation method	62
4.10	Enlarged CT image of the center area in Fig.4.7	62
4.11	Independent expression of a yarn of the sample knitted fabric of the net stitch	63
4.12	Example of yarn cross-section of plain woven fabric using ply yarn	64
4.13	Photograph of the sample plain woven fabric	67
4.14	Example of CT images of the sample plain woven fabric	67
4.15	Structure of the plain woven fabric reconstructed by volume rendering with CT images	68
4.16	Structure of the plain woven fabric reconstructed from the positional information estimated by the 3-d fiber model correlation method	68
4.17	Independent expression of ply yarns of plain woven fabric	69
5.1	Photograph of the sample double-layered woven fabric	72
5.2	Example of CT images of the sample double-layered woven fabric	72
5.3	Structure of the double-layered woven fabric reconstructed by volume rendering with CT images (Area surrounded by blue line is region of interest)	73
5.4	Structure of the sample double-layered woven fabric reconstructed from the positional information estimated by the yarn cross-sectional model correlation method	74
5.5	Enlarged CT image of an area in Fig.5.2(Yarn cross-section is surrounded by red line)	74

5.6	Structure of the double-layered woven fabric reconstructed from the positional information estimated by the 3-d yarn model correlation method	75
5.7	Enlarged image of an area in Fig.5.4(Area surrounded by red line is region of interest)	75
5.8	Enlarged image of an area in Fig.5.6(Area surrounded by blue line is region of interest)	75
5.9	Filament direction vector field, in which voxels have higher values of J_3 than a threshold value	79
5.10	Some of reconstructed fibers by connecting the similar voxels	80
5.11	Two reconstructed yarns by binding up the reconstructed fibers . .	81
6.1	Weave diagram of a plain woven fabric	85
6.2	Weave repeat of a plain woven fabric	85
6.3	Weave diagram of a double-layered woven fabric	86
6.4	Weave diagram of sample double-layered woven fabric	88
6.5	Weave diagram constructed by the proposed method	88
6.6	Weave repeat extracted by the proposed method	89
6.7	Photograph of the sample double-layered woven fabric	89
6.8	Structure of the woven fabric reconstructed from the positional information estimated by the 3-d yarn model correlation method . . .	90
6.9	Weave diagram of sample woven fabric	90
6.10	Weave diagram constructed from yarn positional data	91
6.11	Weave diagram constructed from yarn positional data using proposed yarn sort method	92
6.12	Example of cross-section and center line of GM	94
6.13	Surface shape of the yarn represented by GM	95
6.14	Center line of the knitted fabric of the net stitch of Fig.4.9	96
6.15	Knitted fabric structure of the net stitch of Fig.4.9represented by colored yarns	98
7.1	Flow chart for applying three proposed yarn tracing methods to sample textile fabric	103

表 目 次

7.1	Comparison of each proposed yarn tracing method for target and processing time	102
7.2	Processing time of each proposed yarn tracing method for a yarn, of which length is about 2.4 mm and diameter about 0.1 mm	104

第1章 緒言

1.1 研究背景

1.1.1 繊維産業における計測と自動化

近年の計測制御技術やコンピュータ技術の発展によって、従来熟練した職人や技術者しかこなすことができないと思われていたさまざまな作業が機械化され、自動化が進んでいる。

繊維産業においてもいろいろな作業において自動化が進んでいる。特に1960年代に急速に発展した画像処理技術は織編物の製造や検査の自動化に役立っている。たとえば織編物の製造に関しては、コンピュータ支援設計(CAD)を用いた設計が従来からさかんに行われており、設計者はPCの画面を見ながら簡単な操作によって設計作業を行い、さまざまな織編物の設計を行うと同時にその仕上がりの様子もComputer Graphics(以下、CGと略記する)により表現することができ、どのような製品が出来上がるかを前もっておおよそ予測することができる。さらに設計したデータを織り機に入力すれば、自動で設計通りに織物を織ることのできる電子ジャガード装置も開発されている。また近年、新しい製造過程や新しい素材の開発も進み、非常に凝った意匠のまったく新しい織編物構造の設計を可能にした。結果として、織編物は医学から工学、宇宙から海底、レジャーから軍事まで、産業用資材用途への展開は、最近、一般消費者の目には止らない間に世界中で急速に進行しており、ますますその利用範囲が広がっている[1]。このように新しい織編物の応用が広がるに伴って、織編物は非常に注意深く、慎重に設計されなければならない。なぜならば、それらのミスが重大な事態を引き起こしかねないからである。したがって、ほとんどの場合において、技術的な織編物構造は、それらが使用される前、場合によっては製造される前にリアルにモデリングされなければならない。このような背景のもと、従来から織編物の力学的特性が解析され、最近では有限要素法(FEM)を用いて平織物をモデル化することによりその力学的特性を解析する研究も行われている[2, 3]。また、平織物に限らず一般的な織編物に対して幾何学的、機械的性質をもつモデルの設計ツールを開発する研究[4]も行われている。この研究では最小エネルギー原理を利用することでFEMよ

りも短時間に構造の計算を行っている。

織編物の検査に関してもさまざまな工程の検査が自動化され、布の特性に関する情報を得ることのできる多くの手法が提案されている。それらのうちよく知られた方法として、Kawabata, FAST, Hatra sewability tester, L&M sewability tester などがある [5]。Kawabata testing (KES) は布の手ざわり感覚の客観的評価方法である。引っ張りと剪断、曲げ、圧縮、表面の性質のそれぞれの情報を得るために4つの機械が用いられる。FAST, すなわち fabric assurance by simple testing は布の見ための様子、柄、性能の特性を客観的に測定する装置である。この装置は、寸法安定度試験と圧縮メータ、曲げメータ、伸びメータの3つの機器を用いる。また、裁縫に関して、Hatra 可縫性試験装置は裁縫中に使われる装置であるが、これには縫い針の温度を測るための赤外線光センサがついている。標準条件下で縫われた試料の布の摩擦条件を特徴づける F 指数が求められる。表面の仕上がりは、縫い針の温度に近い相関がある。L&M 可縫性試験装置は布の可縫性を縫い針の最大の貫通力を利用して測定する接触型の装置である。最大力は100回の縫い針を貫通させて記録される。最大力があるしきい値を越える回数は衣服製造中に布に破損が起こるかどうかを決定することに使われる。

画像処理を利用した織編物の検査に関する研究も多く提案されている、たとえば、空間フィルタを利用して編物表面の傷を検出する研究 [6, 7] などが行われている。また、試料となる織物表面画像の2次元高速フーリエ変換を行い、得られる2次元パワースペクトルのピークに着目し、織物の構成糸番手や織物の歪みなど、構造的な特性を計測する研究も行われている [8]。また同様に織物の表面画像のフーリエ変換を利用し、織物表面の動摩擦に係する糸の密度や方向性を計測している。さらに、フロントライト、バックライトを用いた2つの画像を利用し、細線化処理などを行い、繊維の長さ測定を行う手法も提案され、測定できる繊維にはやや制約条件があるものの、手計測よりも精度よくかつ正確に繊維の長さを計測している [9]。さらに、織物の構造を自動で分析し、客観的に織物の品質を評価するための自動織物評価システムが提案されている [10]。このシステムでは、CCD カメラにより取得した織物の表面、断面画像から、画像処理、画像解析により糸密度、表面の状態、糸の波形、織物の厚さや単位面積当りの重さなどのような織物を構成する特徴量が自動的に計測される。また織物の品質を評価するために、取得した画像からスラブやミスピックといった欠陥を検出し、さらに糸間隔の均一性や、交差する角度の直交性も測定される。

このように織編物の製造、検査などさまざま作業において計測が行われ、自動化が進んでいる。しかしながら、計測、自動化技術がこのように発展した現在においても未だに人間の手作業による検査に頼っている、あるいは頼らざるを得ない作業が多く存在しており、人間の情報処理能力の高さには改めて驚かされる。

1.1.2 織編物の組織分解

本研究で対象とする「組織分解」という作業もまさにこの人間の高い情報処理能力が必要とされる作業である。

組織分解とは織編物の構造，すなわち織り方，編み方を解析する作業で，その組織分解の対象となる見本試料の構造を応用して新しい機能や意匠をもった織編物を開発するための設計資料を得ることを目的とするものであり，織編物設計作業においてたいへん重要な役割を果たしている [11]。また，織編物の設計，開発はいかなる織編物に対しても有効なシミュレーション技術が未だなく，多くの織編物は実際に織編物を作成してみないと，機能や意匠などが設計どおり，期待どおりに仕上がっているかわからないのが現状で，その仕上がり具合を確かめるためにも織編物構造の解析は必要であり，有用である。

現在，この組織分解作業は主に顕微鏡を覗きながら毛がき針とハサミを用いて根気強く糸目をほぐしながら分析していくという昔ながらの方法で行われており，その作業は決して容易なものではなく作業には多大な負担がかかる。これに加えて，現在の繊維製品は従来の衣類のみならず産業用資材の分野にまで幅広く用いられるようになり，プレーンなものから厚さが1cm前後にまでなる立体的な布地も登場してきた。最近ではカーボン繊維で織られた多重織物は複合素材として車のバンパーに使われるなど，従来の材料に変わる素材として注目を集めている。また前述のとおり，繊維製品は多様な広がりを見せており，近年では快適性をうたった衣類用布地も幾層もの組織で構成されるようになってくるなど，布地それ自体が非常に複雑化してきており，この組織分解作業には豊富な知識と経験が要求され，それ専門に人材をおく必要もある。さらに最近ではこのような作業への若手離れ，熟練工の老齢化が進んでいる。

このような「組織分解」に関する現状を受け，より確実かつ正確に織編物組織構造を解析するために組織分解の自動化が切望されている。

1.1.3 計測とエキスパートシステム

近年では計測やコンピュータ技術の発達により，組織分解の自動化も同様に専門家への代替としての作業の自動化が目立ってきている。そのようなシステムとしてまず連想されるものの一つにエキスパートシステムがある。本研究は「組織分解」の自動化を対象にしており，場合によってはエキスパートシステムの開発が目的と思われる読者がいるかもしれないが，本論文での議論の中心は計測工学に関する組織分解の自動化を扱い，エキスパートシステムの開発が本論文の主旨ではないことを明確にしておく。そこで本項では，簡単にエキスパートシステ

ムについて述べ、計測がエキスパートシステムに対してどの立場にあるのかを明確にすると同時に、計測とは何かということについても考えていきたい。

はじめにエキスパートシステムについて簡単に説明する。エキスパートシステムは人工知能技術の一つの応用分野として位置づけられる [12]。人工知能に関する研究はその過剰な期待に対する研究の行き詰まり感から、1960年代後半にはいわゆる低迷期に入るが、1977年第5回人工知能国際会議において、Stanford大学のE.A. Feigenbaum教授により「知識工学」が提唱され、以後急速にエキスパートシステムなどの応用研究がさかんになった [13]。当初提唱された知識工学の定義は、問題領域の専門家から得られる専門知識の表現、利用、獲得に関する工学であり、エキスパートシステムはその成果物である。エキスパートシステムとは一言でいうと専門家の代わりをするコンピュータシステムのこと [14] である。ここで、専門家とは、特定の分野の専門知識を持ち、その分野に関して適切なアドバイスができる人のことをさす。そして、エキスパートシステムはその専門知識を保有し、それらの知識を用いて問題解決するもので、保有している知識から推論を行うことができ、あいまいさをも扱うこともできるなどの特徴がある。これらの知識は該当分野の専門家の保有しているノウハウに相当するものである。したがって、たとえば医療のエキスパートシステムは医者代わりに患者の診断を行い、税務のエキスパートシステムは税理士の代わりに税務相談をする。しかし、専門家の代わりをするといっても、そのレベルはさまざまで、専門家をしのぐエキスパートシステムもあれば、専門家にははるかにおよびないエキスパートシステムもある。エキスパートシステムは、つぎのようないろいろな分野で活用されている。

- 医療 (診断)
- 化学
- 数学 (数式処理)
- 地質鉱山学 (鉱物探査)
- 教育 (知的 CAI)
- 商品管理・配置計画 (コンピュータシステムの構成)
- 実験計画
- その他

一般にエキスパートシステムは Fig.1.1 のような構成をしている。すなわち、基本的には、知識を蓄える知識ベースとその知識を利用して推論作業を受けもつ推論

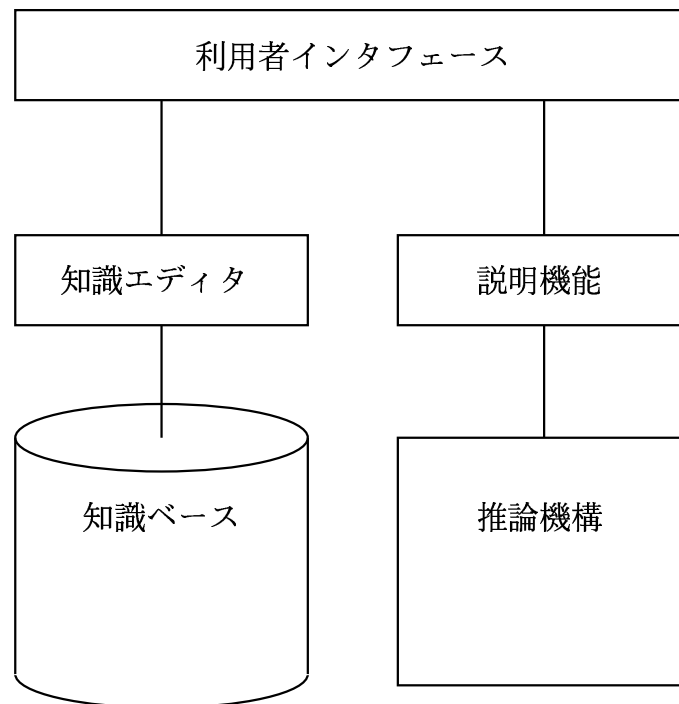


Fig. 1.1: Composition of expert system[14]

エンジンから構成される。知識ベースとは、文字どおり、知識の基地であり、データベースとの違いは単なる事実だけではなく、If-Then ルールのような規則も知識として持つことである。推論機構は、知識ベースを使って推論を行う。推論方法は後ろ向き推論や前向き推論などがあり、これは知識の表現方法に依存している。エキスパートシステムを快適に利用するには、ユーザとのインターフェイスが重要で、たとえばグラフィックスや自然言語の利用が考えられる。また、知識エディタは知識を知識ベースに入力したり、修正したりするのを支援する機能である。既存の知識と矛盾がないかなどのチェックなども行う。説明機能は、結論に至る推論過程を説明する機能である。

エキスパートシステムではない従来のシステムとは、計算機の都合に合わせてアルゴリズムの確立やプログラミングが必要であった。対象の知識は、システムエンジニアおよびプログラマにより処理手順、パラメータ、計算式などの形に変換され、しかもプログラムの中に散在している。一方、エキスパートシステムにおける知識情報処理の場合、ある程度の制約はあるが、対象の知識は自然語に近い If-Then ルールなどの形で、処理の流れとは独立に専門家側の都合で論理を自由に記述でき、知識ベースに格納される。この知識は、問題解決に際し、推論機構に

より必要に応じて選択，適用される．このような考えを実現するため，「知識ベース」が「推論機構」と独立している．これがエキスパートシステムの特徴である．

エキスパートシステムにおいて，知識にはいわゆる「浅い知識」と「深い知識」の2つの知識が存在する．浅い知識 (shallow knowledge) とは，過去の問題解決体験に基づく経験的知識であり，ヒューリスティック (heuristics) とも言われる．たとえば「出力電圧が低下しているならば，トランスの不良を疑え」といった知識は経験的な浅い知識である．浅い知識は問題解決のためにきわめて効率良く機能し，特に型にはまった問題に対しては専門家に匹敵する問題解決システムの実現を可能とする．しかしながら，知識自身に厳密な裏付けがないため必ずしも正しい結論を導くとは限らない．また，柔軟性に乏しく，想定外の問題に対して応用することはほとんど不可能である．浅い知識と対照的な概念が深い知識 (deep knowledge) である．深い知識とは問題に関する理論的，基礎的知識を意味する．オームの法則などの物理法則は深い知識の一例である．専門家は必ずしも経験のみをベースに問題解決を図っているのではない．経験的な知識が誤った結論を導きそうになった場合や，過去に全く経験したことがなく，浅い知識が利用できない状況に遭遇した場合にも，深い知識を用いて基本原理に立ち戻ることにより，何とか解決の糸口を掴むことができる．

エキスパートシステムはその目的に応じて大きく診断・設計 (計画)・制御の三つに分類することができる．診断型エキスパートシステムの研究開発は1970年代にアメリカの大学や研究機関において主に医療診断を中心に行われはじめた．エキスパートシステムそのものの最初の成功例として著名なMYCINがある．MYCINは感染症の診断とその治療法として抗生物質の選択を助言するものである．これらの医療診断のエキスパートシステムに刺激を受けた形で産業界では1980年代に入って種々の故障診断システムが精力的に開発されはじめ，いくつかのシステムは実用の域に到達している．従来のエキスパートシステムの構築においては専門家 (オペレータ) から，原因-症状に関する知識，いわゆる「浅い知識」を収集するといった形態が故障診断，医療診断のいずれの場合においても採用されていた．しかし，最近の傾向として故障診断においては，構造や機能に関する知識，すなわち「深い知識」を積極的に採用するようになってきている．

つぎに，計測工学について考える．計測工学に関して従来よりさまざま議論がなされている．たとえば，寺尾 [15] は「計測とはものごとのあいまいさ (エントロピー) を減らし，それによって得た知識をもとにして，一連の判断と行動をとる知力システムをつくりだすこと」と表現し，北森 [16] は「計測する，すなわち計測方程式を解くということは，物理的に考えると因果過程の逆向きに，計測対象の表面に現れ直接観測できた現象あるいはその観測データから，その現象の原因として奥底に潜む，直接は観測できない現象についての知識を得ることであり，計測

工学はそのための手法，手段を教えてくれる工学であるということができると表現し，さらに「ここで本質的な点は上にも述べたように，結果から原因へという，因果過程の逆方向，”果因”過程とでも言うべきものである．われわれが知識を獲得するということはまさにこの”果因”過程をたどることであり，計測システムはわれわれのその機能の代行システムである．われわれが知識を獲得する方法を与え，また実行するための工学，おそらくそれを知識工学というのであろうが，計測工学はまさにその知識工学そのものであるといえる」と続けている．

これらのことからわかるように，一言でいえば計測工学とはすなわち知識獲得のため工学であると言え，まさに知識工学である．ここで，計測工学とはすなわちエキスパートシステムと同値かというところを筆者はそうは思わない．計測工学とはあくまでも知識を獲得することが目的であり，その得た知識をどのように使うかはエキスパートシステムなど，ほかの工学に任せるという立場にあると考える．森村 [17] の言葉を借りれば「いろいろな装置，器具を使い，さらに種々の操作を自動化して計測が行われるが，得られた結果がどのように利用されるかは，一般には計測のらち外である．たとえば，内蔵の疾患を断層写真を撮ることによって診断しようとするとき，見出された異状が癌であるかどうかの判断は最終的には医師がくださるわけで，この場合は撮影されたフィルムとそれに関する定量的情報を提供するまでの段階が計測であり，誤診を犯す確率を小さくするように装置を考案したり，情報処理のアルゴリズムを選ぶのが計測の課題」である．したがって，計測とエキスパートシステムの関係を考えてみると，計測とは知りたい事柄を，データを採集し分析して，知るための，一言でいえば知識獲得の工学的行為 [58] であり，これはエキスパートシステムで言うところの「深い知識」の獲得行為にほかならない．つまり，計測とエキスパートシステムとの関係を考えるならば，計測とエキスパートシステムは同値ではなく，計測はエキスパートシステムの推論に必要な知識を獲得するための行為と言える．

以上をまとめると，本研究は組織分解自動化のための知識獲得，すなわち計測について扱い，組織分解自動化のためのエキスパートシステムの開発を目的とするものではなく，本論文においても組織分解自動化のための計測が議論の中心となる．

ところで，エキスパートシステムにおいて，知識の獲得には専門家の思考を知ることが重要な鍵を握る．すなわち，計測行為が知識獲得のための行為であるとすれば，計測行為とは専門家，技術者の行為であるとも言える．しかしながら，北森 [18] は「新しい計測法の開発は熟達した技術者の経験と勘に頼らねばならない」としばしばいわれる．しかし工学であろうとするならばこれでは足りない．必要な機能は何と何であり，それはいかなる構成要素をどのように結合することによって実現されるかを明らかにし，経験と勘に頼らずとも，しかるべき手順で問題解

決ができるようではなければならない」と述べ、続いて「工学とは一言にいえば試行錯誤をなくすものである。素人でもシステムティックに行えるように方法を提供するのが工学である。勘と経験に頼らなければならないのはまだ技術レベルであって、工学の域に達しているとはいえない。したがって、工学というのは課せられた目的を達成するのに、どのような部分をどのように組み立てたらよいか、その問題をシステムティックに解く手順を与えるものでなければならない。目的あるいはそれを達成するのに必要な機能とそれを実現する部分(要素)の組たて方(接続)との間の関係を明らかにするものでなければならない。したがって、工学と言うからには、そこで必要とされる機能、用いる要素、および要素の接続の仕方が明らかになっていなければならない。しかし、機能、要素、接続の仕方に種類がありすぎてはとてすべてをとらえにくくなってしまう。したがってうまく整理して全体を的確にとらえ、何ができて何ができないかを容易にわかるようにすることが必要になる。それが体系化である」と主張している[16]。一言で要約するならば、計測工学とは体系化され、素人でもシステムティックに計測を行える方法を提供しなければならないということであるが、確かにこの計測工学の体系化とは重要な過程である。やや蛇足になるが、このことは裏を返すと、現在においてはこの計測という行為はやはり専門家が行う行為であるとも言える。計測工学が整理され体系化が進めば、近い将来計測系構築のためのエキスパートシステムが登場するかもしれない。

1.2 研究目的

本研究は、1.1.2で述べた組織分解自動化を目指し、織編物構造に関する計測を行うことを目的とする。組織分解とはそもそも織り方や編み方、糸の種類、糸密度など試料となる織編物のすべての性質を計測、解析し、見本試料とまったく同様の織編物を作るための広義の意味での組織分解と、織り方、編み方、すなわち糸同士がどのように絡み合っているかということのみを解析する狭義の意味での組織分解がある。本研究は広義の意味での組織分解を最終的な目標とするが、まずは狭義の意味での組織分解の自動化を目指し、そのための計測を行う。したがって、本論文では以後、組織分解とは狭義の意味での組織分解を指す。

また、組織分解自動化のための計測を通して、帰納的に計測に重要な着眼点について考え、得られた知見を組織分解自動化のための計測に還元することによって本論文を進める。

さらに、組織分解結果の表示についての検討も行う。組織分解結果の表現は組織分解自動化の立場から重要である。従来用いられている織編物の設計図である組織図は、専門家でない素人にはたいへんわかりにくい。また最近では立体的な

構造を有した繊維製品が数多く開発され、3次元的な構造は2次元的な組織図から押し量ることは困難な作業である。また、計測を行うことは知識を獲得する行為である。したがって、ある意味においては人間が理解できる形に変換する作業を含めて計測と言える。そこで、本研究では組織分解自動化のための計測結果として直観的でわかりやすい織編物構造の表現方法についても検討を行う。

1.3 本論文の構成

本論文は全7章からなる。以下、章ごとに概要を述べる。また、Fig.1.2に本論文の構成を示した。

第2章「織編物の組織分解に関する検討」では、組織分解に関して諸検討を行う。はじめに織編物について理解するための準備として織編物を構成する糸および織編物の特徴と分類について簡単に述べるとともに本研究で対象とする糸、織物、編物について検討する。続いて組織分解自動化に関してこれまで提案されてきたいくつかの研究を取り上げ、それらに共通な課題点を整理して課題解決に向けた情報の拡張について検討する。つぎに、本研究における組織分解の問題設定を行い、新たに「構造分析」の考え方を提案する。設定した問題に関連する分野として、医用画像における3次元画像計測について本研究と比較し本研究の難しさを明確にする。また、織編物の構造分析の方針として、モデルを利用して糸を追跡し、各糸の心線点列を推定することを示す。

第3章「断面画像を利用した織物の構造分析」では、第2章の検討結果を受け、断面画像列を利用した織物の構造分析法として、糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法を提案する[65, 71]。提案する糸断面モデルの重み関数について、本手法に有効な重み関数の形状を詳しく検討する。さらに提案手法により、従来の研究では不可能であった多重織物の構造分析について実際に二重織物を用いた実験を行い、問題なく構造分析できることを示す。

第4章「3次元画像を利用した編物の構造分析」では、3次元画像を利用した編物の構造分析手法として3次元モデル相関法による糸心線点列推定法を提案する[66, 70]。構造が複雑なために表面画像を用いた従来法では対象が限定的であった編物について、実際の編物に本手法を適用し、従来の手法では解析できない編物に対しても実験を行い、提案手法の有効性を検討する。さらに、提案する糸心線点列推定法の課題点について議論を行い、その解決法の一つとして3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定法を提案する[69]。3次元糸モデル相関法による糸追跡法の適用できない織物に対し実験を行い、構造分析できることを示す。

第5章「大局的处理による織編物の構造分析」では、はじめに提案手法である糸断面モデル相関法による糸追跡法と3次元糸断面モデル相関法による糸追跡を

比較し，糸の中心点を精度よく推定できているかの安定性について検討し，糸全体を考慮した大局的な処理の考え方を導き出す．有効な大局的構造分析法を提案するに至っていないが，3次元繊維モデル相関法を利用した繊維の方向を表すベクトル場を利用した大局的処理の検討を行う [68] ．

第6章「糸心線点列位置情報を活用した織編物構造の表現方法」では，計測結果の提示方法として，構造分析結果により得られた糸心線点列位置情報を活用した，組織図自動作成法と3次元組織構造再構成法を提案する [67, 72, 73] ．

第7章「結言」では，本論文を織編物狭義組織分解自動化のための計測という観点から，本論文で提案する手法をまとめ，残された課題および将来の展望について述べる．

論文構成

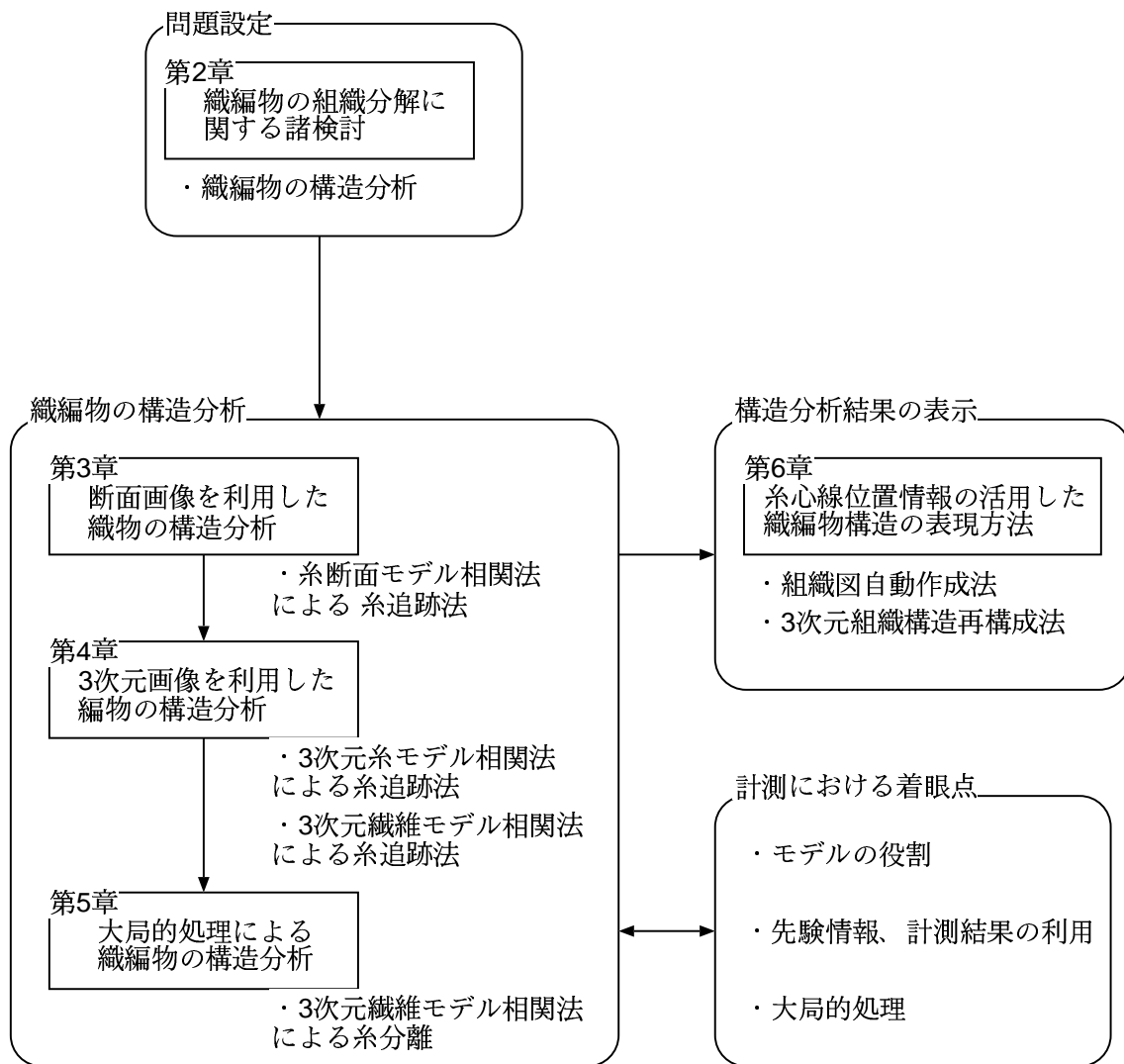


Fig. 1.2: Structure of this thesis

第2章 織編物の組織分解に関する諸 検討

本章では、組織分解における問題点を整理し、明確にするための諸検討を行う。はじめに、織編物における糸、織物、編物の性質に関して概観し、本研究で対象とする糸、織物、編物について検討する。続いて、従来から行われている織編物の組織分解自動化に関する研究について検討し、従来法の課題を明確にする。また、明らかとなった課題につき、その根本となる問題について解決策を検討する。さらに以上の検討を踏まえ、組織分解のための必要な情報について検討し、新たに「構造分析」という考え方を提案する。また本研究に関連する研究として、医用画像における画像計測を取り上げ、本研究との比較、検討を行い、織編物特有の問題を明確にするとともに、医用画像処理における研究を参考に構造分析法の検討を行い、本研究の方針を決定する。

2.1 本研究で対象とする織編物の検討

繊維製品は、大きく分けて、織物、編物、不織布の3つに分類される。ここで織物や編物は繊維を撚ることによって作られた糸を組み合わせて作られる布であるのに対し、不織布とは繊維を一定方向やランダムに集積して接着樹脂で化学的に結合させたり、機械的に絡ませたり、圧力をかけた水流で絡ませたり、熟融着繊維で結合させてつくる布のことである。すなわち、不織布とは繊維から直接製造された布であるため、織り方や編み方を解析する本研究における組織分解の対象にならないことをまず確認しておく。

以下、本節では、糸、織物、編物の性質についてそれぞれ概観するとともに本研究で対象とする糸、織物、編物について検討を行う。

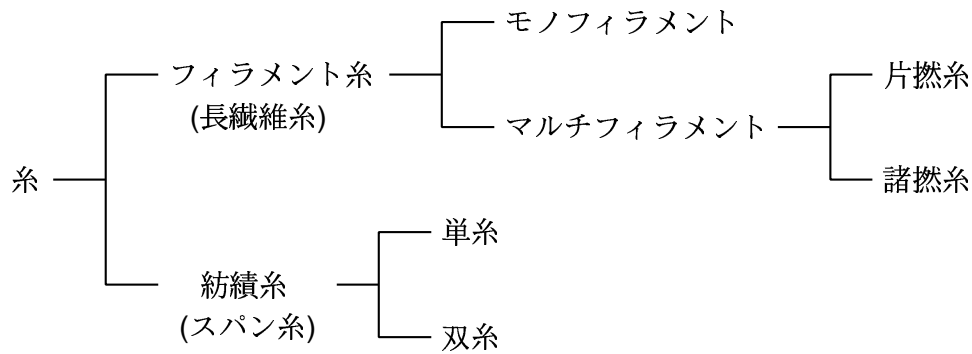


Fig. 2.1: Classification of yarn

2.1.1 対象とする糸の検討

はじめに織編物を構成する糸について、本研究で対象とする糸を検討する。ここで、そもそも糸とは基本的に繊維が撚られてできたものである。すなわち、糸と繊維は基本的に同義ではないことに注意されたい。

糸はFig.2.1のように、その糸を構成する繊維の種類から大きくフィラメント糸と紡績糸の2つに大別される[19]。フィラメント糸とは長繊維(フィラメント)からなる糸のことで、紡績糸とは短繊維(ステープル)からなる糸のことである。ここで、長繊維は生糸のような連続した長い繊維を言い、短繊維は綿や羊毛のように繊維のような非連続の短い繊維を言う。フィラメント糸には1本のフィラメントからなるモノフィラメント糸と、数本以上のフィラメントからなるマルチフィラメント糸がある。

糸は通常、何本かの繊維が撚られて構成されている。糸を撚ること、すなわち加撚は、糸に収束性と丸みを与え、糸の強度を増し、毛羽の発生を抑え、製織、製編効率を向上させるために行う。甘撚糸と呼ばれる比較的撚りの少ない糸においては撚数は100~300回/mが一般的である。また、糸に弾性、剛さ、トルク効果を与え、布に特殊な風合いを付与するために、強撚を行うことがあるが、この場合、撚数は1,000~3,000回/mの糸が一般によく用いられる。撚方向には、Fig.2.2のようにS撚とZ撚の2種類がある。S撚(右撚)は時計の針と同一方向の回転の撚で、Z撚(左撚)は時計の針と反対方向の回転の撚である。たとえば紡績糸はZ撚が、紡績双糸ではS撚が一般的である。

