狭帯域除去型空間フィルタ法による メリヤス地の傷のオンライン種類判別と大きさ計測†

田 承 桓*・大 山 真 司*・小 林 彬*
山 浦 富 雄**

On-Line Discrimination of Defect Type and Size of Knitted Fabrics by Narrow Band Eliminating Spatial Filtering Method

Seung-Hwan JUN*, Shinji OHYAMA*, Akira KOBAYASHI*
and Tomio YAMAURA**

A narrow band eliminating spatial filtering method has been proposed for the on-line defect detection of knitted fabrics. The defects to be detected have several types of defects to be classified. The defects caused by some troubles of the knitting machine give a serious damage on the whole fabrics. Some of the other defects occurred by occasional irregularity of the knitting thread give a few temporal damages. For high quality control and high performance manufacturing, it is required not only to detect the defects but also to discriminate the type of defects simultaneously.

This paper describes how to discriminate the type and the size of the defects by using a pair of narrow band eliminating spatial filters. One spatial filter is set perpendicularly, the other is set in an inclined angle. This arrangement of the spatial filters realizes anisotropic signal processing.

The type of defects is discriminated by the anisotropic signal processing, and the size of defects is extracted from the zero-cross width of the output signals of the two spatial filters. The effectiveness of the proposed method is confirmed by computer simulations and experimentally evaluated.

Key Words: narrow band eliminating spatial filter, defect detection, fabrics, on-line inspection

1. ま え が き

著者らは先の論文において狭帯域除去型空間フィルタ法を提案し、測定対象に存在する特定の空間周波数成分に対する応答ゲインが零となる計測系を構成して、その実的な応用としてメリヤス地におけるオンライン傷検出について検討した¹⁾。すなわちメリヤス地の編目の規則的な間隔により生じる空間周波数成分に合せて空間フィルタの除去帯域を設計すると、傷がないときには空

間フィルタからの信号はほぼ零で、傷が発生したときにはパルスの出力信号が得られ、傷検出が可能となることを明らかにした。

ところで、実際メリヤス地に発生する傷は、その発生原因によって異なった形状をもつ。特に、編機の故障または調整不良などによる傷は1度発生すると縦方向に連続した傷パターンとなるので生地全体に被害を及ぼすことになる。このような傷が検出されたときはただちに製造工程を停止して適切な対応措置をとる必要がある。また、糸の欠陥などにより単発的に発生する傷は生地に円形状または長円形状の穴があく傷となる。したがって、連続的な傷か、または単発的な傷かで、両者には形状的な異方性が特徴的に存在するかどうかの違いが生じる。

本研究では、この傷の異方性に着目して、メリヤス地に発生する傷の種類判別を行う方法を提案する。そのために2系統の狭帯域除去型空間フィルタを用い、一つは

† The 11th Sensor Symposium (1992・6), 第31回計測自動制御学会学術講演会(1992・7)で発表

* 東京工業大学 東京都目黒区大岡山 2-12-1

** 東京工科大学 八王子市片倉町 1404-1

* Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo

** Tokyo Engineering University, Hachioji

(Received February 23, 1993)

(Revised June 22, 1993)

空間フィルタ面に投影されたメリヤス地の編目の縦方向と空間フィルタのスリットの軸方向が平行となるように配置し、他方を傾斜させて配置する。傷の異方性により二つの空間フィルタ出力のパターンは様々な組合せとなるため傷の種類を分類することができる。また傷パターンに伴うおのおの空間フィルタのパルスの出力信号のゼロクロス幅を求めることにより傷のおよその大きさを計測する方法を提案する。

なお、メリヤス地について、いろいろの大きさの傷のサンプルを入手することが困難であったので、傷のモデル化を行い主にシミュレーションにより検討を行い、本研究で提案した方法の有効性を示した。

