

半導体レーザの自己結合効果を利用した 小型距離計に関する研究

Study of Compact Distance Meter by Self-Coupled Effect of Laser Diode

山田 諄*, 紫藤 進*, 津田 紀生*, 上田 正**
JUN YAMADA, SUSUMU SHITOH, NORIO TUDA, TADASHI UEDA

Abstract A compact distance meter using self-coupled effect of semiconductor laser is studied, in which the returned light from the external surface interferes in the resonator. Therefore the sensor of the distance meter is composed of only a laser diode and a lens. As it has no external interference optics, it could be much smaller than the interference measurement. The measurement error is found to be below one percent between 20cm and 110cm.

1. はじめに

レーザによる光の干渉を利用した距離計測は、非接触測定のため測定対象を乱すことなく、高精度の測定方法として古くから用いられている。最近では、半導体レーザは装置の小型化のため、光計測用光源として利用されようとしている。その代表的な例として、FMヘテロダイン干渉計を利用したものがある。これは、比較的長距離測定が可能で精度もよいが、レーザ共振器の外部に干渉計を用いているため光学系が複雑になるという欠点を有する。

これに対し、本研究では半導体レーザ特有の、共振器内での外部反射面からの戻り光との自己結合効果による干渉を利用した距離計測装置を試作し、その性能を評価した。自己結合効果により、粗面に対する距離測定はもちろん、半導体レーザ（フォトダイオード内蔵）が発光、干渉、受光を兼ねているため、外部干渉光学系が大幅に簡略化できる。従って、センサ部が半導体レーザとレンズのみで、従来

のものに比べ小型となる。また、三角測量法より距離測定範囲が広いという特徴を有する。

2. 自己結合効果

半導体レーザの複合共振器モデルを、図1に示す。

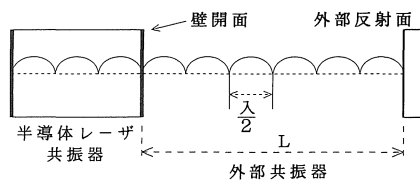


図1 複合共振器モデル

半導体レーザは、光共振器として半導体結晶の壁開面の平行性をそのまま一組の反射鏡として用いている。従って、他のレーザとは違い特別な共振器は不要ではあるがその反面、反射鏡の反射率（約30%）は低く、透過率が高い。そのため、自ら発したレーザ光が外部の反射面に当たり、その一部が発振領域

*愛知工業大学 電子工学科 **同大学院生

内に戻り易い。戻って来たわずかな光は、共振器内のレーザ光と結合し、動作が不安定となり雑音（複合共振器ノイズまたは、戻り光ノイズ）を生じる。戻り光による半導体レーザの特性の変化は、出力光に対する相対的な戻り光量が、極めてわずか（ 10^{-6} 程度）であっても顕著に現れる。

我々は、今回レーザ共振器内における出力光と戻り光の結合を自己結合効果として積極的に利用し、距離計測に応用した。図1に示すように発振波長を λ 、半導体レーザの壁開面から外部反射面までの距離を L とすると共振条件

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (n; \text{整数}) \cdots (1)$$

を満足するとき両者の光は強めあい、レーザ出力がわずかに増加する。この現象は、外部反射面からの散乱光が極めて微弱であっても、半導体レーザの共振器内の見かけの反射率が増加することにより、増幅作用が生じ、十分観測できる。従って、自己結合効果による干渉を用いることにより、測定対象物として反射率の悪いもの、いわゆる粗面で距離計測が可能であり、また三角測量法より距離計測範囲が広い。

3. 測定原理

半導体レーザは、発振周波数を変調をする際に、外部変調器を必要とせず注入電流によって直接変調が可能である。分光器を用いて測定した半導体レーザの発振波長の注入電流依存性の一例を図2に示す。注入電流と発振波長の関係は、同じ縦モードにおいて、ほぼ比例している。

