レーザー・スペckルパターンによる非接触速度計の試作

稲 荷 隆 彦*・高 嶋 和 夫*・北 原 照 義**・大 道 寓 男**

Non-Contact Velocimeter Using Speckle Patterns Produced by Laser

Takahiko INARI*, Kazuo TAKASHIMA*, Teruyoshi KITAHARA** and Michio DAIDO**

Non contact measurement of surface velocity of material such as metal was made possible by the use of movement of the speckle patterns produced by diffraction of coherent light on the surface structure. The movement of the speckle patterns is due to the movement of the surface. Some papers have treated partially this principle supported only by laboratory experiment, but no instrument has been put to a practical use.

We developed the practical velocimeter with high accuracy. In this paper the characteristics is relation to the accuracy, that is, the frequency shift of the output signal for curved surfaces, and the half-width of the frequency spectrum of the signal due to the optical structure, are mainly treated. The half-width depends not only on the spot area of the illuminated surface, but on the velocity distribution of the speckle patterns on the observed plane.

Experimental results showing the accuracy of our instrument in the laboratory and fieldtests on a cold rolling line are described in this paper. At its best an accuracy of better than $\pm 0.15\%$ was obtained for normal steel surfaces running with high velocity and without vibrations or waves. The accuracy is limited by the velocity to be measured and the conditions of users. The accuracy falls for a lower velocity, so it becomes about $\pm 0.5\%$ when the velocity is about 40 m/min. The range of velocity of our instrument is about 20~2000 m/min.

1. ま え が き

コヒーレント光を金属表面などに照射した場合、その反射光にスペckルパターンと呼ばれる粒状の回折像が現われる。このパターンは表面の運動に伴い運動する。この運動の速度を検知すれば、非接触にて速度計測を行うことができる。

この事実は W.H. Huntly により指摘され¹⁾, G. Stavis により実際の速度計測装置としての提案がなされた²⁾。われわれはまずこの現象の回転計としての応用を試み^{3), 4)}, 次いで図形を速度を空間フィルタにて計測するというよく知られた方式^{5), 6)}を用いた実験を行い、基本的な動作特性については報告した⁷⁾。また最近荻原により、差動形光検出器を用いた場合の照射光束幅、および検知器の空間周波数特性と出力のパワースペクトル密度に関する解析が行われた⁸⁾。また一方回折理論からスペckルパターン運動についてもすでに部分的に論ぜられている^{9), 10)}。

しかしながら、以上の多くの研究はいずれも実験室段階にとどまっており、ただちに工場にて使用できる実用的な計測器としての問題点を十分に検討されるにはいたっていない。たとえば精度に関連した光学系設計上の問題点や、対象表面の曲率や表面状態の影響などの実用上重要な研究はまだなされていない。

本論文では、まず実際の速度と速度計出力との定量的関係を求めるため、光学系と出力信号周波数との関係式を導き、特に対象表面が曲率をもつ場合の実験結果との対応を示す。つぎに信号の周波数スペクトルに与える ← 要因につき実験的な検討結果を述べ、最後にわれわれの開発した実用レベルの速度計に関し、精度の面からみた諸特性、ならびに実際の工場における実用試験結果につき報告する。

2. 光学系と出力周波数との関係

前節で述べた対象表面の運動に伴うスペckルパターンの運動は、格子状スリットからなる空間フィルタ

* 三菱電機(株)生産技術研究所 尼崎市南清水中野 80

** 三菱電機(株)鎌倉製作所 鎌倉市上町屋 325

* Manufacturing Development Laboratory, Mitsubishi Electric Co., Amagasaki

** Kamakura Works, Mitsubishi Electric Co., Kamakura

(Received February 14, 1976)

Fig. 1 Basic optical construction of the velocimeter

を通して光電子増倍管にて受光すると、その出力には対象表面の速度に比例した周波数をもつ交流信号が現われる。基本的な光学系は Fig. 1 に示すとおりである。これが速度計の基本的な原理である。

