

# カオスレーザレーダの有効性に関する研究

## Study on Effectiveness of the chaos laser radar

成田 義之<sup>†</sup> , 津田 紀生<sup>††</sup> , 山田 諄<sup>††</sup>

Yoshiyuki NARITA , Norio TSUDA , Jun YAMADA

**Abstract** A laser is widely applied for measurements, since it is invented. There are two types of laser distance meter for short and long distance. For long distance, a laser radar using propagation time of laser light is used. Generally, a distance is measured from delay time using either a periodic signal or a single pulse. But the signal becomes to be buried in noise with increasing distance. A new type of chaos laser radar which processes by only an addition is proposed. This radar can quickly process and is comparatively strong for noise, even if low output power laser is used. To confirm the effectiveness of this principal, a prototype of chaos laser radar is produced. It is found that this laser radar using semiconductor laser is comparatively strong for noise and that the chaos laser radar is effective.

### 1. はじめに

レーザが発明されて以来、計測分野をはじめ様々な分野で広く応用されている。これはレーザ光が従来の光源に比べてコヒーレントな性質、即ち、単色性、指向性及び強度等の点で、優れた特長を持ち、これらの特性は、独立なものではなく、互いに関連しているが、それぞれ活用することにより、レーザ光を用いた応用につながる<sup>1)</sup>。レーザ計測などがこれに該当する。レーザ計測は様々な測定対象があり、距離、変位を測定する場合は、レーザ距離計を用いる。レーザ距離計には微小変位を測定する場合と長距離を測定する場合に分けられる。前者ではレーザの指向性を用いた三角測量法、レーザの収束性を用いて焦点の位置を知る焦点探査法、レーザ光の干渉性を用いたマイケルソン干渉計がこれに該当する<sup>2)</sup>。また後者はレーザ光の伝播時間を用いるレーザレーダがこれに該当する。

このように、様々なレーザ計測に関する研究が行われており、また自動車業界においてもエレクトロニクスを応用し、自動車をインテリジェント化することにより、安全性を高めようとする研究開発が注目をあびている。この自動車のインテリジェント化を行うにあたって、キー技術となるのが、車両周辺のセンシング技術である。このセンシング手段として今最も注目を集めているのが、レーザによるレーダシステムである。<sup>3)</sup>

レーザレーダは、自動車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る。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、さまざま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。

そこで、本研究では車載用の距離センサとして、比較的ノイズに強く、加算のみで高速処理できる、カオスの特性を利用した新しいタイプのレーザレーダ方式を提案した。さらに、カオスレーザレーダを試作することで、その有効性についても確認した。

### 2. カオス

カオスとは、英語の“chaos”が語源で、日本語では通常“混沌”と訳され<sup>4)</sup>、決定論的システムにおける確率的な振舞いを指す。決定論的システムとは、初期値が確定していれば、将来の状態も一意的に決定しているような時間発展系のことである<sup>5)</sup>。従って、カオスを使用

† 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)

すると、ある複雑な現象の解析を行い、その解析結果をもとに将来を予測することが出来る。そのため、画像圧縮、異常検出など、新しい技術を生み出す可能性を秘めており、将来性が期待される。

