

TIA を用いた VCSEL の自己結合型近距離計に関する研究

Study on short distance meter based on self-coupling effect of VCSEL using TIA

神野 美子† , 津田 紀生††, 山田 諄††

Yoshiko Jinno , Norio Tsuda , Jun Yamada

Abstract Recently, making use of self-coupling effect of VCSEL, a compact distance meter has been studied. In this distance meter, self-coupling signal has been processed by FFT to obtain a distance information. However the real time measurement is difficult as FFT analyze takes time. Then a short distance meter based on self-coupling effect of VCSEL using Time Interval Analyzer (TIA) is studied. By TIA, the time interval of each self-coupling pulse is measured and the frequency distribution is obtained. Thereby, a distance is calculated by statistically processing the frequency distribution. It is found that the measurement error by TIA is 1/10 less than that by averaging the total self-coupling pulse, that is by using a counter.

1. はじめに

半導体レーザは、他のレーザと比較して小型・軽量という利点のみならず、高利得・高効率であることや、注入電流によりレーザ光の周波数や出力を制御でき、変調が可能である等の特徴をもつ。このような特徴を活かして、物体の形状測定、距離測定、回転速度測定などの計測分野へも応用が広がるようになり、工場内の生産ラインにおいて距離、外形、形状センサとして多く使用されるようになってきた¹⁾。

現在、工場では生産ラインのオートメーション化が急速に進み、ロボットの使用が数多く見られるようになってきている。このような工場の自動化に伴い、工場のライン上で物体の形状など三次元測定を高速に行う、高性能、小型で安価な距離センサの需要が高まってきている。そこで、小型、非接触、高精度で測定が可能であるといった特徴をもつ半導体レーザを利用して、近距離センサを試作した。

レーザ光を用いた距離測定には、三角測量法が実用化されている¹⁾。この測定方法では短距離において高精度の測定が可能であり、距離分解能をマイクロメートル程度まで可能にしている。しかし、測定可能範囲が非常に狭い範囲に限定されてしまい、対象物までの測定距離が

制限される。また、マイケルソン干渉計を用いて半導体レーザの周波数変調により生じるビートの測定から距離を求める方法もある。この方法は、三角測量法により測定距離が長く、精度も良いが、光学系が複雑になってしまう問題がある。

そこで本研究では、半導体レーザの自己結合効果²⁾を利用して距離測定を行った。従来、レーザ光が半導体レーザに戻ってきたときに戻り光ノイズとして扱われ、極力現れないようにしていた現象を積極的に利用することで距離測定を行おうとするものである。これは対象物に対する散乱光と出力光の干渉を利用し、フォトダイオード内蔵半導体レーザ単体で発光、干渉、受光を兼ねることができるので外部干渉光学系が大幅に簡略化できる。このためセンサ部が、半導体レーザとレンズのみの構造となることから非常に小型で外部振動に強くなる。

自己結合距離センサは、1m 程度の距離を簡単に測定することができることが分かっている³⁾。本研究では、二次元アレイの作製に適したデバイスである面発光型半導体レーザ（以下、VCSEL）を使用し、三次元断面測定を高速に行うことを目的とした。このため、これまで直径 18mm の集光レンズを使用し距離測定を行っていたが、本研究ではアレイ状での測定にむけて面発光型半導体レーザの外径程度の直径 5mm の集光レンズを使用した。集光レンズを小さくしたことにより、戻り光量が少なくなり距離測定が困難になるため、測定回路の改良を行った。また測定距離を 10cm 程度の近距離を目標として近距離測定を行い、変調周波数の違いによる測定距離範囲、平

† 愛知工業大学大学院 工学研究科
電気電子工学専攻（豊田市）

†† 愛知工業大学 工学部 電気学科
電子工学専攻（豊田市）

均ばらつき誤差の変化を調べた。

次に、従来 FFT 解析により距離測定を行っていたが、測定に演算時間のタイムラグを生じるため高速化が望めなかった。工場のライン上での応用に向け、距離測定高速化が必要不可欠である。そこで FPGA を用いたりリアルタイム測定に向けて、自己結合信号をパルス化しタイムインターバルアナライザ（以下、TIA）を用いて距離測定を行った。この際、統計処理を行い、その有用性を確かめた。