ランダムな図形の移動を上述の空間フィルタにより計測することはすでに詳細に論じられており^{5), 6)}、ここでふれる必要はない。結論として、出力の中心周波数はきわめて簡単な式、

$$f = \frac{v_s}{g} \quad (1)$$

ただし f は出力信号周波数、 v_s は図形の手、 g は空間フィルタの格子のピッチ間隔で一般的に与えられる。

スペックルパターンの速度 v_s と、表面の速度 v との関係は光学系により決められる。この関係についても一般的には回折理論から求められるが、われわれの速度計出力と実際の表面速度との関係を簡単な一般式で表すには、光学系の幾何学的関係から求めるほうが便利である。

いま Fig. 2 に示す光学系につき考える。表面のもつ曲率を r とし、ある時間後に点 P が P' に移動したとする。スペックルパターンは照射面積 D が有限であるため、表面が移動した場合、わずかな時間のみ原形を保ったまま移動し、ただちに变化する(この原形を保っている時間をパターンの寿命 τ と呼ぶ)。速度を論ずる場合には PP' は D に比べて十分に小さいとしてよい。図形の中心が P から P' に移動したのであるから、その図形に着目すれば、回折の光学系の中心が OP から OP' に移ったことになり、したがって対応する回折パターンの光学中心は Q から Q' へ移ることになる。 PP' を v とすれば QQ' は v_s を与えることになる。Fig. 2 の光学系では単純な幾何学的関係より、

$$v_s = v \left(1 + \frac{a}{b} + \frac{2a}{r} \right) \quad (2)$$

ただし a は照射光束の拡がりの原点より表面までの距離、 b は表面より観測面までの距離

Fig. 2 Relation between the curved surface and the movement of the speckle pattern

が導かれる。対象表面が平板の場合、(2)式で $r = \infty$ とすれば

$$v_s = v \left(1 + \frac{a}{b} \right) \quad (3)$$

となる。(2)式を(1)式に代入すると、

$$f = \frac{v}{g} \left(1 + \frac{a}{b} + \frac{2a}{r} \right) \quad (4)$$

となり、速度計出力と表面速度の関係が求められる。

3. 速度計の構成

実用レベルでの実験の目的として試作した速度計について以下に述べる。

3.1 検出ヘッド部

検出ヘッド部の構成を Fig. 3 に示す。光電子増倍管を2個用いているのはつぎの理由による。通常の He-Ne ガスレーザーの発振光は数 100 kHz ~ 数 MHz にかけて不安定な高周波の雑音光を含むのが普通であり、これが広範囲の速度計測を阻害する。この光電子増倍管はこの影響を相殺するためのものである。

3.2 周波数追尾装置

光電子増倍管から現われる速度出力信号の周波数スペクトルは多くの雑音を含んでおり、速度計としてはこの周波数スペクトルの中心を、できれば零、現実には数 kHz から数 MHz の周波数領域にわたって追尾し、数値として表示するものでなければならない。このような周波数追尾装置により、初めて 0.1% クラ

Fig. 3 Arrangement of the detecting head

Fig. 4 Basic block diagram of the frequency tracking system

Fig. 5 Variance of output frequency for the curved surfaces

フィルタの周波数を走査し、それぞれのフィルタからの出力の相対値より、目的の周波数スペクトルを検知する方式をとっている。

以下、本論文で述べる実験は、いずれもこの試作速度計によるものである。

4. 対象表面の曲率の影響

表面の曲率の影響は速度計を使用する場合補正する必要があり、重要な特性の一つである。原理的には式により与えられるが、われわれはこれを実験により確認した。

実験室での実験はすべて標準回転体を製作して行った。回転体はアルミニウム円板で、円筒部側面を研磨仕上げたものを対象表面として用いた（半径 50, 75, 100 mm の3種類）。モータの回転速度のばらつき測定には別にエンコーダを用いた。精度実験を行う場合には、追尾装置出力、エンコーダ出力を D/A 変換し、記録した。同一瞬間における両出力が記録することもできるよう、回路系を製作した。

実験結果を Fig. 5 に示す。測定系と表面の距離は一定に保った。計算値は(2)式より求めた。この結果から、おおよその傾向としては(2)式に従っていることが確認される。図中に示した偏差値は、実験系の設定誤差、次節で述べる Q 値の影響などに依っていると考えられる。この偏差値は実際の速度計の補正值に組

