

研究

高出力半導体パルスレーザーを用いる ストロボスペckル速度計

栗田 隆雄・小松 進一

早稲田大学理工学部応用物理学科 〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1

(1989年1月23日受理)

Stroboscopic Speckle Velocimeter Using a High-Power Pulsed Laser Diode

Takao KURITA and Shin'ichi KOMATSU

Department of Applied Physics, School of Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169

Stroboscopic speckle velocimetry using a high-power pulsed laser-diode is proposed. This method is applied to the measurements of a moving diffuser, and the experimental results are obtained with good accuracy. The variations in both intensity and wavefront of each laser pulse are also examined, and the error caused by the intensity variations can be minimized. Because of the high power of the laser pulse, this method is effective particularly for distant objects and/or moving surfaces with low reflectivity under the presence of background light.

1. はじめに

スペckル速度計は、非接触計測可能という光技術に共通な特長を有し、また、物体表面のきずや目印の移動をとらえるインコヒーレント光空間フィルタ方式¹⁻³⁾に比べて、特別な標識なしに高いコントラストの信号が得られ、かつレーザードップラー速度計に比べて光学系が簡単で調整が容易であるという長所をもつ^{4,5)}。

われわれはこれまでスペckル速度計を小型化・安定化し、さらに機動性・簡便性の向上を図るため、光源に半導体レーザーを採用することを試みてきた⁶⁾。しかし、一般に半導体レーザーの出力が限られていたため、測定対象物体の透過率や反射率が低い場合あるいは遠方にある場合には、十分な SN 比を得るのが困難であった。

この問題を解決するためには、レーザー光源の高出力が重要である。最近、高出力の連続発振半導体レーザーも開発されるようになったが、一般にパルス発振半導体レーザーのほうがより高出力を得られるので、ここではスペckル速度計の光源として高出力半導体パルスレーザーを用いることを試みた。

この場合、スペckル受光信号もパルス信号となり連続発振レーザーを用いた従来の信号処理法はそのままでは適用できない。そこで、パルス動作に対して有効なストロボ方式の計測システムを提案し、回転散乱板の速度測定を行ないその測定精度を実験的に評価した。また半導体パルスレーザーの使用に当たっては、各パルスごとの波面変化や光強度変動の影響が問題となるが、この点についても実験的に検討し、波面変化の影響は少ないこと、また強度変化についてはその影響を少なくするようにシステムを改良した。

なお、本論文では被験物体としてすりガラスを使用し透過光によるスペckルについて基礎実験を行なっているが、実際の速度測定対象としては、反射物体を対象とすることが多いと思われる。高出力半導体パルスレーザーを用いる本方法は背景光の下での遠方の物体や反射率の低い物体を計測する際にも有効であると考えられる。

2. 原 理

今回われわれが用いたスペckル速度計の構成を Fig. 1 に示す。まず、説明を容易にするためにレーザー

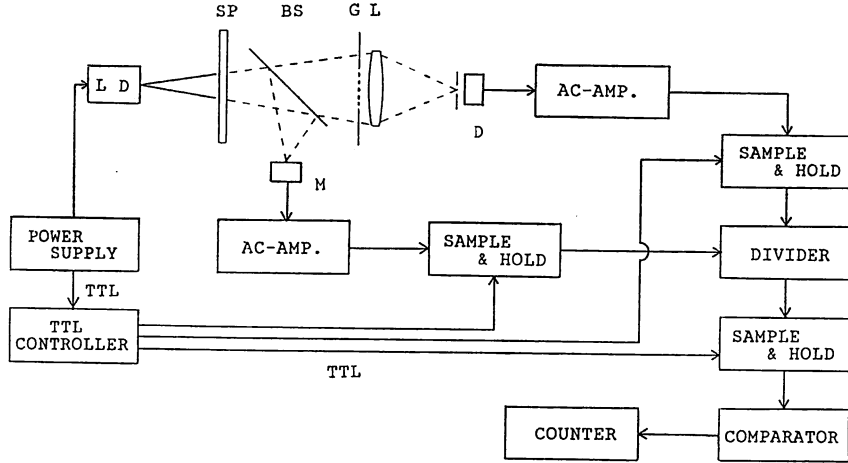


Fig. 1 Schematic diagram of a stroboscopic speckle velocimeter.

