



## 適応型空間フィルタ－検出器と 高分解能スペックル変位計への応用

長山 秀徳\*・岡本 隆之\*\*・山口 一郎\*\*

\* (株)小野測器 〒163 東京都新宿区西新宿 2-4-1

\*\* 理化学研究所光工学研究室 〒351-01 和光市広沢 2-1

(1991年3月14日受付, 1991年5月24日受理)

### Adaptive Spatial Filtering Detector and Its Application to Speckle Displacement Sensor with High Resolution

Hidenori NAGAYAMA,\* Takayuki OKAMOTO\*\* and Ichirou YAMAGUCHI\*\*

\* Ono Sokki Co. Ltd., 2-4-1, Nishishinjyuku, Shinjyuku-ku, Tokyo 163

\*\* The Institute of Physical and Chemical Research, 2-1, Hirosawa, Wako 351-01

(Received March 14, 1991; Accepted May 24, 1991)

A spatial filtering detector system which shows less drop-off of its output signal due to change of the spatial frequency content of moving pattern and is robuster than conventional systems in practical uses is described together with its application to a speckle displacement sensor with high resolution. In this detector system two couples of spatial filtering detectors are combined which have different electric wirings for one photodiode array. Each of the couples consists of the two comb-like detectors which respond to pattern movement with a phase difference of  $\pi/2$ . In the frequency response, however, there is a slight difference between the couples. Consequently, the signal drop-off in one of the couple is recovered by the other couple. The probability that the drop-off occurs in the both couples simultaneously is very low. By using a detector having 32-comb periods of  $160\ \mu\text{m}$  corresponding to 4 photodiodes, the displacement resolution of less than  $1\ \mu\text{m}$  and maximum detectable speed of  $50\ \text{mm/s}$  are observed.

#### 1. 序 論

最近の技術開発, 特に精密機械や電子産業の進歩に伴い, 計測技術に対しても今まで以上に厳しい要求が寄せられている. 光を用いた計測は非接触, 遠隔的にかつ基本的に光の波長に関する精度で測定できるので, 位置や距離, 形状変位などの測定によく使われている. この中で変位測定はリソグラフィ－のステッパーなど, 部品や製品の送り制御に欠かすことはできない. 面に垂直な変位は三角測量を利用した変位計や, 鏡面の場合では干渉計で測定できる. しかし面内の変位は, 移動体に干渉計の鏡, またはエンコーダ－をつける必要があり, 移動体を細工することなしに直接測定するのは困難とされてい

る.

移動体に標識がついているときにはその像の動きを検出すればよい. 像の移動速度から物体の速度を測定する方法の一つに空間フィルタ－法がある<sup>1,2)</sup>. この方法は楕形の検出器からなる空間フィルタ－を用いるもので, その上を流れる空間パターンから楕のピッチに相当する空間周波数成分の動きを光電出力として抽出する機能を有する. この方法は空間領域において並列的に信号処理を行うので実時間測定が可能で, 車速計測などに実用化されている<sup>3)</sup>.

さて移動パターンとしてレーザーを拡散面にあてた時, 散乱光または像の中に生じる自然の目印ともいうべきスペックルの移動を利用する方法が考えられる. スペ

ックル移動は1次元イメージ・センサーからの移動前後の出力の相互相関のピーク位置から確実に求められる<sup>4)</sup>。しかし現状ではイメージ・センサー出力の読み出し時間と相関関数の計算時間の制約により、測定は毎秒数十 cm 以下の移動に限られている<sup>5)</sup>。スペックルの移動量は空間フィルターで検出することもできる<sup>6,7)</sup>。空間フィルターでは走査が不要で、出力の処理も簡単なので、より高速のスペックル移動を検出できる。ただし、従来の空間フィルター検出器でスペックルの移動を検出する場合、スペックルの移動に伴うスペックル自身の変形により、出力信号がある確率で消失する。そのためスペックル・パターンの移動量を安定に測定することはできなかった<sup>6)</sup>。したがって物体の変位、速度、振動の測定はスペックルの変形の小さい範囲に制約されていた。

ここでは新しいタイプの空間フィルター検出器と処理系を構成し、この問題を改善して安定な変位測定を達成し、さらに検出器のピッチ以下の変位も検出できるようにした。またこれを使って簡単で高分解能を持つ変位計を試作した。予備実験で変位分解能は  $1\ \mu\text{m}$  以下、パターンの移動速度は  $50\ \text{mm/s}$  まで検出可能となった。