2. 測定原理

2.1 自己結合効果

単一波長動作をする半導体レーザ（以下、LD）は、コヒーレンスが高いため、可干渉性が非常に強いという特徴をもっている。そのため、レーザ光が対象物に当たって反射面から反射光が LD の活性物質内に戻ってくると、出力光と干渉し合うので出力光強度が揺らぐ。この戻り光によって生じる揺らぎを戻り光ノイズと呼ぶ。この戻り光ノイズによる LD の特性変化は、出力光に対する相対的な光量が 10^{-6} 程度と極めてわずかであっても顕著に現れる。これは出力光と戻り光との干渉が共振条件を満たすと、LD の共振器内での増幅作用により、実際の戻り光量以上の出力の増加となるためである。この現象はこれまで各種の応用技術に際して雑音の原因として大きな障害となっていた。しかし、この現象を自己結合効果として積極的に利用することにより距離測定に応用した。この効果を用いることにより、センサ部が LD とレンズのみの構造となり、小型化が可能となる。また、わずかな戻り光でも顕著に効果が現れるため、対象物が粗面であっても距離測定が可能である。

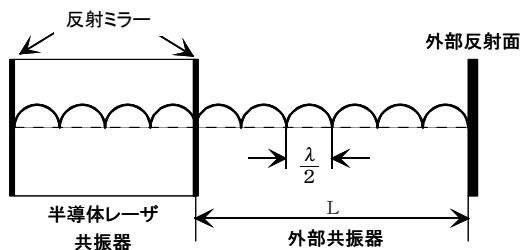


図 1 複合共振器モデル

本距離計における測定原理である自己結合効果を説明するために、複合共振器モデルを図 1 に示す。VCSEL から発振されたレーザ光は外部反射面（測定対象物）に照射され散乱する。その散乱光の一部が VCSEL の出力ミラーを透過して活性領域内に戻る。この時、VCSEL からの出力光と戻り光が LD の活性領域内で干渉を起こす。そして

発振波長を λ 、VCSEL の出力ミラーから外部反射面までの距離を L とすると共振条件

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot n \quad (n ; \text{整数}) \quad \text{(式 2.1)}$$

を満たすとき両者の光は強め合い、光出力がわずかに増加する。これを自己結合効果といい、この効果を利用し距離測定を行った。

2.2 自己結合効果による光出力と距離の関係

LD の注入電流をある一定の割合で変化させたときの発振波長変化の様子を図 2 に示す。

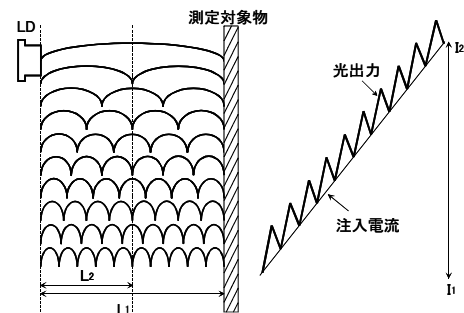


図 2 一定の割合で発振波長を変化させた時の模式図

本研究では、距離が一定のために波長を変化させなければならないので、三角波変調をかけて測定を行っている。発振波長が共振条件を満たしたときに、干渉により図 2 の右図の実線部分のように光出力が増加する。この時、注入電流と発振波長との関係が直線的であるとすると、干渉による光出力の増加は一定の間隔で起こり図の様に階段状になる。例えば、注入電流を I_1 から I_2 まで変化させて波長を変化させたとき、測定対象物までの距離が L_1 のときと、その半分の距離の L_2 のときでは、共振条件を満たした光出力の増加は、10 回から半分の 5 回となる。このことから、距離に比例して光出力の増加の回数が増えることが分かる。従って、この光出力を内蔵フォトダイオード（以下、PD）で検出し、周波数を測定することで距離測定が可能となる。以下、この共振によるフォトダイオード出力の微小な増減を自己結合信号周波数と呼ぶ。

