

Study on measurement of fabric deformation by digital image correlation method using woven structure

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-07-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00062866

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博 士 論 文

織組織を利用したデジタル画像相関法 による布変形挙動の測定法に関する研究

金沢大学大学院自然科学研究科

機械科学専攻

学 籍 番 号 1824032013

氏 名 中垣 勝敬

主任指導教員 喜多 和彦

提 出 年 月 令和3年1月

織組織を利用したデジタル画像相関法 による布変形挙動の測定法に関する研究

【目次】

第 1 章 緒論	
1.1 研究背景と目的	- 1 -
1.2 従来の研究	- 7 -
1.3 本論文の構成	- 8 -
第 2 章 画像処理による織物挙動の測定方法	
2.1 緒言	- 9 -
2.2 織物と交錯点の定義	- 9 -
2.3 交錯点の検出方法	- 11 -
2.3.1 交錯点近傍をテンプレートとする方法	- 11 -
2.3.2 完全組織をテンプレートとする方法	- 13 -
2.4 交錯点を計測点とした DIC 法	- 15 -
2.5 結言	- 20 -
第 3 章 帯状織物の搬送動作試験	
3.1 緒言	- 21 -
3.2 搬送機構の概要	- 21 -
3.2.1 試験装置の概要	- 21 -
3.2.2 計装システムの構成	- 23 -
3.3 試験装置の機構と測定方法	- 25 -
3.3.1 駆動装置および測定系	- 25 -
3.3.2 張力発生装置および測定系	- 27 -

3.4	撮影装置	- 33 -
3.4.1	撮影装置の諸元	- 33 -
3.4.2	光学系の諸元	- 37 -
3.4.3	撮影条件	- 39 -
3.4.4	撮影画像の測定精度	- 41 -
3.5	評価試料	- 43 -
3.5.1	平織物	- 43 -
3.5.2	ファスナ	- 45 -
3.6	試験条件	- 47 -
3.6.1	平織物(Sample1,2)の把持機構と動作	- 47 -
3.6.2	ファスナ(Sample3)の把持機構と動作	- 48 -
3.6.3	搬送速度とクラッチ機構の設定	- 48 -
3.7	試験装置の挙動	- 49 -
3.8	結言	- 52 -
第 4 章 テンプレートマッチング法を用いた交錯点検出		
4.1	緒言	- 53 -
4.2	撮影画像	- 53 -
4.3	テンプレートマッチング法	- 55 -
4.4	交錯点の検出	- 57 -
4.4.1	概要	- 57 -
4.4.2	テンプレート画像	- 57 -
4.4.3	交錯点の検出結果	- 61 -
4.4.4	テンプレートの違いによる比較	- 67 -
4.5	結言	- 69 -

第 5 章 DIC 法を用いた交錯点の変位測定	
5.1 緒言	- 70 -
5.2 DIC 法	- 70 -
5.2.1 DIC 法の概要	- 70 -
5.2.2 DIC 法の演算手順	- 71 -
5.2.3 相関係数の算出方法	- 72 -
5.2.4 サブピクセル処理	- 72 -
5.3 DIC 法のパラメータ設定	- 73 -
5.3.1 完全組織と糸密度による評価領域とサブセット範囲	- 73 -
5.4 DIC 法による交錯点の変位測定	- 87 -
5.4.1 撮影画像の観察と DIC 法による計測点追跡	- 87 -
5.4.2 DIC 法による変位測定結果	- 93 -
5.5 結言	- 93 -
第 6 章 織物の変形評価方法	
6.1 緒言	- 95 -
6.2 変形評価値の算出方法	- 95 -
6.3 変形の評価結果	- 97 -
6.4 結言	- 109 -
第 7 章 結論	- 110 -
参考文献	- 111 -
謝辞	

【記号表】

本論文で使用する主な記号を以下に示す.

A	: 評価対象となる たて糸の本数
a_n	: n 枚目の画像における加速度ベクトル [pixel/s ²]
B	: 評価対象となる よこ糸の本数
b_C	: 円板クラッチ摩擦面の幅 [mm]
C_n	: n 枚目の画像における評価領域の中心座標 [pixel]
$C_{m[i,j],n}$: 識別番号で示される評価領域中心点
$C_{Xm[i,j],n}$: 識別番号で示される評価領域中心点の X 軸座標 [pixel]
$C_{Ym[i,j],n}$: 識別番号で示される評価領域中心点の Y 軸座標 [pixel]
D	: レンズの焦点から撮影対象までの距離 [mm]
d	: 被写界深度 [min]
D_1	: 円板クラッチ内径 [min]
D_2	: 円板クラッチ外形 [min]
D_a	: 円板クラッチ平均直径 [min]
D_{Airy}	: エアリーディスク径 [mm]
D_{warp}	: たて糸の糸密度 [1/mm]
D_{weft}	: よこ糸の糸密度 [1/mm]
E	: 評価領域の 1 辺の長さ [pixel]
$Er_{m[i,j],n}$: 識別番号で示されるトラッキング誤差
$E_{Xm[i,j],n}$: 識別番号で示されるトラッキング誤差の X 軸成分 [pixel]
$E_{Ym[i,j],n}$: 識別番号で示されるトラッキング誤差の Y 軸成分 [pixel]
F	: 撮影フレームレート [fps]
f	: レンズの焦点距離 [mm]
g	: 駆動軸の減速比
H	: 評価画像 輝度値
\bar{H}	: テンプレート画像 平均輝度値
H_e	: 撮影範囲の高さ [mm]
h_c	: カメラ画像素子の高さ [mm]
I	: 評価領域の 1 辺の長さ [pixel]
\bar{I}	: 評価画像 平均輝度値
i	: 評価する交錯点群の行番号
j	: 評価する交錯点群の列番号
k_C	: ばね定数 [N/mm]
L	: 探索範囲の 1 辺の長さ [pixel]
M	: 評価対象となる 交錯点の総数
m	: 評価対象となる 交錯点の番号

N	: レンズの F 値
N_e	: エンコーダ回転数 [min^{-1}]
N_f	: フィードローラ回転数 [min^{-1}]
N_f'	: 駆動装置の出力軸回転数 [min^{-1}]
N_m	: モータ回転数 [min^{-1}]
N_s	: サブローラ回転数 [min^{-1}]
n	: 撮影画像の番号
n_e	: エンコーダ 1 回転当たりパルス数
n_C	: 円板クラッチの摩擦面数
P	: DIC 法の計測点
P_n	: n 枚目の画像における計測点の位置座標 [pixel]
P_C	: 摩擦面への押付力 [MPa]
$P_{m[i,j],n}$: 識別番号で示される交錯点
$P_{Xm[i,j],n}$: 識別番号で示される交錯点の X 軸座標 [pixel]
$P_{Ym[i,j],n}$: 識別番号で示される交錯点の Y 軸座標 [pixel]
p_C	: ねじピッチ [mm]
p	: 計測点 PQ 間のたて糸本数
q	: 計測点 PQ 間のよこ糸本数
Q	: 計測点の最近傍にある同種の交錯点
Q_C	: クラッチ板の押付力 [N]
$Reso$: 撮影画像の解像度 [mm/pixel]
r	: 計測点間の距離 PQ [pixel]
r_f	: フィードローラ半径 [mm]
r_s	: サブローラ半径 [mm]
S_{warp}	: たて糸間隔 [pixel]
S_{weft}	: よこ糸間隔 [pixel]
T	: サブセット範囲の 1 辺の長さ [pixel]
T_d	: 動摩擦状態のトルク [Nm]
T_{EXP}	: カメラの露光時間 [μs]
T_m	: 駆動軸トルク [Nm]
T_S	: 静止摩擦状態のトルク [Nm]
\mathbf{u}_n	: n 枚目の画像における変位ベクトル [pixel]
V	: 試料の移動速度 [mm/s]
ν_e	: エンコーダパルス周波数 [Hz]

W	: 撮影範囲の幅 [mm]
w	: カメラ画像素子の幅 [mm]
X	: 評価画像 X 座標 [pixel]
x	: テンプレート画像 x 座標 [pixel]
x_v	: カメラ画像素子の幅方向画素数 [pixel]
Y	: 評価画像 Y 座標 [pixel]
y	: テンプレート画像 y 座標 [pixel]
y_v	: カメラ画像素子の高さ方向画素数 [pixel]
γ	: 相関係数
δ	: 許容錯乱円径 [mm]
δ_c	: 圧縮ばねのたわみ量 [mm]
λ	: 照明の波長 [mm]
λ_{warp}	: たて糸の伸長率 [mm/mm]
λ_{warp}	: よこ糸の伸長率 [mm/mm]
μ	: 静止摩擦係数
μ'	: 動摩擦係数
σ	: 標準偏差
φ_C	: ナットの締め込み角 [°]
θ	: たて糸とよこ糸の配向角 [°]

第1章 緒論

1.1 研究背景と目的

スライドファスナ⁽¹⁻³⁾は、図 1.1 (a)に示す止製品を例にすると、テープとよばれる帯状の布に、エレメントとよばれる嵌合部と、スライドファスナの主要部品である樹脂や金属製の止具、スライダなどで構成される。

図 1.1 (b)に示すストリングとよばれる帯状の部品は、帯状の布であるテープに対して、樹脂や金属を材料とするエレメントを植付けて構成される。さらに、左右のストリングを組み合わせることで、図 1.1 (c)に示す、チェーンとよばれるスライドファスナの主要部品となる。スライドファスナのチェーンは、構造の多くを帯状の布で構成するため、柔軟な特性を持ち、衣料のみならず自動車などの工業製品⁽⁴⁾でも活用される際に重要な特性となっている。

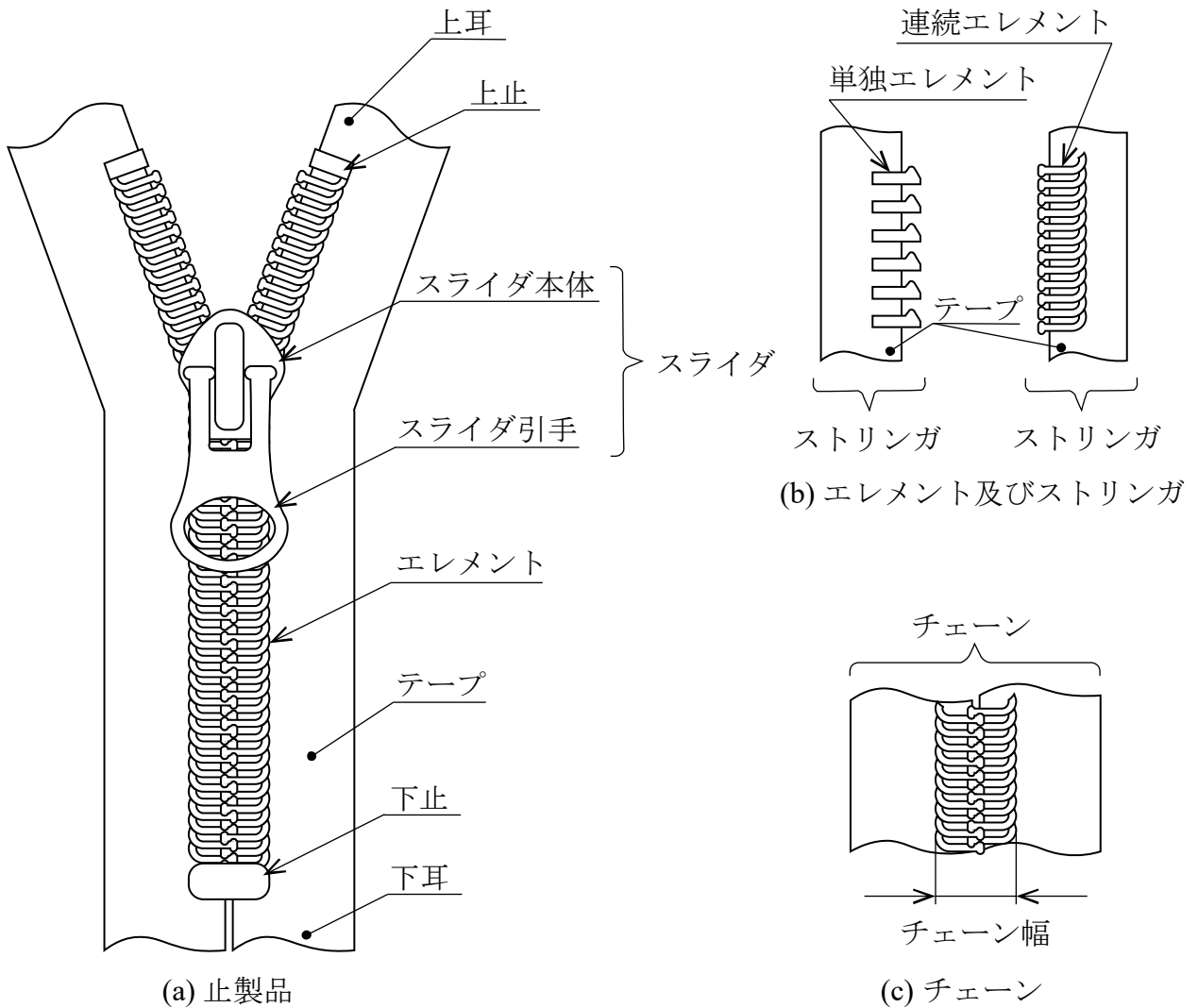


図 1.1 スライドファスナ止製品の各部名称

スライドファスナは帯状の布であるテープに対して、種々の部品を用途に応じて構成する。図 1.2 に示す開製品では、下止を開具とすることで左右のストリングを着脱することが可能となる。このように、同一のチェーンに対しても、構成する部品の一部を変えることで様々な用途のスライドファスナが製造されていることがわかる。

スライドファスナの生産では、まず、帯状の布で構成されるテープに対して、種々のエレメントを植付けることでチェーンに加工される。次に、チェーンを基準として、剛性の高いスライダや止具又は平具を高精度に組付けることでスライドファスナに加工される^(5,6)。したがって、帯状の布で構成されるチェーンと、構成される部品群の相対的な位置を高精度に制御して組付け、加工を施すことが求められる。また、この加工を施す精度によって、スライドファスナの性能⁽¹⁾に影響を及ぼす。

ここで、チェーンは帯状で連続的な構造であることから、チェーンマシンによる大量生産をおこなうことが可能である。これに対して、止具や開具、またはスライダなどの、チェーンに対して構成される部品の種類は多く、用途に応じた多様なスライドファスナの仕様がある。様々な仕様のスライドファスナを大量に生産しておくことは非効率となるため、標準的な仕様以外のファスナは受注されてから生産が行われる^(7,8)。したがって、スライドファスナ生産では、大量生産されるチェーンに対して、受注した仕様に応じた仕上げ加工とよばれる⁽⁶⁾種々の加工を受注される仕様に応じて、生産条件を変更することが求められる。

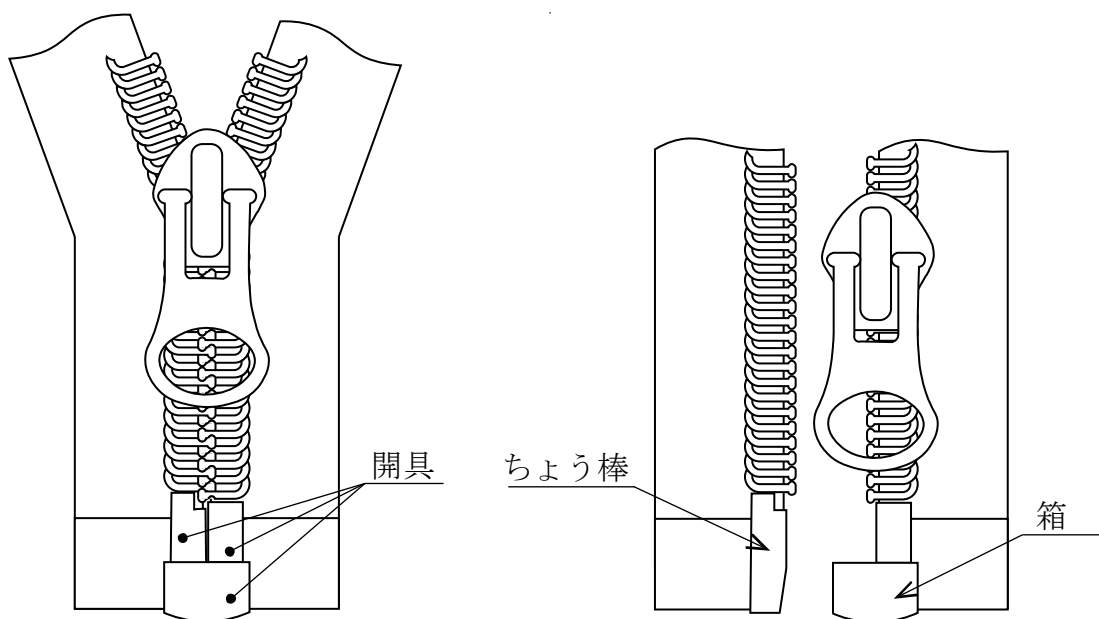
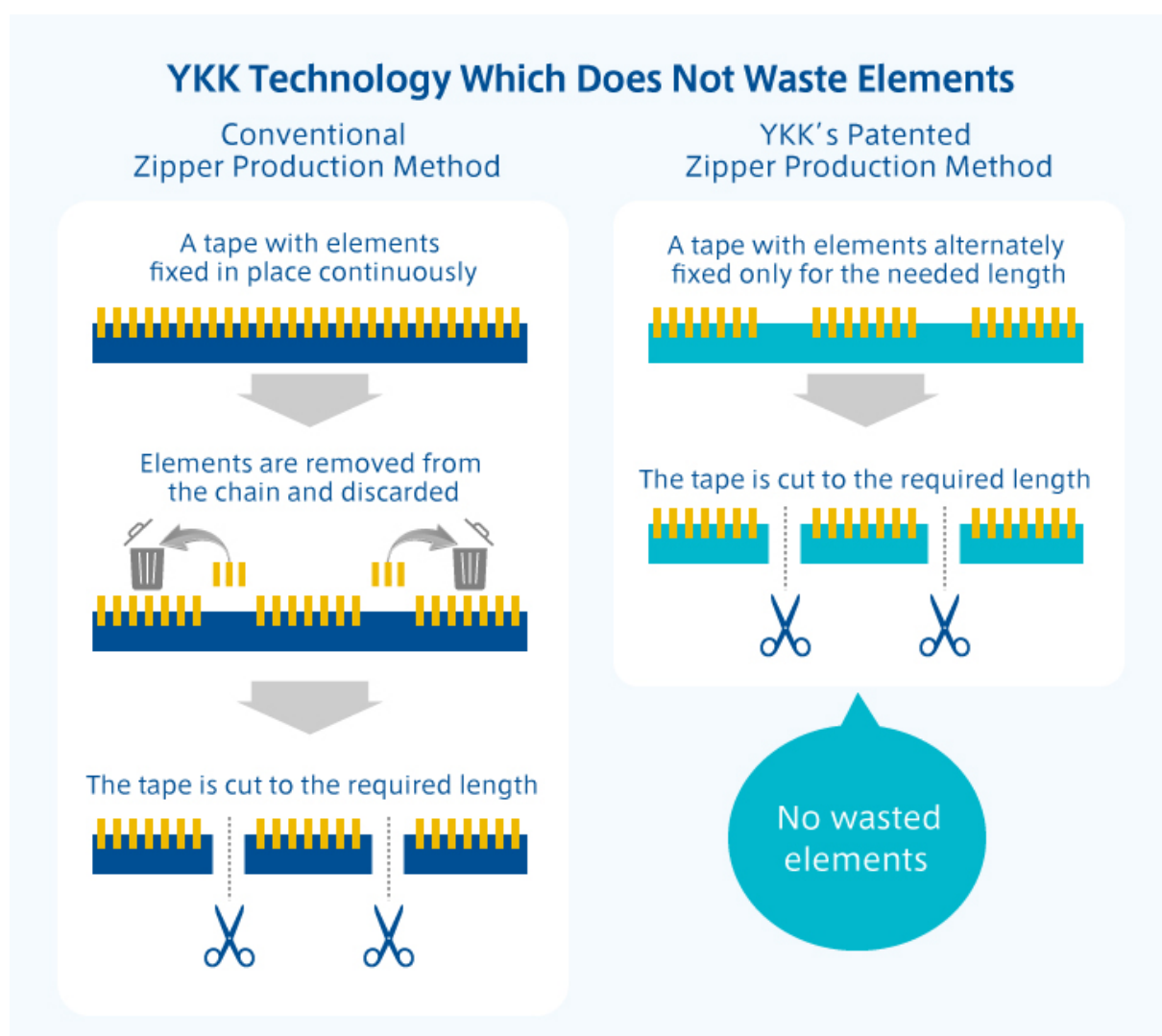


図 1.2 スライドファスナ開製品の開具名称

スライドファスナ(以下、ファスナという。)を構成するチェーンの製造工程において、図 1.3 に示すようにテープに対して間欠にエレメントを植付ける。これは、材料の無駄を省き環境への配慮と同時にコスト削減として、図 1.4 に示す YKK 株式会社のチェーンマシン (YKK-CM6) などにおいて製造する方法となっている。このように、チェーンを構成するエレメントは間欠部があり、この間欠部はスペース部とよばれる。

チェーンの間欠部となるスペース部の両端にあるエレメントを基準として、図 1.5 に示す製造工程を用いて、ファスナの主要部品である止具や開具を組付ける仕上げ加工によりファスナに加工され生産される^(8,9)。



引用) https://www.jsme.or.jp/kikaiisan/heritage_049_jp.html

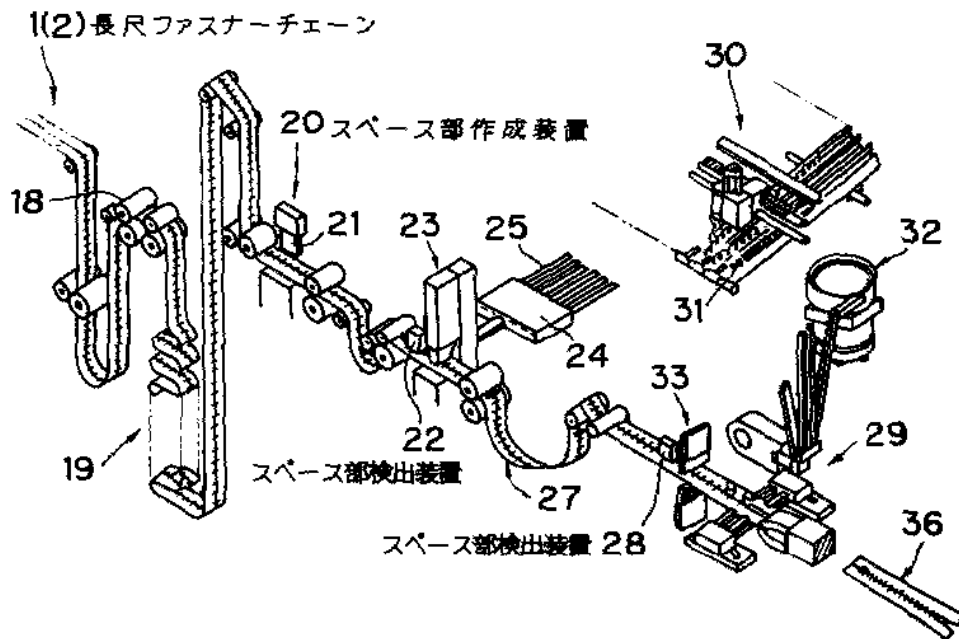
図 1.3 テープへのエレメント間欠植付け



日本機械学会「機械遺産」 機械遺産 第49号
ファスナーチェーンマシン (YKK-CM6)

引用) <https://www.ykkfastening.com/itsnotjustazip/vol02/>

図 1.4 テープへのエレメント植付け加工



引用) 特公平 7-44884)

図 1.5 チェーンへのファスナ構成部品の組付け加工

図 1.5 で示したファスナの仕上げ工程によるファスナ加工の模式図を図 1.6 に、ファスナチェーンの搬送装置の概略図を図 1.7 にそれぞれ示す⁽⁸⁻¹⁰⁾。ファスナのチェーンは、図 1.7 に示す搬送装置のフィードローラによって巻き取られることで搬送され、センサによりスペース部を感知することでエレメント端をストップにより所定の位置に停止させ、位置決めがなされる。停止した位置を基準として図 1.6 に示す上止め、下止め、スライダなどのファスナを構成する部品の組付け加工が順次なされる。すなわち、ファスナの製造工程では、止具、開具やスライダのように剛性が高い部品の加工部に対し、柔軟な帯状の布のテープとエレメントで構成されたチェーンを精度よく相対的に位置決めすることが望まれる。したがって、ファスナの生産における効率や品質の向上には、

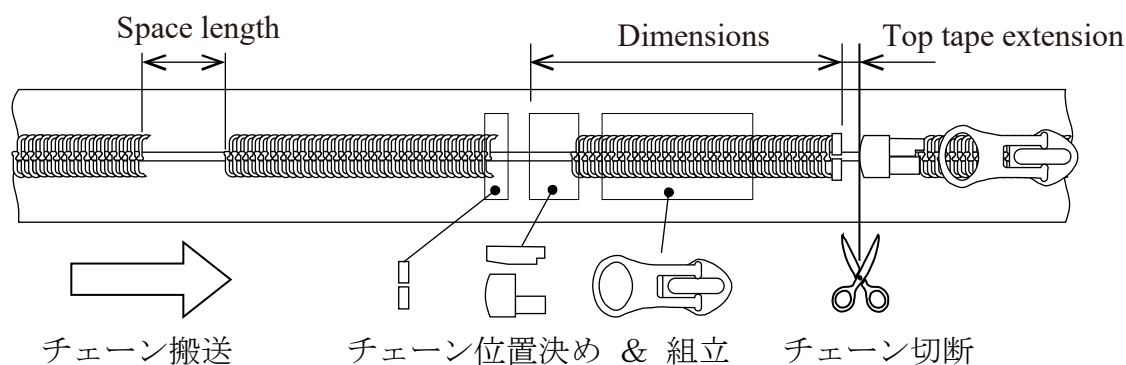


図 1.6 開きファスナの仕上げ工程

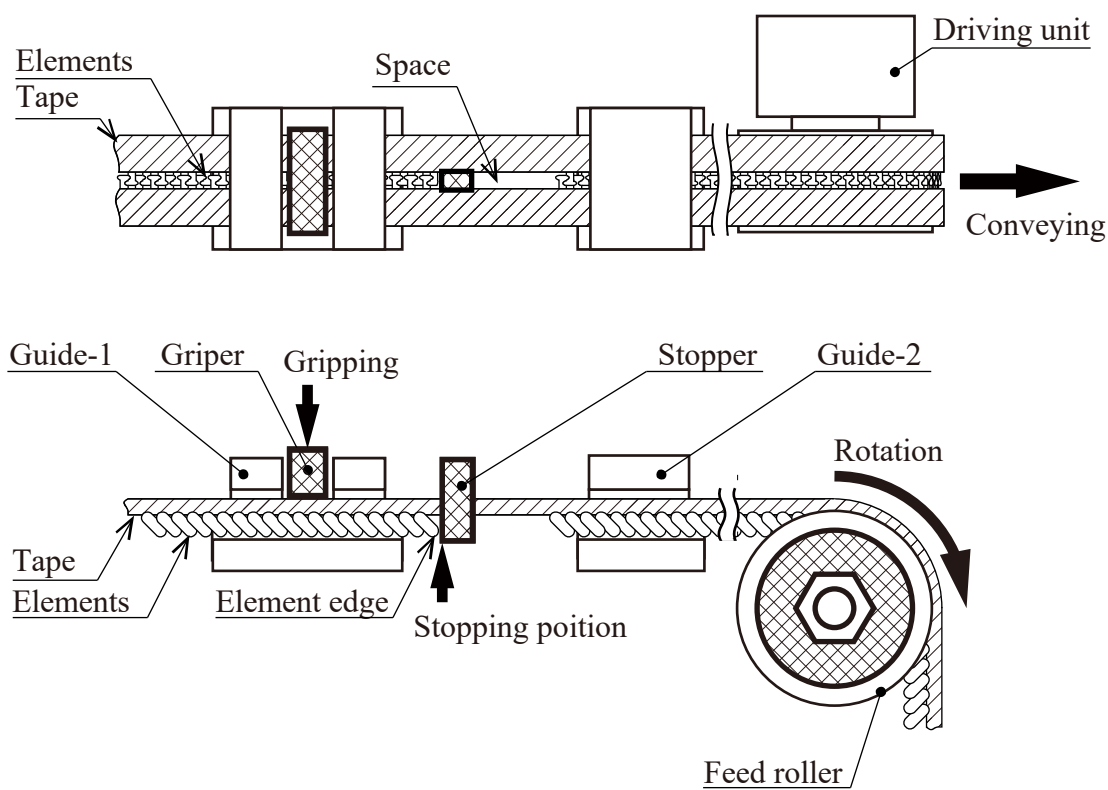


図 1.7 チェーン位置決め装置の概略図

チェーンの位置決め精度を測定し評価することが重要となる。このことから、チェーン搬送時の位置決めにおいて、エレメント部および、変形が生じやすい布の特徴を考慮したテープ部の変位測定が重要となる。

ここで、剛性が高いエレメント部は画像処理のテンプレートマッチング法などを用いることで変位測定ができるが、フィードローラによる搬送では、チェーンに張力が作用しテープ部には変形が生じる。さらに、搬送や位置決め停止による張力変動により、柔軟な特性を持つ布で構成されるテープ部には、動的な変形が生じると考えられる。外力による布の変形挙動評価には、布の初期状態を均一にする手法⁽¹¹⁻¹⁴⁾が用いられることが多く、搬送ごとに布の初期状態が異なる場合に適用できない。

フィードローラによる搬送位置決めでは、ファスナテープ部に生じる変形を介してエレメント部に外力が作用するためエレメント停止位置に影響する。この影響を調査するためには、ファスナテープ部の動的な変形と負荷荷重の測定が有効であると考えられる。したがって、ファスナの製造における生産効率や品質の向上のためには、位置決め精度の評価が重要であり、そのためには、変形が生じやすいテープ部の搬送時における非接触な変形測定が必要となる。

そこで本論文では、デジタル画像相関(Digital Image Correlation, DIC)法⁽¹⁵⁻¹⁶⁾を利用した織物の非接触な変形測定法を提案する。繊維製品の製造においては、糸の向き、たて糸とよこ糸の配向角など織物の状態を評価することが重要であり、たて糸とよこ糸を基準として布変形を評価する。そのため、織物におけるたて糸とよこ糸の交錯点を検出する必要がある。本論文では、織物組織の周期性を利用することで、テンプレートマッチングにより交錯点を検出する。さらに、検出した交錯点を DIC 法における変位測定の計測点とし、織物組織の周期性による計測点の誤差を防ぐための方法を示す。さらに、ファスナに代表される帯状織物の搬送を模擬した試験により提案方法の有用性を検証する。

1.2 従来の研究

これまでに、織物の変形状態を評価する目的で、様々な測定方法^(12-14,23-27)が研究されており、これらは予荷重をかけることで織組織を均質にした状態からの変形を扱っている。織物の材料特性を評価する上で、この手法は有効であり織組織の違いや糸の違いといった織物としての違いを評価可能としている。また、DIC法を用いた織物の変形評価も多くの研究が報告されており^(11,20-22)、DIC法は織物の変形を非接触で測定する有効な測定方法である。

DIC法は、不規則性を有する変形前後の撮影画像に対し、計測点とよばれる任意の点で、撮影画像の相関関係が極大値をとる位置を算出し、計測点の変位を測定する。織物の計測点を複数点設定し、その測定点群の変位からひずみ分布を求めることができる⁽²³⁻²⁷⁾。この際、四角形や円弧のグリッド上に均等に配置した計測点群を用いるのが一般的である⁽²⁸⁾。一方で、実際に織物を材料とした製造工程においては糸密度や配向角が均一ではない状態で搬送されるのが通常である。この初期変形がある状態から、搬送や位置決めさらに加工といった製造工程における織物の変形評価方法についての研究はみられない。

平織物の評価方法として、Jaufrès⁽¹¹⁾らは、たて糸とよこ糸が交錯する交錯点に着目し、手作業で交錯点に着色することで特徴を付し、これを計測点としてDIC法により引張試験における平織物の状態変化を評価している。この手法では、商品となるテープ部に特徴点としての着色はできないため、生産工程におけるインライン測定には適用できない。また、製造業では、統計的な品質管理手法として、シックス・シグマ⁽²⁹⁻³²⁾が活用されている。これは、100万回に3.4回の不良に抑えることを目標としている。すなわち、3.4ppmの頻度で発生する不良状態をモニタリングし評価するためには、インラインでの測定が必要である。このためには、織物の状態を自動かつ高速に処理することが求められる。

本論文で提案する、織組織を利用したDIC法による布変形挙動の測定法は、ファスナ生産工程でファスナテープ部のインライン測定を目的とし、商品となる布の交錯点に着色によるマーカを施すことなく、テープの変形状態の測定を可能とする。また、提案方法は、ファスナのような帯状の織物だけでなく、一般的な織物の変形測定に広く利用可能である。

1.3 本論文の構成

本論文は以下のように7章で構成される。

第1章 緒論

本章では、本研究の背景、目的および従来の研究と本研究の概要を述べる。さらに、本論文の構成を示す。

第2章 画像処理による織物挙動の測定方法

本章では、本研究で提案する織物の変形測定方法について述べる。織物の規則性を活用した交錯点の検出手法を示し、検出した交錯点を計測点としてDIC法による動的な変位測定法を示す。さらに、織物の規則性によりDIC法で発生する誤追跡を防止する手法を説明する。

第3章 帯状織物の搬送試験

本章では、帯状織物の搬送位置決めを模擬した試験装置について説明する。また、本論文で用いる試料の詳細を示す。さらに、模擬装置を用いた試験条件を示すとともに、試験装置の搬送挙動を確認する。

第4章 テンプレートマッチング法を用いた交錯点検出

本章では、試験装置により搬送位置決めした織物試料を撮影した画像を用いて、第2章で提案した方法により、各試料の交錯点を検出する。さらに、交錯点検出の測定精度について考察する。

第5章 DIC法を用いた交錯点の変位測定

本章では、テンプレートマッチングにより検出した織物の交錯点をDIC法の計測点として用いることで交錯点の変位を測定する。さらに、本論文で提案するDIC法のパラメータ設定を用いることで、布の交錯点に着色によるマーカを施すことなく、布変形を測定できることを示す。

第6章 織物の変形挙動評価方法

本章では、DIC法により測定した交錯点群の変位を用いて、たて糸とよこ糸を基準として布変形を評価する。同結果より、提案方法の有用性を確認する。

第7章 結論

本論文で得られた結論を要約して述べる。

第 2 章 画像処理による織物挙動の測定方法

2.1 緒言

本章では，織物の交錯点にマーカを施すことなく，織物の動的挙動を DIC 法により測定する方法を提案する．まず，織物組織の周期性を利用したテンプレートマッチングによる，たて糸とよこ糸が交錯する交錯点の検出方法を示す．つぎに，検出した交錯点を DIC 法による変位測定の見測点とし，織物組織の周期性による見測点の誤追跡を防ぐための方法を示す．

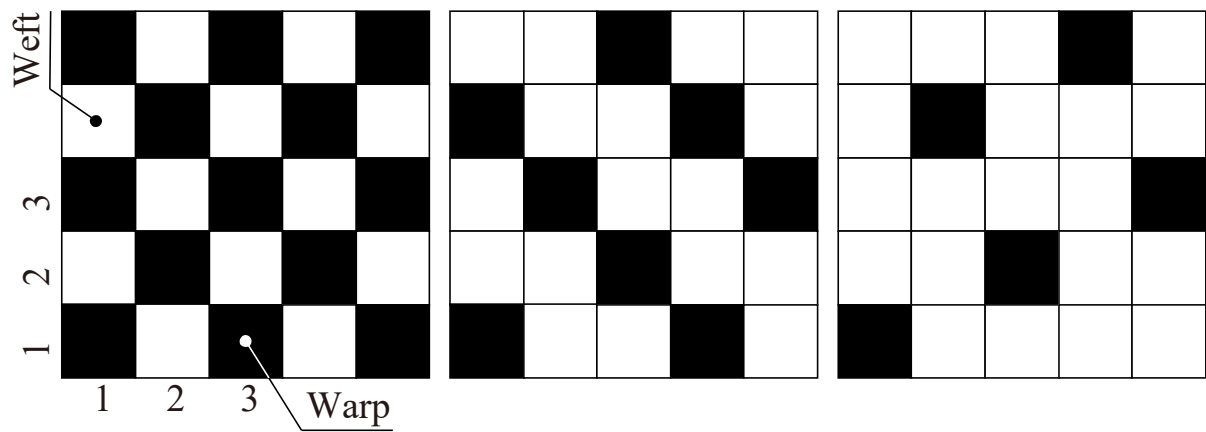
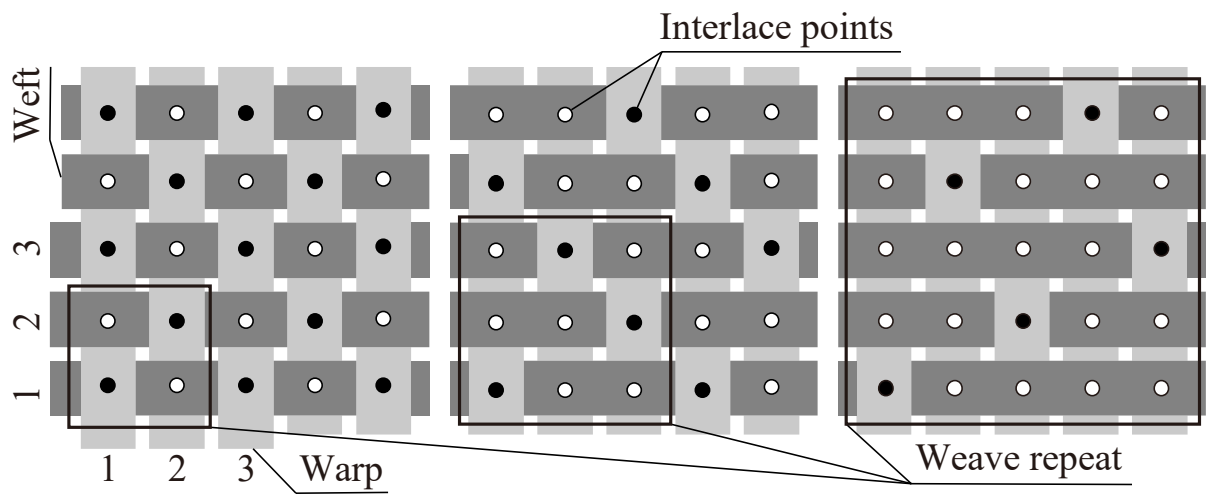
2.2 織物と交錯点の定義

織物はたて糸とよこ糸が規則的に織られた織組織からなり，その最小の規則を完全組織とよぶ．図 2.1 の上段および下段に代表的な織物の概略図および組織図を示す．

図 2.1(a), (b)および(c)はそれぞれ平織，綾織および朱子織であり，三原組織とよばれている．図 2.1 の上段の細線で囲んだ範囲が完全組織である．

たて糸とよこ糸が交錯する個所を組織点とよぶ⁽³³⁻³⁴⁾．本論文では，たて糸とよこ糸の幅方向中心線それぞれが交差する交点の座標を，画像処理上の交錯点として定義する．

図 2.1 に示すように，それぞれの織組織について，完全組織を構成する糸の本数や織り方が異なり，織組織の基本周期となる完全組織が織物を特徴づける．すなわち，織物の変形を測定する場合，組織の周期性，すなわち，完全組織を考慮して画像処理することが重要となる．



(a) Plain weave

(b) Twill weave

(c) Sateen weave

図 2.1 三原組織と交錯点の定義

2.3 交錯点の検出方法

織物の完全組織が有する周期性を利用することで、テンプレートマッチングにより交錯点の座標を検出する。本論文では、図 2.2 で示す交錯点近傍をテンプレートとする方法と、図 2.3 で示す完全組織をテンプレートとする方法を提案する。

両方法とも、テンプレートマッチングにおける相関評価には、相互相関係数 (Zero-mean Normalized Cross-Correlation, ZNCC) ^(35,36)を用いて次式により計算する。

$$\gamma(X, Y) = \frac{\sum \{(H(x, y) - \bar{H})(I(X + x, Y + y) - \bar{I})\}}{\sqrt{\sum (H(x, y) - \bar{H})^2 \cdot \sum (I(X + x, Y + y) - \bar{I})^2}} \quad (2.1)$$

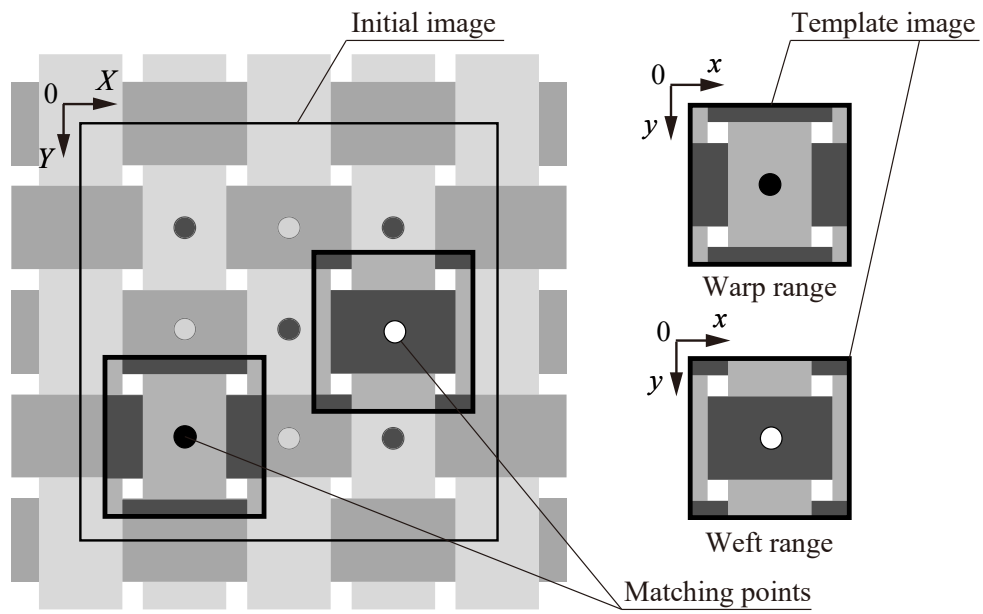
ここで、 H, I はテンプレートおよび評価対象となる画像の輝度値、 \bar{H}, \bar{I} はテンプレートおよび評価対象となる画像の平均輝度値である。 x, y はテンプレートに設けた座標、 X, Y は評価対象となる画像に設けた座標であり、座標原点は画像の左上に設ける。

なお、テンプレートマッチングの詳細は第 4 章で詳述し、本節ではテンプレートマッチングによる交錯点の検出の概念を示す。

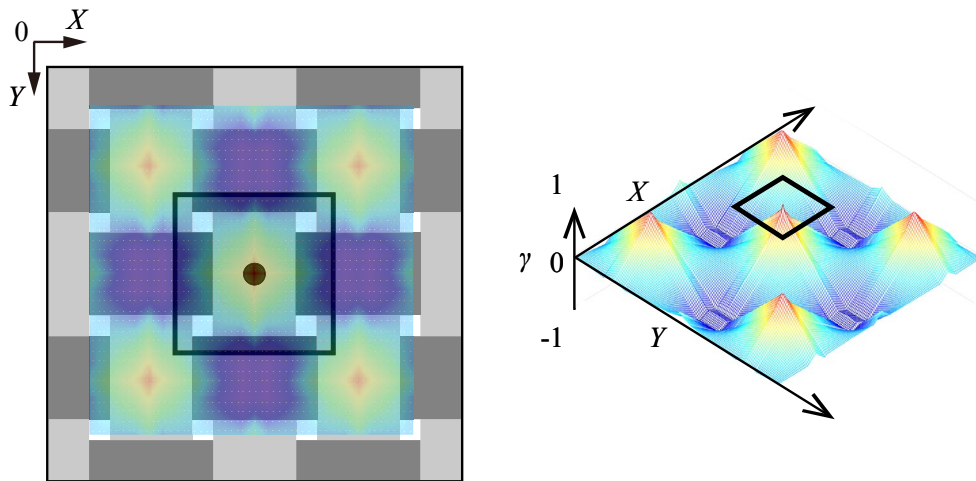
2.3.1 交錯点近傍をテンプレートとする方法

平織を例に、交錯点近傍をテンプレートとした交錯点検出の概要を図 2.2 に示す。平織の完全組織は、たて糸、よこ糸それぞれ 2 本で構成されるため、図 2.2(a)に示す、たて糸とよこ糸それぞれに 1 種類のテンプレート画像を用いて、それぞれ独立に交錯点を検出する。図 2.2(a)に示すテンプレート画像を用い、基準画像に対して相関係数の分布を式(2.1)より求めると図 2.2(b), (c)に示す分布のようになる。図 2.2(b), (c)に示すとおり、テンプレート位置を含め、複数の交錯点において相関係数がピークを示す。すなわち、相関係数のピーク値の座標から、交錯点の座標を検出することができる。なお、図 2.1(b)の綾織の場合、たて糸 1 種類、よこ糸 2 種類、図 2.1(c)の朱子織の場合、たて糸 1 種類、よこ糸 4 種類のテンプレートが必要となる。

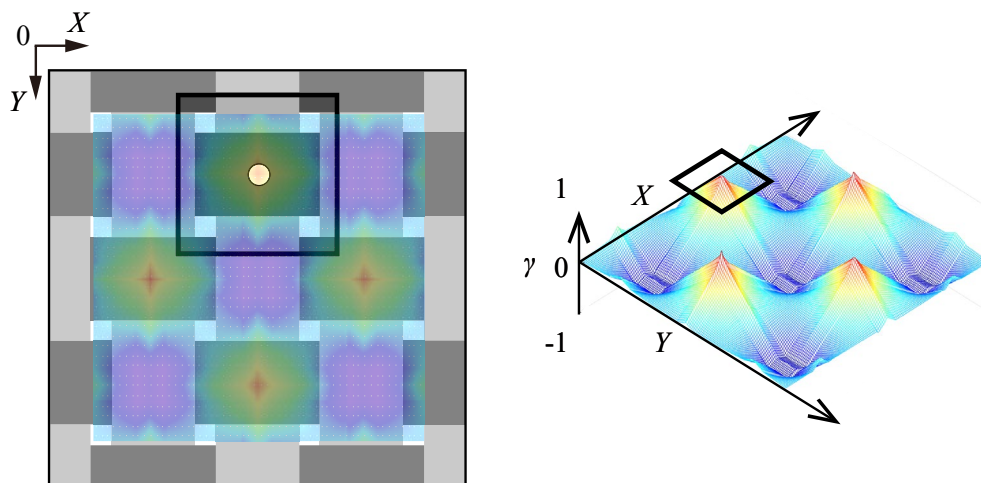
すなわち、完全組織を構成するたて糸とよこ糸の種類に応じたテンプレートを用いれば、初期画像の交錯点が不均一に配置し変形した織物組織においても、それぞれの交錯点の座標を高精度に検出できる方法となる。



