

## 画像処理によるストッキングの運針数計測装置の開発

## -2次元FFTによるステッチ周期のロバスト推定-

Development of a Device for Measuring Stitches per Inch in Stockings Using Image Processing  
-Robust Estimation of Stitch Periodicity by Two-Dimensional FFT-平岡 忠志<sup>\*1</sup>, 立木 準也<sup>\*2</sup>, 加藤 貴士<sup>\*2</sup>, 瀬山 定道<sup>\*2</sup>, 寺田 賢治<sup>\*3</sup>

HIRAOKA Tadashi, TACHIKI Junya, KATO Takashi, SEYAMA Sadamichi and TERADA Kenji

## 抄 録

医療用弾性ストッキングの品質保証において、運針数 (stitches per inch : SPI) の管理は不可欠であるが、従来はリネンテスターによる目視に依存し、人的負担や標準化の課題を抱えていた。本研究では、斜光照明と高解像度カメラを組み合わせた卓上型装置を試作し、画像処理により SPI を計測した。特に、曲線シームを2次曲線近似で直線化し、二次元高速フーリエ変換 (two-dimensional fast Fourier transform : 2D-FFT) によりステッチ周期を抽出することで、低コントラストや高 SPI 領域に対しても頑健な推定を実現した。412 足のサンプル評価により、誤差±2 針以内が 97%を占め、計測時間は 0.2~0.5 秒と従来比の 1/100 以下に短縮され、検査作業の省力化と標準化に有効であった。

## 1 はじめに

医療用弾性ストッキング (以下ストッキングと記す) では、運針数 (stitches per inch : SPI) が規定範囲を外れると、ステッチ間隔の過大または過小が生じ、製品強度や弾性に影響を及ぼす。本稿では、SPI を完成品のシーム 1 インチ当たりのステッチ数と定義する。ここでシームとは、ステッチが連続して形成する線状の結合部を指す。現在、SPI 計測はリネンテスターによる目視検査に依存しており、製品によっては 1 回あたり 1 分以上を要する。年間約 8,000 回の検査が行われており、人的負荷と標準化の課題がある。

市場調査の結果、既製製品のシームを対象に画像から SPI を計測する市販の専用装置は確認できなかった。流通しているのは、ステッチゲージや拡大鏡といった手動計測の補助具、マシン側に実装された異常検知機能、あるいは汎用の外観検査システムが中心である。

関連研究として、Wijayono ら<sup>1)</sup>はフラットベッドスキャナで取得したシーム画像にボックスカウント法を適用し、SPI が目視法と統計的に同等であることを報告した。ただし、同法は画面上での手動ピクセル計測を前提としており、シーム領域の自動

抽出や自動カウントといった装置化に不可欠な要素技術は提示されていない。また、Song ら<sup>2)</sup>はデジタル画像処理により 1 針長を計測する方式を報告しており、SPI 算出にも応用可能ではあるが、SPI を直接対象とした装置レベルの計測については検討していない。

ストッキングに固有の計測困難な理由として、(1) 生地と糸が同色であることおよびウーリー糸特有の境界不明瞭性に起因するコントラスト低下、(2) 曲線シームへの対応が必要であること、(3) シームのうねりに伴う浮きや傾きによる焦点外れや照度むら、(4) 高 SPI 域における 1 繰返し当たり画素数不足が挙げられる。これらは総じて信号対雑音比 (signal-to-noise ratio : SNR, 以下 S/N と記す) を低下させ、SPI 計測を不安定化させることが考えられる。

以上を踏まえ、目視検査の省力化と品質保証の信頼性向上を目的に、ストッキングを対象として SPI を計測する装置を開発し、実使用条件下での精度、速度および運用性を評価した。