3. 測定システム

3.1 システム概要

測定システムを図 3 に示す。本研究において試作した装置は、センサ部と VCSEL 駆動回路と周波数測定回路から構成されている。測定に使用した VCSEL は OPTEK 社の光通信用面発光レーザ OPV310 で、光出力 3mW とした。

TIA を用いた VCSEL の自己結合型近距離計に関する研究

VCSEL と集光レンズからなるセンサ部は、アルミ板、ねじ、バネからなる。VCSEL は VCSEL 駆動回路によって発振し、レーザ光は集光レンズにより集光され測定対象物に照射される。レーザ光は測定対象物で散乱し、その一部が VCSEL の活性領域内に戻る。この戻り光によって得られる、自己結合信号を内蔵 PD によって検出する。内蔵 PD の出力には自己結合信号と共に変調波信号成分が現れるため、MHP 周波数測定回路で自己結合信号周波数成分のみを取り出しパルス化する。このパルスモードホップパルス（以下、MHP）と呼び、測定対象物までの距離に比例した周波数を得る。この周波数を MHP 周波数として用いる。

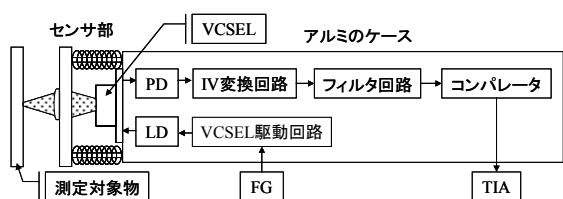


図3 測定システム

周波数測定回路は、IV 変換回路、フィルタ回路、コンパレータ回路からなり、アルミのケースに入れられセンサ部と一体となっている。

3.2 センサ部

本研究は小型、軽量の距離センサの製作を目的としている。自己結合型距離計のセンサ部は PD 内蔵の VCSEL と集光レンズとアルミ板からなり、距離測定はこれだけで行うことができるので、非常に小型となる。図4は集光距離可変センサ部の断面図である。

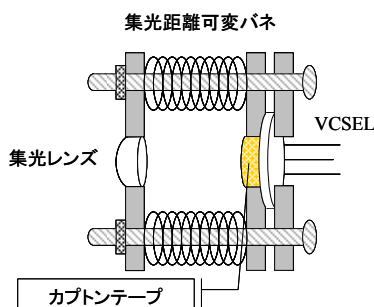


図4 センサ部

集光用のレンズにはシグマ光機製の反射防止膜付き平凸レンズを使用した。レンズの直径は 5mm、焦点距離は 8mm である。レンズの VCSEL に対する面が球状であると、レンズでのレーザ光の反射があらゆる方向に散乱し、レンズを VCSEL に対しどのような角度に設置してもその一部が VCSEL 活性領域に戻り、レンズ表面での戻り光による自己結合信号が観測されてしまう。そこで本研究では両凸

レンズではなく平凸レンズを用い、平面側を VCSEL に向け少し傾けた。

VCSEL とレンズは装置の前方に設置してある。それぞれ VCSEL とレンズの大きさと同じ穴が開けられたアルミ板の中央に別々に固定し、アルミ板の4隅にネジ穴を開け、二つのアルミ板を固定した。VCSEL と VCSEL 部のアルミ板には接触部にカプトンテープを張ってある。本研究では VCSEL のケースに $-5V$ を入れるため、アルミ板に触れて短絡状態になってしまうのを防ぐためである。また、集光距離の変更ができるよう、VCSEL 部と集光レンズの間にはバネが挟んであり、VCSEL-レンズ間の距離が可変となる。

このセンサ部を使用して測定する際は、測定回路とセンサ部が離れていた。そこで信号線にノイズが乗らないようにする為にシールド線を用い、露出した VCSEL の端子周りにもシールドを施した。