## 2. 適応型空間フィルター検出器

従来の空間フィルター検出器の基本原理を Fig. 1 に示す<sup>1,2)</sup>。Fig. 1(a)のように等間隔に並べた受光素子で、2組の楕円素子列を構成し、両者の出力間の差動増幅を行う。ここで、図に示すように各楕円の歯の間隔をピッチ  $p$  と呼ぶことにする。この検出器上をランダムパターンが移動したとき、Fig. 1(b)のようなバイアス成分が除去された信号が得られる。この信号の周波数は楕円検出器の空間周波数とパターンの移動速度との積となる。したがってこの出力を周波数解析することによりパターンの移動速度がわかる。

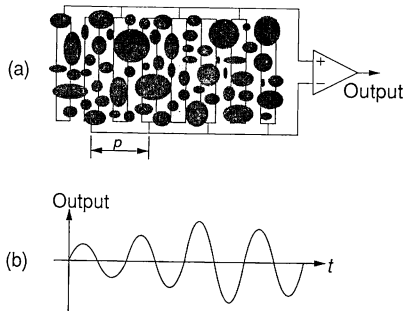


Fig. 1 (a) Differential type of spatial filtering detector and (b) its output signal resulting from movement of a pattern.

さて、空間フィルター検出器の出力が消失する原因はスペックルの移動に伴うそれ自身の変形のため、空間フィルターで選択されるパターンの空間周波数成分 (中心はピッチの逆数) が検出器上のスペックル・パターンから消失するためである。この問題は等間隔で配列されたスリット状の受光素子の出力間の接続の組合せを変えた2種類の空間フィルター検出器を同じ空間上に構成し、一方の検出器の信号が消失したら他方でこれを補うようにして解決できる。

Fig. 2 において  $A_s$  は Fig. 1 に示す従来の空間フィルター検出器の空間感度分布を表している。二つの素子列の出力間の差動を取っているのので、このように表すことができる。ここではさらに同一ピッチで感度分布が  $A_c$ ,  $B_s$ ,  $B_c$  のように与えられる三つの空間フィルター

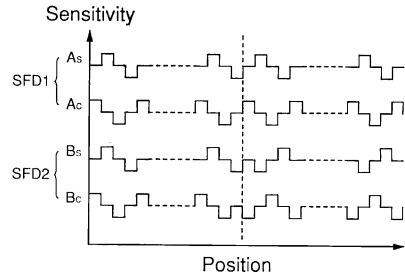


Fig. 2 The spatial distribution of sensitivity of four spatial filtering detectors.

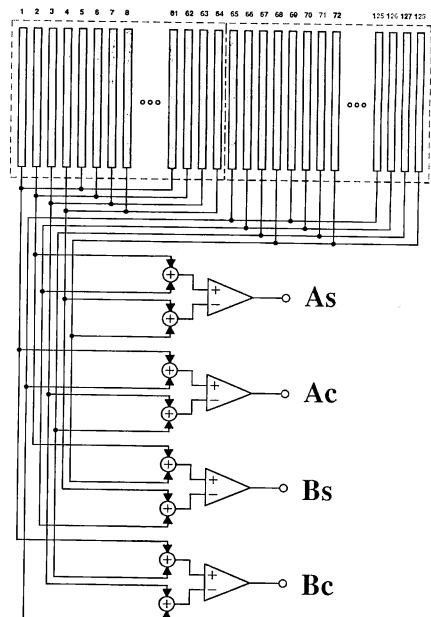


Fig. 3 Circuit diagram for realizing spatial filtering detector shown in Fig. 2.

検出器を追加し、合計4種類の出力信号を得る。A<sub>s</sub>とA<sub>c</sub> (SFD 1), B<sub>s</sub>とB<sub>c</sub> (SFD 2) はそれぞれの間で互いに位置を1/4ピッチ、すなわち周波数応答の位相をπ/2ずらしてあり、サイン関数とコサイン関数の関係にある。さらにB<sub>s</sub>, B<sub>c</sub>は素子列の中間からA<sub>s</sub>, A<sub>c</sub>に対して位相をπずらしてある。この検出器は各受光素子の出力をFig. 3のように接続することにより構成できる。SFD 2で中間から位相をπずらすことにより、SFD 1とSFD 2の周波数応答にずれが生じ、一方の出力が消失したときにも、後述するように、かなりの確率で他方の出力が残るようになり、信号消失の影響が小さくなる。