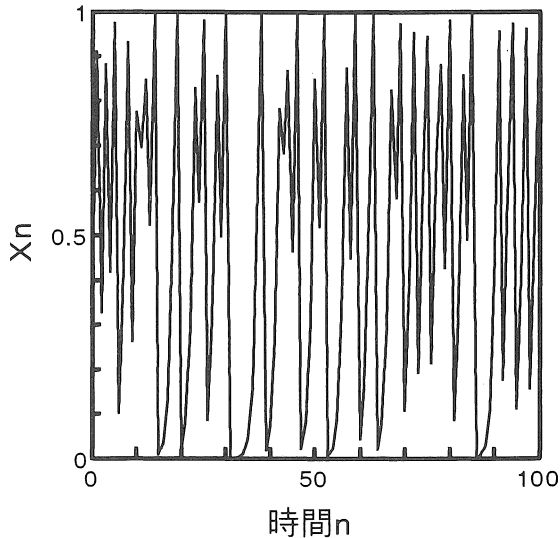


図 1 不規則数列

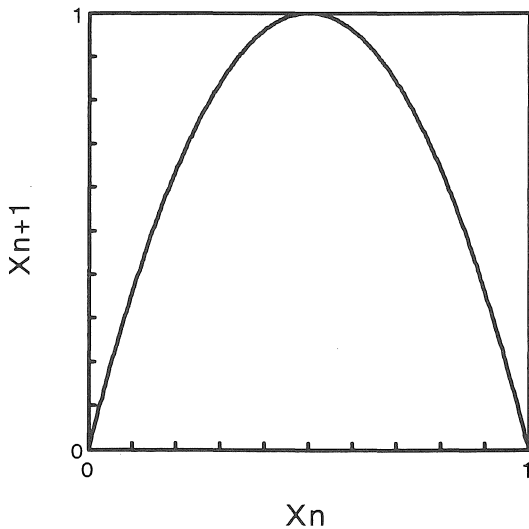


図 2 ロジスティック写像

### 2.1 ロジスティック写像

ロジスティック写像は簡単な法則に従っていながら複雑なカオス挙動を示す端的な例である。簡単な法則の一例としては、具体的には次式によって表されている。

$$X_{n+1} = rX_n(1 - X_n)$$

ただし  $0 < r \leq 4$ ,  $0 < X_n < 1$  (2.1.1)

ここで  $r=4$ ,  $X_0=0.35$  の時、時間  $n$  に対する不規則数列  $X_n$  のグラフを図 1 に、ロジスティック写像を図 2 に示す。図 1 のように、時間的に複雑な波形をして何の規則性も

ないように見えるが、図 2 のように、 $X_n$  と  $X_{n+1}$  の間には放物線の関係が見られる<sup>4) 5)</sup>。

### 2.2 ショットノイズ

自然現象中のノイズには、熱ノイズとショットノイズがある。熱ノイズは導体中の自由電子の不規則な運動によって生成され、低周波の時、抵抗や半導体から発生する  $1/f$  ノイズ(フリッカーノイズ・ピンクノイズ)がこれに当たる。またショットノイズはカソード表面からの電子放出の際のゆらぎによって生ずるノイズ電流等のことで、周波数に依存せず、すべての周波数成分を均等に含むホワイトノイズがこれに当たる。<sup>6)</sup>

本研究ではツェナーダイオードが出すホワイトノイズの一種であるショットノイズを用いた。ツェナー電圧が 6V 以上のツェナーダイオードでは、熱的に発生した電子とホールが印加電圧によって雪崩的に増殖し、急激にツェナー電流を流す。この時ショットノイズが発生する。ここでショットノイズの波形の一例を図 3 に示す。

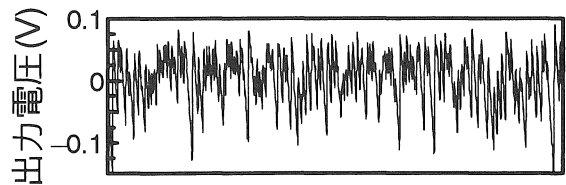


図 3 ショットノイズ

### 2.3 ノイズとカオスの違い

ノイズとカオスの違いを表 1 に示す。カオスの場合は一見ノイズのようなランダム信号に見えるが、図 2 のように、何かパターンがあり、絶対に同じ値をとらない。しかし、ノイズ信号の場合はランダム信号であるため、図 3 に示されるショットノイズを使って、 $X_n$  と  $X_{n+1}$  の関係をとると、図 4 のようにパターンがなく、偶然同じ値をとることがある。