3.3 測定回路

測定回路は、変調波発生装置 (FG)、VCSEL 駆動回路、IV 変換回路、フィルタ回路、コンパレータからなる。

自己結合信号によって得られる内蔵 PD の微小な信号電流は数 μA と非常に小さいので低ノイズで高い増幅度が要求される。そこで、プリアンプはオペアンプを使用した IV 変換回路を作製した。

IV 変換回路により電圧信号に変換された受信信号には自己結合信号のほかに直流成分と変調波である三角波成分が重畳している。変調波の三角波の周波数は最大で 10kHz、自己結合信号周波数は距離に比例するが 500kHz から 2MHz とかなり高い周波数である。そこで、変調三角波成分を取り除くために、4 次のベッセル特性のハイパスフィルタ (以下、HPF) を製作した。カットオフ周波数は 300kHz、 $Q = 10dB$ に設定した。また高周波ノイズを除去するために 4 次のチェビシェフ特性のローパスフィルタ (以下、LPF) を通した。カットオフ周波数は 30MHz、 $Q=10dB$ に設定した。このフィルタ回路を通った後、コンパレータによって MHP を生成した。

MHP 信号の周期を測定するため、横河電機社の TIA、TA320 を用いた。この TIA は時間分解能 100ps、連続サンプリングレート 14MS/s であり、ヒストグラム表示される。また、フロッピーディスクドライブが内蔵されているため、測定データを PC に取り込んで処理することができる。

4. FFT を用いた測定結果

本章では 10cm 程度を目標とし、各距離において自己結合信号周波数を FFT 解析により測定し、そのばらつき誤

差を調べた。また、変調周波数の違いによる測定距離範囲、ばらつき誤差の変化を調べた。

FFT 解析には Tektronix 社製のオシロスコープ、TDS2012B の FFT を使用した。

4.1 変調周波数 1kHz の時の測定結果

三角波変調周波数 1kHz、FG 電圧振幅 1Vpp、光出力 3mW とした時の測定距離 対 自己結合周波数、及び平均ばらつき誤差の測定結果を図 5 に示す。測定対象物には反射テープを使用し、集光距離は 5cm 一定、測定距離は 2cm ~10cm とした。図中のプロットは各測定距離で 12 回測定を行い、その最大値と最小値を除いた 10 回の平均値とばらつき誤差をとったものである。本研究ではばらつき誤差の算出は、各測定距離で得た複数の測定値の平均を求め、この平均値と各測定値の差を平均値で割ることで求めた。図には各距離のばらつきの平均値がプロットされている。また、図中の直線は自己結合周波数のプロットを最小二乗法により直線近似したものである。

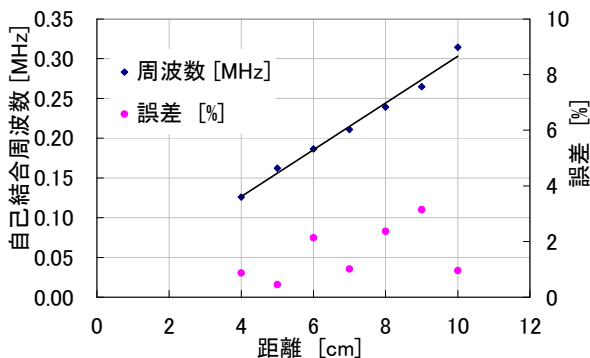


図 5 FFT による測定結果 (変調周波数 1kHz)

図の測定結果より、測定距離と自己結合周波数が比例関係にあることがわかる。このことより、近距離でも自己結合周波数を測定することで測定対象物までの距離を測定することが可能であることが分かった。測定範囲内の測定最短距離は 4cm、測定最長距離は 10cm となった。また、この時の平均ばらつき誤差は 1.6% となった。

4.2 変調周波数 10kHz の時の測定結果

三角波変調周波数 10kHz、測定対象物を反射テープとした時の測定距離 対 自己結合周波数、及び平均ばらつき誤差の測定結果を図 6 に示す。その他の測定条件は 4.1 と同様である。