## 2 方法

## 2・1 サンプルについて

本研究で用いたサンプルは、ドイツの医療用弾性ストッキング編機メーカーであるメルツ社製特殊

\*1 機械技術担当, \*2 東光 (株), \*3 徳島大学

編機により製造した。生地にはシングルカバード糸（single covered yarn : SCY）およびダブルカバード糸（double covered yarn : DCY）を用いた。SCY はポリウレタン糸にナイロン糸を一重巻きにした構造、DCY は二重巻きにした構造を有し、高い伸縮性と保持力を示す。縫製は、上糸・下糸ともナイロン製ウーリー糸を用いた。糸色・生地色は白、黒、ベージュの3色を基本とし、多くが同系色で縫製されるため、ステッチは一般に低コントラストとなる。

縫製方式は JIS L 0120-1984 に規定される3種を対象とした。すなわち、ヒップ部は偏平縫い（表示記号：607）、ゴム付け部は二重環縫い（表示記号：406 または 407）、つま先部は縁かがり縫い（表示記号：521）である。ヒップ部のステッチは4本の針糸、1本のルーパ糸および1本の飾り糸で構成される。ゴム付け部のステッチは2本または3本の針糸および1本のルーパ糸から構成される。つま先部のシームは2本の針糸および2本のルーパ糸で構成され、2本の針糸のうち布側の針糸はルーパ糸の毛羽立ちの影響が少なく比較的視認性が高い。SPI 計測は、各部とも針糸のうち視認性が最も高い1本を対象とした。

各部の写真を図1～図3に示す。計測対象の針糸を四角枠で示し、目視で得た SPI を記した。

## 2・2 計測装置の構成

本装置は、照明、レンズ、カメラ、小型パーソナルコンピュータ (PC) から構成する。図4に試作機1、図5に試作機2を示す。試作機1は重量約3.6kgで携帯性に優れ、試作機2は12.6インチディスプレイにより視認性に優れる。両者は機能が同一であるため、以降は試作機2について述べる。

表1に示すように、カメラは1/1.8インチ相補型金属酸化膜半導体（complementary metal-oxide semiconductor : CMOS）モノクロセンサ（3088×2064画素）を搭載し、レンズは焦点距離25mmを用いた。作動距離は約130mmとし、横方向視野42mmを確保した。照明には発光ダイオード（light-emitting diode : LED）白色拡散バー照明を採用し、先端位置を計測対象基準で高さ130mm、横方向140mmに配置した。光軸は計測対象を外して遠方へ向くように設定し、水平面に対して30°の斜入射とするこ

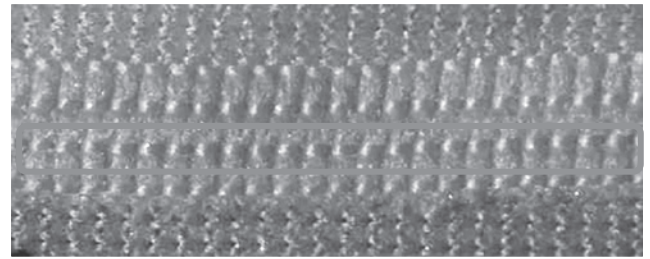


図1 ヒップ部 (SPI:23)

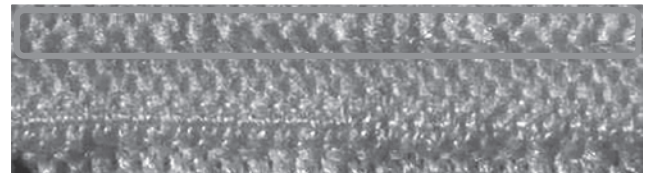


図2 ゴム付け部 (SPI:22)

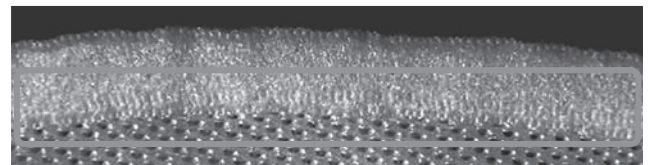


図3 つま先部 (SPI:79)



