光相関法を用いた糸速度の計測

豊田中央研究所 木佐 貫 義 勝
吉 田 一 徳 (会員)

Yarn Velocity Measurement Using Optical Correlation Method

Yoshikatu kisanuki, Kazunori Yoshida

Toyota Central R&D. Labs., Inc.,

Nagakute, Aichi-gun, Aichi

Abstract

A high performance yarn speedometer adopting optical correlation method has been developed to contribute to efficient improvement of looms.

Among some **velocity** measuring methods, optical correlation method is the most suitable for a yarn intense speedometer because of its high accuracy and simple equipment composition.

Optical characteristics of spinning yarn and filament yarn were investigated for the development.

The investigation of frequency characteristics revealed that transmitted light intense signals for both the yarns were roughly random, which indicates optical correlation method **was** suitable for **velocity** measurement.

Measuring accuracy of a trial manufacture yarn speedometer was checked by measuring the **velocity** of the yarn which **moved** at a constant **velocity**.

The influence of the structural factors of the trial yarn speedometer on the accuracy was also examined.

Based on the above result, the trial yarn speedometer was adjusted optimally and the yarn **velocity** near the main nozzle of **air jet loom** was measured.

The measuring accuracy of the adjusted speedometer was found comparable to that of **laser Doppler velocimeter**.

(Received Feb. 9, 1996)

(Accepted for publication July 12, 1996)

摘 要

目的 織機の性能向上と機能拡大を図るため、各種の自動化装置が装着されるようになってきた。

このうち、よこ入れ関連の装置においては、よこ糸の挙動を詳細に把握する必要から、小型、高精度かつ高応答な非接触糸速度計の開発が望まれている。

非接触速度計測方法には、ドップラー効果を利用した方法、空間フィルタ法および光相関法などいくつかの方法があるが、なかでも、光相関法は柔軟に装置を構成でき、上記要求を満足する糸速度計に適した方法であると考えられる。

本研究では、高性能な糸速度計を開発し、織機の性能向上に寄与することを目的としており、本報では、紡績糸ならびにフィラメント糸を対象に、その透過光強度を調べるとともに、速度計を試作し、構成諸因子が測定精度に及ぼす影響を調査した。

成果 紡績糸およびフィラメント糸を一定速度で移動させ、透過光強度信号の周波数分析を行った結果、糸種および移動速度に応じて振幅スペクトルに違いがみられた。しかし、いずれの糸においてもスペクトルには、卓越したピークは認められず、信号はほぼランダム信号と見なすことができ、光相関法を適用するのに好適であることがわかった。

また、試作速度計のスリット間距離やサンプリング間隔などを適切に設定した後、エアジェットルームのよこ入れ装置を静止台上に設置した試験機を用いて、メインノズル入口部近傍の糸噴射過程におけるよこ糸速度を計測した結果、レーザードップラー速度計とほぼ同等の精度で速度計測が可能であった。

(平成8年2月9日受理)

(平成8年7月12日審査終了)

1. 緒 言

エアジェットルーム (AJL) をはじめとする織機のよこ入れ性能の向上を図るため、糸の移動速度を高精度に測定したいという要求がある。測定においては、糸の挙動を乱さないという観点から、非接触計測が望ましく、これまでも光学的手段を用いた幾つかの報告例がある⁵⁻⁷⁾。

このうち、レーザードップラー速度計 (LDV) を用いた方法は、測定精度および応答性の面で優れている反面、レーザビームの交差点と糸の移動路を一致させる必要から、糸の進路や光軸の調整が面倒である。これに加え、装置が大型であるため、主に実験室での利用に限られるなどの問題がある。

LDV 以外の非接触速度計としては、光相関方式の速度計 (光相関速度計) や空間フィルター方式の速度計が知られているが、これらの方式を糸速度計に適用した詳細な研究例は、著者の知る限りない。

上記速度計のうち、光相関速度計は、簡単なセンサー構成で信号計測が行えることから、小型化が容易であり、取り付け、調整が簡単な糸速度計として有望と思われる。

本研究では、高性能な糸速度計を開発し、織機の性能向上に寄与することを目的としており、本報では、糸の光学特性ならびに速度計の構成諸因子が測定精度に及ぼす影響について調べた結果を述べる。

