

高速スペckル速度測定器の開発

The Development of High Response Speckle Velocimeter

中村幸登
澤住庸生
古田和三
感材生産本部
生産技術センター



Abstract:

In the case of the speckle method, we can construct a relatively simple optical system and reduce the size of the equipment. On the other hand, it is difficult to obtain both high accuracy and high response simultaneously.

We developed the following technology:

- (1) To obtain the high accuracy under the limited light intensity by which film is not exposed, we determined the optimum condition of the distance between two sensors, and the aperture size.
- (2) We analyzed the detecting signal frequency and determined the optimum condition of the high pass filter constant. By using this constant, we obtain high similarity between the two detecting signals and high resolution of the measured velocity. As a result we achieved the high measurement accuracy.
- (3) To obtain the high response, we used high speed multiplier/accumulator (DSP) which calculates the cross-correlation between the two detecting signals. We selected the minimum calculating times and region for determining the cross-correlation between the two detecting signals, and kept the peak of cross-correlation in the center of the selected region.

From the above results, we developed our high response speckle velocimeter.

Nakamura, Yukito
Sawazumi, Tsuneo
Furuta, Kazumi
Production Engineering Center
Photographic Products
Manufacturing Headquarters

1 はじめに

写真用乳剤の塗布ライン、プラスチックフィルムの製膜ラインなどのウェブを搬送しながら加工するラインでは、製品性能・品質の向上のためオンラインで移動体の速度を正確に測定することが要求されている。

現在製造ラインで一般に用いられている測定方法は、搬送ロールにロータリーエンコーダー等を取り付け、そのロールの回転数から被測定物の速度を換算して求めているが、ロールと被測定物との間のスリップ等が原因で誤差を生じ、しばしば問題となっている。このため非接触で被測定物そのものの速度を正確に測定する装置が重要となっている。

現在、代表的な非接触速度測定器として①ドップラー式速度測定器、②結像光学系により被測定物の表面のムラの移動を観察し速度換算する方式などがあるが、我々はレーザ照射により生じるスペックルを利用し本装置の開発に取り組んだ。

2 開発の背景

写真フィルムの高性能化・高品質化、又その製造ラインの大規模・高速化に伴い製品検査のみならず、それ以上に各種生産条件をより厳しく管理する必要が生じている。即ち、生産工程における搬送中のフィルムの様々な物理状態を、高精度に計測し安定化することが必要である。

写真フィルムにおいては、製品の性能・品質上塗布膜厚（塗布された乳剤の厚み）を一定に保たなければならない。一般に乳剤の塗布工程では巾1m以上、およそ100m/minの速度で走行しているベースに乳剤を均一に塗布する必要がある。ここで長さ方向の塗布膜厚は乳剤の供給量とフィルムの搬送速度で決定されるため速度は重要な生産条件の一つである。例えば1/100秒の間に平均速度から1%の速度変動があると、製品に期待される写真性能が得られなかったり感度ムラが発生すると言われている。

我々はこれまでオンライン表面検査技術⁴⁾を開発してきたが、その光応用計測、高速アナログ・デジタル処理等の技術を発展させ乳剤塗布ラインでフィルムを直接・非接触且つ高精度に測定する技術を開発したのでその内容を報告する。

3 スペックルを利用した速度測定の原理

3.1 各種速度測定方式の比較

Table 1は、代表的な非接触速度測定方式の特徴を比較したものである。Fig.1は、ドップラー式速度測定器の原理を示している。ビームの交差する点では、干渉による明暗の縞模様が生ずる。その中を通過する粒子により生じる散乱光を光電変換し、その信号周波数から速度換算する。この方式ではビームの交差する位置から被測定面がずれた場合測定が不可能になるが、測定対象が高速なほど高い精度を得られるため、ビデオヘッド等比較的高速で振動がなく安定走行している対象に有効な手段である。

Fig.2は、結像光学系を用いた測定器の原理を示している。測定対象の上流側、下流側にセンサーを設置し対象表面のムラ等のパターンが2つのセンサーを通過する時間を測定することにより速度換算する。この方式では対象表面に光学的に特徴のある凹凸・色ムラ等があることが必要であり、又その表面状態に合わせて光学系・処理系の