注入電流をある一定の割合で変化させた時の、共振条件を満足した発振波長の変化の様子を図3に示す。式(1)の共振条件を満足した時のみ、光出力は増加する。そのため、フォトダイオードでその光出力を検出すると、図3の実線部分のように一定周期の階段状になる。この階段状の波形の一つ一つをモードポップパルス（以下、MHP）と呼ぶことにする。例えば、測定対象物までの距離が L_1 のときMHP数は10個となるのに対して、半分の L_2 では、5個である。すなわち、ある一定時間において注入電流を変化させた場合、測定距離に比例して

MHP数は変わる。従って、そのMHPを内蔵フォトダイオードで検出し、電気信号に変換して、MHP周波数を測定することにより、容易に距離計測が可能となる。

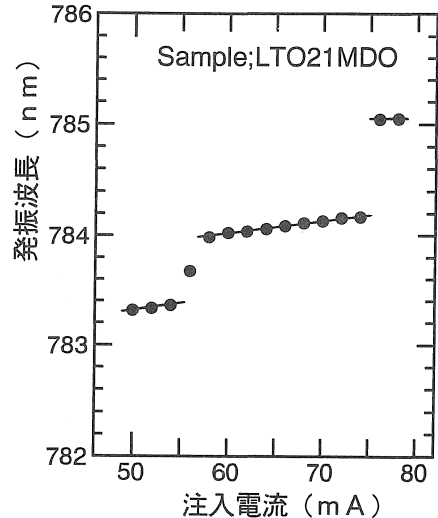


図2 発振波長の注入電流依存性

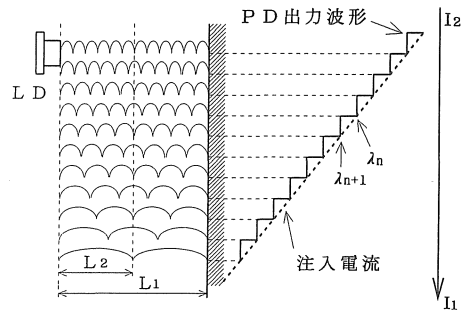


図3 一定の割合で注入電流を変化させた時の、共振条件を満足した発振波長の変化を示した模式図

3・1 測定理論

変調電流には、一定の変化率である三角波注入電流を用いる。注入電流対発振波長特性の模式図を、図4に示す。同じ縦モードで、振幅 i_m (peak to peak値)の三角波で注入電流に変調をかけると、隣り合うMHP間における半導体レーザの発振波長差 $\Delta\lambda$ は、式(1)を用いて次式に表される。