(a) Initial image of plain weave fabric



(b) Correlation coefficients of warp



(c) Correlation coefficients of weft

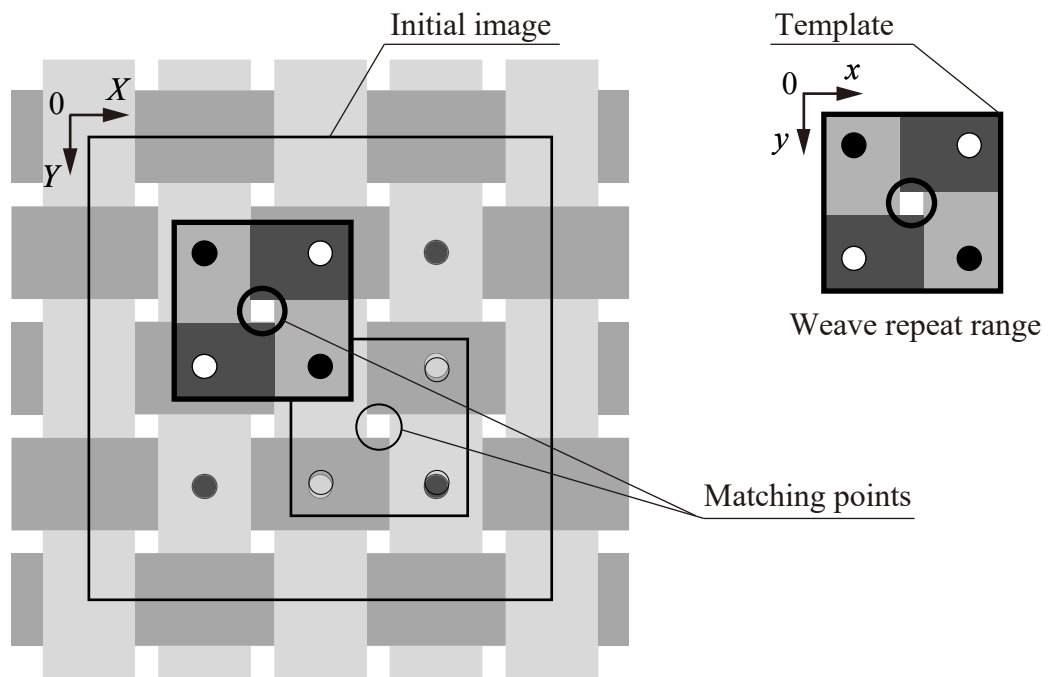
図 2.2 たて糸とよこ糸上の交錯点による相関係数

2.3.2 完全組織をテンプレートとする方法

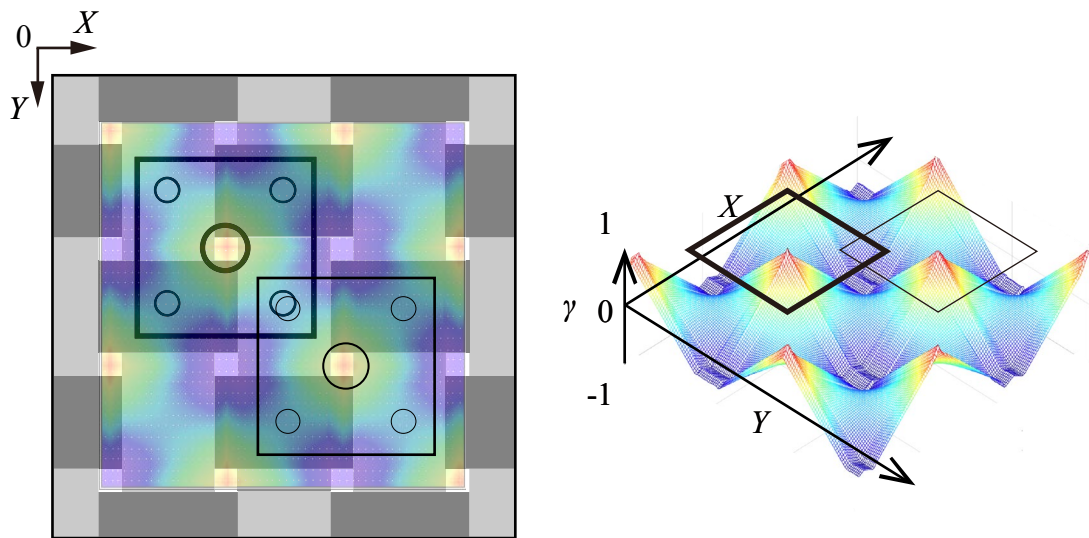
平織を例として、完全組織をテンプレート画像とする場合における交錯点検出の概要を図 2.3 に示す。図 2.3 (a)に完全組織を構成する交錯点を含むテンプレート画像を示す。なお、完全組織を構成する交錯点の座標をあらかじめテンプレート内に指定する。これにより、検出された完全組織の位置と角度から、各交錯点の座標を算出し割り当てる。

同テンプレートを用いて、初期画像における相関係数の分布を式(2.1)により求めれば図 2.3(b)となる。図 2.3(b)のとおり、○印で示す完全組織の中心において相関係数がピーク値を示す。このとき、図 2.3(a)において実線で示した完全組織と同時に、破線で示した完全組織も検出され、交錯点の座標が重複する。重複した座標値は、平均化して交錯点の座標とする。

同手法により、複雑な組織をもつ織物でも簡便に交錯点の座標を検出できる。ただし、初期画像において織物組織が不均一に変形している場合は、テンプレートで設定した完全組織の形状から誤差が生じる。



(a) Initial image and template of plain weave



(b) Correlation coefficients of weave repeat

図 2.3 完全組織による相関係数

2.4 交錯点を計測点とした DIC 法

本節では、2.3 節の方法で検出した交錯点を DIC 法における計測点として、連続画像間における計測点の変位測定の方法について述べる。基準画像に設定した計測点を中心とする、あらたなテンプレート画像を、DIC 法のサブセット画像とし、2 枚目以降の画像に対して相関係数の分布を求め、その結果を基に初期画像から変位した計測点を検出する。

本論文では、サブセット画像を 2 枚目以降の画像内で走査し、相関係数を算出する領域を評価領域と定義する。前節の 2.3.1 項で示した交錯点近傍をテンプレートとして交錯点を検出する場合と同様に、交錯点を中心としたサブセット画像では、近傍の同種の交錯点においても相関係数のピークを示す。すなわち、2 枚目以降の画像に対して、評価領域の設定によっては、隣接する別の交錯点の相関係数のピーク座標を測定対象の計測点として検出する可能性がある。したがって、DIC 法により測定対象の計測点変位を逐次追跡するためには、測定対象の計測点に対応する相関係数のピークのみを含む評価領域の設定が必要である。

本論文では、前節で検出した計測点となる交錯点の座標から算出できる糸間隔および配向角から、近傍にある計測点を誤検出しない評価領域とサブセットの設定方法を提案する。なお、DIC 法における相関係数の算出には、前節と同様に式(2.1)を用いる。また、計測点のサブピクセル探査においては、高速な処理が可能であることから、評価領域内で相関係数が最大となるピクセル座標を含む隣接した 9 点の相関係数に対して、2 次多項式による応答曲面近似によりサブピクセル処理を行う⁽³⁷⁾。なお、DIC 法の詳細は第 5 章で述べる。

まず、評価領域の設定で着目する交錯点に関し、2.1 節の図 2.1 (b), (c)に示す例のように綾織り、朱子織では、たて糸が表に見える交錯点の数が、よこ糸が表となる交錯点より少ない。このような場合、計測点の誤検出を防ぐため、表に見える交錯点の数が少ない方の糸に着目し、評価領域を設定すればよい。

評価領域設定方法の例を，平織りを対象に図 2.4 に示す．ただし，平織り布の場合，表に見える交錯点の数は，たて糸とよこ糸で等しいため，ここではたて糸を基準としている．図 2.4(a)は初期画像であり，図中に示すとおり，たて糸間隔を S_{warp} ，よこ糸間隔を S_{weft} [pixel]，たて糸とよこ糸の配向角を θ [°] と定義している．図 2.4(b)は 2 枚目の画像であり，計測点 P は u_2 の変位が生じるとする．

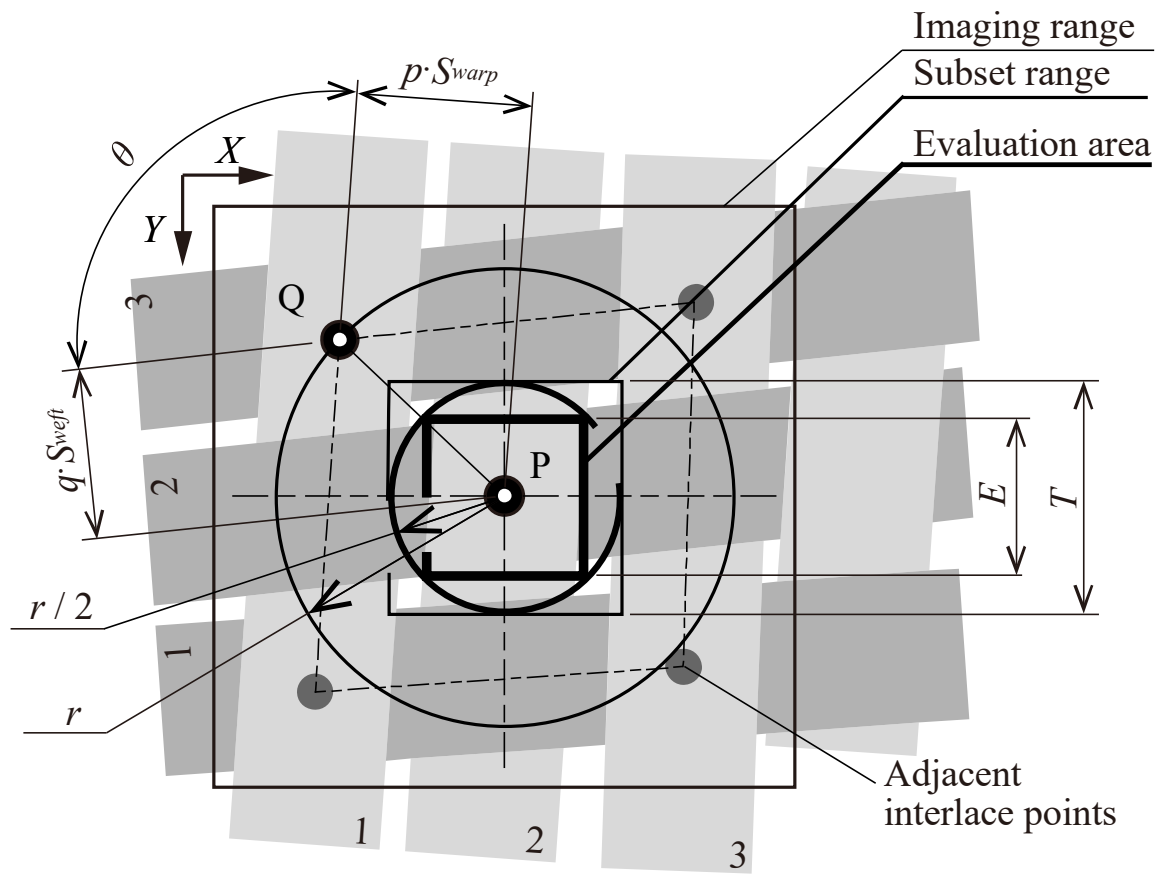
図 2.4 (a)に示す初期画像において，ある交錯点を計測点 P とし最も近傍にある同種の交錯点を計測点 Q とした場合，計測点間の距離 PQ を半径 r とした円上には，隣接する同種の交錯点が 1 点となる．次に，青線で記した半径 $r/2$ の円を考える．図 2.4 (b)の 2 枚目の画像において，計測点 P の変位の大きさが $r/2$ 未満であれば，点 Q が同円内に侵入することはない．すなわち，計測点 P を中心とする半径 $r/2$ の円が，他の交錯点の誤検出を防ぎ計測点 P を検出可能な領域となる．したがって，計算の容易さから，評価領域を X, Y 軸に平行な正方形とした場合，半径 $r/2$ の円に内接する一辺の長さが E [pixel] の正方形が相関係数の評価領域の上限であり，一辺の長さ E は次式で表される．

$$E = \frac{r}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(pS_{warp})^2 + (qS_{weft})^2 \left(\frac{1}{\sin \theta} + \frac{1}{\tan \theta} \right)^2} \quad (2.2)$$

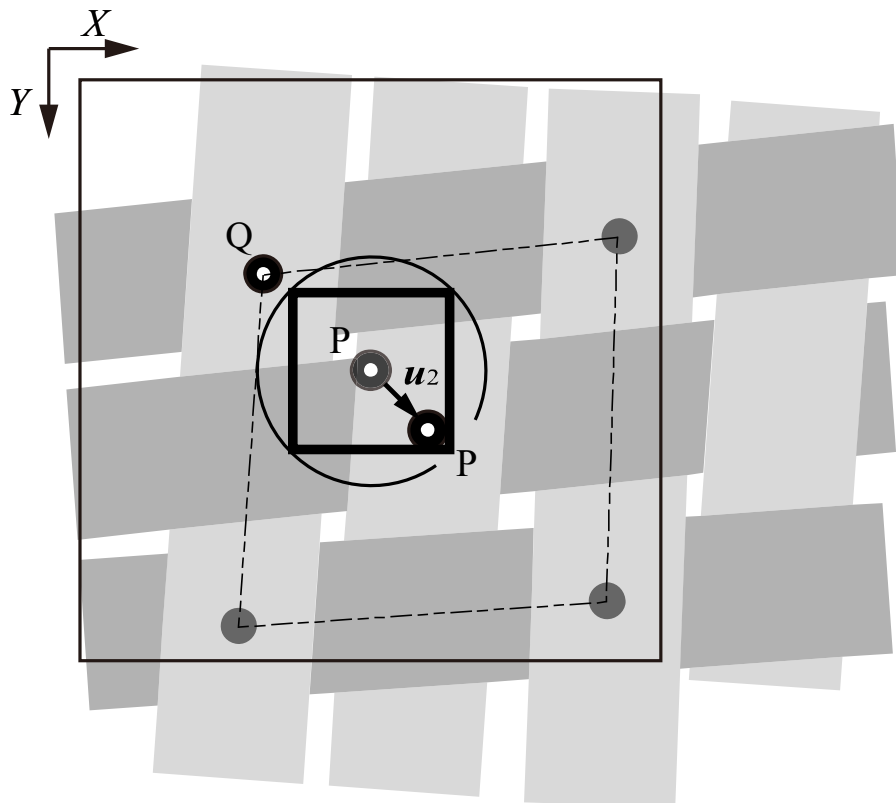
ただし，式(2.2), (2.3)において，計測点 P を 0 本目として点 Q までのたて糸の本数を p ，よこ糸の本数を q とする．平織はたて糸，よこ糸共に 1 本のため $p = q = 1$ である．同様に，2.1 節の図 2.1 において $p = q = 1$ となる綾織，および， $p = 1, q = 2$ となる朱子織のたて糸が表に見える交錯点についての評価領域を図示すると図 2.5(a), (b)となる．すなわち， $p = q = 1$ となる平織および綾織と比較すると， $p = 1, q = 2$ となる朱子織の評価領域は大きくなるのがわかる．

また，サブセット範囲は，図 2.4(a), 図 2.5 および 図 2.6 に示す半径 $r/2$ の円に外接する一片の長さが T [pixel] の正方形より大きい奇数とし中心点を計測点とする． T は次式で求められる．

$$T = r = \sqrt{(pS_{warp})^2 + (qS_{weft})^2 \left(\frac{1}{\sin \theta} + \frac{1}{\tan \theta} \right)^2} \quad (2.3)$$



(a) Initial image



(b) 2nd image

図 2.4 平織の評価領域

ここで、織物組織の特徴となるたて糸が表に見える交錯点を基準として導いた式(2.2), (2.3)を用いて、綾織および朱子織のよこ糸が表に見える交錯点に対して評価領域とサブセット範囲を図示すると図 2.6 となる. 図 2.6 に示すとおり, 式(2.3)を満たすサブセットは織物組織の特徴となるたて糸が表に見える交錯点を含むため, 類似した特徴量を有する同種の交錯点は半径 r の円状にあり, 式(2.2)を満たす評価領域を用いて, 他の交錯点を誤検出することはないことがわかる. すなわち, 織物組織の特徴を示す表に見える交錯点の数が少ない糸を基準として導いた式(2.2), (2.3)に従う評価領域およびサブセット画像は, 他方の糸が表に見える交錯点に対しても適用することができる. 本節では, よこ浮きが多い例を示したが, たて浮きが多い組織ではよこ糸が浮く交錯点を基準とする.

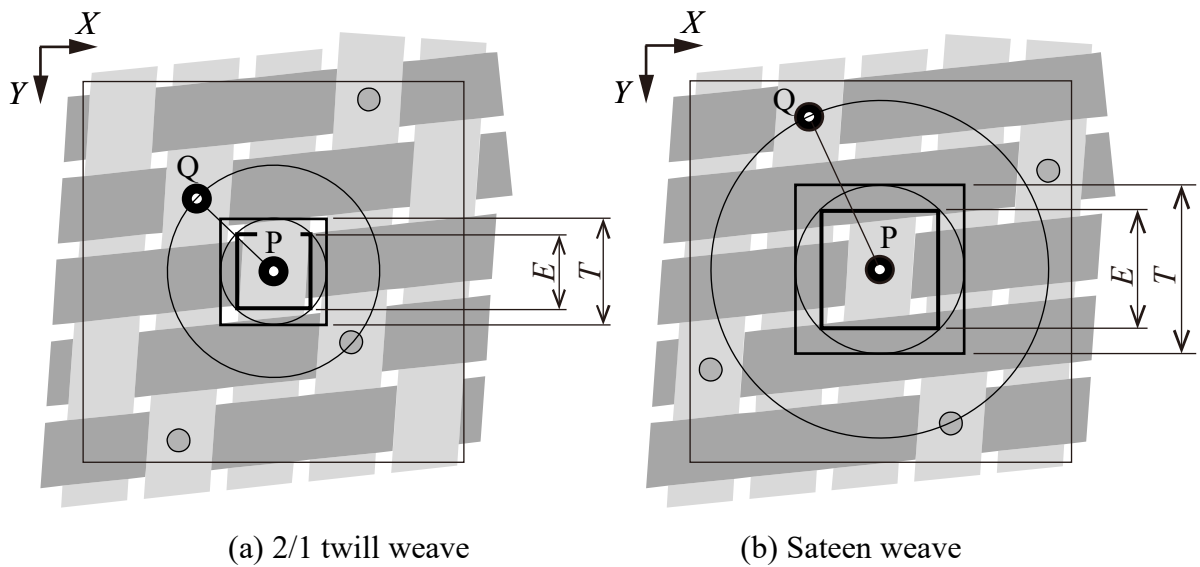


図 2.5 たて糸の評価領域

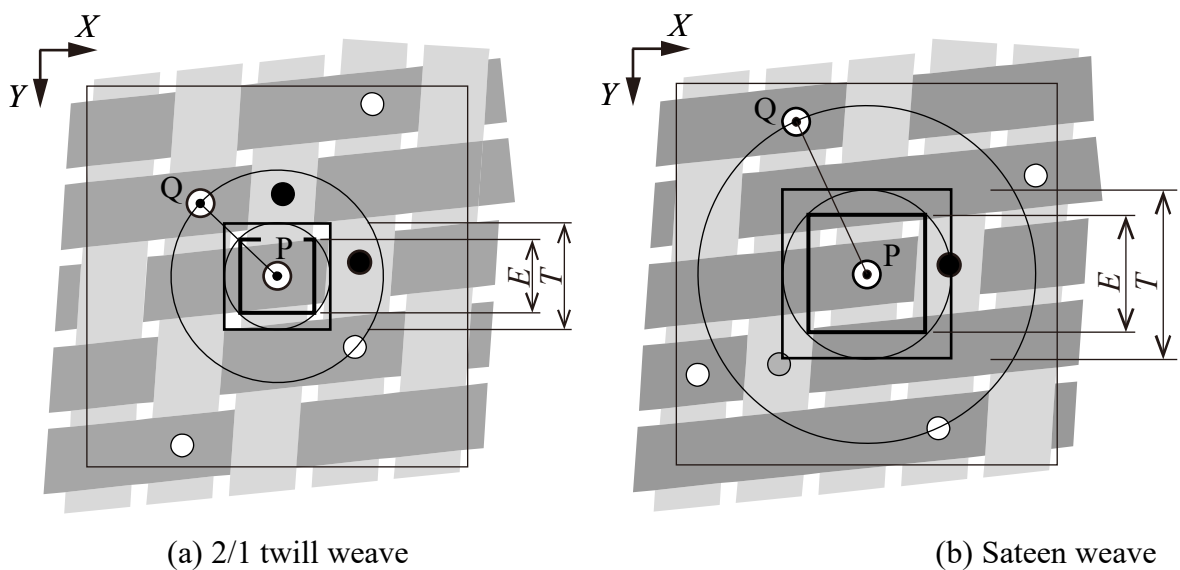


図 2.6 よこ糸の評価領域

ここまで示したとおり，交錯点を計測点とした DIC 法では，織物組織の周期性による誤検出を避けるため，織物組織に応じた評価範囲を導入した．特に，平織の場合は織物組織の特徴を示す交錯点が密なため，評価領域が小さくなる．そのため，連続する画像間で計測点を評価領域に収めるためトラッキングによる評価領域中心座標の更新と撮影フレームレートの決定が必要となる．

図 2.7 に示すとおり，画像 $n-1$ 枚目から画像 n 枚目に生じる計測点の変位ベクトル，加速度ベクトルを \mathbf{u}_n [pixel], \mathbf{a}_n [pixel/s²], 画像撮影のフレームレートを F [fps] とすると，次式が成り立つ．

$$\mathbf{u}_n = \mathbf{u}_{n-1} + \frac{\mathbf{a}_n}{2F^2} \quad (n = 2, 3, \dots, \mathbf{u}_1 = 0) \quad (2.4)$$

したがって，画像 n 枚目における計測点の位置ベクトル \mathbf{P}_n は次式で表される．

$$\mathbf{P}_n = \mathbf{P}_{n-1} + \left(\mathbf{u}_{n-1} + \frac{\mathbf{a}_n}{2F^2} \right) \quad (2.5)$$

そこで，本論文では評価領域の中心座標 \mathbf{C}_n を次式により逐次更新する．

$$\mathbf{C}_n = \mathbf{P}_{n-1} + \mathbf{u}_{n-1} \quad (2.6)$$

なお，本論文ではトラッキングによる，中心座標の更新において評価領域 E [pixel] の 1 辺の長さが奇数の場合は中心点座標 $C_n(x, y)$ とし，偶数の場合は中心点座標 $C_n(x-1, y-1)$ とする．

次に，画像 n 枚目における計測点 \mathbf{P}_n が，評価領域内に収まるためのフレームレート F の条件を検討する．図 2.7 に示す，一辺の長さが E の評価領域に内接する半径 $E/2$ の円を用いて，計測点 \mathbf{P}_n が同円内の内側に内包されるための，次式の条件を考える．

$$\frac{E}{2} > \frac{|\mathbf{a}_n|}{2F^2} \quad (2.7)$$

想定される計測点の最大加速度の大きさを \mathbf{a}_{\max} とし，式(2.7)を書き換えると次式となり，必要となる最小フレームレート F を算出できる．

$$F > \sqrt{\frac{\mathbf{a}_{\max}}{E}} \quad (2.8)$$

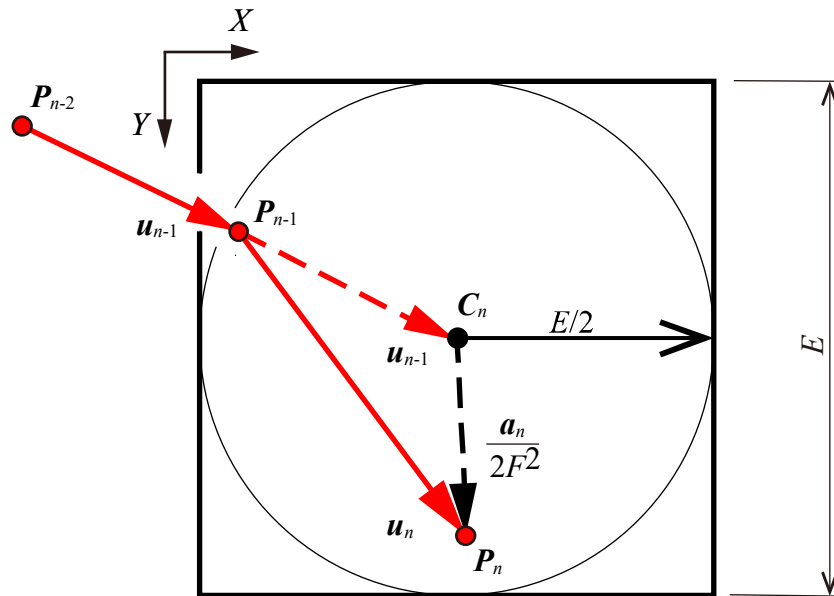


図 2.7 評価領域の中心座標トラッキング

2.5 結言

本章では、本研究における織物についての定義を説明し、提案する織物の変形測定を行うための測定方法について述べた。

テンプレートマッチングによる織物の規則性を活用した交錯点の検出手法を示し、検出した交錯点を計測点として DIC 法による動的な変位測定法を示した。さらに、DIC 法を織物に用いた場合に、織組織の規則性により発生する誤追跡を防止する DIC 法の設定値を織物の特徴から決定する手法を説明した。

次章では、織物を搬送する試験装置と、本章で説明した画像処理を行うために織物を撮影する撮像装置について述べる。

第 3 章 帯状織物の搬送動作試験

3.1 緒言

本章では、ファスナに代表される帯状織物の搬送位置決めを模擬した試験装置について説明する。まず、帯状織物の搬送状態と同様に張力を発生させる機構を示し、装置動作と搬送試料の力学状態を測定するための測定系について述べる。次に、搬送位置決めされた際の織物に生じる変形を測定する画像撮影装置について説明する。さらに、本研究で用いる織物試料の詳細と模擬装置を用いた試験条件を示すとともに、試験装置の搬送挙動を評価する。

3.2 搬送機構の概要

3.2.1 試験装置の概要

帯状織物の搬送位置決め時を模擬するための試験装置を図 3.1 に示し、測定機器、測定箇所、測定量を表 3.1 に示す。図 3.1 に示すとおり、同試験装置は、帯状の織物試料の左端をグリッパ、またはストッパにより固定し、右端をフィードローラにより巻取ることによって試料に張力を負荷する構造としている。これにより、搬送位置決めされた帯状の織物が停止した際に生じる変形挙動を模擬する。また、ガイド 1 とガイド 2 の間で引張により生じる帯状織物の変形を画像処理により測定する。

まず、図 3.1 に示すように、グリッパにより試料の左端を固定し、ガイド 1 とガイド 2 により試料を水平に保持する。次に、搬送動力となる減速機付きモータによる駆動ユニットにより、フィードローラを回転させる。この際、フィードローラに負荷されるトルクを測定するため、駆動装置とフィードローラの間にはトルクセンサを配している。測定したトルクをフィードローラの半径で除すことで試料に作用する張力を測定する。また、モータ後部に直結したエンコーダ 1 によりモータの回転を測定する。

フィードローラと織物試料には滑りが生じないように設計しており、巻取りによる送りを行う。巻取りにより搬送位置決めされた際に、試料に負荷する張力を一定にするためにフィードローラには摩擦クラッチが内蔵されている。摩擦クラッチにより、所定のトルクが作用した時点でフィードローラは停止し、モータ軸は空転する。そのため、フィードローラの回転を測定するためにエンコーダ 2 を配している。

すなわち、トルクセンサとエンコーダの出力値から、フィードローラが巻取る試料右端の送り量と試料に作用する張力を測定できる。なお、ガイド 1 とガイド 2 の間で生じる試料の変形挙動を測定するため、デジタルカメラと LED 照明を配している。撮影装置の詳細は 3.4 節で詳述する。

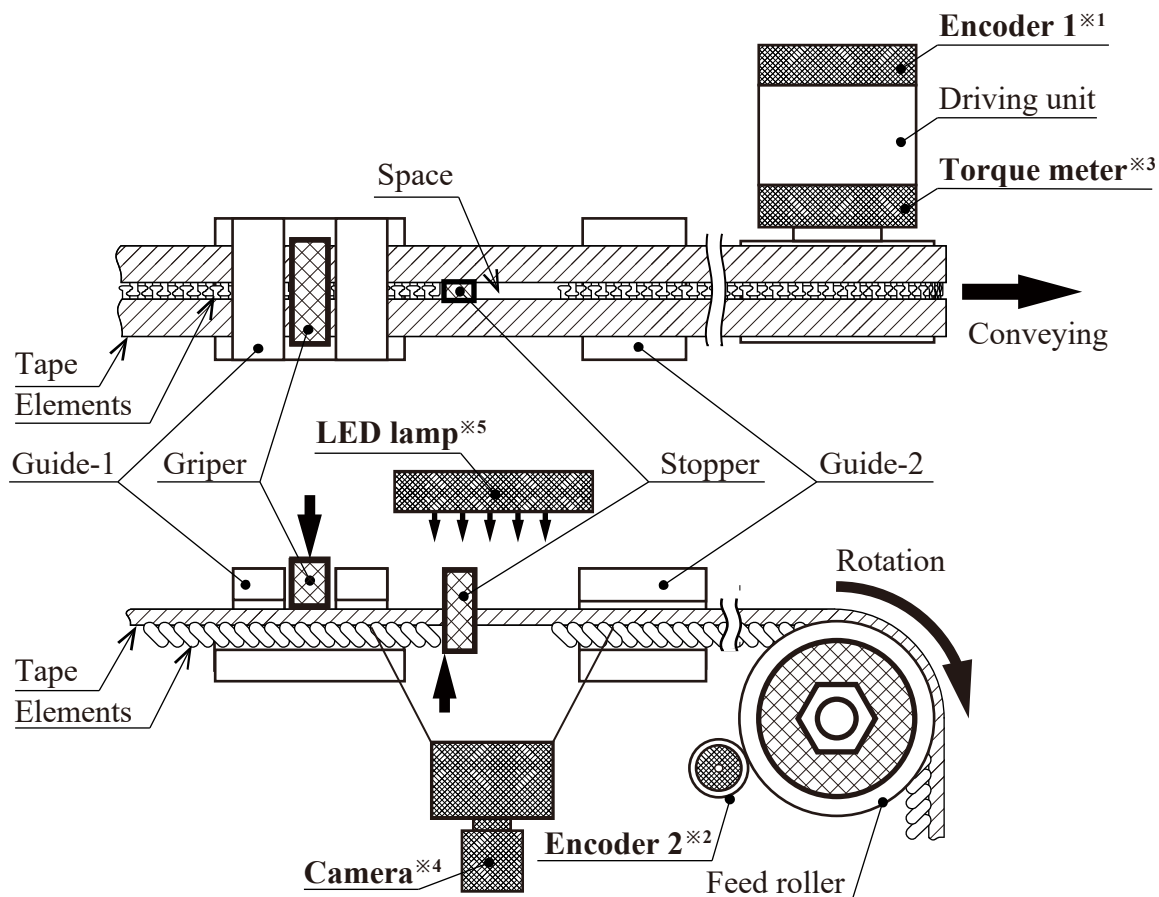


図 3.1 搬送位置決めを模擬する試験装置

表 3.1 測定機器，測定箇所，測定値

測定機器	測定箇所	測定量
トルクセンサ	ローラトルク	試料の張力
エンコーダ 1	駆動ユニット，モータ部	モータ回転量
エンコーダ 2	フィードローラ	ローラ回転量
カメラ	ガイド 1, 2 間	試料の変形量

3.2.2 計装システムの構成

試験装置に配する種々のセンサ測定値を記録する計装システムの構成を図 3.2 に示し、各々のセンサ出力を表 3.2、対応する記録装置の諸元を表 3.3 に示す。試験装置の動作を制御するコントローラとは別に、センサの測定値を記録する計装システムを用いることで、機械の動作と試料の挙動を同期して測定する。

図 3.2 に示すように、試験装置の制御は赤線で示す信号により、試験装置の動作と記録装置の収録制御を行う。青線で示す試験装置に配した各種センサの出力信号は、記録装置で収録される。この際に、記録装置には内部に 1 [MHz]の基準クロックをもち、これに同期して測定値の収録を行う。同様に、基準クロックに同期して試料の挙動を撮影するカメラに対し撮影トリガ信号を出力する。これにより、トリガ信号とカメラの露光タイミングを同期させ、センサの信号と同期した撮影画像を得ることができる。カメラにより得られた撮影画像は、フレームグラバを経由してコンピュータに記録される。

表 3.2 各々のセンサ出力とカメラトリガの諸元

対象機器	入出力	範囲	単位	記録機器
トルクセンサ	電圧入力 1	±5	V	NI 9223
エンコーダ 1 : A 相	電圧入力 2	High:5, Low:0	V	NI 9401
エンコーダ 1 : B 相	電圧入力 3	High:5, Low:0	V	NI 9401
エンコーダ 2 : A 相	電圧入力 4	High:5, Low:0	V	NI 9401
エンコーダ 2 : B 相	電圧入力 5	High:5, Low:0	V	NI 9401
カメラ	撮影トリガ出力	High:5, Low:0	V	NI 9361

表 3.3 各々の記録装置とカメラ信号出力器の諸元

型式	範囲	単位	周期	分解能	確度
NI 9223	±10	V	1 MS/秒/ch max	16 bit	0.00306 V
NI 9401	0~5.25	V	10 MHz	-	-
NI 9361	0~102.4	kHz	1 MS/秒 max	32 bit	± 50 ppm max

表 3.4 トルクセンサの諸元

メーカー	UNIPULSE
型式	UTM II-5Nm
定格容量	±5 Nm
応答性	kHz
ヒステリシス/繰返し性	0.03% FS

表 3.5 エンコーダの諸元

	エンコーダ 1	エンコーダ 2
メーカー	OMRON	OMRON
型式	E6A2-CW5C 500P/R	E6J-CWZ1C 1000P/R
設置場所	モータ	サブローラ
1回転当たりのパルス数： n_e [P/R]	500	1000

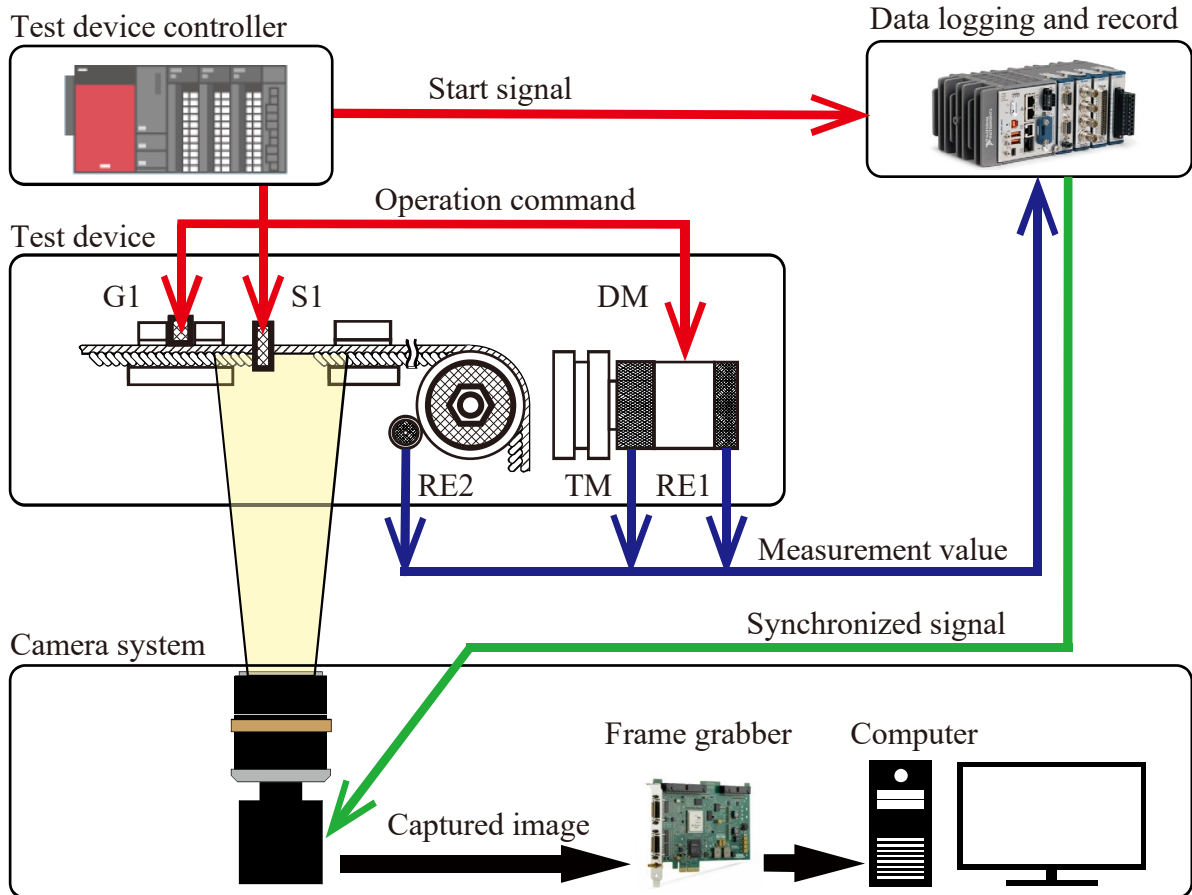


図 3.2 試験装置の計装システム

3.3 試験装置の機構と測定方法

3.3.1 駆動装置および測定系

図 3.1 に示したように、試料はストッパあるいはグリッパで左端を固定された状態で、フィードローラにより搬送方向に送られ、張力がかかり停止する。この際に、エンコーダ 2 によりフィードローラの回転量を測定することで、試料の伸び量を測定する。

ストッパやグリッパにより試料の左端が固定された状態からモータを駆動すると、フィードローラに設けられた摩擦クラッチ機構により、試料の伸びに伴う張力によるトルクと摩擦クラッチにより発生するトルクがつり合い、フィードローラの回転は停止する。この際に、モータは停止せず駆動した状態を保つことで、試料に一定の張力を負荷することができる。この状態においては、フィードローラと駆動ユニットの出力軸の回転数が異なる。

図 3.3 に示すように、駆動ユニットは、エンコーダ 1 が設置されたモータが、減速比 9 の減速機とトルクセンサを介して、半径 $r_f = 40$ [mm] のフィードローラが接続されている。同時に、フィードローラにはエンコーダ 2 を設けた半径 $r_s = 12.5$ [mm] のサブローラを接触させ、サブローラの回転からフィードローラの回転数に変換する。フィードローラとサブローラの回転比は 3.2 である。表 3.5 に示すエンコーダにより、モータ回転数、サブローラ回転数をそれぞれ測定する。

エンコーダにより測定したパルス間隔をパルス周波数 ν_e [Hz] に換算し、エンコーダ 1 回転当たりのパルス数を n_e とすると、エンコーダの回転数 N_e [min^{-1}] は次式で表される。

$$N_e = \frac{\nu_e}{n_e \times 60} \quad (3.1)$$

エンコーダ 1 により測定したモータ回転数を N_m とし、減速機の減速比 1/9 を用いて、次式のとおり、駆動装置の出力軸回転数 N_f' に換算する。

$$N_f' = N_m \times \frac{1}{9} \quad (3.2)$$

エンコーダ 2 により測定したサブローラ回転数を N_s とし、ローラ径の比を用いて、次式のとおり、フィードローラの回転数 N_f に換算する。

$$N_f = \frac{2r_s}{2r_f} N_s \quad (3.3)$$

ここで、減速機はギヤで構成されるため、減速比に誤差は生じないが、フィードローラとサブローラの回転伝達は二つの円の接触であるため、直径誤差によりローラ径の比には誤差が生じる。そこで、定速回転で駆動して得たエンコーダ 1 と 2 の測定値から、ローラ径の比を算出する。すなわち、フィードローラとサブローラ径の比は、エンコーダ 1 と 2 の測定結果を用いて、式(3.2)と式(3.3)より、次式で算出する。

$$\frac{r_s}{r_f} = \frac{N_m}{N_s} \times \frac{1}{9} \quad (3.4)$$

式(3.4)により算出したローラ径比を用いて、クラッチが動作した場合においても直接フィードローラ回転数 N_f を求めることができる。また、駆動ユニットの出力軸回転数 N_f' と、フィードローラ回転数 N_f を比較することで、クラッチの動作状態を判断できる。

本論文では、モータへの指令回転数を3段階に変化させてローラ径の比を求める試験を行い、試験結果からローラ径比を算出した。算出には、フィードローラに負荷を掛けない状態で、加減速の影響を受けない一定速度に達した状態の測定値を用いる。表 3.4 に示す各指令速度でモータを駆動させ、それぞれのエンコーダ回転数を 1 [s] 測定した結果の平均値を表 3.4 に示す。同結果から算出したローラ径比はいずれも 3.19 となった。この値を用いることで、サブローラの回転数によりフィードローラの回転数を測定することができる。

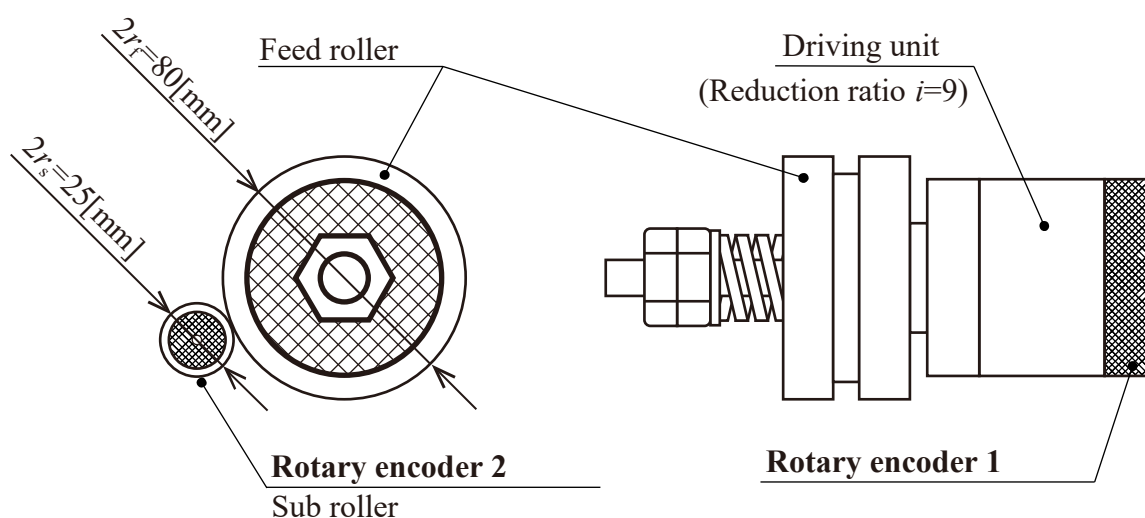


図 3.3 モータ回転数とローラ回転数の測定方法

表 3.6 フィードローラとサブローラ径との比

	エンコーダ 1 測定回転数[rpm]	エンコーダ 2 測定回転数[rpm]	$\frac{r_s}{r_f}$
指令 200 RPM	1786	633	3.19
指令 100 RPM	891	316	3.19
指令 25 RPM	234	83	3.19

3.3.2 張力発生装置および測定系

摩擦クラッチによるフィードローラの挙動

図 3.4 にフィードローラに搭載するクラッチ機構の概略を示す。クラッチ部は、金属板、樹脂板、スプリングおよびトルクメータが直結する駆動軸で構成する。金属板は回転方向のみ駆動軸に固定し、樹脂板は圧縮ばねによってローラと金属板に押し付け、摩擦力で駆動軸の動力をフィードローラ伝える機構になっている。

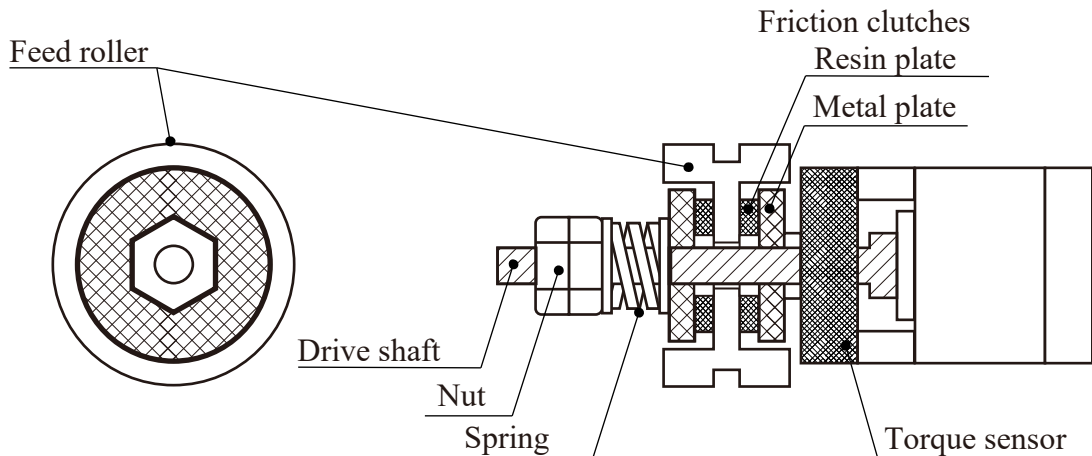


図 3.4 押付力とフィードロールに作用するトルク

フィードローラに伝えるトルクの調整方法は、圧縮ばねのたわみ量を変えることにより押付力を変更しておこなう。圧縮ばねのたわみは、直接推定が困難なため、圧縮ばねを固定するナットの締め込み角をもとに算出することができる。駆動軸の先端は、おねじとなっており、2 個のナットにより圧縮ばねのたわみ量を調整する。圧縮ばねのたわみ量 δ_c は、ナットの締め込み角 φ 、ねじピッチ p_c より次式で求められる。

$$\delta_c = \frac{\varphi}{2\pi} p_c \quad (3.5)$$

よって、圧縮ばねのバネ定数を k とすると、クラッチ板の押付力 Q は次式となる。

$$Q = k\delta_c \quad (3.6)$$

本研究では、ばね定数 $k = 152.5$ [N/mm] の圧縮ばねを用い、たわみ量を $\delta = 1.3$ [mm] として、クラッチ板の押付け力 $Q = 198.3$ [N] となるように設定した。

駆動軸回転数 $N_f' = 25$ [rpm] で指令し、フィードローラが回転している状態から急停止させて、クラッチが滑り出した際の駆動軸回転数 N_f' とフィードローラ回転数 N_f の測定結果を図 3.5 に示す。同図より、0.08 秒より後は駆動軸とフィードローラの回転数に差が生じている。これは、フィードローラと樹脂板および金属板と樹脂板の接触面で発生する摩擦力を超える力が発生したため、各板間で滑りが生じフィードローラに対して駆動軸が空転したことによる。すなわち、フィードローラと樹脂板および金属板と樹脂板の間には、図 3.5 に示す 0.1 秒より前では静止摩擦力、後では動摩擦力が作用している。

したがって、フィードローラは、静止摩擦から動摩擦への変化を利用してクラッチが滑りはじめることで一定トルクを発生する機能を持つことが確認できた。

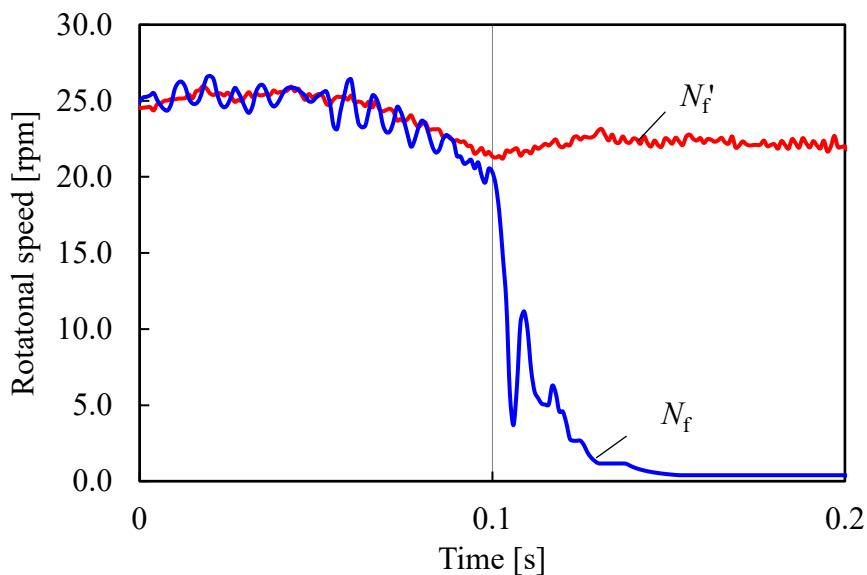


図 3.5 ファスナ位置決め時のフィードローラ回転速度の測定結果の一例

また、クラッチが動作し、フィードローラに対して駆動軸が空転する際に発生するトルクを測定するため、フィードローラを固定した試験をおこなう。駆動軸を 25 [rpm] で空転させ、軸に生じたトルクの測定結果を図 3.6 に示す。図 3.6 より、フィードローラが 1 [Rotation] するたびに周期的なトルク変動を示すことがわかる。周期的なトルク変動の原因としては、接触面の表面粗さが一定でないことや、ローラと樹脂板の間に摩擦振動が生じている可能性があげられる。フィードローラに生じるトルク約 1.5 [Nm] に対して、トルクの変動幅は 0.1 [Nm] 程度となっており、10%程度の変動があることがわかる。

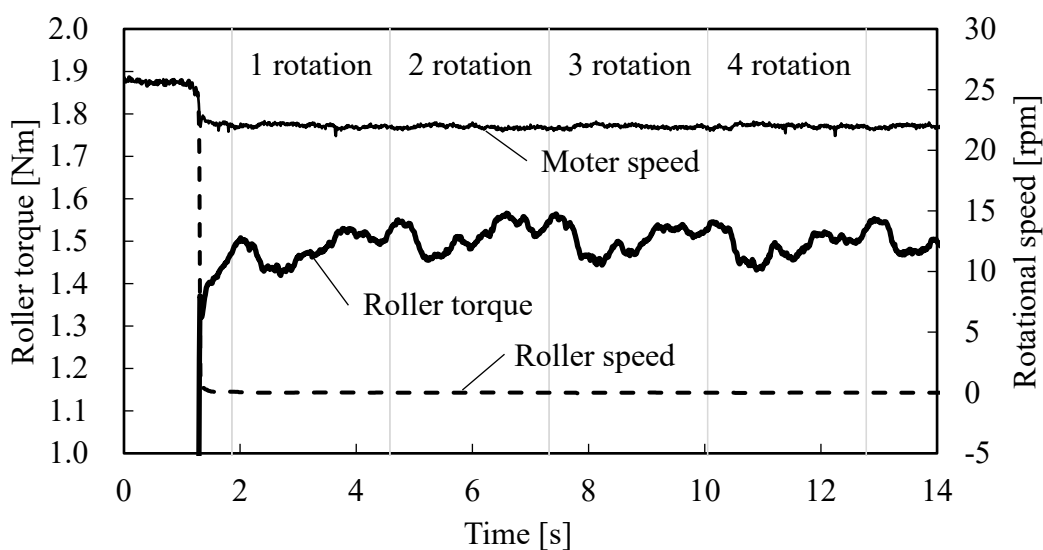


図 3.6 トルクセンサの測定結果によるフィードローラのトルク変動

摩擦クラッチの静止摩擦係数

円板クラッチの許容伝達トルクから、フィードローラの静止摩擦係数を算出する。図 3.7 に樹脂板の概略図と諸元表を示す。樹脂板はリング状であり、内径と外形を D_1 , D_2 , 平均直径を D_a , 摩擦面の幅を b_c とおく。