2. 傷の種類判別

2.1 傾斜した空間フィルタの特性

傾斜した空間フィルタの構成を Fig. 1 に示す。このとき、まず問題となるのは、傾斜したことにより、対象が本来もっている空間パターンによる成分が除去できるかどうかである。そこで、傾斜することにより空間フィルタのフィルタリング特性がどのように変化するかを調べる。

まず、傾斜していないとき ($\theta=0^\circ$) の空間フィルタの重み関数を $h(x, y)$ で表わすと、重み関数の空間領域での 2 次元フーリエ変換 $H(\mu, \nu)$ は

$$H(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dx dy h(x, y) \cdot \exp(-j2\pi(\mu x + \nu y)) \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 μ, ν はそれぞれ x, y 方向に対する空間周波数である。

つぎに、角度 θ だけ傾斜したときの空間フィルタの重

Fig. 1 Configuration of the inclined spatial filter

み関数を $g(\xi, \eta)$ とし、この重み関数の空間領域での 2 次元フーリエ変換を $G(\mu', \nu')$ で表わして、空間フィルタの回転によるフィルタリング特性を求めると、空間周波数座標系も θ 回転されることになるので、 $\theta=0^\circ$ のときの特性¹⁾を用いて、

$$|G(\mu', \nu')|^2 = (LNW)^2 \cdot \{ \text{sinc}(\pi\nu L) \}^2 \cdot \{ \text{sinc}(\pi\mu W) \}^2 \cdot \left\{ 1 - \frac{\sin(\pi\mu PN)}{N \cdot \sin(\pi\mu P)} \right\}^2 \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{cases} \mu = \mu' \cos \theta + \nu' \sin \theta \\ \nu = -\mu' \sin \theta + \nu' \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

となる。ただし、 L はスリットの長さ、 N はスリット総個数で奇数、 P はスリットのピッチ、 W はスリットの幅であり、 μ', ν' はそれぞれ回転座標系 ξ, η 方向に対する空間周波数である。

ここで、(2)式を用いて空間フィルタのフィルタリング特性を調べる。回転角 θ をパラメータとして、フィルタリング特性を求めたものを Fig. 2 に示す。図からわかるように狭帯域除去型空間フィルタは傾いても $1/P$ 付近の空間周波数成分を除去する特性は保存されている。ただし、このような特性は、厳密には空間フィルタの長さ L と回転角度 θ に関係しており、 L の値が極端に小さい範囲では ν' 軸方向に選択特性が広がっているので、空間フィルタを回転させると $1/P$ の空間周波数成分を除去できない場合が生じる。また L が大きい場合でも回転角度が大きくなると、 $1/P$ の空間周波数成分は除去されないことがあり、実際には適当な長さの L と小さな θ の値が用いられる。

2.2 傷の種類判別の方法

2.2.1 傷の形状の分類とモデル化

メリヤス地の傷パターンには、その発生原因により大別して、Fig. 3 に示すような連続して生じる傷 Type 1, 2 と Fig. 4 に示すような単発的に生じる傷 Type 3, 4 とに分けることができる。

測定対象であるメリヤス地がもっている編目の周期的パターン空間周波数成分は狭帯域除去型空間フィルタにより除去されて信号が出力されるので、ここでは傷の空間的パターンのみに着目することにする。Fig. 3 に示す連続して発生する傷のモデルとして Fig. 3 (a) の Model A, Fig. 4 に示す単発的に起こる傷のモデルとして Fig. 4 (a) の Model B を考える。