入れ、(4)式最後の項は $2\alpha(1+\alpha)/r$ として実験値により修正される。

5. 出力信号の Q 値へ与える影響

検出ヘッド部からの出力信号の特性を表わす重要なパラメータはその Q 値である。これは出力信号の周波数スペクトルのピークの中心値 ν とその半値幅と $\Delta\nu$ の比、 $\nu/\Delta\nu$ で与えられる。

Q 値は主として光学系の設定の方法によりきまる。この Q 値は一つには第2節で述べたスペックルパターンの寿命 τ に依存し、したがって照射スポット径 D に依存する。このことは定性的にも明らかであり、理論的にもある程度明らかにされている⁸⁾。このほかに観測面内のスペックルパターンの速度分布の影響が特に重要である。

観測面内でのスペックルパターンの速度分布は、主として、本来角度分布として与えられる回折像を、一定の位置においた、広がりをもった平面で観測するために起る。たとえば Fig. 6 のように 1 点 O から入射角 θ でもって表面 S を照射した場合、回折光の中心は $\overline{PR_0}$ に沿って進むが、回折光はそのまわりに角度分布をもって進む。表面 S の微細構造の y 軸方向の成分による回折光は、 P を頂点とし、 P_y を底とする円錐を中心にした、それぞれひらき角の異なる円錐群の表面に沿って進む。また表面 S の x 軸方向の成分による回折光は、同様に x 軸を中心にした円錐群の表面に沿って進むことになる。図のように $\overline{OP}$ が yz 平面内にある場合、 x 成分の回折光の中心は、円 P_x に向って進むことになる。この回折光を平面状の観測面 R で区切って観測した場合、図のように直線状の軸 R_x と曲率をもった軸 R_y を二つの中心軸とした座標系の上に、スペックルパターンは分布することになる。表面 S が x 方向に移動すると、各スペックルパターンは軸 R_y と平行に運動することになる。この運動速度は厳密には R_y の曲率、ならびに各スペックルパターンの観測点と、照射光中心 P との距離に依存する

Fig. 6 Diffraction pattern and velocity distribution on the observed plane

Fig. 7 Observation of the velocity distribution by partially masking of the spatial filter

と考えられる。すなわち、実際の速度計では、この速度分布を平均した形で観測しており、観測面の大きさ、位置、角度により、Q値が大きく変動することは明らかである。

Fig. 7 はわれわれの速度計での空間フィルタを、図中に示すように中央部のみしゃへいした場合の出力信号の周波数スペクトルで、スペクトルの中央部のみ消えており、空間フィルタ面上での速度分布を明らかに示している。

6. 速度計の精度

われわれの試作した速度計の総合的な精度を以下に述べる。

6.1 速度計のばらつき

一定速度の表面を計測した場合の指示値のばらつきの実測結果を Table 1 に示す。測定系は第4節で述べたとおりである。図のA欄は回転体の速度のばらつきを含めた値であり、B欄は第4節で述べた同一瞬間

Table 1 Variance of the data for a constant surface velocity of the standard rotator

Data No.	Velocity of the rotating surface	Dispersion (A) (Before correlation)	Dispersion (B) (After correlation)
1	228 m/min	$\pm 0.17\%$	$\pm 0.045\%$
2	114	± 0.17	± 0.086
3	72	± 0.23	± 0.12
4	36	± 0.26	± 0.18
5	18	± 0.29	± 0.18

A: Variance including that of surface velocity of the rotator

B: Not including the variance of the rotator

Fig. 8 Difference of the observed data from the calculated values (eq. 4) for various velocities

のエンコーダからの指示値と速度計の指示値をとり、その相関性より求めた値である。

6.2 速度計の線形性

回転体の速度を広範囲に変化させた場合の指示値の実測結果を Fig. 8 に示す。ここに示されたデータは実測値と(4)式からの計算値との偏差値である。また4回同様な実験を行い、そのばらつきをも同時に示している。繰返し実験のばらつきは非常に小さい範囲に入っているが、計算値からのかたよりは10%以上あり、実験誤差以外の何らかの原因があるものと推定される。