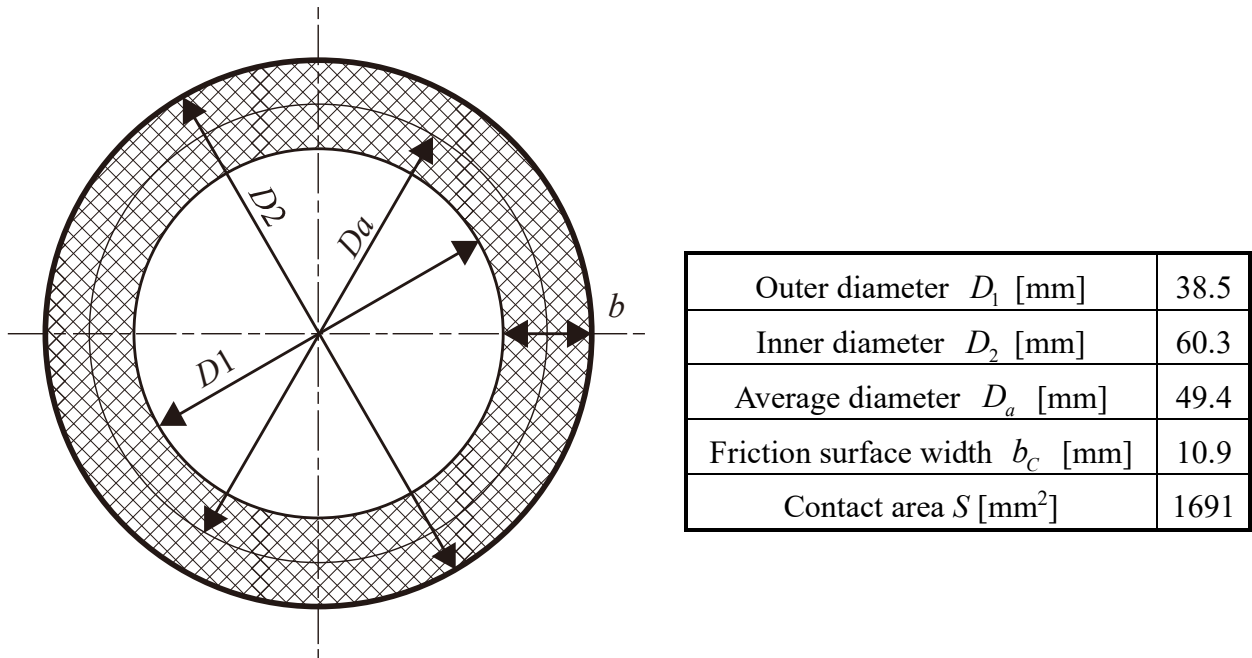


図 3.7 樹脂板の概略図と諸元表

金属板と樹脂版との摩擦数 n_c は 2 面あり、それらの摩擦状態は同等と仮定すると、クラッチによりフィードローラで伝達できる静止摩擦状態のトルク T_s は、接触面の静止摩擦係数を μ とすると、次式で求められる。

$$T_s = n_c \times \mu Q \times \frac{D_a}{2} = \mu Q D_a \quad (3.7)$$

すなわち、式(3.7)より、接触面の静止摩擦係数 μ は次式により求めることができる。

$$\mu = \frac{T_s}{Q D_a} \quad (3.8)$$

ここで、クラッチ板の押付け力 $Q_c = 198.3$ [N] とし、駆動軸回転数 $N_f' = 25$ [rpm] となるようモータを指令しフィードローラを動作させた場合の、駆動軸回転数 N_f' , フィードローラ回転数 N_f および駆動軸トルク T_m を図 3.8 に示す。同図より、フィードローラが空転しはじめるタイミングで駆動軸トルク T_m がピーク値を示していることがわかる。そこで、駆動軸トルクのピーク値を静止摩擦状態のトルク $T_s = 1.668$ [N m] とする。よって、式(3.8)より静止摩擦係数 $\mu = 0.1922$ となる。

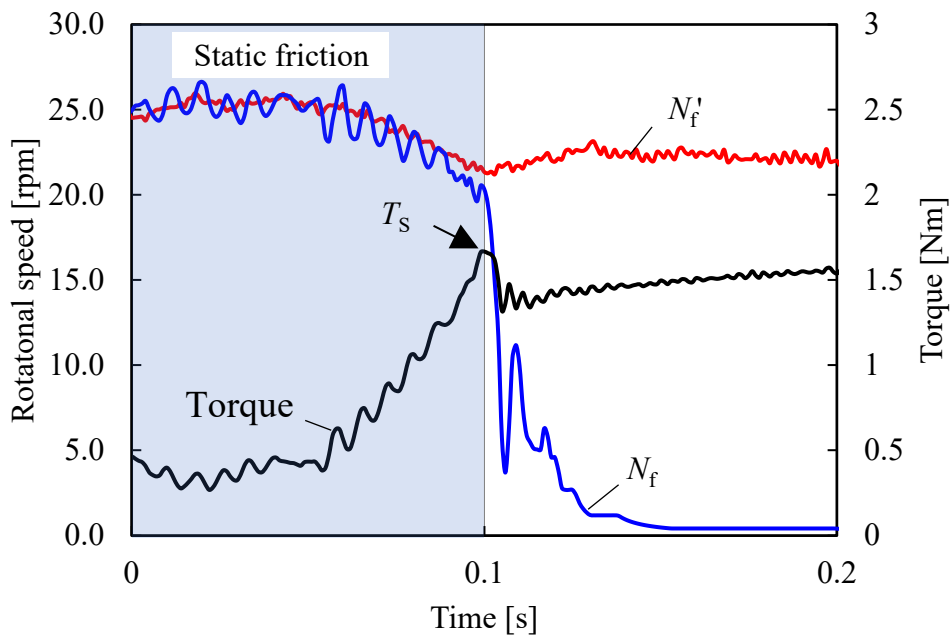


図 3.8 クラッチの滑り出しとピークトルクの関係

なお，モータ回転数 N_m を変化させた時の静止摩擦係数の速度依存性についても調査した．図 3.9 に静止摩擦係数 μ の算出結果を示す．図 3.9 より，静止摩擦係数 μ は，フィードローラの回転が速くなるほど増加する傾向が見られる．したがって，フィードローラが停止する際に生じるトルクは速度に依存して変化するといえる．

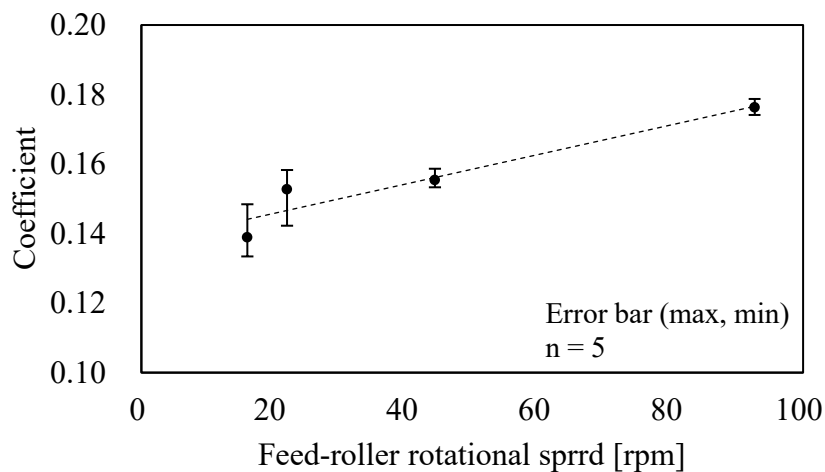


図 3.9 静止摩擦係数 μ' の算出結果

摩擦クラッチの動摩擦係数

円板クラッチが滑っている状態の伝達トルクから、フィードローラの動摩擦係数を算出する。図 3.6 より、ローラ巻き取りトルクはモータが 1 回転する毎に周期的に変化する傾向を示す。そのため、ローラ巻き取りトルクの最大、最小値を含む 5 周期分を測定し、伝達トルクの平均値を動摩擦状態のトルク T_d とする。

ここで、図 3.10 にフィードローラ回転速度とトルクの測定結果の一例を示す。同図から $N_f = 0$ となりフィードローラが停止する 0.15[s] より後の測定値を用いて動摩擦トルク T_d を求める。

クラッチ板の押付力 $Q_C = 198.3$ [N] から、摩擦面への押付力 P_C を求め、表 3.7 に示す諸元を用いてフィードローラの動摩擦係数 μ' は次式で求められる。

$$\mu' = \frac{2T_d}{n_c \pi D_a^2 b_c P_c} \quad (3.9)$$

表 3.7 摩擦係数算出に必要な諸元表

Spring constant k_c [N/mm]	152.5
Spring displacement δ_c [mm]	1.30
Pushing force Q_C [N]	198.3
Contact surface pressure P_C [MPa]	0.1172
Number of friction surfaces n_c	2

なお、モータ回転速度を変化させた時の動摩擦係数の速度依存性についても調査した。フィードローラの指令回転速度は、20 [rpm], 25 [rpm], 50 [rpm], 100 [rpm] の 4 通りとする。表 3.8 に各フィードローラ回転速度における動摩擦状態のトルク T_d の測定結果を示す。

表 3.8 各フィードローラ回転速度における T_d の測定結果

		Feed roller rotational speed [rpm]			
		15.6	22.7	44.2	92.5
Dynamic friction torque T_d [Nm]	Cycle 1 ave.	1.45	1.50	1.67	1.89
	Cycle 2 ave.	1.49	1.45	1.67	1.90
	Cycle 3 ave.	1.43	1.53	1.68	1.92
	Cycle 4 ave.	1.44	1.55	1.63	1.88
	Cycle 5 ave.	1.44	1.47	1.68	1.84
Average		1.45	1.50	1.67	1.89

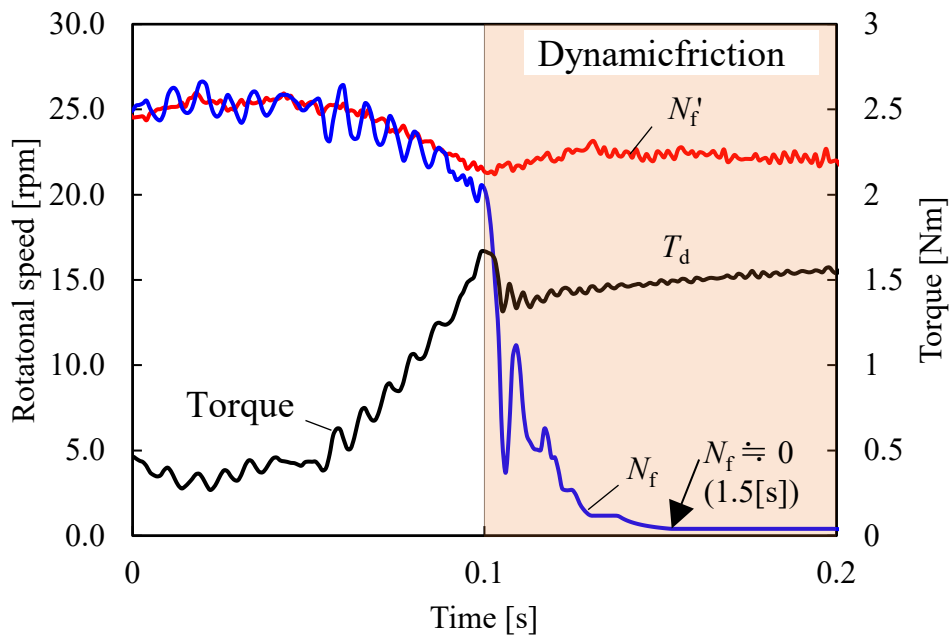


図 3.10 クラッチの滑り出し後のフィードローラ回転速度とトルクの関係

測定した動摩擦状態のトルクより求めた、動摩擦係数 μ' の算出結果を図 3.11 に示す。同図より、クラッチ機構の動摩擦係数は、駆動軸の回転が速くなるほど増加する傾向が見られる。したがって、フィードローラが停止した後にローラに生じるトルクは速度に依存して変化することがわかった。

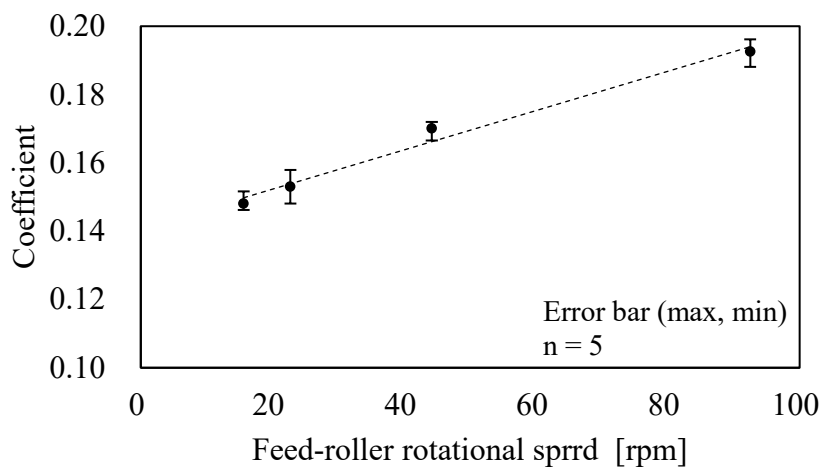


図 3.11 動摩擦係数 μ' の算出結果

3.4 撮影装置

3.4.1 撮影装置の諸元

織物の変形を撮影画像により測定するため，試験装置に用いるカメラおよびレンズを選定する．被写体となる試料を撮影するために要求される項目を表 3.9 に示す．まず，ファスナ搬送時の撮影を念頭に置くと，撮影範囲は 40×30 [mm²]以上が必要となる．また，測定精度 ± 0.1 [mm] を目標とし，撮影画像の分解能を目標精度の 10 分の 1 とし解像度を 0.02 [mm/pixel] とする．

表 3.9 試料の撮影画像に要求する項目

被写体（試料）	織物
撮影範囲[mm]	40×30 以上
解像度 $Reso$ [mm/pixel]	0.02 以下

表 3.9 に示す項目を満足するように，撮影範囲から要求される解像度を求めカメラおよびレンズの選定を行う．図 3.12 に示すように，撮影範囲の幅 W [mm]，高さ H_c [mm]，カメラの撮像素子面の幅 w [mm]，高さ h_c [mm]，レンズの焦点から撮影対象までの距離 D [mm] およびレンズの焦点距離 f [mm] を定義する．

また，カメラ撮像素子の幅方向と高さ方向の画素数を x_v, y_v [pixel] とすると，撮影画像の解像度 $Reso$ [mm/pixel] は次式で求められる．

$$Reso = \frac{W}{x_v} = \frac{H_c}{y_v} \quad (3.10)$$

まず，カメラの選定として，表 3.9 に示す，撮影範囲の幅 $W=40$ [mm] 以上，高さ $H_c=30$ [mm] 以上に対し，解像度 $Reso=0.02$ [mm/pixel] 以下を満たすため，式(3.10)より撮像素子の画素数は $x_v=2000$ [pixel]， $y_v=1500$ [pixel] 以上が必要となる．そこで，表 3.10(a) に示す有効画素数 2464×2056 [pixel] の CMOS カメラを選定し， 2400×2040 [pixel] に設定する．

図 3.12 より，撮影範囲の幅 W ，高さ H_c ，カメラの撮像素子面の幅 w ，高さ h_c ，レンズ焦点から撮影対象までの距離 D およびレンズの焦点距離 f には次の関係式が成り立つ．

$$\left(\frac{W}{H} \right) = \frac{D}{f} \left(\frac{w}{h} \right) \quad (3.11)$$

同カメラで使用する画素数に基づき，解像度 $Reso$ と撮影範囲 W の関係を式(3.10)より破線で図 3.13 に示す．同図には，表 3.9 に示す要求項目の範囲を A で示しており，選定したカメラでは丸点間の実線で示す撮影範囲の幅 W が $40 \sim 48$ [mm] かつ， $Reso = 0.02$ [mm/pixel] 以下を満たす．なお，使用する画素数の高さとの比は $2040 / 2400 = 0.85$ ，撮影範囲の高さと幅の比は $H_c / W = 3 / 4 = 0.75$ であるから，撮影範囲の幅 W が満たされれば，高さ H_c に関しても同時に満たされる．

表 3.10 に示すカメラ撮像素子のセルサイズ 3.45 [μm]，幅と高さ方向の画素数 2400 と 2040 [pixel] より，映像素子面は，幅 $w = 8.28$ [mm]，高さ $h_c = 7.04$ [mm] となる．

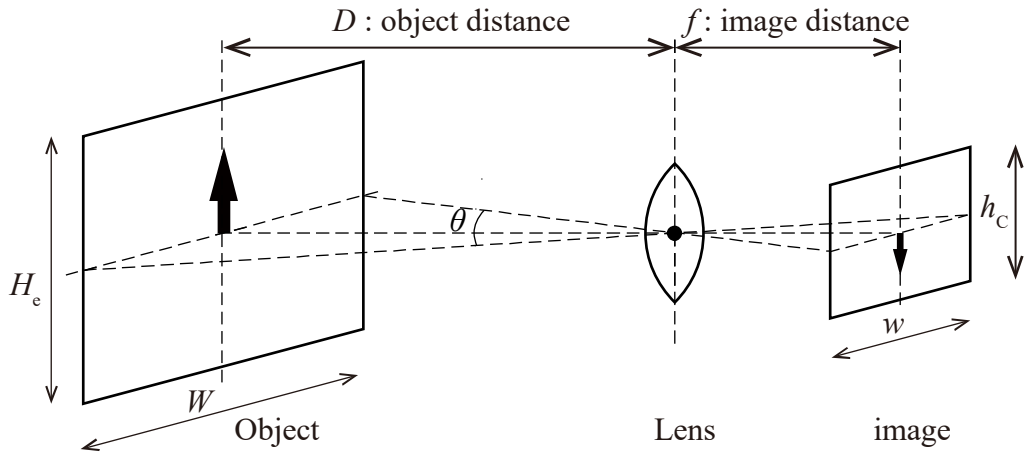


図 3.12 撮影対象とレンズおよびセンサの位置関係

表 3.10 撮影装置の詳細

(a) カメラ諸元

型式	XCL-SG510 (SONY)
映像素子	CMOS IMX250 : 2/3 型
セルサイズ [μm]	3.45 \times 3.45
有効画素数 [pixel]	2464 \times 2056
レンズマウント	C マウント
フランジバック [mm]	17.526
最大フレームレート [fps]	154
カメラ規格	Camera Link®Version2.0 準拠

(b) 設定値

画素数 [pixel]	2400 \times 2040
フレームレート F [fps]	150
被写体との設置角度	0° (平行配置)
撮影範囲 $W \times H_e$ [mm]	43.4 \times 36.9
解像度 $Reso$ [mm/pixel]	0.018
被写体距離 D [mm]	262.1

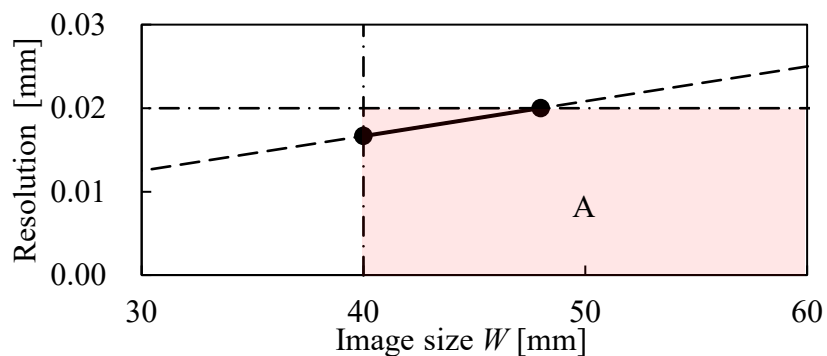


図 3.13 撮影範囲の幅 W と解像度 $Reso$ の関係

次に、レンズの選定として、表 3.11 に示す焦点距離 $f=50$ [mm] を用いた場合、撮影範囲の幅 W と焦点から撮影対象までの距離 D の関係を式(3.11)より破線で図 3.14 に示す。同図には、選定したカメラで $Reso = 0.02$ [mm/pixel] 以下かつ、撮影範囲の幅 W が 40~48[mm] を満たす範囲 B を示しており、焦点距離 $f=50$ [mm] では丸点間の実線で示す焦点から撮影対象までの距離 D が 242~290[mm] となる。したがって、焦点から撮影対象までの距離 D が 242~290[mm] の範囲になるよう、カメラおよびレンズを設置する。

カメラの最大フレームレートは 154[fps] となっており、任意のタイミングで外部トリガにより撮影が可能となっている。図 3.2 に示す記録装置から、1 [MHz] クロックを基準としたトリガが出力され、各種センサの測定記録と同期した撮影ができる。トリガレイテンシーは約 0.2 [μ s] となっており、フレームレートに対し十分小さな値となっている。これにより、機械の動作と同期した試料の状態を記録することができる。また、フレームレート F を 150 [fps] と設定した場合は 6.667 [ms] 毎に記録され 150 枚の撮影時間は 1.00005 [s] となり同期を優先して記録する。

上述の条件を満たすように試験装置に設ける撮影機器の配置を図 3.15 に、カメラの設定値と撮影条件を表 3.10(b) に示す。これにより、ガイド 1 とガイド 2 を含む、搬送した試料の停止位置を中心に撮影範囲とし撮影画像の例を図 3.16 に示す。また、試料の搬送方向と撮影画像の X 軸方向を平行に配しているが、組立上の幾何学的な誤差については、固定されたガイド 1 を基準として搬送方向を定義する。

表 3.11 レンズの諸元

型式	M23FM50 (TAMRON)
F 値(絞り範囲) N	2.8~32
フォーカス範囲 [mm]	0.15~ ∞
焦点距離 f [mm]	50

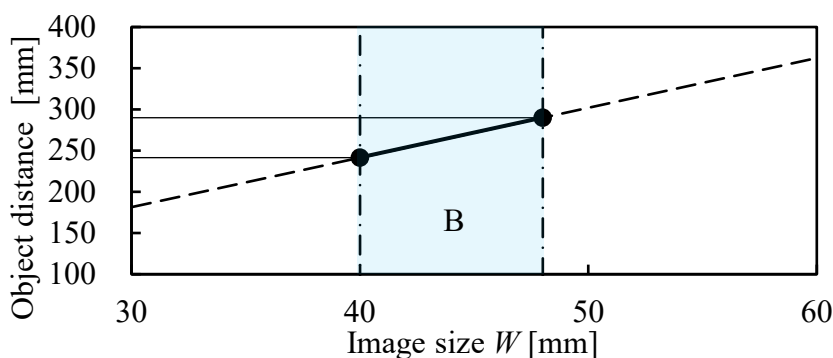


図 3.14 撮影範囲の幅 W と焦点から撮影対象までの距離 D の関係

撮影は試験装置の制御コントローラで定めた記録タイミングにより開始され、記録時間は変形前後を考慮して 2 秒程度を想定する。この際に、撮影画像は、設定される画素数により 1 枚の保存容量が決定される。設定画素数を 2400×2040 [pixel] とした撮影画像は約 4.7[MB] となる。このため、1 回の試験において 150 [fps] で 2 秒間の撮影をする場

合は、1.4[GB]の容量が必要となり、撮影画像の記録媒体は試験回数を考慮して十分な容量を準備する必要がある。

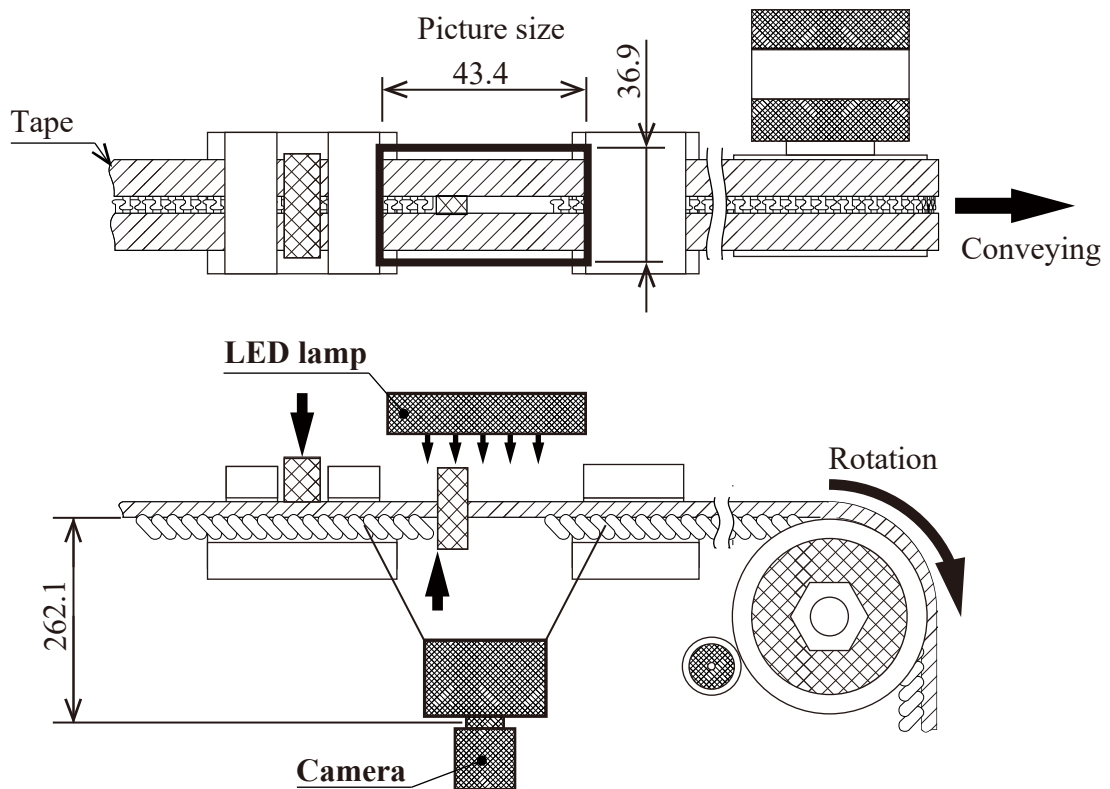


図 3.15 撮影機器の配置 (単位: mm)

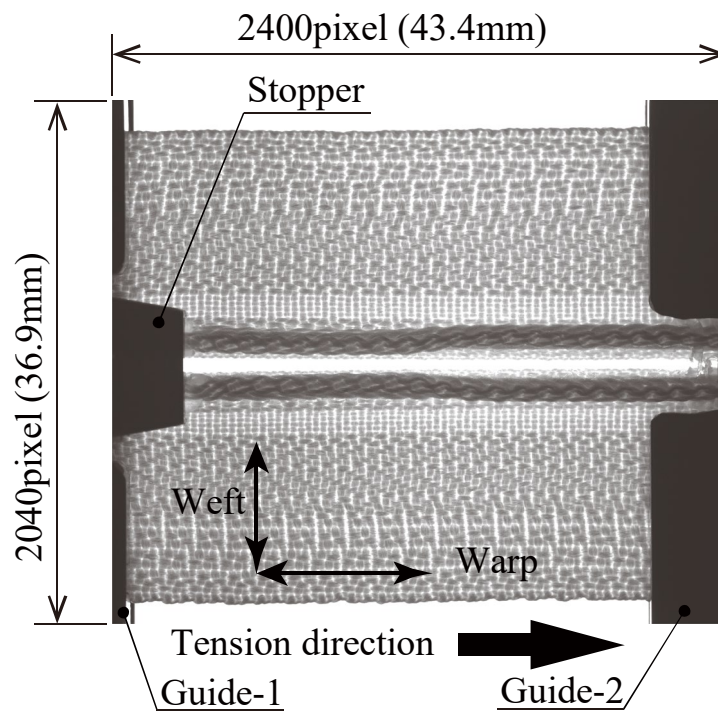


図 3.16 撮影画像

3.4.2 光学系の諸元

試験装置で位置決めされる試料の変形状態を測定するため、撮影画像中の変位を測定する精度が重要となる。試料となるファスナにはテープ部とエレメント部で高さ方向に違いがあり、被写界深度を考慮して試料を鮮明に撮影画像としてカメラの素子に結像させる必要がある。

被写界深度 d は、次式により求められる。

$$d = \frac{\delta ND^2}{f^2 + \delta ND} + \frac{\delta ND^2}{f^2 - \delta ND} \quad (3.12)$$

ここで、 N は F 値で、 δ は許容錯乱円径である。許容錯乱円径が映像素子のセルサイズより小さい場合、ピントが合う状態になる。式(3.12)より、被写体距離 D 、焦点距離 f および画像センサのセルサイズおよび許容錯乱円径が一定であれば、被写界深度 d は F 値に依存することになる。F 値を大きくする、すなわちレンズを絞ることで被写界深度を大きくすることができると同時に、画像が暗くなる。

また、エアリーディスクとよばれるレンズの光学的な結像限界がある。エアリーディスクとは光の回折現象により生じ、中央部に明るい領域、その周囲に暗い同心円状の回折パターンであり、照明の波長 λ と F 値により決まる円形開口直径に影響される。エアリーディスク径 D_{Airy} と F 値の関係は、次式で近似される^(38,39)。

$$D_{Airy} = 2.4\lambda N \quad (3.12)$$

すなわち、照明の波長 λ 、F 値とエアリーディスク径 D_{Airy} は比例する。エアリーディスクは光が焦点を結ぶ場所での最小スポット径に相当する。そのため、エアリーディスク径を画像素子のセルサイズより小さくすることで、カメラの性能を 100% 発揮できる。

本研究では LED 照明に、周囲の可視光の影響を受けにくく、かつ織組織が明瞭に映る赤外光 (LDL-60X60IR2-850 : CCS) を用いる。同 LED 照明のピーク発光波長は 850 [nm] である。表 3.11 に示すレンズの最小の F 値は 2.8 であり、エアリーディスク径 D_{Airy} は 5.81[μm]となり、画素ピッチの 3.45[μm]より大きくなる。したがって、エアリーディスク径 D_{Airy} を許容錯乱円径 δ として用いる。

本論文で用いる撮影機器を対象として、被写界深度と F 値の関係を図 3.17 に示す。搬送中のファスナの高さ方向変形を考慮すると、被写界深度は 3[mm]以上必要となる。焦点から撮影対象までの距離 $D=262.1[\text{mm}]$ および F 値 $N=5.13$ 以上のとき、被写界深度は $d=3.0[\text{mm}]$ 以上となり、エレメント部とテープ部を同時に鮮明に撮像することが可能である。

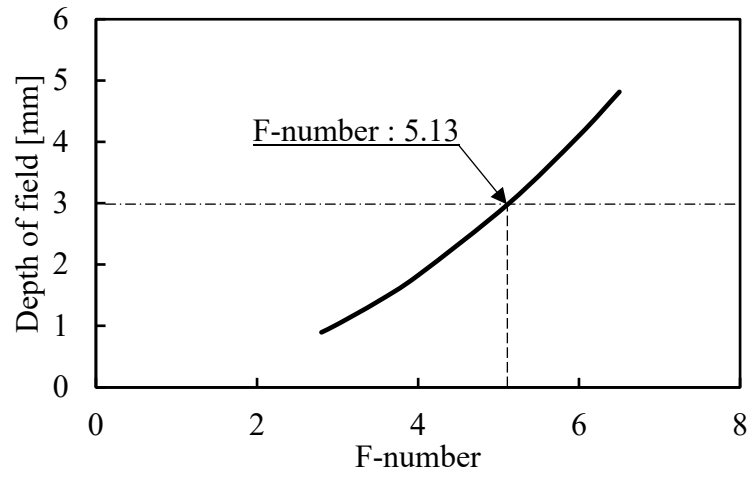


図 3.17 被写界深度と F 値の関係

3.4.3 撮影条件

撮影条件を決めるためには、試料が搬送され位置決め停止する試料の移動速度を考慮する必要がある。カメラ素子1つに対する被写体の距離を超えて、撮影対象が動くと被写体ぶれが起こり、不明瞭な撮影画像となる。また、シャッタ速度を速くする、すなわち露光時間を短くすると画像が暗くなるため、適切な輝度が得られる露光時間を設定する必要がある。したがって、画像にぶれが発生しない最長となる露光時間を求め、それ以下の露光時間で適切な輝度値に設定する必要がある。

試料の移動速度を V として、次式により露光時間 T_{EXP} を算出する。

$$T_{EXP} = \frac{Reso}{V} \quad (3.13)$$

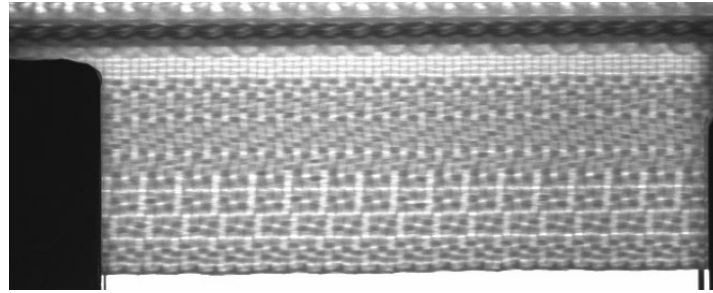
ここで、試料の移動速度 V は、駆動軸の減速比 g 、モータ回転数 N_m [rpm] とフィードローラ半径 r_f から、次式で表される。

$$V = \frac{2\pi r_f N_m}{60g} \quad (3.14)$$

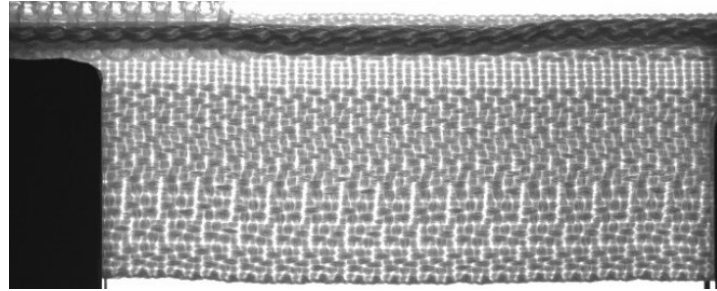
図 3.3 に示す装置の諸元において、モータ回転数とシャッタ速度の関係を式(3.14)により算出した結果を、表 3.12 に示す。停止する直前の試料の移動速度は、モータ回転数が 200[rpm]程度に低下するため、表 3.12 より露光時間を 190 [μ s]に設定し、撮影した画像を図 3.18 に示す。図 3.18(a)は、モータ回転数 900[rpm]で搬送中に撮影した撮影画像であり、画像ぶれが生じていることが観察できる。図 3.18(b)では、移動中ではあるが画像ぶれは生じておらず、図 3.16 に示す位置決め停止した際と同様に明瞭な撮影画像が確認できる。図 3.18(b)に示す画像から試料部分の輝度値を抜粋し、その範囲を図 3.19(a)に示し、ヒストグラムを図 3.19(b)に示す。図 3.19(b)のヒストグラムから、試料画像の輝度値は中央付近に分布しており、暗すぎず、明るすぎない最適な状態で撮影出来ていることが確認できる。これにより、搬送による移動を含む場合もぶれがなく明瞭かつ、画像の明るさも最適な撮影ができることを確認した。

表 3.12 モータ回転数とシャッタ速度

モータ回転数 N_m [rpm]	100	150	200	900
試料の移動速度 V [mm/s]	46.5	70.0	93.0	419
露光時間 T_{EXP} [μ s]	387	258	193	43

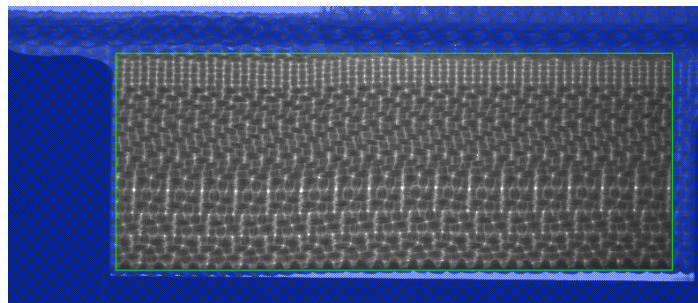


(a)搬送中の撮影画像

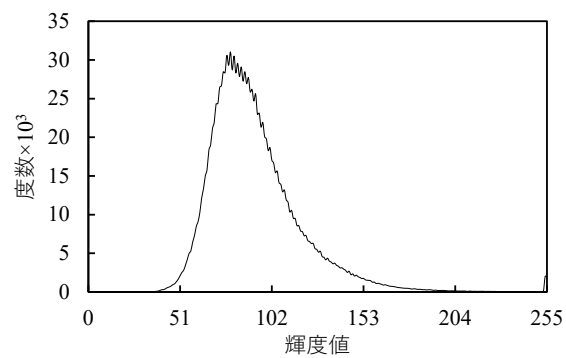


(b)位置決め停止直前の撮影画像

図 3.18 搬送による移動中の撮影画像



(a)分析用の撮影画像と抜粋する輝度値の範囲



(b)試料画像の輝度値ヒストグラム

図 3.19 位置決め停止直前の撮影画像のヒストグラム

3.4.4 撮影画像の測定精度

撮影画像の変位測定の精度を確認するため、接触式の変位センサを用いて撮影画像による測定結果と比較評価を行う。精度確認に用いた接触式センサと、基準となる金属製治具の配置を図 3.20 に示す。試料を貼付した治具を搬送方向に移動させ、治具の変位を接触式変位センサにより測定し、同時に画像を撮影する。測定は、ガイド 2 右端に設けたストッパと治具右端の間にブロックゲージを挟み、左側に固定した接触式変位センサの接触子と治具の左端が接する状態とする。ここで、ブロックゲージを 1[mm] まで 1[mm] 間隔で変更することで、ガイドと治具の相対位置を変更する。これにより、試料となる織物に外力を与えることなく変位させる。

まず、カメラキャリブレーションで用いる、格子状のプレートをスライド治具に貼付して測定を行った。図 3.21 に、ブロックゲージ 1[mm] と 11[mm] を挟んだ際の撮影画像を示し、変位測定の結果を図 3.22 に示す。次に、試料としてファスナチェーンを貼付したスライド治具を用いて測定を行った。格子状のプレートで試験した際と同様に図 3.23 にブロックゲージ 1[mm] と 11[mm] を挟んだ際の撮影画像を示し、変位測定の結果を図 3.24 に示す。この際に、変位測定には第 2 章で示した DIC 法を用いた。

図 3.23 および図 3.24 の左軸には変位センサによる変位と撮影画像による変位の差を丸点で示し、右軸には撮影画像による変位を棒グラフで示す。同図から、測定値の差は $\pm 0.01[\text{mm}]$ に収まっており、撮影画像による DIC 法を用いて、織物の交錯点間隔を測定する分解能を十分に持つことを確認した。

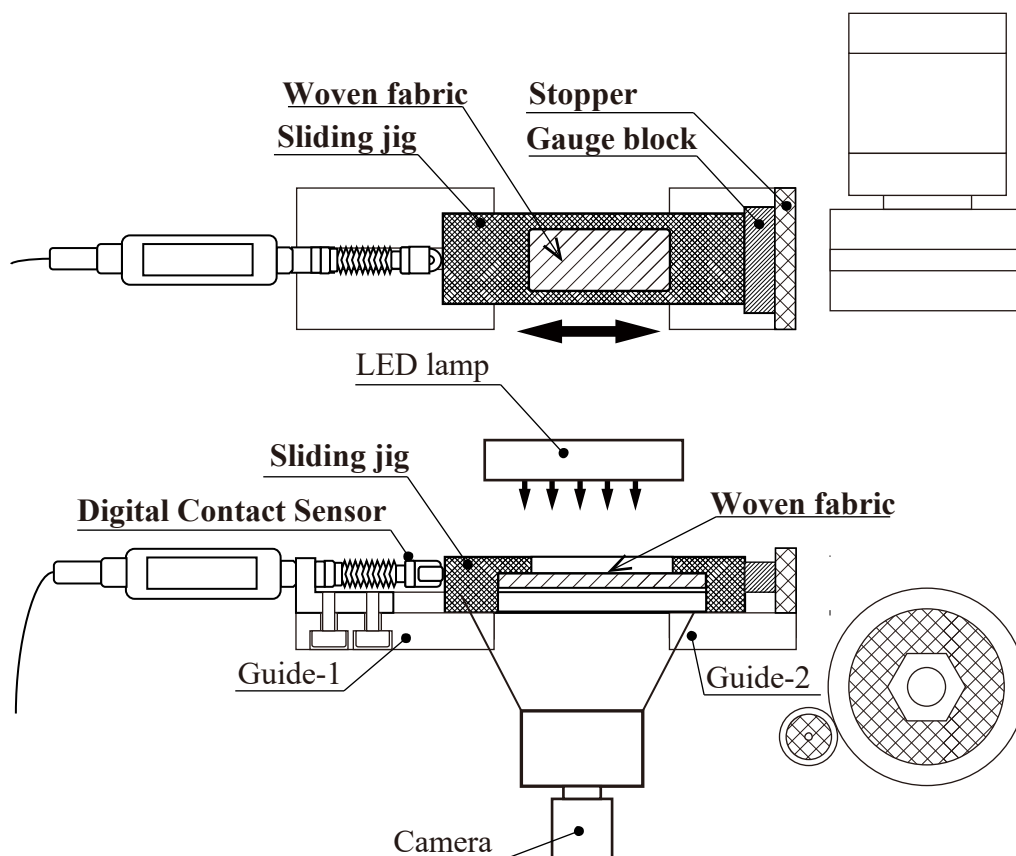
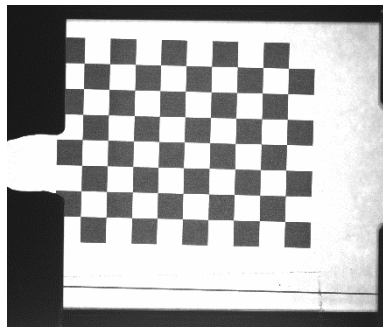
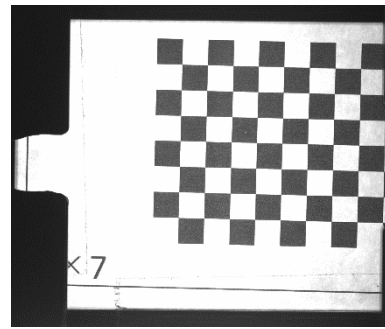


図 3.20 測定精度の確認



(a)ブロックゲージ 1[mm]



(b)ブロックゲージ 11[mm]

図 3.21 格子状プレートの撮影画像

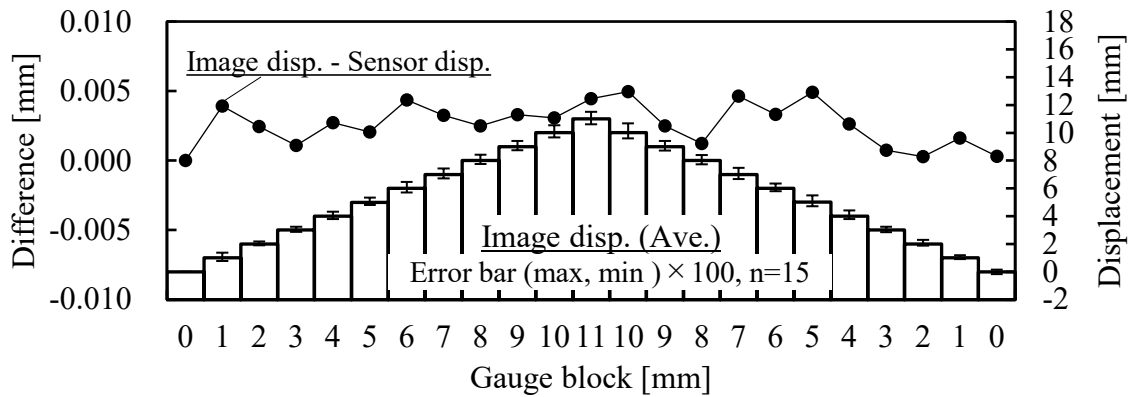
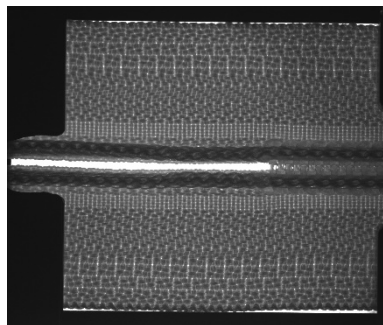
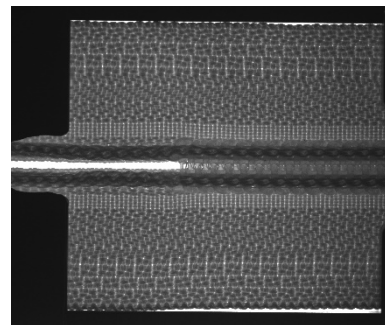


図 3.22 格子状プレート撮影画像と接触式変位センサによる測定結果の比較



(a)ブロックゲージ 1[mm]



(b)ブロックゲージ 11[mm]

図 3.23 ファスナチェーンの撮影画像

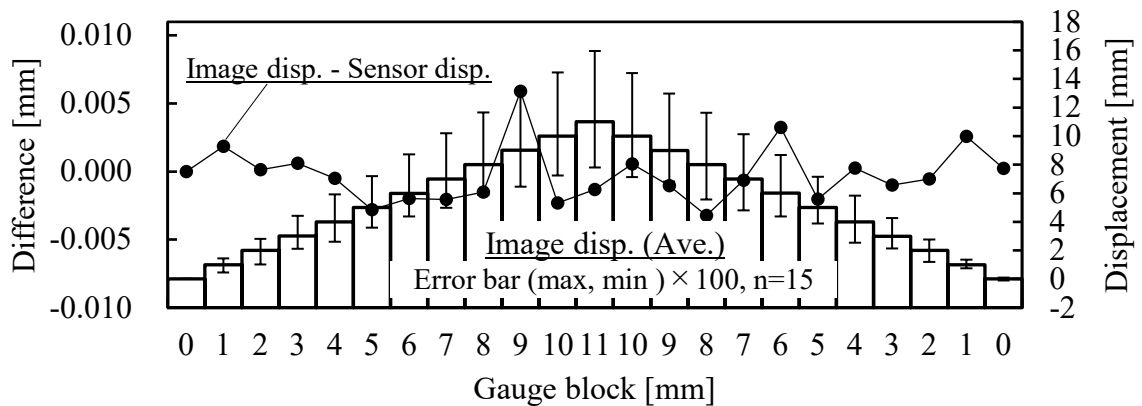


図 3.24 ファスナ 撮影画像と接触式変位センサによる測定結果の比較

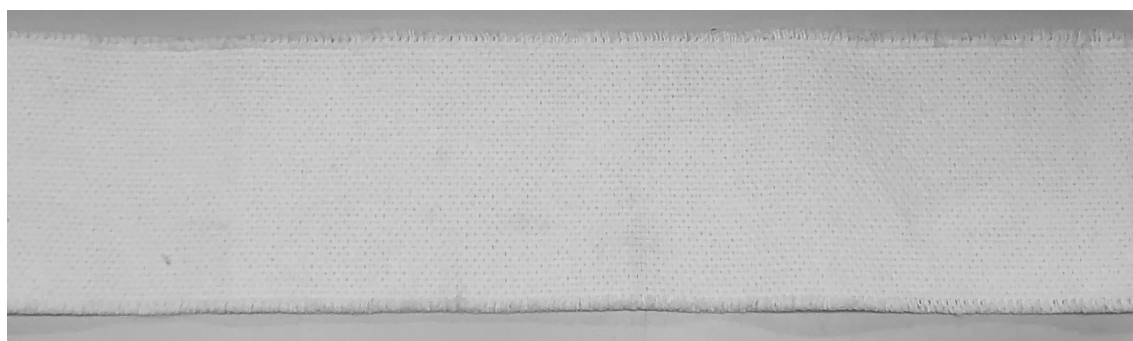
3.5 評価試料

3.5.1 平織物

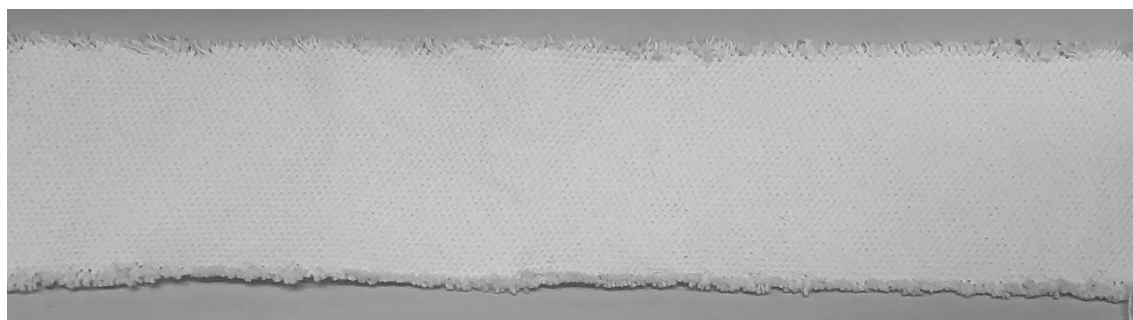
本論文では、代表的な織物である平織の織組織で構成される帯状の織物を試料とし、たて糸密度 1.40 [1/mm]、よこ糸密度 0.947 [1/mm]の平織布を 50×350 [mm]の帯状に裁断して用いた。このとき、図 3.25(a)に示す引張方向とよこ糸がほぼ平行に裁断した試料（以降 Sample-1 と称す）と、図 3.25(b)に示す引張方向に対してよこ糸が 45 [°] 程度に裁断した試料（以降 Sample-2 と称す）を供した。

