

自己結合型距離計の安定化に関する研究

Study on Stabilization of Self-Coupled Distance Meter

宮崎 聡[†], 津田 紀生^{††}, 紫藤 進^{††}, 山田 諄^{††}
Satoru Miyazaki, Norio Tuda, Susumu Sito, Jun Yamada

Abstract A compact and simple distance meter based on self-coupled effect of semiconductor laser has been developed. Using the interference in the laser resonator with the returned light from external surface, the sensor of the distance meter is composed of only a laser diode and a lens. It could be much smaller than other distance sensors. It is obtained that the accuracy of this distance meter is below 1%. This distance meter has good accuracy when the measurements condition such as surround temperature, modulation frequency and amplitude is a constant. If these conditions are changed, the error increases. Maikeruson interferometer is used to decrease the error. The change of the laser wavelength is measured by the interferometer which take a part of output laser light. To compensate the distance meter by the interferometer, the errors from change of the measurements condition much decrease.

1. はじめに

今日では工場内の組立ラインで生産性の向上が重要視され、工場内のオートメーション化、無人化が期待されている。特に最近では、数多くの無人工場の出現によりロボットの活躍が期待され、距離センサの需要が高まってきている。なかでも、ロボットアームのように軽量で小型な装置が数多く用いられることから小型、軽量の距離センサの需要が特に高い。このような場合、レーザ光を用いることにより非接触で測定が可能となり生産ライン上の測定物を乱すことがないという利点がある。

干渉を利用した距離計としてマイケルソン干渉計、トワイマン-グリーン型干渉計、マッハ-ツェンダー干渉計等があり、高精度であるが、装置が複雑になり、振動に弱いなどの問題がある。¹⁾ また、従来から用いられている三角測量法では、短距離において高精度の測定が可能となるが測定レンジが狭く、対象物までの測定距離が制限される欠点がある。

本研究では、今まで半導体レーザの使用に於いて、戻り光ノイズとして扱われていたノイズ信号を、自己結合効果として積極的に利用し、距離測定を行う事を目的にしている。

また、自己結合効果により、センサ部が半導体レーザとレンズのみとなり、非常に小型化、軽量化する事が可能であり、半導体レーザに発光、干渉、受光を兼ねさせることにより、外部

[†] 愛知工業大学 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)

光学系を簡略化することができる。また三角測量法より測定可能距離が広い特徴を持つ。

これまで、半導体レーザーの自己結合効果を用いた距離測定については報告されているが、²⁾半導体レーザーの発振波長は周囲温度、変調周波数、振幅、注入電流等の変動により、変化するので測定誤差が増大する。そこで、レーザー光の一部をマイケルソン干渉計に取り込み、発振波長の変化に比例する干渉波形の周期を補正に用い、測定条件の変化による半導体レーザーの発振波長の変動による誤差に影響されない距離計について研究した。

2. 測定原理

2・1 自己結合効果

半導体レーザーの戻り光ノイズはこれまでの各種の応用技術に際して、雑音の増大などの障害をもたらし、戻り光対策が重要な技術課題となっていた。しかし、今回は、その出力光と戻り光の干渉を自己結合効果として利用することにより距離計測を行い、さらに干渉計を用い、計測誤差を低減することを目的としている。この効果を用いることにより、僅かな戻り光でも共振器内の増幅作用により、信号として検出できる。

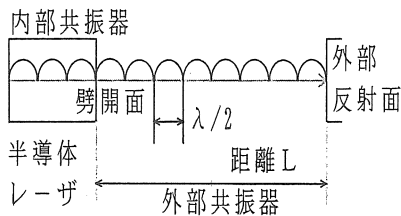


図1 複合共振器モデル

図1に複合共振器のモデルを示す。半導体レーザーから発振されたレーザー光が外部反射面（測定対象物）に照射され、散乱し、その一部が戻り光として半導体レーザーの劈開面に戻り、共振器内のレーザー光と干渉する。この時、半導体レーザーの発振波長を λ 、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