Fig.2.1に示すようにフィラメント糸は無撚の糸に撚を入れた片撚糸、また片撚糸を引き揃え、片撚と反対方向の撚を入れた諸撚糸がある。2本引き揃えた糸の場合、2本諸撚糸あるいは二子糸と言い、3本の場合、3本諸撚糸あるいは三子糸と言う(Fig.2.3)。紡績糸については1本の糸からなる単糸、2本の糸からなる双糸にさ

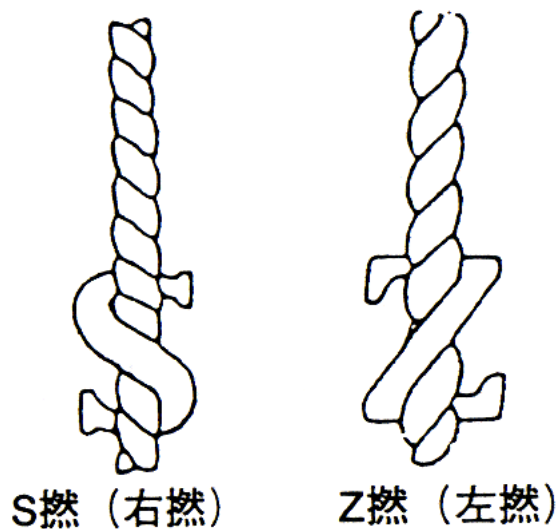


Fig. 2.2: Twist directions of yarn[19]

らに分類される。

さらに、糸の組み合わせ、糸の供給量、撚数などの撚糸条件を変更することにより特徴のある形状に撚った糸を意匠撚糸と言う。Fig.2.4 にいくつか意匠撚糸の例を示す。糸にループを形成するループ系統 (Fig.2.4(a)) と、糸に玉を形成させるスレット系統 (Fig.2.4(b)) がある。

以上、糸の性質および分類について簡単に説明したが、以下では本研究で扱う糸について検討する。

はじめに糸はその繊維の素材からフィラメント糸と紡績糸の2つに分類されたが、紡績糸は短繊維の性質から毛羽や撚りむらが発生しやすいため、きれいな線状の糸にはならず、これをはじめから対象とするには多くの困難が予想される。また故意に毛羽や撚りむら、さらにはループを形成させる意匠撚糸は同様の理由により扱いに困難が予想される。したがって、本論文ではまずは構造、形状が基本的で一般的な Fig.2.5 のようなフィラメント糸に限定して扱うこととする。また、糸を構成する繊維は円形断面の吐出孔を有する紡糸口金を用いて円形断面の繊維を紡出するのが一般的である。なかには三角形、星形、Y字形などの形状を有する口金を用いて非円形の断面形状とした繊維や、断面を中空形状として空気を多く含み、軽く、こしの強い性質を持たせた繊維などもある。しかし、特殊な断面形状の繊維も扱いに困難が予想されるため本論文では一般的な円形の断面形状をした繊維を扱う。

すなわち、本論文で対象とする糸は、円形な断面形状を持つ繊維を撚って作ら

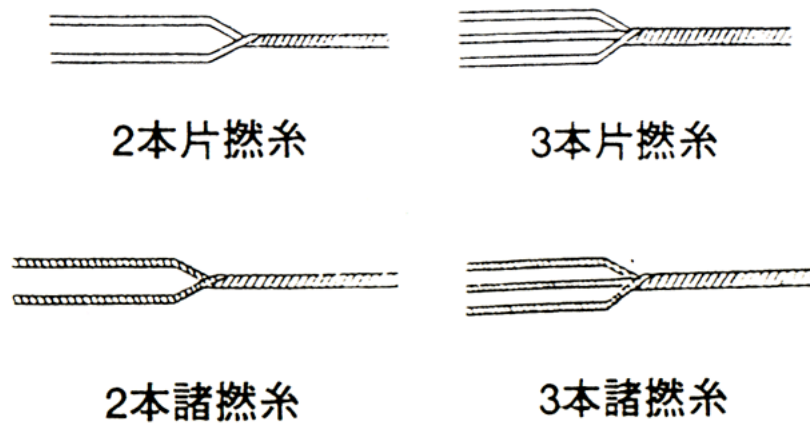
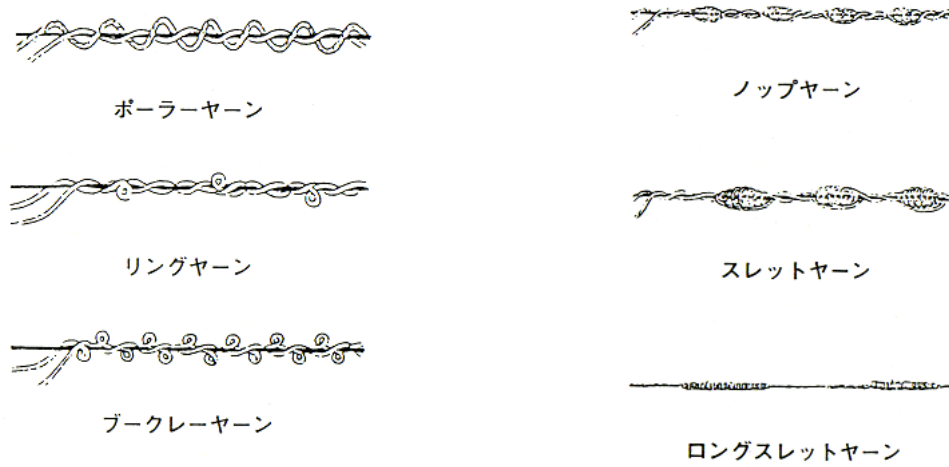


Fig. 2.3: Examples of twisted yarns[19]



(a) Boucle type

(b) Knot type

Fig. 2.4: Examples of Fancy yarn[19]

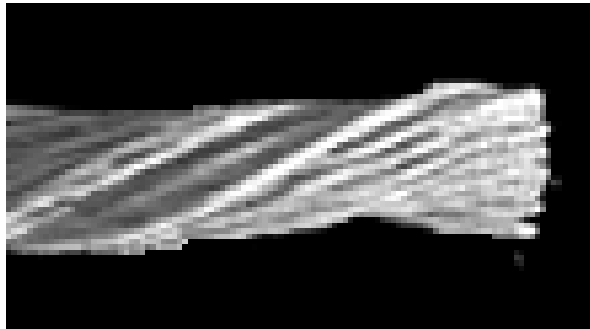


Fig. 2.5: Filament yarn constructed by twisted filaments

れた一般的なフィラメント糸とする。

2.1.2 対象とする織物の検討

織物は平行に揃えたたて糸¹をそれぞれの織り方にしがい上げる糸と下げる糸をきめ、上がった糸と下がった糸との間にできる「ヒ口」と呼ばれるすき間によこ糸を通し、たて糸にさしたくし状の「おさ」と呼ばれるものでよこ糸を押し付け密着させることによって織られる。したがって、垂直に交わるたて糸とよこ糸を上下に組み合わせられ、糸は基本的に途中で折り返されたりすることはせず、たて糸はたて糸同士、よこ糸はよこ糸同士互いに交わることなく平行である。

織物はその織り方から Fig.2.6 のように大きく4つに分類される。

一重組織は平坦な織物で、衣類などで多く使われている織物で、三原組織、すなわち平織、あや織、朱子織を基本とし、そのほかの一重組織の織物はこれらの組み合わせか、少し変化させたものに過ぎない。重ね組織は一重組織に比べ、立体的な構造をしている。Fig.2.7 に重ね組織の一つである二重組織の織物を上からみた様子、すなわち表面の様子 (a)、また、その側面からみた様子、すなわち断面の様子 (b) を示す。断面の様子から、二層の構造を有していることがわかる。このように重ね組織は布に厚みを持たせることによって、布の強度を強くさせたり、保温性を向上させたり、また表地と裏地を変えることによって、意匠に工夫を凝らせたりするなど、一重組織にはない機能を持たせることができる。

パイル組織は、織物を構成する糸の何本かをたるませて表面でループ状にした、あるいは Fig.2.8 に示すようにそのループを切断することによって毛羽立ちを持たせた織物で、主にタオルなどの製品に用いられている。

¹主に繊維関係の専門家の間では「経糸(たていと)」「(warp)」「緯糸(よこいと)」「(weft)」の表記が用いられるが、本論文では JIS の表記にしたがって「たて糸」「よこ糸」を用いる。

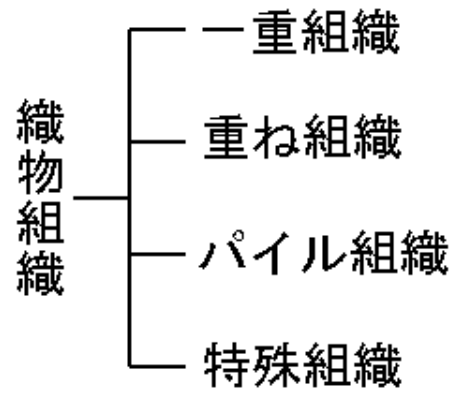


Fig. 2.6: Classification of woven fabric structure

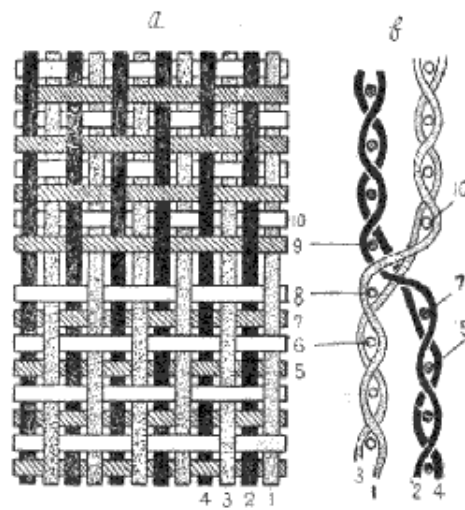
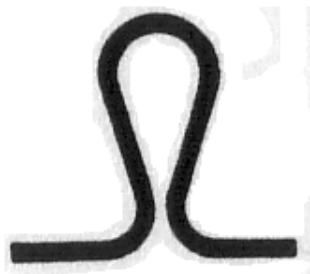


Fig. 2.7: Double-layered woven fabric structure[11]



Fig. 2.8: Cross-section of pile woven fabric[19]



(a) Loop of weft knitted fabric



(b) Loop of warp knitted fabric

Fig. 2.9: Examples of Loop of knitted fabric[19]

特殊組織は上記の分類に入れることのできない特殊な性質，構造を持つ織物である．たとえば，からみ組織は，同じ方向の糸同士は平行であるという織物の基本的な特徴を覆し，たて糸が互いにかからみ合う特殊な織り方である．

パイル組織，特にタオル地のように糸を切断し毛羽立たせている織物構造の解析は糸が切断されているため構造を解析することが非常に難しく，また特殊組織についても一般的な織物ではないため，本論文では順番としてまずは比較的一般的な構造である，一重組織および重ね組織を対象とし，パイル組織や特殊組織は今後の研究で考察する予定である．

2.1.3 対象とする編物の検討

織物がたて糸とよこ糸を互いに直角の方向に交差して布地を形成したのに対し，編物は1本または2本以上の糸が Fig.2.9 のようなループを作り，そのループに引かっけてつぎの新しいループを作ることを継続し，順次ループを平面状に連続させて編目を形成して布地としたものである [19] ．

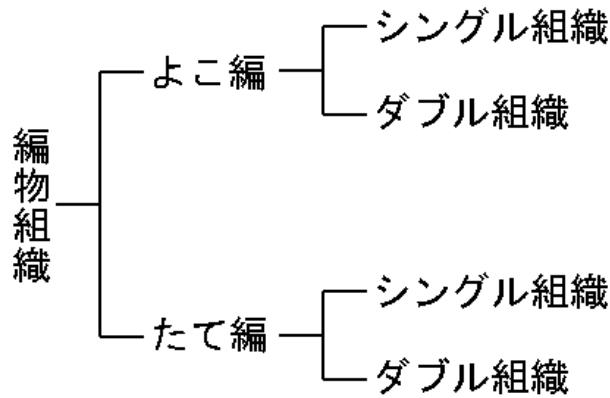


Fig. 2.10: Classification of knitted fabric structure

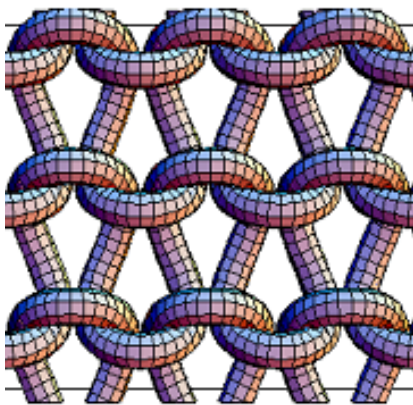


Fig. 2.11: Example of weft knitted fabric

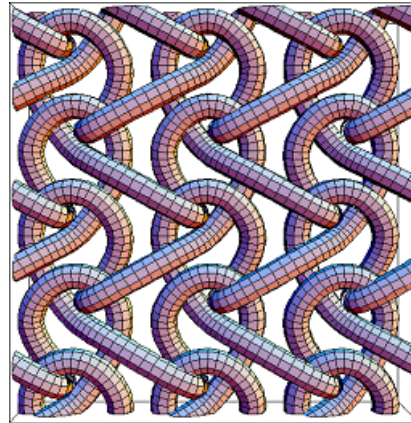


Fig. 2.12: Example of warp knitted fabric

編物はその編み方から Fig.2.10 のように大きくよこ編とたて編の2つに分類される。Fig.2.11 のようによこ編は、1本の糸がループを作りながら左右に往復して平面上の布地を形成する編物で、さらに螺旋状に進行して円筒状布地を形成するものを丸編という。なお、よこ編の編目には表目と裏目とがあり、ループがV字形をして縦の方向に並んで見える面の編目が表目で、半円形のループが横の方向に並んで見える面の編目が裏目である。この表目と裏目との配列を変えることによって、いろいろな編組織が作られる。

これに対して、Fig.2.12 のように織物のたて糸と同様に整然と配列した各たて糸がループを作りながら、隣接する左右のたて糸とループでたて糸方向に連結されて布地を形成するものをたて編という。なお、たて編の編目には、Fig.2.13 のよう

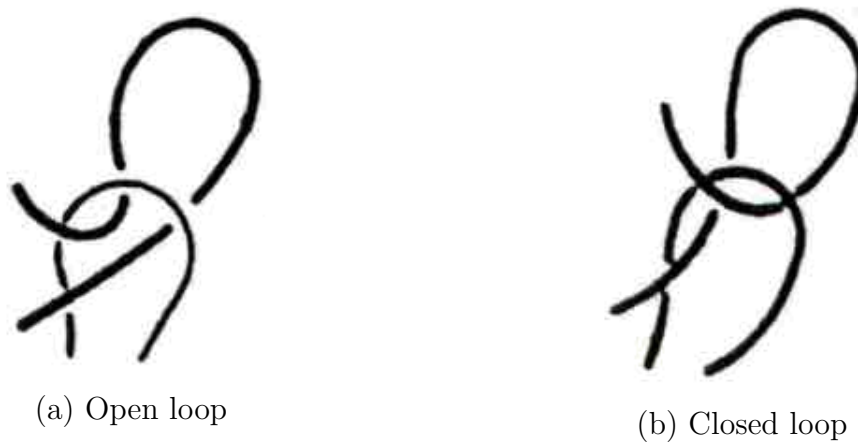


Fig. 2.13: Two loops of warp knitted fabric[19]

に開き目 (open loop) と閉じ目 (closed loop) の2種類があり、これらの配置を変えることによりさまざまな編組織が作られる。そのため、実際たて編の構造の解析には、編目が開き目か閉じ目かを判断することがきわめて重要となる。

よこ編、たて編はそれぞれさらにシングル組織とダブル組織に分けられる。シングル組織は、織物の一重組織のように平面的な組織であるが、ダブル組織は編目を作るための針床と呼ばれる針の列を2列利用して編むことにより複雑な組織を有する編物を編むことができ、これにより編物に厚みを持たせることができ、強度の向上や保温性などを持たせる効果がある。

編物の場合は、織物におけるパイル織のように糸が切断されたりすることはせず、理想的には一本の糸で初めから終わりまで編むことができる。実際に生地を縫い合わせることなく1本の糸から編物を作り上げる無縫製の編機も開発されている[20]。そこで、本研究では対象とする編物は特に限定せず、基本的には、よこ編、たて編それぞれについてシングル組織、ダブル組織を対象とする。

2.2 従来の組織分解自動化に関する研究の問題点とその解決策の検討

2.2.1 従来の組織分解自動化に関する研究

組織分解の自動化に関する研究は1980年代半ばから取り組まれている。

織物について考えると、前節で述べたように織物はたて糸とよこ糸が上下に組み合わされた布であるため、たて糸とよこ糸の交差状態はたて糸がよこ糸の上で交差しているのか、その逆かの2つの状態しかない。逆に言えば、すべてのたて

系とよこ系の交差点において交差状態を判定することができれば織物の構造は解析できたことに等しいといえる。したがって、従来報告されている組織分解の自動化に関する研究はすべて、たて系、よこ系の交差状態の計測を行うものである。たとえば、Huangら[21]は表面画像の輝度値を水平、垂直方向にそれぞれ合計した結果よりたて系、よこ系の交差点を求め、表面画像に現れる系配置の幾何学的特徴を頼りにして、たて系やよこ系の交差状態を認識し、織物の構造を識別している。また、Kuoら[22]は、試料の表面画像に対して、系のすき間をもとにたて系、よこ系の交差点を見つけ出し、一次統計、すなわち、輝度値の平均、標準偏差および二次統計、すなわち同時生起行列における相関、コントラストの4つの特徴量から Fuzzy c-Means 法を用いて交差点におけるたて系、よこ系の浮きを判定する手法を提案し、織物三原組織について自動判別を行っている。このほか、試料の表面画像を利用した織物の組織分解の自動化に関する研究がいくつか報告されている[23, 24, 25, 8, 26, 27, 28]。

一方、編物では、織物に比べてその構造が複雑なため、そもそも何を計測すれば構造を解析できたことになるのかの判断は難しく、組織分解の自動化に関する研究自体あまり報告されていない。近藤ら[29]は編み方の違いによりできる編み方固有の編目の穴形状に着目し、試料の表面から抽出した編目の穴形状をテンプレートマッチング手法により判別し、編み方の解析を試みている。

以上のように、従来の織編物の組織分解に自動化に関する研究はすべて試料の表面画像をもとに、幾何学的な特徴や輝度値の変化などを利用した研究、すなわち表面画像を利用した組織分解の研究とまとめることができる。

2.2.2 従来法の課題点とその解決法としての画像の拡張

従来の表面画像を利用した組織分解の研究は、試料の表面画像をもとに画像処理によって組織分解を試みているため、対象となる試料は一重組織の織物、シングル組織の編物など、平面的な構造の織編物に限定され、複数の層を有する重ね組織の織物やダブル組織の編物のような複雑な織編物には適用できないという共通の課題点がある。実際、論文中に重ね組織の織物、立体的な組織の編物への対応が課題として挙げられている。

また、近藤らの提案するテンプレートマッチング手法を利用した組織分解は、予め作成したテンプレートの編目の穴形状から実際の試料の編目の穴形状の判別を行っているに過ぎず、本質的には編物の構造を明らかにしているわけではない。すなわち未知の編物に対しては解析を行うことができないという根本的な問題点もある。

これら表面画像を利用した織編物の組織分解の欠点は、重ね組織の織物やダブル

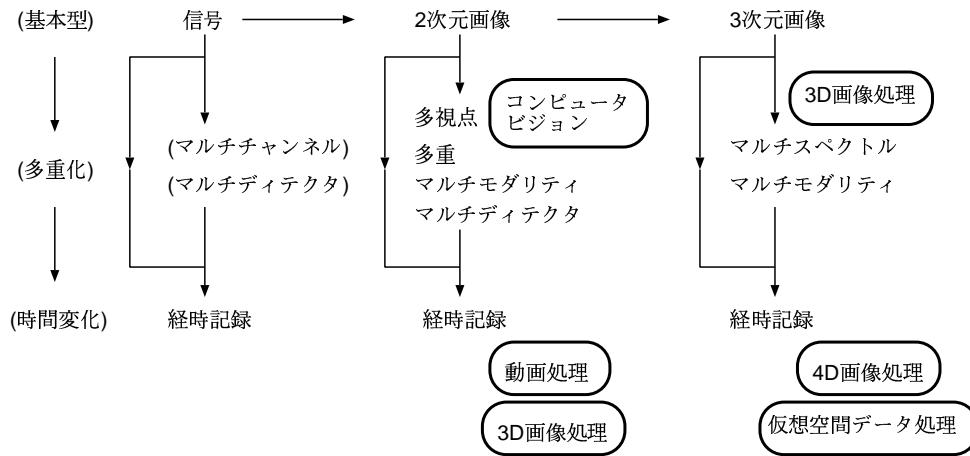


Fig. 2.14: Extension of image media[30]

ル組織の編物に対して、その内部構造を解析するのに必要とされる十分な情報を得ることができない点にある。そこで、まずは内部構造の解析に必要な情報を得ることを考えなくてはならない。一般に情報を担う信号の高度化は Fig.2.14 のように表される。すなわち、独立変数の増加と時間変数の導入による信号の高度化の2軸がある [30]。本研究の場合では、織編物の時経変化は対象としていないので時間軸は直接は関係しない。いま、従来法で利用されていた表面画像は2次元画像の基本形に相当する。これから情報量を増やすために考えられる拡張は2次元画像の多重化および3次元画像の基本型の利用である。したがって、これら二つの拡張について考える。なお、時間変化の伴わない2次元画像の多重化は3次元画像に含まれるが、2次元画像と3次元画像とではデータ量や処理の方法などについて大きく異なる。

はじめに2次元画像の多重化について考える。2次元画像の多重化として考えられる2次元画像は、織編物の面に対して平行な面の画像および、織編物の面に対して垂直な面の画像が考えられる。本論文では利用のしやすさ、取得のしやすさから、織編物の面に対して垂直な面の画像を採用する。これは、医用X線 Computer Tomography(以下、CT と略記する)の断層画像では、人体の軸に対して垂直な面で撮影されるのと同じである。また、織物の組織分解で必要とされる情報はたて糸とよこ糸の交差状態である。すなわち、織物の面に垂直な方向の情報が必要である。従来の表面画像を利用した組織分解では、たて糸とよこ糸の交差状態を輝度値などをうまく利用して取得していた。しかし、織物の面に対して垂直方向の画像を利用できれば、たて糸、よこ糸の交差状態を比較的簡単に取得できることが予想される。したがって、2次元画像の多重化において、有効な画像は織物の面

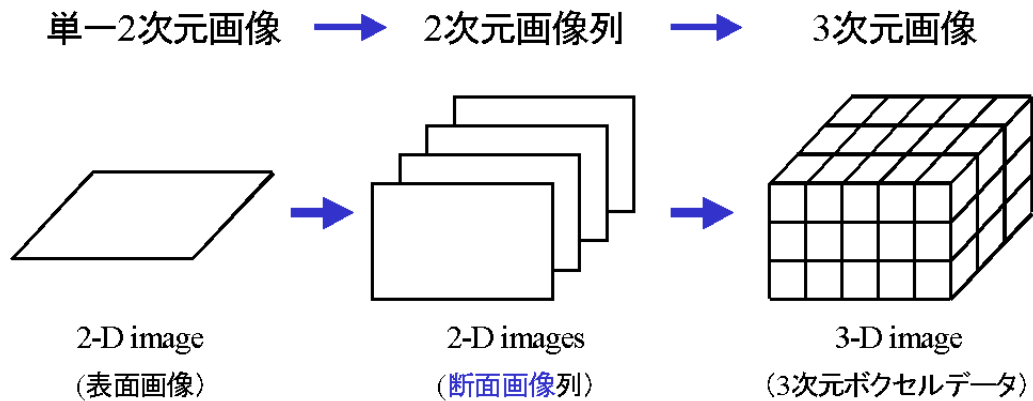


Fig. 2.15: Extension of textile fabric image

に対して垂直な方向の画像であると考える。

以上から，本研究において2次元画像の多重化では織編物の面に対して垂直な面での画像とする．本論文では，以後，織編物の面に対して垂直な面での画像を表面画像との区別から断面画像と呼ぶこととし，2次元画像の多重化の意味で用いる場合には，2次元画像列または断面画像列と呼ぶことにする．

つぎに3次元画像の基本型とは，断面画像列を一つの画像とみなしたもので，正確には $I \times I \times I \rightarrow R$ (I は全整数の集合， R は全実数の集合) で定義される [31]．ここで，各要素 $(i, j, k) \in I \times I \times I$ を画素 (voxel)，その値 f_{ijk} を濃度値と呼ぶ．本論文では，3次元画像の基本型を単に3次元画像，またはボクセルの集合の意味から3次元ボクセルデータと呼ぶことにする．2次元画像列では断面画像間の間隔は一般に2次元画像の解像度よりも低いが，3次元画像では処理のしやすさから等方性の解像度が望まれる．

Fig.2.15 に本研究における織編物の画像拡張の様子を示す．

2.2.3 画像の拡張のための断面画像の取得方法の検討

断面画像を取得する方法として，以前のわれわれの研究では試料を樹脂で固め，それを順次研削，研磨，撮影することによって取得する方法をとった [32, 73, 72]．この方法は比較的低コストで断面画像を取得できるという利点がある反面，試料を研削するための前処理および試料の研削，研磨，撮影という一連の作業を手作業で繰り返し行う必要があり非常に手間がかかる．また，断面画像間隔や各断面画像間の位置合わせなどに誤差が生じやすい．さらに，実際に対象となる織物を研削してしまうため，組織分解の対象が歴史的に価値のある織物など貴重な織物

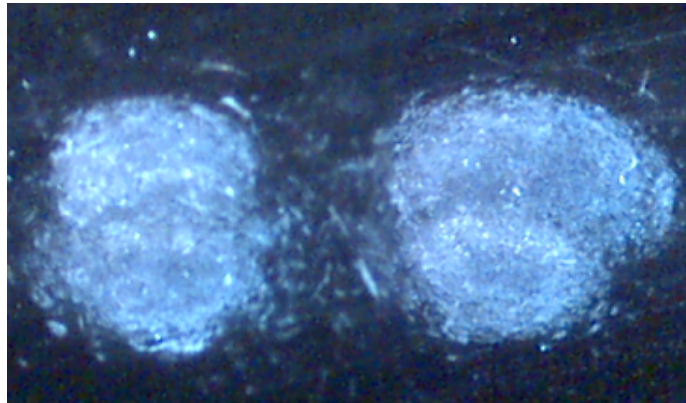


Fig. 2.16: Example of grinded cross-sectional image of plain woven fabric

にはこの方法を適用することができない．参考までに Fig.2.16 に研削，研磨による織物断面画像例を示す．青白い部分が糸断面であり，ここには互いに接し合っている2組の糸断面が現れている．

そこで本研究では，工業用 X 線 CT による非破壊断面画像取得方法を考える．この方法の最大の利点は非破壊的に断面画像が取得できる点にあり，歴史的価値の高い古布などにおいても傷付けることなく非接触に分析を行うことができる．また，簡単な設定により自動的に断面画像の取得ができるように装置を構成すれば，組織分解の自動化の上でも好都合である．前節で検討したように本研究では3次元画像を得るために解像度に加え，微小間隔での撮像も要求されるが，現在では糸の太さに対して十分高解像度かつ微小間隔で撮像できるコンパクトな CT 装置が開発されている．織編物の構造は基本的に固有の周期を有しているので，測定範囲は1完全組織，すなわち1周期分を含む大きさが必要である．実際には周期が既知ではないため，その周期を見つけいるという意味において，少なくとも2周期分の測定範囲が必要となる．すると，測定範囲は広くなるが，本研究で使用している CT 装置の撮像範囲は最大で 68mm 程度であり，解像度などの問題もあり一概にはいえないが，一般的な構造の織編物であれば本 CT 装置の撮像範囲内で必要な撮像が行えるものと考ええる．ただし，CT 装置の撮像範囲を越える場合は，試料を CT 装置の撮像範囲内の大きさに加工して撮像し，それらをつなぎ合わせて対応する方法となる．また，装置の物理的な制約からもともと大きな試料はある程度の大きさに加工しなければ装置に入らないという問題もあり，これらの場合は本研究の利点である非破壊検査は難しくなるが，X 線は織編物をよく透過するため，試料を丸めたり，折りたたむことでこれらの問題を回避できる可能性は十分にある．

なお，本研究で扱うX線CT画像は各画素がX線吸収係数値を256階調のグレースケールで表したデータとなっている．

2.3 組織分解のための構造分析の検討

本節では，組織分解を行うにあたり，どのような情報の抽出が必要かを検討し，新たに組織分解のための構造分析という考え方を提案する．また，本研究に関連する研究として，医用画像における画像計測を取り上げ，本研究と比較，検討を行い，織編物特有の問題を明確にする．また医用画像処理を参考に織編物の構造分析法の検討を行い，構造分析法の方針を決定する．

2.3.1 織編物の構造分析とその役割

組織分解はその目的に応じて，試料の組織図を作成することであったり，3次元の構造を解析することであったりとさまざまなことが考えられる．そこで，本研究ではこれら種々の要求に柔軟に対応するため，組織分解の上で必要な基礎的情報を得ることを目的の一つとする．そのような情報さえ獲得できればそれらをどのようにも応用できると考えられるからである．本論文ではこのように組織分解の上で基礎的情報を得ることを構造分析と呼ぶことにする．ここで，基礎的情報とは，各糸がほかの糸との位置関係を復元できる情報のことであり，具体的には各糸の位置情報がそれにあたると考えることができる．このとき必要な情報は各糸の相対的な位置情報であり，実際の各糸の絶対的な位置情報は必ずしも必要ではない．糸は円を任意の連続した曲線に沿って，その円ののる平面と任意曲線が常に垂直になるように移動させたときにできる軌跡としてモデル化できる．このとき円の中心の軌跡を糸の心線と呼ぶことにすれば，本研究では糸の位置情報を糸の心線についての位置情報として把握する．各糸との相対的な位置関係を復元することを考えると，糸の心線の位置はその糸の位置を代表しており，さらに誤差に対してロバストであると考えられるからである．なお，本研究では離散的なデジタル画像を用いるため実際には各糸の心線点列の位置情報を各糸の位置情報とする．

われわれは各糸の位置情報の応用の一つとして，LiaoとAkanur[33]の提案するGenerative Modelを参考に，織物の構造を3次元的に再構成することをこれまで検討してきた[32, 73]．すなわち，試料の構造を2次元的に表現する組織図とは異なり，3次元的に織編物の構造を表現することにより，糸の張り具合など組織図からではわからない特徴を観察でき，それによって実際の意匠や質感，また構造的な機能性を知ることのできる新たな織編物構造の解析方法を提供できると

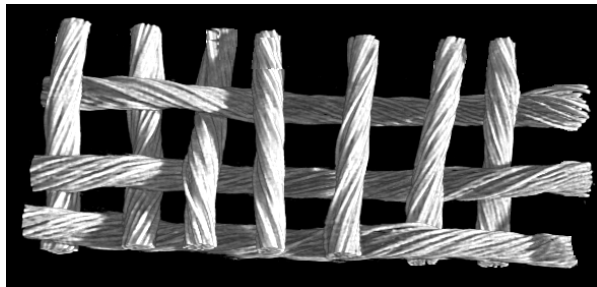


Fig. 2.17: Twill fabric structure reconstructed by volume rendering with its CT images

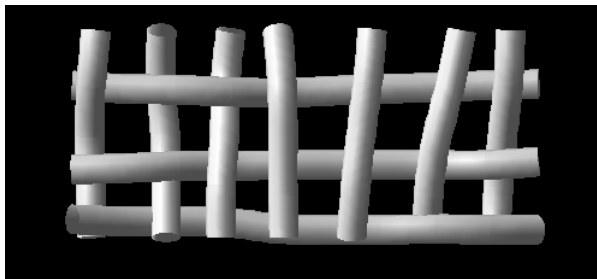


Fig. 2.18: Twill fabric structure reconstructed from positional information of each yarn estimated by proposed method

考える．さらに，3次元的に再構成された試料の構造は各糸の位置情報を得ているため，任意の糸を独立に表現することができ，多重織物のような立体的で複雑な織物構造や織物よりも構造が一見してわかりにくい編物においてこのような表現方法は構造理解に特に役立つと考える．たとえば，Fig.2.18とFig.2.17は，同じあや織物の3次元組織構造を表している．Fig.2.18はわれわれの提案する方法によって3次元組織構造を再構成したもので，Fig.2.17はCTによる断層画像をそのままCG技術の一つであるポリウムレンダリングによって3次元組織構造を再構成したものである．どちらもその外観は同じだが，提案する3次元構造再構成法ではFig. 2.19のように，各糸を独立に表現することが可能である．これは人間にも行うことができない，コンピュータならではの処理であり，いままでにない全く新しい構造解析方法の可能性を示している．

また，各糸の位置情報を得ているため，従来から組織分解結果として示される，織編物の設計図である組織図を作ることも可能であると考えられ，本研究では実際織物の組織図の自動作成を試みている [34, 67]．これら構造分析結果の可視化については第7章において詳しく述べる．