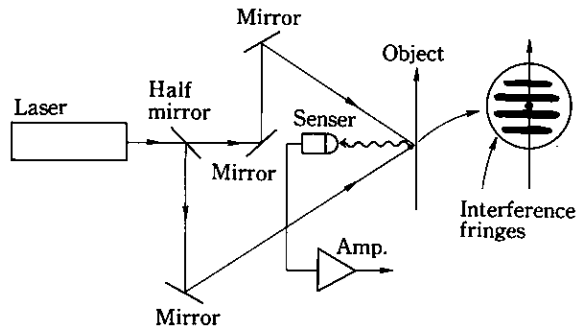


Fig.1 Schematic diagram of laser doppler velocimeter

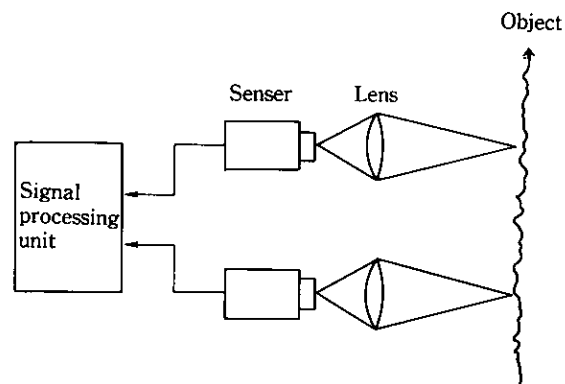


Fig.2 Schematic diagram of velocimeter by using image-forming optical system

Table 1 Characteristic comparison of typical velocimeters

項目	方式	ドップラー方式	表面ムラを利用した方式	スペックル方式
分解能		○	×	△
応答性		○	△	△
装置サイズ		△	△	○
対象の振動の影響		×	△	△
対象の表面状態の影響		○	×	○
構成のシンプルさ		×	△	○

条件を変更する必要がある。但し、測定距離等にあわせ比較的自由に光学系を配置することができるため、路面パターンを利用した車載の速度計等に使われている。

スペックル方式の速度測定器は、シンプルな光学系を構成できるため低価格化が望める。又、小型化も比較的容易であり工程の限られたスペースにも設置が可能であるが、精度・応答性を同時に高めることが難しい。我々は、この2点を解決すべく光学系・処理系に検討を加えていった。

3.2 レーザスペックルの基本原理

(1) 光学的な粗面によるスペックルパターンの生成

光学的な粗面に照射したレーザ光の透過光・反射光はFig.3 (a) に示す様に面の微細な凹凸によりランダムに散乱された拡散光となる。観察面上ではその拡散光どうしが、ある点では互いに強めあい、ある点では互いに弱めあう干渉を起こす。

この様な拡散光の干渉によりFig.3 (b) に見られる様な不規則な明暗の斑点状の模様を形成する。この模様をスペックルパターン、1つ1つの点をスペックルと呼ぶ。

(2) スペックルの並進運動と並進倍率⁷⁾

光学系の投光条件と観察する場の位置関係を適当に選

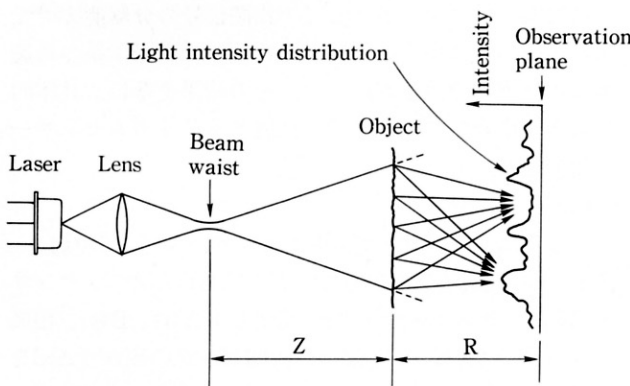


Fig.3(a) Schematic diagram of the optical system which produces speckle pattern



Fig.3(b) Photography at the observation plane

ぶと、対象の移動にあわせて観察場のスペックルパターンがその形を保存したまま平行移動する。これを並進運動と呼び、この時対象の速度 v とスペックルの速度 V の関係は次の式で表される。

$$V = \sigma v \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、ビームウェストー対象試料間距離を Z 、対象試料ー観察面間距離を R (Fig.3-(a) 参照) とすると σ は、

$$\sigma = \frac{Z+R}{Z} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

で表され、光学系の配置で決まる定数となる。 σ は、並進倍率と呼ばれている。

3.3 スペックルの動的挙動の速度測定への応用

スペックルパターンが並進運動しているところで、そのスペックルの移動方向にFig.4の様子に2つのセンサーを間隔 X で配置して、スペックルパターンの移動を光の強度信号として光電変換する。この時、下流側のセンサーBから得られる信号は、上流側のセンサーAに対し (3.3) 式で表される時間位相差 τd を生じる。

$$\tau d = \frac{X}{V} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

(3.1) 式を用いることにより対象速度 v は、

$$v = \frac{X}{\sigma \cdot \tau d} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

即ち、 τd を測定することにより対象速度に換算することができる。

τd は、(3.5) 式で表される相互相関関数を計算し、 $r(\tau)$ が最大となる τ より得られることが知られている。

$$r(\tau) = \int A(t) \cdot B(t+\tau) dt \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