3. 空間周波数応答と変位測定の原理

2組の空間フィルター検出器の空間周波数応答を計算する。簡単のために1次元で考える。検出器のピッチ内の感度分布をg(x) (0 ≤ x ≤ p), 総ピッチ数をNとする、検出器の感度分布D(x)は次式で与えられる。

$$D(x) = G(x)W(x) \tag{1}$$

ここで

$$G(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} g(x - mp),$$

$$W(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } |x| \leq \frac{Np}{2} \\ 0 & \text{for } |x| > \frac{Np}{2} \end{cases}$$

これをフーリエ変換すると

$$\hat{D}(\xi) = \hat{G}(\xi) * \hat{W}(\xi) = \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \hat{g}(\xi) \delta\left(\xi - \frac{m}{p}\right) * \frac{\sin N\pi p \xi}{\pi \xi} \right\} \tag{2}$$

ここで、δ(ξ)はディラックのデルタ関数で、\*はコンボリューションを表す。f̂(ξ)はf(x)のフーリエ変換を表し、

$$\hat{f}(\xi) = \int f(x) \exp(i2\pi \xi x) dx.$$

ただし、積分範囲は-∞から+∞までとする。

Fig. 3に示す差動型の配置を考え、ピッチ内の感度分布をg<sub>s</sub>(x)とすると、そのフーリエ変換は

$$\hat{g}_s(\xi) = -\int_{-\frac{p}{4} + \frac{d}{2}}^{-\frac{p}{4}} \exp(i2\pi \xi x) dx + \int_{\frac{p}{4} - \frac{d}{2}}^{\frac{p}{4}} \exp(i2\pi \xi x) dx$$

$$= i2 \frac{\sin \pi \xi d}{\pi \xi} \sin \frac{\pi \xi p}{2} \tag{3}$$

式(3)を式(2)に代入すると、mが偶数の項は消失する。さらにd=p/4のときで、3次以上の項を無視すると次のようになる。

$$\hat{G}_s(\xi) = \frac{i\sqrt{2} p}{\pi} \left\{ \delta\left(\xi - \frac{1}{p}\right) - \delta\left(\xi + \frac{1}{p}\right) \right\} \tag{4}$$

したがって式(4)を式(2)に代入すると

$$\hat{D}_s(\xi) = \frac{i\sqrt{2} p}{\pi^2} \left\{ \frac{\sin N\pi p \left(\xi - \frac{1}{p}\right)}{\left(\xi - \frac{1}{p}\right)} - \frac{\sin N\pi p \left(\xi + \frac{1}{p}\right)}{\left(\xi + \frac{1}{p}\right)} \right\} \tag{5}$$

Fig. 4の実線はN=32のときの検出器の空間周波数応答|Ĥ(ξ)|<sup>2</sup>=|Ĥ(ξ)\*Ŵ(ξ)|<sup>2</sup>を表したものである。また、g<sub>s</sub>(x)とπ/2位相のずれた検出器g<sub>c</sub>(x)の応答関数ĝ<sub>c</sub>(ξ)は

$$\hat{g}_c(\xi) = -\int_{-\frac{p}{2}}^{-\frac{p}{2} + \frac{d}{2}} \exp(i2\pi \xi x) dx + \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2} + \frac{p}{2}} \exp(i2\pi \xi x) dx$$

$$- \int_{\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2} - \frac{d}{2}} \exp(i2\pi \xi x) dx$$

$$= \frac{1}{\pi \xi} \{ \sin \pi \xi (p-d) - \sin \pi \xi p + \sin \pi \xi d \} \tag{6}$$

となる。さらに上記と同じ条件では

$$\hat{G}_c(\xi) = \frac{\sqrt{2} p}{\pi} \left\{ \delta\left(\xi - \frac{1}{p}\right) + \delta\left(\xi + \frac{1}{p}\right) \right\} \tag{7}$$

となる。

次に中間から位相をπずらした検出器SFD 2の応答を求める。この検出器の感度分布H(x)は次式で与えられる。

$$H(x) = G(x)T(x) \tag{8}$$

ここでT(x)は位相反転を与える項で次式で与えられる。

$$T(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } -\frac{Np}{2} \leq x < 0 \\ -1 & \text{for } 0 \leq x \leq \frac{Np}{2} \\ 0 & \text{for } |x| > \frac{Np}{2} \end{cases}$$

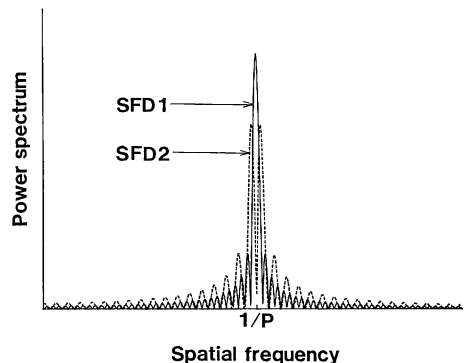


Fig. 4 Spatial frequency response of the spatial filtering detectors SFD 1 and SFD 2.