各々の試料を、試験装置に計装した撮影システムによる撮影画像を図 3.26 に示す。たて糸、よこ糸を明瞭に観察でき、適切な撮影条件を設定できている。

撮影画像には試料となる織物だけでなく、変位測定の基準となるガイド 1, 2 の端部が左右に写り、搬送方向となる X 方向の基準とする。また、ガイドは画像の縦方向の中心付近が欠けており、この欠け部分は搬送方向に直交する Y 方向の基準とする。撮影画像に写るガイド 1, 2 を基準として撮影画像に写る試料の変位測定を行うことで、機械の振動が伝播し生ずるカメラの微小振動による撮影画像中における試料の変位をキャンセルすることができる。

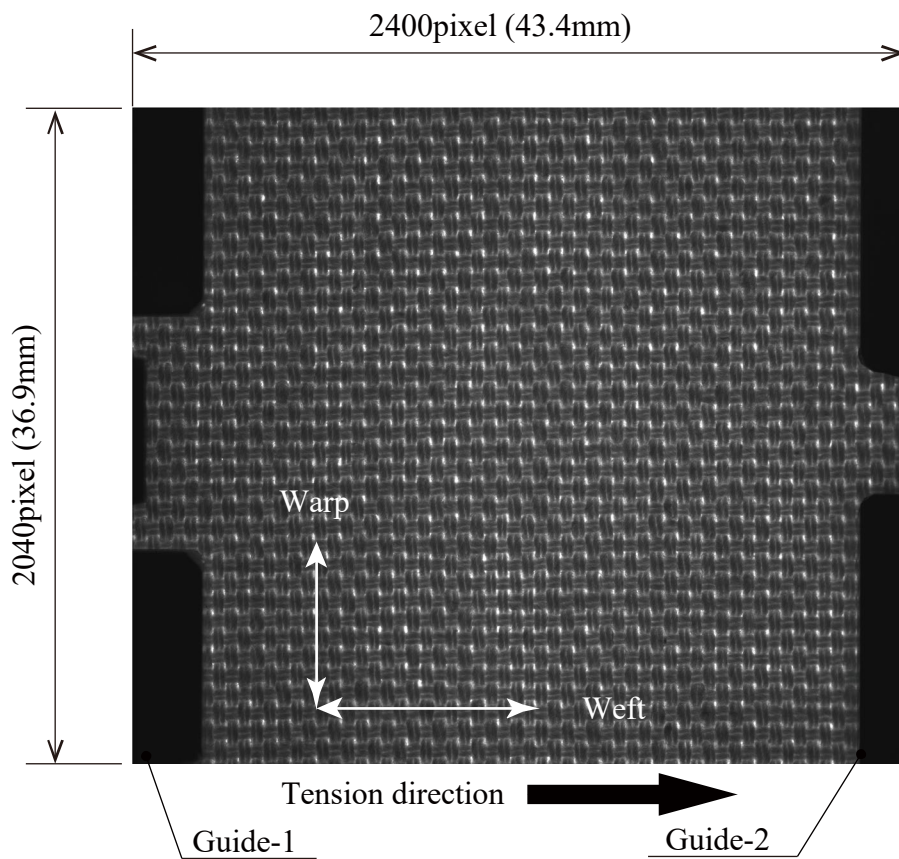


(a) Sample-1 (Parallel arrangement)

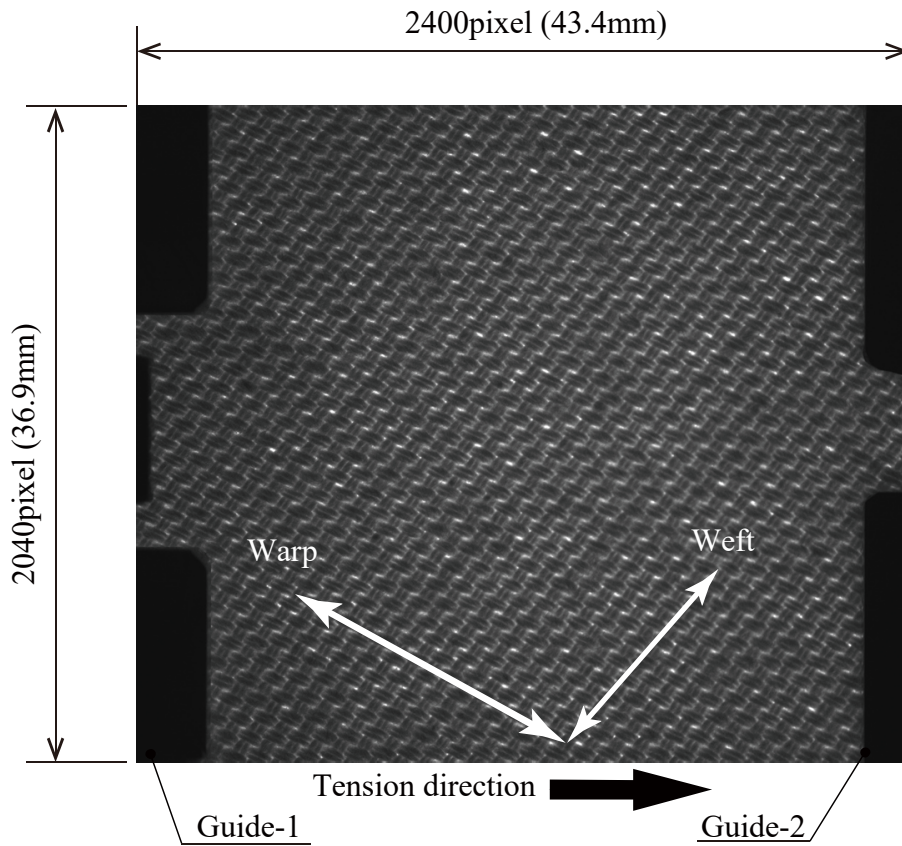


(b) Sample-2 (Diagonal arrangement)

図 3.25 平織物の評価試料



(a) Sample-1 (Parallel arrangement)



(b) Sample-2 (Diagonal arrangement)

図 3.26 平織物の撮影画像

3.5.2 ファスナ

織物は用途や見栄えに応じて様々な意匠があり、複雑な織組織で構成されるものがある。複雑な織組織を持つ帯状織物の代表例として、ファスナチェーンを用いる。このとき、図 3.27 に示す引張方向とたて糸がほぼ平行に配置したファスナチェーン（以降 Sample-3 と称す）を供した。

Sample-1, 2 と同様に、試験装置に計装した撮影システムによる撮影画像を図 3.28 に示す。ここで、Sample-1, 2 と同様の撮影条件を用いると、撮影画像からたて糸、よこ糸を明瞭に観察でき、たて糸密度 1.85 [1/mm]、よこ糸密度 3.23 [1/mm]とわかり、同一な撮影条件で分析可能な画像の撮影ができています。

図 3.1 で示すように Sample-3 の固定にはストッパを用いており、撮影画像にもストッパが写る。Sample-1, 2 と同様にガイド 1, 2 の基準に加え、ストッパ位置との相対変位を測定することも可能となる。このように、撮影画像による変位測定では構造体を画像内に写すことで、基準となる位置を可変できる。本論文で扱う Sample1~3 については、ガイド 1, 2 を基準とした測定を行う。

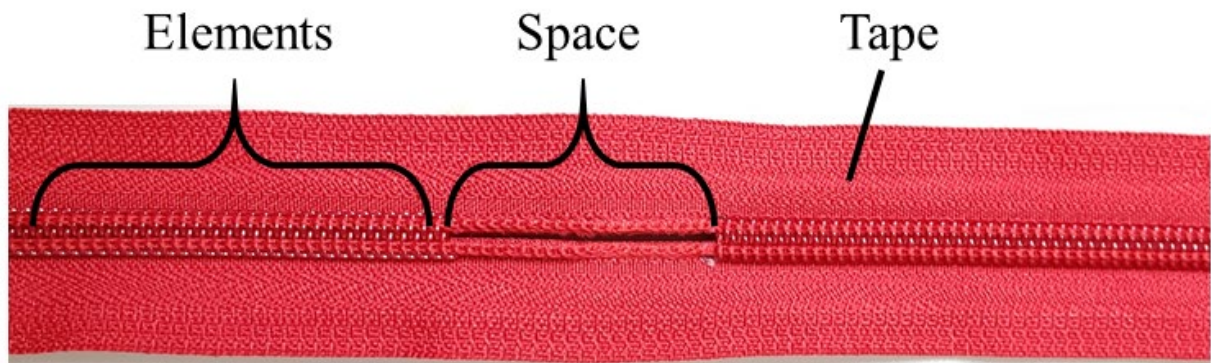
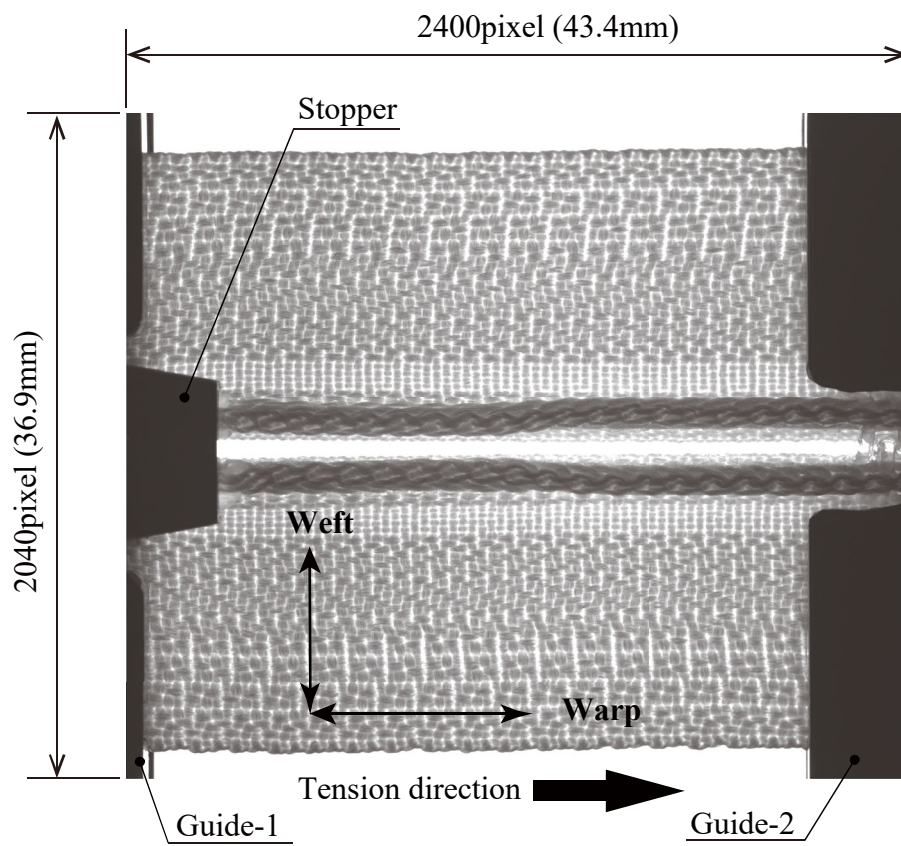


図 3.27 複雑な織組織をもつ評価試料 Sample-3 (ファスナチェーン)



Sample-3 (Fastener chine)

図 3.28 ファスナチェーンの撮影画像

3.6 試験条件

帯状織物を搬送し位置決め停止した際に、織物の変形を測定する手法の検証を行う試験条件について述べる。搬送位置決めされた帯状織物が停止した際に生じる変形挙動を模擬するため、試料となる帯状織物の一端を固定しフィードローラによる引張り荷重と織物の変形を測定する試験を行う。

3.6.1 平織物(Sample1,2)の把持機構と動作

帯状に裁断した平織物を試料として用いる場合には、図 3.29 に示す試験装置の左側にあるガイド1に設けたクランプを用いて試料を把持する。先端が樹脂製となっているクランプにより試料の幅方向を把持し滑りが発生しにくい構造となっている。次に、モータを動作しフィードローラが試料を引張ることで張力が生じ、クラッチ機構により一定の張力で引張り荷重を負荷する。この時、機械動作の測定と同時に試料の撮影を行う。すなわち、試料はガイドとクランプに押し付けられた摩擦力で固定された状態から、モータ回転とクラッチ機構による引張り荷重を負荷され、この時に生じるフィードローラのトルク、回転量を各センサで測定し、同期して試料の変形を撮影する。

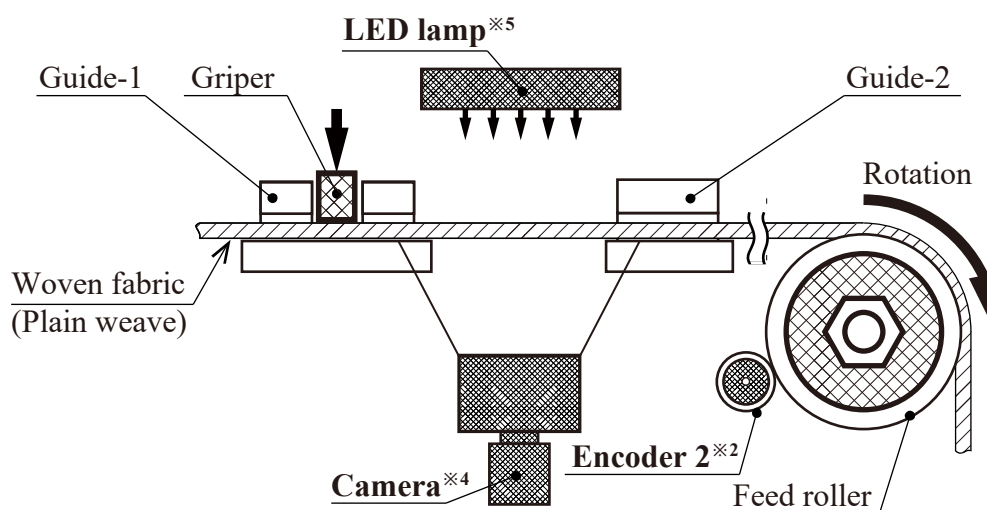


図 3.29 クランプによる試料の把持

3.6.2 ファスナ(Sample3)の把持機構と動作

ファスナチェーンを試料として用いる場合には、図 3.30 に示す試験装置のガイド 1 と 2 の間でガイド 1 近傍に配したストップを用いて把持する。ファスナチェーンはフィードローラによる送りで、スペース部が移動し、ストップとエレメント端部が接触することにより、固定される。この際、ストップは高剛性な機械構造で固定されるため変形は生じない。この時、機械動作の測定と同時に試料の撮影を行う。すなわち、試料は移動中にストップとの接触で固定され、クラッチ機構による引張り荷重を負荷され、この時に生じるフィードローラのトルク、回転量を各センサで測定し、同期して試料の変形を撮影する。

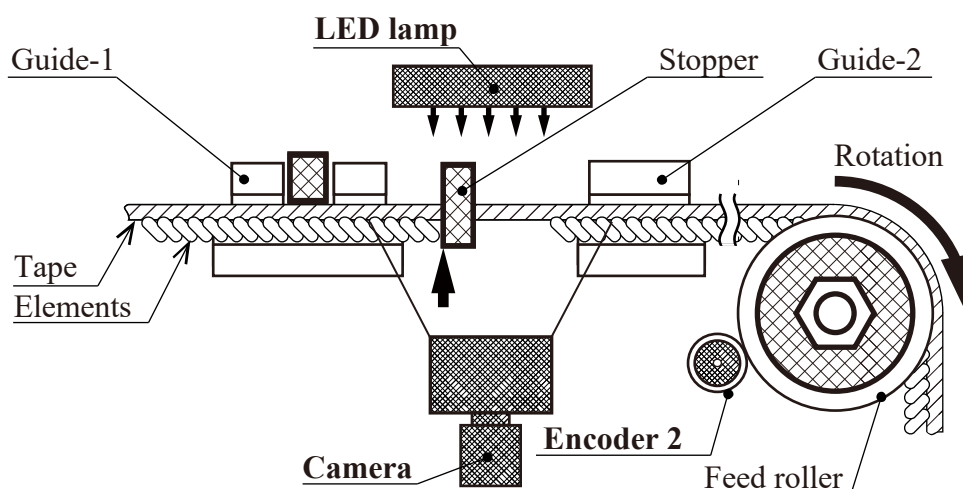


図 3.30 ストップによる試料の把持

3.6.3 搬送速度とクラッチ機構の設定

本論文での試験で用いた、試験装置のクラッチ機構と、モータの速度設定を表 3.12 に示す。Sample-1,2 の搬送速度は、100[mm/s]に設定し停止から指令する。Sample-3 の搬送速度は 150[mm/s]に設定し、ストップに接触する際は 50[mm/s]とする。クラッチ機構は、全ての試験において押付力が 193.8[MPa]となるよう設定し、生じるトルクは平均で 1.5[Nm]（変動幅 10%程度）に設定する。

表 3.12 試験装置の設定値

	Sample-1,2	Sample-3
搬送速度 V [mm/s]	100	150~50
クラッチ押付力 Q[MPa]	193.8	193.8
発生トルク [Nm]	1.5	1.5

3.7 試験装置の挙動

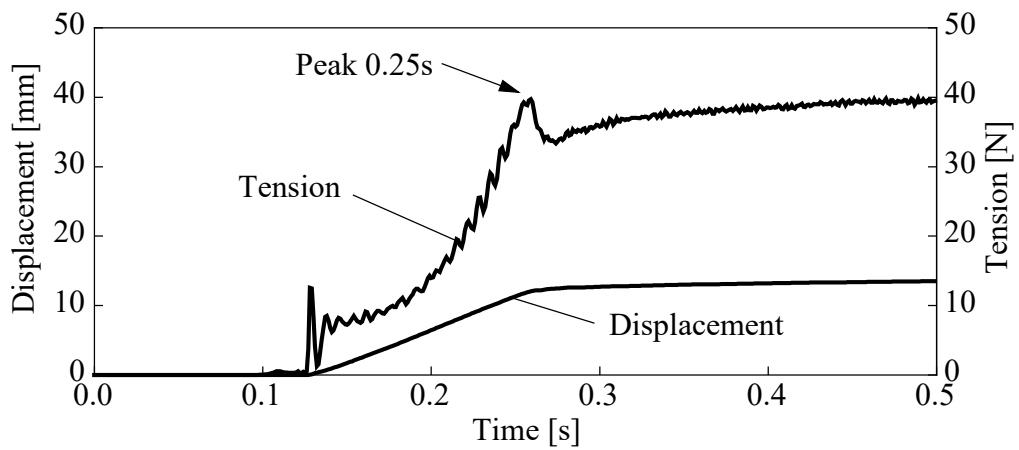
本節では、前節までに示した試験装置および試験条件により試験を行った際の機械動作による試験装置の挙動を示す。

(Sample-1, 2)

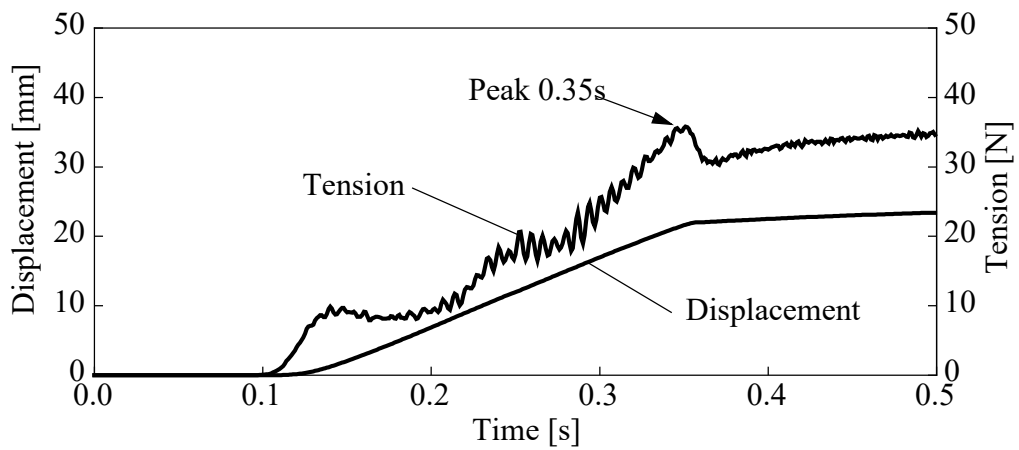
平織物の各試料は、布の織組織の初期状態は特に意識せず、引張方向と長手方向が平行になるように試験装置に配置した。前節で述べたようにフィードローラを動作させ布を巻取りトルクリミッタが動作した後となる 0.5 秒で停止させた。

試験によりフィードローラの回転量から測定した Sample-1, 2 の布右端変位および、トルクセンサで測定した張力の時間変化を図 3.31(a)および(b)にそれぞれ示す。図 3.31(a), (b)のように、Sample-1, 2 それぞれについて、測定開始後 0.1[s]から布の右端変位が時間とともに増加し、0.25 [s], 0.35 [s]でフィードローラのトルクリミッタが作動して張力がピークを示した後は、布の右端変位の増加が緩やかになっていることがわかる。

図 3.31 に示した測定データより、張力-変位線図を求め図 3.32 に示す。図 3.32 より、Sample-1 は引張方向とよこ糸の方向が一致するため、Sample-2 と比較して小さな変位で張力がピークを示していることがわかる。一方で、Sample-2 は、引張方向に対してたて糸とよこ糸が斜めに配置されているため、たて糸とよこ糸のせん断変形が支配的になり、Sample-1 よりも伸びやすいことから右端の変位が大きくなっている。また、各々の結果において振動波形が見られ、これは図 3.6 で示したクラッチ機構のトルク変動が要因となっている。



(a) Sample-1 (Parallel arrangement)



(b) Sample-2 (Diagonal arrangement)

図 3.31 平織物(Sample-1,2)のフィードローラの移動量と換算張力

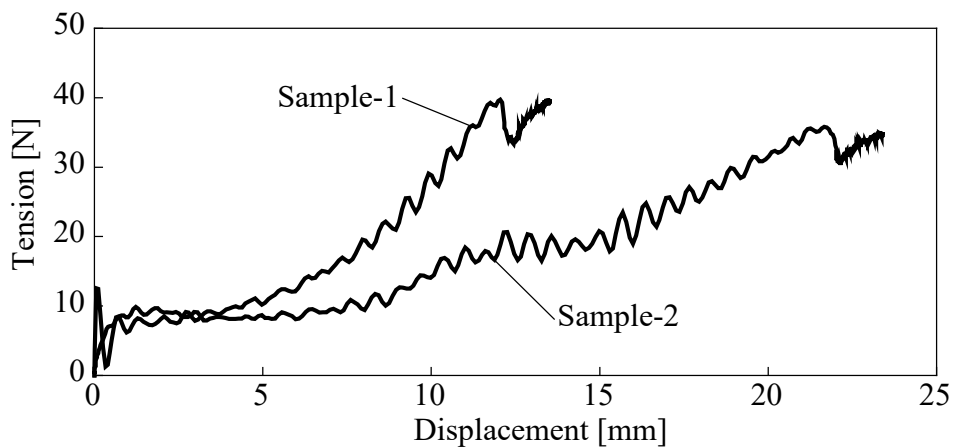


図 3.32 平織物(Sample-1,2)の張力-変位線図

(Sample-3)

ファスナチェーンはフィードローラによる送りで、スペース部が移動し、ストップとエレメント端部が接触したのち、トルクリミッタが動作した後に 0.15 秒程度でモータを停止した。

試験結果のフィードローラ回転量から測定した Sample-3 のファスナチェーン右端変位および、トルクセンサで測定した張力の時間変化を図 3.33 に示す。Sample-3 では、測定開始直後から布の右端変位が時間とともに増加し、約 0.05[s]でフィードローラトルクによる張力の上昇が確認できる。この張力上昇は、ストップとファスナチェーンのスペース端部にあるエレメントが接触したことにより生じる。すなわち、試験開始からファスナチェーンが搬送移動し、ストップによる接触で位置決め停止と同時に変形が生じ、クラッチ機構で一定トルクを負荷することで、ファスナチェーンに張力が負荷され変形が開始する。その後、0.10[s]でフィードローラの張力がピークを示しトルクリミッタが動作した後は、布の右端変位の増加が緩やかになっていることがわかる。

図 3.33 に示した測定データより、張力-変位線図を求め図 3.34 に示す。図 3.34 より、Sample-3 は平織物 Sample-1, 2 と比較して小さな変位で張力がピークを示していることがわかる。このように、機械動作の測定結果から、試料の違いによる材料特性の違いを判断できる。

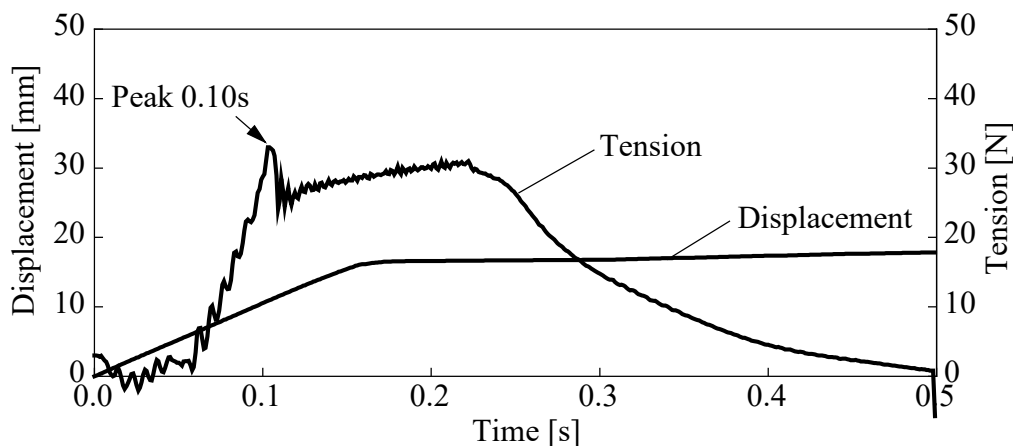


図 3.33 ファスナチェーン(Sample-3)のフィードローラの移動量と換算張力

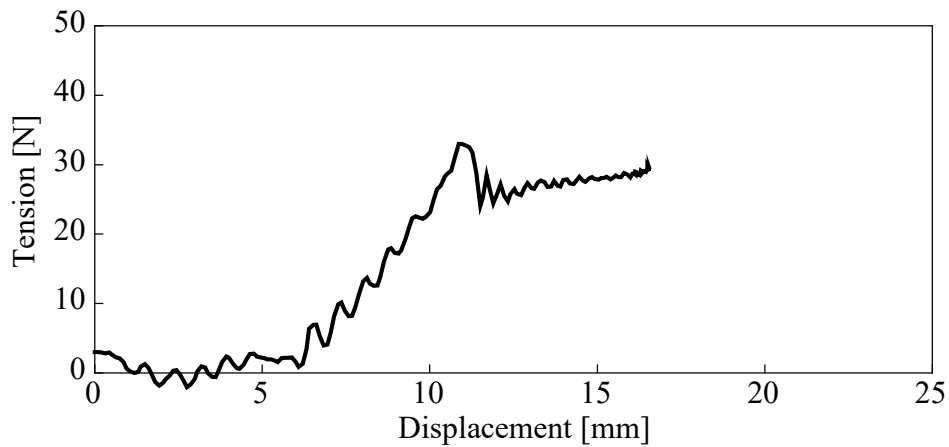


図 3.34 ファスナチェーン(Sample-3)の張力-変位線図

3.8 結言

本章では、織物を搬送する試験装置と、試料となる織物を撮影する撮像装置について述べた。試験装置については、試料を搬送するフィードローラ機構とその回転量の測定系を説明し、試料に一定の張力を負荷するクラッチ機構とトルクから張力を測定する測定系について説明した。試料の変形を機械動作と同期して撮影する計装システムと、撮影画像による測定精度について示した。また、試験装置により試料を変形させた際の機械動作を測定し、この測定結果から試料に生じる張力と平均化された変形を算出することで試料の挙動を示した。

次章では、第2章の2.2節で示したテンプレートマッチングを用いて撮影画像から交錯点を検出する方法により、Sample1~3の交錯点検出について述べる。

第4章 テンプレートマッチング法を用いた交錯点検出

4.1 緒言

本章では、試験装置により搬送位置決めした織物を撮影した画像を用いて、第2章に示した本論文で提案する交錯点の検出方法の詳細について示す。また、同一の画像に対して交錯点近傍をテンプレートとする場合と完全組織をテンプレートとする場合の結果を示し、それぞれの手法の測定精度を比較することで、両手法の有効性を示す。

まず、第3章に示した試験装置および条件により撮影した Sample-1 から3の試料を撮影した画像の特徴を示す。次に、一般的なテンプレートマッチングを概説し、本論文で用いるテンプレートマッチング手法について説明する。続いて、それぞれの試料に対するテンプレート画像を示し、そのマッチング結果を XY 座標にプロットして示す。それぞれのテンプレート画像により検出したプロットに対応する2点の座標から2点間距離を位置の差として、統計的に比較した結果を示す。これにより、本論文で用いたテンプレートマッチング手法とテンプレート画像の違いによる測定精度を考察し有用性を示す。

4.2 撮影画像

織物の交錯点を探索する対象画像は、織物の挙動を逐次撮影したいずれか1枚で良い。また、あらかじめテンプレートとなる画像を用意する。

本論文では、織物を位置決めした際の動的な変形を連続で撮影した1枚目を探索対象の画像とする。平織物を試料とした Sample-1, 2を撮影した画像を図4.1および図4.2に示し、ファスナチェーンを試料とした Sample-3を撮影した画像を図4.3に示す。

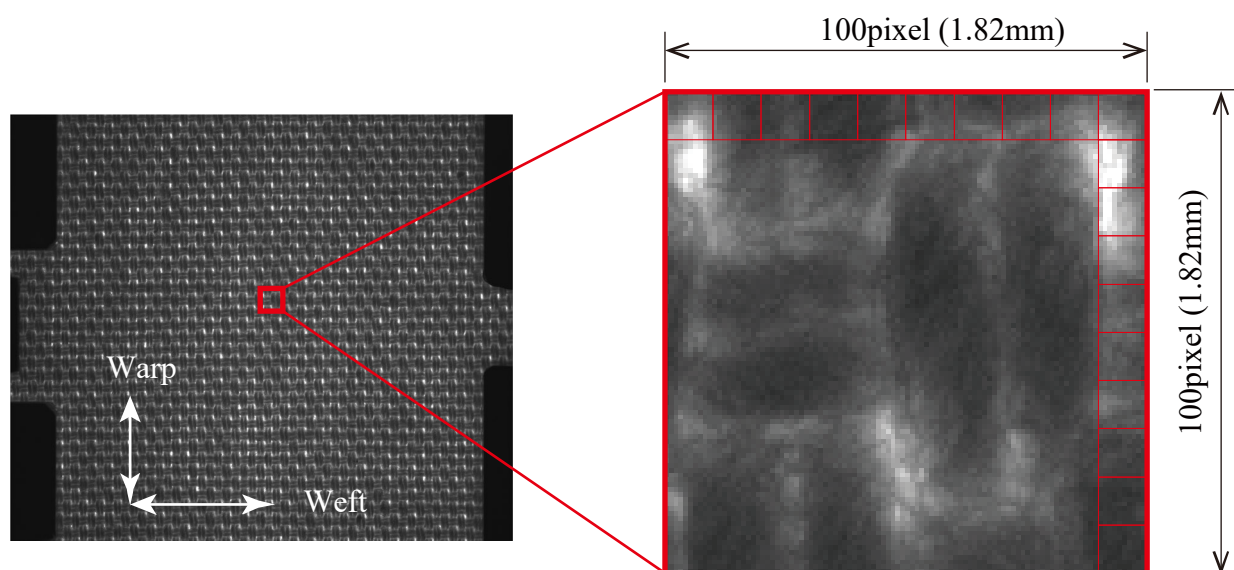


図4.1 Sample-1の撮影画像と織組織の拡大図

図 4.1～4.3 に示す画像から、織物を構成するたて糸とよこ糸が観察できる。図 4.1 に示す Sample-1 の拡大画像では、たて糸とよこ糸それぞれ 1 つの交錯点が確認でき、たて糸が浮く形状に対して、よこ糸が浮く形状は小さいことがわかる。また、この平織物はダブルツイスト糸で織られた平織の試料となっており、画像上では糸の中心軸が白くなっている。図 4.2 に示す Sample-2 の拡大画像は、図 4.1 と同様の傾向が回転して見える画像となっている。どちらの画像においても、交錯点間の距離を測定するために十分な分解能を有していることがわかる。図 4.3 に示す Sample-3 のファスナチェーンのテープ部においても、拡大画像から織組織を観察することができ、この画像においても織物を分析するために必要となる交錯点間の距離を十分に測定できる分解能を有することが確認できる。

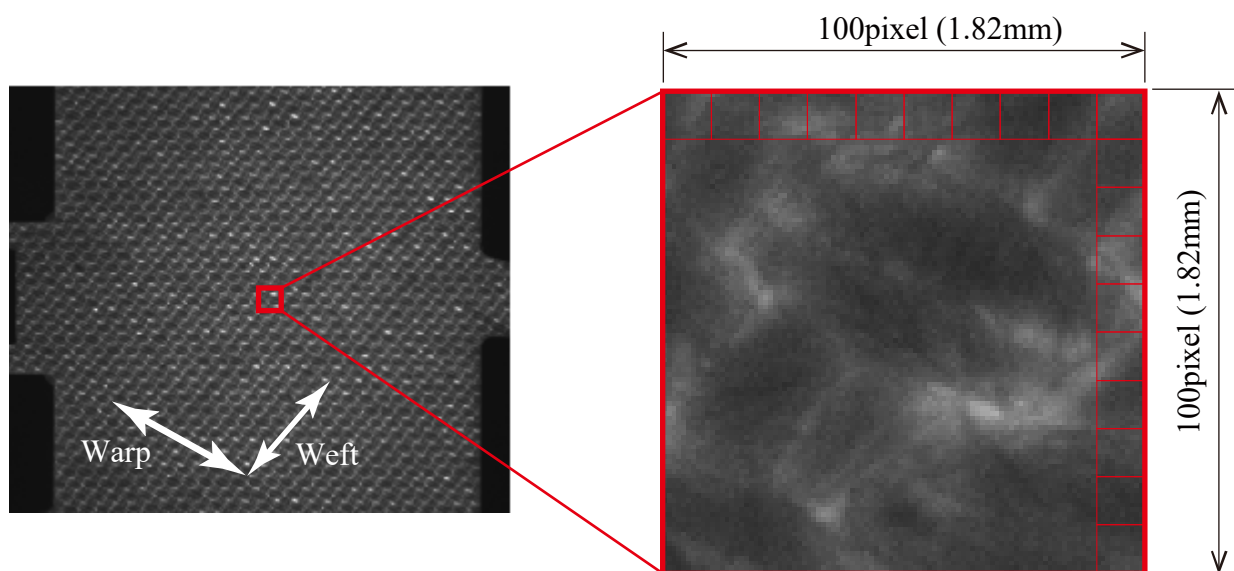


図 4.2 Sample-2 の撮影画像と織組織の拡大図

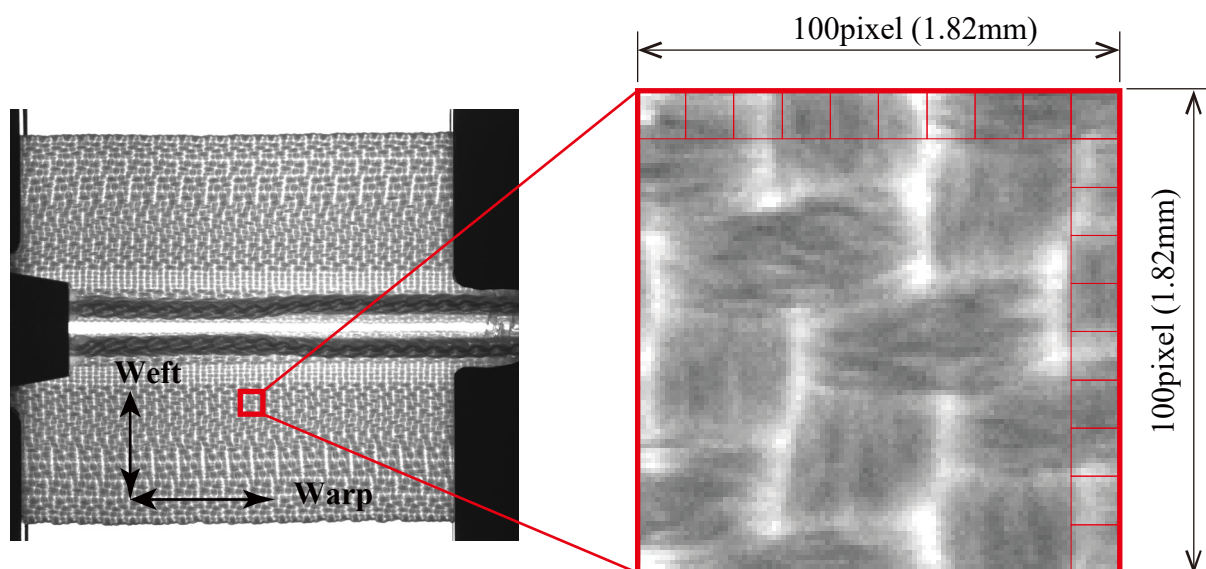


図 4.3 Sample-3 の撮影画像と織組織の拡大図

4.3 テンプレートマッチング法

テンプレートマッチング法は，探索対象となる画像に対し，対象物をあらかじめ撮影したテンプレート画像との類似度あるいは相違度を算出することで対象物の位置検出を行う．広く用いられる算出方法として，類似度は2つの画像領域が似ているほど類似度が1に近づく正規化相互相関(Normalized Cross-Correlation, NCC)や相互相関係数(Zero-mean Normalized Cross-Correlation, ZNCC)などがあり，相違度は2つの画像が似ているほど小さな値となる差の絶対値和(Sum of Absolute Difference, SAD)，差の二乗和(Sum of Squared Difference, SAD)が用いられており，それぞれの算出式は次式である^(35,36)．

$$\gamma_{NCC}(X,Y) = \frac{\sum\{H(x,y)I(X+x,Y+y)\}}{\sqrt{\sum(H(x,y))^2} \sqrt{\sum(I(X+x,Y+y))^2}} \quad (4.1)$$

$$\gamma_{ZNCC}(X,Y) = \frac{\sum\{(H(x,y)-\bar{H})(I(X+x,Y+y)-\bar{I})\}}{\sqrt{\sum(H(x,y)-\bar{H})^2} \cdot \sqrt{\sum(I(X+x,Y+y)-\bar{I})^2}} \quad (4.2)$$

$$\gamma_{SSD}(X,Y) = \sum(H(x,y)-I(X+x,Y+y))^2 \quad (4.3)$$

$$\gamma_{SAD}(X,Y) = \sum|H(x,y)-I(X+x,Y+y)| \quad (4.4)$$

式(4.1)のNCCは，画像内における輝度値の平均値計算を含まないため，式(4.2)のZNCCに比べ計算量が少なくなる．式(4.2)のZNCCは，各画素の輝度値を輝度値の平均値を減ずることで正規化しており，平均値が異なる場合も類似度が1に近づくため，照明の光量変化などによる画像全体の輝度値変化がおきた場合も検出精度が低下しない特徴を有する．

式(4.3)のSSDは正規化項を含まないためNCCに比べ計算量が少なく，式(4.4)に示すSADは乗算を含まないため，さらに計算量が少なくなる．したがって，計算量が少ないSAD，SSD，NCC，ZNCCの順で高速化に有用となるが，探索画像にある対象物の輝度値が平均的，比例的あるいは，これらが同時に変化する場合，対象物と異なる位置を誤検出する可能性が高まる．

すなわち，計算にかかる計算時間を抑え，かつ対象物の高精度な位置検出は相反課題としてあり，高速かつ高精度に処理する手法が望まれている．本論文で提案する，交錯点をDIC法の計測点として用いた布の変形評価の有用性を確認するために，高精度であることを優先し，テンプレートマッチングには式(4.2)のZNCCを用いる．

図 4.1 に示す Sample-1 の画像に対し，完全組織を中心とするテンプレート画像により相関係数を算出した結果を図 4.4 に示し，同図の中央付近を拡大し図 4.5 に示す．図 4.4 および図 4.5 から，相関係数の極大値が多数確認でき，これらはテンプレート画像とした完全組織の中心と一致する．すなわち，テンプレートマッチングで織物の完全組織による規則性を相関係数の極大値として検出し，織組織および交錯点の位置を特定することができる．次節以降では，第 2 章で述べた 2 種類の方法により設定したテンプレート画像を用いて算出した相関係数の極大値による交錯点の検出結果を示す．

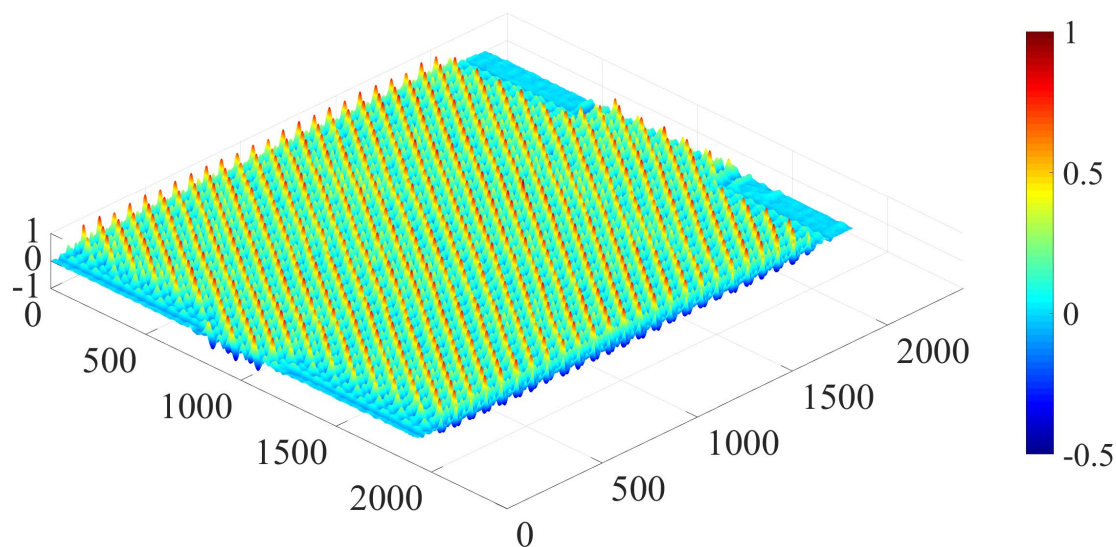


図 4.4 Sample-1 の完全組織をテンプレートとする場合の相関係数

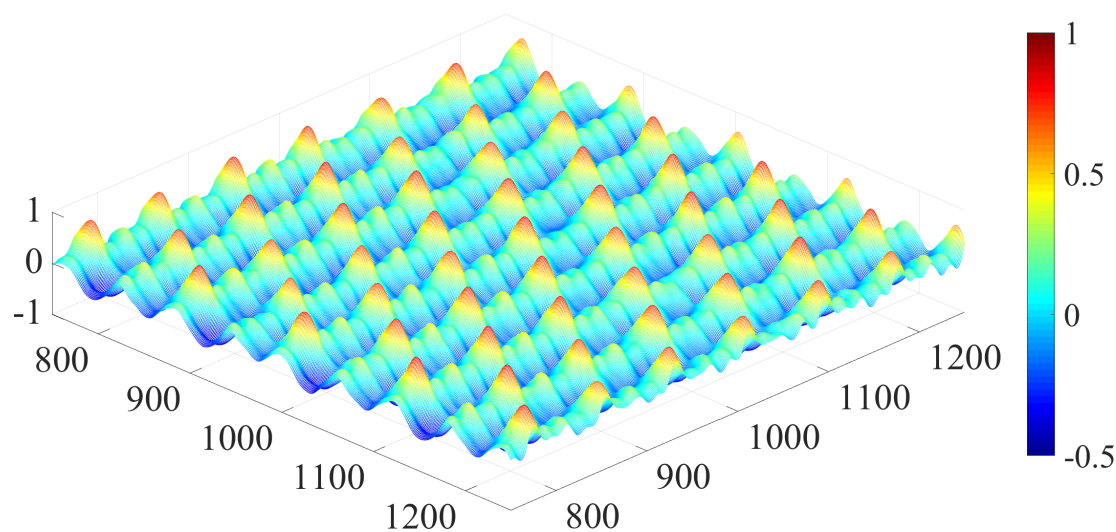


図 4.5 Sample-1 相関係数の拡大図

4.4 交錯点の検出

4.4.1 概要

織物は完全組織ごとに繰り返し織られていることから、完全組織ごとに規則性がある。この規則性を利用することで、テンプレートマッチング法により交錯点の検出を行う。

織物は完全組織で繰り返し織られるため、完全組織が写る範囲をテンプレート画像として設定することで、織物全体の交錯点を検出することができる。一方で、完全組織が多数の交錯点で構成される場合には、テンプレート画像内に設定する交錯点間の距離に対して、探索画像にある交錯点間の距離が変わることにより、交錯点の検出位置に誤差が生じる。この場合は、交錯点近傍を中心とするテンプレート画像を用いることで、完全組織内における交錯点間の距離が変わる場合も交錯点の位置を正確に検出することが可能である。したがって、評価対象とする試料の初期画像が変形しているか、また試料の完全組織の複雑差に応じてテンプレート画像を設定する必要がある。

4.4.2 テンプレート画像

(Sample-1)

平織物の Sample-1 を撮影した初期画像に対して 2.2 節で示したテンプレート画像の範囲において、交錯点を中心とする方法と、完全組織とする方法の 2 手法について図 4.6 に示す。同図において、テンプレート画像に設定するたて糸上の交錯点を黒点で、よこ糸上の交錯点を白点で示している。

テンプレート画像中に設定する検出点は、完全組織のテンプレート画像は図 2.2(a)で示すように、たて糸、よこ糸の交錯点それぞれ 2 点の合計 4 点を設定する。たて糸とよこ糸の交錯点近傍のテンプレート画像は、各交錯点上にそれぞれ 1 点の検出点を設定する。

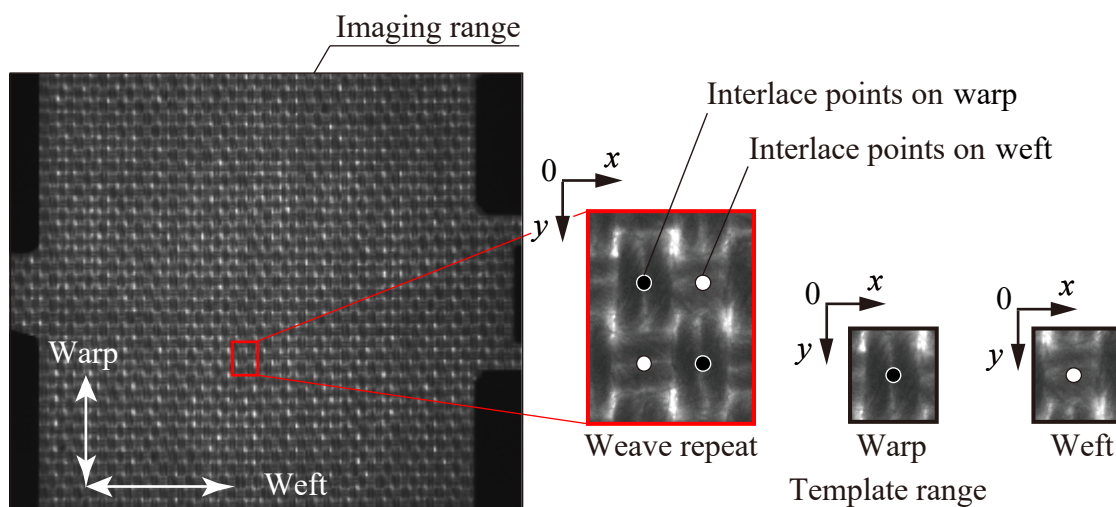
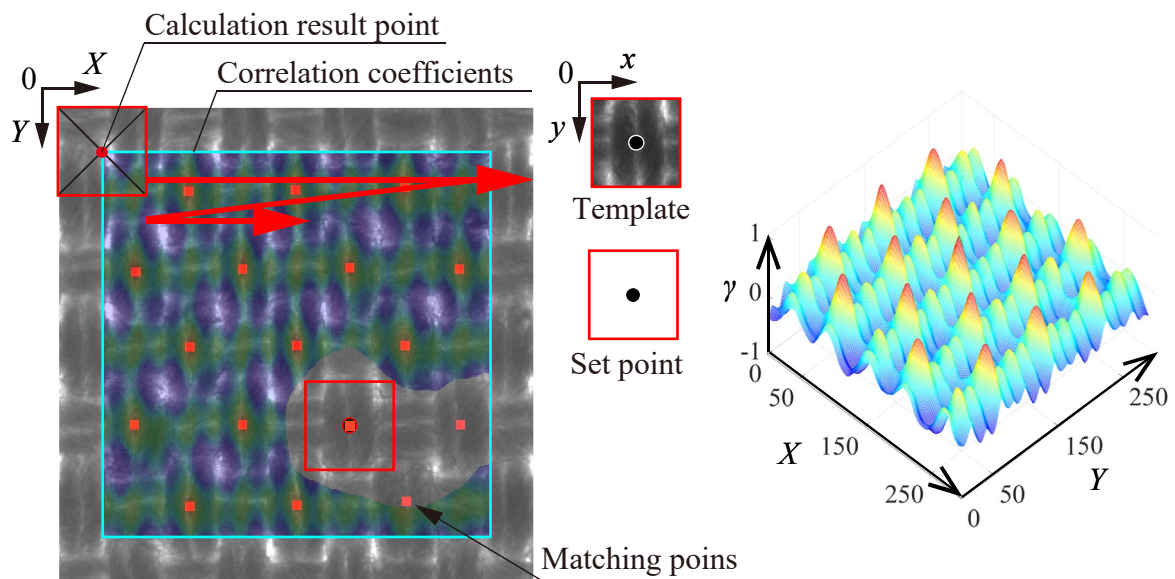