表 1 ノイズとカオスの違い

ノイズ
初期値をどの値にしても、次の値が決まらない。
確率的に決まるので、任意の順番の値と同じ値をとることもある。
次の値は確率的に決まるので、パターンがない。

カオス
初期値が決まると次の値が決まる。
絶対に同じ値をとらない。
周期的ではないが、何となくパターンがある。

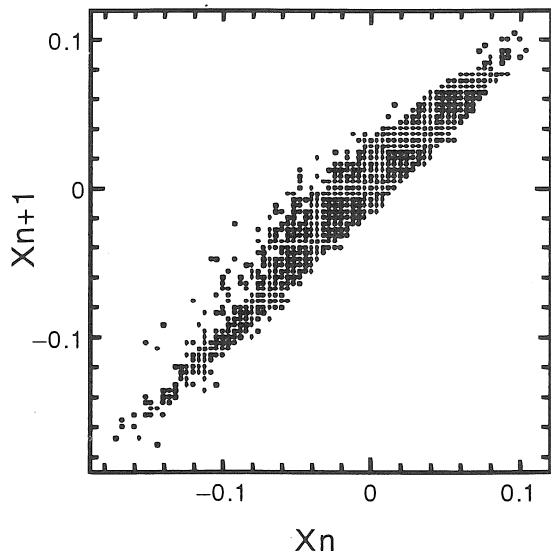


図4 Xn と Xn+1 の関係(ノイズ信号)

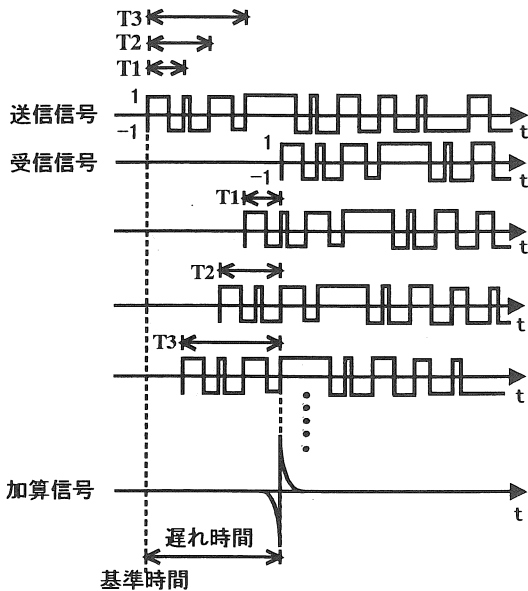


図5 測定原理(単体)

3.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5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 T1・T2・T3…となる。また、受信信号も±1に2値化し、送信信号で求めた T1・T2・T3…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。従って、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。

この原理を使用すると、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。

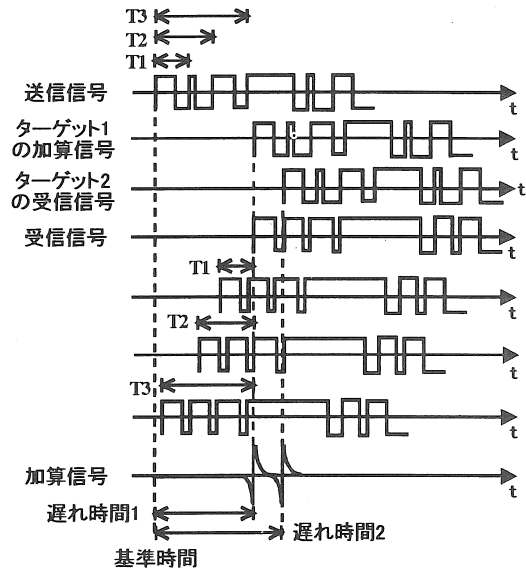


図6 測定原理(複数)

ターゲットが複数の場合の測定原理を図6に示す。送信信号はターゲットが単体の場合の測定原理と同様に処理する。一方、受信信号はすべてのターゲットの受信信号が合成されるので、この合成された受信信号を±1に2値化し、送信信号で求めた T1・T2・T3…だけ波形を進ませる。この移動した波形をすべて加算すると、加算信号の値がそれぞれの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。ただし、複数個のターゲットの遅れ時間の差が、加算信号における負から正へ急峻に変化する部分の過渡時間以上ある場合に限る。

4.測定システム

カオスレーザレーダの有効性を示し、測定原理の確認を行うために試作した実験装置を図7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。ターゲットは、車のテールランプの反射板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。

