カオスレーザレーダを用いた衝突防止センサの研究

学生員 成田 義之* 正 員 津田 紀生*
正 員 山田 諄*

Study on Collision Avoidance Sensor using Chaos Laser Radar

Yoshiyuki Narita*, Student Member, Norio Tsuda*, Member, Jun Yamada*, Member

Many laser radars have been studied as in-car radar. Generally, a distance is measured from delay time using either a periodic signal or a single pulse. But the received signal becomes to be buried in noise with increasing distance. Recently a chaos has been paid an attention and a chaos laser radar has been suggested. When a received signal is correlated with a transmitted one, it takes long processing time to perform repeatedly multiplications and integrations. A new type of chaos laser radar which processes by only an addition is proposed. It can quickly process and is comparatively strong for noise. A proto type of chaos laser radar is produced, in which a semiconductor laser with low output power below 1mW is used. This laser radar is able to measure the distance up to 80m. It is confirmed that the chaos laser radar is effective.

キーワード：半導体レーザ，カオス変調，レーザレーダ，衝突防止センサ

Keywords : laser diode, chaos modulation, laser radar, collision avoidance sensor

1. はじめに

レーザレーダには，エアロゾル分布測定などの大気計測や，車載用衝突防止センサなどがある。

車載用レーザレーダの場合は，自動車のテールランプの反射板に向けレーザ光を照射し，反射光の遅れ時間から距離測定を行う。また，レーザレーダ以外には，ミリ波レーダや超音波レーダがあり，ミリ波レーダの場合は，全天候下で測定可能となり，長距離センサとして優れた特徴をもつ。しかし，レーザレーダと比べて，装置自体が大型となり，分解能が悪く，ターゲットが複数存在する場合は混信する恐れがある。超音波レーダの場合は，車両周辺の物体のみ測定可能で，低速車での周辺監視装置としての応用が主流である。このように，様々なレーダの研究が行われており，現在は車載用レーダとして，レーザレーダが数多く研究されている。

レーザレーダ方式としては，周期的な信号で変調をかけ遅れ時間を求める方法と，単一パルスを用いて遅れ時間を求める方法が一般的である。しかし，距離が遠くなると戻り光が小さくなり，ノイズに埋もれてしまう。このため，最近ではカオス変調を用いたレーザレーダが注目を集めてい

る。

レーザカオスは，Haken の研究以来⁽¹⁾，さまざまな現象が解明され始め，擬似ランダムコード変調を用いたレーザレーダ^{(2)~(4)}やカオス変調を用いたレーザレーダ^{(5) (6)}などが提案されている。カオス変調の方法としては，カオス発振するレーザを用いたものと，電氣的にカオス信号を生成し変調をかけるものがある。しかし，これらの相関を取る方法では，必要な距離分解能で決まる時間ごとに乗算と積分を繰り返し行うため，非常に処理時間がかかる。

そこで，本研究では，出力の小さな半導体レーザを用いて，比較的ノイズに強く，加算のみで高速処理できる新しいタイプのレーザレーダを考案した。これは，ランダム信号であるカオスまたはノイズ信号で変調をかけて半導体レーザを発振させ，ターゲットから反射して戻ってきた受信信号を進ませ，加算するという簡単な信号処理により遅れ時間を求める方法である。このため，一般に相関関係をとるには，乗算と積分を繰り返し計算するため処理時間がかかるが，本研究では加算を 1 回行うだけなので，処理時間が速くなる。また非周期的なノイズ信号を用いて変調をかけるため，ある程度ノイズに強く，混信に強い。

本研究では，平均出力 1mW 以下の安価な半導体レーザを用いて，80m まで距離計測を行うことができ，本方式のカオスレーザレーダが有効であることが確認できた。

* 愛知工業大学

〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247

Aichi Institute of Technology

1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota-shi, Aichi 470-0392

図 1 測定原理

Fig. 1. Measurement principle.

2. 測定原理

カオスの特性を利用したレーダ方式の測定原理を図 1 に示す。送信信号は ± 1 に 2 値化し、最初の立ち上がりゼロクロスする時刻を基準時間とすると、この基準時間と、2 値信号の立ち上がりゼロクロスする時刻との差がそれぞれ $T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \dots$ となる。また、受信信号も ± 1 に 2 値化し、送信信号で求めた $T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \dots$ だけ受信信号波形を進ませ、この移動した波形をすべて加算すると、遅れ時間の所で加算信号の値が負から正に急峻に変化する波形が得られる。それ以外のところは受信信号波形が不規則に正または負になるので、加算信号は限りなく 0 に収束する。そして、この加算信号の値が負から正に急峻に変化している所と、0 点と交わった点を求めれば送信信号との時間差を示し、この時間差に光速を乗算すればターゲットまでの距離が測定できる。