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

を満たすときに両者の光は強めあい、光出力は僅かに増幅される。この現象を自己結合効果と言う。

この現象を用いれば、外部反射面の位置を変化させると、共振条件を満たしたところでのみで光出力が増幅されるので、最初の位置からの変化が分かる変位計として利用できる。しかし、この方法では静止した距離を測定する事はできない。距離測定に利用するには、変調をかけ発振波長が時間的に変化するようにして共振条件を満たすモードの数(式1の n の数)の変化を測定しなければならない。

三角波電流変調時のフォトダイオードの出力は式(1)の共振条件を満たすと、その時だけ出力が増加し、三角波が一定周期の階段状の波形となる。この階段状の波形の一つ一つをモードホップパルスと呼ぶ。このモードホップパルス周波数は次式で表す事ができる。³⁾

MHP周波数 F は

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

ここで、 f_m は変調周波数、 i_m は三角波電流の振幅、 L は外部反射面までの距離、 λ は発振波長、 $d\lambda/di$ は変調効率である。

また、外部反射面までの距離 L を干渉波のミラーの光路差に変えれば、干渉計から生成される干渉波の周波数となる。

2・2 マイケルソン干渉計

半導体レーザーの発振波長の変化を測定するためにマイケルソン干渉計を用いた。干渉計測はレーザーの特長を最も生かした計測法の一つで、レーザー光の優れた時間コヒーレンス（単色性）を利用した計測法である。被測定物体を非接触で、光の波長のオーダの光路長の変化（長さ、変位、屈折率の変化）といった極めて高い精度を持って測定できる。光波の持つ情報は、振幅、位相、偏光の大きさや変化であるが、干渉計測においては位相変化

によって情報が得られる。そして、測定対象物の変位や屈折率変化などの物理量をレーザー光の位相変化として観測する。図2にマイケルソン干渉計の構成と動作原理を示す。レーザー出力光は、ビームスプリッタにより光強度の等しい二つの光に分けられ、それぞれミラー1、ミラー2に照射し、反射され、再びビームスプリッタで重ね合わせ、フォトトランジスタで受光される。レーザー光に変調をかけているので反射光の重ね合わせにより、干渉波が生じる。

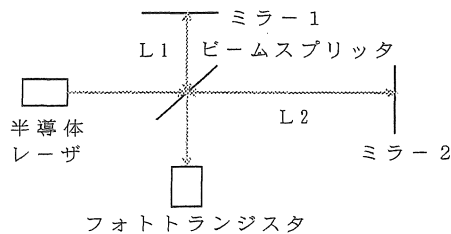


図2 マイケルソン干渉計

3. 距離計測システム

システムのブロック図を図3に示す。本測定装置は、レーザー光を発振、受光する部分である距離センサ部とマイケルソン干渉計からなる干渉部で構成される。まず、距離センサ部では三角波で変調をかけたLDからの出力光がターゲットによって反射し、その散乱光の一部が出力光と結合し、内蔵のフォトダイオードによってモードホップパルスが出力される。その信号からハイパスフィルターで変調波成分を取り除き、増幅し、コンパレータで整形し、MHP周波数として測定する。しかし、この方法では測定条件の変化により誤差が増大する。そこで、ガラススプリッタを介して出力光の一部を距離差を設けたマイケルソン干渉計に取り込みLDの波長の変化を測定し、測定条件の変化による誤差の増加を低減するようにつとめた。バンドパスフィルターで干渉波だけを取り出し、コンパレータで整形し、三角波発生回路からゲートを作り、そのゲート内のパルスから干渉波の周波数（以後、基準周波数と呼ぶ）