図4 試作機1

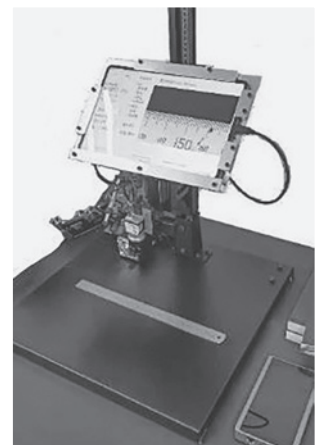


図5 試作機2

表1 試作機2の構成機材

名称	メーカー名	型番
LED 照明	(株) レイマック	IDBA-C100/11DW
カメラ	Basler AG	acA3088-57um
レンズ	(株) オプトアート	MK2514-C
小型 PC	アイワ (株)	JA4-TBW1201-H

とで、視野内の照度むらを低減した。

取得画像に対して、シームの直線化（幾何補正）を施した後、二次元高速フーリエ変換（two-dimensional fast Fourier transform : 2D-FFT）により基本空間周波数を同定し、SPI を算出した（本研究の

サンプルでは支配的周波数は基本空間周波数と一致)。演算処理には Intel N100 プロセッサを搭載した小型 PC を用いた。本研究で必要となる処理は主として 2D-FFT に基づくため、当該構成で性能要件を満たすと判断した。

### 2・3 計測ワークフロー

計測は、撮像条件のセットアップ、スケール校正、距離(厚み)補正、撮像、画像処理の順で実施した。

#### (1) 撮像条件のセットアップ

視野は、シーム方向に沿って 1 インチ幅の関心領域 (region of interest : ROI) が確実に含まれるよう構図を調整した。LED 斜光照明は浅角度入射としてステッチの明暗差を強調し、カメラは生地に対してほぼ法線方向から撮像した。露光時間は生地色に応じて自動調整し、ゲインは 1、絞りは F8 とした。直線シーム (ヒップ部、ゴム付け部) のシーム方向が画像横方向に一致するように、また曲線シーム (つま先部) のシームの中心線が視野中央を通るように配置した。

#### (2) スケール校正

基準スケールを撮像して pixels per inch (PPI) を求め、ROI の横幅を PPI に等しく設定した。

#### (3) 距離(厚み)補正

厚手サンプルでは作動距離の差で倍率誤差が生じるため、基準スケールをサンプルと同等厚のスペーサ上で再撮像して、PPI を更新した。

#### (4) 撮像

上記条件を満たした状態で画像を取得した。同色・低コントラストで S/N が不足する場合は、照明角度の微調整などで陰影差を確保した。

#### (5) 画像処理

つま先部については曲線形状に対する幾何変形(直線化)を行い、ヒップ部およびゴム付け部については幾何変形をせずそのまま用いた。ROI に対し、2D-FFT を実行し、シーム方向に沿う一次元の空間周波数分布を取り出した。当該分布の最大振幅を SPI として算出した。画像処理アルゴリズムの詳細については次で述べる。

### 2・4 画像処理アルゴリズム

シームの曲線形状を直線に幾何変形し、ROI の周

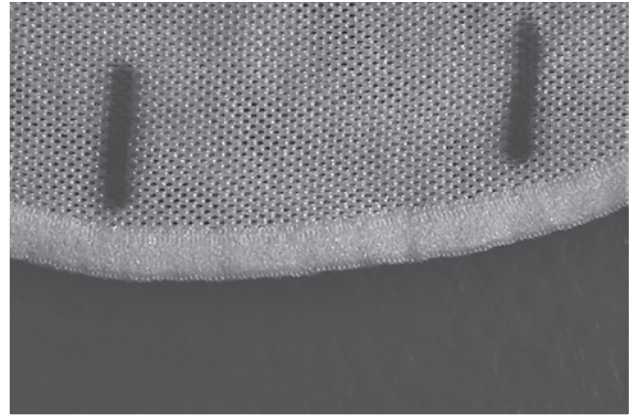


図6 原画(つま先部)