式(8)をフーリエ変換すると,

$$\hat{H}(\xi) = \hat{G}(\xi) * \hat{T}(\xi) \quad (9)$$

この中で位相反転項のフーリエ変換は

$$\begin{aligned} \hat{T}(\xi) &= \int_{-\frac{Np}{2}}^0 \exp(i2\pi\xi x) dx - \int_0^{\frac{Np}{2}} \exp(i2\pi\xi x) dx \\ &= -\frac{i2}{\pi\xi} \sin^2 \frac{N\pi p\xi}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

となる. 式(9)に式(4)および式(10)を代入すると

$$\begin{aligned} \hat{H}(\xi) &= \frac{2\sqrt{2}p}{\pi^2} \left\{ \frac{1}{\left(\xi - \frac{1}{p}\right)} \sin^2 \frac{N\pi p \left(\xi - \frac{1}{p}\right)}{2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\left(\xi + \frac{1}{p}\right)} \sin^2 \frac{N\pi p \left(\xi + \frac{1}{p}\right)}{2} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

となる. Fig. 4 の破線は  $N=32$  のときの SFD 2 の空間周波数応答  $|\hat{H}(\xi)|^2 = |\hat{G}(\xi) * \hat{T}(\xi)|^2$  を表したものである. SFD 1 と SFD 2 の周波数応答がわずかにずれていることがわかる.

次にこの検出器による変位測定の原理について述べる. 検出器上の光強度分布を  $I(x)$  とすると, パターンが  $a$  だけ移動した時の検出器の出力は次式で与えられる.

$$S(a) = \int D(x) I(x-a) dx \quad (12)$$

右辺をコンボリューション積分定理を使って書き直すと

$$S(a) = \int \hat{D}(\xi) \hat{I}^*(\xi) \exp(-i2\pi\xi a) d\xi \quad (13)$$

ここで  $f^*(\xi)$  は  $f(\xi)$  の複素共役を表す. また  $I(x)$  が実数のために成立する  $\hat{I}^*(\xi) = \hat{I}(-\xi)$  の関係を使った. 式(5)を式(13)に代入すると, パターンの変位  $a$  に対する出力は

$$\begin{aligned} S_s(a) &= \frac{i\sqrt{2}p}{\pi} \left\{ \hat{f}^* \left( \frac{1}{p} \right) \exp \left( -2\pi \frac{a}{p} \right) \right. \\ &\quad \left. + \hat{f}^* \left( -\frac{1}{p} \right) \exp \left( 2\pi \frac{a}{p} \right) \right\} \\ &= \frac{\sqrt{2}p}{\pi} \text{Im} \left\{ \hat{f} \left( \frac{1}{p} \right) \exp \left( i2\pi \frac{a}{p} \right) \right\} \end{aligned} \quad (14 a)$$

となる. ただし  $\text{Im}$  は虚数部を示す. また, 簡単のため, 総ピッチ数  $N$  を無限大とおいた. 次に式(2), 式(7)を式(13)に代入すれば,

$$S_s(a) = \frac{\sqrt{2}p}{\pi} \text{Re} \left\{ \hat{f} \left( \frac{1}{p} \right) \exp \left( i2\pi \frac{a}{p} \right) \right\} \quad (14 b)$$

ここで  $\text{Re}$  は実数部を示す. ここで  $\hat{f}(1/p) = A \exp(ia)$  とおけば, それぞれの出力は次のようになる.

$$S_s(a) = \frac{\sqrt{2}p}{\pi} A \sin \left( \frac{2\pi a}{p} + \alpha \right) \quad (15 a)$$

$$S_c(a) = \frac{\sqrt{2}p}{\pi} A \cos \left( \frac{2\pi a}{p} + \alpha \right) \quad (15 b)$$

これらの比をとると

$$\frac{S_s}{S_c} = \tan \left( \frac{2\pi a}{p} + \alpha \right) \quad (16)$$

となるので, 最終的には次式を得る.

$$a = \frac{p}{2\pi} \left\{ \arctan \left( \frac{S_s}{S_c} \right) - \alpha \right\} \quad (17)$$

以上の関係から二つの検出器出力の比の逆正接をとると, 検出器上のパターンの変位  $a$  を求めることがわかる. ただしこの際にパターンの周波数成分の振幅  $A$  がゼロでないことが必要である. もしこの周波数成分が消失して  $A=0$  となると式(16)が  $0/0$  の形となり変位が測定できない. 信号が消失するまでのスペックル変位量は, 信号の自己相関関数  $\langle S(0)S(a) \rangle$  の包絡線の拡がりから求めることができる<sup>7)</sup>. これは物体上のビーム径程度である.

