

半導体レーザを用いた自己結合型 距離センサの自己補正に関する研究

Study on Self -Correction of Self- Coupled Distance Sensor Using Semiconductor Laser

中尾 佑介[†] , 津田 紀生^{††} , 山田 謙^{††}

Yusuke NAKAO , Norio TSUDA , Jun YAMADA

Abstract : A compact and simple distance meter based on self-coupling effect of semiconductor laser has been developed. Using the interference in the laser resonator with the scattered light at the object surface, the distance sensor is composed of only a laser diode and a lens. But the operating wavelength of semiconductor laser varies by the surrounding temperature. Then the method of self-correction using Michelson interferometer is studied. It is possible to measure a distance without an affect of surrounding temperature by the self-correction. The measurement range is between 20cm and 120cm, and the measurement error is below 0.6 percent.

1. はじめに

半導体レーザは1962年に初めて発振して以来精力的な研究が続けられ、現在ではコンパクトディスク、レーザプリンター、光ファイバー通信など幅広い分野で利用され、生活の中で無くてはならないものとなっている。これは半導体レーザが他のレーザに比べ小型（数十～数百μm）で高い利得が得られ、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るため外部変調器を用いずに変調が可能であるからである。また発振波長は可視光から遠赤外まで仕様目的に合わせることが出来る。そして性能及び信頼性が高くて安価なレーザが量産されるようになったからである。

また、近年では上記に示した分野以外に計測分野へも広く応用されるようになった。例として工場内の生産ラインにおいて距離、外形、形状センサなどとして多く使用されるようになってきた。これは半導体レーザの最大の特徴である小型、非接触、高精度で測定が可能であるからである。

現在工場の生産ラインのオートメーション化が急速に進んできており、ロボットだけによる無人工場も数多くできてきている。そこでこのロボットの目となる高性能、小型で安価な距離センサの需要が高まってきている。

従来、レーザ光を用いた粗面に対する距離測定には三角測量法が実用化されている。しかしこの測定方法では

短距離においては高精度の測定が可能であるが、測定範囲が狭く、対象物までの測定距離が制限されてしまう。また、マイケルソン光学系を用いて、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が、三角測量法よりは測定距離が長く、精度も良いが、光学系が複雑になってしまう。

そこで、半導体レーザの自己結合効果を用いた距離測定に関する研究が行われてきた。^{1,2)} つまり今までレーザの受光の際に戻り光ノイズとして扱われ、極力現れないとしていた現象を逆に最大限に利用することで距離の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の干渉を利用するので、粗面に対する距離測定も可能で、何より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出来るため、外部干渉光学系が大幅に簡略化できる。つまり半導体レーザと光を集光するレンズがあれば良いのでセンサ部が非常に小型化でき、三角測量法より距離測定範囲が広い。

本研究では、半導体レーザの自己結合効果を用いた距離測定装置を試作、回路の改良による測定精度について検討した。さらに半導体レーザは周囲の温度変化に非常に影響されやすく、この測定原理のみによる距離測定では精度に大変大きな影響が出る。そこで周囲の測定条件が異なっても常に安定した測定を行うためにマイケルソン干渉計を用いて自己補正を行った。この干渉計をセンサ部と小型ボックスに納めて一体化した。これによりさらなる測定精度の向上と安定化を目指した。

2. 測定原理

† 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 電子工学科 (豊田市)

2. 1 自己結合効果

半導体レーザ（以下 LD）の特徴の一つに外部共振器を用いずに半導体結晶の劈開面の平行性を共振器として利用している点があるが、これにより他のレーザと異なり小型にする事が出来る。しかしその反面劈開面における光の反射率は 30% と低いため、自ら発したレーザの出力光が対象物に当たることで散乱光の一部が劈開面を透過して活性領域内に戻ることになる。この戻り光と出力光との干渉により出力光が増加し、動作が不安定となり雑音（戻り光ノイズ）を生じる。この戻り光は出力光に対する相対的な光量が 10^{-6} と極めてわずかであっても LD の特性の変化は顕著に現れる。なぜなら、出力光と戻り光との干渉がある共振条件を満たすと、LD の共振器内での增幅作用により、実際の戻り光量以上に出力の増加となる。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て、いかにこの LD の特性の変化を抑えるかがポイントとなってきた。しかし、今まで雑音として扱われてきた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することを目指した。この効果を用いることにより、センサ部を LD とレンズのみで構成する事が出来るため小型な距離計となる。また、わずかな戻り光でも顕著な効果が現れるため、対象物が粗面であっても距離測定が可能となる。本距離計における測定原理である自己結合効果を図 1 に示した複合共振器モデルを用いて説明する。LD の劈開面 A と B で共振条件を満たし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 LD の劈開面 B を透過して LD 内に戻る。この時、LD からの出力光と戻り光が劈開面 A と外部反射面との間で干渉を起こす。そして発振波長を入、LD の劈開面から外部反射面までの距離を L とすると共振条件