$$\Delta \lambda = \lambda_n - \lambda_{n+1} = \frac{2L}{n(n+1)} \dots (2)$$

ここでnは定在波の数である。

nは1より十分大きいので、式(2)は

$$\Delta \lambda = \frac{2L}{n^2} \dots (3)$$

と近似できる。

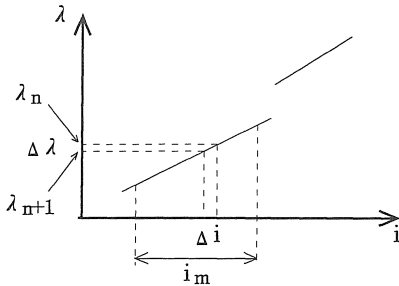


図4 注入電流一発振波長特性

また、変調効率 $d\lambda/di$ は式(3)を用いて

$$\frac{d\lambda}{di} \Delta i = \frac{2L}{n^2} \dots (4)$$

となる。変調波の半周期 $t_m/2$ におけるMHPの個数Nは、MHP周波数をFとすると

$$N = \frac{i_m}{\Delta i} = F \times \frac{t_m}{2} \dots (5)$$

となる。ゆえに式(4)からNとFは次式で与えられる。

$$N = \frac{n^2}{2L} i_m \frac{d\lambda}{di} \dots (6)$$

$$F = \frac{i_m}{\Delta i} \frac{2}{t_m}$$

$$= f_m i_m \frac{n^2}{L} \frac{d\lambda}{di}$$

式(1)より

$$F = 4 f_m i_m \frac{L}{\lambda^2} \frac{d\lambda}{di} \dots (7)$$

ここで、 f_m は変調波の周波数である。式(7)からMHP周波数Fは、ターゲットまでの距離、三角波電流変調波形の周波数、及び振幅に比例する。

4. 距離計測システム

今回、試作した距離計測システムは、図5に示されるようにセンサ部(レーザ出力、干渉、受光)と、受光した信号を処理する測定回路、及び装置からなる。

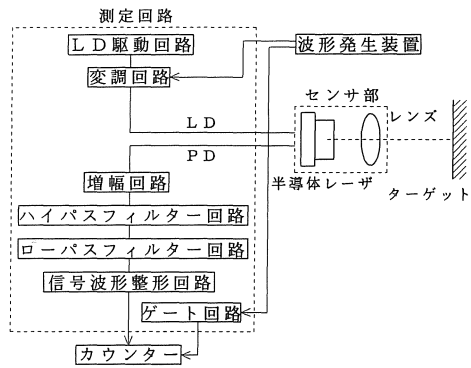


図5 距離計測システム

4.1 センサ部

本装置の特徴の一つであるセンサ部は、図6に示すように、直径20mm、長さ25mmのアルミ製円筒中に半導体レーザー(モニタ用フォトダイオード内蔵)とレンズのみで構成され、他に外部干渉光学系がなく、従来のものに比べ小型で、光学系の設定が楽である。

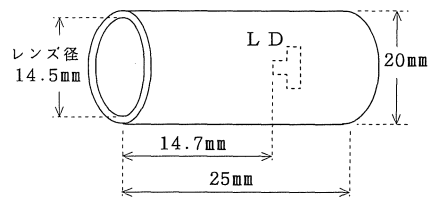


図6 センサ部

使用した半導体レーザー(以下、LD)は、シャープ製のLTO21MDであり発振波長780nm、定格出力10mW、発振開始電流45mAである。また、今回の測定実験では、測定距離を1m程度としたのでレーザーの集光距離を約1mに設定した。尚、信号線には、すべてシールド線を用い外部ノイズを最小限におさえた。

4・2 測定回路、及び装置

試作した測定回路は、変調回路、LD駆動回路、増幅回路、ハイパスフィルター回路、ローパスフィルター回路、信号波形整形回路、ゲート回路からなり、他に電源装置、波形発生装置、カウンターを用いた。

尚、本センサ部より検出される信号は非常に微弱であり、ノイズの与える影響が大きいため、試作した測定回路において信号レベルの微少な範囲では、抵抗、コンデンサ、トランジスタ、オペアンプ等の素子には、低ノイズでかつ温度特性の良いものを使用した(抵抗には金属皮膜抵抗、コンデンサにはポリプロピレンコンデンサ、タンタルコンデンサを使用)。また、それぞれの素子の配置、配線や、装置のシールドにも配慮した。

4・2・1 LD駆動回路

LDを発振させる場合、市販の駆動用ICを用いるのが一般的である。その駆動用ICは、LDの光出力が周囲温度の変動によって容易に変化するのを防ぐため、温度が変化しても一定の光出力が得られるようにモニタ光を検出して駆動電流にフィードバックするAPC(Automatic Power Control)機能をもっている。しかし、本装置は駆動用ICは使用していない。これは、本装置が光出力の変動にほとんど影響されず、むしろ発振波長の変動の方が測定精度に影響することによる。また、駆動用ICのモニタフォトダイオードの逆電圧は-5Vとなっており、本装置で得られる信号は微弱で比較的高周波であるため、信号を検出し易くするためには逆電圧を大きくした方がよいことから、逆電圧に別電源(-15V)を用いたからである。従って、本装置では定電流回路を用い、その定電流に変調をかけている。

4・2・2 変調回路

波形発生装置には、市販のファンクションジェネレータ(ヒューレットパッカート製の33120A

(以下、FG))を用いた。変調回路は、FGから得られた三角波を、トランジスタのカレントミラー回路を介し、LD駆動回路からの駆動定電流の一部を吸い取り、三角波変調電流波形を得ている。従って、FG値を変えれば容易に三角波変調電流の振幅、オフセットを設定でき、レーザー出力も調整できるため、種々の実験において便利である。

4・2・3 増幅回路、及びフィルター回路

PDから得られたMHP信号は、非常に微弱である。そのため、低ノイズでかつ高利得な増幅回路、及び変調波を落とすためのシャ断特性のよいハイパスフィルター回路が必要となる。