は連続発振しているものと仮定してみる。運動する散乱板 SP に照射されそこで散乱された光は、レンズ L を通過して像界にSpeckleを生じさせる。とくにレンズ L に関して散乱板を照射するレーザー波面の曲率中心と共役な面上では、Speckleは変形だけを生じることが知られている⁴⁾。さらにレンズが周期的な瞳 G をもつ場合には、変形が周期的におきる⁵⁾。これは、ランダム振幅分布をもつ光の場が周期瞳上を移動し、ちょうど周期分移動すると再び同様な光の場が像界Speckleの形成に寄与するようになるためである。瞳面上をランダムな振幅分布をもつ光の場が移動する速度 v_L は、照射するレーザーの光の波面曲率半径を R 、散乱板からレンズ瞳までの距離を a 、散乱板の速度を v_0 とすると、

$$v_L = (1 + a/R)v_0 \quad (1)$$

で与えられるから、Speckle変形の時間周期 τ は、瞳の周期を d として、 $\tau = d/v_L$ となる⁴⁾。したがって、Speckle変形の振動数 f は

$$f = 1/\tau = (1 + a/R)v_0/d \quad (2)$$

となる。

Speckleの強度ゆらぎは、フォトディテクタ D から出力される光電流を交流増幅して得られる。Speckleの時間変動の周期 τ あるいは周波数 f は、光電流信号のスペクトルや自己相関などを測定して求めることができ、これから(2)式を使って散乱板の速度を知ることができる。

以上は連続発振レーザーの場合であるが、本実験では、光源に周期 T で発振するパルスレーザーを使用した。この場合 D からの出力もパルス信号となる。パルス信号のピーク値は、CW レーザーを照射したと仮定したときの光電流を周期 T でサンプリングしたものになる

と考えられる。連続するパルス信号のピーク値は、レーザー発振周期 T とSpeckleの変形周期 τ が一致したとき、ストロボ効果によりその時間的変動が最小になるはずである。また、二つの周期の差が大きくなるにつれてピーク値の変動も大きくなる。したがって、レーザーのパルス発振周波数を制御・調整しパルス信号のピーク値の変動が最小になるところをみつけることにより散乱板の速度を決定することができる。

3. 実験および結果

本実験では、光出力 10 W の半導体パルスレーザー (浜松ホトニクス社 L2376) を使用し、波長 $\lambda = 890 \text{ nm}$ 、パルス幅 100 ns、発振周波数 100 Hz~3 kHz の範囲で駆動した。まずはじめに、レーザー発振の安定性を確認するために、各パルス間の波面変化と強度変動の大きさを評価した。方法は静止散乱板にパルスレーザーを照射し、その透過光によって散乱板から 250 mm のところに生じる回折界Speckle像を赤外線フィルムに多重露光した。各パルス間で波面変化が生じていれば記録パルス数の増加とともに写真記録されたSpeckleのコントラストは低下するはずである。実験の結果露光パルス数を 125, 250, 500 パルスの場合の多重露光写真は Fig. 2 のようにほとんど変化しないことがわかった。Speckleの形状が上下方向に細長くなっているのはレーザービームの広がり角が、レーザーチップの接合面に水平な方向と垂直な方向で大きく異なるため散乱板上の照射領域が扁平率の大きな楕円になることによる。写真の水平方向に光電測定したコントラストはほぼ 0.39 で一定であった。He-Ne レーザーなどによるSpeckleと比べるとかなりコントラストが低い、この原因は記録に用