測定対象は、 x 方向に移動するので x 方向に対する空間周波数成分を調べることにする。

(1) Model A

傷の幅を λ とし、 x 方向に移動する傷から得られる信

Fig. 2 Filtering characteristics of $|G(\mu', \nu')|^2 / (LNW)^2$ where $\nu'=0$

(b) Type 1

(c) Type 2

Fig. 3 Model A for the defect patterns of Type 1 and Type 2

(b) Type 3

(c) Type 4

Fig. 4 Model B for the defect patterns of Type 3 and Type 4

号のフーリエ変換を $I(\mu)$ とすると、

$$I(\mu) = \lambda \frac{\sin(\pi\mu\lambda)}{\pi\mu\lambda} \quad (4)$$

となる。Fig. 5 (a) にその特性 $|I(\mu)|$ を示す。

(2) Model B

ここでは便宜的に $\alpha = \beta$ の円形の傷を考えると、 x 方向に移動する傷から得られる信号のフーリエ変換 $I(\mu)$ は、

$$\begin{aligned} I(\mu) &= \int_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 - x^2} \exp(-j2\pi\mu x) dx \\ &= \int_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 - x^2} \cos(2\pi\mu x) dx \end{aligned} \quad (5)$$

で与えられ、第1種の Bessel 関数 $J_1(\omega)$ を用いて、

$$I(\mu) = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 \frac{\pi}{\omega} J_1(\omega) \quad (6)$$

と求まる。ただし、 $\omega = \pi\alpha\mu$ である。Fig. 5 (b) にその特性 $|I(\mu)|$ を示す。

Model A および Model B の傷の特性をみると両者とも $0 \sim 1/T$ の空間周波数帯域に主な周波数成分をもっている。ただし、 T は投影されたメリヤスパターンの編目のピッチであり、空間フィルタのピッチ P はこの値に合せて設計される ($P = T$)。また、小さい傷ほど広い範囲に周波数成分をもっていることがわかる。

空間フィルタの出力には、上のスペクトル成分のうち $1/P$ 近くの成分を除いた成分に対するものが傷の信号として得られることになる。メリヤス地の傷により発生する信号は、長い観測時間に対し、非常に短い時間で、単発的、または間欠的に得られるので、つぎの項で述べるように傷の種類判別や大きさ計測は、周波数領域より、時間領域で扱ったほうが便利である。

2.2.2 種類判別の方法

前項では、空間周波数領域で傷の信号をとらえたが、ここでは時間領域でとらえ、Model A の傷か、または

Model B の傷かを判別する方法について検討する。

はじめに種類判別の方法を Fig. 6 に模式的に示す。また、そのときの傷の信号波形(横軸、縦軸は本研究で実験を行ったときの値を便宜的に用いている)を Fig. 7 に示す。ここでは、傷の信号波形の特性パラメータとして、ピーク値 $\Phi(\theta)$ およびゼロクロス幅 δ を採用する。

ここで種類判別の方法を考える。Fig. 6 に空間フィルタの傾斜角が $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ の場合が示されている。Fig. 6 (a) に示すように Model A の傷の場合は、 θ が大きくなると空間フィルタと傷が重なり合っている面積が小さくなり、その結果ピーク値 $\Phi(\theta)$ が小さくなる。Fig. 6 (b) に示すように Model B の傷の場合は、 θ が大きくなっても空間フィルタと傷が重なり合っている面積が変わらないので、その結果ピーク値 $\Phi(\theta)$ も変わらない。したがって、傾斜角度の異なった二つの空間フィルタを用いて、傷を観測し、得られた信号のピーク値 $\Phi(\theta)$ が異なれば Model A の傷、ピーク値 $\Phi(\theta)$ がほぼ同じであれば Model B の傷であることになる。

つぎに計算機シミュレーションにより、空間フィルタ ($N=5, W=0.45P$) の傾斜角を変えたときのピーク値の変化を調べた。結果を Fig. 8 に示す。なお Fig. 8 は Model B 群については α, β それぞれ $1.0 \sim 7.0$ mm まで 1 mm きざみのすべての組合せ 49 通りに対する結果の一部を示すものである。ただし、それぞれの群に対するプロットの分布の範囲は、ほぼカバーされている。また実際に生じ得る傷の大部分はここでの λ, α, β の値の範囲に含まれると考えられる。Fig. 8 に示すように Model A の傷の場合は、 θ が大きくなると急激にピーク値が減少し、 $\theta = 7^\circ$ ぐらいで、ほぼ $1/5$ ぐらいまで減少することがわかる。Model B の傷の場合は、 $\alpha = \beta$ でピーク値は一定となっており、 α/β が $1/5$ ぐらいで $\theta = 7^\circ$ のときピーク値は、 $4.3/5$ ぐらいまでしか減少しないことが