本回路は、初段に低ノイズのFETをソース接地増幅回路として用い、2段目は増幅度を大きくするためバイポーラ・トランジスタをエミッタ接地増幅回路として用いた。また、初段のFETのソースに負帰還をかけ、回路全体の利得の向上、安定化、低雑音化、周波数特性の改善をはかった。このトランジスタ回路は、検出した信号を次段以降で扱いやすいレベルまで増幅するためのものである。次段には、さらに増幅度を上げるためオペアンプによる簡単な増幅回路を用いた。

フィルターには様々な種類がある。本回路では、変調三角波の周波数1kHzと、信号波のMHP最低周波数約20kHz(測定距離10cm)が比較的近い。そのため、減衰特性を急峻できるチェビシェフ特性による高速、広帯域のオペアンプを用いて多重帰還型ハイパスフィルター(カットオフ周波数は約33.8kHz)を形成した。また、終段には、高周波ノイズ除去のためローパスフィルター(カットオフ周波数は約280kHz)を用いた。信号周波数帯域における回路全体の利得は80dB程度である。

4・2・4 信号波形整形回路、及びゲート回路

信号波形整形回路は、増幅回路及びフィルター回路から得られたMHP信号を比較器によりデジタル信号に変換するものである。比較器には、ヒステリシスをもたせ、できる限りノイズをカットした。

カウンターには、市販のものを用いた。一般にカウンターは、カウンター自身で設定したゲート時間内のパルス数をカウントし、そのゲート時間で除算を行うことによって周波数が測定される。

MHP信号と本装置のゲート、及びカウンターゲートのタイムチャートを図7に示す。本装置からの

MHP信号は、変調三角波の頂点部分を除いたあるゲート時間を設定し、そのゲート内だけに存在している(図7(a))。今回の測定では、本装置のゲート(図7(b))の50個分の平均を、測定値としている。従って、カウンターでその信号周波数を正確に測定する場合、カウンター自身のゲートと本装置の一つ一つのゲートとの同期をとり、しかもその50個の平均をとらなければならない。しかし、一般には、そのような機能をもったカウンターはない。特にアーミング機能といって、外部から入力されるゲート(本装置のゲート)の立ち上がりからカウンター自身の設定ゲート時間直後の外部入力のゲートの立ち上がりまでの時間内(図7(c))におけるすべての信号パルス数をその時間内で除算する機能をもったカウンターはある。しかし、それから得られる測定値は、本装置のゲートの閉じている部分を見逃しており、明らかに真値ではない。しかも、本装置のゲートはカウント誤差を減らすため、MHPと同期をとっている。そのため、本装置の一つ一つのゲート時間は、MHPの変動により若干ではあるがそれぞれ異なっている。従って、より正確なMHP周波数を測定するためには、個々のゲート時間を測定し、その間のMHP数で除算し、例えばそのゲートの50個の平均をMHP周波数としなければならない。

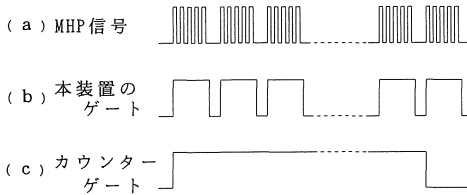


図7 MHP信号と本装置のゲート、及びカウンターゲート

今回はカウンターを2台用いて同時に、1台は本装置のゲート時間を、もう1台は単に変調波1周期間の周波数をカウントして、両者の50個分の平均をとり、その二つの測定値からMHP周波数を算出し測定を行った。

5. 測定、及び結果

5・1 MHP信号の観測

測定距離15cmにおける変調三角波形とMHP波形をデジタルオシロスコープで取り込んだものを図8に、測定距離を30cmとした場合のものを図9に示す。ターゲットには、反射テープを用いた。図より、測定距離が2倍に遠くなると、MHP数も2倍になっていることが分かる。

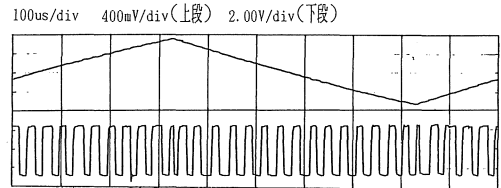


図8 測定距離15cmにおける変調三角波形(上段)とMHP波形(下段)