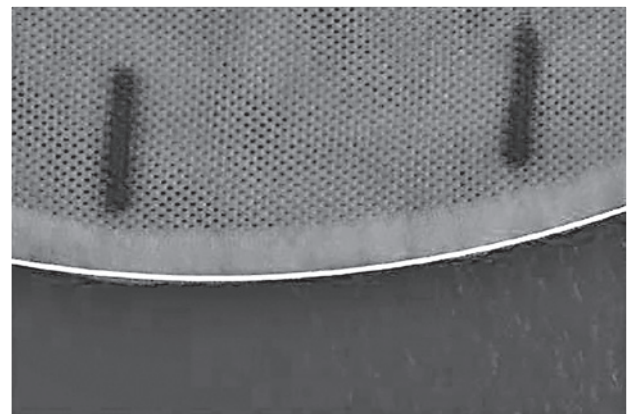


図7 2次曲線近似

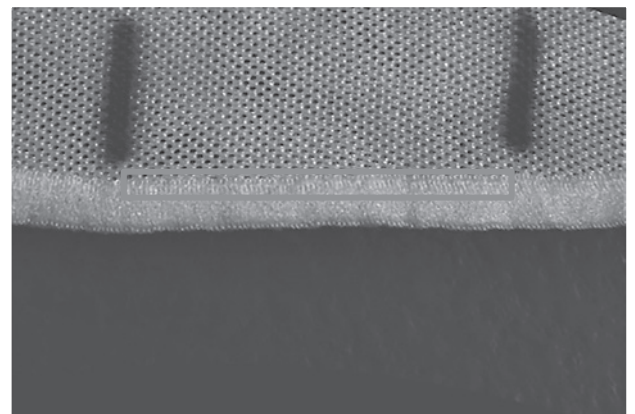


図8 幾何変形(直線化)とROI



図9 切り出し

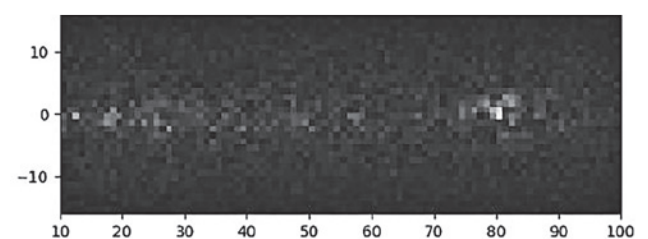


図10 2D-FFT

縦座標 0 (中央行) の横方向ビン = SPI

波数分布を 2D-FFT で検出し，SPI を算出した．

#### (1) 直線化と切り出し

図 6 に示す曲線シームに対しては，Sobel による縦方向微分と二値化で輪郭を抽出し，図 7 のように 2 次曲線近似によりサンプルと背景の境界曲線を推定した．さらに，図 8 のように列ごとに縦方向シフトを与える幾何変形（直線化）を施し，推定曲線が直線となるよう整列した．直線シームに対してはこの処理をしなかった．

次に，ROI を図 8 の矩形で示し，切り出し結果を図 9 に示す．このとき，ROI の横方向は必ずシーム方向と平行になるよう配置する．本報の撮影条件では 1 インチは 1,892 画素に相当するため，ROI の横幅を 1,892 画素とした．ROI の縦幅は対象シームが全て含むよう設定し，ここでは 128 画素とした．

#### (2) スペクトル抽出とピーク決定

図 9 の切り出し画像に 2D-FFT を適用し，直流成分が中央に位置するよう周波数シフト（いわゆる fftshift）を行い，振幅スペクトル（絶対値）を得た．振幅スペクトルのサイズは切り出し画像と同じで，横 1,892，縦 128 である．振幅スペクトルの縦方向は中央の 32 ビン，横方向は中央から右へ 10～99 ビン（SPI=10～99 に対応）を切り出した（図 10）．