従って、この原理を利用すると、加算のみで処理するため従来の方式よりも高速に処理が出来る。更に、ノイズによって受信信号が分離・結合して送信信号と違った波形になっても、加算信号のピーク値が減少するだけなので、あまりノイズによる影響が出にくい。また、ターゲットが複数個ある場合は、それぞれ遅れ時間の所にピークが複数得られ、複数個のターゲットまでの距離を同時に測定出来る。

3. 測定システム

試作した測定システムを図 2 に示す。本装置は、光学系、投光回路、受光回路、デジタルオシロスコープ(以下デジタルオシロ)、パーソナルコンピュータ(以下 PC)からなる。尚、デジタルオシロは、Tektronix 製の TDS3032 を使用し、周波数帯域は 300MHz、最高サンプリングレートは 2.5GS/s である。また、ターゲットは、車のテールランプの反射板

図 2 測定システム

Fig. 2. Measurement system.

を模したプラスチック製のコーナキューブ反射板を使用した。

〈3・1〉 光学系 光学系は投光部と受光部からなり、単眼式ではなく複眼式を使用した。投光部は、半導体レーザ(以下 LD)と直径 30mm、焦点距離 30mm の投光レンズから構成されており、直径 40mm、長さ 46.5mm のアルミニウム製の円筒内に設置した。LD は、シャープ株式会社製の LT022PD0 を使用し、発振波長 780nm、平均出力 1mW 以下である。本研究は、百 m 程度を目標とするため、レーザ光を平行ビームにした。受光部は、ホトダイオード(以下 PD)と直径 52mm、焦点距離 89mm の受光レンズから構成される。PD は、浜松ホトニクス株式会社製の S1223-01 を使用し、受光面は 3.7mm 角であるが 45° 傾けて使用した。また、投光、受光レンズ間距離は 46mm で、測定限界距離は 77cm である。

〈3・2〉 投光回路 投光回路は、ノイズ発生回路、波形整形回路、LD 駆動回路からなる。ノイズには、抵抗から生じる熱ノイズやツェナーダイオードから生じるショットノイズなどがあり、抵抗から生じる熱ノイズはわずかなため実用的ではない。そこで、ノイズ発生回路には、ツェナーダイオード(ツェナー電圧 $V_Z=12V$)が出すショットノイズを利用した。その後、波形整形回路でパルス化し、デジタルオシロで観測する。パルス化されたノイズ信号の平均周波数は約 1.5MHz であった。そして、送信信号として PC に送る。また、LD 駆動回路では、LD の光出力が一定になるように、供給する駆動電流を LD 駆動回路で制御し、この供給電流を外部から吸い取ることによって変調をかけている。

〈3・3〉 受光回路 受光回路は、増幅回路と波形整形回路からなる。PD で検出される受信信号は 1mV 以下と微弱であり、ノイズによる影響が大きいため、負帰還増幅回

路を使用した。この回路では、増幅率を減らしているため、通常の増幅よりもノイズを減らすことができる。また次段には、カスコード回路を使用したため周波数特性を良くすることが出来る。

増幅回路のノイズ特性については、広帯域ではなく、主に 10MHz, 70MHz で大きなピーク値をもち、70MHz で rms 値が約 25mV であった。また増幅回路の周波数帯域については、高域カットオフ周波数が 10MHz であった。その後、デジタルオシロで観測し、受信信号として PC に送る。そして測定原理に基づいて距離を測定した。

4. 測定結果及び検討

〈4・1〉 加算個数による波形の変化と S/N 本測定原理では、受信信号を進ませ加算する時の個数により、加算信号の S/N が変化する。ただし、通常の S/N と定義と異なり、S は加算信号の遅れ時間附近でのピーク値で、N はそれ以外の時刻におけるピーク値とした。

まず、距離 45m における送受信信号波形を用い、加算個数を増やすと、どのように S/N が改善されていくかをあらかじめ調べ、必要な個数を決めた。ここで、加算される受信信号の個数を 5 個、15 個、25 個と変えた時の加算信号波形をそれぞれ図 3、図 4、図 5 に示す。ここで、サンプリングレートが 2ns なので、Point Number が 1000 の時、時間は 2 μ s である。加算する個数が 15 個以上では、加算信号の値が負から正に急峻に変化する波形が得られ、加算信号のピーク値がノイズよりも大きいことが分かる。15 個以下ではノイズなどの影響で加算信号のピーク値よりも大きい所で上下するため、遅れ時間が分からない。従って、距離 45m では受信信号を加算する個数としては 15 個以上なら測定原理に基づいて処理できることが分かる。