$$L = \frac{\lambda}{2} \times n \quad n : \text{整数}$$

を満たすとき両者の光は強めあい、光出力はわずかに増加する。これは距離に比例して光出力の増加する数が変化する。そこでこの光出力の周波数測定することで距離測定が可能となる。これを MHP 周波数と呼ぶ。

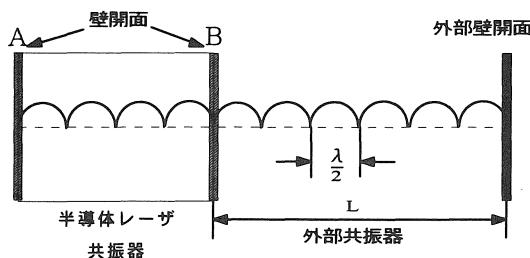


図 1 複合共振器モデル

2. 2 自己補正方法

LD は周囲の環境の変化で容易に発振波長が変化して

しまう。これではいかに正確に MHP 周波数を測定しても正確な距離を知ることは出来ない。そこで発振波長の変化による誤差を打ち消すための基準が必要となる。今回この基準を作るためにレーザ光の一部をマイケルソン干渉計に取り込みその出力を利用した。この干渉計の光路差を基準とするので基準周波数と呼ぶ。そして MHP 周波数と基準周波数の比を求めることで、周囲の環境による発振波長の変化に依存しない距離測定が可能となる。例として光路差が 7 cm の時に MHP 周波数が基準周波数の 10 倍であるとすると対象物までの距離は 70 cm となる。

3. 測定システム

本研究において試作した距離測定システムを示す。本システムは半導体レーザとレンズで構成される距離測定部分とマイケルソン干渉計とフォトダイオードで構成される自己補正部分の 2 つでセンサ部とし、これを縦 8 cm、横 4 cm、高さ 4 cm の小型ボックスに納めた。そしてその信号を処理する測定回路からなる。

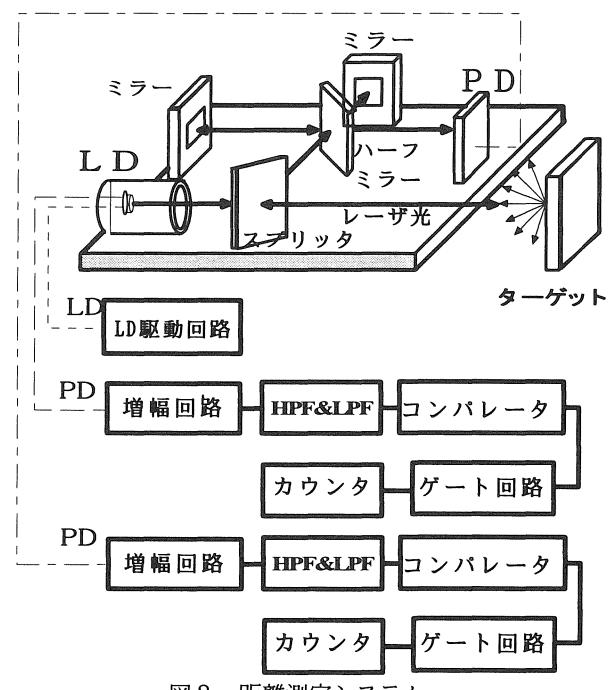


図 2 距離測定システム

3. 1 測定システム

センサ部の中の距離測定部分は半導体レーザ（フォトダイオード内蔵）と直径 14.5 mm のレンズから構成されており、直径 20 mm、長さ 25 mm のアルミ製円筒形の中に設置した。基本的な距離測定はこれだけで行うことが出来るので従来のものに比べて非常に小型となる。今回使用した半導体レーザ（LD）は、シャープ株式会社製 LTO21MD を使用し、発振波長 780 nm、定格出力 10 mW、しきい値電流 45 mA である。測定距離は 1 m までを目標とし、レーザ光を 1 m 先で集光するようにした。なお、アルミの内側を黒く着色する事でレーザ光のアルミによ