また、AJL のよこ入れ装置を静止台上に設置した試験機を用い、よこ入れ時の糸速度を試作速度計と LDV で同時計測した結果についても報告する。

2. 主な記号

本報で用いる主な記号を以下に示す。

L : 2つのセンサー間の距離 m

t_c : 信号波形の相対位置をずらす区間 s

t_s : 基本データ計測区間 s

V_c : 試作速度計で求めた演算糸速度 m/s

V_a : 誤差を含んだ演算糸速度 m/s

V_L : LDV で計測した糸速度 m/s

V_r : 実際の糸速度 m/s

Δt : 2つの信号波形のずれ時間 s

ΔV : 速度誤差 $V_r - V_a$ m/s

3. 信号波形について

光相関法を用いた速度計測では、図 1 に示すよう

Fig. 1 Principle of optical correlation method.

に一定距離 L を隔てて測定対象に光を照射し、2 か所で計測した透過光強度または反射光強度の波形のずれ時間 Δt と L から測定対象の移動速度を求める。

従って、測定精度は、その波形の特性 (特徴の状態) に依存し、光相関速度形を糸速度計測に適用するに当たっては、測定対象である糸の光学特性を十分に把握しておく必要がある。

糸には太さ、色、原料および製造方法の組み合わせで多数の種類がある。そこで、今回は代表的な糸種として、紡績糸 (ポリエステル綿混紡糸 Ne45 (13.1tex), 綿糸 Ne15 (39.4tex) およびフィラメント糸 (アセテート 120D (13.3tex) - 32F) を対象に、図 9 に示す装置により、糸を一定速度で移動させ、その透過光強度を調べた。なお、測定に際しては、図 4 に示す光学系と、図 5 に示す試作速度計の信号処理回路の一部を用いた。使用したセンサーおよび前段増幅器は、その周波数特性が測定結果に影響を与えないように構成した。なお、上記装置および回路等については後述する。

図 2 に測定結果の一例を示す。図 2 には、図 5 中 a 点の出力信号 a_{sig} をいったんコンピュータで保存し、投影直径に換算した後、平均直径信号 d_{sig} で正規化したものを表示した。

信号の変動振幅は、紡績糸がいずれも平均直径の 40% 程度であるのに対して、フィラメント糸は 70% 程度と大きくなっており、糸による違いが見られる。

一方、信号の変動周期は、いずれの糸においても、移動速度が 5m/s 時より、30m/s 時の方が全般的に短くなっている。また、同一移動速度においては、フィラメント糸は紡績糸に比べ周期の長い変動が目

Fig. 2 Wave-form observations.
 (a) spun (Ne45 (13. 1tex))
 (b) spun (Ne15 (39. 4tex))
 (c) filament (120D (13. 3tex) /32F)

立っている。

図3は、図2の信号の振幅スペクトルを示した結果であるが、いずれの糸においても、スペクトル中に卓越したピークはなく、周波数が高くなるに従って、レベルが低下する傾向がある。また、紡績糸については移動速度が高くなるに従って、10~50kHzのスペクトルが高周波数域にシフトし、フィラメント糸においては、5kHz以下のスペクトルに同様の変化が認められる。

上記のようにいずれの糸においても、スペクトル中に卓越したピークがないことから、信号はランダム信号と見なすことができ、相関法を用いて速度計

Fig. 3 Examples of an amplitude spectrum.
 (a) spun (Ne45 (13. 1tex))
 (b) spun (Ne15 (39. 4tex))
 (c) filament (120D (13. 3tex) /32F)

測を行うのに好適な信号であることがわかった。また、フィラメント糸は、信号の変動周期が長いことから、信号中の特徴の数を紡績糸と同程度とするには、信号計測区間を長くする必要があることもわかった。

上記の信号変動は、紡績糸の場合主に太さむらや表面の毛羽によって生じ、フィラメント糸の場合は、主に糸の姿勢変化や糸の長手方向における繊維の重なり具合の変化により生じると思われる。以下に、Ne45(13.1tex)を例に紡績糸の信号変動と毛羽の関係について考察する。

表1は、毛羽測定器(敷島紡績機, F-INDEX

Table 1 Examples of measured fluff.