を測定する。このMHP周波数と基準周波数の比をとり、誤差を低減する。以後、この比を補正值と呼ぶ。

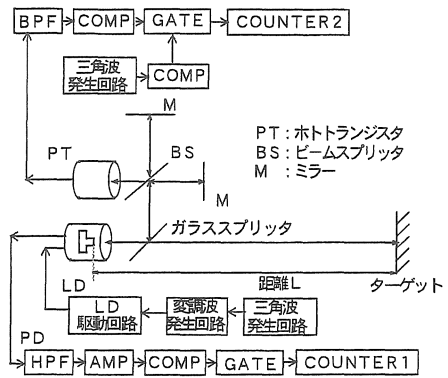


図3 距離計測システム

3・1 センサ部

レーザー発振部分の距離センサ部は半導体レーザー（フォトダイオード内蔵）とレンズ（直径14.5mm）のみで構成され、直径20mm、長さ25mmのアルミ製円筒内に組み込まれており、小型である。しかし、手作りのセンサのため、やや大きくなったがさらに小型にすることも可能である。センサ部分が小型に出来ることは、この距離計の特徴の一つである。使用した半導体レーザーはシャープ株式会社製の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、本実験に置いて、測定距離を最大1m程度としたので、レーザーの焦点距離を1mに設定し、半導体レーザー～レンズ間の距離を14.7mmとした。尚、アルミの内側は反射を防ぐために、黒く着色し、外部ノイズを最小限に防ぐために信号線にはシールド線を使用した。

3・2 測定回路

フィルター回路、増幅回路、信号波形整形回路、ゲート回路はそれぞれMHP周波数測定用、基準周波数測定用を試作した。本センサ部より検出される信号は非常に微弱であり、ノイズの影響を受けやすいため、試作した測定回路にお

いてその信号レベルの微小な範囲では、抵抗、コンデンサ、トランジスタ、オペアンプ等については、低ノイズであり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)

3・3 LD 駆動回路

一般的に半導体レーザを発振させる場合、市販の駆動 IC を用いる。それは、半導体レーザの光出力が周囲温度の変動によって変化するのを防ぐためであり、温度が変化しても一定の光を出力することができ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) 機能を有する。しかし、APC を使用すると出力は一定になるが波長が変化するので、本測定では使用しなかった。そのため、半導体レーザ駆動電流を微調整できるように抵抗を可変式にした。

3・4 干渉波測定ゲート回路

干渉波計測用ゲート回路には三角波発生回路と JK フリップフロップを用いた。まず、三角波発生回路により仮ゲートをつくり、JK フリップフロップにより、そのゲート内のパルスを 2 進数のパルスと 4 進数のパルスに変換、さらにパルス 5 個以上の測定には 8 進数のパルスを 4 進数のパルスから作る。これら 3 種類のパルスの組み合わせから、2～6 周期まで求めることができるように作製した。2 進数のパルスを作り出すために最低 2 つのパルス、4 進数のパルスを作り出すために最低 4 個のパルスが必要なために 2 周期を求めるときにもパルスが 4 つ必要とされるが、排他的論理和を使うことで、3 周期分のパルスで可能である。

4. 測定結果及び検討

4・1 カウンターのゲート時間

本測定において誤差が大きくなる要因の一つにカウント誤差が考えられる。特に基準周波数

においてはその値で MHP 周波数を除算するので誤差の影響はとて大きい。

基準周波数は干渉計の光路差から生じる干渉波形から測定するが、小型化を目指しているため、小さな光路差から基準周波数を測定することになる。そのため少ないパルスを測定する事になりカウント誤差の影響は大きい。このカウント誤差を低減するには、その平均化個数を増やす、つまりゲート時間を長くすればよいが、そうすると一回の測定に時間がかかりすぎてしまい、距離センサとしての実用性を無くしかねない。図 4 にバラツキ誤差の測定結果を示す。やはりゲート時間が短いと、バラツキ誤差は大きくなる。実用性の面も考慮に含め、最も早く安定した範囲に入る 50ms 程度が最適である。この事より、測定には 50ms の設定にした。50ms でのバラツキ誤差は 0.56% であり、1000ms の時は 0.46% であった。変調周波数に 1kHz を用いているので 50ms は 50 個分の平均に相当する。MHP 周波数の測定にも 50ms で行った。