## 4. 実験結果

### 4.1 1次元イメージセンサによるシミュレーション

Fig. 5 に適応型空間フィルタ検出器を用いた, 変位測定のための検出器システムのブロック図を示す. 4組の空間フィルタ検出器は1次元イメージ・センサー(素子間隔  $15 \mu\text{m}$ , 幅  $14 \mu\text{m}$ ,  $1,024$  素子)とパーソナルコンピュータでソフトウェア的に構成した. 得られたフィルタはピッチ  $180 \mu\text{m}$ , 総ピッチ数  $80$  である. 検出器以降の演算もすべてパーソナルコンピュータで行った.  $A_s, B_s$  は正弦関数に,  $A_c, B_c$  は余弦関数に対応している. 両成分の2乗和から抽出された空間周波数成分の強度を, また比の逆正接から位相を求める. 位相は

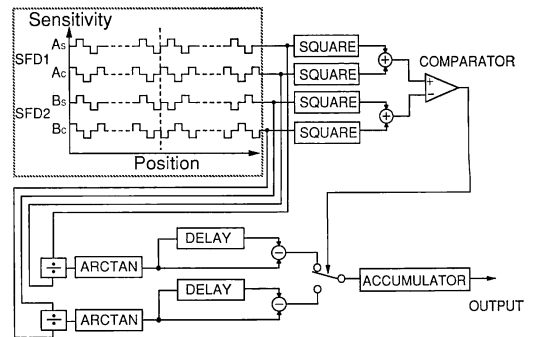
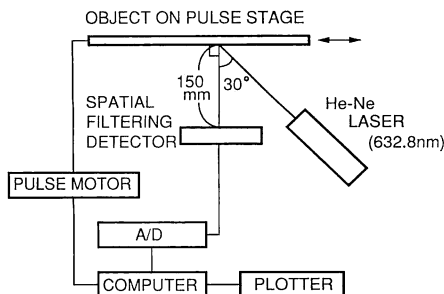


Fig. 5 Schematic diagram of the displacement measuring system using an adaptive spatial filtering detector.

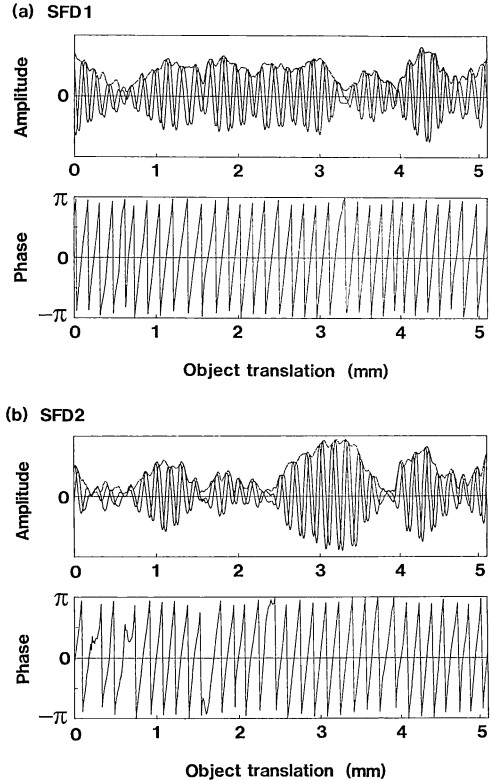
検出器上のパターンの位置を与える。SFD 1, SFD 2 からの信号の強度と位相を一定サンプリング時間ごとに計算する。この位相値から直前の位相値を引き算した値がサンプリング時間におけるパターンの変位量に相当する。図中の delay は直前の位相値を保持するためのものである。さらに、SFD 1, SFD 2 からの信号の強度を逐次比較し、大きい方の位相増分を累積し、それをパターンの変位量に変換することにより物体変位を測定した。