Fig. 5 Spectral analysis of spatial frequency μ where $P = T$

Fig. 6 Anisotropic effects of the knitting defect models in relation to the spatial filter setting

Fig. 7 The definition of peak value $\Phi(\theta)$ and 0-cross width ζ

わかる。

以上のことから、傾斜角度の異なった二つの空間フィルタを用いて、傷を観測し、それぞれから得られた信号のピーク値の比を調べることで傷の種類判別が可能であることがわかる。

2.2.3 傾斜角度の設定

ここでは、一つの空間フィルタを $\theta=0^\circ$ で配置したとき、もう一つの空間フィルタをどのくらいの角度に傾斜させたら効果的な種類判別ができるかを検討する。そのために傾斜角度 θ を横軸にとり、Fig. 8 に示されている $\delta_r(\theta)$ を縦軸にとってプロットしたものを Fig. 9 に示す。

Fig. 8 Variation of peak values due to inclination of spatial filter

Model A	λ
	<ul style="list-style-type: none"> ● : 1.5 [mm] ■ : 1.0 [mm] ◆ : 0.8 [mm]
Model B	$\alpha \times \beta$
	▽ : 1.0 × 5.0 [mm ²]
	○ : 1.0 × 4.0 [mm ²]
	□ : 1.0 × 3.0 [mm ²]
	◇ : 1.0 × 2.0 [mm ²]
	△ : 1.0 × 1.0 [mm ²]

二つの空間フィルタ出力のピーク値の比を手がかりに傷を分類することを考えると、Model A 群と Model B 群に対する Fig. 8 でのプロットができるだけ離れて分布するような条件を選ばよい。Fig. 8 中の $\delta_r(\theta)$ は θ を一つ決めたとときの Model A 群に対するプロットの上限と Model B 群に対するプロットの下限の差を意味し、この $\delta_r(\theta)$ がほぼ最大になる θ を選択すればよいことになる。

図からわかるように、 $\theta=7^\circ\sim 8^\circ$ のとき $\delta_r(\theta)$ がほぼ最大であり、この値に θ を設定すれば効果的な種類判別が可能となることがわかる。

2.3 実験および実験結果

実験のための傷検出装置を Fig. 10 に示す。ドラム状

Fig. 9 Distribution of $\delta_r(\theta)$

にメリヤス地が被せてあり、一定速度で回転するようになっている。実際の編機では、図の点線で示したようにメリヤス地が編まれて下方へ螺旋的に移動して行くので、1カ所を観測していれば、メリヤス地全面をオンラインで監視することができる。本実験では、定常のメリヤス地の編目の間隔が 0.5 mm に対して、編目のゆらぎなどを考え、Type 1 の傷の場合 0.7~1.5 mm の大きさを対象とした。Type 4 の傷に関しては、編機の糸にはあ

Fig. 10 Configuration of the experimental inspection system

Fig. 11 Experimental results of the output signals obtained from spatial filter

らかじめある程度のテンションが加わっているの、糸が切れると穴が大きくなり、現実には最小でも直径数 mm 程度の穴に広がってしまう。したが、実験では大きさが 1.0, 2.0, 3.0 と 7.0 mm の傷を用いた。なお、用いた空間フィルタのスリットの個数は 5 で、ピッチは 1.0 mm、スリット幅は 0.45 mm である。また、光学系の倍率は 1.0 である。なお、編機の回転速度は 130 mm/sec である。