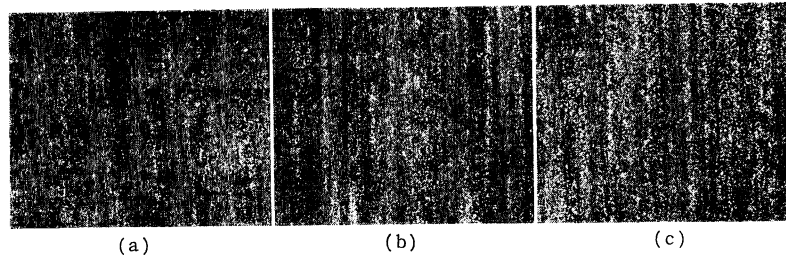


Fig. 2 Multiple exposure photographs of the speckle pattern produced by the pulsed laser-diode. These photographs are exposed for (a) 125, (b) 250 and (c) 500 pulses.

いた赤外用写真フィルムの特性によるものと思われる。パルス数に伴うコントラストの低下はほとんど認められず波面の変化は少ないことが確認された。また、速度測定実験では、周期瞳の格子の方向をスペックルの長手方向と一致させた。

また、パルスごとの光強度の変動をフォトディテクタを用いて測定したところ、こちらは10%程度の変動が認められた。波面変化の影響に比べて光強度の変動が大きく、強度変動の影響を低減する必要があることがわかった。このためには、レーザー出力を各パルスごとにモニターしこれを用いて信号の大きさを割り算して規格化すればよい。

本実験の信号処理系を **Fig. 1** を用いて説明する。光源と共役な面に置いた pin フォトダイオード D で受光したスペックル信号をサンプルホールド (Harris 社 HA 5330) しパルス幅を拡大 (330 μ s) する。散乱板透過後ビームスプリッタ BS から反射されたモニター用 pin フォトダイオード M の出力も同様にパルス幅を拡大する。次に、拡大されたパルス信号をモニター信号でアナログ除算器 (Analog Devices 社 AD 535) により割り算を行なう。除算回路の出力段にもう一段のサンプルホールド回路 (Harris 社 HA 2425) を接続し、次のレーザーパルスの到着まで正しい値を保持する。このようにして得た信号の時間変動の大きさを調べるためにはさまざまな方法があるが、ここではレベル交差数の計数を用いた。2段目のサンプルホールド出力の信号がその平均電圧レベルを交差する回数をコンパレータとカウンタを用いて計数した。パルスレーザーの発振周波数を高周波側から減少させていき、レベル交差数が最小になる発振周波数を見つけ、その値から散乱板の速度を計算により求めることができる。

Fig. 1 の光学系の設定は、 $R=22$ mm, $a=70$ mm, 瞳の直径 4.8 mm, $d=50$ μ m, レンズ焦点距離 50 mm, Dの開口直径 50 μ m, Mの開口直径 2.54 mm とした。

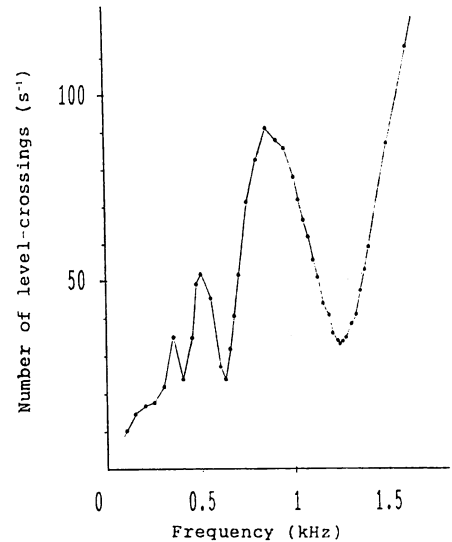


Fig. 3 Number of level-crossings per unit time experimentally obtained for various repetition frequencies of the pulsed laser diode.