**Fig. 6** に実験光学系を示す。He-Ne レーザー (632.8 nm, 2mW) からのビームを直接物体にあて検出器上にスペckルを生じさせた。物体はアルミニウム板でステップモーター移動台にのせ 10  $\mu\text{m}$  ステップで 512 点、全部で 5.12mm 移動させた。この結果を **Fig. 7** に示す。(a)は SFD 1, (b)は SFD 2 の出力である。

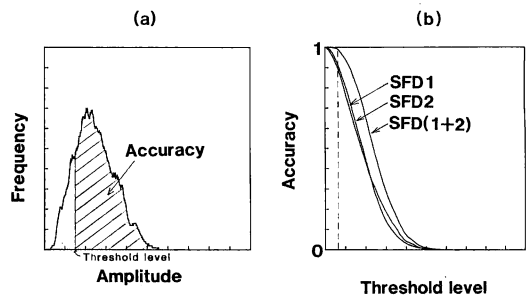
Amplitude の2本の実線はそれぞれ正弦成分と余弦成分に対応している。Fig. 7 で振幅が小さくなっている部分はスペckルに空間フィルターで選択される空間周波数成分が消失しているときで、このときは位相も乱れていることがわかる。消失はビームスポット径 (約 1mm) 程度の変位で生じていることがわかる。ここで注目すべき点は、SFD 1 の出力と SFD 2 の出力を比較した場合、同一のスペckルを検出しているにもかかわらず、それぞれの信号が消失する箇所が一般に一致していないことである。この結果より二つの信号のうち振幅の大きい方のみを採用することにより、検出器を一つだけを用いた場合より安定した測定が可能となることがわかる。**Fig. 8** はこの効果を定量的に求めたものである。(a)は SFD 1 の出力振幅のヒストグラムである。横軸は平均振幅で規格化した相対振幅、縦軸に頻度を表している。振幅がある閾値以上であれば忠実にスペckルの移動量を測定できるが(斜線部分)、それ以下ではできなくなる。ここで全体のうち移動量を測定できる割合を accuracy と定



**Fig. 6** Schematic diagram of an optical system for measuring speckle displacement. The radius of the wavefront curvature of the incident beam is 790 mm and the spot size of that is 0.6 mm.



**Fig. 7** Amplitude and phase of the output signals from spatial filtering detectors (a) SFD 1 and (b) SFD 2.



**Fig. 8** (a) Histogram of the amplitude of the output signal. The probability that the amplitude is larger than a threshold level is named accuracy. (b) Measured accuracies for spatial filtering detectors SFD 1, SFD 2, and SFD(1+2).

義する。(b)は横軸に SFD 1 の平均振幅で規格化した閾値、縦軸に accuracy をとったときの実験結果で、測定点数は 15,360 点である。**Table 1** に閾値を変えたときの測定不能となる確率を示す。平均振幅に対する閾値が 0.1 のとき SFD 1, SFD 2 の一方のみでは約 1% の確率で信号が消失し、測定が不能となるが、両方の振幅

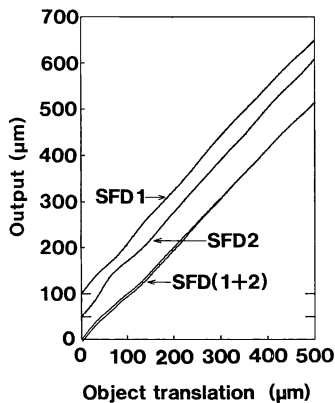
**Table 1** Probabilities of drop-off of signal at several threshold level and the ratio of improvement. The averages of the amplitudes are written in arbitrary units.

		Threshold level			Average of amplitude
		10%	20%	30%	
Probability of signal drop-off (=1-accuracy)	SFD 1	1.439%	4.844%	9.219%	192.85
	SFD 2	0.697%	3.340%	7.487%	192.31
	SFD (1+2)	0.007%	0.124%	0.632%	246.87
Improvement factor		153	66	13	

の大きい方のみを採用 (SFD (1+2)) すると、この確率は 0.01% 以下となり、100 倍以上の改善が行われていることがわかる。閾値が大きくなるにしたがって改善の割合は小さくなる。