Fig. 11 に Type 1 と Type 4 の傷について、傾斜角度を $\theta=0^\circ, 4^\circ, 10^\circ$ としたとき、狭帯域除去型空間フィルタから得られる出力信号が示されている。図からわかるように Type 1 の傷については、 θ が大きくなると急激にピーク値が減少していることがわかる。また、Type 4 の傷については、 θ が大きくなってもほとんど信号波形が変わっていないことがわかる。

このことを定量的に調べるために、傾斜角度 θ を横軸にとり、正規化したピーク値 $\phi(\theta)/\phi(0^\circ)$ を縦軸にとり、実験結果をプロットしたものを Fig. 12 に示す。図から

Fig. 12 Differences of experimental peak values between Type 1 and Type 4

わかるように Fig. 8 のシミュレーションの結果とよく一致していることがわかる。

また、最適な傾斜角度を求めるために、傾斜角度 θ を横軸にとり、Fig. 12 の $\delta_r(\theta)$ を縦軸にとったものを Fig. 13 に示す。図からわかるように、 $\theta=7^\circ$ ぐらいのときに最も $\delta_r(\theta)$ が大きく、Fig. 9 のシミュレーションの結果とほぼ一致していることがわかる。

3. 傷の大きさ計測

Fig. 6 からわかるように傷が大きくなると、空間フィルタの出力信号の持続時間が長くなり、結果として Fig. 7 に示す特性パラメータのゼロクロス幅 ζ が大きくなる。またゼロクロス幅は、空間フィルタの傾斜角 θ が大きくなればなるほど大きくなる。したがって、傾斜角を固定して、あらかじめ傷の大きさ (Model A の傷については λ の値、Model B の傷については α と β の値) とゼロクロス幅 ζ との関係調べておけば、傷の大きさを検出することが可能となる。このことを計算機シミュレーションにより調べた。

Fig. 13 Experimental distribution of $\delta_r(\theta)$

(a) Model A ($\theta=0^\circ$)

(b) Model B ($\alpha=\beta$)

Fig. 14 0-cross width ζ of Model A and Model B ($\alpha=\beta$)

Fig. 15 0-cross width ζ of Model B for $\alpha=2$ mm and 3 mm

Fig. 16 The procedure for type and size discrimination of defects

まず、Model A の傷の λ の値と傾斜角 $\theta=0^\circ$ の空間フィルタより得られる信号のゼロクロス幅 ζ との関係を図 14(a) に示す。また Model B の傷の α は x 方向のパラメータであるので、 α の値と傾斜角 $\theta=0^\circ$ の空間フィルタより得られる信号のゼロクロス幅 ζ との関係を図 14(b) に示す。図からわかるように各特性パラメータの値とゼロクロス幅 ζ との関係は、緩やかなカーブで表わされることがわかる。

Model B の傷の β の値については、傾斜角 $\theta=7^\circ$ の空

間フィルタより得られる信号のゼロクロス幅 ζ との関係を Fig. 15(a), (b) に示す。この場合も、特性パラメータの β の値とゼロクロス幅 ζ の関係は、緩やかなカーブで表わされることがわかる。

いろいろな大きさの傷を実際に入手するのが困難であったので、いくつか人為的に作ったメリヤス地の傷について、その傷の大きさを計測するための実験をいくつか試みた。

Fig. 14 に実験結果を示す。校正の代わりに図において、いちばん左の実験値をシミュレーションに合せると、ほかの点がほぼシミュレーション結果と一致する結果が得られることがわかる。

4. 傷の種類判別と大きさ計測のアルゴリズム

Fig. 16 に傷の種類判別と大きさ計測のアルゴリズムを示す。まず、ピーク値 $\Phi(0^\circ)$ があらかじめ設定されているスレッシュホールドの値 ε_1 を越えると傷の存在を検出する。つぎに $\Phi(7^\circ)/\Phi(0^\circ)$ を求め、その値が ε_2 より小さければ Model A の傷と判別し、 ε_2 より大きければ Model B の傷と判別する。