る反射を極力抑えた。また、信号線には全てシールド線を用い外部ノイズを最小限に抑えた。

3. 2 自己補正部

センサ部の自己補正部分は出力光の一部を取り出すためのガラススプリッタとマイケルソン干渉計、そしてフォトダイオードから成る。干渉計に取り込まれた光はハーフミラーにより二分された後、異なった光路差を進み、蒸着ミラーで全反射して再びハーフミラーで結合される。2つの光路長は 2 cm、5.5 cmとしたので光路差は 3.5 cm となる。測定装置を一体化したことにより振動等による光路差の変化が少なくなり正確な補正を行うことが出来る。

3. 3 測定装置

測定装置は、電源装置、変調波発生装置、LD 駆動回路、増幅回路、フィルター回路、信号波形整形回路、ゲート回路、カウンターからなる。本センサ部より検出される信号は非常に微少であり、ノイズの与える影響は非常に大きなものとなる。そこで回路の初段には低雑音負帰還増幅回路を試作し、使用した。この回路では、汎用の OP アンプを用いたときと比べて 10~20dB も雑音を

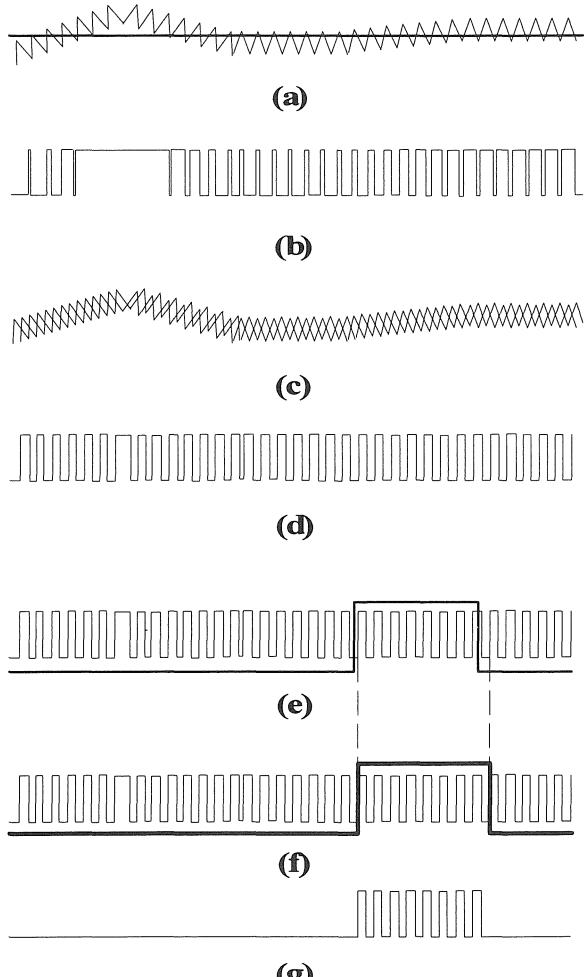


図3 MHP の波形整形

低くすることが出来る。この後、変調波である三角波や高周波のノイズを落とすためにフィルタに通し、コンパレータでパルスに整形する。そして設定したゲート内に入るパルス数とその時間から MHP 周波数を求めた。回路に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用いた。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。

ノイズに埋もれた微少な信号から MHP を作る信号波形整形回路は特に工夫を加えたので、以下に説明する。図3に測定回路の各部の波形の模式図を示す。増幅した MHP をコンパレータでパルス化するが、基準電圧を一定電圧とすると(図3(a))パルス化することのできない MHP が出来てしまう(図3(b))。1つのパルスのカウントミスで近距離においては誤差数%にもなってしまう。そこで MHP を積分回路に通し、位相遅延したものを基準電圧として用い(図3(c))1つの漏れもなくパルス化した(図3(d))。しかし、変調波である三角波の頂点付近の MHP は回路の特性上、取り出すことは出来ない。そこでこの頂点付近を除くように仮ゲートを設定し(図3(e))、これとパルス化した MHP で D-フリップフロップをかけて本ゲートを作った(図3(f))。D-フリップフロップは仮ゲート内の最初のパルスの立ち上がりから仮ゲート後の最初のパルスの立ち上がりまでの本ゲートを作ることが出来る。これにより、パルスと同期のとれたゲートを作り、カウンターでゲート時間を測定する。また、ゲートと MHP の AND をとって、このパルス数をカウントする。この両者の測定値から MHP 周波数を求めた。