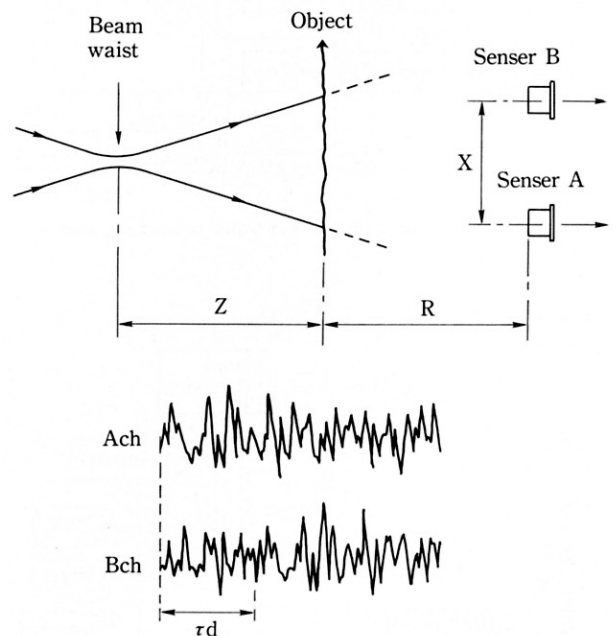


Fig.4 Schematic diagram of the sensor arrangement and the received signals

4

装置概要

4.1 検出部

今回開発した透過型検出部をFig.5に示す。装置のコンパクト化とカブリ（感光）を生じさせないために、光源に赤外半導体レーザー（波長=830nm）を用いている。ビームウエスト・試料間距離 $Z=50\text{mm}$ 、試料・センサー間距離 $R=50\text{mm}$ である。

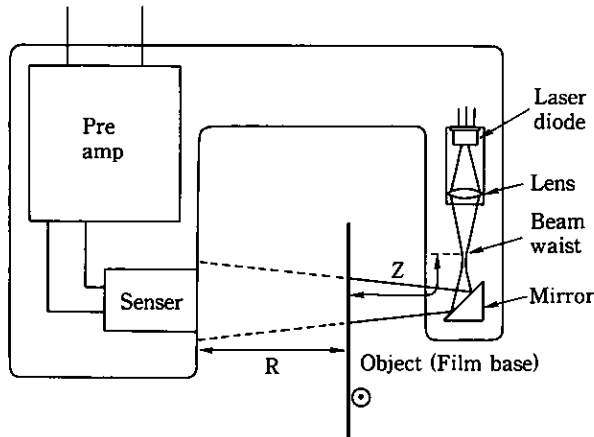


Fig. 5 Detecting unit

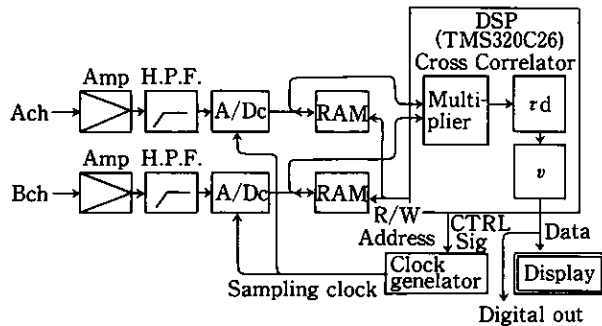


Fig. 6 Schematic diagram of signal processing unit

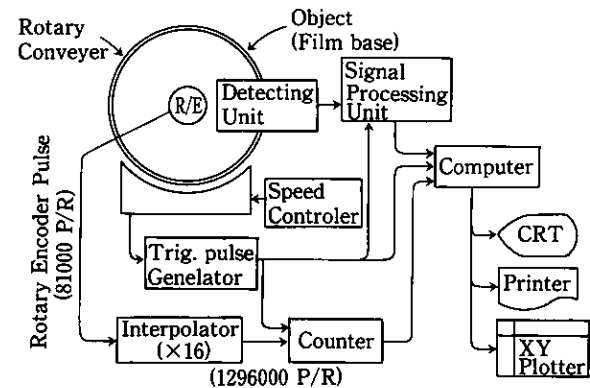


Fig. 7 Schematic diagram of evaluation system

4.2 処理部

処理部の基本構成をFig.6に示す。検出部からの受光信号A,Bの中のスペックル以外の信号周波数成分をHPFにより取り除き、A/D変換する。乗算機能を持つDSPを用いて、(3.5)式であらわされるA,B信号の相互相関を計算し、 τd を高速に逐次求め、速度換算して出力・表示する。

4.3 評価用実験機構成

前記装置を評価するのに用いた実験機構成をFig.7に示す。試料は、回転ドラムに貼付されている。処理部で求められた速度データと高精度な検定用ロータリーエンコーダ出力をパソコン内で比較評価した。

5 高精度・高速応答のための技術開発

5.1 目標性能

目標性能を以下に示す。

- (1)測定範囲：40~100m/min
- (2) 精度： $\pm 0.3\%$ 以内
- (3) 応答性：10msec/data以内で測定値を出力
- (4)カブリを生じないこと
- (5)装置サイズ：約150mm角以内に納まること

5.2 高精度化のための受光光学系開発

精度向上のポイントとして(1)相関信号の分解能(2)受光信号の安定性についての検討を行い、受光光学系の最適条件と具体的数値を導出した。その結果を基に、具体的な受光光学系の形態として、後述するプリズムセンサーを開発した。