想定する SPI は 10 以上 100 未満であり，かつ ROI の横幅は PPI であるため，横方向の離散周波数ビン番号（中央からのオフセット）はそのまま SPI に一致する．したがって，振幅スペクトル画像に対し，中心から右方向の 10～99 ビンの範囲で最大値を探索し，そのビン位置を SPI とした．図 10 であれば中央行（縦軸 0）のうちの最大は 80 番目のビン（最も明るい）であり，SPI は 80 と算出される．

### 3 結果

#### 3・1 計測精度

白，黒，ベージュ等の色および縫製形式（ヒップ＝偏平縫い，ゴム付け＝二重環縫い，つま先＝縁かがり縫い）を含む 412 足について，目視基準（リネンテスター，7650-I）と本装置の誤差を評価した．その結果，図 11 に示すように，（目視 SPI - 装置 SPI）のヒストグラムは，-2 針が 4%，-1 針が 8%，0 針が 24%，1 針が 35%，2 針が 26%，3 針が 3% となり，±2 針以内 97% と実用上十分な精度を示した．

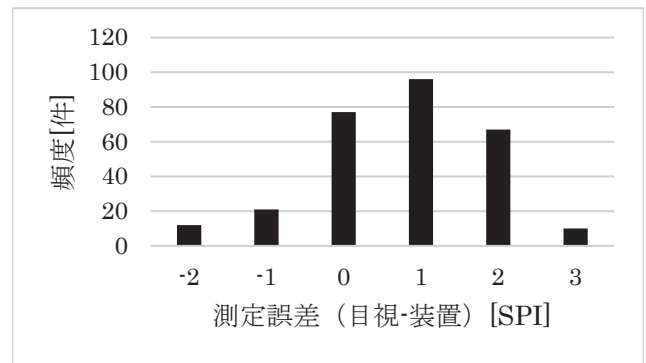


図 11 測定誤差のヒストグラム

また，誤差の平均 0.82 針，標準偏差 1.11 針であったことから，装置による SPI が少なく計測される傾向がわかった．これは次に述べるサンプルの厚みによる影響と考えられる．

#### 3・2 厚手サンプルに対する距離補正の効果

厚手のストックングでは，生地表面がカメラ側へ近づくことで実効倍率が上昇し，結果として SPI が小さめに算出されることを確認した．そこで，サンプルの厚みに応じて，基準スケールをサンプルと同等厚のスペーサ上で撮像して，PPI を更新する補正を行うことで，この系統誤差を低減した．

#### 3・3 計測時間

1 回あたりの計測時間は 0.2～0.5 秒であり，従来の目視作業に対して 1/100 以下へ大幅に短縮できた．計測時間の変動はカメラの露光時間の影響であり，特に黒色のストックングを測定するときは計測時間が長くなった．しかし，計測時間が 0.5 秒になっても計測作業にはほとんど影響しないため，本装置で問題ないと判断した．

#### 3・4 運用性

本装置は，試作機 1（SZBOXJX5，約 3.6 kg）および試作機 2（JA4-TBW1201-H，12.6 インチ表示）の 2 構成について評価した．いずれも交流 100 V またはバッテリー駆動に対応し，検査台やミシン横への短時間での設置が容易であることを確認した．

保守の観点では，構成要素を小型 PC，カメラ，レンズ，照明のモジュールに分離し，標準インタフェースで接続しているため，交換が容易である．想定される故障の主因は小型 PC であり，Windows

を動作する x86-64 機であって、ユニバーサル・シリアル・バス (universal serial bus : USB) 接続のカメラが動作すれば代替可能である。当該クラスの PC および USB カメラは普及品であり、供給途絶のリスクは低いと判断される。