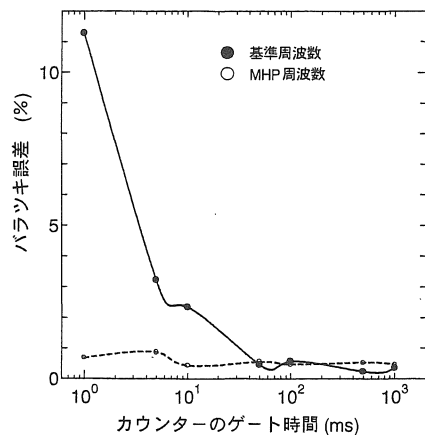


図 4 カウンターのバラツキ誤差特性

4・2 距離に対する MHP 周波数

測定方法は距離 10cm から 10cm 間隔で設定し、その距離で MHP 周波数を連続的に 5 回測定し、その平均値をその距離における MHP 周波数測定値とした。ターゲットには、白い紙を用いた。距離に対する MHP 周波数値の測定結

果を図 5 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、これを校正曲線と呼ぶ。図 5 には、校正曲線と測定値のズレを誤差として示す。図 5 より距離と MHP 周波数には比例関係があるので、MHP 周波数が分かれば、距離が測定できる。ズレは平均で 0.78%、近距離 10cm において最大 1.46% となり、各距離において 1% 程度となった。

また、バラツキ誤差の平均は 0.53%、近距離 10cm において最大で 0.90% となり、各距離で 1% 未満となった。これらの誤差の中には、ターゲットを手で動かしているための設定誤差、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測定誤差等が考えられる。

4・3 ターゲットの色、材質による誤差

材質別として、反射テープ、アルミ板、木材(ベニヤ)を用いた。その結果を図 6 に示す。バラツキ誤差は距離によらず 1% 以下に収まっている。色別として、白、赤、青の光沢のない紙を使用して同様な測定を行った結果、どの色についても平均で 1% 未満となり同じような変化をしており、色による変化はあまり見られない事が分かった。

5. 基準周波数の測定誤差

5・1 光路差に対する誤差

試作した回路での干渉計の各光路差において干渉波から作られる測定対象とするパルス数を 3~7 まで変化させた時の結果を図 7 に示す。基準周波数の平均バラツキ誤差が比較的安定していたのは、7,8cm だった。光路差 3,4cm では干渉波がうまく生じなかったために、10cm では生じる干渉波に大小の差ができてうまく測定できなかったの、バラツキ誤差が増大したと考えられる。一般的に光路差を多く設け、パルスを多く生成し、カウントした方が誤差も少なくなると考えられるが、光路差を多く設けると振幅が小さくなる。試作した回路では S/N 比