4. 測定結果

4. 1 MHP 周波数測定結果

4. 1. 1 距離測定範囲

図4に温度 20°C、駆動電流 80mA、周波数 1kHz、振幅 800mV、オフセット 1.0V で三角波変調させたときの距離-MHP 周波数グラフを示す。この結果からこの測定原理における距離測定範囲は最短で 20 cm となり、最長で 120 cmまで測定することができた。20 cm以下で測定が不可能な原因は、レーザ光を 1m 先に集光したために、戻り光が活性領域内に十分入らないからである。このため自己結合効果による出力の増加がごくわずかとなり、MHP を回路で整形する過程でノイズに埋もれてしまう。レーザ光の集光距離を調整し、最長距離を短くすれば 20cm 以下でも測定は可能となる。

また最長で 120 cmまでの測定が限界であった。この原因是、LD からターゲットまでの距離が遠くなるほど光出力は小さくなってしまうからである。また LD に戻るための反射角度も狭くなってしまう。この両者の条件から 120 cmが限界であったと考えられる。

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、これを較正曲線と呼ぶこととする。

測定値のバラツキ誤差は

$$\text{バラツキ誤差} = \frac{\text{測定値} - \text{較正値}}{\text{較正値}} \times 100$$

で求めた。これよりバラツキ誤差の平均は 0.21%となつた。

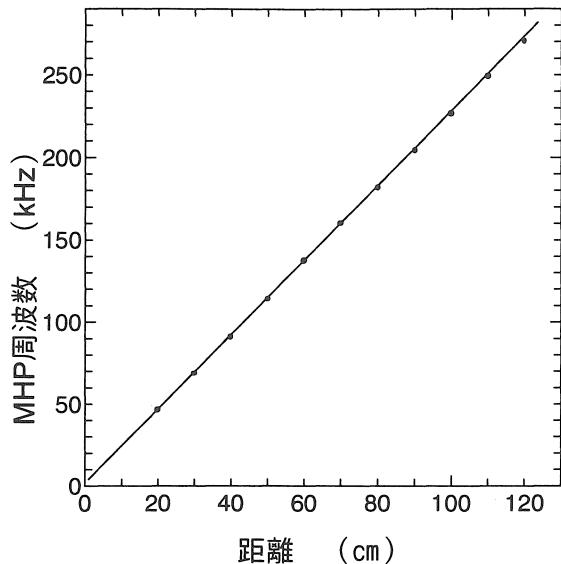


図 4 距離-MHP 周波数グラフ

4. 1. 2 変調波振幅-MHP 周波数測定

図 5 に LD からターゲットまでの距離を 70 cm に固定して、三角波変調の振幅を 600 mV から 1,000 mV まで変化させたときの MHP 周波数を示す。変調波の振幅を変化させると LD に注入される電流が変化する。そして電流の変化が大きくなるほど発振波長の変化も比例して大きくなるので、共振条件を満たす波長が増えて MHP 周波数も増加している。較正曲線からのズレは、変調の大きさには関わらずにほぼ一定となった。これから、MHP 周波数はモードホップ時の多モード発振の影響を受けていないことがわかる。この原因として考えられる 1 つには、ゲートの設定の仕方が関わっているものと思われる。つまり MHP は変調波の半周期で数多く現れるので、ゲート時間は短くても精度の良い値を得ることが出来る。そこで本測定では仮ゲート時間を 100 μs に設定した。このためゲート内にモードホップする範囲が入らなかったためだと思われる。もう 1 つにはゲート内に多モード発振の部分がかかることがあるが、検出は出来なかつた可能性もある。これは多モード発振では確かに LD が複数の波長で発振してしまうが、その 1 つ 1 つの出力光は单一モード発振時に比べてかなり低くなる。そのため戻り光もかなり微弱となり、自己結合効果による出力の増加が小さい。よって MHP として取り出すことが出来ないので測定には影響を及ぼさないと考えられる。