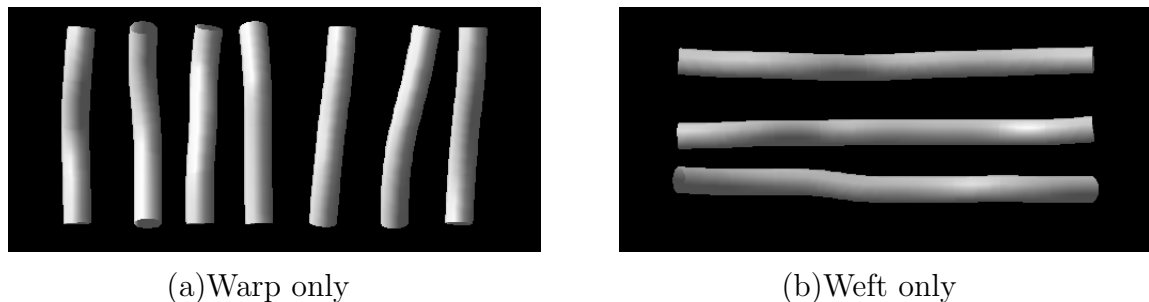


Fig. 2.19: Independent expression of each yarn

以上，本研究では，組織分解に伴う種々の要求に柔軟に対応するため，組織分解の上での基礎的情報を得ることを目的とする．組織分解の上での基礎的情報とは具体的には，試料となる織編物の断面画像列，3次元画像から各系の心線点列の位置情報を得ることであった．これはさらに抽象化すると，断面画像列，3次元画像からの線図形抽出問題として位置づけることができる．

2.3.2 織編物の構造分析と医用画像における線図形抽出問題の比較

本項では，本研究に関連する研究，すなわち線図形抽出に関して，医療分野で行われている線図形抽出について概観し，本研究における織編物の構造分析と比較検討を行う．医療分野における医用画像はCTの登場により早くから3次元画像処理が行われていた分野でもあり，線図形抽出問題に限らず，本研究にとってさまざまな示唆を与えてくれる．はじめに，医用画像計測に関する研究について簡単に述べ，続いて，線図形抽出問題について取り上げる．さらに，織編物の構造分析における処理と医用画像処理との比較，検討を行い，織編物特有の問題を明確にする．

医用画像計測

2次元画像や3次元画像は医用分野においても画像計測などに多く利用されている．特に3次元画像を用いた画像処理の基礎的な研究は1980年頃から始まり，2次元から3次元への手法の拡張や，新しい3次元処理アルゴリズムの提案がつつぎと行われている [35]．医用画像において利用される3次元画像は主にX線CT画像およびMagnetic Resonance Imaging (以下MRIと略記する)画像であり，ほかに超音波，Positron Emission Tomography(PET)などの画像がある．特に1990年頃，ヘリカルCTの実用化とともに研究は本格化し，等方ボクセルの高解像度3次元画像が容易に，かつ，大量に得られる時代となった．この変化の中で，膨大

な質の高い画像情報を効率よく利用して診断能を向上させる新しい診断技術に期待が高まっており [36]，3次元画像処理，とくに，特徴抽出やパターン解析などの技術は，臓器，腫瘍など利用上意味のある成分図形を抽出し，それらの特徴量を計測することで診断情報の定量化，病変候補の検出，あるいは，人体臓器の認識など，医師の判断を支援する技術として重要性を増し，それらのいくつかは，実際に画像診断支援システムや医療 Virtual Reality (VR) システムの中で使われている．たとえば，長谷川 [37] は3次元画像処理を支援するエキスパートシステムの一つとして，3D-IMPRESS と呼ばれるエキスパートシステムを提案している．3D-IMPRESS は，ユーザが原画像から抽出したいと思う特徴を直接図形の形 (サンプル図形とよぶ) で例示すると，それに必要な画像処理手順を自動構成するエキスパートシステムである．このため，ユーザは通常の画像処理エキスパートシステムにありがちな煩雑な対話処理に悩まされることなく，最適な画像処理手順を短時間で得ることができる．

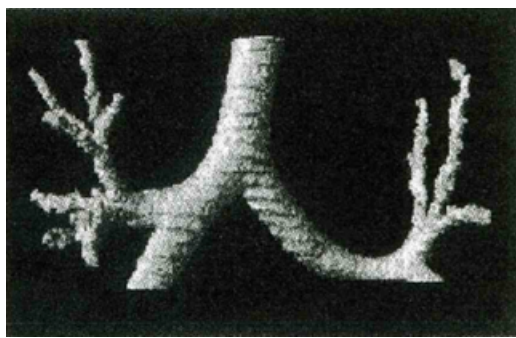
ここで，3次元画像処理においてははじめに行う基本的な処理は，注目する対象物，当面関心を持っている領域，あるいは，何らかの観点から意義のある部分を抽出することである．これをセグメンテーションという．さらに，抽出した領域を意味のあるデータに変換するため構造化が行われる [38]．

血管，気管支の抽出

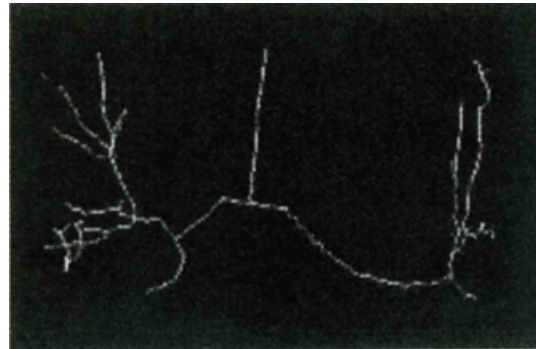
医用画像計測に関するさまざまな研究が報告されているが，この中で，3次元濃淡画像²から線図形抽出に関する研究も数多く行われている．3次元濃淡画像中の構造物の形状解析や位置合わせを行う場合などに，構造物の特徴的な線成分を用いることは非常に有効である [39]．特に，胸部疾患の自動診断や診断支援を精度高く実現するには，血管や気管支の3次元構造を正しく抽出し，その一部を病変部と誤ることがないようにする必要があり [40]，これらの一部は，胸部 CT 像における血管や気管支を認識するための前処理などに利用されている．また，線図形抽出結果をもとに仮想化内視鏡における自動ナビゲーション用パスを自動的に生成する研究なども行われてきた [41]．参考までに Fig.2.20(b) に気管支の線成分抽出の様子を示す．

血管や気管支など線状や円筒状の構造物を線図形に変換する際は，線図形を抽出する手法として主に追跡型と細め型の2つの手法に分けられる [39]．以下では，追跡型，細め型それぞれによる線図形の抽出として，これまでに報告されている血管，気管支の抽出に関する研究を概観していくことにする．

²3次元濃淡画像とは2値化された3次元画像との対比表現で，各画素がCT装置などで撮像された際のもとの濃度値を有している画像である．



(a) Bronchus region



(b) Center line of bronchus

Fig. 2.20: Example of extracting line figure[40]

追跡型による血管，気管支の線成分抽出 追跡型は，血管や気管支の中心などを追跡し，結果として血管や気管支の線図形を得る手法である．

この追跡型による血管，気管支の抽出方法として，たとえば気管支の伸びていく方向を示す3次元ベクトルを検出し，そのベクトルと垂直なつぎの観測面で気管支の断面領域を抽出し，抽出した断面領域が真に気管支の断面領域かどうかを判定するという手順を再帰的に繰り返すことによって気管支領域を追跡する手法が提案されている [40, 42, 43]．この手法は，気管支の形状だけでなく，たとえば気管支の伸びている方向やそこでの断面積，重心，枝分かれ情報など3次元的な構造も同時に得ることができ，またそれら抽出した気管支の断面領域の重心をつなぐことにより，気管支の線図形を抽出することができる．同様に血管の伸びていく方向に直交する断面の血管領域と思われる領域の中心らしさを追跡していく手法も提案されている [44]．また，ある程度の太さの血管はその中心付近の濃度値が高く，血管壁に近づくにつれて濃度値が低くなるという性質を利用し，この濃度値構造の尾根線を血管の構造を表す線として抽出している [45]．この手法では3次元濃淡画像の濃度値を第4軸目として，血管部分を4次元空間中の超曲面とみなしてこの超曲面の曲率を計算し，この曲率の大きさを追跡の条件として用いている．

細め型による血管，気管支の線成分抽出 細め型は，その目的により処理はさまざまな手法が提案されているが，基本的には線図形において消去可能なわち，消去してもそのトポロジーを保存する画素を消去していき，最終的に分岐，交差，空洞など特殊な場所を除いて太さが1であり，かつ，端点以外には消去可能な画素を含まなくなるまで細線化する処理のことである．

たとえば背景付き濃淡画像の細線化として，胸部 X 線 CT 像中の肺血管に対して，濃度値が小さい画素を優先的に削除する手法が提案されている [46]．しかし，

図形の形状よりも濃度値の影響を強く受け、図形の濃度値が理想心線³付近ほど高い値をもつ場合には有効であるが、濃度値雑音に弱いなどの欠点もある。さらにこの手法の前処理として重み付き距離変換を利用する方法も提案され、図形の中心線と尾根線を折衷した心線が得られている。ここでも血管の中心付近の濃度値がその周辺に比べて高くなっている性質を利用し、形状雑音によって生じやすい偽枝、いわゆるひげの発生を抑制している。ここで、距離変換とは図形内の各点に背景からその点までの距離を与える変換である[47]。この場合、その距離を濃度値で重み付けしたものが重み付き距離変換である。背景付き濃淡画像とは、処理対象となる領域があらかじめセグメンテーションされた濃淡画像のことである。

また、細線化に伴う図形の縮退とひげの発生の量を調節できるような細線化手法も提案されている[48]。この手法では、一度、スケルトン変換を行い、そのスケルトンの集合の一部を削減し、残りのスケルトンの集合を細線化における永久保存点として、再び上記と同様な細線化を行う。この手法では、スケルトン集合の削減度合いを選択することにより、縮退と偽枝の発生量の制御を行っている。なお、スケルトンとは、直観的に言えば距離変換の極大点の集合のことであるが詳しくは文献[47]などを参考にされたい。

織編物の構造分析と医用画像処理の比較

本研究の目的である織編物の構造分析は各系の中心点列の位置情報を得ることであり、線図形の抽出にほかならない。医用画像における線図形抽出問題と本研究の問題は関連性が高く、本研究においても追跡型と細め型を検討することは有意であると考えられる。そこで、以下では、織編物における追跡型、細め型による構造分析を想定し、それぞれ医用画像の手法と比較しながら利点、欠点などの検討を行う。はじめに3次元画像処理の基本となるセグメンテーションについて比較するが、主に医用画像のセグメンテーションを概観する。

セグメンテーション処理の比較 3次元画像においてははじめに行う基本的な処理として、注目する対象物、当面関心を持っている領域を抽出するセグメンテーションを行わなければならないことはすでに述べた。この場合、注目する対象物とは織編物画像では糸であり、医用画像ではたとえば血管や気管支などがそれにあたる。織編物画像の場合では、糸のほかは撮影されないため糸と背景とは容易に区別することができるが、医用画像の場合、各臓器が詰まっている体内から血管や気管支を抽出することになり、CTの場合ではX線吸収係数を頼りに、またMRI

³医用画像分野では血管や気管支の中心はよく芯線と書かれるが、本論文では心線に統一して表記する

の場合ではMR値を頼りにさまざまなセグメンテーション手法が提案されている。ここでは、画像に表れる対象物の性質、特徴を利用したセグメンテーションおよびモデルを利用したセグメンテーションについて簡単に述べる。

特徴利用によるセグメンテーション もっとも単純なセグメンテーション手法としてしきい値処理がある。しかし、この手法は簡単である反面、すべての血管や気管支を一度に抽出することは不可能である。またセグメンテーションにおいて一般的な領域拡張法も複数の血管内で拡張が同時に進行するため、各拡張点に異なる拡張条件を適用することは難しい[49]。そこで、血管の中心ほど輝度値が高いことに着目して3次元線集中フィルタを利用し、頭部Magnetic Resonance Angiography(MRA)データから血管の形状と輝度の勾配の向きを利用した3次元セグメンテーション処理が提案されている[50]。しかし、ノイズの含まれる環境下では過敏に反応して、誤抽出、さらに、細かい血管像は輝度分布が一様であるため、輝度勾配ベクトルの向きがモデルのようにならず、抽出に失敗し、しきい値処理よりも劣る場合もある。また、4次元超曲面の主曲率のパターンの組み合わせを拡張条件とした領域拡張を行い、3次元胸部X線CT像から肺野内の血管抽出を行っている研究もある[51]。やはりこの手法も、血管の中心付近ほど濃度値が高いことを利用している。これらのセグメンテーションにおいて、いずれの手法も画像のもっている性質、特徴などが有効に利用されていることがわかる。血管抽出の場合では、ほとんどの手法が中心付近ほど濃度値が高い性質を利用している。

モデル利用によるセグメンテーション 多くのセグメンテーション手法のうち、血管や気管支のモデルをたて、そのモデルを実際の3次元画像に最適にあてはめることによって対象物の抽出を行う手法がある。

たとえば、2次元画像を利用しているが、胸部X線像からSN比が低い抹消血管影を安定して自動抽出する手法として、その輪郭形状や分岐部、交差部における形態的特徴を考慮したDeformable modelを提案している[52]。この手法は血管影の太さや位置に関する情報の欠落に対処するため、スケールスペースを基礎にした処理を導入するとともに初期形状の自動設定機能、および抽出過程でのトポロジー可変機構を付加することによってより自動で抽出が行っている。この手法は事前知識を有効に利用した心線と図形の幅を用いて輪郭線を定義していることに特徴がある。同様にあらかじめ作成した大動脈および肺動脈心線モデルを利用して、コントラストの低い、非造影胸部CT画像からそれぞれの心線を抽出し、得られた心線から血管領域の復元を行っている。CT画像の心線モデルあてはめでは、個人差など考慮しておおまかにあてはめを行う大局モデルあてはめと、モデルの各制御点もあてはめに用いて精度よく心線を抽出するための精密モデルあてはめ

の2段階からなり、実際の肺動脈および大動脈の抽出を行っている [53]。なお、この手法では、肺動脈の抽出には大動脈の抽出結果を利用することによって誤って大動脈の心線にあてはまるのを防いでいることに特徴がある。

また、セグメンテーションとは若干異なるが、モデル利用に関連し、肺野内すべての正常器官の3次元構造を物体モデルとして計算機内に再現し、それを知識として利用し、候補陰影を認識する手法の確立を目的として、実際の人体断面画像から領域拡張法により抽出した血管、気管支領域から円筒モデルを利用することによって、血管、気管支モデルを構築している [54]。ただし、この手法ははじめに手動で円筒モデルを大まかにあてはめる必要がある。

以上、モデル利用によるセグメンテーションでは、SN比やコントラストの低い画像に対して、モデルを利用することによって、有効に対象領域の抽出を行っていると言える。

線図形抽出処理の比較 追跡型、細め型それぞれの線図形抽出法について、血管、気管支の場合と本研究のような織編物の糸の場合とでどのように処理が異なるかを考察する。

追跡型による線図形抽出処理の比較 追跡型による線図形の抽出では、対象とする領域がなんらかの方法で抽出できなければならない。領域拡張法などから明らかかなように、血管や気管支の場合、CTのX線吸収係数により、ある程度対象領域を抽出することができる。

織編物の糸を追跡すること考えた場合、領域抽出の問題は多少異なる。すなわち、糸追跡における対象とする領域とは糸一本のことである。しかし、構造上織編物は糸同士が互いに接し合うため、一本の糸を区別するのは非常に困難である。Fig.2.21は平編物の断面画像であり、Fig.2.21(a)は元の画像、Fig.2.21(b)の青い円は一本の糸断面を表しているが、見比べてわかるように、糸は単なる繊維の集合体であるため糸の張力や外部の圧力などで膨脹収縮して断面形状が簡単に变形してしまい、人間がみてもそれぞれの糸断面を個別に認識することは難しい。

以上より、追跡型を用いる場合は、追跡したい糸とほかの糸を個別に認識するために何らかの工夫が必要となる。

細め型による線図形抽出処理の比較 細め型でよく用いられる細線化はトポロジーを変化させないでこれを行うことを意味することが多く [41]、細め型による線図形の抽出の多くはトポロジーの保存が細線化に対する要求条件とされている [48]。ここでトポロジーとは穴や連結成分の保存である。

しかし、織編物の場合では、前述のとおり区別のつかない糸同士が接し合ってい

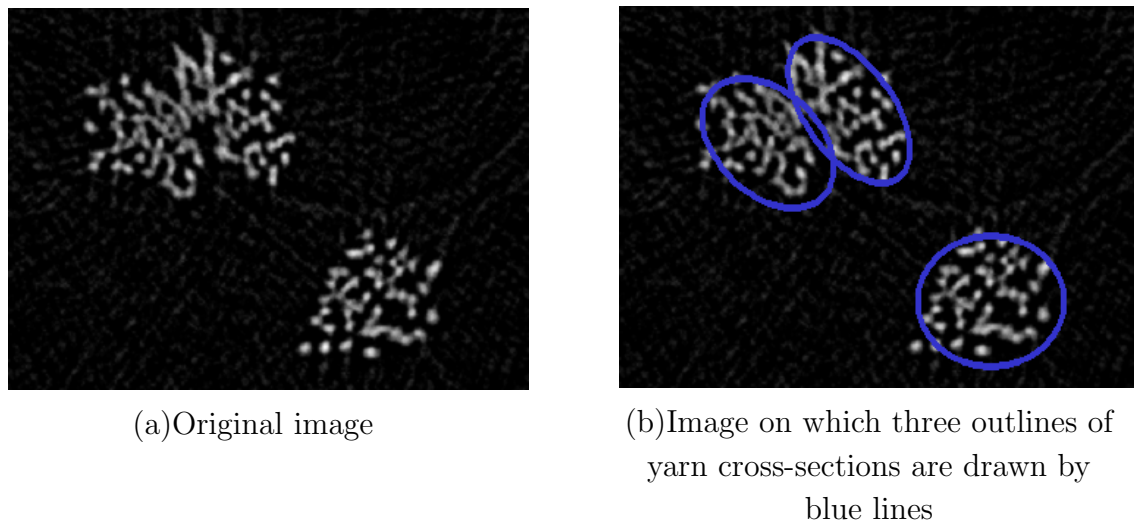


Fig. 2.21: Yarn cross-sections of plain knitted fabric

るため、トポロジーを保存すると、それら箇所は最後まで連結したまま残り、結果としてどのように糸同士が交わるのかがわからなくなる。すなわち、トポロジーを保存すると各糸の心線点列を得ることができず、糸同士の位置関係を復元できる情報を得るという構造分析の目的を果たせない。また、トポロジーを保存させない細線化も考えられるが、その場合、どこで連結成分を切断し、どこは保存するのかといった判断は非常に難しいと予想される。ほかにも、先述したとおり、細線化処理では本来存在しない枝（偽枝）が生成されることはよく知られており、偽枝の除去は容易ではない [53]。

結局、細め型の場合は、基本的に濃度値に関する局所的条件を満すある種の特徴点を抽出するものであり、抽出結果は線状になる傾向はあっても積極的に線状図形を抽出するアルゴリズムにはなっていない [45] 場合が多い。したがって、織編物構造分析において細目型による処理は適していないといえる。

2.3.3 織編物の構造分析に適した心線点列推定方法の検討

以上、追跡型と細め型の線図形抽出法について考察してきたが、織編物の構造分析では、糸同士が接しあっていることが線図形抽出の最大の問題点であることがわかる。このとき、細め型はその処理方法から本研究には適していないことがわかった。そこで、本研究でも追跡型の織編物構造分析を行っていくことにする。しかしながら、追跡型においても、追跡したい糸とほかの糸を区別、分離するため何らかの工夫が必要である。ここで、SN比やコントラストの低い画像に対してモセグメンテーションを行うことのできる、モデルを利用したセグメンテーショ

ン手法に注目する。SN比やコントラストが低いということは、領域の区別が難しいということである。この場合、モデルはCT値のみでは区別のつかない部分の輪郭を決めたりするために有効に使われ(あるいはモデルを手がかりにする以外に方法がない) [38], モデルを利用することで形状的な特徴などから区別, 分離を行っているといえる。本研究の場合では, 接し合った糸同士というのはコントラストが全くないのと同値であるが, モデルを利用し, 形状的な特徴などをうまく利用することで, 接し合った糸同士を分離できる可能性があるかもしれない。

2.4 本章のまとめ

本章では, 組織分解における問題を整理し, 明確にするための諸検討を行った。はじめに本研究で扱う糸について検討し, フィラメント糸に限定して扱うこととした。続いて織編物の性質および分類について述べ, 織物については一重組織および重ね組織を研究対象とすることとし, 編物のたて編の構造解析において, 開き目と閉じ目を判断することが重要であることについて述べた。さらに, 従来の組織分解における自動化に関する研究について概観し, その課題を検討するとともに根本的な問題点として, 構造を解析する上での情報が足りないことを明らかにした。そこで本研究では情報を荷なう信号の高度化として画像の拡張を考え, 2次元画像列, および3次元画像を用いることにした。その画像の取得方法として, 非破壊的に断面画像を撮像できるX線CT装置を用いることとした。また, 構造分析の役割として, 組織分解のさまざまな要求を考慮し, 組織分解の上で必要な基礎的情報, すなわち各糸の心線の位置情報を得ることを本研究の問題と設定した。本論文ではこの組織分解の上で必要な基礎的情報を得ることを構造分析と呼ぶこととした。また本研究は2次元画像列, 3次元画像からの線図形抽出問題と位置づけることもでき, その関連分野として医用画像における線図形抽出問題について概観し, 血管や気管支の抽出によく用いられる追跡型および細線型の線図形抽出について織編物の構造分析と比較, 検討を行った。その結果, 織編物の構造分析の固有の難しさは接しあっている糸同士を個別に認識することであると本研究の問題を明確にした。織編物の構造分析においては細め型による処理は適しておらず, 追跡型を採用することとし, モデルをうまく利用することによって, 接しあっているほかの糸を区別して糸追跡を試みることにした。

第3章 断面画像を利用した織物の構造分析

前章までの準備，問題設定に対して，本章から設定した問題に対する織編物の構造分析について検討を行う．本章では断面画像列を利用した織物の構造分析，すなわち糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法について述べる．糸断面モデル相関法は糸断面のモデルに重み付けを行い，糸断面の中心を推定していることに特徴がある．また比較のため，モデルを使わず糸断面画像の性質や特徴のみに着目し，それらを利用して糸追跡を行う方法も提案し，両手法について比較，検討を行い，提案手法の有効性について考察する．さらに糸断面モデルの重み関数について検討を加え，注目糸以外の糸の影響を低減し，より精度よく糸断面の中心を推定できる重み関数を提案する．従来表面画像を利用した組織分解では解析できない多重織物として，実際の二重織物に対し糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法を適用し，本手法の有効性の確認を行う．最後にモデルの役割について考え，モデルの構築に何が重要であるかを議論する．

3.1 織物糸心線点列推定のための画像利用方法の検討

追跡型とは線状，円柱状，あるいは円筒状の対象物に対し，その対象物が伸びていく方向に直交する断面中心の追跡を行う処理で，本論文では糸を追跡の対象としているので，この場合，糸の伸びていく方向に対して直交する糸断面の中心を追跡していくことになり，この糸断面中心点列こそ心線点列にほかならない．対象物が伸びる方向が既知ではないため，まずはその断面を計算する必要がある．しかし，再度織物の特徴を考えると，織物とは垂直に交わるたて糸とよこ糸を上下に組み合わせて作る布のことで，糸は基本的に途中で折り返されたりすることはせず，たて糸はたて糸同士，よこ糸はよこ糸同士互いに交わることなく平行である．すなわち，織物の場合，各糸の伸びていく方向はおおよそ決まっており，たて糸，よこ糸の軸に直交する断面は，たて糸はたて糸同士，よこ糸はよこ糸同士同一の断面である．糸の伸びていく方向に対し正確には直交しないが，これらの断面を利用することで処理が簡単になる．

以上の考察より織物について、たて糸、よこ糸それぞれの軸方向に垂直な2方向の断面画像列を用いて各糸について同一糸の糸断面の中心点を推定することで各糸の心線点列を得ることとする。

3.2 織物糸心線点列推定法

前節で検討したように糸の軸方向に対してそれぞれ垂直な断面画像が得られていることを前提として、2.3.3で検討したように、モデルを利用した追跡型の処理を用いた各糸の心線点列推定法について述べる。また、比較のため、繊維断面の集合として現れる糸断面の模様に着目した、モデルを利用しない追跡型の糸心線点列推定法についても示す。

3.2.1 糸断面モデル相関法による糸心線点列推定

はじめに、糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法の手順を以下に示す。後述する糸断面モデル相関法とは断面画像に現れた糸断面の中心点を推定する方法である。

まず糸心線点列推定開始のための初期設定を行なう。ここでは、第1断面画像の糸断面におおよその中心点座標を与える。この作業は人間が断面画像を見て行なう。つぎに、この初期点をもとに糸断面モデル相関法によりその糸断面の中心点を推定する。そして、推定された中心点位置を第2断面画像に継承する。このとき、推定された中心点位置をそのまま次断面画像に継承すると次断面画像の同一糸の糸断面内にその中心点位置を継承できる程度に前後二枚の断面画像間隔が狭いことを前提にしていることに注意されたい。このような前提が満たされているものとして、継承された位置を第2断面画像における中心点推定の初期点として、また糸断面モデル相関法によりその糸断面の中心点を推定する。この手順を最後の第N断面画像まで繰り返し行なうことで最終的に糸の心線点列を得る。

つぎに、糸断面モデル相関法について述べる。本手法では糸断面モデルと呼ばれる関数と断面画像との相関をとる。このとき、本論文では一般的なフィラメント糸を対象としていることから、糸の軸方向に垂直な断面画像に現われる糸断面は円形に近い。したがって、糸断面モデルは円形状とし、さらに糸の中心を推定するとともに、背景雑音やほかの糸などの影響を抑えるため、糸断面モデルに重みを持たせた式(3.2)で与え、これと断面画像との相関を式(3.1)のように計算する。評価関数値 J_2 が最大するとき最も糸断面モデルと断面画像中の糸断面との相関が高く相互の位置関係が合致していると考えられるので、このときの糸

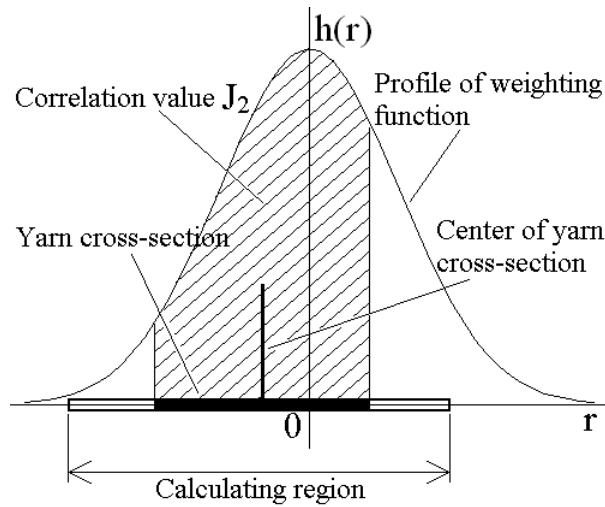


Fig. 3.1: Profile of the weighting function $h(r)$, a yarn cross-section, its center, the calculating region, and the correlation value J_2 , which are respectively described in two-dimensions

断面モデルの中心点を糸断面の中心点として推定する。

$$h(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \exp\{-s r(\mathbf{x}, \mathbf{p})^2\} \quad (3.1)$$

$$J_2(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{S}} h(\mathbf{x}, \mathbf{p}) f(\mathbf{p}) \quad (3.2)$$

$$r(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \|\mathbf{p} - \mathbf{x}\| \quad (3.3)$$

ここで、 \mathbf{x} は糸断面モデルの中心点座標、 \mathbf{p} は計算点の座標、 h は重み付き糸断面モデル (本論文では単に糸断面モデルの重み関数と呼ぶこともある)、 f は糸部分が1、背景部分が0になるように断面画像を2値化したもの、 r は糸断面モデルの中心点と計算点との距離である。また、 S は計算領域を表し、 s は糸断面モデルの重み関数の形状を決定する変数である。CT画像をみると、糸断面の大きさはおよそ判断することができるため、糸の直径をもとに本研究では、計算領域は糸断面よりひと回り大きくなるように、また h の半値幅が糸の直径となるように計算領域と変数 s の値をそれぞれ決定している。ただし、これらの変数値の設定法には検討の余地が残る。

簡単のため2次元で考えると、Fig.3.1に示すように J_2 は糸断面部分の範囲にわたる糸断面モデルの重み関数の面積 (斜線部) に相当し、明らかに糸断面の中心が糸断面モデルの中心と一致するとき J_2 は最大となる。

なお、糸断面は Fig.2.21 のように繊維の集合体であるため、糸断面の2値化画像には繊維間のすき間が穴のように多く存在する。そこで、本研究では雑音除去

も兼ね、この穴埋めのために2値化画像に膨脹収縮処理を行っている。これら画像の2値化、膨脹収縮処理はある意味では情報を捨てていることに等しく、断面画像の利用方法についてはさらに検討が必要である。

3.2.2 断面画像間相関法による糸心線点列推定

一方、CT画像は断面画像間隔が非常に狭いので連続する二枚の前後断面画像間の相関が非常に高い。このことに注目して前後断面画像間の相関をとることで糸断面の中心点を推定する方法が断面画像間相関法である。次項では、この方法と糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法との両者についてその得失を比較し、糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法の有効性について議論する。

断面画像間相関法による糸心線点列推定法の手順は以下のとおりである。

まず糸心線点列推定開始のために初期設定を行なう。このため、第1断面画像の糸断面について中心点座標を与える。糸断面モデル相関法と同様人間が断面画像を見て中心点座標を与えるが、糸断面モデル相関法とは異なり、中心点座標を推定し直すことなく、与えた中心点を糸断面の中心として以降の処理が進められるので、慎重に中心点座標を与えなくてはならない。つぎに、この初期点をもとに後述する断面画像間相関法により第2断面画像の糸断面の中心点を推定する。そして、推定した中心点位置をもとに断面画像間相関法により第3断面画像の糸断面の中心点を得る。この手順を最後の第N断面画像まで繰り返し行なうことで最終的に糸の心線点列を得る。

この場合、断面画像間相関法では、第 l 断面画像と第 $(l+1)$ 断面画像との相関を式(3.4)によって計算し[55]、評価関数値 S が最大になるとき、第 l 断面画像の糸断面の中心点と同位置に対応する第 $(l+1)$ 断面画像の点を第 $(l+1)$ 断面画像の糸断面の中心点として推定する。

$$S(x_{c(l+1)}, y_{c(l+1)}) = \frac{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n D_l(i, j) \times D_{(l+1)}(x_{c(l+1)}, y_{c(l+1)}, i, j)}{(2m+1)(2n+1)\sqrt{\sigma^2(I_l) \times \sigma^2(I_{(l+1)})}} \quad (3.4)$$

$$D_l(i, j) = I_l(x_{cl} + i, y_{cl} + j) - \overline{I_l(x_{cl}, y_{cl})} \quad (3.5)$$

$$D_{(l+1)}(x_{c(l+1)}, y_{c(l+1)}, i, j) = I_{(l+1)}(x_{c(l+1)} + i, y_{c(l+1)} + j) - \overline{I_{(l+1)}(x_{c(l+1)}, y_{c(l+1)})} \quad (3.6)$$

$$\overline{I_k(x_{ck}, y_{ck})} = \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n \frac{I_k(x_{ck} + i, y_{ck} + j)}{(2m+1)(2n+1)} \quad (3.7)$$

$$\sigma(I_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n I_k^2(x_{ck} + i, y_{ck} + j)}{(2m+1)(2n+1)} - \overline{I_k(x_{ck}, y_{ck})}^2} \quad (3.8)$$

ここで、 (x_{ck}, y_{ck}) は第 k 断面画像の推定糸断面中心点座標、 I_k は輝度値、 $\overline{I_k(x_{ck}, y_{ck})}$ は点 (x_{ck}, y_{ck}) を中心とする窓 $((2m+1) \times (2n+1))$ 内の I_k の平均値であり、 $\sigma(I_k)$ はその標準偏差である。 S は -1 から 1 までの範囲内にあり、 1 に近ければ近いほど相関が高い。

3.2.3 糸心線点列推定法の比較実験

実際の織物の CT 画像を用いて、糸断面モデル相関法および断面画像間相関法による方法で行なった糸心線点列推定実験について比較検討し、糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法の有効性を検証する。

実験の概要

本実験で使用した織物の写真を Fig.3.2 に示す。糸の太さが約 0.1mm のあや織物¹である。断面画像撮像には SkyScan 社製 1072 型マイクロ CT スキャナ [56] を用いた。1 ピクセルあたりの分解能は $2.1\mu\text{m}$ 、断面画像取得間隔は平均 $4.1\mu\text{m}$ で、断面画像面とよこ糸が平行になるように試料を固定して撮像した。断面画像の一例を Fig.3.3 に示す。白い円形部分がたて糸の糸断面、白い細長い部分がよこ糸の糸断面部分である。便宜上、断面画像の横軸方向を x 軸、縦軸方向を z 軸として、奥行き方向を y 軸とする。また、これらの断面画像をそのまま積み重ねて 3 次的に再構成した構造を Fig.3.4 に示す。点線は Fig.3.3 の断面画像が使われている箇所である。よこ糸の糸心線点列推定のための $y-z$ 断面画像には本来、解像度の点から $y-z$ 断面を撮像した CT 画像を用いるべきだが、本実験の $y-z$ 断面画像では $x-z$ 断面を撮像した CT 画像全体から等 x 座標の画素を集めた擬似断面画像を用いている。

糸断面モデル相関法による糸心線点列推定

断面画像は判別分析法により 2 値化後、糸断面部分の穴埋めと、雑音除去のために膨脹収縮処理を行なっている。

得られた各糸の心線点列をもとに提案する 3 次元組織構造再構成法により試料の構造を 3 次的に再構成したものを Fig.3.5 に示す。たて糸、よこ糸の交差する点で異なる方向の糸の影響を受けて糸が歪んでいる箇所があるものの、Fig.3.4 と見比べると各糸同士の位置関係が正確に復元されていることがわかる。つまり、糸