図 4.6 Sample-1 の基準画像とテンプレート画像

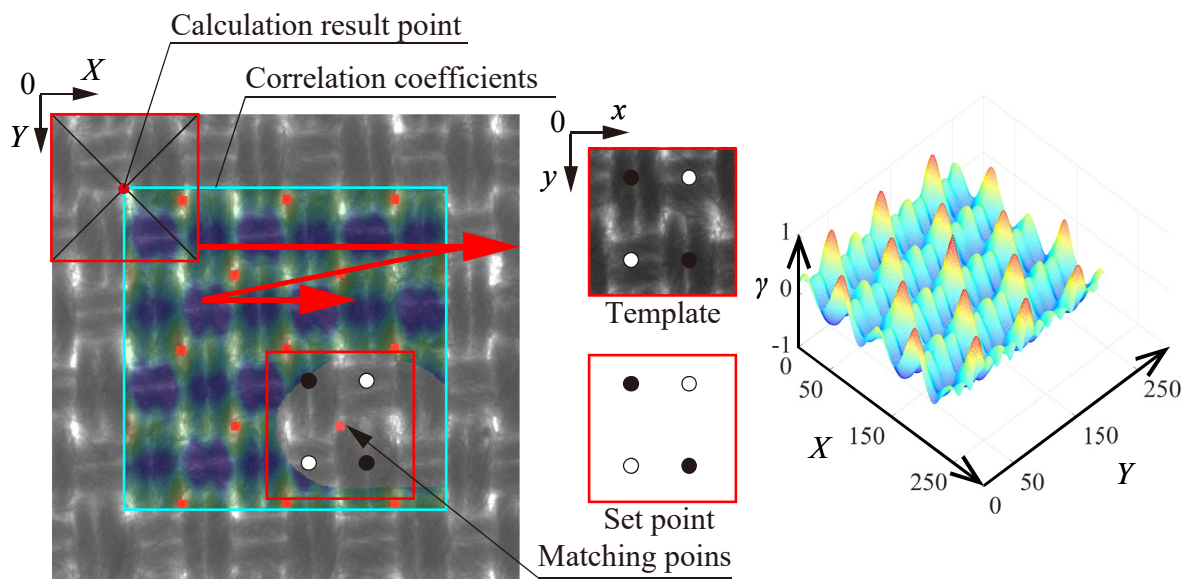
図 4.7(a)に示すように、たて糸の交錯点近傍をテンプレート画像として、赤色矢印のように走査することで初期画像との相関係数を算出する。図 4.7(b)が算出された相関係数の 3 次元マップであり、図 4.7(a)には相関係数のカラーマップを初期画像に重ねて示している。相関係数の算出値は、テンプレート画像の中心点と、探索画像の XY 座標が一致する点に出力する。このため、初期画像サイズに対してテンプレート画像の X, Y 方向それぞれテンプレート画像サイズの半分の値だけ内側になる水色枠で示した範囲で相関係数が算出される。たて糸、よこ糸それぞれ 1 点の交錯点は、テンプレート画像の中心に位置するよう設定しており、設定点とテンプレート中心が一致する。このため、相関係数が極大値をとる複数の赤点を交錯点として検出する。



(a) 相関係数の算出範囲と検出点

(b) 3 次元マップ

図 4.7 交錯点近傍をテンプレート画像として算出した相関係数



(a) 相関係数の算出範囲と検出点

(b) 3 次元マップ

図 4.8 完全組織をテンプレート画像として算出した相関係数

図 4.8 には完全組織をテンプレート画像として、同様に相関係数を算出した結果を示す。この図から、相関係数の極大値をとる XY 座標から、テンプレート画像の中心点から設定した交錯点の xy 座標を加減算し交錯点座標を検出する。なお、本論文では平織で重複した検出点について平均化処理を行う。

(Sample-3)

ファスナチェーンの Sample-3 を撮影した初期画像を図 4.9 に示す。同図より、ファスナチェーンの完全組織は、ファスナ幅方向 (Y 方向) に段階的に組織が変化する複雑な構成となっている。そこで、図 4.9 のとおり、完全組織を分割し、交錯点を中心とする方法と、完全組織を分割した範囲をテンプレート画像とする方法を検討する。図 4.9 には、初期画像と完全組織および完全組織を分割したテンプレート画像の例を示し、完全組織を分割したテンプレート画像に示す交錯点の 1 点を中心として、その近傍をテンプレート画像の例として示している。

テンプレート画像中に設定する検出点は、たて糸、よこ糸の交錯点にそれぞれ設定する。完全組織を分割したテンプレート画像の拡大図には、平織物の完全組織をテンプレート画像とした際と同様に、たて糸上の交錯点を黒点で、よこ糸上の交錯点を白点でおのおの 2 点ずつを例として示している。交錯点を中心とする方法では、設定したよこ糸上の交錯点として白点を示している。

上述のように 2 つの手法で設定したテンプレート画像を用いて、相関係数を算出した結果を図 4.10, 4.11 にそれぞれ示す。平織の完全組織を算出した場合と同様に相関係数が極大値をとる点の XY 座標から、テンプレート画像の中心点から設定した交錯点の xy 座標を加減算し交錯点座標を検出する。図 4.9 に示す赤枠の範囲で示した完全組織の一部をテンプレート画像とする方法での算出結果を示す図 4.11(a) から、テンプレート画像との相関係数が極大値をとる赤点が 3 点確認できる。赤点で示した極大値をとる赤点以外にも、図 4.11(b) の 3 次元マップから相関係数値は小さいものの赤点と赤点の間付近にも極大値が確認でき、極大値を検出する相関係数値の閾値設定は調整を要する。

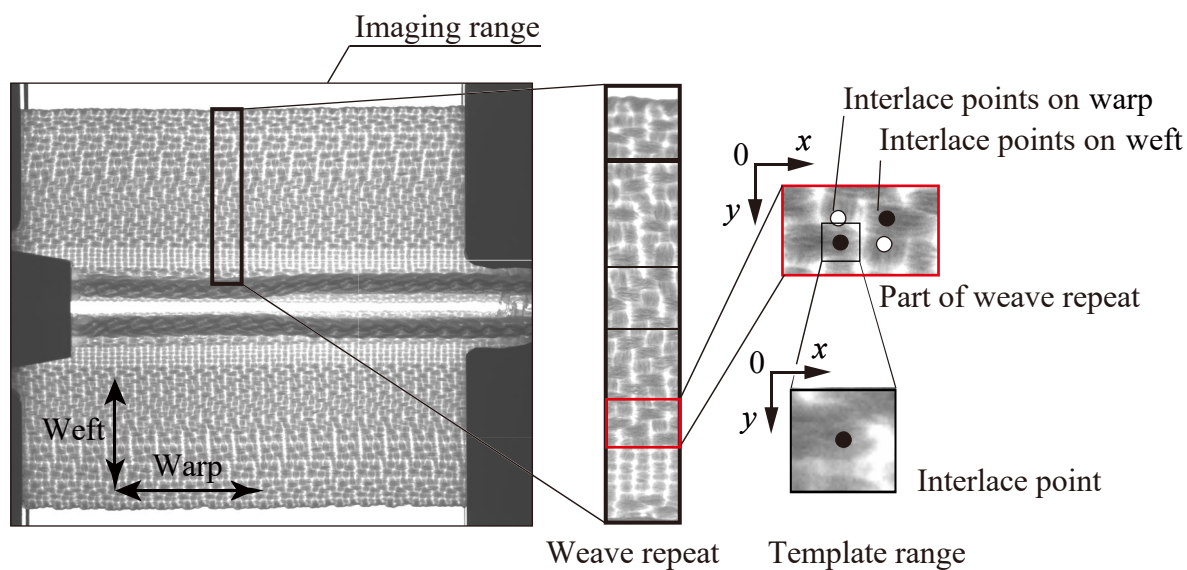
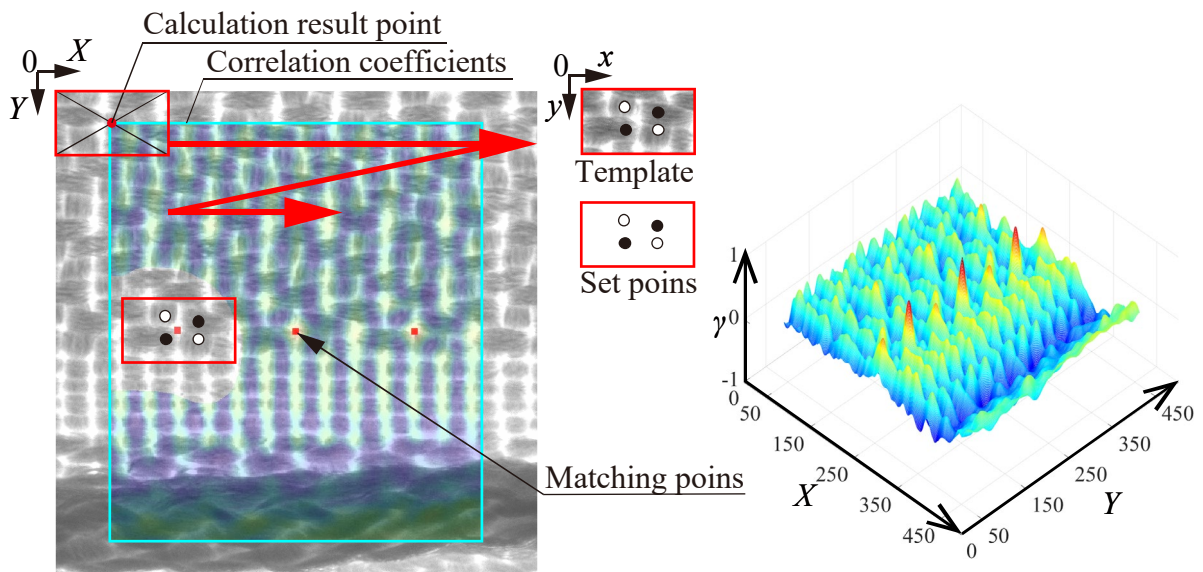


図 4.9 Sample-3 の基準画像とテンプレート画像

これは、完全組織を分割したことにより、分割した範囲の組織構成が完全組織内で似たパターンを検出するためである。したがって、完全組織を分割した場合には、分割した範囲に含まれる交錯点の配置が、繰返される完全組織の範囲内で同様の配置が無いことが望ましい。

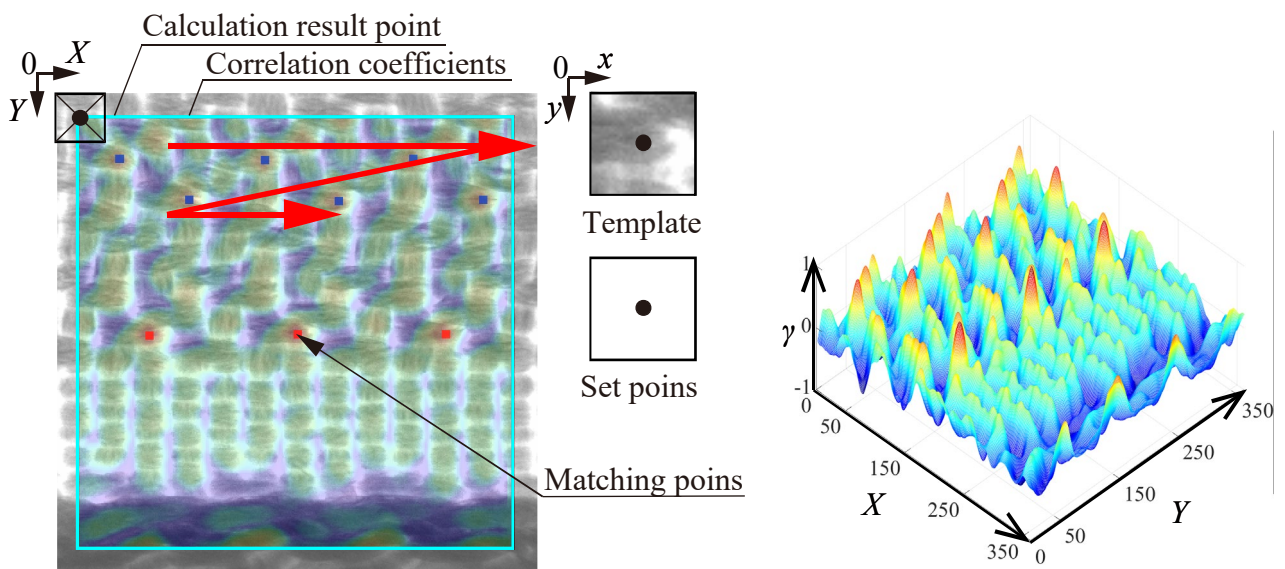
図 4.10 に示す、交錯点を中心とするテンプレート画像を用いた場合では、平織で示した場合と異なり、完全組織内で選択した交錯点中心において極大値をとる。また、図 4.10(b) に青点で示した、テンプレート画像で中心とした交錯点 1 点の周囲 8 点の交錯点と似た配置においても相関係数の極大値をとることがわかる。このため、多くの交錯点により構成される完全組織では、交錯点近傍を中心とするテンプレート画像を用いる場合には、周囲の交錯点配置を考慮しテンプレート画像を設定する必要がある。



(a) 相関係数の算出範囲と検出点

(b) 3次元マップ

図 4.10 交錯点近傍をテンプレート画像として算出した相関係数



(a) 相関係数の算出範囲と検出点

(b) 3次元マップ

図 4.11 完全組織の一部をテンプレート画像として算出した相関係数

4.4.3 交錯点の検出結果

前項では、テンプレートマッチング法による交錯点の検出方法を示した。DIC法による交錯点変位の測定、および織物の変形挙動を評価するために、検出した交錯点を識別するための座標を $P_{m[i,j],n}(X_{m[i,j],n}, Y_{m[i,j],n})$ と定義する。ここで、 m は評価対象となる交錯点の番号とし、 $[i,j]$ で交錯点の行列成分の位置を示し、 n は撮影画像の番号とする。評価する交錯点の総数を M 、評価範囲のたて糸本数 A とよこ糸本数 B とすると、 $M = A \times B$ となり、交錯点 m の行列成分の位置 ij については、よこ糸本数から計算し、 $i = m - (\lfloor m/B - 1/B \rfloor \times B)$ $j = \lfloor m/B - 1/B \rfloor + 1$ となる。なお、ガウス記号 $\lfloor \]$ を用いて、 $m/B - 1/B$ を超えない最大の整数を $\lfloor m/B - 1/B \rfloor$ と表記している。また、以降の本文中で示す交錯点番号を示す表記では ij を省いて表記する場合は $[]$ を示さない。

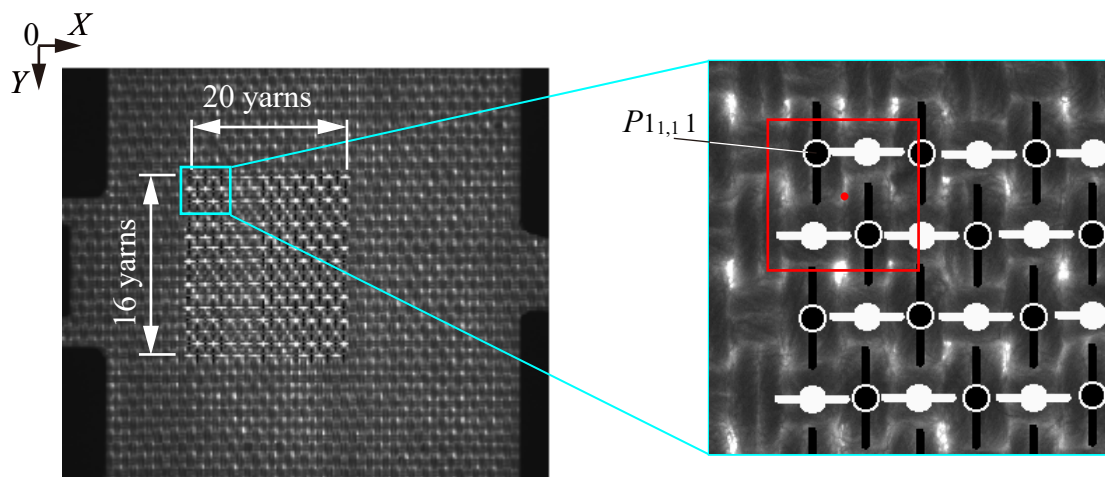
初期画像 $n=1$ において、交錯点番号 $m=1$ となる交錯点 $P_{1,1}$ を撮影画像から任意に選択したとき、 X 座標または Y 座標が増加する方向で、同一糸の延長上にある次の交錯点を $P_{2,1}$ または $P_{1,2}$ として定義する。なお、糸が傾いている場合は XY どちらかが増加した交錯点に i を加算し、交差する糸方向に j を加算して定義しても良い。

(Sample-1)

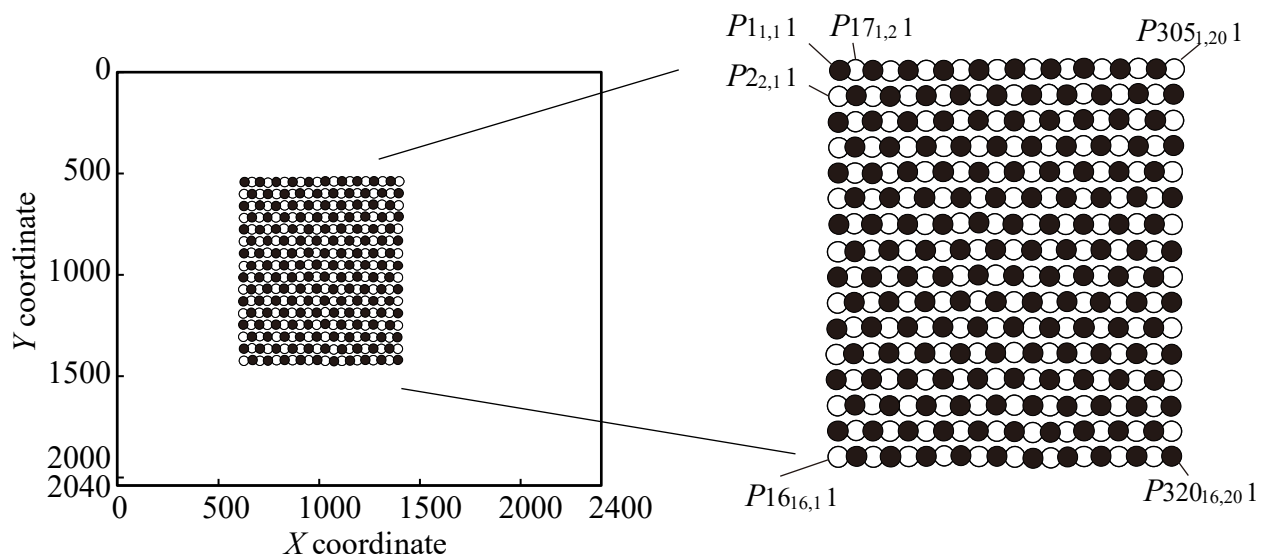
完全組織をテンプレートにする方法により、Sample-1 の初期画像に対して交錯点群を検出した結果を図 4.12 に示す。まず、検出した交錯点の座標から、第 6 章にて後述する糸間距離に従い評価範囲における糸間距離の平均値を求めると、たて糸間距離は 0.732 [mm]、よこ糸間距離は 1.070 [mm] となる。図 4.12(a) に示すように、たて糸本数 $A = 20$ 、よこ糸本数 $B = 16$ が含まれる範囲を対象とすると、糸間距離から約 13.9 mm \times 16.1 mm の範囲が変形挙動の評価対象となる。また、評価対象となる $M = 20 \times 16 = 320$ 点の交錯点の XY 座標を検出している。

図 4.12(a) の拡大図において、赤線の枠がテンプレート画像であり、黒点でたて糸上の交錯点、白点でよこ糸上の交錯点を示し、第 6 章にて後述する配向角に従い糸方向をそれぞれの交錯点と同色の直線で示している。図 4.12(a) に示すように、画像左上のたて糸が浮く交錯点を、交錯点番号 $m=1$ の $P_{1[1,1],1}$ と定めている。また、図 4.12(b) では、たて糸の交錯点を黒点で、よこ糸の交錯点を白点で XY 座標にプロットし、交錯点番号 m と行列成分の位置 ij の関係を示す。この場合、交錯点 $P_{(1+2a)[i,j],1}$ ($0 \leq a \leq B/2-1$; a は整数) ではたて糸が浮き、交錯点 $P_{(2+2b)[i,j],1}$ ($0 \leq b \leq A/2-1$; b は整数) ではよこ糸が浮いた状態になっていることがわかる。図 4.12(a) および (b) より、それぞれ連続した 1 本目のたて糸およびよこ糸が観察でき、たて糸とよこ糸の交錯点が交互に配列する平織を検出できていることがわかる。すなわち、図 4.12(b) から、平織の交錯点の組織図で示すとおり、糸をまたぐ誤検出が生じること無く、交錯点の検出ができていることが確認できた。

Sample-1 では、図 4.12 で示した初期画像における交錯点群を計測点として、第 5 章で詳述する DIC 法による交錯点の変位測定を行う。



(a) テンプレート画像の範囲と評価対象の交錯点群



(b) 交錯点の指標

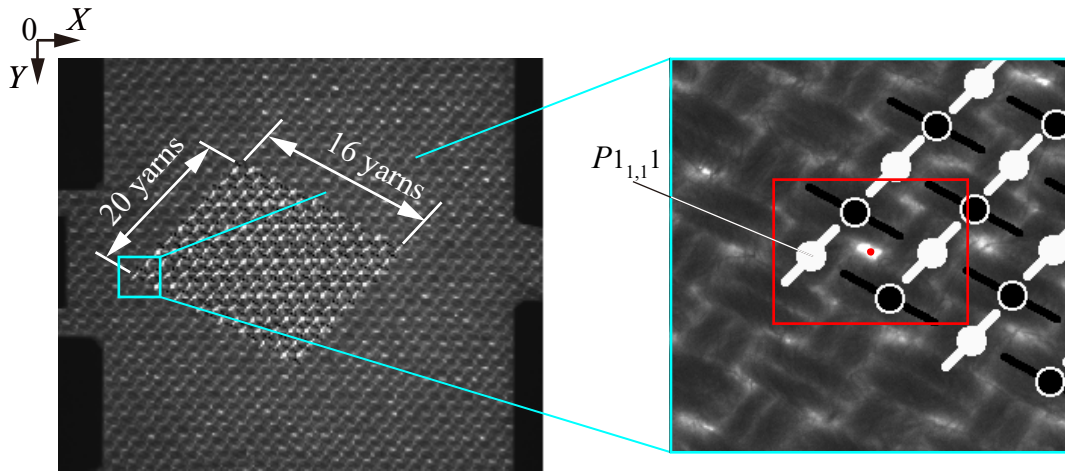
図 4.12 Sample-1 の評価範囲と検出した交錯点群

(Sample-2)

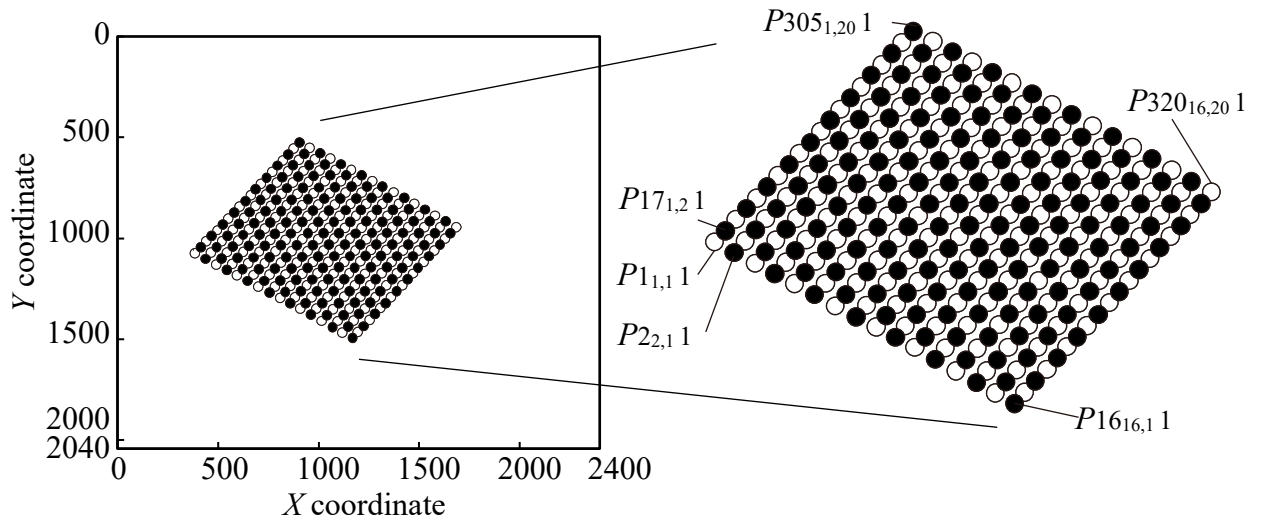
完全組織をテンプレートにする方法により，Sample-2 の初期画像に対して交錯点群を検出した結果を図 4.13 に示す．先述した Sample-1 と同様に，評価範囲における糸間距離の平均値を求めると，たて糸間距離は 0.695 [mm]，よこ糸間距離は 1.043 [mm]となる．図 4.13(a)に示すように，たて糸本数 $A=20$ ，よこ糸本数 $B=16$ が含まれる範囲を対象とすると，糸間距離から約 $13.2\text{ mm} \times 15.6\text{ mm}$ の範囲が変形挙動の評価対象となる．また，Sample-1 と同様に評価対象となる $M=20 \times 16=320$ 点の交錯点の XY 座標を検出している．

図 4.13(a)の拡大図において，赤線の枠がテンプレート画像であり，黒点でたて糸上の交錯点，白点でよこ糸上の交錯点を示し，糸方向をそれぞれの交錯点と同色の直線で示している．図 4.13(a)に示すように，画像左端のよこ糸が浮く交錯点を，交錯点番号 $m=1$ の $P_{1[1,1],1}$ と定めている．また，図 4.13(b)では，たて糸の交錯点を黒点で，よこ糸の交錯点を白点で XY 座標にプロットし，交錯点番号 m と行列成分の位置 ij の関係を示す．この場合，交錯点 $P_{(1+2a)[i,j],1}$ ($0 \leq a \leq A/2-1$: a は整数)ではよこ糸が浮き，交錯点 $P_{(2+2b)[i,j],1}$ ($0 \leq b \leq B/2-1$: b は整数)ではたて糸が浮いた状態になっていることがわかる．図 4.13(a)および(b)より，それぞれ連続した 1 本目のたて糸およびよこ糸が観察でき，たて糸とよこ糸の交錯点が交互に配列する平織を検出できていることがわかる．すなわち，図 4.13(b)から，Sample-1 と同様に，糸方向を斜めに配置した Sample-2 の場合も平織の交錯点の組織図で示すとおり，糸をまたぐ誤検出が生じることなく，交錯点の検出ができていたことが確認できた．

Sample-2 では，図 4.13 で示した初期画像における交錯点群を計測点として，DIC 法による交錯点の変位測定を行う．



(a) テンプレート画像の範囲と XY 座標系に示す評価対象の交錯点群



(b) 交錯点の指標

図 4.13 Sample-2 の評価範囲と検出した交錯点

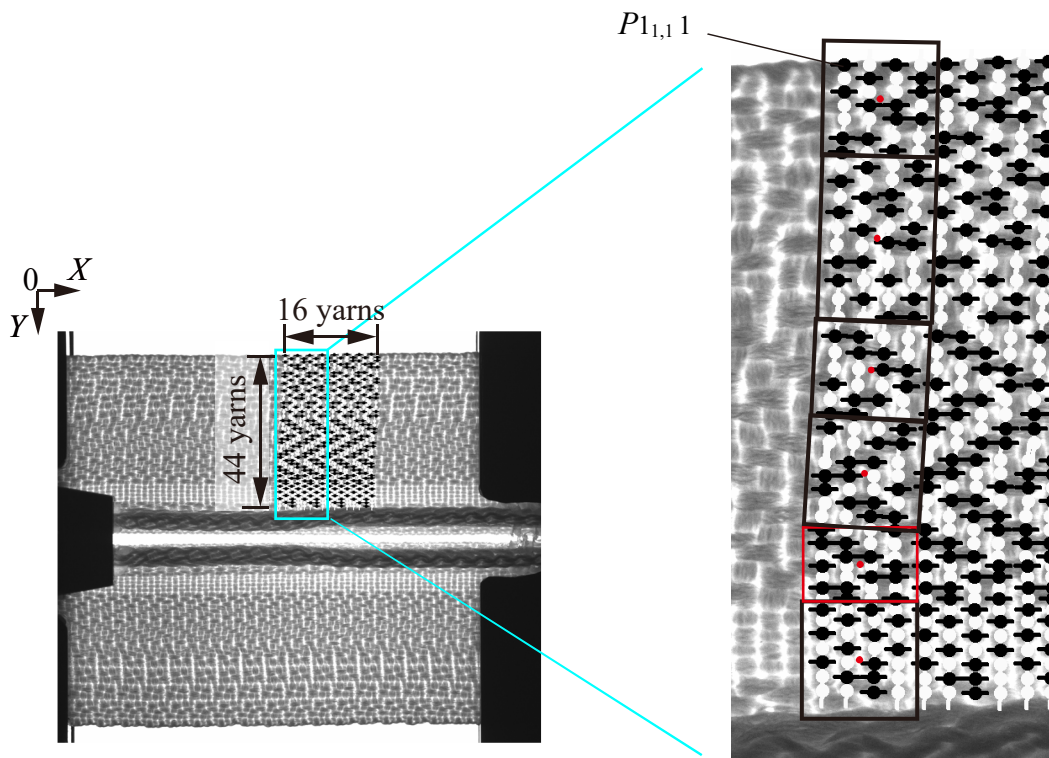
(Sample-3)

完全組織を分割した範囲をテンプレートにする方法により、ファスナチェーンである Sample-3 の初期画像に対して交錯点群を検出した結果を図 4.14(a)に示す。同図では、黒点でたて糸上の交錯点、白点でよこ糸上の交錯点を示し、糸方向をそれぞれの交錯点と同色の直線で示している。評価範囲における糸間距離の平均値を求めると、たて糸間距離は 0.542 [mm]、よこ糸間距離は 0.309 [mm]である。図 4.14(a)に示すように、たて糸本数 $A=44$ 、よこ糸本数 $B=16$ が含まれる範囲を対象とすると、糸間距離から約 $8.1 \text{ mm} \times 13.3 \text{ mm}$ の範囲が変形挙動の評価対象となり、同範囲において $M=40 \times 16=704$ 点の交錯点の XY 座標を検出している。また、図 4.14(a)の拡大図に示すとおり、評価範囲の左上のたて糸が浮く交錯点を、交錯点番号 $m=1$ の $P_{1[1,1],1}$ と定めている。

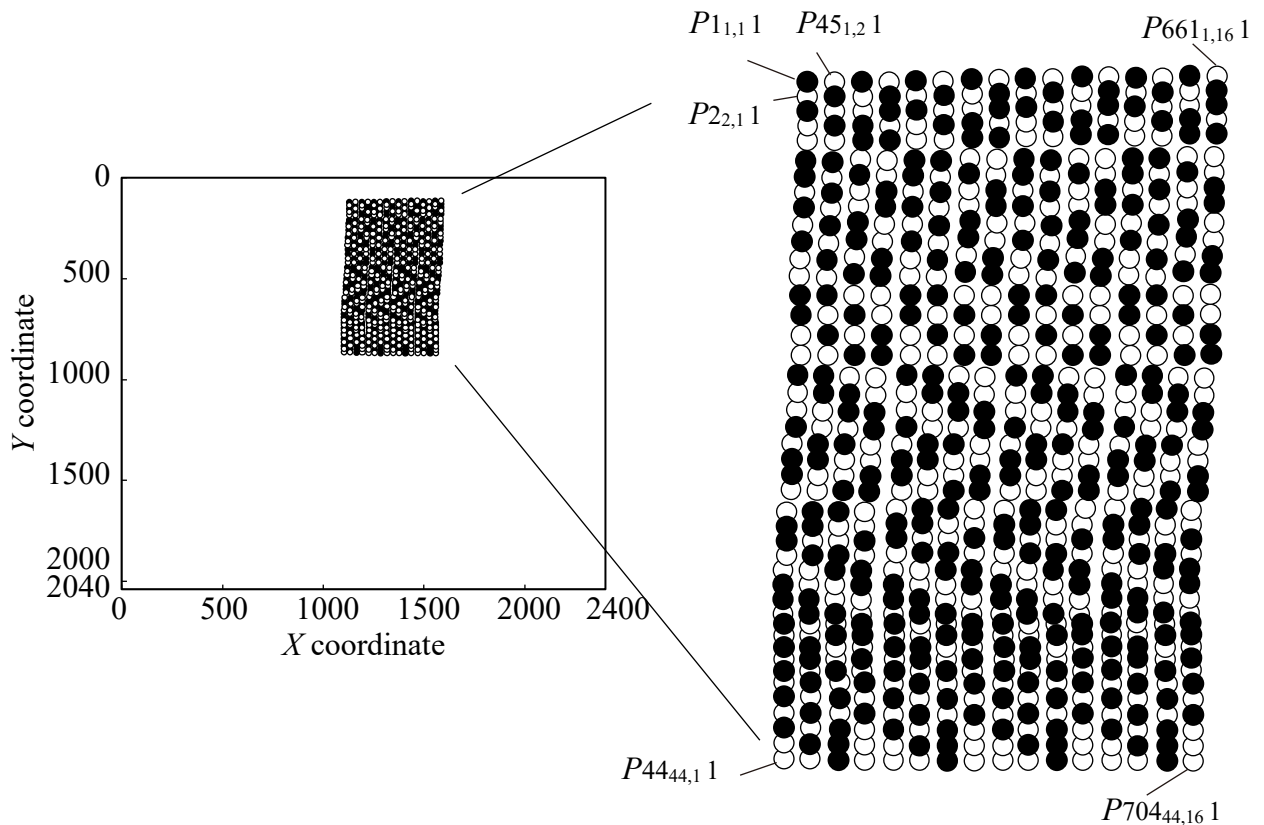
図 4.14(b)に、たて糸の交錯点を黒点で、よこ糸の交錯点を白点で XY 座標にプロットし、交錯点番号 m と行列成分の位置 ij の関係を示す。同図から、たて糸とよこ糸の交錯点が完全組織に基づき繰り返し配列していることを確認した。

平織の Sample-1, 2 と異なり、たて糸とよこ糸の配置が複雑な規則で配置された完全組織であるため、たて糸とよこ糸を数式で区分することは難しい。このため、完全組織を基にして、評価対象となる範囲にある糸 1 本ごとに、たて糸交錯点とよこ糸交錯点を区分する。なお、組織図に基づき、図 4.14(b)において糸をまたぐ誤検出が生じることなく交錯点の検出ができていたことが確認した。

Sample-3 では、図 4.14 で示した初期画像における交錯点群を計測点として、DIC 法による交錯点の変位測定を行う。



(a) テンプレート画像の範囲と XY 座標系に示す評価対象の交錯点群



(b) 交錯点の指標

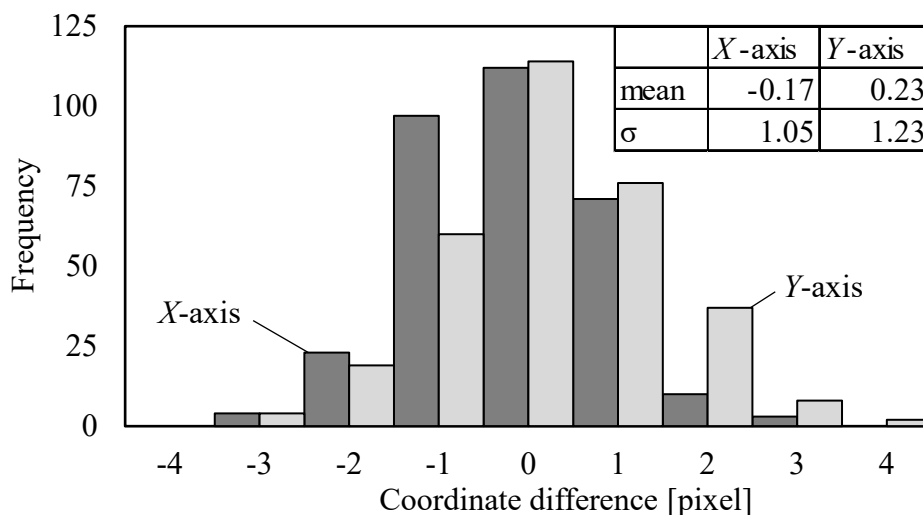
図 4.14 Sample-3 の検出した交錯点の指標

4.4.4 テンプレートの違いによる比較

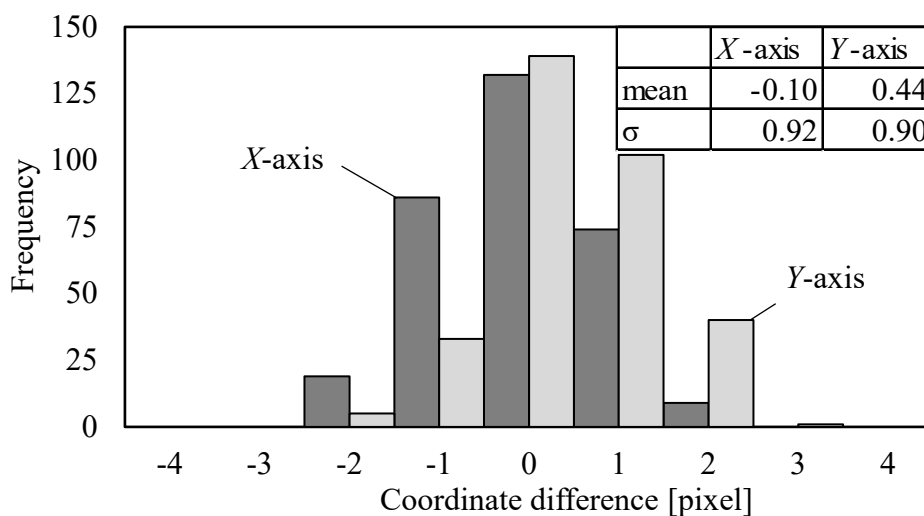
交錯点の近傍をテンプレート画像にする手法と、完全組織をテンプレート画像にする手法で検出した交錯点は、前節で示すXY座標系において目視では差異を確認できない。そこで、2手法において交錯点番号 m が同一の交錯点間距離を算出し比較する。

(Sample-1, 2)

X座標, Y座標ごとに算出した交錯点間距離を Sample-1 および 2 について図 4.15(a) および(b)に示す。ただし、完全組織をテンプレートにする場合を基準として検出座標の差を算出している。図 4.15 中には、X座標, Y座標それぞれについて平均値と標準偏差 σ を記載している。図 4.15 より、Sample-1 および 2 において、2つの方法により測定した交錯点座標の 86%は ± 1 [pixel]の差に収まっており、最大差の ± 4 [pixel]は 0.6%である。なお、たて糸の糸間距離の平均値は約 40 [pixel], よこ糸の糸間距離の平均値が約 60 [pixel] に対し、2つの手法により抽出した交錯点の多くは座標の差は小さく、両手法とも交錯点の座標を同様に検出していることを確認した。



(a) Sample-1 (Parallel arrangement)



(b) Sample-2 (Diagonal arrangement)

図 4.15 交錯点のXY座標差の度数分布

(Sample-3)

ファスナチェーンにおいて、二つの手法で測定した X 座標、 Y 座標ごとに算出した交錯点間距離を図 4.16 に示す。ただし、図 4.16 では完全組織をテンプレートにする場合を基準として検出座標の差を算出している。図 4.16 中には、 X 座標、 Y 座標についての平均値と標準偏差 σ を記載している。図 4.16 より、2つの方法により測定した交錯点座標の 89%は ± 1 [pixel]の差に収まっており、最大差の ± 4 [pixel]は 1.3%である。なお、たて糸の糸間距離の平均値は 29.8 [pixel]、よこ糸の糸間距離の平均値が約 17[pixel]に対し、2つの手法により抽出した交錯点の多くは座標の差は小さい。ただし、 ± 2 [pixel]以上の差があるものは 11%あり、必要に応じて該当箇所はテンプレート画像の分割数など見直しを検討する必要がある。

ファスナチェーンのテープ部のように複雑に変化した織組織においても、完全組織を分割することで、交錯点の座標を検出できることを確認した。

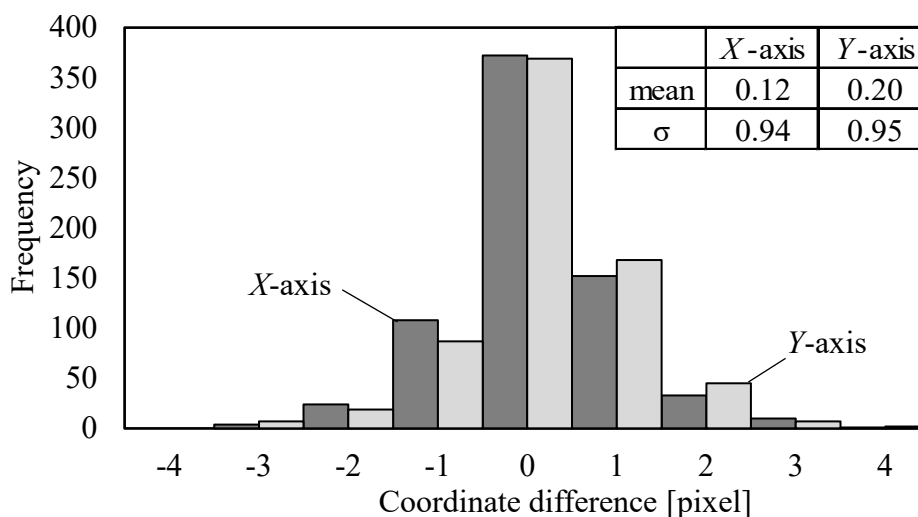


図 4.16 交錯点の XY 座標差の度数分布

4.5 結言

本章では、第2章で示した交錯点の近傍をテンプレート画像にする手法による交錯点検出について、平織布およびファスナを試料として両手法の妥当性を検証した。各試料において、提案した二つの手法ともに、布の交錯点を検出できることを確認した。また、二つの手法で検出した交錯点の XY 座標の差を統計的に比較することで、それぞれの手法の妥当性の確認をおこなった。

二つの手法により検出した交錯点の多くは、 XY 座標の差が小さく、両手法とも交錯点の座標を同様に検出していることを確認した。また、同結果は、完全組織が単調な平織においては、テンプレート画像の範囲などを特に留意することなく、同様の結果を得ることができる。一方で、完全組織が複雑、また多数の交錯点により構成される場合は、算出した相関係数と極大値から、たて糸とよこ糸の交錯点配置によっては、誤検出や重複した検出が生じる可能性が示された。このため、複雑な完全組織をもつ試料においては個別にテンプレート画像の範囲を調整する必要がある。

第 5 章 DIC 法を用いた交錯点の変位測定

5.1 緒言

本論文では、テンプレートマッチングにより検出した織物の交錯点を DIC 法の計測点として用いることで、交錯点の変位を測定し織物の変形挙動を評価する。DIC 法は、撮影した画像内で計測点を中心とした Subset と呼ばれる計算領域の輝度分布について変形前後の相関係数が極大値をとる XY 座標を計測点の位置として検出する。第 4 章の図 4.4 に示したように、織物の交錯点を中心としたテンプレート画像と撮影画像における相関係数は、同種の交錯点において多数の極大値をとる。このため、DIC 法において計測点に交錯点として設定する場合、隣接する同種の交錯点において算出される相関係数の極大値をとる XY 座標を計測点の位置として誤検出する可能性がある。そこで、本論文では評価領域とよぶ相関係数の計算領域に対し、第 2 章で示した織物組織の規則性を活用して、隣接する同種の交錯点を含まない範囲を設定する手法により誤検出を防止する。

本章では、まず、第 2 章で示した設定方法に基づき DIC 法の処理手順と原理を述べ、第 4 章で示した Sample-1~3 における交錯点群を用いて、評価領域における相関係数の極大値をとる XY 座標から交錯点の変位を求める。これにより、計測点の近傍にある同種の交錯点を検出することなく、計測対象の交錯点変位が測定可能であることを示す。

5.2 DIC 法

5.2.1 DIC 法の概要

デジタル画像相関(Digital image correlation, DIC)法は、一般的に測定対象物の表面に存在するパターン、もしくは、スプレー塗料などで意図的に物体表面に塗布したランダムパターンを利用する⁽⁴⁰⁻⁴²⁾。変形前後の物体表面をカメラで撮影し、得られた物体表面のパターンの輝度値分布を比較することにより変形を測定する。

しかし、第 4 章の図 4.4 に示したように、織物の交錯点を中心としたテンプレート画像と撮影画像における相関係数は、同種の交錯点において多数の極大値をとる。このため、交錯点を DIC 法の計測点に設定する場合、隣接する同種の交錯点を計測点の位置として誤検出する可能性がある。本論文では、第 2 章の 2.4 節で示した、相関係数を算出する評価領域を、隣接する同種の交錯点を含まない範囲に設定する方法により誤検出を防止する。

5.2.2 DIC 法の演算手順

2.4 節で解説した DIC 法における評価領域は相関係数が算出される領域であり，サブセット画像 n 番目以降の画像内で走査する探索範囲の一辺の長さは $L = E + T - 1$ [pixel] となる．本論文で行った DIC 法の演算手順を以下に示し，概略図を図 5.1 に示す．

1. 帯状織物の搬送を模擬する試験装置において，試料の左側を把持し，右側をローラにより巻き取る試験において逐次撮影する．
2. ローラ軸に組み込んだトルクセンサの測定値が上昇を開始する 0.1 秒前に撮影された画像を初期画像 ($n = 1$) とし，0.5 秒間を試験時間とする．
3. 初期画像 ($n = 1$) に対し，テンプレートマッチング法を用いて検出した織物の交錯点 $P_{m,1}$ を DIC 法の計測点として設定する．
4. 初期画像の交錯点 $P_{m,1}$ より，たて糸間隔 S_{warp} ，よこ糸間隔 S_{weft} [pixel] および，たて糸とよこ糸の配向角 θ [°] を求め，式(2.2)と式(2.3)より評価領域の 1 辺 E [pixel] とサブセット範囲の 1 辺 T [pixel] を算出する．
5. 評価領域とサブセット範囲の 1 辺の長さから，探索範囲の 1 辺 L [pixel] を算出する．
6. 初期画像に対し計測点 $P_{m,1}$ を中心とするテンプレート画像となるサブセット範囲 $T \times T$ [pixel²] を設定する．
7. 初期画像において評価点 $C_{m,1} = P_{m,1}$ を中心とする探索範囲 $L \times L$ [pixel²] を設定する．
8. 式(2.6)により，画像 No. n における評価領域の中心座標 $C_{m,n}$ を更新し， $C_{m,n}$ を中心とする探索範囲を計算領域として，計測点 $P_{m,1}$ を中心として設定したサブセット範囲と最も高い相関値をとる XY 座標を計測点 $P_{m,n}$ とする．
9. 撮影した最後の画像まで 8 の計算を繰り返す．

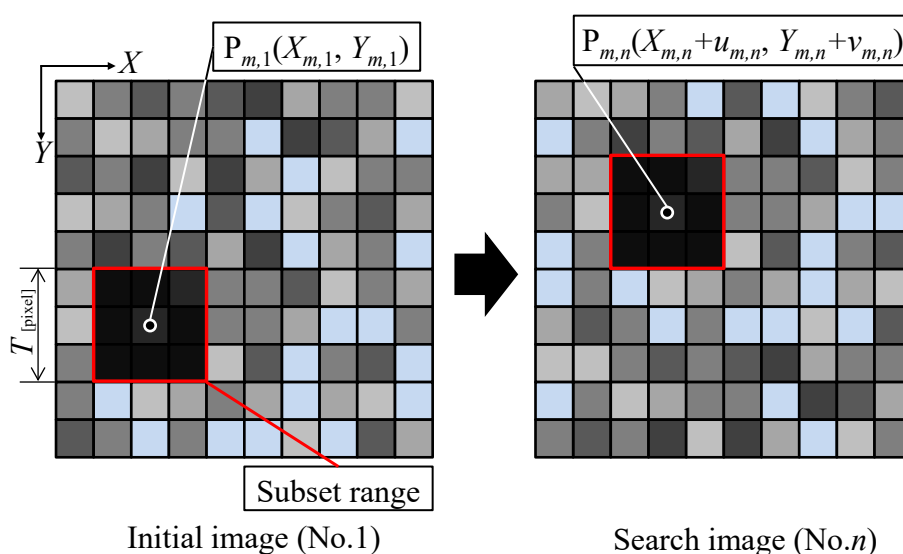


図 5.1 DIC の概念図

5.2.3 相関係数の算出方法

前項の DIC 法の演算手順に従い，初期画像における計測点 $P_{m,1}$ を中心としたサブセット範囲と画像 No. n の評価領域との相関係数 γ は，式(2.1)と同様に次式で算出する．

$$\gamma_{ZNCC}(X,Y) = \frac{\sum \{(H(x,y) - \bar{H})(I(X+x, Y+y) - \bar{I})\}}{\sqrt{\sum (H(x,y) - \bar{H})^2 \cdot \sum (I(X+x, Y+y) - \bar{I})^2}} \quad (5.1)$$

初期画像のサブセットを画像 No. n の探索範囲内で走査し，評価領域に出力される相関係数 γ が最も高い位置を，初期画像 No. 1 の計測点 $P_{m,1}$ に対応する画像 No. n の測定点 $P_{m,n}$ として追跡する．

5.2.4 サブピクセル処理

式(5.1)により相関係数の極大値を示す計測点のピクセル座標 $P_{m,n}(P_{Xm,n}, P_{Ym,n})$ を求めた後，図 5.2 に示すように相関係数の最大値 γ_{\max} を取り囲む 9 点の相関係数 $\gamma(\xi, \psi)$ に次式で表される 2 次多項式を適用することにより，サブピクセル精度の移動量

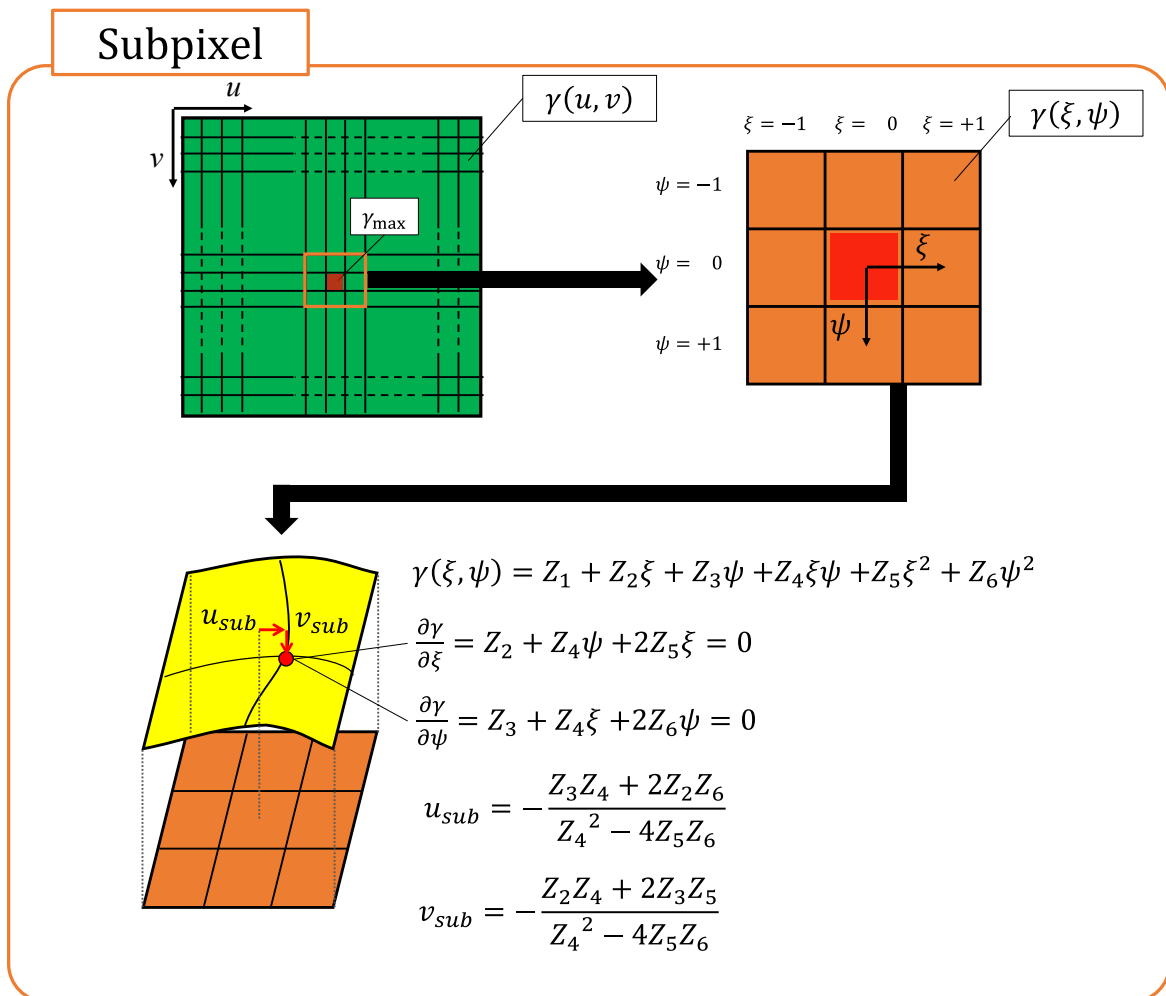


図 5.2 サブピクセル処理の概要

u_{sub} , v_{sub} を求める.

$$\gamma(\xi, \psi) = Z_1 + Z_2\xi + Z_3\psi + Z_4\xi\psi + Z_5\xi^2 + Z_6\psi^2 \quad (5.2)$$

$$(-1 \leq \xi \leq 1, \quad -1 \leq \psi \leq 1, \quad \gamma(0,0) = \gamma_{max})$$

サブピクセル精度の移動量 u_{sub} , v_{sub} は, $\gamma(\xi, \psi)$ が極大値となる ξ, ψ とし, 次式を満たす.