次に、加算個数を変えた時の S/N の変化を図 6 に示す。一般に加算個数を増やせば S/N が良くなり、遅れ時間が分かる。しかし、70m の場合は加算個数が少ないと加算信号のピーク値がノイズ信号よりも小さくなるため S/N が良くない。しかし、更に加算個数を増やせば S/N が良くなる。本研究では、まず 80m 程度までの測定を目指したので、計算時間との兼ね合いから加算個数を 30 個とした。

〈4・2〉 各距離における波形 距離 10m の時の波形を図 7 に示す。送信信号波形はホワイトノイズを使用してい

るので、パルス波形が不規則になり、毎回異なった波形が発生する。受信信号波形は戻り光が多いので、送信信号波形とほとんど同じ波形となり、この波形には回路における遅れも含まれる。これを 2 値化し移動加算すると、加算信号は負から正に急峻に変化する波形が得られ、そして 0 点を通過する時間が遅れ時間となり、それ以外はノイズなどによって上下する。このためノイズによる影響がほとんど

図 4 加算された信号波形(15 個)
Fig. 4. Added signal (15).

図 5 加算された信号波形(25 個)
Fig. 5. Added signal (25).

図 3 加算された信号波形(5 個)
Fig. 3. Added signal (5).

図 6 加算個数に対する S/N
Fig. 6. S/N for different added number.

図7 10mにおける信号波形
Fig. 7. Signal waveform at 10m.

図8 45mにおける信号波形
Fig. 8. Signal waveform at 45m.

ない。

距離 45m の時の波形を図 8 に示す。受信信号波形は戻り光が小さくなってきたため、ノイズに埋もれ始め、波形が歪むが、送信信号とある程度似た波形が発生する。これを 2 値化し移動加算すると、10m の加算信号波形と比べてノイズなどの影響で上下するが、加算信号は負から正に急峻に変化する波形が得られる。

80m の時の波形を図 9 に示す。受信信号波形についてはノイズに埋もれてしまったため、送信信号波形の形跡が見られない。このため 2 値化し移動加算しても、加算信号のピーク値がノイズと比べてやや小さくなるため、遅れ時間が分かりづらくなる。しかし、図 6 に示したように、加算するパルス数を増やせば、加算信号のピーク値が大きくなるのでさらに遠距離までの測定が出来ることが予想される。また、加算信号は遅れ時間の附近で移動した受信信号波形が集まるため、受信信号のパルス幅の平均分だけ幅が出来るが、ノイズの場合は偶然一致した場合だけ瞬間的にピーク値が現れるだけなので、このような幅が出来ない。この違いから遅れ時間を決めることも出来る。

〈4・3〉 測定結果 試作した測定装置を用いて距離測定を行った結果を図 10 に示す。測定距離については 1 つの距離に対し 4 回測定し、その平均値から算出した。この結果には回路の遅れが含まれているので差し引いてある。測定距離は、実際の距離に対して比例的に増加し、80m まで測定が出来た。また、実際の距離については巻尺で測定したので 80m で 1cm 以下の精度である。以上のように、デジ

図9 80mにおける信号波形
Fig. 9. Signal waveform at 80m.

図 10 測定結果
Fig. 10. Measurement result.

図 12 統計誤差
Fig. 12. Statistical error.

図 11 絶対誤差
Fig. 11. Absolute error.

タルオシロと PC を用いた場合、オフラインながら平均出力 1mW 以下の小さな出力の半導体レーザを用いても 80m までの距離計測が行えることが分かった。

〈4・4〉 絶対誤差 実際の距離に対する測定結果の絶対誤差を図 11 に示す。絶対誤差については測定した 4 回分の平均値と、実際の距離との差から算出した。絶対誤差については 70m を越えると急激に大きくなり、誤差は 1 m 以上になった。この原因については距離が遠くなると戻り光が弱くなってノイズに埋もれたことで誤差が生じたと考えられる。一方 70m 付近までの小さな誤差については、回路の遅れのバラツキやサンプリングレートの影響が考えられ、サンプリングレートについては 500MS/s で処理してい

るため 0.3m 程度の誤差が生じる。全体の平均絶対誤差は、0.34m となった。

〈4・5〉 統計誤差 実際の距離に対する測定結果の統計誤差を図 12 に示す。統計誤差については、次式で与えられる。また、図 12 は、統計誤差を各距離で割って示した。

$$\left[\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 / (n-1) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 x_i =測定値、 m =平均値、 n =測定回数

相対的な統計誤差については、回路の遅れのバラツキやサンプリングレートによる一定の誤差があるため、近距離の場合は誤差が大きくなるが、それ以外は、1～2%程度とほぼ一定となった。全体の平均統計誤差は、1.93%となった。