¹専門家の間では「六つあや」と呼ばれ、 $\frac{4}{2}$ と表記されるあや織物である。

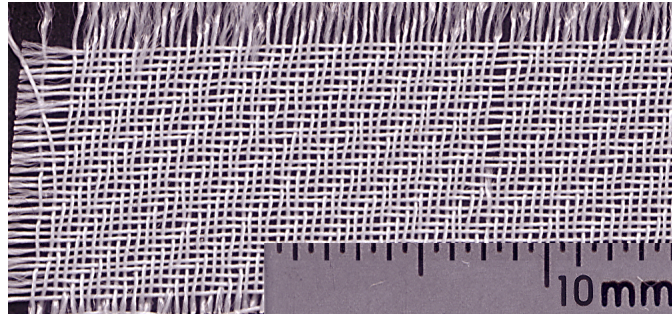


Fig. 3.2: Photograph of the sample twill fabric

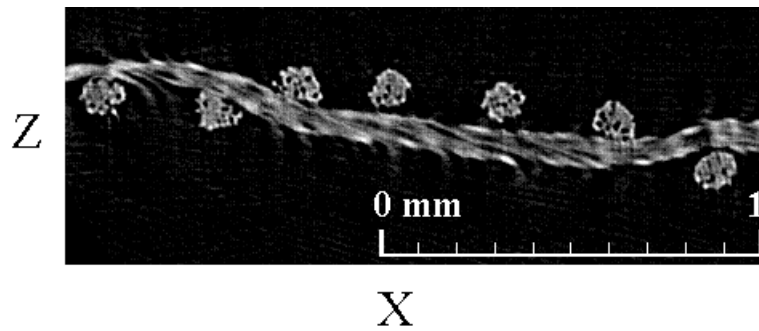


Fig. 3.3: Example of CT images of the sample twill fabric

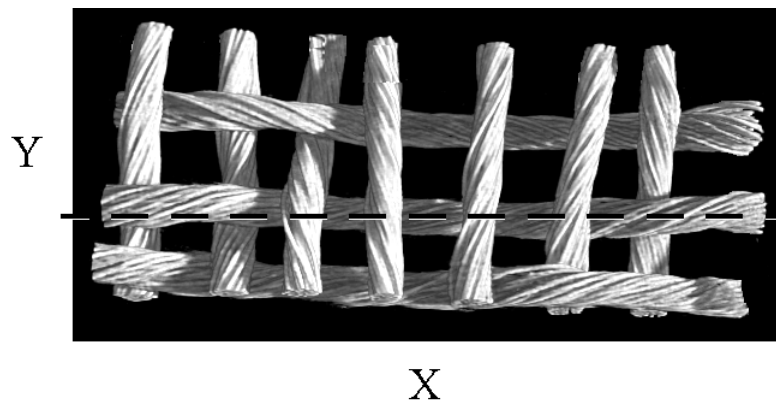


Fig. 3.4: Twill fabric structure reconstructed by volume rendering with CT images (Dotted line indicates the portion for which the CT image of Fig.3.3 is used)

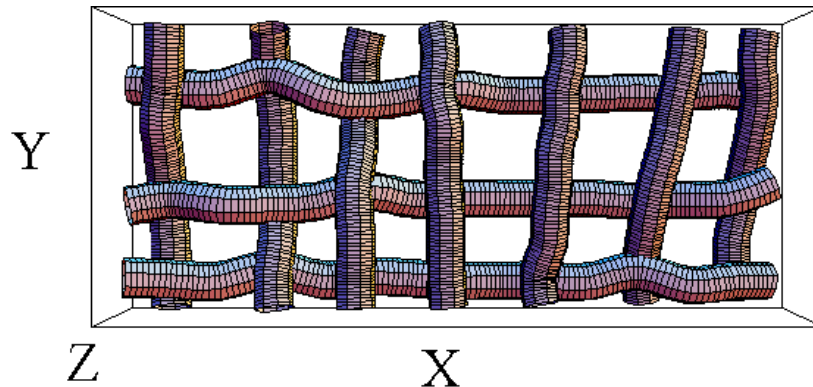


Fig. 3.5: Twill fabric structure reconstructed from the positional information of each yarn estimated by the yarn cross-sectional model correlation method

断面モデル相関法による糸心線点列推定法により各糸の位置情報が正しく得られていると言える。

断面画像間相関法による糸心線点列推定

断面画像間相関法では、断面画像として、X線の吸収係数データとして得られたCT画像をそのまま用いている。なお、CT画像の各画素値は2値ではなく256階調のグレースケールで得られている。

得られた各糸の心線点列をもとに試料の構造を再構成したものをFig.3.6に示す。各糸が大きく歪んでいる箇所があるものの、Fig.3.4と比べると各糸の位置関係は正確に復元されていることがわかる。なお、窓の大きさはさまざまな大きさを試しFig.3.4と比べて最も結果の良い大きさを利用している。図において糸形状が大きく歪んだ原因は、推定された糸断面の中心点の誤差と糸の撚りの影響が考えられる。推定された糸断面の中心点は真の中心点からずれ出すと、糸が撚られているため前後糸断面の相関をとる場合中心点も一緒に回転してしまい、その結果糸形状が大きくゆがんだものと考えられる。

糸断面モデル相関法と断面画像間相関法の比較

まず糸断面モデル相関法は処理自体が本質的に糸断面の中心点を推定する処理であるので、各糸の心線点列を推定するという本研究の目的に直接沿ったものである。計算領域内に異なる方向の糸などの画像成分が入るとその影響を受けるが、その画像成分が計算領域内からなくなると自動的に受けた影響を修正することが

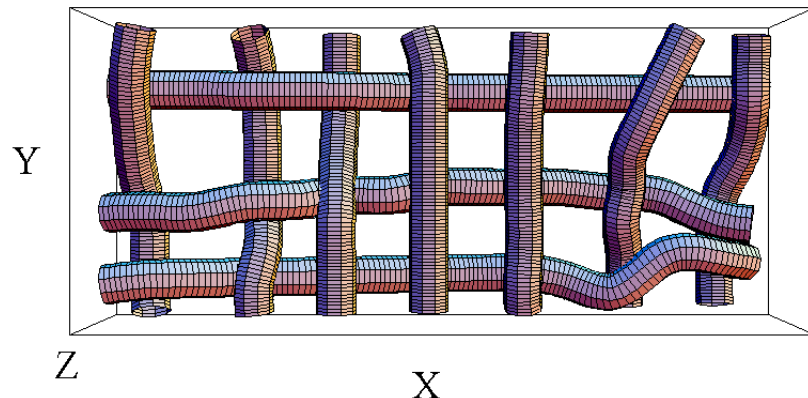


Fig. 3.6: Twill fabric structure reconstructed from the positional information of each yarn estimated by the cross-sectional images correlation method

できる．また，相関をとる際の糸断面モデルに関するの重み関数を変えることによってほかの糸などの雑音による影響を軽減できる可能性もある．この重み関数については事項で詳しく検討する．

これに対して，断面画像間相関法は本質的には画像間の相関をとり，画像を前画像に対してどれだけ移動させたとき両者の画像がもっとも似た画像に見えるかを求め，中心位置もそれだけ移動したと考える処理である．したがって，処理を進めるにしたがい注目する糸断面内をはずれ，関心の対象である糸断面からまったくはずれた位置に糸断面の中心点を推定する可能性が十分にある．今回用いた画像間の相関の計算では，糸の撚りの影響などを考慮していないため改善する余地はあるが，たとえ改善してもこの性質は変わらない．

以上より，糸断面モデル相関法にはその処理自体に糸断面の中心点を推定するという利点があり，糸心線点列推定に適していると言うことができる．

結局，医用画像における細め型の線図形抽出同様，断面画像間相関法による糸追跡法は基本的に濃度値に関する局所的な条件を満すある種の特徴点を抽出するものであり，抽出結果は心線を抽出する傾向はあっても，本質的には中心点の追跡を行っているわけではない．糸断面モデル相関法のように，モデルを利用をすることによって，積極的に目的を達成するための処理系をつくることができる．ただし，モデルを作る際，どんな場合でも正確な数式モデルが適切とはかぎらない．問題に応じて適切なモデルを使い適切なデータ処理を行うことが肝要である [16]．この場合，糸断面モデルにおける重み関数が糸心線点列推定処理に重要な役割を果たしている．以下では，この重み関数についてさらに検討していく．

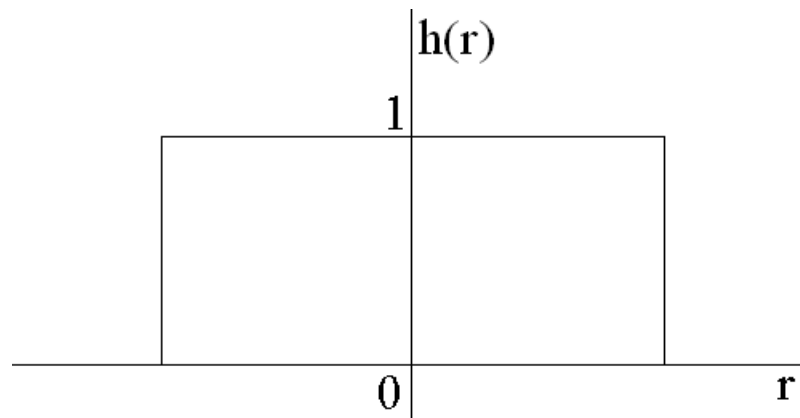


Fig. 3.7: Profile of a rectangular weighting function

3.2.4 糸断面モデルにおける重み関数の検討

3.2.3 でふれたように，糸断面モデル相関法における重み関数は糸断面モデル相関法における糸断面の中心推定に重要な役割を果たしている．仮に重み関数を考えない場合，すなわち重み関数が単純に Fig.3.7 のような矩形形状の関数であった場合を考える．たとえば，矩形の領域を実際の糸断面の直径にあわせると，糸断面と糸断面モデル(矩形部)で相関をとった場合は前項で考えたような重み関数と同様にちょうど糸断面の中心と糸断面モデルの中心が一致したとき相関値が最大になり，糸断面の中心を推定できる．しかし，糸断面が糸の張力や外部からの圧力により膨脹収縮した場合，相関値の最大値が一意に決まらず，不定領域が存在してしまい，重み関数を考えない場合はやはり本質的に糸断面の中心を推定するという処理になっていないことがわかる．すなわち，このことは糸断面の形状だけをモデル化しても目的の処理を達成できないことを示唆している．

そこで，以下ではこの糸断面モデルの重み関数についてさらに検討を加える．ただし，ここではやはり簡単のため糸断面を2次元として議論を進める．まず，前述の糸断面モデル相関法における糸断面モデルの重み関数は次式で表される．

$$h(r) = \exp\{-s r^2\} \quad (3.9)$$

その重み関数の形状は Fig.3.1 に示したとおりである．この形状により糸断面の中心点を問題なく推定することができた．ただし，ただ糸断面の中心点を推定するだけであればこのような形状である必要は必ずしもない．式(3.9)の代わりとして，Fig.3.8 のような三角形状の関数を考えてもやはり同様の効果が期待できることは容易に想像できる．ただ，糸断面モデル相関法では相関値の最大化を行うため，微分可能な数式で表せたほうが計算上都合がよいと考えられるため，本研究

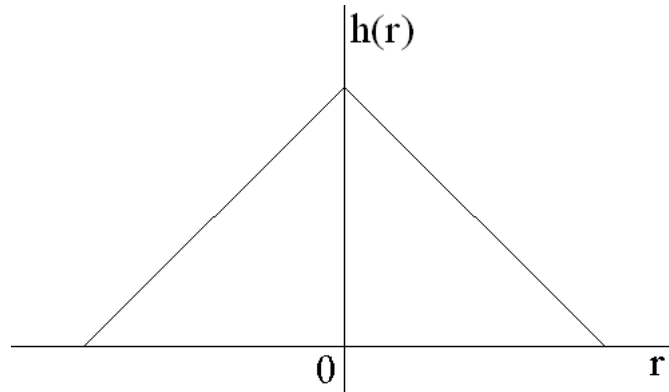


Fig. 3.8: Profile of a triangular weighting function

では式 (3.9) を用いることとした．なお，相関値の最大値を求める際には非線形最小 2 乗問題の解法の標準とされる Levenberg-Marquardt 法 [57] を用いている．

したがって，本研究では糸断面モデルに式 (3.9) の重み関数を組み込んだが，前項で述べたとおり式 (3.9) の重み関数はほかの糸などの雑音の影響を受けやすいという問題点があった．しかし，この重み関数を変更し適切に設定することでほかの糸などの雑音の影響を軽減できると考えられる．Fig.3.1 のような形状の場合，孤立して存在する糸についてはその中心点を推定することができるが，ほかの糸と接し合っていると Fig.3.9 のように注目する糸断面とほかの糸断面をひとつかたまりとして，その断面全体についての中心点を推定してしまう．実際，前述した糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法の実験においては，たて糸，よこ糸が交差する箇所異なる方向の糸の影響を受けて糸心線点列が歪んだ形で推定されているのがわかる．このことは，最悪の場合，近傍に存在するほかの糸断面上に糸断面の中心を推定してしまい，各糸同士の位置関係を復元する心線点列が得られない可能性があることを示している．

そこで，このようなほかの糸の影響を抑えるため，背景部分の存在に着目し，糸部分ばかりでなく背景部分もモデルに組み入れた次式の重み関数を提案する．

$$h(r) = -2 \exp\{-s r^2\} + \exp\{-t r^2\} \quad (3.10)$$

その重み関数の形状を Fig.3.10 に示す．変数 s, t の値は，Fig.3.10 において，2 つのゼロクロス点間の長さ $2a$ が糸の径になるよう調整し，また，両側の関数値が正の部分は背景部に対応するが，背景部が糸の径のおおよそ 2 倍の大きさで糸部分を環状に取り囲むように調整されている．ただし，実際には糸断面は円形であり，糸の張力や外部の圧力により多少膨脹収縮するため，最適なパラメータ s, t を求めることは難しい．したがって， s, t は経験的な微調整がさらに必要となる．本重み

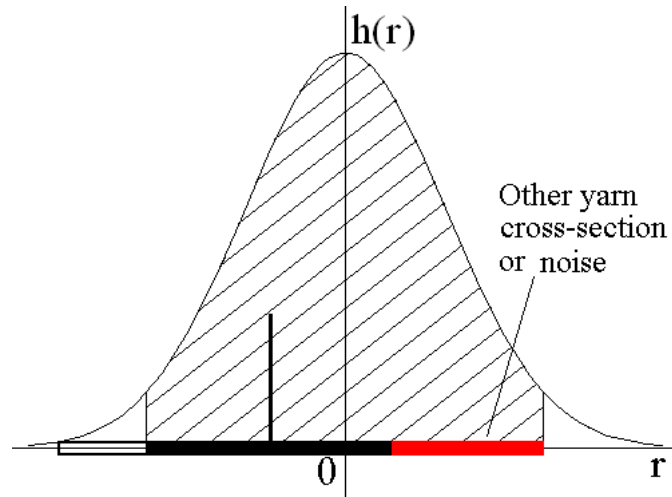


Fig. 3.9: Influence of other yarn cross-section or noise

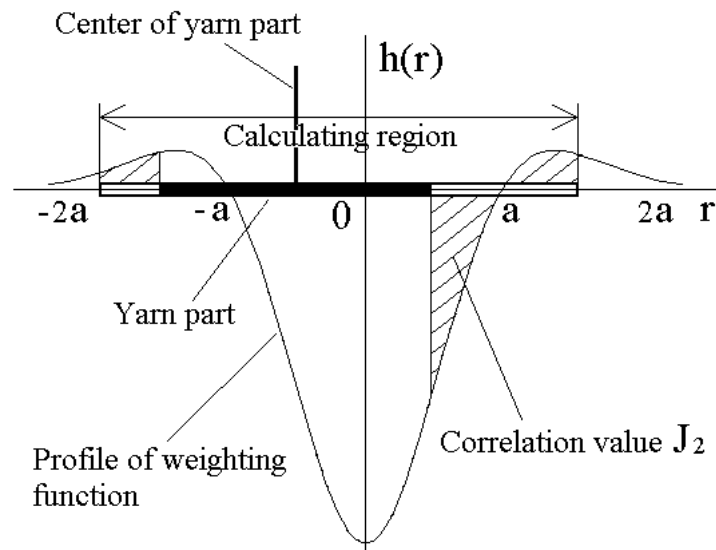


Fig. 3.10: Profile of the improved weighting function of the yarn cross-sectional model, $h(r) = -2 \exp\{-s r^2\} + \exp\{-t r^2\}$

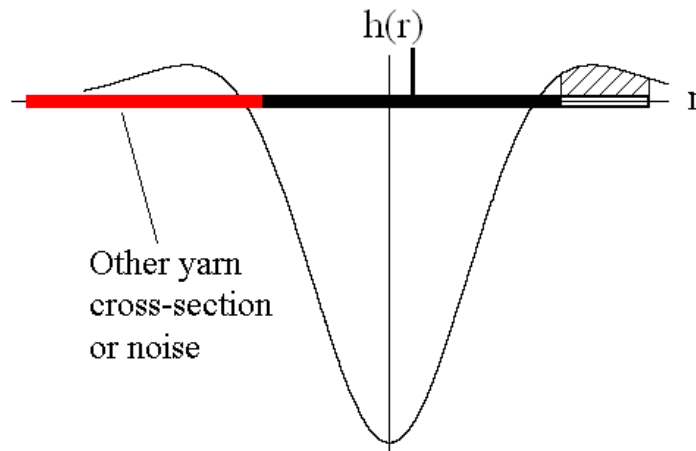


Fig. 3.11: Influence of other yarn cross-section when a weighting function $h(r) = -2 \exp\{-s r^2\} + \exp\{-t r^2\}$ is used

関数は特に糸の周りの背景部分の存在に着目しているため，断面画像は糸部分が0，背景部が1となるように2値化する．糸部分の値と背景部の値の扱いが前述の場合と反転されていることに注意されたい．すると，Fig.3.10に示すように評価関数値 J_2 は背景部分の範囲にわたる糸断面モデルの重み関数の面積（斜線部）に相当し， $J_2(r)$ の最大化を行うと，重み関数の正の部分は背景部分になるよう，また，負の部分は糸部分になるように糸断面モデルは移動し，結果的に重み関数の正の部分で背景部分を捉え，負の部分で糸部分を捉えることになり，糸部分の中心点が糸断面モデルの中心点と一致するとき J_2 は最大となる．

このように，糸の周りの背景部についても相関をとるこのようなモデルを利用すると，孤立する糸の場合はもちろんのこと，ほかの糸と接し合う場合においてもその糸断面内に糸断面の中心点を推定することができる．一例として，注目する糸にほかの糸が接しあったとき，相関値 $J_2(r)$ の最大となる糸断面モデルの重み関数の位置を Fig.3.11 に示す．多少注目する糸断面の中心からは糸断面モデルの中心がずれるものの，その糸断面内に J_2 の最大値が存在する，すなわち糸断面の中心点を推定できていることがわかる．ただし，ほかの糸断面と接しあった場合，少なくとも注目糸断面内に J_2 最大化の初期値が存在することが必要である．しかし，3.2.1 で述べたとおり，推定された中心点位置をそのまま次断面画像に継承すると次断面画像の同一糸の糸断面内にその中心点位置を継承できる程度に前後二枚の断面画像間隔が狭いことを前提にしているため，この条件は常に満される．また，糸の撚りむらや太さむらなどにより，糸の径が想定した値よりも大きくなる場合においても，ほかの糸と接し合う場合と同様に多少注目する糸断面からずれ

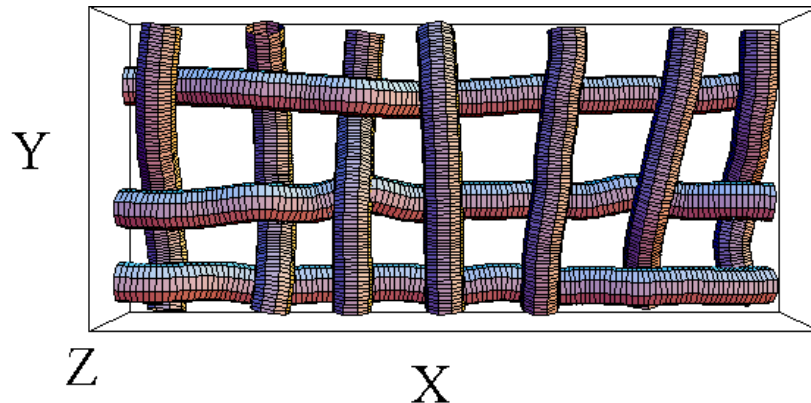


Fig. 3.12: Twill fabric structure reconstructed from the positional information of each yarn estimated by the yarn cross-sectional model correlation method using the improved weighting function

るものの、その糸断面内に中心点を推定することができる。糸断面が小さくなる場合においても、重み関数の形状より問題なく中心が推定される。やはり微分可能な数式で表すために重み関数として式 (3.10) を用いたが、Fig.3.8 に示した三角形の重み関数を Fig.3.10 のような形状になるように組み合わせた形状の重み関数を用いても同様の効果が得られるものと思われる。ただし、この場合も糸断面形状の変形などを考慮するとそれぞれの三角形の大きさや形状など適当な形状を求めるのは難しい。

この糸断面モデルの重み関数を用いた糸断面モデル相関法を先の実験で使用したあや織物の CT 断面画像に適用し、糸心線点列を推定した結果を Fig.3.12 に示す。各糸同士の位置関係は正確に復元され、さらにたて糸、よこ糸の交差する箇所において異なる方向の糸の影響を受けにくく、Fig.3.5 と比較して糸の歪みが少ないのがわかる。

3.3 二重織物の構造分析実験

重み関数を改善した糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法を本研究の対象である実際の多重織物へ適用した実験結果について述べる。

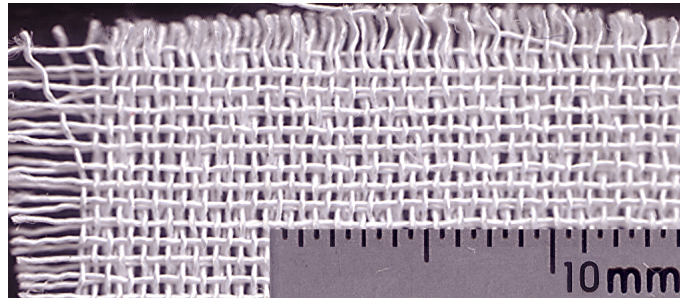


Fig. 3.13: Photograph of the sample double-layered woven fabric

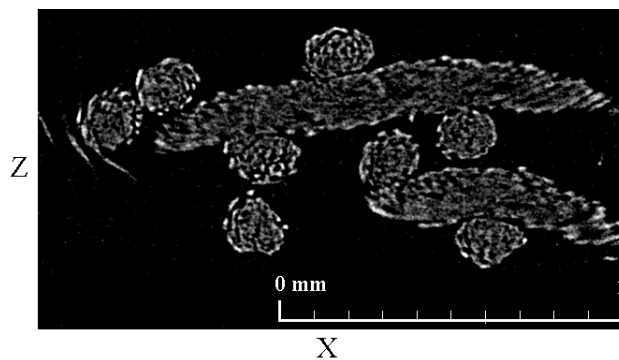


Fig. 3.14: Example of CT images of the sample double-layered woven fabric

3.3.1 実験の概要

本実験で使用した多重織物の写真を Fig.3.13 に示す．糸の太さが約 0.17mm のたてよこ二重織の二重織物である．断面画像撮像には先の実験と同様 SkyScan 社製 1072 型マイクロ CT スキャナを用いた．1 ピクセルあたりの分解能は $2.6\mu\text{m}$ ，断面画像間隔は平均約 $8.2\mu\text{m}$ で，断面画像面とよこ糸が平行になるように試料を固定して撮像した．断面画像の一例を Fig.3.14 に示す．白い円形部分がたて糸の糸断面，白い細長い部分はよこ糸の糸断面である．先の実験同様，断面画像の横軸方向を x 軸，縦軸方向を z 軸として，奥行き方向を y 軸とする．また，これらの断面画像をそのまま積み重ねて 3 次的に再構成した構造を Fig.3.15 に示す．点線は Fig.3.14 の断面画像が使われている箇所である．実験には式 (3.10) に示した改善した重み関数を用い糸断面モデル相関法による糸心線点列推定を行なった．本実験においても，断面画像は判別分析法により 2 値化後，糸断面部分の穴埋めと雑音除去のために膨脹収縮処理を行っている．また， $y-z$ 断面画像は $x-z$ 断面で撮像した CT 画像全体から作成した擬似断面画像を用いている．

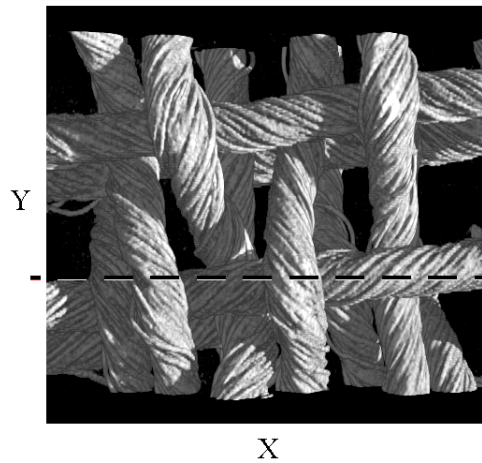


Fig. 3.15: Structure of the double-layered woven fabric reconstructed by volume rendering with CT images (Dotted line indicates the portion for which the CT image of Fig.3.14 is used)

3.3.2 実験結果

得られた各糸の心線点列より試料の構造を再構成したものを Fig.3.16 に示す。Fig.3.15 と見比べると試料上層の各糸の位置関係は正しく再構成されていることがわかる。また、Fig.3.16 からでは上層の糸に隠れて直接確認できない部分の糸の関係についても、Fig.3.17 のように糸を独立に表示することにより実際の織物の構造と合致していることを確認した。つまり、本糸心線点列推定法により正しく各糸の位置情報が得られたことが確認できた。

このように、提案する構造分析法は各糸の位置情報が得られるため、糸を独立に表現することがかのであるため、その構造を簡単に調べることができ、構造の解析に有効であるといえる。なお、本実験は二重織物を対象にしたが、対象が三重織、四重織と複雑になっても、糸心線点列推定開始点を増やすだけで各糸の心線点列を推定することは可能である。

3.4 モデルの役割

3.2 で提案した糸断面モデル相関法について、3.3 の実験結果をふまえ、モデルの役割について議論する。

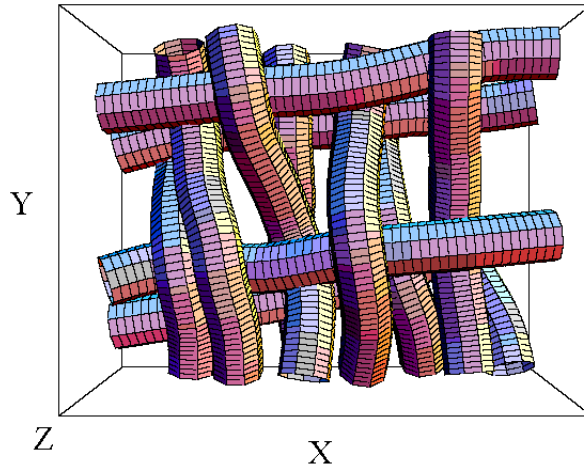


Fig. 3.16: Structure of the double-layered woven fabric reconstructed from the positional information estimated by the yarn cross-sectional model correlation method using the improved weighting function

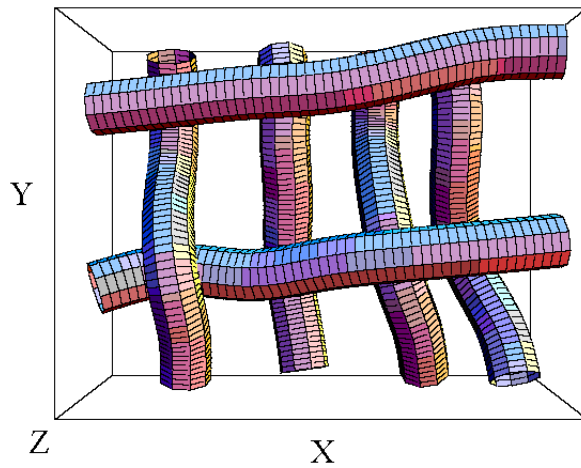


Fig. 3.17: Independent expression of warp of the under layer and weft of the upper layer of the sample double-layer woven fabric

3.4.1 逆問題の計測とモデル

計測とは因果律を逆行する，因果律に反する行為 [58] であり，よく逆問題と捉えることができる．逆問題の多くは，素朴に定式化すると非適切問題に導かれる．非適切問題は，字義どおり数学的設定が適切でない問題であり，因果連鎖を定式化した方程式を単純に逆転しようとしても意味のある解を得ることはできない．不適切問題を解くためには，因果連鎖を定式化した方程式に加えて，方程式の解の範囲をさらに限定するための先験情報が不可欠である [59]．そして，その情報がなんらかの数理モデルに表現されてはじめて逆問題の解法に役立つ．この意味では逆問題はモデリングの問題である [59] といわれ，また，逆問題の計測において，きわめて重要なのは，解くべき問題を定めるモデルの構築，換言すれば計測系の設計であり，どのような現象や変数に着目してモデルを設計すべきかが重要 [60] であるといわれている．この場合，モデルとは逆問題における逆変換に関するモデルを指すが，接しあった系同士を個別に認識する目的で用いられる本研究におけるモデルと性質がよく似ている．

ここで，3次元画像処理におけるモデルというと，

- 認識対象の定義
- 代表的，典型的な具体例
- 多様な個別の例をそれに向けて合わせられるような規範，標準
- 理想像
- 現象を説明するための基盤となる考え方，仮説

などの意味で用いられ [38]，主に対象物の形状を抽象化したものとして認識される．これに対し，本論文で提案するモデルは計測を行うためのモデルであり，上に挙げた例とは若干意味が異なる．たとえば，糸断面モデルでは糸断面形状を模して円形としているが，これは円形である必要はなく．実際に検討はおこなっていないが，場合によっては卵形や円形を基本とした可変形モデルなど，ほかの形状も考えることができる．また，糸断面モデルは重み関数により重み付けされているが，これはいわば演算子であり，3.2.4 で検討したように，本論文で提案するモデルはその形状だけでなく，この演算子の要素も非常に重要になってくる．このように本研究で用いるモデルは計測のためのモデルであるため，必ずしも実際の対象物に近い形状にはならず，利用する先験情報により変形する．したがって，モデルは実際の対象物の形状に近づけるといっても，先験情報を利用できるモデルにいかにして変形していくかが重要な考え方になってくる．

3.4.2 糸心線点列推定におけるモデル

まず、モデルを利用しない断面画像間相関法は、濃度値に関する局所的な条件を満たすある種の特徴点を抽出するものであり、抽出結果は心線を追跡する傾向はあっても、本質的には心線の追跡を行うものではない。これに対し、モデルを利用した糸断面モデル相関法は糸断面モデルと試料の断面画像との相関を計算することによって、中心点を推定するという本来の目的を積極的に達成するための処理系をつくることができるといえる。また、何度も述べているように、本糸断面モデルは、形状だけでなく、モデルに重み関数を組み込んでいることに大きな特徴がある。3.2.4で検討したように、形状だけに着目し、重み関数を考えない、すなわち Fig.3.7のように単純な矩形の場合、糸の張力や外部からの圧力により糸断面は多少変形するということを考慮していないため、糸断面の中心を推定するという本来の目的を達成することができない。つまり、モデルの構築には形状のみならず、対象をよく吟味し、性質や特徴、事実、すなわち先験情報をうまく利用して目的を達成する演算子の要素もいかにして組み込むかが重要であることが本研究よりわかる。

さらに、重み関数の形状を Fig.3.1 から Fig.3.10 へと変更することで、ほかの糸の影響を抑えて糸追跡が行えるようになった。重み関数変更前は糸断面は多少糸の張力や外部からの圧力により変形するものの、その糸の直径は CT 画像からおおよそ決めることができ、ほぼ円形であるという先験情報から糸の中心を推定する重み関数 (Fig.3.1) を構築した。しかし、糸断面はほかの糸断面と接し合うため、糸の直径と円形であるという先験情報だけからでは円の中心を推定することは難しい。重み関数変更後は糸断面が円形であるという先験情報に加え、糸断面の周りには背景部分が存在し、糸断面は背景部分に囲まれているという新たな先験情報すなわち、背景部分を積極的に利用することによって、ほかの糸の影響を抑えることができたことになる。

すなわち、モデルの構築には有意な先験情報をいかに多く入れられるかが大きな鍵なる。そして、計測における逆問題同様、本研究においてもモデルの役割とは、先験情報を利用することであり、それによって目的にあった処理だけに限定する、求めたい解の存在を限定することであるといえることができる。

最後に本糸断面モデル相関法の適用できる織物について簡単に整理する。本糸断面モデルはすでに述べているように、

- 糸の形状は円形である
- 糸の張力、外部の圧力により糸形状は多少膨脹収縮するものの、CT 画像を見ればおおよそその糸の直径を知ることができる

- 糸の周りには背景部分が存在し、糸断面は背景部分に取り囲まれている

という先験情報を利用して糸断面の中心を推定するように構築されている。したがって、その適用範囲はCT画像を見たときに糸断面がおおよそ円形をしており、かつ注目する糸断面が他の糸断面と接し合うことはあるものの、その周りをすべてほかの糸に囲まれていない比較的低糸密度の織物ということになる。

このような低糸密度の織物が全体の織物のどの程度の割合を占めるかは7.1.1においてまとめることにする。

3.5 本章のまとめ

はじめに、断面画像を利用した糸心線点列推定法として、糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法を提案した。糸断面モデル相関法は重みづけされた糸断面モデルを用いることにより、積極的に糸の心線を推定する手法になっている。さらに、糸断面モデルの重み関数を変形することでほかの糸の影響を減らし、精度よく糸を追跡できることを示した。表面画像を利用した従来の手法では対象とすることができなかった多重織物について二重織物を用いた実験を行い、提案手法により構造分析を行えることを示した。最後にモデルの役割について考察し、モデルは先験情報から作られ、それによって雑音を抑える、または解の存在を限定して対象を計測する役割があることを示した。