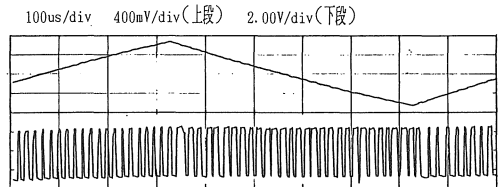


図9 測定距離30cmにおける変調三角波形(上段)とMHP波形(下段)

5・2 測定距離に対するMHP周波数測定

基礎的実験として測定距離10cmから10cm間隔で、各距離におけるMHP周波数を、連続的に10回測定し、その平均を各距離におけるMHP周波数測定値とした。尚、ターゲットには白い紙を用いた。

距離対MHP周波数の測定結果を図10に示す。図中の直線は、測定値を最小二乗法により直線近似したものであり、これを校正曲線とする。図より、距離とMHP周波数は理論通り比例関係にあり、MHP周波数から距離計測が可能である。

校正曲線と測定値のズレを図11に示す。ズレは平均で0.62%、近距離10cmで最大2.80%となり、20cm~120cmでは1%未満となった。このズレの中には、ターゲットを手動で動かしているための設定誤差が含まれ、特に近距離で大きく現れる。他に近距離10cmでズレが大きくな

る要因として、カウンターによるカウント誤差、ターゲットへの焦点のズレによる誤差等が考えられる。

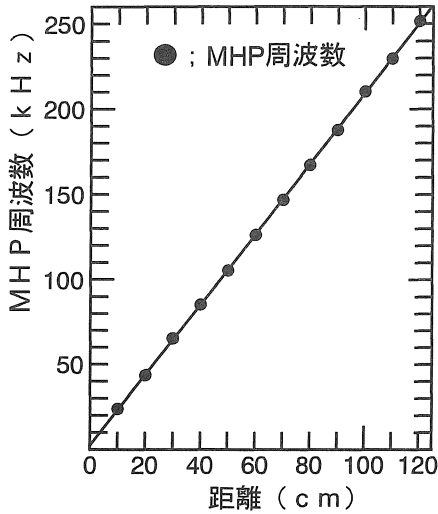


図10 距離-MHP周波数

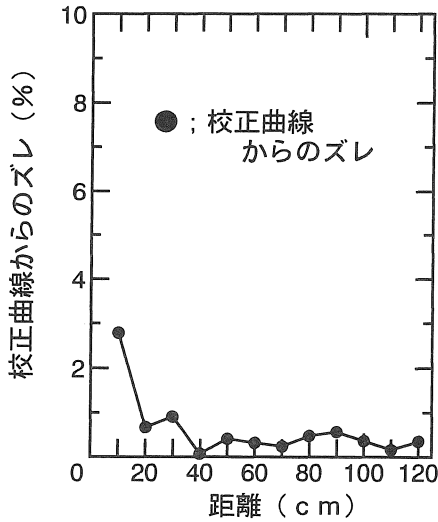


図11 校正曲線からのズレ

図12に、各距離10回の測定値のバラツキを誤差として示す。図より、誤差は平均で0.56%、近距離10cmにおいて最大1.60%となり、測定距離20cm~120cmまでは1%未満となった。