5. まとめ

従来のレーザレーダ方式では周期的な信号、又は単一パルスを用い、遅れ時間から距離を求めている。このため、距離が遠くなるとノイズに埋もれてしまう。そこで、カオス信号を用いて相関をとる方式が提案されているが、時間毎に乗算と積分を繰り返し計算するため処理時間がかかってしまう。従って、本研究では、比較的ノイズに強く、加算のみで高速処理できる新しいタイプのレーザレーダ方式を提案し、測定を行った。その結果、平均出力 1mW 以下でも 80m 程度まで距離測定が可能となり、ある程度ノイズに埋もれても距離測定できることが確認できた。また、一定間隔のパルス光を用いて受信信号を加算平均する方式では、パルスの立ち上がりが緩やかになり測定精度が低下するが、本方式では処理時間が短く加算個数を増やすことができるのでノイズに強く、ノイズに埋もれても遅れ時間附近のピーク値が低下するのみでゼロクロス点は原理的に変化しないので精度が低下しない。更に、従来の相関をとる

方法と比べて処理が簡単のため、安価で小型な装置が実現できる。このため、本方式によるカオスレーザレーダの有効性を示すことができた。

測定結果については、測定距離が実際の距離に対して比例的に増加し、ほぼ理論特性と一致することが分かる。また 80m の受信信号波形のように、受信信号がノイズに埋もれても加算信号にピーク値が現れた。更に、誤差については、60m 以上で増え、原因としてはノイズに埋もれたことが考えられる。さらに 60m 以下での小さな誤差に関しては回路の遅れのバラツキやサンプリングレートの影響が考えられる。

今後の課題としては、測定結果がリアルタイムに表示されるように専用のハードウェア(FPGA)を用い、比較的簡単に高速処理する方法を検討中である。また、オンライン化については、本測定原理に基づいて処理するが、ノイズの影響が大きくなり判断が難しい場合には、加算信号のピーク値の幅で判断する。

また、統計誤差が 60m 以上から大きくなるのでノイズを減らし、測定精度を向上させることが挙げられる。更に、DSP やフィルタ回路などを用いてノイズ除去すれば、長距離までの測定が出来ることが予想される。

(平成 15 年 3 月 12 日受付, 平成 15 年 8 月 25 日再受付)

文 献

- (1) H.Haken : "Analogy Between Higher Instabilities in Fluids and Lasers", *Phys.Lett*, Vol.53A, No.1, p.77-78 (1975-4)
- (2) N.Takeuchi, N.Sugimoto, H.Baba, and K.Sakurai : "Random Modulation CW lidar", *Appl.Opt*, Vol.22, No.9, pp.1382-1386 (1983-5)
- (3) N.Takeuchi, H.Baba, K.Sakurai, and T.Ueno : "Diode-Laser Random-Modulation CW Lidar", *Appl.Opt*, Vol.25, No.1, pp.63-67 (1986-1)
- (4) C.Nagasawa, M.Abo, H.Yamamoto, and O.Uchino : "Random Modulation CW Lidar Using New Random Sequence", *Appl.Opt*, Vol.29, No.10, pp.1466-1470 (1990-4)

- (5) A.Minato : "Laser Remote-Sensing Technique Using Chaotic Modulation", *Trans. of SICE*, Vol.34, No.10, pp.1316-1320 (1998-10) (in Japanese)

湊 淳 : 「カオス変調を用いたレーザ遠隔計測手法の提案」, 計測自動制御学論文集, 34, 10, pp.1316-1320 (1998-10)

- (6) A.Minato, M.Itaba, M.Wakasa, and S.Ozawa : "Fundamental Experiment of Ranging Using Chaotically Modulated Laser Diode", *Trans. of SICE*, Vol.37, No.1, pp.1-5 (2001-1) (in Japanese)

湊 淳 : 「カオス変調レーザダイオードを用いた測距手法の基礎実験」, 計測自動制御学論文集, 37, 1, pp.1-5 (2001-1)

成 田 義 之

(学生員) 1978 年 12 月 14 日生。2001 年愛知工業大学電気工学科卒業。2003 年同大学大学院修士課程修了。工学修士。レーザ計測に関する研究に従事。現在、(株)トヨタマックスに勤務

津 田 紀 生

(正員) 1968 年 11 月 18 日生。1992 年愛知工業大学工学部電子工学科卒業。1994 年同大学大学院修士課程修了。同年アンデン㈱入社。1995 年愛知工業大学電子工学科助手、2000 年同講師。現在、同助教授。工学博士。レーザプラズマ及びレーザ計測に関する研究に従事。物理学会、レーザー学会会員

山 田 諄

(正員) 1944 年 4 月 25 日生。1967 年名古屋大学工学部電子工学科卒業。1972 年同大学院博士課程修了。同年名古屋大学工学部助手。1974 年愛知工業大学電子工学科講師、助教授を経て、現在同電子工学教授。工学博士。レーザプラズマ及びレーザ計測に関する研究に従事。物理学会、レーザー学会会員