このときの測定最短距離は 2cm、測定最長距離は 10cm、平均ばらつき誤差は 0.5% となった。

三角波変調周波数が 1 kHz の場合と比べて、最短距離

が 2cm になり、平均ばらつき誤差も低減した。これは、三角波変調周波数を上げることにより、自己結合周波数も高くなり分解能が向上したためだと考えられる。

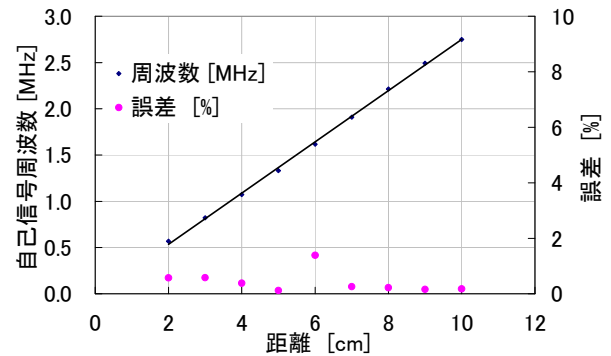


図 6 FFT による測定結果 (変調周波数 10kHz)

5. TIA を用いる際の統計処理方法

5.1 MHP 生成における誤差

自己結合信号の波形及び MHP の模式図を図 7 に示す。自己結合信号は非常に微小な信号のため、ゆっくりとした成分の上に乗る。このため、しきい値電圧を一定にすると、正確に 2 値化できず、一つの長い周期のパルスができる。その他にも、ノイズの影響を受けた短い周期のパルスも現れる。これは、MHP 全体を平均し距離を求める際に、大きな誤差となる。したがって、カウンタのように単に取得したデータの平均値をとる測定方法では、正確に距離測定を行うことができないため、統計処理を行うことによって、距離測定を行う。

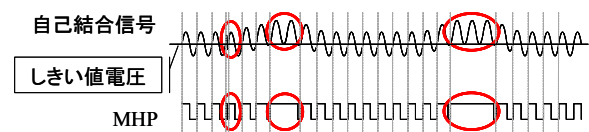


図 7 MHP 模式図

5.2 統計処理

5.2.1 長い周期のパルス

図 8 に長い周期のパルスができたときの模式図を示す。このときの度数分布を図 9 に示す。図 9 のように、T、2T、3T を中心としたガウス分布になる。2T を中心としたパルスは T の 2 個分のパルス、3T を中心としたパルスは T の 3 個分のパルスである。したがって、長い周期のパルスにそれぞれの重みをかけて平均化することにより平均周期を求める。この平均周期の逆数を MHP 周波数とする。

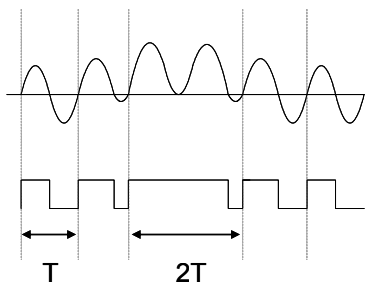


図8 模式図

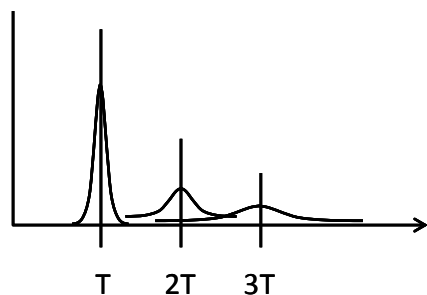


図9 度数分布

5.2.2 短い周期のパルス

雑音により生じたパルスは $0.5T$ 以下になるため、これを無視して測定を行う。

6. TIA を用いた測定結果

6.1 全体を平均した際の測定結果

三角波変調周波数 10 kHz 、FG 電圧振幅 1Vpp 、光出力 3mW 、集光距離 7cm 一定で、測定距離は 2cm から 10cm までとし、測定対象物には反射テープを使用した。また、本測定のサンプル数は 10000 個とした。