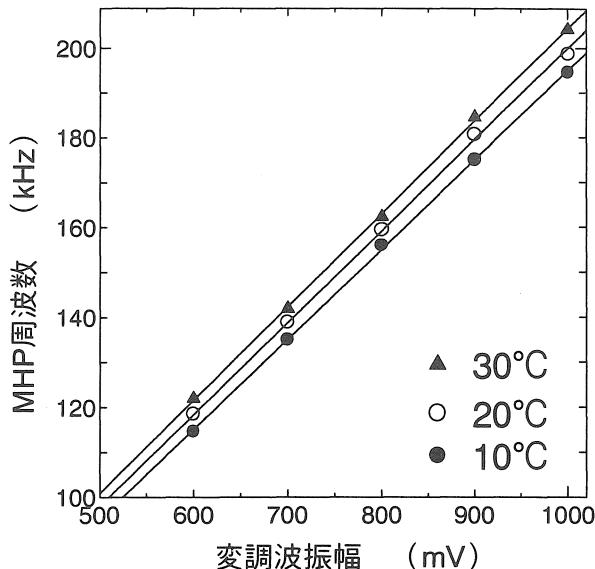


図 5 距離 70cm における変調波振幅-MHP 周波数

4. 1. 3 温度-MHP 周波数測定

図 5 に温度を 10°C、20°C、30°C と変化させた時の MHP 周波数も示したが、こちらは温度が高くなるに従って MHP 周波数も大きくなっていくことがわかる。これは、温度が高くなるにつれて、LD の変調効率が大きくなっているためだと考えられる。温度が 30°C の時の MHP 周波数は、10°C の時よりも平均で 5.2% も大きな値となっている。これは温度差が大きくなるほど誤差も大きくなってしまうので、この MHP 周波数をそのまま距離に換算することはできない。

4. 2 基準周波数測定

MHP 周波数は周囲の温度等による LD の変調効率の変化の影響によって、その測定値は大きく変動してしまう。そこで一つの基準を設ける。その基準としてマイケルソン干渉計を利用して常に一定距離における干渉波を測定することで、発振波長の変化分を検出する方法を用いた。今回は光路差を 3.5 cm とした。つまり、3.5 cm の距離を測定していることになる。4. 1. 1 の距離測定範囲では 20 cm 未満の測定は不可能であった。これはレーザの出力光と戻り光量に大きな差があり、2 つの光が結合しても光出力の増加が僅かだったためであるが、こちらの基準周波数測定では光出力をマイケルソン干渉計の 2 光路にほぼ等しくわけるため、共振条件を満たしたときの光出力の増加分は大きくなる。また、PD の受光面にはスリットで光を絞って光路差によるバラツキを极力抑えた。

4. 2. 1 変調波振幅-基準周波数測定

図 6 に三角波変調の振幅を変化させた時の基準周波数を示す。測定したパルスは、半周期に現れたパルスの両端を除いたものを採用した。例として、5 つパルスが得られたときは中心の 3 つのパルスの周期を測定し、そ

の値から1つ分の周波数を計算してこれを基準周波数とした。この結果、図6のようにかなりバラツキの大きな結果となった。温度20°Cでは較正曲線からのズレは平均で1.9%となった。この原因として変調波の振幅が小さいときには半周期で得られるパルス数が少ないためにバラツキ誤差が大きくなつたためと考えられる。また、振幅を大きくすると得られるパルス数は多くなるが、変化させる波長の範囲が大きくなるので、モードホップ時に起こる多モードの影響を受けやすくなる。距離測定時とは違い、2つの光波が結合したときの増加量が大きいため、多モード発振時の出力の弱い波長でも顕著に検出してしまう。また、多モード発振は毎回同様の発振をするとは限らず、その時々によって基準周波数は大きく異なってしまう。そこで今回の条件での最適な変調波振幅は800mVとなった。