(1)相関信号の分解能

ここでは、センサー間隔 X とセンサーサイズ d の比 $2d/X$ の最適値を導出した。ここであらためて、センサー間隔 X 、センサーサイズ d 、受光信号 $A(t)$ 、 $B(t)$ 、相関信号 $r(\tau)$ 、相関ピーク位置 τd 、相関ピークの広がり $\Delta \tau d$ をFig.8に図示する。

受光信号は、センサー面上を横切るスペックルパターンの時間的光量変動であるため、その周波数帯域 f_c は、スペックルパターンの移動速度 $V (= \sigma v)$ に比例し、センサーサイズ d に反比例することがわかる。即ち

$$f_c = k \cdot \sigma v / d \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

とおける。ここで、 f_c と $\sigma v / d$ の関係を実験的に求めた結果をFig.9に示す。これより、 $k \approx 1$ とみなせ

$$f_c = \sigma v / d \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

を得た。よって、受光信号の波長 λt は、次式のように表される。

$$\lambda t = 1 / f_c = d / \sigma v \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

即ち、受光信号の波長 λt は、スペックルパターンが、1つのセンサーを横切る時間を表している。

一方、相関ピークの広がり $\Delta \tau d$ は、センサーサイズ $2d$ 分の広がりをもつので、(5.3)式と合わせて、次式が成立

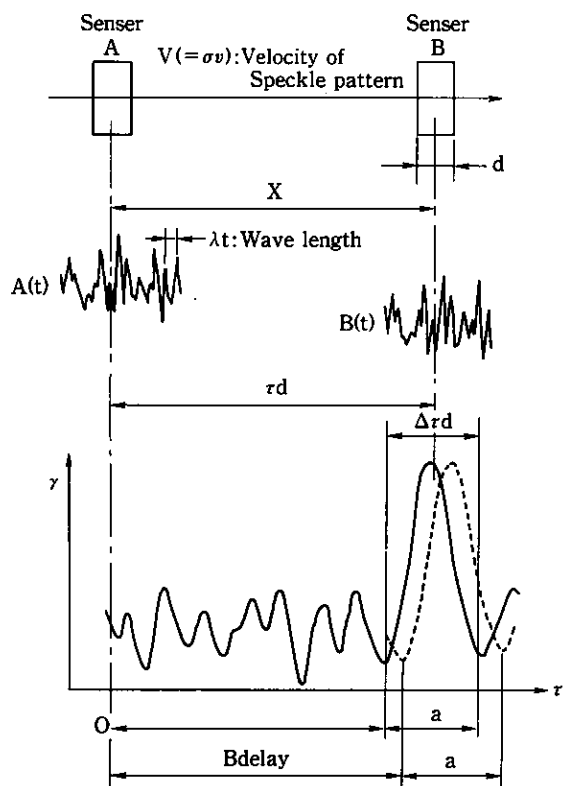


Fig.8 Schematic diagram which shows the sensor received signals and cross correlation value

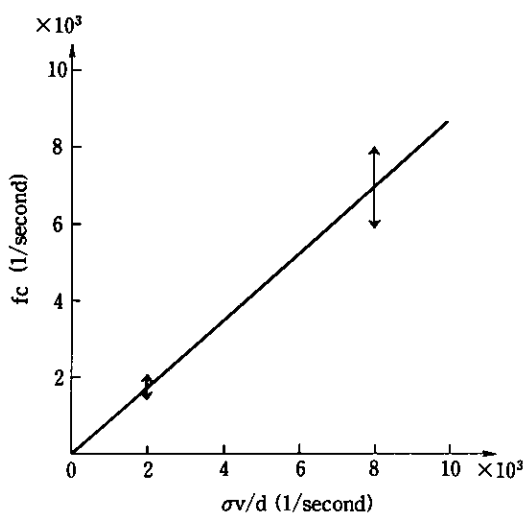


Fig.9 fc vs σv/d

する。

$$\Delta rd = 2d/\sigma v = 2\lambda t \quad \dots\dots\dots(5.4)$$

そして、上式と(3.4)式より

$$\Delta rd / rd = 2d/X \quad \dots\dots\dots(5.5)$$

が成立する。

即ち、Fig.8でXとrdの長さを同じにとると、dはΔrdの1/2になる。

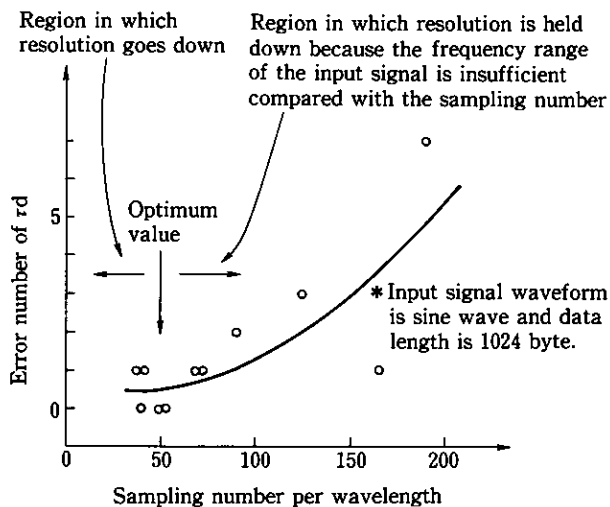


Fig.10 Error number of rd vs sampling number per wavelength

次に、受光信号の1波長(λt)当りのサンプリング数と相関ピーク位置rdの誤差の関係を実験的に求めたものをFig.10に示す。

この結果、1波長(λt)を50サンプリング(即ち、(5.4)式より、Δrdを100サンプリング)すれば、rdの誤差は最も小さくなり、1サンプル分の分解能が得られることがわかった。