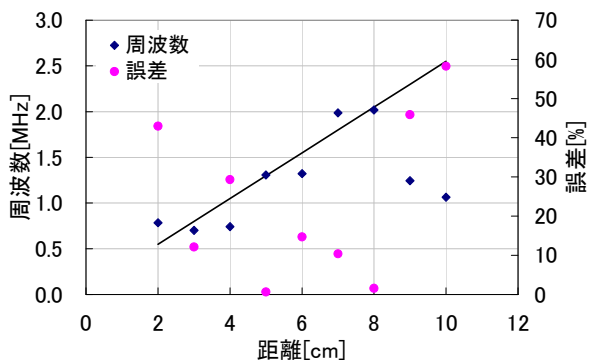


図10 TIAによる測定結果 (全体平均)

各距離の測定データ全体の平均により MHP 周波数を求めた際の測定結果を図 10 に示す。図中のプロットは各測定距離の MHP 周波数、直線は6.2において統計処理

を行った際の MHP 周波数のプロットを最小二乗法により直線近似したものである。また、この近似線からの偏差を誤差としてプロットした。

図 10 の測定結果より、距離に対して MHP 周波数が比例関係になく、単に測定データ全体の平均をとることで距離測定が行うことができないことが分かった。この測定範囲内での平均誤差は 24% となった。これは、長い周期のパルスやノイズによる短い周期のパルスも混ざっているため、近似線に対して最小で 0.6% 、最大で 58.2% の誤差が出た。

6.2 統計処理をした際の測定結果

統計処理を行った際の測定結果を図 11 に示す。 $0.5T$ 以下はノイズのため取り除き、 $3T$ 以上は重ね合わせの影響を生じるため、 T から $3T$ までの統計処理を行った。図中のプロットは各測定距離の MHP 周波数、直線は MHP 周波数のプロットを最小二乗法により直線近似したものである。また、各測定値の最小二乗法による直線からの偏差を誤差としてプロットした。この範囲内での誤差は最小で 0.2% 、最大で 4.9% 、平均で 1.9% となった。 3cm までの近距離で僅かに誤差が増えた原因は、戻り光量が少ないため最頻度 T を求める際に誤差が生じたためと思われる。

図 11 の測定結果より、距離に対して MHP 周波数が比例関係にあることより、TIA を用いて統計処理を行うことで距離測定が可能であることが分かった。

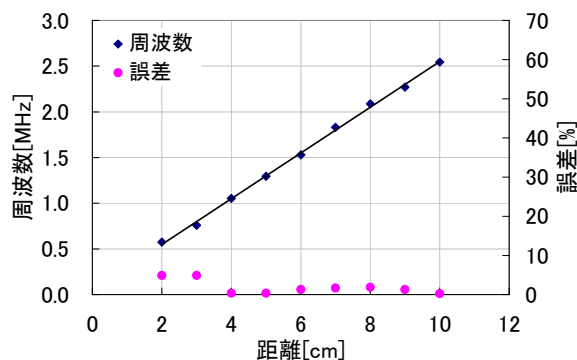


図11 TIAによる測定結果 (統計処理)

6.3 測定距離 10cm 時のヒストグラム

測定距離 10cm の時のヒストグラムを図 12 に示す。

図 12 より最頻値 T は $0.402\ \mu\text{s}$ であり、 $2T$ 、 $3T$ が出ているため全体の平均を取ると大きな誤差の原因となる。そこでデータの統計処理を行うと T を中心としたガウス分布の平均周期は $0.398\ \mu\text{s}$ 、 $2T$ と $3T$ も同様にそれぞれ重みをかけて平均をとり平均周期を求めると、 $2T$ を

中心としたガウス分布の平均周期は $0.385 \mu\text{s}$ 、3 σ を中心としたガウス分布の平均周期は $0.395 \mu\text{s}$ となった。この時の MHP 周波数は 2.54MHz 、誤差は 0.24% となり測定データ全体の平均取った場合に比べ、非常に精度のよい距離測定が可能になることが分かった。