第4章 3次元画像を利用した編物の構造分析

本章では3次元画像を利用した編物の構造分析，すなわち3次元系モデル相関法による糸心線点列推定法について述べる．3次元系モデル相関法は前章で検討した重み付き糸断面モデルを3次元に拡張し，糸の中心だけでなく，さらに糸の方向も推定できることに特徴がある．表面画像を利用した従来の組織分解では解析できないと思われる編物に対して，提案手法を適用し，有効性の確認を行う．さらに本章では，3次元系モデル相関法による糸追跡の限界についても述べ，その解決方法の一つとして，糸を構成する繊維の方向に着目した3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定法を提案する．また，先験情報，計測結果の利用について検討し，前章に引き続きモデル構築についてさらに考える．

4.1 編物糸心線点列推定のための画像利用方法

編物は1本または2本以上の糸がループを作り，そのループに引っかけてつぎの新しいループを作ることを継続し，順次ループを平面上に連続させて編目を形成して布地としたものであるため，基本的に糸の方向が自在に変化する．そのため，たとえばFig.4.1のようにGenerative Modelで表されたU字形の糸形状の場合，織物における糸追跡同様単純に $x-z$ 平面の断面画像を用いると，ある断面画像において2つあった糸断面がつぎの断面画像では一つの糸断面に結合するという織物では起こりえない事態が生じる．また，逆に一つの糸断面がつぎの断面画像では2つに分離するという事態も同様に生じる．

したがって，編物の場合においては織物とは異なり，ある特定の一方の断面画像のみを用いても一本の糸心線点列を推定することは難しい．そこで，断面画像を一枚ずつ2次的に扱うのではなく，微小間隔で撮影された断面画像全体を利用して3次元ボクセルデータとして扱うことにする．これにより3次的に構造分析を行うことができ，糸がどのような姿勢をしていても対応できると考えるからである．

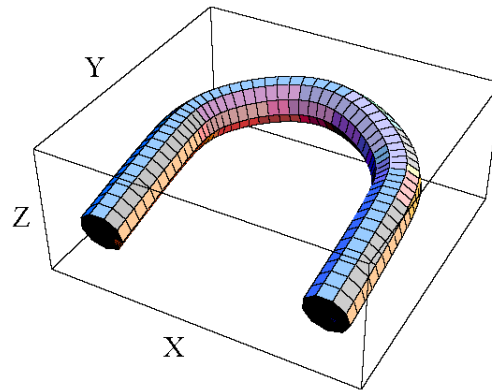


Fig. 4.1: Model of bent yarn

4.2 編物糸心線点列推定法

前節で検討したように，編物の構造分析を行う際に問題となるのは，織物とは異なって糸の向きが自在に変化するという点である．そこで，3次元的に処理することで，糸の心線上の点（以下，糸の中心点と呼ぶ）に加え，糸の方向も推定することを考える．糸の方向を推定することができれば，糸の方向がどのように変化しても糸を追跡していくことが可能になると考えられるからである．

以下では，糸の太さに比べ十分な解像度，微小間隔からなるCT断面画像から作られた3次元ボクセルデータが得られていることを前提として，はじめに糸の中心点と方向を推定する3次元糸モデル相関法について述べ，つぎに3次元糸モデル相関法を用いて糸心線点列を推定する方法を提案する．

4.2.1 3次元糸モデル相関法

ここでは，糸の中心点と方向を同時に推定する手法を提案する．前章で提案した糸断面モデル相関法は，糸断面モデルの中心点座標，および計算点座標 x, p を2次元から3次元に拡張することで容易に3次元に拡張できる．ここで，3次元に拡張するにあたり，糸の形状を円柱と仮定できるほどの小領域を扱う．しかし，単に3次元に拡張しただけでは糸の方向を推定することができないため，新たな評価関数値 J_3 にはさらに糸の方向をパラメータとして加える必要がある．そこで，式(3.2) (3.1) をそれぞれ式(4.2) (4.1) に変形する．

$$h(x, d, p) = -2 \exp\{-s r(x, d, p)^2\} + \exp\{-t r(x, d, p)^2\} \quad (4.1)$$

$$J_3(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{d}) = \sum_V h(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{d}, \boldsymbol{p}) f(\boldsymbol{p}) \quad (4.2)$$

ここで、 h が糸断面モデルを3次元に拡張したモデルである。本論文ではこれを3次元糸モデルと呼ぶことにする。また、 \boldsymbol{d} は3次元糸モデルの方向を示す単位ベクトルである。 f は糸部分で0、背景部分で1に2値化されたボクセルデータを表し、 r は3次元糸モデルの中心軸と計算点との距離で、次式で表される。

$$r(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{d}, \boldsymbol{p})^2 = \|\boldsymbol{p} - \boldsymbol{x}\|^2 - ((\boldsymbol{p} - \boldsymbol{x}) \cdot \boldsymbol{d})^2 \quad (4.3)$$

さらに、 V は計算領域を表し、経験的に実際の糸よりも半径方向にひと回り大きく、また軸方向は糸の曲率を考慮して糸の径の2倍を目安とした円柱としている。

このように設定すると、糸断面モデル相関法と同様に、評価関数値 J_3 が最大するとき最も3次元糸モデルとボクセルデータ中の糸部分、背景部分との相関が高く、相互の位置関係が合致していると考えられるので、このときの3次元糸モデルの中心点を糸の中心点として、また、3次元糸モデルの方向を糸の方向として、それぞれ推定できる。

4.2.2 3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定

本研究では、試料のボクセルデータにおける糸を追跡することによって糸心線点列を推定する。すなわち、前節で提案した3次元糸モデル相関法を用いて糸の中心点と方向を推定し、その推定した糸方向に沿って3次元糸モデルを逐次移動させ、その糸モデルの中心点の軌跡を糸心線点列とする方法である。3次元糸モデル相関法を利用した糸心線点列推定法の手順を以下に示す。

はじめに糸心線点列推定開始のための初期設定を行なう。ここでは、追跡したい糸の心線上の点のおおよその座標とその糸の方向を表すおおよその方向ベクトルを与える。これらの設定は作業者がボクセルデータから判断して行なう。つぎに、この初期点と初期方向ベクトルをもとに3次元糸モデル相関法により、糸の中心点と方向ベクトルを推定する。ここで、推定する中心点 \boldsymbol{x} はある平面に拘束する必要がある。3次元糸モデル相関法は、3次元糸モデルと最も相関の高い点を糸の中心点として推定するため、原理的には追跡したい糸のただ一つの中心点しか常に推定されない。このため推定する中心点をある平面に拘束し、その中で中心点を推定しなければならない。具体的には、初期点を通り、初期方向ベクトルを法線とする平面上に拘束する。すなわち、 \boldsymbol{x} は次式で拘束される。

$$\boldsymbol{d}_0 \cdot \boldsymbol{x} + q_0 = 0 \quad (4.4)$$

$$q_0 = -\boldsymbol{d}_0 \cdot \boldsymbol{x}_0 \quad (4.5)$$

ここで、 x_0, d_0 はそれぞれ初期点の座標，初期方向ベクトルである．このとき，この推定された中心点が求める糸心線点列の初めの点となる．そして，糸モデルをいま推定した糸の方向ベクトルに沿って微小移動させることによって糸を追跡する．この移動量が小さいほど糸心線点列は細かく得られるが，小さすぎると全体の糸心線点列を推定するのに多くの時間を要することになる．逆に大きすぎると移動した点が注目する糸部分から外れてしまい糸の追跡が不可能になるので，本研究では経験的に糸の半径の $1/2$ を目安としている．

つぎに，その移動後の糸モデルの中心点および移動前の推定方向ベクトルを新たに初期値として同様に3次元糸モデル相関法により拘束平面上の糸の中心点および方向ベクトルを推定する．この手順をボクセルデータの端まで繰り返し行うことで最終的に糸の心線点列を得る．

4.3 編物の構造分析実験

3次元糸モデル相関法を利用した糸心線点列推定法を実際の編物試料に適用した2つの実験結果について以下に述べる．はじめに構造の平易な平編物を実験試料として，糸方向が自在に変化しても提案手法により問題なく糸心線点列が推定できることを実験的に検証する．つぎに，本研究は未知の編物構造を分析することが目的の一つだが，従来法との比較のため平面的ではあるものの表面画像からでは編目の穴形状が見えず，テンプレートマッチング法の適応が困難と考えられる構造をもつ編物を実験試料として構造分析を行い，本手法の有効性について考察する．

4.3.1 糸心線点列推定法の検証

実験の概要

本実験で使用した編物試料を Fig.4.2 に示す．糸の太さが約 0.2mm の平編物である．断面画像撮像には SkyScan 社製 1072 型マイクロ CT スキャナ [56] を用いた．1ピクセルは $6.1 \times 6.1\mu\text{m}$ に相当し，断面画像間隔は平均約 $6.2\mu\text{m}$ である．断面画像の一例を Fig.4.3 に示す．細かい白い粒状の像が糸の繊維断面を表しており，それらがいくつか円状に集合して糸を構成している．ボクセルデータを作成する際に，これらの断面画像を判別分析法により2値化後，繊維間のすき間埋めと雑音除去のために膨脹収縮処理を行った．便宜上，断面画像の横軸方向を x 軸，縦軸方向を z 軸として，奥行き方向を y 軸とする．また，Fig.4.4 は断面画像をそのまま積み重ねて3次的に再構成して表示したものである．なお，点線部は Fig.4.3

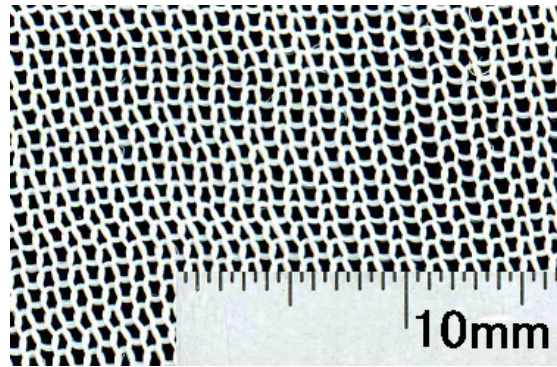


Fig. 4.2: Photograph of the sample plain knitted fabric

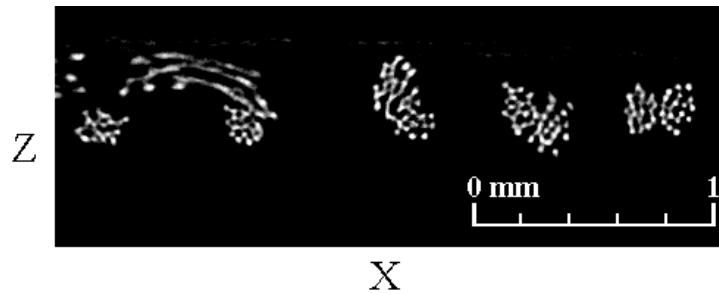


Fig. 4.3: Example of CT images of the sample plain knitted fabric

の断面画像の箇所に対応する。

実験結果

3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法より得られた各糸の位置情報から試料の構造を再構成した結果を Fig.4.5 に示す。Fig.4.4 と比較して各糸の位置関係が正しく再構成されていることがわかる。つまり本糸心線点列推定法により正しく各糸の位置情報が得られ、糸方向が自在に変化する編物において構造分析を行うことが可能であることが確認できた。

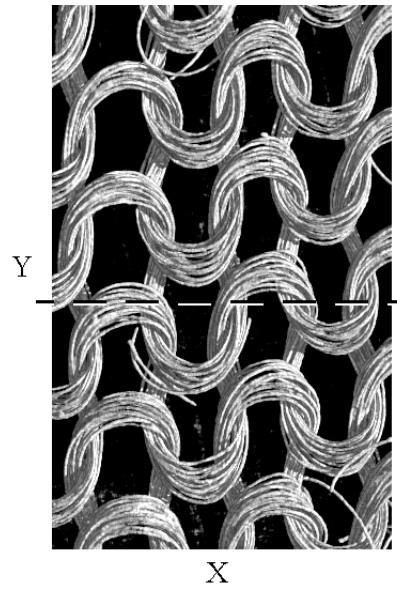


Fig. 4.4: Structure of the plain knitted fabric reconstructed by volume rendering with CT images (Broken line indicates the portion for which the CT image of Fig.4.3 is used)

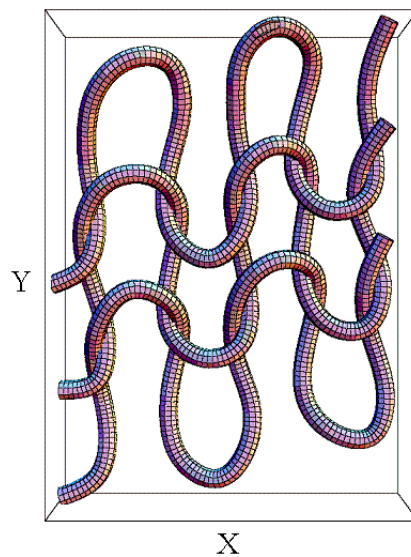


Fig. 4.5: Structure of the plain knitted fabric reconstructed from the positional information estimated by the 3-d yarn model correlation method

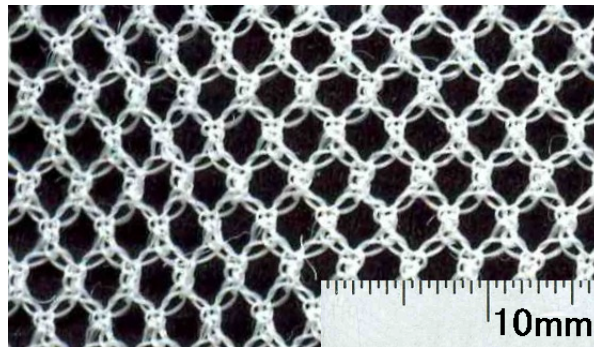


Fig. 4.6: Photograph of the sample knitted fabric of a net stitch

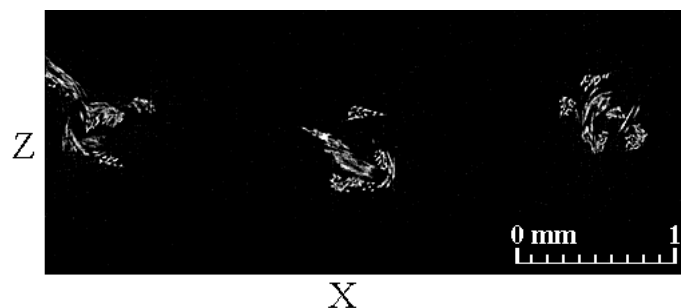


Fig. 4.7: Example of CT images of the sample knitted fabric of the net stitch

4.3.2 糸心線点列推定法の有効性の検討

実験の概要

本実験で使用した編物試料を Fig.4.6 に示す．糸の太さが約0.1mmのネット編物である．本実験においても，断面画像撮像には SkyScan 社製 1072 型マイクロ CT スキャナを用いた．1 ピクセルは $4.2 \times 4.2 \mu\text{m}$ に相当し，断面画像間隔は平均約 $4.3 \mu\text{m}$ である．断面画像の一例を Fig.4.7 に示す．繊維の太さに比べて解像度が低いため，繊維断面ははっきりと現れていない．さらに本試料の糸は撚りが弱いため，糸断面の形状が円形から変形している箇所も存在する．ボクセルデータを作成する際に，本実験においてもこれらの断面画像を判別分析法により2値化後，繊維間のすき間埋めと雑音除去のために膨脹収縮処理を行っている．また，断面画像の横軸方向を x 軸，縦軸方向を z 軸として，奥行き方向を y 軸とする．断面画像をそのまま積み重ねて3次元的に再構成して表示したものを Fig.4.8 に示す．なお，点線部は図 4.7 の断面画像の箇所に対応する．

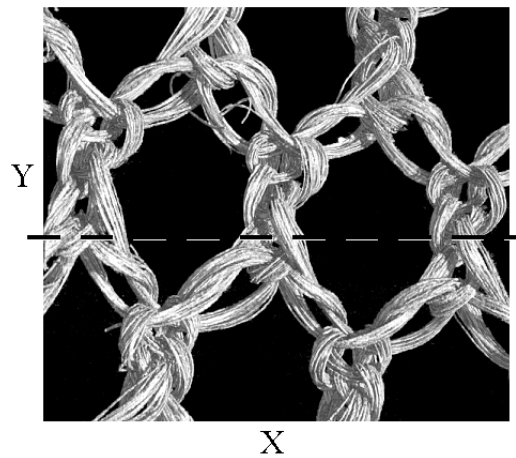


Fig. 4.8: Structure of the knitted fabric of the net stitch reconstructed by volume rendering with CT images (Broken line indicates the portion for which the CT image of Fig.4.7 is used)

実験結果

3次元糸モデル相関法を利用した糸心線点列推定法より得られた各糸の位置情報から試料の構造を再構成した結果を Fig.4.9 に示す．実際の試料と比較して各糸の位置関係を正しく再構成していることを確認した．ただし，糸心線点列推定において，一本の糸を追跡する際に3次元糸モデルの重み関数の形状を決定する変数 s, t を途中変更する必要があった．Fig.4.7 の中央部を拡大した Fig.4.10 に示す断面画像からもわかるように，本実験で用いた試料の糸は撚りが弱く，糸同士が絡み合い糸が密集する箇所では糸がつぶれているため糸モデルの形状を円柱としている3次元糸モデル相関法では，正しく糸の中心と方向を推定することができない．したがって，そのように糸がつぶれている箇所においては，その分だけ糸の直径を実際よりも小さく見積もって変数 s, t を調整し直さなければならない．なお，糸の中心点，方向推定の誤りの判断は元のボクセルデータに推定した中心点と方向を重ね合わせることにより行った．推定誤りの判断，パラメータ調整は手作業で行ったものの，調整作業は糸の追跡を確実にするためのもので，編物構造の知識に依存することなく行うことができる．つまり，糸心線点列推定が正しく行われているかの判断と，糸同士がどう絡んでいるかという編物の構造を解析することは別の問題である．

以上より，本実験で使用したネット編物を構成する糸は撚りが弱く，糸形状がつぶれたため，糸形状を円柱として構築した3次元モデルでは正しく糸の中心，方向が推定できず，途中パラメータを変更する必要があったが，試料の編物構造の

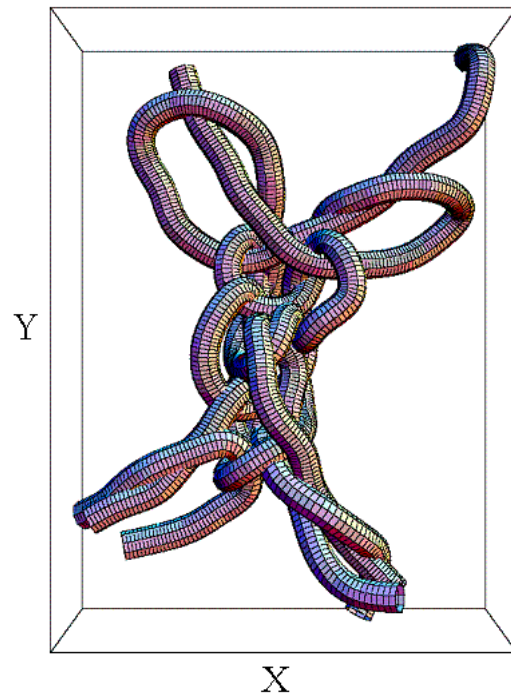


Fig. 4.9: Structure of the knitted fabric of the net stitch reconstructed from the positional information estimated by the 3-d yarn model correlation method

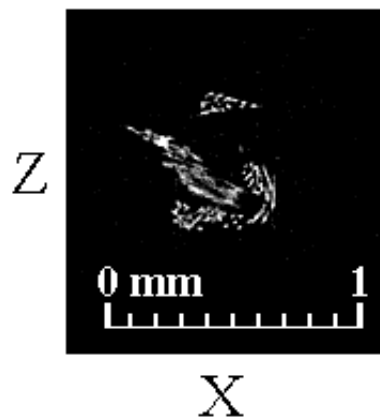


Fig. 4.10: Enlarged CT image of the center area in Fig.4.7

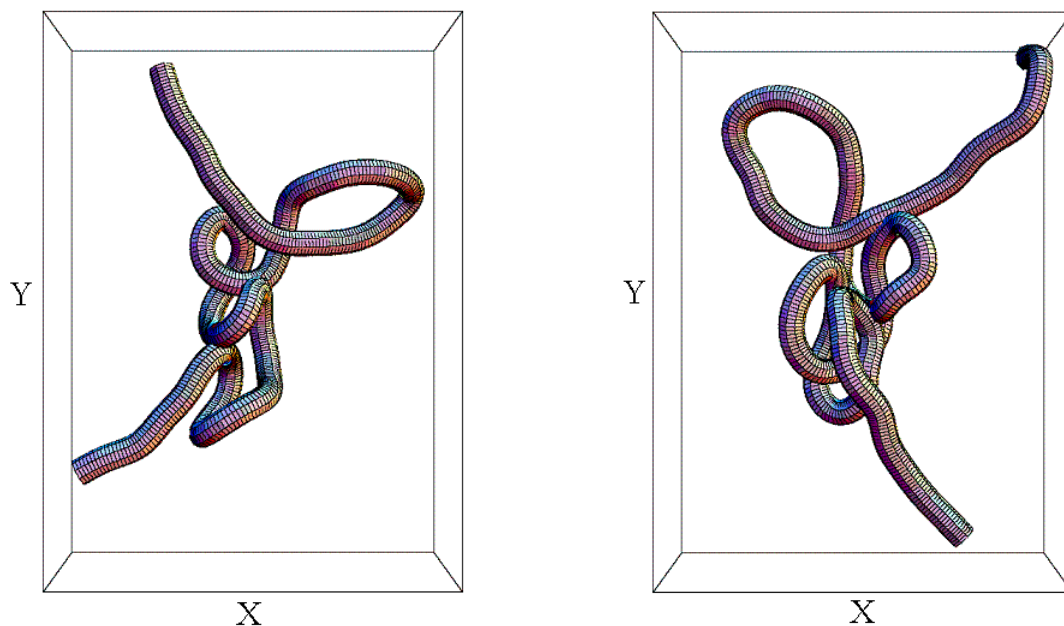


Fig. 4.11: Independent expression of a yarn of the sample knitted fabric of the net stitch

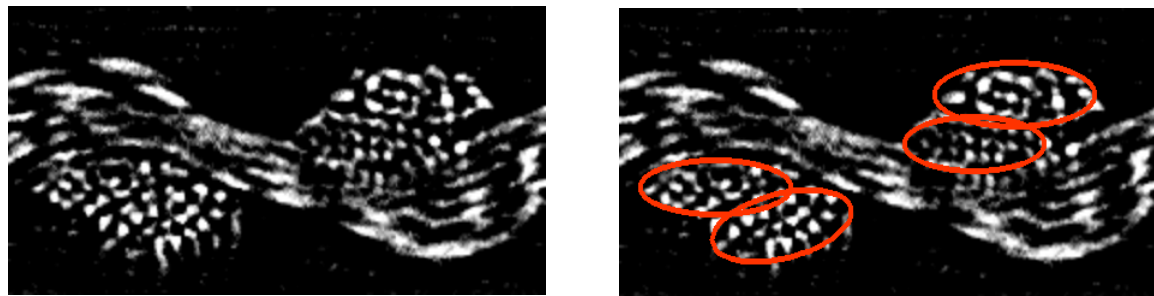
知識を用いることなく糸心線点列を推定できることを確認した。

また、本手法では各糸の位置情報から Fig.4.11 のように糸を独立に表現することで、各糸のループ形状などその編物構造を視覚的にわかりやすく表示できる。Fig.4.11 では Fig.2.13 に示したたて編特有の編目、すなわち開き目と閉じ目が容易に確認でき、構造の解析に役立つ。このように本手法で得られる各糸の位置情報をもとに各糸を3次元的に再構成することはその構造が一般的に複雑な編物の解析に特に有効であることがわかる。

なお、本実験は平面構造のネット編物を用いたが、対象が立体的な構造の編物になっても、3次元的に処理を行うため各糸の心線点列を推定することは原理的に可能である。

4.4 繊維の方向に着目した糸心線点列推定法

前節、3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法の有効性の検討におけるネット編の実験結果で述べたように糸の形状は円柱であり、糸の太さは糸の張力や外部の圧力により多少変化するもののおおよそ一定であるということや糸の周りには背景部分が存在するという先験情報をもとにモデルを構築した。したがって、この先験情報と異なる状況になると、正しく目的の処理、すなわち、糸の中



(a)Original image

(b)Image on which outlines of yarn cross-sections are drawn by red lines

Fig. 4.12: Example of yarn cross-section of plain woven fabric using ply yarn

心や方向を正しく推定することができなくなる。

そこで、そのように糸がつぶれている箇所においては、その分だけ糸の直径を実際よりも小さく見積もって変数 s, t を調整しなければならない。これは組織分解の自動化という観点からすると、人間が介入することになり好ましい作業ではない。また、Fig.4.12(a) は2本諸撚糸と呼ばれる2本の糸を撚り合わせて作った糸を用いて作られた平織物のCT断面画像の元画像であり、同図(b) はそれぞれの糸形状がわかるように糸の輪郭を赤線で記したものである。このように糸断面形状が円形から大きく変形し、さらにほかの糸と接し合う場合においてはいくらパラメータを変更しても2本の糸を区別できず一本の糸として追跡してしまう。すなわち、3次元糸モデルを構築する際に利用した先験情報がここでは先験情報として成立していないため、このような織物には3次元糸モデル相関法を適用することはできない。

本節からはその解決方法の一つとして糸を構成する繊維に着目し、繊維の方向を利用することを考える。

4.4.1 繊維の特徴

第2章で述べたように本論文で扱う糸とは繊維が撚り合わされて構成されている。糸断面においては繊維が小さい粒状に現れる。Fig.4.12においても白い粒状のものが繊維断面である。ただし、糸によっては織物準備工程において、製織をスムーズにするため糊付けという作業が行われる[19]ため、このようにはっきりと繊維が見えない糸も存在するが、ここでは、比較的繊維がはっきりと認識できる糸を扱うものとする。

繊維は、糸のように何かが撚り合わされてできているわけではないので、変形しにくく、2.1.1の最後で述べたように一般的にその形状は円形である。さらに、糸

断面を見てわかるように繊維間には空気が多く存在し，すなわち周りを背景部分に取り囲まれている．形状が円形であり，周りが背景部分に囲まれているというこれらの繊維の特徴は3次元系モデルを構築した際の先験情報を満しており，まさに3次元系断面モデル相関法の適用に好都合な特徴である．そこで，次項では3次元系モデル相関法を繊維へ応用することを考える．

4.4.2 3次元繊維モデル相関法

前項で検討したように繊維は以下の特徴より3次元系モデル相関法の適用に適しているといえる．

- 繊維断面形状は円形で，ほとんど変形することがない
- 繊維の周りは空気(背景)に取り囲まれている

すると，Fig.3.10において，2つのゼロクロス点間の長さ $2a$ が繊維の直径になるよう，また，両側の関数値が正の部分はやはり背景部に対応するが，背景部が糸の径のおおよそ2倍の大きさで糸部分を環状に取り囲むように3次元系モデル相関法における重み関数のパラメータ s, t を調整することによって，容易に3次元系モデル相関法は繊維の中心と方向推定へ応用することができる．繊維の中心と方向を推定することは本質的に3次元系モデル相関法と変らない処理であるが，ここでは処理の目的が一目でわかるよう，3次元繊維モデル相関法と呼ぶことにする．

4.4.3 3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定

3次元繊維モデル相関法を利用することによって，繊維の中心と方向が推定でき，したがって，3次元系モデル相関法による糸心線点列推定法と同様にして繊維を追跡できる可能性がある[61]が，初期点の設定の手間や計算時間，空間解像度，それに伴う推定誤差などを考慮して，繊維の追跡は行わず直接糸を追跡する手法を提案している．ここで，繊維追跡を行わないため，繊維の中心推定は不要となり，計算時間の短縮のため3次元繊維モデル相関法は，次式のように書き換えられる．

$$J_3(\mathbf{d}) = \sum_{\mathbf{V}} h(\mathbf{d}, \mathbf{p}) f(\mathbf{p}) \quad (4.6)$$

$$h(\mathbf{d}, \mathbf{p}) = -2 \exp\{-s r(\mathbf{d}, \mathbf{p})^2\} + \exp\{-t r(\mathbf{d}, \mathbf{p})^2\} \quad (4.7)$$

ここで， \mathbf{d} は繊維の単位方向ベクトル， \mathbf{V} は計算領域で3次元系モデル相関法同様実際の繊維よりも半径方向にひと回り大きく，また軸方向は繊維の直径の2倍を目安とした円柱としている．

3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定法の手順を以下に示す。

はじめに、糸心線点列推定開始のための初期設定を行う。ここでは、追跡したい糸の心線上の点のおおよその座標とその糸の方向を表すおおよその方向ベクトルを与える。また、糸の心線上周りに繊維を数本含む大きさの計算領域を与える。ただし、この計算領域は経験的に糸の半径方向は糸の直径の半分くらいの大きさ、糸の軸方向は糸の直径の大きさを目安とする。これらの設定は作業者がボクセルデータから判断して行う。つぎに、この初期方向ベクトルをもとに計算領域内すべてのボクセルに3次元繊維モデル相関法を適用し、繊維の方向ベクトルを推定する。そして、いま推定された計算領域内すべてのボクセルの推定方向ベクトルを加算し、正規化したベクトルを糸の方向 d_y として推定する。

$$d_y = \frac{\sum_V J_3(p) \cdot d(p)}{|\sum_V J_3(p) \cdot d(p)|} \quad (4.8)$$

ただし、 $J_3(p)$, $d(p)$ はそれぞれ計算点 p における相関値 J_3 、繊維方向ベクトル d である。続いて計算領域をいま推定した糸の方向に沿って微小移動させることによって糸を追跡する。その後、移動前の推定糸方向を新たな初期値として同様に計算領域内すべてのボクセルに対し3次元繊維モデル相関法を適用し、すべての繊維の方向推定を行い、再び相関値 J_3 を重みとして加算し、その正規化ベクトルを糸の方向として推定する。この手順をボクセルデータの端まで繰り返し行うことで最終的に計算領域の中心の軌跡として心線点列が推定される。

4.5 2本諸撚糸を使用した平織物の構造分析実験

実験の概要

本実験で使用した織物試料を Fig.4.13 に示す。約 0.1mm の 2 本諸撚糸で織られた平織物である。断面画像撮像には SkyScan 社製 1072 型マイクロ CT スキャナ [56] を用いた。1 ピクセルは $2.7 \times 2.7 \mu\text{m}$ に相当し、断面画像間隔は平均約 $2.7 \mu\text{m}$ である。断面画像の一例を Fig.4.14 に示す。やはり細かい白い粒状の像が糸の繊維断面を表しており、それらがいくつか楕円状に集合して糸を構成している。ボクセルデータを作成する際に、これらの断面画像を判別分析法により 2 値化を行っている。ただし、繊維を利用するためこれまでの実験とは異なり膨脹収縮処理は行っていない。便宜上、断面画像の横軸方向を x 軸、縦軸方向を z 軸として、奥行き方向を y 軸とする。また、Fig.4.15 は断面画像をそのまま積み重ねて 3 次元的に再構成して表示したものである。

本研究は組織分解の上での基礎的情報の獲得が目的であり、本来は 2 本諸撚糸それぞれの糸の心線点列の情報が必要としないが、本実験は、糸が円柱形から変形

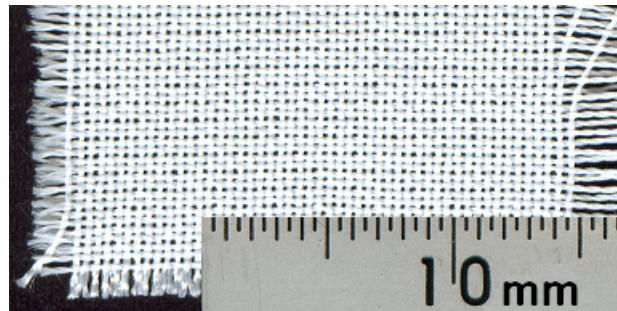


Fig. 4.13: Photograph of the sample plain woven fabric

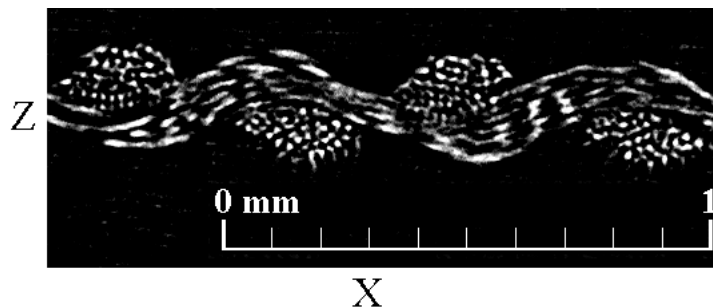


Fig. 4.14: Example of CT images of the sample plain woven fabric

し、さらに糸同士が接し合っている状況に対する提案手法の有効性の確認することがその目的であるため、2本諸撚糸のそれぞれの糸の心線点列の推定を試みる。

実験結果

3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定法より得られた各糸の位置情報から試料の構造を再構成した結果を Fig.4.16 に示す。Fig. 4.15 と比較して各糸の位置関係が正しく再構成されていることがわかる。つまり本糸心線点列推定法により正しく各糸の位置情報が得られ、糸形状が変形し、さらに糸同士が接し合っている糸に対して、糸心線点列推定が可能であることが確認できた。また、本実験結果は糸形状が変形し、さらに糸同士が接し合っている糸密度の高い織編物に対しても構造分析を行うことができる可能性を示している。また、やはり各糸の位置情報を得ているため、Fig.4.17 のように各糸を独立に表現することが可能である。