があまり良くなく、その一つ一つの振幅を判別出来なくなった。

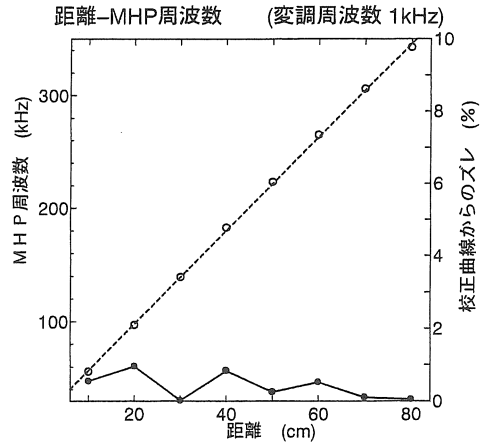


図 5 距離-MHP 周波数、ズレ

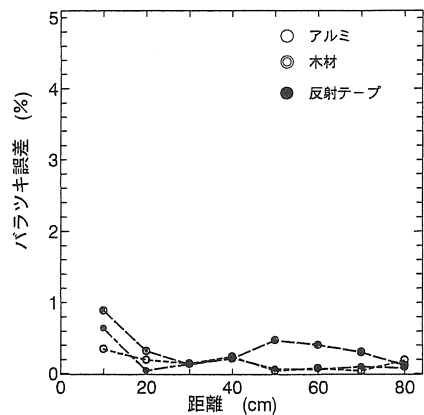


図 6 材質別のバラツキ誤差

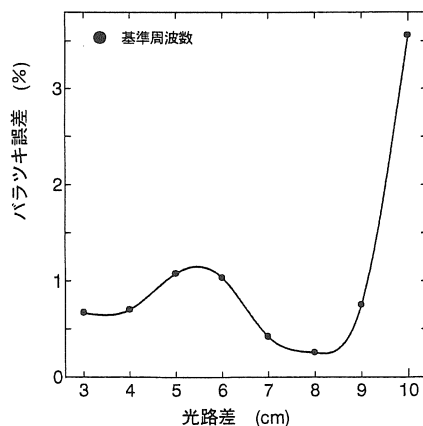


図 7 光路差-バラツキ誤差特性

5・2 測定パルス数に対する誤差

試作した回路での各測定パルス数における光路差を変化させた時の基準周波数の平均バラツキ誤差を図 8 に示す。3~6 個までは僅かであるがバラツキがあるが 7 個では低く抑えられている。これらの結果より光路差 7cm、6 周期分で以降の測定を行った。

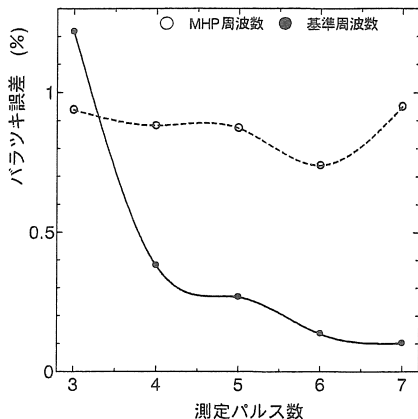


図 8 パルス数-バラツキ誤差

5・3 光軸の状態による誤差

次に光路差 6cm 測定パルス数 4 つで干渉計のミラーの光軸を変化させ、うまく調整が取れているときと、取れていないときに変化させた。

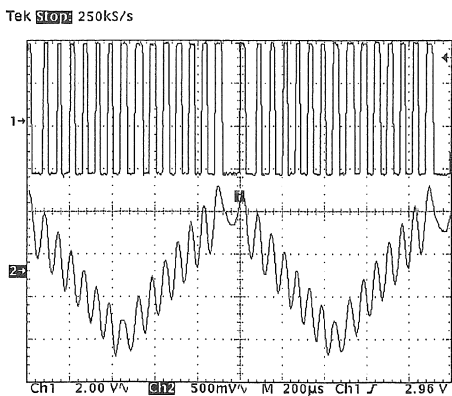


図 9 パルス安定時

(上：コンパレータ出力 下：干渉波形)

その時の波形を図 9、図 10 に示す。また、バラツキ誤差は安定時 0.50%、不安定時は 0.67%とおよそ 1.4 倍の誤差が光軸の状態によ

り誤差が増加する。このことから干渉計の設定により、基準周波数が容易に変動し、補正に影響を及ぼす。

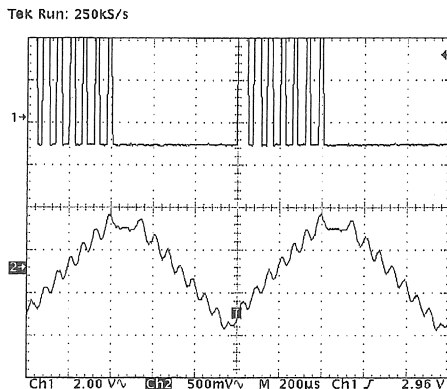


図 10 パルス不安定時

(上：コンパレータ出力 下：干渉波形)

6. 変調周波数に対する測定誤差

6・1 校正曲線に対する誤差

まず、三角波変調の周波数 1kHz、振幅 520mV、オフセット 1.1V に設定し、光路差 6cm、測定パルス数 4 つで、距離に対する MHP 周波数と基準周波数を測定した。測定方法は、測定距離を 10cm から 10cm 間隔で設定し、その距離で MHP 周波数と基準周波数を連続的に 5 回測定し、その平均値をその距離における周波数測定値とした。