カメラは産業用機を採用しており、撮像素子サイズ (1/1.8 型 : 約 7.41 mm×4.95 mm)、有効画素数 (3088×2064 画素)、およびマウント規格 (C-mount) を維持すれば、他社製への置換においても光学幾何条件を変更せず運用できる。

以上より、本装置は設置性と保守性を両立しており、現場導入後の継続運用に適する構成である。

## 4 考察

### 4・1 2D-FFT に基づく大域的推定の有効性

本研究で採用した方法は、ROI 全体の輝度分布に対して 2D-FFT を適用し、シーム方向の支配的空間周波数をピーク検出により同定する大域的手法である。局所フィルタを基盤とする局所的手法と比較して、局所的な欠損、反射、毛羽立ちに起因する不連続が平均化され、低コントラスト条件でもスペクトル上のピークが明瞭に現れるため、S/N の観点で有利である。

特に高 SPI のシームにおけるうねりについては、透明アクリル押さえにより長波長 (低空間周波数) 成分は抑制できる一方、数ステッチ規模の中程度の空間周波数成分は残存しやすい。押圧荷重を増すことで当該成分を低減できるが、過度の押圧はステッチのコントラストを低下させる。本研究では、2D-FFT により ROI 全体に含まれる周期情報を積分的に利用することでこれらの影響を相対的に抑制し、実運用範囲では SPI の検出に支障を来さないことを確認した。

### 4・2 ROI 設計の意義

ROI の横幅を 1 インチに固定した設計は、①現行の目視検査と測定定義を一致させ結果の互換性を担保できる点、②横方向の離散周波数ビン番号がそのまま SPI に直結するためスケール換算を不要にできる点、の二点で実運用上の利点大きい。また、縦幅をシーム全体が余裕をもって収まるサイズとし、縦方向中央帯の帯域積分で一次元スペクトル

を得ることにより、局所的な濃淡変動や微小な位置ずれの影響を低減し、ピーク検出の再現性を高められる。過度に狭い縦幅の場合はサンプルの位置合わせが困難になり、逆に広すぎる場合は S/N 低下を招く。

### 4・3 本手法の適用範囲

本手法は SPI 計測を目的とするものであり、目跳び、糸切れ、局所的な縫製欠陥の自動検出・分類を目的とするものではない。欠陥が存在する場合、スペクトルピークの低下や広がりといった間接的な兆候は現れるが、欠陥の種類・位置・範囲を信頼度高く特定するには、追加の局所解析や時系列監視が必要である。したがって、欠陥検出は本研究の対象外であることを明示しておく。

## 5 まとめ

本研究では、ストッキングを対象として、シームの SPI を計測する装置を開発した。装置は、LED 斜光照明、高解像度カメラ、焦点距離 25 mm のレンズ、小型 PC から構成した。シーム画像に対し、微分処理によるエッジ強調、2 次曲線近似による曲線シームの直線化、ROI 切り出しおよび 2D-FFT による周波数解析を適用して SPI を算出した。

その結果、様々な色や縫製形式を含む 412 足のサンプルに対し、誤差±2 針以内 97% と実用上十分な精度を示した。1 回あたりの計測時間は 0.2~0.5 秒であり、従来の目視作業と比較して 1/100 以下に短縮できた。特に、白生地と白糸、黒生地と黒糸といった低コントラスト条件や SPI=80 程度の高 SPI 域においても、周波数解析により安定したピーク検出が可能であった。

## 参考文献

- 1) Wijayono Andrian, Putra Valentinus Galih Vidia. "Stitch Per Inch Measurement Using Image Processing Techniques". Arena Tekstil. 2018, 33(2), p.85-92.
- 2) Song, Guangli, Huang Gu, Ding Xuerong. "Study on automatic stitch length measuring system with digital image processing technique." The Journal of The Textile Institute. 2008, 99(5), p.415-420. doi:10.1080/00405000701695158