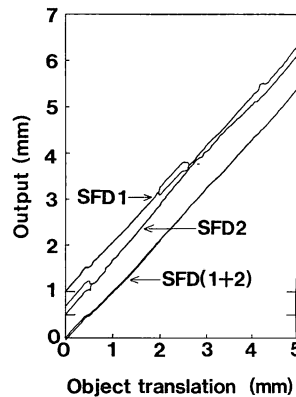
次に実際に変位測定を行った。測定対象を 1 $\mu$ m ステップで 500 $\mu$ m 往復移動させた結果が Fig. 9 である。出力の位相の変化量をスペckルの移動量に変換している。傾きは、あらかじめ相関法により求めたスペckルの移動感度 (スペckル移動量/物体変位) 1.14 とほぼ一致している。測定対象を 1 ステップ動かしたときの空間フィルタ検出器の出力の標準偏差は 0.78 $\mu$ m であった。このことから本検出器はピッチが 180 $\mu$ m の空間フィルタで 1 $\mu$ m 以下の分解能を持っていることがわかる。また Fig. 10 は測定対象を 10 $\mu$ m ステップで 5 mm 往復移動させたものであるが、SFD 1, SFD 2 の一方だけの測定では測定対象の移動量を忠実に表していないが振幅の大きい方のみを採用した場合 (SFD (1+2)) は忠実に検出している。

同じ光学系において測定領域、測定範囲を変えて 12 回測定し、このときの結果の傾きと直線からのずれの標

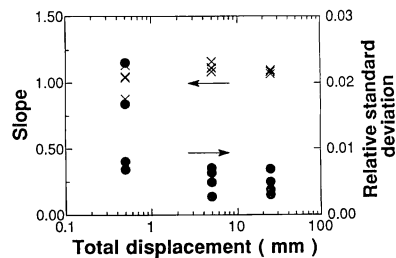


**Fig. 9** Speckle displacement obtained from the outputs of the spatial filtering detectors versus object translation.

準偏差を求めた。測定範囲が異なるので標準偏差はフルスケールで正規化してある。Fig. 11 の結果より本検出器では全移動量が 1 mm 以下では 3% 以下、それ以上では 1% 以下の精度で移動量を測定できることがわかる。Fig. 12 は測定対象を 10 $\mu$ m ステップで 5 mm 往復移動させたときの結果を見やすく表したものである。対象が逆方向に移動した時は傾きは負になり、移動方向の判別ができていることがわかる。また光源に発散光を使うことにより移動感度を 15 倍程度まで変えることができるので<sup>9)</sup>、この適応形空間フィルタ検出器を使って 0.1 $\mu$ m 以下の面内変位が測定できる。



**Fig. 10** The same as Fig. 9, but for larger amounts of object translation.



**Fig. 11** Slopes and relative standard deviations in the detector output versus object translation for various amounts of total displacement.

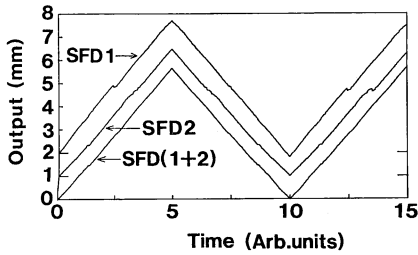


Fig. 12 Outputs of the spatial filtering detectors versus time for round trip object motion.

#### 4.2 フォトダイオードアレーを用いた実験結果

これまで良好な結果が得られたので実際に素子間隔  $40\ \mu\text{m}$  のフォトダイオードアレーで適応型空間フィルター検出器を構成して実験を行った。作製したフィルターはピッチ  $160\ \mu\text{m}$ 、総ピッチ数 32 である。処理系には前と同様にパーソナルコンピュータを用いた。Fig. 13 は対象を加速移動させたときの結果で、このときの移動感度は 1.05 であった。また検出器のサンプリング間隔は  $720\ \mu\text{s}$  であり、検出器上のスペックルの移動速度

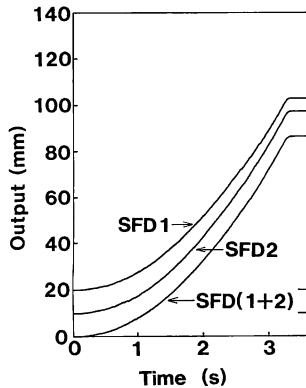


Fig. 13 Outputs of the spatial filtering detectors for accelerated object motion.

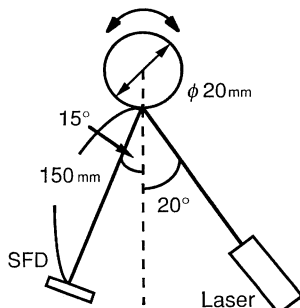


Fig. 14 Schematic diagram of the rotation measuring system.