fluff head (mm)	F-INDEX average	F-INDEX standard deviation
2.0	392.2	19.2
3.0	143.0	6.3

TESTER) を用いて **Ne45(13.1tex)** の毛羽量を測定した結果の一例であり、表に示す F-INDEX から平均毛羽長と平均本数を求めると、1.1mm と 1080本 /m となった。

信号変動が毛羽によって生じているとすれば、移動速度と毛羽本数の積が、その移動速度における信号変動の主たる周波数成分になると考えられる。上記測定結果を例にとれば、移動速度が 5m/s の場合においては、 $1080 \times 5 = 5.4\text{kHz}$ が変動の主たる周波数成分となり、15m/s および 30m/s では、16.2kHz と 32.4kHz となる。図 3(a)の結果においては、スペクトル中に卓越したピークは見られないが、毛羽から予測した周波数域と、移動速度が高くなるに従ってスペクトルがシフトした周波数域とがほぼ対応していることから、信号変動と毛羽の間には有意な関係があるものと思われる。

4. 試作糸速度計の構成

4.1 検出部

試作速度計は、検出部と信号処理部とからなり、検出部は図 4 に示すように投光器と受光器を対向配置した構造となっている。投光器と受光器の間隔は、移動中の糸の蛇行を考慮し、糸が検出部に接触しない最小間隔である 3mm とした。

投光器は、発光ダイオードとレンズ系からなっており、連続光を糸の移動方向と直角に交差するように照射する。受光器は受光素子とその前面部にスリッドを設置した構成とした。なお、スリットの幅および高さは、測定信号に影響を及ぼす。

スリット幅を広くするに従って、受光器の高周波数域の検出感度が低下し、速度計測に必要な信号成分が失われる。一方、幅を狭くしていくと一定の照射光量の下では受光量自体が少なくなり、S/N 比が低下する。そこで、種々のスリット幅についてその信号を測定し、検出感度と S/N 比のバランスを考慮した結果、幅 0.5mm が良好であった。

一方、スリット高さに関しては、寸法が小さくなるほど S/N 比は増加するが、計測空間が狭くなる。

Fig. 4 Construction of optics.

Fig. 5 Block diagram of developed speedometer.

試作速度計では、S/N 比と取り付けの容易さを考慮し、高さを 10mm とした。なお、スリット間距離 L については後述する。

4.2 信号処理部

信号処理部の構成を図 5 に示す。信号処理部は、受光素子の出力を増幅およびフィルター処理するアナログ回路部と速度演算部とからなっている。

外乱光などによる不要な周波数成分の信号を除去し、速度計測に必要な信号のみを取得する目的か

Fig. 6 An example of mean square error.

ら、フィルターにはバンドパスフィルター（通過帯域0.16~160kHz）を設けた。なお、フィルターの特徴は、前項の糸の透過光強度信号の周波数分析結果を基に、速度計測に必要な信号が欠落しないように考慮してある。

速度演算部は、A/D変換器とDSP（Digital Signal Processor）により構成している。

図6にDSPに記憶した信号波形の一例を示す。速度演算では、図のように信号を一定時間（ $t_s + t_c$ ）の窓で切り取り、切り取った範囲においてDSPにより、ch. 1信号（ $S_{ch.1}$ ）とch. 2信号（ $S_{ch.2}$ ）とのずれ量（ Δt ）を求め、（ $t_s + t_c$ ）間の平均速度 V_c を $V_c = L/\Delta t$ の関係から算出する。

なお、 Δt は、(1)式に示す平均二乗誤差 δ_2 を用いて求めた。 δ^2 を用いた場合、 Δt は誤差値が最小となるサンプリング点のずれ量に対応し、求めたずれ量にA/D変換器のサンプリング間隔 Δt_{AD} （ $=1/f_s$ ）を乗じたものが時間差 Δt となる。

$$\delta_2^2(t_c) = \frac{1}{t_s} \sum_{t=0}^{t_s} (S_{ch.1}(t) - S_{ch.2}(t+t_c))^2 \quad (1)$$

4.3 測定精度の試算

速度計を図5に示すように構成した場合、スリット間距離 L およびサンプリング周波数 f_s が測定精度に影響を与える。そこで、これらの因子の影響を以下に示す指標を用いて調べた。