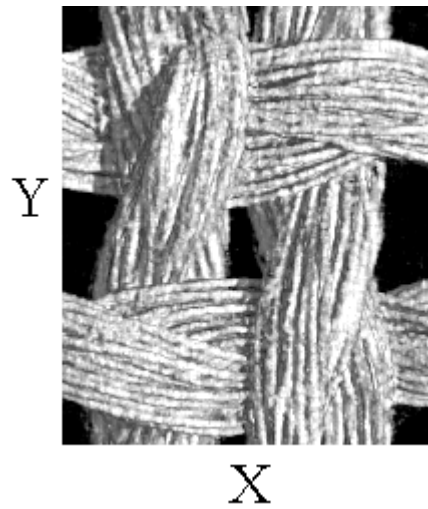


Fig. 4.15: Structure of the plain woven fabric reconstructed by volume rendering with CT images

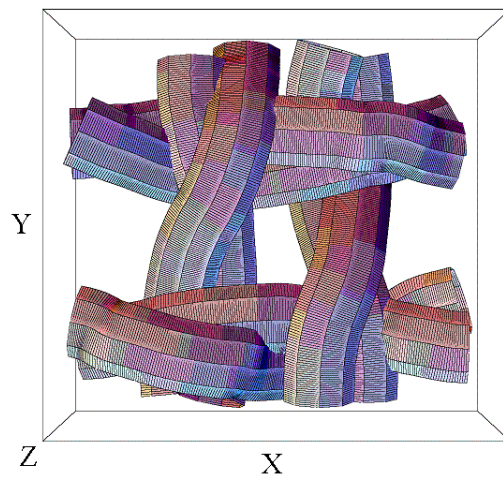


Fig. 4.16: Structure of the plain woven fabric reconstructed from the positional information estimated by the 3-d fiber model correlation method

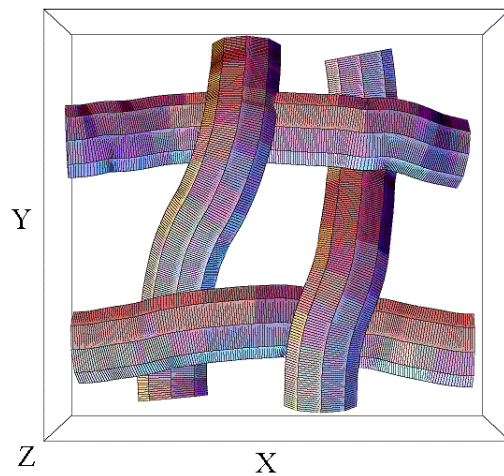


Fig. 4.17: Independent expression of ply yarns of plain woven fabric

4.6 先験情報と計測結果の利用

以上、本章で検討してきたことを先験情報、計測結果の利用という立場からまとめると、

まず、3次元糸モデル相関法では、糸を局所的には円柱とみなすことができるという先験情報を利用し、糸のモデルを円柱として構築した。これにより、糸の中心だけでなく、計測の対象ではないが、新たに糸の方向も推定できるようになった。本来計測対象ではない糸の方向を推定し、積極的に糸の追跡に利用している点に3次元糸モデル相関法の特徴があるといえる。すなわち、糸の方向を推定することにより、糸の形状が自在に変化しても糸を追跡できるようになり、より糸を追跡する処理に近づいたといえる。さらに、3次元繊維モデル相関法では繊維形状を先験情報として利用し、繊維の方向を推定することによって3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法では追跡できない糸に対しても糸心線点列を推定することができた。3.4では、モデルの構築には有意な先験情報を多く利用することが鍵であり、それによって目的にあった処理だけに限定する、求めたい解の存在を限定することであると述べた。しかし、計測対象を本来の目的だけに限るのではなく、先験情報をうまく利用し、計測対象(心線点列)以外の量(糸の方向、繊維の方向)も推定し、それを利用できるモデルを構築することが非常に効果的であると本研究を通じて考察することができる。

4.7 本章のまとめ

本章では、3次元画像を利用した構造分析法として、3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法を提案した。提案手法では、糸の中心に加えて、糸の方向も推定することができる。本手法を実際の編物に適用し、その有効性を確認した。また、表面画像を利用した従来法では対象とできない編物に提案手法を適用し、途中糸の変形により、手動によるパラメータの変更が必要であったが、構造分析できることを示した。また、3次元糸モデル相関法は、糸断面形状が変形し、糸同士が互いに接し合っている糸は追跡できないことを示した。そこで、3次元糸モデル相関法に代わる糸心線点列推定法の一つの方法として、新たに3次元繊維モデル相関法を提案した。実際に3次元糸モデルでは糸を追跡することができない、2本諸撚糸が使われている平織物に対して実験を行い、その有効性を示した。また、モデルの構築に際しては、先験情報を利用して目的にあった処理に限定することだけでなく、計測対象以外の量も推定、計測し、その量をさらに目的の計測に利用することを考慮に入れることが効果的であることを考察した。

第5章 大局的処理による織編物の構造分析

第3章，第4章では，糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法，3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法，および3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定法を通じて，モデルの役割，先験情報，計測結果の利用について検討してきた．本章ではどのように先験情報を利用して，いかにしてよい計測系を構築するかについて検討を行い，計測を行う上で有効な大局的処理の考え方を示す．はじめに糸断面モデル相関法と3次元糸モデル相関法の比較検討を行い，糸心線点列を精度よく推定できているか否かのそれぞれの処理の安定性について議論する．つぎに，その議論の結果をうけ「局所的処理と大局的処理」の考え方を導き出す．続いて本論文では有効的な構造分析法を提案するに至っていないが，3次元繊維モデル相関法を利用した大局的な構造分析法について検討する．

5.1 構造分析法の安定性

5.1.1 糸断面モデル相関法と3次元糸モデル相関法の比較実験

糸断面モデル相関法と3次元糸モデル相関法を比較するにあたり，同じ織物を実験試料として実験を行い，それぞれの糸追跡結果をもとに処理の安定性，すなわち糸心線点列を精度よく推定できているか否かの比較，検討を行う．

実験の概要

本実験で使用した織物試料を Fig.5.1 に示す．糸の太さが約0.1mm のたてよこ二重織物である．断面画像撮像には SkyScan 社製 1072 型マイクロ CT スキャナ [56] を用いた．1 ピクセルは $2.7 \times 2.7 \mu\text{m}$ に相当し，断面画像間隔は平均約 $2.75 \mu\text{m}$ である．断面画像の一例を Fig.5.2 に示す．細かく白い粒状の像が糸の繊維断面であり，それらが円形状に集合して糸を構成している．これまでの実験同様，ボクセルデータを作成する際に，これらの断面画像を判別分析法により2値化後，繊維

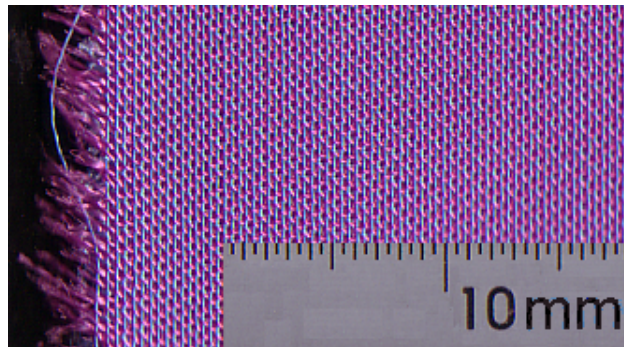


Fig. 5.1: Photograph of the sample double-layered woven fabric

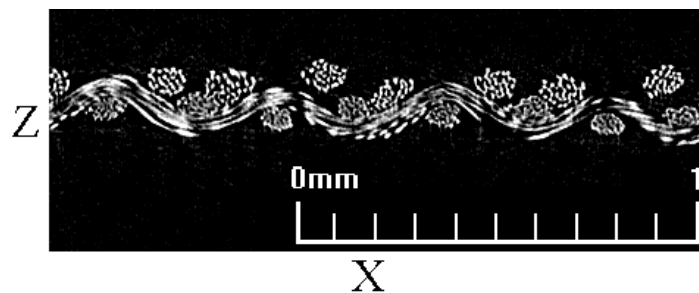


Fig. 5.2: Example of CT images of the sample double-layered woven fabric

間のすき間埋めと雑音除去のために膨脹収縮処理を行った．便宜上，断面画像の横軸方向を x 軸，縦軸方向を z 軸として，奥行き方向を y 軸とする．また，Fig.5.3 は断面画像をそのまま積み重ねて3次元的に再構成して表示したものである．

実験結果

はじめに糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法により得られた各糸の位置情報から試料の構造を3次元再構成した結果を Fig.5.4 に示す．実際の織物と比較して，一部たて糸よこ糸の上下関係が誤っていることを確認した．この原因として糸形状が変形し，さらに糸同士が接し合っていることが挙げられる．本実験で使用した試料は，3.3の実験で用いた二重織物の試料よりも糸密度が高いため，糸断面モデル相関法の特徴である糸を囲む背景部分が少ない．また，糸断面自体も円形ではなく，やや楕円形をしている．このため，糸追跡に失敗した箇所があるものと考えられる．Fig.5.5 に Fig.5.2の一部を拡大したものを示す．赤い円で囲まれた糸形状がやや楕円形にひずみ，さらに糸の周りの背景部分が少ないことが

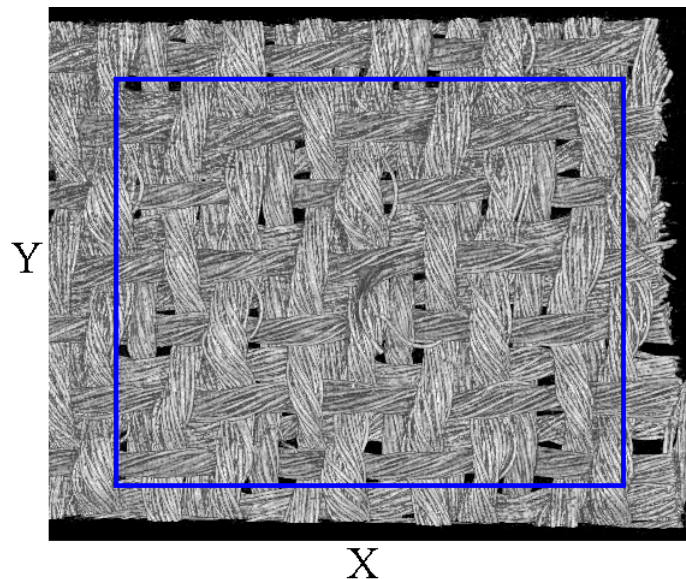


Fig. 5.3: Structure of the double-layered woven fabric reconstructed by volume rendering with CT images (Area surrounded by blue line is region of interest)

わかる。

つぎに3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法により得られた各糸の位置情報から試料の構造を再構成した結果を Fig.5.6 に示す。こちらは各糸の位置関係が正しく再構成されていることを確認している。

5.1.2 実験結果の比較検討

本実験は、それぞれの糸心線点列推定法が糸の追跡に成功しているか失敗しているかが問題ではなく、重要なことは、どちらがより安定して糸を追跡しているかである。本研究では真値そのものが存在しないため、精度評価することは難しいが、2つの構造分析結果は興味深い。すなわち、糸断面モデル相関法による糸心線点列推定結果は、たて糸とよこ糸が交差する箇所において糸同士がめり込んでしまっている箇所が全体的に多く存在する。たとえば、Fig.5.7 と Fig.5.8 はそれぞれ Fig.5.4 と Fig.5.6 における同位置を拡大し、たて糸、よこ糸の交差点にそれぞれ、赤円、青円を付したものである。

真の位置が存在しないため、どちらが悪いとは一概には言えないが、直観的には糸断面モデル相関法のほうが精度が悪いと言える。少なくとも、たて糸、よこ糸がめり込むということは、たて糸、よこ糸が接近しているということであり、場

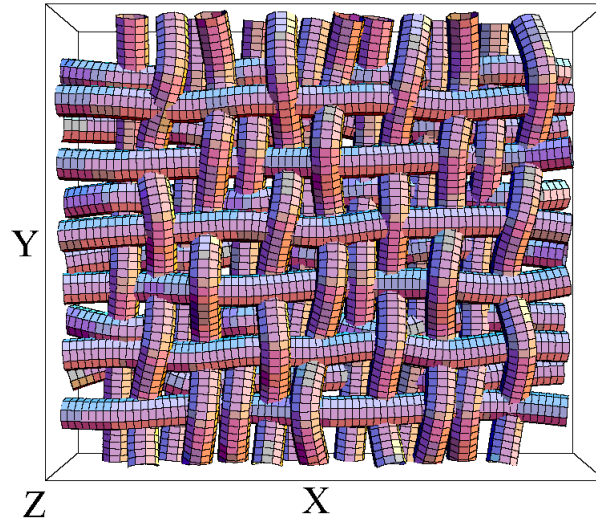


Fig. 5.4: Structure of the sample double-layered woven fabric reconstructed from the positional information estimated by the yarn cross-sectional model correlation method

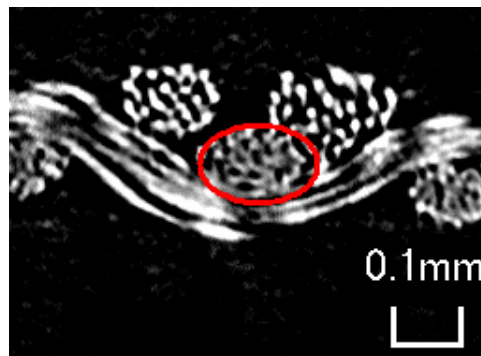


Fig. 5.5: Enlarged CT image of an area in Fig.5.2(Yarn cross-section is surrounded by red line)

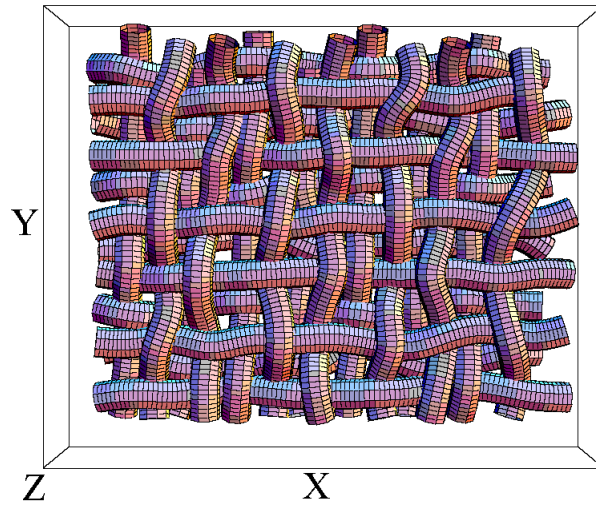


Fig. 5.6: Structure of the double-layered woven fabric reconstructed from the positional information estimated by the 3-d yarn model correlation method

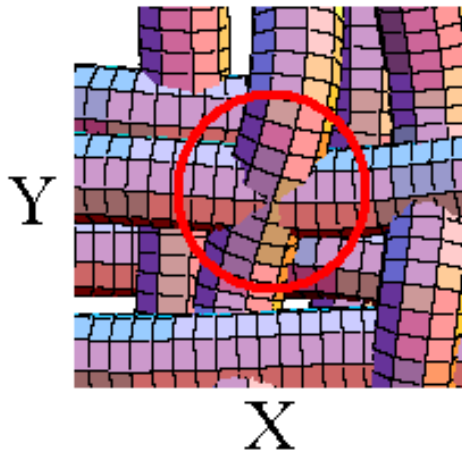


Fig. 5.7: Enlarged image of an area in Fig.5.6(Area surrounded by red line is region of interest)

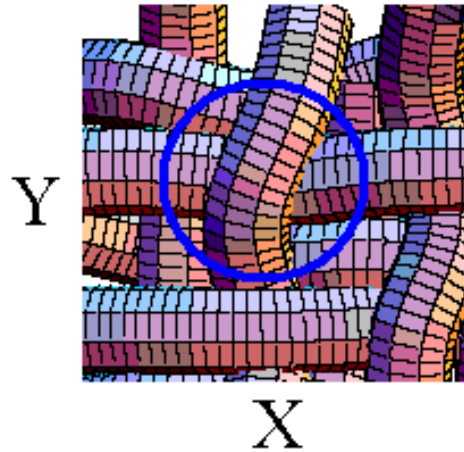


Fig. 5.8: Enlarged image of an area in Fig.5.6(Area surrounded by blue line is region of interest)

合によってはたて糸とよこ糸の上下関係が逆転しかねない。実際、たて糸とよこ糸の上下関係が逆転しているため、糸断面モデル相関法による糸心線点列推定は誤った結果となっている。このことは、3次元糸モデル相関法は単に糸断面モデル相関法を3次元に拡張しているとは捉えるのではなく、糸のモデルとして円柱を利用することによって、より実際の糸形状に近づき、糸の中心の候補をより限定して推定していると捉えるべきである。また3次元糸モデル相関法では、糸の中心だけでなく糸の方向を推定することが可能であり、推定した糸の方向を利用することによって、糸の中心を推定するための初期値がより理想の中心に近づくため、より安定して糸心線点列の推定を行うことができると考えられる。逆に、糸断面モデル相関法では、糸中心推定のための初期値は前断面画像で推定した糸断面の中心をそのまま継承しており、糸断面中心推定の際の初期値が、相関値が局所最大に陥る初期値となる可能性もある。

先験情報を多く利用し、計測対象以外の量も計測し、その情報を積極的に計測に利用することによって、より安定して計測を行えるということが本実験より帰納的にわかる。

ただし、いつでも情報を多く利用したほうがよいとも限らないことに注意が必要である。糸断面モデル相関法は計算領域が2次元であり、推定量が糸断面の中心点座標の2つなのに対し、3次元糸モデル相関法は計算領域が3次元であり、推定量が糸中心点座標の2つ(平面に拘束しているため)と糸方向の2つ(正規化しているため)で合計4つあるためそれだけ計算に時間がかかる。

5.1.3 局所的処理と大局的処理による構造分析

前項の実験結果を別の見方で考える。すなわち、糸断面モデル相関法は追跡する糸に対して「断面」というごく限られたデータを利用した処理である。それに対して3次元糸モデル相関法は3次元ボクセルを利用している点、糸断面モデル相関法よりも多くのデータを利用していることになる。これは、糸断面モデル相関法が局所的な処理とすれば、3次元糸モデル相関法は糸断面モデル相関法よりも大局的な処理といえる。前項の実験では、3次元糸モデル相関法のように大局的に処理することで、よりおおくの先験情報を利用でき、より安定して糸追跡が行えた。すると、より大局的に処理することで、より多くの先験情報が利用でき、より安定な処理が可能となると予想できる。この観点で本研究の構造分析という問題をみても、糸追跡に代わる新たな構造分析法を考えることができる。

糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法にしても3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法にしても、構造分析という目的からすると、糸追跡とは一本の糸のごく限られた部分から糸の中心もしくは方向を推定している点、いわば

局所的な処理であるといえる。別の言い方をすれば、糸一本の局所でモデルに合う最適な解を求めているに過ぎない。このとき、ほかの糸はすべて雑音であり、最適解を求めるにあたり、先験情報を利用することで、この雑音の影響を抑えていたと見ることができる。このため、4.4で述べたように、糸形状が変形した状態でほかの糸の影響を受けた場合は、正しく糸の中心、糸の方向が求められないが、織編物を構成するすべての糸を一本ずつ追跡することは局所に着目するあまり、それが誤りであると認識することができない。また、一般に、測定量以外の物理量の影響を打ち消すには、その物理量を測定する機能がその糸に備わっていなければならない。その物理量の値を知って測定値への影響を消去することが本質的に必要だからである [18]。そもそも注目糸以外の糸も本来雑音ではなく計測対象である。以上をふまえ、構造分析をもっと大局的にとらえて、織編物を構成するすべての糸についてモデルを基準とした最適化の対象とすると、この問題は雑音のない最適化問題に変形することができる。

5.2 大局的構造分析の検討

5.2.1 大局的構造分析法における初期値の重要性

大局的構造分析法を最適化問題とみるならば、その初期値は重要である。すなわち、初期値が適切に設定されない場合、しばしば最適化問題は局所最大(小)に陥る。しかしながら、計測、特に画像計測において初期値を自動で決めることはたいへん難しい。先述したモデルを利用したセグメンテーションに関する研究において、大動脈と肺動脈のセグメンテーションに関する研究 [53] は、はじめに心線のモデルを用いて大局的なあてはめを行う手法であった。人間の臓器の位置はおおよそ決まっているため、何人かのデータを統計的に処理することで平均的な位置を求めることができ、この平均的な臓器の位置を初期値として利用している。また、血管、気管支のモデル構築のための研究 [54] では、手動で円筒モデルを大まかにあてはめている。このように大局的な処理は、最適化の初期値がおおきな問題の一つであるといえる。

5.2.2 3次元繊維モデル相関法を利用した糸追跡法の再考

4.4で提案した3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定法は糸形状が変形していても糸の追跡を行うことのできる利点があった。しかし、糸を追跡する以上、構造分析という立場から見ると、本手法はやはり局所的な処理である。また糸の方向推定は計算領域のすべての繊維の方向を加算したものを糸の方向とみなすこ

とで行ったが、これはすべての繊維の方向が正しく推定され、しかも中心付近を計算領域としたことで、ちょうど糸の撚りの影響が相殺されるということを暗に仮定した処理であり、推定誤差などの影響で中心からずれてしまったとき撚りの影響などをうけ、正しく糸の方向を推定できる保証はない。この状況は3.2.2で示した画像間相関法を利用した糸追跡法と何ら変わらず、4.5の実験はたまたま糸の追跡に成功しただけともいえる。この原因は、3次元繊維モデル相関法を利用した糸方向推定が本質的には糸の方向を推定する処理になっていないことである。糸を構成する繊維のほかの事実、特徴に着目し、先験情報としてモデルに組み込み、目的とする処理を限定する計測系を構築し直す必要がある。

ただし、3次元繊維モデル相関法はほかの糸の影響をうけにくいという特徴があり、この利点をうまく利用することで、大局的構造分析に応用できる可能性がある。

5.2.3 3次元繊維モデル相関法を利用した大局的構造分析の検討

3次元繊維モデル相関法は繊維の方向を推定する処理である。すると、全ボクセルに3次元繊維モデル相関法を適用すると、繊維方向のベクトル場を作ることができる。Fig.5.9は4.5で述べた2本諸撚糸を用いた平織物に対し、同じCT画像を利用して作成した3次元画像に対し、全ボクセルに3次元繊維モデル相関法を適用してできた繊維方向のベクトル場である。ただし、相関値 J_3 があるしきい値以上であるボクセルの繊維方向ベクトルのみを表示している。ここで、相関値の低いボクセルは推定された繊維方向の信頼性が低いとみなすことができるので、以降の処理においても処理に用いることはない。

すると、各ボクセルにおける3次元繊維モデル相関法の相関値、推定繊維方向から、各ボクセルが自己組織的に繊維さらには糸を構成すれば、糸心線点列を直接求めることにはならないが、各糸を分離することができる。そのように各糸を分離することができれば、そのままでも各糸の相対的な位置関係を表す各糸の位置情報であるため構造分析といえる。また、その値を初期値として大局的処理により糸の心線点列を求めることは比較的容易であると考えられる。これはもはや糸を追跡するという考え方でないことに注意されたい。

十分な答えは得られていないが、各糸を分離するための処理を以下に示す。

繊維方向ベクトル場を利用した糸分離法

本手法は、いま検討したように3次元繊維モデル相関法を全ボクセルに適用し、繊維方向のベクトル場が形成されていることを前提とする処理である。提案手法

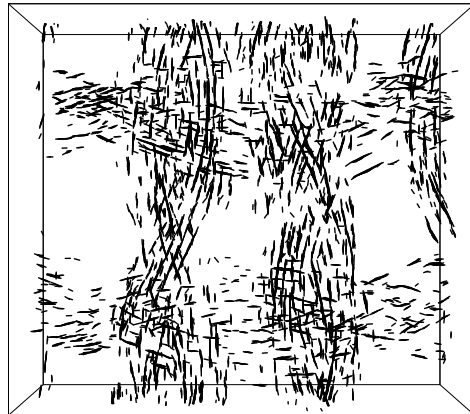


Fig. 5.9: Filament direction vector field, in which voxels have higher values of J_3 than a threshold value

は、大きく2段階に分かれる。すなわち、「ボクセル同士を結合して繊維を再構成する処理」、「再構成された繊維をまとめて糸を再構成する処理」の2段階である。以下で詳しくそれらの手法について述べる。

はじめに、正しく繊維の方向を推定していると思われるボクセルのみを用いるためボクセルの相関値によってしきい値処理を行う。しきい値(これを後の説明の都合によりしきい値Aとする)は実験的に決定されるが、おおよそ理想的な値、すなわち3次元繊維モデル相関法の計算領域中において繊維が仮定した繊維の太さの円柱であり、かつその周囲は背景部分で囲まれている理想的な条件での相関値のおおよそ7割を目安としている。

続いて、ある小領域において推定繊維方向が最も類似したボクセル同士を結合する。ただし、次式のように互いのボクセルにおける繊維方向 d_i, d_j の内積をその類似度 S としている。

$$S = d_i \cdot d_j \quad (5.1)$$

ここで、推定繊維方向の大きさは規格化されているので、最大類似度は1である。この方法を用いてつぎつぎにボクセル同士を結合することによって繊維が再構成される。ただし、小領域内に類似度がしきい値(同様しきい値Bとする)よりも低いボクセルしかない場合は、繊維の再構成を中断する。そのしきい値はやはり実験的に決定されるが、おおよそ0.9を目安としている。これは角度にして約25度である。

つぎに、非類似度として新しく定義する繊維同士の距離をもとにして、それぞれの繊維同士をまとめ、糸を再構成する。非類似度 DS すなわち、繊維同士の距

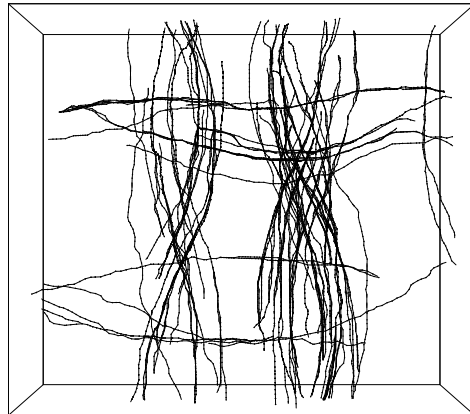


Fig. 5.10: Some of reconstructed fibers by connecting the similar voxels

離は次式で定義される .

$$DS = \max_{s \in f_i} \{ \min_{t \in f_j} \{ |p_s - p_t| \} \} \quad (5.2)$$

ここで, p_s, p_t は繊維を構成するボクセルの座標ベクトルを表し, f_i, f_j は繊維を構成するボクセルの集合を表す . 本非類似度は2つの繊維において, ユークリッド距離の意味で最も近いボクセル同士の組のうちの最大値を意味する . 最も長い繊維, すなわち最もボクセルを有する繊維から, あるしきい値 (同様にしきい値 C とする) によって繊維をまとめていく . なお, しきい値はやはり実験的に決められるが, その非類似度の意味からおおよそ系の半径を目安にしている . ただし, このしきい値によっては, 再構成される系の本数が本来の本数よりも多く, または少なくなる可能性があることが本手法の課題である . しかしながら, 本手法では, 3次元系モデル相関法による系心線点列推定法で処理することができなかった系形状が変形した系に対しても対応でき, さらにどの系心線点列推定法でも必要であった系追跡のための初期設定が不要である . このことは組織分解の自動化に近づくことを意味し本手法の大きな利点といえる .

繊維方向ベクトル場を利用した系分離実験

Fig.5.9 の繊維方向ベクトル場, すなわち 4.5 で述べた 2 本諸撚系を用いた平織物における推定繊維方向ベクトル場を用いて系分離の実験を行った . 実験結果を Fig.5.10, Fig.5.11 に示す . Fig.5.10 は再構成された繊維の一部を表し, Fig.5.11 は再構成された 2 本の系を表している . それぞれ実験的にしきい値を試行錯誤的に変更し, 比較的良好と思われる結果であるが, 見てわかるように十分な数の系の

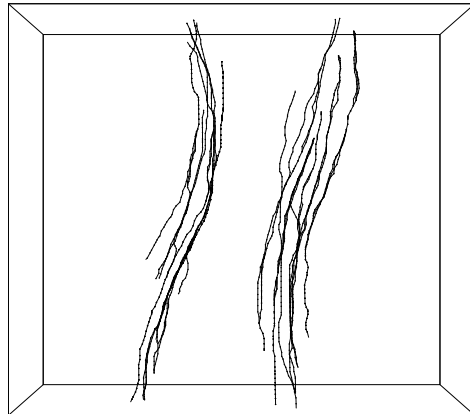


Fig. 5.11: Two reconstructed yarns by binding up the reconstructed fibers

が再構成されていないことがわかる。

ここで本手法における3つのしきい値(A, B, C)の変更による影響について考える。まず、しきい値Aが小さすぎると、繊維の再構成の際、推定された繊維方向に誤差を含むボクセルを多く採用する可能性が高いが、逆に大きすぎると今度は繊維再構成の際に、利用できるボクセルの数が減ってしまい、うまく繊維を再構成できない可能性が高くなる。つぎに、しきい値Bは小さすぎると望ましくないボクセル同士を結合してしまい、大きすぎると同一繊維のボクセル同士においても結合できなくなる。最後に、しきい値Cについては前述したとおり、小さくすると分離される糸の本数が本来の本数より多くなってしまい、大きすぎると繊維の過剰なまとめにより、異なる糸の繊維同士も同一糸としてまとめてしまう。

このように本手法はしきい値の設定がトレードオフの関係となっており、やはり本質的に同一繊維を再構成するだけの処理、同一糸の繊維まとめるだけの処理になっていないことが本手法の欠点である。本手法の場合、同一繊維を再構成する処理は、繊維を再構成する処理ではなく、推定繊維方向の似ているボクセルをまとめているに過ぎない。また、糸をまとめる処理においても、糸を再構成する処理ではなく、再構成された繊維の距離が近い繊維同士をまとめているに過ぎない。3.2.3で考察したように、先験情報をうまく利用して、目的の処理に限定される計測系を構築することが重要であり、このとき、糸の全領域、また織編物を構成するすべての糸を考慮して大局的に糸分離を行うことができれば、さらによい結果が得られると考える。

系分離結果を利用した大局的構造分析の検討

本項では必ずしも十分な答えは得られていないが，大局的構造分析の概念を述べる．大局的構造分析では，繊維方向ベクトル場を利用した系分離で推定した織編物を構成するすべての系のおおよその位置を初期値として，次式のような評価関数 J_G の最適化問題を考える．

$$J_G(\mathbf{X}, \mathbf{D}) = \sum_G \{h(\mathbf{X}, \mathbf{D}, \mathbf{p})f(\mathbf{p}) + g(\mathbf{X}_i, \mathbf{D}_i) + e(\mathbf{X}, \mathbf{D})\} \quad (5.3)$$

$$\mathbf{X}_i = \{\mathbf{x}_{1i}, \mathbf{x}_{2i}, \dots, \mathbf{x}_{mi}\}^T \quad (5.4)$$

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n\} \quad (5.5)$$

$$\mathbf{D}_i = \{\mathbf{d}_{1i}, \mathbf{d}_{2i}, \dots, \mathbf{d}_{mi}\}^T \quad (5.6)$$

$$\mathbf{D} = \{\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_n\} \quad (5.7)$$

ここで， \mathbf{x}_{ji} は i 本目の心線点列における j 番目の推定中心点の座標ベクトル， \mathbf{X}_i は i 本目の心線点列のすべての座標ベクトルを要素とする列ベクトル， \mathbf{X} は織編物を構成するすべての系の \mathbf{X}_i を要素とする行ベクトルである．また， \mathbf{d}_{ji} は i 本目の心線点列の j 番目の推定中心点における糸モデルの傾きを表す単位方向ベクトル， \mathbf{D}_i は i 本目の心線点列のすべての糸モデルの傾きを表す単位方向ベクトルを要素とする列ベクトル， \mathbf{D} は織編物を構成するすべての系の \mathbf{D}_i を要素とする行ベクトルである． G は計算領域を表し，この場合3次元ボクセルデータすべての領域または複数の糸を含む大局的な領域， h は糸モデル， p は計算点， f は3次元ボクセルデータである．また， g は糸の曲率などを考慮した一本の糸内での制約項， e は糸同士の間隔などを考慮した糸同士の制約項である．

関数 g や e のように糸の全領域，さらに織編物を構成するすべての糸を考慮した大局的処理によって，糸同士の位置関係を誤ることなくより安定して構造分析が行えるものとする．また，最適化においては漸近学習型計測系の考え方 [62, 63] を応用し，糸モデルなどの各パラメータの変更などを先験情報，計測結果を利用して再帰的に行ない，より精度よく糸心線点列を推定することが有効であると考えられる．

5.3 計測における大局的処理

第3, 4, 5章にわたり織編物の構造分析法について検討してきたが，それと同時に本研究を通じて，帰納的に計測の着眼点として，モデルの役割，先験情報，計測結果の利用について検討し，十分な答えは得られなかったが大局的処理の考えに至った．

まず計測を行う上で、計測対象の性質、特徴などの先験情報を組み込み、解もしくは計測の範囲を限定できるというモデルの役割を確認した。そして、多くの先験情報、また計測結果をうまく利用することにより計測を安定に行うことができ、モデルはそのように多くの先験情報が組み込むことが可能で、計測対象以外の量についても計測が行えるよう構築することが効果的であるといえた。この場合、局所的な計測を行うのではなく、計測対象を広げ、大局的な計測を行うことが有効であると糸断面モデル相関法と3次元糸モデル相関法の比較実験から帰納的に考えることができる。実際、3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法や3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定法は、それぞれ糸の方向、繊維の方向という計測対象以外の量も推定、計測し、それをさらに目的の計測に利用した点に特徴があった。しかし、大局的处理という観点からすると、推定した糸の方向、繊維の方向を糸または繊維のごく一部分の局所にしか利用していない。より大局的に、すなわち推定した糸の方向、繊維の方向を利用して糸や繊維の曲率など考慮して、糸の追跡や繊維による糸の再構成などに利用することでできればさらに安定して糸の追跡が行えると考えることができる。