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \xi} = +Z_2 + Z_4\psi + 2Z_5\xi = 0, \quad \frac{\partial \gamma}{\partial \psi} = Z_3 + Z_4\xi + 2Z_6\psi = 0 \quad (5.3)$$

式(5.3)よりサブピクセル精度の移動量 u_{sub} , v_{sub} は次式で求められる.

$$u_{sub} = -\frac{Z_3Z_4 + 2Z_2Z_6}{Z_4^2 - 4Z_5Z_6}, \quad v_{sub} = -\frac{Z_2Z_4 + 2Z_3Z_5}{Z_4^2 - 4Z_5Z_6} \quad (5.4)$$

算出したサブピクセル精度の移動量により, 高精度な変位測定が可能となる.

5.3 DIC法のパラメータ設定

5.3.1 完全組織と糸密度による評価領域とサブセット範囲

織組織の交錯点を計測点としたDIC法における評価領域は, 式(2.2)に示すとおり, 完全組織の構造で定まる p, q , たて糸間隔 S_{warp} , よこ糸間隔 S_{weft} およびたて糸とよこ糸の配向角 θ に依存する.

まず, 平織布であるSample-1および2について, 第4章で検出した交錯点群のXY座標を用いて算出した, たて糸間隔, よこ糸間隔, 配向角の平均値を表5.1に示す. また, 表5.1には, 式(2.2)による評価領域の一辺の長さ E , 式(2.3)によるサブセット範囲の一辺の長さ T および, 探索範囲の一辺の長さ $L=E+T-1$ を算出した結果も示している.

表 5.1 Sample-1, 2 の DIC パラメータの演算結果

	Sample-1	Sample-2
たて糸間隔 S_{warp} [pixel]	40.2	38.2
よこ糸間隔 S_{weft} [pixel]	58.8	57.3
配向角 θ [°]	89.85	75.02
たて糸本数 p	1	1
よこ糸本数 q	1	1
評価領域 E [pixel]	51	59
サブセット範囲 T [pixel]	71	85
探索範囲 L [pixel]	121	143

(Sample-1)

図 5.3 に，Sample-1 を撮影した初期画像から水色枠の範囲を抜粋し，拡大した画像上に表 5.1 の Sample-1 についての評価領域，サブセット範囲を重ねて示す．同図より，抜粋した対象画像において，交錯点の配置にゆがみが少なく，各交錯点の配向角がほぼ 90° であるため，隣接する複数の同種の交錯点中心が半径 r の円上に位置している．また，計測点 P となる交錯点から最も近い位置にある同種の交錯点 Q までの距離 r を用いて式(2.2)により設定する評価領域には，同種の交錯点中心が共存しないことが確認できる．

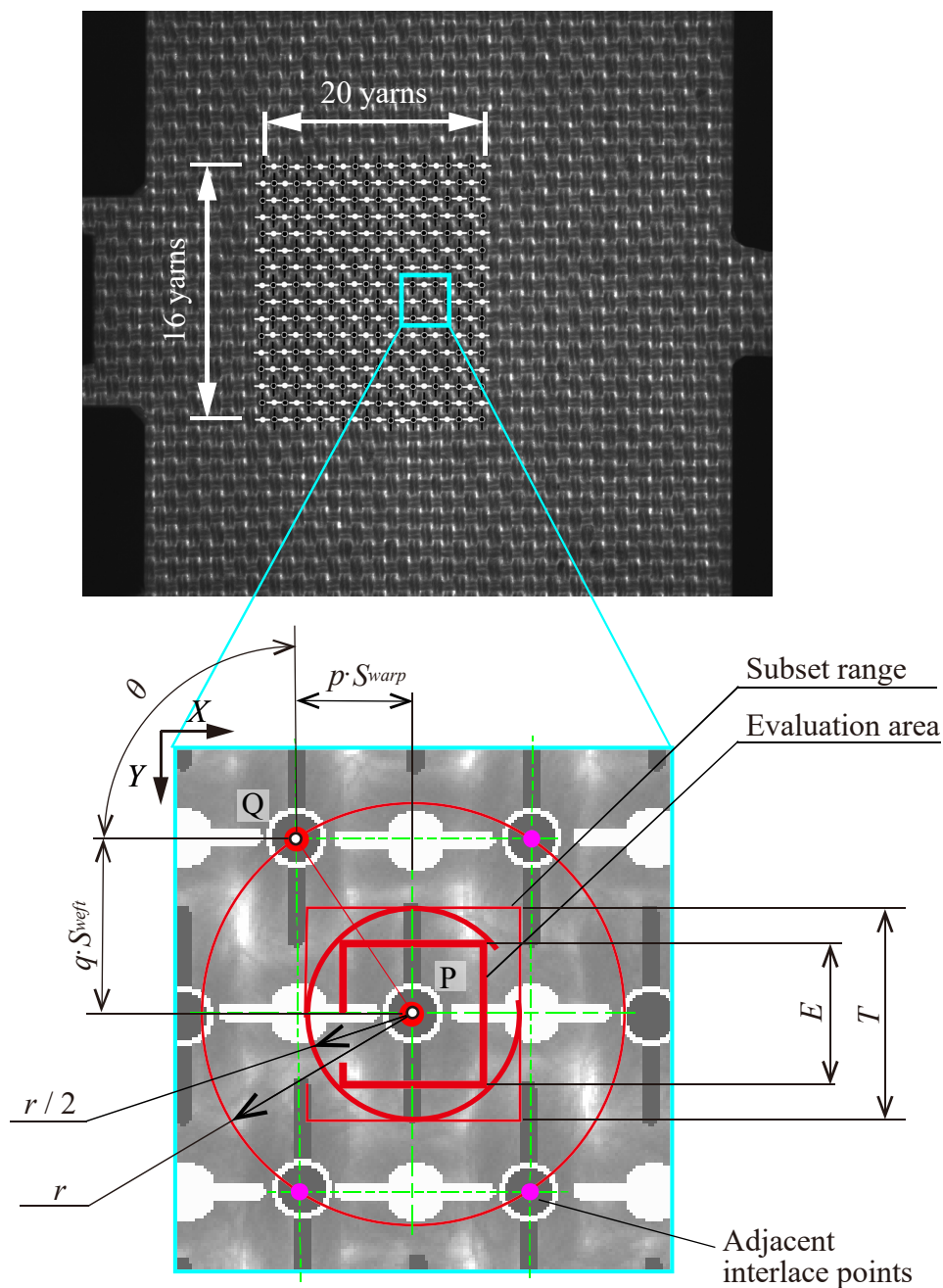


図 5.3 Sample-1 の評価領域

図 5.4 に、計測点 P となる交錯点を中心としたサブセット範囲を用いて、評価範囲の 3 倍の範囲を計算領域として算出した相関係数と半径 r および $r/2$ の円を、図 5.3 で抜粋した拡大図に重ねて示す。第 4 章のテンプレートマッチング法により検出した同種の交錯点位置と同様に、図 5.4 から、サブセット画像による相関係数の極大値が複数存在するが、式(2.2)に従い決定した評価領域には、DIC 法において誤検出対象となる隣接する同種の交錯点の相関係数の極大値が含まれないことが確認できる。

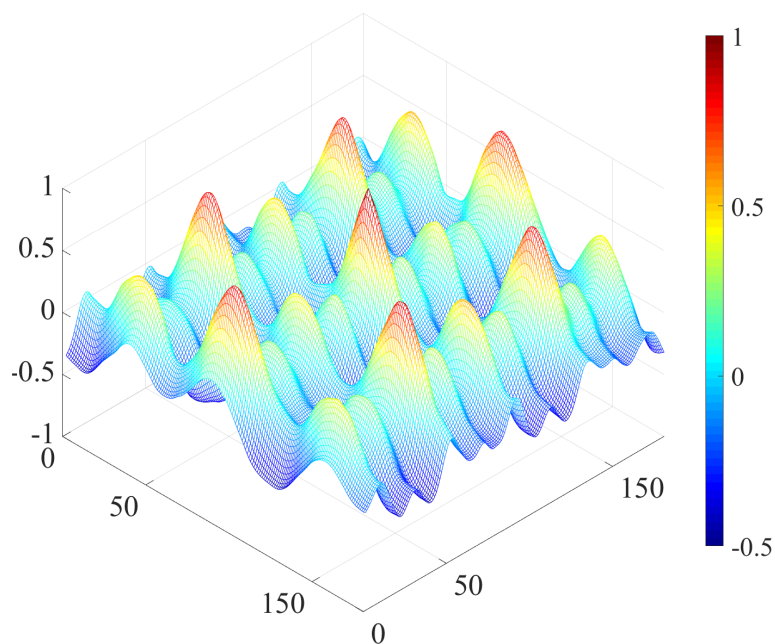
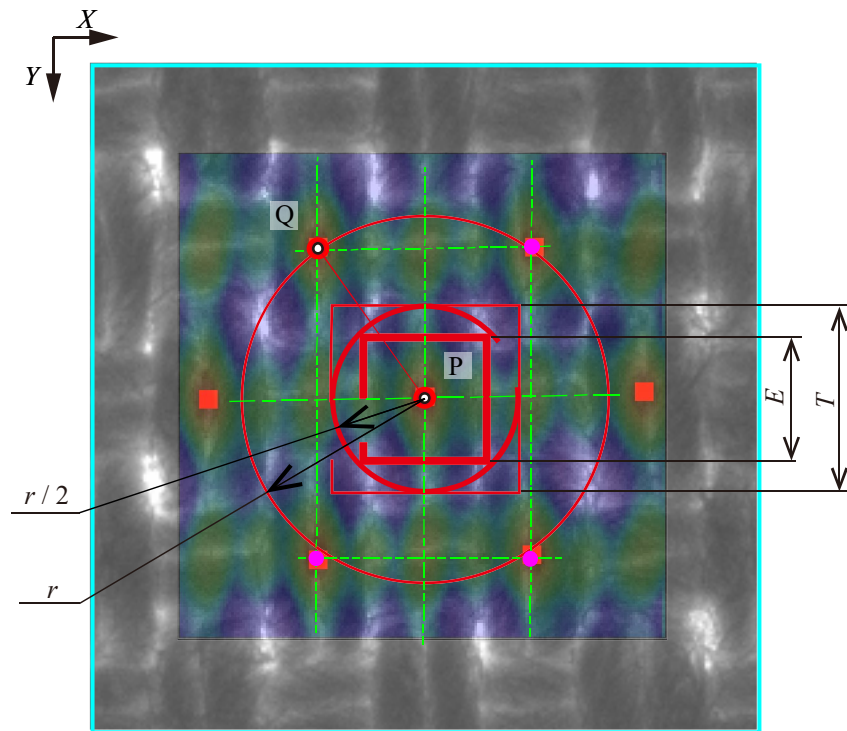


図 5.4 Sample-1 の評価領域周辺の相関係数

(Sample-2)

Sample-1 同様に，図 5.5 に，拡大した画像上に表 5.1 の Sample-2 についての評価領域，サブセット範囲を重ねて示す．同図より，Sample-2 では，抜粋した対象画像において，各交錯点の配向角が初期画像において約 75° であり，交錯点の配置にゆがみが生じている．そのため，隣接する同種の交錯点は半径 r の円より外側にあり，それぞれの距離も異なる位置にあることがわかる．

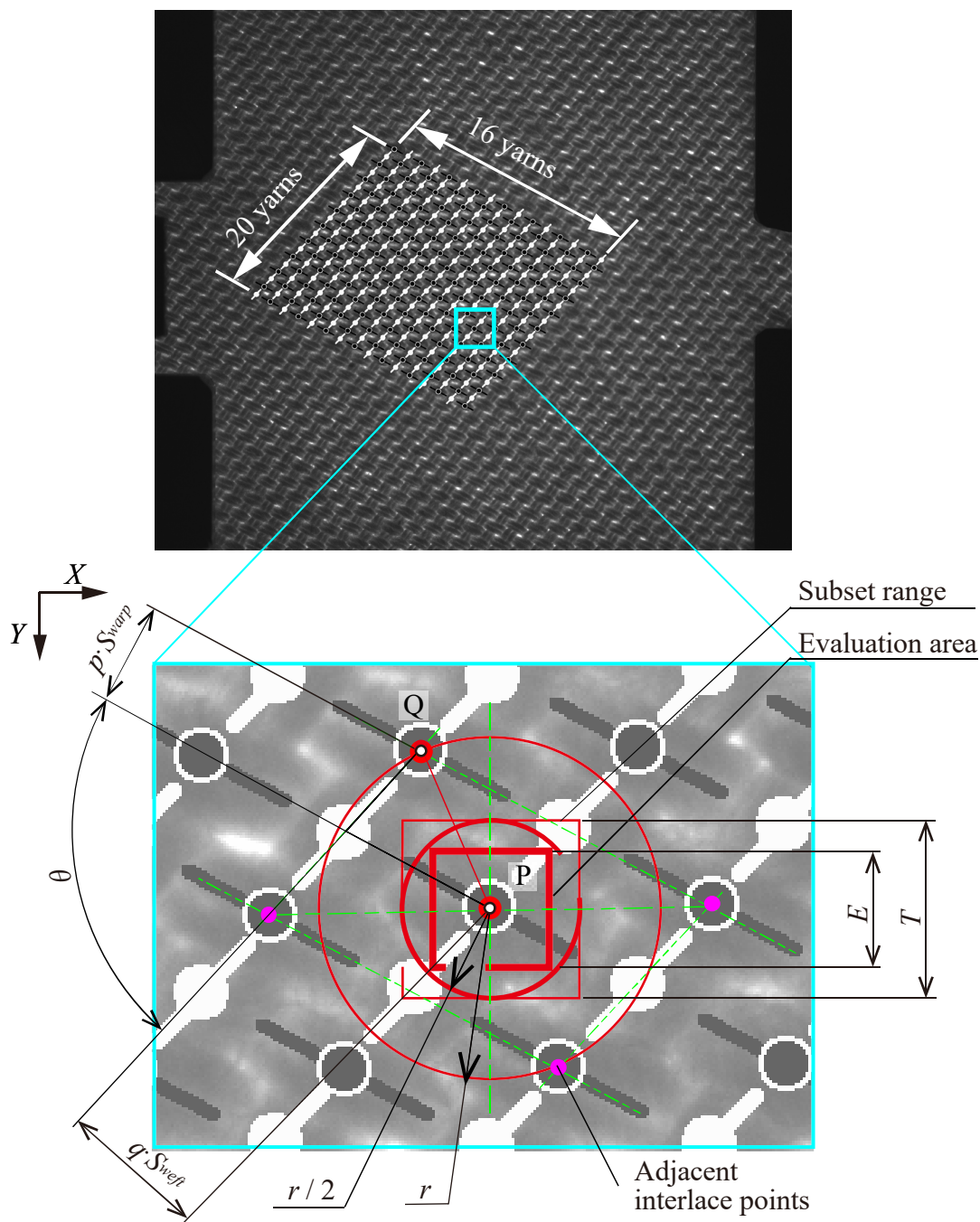


図 5.5 Sample-2 の評価領域

図 5.6 に、計測点 P となる交錯点を中心としたサブセット範囲を用いて、評価範囲の 3 倍の範囲を計算領域として算出した相関係数と半径 r および $r/2$ の円を、図 5.5 で抜粋した拡大図に重ねて示す。同図から、サブセット画像による相関係数の極大値は、近傍にある複数の同種の交錯点上に存在している。しかし、Sample-1 と同様に、式(2.2)に従い決定した評価領域には、DIC 法において誤検出対象となる近傍にある同種の交錯点の相関係数の極大値が含まれないことが確認できる。

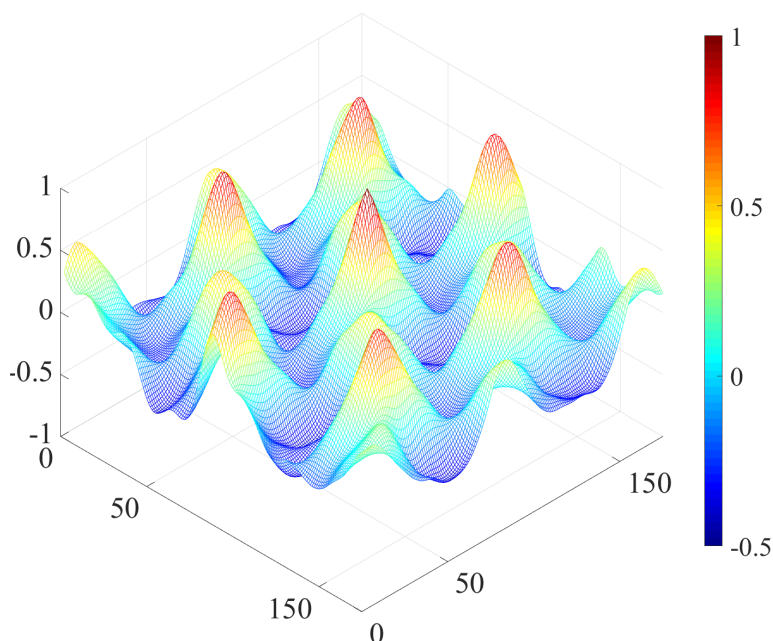
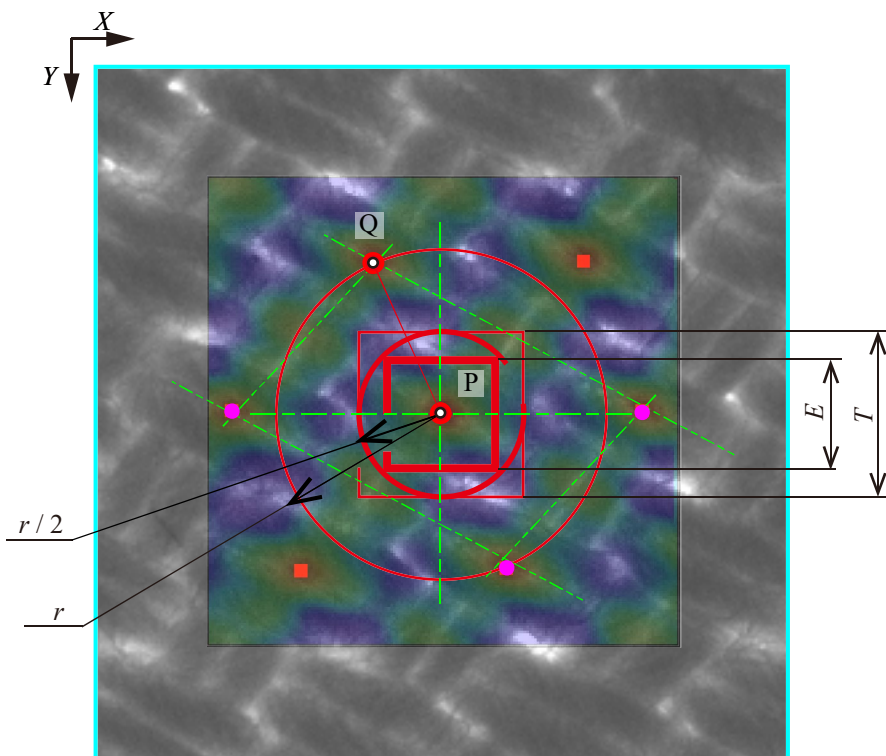


図 5.6 Sample-2 の評価領域周辺の相関係数

(Sample-3)

式(2.3)より算出されるサブセット範囲には、隣接する糸形状を含むため、完全組織の交錯点配列に依存する画像となり、完全組織中にある任意の交錯点を特定できる。したがって、同種糸が続けて浮く場合や複雑な織組織をもつ織物においても、完全組織中の特定の交錯点においてのみ相関係数が極大値をとる。すなわち、式(2.2), (2.3)で決定される評価範囲とサブセット範囲は、完全組織の構成によらず普遍的に適用することができる。

その一方で、完全組織を構成するたて糸あるいはよこ糸の本数が多い場合では、式(2.2), (2.3)で設定する評価領域およびサブセット範囲が大きな範囲となる。この場合、初期画像で設定したサブセット範囲と比べ、探索画像において対象画像の変形にともなう相関係数の低下や、計算量の増加に伴う処理時間の問題が生じる。

そこで、式(2.2), (2.3)において、完全組織における同種の交錯点によるよこ糸、たて糸の本数を $p=1$, $q=1$ とし、評価領域とサブセット範囲の設定を行う。同条件において、隣接する同種の交錯点が最短であり、どのような完全組織であっても適用できる。

表 5.2 に、ファスナチェーンである Sample-3 について、たて糸間隔、よこ糸間隔、配向角の平均値、式(2.2), (2.3)に基づき算出した評価領域、サブセット範囲および探索範囲の一辺の長さを算出した結果を示す。同表には、 $p=1$, $q=1$ とした場合を Sample-3-2 としてあわせて表記している。

表 5.2 Sample-3 の DIC パラメータの演算結果

	Sample-3	Sample-3-2
たて糸間隔 S_{warp} [pixel]	29.8	
よこ糸間隔 S_{weft} [pixel]	17.0	
配向角 θ [°]	87.50	
たて糸本数 p	4	1
よこ糸本数 q	0	1
評価領域 E [pixel]	84	24
サブセット範囲 T [pixel]	119	35
探索範囲 L [pixel]	202	58

図 5.7(a)および(b)に、表 5.1 に示す Sample-3 および Sample-3-2 の評価領域、サブセット範囲の一例をそれぞれ示す。まず、図 5.7(a)より、計測点 P となる交錯点から最も近い位置にある同種の交錯点 Q までの距離 r を用いて式(2.2)により設定する評価領域には、同種の交錯点中心が共存しないことが確認できる。さらに、図 5.7(b)より、 $p=1, q=1$ とした Sample-3-2 についても、評価領域に最近傍の交錯点中心が存在しないことがわかる。

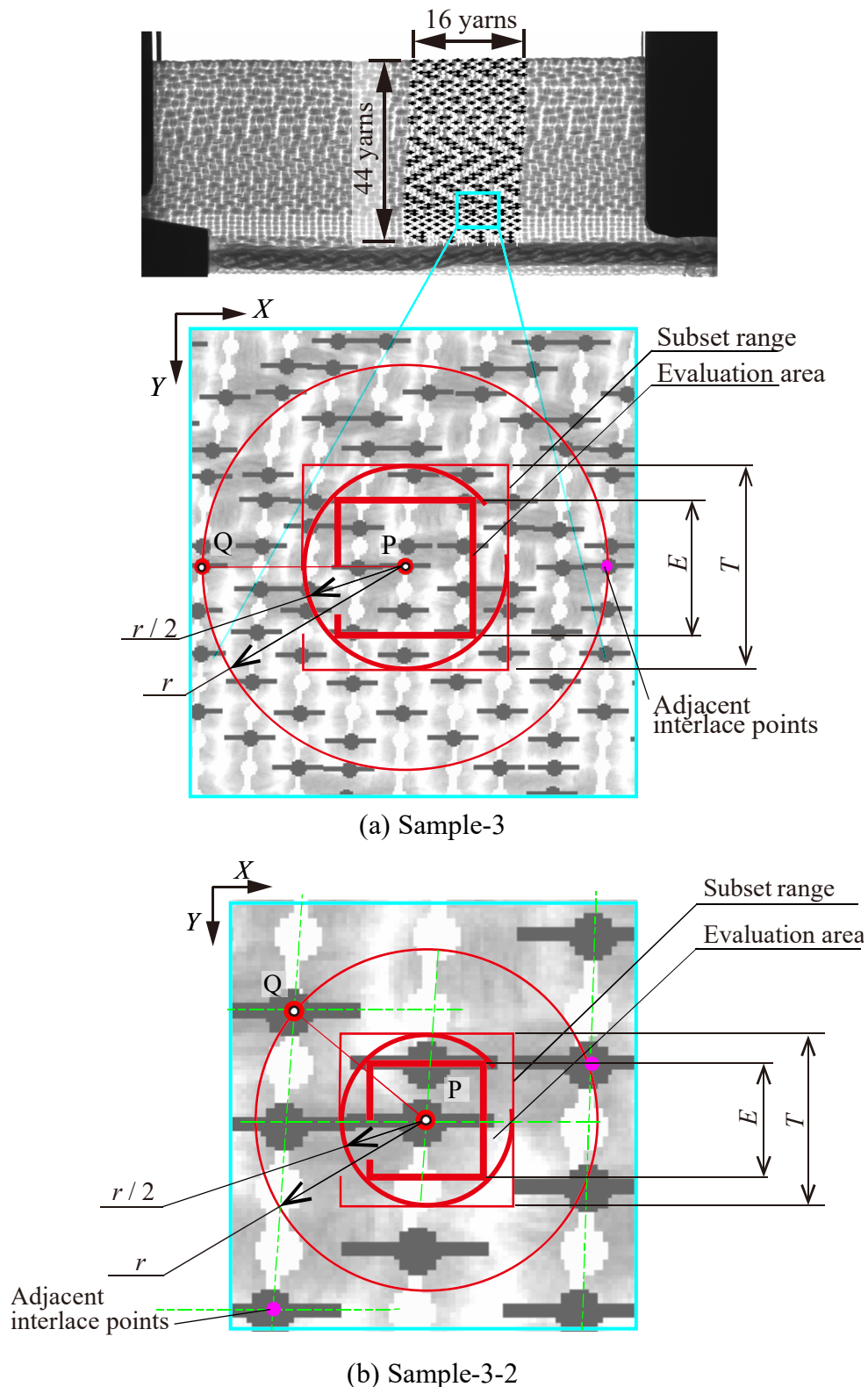


図 5.7 Sample-3 の評価領域

図 5.8 に、計測点 P となる交錯点を中心としたサブセット範囲を用いて、評価範囲の 3 倍の範囲を計算領域として算出した相関係数と半径 r および $r/2$ の円を図 5.7(a)の拡大図に重ねて示す. 同図(a)から、Sample-3 においてはサブセット範囲による相関係数の極大値と、第 4 章のテンプレートマッチング法により検出した同種の交錯点位置が一致しており、式(2.2)に従い決定した評価領域には、隣接する同種の交錯点の相関係数の極大値が含まれないため、他の試料同様に誤検出しないことがわかる. 一方で図 5.7(b)に示す、Sample-3-2 では完全組織の配置とは別に、相関係数の頂点が確認でき、隣接する同種糸の交錯点を最短と定義した円内に、誤検出対象となる相関係数の極大値が含まれることが確認できる. 相関係数の値は、計測対象の交錯点が高いため、誤検出は発生していないが、複雑かつ糸本数の多い完全組織をもつ織物で、式(2.2), (2.3)において $p=1$, $q=1$ とすることでサブセット範囲を小さくする場合には、個別に検証が必要となる.

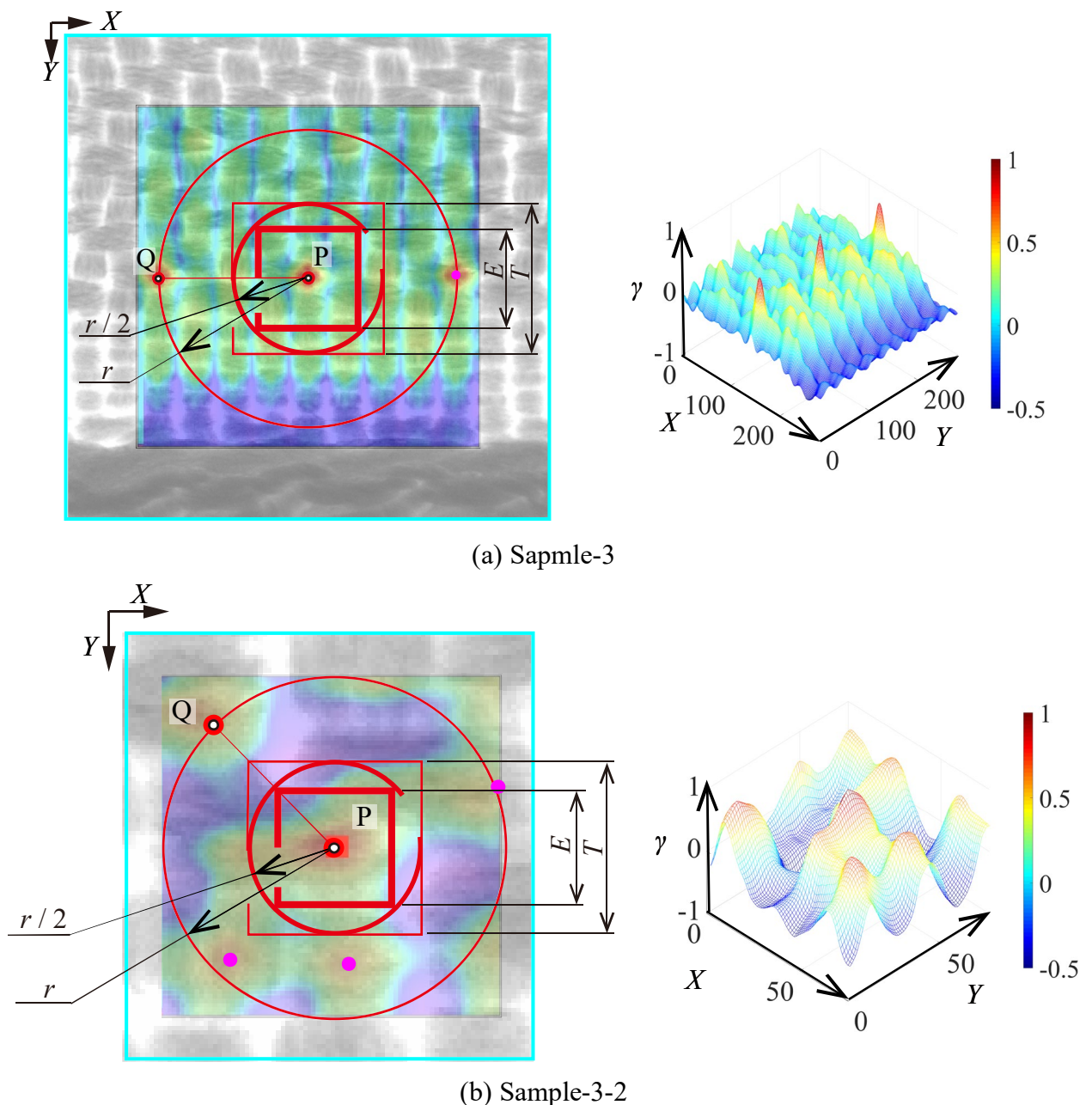


図 5.8 Sample-3 の評価領域周辺の相関係数

5.3.2 トラッキング処理と探索範囲

5.2.2 項で示した通り，探索範囲は，評価領域とサブセット範囲の関係から決定され，一辺の長さは $L = W + T - 1$ [pixel] となる．この際に，各計測点における評価領域の中心座標 $C_{m,n}$ は式(2.6)によるトラッキング処理により算出される．ここでは，任意の計測点について，試験開始から 0.5 秒間の計測点の座標 $P_{m,n} (P_{Xm,n}, P_{Ym,n})$ と評価領域の中心座標 $C_{m,n} (C_{Xm,n}, C_{Ym,n})$ および，トラッキングの予測誤差 $Er_{m,n} (E_{Xm,n}, E_{Ym,n}) = P_{m,n} - C_{m,n}$ を算出することで，トラッキング処理の有用性を示す．

(Sample-1)

図 5.9 に，Sample-1 の初期画像における $P_{19,1} (P_{X19,1}, P_{Y19,1}) = (703, 1013)$ [pixel] から測定された計測点座標 $P_{19,n} (P_{X19,n}, P_{Y19,n})$ を黒線，評価領域の中心座標 $C_{19,n} (C_{X19,n}, C_{Y19,n})$ を白破線，算出したトラッキングの予測誤差 $Er_{19,n} (E_{X19,n}, E_{Y19,n})$ を示す．同図中には，予測誤差が極大値をとる時間の撮影画像 No. も示している．図 5.9 より，搬送方向となる計測点の X 座標 P_X が大きく変化し， Y 座標 P_Y の変化は小さいことがわかる．ここで， X 座標の誤差 E_X に注目すると計測点の X 座標 P_X が変化し始める $n=23$ (0.15 秒) で誤差が負の方向に大きくなり，次に計測点の移動量が小さくなる $n=39$ (0.25 秒) で正の方向に大きくなっていることが確認できる．これは，トラッキング処理が $n-2$ までを計算範囲として予測するため追従遅れが生じることによるもので，加速度が増加するタイミングでは遅れにより負の方向に誤差を生じ，減速度が増加するタイミングでは，進みにより正の方向に誤差を生じるためである．

評価領域の相関係数を探索範囲の画像に重ねて図 5.10 に示す．撮影画像から評価領域の中心座標を中心とした一辺の長さ L の探索範囲に対し，初期画像から抜き出したサブセット範囲の画像を走査することで相関係数が算出される領域が評価領域である．図 5.10 には，緑枠で探索範囲，水色枠で評価領域となる画像を抜粋し，図 5.9 で示した誤差が大きくなる $n=23, 39$ および，初期画像 $n=0$ と終了画像 $n=75$ を示す．

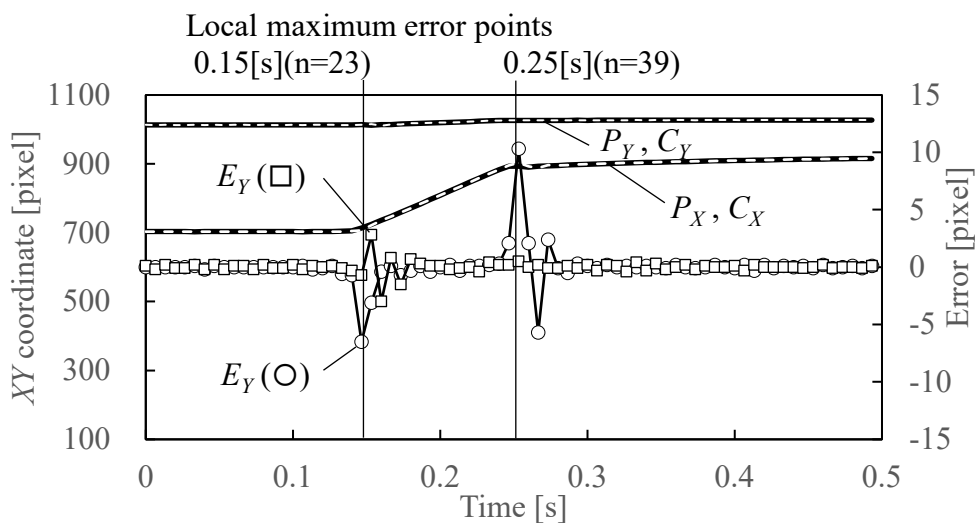


図 5.9 Sample-1 の評価領域の中心座標と予測誤差

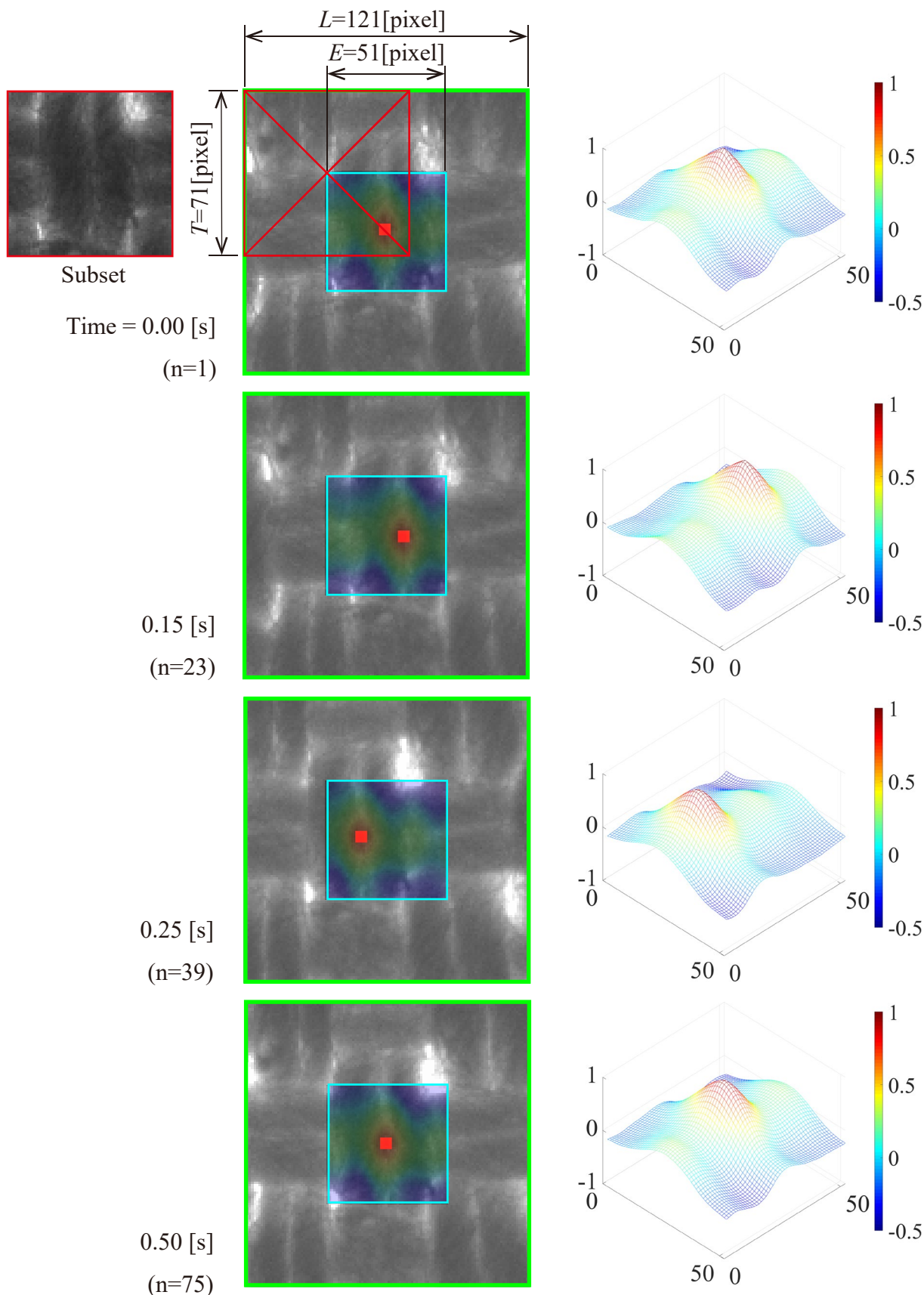


図 5.10 Sample-1 の探索範囲評における相関係数と極大値

図 5.10 から、 $n=1$ では評価範囲中心に計測点が位置し、 $n=23$ では評価範囲の右側に計測点となる相関係数の極大値が観察できる。また、 $n=39$ では評価範囲の左側に計測点となる相関係数の極大値があり、 $n=75$ では再び評価領域の中心付近に計測点を観察できる。ここで、搬送方向は画像の左側から右側となるため、試料の搬送巻取りにより交錯点が画像右側に移動を開始した際に評価領域の中心座標は追従遅れにより、交錯点の左側に位置することになる。図 5.9, 5.10 より、搬送方向となる X 座標については $n=23$ の探索範囲画像では交錯点より左側で負の方向の誤差、 $n=39$ の探索画像では、交錯点より右側で正の方向の誤差となることがわかる。

(Sample-2)

図 5.11 に、Sample-2 の初期画像における $P_{87,1} (P_{X87,1}, P_{Y87,1}) = (708, 807)[\text{pixel}]$ から測定された $P_{87,n} (P_{X87,n}, P_{Y87,n})$ を黒線、評価領域の中心座標 $C_{87,n} (C_{X87,n}, C_{Y87,n})$ を白破線、算出したトラッキングの予測誤差 $Er_{87,n} (E_{X87,n}, E_{Y87,n})$ を示す。図 5.11 より、計測点 $P_{87,n}$ の座標は、搬送方向となる計測点の X 座標 P_X が Sample-1 よりも大きく変化し、計測点の Y 座標 P_Y の変化は小さいことがわかる。一方で、トラッキングの X 軸方向の予測誤差 E_X は Sample-1 よりも小さい。これは、図 3.32 で示したように Sample-2 は Sample-1 よりも柔軟で、伸びやすい性質から、引張り荷重に対して交錯点の変化量が小さいため、交錯点の加減速度が Sample-1 に比べ小さな値であったからである。 Y 軸方向の誤差 E_Y を比較すると、Sample-1 よりも大きな値をとっていることがわかる。これは、搬送方向に対してななめに配した糸により、試料幅方向の縮みが生じたことによる。

図 5.12 に、緑枠で探索範囲、水色枠で評価領域となる画像を抜粋し、図 5.11 で示した予測誤差の絶対値が大きくなる $n=17,53$ および、初期画像 $n=0$ と終了画像 $n=75$ を示す。同図から、 $n=1$ では評価範囲中心に計測点が位置し、 $n=23$ では評価範囲の右下側に計測点となる相関係数の極大値が観察できる。続いて、 $n=53$ では評価範囲の左上側に計測点となる相関係数の極大値があり、 $n=75$ では再び評価領域の中心付近に計測点を観察できる。Sample-1 と同様に、試料の動きに応じて、トラッキング処理の誤差が生じていることがわかる。