演算速度 V_c は、(1)式により求めた Δt を用いて算出する。 Δt を求める際の精度は、 Δt_{AD} およびDSPの演算精度に依存する。一方、実際の糸速度 V_s におけるずれ量 Δt_s は、 $\Delta t_s = L/V_s$ で与えられる。

ここで、 Δt に含まれる誤差量を ε とすれば、誤差を含んだ演算速度 V_α は、 Δt_s と V_s を用いて(2)式のように表すことができる。

$$V_\alpha = \frac{L}{\Delta t} = \frac{L}{(\Delta t_s + \varepsilon)} = \frac{V_s}{\left(1 + \frac{\varepsilon}{\Delta t_s}\right)} \quad (2)$$

ここで、 V_s と速度誤差 $\Delta V = V_s - V_\alpha$ の比を演算誤差率 α と定義し、さらに、 ε が Δt_{AD} に比例して増大するとみなし、 $\varepsilon = \Delta t_{AD}$ を代入して、1サンプリング時間間隔に対応する α を求めると(3)式のようになる。

$$\alpha = \frac{(V_s - V_\alpha)}{V_s} = 1 - \frac{L}{\left(L + \frac{V_s}{f_s}\right)} \quad (3)$$

(3)式によれば、 V_s が高くなるほど α は大きくなり、また、 f_s が高くなるほど α は小さくなる。さらに、 V_s と f_s の影響は、 L の大きさにより異なることがわかる。

f_s を一定として、 L および V_s を変更した場合の α の計算結果を図7に示す。試作速度計の目標精度を3%以下と設定し、さらに、織機における V_s の最高値が70m/s程度であることを考慮すると L を4mm以上にする必要がある。

次に、 L を4mmとして、 f_s および V_s を変更した場合の α の計算結果を図8に示す。 $V_s = 70$ m/sにおいて、 α を3%以下にするためには、 f_s を500kHz以上にする必要がある。

以上の結果を基に、試作速度計における L および f_s の標準値をそれぞれ $L = 4$ mm と $f_s = 500$ kHz とした。

5. 測定精度

5.1 非直線性誤差

糸を図9に示す装置を用いて、一定速度で移動させ、 V_c の非直線性誤差 γ （ $(V_s - V_c)/V_{smax}$ ）を調べた。測定糸には Ne45 (13.1tex) を用い、40m/s（=

Fig. 7 Relationship between α and L .

Fig. 8 Relationship between α and f_s .

Fig. 9 Structure of test apparatus.

$V_{y,max}$ までの速度範囲で試験を行った。糸の移動は、糸を多重に巻き付けた円盤をモーターで等速回転させることにより行い、円盤の回転数を反射型の光学センサーを用いて計数することにより移動速度を求めた。上記装置は、回転数が高くなり糸に作用する遠心力が増大すると、糸と円盤の摩擦力が低下するため、移動速度と周速度に差が生じる。このため、試作速度計に近接してLDVを設置し、移動速度を確認した。

γ を調べるに当たって、 t_s 、 L および f_s の測定精度への影響について調査した。

相関法では、信号波形の計測区間 t_s を長くし、信号中に含まれる特徴の数を増加させるほど、測定精度が向上することが知られている。しかし、 t_s を長くすると逆に、速度計の応答性が低下するため、測定精度と応答性のバランスをとる必要がある。一方、 t_s の測定精度への影響は、測定される信号の特性によって異なり、予測することは難しい。このため、 t_s の影響を V_c の標準偏差 σ (測定数100)と V_y の比からなる指標 β ($=\sigma/V_y$)を用いて調べた。

図10に結果の一例を示す。図に示すように t_s が長くなるに従って、いずれの糸速度でも β は小さく

Fig. 10 Relationship between β and t_s . Fig. 11 Relationship between β and L . Fig. 12 Relationship between β and f_s .

っている。例えば、AJLの製織中のよこ糸速度を測定し、糸噴射過程の速度変化を精度良く求めるには、少なくとも噴射期間30~40msの間に20~30点の測定を行う必要があり、このためには t_s を2ms以下にする必要がある。この場合、 β は4%以上となる。

一方、 t_s 以外にも前述のように L および f_s が測定精度へ影響する。 $t_s=1.8ms$ として、 L および f_s の影響を調べた結果を図11、図12に示す。

図11に示すように L が増すに従って β は小さく

Fig. 13 An example of measured γ .