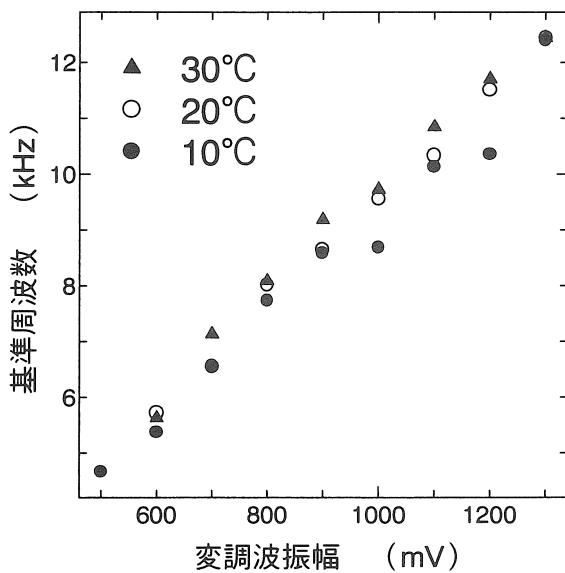


図6 変調波振幅-基準周波数グラフ

4.3 自己補正結果

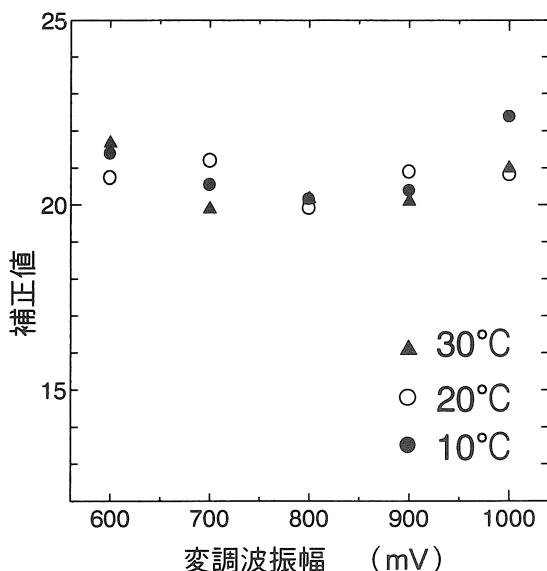


図7 変調波振幅-補正值グラフ

4.3.1 変調波振幅-補正值測定

図7にターゲットまでの距離70cmにおけるMHP周波数と基準周波数の比を取り、自己補正したグラフを示す。変調波の振幅が800mV以外では自己補正を行っても温度によって自己補正值は大きなバラツキが見られた。これは基準周波数が4.2.1で述べた理由により精度が悪くなってしまったからである。このグラフから変調波の振幅は800mVが最適であった。しかし振幅は小さければ小さいほどモードホップの影響を受けにくくなるので、800mV以下でも精度の良い補正を行えるようにすることが望ましい。

5.まとめ

半導体レーザ特有の現象として、外部の反射面からの散乱光が戻り光として活性領域内に戻り出力光と結合してしまい、ノイズとして扱われてきた現象を逆手に取り、これを自己結合効果として利用することで反射面までの距離測定に利用する研究を行った。この時の大きな障害として、LDの発振波長が周囲の温度等によって変化してしまうことが挙げられる。本実験では、LDを三角波変調して測定を行ったが、周囲の温度の影響で変調効率が微妙に変化して温度によって測定値は変化してしまう。そこで一定の距離のMHP周波数である基準周波数との比をとて自己補正を行った。これによって周囲の環境の影響を受けにくい補正值を得ることが出来た。

この測定原理ではターゲットまでの距離をMHP周波数に変換し、その値が基準周波数の何倍になるかで距離に戻す方法をとっている。そのため両方の過程で高い精度が要求される。

前者のMHP周波数測定は信号が微弱なため、測定回路に大変苦労した。また、測定距離は20cm~120cmの範囲で、測定誤差の平均は0.6%となったが、これ以上距離を伸ばすことは元々大変微弱な戻り光を利用しているという原理的な面から、あまり望めない。一方、20cm以内の近距離を測定することは回路の改良で可能である。

後者の基準周波数測定では結合による増加分は大きいので、回路による処理は簡単である。しかし、得られるパルスが少ないため、安定した精度の良い基準周波数を得るのに大変苦労した。センサ部を出来るだけ小型化しようと、マイケルソン干渉計の光路差を短く設定してしまったためである。しかし光路差を伸ばせば得られるパルス数は多くなるが、本距離測定装置の特徴の1つである小型に反してしまう。そこで装置の改良の1つに光ファイバーを用いてLDの出力光の一部を取り出し、回路ボックスの中にマイケルソン干渉計を持ってくる方法が考えられる。これによりセンサ部はLDとレンズだけとなるので2×3cm程度と現在と比べてかなり小型化することが出来る。また、マイケルソン干渉計の光路差も長くしやすいので、現在の3.5cmから10cm程度にすれば、

より精度のいい補正值が得られる。また補正によって、
LD ごとの異なる発振波長特性に影響されない距離測定
が可能なので LD の特性を測定する必要が無くなる。

参考文献

- 1) 上田正、山田諄、紫藤進、津田紀生、正弦波変調による半導体レーザの自己結合効果を利用した距離計、電気学会論文誌、Vol. 117-C、No.7、pp954-961、1997
- 2) 宮崎聰、津田紀生、紫藤進、山田諄、自己結合型距離計の安定化に関する研究、愛知工業大学研究報告、Vol. 33、PartB、pp61-68、1998

(受理 平成 13 年 3 月 19 日)