つぎに Model A の傷を検出した場合は、 $\theta=0^\circ$ の空間フィルタの信号のゼロクロス幅 ζ の値から、あらかじめ作成された校正曲線などを用いて傷の幅 λ を求める。

Model B の傷を検出した場合は、まず $\theta=0^\circ$ の空間フィルタの信号のゼロクロス幅 ζ の値から、あらかじめ作成された校正曲線などを用いて α の値を求め、つぎに $\theta=7^\circ$ の空間フィルタの信号のゼロクロス幅 ζ の値から、あらかじめ作成された校正曲線などを用いて β の値を求める。

実際には、Model A の傷を検出すると、対象のメリヤス地が一定速度で回転しているので、1 ヲ所の傷でも一定間隔で繰り返し傷が検出されることになる。このこと

を利用すれば、より信頼性の高い Model A の傷を検出することができる。

5. あとがき

特定の空間周波数成分を除去できる狭帯域除去型空間フィルタをそれぞれ角度を変えて 2 系統配置することにより、メリヤス地に発生する傷をオンラインで検出するとともにその傷の種類判別および大きさ計測をする方法を提案した。

まず、傾斜して配置した狭帯域除去型空間フィルタのフィルタリング特性を調べ、狭帯域除去型空間フィルタを傾斜することにより、対象の周期的なパターンに影響を受けず、傷の形状の異方性に基づいて変化する信号が得られることを示した。そしてこの信号を利用することにより傷の種類判別を行った。また、おのおのの狭帯域除去型空間フィルタの信号持続時間に関する成分として、出力信号のゼロクロス幅を求めることにより傷のおよその大きさを計測する方法を提案した。

また、シミュレーションおよび実験により本研究で提案した方法の有効性を確かめるとともに、最適な傾斜角度を求めた。

本研究では、傷の種類判別などを時間領域で議論をしたが傷の 2 次元のパワースペクトルを求め、同様の議論を周波数領域で行うことが考えられる。この点は、今後の課題としたい。

最後に本研究に関し、いろいろとご支援をいただきました(株)応用計測研究所の中山鳩夫氏に厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 田, 大山, 小林, 山浦: 狭帯域除去型空間フィルタとメリヤス地のオンライン傷検出, 計測自動制御学会論文集, 29-7, 725/734 (1993)
- 2) 内藤, 狼, 小林: 空間フィルタによる速度計測, 計測と制御, 7-11, 761/772 (1968)

[著 者 紹 介]

田 承 桓 (正会員)

1983 年, 韓国海洋大学修士課程(海洋学専攻)修了。81 年同大学助教, 87 年同講師。87 年来日, 92 年東京工業大学大学院博士後期課程(計測工学専攻)修了。93 年より韓国海洋大学助教授。空間フィルタ法や欠陥計測などの研究に従事。

大 山 真 司 (正会員)

1984 年, 東京工業大学大学院修士課程修了。同年(株)日立製作所日立研究所入社。90 年東京工業大学工学部助手, 現在に至る。高度化した能動計測系としての信号場の理論と応用, 空間フィルタなどの研究に従事。86 年度計測自動制御学会論文賞, 電子情報通信学会の会員。

小 林 彬 (正会員)

1964 年, 東京工業大学理工学部卒業。69 年同大学大学院博士課程修了。同年同大学工学部助手。87 年同教授, 現在に至る。計測用空間フィルタ, 感覚計測, 解領域法による信号処理, 信号場, 高 SN 比計測法の研究に従事(工学博士)。

山 浦 富 雄 (正会員)

1971 年, 東京工業大学大学院修士課程(制御工学専攻)修了。75 年同大学工学部助手。89 年東京工科大学工学部講師, 92 年より助教授。工業計測, 最適制御の応用理論に関する研究に従事(工学博士(89 年東京工業大学))。