ここで我々は、目標速度精度±0.3を得るための必要速度分解能(相関ピーク位置rdの分解能と同じと考えられる)として、±0.1とした。これを得るためには、1サンプル分の分解能が得られる条件(即ち、Δrdを100サンプリングする)の下で、rdを1000サンプリングすればよい。このことと、(5.5)式より

$$2d/X = 100/1000 = 1/10 \quad \dots\dots\dots(5.6)$$

を得た。

(2)受光信号の安定性

ここでは、センサー間隔Xの最適値を導出した。センサー間隔を小さくできれば、センサー間を横切るスペックルの保存性が高まるため、相関ピーク値rdが大きくなり、測定の安定性が向上する。しかし、センサー間隔を小さくしていくと、(1)で述べた速度分解能が逆に劣下してしまう。

そこで、分解能を劣下させずに、高い安定性を維持できるXを実験的に求めた。

Fig.11に、R=300mmとした時の、センサー間隔Xと相関ピーク値rdの関係を実験的に求めた結果を示す。

この図から、Xが6mmを越えると、急激に相関ピーク値rdが劣下することがわかる。

ところで、相関ピーク値rdは、次式で表される。

$$rd = \exp\left(-\frac{x^2}{\Delta x^2} a\right) \quad \dots\dots\dots(5.7)$$

ここで

$$\alpha = 1 - \left(\frac{\sigma^2}{\frac{\Delta x^2}{\omega^2} + \sigma^2} \right) \dots\dots\dots (5.8)$$

- ΔX : 平均スペックルサイズ $\lambda R / \pi \omega$
 - σ : 並進倍率 $(Z+R) / Z$
 - R : 試料-センサー間距離
 - X : センサー間隔
 - ω : 試料面上照射ビーム径
 - λ : 波長
- である。

ω, Z -一定の時、我々が考えているRの範囲 (50mm~300mm前後) では、 α は一定とみなせ、 r_{rd} はX/Rのみの関数となる。

従って、Fig.11の結果と合わせると、R=50mmにおいて分解能を劣下させずに高い安定性を得るにはX≒1mmとすればよいことがわかる。

上記の結果と (5.6) 式より、具体的数値として、R=50mmで、X=800 μ m、d=40 μ mとした。

(3)プリズムセンサー

測定対象である写真フィルムの光特性 (カブリ) を考慮すると、照射光強度は制限される。そこで、信号周波

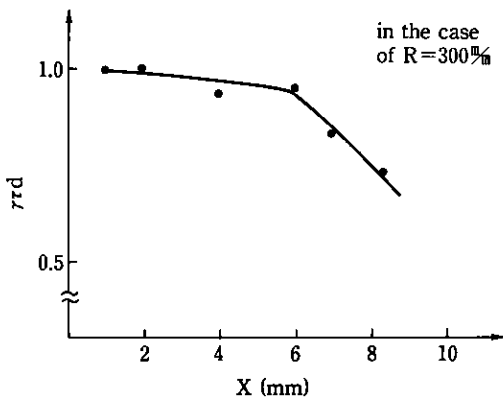


Fig. 11 Cross correlation peak value r_{rd} vs distance between the two sensors

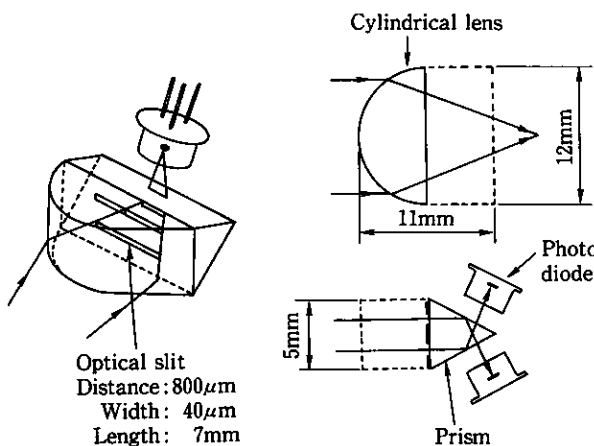


Fig. 12 Prism sensor

数を維持し、速度分解能を保持したまま受光効率を上げ、カブリに有利な受光形状として、スペックル並進方向と直交する方向に細長いスリット形状の受光部とした。

受光部の具体的な形態として開発したプリズムセンサーをFig.12に示す。プリズムセンサーは、プリズム・シリンドリカルレンズ・スリットから構成され、以下の機能を持つ。