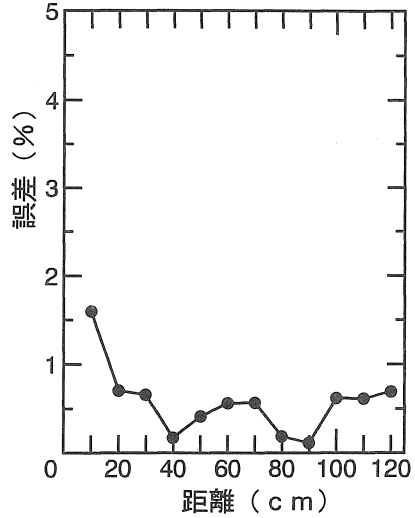


図12 各距離10回の測定の誤差

5・3 戻り光量減衰時における測定誤差の検討

自己結合効果による距離測定は、ターゲットからのわずかな戻り光を利用している。そのため、戻り光量の減少、または変動が非常に大きな影響を与えると予想される。

参考までに、ターゲットの色、材質、及びレーザ光に対する角度が変化した場合の測定誤差を検討する。

5・3・1 色、材質別

色別として、白、赤、青、緑、黒を用い、その材質は光沢のない紙である。また、材質別としては反射テープ、アルミ板、木材(ベニヤ)、鏡を用いた。実験方法は5・2と同様であり、図13に色別の誤差を、図14に材質別の誤差を示す。

その結果、色別については、どの色についても平均で1.5%未満で同じような変化をしており、色によりあまり変化は見られない。ただ、黒い色については一般に、光をよく吸収するため、他の色より若干ではあるが誤差が大きくなっている。

材質別については、木材を除いてバラツキ誤差は平均で約1%未満であった。木材については、近距離10cmと遠距離120cmで測定不能であった。これは木材が、比較的反射面が荒いためである。また鏡の場合は、非常によく光を反射するため他のものと比べ最も誤差が少ない。しかし、5・3・2で述べるが設定が困難となる。

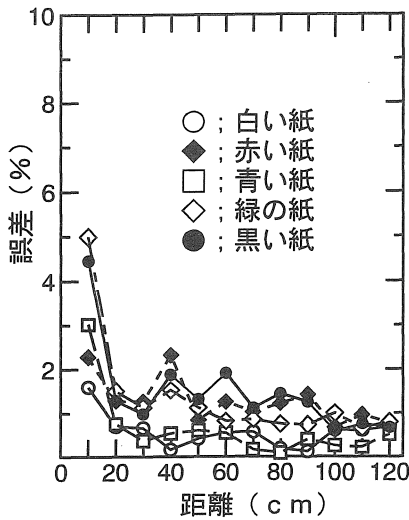


図 13 色別の測定誤差

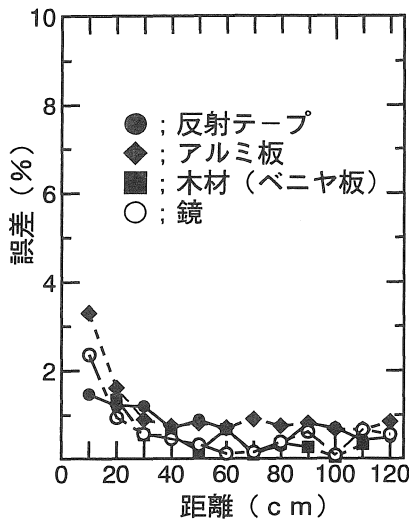


図 14 材質別の測定誤差

以上から、ターゲットの測定点において、ある程度の戻り光量があれば色や材質によらず、すなわち粗面で距離測定が可能である。

5・3・2 レーザ光に対する角度変化

前節までの測定実験では、ターゲットをレーザー光に対して直角に設置して行ったが、図 15 に照射角度を変化させた場合の誤差を示す。

ターゲットの種類には、白い紙、アルミ板、反射テープ、鏡を用いた。測定方法は、測定距離を 50 cm とし、照射角度における MHP 周波数を連続的に無作為に 10 回測定しその平均値と、レーザー光に