5.4 本章のまとめ

本章では、はじめ糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法と、3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法を比較し、糸心線点列を精度よく推定できているか否かの処理の安定性について議論した。つぎに、その比較結果から糸のごく一部のみに着目する局所的処理と糸全体、さらにほかの糸も考慮する大局的处理の考え方を示した。有効な手法を提案するに至らなかったが、大局的な構造分析として3次元繊維モデル相関法を利用した大局的構造分析、すなわち、繊維方向ベクトル場を利用した糸分離を、実際の2本諸撚糸を使用した織物について実験的に試み、さらに糸全体、織編物を構成するすべての糸も考慮にいたった構造分析の考え方を示した。

第6章 糸心線点列位置情報を活用した織編物構造の表現方法

本章では、構造分析結果、すなわち各糸の心線点列位置情報の応用として、組織図自動作成法と3次元組織構造再構成法の2つの手法を提案する。組織図とは織編物の設計図のことで従来より織編物の構造の表現に用いられてきた。本章では従来手法では行うことのできなかつた二重織物の組織図自動作成について実験を行い、有効性を検討する。また、3次元組織構造再構成法により、従来「組織図」のように2次的にしか表現することのできなかつた組織分解結果を3次的に表現することが可能となり、全く新しい解析方法を与えることができることを示す。

6.1 糸心線点列位置情報活用の意味

計測において、計測結果の表示方法は重要である。計測工学が知識獲得の工学的行為 [58] であるならば、計測の結果によって何らかの知識が得られなければならない。本研究において、構造分析結果、すなわち各糸の心線点列の位置情報はまだそれだけではあまり意味がなく、より有意な情報に変換することが重要である。

また、本研究では3次元画像を扱うが、3次元画像処理という立場においても、可視化の重要性は非常に大きい [30]。それはわれわれが3次元画像をひとめで見えないことによるものである。実際、3次元組織構造再構成法により織編物の構造を直観的にわかりやすい形で表現している。

6.2 組織図への活用

6.2.1 織物組織図

はじめに織物の組織図について簡単に説明する。織物は織り方を工夫することによって装飾性、通気性、防寒性などに優れた織物を作ることができる。しかし、このような機能を持った織物は重ね組織など立体的な構造を持っており、一見する

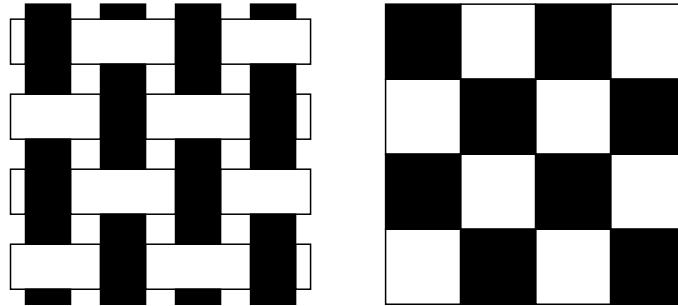


Fig. 6.1: Weave diagram of a plain woven fabric

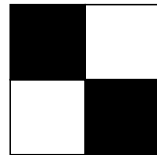


Fig. 6.2: Weave repeat of a plain woven fabric

ととても複雑な構造を有するように見える。しかしながら、2.1.2で述べたように織物は基本的に垂直に交わるたて糸とよこ糸から構成されている。そのため、たて糸とよこ糸の交差点での状態は、たて糸がよこ糸の上に織り重なるか、その逆かの2つの状態しか存在しない。したがって、もしたて糸とよこ糸のすべての交差点でたて糸とよこ糸の交差する状態を知ることができれば、その情報をもとに同じ構造の織物を織ることができる。このたて糸とよこ糸の交差する状態を記した紙が組織図である。Fig.6.1は平織物の組織図であるが、組織図はたて糸がよこ糸の上に交わっている交差点に印がつけられた格子状の紙のことである。ここで、織物には周期があるため、その一周期の情報だけが必要である。この一周期分の構造のことを一完全組織と呼ぶ。平織物の一完全組織は 2×2 であるので、組織図はFig.6.2となる。

もし組織図があれば同じ構造を持った織物を何回でも織ることができる。すなわち、組織図は織物における設計図であるということができる。このことから、従来より織物構造の解析とは組織図の作成を意味することが多い。ただし、全く同じ織物を織るためには、このほか使われている糸の種類、糸の張力、糸密度などさまざま構成要素を知らなければならない。重ね組織の織物の組織図においても一重組織のときと全く同じ方法で記述される。たとえば、Fig.6.3は二層の平織りからなる二重織物の組織図である。この組織図は重ね組織の織物の場合でも構造の解析に必要な情報はたて糸とよこ糸の交差状態だけであることを示している。

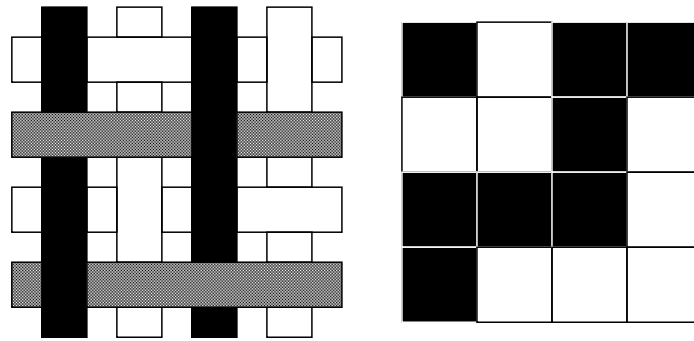


Fig. 6.3: Weave diagram of a double-layered woven fabric

6.2.2 織物組織図自動作成法

糸心線点列位置情報から組織図を作成することを考える．組織図を作成するために行うことは，織物の一周期のうちのたて糸とよこ糸のすべて交差状態を調べることに尽きる．組織図作成の手順を以下に示す．ただし，対象はおおよそ平面的な織物であることを仮定し，説明のため，たて糸，よこ糸，高さ方向をそれぞれ x 軸， y 軸， z 軸とする．

はじめに，たて糸とよこ糸を分類するために糸心線点列の x, y 座標のみを用い，最小二乗法により各糸の近似直線を計算する．近似直線の傾きと y 切片は次式で計算される．

$$\begin{aligned}
 A &= (X^T X)^{-1} X^T Y & (6.1) \\
 A &= (a, b)^T \\
 X &= (\{x_i\}, 1), \quad Y = (\{y_i\}) \quad (1 \leq i \leq N).
 \end{aligned}$$

ここで， a は近似直線傾き， b は y 切片， $\{x_i\}, \{y_i\}$ はそれぞれ糸心線点列の x 座標と y 座標の列ベクトルで， N は得られた糸心線点列の点の数である．そして，それぞれの糸はいま計算された近似直線の傾きからたて糸とよこ糸の分類される．ここで，よこ糸はたて糸よりも張力が弱いため，よこ糸の z 座標の分散はたて糸のそれよりも大きくなる．したがって，この z 座標の分散を計算することでたて糸，よこ糸どちらの糸かを判断できる．逆に言うと z 座標の分散は糸の張力と密接な関係がある．このことは織物の構造の評価につながり，広義組織分解の一つの分析として用いることも可能であることを示している．そして，たて糸の各糸は x 座標の平均値，よこ糸の各糸は y 座標の平均値をもとに昇順並び替えられる．続いて，たて糸，よこ糸すべての交差点における交差状態を調べる．ここで，たて糸，よこ糸の交差点の位置は，たて糸，よこ糸が最も接近するそれぞれ点の位置とす

る．すなわち，近似曲線の交点ではないことに注意されたい．そして，交差点におけるそれぞれの z 座標をもとにたて糸がよこ糸の上に位置するか否かを判断し，最後にたて糸がよこ糸の上に位置している交差点に印をつける．以上の手順により組織図が作成される．また織物の一周期は次式によりそれぞれたて糸の一周期 R_{wa} ，よこ糸の一周期 R_{we} として簡単に求められる．

$$(R_{wa}, R_{we}) = \arg \min_{r_{wa}, r_{we}} Z_{kl} = \begin{cases} Z_{(k+r_{wa})l} & \{\forall k: 1 \leq k \leq K - r_{wa}, \quad \forall l: 1 \leq l \leq L\} \\ Z_{k(l+r_{we})} & \{\forall k: 1 \leq k \leq K, \quad \forall l: 1 \leq l \leq L - r_{we}\} \end{cases} \quad (6.2)$$

ここで， Z_{kl} は k 番目のたて糸と l 番目のよこ糸の状態である．また K と L はそれぞれたて糸とよこ糸の本数である．

組織図自動作成実験

提案する組織図自動作成法を実際の2つの試料を用いて3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法により得られた糸心線点列に適用した実験結果について以下に述べる．はじめに5.1の糸断面モデル相関法と3次元糸モデル相関法の実験の比較の際に実験で用いた試料と同じ二重織物を実験試料として，問題なく組織図を作成できることを実験的に検証する．つぎに，糸密度が比較的高く，さらに糸に独特な撚りのかけられた，組織図の作成が難しいと思われる二重織物を実験試料として，本手法の有効性および限界について考察する．

組織図自動作成法の検証

実験の概要 本実験では5.1の実験で使用した織物と同じ二重織物を用いて実験を行った．5.1により糸同士の関係が正しく復元されていることを確認した糸心線点列の位置情報を用いている．Fig.6.4は本実験で用いた試料の組織図である．したがって，実験によりFig.6.4と同じ組織図が得られることが期待される．

実験結果 実験により得られた試料をFig.6.5に示す．Fig. 6.4と見比べ，どちらも同じ組織図であることがわかる．すなわち提案手法により，たて糸，よこ糸のすべての交差点での交差状態を正しく求められていることがわかる．

なお，実験試料の周期をみつけるため式(6.2)を適用して得られた周期はたて糸，よこ糸それぞれ8，8と正しく求められている．求めた周期より一完全組織図をFig.6.6に示す．

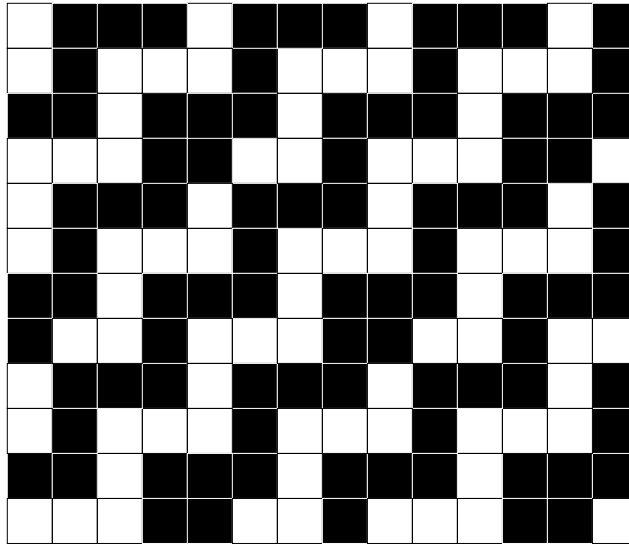


Fig. 6.4: Weave diagram of sample double-layered woven fabric

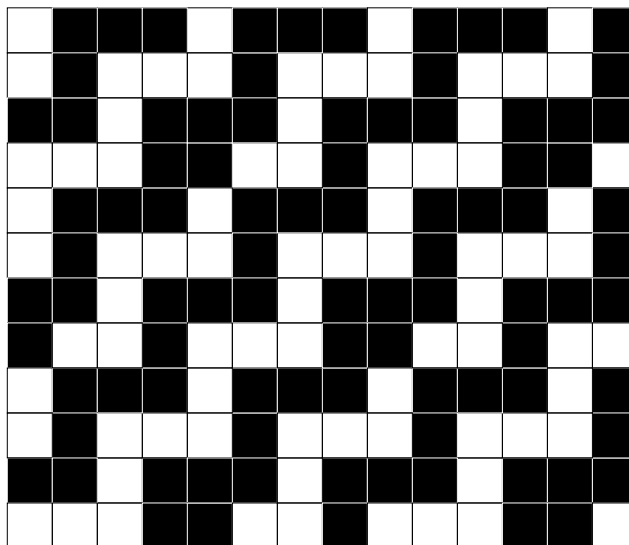


Fig. 6.5: Weave diagram constructed by the proposed method

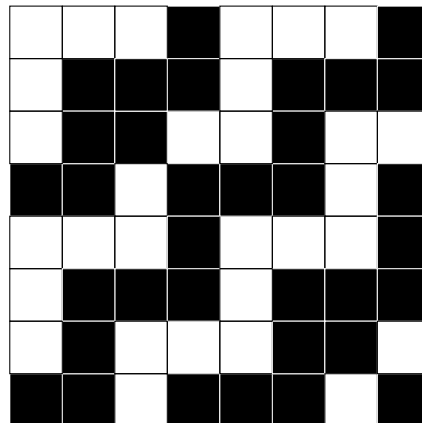


Fig. 6.6: Weave repeat extracted by the proposed method

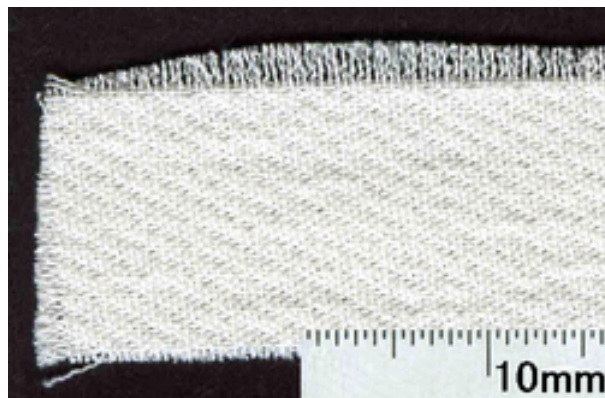


Fig. 6.7: Photograph of the sample double-layered woven fabric

組織図自動作成法の有効性の検討

実験の概要 本実験で使用した編物試料を Fig.6.7 に示す．糸の太さが約 0.2mm のたてよこ二重織物である．5.1.1 の実験同様，糸密度が高いため，糸心線点列は 3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法を適用して得られた糸心線点列を用いている．推定された各糸の心線点列を元の断面画像に重ね合わせることにより少なくとも各糸断面内に糸断面の中心が推定されている，すなわちそれぞれの糸同士の間隔は実験により正しく得られていることを確認している．参考までに 3次元組織構造再構成により 3 次元的に再構成して表示したものを Fig.6.8 に示す．各糸が独特な撚を持っていることがわかる．また，Fig.6.9 は本試料の組織図である．やはり実験により Fig.6.9 と同じ組織図が得られることが期待される．

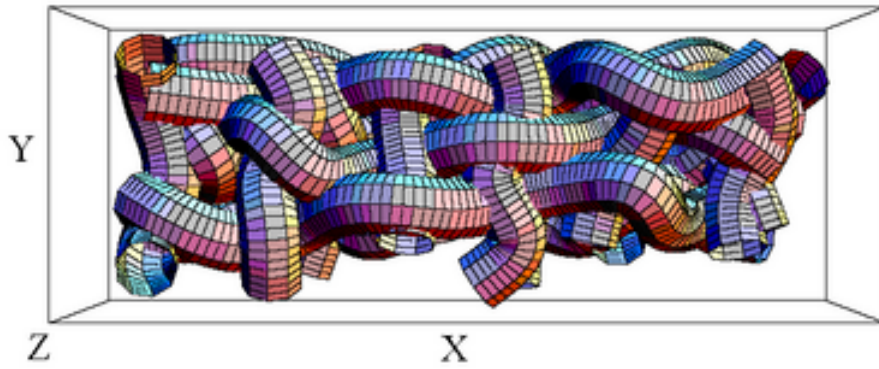


Fig. 6.8: Structure of the woven fabric reconstructed from the positional information estimated by the 3-d yarn model correlation method

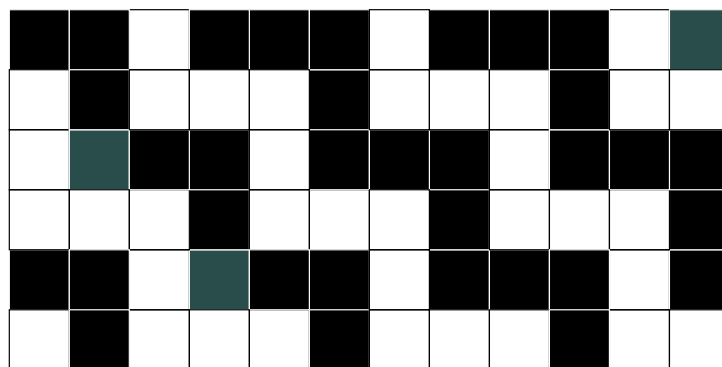


Fig. 6.9: Weave diagram of sample woven fabric

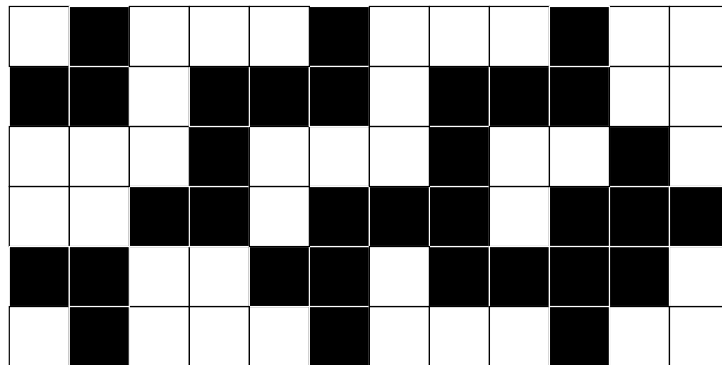


Fig. 6.10: Weave diagram constructed from yarn positional data

実験結果 Fig.6.10 に実験により得られた組織図を示す．Fig.6.9 と見比べると，組織図が異なっていることがわかる．この原因として重ね組織特有の糸のよじれを挙げることができる．重ね組織とはまさに一重組織を重ね合わせたもので，基本的に各層はほかの層に対して独立である．すなわち，異なる層の糸は互いに拘束されていない状態にあり，結節糸とよばれるたて糸（もしくはよこ糸）をほかの層のよこ糸（たて糸）と交差させることによって互いの層を結節している．なお，この異なる層のたて糸とよこ糸が交差している点を結節点とよぶ．このように重ね組織は，ほかの層の糸を互いに拘束しないことによって，結果的に立体的な構造を作り上げている．すると異なる層において隣り合うたて糸の順番，もしくはよこ糸の順番を一意に決定することはできなくなる．この影響により Fig. 6.10 はもとの組織図とは異なる組織図となったと考えられる．実際，Fig.6.10 の左から 11 番目と 12 番目のたて糸，また上から 1 番目と 2 番目のよこ糸，さらに上から 3 番目と 4 番目のよこ糸を入れ替えることによって，Fig.6.11 のように Fig.6.9 と同じ組織図を得ることができる．したがって，この重ね組織特有の現象である糸のよじれによる糸の順序の乱れを補正して本来の組織図を完成させることは専門知識に頼らざるを得ないと言える．本論文は計測という立場にあり，エキスパートシステムを構築することが目的ではないため，糸のよじれの補正までには立ち入らないことにするが，簡単な多重織物に対しては糸のよじれによる糸順序の乱れを補正する手法を提案している [34, 67]．実際，Fig.6.11 はこの糸の順序乱れ補正のための提案手法により補正したものである．

また，編物の組織図の作成にはついでには多くの専門的知識が要求されるため本研究では扱わないものとするが，糸心線点列の位置情報を用いることによって，編物の組織図を作成することも可能であると考えられる．

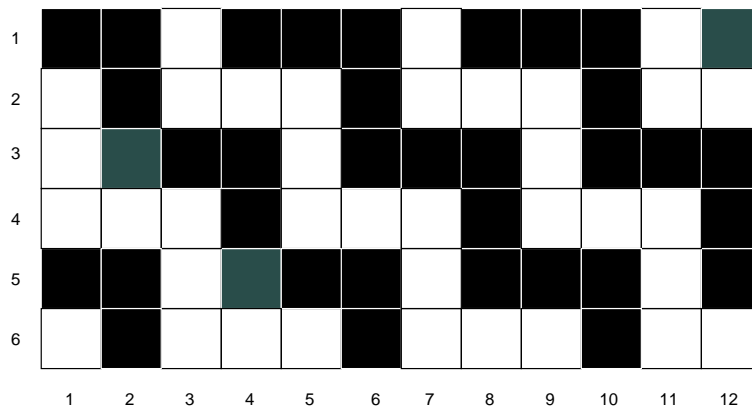


Fig. 6.11: Weave diagram constructed from yarn positional data using proposed yarn sort method

6.3 3次元組織構造再構成への活用

3次元組織構造再構成法はすでに各糸心線点列推定法の実験結果の評価に利用しているとおり，織編物の3次元的な構造を評価する上でたいへん有用な方法である．本節では，この3次元組織構造再構成法について詳しく述べる．

6.3.1 糸の表現

2.3.1において，糸を「円を任意の連続した曲線に沿って，その円のものる平面と任意曲線が常に垂直になるように移動させたときにできる軌跡」としてモデル化した．3次元組織構造再構成法はまさにこのモデルのもとになっている．2.3.1の糸のモデル化において，円とは糸断面を表している．しかし，糸断面は円形に限らず，織り方や仕上げ方，生地の状態，糸の張力などの影響によりさまざまな形に変化する．そこで，糸断面をより一般表現して，2次元の閉曲線とする．また，糸の心線は，空間上で任意の曲線を描き，連続的に変化する．すなわち，糸は「任意の2次元閉曲線を任意の連続した曲線に沿って，その閉曲線のものる平面と任意曲線が常に垂直になるように移動させたときにできる軌跡」として表現できる．

このような糸の表現として，織物デザインツールの開発を目的に Generative Model(以下，GMと略記する)が提案されている [33]．次項ではGMについて簡単に紹介する．また，同様の研究として，たて編の視覚的評価のため NURBS 曲面を用いて，たて編のモデリングを行っている研究 [64] もあるが，本質的な考え方は同じである．

6.3.2 GENERATIVE MODEL

GM は, generator とよばれるものの連続的な移動により生成される形状のことである。一般的に GM は低次元の generator の移動によって形成される。一例として曲線 $\gamma(u)$ と媒介変数化された変換 $\delta(p, v)$ を考える。 $\delta(p, v)$ は, パラメータ v が与えられたとき p が取る点上を動く。すると形成される表面 $S(u, v)$ は, 曲線 γ にしたがって動く δ によって作られるすべての点から形成される。つまり, $S(u, v) = \delta(\gamma(u), v)$ である。

GM の媒介変数表現

織物における糸は原則として同じ方向の糸同士は平行であるため, 2次元の曲線に沿って, 2次元の断面曲線を動かすことによって出来るワイヤとみなすことができる。そのため, 糸の横断面はワイヤに対して垂直である。いま, 媒介変数関数 $\gamma(u) = (\gamma_1(u), \gamma_2(u))$ を断面曲線, $\delta(v) = (\delta_1(v), \delta_2(v))$ をワイヤ曲線とする。 v における $\delta_1(v)$ の一次導関数を $\delta_1'(v)$, 同様に $\delta_2(v)$ に対しても $\delta_2'(v)$ とするならば, v における δ の接線ベクトルは $\delta'(v) = (\delta_1'(v), \delta_2'(v))$ とかける。そして, この δ' を正規化した正規化接線ベクトル \mathbf{t} は,

$$\mathbf{t}(v) = \frac{\delta'(v)}{|\delta'(v)|} \quad (6.3)$$

となる。ここで, $\mathbf{t}(v) = (\mathbf{t}_1(v), \mathbf{t}_2(v))$ とし, 接線ベクトル $\delta'(v)$ の大きさは,

$$|\delta'(v)| = \sqrt{(\delta_1'(v))^2 + (\delta_2'(v))^2}$$

で表せる。

すると, ワイヤ曲線の法線ベクトル $\mathbf{n}(v) = (\mathbf{n}_1(v), \mathbf{n}_2(v))$ は,

$$\mathbf{n}(v) = \begin{pmatrix} -\mathbf{t}_2(v) \\ \mathbf{t}_1(v) \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

と定義できる。

糸の表面 $S(u, v)$ は, 横断面の X 軸を \mathbf{n} 方向に, Y 軸をワイヤ曲線の Y 軸に, その原点がワイヤ上にくるように変換して, その横断面を動かすことによって定義できる。つまり,

$$S(u, v) = \begin{pmatrix} \mathbf{n}_1(v) \bullet \gamma_1(u) + \delta_1(v) \\ \gamma_2(u) \\ \mathbf{n}_2(v) \bullet \gamma_1(u) + \delta_2(v) \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

である。

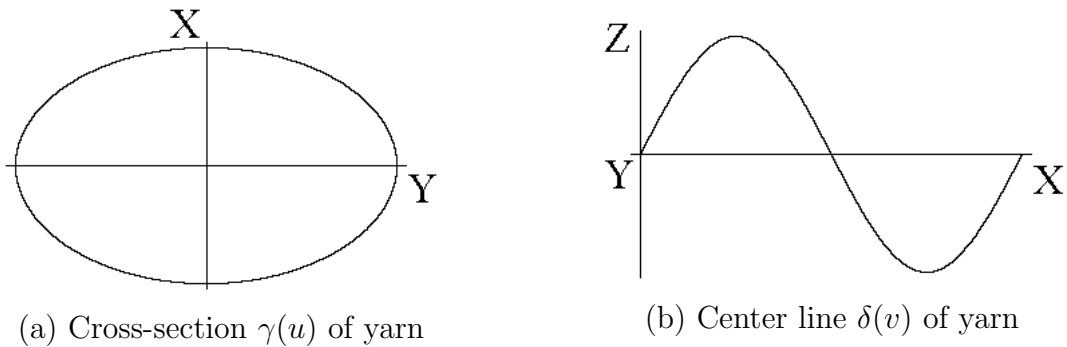


Fig. 6.12: Example of cross-section and center line of GM

GMの例

数学的に，Fig.6.12(a) と (b) のような楕円形をした糸の横断面 $\gamma(u)$ と sin 曲線の糸の心線 $\delta(v)$ はそれぞれつぎのように表せる．

$$\gamma(u) = \begin{pmatrix} r_a \cos(2\pi u) \\ r_b \sin(2\pi u) \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

$$\delta(v) = \begin{pmatrix} v \\ h \sin(2\pi v) \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

ここで， $r_a =$ 短径， $r_b =$ 長径， $h =$ sin 曲線の振幅である．

式 (6.7) を微分して式 (6.3) に代入すると，法線ベクトル $\mathbf{n}(v)$ は下式のようになる．

$$\mathbf{n}(v) = \begin{pmatrix} \frac{-2\pi h \cos(2\pi v)}{\sqrt{1+(2\pi h \cos(2\pi v))^2}} \\ \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi h \cos(2\pi v))^2}} \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

すると，式 (6.6),(6.7),(6.8) を式 (6.5) に代入すると，Fig.6.13 のように糸の表面 $\mathbf{S}(u, v)$ を表現できる．

$$\mathbf{S}(u, v) = \begin{pmatrix} \frac{-2\pi h \cos(2\pi v) r_a \cos(2\pi u)}{\sqrt{1+(2\pi h \cos(2\pi v))^2}} + v \\ r_b \sin(2\pi u) \\ \frac{r_a \cos(2\pi u)}{\sqrt{1+(2\pi h \cos(2\pi v))^2}} + h \sin(2\pi v) \end{pmatrix} \quad (6.9)$$

6.3.3 3次元組織構造再構成法

3次元組織構造は，推定された各糸の心線点列より各糸を3次元的に表現することによって再構成される．本研究では，心線の情報は点列で与えられているが，

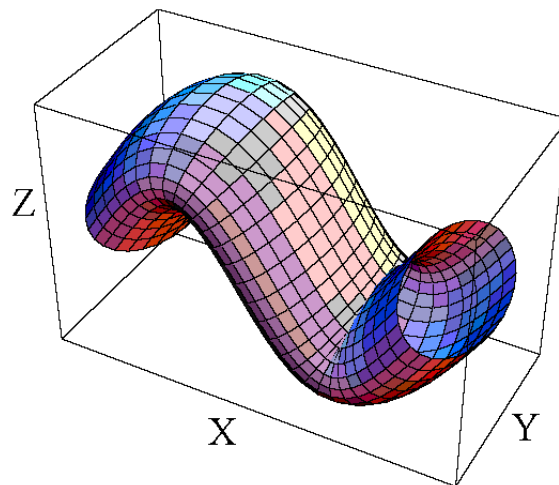


Fig. 6.13: Surface shape of the yarn represented by GM

GM に応用するためには媒介変数表現で，曲線として表現されなければならない．さらに GM は織物のデザインを対象としていたため心線は 2 次元曲線として表現されたが，本研究は編物も対象としているため，3 次元に拡張されなくてはならない．以下では，心線点列の補間，および GM の 3 次元への拡張について述べる．

心線点列の補間

構造分析により得られた心線点列を媒介変数表現で補間することを考える．点列の補間としてスプライン補間がよく知られている．心線はなめらかな曲線として表現されれば十分であるため，本研究では 2 回導関数まで連続である 3 次スプライン補間 [57] を行う．実際には， x, y, z 座標それぞれを共通媒介変数 v によって補間している．これにより心線が v を媒介変数としたなめらかな曲線 $\delta(v)$ として得られる．

以上より，構造分析により推定された心線点列を GM に利用することのできる心線の媒介変数表現に変換することができる．

心線の肉付け

はじめに，糸を GM で表現する理由について簡単に述べる．心線点列が補間されれば，心線だけでも糸の形状は理解できる．しかし，3 次元的に織編物の組織構造を解析するには心線の表示だけでは Fig.6.14 のように糸同士がどのように交

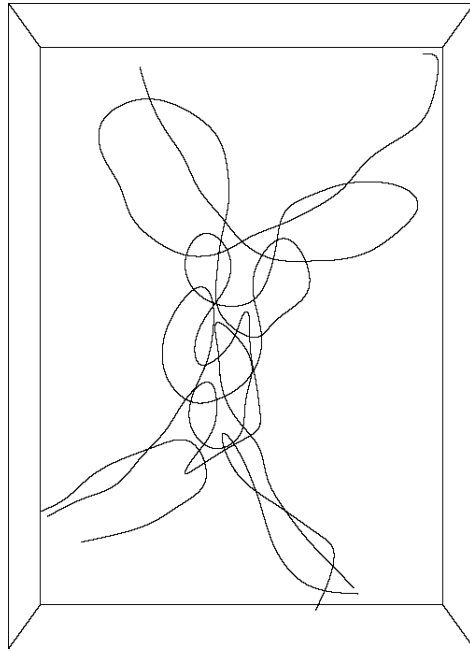


Fig. 6.14: Center line of the knitted fabric of the net stitch of Fig.4.9

わっているかを理解することが難しい．そこで，直観的にその構造を理解するために心線を肉付けする必要がある．これがGMを用いる理由である．そこでGMを一般的な糸を表現できるように3次元に拡張する．GMは織物デザインツールとして提案されたため，表現できる糸形状は2次元に限定されていた．いま，GMにおける $\delta(v)$ を $\delta(v) = (\delta_1(v), \delta_2(v), \delta_3(v))$ と3次元曲線に拡張することを考える．すると， v における正規接線ベクトル \mathbf{t} は，

$$\mathbf{t}(v) = \frac{\delta'(v)}{|\delta'(v)|} \quad (6.10)$$

となる．ここで， $\mathbf{t}(v) = (t_1(v), t_2(v), t_3(v))$ とし，接線ベクトル $\delta'(v)$ の大きさは，

$$|\delta'(v)| = \sqrt{(\delta_1'(v))^2 + (\delta_2'(v))^2 + (\delta_3'(v))^2}$$

で表される．

ワイヤ曲線の法線ベクトル $\mathbf{n}(v) = (\mathbf{n}_1(v), \mathbf{n}_2(v), \mathbf{n}_3)$ は無数に考えられるが，ここではGMにならい，糸の表面 $S(u, v)$ のY軸を心線のY軸に合わせるため，ワ

ワイヤ曲線の法線ベクトル \mathbf{n} は、

$$\mathbf{n}(v) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \frac{t_3(v)}{\sqrt{t_1(v)^2 + t_3(v)^2}} \\ 0 \\ -\frac{t_1(v)}{\sqrt{t_1(v)^2 + t_3(v)^2}} \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

と定義する。ただし、 $\mathbf{t}(v) = (0, t_2(v), 0)$ のときは注意が必要である。このほか $\mathbf{n}(v)$ は目的に応じて変更されるべきである。たとえば、 $\mathbf{n}(v)$ の一つとして、主法線単位ベクトルなどが考えられる。

糸の表面 $S(u, v)$ は、横断面の X 軸を \mathbf{n} 方向に、 Y 軸をワイヤ曲線の Y 軸に、その原点がワイヤ上にくるように変換して、その横断面を動かすことによって定義できる。つまり、糸の表面は

$$S(u, v) = \begin{pmatrix} \mathbf{n}_1(v) \cdot \gamma_1(u) + \delta_1(v) \\ \gamma_2(u) + \delta_2(v) \\ \mathbf{n}_3(v) \cdot \gamma_3(u) + \delta_3(v) \end{pmatrix} \quad (6.12)$$

と表せる。

3次元組織構造再構成の意義

3次元的に組織構造を表現することは直観的にその構造を理解するのに都合がよい。たとえば、2.3.1で述べたように糸を一本一本独立に表現すること以外にも多くの利点が考えられる。繊維製品、特に編物の構造を設計段階でシミュレートすることは現在の技術では困難で、設計者の思いどおりの構造が実現されているかを確かめるためには実際に編んでその様子を見なければならぬ。この意味で3次元的に組織構造を再構成することはたいへん有意なことであると考えられる。また、Fig.6.15はFig.4.9のネット編物の糸に色をつけたものである。これによりそれぞれの糸が全体の構造に対してどのように流れているかが簡単にわかる。