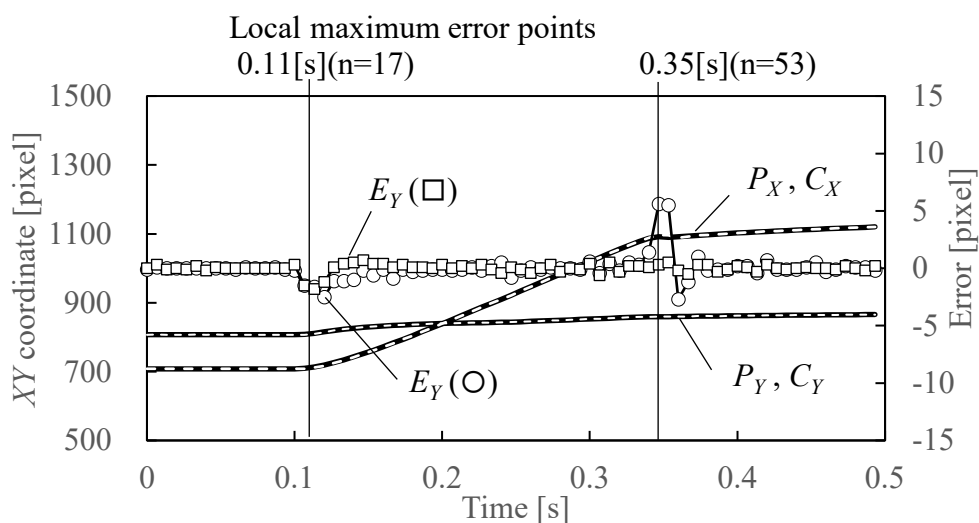


図 5.11 Sample-2 の評価領域の中心座標と予測誤差

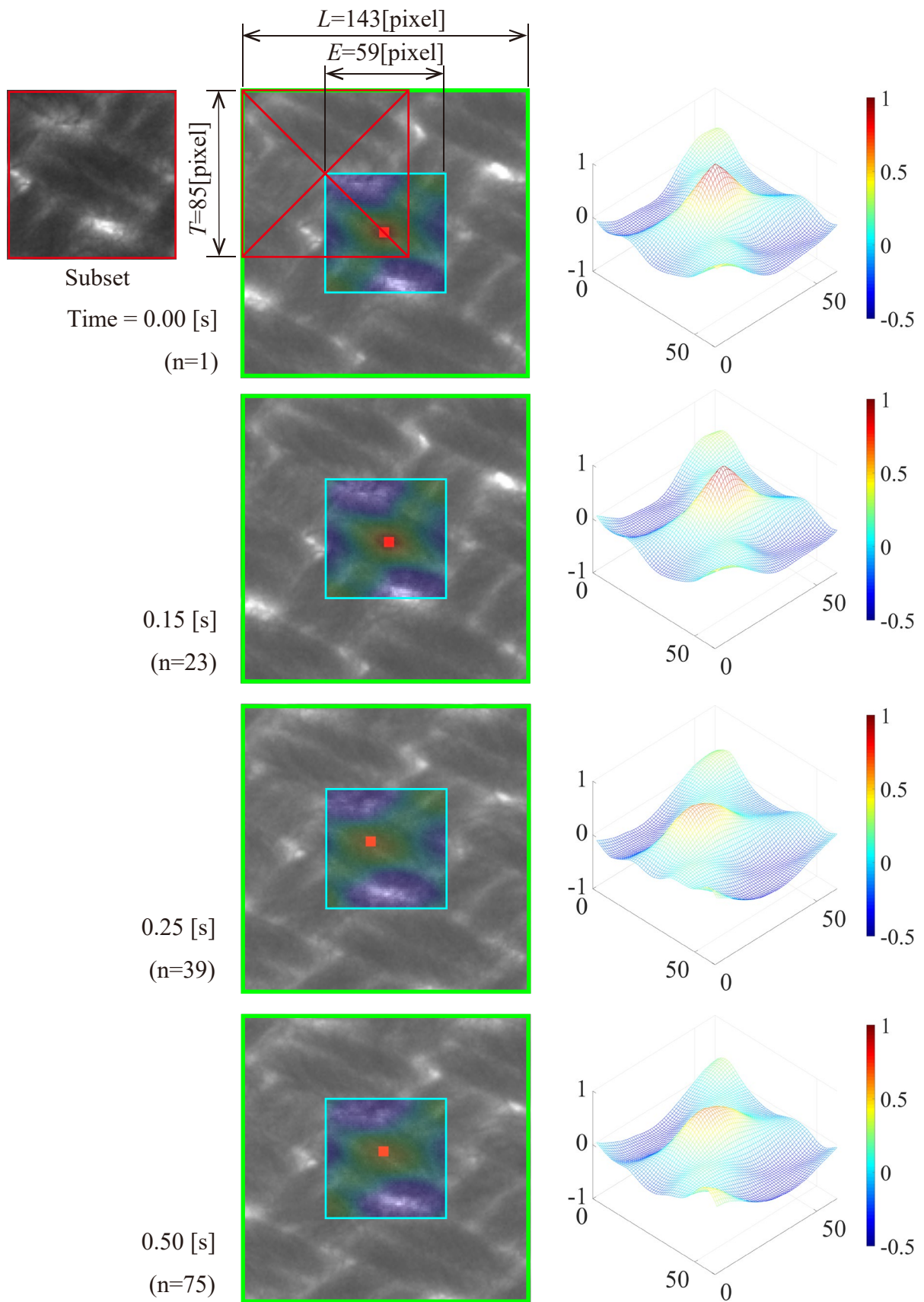


図 5.12 Sample-2 の探索範囲評における相関係数と極大値

(Sample-3)

図 5.13 に、Sample-3 の初期画像における $P_{424,1}$ ($P_{X424,1}, P_{Y424,1}$) = (1560, 737)[pixel] から測定された計測点座標 $P_{424,n}$ ($P_{X424,n}, P_{Y424,n}$)を黒線，評価領域の中心座標 $C_{424,n}$ ($C_{X424,n}, C_{Y424,n}$)を白破線，算出したトラッキングの予測誤差 $Er_{424,n}$ ($E_{X424,n}, E_{Y424,n}$)を示す．同図より，計測点 $P_{424,n}$ の座標の変化から，XY座標ともに平織の Sample-1, 2 の両試料よりも変位が小さいことがわかる．また，トラッキングの予測誤差は，撮影開始直後の $n=2$ (0.01[s])において大きな値をとる．これは，Sample-3 では，搬送中の試料をストップにより急停止させたところから撮影を開始しているためである．また，図 3.34 で示したように Sample-3 は平織試料に比べ伸長剛性が高く，ストップ停止により引張り荷重が急変するため，計測点に大きな加速度が生じるためである．

図 5.14 に，緑枠で探索範囲，水色枠で評価領域となる画像を抜粋し，図 5.13 で示した予測誤差の絶対値が大きくなる $n=2$ および，初期画像 $n=1$ を示す．図 5.14(a)には，表 5.1 に示す Sample-3 の評価領域，サブセット範囲，探索範囲を設定した場合を示し，図 5.14(b)には，Sample-3-2 の場合を示す．同図から， $n=1$ ではどちらも評価範囲中心に計測点が位置することがわかる．次に， $n=2$ では評価範囲の右側に計測点となる相関係数の極大値が観察できるが，Sample-3-2 では評価領域の端に計測点が位置することがわかる．計測点の変位は，どちらも同様に測定していることから，トラッキング処理の誤差も同様となる．このため，評価領域が小さい Sample-3-2 では誤差が大きくなり評価領域の半分以上の誤差が生じた場合に誤検出が発生する．このため，多数の交錯点で構成される完全組織をもつ織物において， $p=q=1$ とする場合には，トラッキング誤差を考慮して，撮影速度 F を考慮する必要がある．今回の条件においては，トラッキング誤差が評価領域の半分を超えることが無いことを確認しており，Sample-3-2 の条件においても測定が可能である．

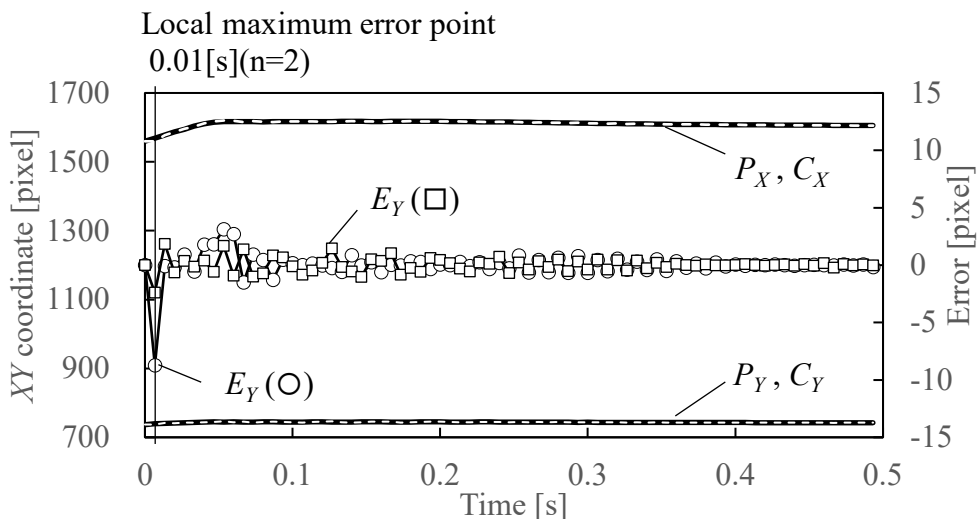


図 5.13 Sample-3 の評価領域の中心座標と予測誤差

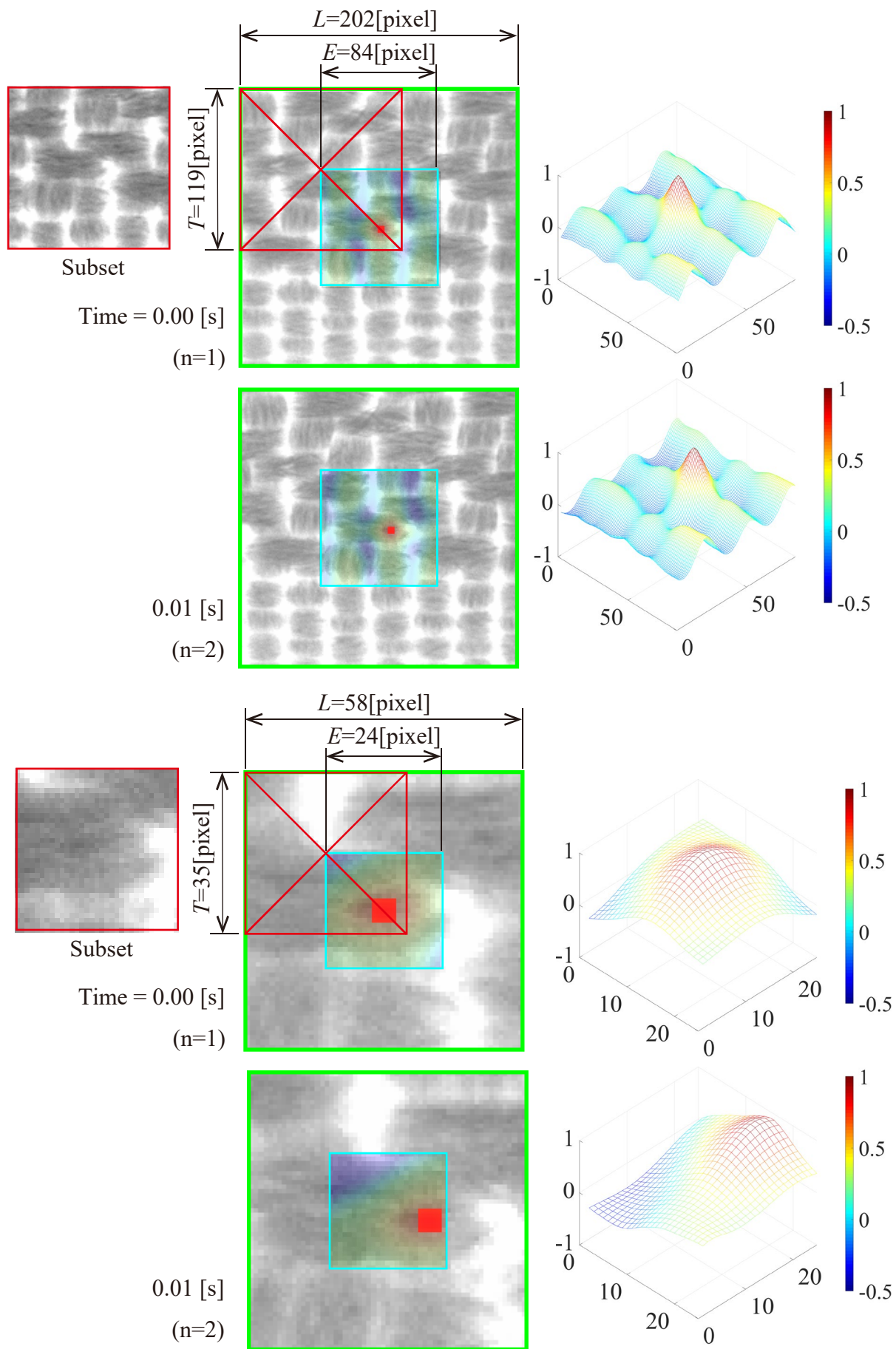


図 5.14 Sample-3 の探索範囲評における相関係数と極大値

5.4 DIC 法による交錯点の変位測定

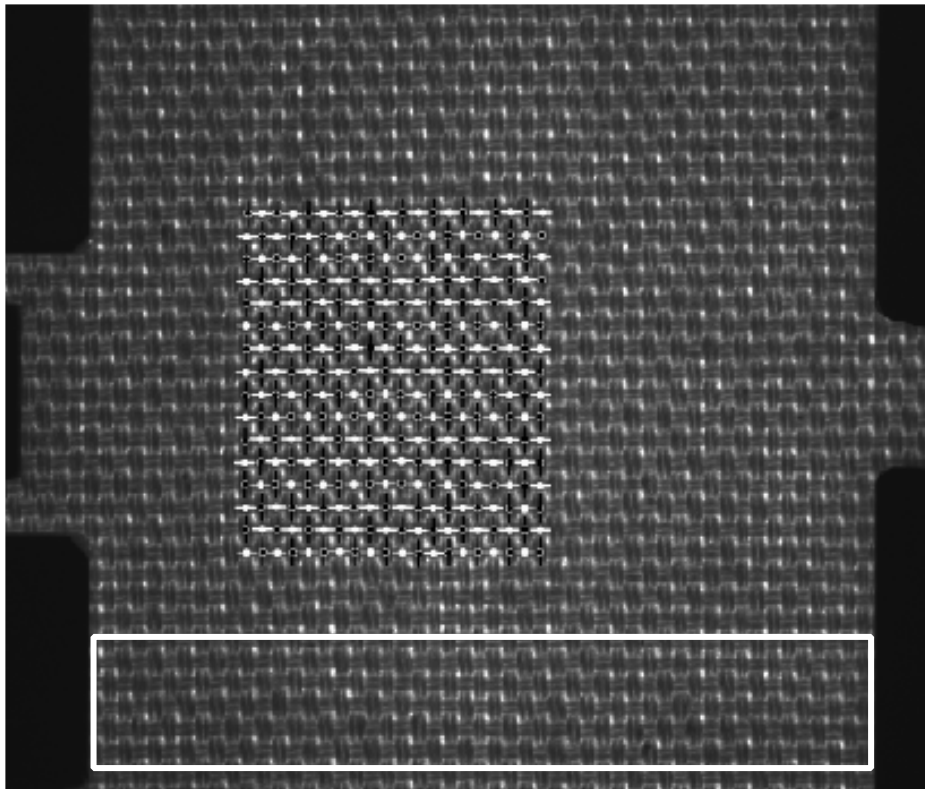
5.4.1 撮影画像の観察と DIC 法による計測点追跡

第3章で示した試験条件と撮影条件において、初期画像($n=1$)と、0.5秒後となる $n=75$ 枚目の撮影画像を、Sample-1~3 について、図 5.15~図 5.17 にそれぞれ示す。同図において、評価対象となる範囲の計測点群として、たて糸の交錯点を黒点で、よこ糸の交錯点を白点で示し、 $n=75$ 枚目の撮影画像には DIC 法により追跡した結果を示している。

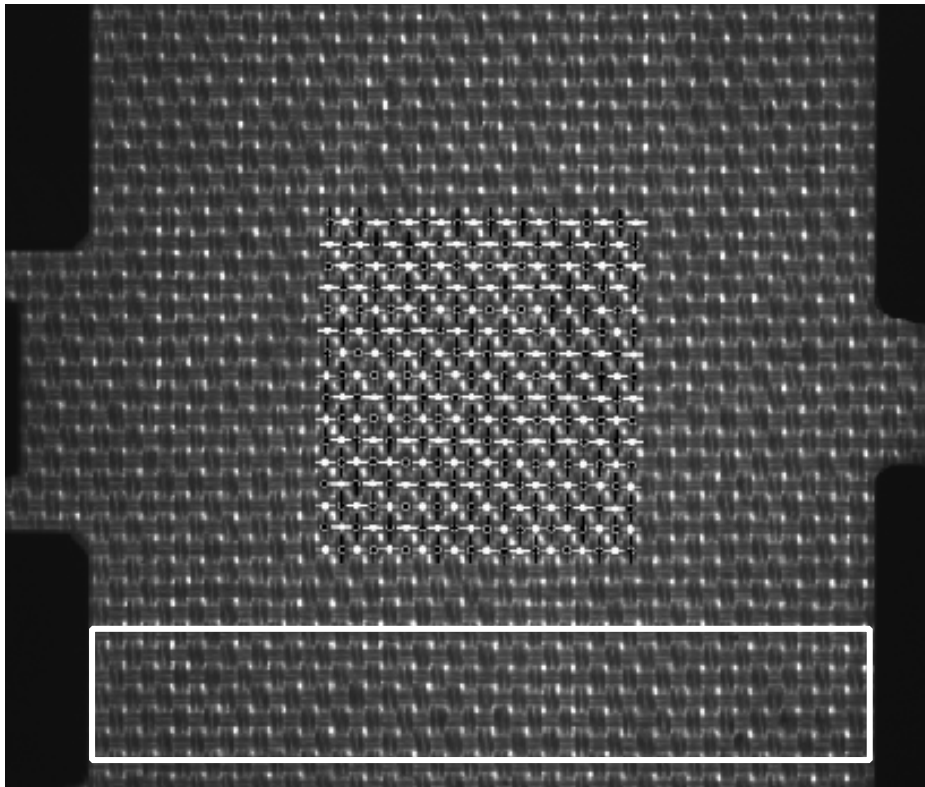
(Sample-1)

平織の試料を構成するよこ糸と搬送方向とを平行に配置した Sample-1 では、図 5.15 から、たて糸とよこ糸の交錯点群が搬送方向となる右側に移動していることが観察できる。また、同図において目視観察からは、交錯点群を示す範囲において顕著な変形は確認できない。

ここで、平織はよこ糸2本、たて糸2本の交錯点で構成される完全組織が繰り返され、織物において最も単調な構造であり、類似形状となる同種の交錯点が多数観察できる。このため、2枚の画像において目視による観察では特定の交錯点の移動先を判断することは困難である。具体的には、図 5.15(a)の移動前と0.5秒後の図 5.15(b)の移動後において、黒点と白点を示さない白枠の範囲では、移動前後となる2つの画像において同一の交錯点がどの点に移動したか判断することは困難である。これに対し、DIC法を用いて逐次、追跡結果を示した黒点と白点を手掛かりにする場合は同一の交錯点の移動先を確認でき本手法の有用性がわかる。



(a) 初期画像 ($n=1$)



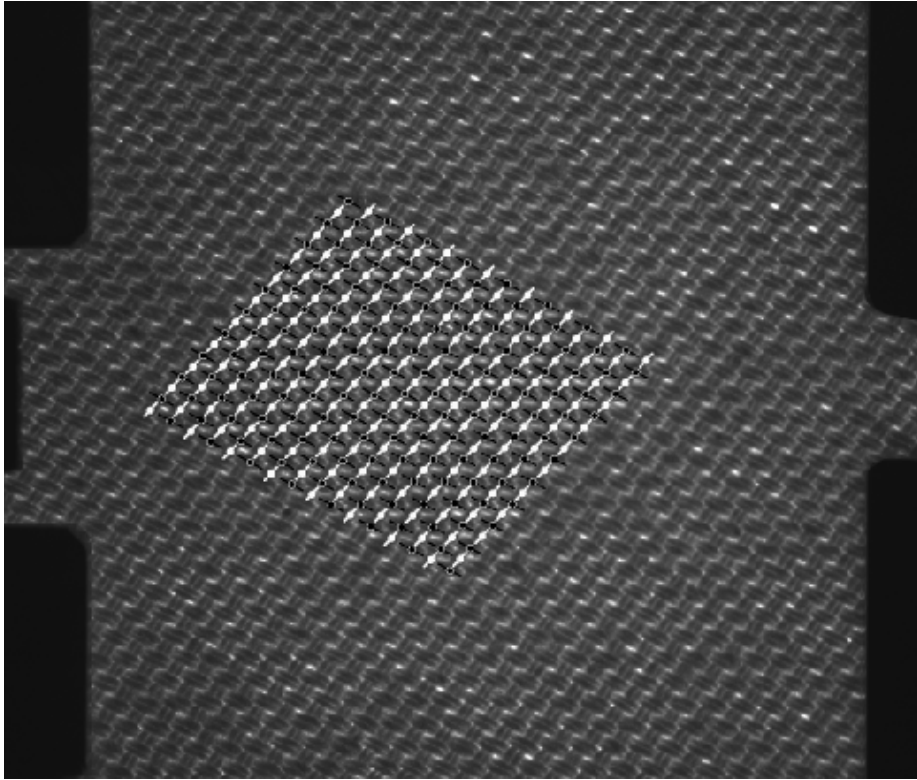
(b) 0.5 秒後の画像 ($n=75$)

図 5.15 DIC 法に用いる Sample-1 の撮影画像

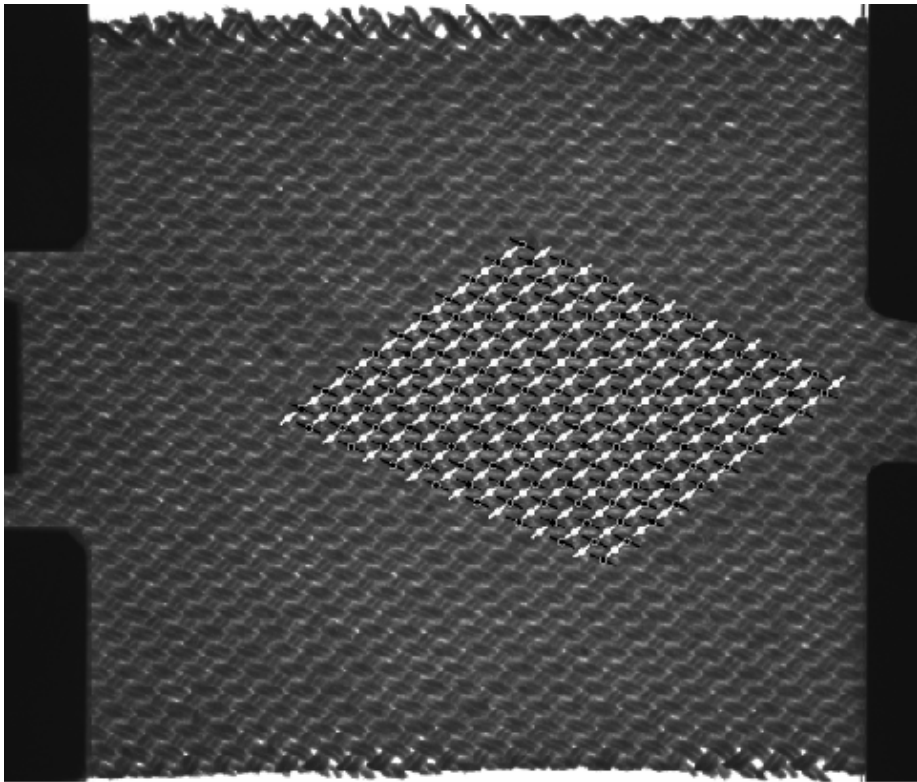
(Sample-2)

平織の試料を構成する糸方向と、搬送方向とを斜めに配置した **Sample-2** では、図 5.16 から、たて糸とよこ糸の交錯点群が **Sample-1** と同様に搬送方向となる右側に移動していることが確認できる。同図から、引張り荷重が作用する搬送方向に対して試料が伸びていることが、交錯点群がなす形状の変形から観察できる。

さらに、**Sample-2** は **Sample-1** と同一の試料であるものの、試料に張力が作用する搬送方向と糸方向を斜めに配したことにより、試料の搬送方向における伸長剛性が低下したと考えられる。これは、図 3.32 に示した **Sample-1** と **Sample-2** の張力-変位線図からも確認できる。また、同図の交錯点群がなす形状の変形から、搬送方向に生じる伸びと同時に、搬送方向と垂直方向となる試料の幅方向では縮みが生じていることも観察できる。初期画像では、試料を裁断した幅方向の端部が観察できないが、0.5 秒後の画像では幅方向の端部が観察できることから、試料の幅方向に縮みが生じたことが確認できる。



(a) 初期画像 ($n=1$)



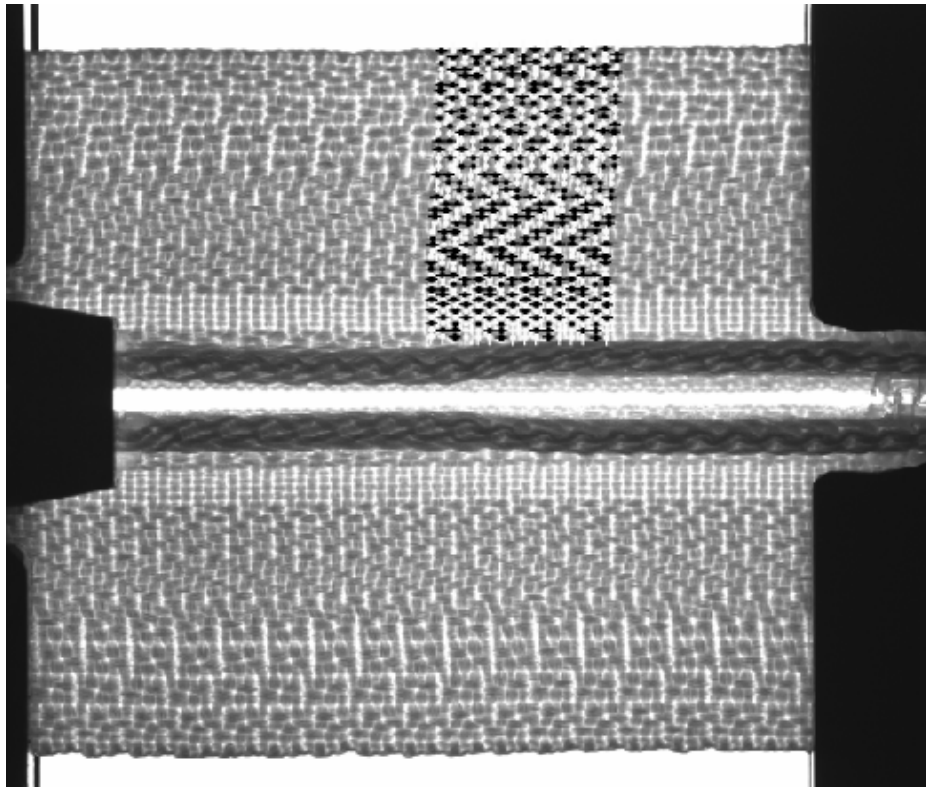
(b) 0.5 秒後の画像 ($n=75$)

図 5.16 DIC 法に用いる Sample-2 の撮影画像

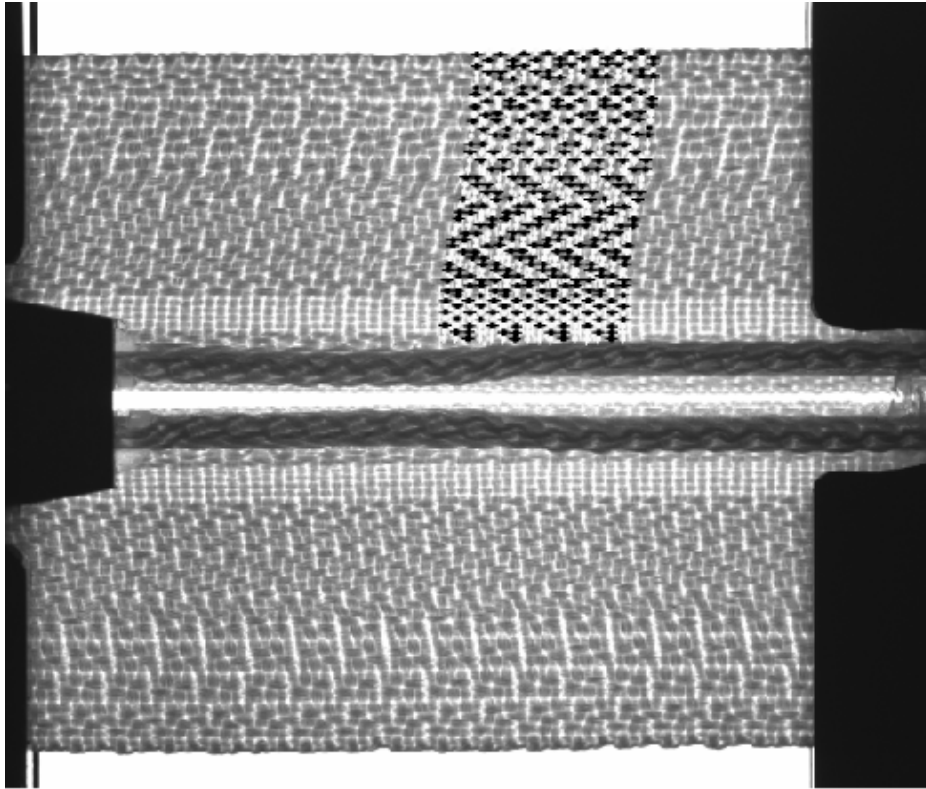
(Sample-3)

ファスナチェーンを配した Sample-3 では、図 5.17 から試料の幅方向の端部が、試料中央部に比べ大きく移動していることがわかる。このことから、試料の織物部となるテープにはせん断変形が生じていることがわかる。また、せん断変形は一様ではなく、テープ部の中央付近を起点として変形が始まり、幅方向端部の近傍ではせん断変形が小さくなることが観察できる。

ここで、ファスナのテープは、試料中央部となるスライダが接触するエレメント付近は糸が切れにくく、テープ部の中央から端部にかけては縫製するさいに縫い付けやすいように構成されている⁽⁴³⁾。ファスナテープ部は、織組織を意図して複雑に変えており、組織の構成に依存して、せん断変形が試料内部で一様ではない状態となる。織物を構成する織組織の要素となる交錯点を起点としてせん断変形が生じると考えられており^(12-14,44)、交錯点を計測点として設定した変形測定は有用といえる。



(a) 初期画像 (n=1)



(b) 0.5 秒後の画像 (n=75)

図 5.17 DIC 法に用いる Sample-3 の撮影画像

5.4.2 DIC 法による変位測定結果

第4章で示した、交錯点の検出に用いるテンプレート画像について Sample-1, 2 においては完全組織をテンプレート画像にする方法, Sample-3 においては完全組織の一部をテンプレート画像にする方法を用いて検出した交錯点群を DIC 法の計測点に用いて変位測定を行った。

各試料で検出した全ての交錯点ごとに変位を求め、第6章で示す織物の変形評価に用いる。本節では、測定した交錯点群の平均化した合成変位と、同期測定したトルクから算出した張力をあわせて変位測定結果を確認する。

図 5.18, 図 5.19 に、平織の Sample-1, 2 において、平均化した合成変位と 0.0, 0.4[s] の評価領域内の画像および相関係数分布を示す。同図より、機械動作により生じた張力に対応し計測点変位の時間変化が確認でき、張力がピークを示した後は、変位の変化量が小さくなっていることがわかる。また、変位の変化が小さくなった後の 0.4 [s]においても、探索範囲中の相関係数は顕著なピーク値を示しており、近傍にある他の計測点を誤検出することなく良好に計測点位置の測定が可能であることを確認した。この結果から、織物の変形評価を行うための交錯点変位が良好に測定できていることを確認した。

図 5.20 に、ファスナチェーンの Sample-3 について平均化した合成変位と 0.0 秒, 0.4 秒の評価領域内の画像および相関係数分布を示す。同図より、機械動作により生じた張力に対応し計測点変位の時間変化が確認でき、張力がピークを示した後は、変位の変化量が小さくなっていることがわかる。また、変位の変化が小さくなった後の 0.4 [s]においても、探索範囲中の相関係数は顕著なピーク値を示しており、近傍にある他の計測点を誤検出することなく良好に計測点位置の測定が可能であることを確認した。この結果から、織物の変形評価を行うための交錯点変位が良好に測定できていることを確認した。

5.5 結言

本章では、織物の交錯点を計測点とした DIC 法の演算手法およびパラメータの設定方法について詳述するとともに、同 DIC 法の有用性を、3つの試料で実証した。本論文で提案する DIC 法のパラメータ設定を用いることで、規則性を持つ織物の撮影画像においても、誤検出の発生を抑制し、計測点変位を良好に測定できることを確認した。

本章で測定した交錯点群の変位結果を用いて、織物の変形挙動評価について次章より説明する。

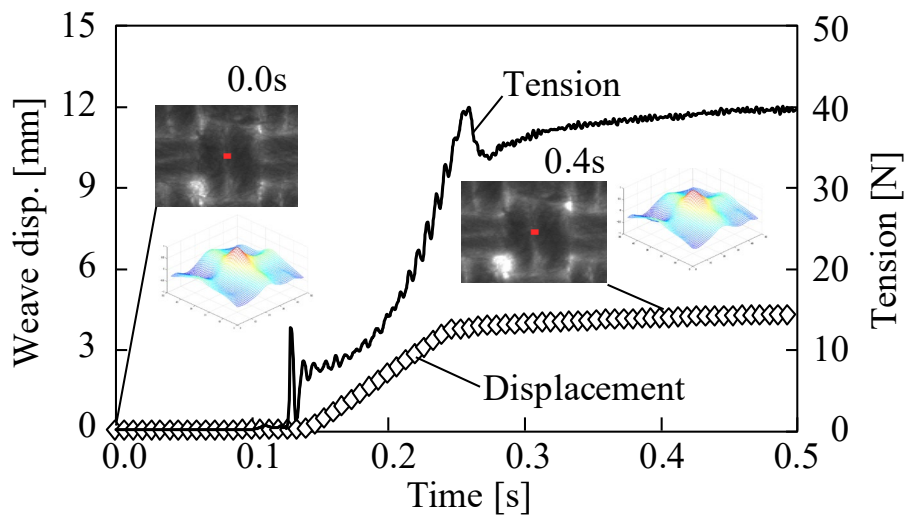


図 5.18 Sample-1 の交錯点変位と張力

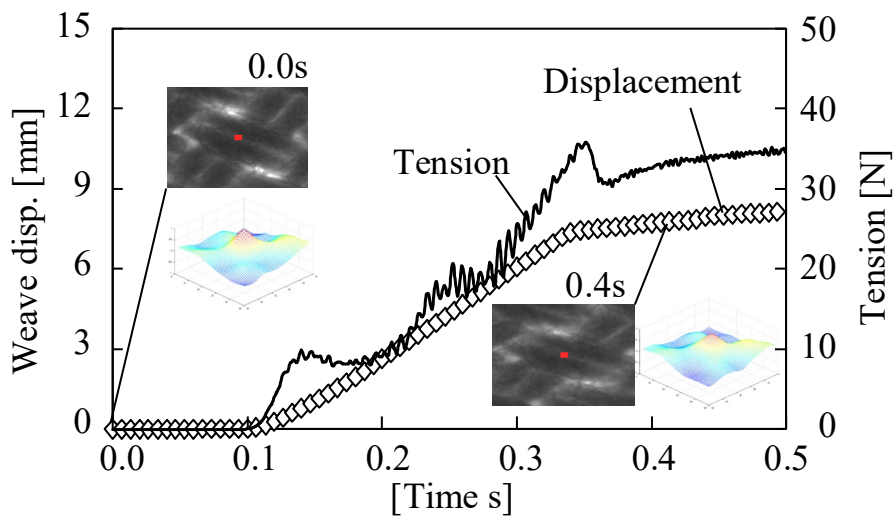


図 5.19 Sample-2 の交錯点変位と張力

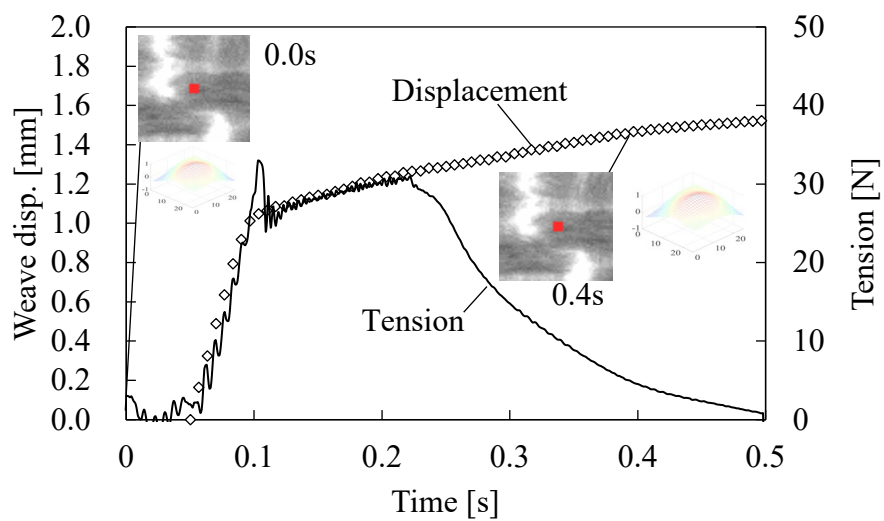


図 5.19 Sample-2 の交錯点変位と張力

第 6 章 織物の変形評価方法

6.1 緒言

本論文では交錯点をたて糸上とよこ糸上ごとに分離して測定しているため、布を構成するたて糸およびよこ糸を基準とした布の変形評価が可能となる。

本章では、評価対象となる交錯点群について、DIC 法により第 5 章で測定した交錯点群の変位を用いて、布の変形挙動を評価する。まず、織物の評価値として糸の配向角、糸の密度、糸の伸長率の算出方法を示す。つぎに、DIC 法により測定した変位データより各評価値の算出結果を示し、織組織が引張方向と傾いている状態や織組織が不均一な状態であっても、提案方法により布の変形を随時測定できることを示す。

6.2 変形評価値の算出方法

DIC 法により測定した各交錯点の変位から、各画像において、たて糸とよこ糸の配向角 θ [°]、たて糸とよこ糸の伸長率 λ_{warp} , λ_{weft} [mm/mm] および糸密度 D_{warp} , D_{weft} [1/mm] を図 6.1 に従い算出する。なお、たて糸とよこ糸の伸長率 λ_{warp} , λ_{weft} は、変形後の距離を初期画像における初期の距離で除すことで算出する。

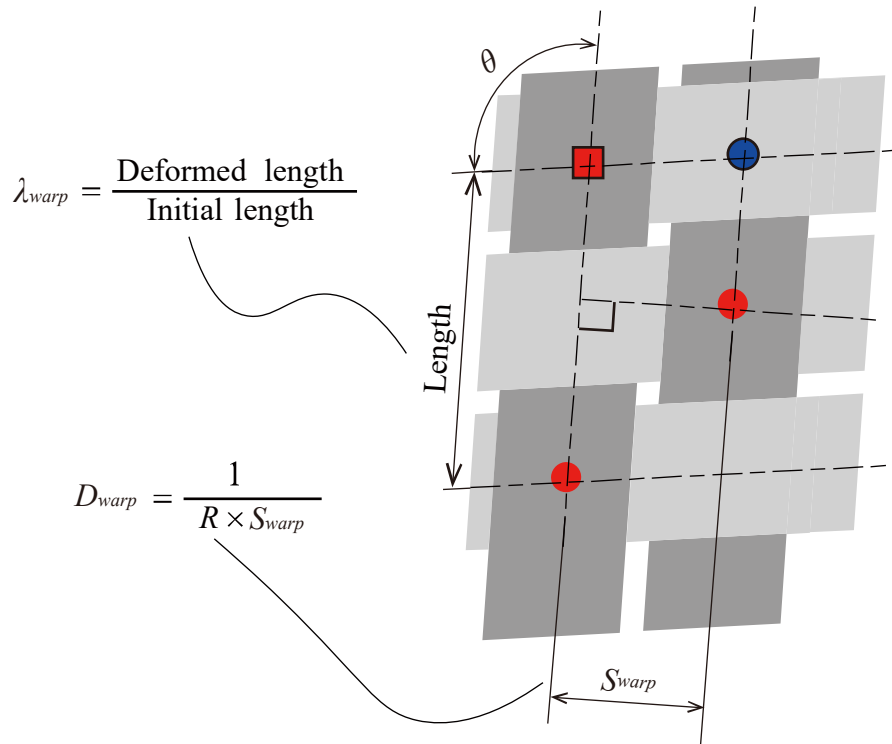


図 6.1 織物の変形挙動の評価値

6.3 変形の評価結果

(Sample-1)

変形挙動の分析結果を図 6.5～図 6.10 に示す。図 6.5 は配向角，図 6.7 はたて糸およびよこ糸の糸密度，図 6.9 は伸長率について，それぞれ全計測点を平均した値の時間変化を示す。また，図 6.6，図 6.8，図 6.10 では，0.1, 0.2 および 0.3 [s]における配向角，糸密度および伸長率を撮影画像に重ねて表示している。

Sample-1 はよこ糸を引張方向とほぼ一致させているため，図 6.5，図 6.6 より，張力増加に伴う配向角の変化は小さく，初期状態から 1 [°]未満の変化となっている。図 6.7，図 6.8 より，引張方向と一致するよこ糸に伸びが生じており，引張方向と直交するたて糸は縮んでいることがわかる。また，図 6.9，図 6.10 より，張力増加にともない，よこ糸密度は増加し，たて糸密度は低下している。

ここで，伸長率と糸密度の結果から，よこ糸は伸びることにより，たて糸の間隔が粗になり糸密度は低下すると同時に，たて糸は縮むことにより，よこ糸の間隔が密になり糸密度は増加したといえる。また，図 6.5 より，配向角に変化が無いことから，布にせん断変形は発生せず，図 6.8 より，糸の伸長状態は布内で一様に変化していることがわかる。また，図 6.10 より，初期状態から糸密度には布内での空間的な偏りがみられ，負荷前後においても偏りを維持したまま，変形していることがわかる。

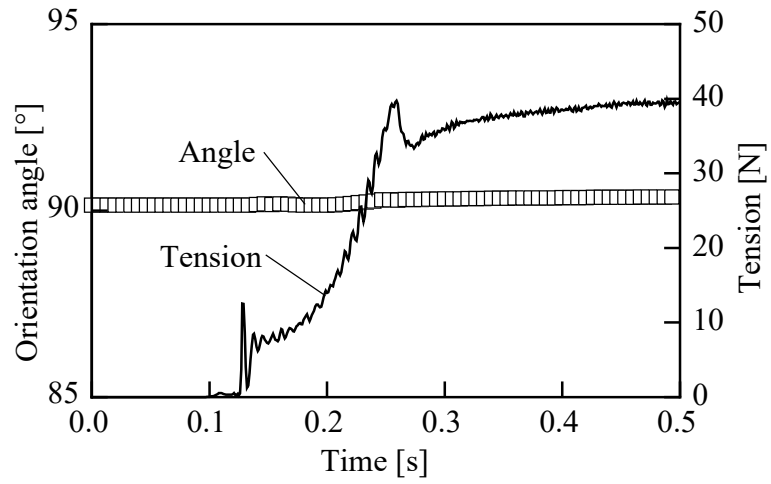


図 6.5 Sample-1 の配向角の平均値の変化

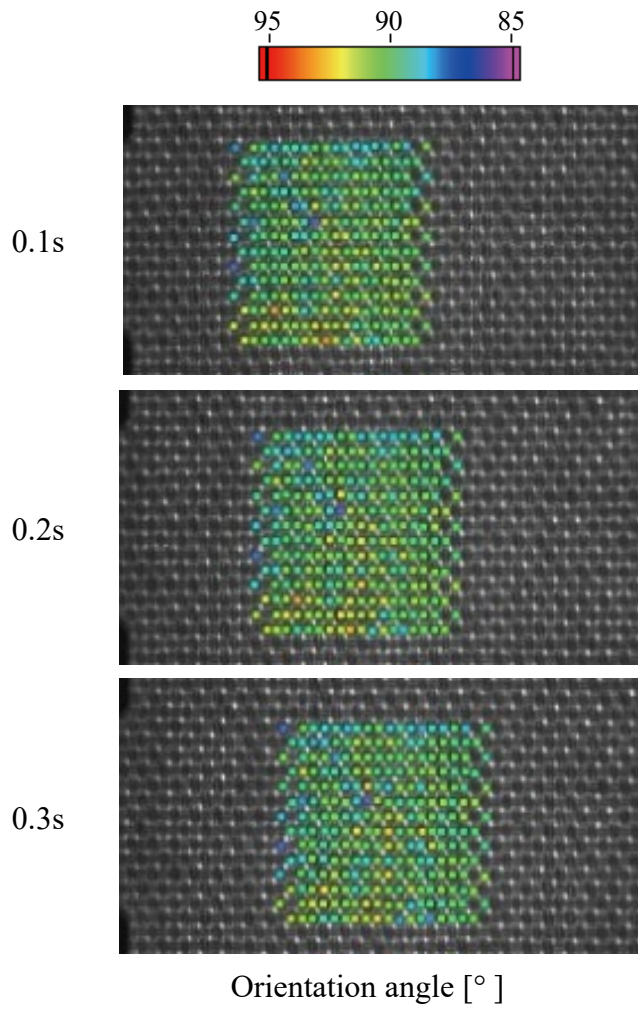


図 6.6 Sample-1 の配向角変化の様子

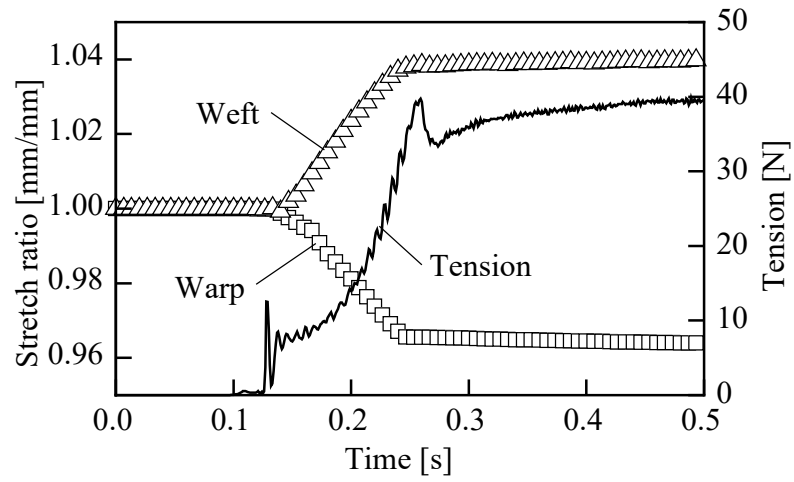
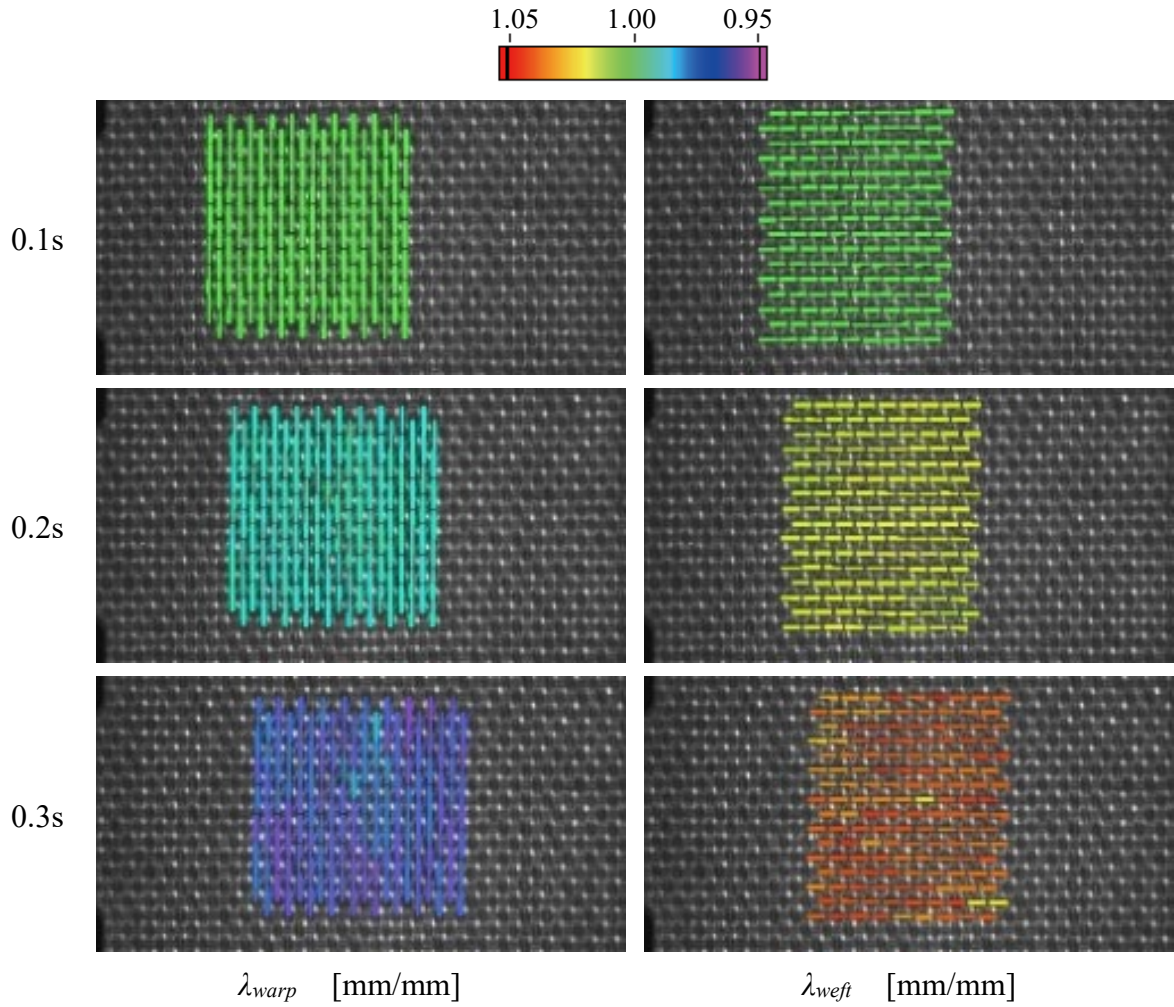