また散乱板として回転すりガラス円板を用いた。

はじめに散乱板の速度を一定 ($v=1.53$ cm/s) にしてパルスレーザーの発振周期を変化させたときのレベル交差数の変化の様子を調べ、その結果を **Fig. 3** に示す。計数は散乱板が一回転する間にわたって行なった。図から $f=1.24$ kHz で零交差数が極小値となっていることがわかる。この値は散乱板の速度から逆算した値 1.28 kHz とほぼ一致している。このほかにゼロ交差数が $f=0.63$, 0.4 kHz においても極小値が存在するが、これはパルスレーザーの発振周期がスペックルの変形周期に一致したときだけでなく、その整数倍の周期においてもレベル交差数が極小値となるためである。これらの極小値を与える周波数のうち、最大のものから散乱板の速度を求めることができる。

次に、散乱板の速度を変化させ、レベル交差数の極小値を与えるパルスレーザーの最大発振周波数を求めた結

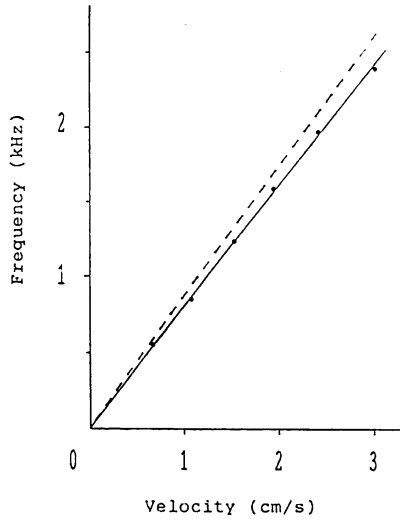


Fig. 4 Maximum pulse repetition frequencies giving minimum level crossings are experimentally obtained for various diffuser speeds. The solid line is determined by the least square method and the dashed line is calculated from actual diffuser speeds.

果を Fig. 4 に示す。実線は、測定値から最小自乗法で求めた直線であり、点線は実際の散乱板速度から計算した周波数と散乱板速度の関係を示している。レベル交差数の極小値を与えるレーザー発振周期の最大値と散乱板速度の関係において測定値は良い直線性を示しており、直線からのずれは 2.0% であった。点線と直線の傾きの違いは、レーザー波面の曲率半径や散乱板と瞳間の距離などの測定誤差に起因するものと思われる。実際の測定にあたっては標準速度物体を用いて速度計の較正を行えばよい。

4. ま と め

高出力半導体パルスレーザを光源とするストロボ効果を利用したスペックル速度測定システムを構成し、測定精度を実験的に評価した。回転散乱板の速度測定結果からレベル交差数の極小値を与える最大レーザー発振周期と物体速度との間に良い直線性があることが示された。

また、高出力半導体パルスレーザの各パルスごとの波面変化を多重露光写真のコントラストにより評価した結果、スペックルに与える影響は少ないことが確認された。パルス強度の変動は 10% 程度あることがわかり、モニター光で信号光を規格化してその影響の低減を図った結果、本方法がスペックル速度計測に十分利用できることを確認した。

日頃ご指導いただく本学大頭仁教授に感謝の意を表す。なお、本研究の一部は、河上記念財団の助成により行なわれた。

文 献

- 1) 島津雅樹：“最新の車速計測システム”，内燃機関，**23** (1984) 28-36.
- 2) 牛坂 健：“格子状フィルタを用いた速度計”，光学，**11** (1982) 314-316.
- 3) 小林 彬：“計測用空間フィルタ法の進展”，応用物理，**52** (1983) 1007-1014.
- 4) I. Yamaguchi, S. Komatsu and H. Ohzu: "Dynamics of speckle produced by moving object and its applications," *Proceedings of the ICO Conference on Optical Methods in Measurements*, Tokyo (1974), Jpn. J. Appl. Phys., **14**, Suppl. 14-1 (1975) 301-306.
- 5) S. Komatsu and I. Yamaguchi: "Velocity measurement using structural change of speckle," *Opt. Commun.*, **18** (1976) 314-316.
- 6) K. Kobayashi, S. Komatsu and H. Ohzu: "Diode-laser speckle velocimeter using maximum entropy method," *ICO-13 Conf. Dig.* (1984) 128.