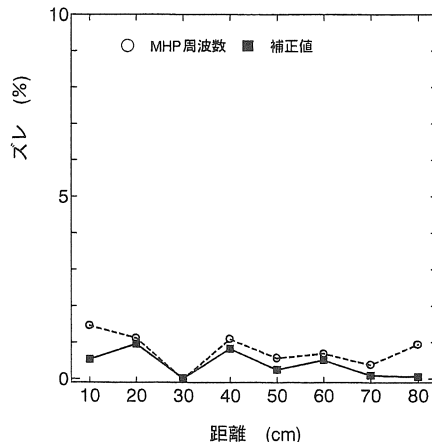


図 11 距離-ズレ

図 11 に MHP 周波数、補正值、それぞれの測定値を最小二乗近似した曲線である校正曲線からの誤差をズレとして示す。MHP 周波数の平均値は 0.79%、補正值の平均値は 0.41%であった。補正を行わないときに比べおよそ半分に誤差を低減することができた。また、80cm では MHP 周波数のズレ、0.94% が補正值では 0.056% に約 1/17 に低減した。

6・2 変調周波数による変化

変調周波数を変化させた時の基準周波数の変化を図 12 に示す。変調周波数の増加に伴って、それに比例して基準周波数も増加している。また、図 12 には MHP 周波数対距離の測定結果の傾きを示す。これらの変化が同様であることから、その比をとり、補正を行う事で変調周波数に影響されずに距離測定を行うことができる。

6・3 距離一周波数特性

三角波発生回路による変調周波数を 900Hz から 50Hz 間隔で 1100Hz まで変化させた時の測定結果を図 13 に示す。図からも MHP 周波数の距離に対する傾きが変化し、その結果、誤差が増加しているが、同時に基準周波数の方も増えるので、基準周波数による補正を行うと傾きはほぼ一定となり、変調周波数による誤差が低減できることが分かる。

変調周波数 1kHz を基準値として、距離に対して誤差がどれくらい生じるかを図 14 に示す。誤差は式(3)より算出した。

$$1\text{kHzからの誤差} = \frac{1\text{kHzの平均値} - \text{各周波数の平均値}}{1\text{kHzの平均値}} \times 100 \quad (3)$$

誤差は変調周波数の変化分がそのまま MHP 周波数の変化分に相当するので、式(2)より 900Hz や 1100Hz では 1kHz との誤差は 10% と考えられる。測定では約 9% 程度の誤差が生じた。また、950Hz や 1050Hz は同様に 5% の誤差が考えられる。多少のバラツキが生じているが、ほぼ 5% 程度の誤差が測定で得られた。このことから、MHP 周波数がほぼ理論値と等しい変動をしている事が分かる。