なり、誤差が減少する傾向があり、図7の計算結果と同様の傾向が認められる。しかし、速度の影響に関しては傾向が一致しなかった。

一方、 f_s の影響に関しては、図12に示すように全体的には f_s を高くするほど β が小さくなり、誤差は減少する傾向にあり、前述の図8と同様の傾向がみられる。

これまでの結果を基に、 $t_s=1.8\text{ms}$ 、 $L=4\text{mm}$ 、 $f_s=500\text{kHz}$ として、 γ を調べた結果の一例を図13に示す。図中には、 γ と V_c の平均値 $\bar{V}_c$ を示した。この例においては、 γ は最大2%程度であった。

5.2 よこ入れ速度の測定例

試作速度計の測定条件を前述のように設定し、糸噴射過程のよこ糸供給速度を測定した。測定は、AJLのよこ入れ装置を静止台上に設置した試験機（回転数500rpm）で行った。また、測定糸には、Ne45（13.1tex）を用い、試作速度計とLDVの同時計測を行った。測定結果の一例を図14に示す。

図に示すように試作速度計の測定値は、LDVで測定した速度波形とほぼ重なり、実用上十分な精度で測定が行えている。

なお、 $t_s=0.8\text{ms}$ における結果も合わせて示したが、 1.8ms の場合に比べ測定値の変動が大きく、LDVで測定した速度波形に対して、若干高めめの値となっている。

6. 結 言

光相関法を糸速度計測に適用するにあたって、糸の光学特性を明確にするため、一例として、紡績糸およびフィラメント糸の透過光強度を測定し、その周波数特性の特徴を調べた。また、速度計の構成諸因子が測定精度に及ぼす影響を調査した。

Fig. 14 Measured yarn velocity near the main nozzle.

さらに、AJLのよこ入れ装置を静止台上に配置した試験機を用い、糸噴射過程のよこ糸速度をLDVと同時計測するなど試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) フィラメント糸の透過光強度信号は、紡績糸に比べ周期の長い変動が目立った。信号を周波数分析した結果、いずれの糸においても、振幅スペクトル中に卓越したピークはなく、相関法を用いるのに好適な信号であることがわかった。
- (2) Ne45（13.1tex）を対象に、毛羽と信号変動の関係を調べた結果、両者の間に有意な関係が認められた。
- (3) 速度計の構成因子を $L=4\text{mm}$ 、 $f_s=500\text{kHz}$ 、 $t_s=1.8\text{ms}$ とした場合、糸速度40m/s以下での非直線性誤差は2%以下であった。
- (4) 上記条件において、メインノズル入口部近傍の糸速度を計測した結果、試作速度計の測定値は、LDVで測定した速度波形上にほぼ重なり、実用上十分な精度が得られることがわかった。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、(株)豊田自動織機製作所織機技術部の関係者の皆様に協力を頂き、感謝いたします。

参考文献

- 1) 山口一郎；“スペクトル応用計測の最近の進歩”，精密工学

- 会誌, 57 (1991) 1948-194.
- 2) M. H. Butterfield, G. F. Bryant and J. Dowsing ; A New Method of Stripspeed Measurement Using Rondon-Waveform Correlation, Trans. S. I. T., 13, 111/123 (1961)
- 3) 磯部編 ; “相関関数およびスペクトル”, 東京大学出版会 (1968)
- 4) 敷島紡績機, “光学式毛羽カウンター取り扱い説明書”
- 5) 吉田, 他 ; “エアジェットルームにおけるよこ糸の速度変動”, 織機誌, 44, No. 2 (1991)
- 6) G. Hoth und M. von Thenen ; “Rechnergesteuerte Meßwertaufnahme mehrerer schnell ablaufender Messgrößen”, Textilpraxisinternational, Juli, (1983), p650-653
- 7) G. C. Dubbeldam ; “The Contactless Measurement of Yarn Speed with a Layser-Doppler Velocity Meter”, J. of Textile Institute, 65, (1974-9), p483-487