図 6.7 Sample-1 の伸長率の平均値の時間変化



λ_{warp} [mm/mm]

λ_{weft} [mm/mm]

図 6.8 Sample-1 の伸長率変化の様子

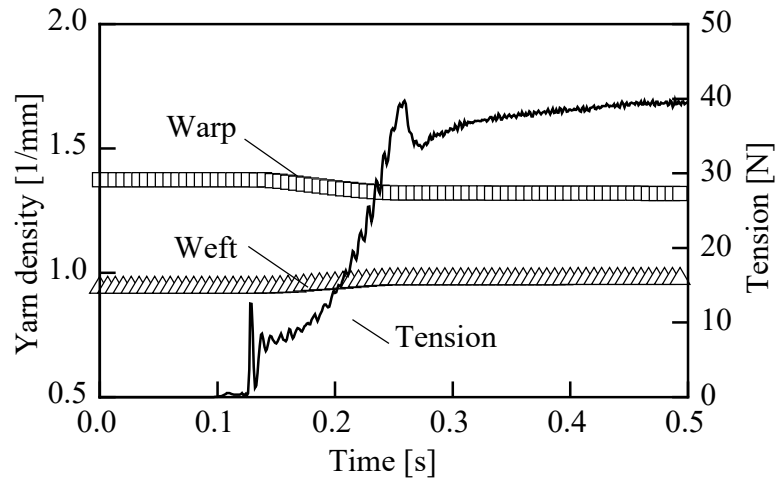


図 6.9 Sample-1 の糸密度の平均値の時間変化

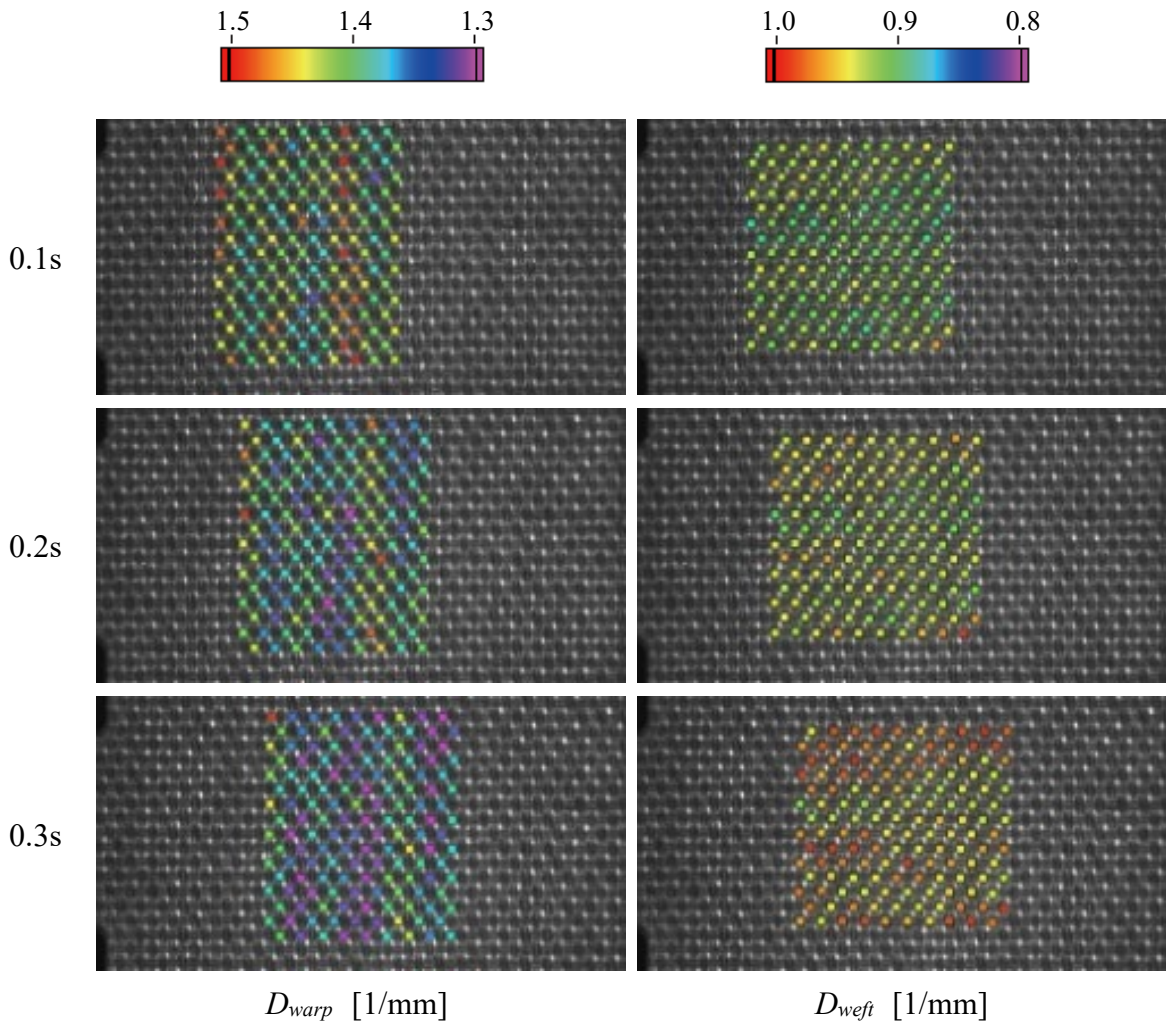


図 6.10 Sample-1 の糸密度変化の様子

(Sample-2)

よこ糸を引張方向に対して約 $45 [^\circ]$ 傾けて配置した Sample-2 の分析結果を図 6.11～図 6.16 に示す。図 6.11 は配向角，図 6.13 はたて糸およびよこ糸の糸密度，図 6.15 は伸長率について，それぞれ全計測点の平均値の時間変化を示す。また，図 6.12，図 6.14，図 6.16 では，0.1, 0.42 および 0.4 [s]における配向角，糸密度および伸長率を撮影画像に重ねて表示している。

Sample-2 では，図 6.11 に示すとおり，引張負荷前の初期状態からたて糸とよこ糸の配向角は $105 [^\circ]$ となっており，初期状態においてせん断変形が生じており，荷重増加にともない配向角が増加しせん断変形が進む。また，図 6.12 より，布内での配向角の分布に大きな偏りは生じていない。負荷前において，たて糸は引張方向との角度が約 $30 [^\circ]$ とよこ糸と比べ小さいため，図 6.13，図 6.14 より，よこ糸よりも大きな伸長率となっていると予測できる。また，図 6.14 より，たて糸，よこ糸ともに，移動側（画像右側）で伸長率が大きくなっており，不均一な変形が生じていることがわかる。図 6.15，図 6.16 より，たて糸，よこ糸ともに荷重増にともない糸密度が増加しており，引張方向との角度が小さいたて糸の方が，糸密度の増加率が高くなっている。また，初期状態から布内での糸密度の空間的な偏りがみられ，負荷前の糸密度の偏りを維持しながら変形していることがわかる。

以上に示したように，たて糸とよこ糸上の交錯点を DIC 法の計測点とすることで，たて糸とよこ糸を基準として布の変形を評価できた。すなわち，提案方法により，初期状態において，織組織が引張方向と傾いている場合や織組織が不均一な状態であっても，たて糸とよこ糸の配向角，たて糸密度およびよこ糸密度を随時測定することができる。

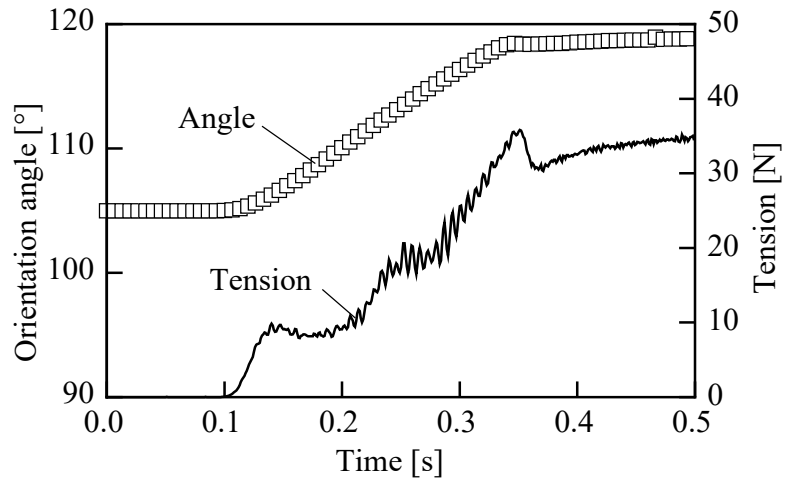


図 6.11 Sample-2 の配向角の平均値の時間変化

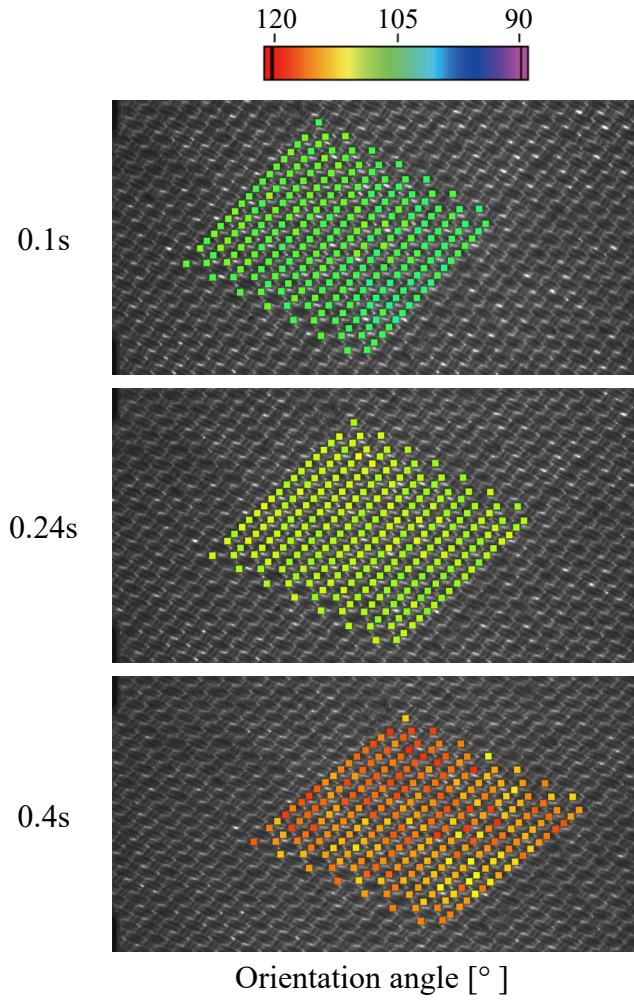


図 6.12 Sample-1 の配向角変化の様子

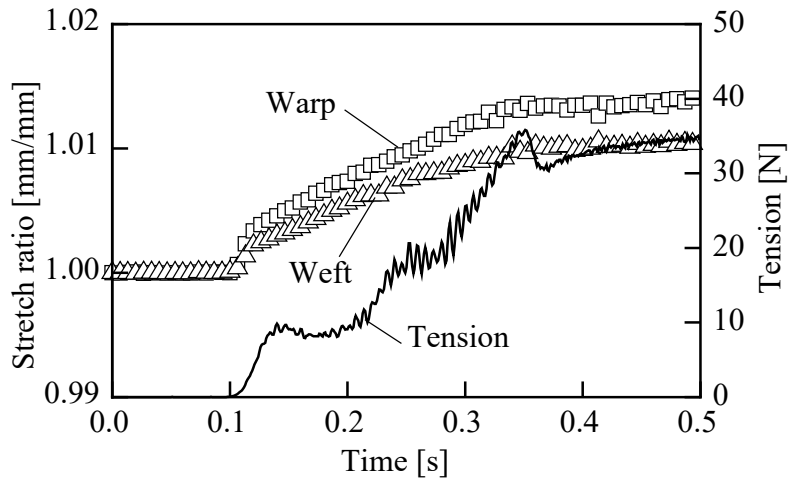
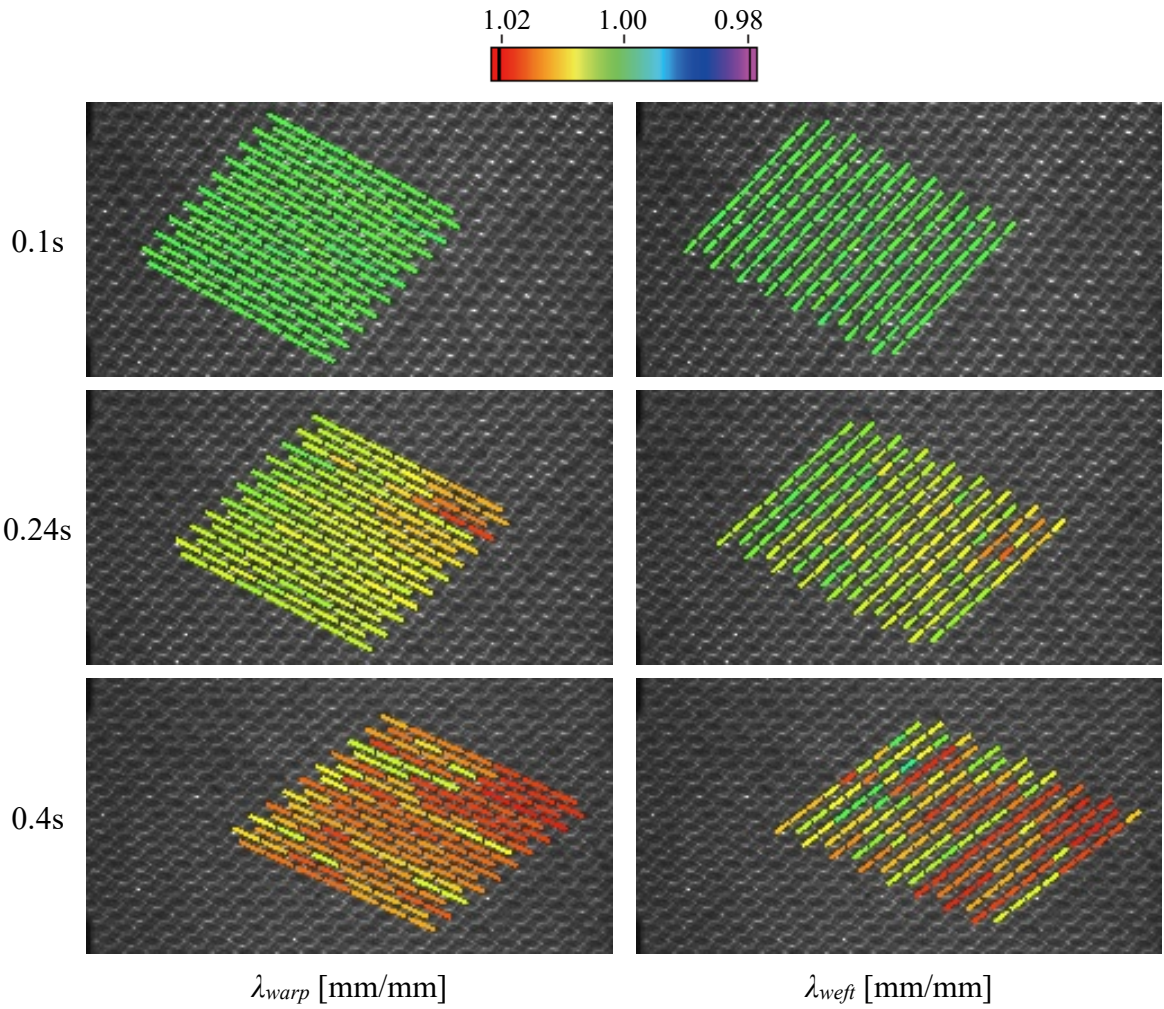


図 6.13 Sample-2 の伸長率の平均値の時間変化



λ_{warp} [mm/mm]

λ_{weft} [mm/mm]

図 6.14 Sample-2 の伸長率変化の様子

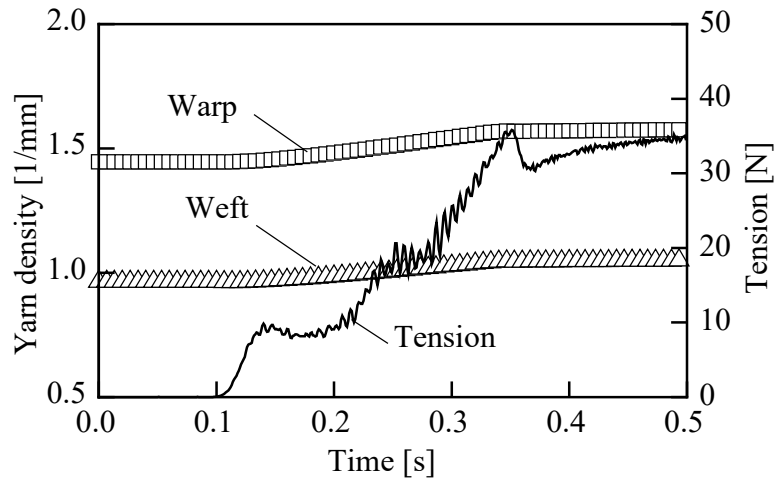


図 6.15 Sample-2 の糸密度の平均値の時間変化

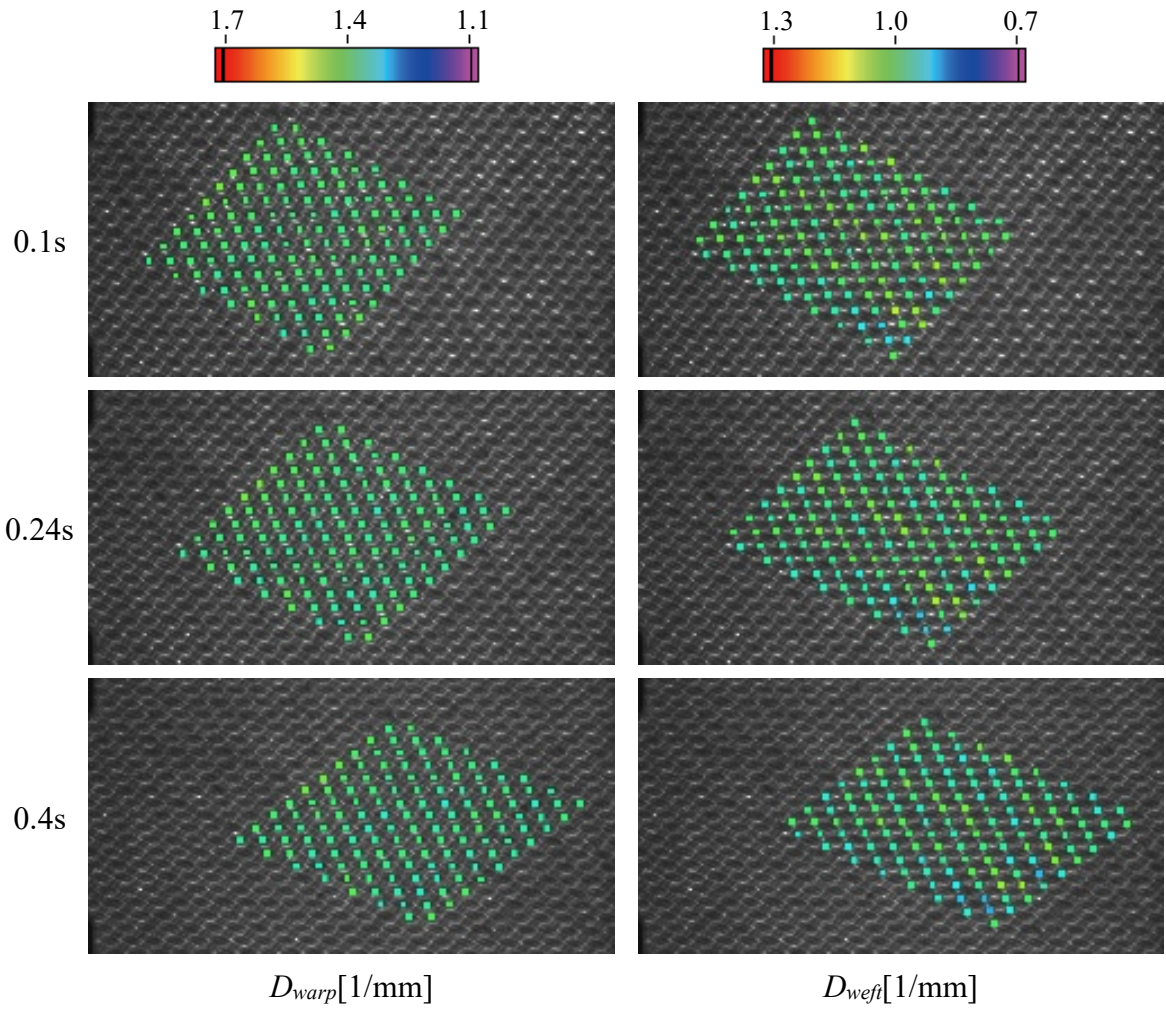


図 6.16 Sample-2 の糸密度変化の様子

(Sample-3)

Sample-3 であるスライドファスナのテープについて分析結果を図 6.17～図 6.22 に示す。ただし、試料の撮影画像は 0.1 秒を初期画像としている。図 6.17 は配向角，図 6.20 はたて糸およびよこ糸の糸密度，図 6.21 は伸長率について、それぞれ全計測点の平均値の時間変化を示す。また、図 6.18，図 6.20，図 6.22 では、0.1, 0.3 および 0.5 [s]における配向角，糸密度および伸長率を撮影画像に重ねて表示している。

図 6.17 より、張力の上昇と同時に配向角の平均値が大きく変化していることがわかる。また、図 6.18 より変化には偏りが観察できる。さらに、斜めに变形している箇所と配向角が変化する箇所は合致していることが確認でき、良好に測定および分析できている。

図 6.19 より、よこ糸の伸長率の平均値は張力の減少と共に小さくなっていることが確認できる。また、図 6.20 より、伸長率の空間分布は一様であることが観察できる。

図 6.21 より、糸密度の平均値は張力変化に対し小さな変化になっていることが確認できる。また、図 6.22 より、たて糸の糸密度は一様である一方で、よこ糸の糸密度には空間的な偏りが観察できる。この結果から、ファスナテープにはよこ糸の密度に偏りがあり、この糸密度の偏り部分でせん断変形が発生しやすく、図 6.17 に示されるように配向角の一部に大きな変化が発生していると考えられる。

以上のことから、ファスナテープのように複雑な織組織が組み合わさる布においても提案手法による測定に基づき分析し、布の動的な変形状態を評価できるといえる。

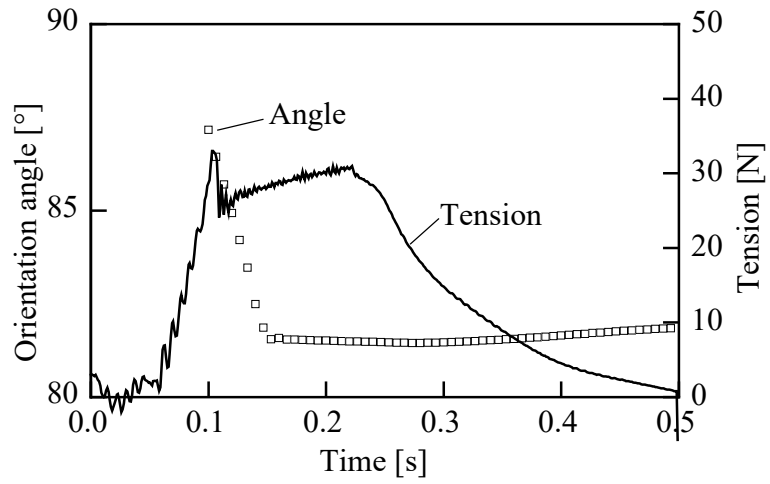


図 6.17 Sample-3 の配向角の平均値の時間変化

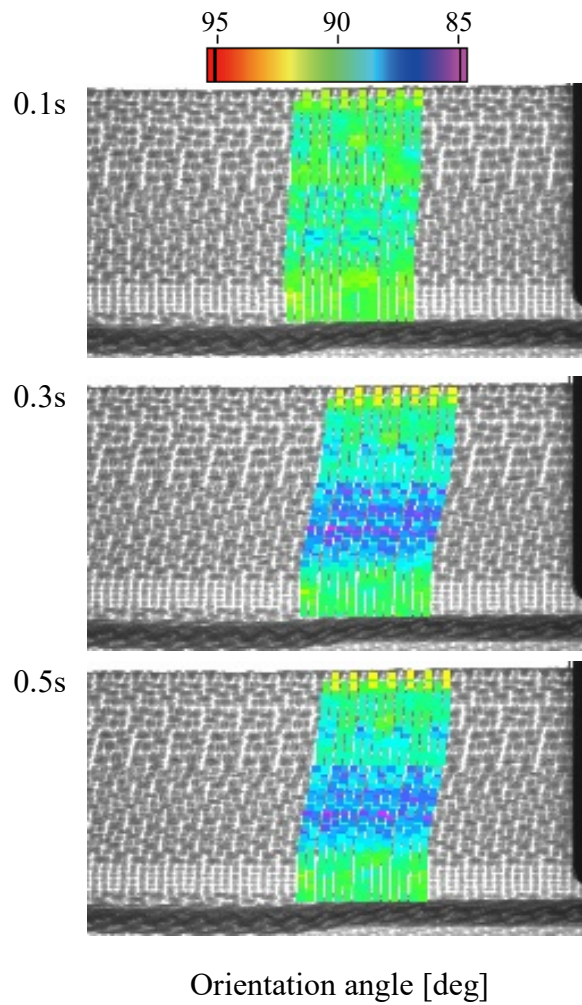


図 6.18 Sample-3 の配向角変化の様子

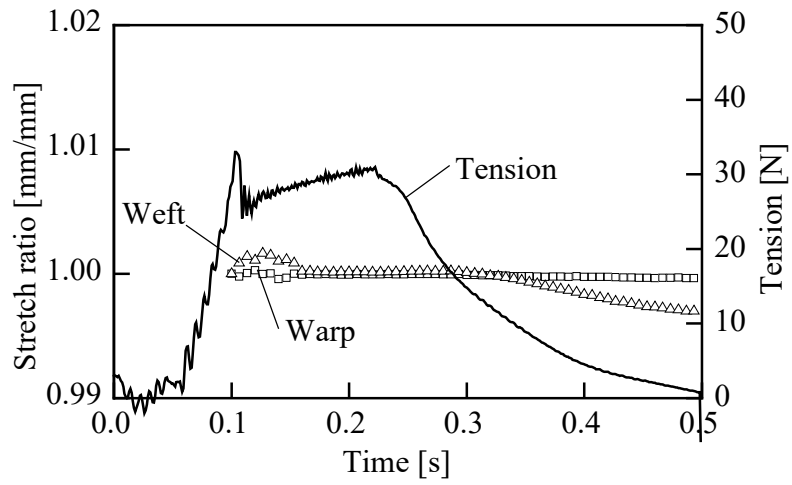


図 6.19 Sample-3 の伸長率の平均値の時間変化

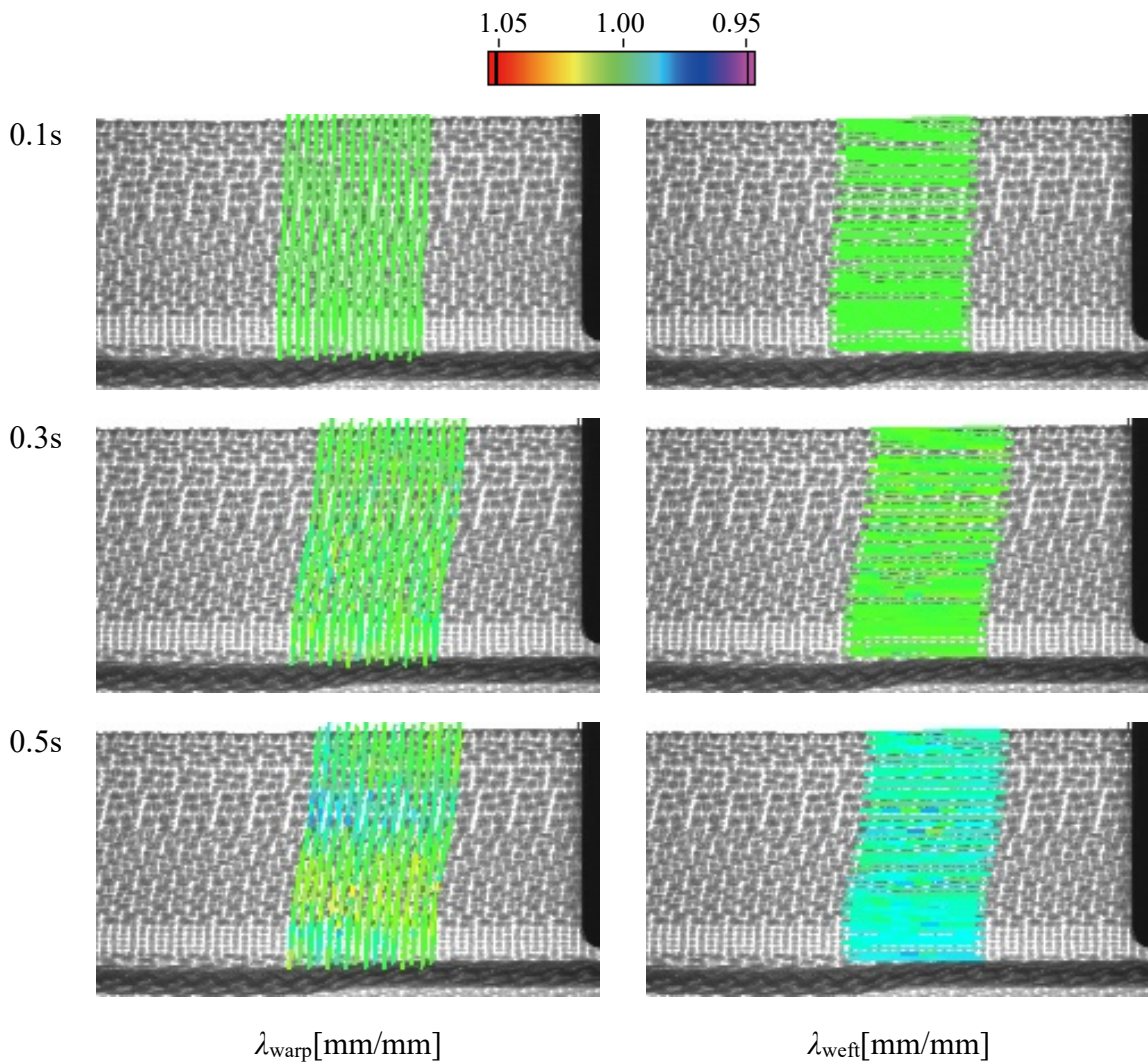


図 6.20 Sample-3 の伸長率変化の様子

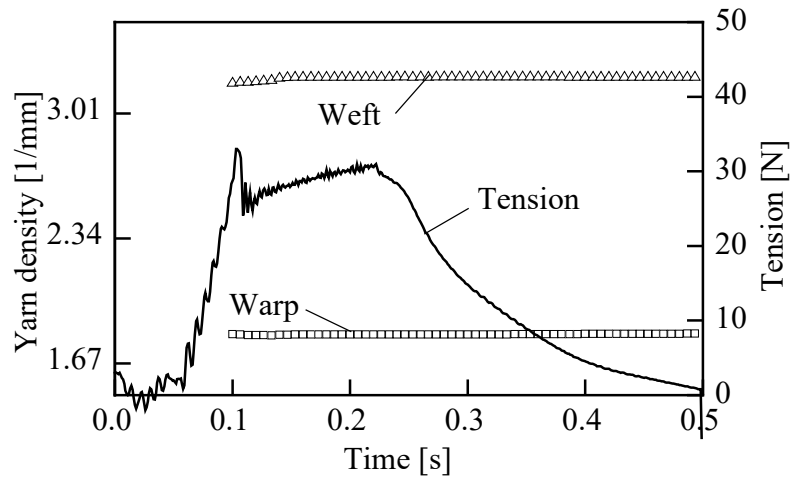
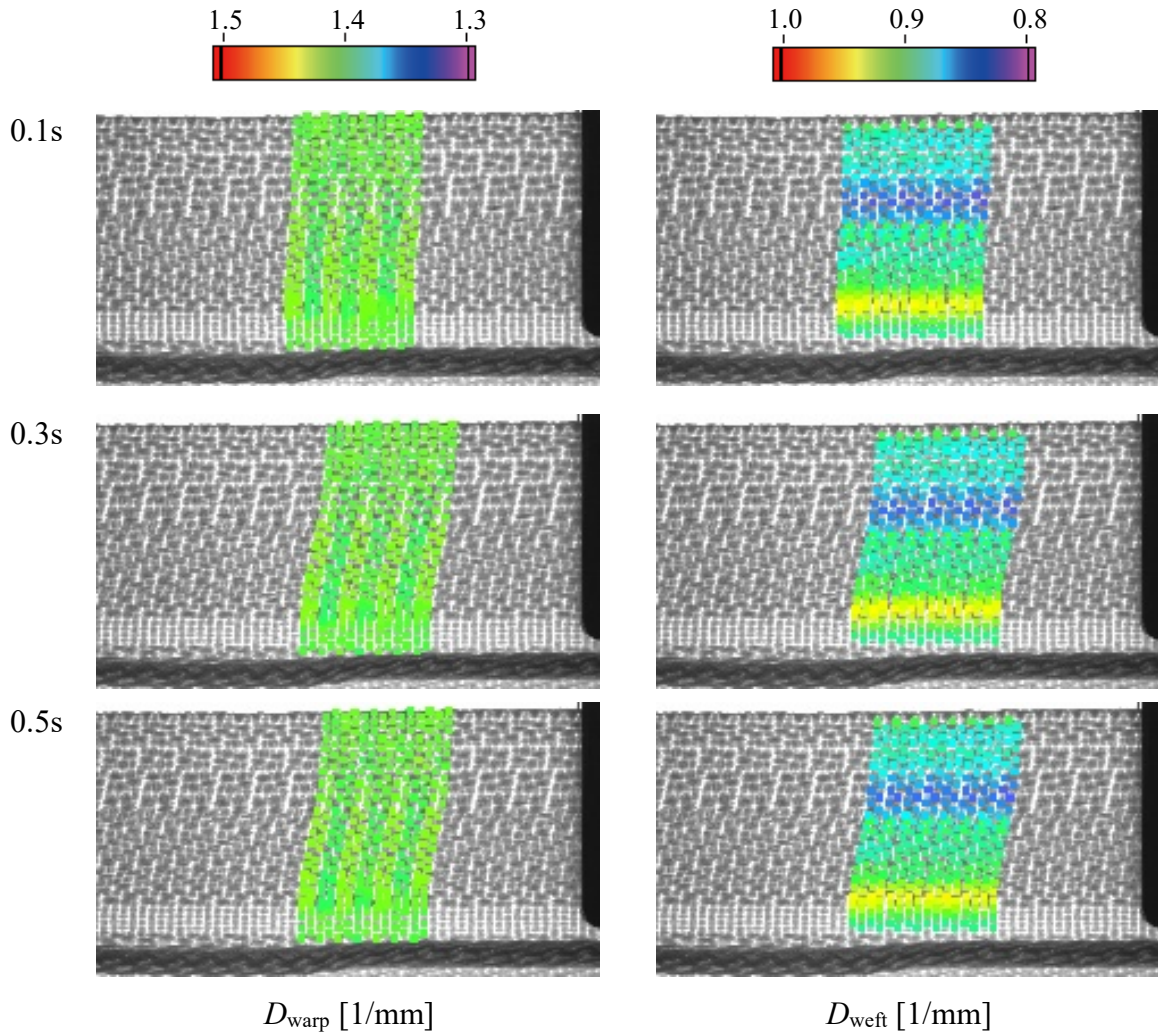


図 6.21 Sample-3 の糸密度の平均値の時間変化



D_{warp} [1/mm]

D_{weft} [1/mm]

図 6.22 Sample-3 の糸密度変化の様子

6.4 結言

本章では，本論文で提案する DIC 法による交錯点の変位測定結果を用いて，たて糸とよこ糸を基準として布変形の評価方法を示した．すなわち，提案方法により，初期状態において織組織が不均一な状態であっても，たて糸とよこ糸の配向角，たて糸密度およびよこ糸密度を随時測定することができる．したがって，織物を構成する織組織を基準とした布の変形評価から提案手法の有用性が示された．

第7章 結論

本論文では、生産工程における布の変形状態の非接触測定を可能とするために、糸の交錯点を計測点とした DIC 法による布の変形測定法を提案した。同方法では、布の織組織の周期性を利用することで、テンプレートマッチングにより糸の交錯点の中心を検出する。さらに、検出した糸の交錯点の変位を周期性による誤検出を回避する DIC 法により測定する。

交錯点の検出方法として、交錯点上のたて糸およびよこ糸をテンプレートにする場合、および完全組織をテンプレートにする場合の 2 種類の方法を提案し、両方法とも交錯点を良好に検出できることを示した。交錯点を計測点とする DIC 法においては、計測点検出結果より算出される糸間隔などの初期情報により、隣接する類似の交錯点を誤検出が発生しないように評価領域を設定することで、各計測点の変位を測定可能とした。さらに、同方法においては、よこ糸上とたて糸上の交錯点を独立して検出できるため、布の変形をたて糸とよこ糸を基準として評価可能とした。

平織布の搬送を模擬した試験を実施し、提案手法に基づき、布を構成する糸の配向角、伸び率および糸密度の空間分布と時間変化を測定した。同試験結果により、初期状態において織組織にゆらぎがある場合でも、たて糸とよこ糸の配向角、たて糸密度およびよこ糸密度を随時測定することができることが示され、提案手法の有用性が確認された。本論文で示した測定方法は、周期性のある織物組織からなる織物の動的な変形評価を自動的かつ連続的に行うものであり、一般的な織物布の変形測定にも利用できる。これまでに、布の自動搬送により衣服を自動製造する縫製機が開発されている⁽⁴⁵⁾。しかし、製造時の布の変形状態と加工品質の関係を明らかにすることは、変形測定の難しさから実現できていない。すなわち、提案方法はインラインでの測定が可能となるため、柔軟な布の変形状態と加工品質の統計的な評価を実現し、繊維製品の生産効率や品質の向上に寄与することが期待できる。

また、生産工程において搬送される布生地は、3 次元的に運動する場合もあり、布変形の 3 次元測定が必要となる。今後は、本論文で示した測定方法を 3 次元測定に拡張し、生産工程のインライン測定へ応用を検討する予定である。

参考文献

- (1) 日本産業標準調査会, スライドファスナ : JIS S 3015 (2019)
- (2) YKK Corporation Website 「ファスナーのきほん」 :
<https://www.ykkfastening.com/japan/support/tips/002.html> (参照日 2021 年 1 月 2 日)
- (3) YKK Corporation Website 「YKK なるほどマメ知識」 :
https://www.ykk.co.jp/japanese/ykk/mame/fas_01.html (参照日 2021 年 1 月 2 日)
- (4) Shimono, T: Stringers arranged side-by-side when fastened, e.g. at least partially superposed stringers, Japanese patent disclosure 4762113 (2006).
- (5) Kuze, K.: Method and apparatus for producing fastener chain with opening insertner, Japanese patent disclosure H7-75604 (1995).
- (6) Kameda, Y., Matsumura, S. and Takamura, T.: Device for detecting meshing state of slide fastener element row, Japanese patent disclosure 2004-329677 (2004).
- (7) ApparelX News Website 「ファスナー手配の裏側～加工の現場・詰めるって何?～」:
<https://www.excy.co.jp/wordpress/?p=913.html> (参照日 2021 年 1 月 2 日)
- (8) Kuze, K.: Slide fastener manufacturing method, Japanese patent disclosure H07-44884 (2009)
- (9) Kuze, K.: Method of manufacturing slide fastener, Japanese patent disclosure H07-67401 (2010)
- (10) Oosaki, T.: Finishing equipment for slide fasteners, Japanese patent disclosure H06-75522 (2007)
- (11) Jauffrès, D., Sherwood, J.A., Morris, C.D. and Chen, J.: Discrete mesoscopic modeling for the simulation of woven-fabric reinforcement forming, *Int. J. Mater. Form.*, 3-3 (2009), S1205–S1216.
- (12) S, Yamauti, . Shearing Deformation of Fabrics *J. Text. Mech. Soc. Japan* 21.11 (1968): P753-P761.

- (13) Niwa, Masako, Sueo Kawabata, and Hiromichi Kawai. Torque required for changing intersecting angle between warp and weft yarns in shear deformation of woven fabrics. *Sen'i Gakkaishi* 26.10 (1970): 461-474.
- (14) Kawabata, S., Masako Niwa, and H. Kawai. 5—"The finite-deformation theory of plain-weave fabrics. Part III: The shear-deformation theory." *Journal of the textile institute* 64.2 (1973): 62-85.
- (15) Sutton, M.A., Wolters, W.J., Peters, W.H., Ranson, W.F. and McNeill, S.R.: Determination of displacements using an improved digital correlation method, *Image Vision Comput.*, 1-3 (1983), 133-139.
- (16) Yoneyama, S.: Displacement and strain measurement using digital image correlation (in Japanese), *J. NDI*, 59-7 (2010), 306-310.
- (17) A.S.Milani, J.A. Nemes b, R.C. Abeyaratne a, G.A. Holzapfel: A method for the approximation of non-uniform fiber misalignment in textile composites using picture frame test, *Composites, Part A* 38 (2007) 1493–1501
- (18) S.V.Lomov, Ph.Boisse, E.Deluycker, et al.: Full-field strain measurements in textile deformability studies, *Composites, Part A* 39 (2008) 1232–1244
- (19) B.Zhu, T.X.Yu, X.M.Tao: Large deformation and slippage mechanism of plain woven composite in bias extension, *Composites, Part A* 38 (2007) 1821–1828
- (20) S.M.Kraft, F.A.Moslehy, Y.Bai, A.P.Gordon: Characterization of the Orthotropic Elastic Constants of a Micronic Woven Wire Mesh via Digital Image Correlation, *Experimental Mechanics*, (2014), 54, 501–514
- (21) R.Gras, H.Leclerc, S.Roux, S.Otin, et al.: Identification of the Out-of-Plane Shear Modulus of a 3D Woven Composite, *Experimental Mechanics*, (2013), 53, 719–730
- (22) M.A.Khan, T.Mabrouki, E.Vidal-Sallé, P.Boisse: Numerical and experimental analyses of woven composite reinforcement forming using a hypoelastic behaviour. Application to the double dome benchmark, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, (2010), 378–388

- (23) Galliot, C., and R. H. Luchsinger. The shear ramp: A new test method for the investigation of coated fabric shear behaviour–Part II: Experimental validation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41.12 (2010): 1750-1759.
- (24) Colman, A. G., et al. Shear behaviour of architectural fabrics subjected to biaxial tensile loads. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 66 (2014): 163-174.
- (25) Harrison, Philip, Marcos Fernandez Alvarez, and Drew Anderson. Towards comprehensive characterisation and modelling of the forming and wrinkling mechanics of engineering fabrics. *International Journal of Solids and Structures* 154 (2018): 2-18.
- (26) Zhu, B., T. X. Yu, and X. M. Tao. "Large deformation and slippage mechanism of plain woven composite in bias extension." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38.8 (2007): 1821-1828.
- (27) Hu, Jianhui, et al. "Effects of on-axis and off-axis tension on uniaxial mechanical properties of plain woven fabrics for inflated structures." *Composite Structures* 171 (2017): 92-99.
- (28) Arikawa, S., Murata, M., Yoshida, R., Yoneyama, S., Fujimoto, K. and Omoto, Y.: Effect of subset size and gage length for measurement accuracy in digital image correlation (in Japanese), *J. JSEM*, 16-2 (2016), 162-167.
- (29) Pyzdek, Thomas, and Paul Keller. *Six sigma handbook*. McGraw-Hill Education, 2014.
- (30) Schroeder, Roger G., et al. Six Sigma: Definition and underlying theory. *Journal of operations Management* 26.4 (2008): 536-554.
- (31) Arnheiter, Edward D., and John Maleyeff. The integration of lean management and Six Sigma. *The TQM magazine* (2005).
- (32) Pepper, Matthew PJ, and Trevor A. Spedding. The evolution of lean Six Sigma. *The International Journal of Quality & Reliability Management* 27.2 (2010): 138.
- (33) Ishikawa, K., Ohnuma, I., Usuzumi, T., Tokunaga, K. and Nakajima S.: *Seni* (3rd ed.), Tokyo Denki University Press (1986), 155-157.
- (34) Tsuboaki, K., et al. : *Sinban tekisutairu seihin* , Jikkyo Shuppan Co., Ltd. (2002), 108-110.
- (35) Okutomi, M.: *Digital image processing* (2nd ed.), CG-ARTS (2020), 234-236.
- (36) H, Tamura . *Kompyuta gazoshori* Ohmsha, Ltd. (2002), 252-255.

- (37) Uneda. M., Okuhata, S. and Ishikawa, K.: Study on accuracy evaluation of deformation and strain distribution measurement using digital image correlation method (in Japanese), Trans. JSME C, 76-763 (2010), 119-126.
- (38) Airy, George Biddell. "On the diffraction of an object-glass with circular aperture." TCaPS 5 (1835): 283.
- (39) TOSHIBA TELI Website 「知っておきたい撮影レンズの基礎 ～レンズ選定編～」 : <https://www.toshiba-teli.co.jp/technology/technical/t0005-Lens-Terminology.htm>
(参照日 2021 年 1 月 2 日)
- (40) Chu TC, Ranson WF, Sutton MA, Peters WH, Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics, Experimental Mechanics, Vol. 25, pp. 232-244, 1985
- (41) Bruck Ha, Meneill SR, Sutton MA, Peters WH, Digital image correlation using Newton-Rapson method of partial-differential correlation, Experimental Mechanics, Vol. 29, pp. 261-267, 1989
- (42) Sutton MA. Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics (ed by Sharpe WN), New York : Springer, pp. 567-600, 2008
- (43) YKK Corporation Website 「YKK の技 Vol.6 テープにも工夫」 : <https://www.ykk.co.jp/japanese/ykk/tech/06.html> (参照日 2021 年 1 月 2 日)
- (44) Lomov, Stepan V., et al. Full-field strain measurements in textile deformability studies. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 39.8 (2008): 1232-1244.
- (45) Guizzo, E.: Your next t-shirt will be made by a robot, IEEE Spectrum, 55-1 (2018), 50-57.

謝辞

本論文は2018年4月から2021年3月までの3年間、金沢大学大学院 自然科学研究科 連携講座において社会人学生として在籍し取組んだ内容となります。本研究に取り組むにあたり、多くの方々に御指導、御協力を賜りました。本論文の終わりに臨み、皆様への感謝の意を表わします。

本研究において、柔軟な織物を高精度に非接触で測定するため、特に材料力学の知見に基づく最新の画像処理技術について、実験方法から論文としてのまとめ方に至るまで、多くの御指導や御助言を賜りました金沢大学 樋口理宏 准教授に深く感謝いたします。また、技術討論を通して新たな知見を共有できたことは代えがたい喜びの経験です。

学術論文の作成においては、日々の研究だけでは到達できないレベルの文章構成や表現方法について、御指導や御助言を賜りました金沢大学 立矢宏 教授、児玉昭雄 教授、喜多和彦 教授、見角裕子 准教授に深く感謝いたします。

金沢大学大学院での修学機会を与えて下さいました、YKK 株式会社 猿丸雅之 代表取締役会長、大谷裕明 代表取締役社長、池田文夫 取締役副社長をはじめ、各役員の皆様に心より御礼申し上げます。

本研究の開始において、まだ入社1年目であった私に「信じて任せる」という会社の風土のまま、暖かく背中を押して頂いた森田芳久 様、平井孝宏 様には、深く感謝しております。

そして、「失敗しても成功せよ」という理念のもと、工機技術本部 製造技術開発部 ファスニンググループ 小林喜峰 グループ長、滝山博徳 室長、富野真 リーダはじめ、仕上設備開発室の皆様より、様々なチャレンジに対して、多大なご支援を賜りましたこと、深く感謝しております。

皆様への感謝は、本研究で得た知見を礎に、社会に役立つ開発に生かすことで恩送り出来るよう、会社での業務に繋げていきたいと思っております。

末筆ながら、本論文の完成まで、社会人学生として多くの時間を修学に使う中で、4人の子供達の育児を一手に引き受けるだけでなく、私の心の支えとなってくれた妻の美恵に心から感謝の意を示し、本論文の謝辞とさせていただきます。