- (イ)試料移動方向と直交する方向に細長いスリットを用いることで、分解能向上と受光量を上げてS/Nを向上させる。
- (ロ)シリンドリカルレンズを用いて、スリット長手方向の光をセンサーに集める。
- (ハ)受光素子の外径よりも狭いスリット間隔の光をロスなく受けるため、プリズムの壁面で全反射させながら、ビームを分離する。

(4)測定精度とカブリ安定性

照射レーザーパワーに対する測定精度とカブリ安定性を求めた実験結果をFig.13に示す。

この図より、照射レーザーパワーとして1mW~3mWの間で使用できるようになった。

5.3 高性能化のための処理系開発

(1)高精度化

(a)HPF定数最適化

目標精度を得るための、HPF定数の条件を導出した。

Fig.14に、試料速度をパラメータとして、HPF定数 f_{cm}

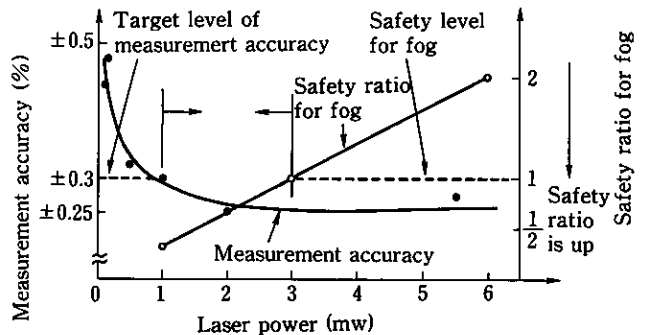


Fig. 13 Measurement accuracy and safety ratio for fog vs laser power

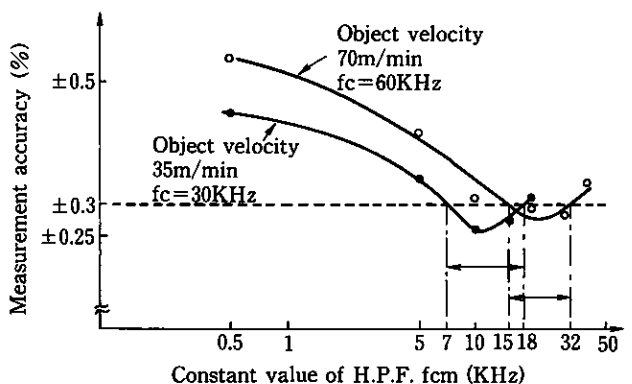


Fig. 14 Effect of H.P.F. on measurement accuracy

と測定精度の関係を実験的に求めた結果を示す。これより、HPF定数は、受光信号の周波数 f_c の $1/2 \sim 1/4$ にするのが最適であることがわかる。これは、スリットサイズ d 、スペックル速度 σv とした時、 $f_{cm} = (1/2 \sim 1/4) \sigma v / d$ であり、具体的には、20kHzのHPFを用いた。

(2) 応答性向上

一般的に、相関計算は、膨大な量の積和演算を行うため、実時間処理が難しい。そこで我々は、DSPを用い高速演算させたが、さらに処理時間を短縮して応答性を上げるため、相関計算区間を狭くするとともに、相関ピーク位置が常に計算区間の中心にくるように制御した。

(a) 相関計算区間の最適化

計算区間として、Fig.8中に示すaの区間だけとした。これは、相関ピーク位置 τd の前後 $\pm 5\%$ に相当する。

(b) 中心化補正

中心化補正を実現化するための処理フローをFig.15に示す。試料速度が変化して、相関ピーク位置 τd が前回の結

果からずれても (Fig.8中の点線部分)、Bchのサンプリングスタートアドレス (Fig.15中のBDELAY) を変えることにより、常に計算区間の中心にピーク位置が来るように制御した。なお、これらの処理 (相関計算区間の最適化と中心化補正) もDSP内部で行っている。

ラインスピード60m/minのフィルムを測定している時のタイミングチャートをFig.16に示す。データ取り込みに1.2msec、演算とその他処理に5.0msec、合わせて6.2msec要した。これより、目標処理速度10msec/data以内を達成出来た。

6

性能評価結果

Fig.17は、テスト用搬送系の速度を測定した結果であり、横軸に時間を取り速度変動をプロットしている。実線は本測定機で測定した結果、点線はその時のロータリーエンコーダーで測定した検定結果を表している。今回製作