6.4 本章のまとめ

本章では織編物の構造分析の応用として、組織図自動作成法と3次元組織構造再構成法の2つの手法を提案した。組織図自動作成では、2つの二重織物の構造分析結果である糸心線点列からそれぞれ組織図を作成した。2つ目の試料を用いた実験では多重織物特有の糸のよじれにより、もとの織物と同じ組織図は作成されなかったが、本研究は織編物の組織分解自動化における計測を行うことを目的とす

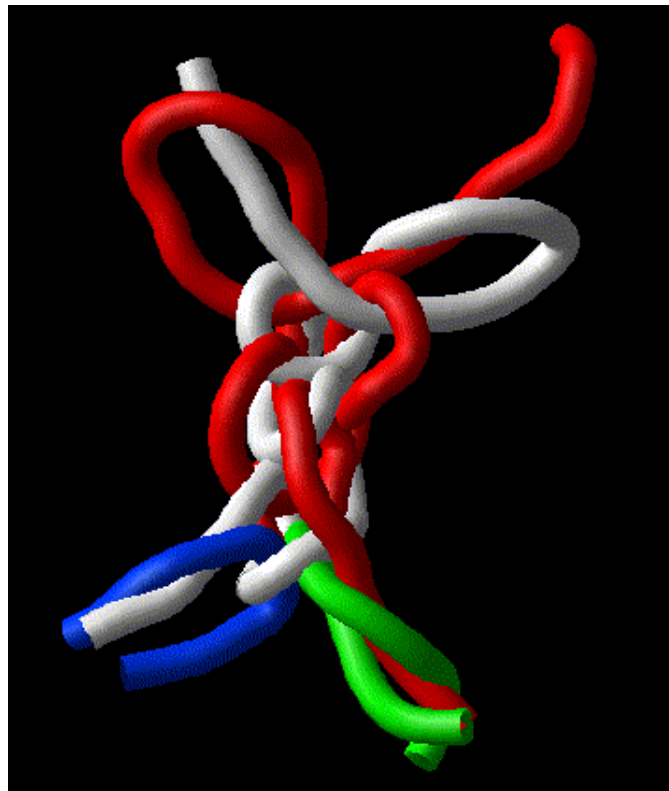


Fig. 6.15: Knitted fabric structure of the net stitch of Fig.4.9 represented by colored yarns

るため、特に補正は行わなかった。また、3次元組織構造再構成法について、GMを紹介し、ついで、心線点列の補間、心線の肉付けについて述べた。また、3次元組織構造再構成の意義について、3次元的に組織構造を再構成することは織編物の構造を解析することのほかに織編物を設計する上でも有意であることを述べた。

第7章 結言

7.1 本論文のまとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる．まず本研究の目的にしたがい，はじめに「織編物の狭義組織分解の自動化のための計測」に関して得られた結論について述べる．つぎに，本研究を通じて帰納的に得られた「計測における着眼点」について述べる．

7.1.1 織編物の狭義組織分解自動化のための計測について

- CTによる断面画像を利用した構造分析法の提案
試料の表面画像から行なわれていた従来の組織分解の自動化と異なる新しい組織分解自動化のための織編物構造の解析方法として，断面画像を利用した織編物構造の解析方法を提案した．組織分解における種々の要求に対応するため，組織分解の上で必要な基礎的情報，すなわち糸心線点列の位置情報を得ることを目的とした構造分析の考え方を提案した．これにより，各糸の独立表現などいままでにない新しい組織分解方法の可能性が広がる．
- 糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法の提案
糸断面モデルと呼ばれる関数と断面画像との相関を計算することで糸断面の中心点を推定する糸断面モデル相関法を提案し，各注目糸断面の中心を順次推定することで糸を追跡する糸心線点列推定法を提案した．実際の織物に本手法を適用し，心線点列が得られることを確認した．また，表面画像を利用した従来法では解析できない二重織物に対して本手法を適用し，構造分析できることを示した．
- 3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法の提案
3次元糸モデルと呼ばれる関数と3次元ボクセルデータとの相関を計算することで糸の中心点および方向を同時に推定する3次元糸モデル相関法を提案し，3次元ボクセルデータの糸部分より順次糸の中心と方向を推定し，推定糸方向をもとに糸を追跡する糸心線点列推定法を提案した．本手法を実際

の編物に適用し，心線点列が得られることを実験的に確認した．また，手動による糸モデルのパラメータ変更が必要であったが，表面画像を利用した従来法では解析できないと思われる編物に本手法を適用し，構造分析できることを示した．

- 3次元繊維モデル関連法による糸心線点列推定法の提案
糸を構成する繊維に3次元糸モデル関連法を適用し，糸の中心付近の繊維方向を推定し，それらを加算，正規化したベクトルを糸の方向とみなして糸追跡を行う糸心線点列推定法を提案した．3次元糸モデル関連法による糸心線点列推定法では糸追跡できない織物に適用し，構造分析できることを示した．
- 大局的構造分析法の考え方の提案
一本の糸を追跡する糸心線点列推定法に代わる構造分析法として，織編物全体を計測対象として大局的に構造分析を行う考え方を提案した．本論文では有効な手法を提案するまでには至っていないものの，大局的な構造分析法のひとつ，もしくはその前処理として3次元繊維モデル関連法を利用した糸の分離について検討を行った．
- 構造分析結果の提示方法の提案
構造分析により得られた各糸の心線点列位置情報の活用方法として，織物について，従来から組織分解結果として作成されている組織図の自動作成法，および3次元的に織編物構造を表示する3次元組織構造再構成法を提案した．織物の組織図自動作成では，2つの二重織物に組織図自動作成法を適用した実験を行い，構造分析により得られた多重織物の各糸心線点列より組織図が自動的に作成できることを確認した．また，従来は狭義組織分解とは組織図を作成することに等しかったが，各糸から織編物構造を3次元的に表示する3次元組織構造再構成法を新たに提案した．これにより，3次元的に織編物の構造を観察でき，実際の意匠や質感，また構造的な機能性を知ることができる．

ここで，提案する3つの糸心線点列推定法，すなわち，

- 糸断面モデル関連法による糸心線点列推定法
- 3次元糸モデル関連法による糸心線点列推定法
- 3次元繊維モデル関連法による糸心線点列推定法

の関係について整理する．それぞれの手法に長所，短所があり，適用できる織編物は Table.7.1 のようにまとめることができる．ただし，3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定法では，CT 画像において繊維をはっきりと認識できる織編物に限るという条件がつく．また，処理時間は糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法，3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法，3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定法の順に大きくなる．最適化繰り返し計算，また各種パラメータが異なるため，あくまで目安であるが，同じ糸（直径 0.1mm，長さ 2.4mm）を 3つの糸心線点列推定法で処理したところ，計算時間は Table.7.2 のようになった．なお，この場合計算時間は糸の長さに対し比例関係にあり，糸の長さを変更されても各手法の計算時間の割合は変わらない．また，本手法は並列化計算が容易なため，計算能力を制約しなければ，いずれの手法においても計算時間の短縮は可能である．

また，実際に織編物の構造分析を行う際にどのような手順で適用するかをフローチャートとして，Fig.7.1 のようにまとめた．ただし，本フローチャートは処理の自動化を目的としたものではないことに注意されたい．したがって，試料が織物か編物かの判断や，低糸密度であるか否かの判断は作業者が行う．この図からわかるように，現在低糸密度の織編物（CT 画像を見ると，糸断面が円形をしており，かつ注目する糸断面が他の糸断面と接し合うことはあるものの，その周りを囲まれていない織編物）については，3つの提案手法のいずれかの手法により糸追跡を行うことができる．また高糸密度の場合は，CT 画像において繊維をはっきりと認識できるという条件において，現在は十分な糸追跡はできていないが，将来的に 3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定法により，構造分析を行える可能性は十分にある．また残りの織編物，すなわち高糸密度で繊維を認識できない織編物が残された課題ということになる．

Table. 7.1: Comparison of each proposed yarn tracing method for target and processing time

	織物		編物		処理時間
	低糸密度	高糸密度	低糸密度	高糸密度	
糸断面モデル相関法による糸追跡	○	×	×	×	◎
3次元糸モデル相関法による糸追跡	◎	×	◎	×	○
3次元繊維モデル相関法による糸追跡	○	△	○	△	△

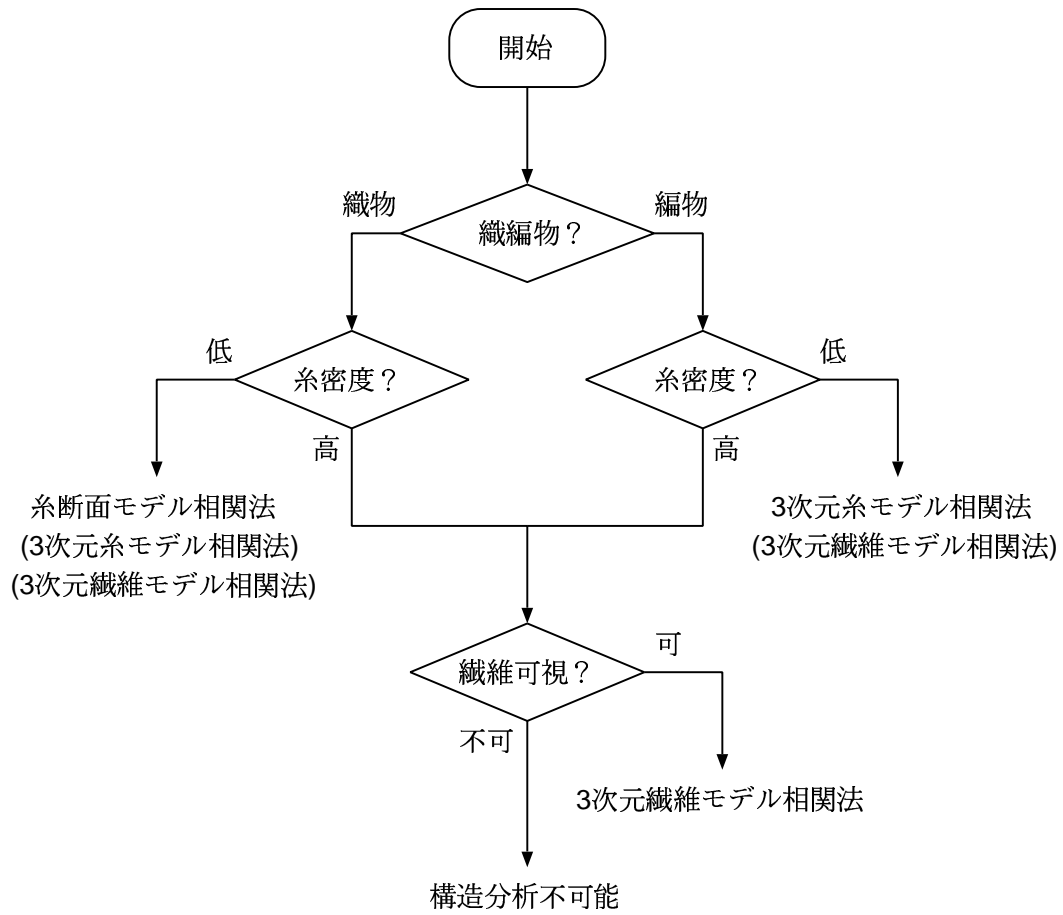


Fig. 7.1: Flow chart for applying three proposed yarn tracing methods to sample textile fabric

構造分析を行うことができるこのような織編物が現在生産されている織編物のうち、どのくらいの割合を占めるかについて簡単に述べる。比較的低密度でかつ糸断面が円形に近い構造の織編物は主にフィルタや産業用資材(工業, 土木, 農業, 医療)等に使われるが, これらが全体の織編物製品に占める割合は1割に満たない。また, 少々毛羽があっても少し糸間隔が空いていれば解析は可能であるため, 綿や毛などの紡績糸の織物や紡績糸の編物もシングル編のよこ編であれば解析できる可能性がある。さらに, 多少糸密度が高くても3次元糸モデル相関法, 3次元繊維モデル相関法を適用できることを考慮すると, 分析できる織編物の割合は現状では良くて2~3割程度ではないかと思われる。多くの織編物は糸密度が高く, 糸断面が変形しており, 変形して接触しあう糸をどのようにして個別に認識するかが本研究の大きな課題である。

7.1.2 計測における着眼点について

- 計測モデルの役割

糸断面モデル相関法による糸心線点列推定法を通じ, 計測を行う上でモデルの役割について検討した。糸断面モデルを利用することによって糸断面の中心を推定するという目的に合った処理を行うことができた。また「糸断面の周りには背景部分が存在し, 背景部分に囲まれている」という先験情報を利用することで, ほかの糸の影響を低減することができた。以上から, モデルの構築には有意な先験情報をいかに多く入れられるかが大きな鍵となり, 計測における逆問題同様, 本研究においてもモデルの役割とは, 先験情報を利用することであり, それによって目的にあった処理だけに限定する, 求めたい解の存在を限定することであるということが出来る。

Table. 7.2: Processing time of each proposed yarn tracing method for a yarn, of which length is about 2.4 mm and diameter about 0.1 mm

	処理時間[s]
糸断面モデル相関法による糸追跡	39
3次元糸モデル相関法による糸追跡	2031
3次元繊維モデル相関法による糸追跡	8087

- 先験情報，計測結果の利用

3次元系モデル相関法，および3次元繊維モデル相関法における系心線点列推定法を通じ，目的とする処理を行うためには先験情報が必要であると同時に，計測対象以外の量も計測し，その結果を利用することが有効であることを確認した．すなわち，3次元系モデル相関法において，系は局所的に円柱形とみなせるという先験情報を利用した3次元系モデル相関法より系の中心のみならず，系の方向を推定することができ，推定した系方向を利用することによって，系を追跡するという目的に合った処理を行うことができた．また，3次元繊維モデル相関法において，繊維が燃られて糸が作られているという事実から繊維の方向に着目した3次元繊維モデル相関法より糸の方向を推定することができた．以上から，計測対象を本来の目的だけに限るのではなく，先験情報をうまく利用し，計測対象(心線点列)以外の量(糸の方向，繊維の方向)も推定し，それを利用できるモデルを構築することが非常に効果的であると本研究を通じて考察することができる．

- 大局的処理

糸断面モデル相関法と3次元系モデル相関法を比較，検討することにより，系心線点列を精度よく推定できているか否かの処理の安定性について議論し，これまでのモデル役割，先験情報，計測結果の利用の検討をふまえ，糸一本の糸追跡のように局所的な計測を行うのではなく，織編物を構成するすべての糸をまとめて計測対象とする大局的な計測系の構築の考え方に至った．実際に有効な手法を提案するまでには至らなかったものの，大局的構造分析により，注目糸をほかの糸と誤って追跡してしまう課題を克服できると思われる．

以上の議論より，計測における知見の一つとして以下のように総括できる．すなわち，モデルを利用することによって先験情報を利用することができ，その先験情報を利用することによって処理を目的の処理に限定することができる．そして，多くの先験情報を利用することによって処理は安定する．その際，計測対象以外の量も測定の対象として，それを積極的に計測に利用すると効果的である．多くの先験情報を利用するためには大局的に対象を計測することが有効な考え方である．

7.2 今後の課題

「組織分解の自動化」における計測において，本論文では解決するに至らなかった残された課題について以下に述べる．

- 糸心線点列推定法の検討
糸心線点列推定法の欠点として、結局最後は人間による確認がなければ糸心線点列推定があっているか、まちがっているかの判断が現状ではできない。各提案手法の相関値からある程度判断できる可能性もあるが、もしまちがっていた場合それを修正する方法がない。現在、織物について、糸追跡の誤りの発見、およびその修正方法について検討を行っている。その際、漸近学習型計測系の考え方 [62, 63] を応用し、糸モデルなどのパラメータの変更を先験情報、計測結果を利用して再帰的に行えるようにすることが有効な方法であると考えられる。また、一本の糸ではなく織編物を構成する全体の糸を考慮した糸の追跡方法についても検討を行っている。
- 有効な大局的構造分析法の検討
一本の糸を追跡する糸心線点列推定法は局所的な処理のため不安定であり、大局的に処理を行うことによって構造分析の安定化を図る必要がある。現在は、第5章で述べた、3次元繊維モデル相関法を利用した糸の分離について詳しく検討している。
- 糸密度の高い織編物の構造分析法の検討
提案した糸断面モデル相関法、および3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法では対象とできる試料は糸間に隙間を有した低糸密度の織編物という制約がある。また、3次元繊維モデル相関法による糸心線点列推定法ではCT画像に繊維が現れている必要があるが、糸によっては糊付けなどによりCT画像に繊維がはっきりと現れないものもある。そこで、糸密度の高い織編物や繊維の見えない織編物について検討を行なう必要がある。解決方法の一つとして断面画像間相関法において用いた各画素の濃度値の情報を有効に使うことが考えられる。

7.3 将来の展望

本研究に関する将来の展望として以下のことが挙げられる。

- 広義組織分解のためのCT画像の利用
本研究は狭義組織分解を目的としているが、CT画像にはそのほか構成糸番手や糸密度、糸の撚り方向など織編物の特性を決定するさまざまな情報を抽出することができる。また、構造分析結果を利用して、いままでにない織編物の特徴計測を行うことも可能となる。たとえば、6.2.2において、 z 座標の分散を計算することで、たて糸、よこ糸どちらの糸かを区別したが、この

分散は、たて糸、よこ糸それぞれの張力の相対的な強さを表していると考えられ、織物構造の評価につながりるかもしれない。

- 他分野での断面画像を利用した糸心線点列推定法の応用

本研究は織編物を対象としているが、本糸心線点列推定法、特に3次元糸モデル相関法による糸心線点列推定法は織編物に固有の特徴を利用して処理を行っているわけではなく、糸を単に円柱形として扱っているため、ほかの分野における線図形抽出問題など線状のものを扱う分野に比較的容易に応用できるものと考えられる。たとえば、3.2で述べたような血管や気管支など、医用画像における線図形の抽出などの応用を考えたい。

参考文献

- [1] 繊維学会編: 繊維便覧, 丸善 (1994)
- [2] 桑水流理, 吉川暢宏: 平織布の弾性理論 (第 1 報, 擬似連続体モデル), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.68, No.672, 1243/1250(2002)
- [3] 桑水流理, 吉川暢宏: 平織布の弾性理論 (第 2 報, 有限要素定式化), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.68, No.672, 1251/1258(2002)
- [4] S. V. Lomov, G. Huysmans, and I. Verpoest: Hierarchy of Textile Structures and Architecture of Fabric Geometric Models, TEXTILE RESEARCH JOURNAL, Vol.71, No.6, 534/543(2001)
- [5] S. A. Hosseini and K. Toriumi: Fourier Transform Analysis of Plain Weave Fabric Appearance, TEXTILE RESEARCH JOURNAL, Vol.65, No.11 676/683(1995)
- [6] 田承桓, 大山真司, 小林彬, 山浦富雄: 狭帯域除去型空間フィルタとメリヤス地のオンライン傷検出, 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.7, 725/734(1993)
- [7] 田承桓, 大山真司, 小林彬, 山浦富雄: 狭帯域除去型空間フィルタによるメリヤス地の傷のオンライン種類判別と大きさ計測, 計測自動制御学会論文集, Vol.30, No.3, 276/284(1994)
- [8] Bugao Xu: Identifying Fabric Structures with Fast Fourier Transform Techniques, TEXTILE RESEARCH JOURNAL, Vol.66, No.8 496/506(1996)
- [9] Y. Ikiz, J. P. Rust, and W. J. Jasper: Fiber Length Measurement by Image Processing, TEXTILE RESEARCH JOURNAL, Vol.71, No.10, 905/910(2001)
- [10] Tae Jin Kang, Soo Hyun Choi, and Sung Min Kim, and Kyung Wha Oh: Automatic Structure Analysis and Objective Evaluation of Woven Fabric Using Image Analysis, TEXTILE RESEARCH JOURNAL, Vol.77, No.3, 266/272(2002)

- [11] 全国繊維工業技術協会: 織物分解設計の実際知識, 繊維技術研究社 (1960)
- [12] 本位田真一, 市川照久: エキスパートシステム基礎技術, オーム社 (1989)
- [13] 蔦田憲久, 大川剛直, 安信千津子: エキスパートシステムの設計と開発, 昭晃堂 (1997)
- [14] 戸内順一: エキスパートシステム入門, 啓学出版 (1991)
- [15] 寺尾満: これからの計測, 計測と制御, Vol.19, No.1, 3/7(1980)
- [16] 北森俊行: 計測の本質と計測工学, 計測と制御, Vol.26, No.2, 145/152(1987)
- [17] 森村正直: 計測の論理構造, 計測と制御, Vol.19, No.1, 20/26(1980)
- [18] 北森俊行: 計測系の構造と機能, 計測と制御, Vol.19, No1, 27/32(1980)
- [19] 東京都立繊維工業試験場: 繊維技術ハンドブック, 東京都立繊維工業試験場 (2000)
- [20] 株式会社島精機製作所: <http://www.shimaseiki.co.jp/wholegarmentj.html>
- [21] Chang-Chiun Huang, Sun-Chong Liu, and Wen-Hong Yu: Woven Fabric Analysis by Image Processing, TEXTILE RESEARCH JOURNAL, Vol.70, No.6 481/485(2000)
- [22] Chung-Feng Jeffrey Kuo, Chung-Yang Shih, and Jiunn-Yih Lee: Automatic Recognition of Fabric Weave Patterns by a Fuzzy C-Means Clustering Method, TEXTILE RESEARCH JOURNAL, Vol.74, No.2 107/111(2004)
- [23] 太田健一, 坂上勝彦, 田村秀行: 布表面パターンの認識方法に関する研究, 繊維機械学会誌, Vol.36, No.10 23/27(1983)
- [24] Mizuho Kinoshita, Yoshitada Hashimoto, Ryuichi Akiyama and Sei Uchiyama: Determination of Weave Type in Woven Fabric by Digital Image Processing, J.Text. Mach. Soc. Japan, Vol.35, No.2, 1/4(1989)
- [25] 西松豊典: 織物組織の自動認識に関する研究, 繊維機械学会誌, Vol.44, No.6 51/57(1991)
- [26] G. R. Barrett, T. G. Clapp, and K. J. Titus: An On-Line Fabric Classification Technique Using a Wavelet-Based Neural Network Approach, TEXTILE RESEARCH JOURNAL, Vol.66, No.8, 521/528(1996)

- [27] Tae Jin Kang and Chang Hoon Kim: Automatic Recognition of Fabric Weave Patterns by Digital Image Analysis, TEXTILE RESEARCH JOURNAL, Vol.69, No.2 77/83(1999)
- [28] Boong Soo Jeon and Ji Hyun Bae: Automatic Recognition of Woven Fabric Patterns by an Artificial Neural Network, TEXTILE RESEARCH JOURNAL, Vol.73, No.7 645/650(2003)
- [29] Mikiya Kondo, Masayuki takatera and Yoshio Shimizu: Analyzing and Design Supporting System for Knit Fabrics, J.Text. Mach. Soc. Japan, Vol.53, No.1. 77/86(2000)
- [30] 鳥脇純一郎: 3次元画像処理アルゴリズム 総論, MEDICAL IMAGE TECHNOLOGY, Vol.19, No.3 135/141(2001)
- [31] 鳥脇純一郎, 横井茂樹: 3次元デジタル画像処理アルゴリズムの基礎, 電子通信学会論文誌, Vol.J68-D No.4 426/433(1985)
- [32] 篠原寿広, 高山潤也, 大山真司, 小林彬: 離散的断面画像を利用した織物の3次元糸目再構成, 東京工業大学工学部制御システム工学科学士論文 (2000)
- [33] Tianyi Liao and Sabit Akanur: A Novel Approach to Three-Dimensional Modeling of Interlaced Fabric Structures, TEXTILE RESEARCH JOURNAL, Vol.68, No.11 841/847(1998)
- [34] 上田悠介: 糸の3次元心線情報を基にした組織図自動生成法に関する研究, 東京工業大学 卒業論文 (2005)
- [35] 長谷川順一: 特集/3次元画像処理アルゴリズム-領域・面・線の抽出と解析-序文-, MEDICAL IMAGE TECHNOLOGY, Vol.19, No.3 133/134(2001)
- [36] 仁木登: 医用3次元画像と知識処理, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, Vol.16, No.2, 117/123(1998)
- [37] 長谷川純一: 3次元画像とエキスパートシステム, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, Vol.16, No.2, 111/116(1998)
- [38] 鳥脇純一郎: 三次元画像処理の基礎, 日本放射線技術学会雑誌, 第57回総会学術大会教育講演, Vol.58. No.5 601/612(2002)
- [39] 平野靖, 鳥脇純一郎: 3次元濃淡画像からの線図形抽出アルゴリズム, MEDICAL IMAGE TECHNOLOGY, Vol.19, No.3 161/167(2001)

- [40] 井関文一, 小畑秀文, 大松広伸, 柿沼龍太郎: 胸部 CT 画像からの気管支 3 次元木構造の抽出の一手法, 電子情報通信学会論文誌, J80-D-II, No.10 2841/2847(2001)
- [41] 平野靖, 鳥脇純一郎: 距離変換を用いた図形の構造解析手法, MEDICAL IMAGE TECHNOLOGY, Vol.20, No.1 13/22(2002)
- [42] 井関文一, ツァーガンバイガルマ, 小畑秀文, 大松広伸: 再帰的領域探索法による胸部 CT 画像からの血管の 3 次元行抽出, 電子情報通信学会論文誌, J82-D-II, No.9 2841/2847(1999)
- [43] 井関文一, 小畑秀文: 再帰的な領域探索法の改良と 3 次元木構造物体の細線化への応用, 電子情報通信学会論文誌 D-II Vol.J83-D-II No.2 859/862(2000)
- [44] Wink O, Niessen WJ, Viergever MA: Fast delineation and visualization of vessels in 3-D angiographic images, IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol.19, No.4 337/346(2000)
- [45] 平野靖, 清水昭伸, 長谷川純一, 鳥脇純一郎: 4 次元超曲面の曲率を用いた 3 次元濃淡画像に対する追跡型細線化の一手法, 電子情報通信学会論文誌, J83-D-II, No.1 126/136(2000)
- [46] 安江正宏, 森健策, 斉藤豊文, 長谷川純一, 鳥脇純一郎: 3 次元濃淡画像の細線化法と医用画像への応用における能力の比較評価, 電子情報通信学会 D-II, Vol.J79-D-II No.10 1664/1674(1996)
- [47] 鳥脇純一郎: 画像理解のためのデジタル画像処理 [II], 昭晃堂 (1988)
- [48] 斉藤豊文, 番正聡志, 鳥脇純一郎: ユークリッド距離に基づくスケルトンを用いた 3 次元細線化手法の改善—ひげの発生を抑制できる一手法—, 電子情報通信学会 D-II, Vol.J84-D-II No.8 1628/1635(2001)
- [49] 関口博之, 杉本直三, 栄保茂, 花川隆, 浦山慎一: 枝単位リージョングロウイングによる頭部 MRA からの血管抽出, 電子情報通信学会論文誌, J87-D-II, No.1 126/133(2004)
- [50] 大橋智志, 畑中雅彦: MRA における脳血管の 3 次元セグメンテーション処理について, 電子情報通信学会 信学技報, MBE2004-17 25/28(2004)
- [51] 平野靖, 国光和宏, 長谷川純一, 鳥脇純一郎: 4 次元長曲面の曲率を用いた領域拡張法と胸部 CT 像からの血管抽出への応用, コンピュータ支援画像診断学会論文集, Vol.7 No.3 1/10(2003)

- [52] 宋在旭, 清水昭伸, 長谷川純一郎, 森雅樹: Deformable Model を用いた胸部 X 線像からの血管影の自動抽出手順, MEDICAL IMAGE TECHNOLOGY, Vol.17, No.5 601/613(1999)
- [53] 北坂孝幸, 森建策, 長谷川純一, 鳥脇純一郎, 片田和廣: 芯線モデルを利用した非造影 3 次元胸部 X 線 CT 像からの縦隔内血管領域抽出, MEDICAL IMAGE TECHNOLOGY, Vol.20, No.5 572/583(2002)
- [54] 滝沢穂高, 深野元太郎, 山本眞司, 松本徹, 館野之男, 飯沼武, 松本満臣: 人体断面画像からの 3 次元肺血管・気管モデルの構築, コンピュータ支援画像診断学会論文誌, Vol.5, No.9 1/10(2001)
- [55] 徐 剛, 辻 三郎: 3 次元ビジョン, 共立出版 (1998)
- [56] (株) 東陽テクニカ: SKYSCAN1072 カタログ (2002)
- [57] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling and Brian P. Flannery: NUMERICAL RECIPES in C, 技術評論社 (1994)
- [58] 北森俊行: センシング技術における逆問題の意義と構造, 計測と制御, Vol.36, No.7, 459/463(1997)
- [59] 田辺國士: 逆問題における先駆情報の Bayes の方法による取り扱い, 計測と制御, Vol.36, No.7, 468/471(1997)
- [60] 藤村貞夫: 逆問題解法による温度計測, 計測と制御, Vol.36, No.7, 480/484(1997)
- [61] 李純黙: 織編物の組織構造分析のための 3 次元ファイバモデル相関法, 東京工業大学 卒業論文 (2004)
- [62] 小林彬: 適応型計測システムの構成論, 計測と制御, Vol.36, No.7, 472/475(1997)
- [63] 大山真司: 信号場の概念を導入した能動計測系の高度化に関する研究, 東京工業大学 学位論文 (1997)
- [64] O. Goktepe and S. C. Harlock: Three-Dimensional Computer Modeling of Warp Knitted Structures, TEXTILE RESEARCH JOURNAL, Vol.77, No.3, 266/272(2002)

本研究に関する発表論文リスト

印刷論文

- [65] 篠原寿広, 高山潤也, 大山真司, 小林彬: X線 CT 画像を利用した織物構造の分析, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.10 1000/1007, 2004
- [66] 篠原寿広, 高山潤也, 大山真司, 小林彬: X線 CT 画像による 3次元ボクセルデータを利用した編物構造の分析, 計測自動制御学会論文集, Vol.41, No.11 879/885, 2005

国際会議

- [67] Toshihiro Shinohara, Yusuke Ueda, Jun-ya Takayama, Shinji Ohyama and Akira Kobayashi: Automatic Weave Diagram Construction from Yarn Positional Data of Woven Fabric, Proceedings of SICE Annual Conference 2005, 1071/1075, 2005.
- [68] Toshihiro Shinohara, Jun-ya Takayama, Shinji Ohyama and Akira Kobayashi: Yarn Segmentation from 3-D Voxel Data for Analysis of Textile Fabric Structure, Proceedings of 2005 International Conference on Control, Automation and Systems(ICCAS2005), 877/881, 2005.
- [69] Toshihiro Shinohara, Jun-ya Takayama, Shinji Ohyama and Akira Kobayashi: Analysis of Textile Fabric Structure Based on Three-dimensional Fiber Model Matching Method, Proceedings of SICE Annual Conference 2004, 399/403, 2004.
- [70] Toshihiro Shinohara, Jun-ya Takayama, Shinji Ohyama and Akira Kobayashi: Analysis of Knit Fabric Structure with its Voxel Data, Proceedings of 2003 International Conference on Control, Automation and Systems(ICCAS2003), 53/56, 2003.
- [71] Toshihiro Shinohara, Jun-ya Takayama, Shinji Ohyama and Akira Kobayashi: Analysis of Textile Fabric Structure with the CT Images, Proceedings of SICE Annual Conference 2003, 234/238, 2003.

- [72] Toshihiro Shinohara, Jun-ya Takayama, Shinji Ohyama and Akira Kobayashi: Three-dimensional Reconstruction of Textile Structure Using Discrete Cross Sectional Images to Analyze Fabric Weave Structure, Proceedings of 2001 International Conference on Control, Automation and Systems(ICCAS2001), 250/253, 2001.

国内口頭発表

- [73] 篠原寿広, 高山潤也, 大山真司, 小林彬: 離散的断面画像を利用した織物の3次元糸目構造再構成, 第40回計測自動制御学会学術講演予稿集, 132/135, 2001.

謝辞

小林彬教授，大山真司助教授両先生には大変お世話になりました。先生方の物事の本質を見抜いた鋭いご指摘，また研究の道標となるご助言，ご指導のおかげで本研究をなんとか博士論文としてまとめるまでに進めることができました。心より感謝申し上げます。

小林先生，大山先生をはじめとする博士論文審査員の伊能教夫教授，奥富正敏教授，北川能教授，中本高道助教授先生方には論文にまとめるにあたり，多くのご指導，ご助言をいただきました。深く感謝いたします。

高山潤也助手には，研究の相談にのっていただいたり，的確なご助言をいただいたりと，お世話になりました。ありがとうございました。

また，研究に専念することができたのは，事務的な事を一手に引き受けて下さった遠藤由紀元事務員，石川寛子元事務員，山崎明子元事務員，阿達三枝事務員のおかげです。ありがとうございました。

福井県工業技術センターの吉田勝紀様には，センター内を見学させていただいたり，大変参考になるご助言や資料，また実験用試料を頂きました。とても役立ちました。ありがとうございました。

東京都立産業技術研究所の樋口明久様には，研究所内を見学させていただいたり，ご助言や実験用試料をいただきました。ありがとうございました。

(株)東陽テクニカの斉藤伸裕様，田村衣里様には，CT スキャナによる試料の撮像を快く引き受けていただきました。本研究はあのような CT 装置がなければ実現できませんでした。ありがとうございました。

制御システム工学科をはじめとする東京工業大学の諸先生方には知る喜びを授けていただき，実りのある学生生活を送ることができました。深く感謝申し上げます。

そして，小林・大山研究室の皆様には，普段の生活や研究会を通して数多くの良きアドバイスを頂きました。研究を進めるにあたり，一番長く接していたみなさまから受けた刺激，影響は多大です。本当にありがとうございました。

最後に生活面，精神面などいろいろな面で支えてくれ，温かく見守ってくれた両親に心より感謝します。ありがとうございました。

平成 18 年 3 月