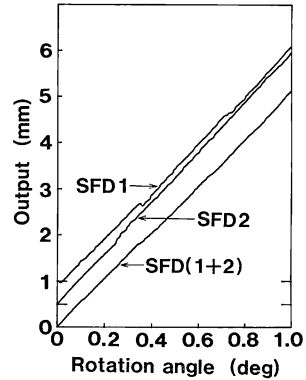


Fig. 15 Outputs of the spatial filtering detectors versus rotation angle of a cylindrical object.

が  $50\ \text{mm/s}$  まで測定可能であった。

次に Fig. 14 の実験系において、直径  $20\ \text{mm}$  のステンレス円筒の回転変位を求めた。測定対象は平行光で照射されている。これを  $1/500\ \text{deg}$  ステップで回転させた時の結果が Fig. 15 である。移動感度は  $5,179\ \mu\text{m}/\text{deg}$  であった。このときの理論値<sup>8)</sup>は  $5,253\ \mu\text{m}/\text{deg}$  で理論とよく一致している。この検出器は  $1\ \mu\text{m}$  のスペックル移動量を検出できることが面内変位の実験により明らかであるので測定分解能は約  $1/5,000\ \text{deg}$  となる。

## 5. 考 察

測定結果からわかるように、適応型空間フィルター検出器を用いることにより、従来の検出器の場合より極めて安定した変位測定を行うことができた。空間フィルターのピッチ  $160\ \mu\text{m}$  で分解能は  $1\ \mu\text{m}$  以下、スペックルの移動速度は  $50\ \text{mm/s}$  まで検出可能であり、スペックルの移動量を位相の変化量に変換しているため物体の移動方向の判別も可能である。また空間フィルターのピッチ以下の分解能をもっているため、ピッチを細かくすることにより分解能はさらに高くなり測定範囲が広がる。今回は信号処理系にマイクロコンピュータを用いたが、専用のハードウェアを用いれば数  $\mu\text{s}$  の応答時間で処理が可能であり現在試作中である。ただし問題点は SFD 1, SFD 2 の二つの信号が同時に消失した場合は測定誤差が増すことである。また検出する変位量は累積値なので一度誤差が生じるとそれが後の測定に影響を与えてしまう。これを解決することが、今後の課題となる。

## 6. 結 論

スペックル移動を高分解能でかつ高速に検出できる適応型空間フィルター検出器を開発した。本法は相関法に

比べて回路が簡単で、高速化も容易である。時間応答は相関法に比べて2桁以上の向上が期待できる。またこれを用いて直線および回転変位を測定する変位計を試作し、直線変位の場合  $\mu\text{m}$  オーダー、回転変位の場合  $1/1,000 \text{ deg}$  オーダーの変位測定が可能であることがわかった。この検出器は従来のエンコーダーと異なり完全に非接触であり、しかも投光部と受光部のみでよいので小型化が容易であるという特長を持っている。測定範囲は検出器の出力が消失する確率で決まるが、本システムでは二つの出力を用いることによって従来法に比べ1桁向上した。

これらの特長を利用した応用例として、スペckル移動を数箇所検出することによる、速度、振動などの3次元ベクトル成分の測定や歪の測定が考えられる。

## 文 献

- 1) 内藤 正, 狼嘉 彰, 小林 彬: “空間フィルターによる速度計測”, 計測と制御, **7** (1968) 761-772.
- 2) Y. Aizu and T. Asakura: “Principles and development of spatial filtering velocimetry,” Appl. Phys. B, **43** (1987) 209-224.
- 3) 島津雅樹: “最近の車速計測システム”, 内燃機関, **23** (1984) 28-36.
- 4) I. Yamaguchi: “Automatic measurement of in-plane translation by speckle correlation using a linear image sensor,” J. Phys. E., **19** (1986) 944-949.
- 5) I. Yamaguchi and T. Fujita: “Linear and rotary encoders using electronic speckle correlation,” Proc. SPIE, **1162** (1989) 213-216.
- 6) I. Yamaguchi: “Advances in the laser speckle strain gauge,” Opt. Eng., **27** (1988) 214-218.
- 7) I. Yamaguchi, T. Okamoto and H. Nagayama: “Performance of a spatial filtering detector applied to a speckle displacement sensor,” Meas. Sci. Technol., **1** (1990) 406-412.
- 8) I. Yamaguchi and T. Fujita: “Laser speckle rotary encoder,” Appl. Opt., **28** (1989) 4401-4406.