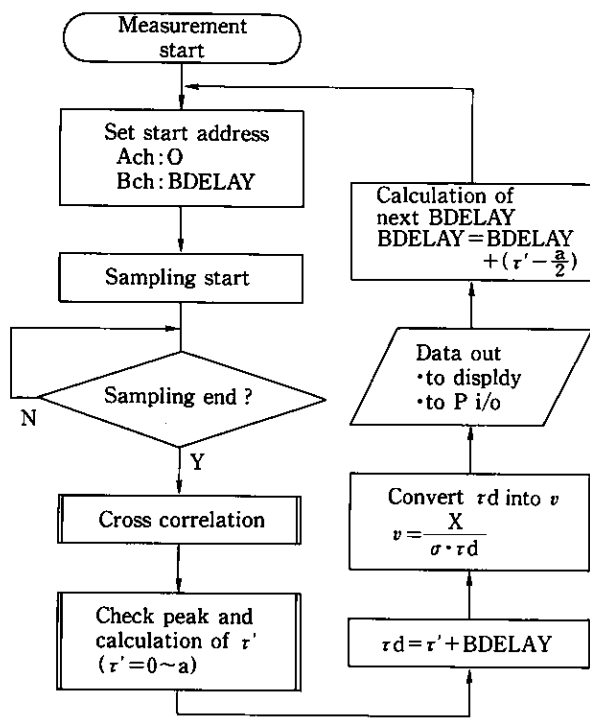


Fig. 15 Flow chart of the signal processing which keeps the peak of cross correlation to the center of the calculating region

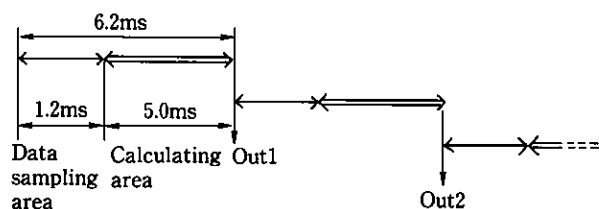


Fig. 16 Timing chart of signal processing system

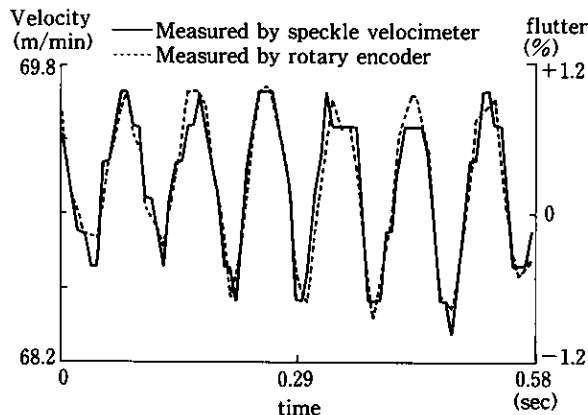


Fig. 17 Measurement result of coated film base

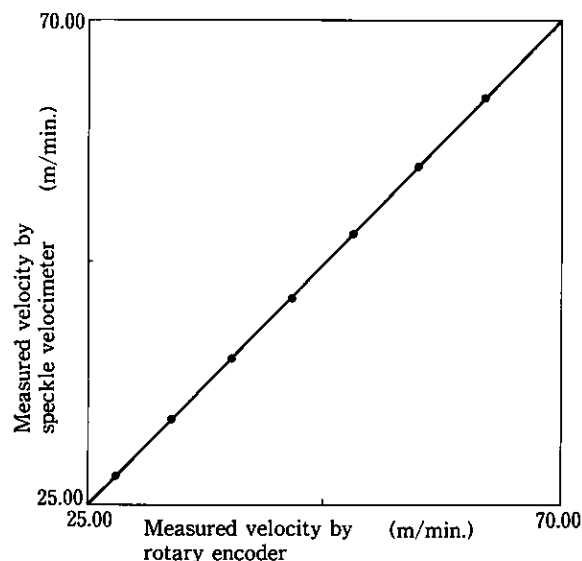


Fig. 18 Experimental result of the linearity test

した測定機では、6.2msec/dataの処理速度を達成することができており、これによりテスト用搬送系で発生している10数Hzの特徴的な速度ムラの成分を良く分解できていることが解る。

Fig.18は乳剤塗布済みのフィルムを対象として測定した結果であり横軸に検定結果、縦軸に本測定機の出力をプロットしている。速度25~70m/minの範囲で非常に良い精度・直線性が得られている。

Fig.19はFig.18を拡大したものである。検定結果に対する測定値のパラツキとして精度を評価した結果±0.3%以内の精度が得られていることが確認された。Table 2は、同様にして種々の対象における測定精度を評価した結果である。乳剤塗布済みベースを測定した場合は、種類によらず±0.3%以内の精度が得られたが、未塗布透明ベースを測定した場合精度劣下が確認された。

Fig.20 (a) は、表面の拡散性の高い塗布済みベースで得られたスペckル信号とその相関信号、Fig.20 (b) は、表面の拡散性の低い透明ベースのそれらを示している。透明ベースの様に、その表面が非常に滑らかで（鏡面状態に近い）拡散性の低い対象では、照射したレーザー光の散

乱が小さくなり拡散光が少なくなる。従って、(5.8)式の照射ビーム系 ω が見かけ上小さくなり、平均スペckルサイズ ΔX が大きくなる。その結果受光するスペckル信号の高周波成分が低下し、相関信号の広がり Δrd が大きくなっている。即ち、測定の分解能が低下するために、測定精度の劣下が発生すると考えられる。