対し直角（この時の角度を 0° とする）にターゲットを設置した時の MHP 周波数の 10 回の平均値とのズレをその照射角度における誤差として表す。

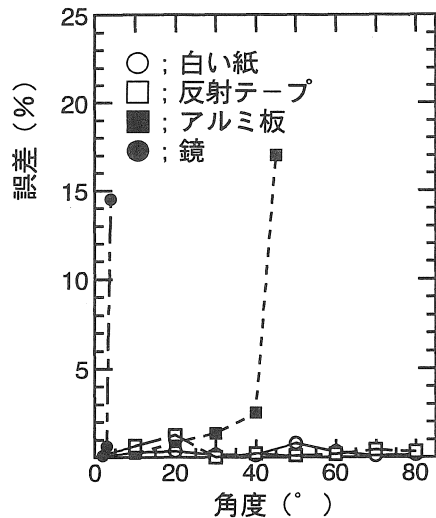


図 15 ターゲットのレーザーに対する角度を変化させた場合の誤差

ターゲットの種類によりレーザー光が当たった時の散乱の仕方は様々である。鏡のように指向性が強く、ほとんど散乱しないものでは、レーザー光の当たる角度に非常に影響されるため、図のように数度角度がずれると測定不可能となった。次に、アルミ板が約 40° のズレまで、散乱しやすい材質である反射テープ、白い紙では、 80° 付近まで測定可能であった。従って、特に指向性の強い材質を除けば、ターゲットのレーザー光に対する角度は測定誤差にあまり影響しない。

これは、本装置が自己結合効果を利用していることの特徴の一つである。仮に、照射角度変化により戻り光量が減少してもあるレベル以上であれば、共振器内において MHP 信号として検出できるまでに増幅されるためである。ターゲットの色、材質によって戻り光量が減衰した場合も、同様な理由により測定に影響がない。従って、本装置は大抵の測定対象物において、単にレーザーを照射させれば距離測定が可能であり、非常に簡単に扱えるという特徴を有する。

5・4 近距離における誤差の検討

5・2 の測定結果から、近距離 10 cm で特に誤

差が大きくなった。この原因として、近距離においてターゲット上のスポット径に幅を生じ、戻り光に光路差を生じ距離測定が不安定となることが考えられる。例えば、測定距離10 cmにおいて、ターゲット上のビーム径が5 mmであるとする計算上、最大3.65 mmの光路差を生じることになる。

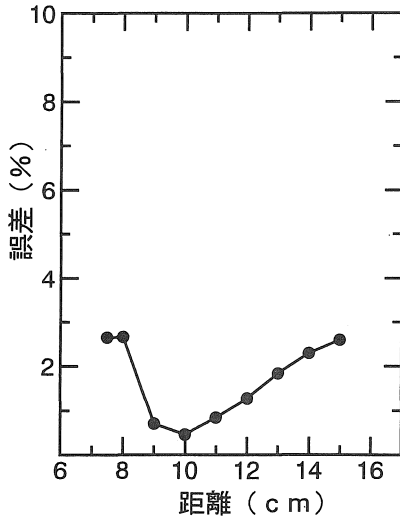


図16 レーザ光の集光距離を10 cmに設定した時の誤差

レーザ光の集光距離を10 cmに設定した場合の誤差を図16に示す。図から、測定距離10 cmのとき最も誤差が小さく0.46%であるのに対し、集光距離を約1 mに設定した場合の1.60%と比べると非常に改善された。このように、レーザ光の集光距離付近ではスポット径が小さく光路差による誤差少なくなるが、測定範囲は狭くなる。

6. まとめ

半導体レーザは、外部反射面からの散乱光が、戻り光として再び活性領域内に入り込み、その領域内のレーザ光と結合し、レーザ自体の動作が不安定となりノイズを生じるという欠点がある。従来、そのノイズは不要なものとして取り除こうと様々な研究がなされてきた。

本研究では、そのノイズとして扱われてきたものを、自己結合効果として距離計測に積極的に利用した。自己結合効果の利用により、本装置は外部干渉光学系の大幅な簡略化が可能となり、レーザ計測では厄介とされている光学系の設定が非常に楽となるという特徴を有する。さらに、測定対象物の反射率の悪いものでも距離計測が可能であり、また測定対象物のレーザに対する角度にも影響されないという特徴も有する。従って、本装置は、大抵の測定対象物において、単にレーザを照射させれば距離測定が可能となり、非常に容易に扱える。

今回の測定実験では、測定範囲20 cm～110 cmで誤差1%以下の精度で測定できた。近距離では若干誤差が大きくなったが、レーザ光の集光距離付近に測定対象物を設定することで精度の向上が得られることがわかった。

また、本装置の応用としてセンサ部が小型であることから、ロボットのアームに取り付けた距離センサとして利用できる。

今後は、測定回路のノイズをおさえ、さらなるセンサ部の小型化と、精度の向上を図り、周囲の温度変化に対する装置の安定性も検討していきたい。

(受理 平成8年3月19日)