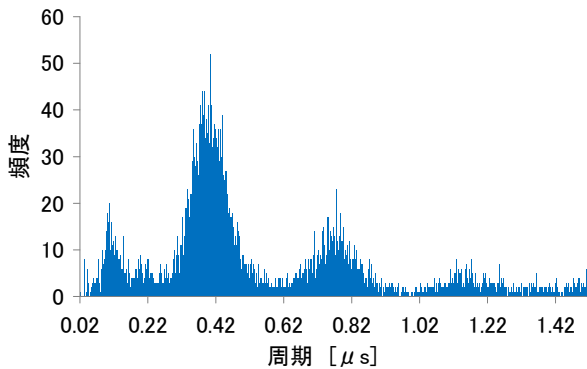


図 1.2 ヒストグラム

6.4 測定結果の比較

表 1 に統計処理を行った場合と全体の平均から MHP 周波数を求めた場合の誤差を示す。

表 1 測定結果の比較

	誤差[%]	
	統計処理	全体平均
平均	1.90	23.98
最大	4.92	58.24
最小	0.24	0.63

表 1 より、各測定距離の周期のヒストグラムから簡単な処理を行うことによって、距離測定を正確に行うことが可能であるということが分かった。これにより、FPGA などを利用してリアルタイムに距離測定を行う際、カウンタで単に平均化するのではなく、統計処理を加えることで正確な距離測定が可能であるという事が分かった。

7. まとめ

半導体レーザは、外部反射面からの散乱光が戻り光として活性領域内に戻ると出力光と結合し、ノイズを生じるといった問題がある。しかし、この現象を自己結合効果として積極的に利用することで、外部反射面までの距離測定を行った。

本研究では、半導体レーザをアレイ状に並べ高速に三次元測定を行うことを目的とし、 10cm 程度を目標とした。近距離測定を行った。このため、集光レンズを直径 5mm とし、距離測定に使用する半導体レーザは二次元アレイ化がしやすい VCSEL を選んだ。VCSEL はモードホ

ップが起こらず常に単一モードで発振するため、これまで自己結合型距離計の誤差の大きな原因になっていたモードホップを避けることができる。

自己結合型近距離計の測定距離 対 自己結合周波数特性を FFT 解析によって測定した。その結果、自己結合周波数は測定距離に比例することが分かり、近距離測定が可能であることが確認できた。また、この測定で三角波変調周波数を変化させて平均ばらつき誤差に違いがみられるか検証した。平均ばらつき誤差は変調周波数 1kHz のとき 1.6% 、 10kHz では 0.5% となった。これは、変調周波数を上げることによって、自己結合周波数が高くなり分解能が向上したためである。

しかし、FFT ではリアルタイム測定を行うことができないため、自己結合信号をパルス化して MHP を生成し、TIA を用いて測定距離 対 自己結合周波数特性の測定を行った。統計処理を行った結果、MHP 周波数は測定距離に比例することが分かり、自己結合信号をパルス化し、統計処理を行うことにより距離測定が可能であることが分かった。また、この測定データ全体の平均により MHP 周波数を求めた場合、測定距離に対して MHP 周波数が比例関係に無いことから、カウンタのような単に測定データ全体の平均をとることは距離測定を行うことができないことが分かった。TIA を用いた時の平均ばらつき誤差は全体の平均をした場合は 24% 、統計処理を行った場合は 1.9% となり、 10 分の 1 以上小さくすることができた。これより、統計処理の有用性が確認できた。

以上より、VCSEL を使用した自己結合型距離計は変調周波数を上げることにより分解能が向上し、パルス化してリアルタイム測定を行う際には統計処理を行うことによって、高精度な近距離測定が可能になることが分かった。

参考文献

- 1) レーザ計測ハンドブック編集委員会:レーザ計測ハンドブック、丸善株式会社
- 2) 中尾佑介・津田紀生・山田諄:「半導体レーザの自己結合効果を用いた自己補正型距離計」, 電気学会論文誌 C, Vol.121-C, No.12, pp.1819-1825(2001)
- 3) 坂本明紀・津田紀生・山田諄:「面発光レーザを用いた自己結合型距離計の特性」, 電気学会論文誌 C, Vol.126-C, No.12, pp.1454-1459(2006)

(受理 平成 21 年 3 月 19 日)