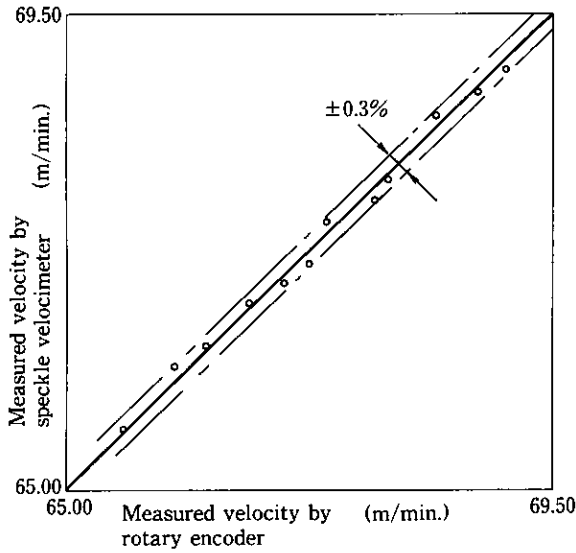


Fig. 19 Expanded graph of Fig. 18 which shows the measurement accuracy

Table 2 Measurement accuracy of several film base

測定対象	測定精度
塗布済みベース1	~±0.3%
塗布済みベース2	~±0.3%
青色透明ベース	~±0.4%
無色透明ベース	~±0.5%

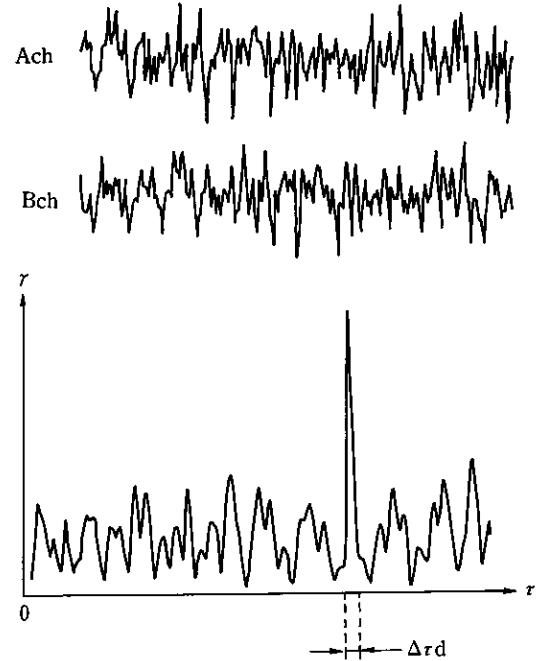


Fig. 20(a) Received signals and the cross correlation value in the case of coated film base

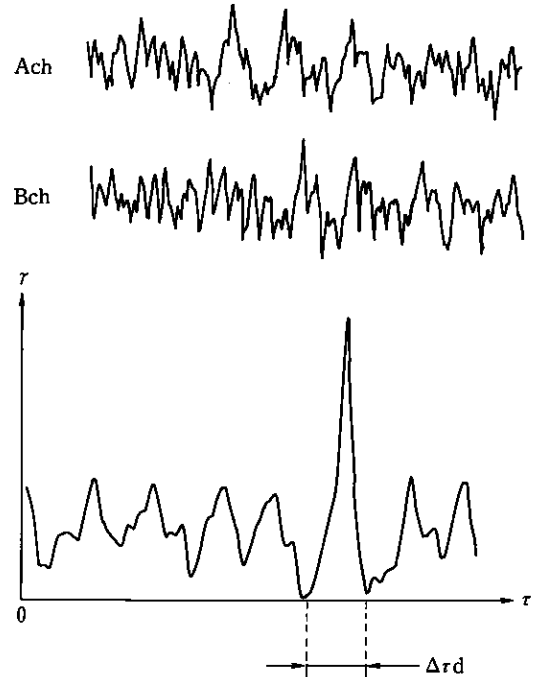


Fig. 20(b) Received signals and the cross correlation value in the case of uncoated film base

7

むすび

検出部にプリズムセンサー、処理部にDSPを用い、コンパクトで応答性・精度の高いレーザスペckル速度測定器を開発した。今後は、以下の項目を進めていく予定である。

- ①拡散性の低い対象での精度向上
- ②反射型検出部の開発
- ③DSP並列化による応答性向上

●参考文献

- 1) ミナトエレクトロニクス㈱6000シリーズ カタログ
- 2) 三菱電機㈱LV-202シリーズ カタログ
- 3) ㈱小野測器 LCシリーズ カタログ
- 4) 特開昭 60-13249
特開昭 63-9853
特開昭 64-66549
- 5) 三品、朝倉：応用物理 42(6),560-573(1973)
- 6) 柳沢、福家：センサー技術 42(3),57-60(1985)
- 7) 高井、朝倉：レーザ研究 8(2),379-387(1980)