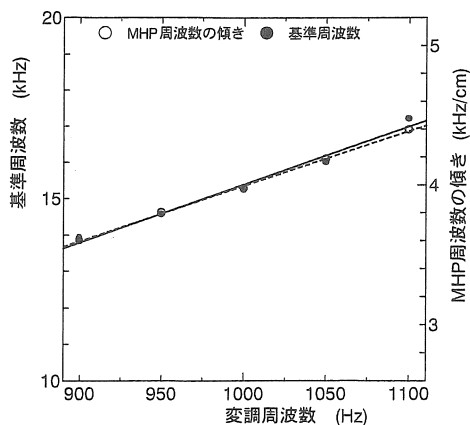


図 12 変調周波数－基準周波数

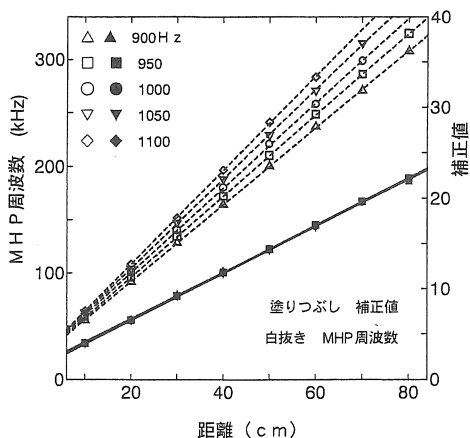


図 13 距離一周波数特性

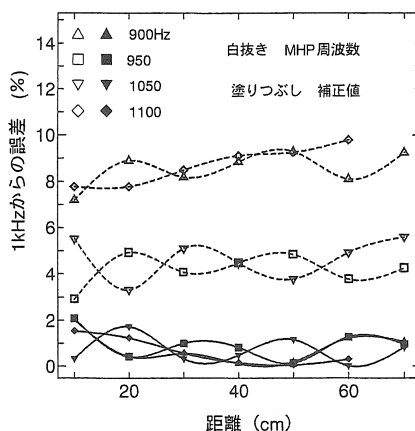


図 14 1kHz からの誤差

また、補正值では、全ての周波数において、誤差を低減している。近距離では、誤差が 2% を

越えているところがあるが、これは、基準周波数の設定ゲートと干渉波パルスのタイミングがうまく合わずに生じるバラツキやカウント誤差等が考えられる。その他では変調周波数、距離に関係なく誤差を 1% 程度以内に低減している。

図 14 の各変調波の誤差を平均したものを図 15 に示す。誤差が減少しているのが分かる。補正を行うと、1100Hz では誤差 8.7% が 0.64% におよそ $1/14$ 以下、900Hz では 8.5% が 0.81% におよそ $1/10$ 以下に減少している。900~1100Hz まで変化して、MHP 周波数では最大 10% 程度の誤差が生じることを補正值では最大 0.64% に低減している。これらの結果から、変調周波数が変動しても精度良く測定が可能である。900~1100Hz までの MHP 周波数の平均誤差 6.52% が補正值では平均誤差 0.75% に、およそ $1/8$ 以下に削減している。このように、基準周波数を用い補正を行うことで、誤差を低減し、変調周波数によらず距離測定を行うことが可能である。

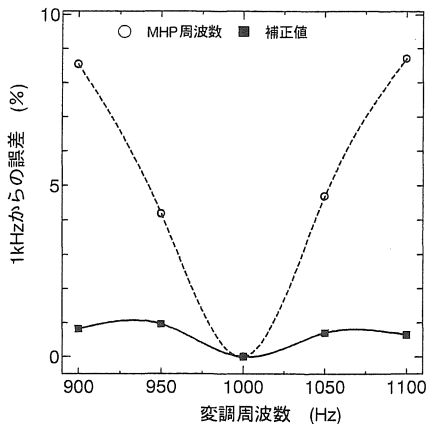


図 15 1kHz からの平均誤差

7. まとめ

工場における生産性向上のために、小型、軽量の距離センサの需要が最近、特に高い。そのため、半導体レーザを使用した距離計の検討を行った。本研究では今まで半導体レーザの戻り光ノイズとして扱われていたノイズ信号を自己

結合効果として積極的に利用し、距離測定を行うことを目的としつつ、さらに半導体レーザの発振波長の変化に影響されない距離計の研究を主な目的とした。

この距離計の特徴としてレーザ光を発振、受光するセンサ部がレンズと半導体レーザのみで非常に小型に出来ることが上げられる。また、測定対象物の、色、材質に影響されない事も本距離計の特徴の一つである。

自己結合効果は半導体レーザのみみられる現象で、外部反射面と半導体レーザの劈開面との間で共振条件を満たす時に出力が増加される現象である。しかし、測定条件が一定の時にはある程度精度良く測定が可能であるが、周囲条件の変化により半導体レーザの波長が変動するため誤差が生じる。その誤差を低減させるためにマイケルソン干渉計を用い、補正を行った。変調周波数 1000Hz を基準として、900~1100Hz まで変化させた結果、MHP 周波数の平均バラツキ誤差を基準周波数で補正することにより $1/8$ に低減することができた。今回は光路差の最適の長さを調べるため、干渉計としてそれぞれを独立型のもを使用したために振動等により光軸がずれる事が生じたので、一体型の干渉計を使用すればさらに誤差を低く抑えることが可能であると推測される。

参考文献

- 1) 西塚 弘：レーザ計測、p.71、経営システム研究所、東京、1984
- 2) 上田 正、山田 諄他：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 C (7)、pp.954~961、1997
- 3) 上田 正、山田 諄他：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、愛知工業大学研究報告、第 31 号 B、pp.36~37、1996

(受理 平成10年 3月20日)