7. 速度計現地試験結果

この速度計は連続して走行する物体の速度を計測する目的のものであるが、実験室での実験はいずれも回転体で行うよりほかに方法がない。したがって最終的に実用性を確認するためには実際の対象物での試験が必要である。

現地試験は実際の薄板冷間圧延ラインの中で、比較的鋼板の表面がきれいで、パスライン変動の少ない場所を選んで行った。実験はラインの中で鋼板がしっかりとまかれたローラに取付けたエンコーダ(PLGと略す)により鋼板の速度を求め、その対比を検討した。Table 2 に試験結果を示す。図中で回転部とあるのはラインの中のローラの表面上での結果であり、平板部はローラから外れた、曲率のない部分での実測結果である。平板部でのしわ、振動というのは鋼板にし

Table 2 Variance of the data for sheet metal in the field test.

Location of measurement		Velocity of steel plate/Dispersion of indication value		Note
Rotating part (on a roller)		400~800 m/min/ $\pm 0.12 \sim 0.16\%$		Pitch of the grating $g=0.4$
On a plane part	Non-waving and non-vibrating point	200~800	$\pm 0.18 \sim 0.57$	0.4
	Waving point	800	$\pm 0.42 \sim 0.91$	0.2
	Vibrating point	800	$\pm 0.55 \sim 1.03$	0.2

Fig. 9
An example of trace of the output signal for sheet metal in the field test.

わや振動のある部分での実測結果である。このような鋼板では反射光がゆれ動くため、1% 近い大きいばらつきが現われてくる。Fig. 9 はこの現地試験での測定データの一部である。鋼板速度の大きな変化に、よく追隨していることがわかる。

8. む す び

レーザーによるスペックルパターンの運動を利用した速度計の研究は、従来部分的、かつ実験室的段階にとどまっていたが、われわれはこれを総合的、かつ実用的な速度計とするため研究をすすめてきた。本論文では速度計出力と表面の速度との関係式を光学系の幾何学的関係より求め、実用装置としての諸特性、こと

に高精度を実現するための要因の分析と実験的確認を行い、実験室、ならびに実際に使用される工場での試験を行った結果について述べた。

現在までに得られている概略性能は、鋼板が一応通常の表面で、かつパスライン変動のない場合、高速において $\pm 0.15\%$ 以上（応答時間1秒）の精度を得ている。精度は低速になるほど悪くなり、40 m/min で約 $\pm 0.5\%$ になる。なお今回の試作装置で計測できる速度範囲は約 20~2000 m/min である。

今まで述べた諸特性の詳細な分析と解明について、本論文ではほとんど概括したのみであり、今後実施してゆく予定である。

最後に本速度計の現地実験にご協力いただいた東洋鋼板(株)の関係部門の方々、ならびに三菱電機(株)の関係部門の方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) W.H. Huntley: New Coherent Light Diffraction Techniques, IEEE Spectrum, 114/122, January (1964)
- 2) G. Stavis: Optical Diffraction Velocimeter, Instrument and Control System, 39-9, 99/102 (1966)
- 3) T. Inari: Detection of the Number of Rotation of a Rotator Using the Speckled Patterns Produced by a Coherent Light, Japan. J. Appl Phys., 8, 970/971 (1969)
- 4) 稲荷: 周波数分析形無接触光学回転計測, 第11回SICE学術講演会予稿集, p. 607 (1972)
- 5) J.T. Ator: Image Velocity Sensing by Optical Correlation, Appl. Opt. 5, 1325~1331 (1966)
- 6) 内藤, 狼, 小林: 空間フィルタによる速度計測, 計測と制御, 7-9, 761/772 (1968)
- 7) 稲荷, 高嶋: 空間フィルタを用いたレーザースペックルパターン速度計, 第20回応物連合講演会予稿集, p. 134 (1973)
- 8) 荻原: スペックルパターン速度計の特性解析, 計測自動制御学会論文集, 11-5, 567/572 (1975)