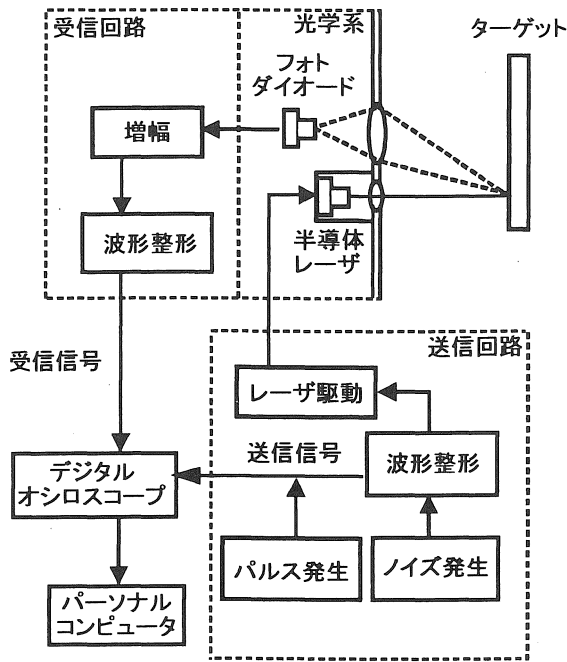


図 7 実験装置

### 4.1 光学系

光学系は投光部と受光部からなり、集光するレンズの面積をフルに使えるため複眼式を用いた。しかし、半導体レーザ(以下 LD)の照射方向と、フォトダイオード(以下 PD)の受光方向が一致しないため、至近距離において測定できない領域ができるという欠点がある。

投光部は、LD と直径 10mm、焦点距離 10mm の投光レンズから構成されており、直径 19mm、長さ 14.07mm 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、5m 程度の距離測定を行う為、レンズを用いて 5m 先にレーザ光を集光させた。

受光部は、PD と直径 30mm、焦点距離 30mm 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 25mm で、測定限界距離は 14cm である。

### 4.2 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、ノイズ信号は波形整形回路でパルス信号に整形した。また、パルス発生回路で生成されたパルス幅  $100\mu s$ ・周期 1ms のパルス信号は、このパルス幅の間に波形整形回路でパルス信号に整形されたノイズ信号を挿入し、デジタルオシロで観測する。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。

### 4.3 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為、初段には負帰還増幅回路を使用し、次段にはベース接地増幅回路を使用した。負帰還増幅回路では、出力電圧または電流を入力部に戻すことで自分自身の入力電圧または電流を見かけ上小さくして、回路全体の利得をコントロールし、また増幅率を減らしているため、通常増幅よりもノイズを減らすことができる。ベース接地増幅回路では周波数特性が良い特長をもつ。しかし出力インピーダンスが比較的高いので後段にエミッタフォロワを接続することによって、ベース接地増幅回路の周波数特性の良さを生かしている。その後、オペアンプを用いて更に増幅させ、デジタルオシロで観測する。そして、受信信号として PC に送り、測定原理に基づいて距離を測定した。

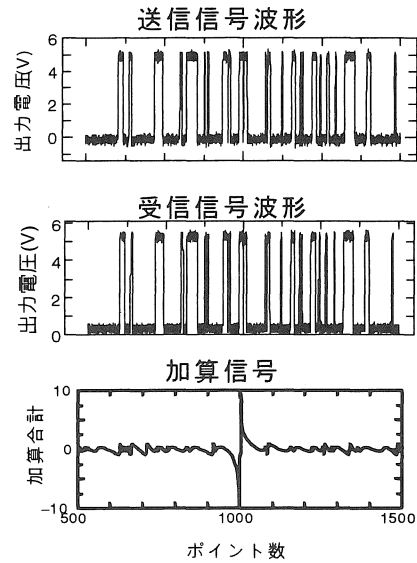


図 8 ノイズの影響がない波形

## 5. 測定結果及び検討

### 5.1 信号波形(送信信号、受信信号、加算信号)

実際に使用した送信信号と受信信号の波形と、これを測定原理に基づいて処理した加算信号波形について記す。

まずノイズの影響がない波形を図 8 に示す。送信信号波形についてはパルス波形が不規則になり、毎回異なった波形が発生し、受信信号波形は送信信号波形とほとんど同じである。これを測定原理に基づいて処理すると、加算信号は負から正に傾斜が急に变化する波形が得られ、そして 0 点を通る時間が遅れ時間となり、それ以外は限りなく 0 に収束していることが分かる。

次にノイズの影響がある波形を図9に示す。受信信号波形については戻り光がかなり小さくなり送信信号とは異なるが、ある程度似たような波形が発生する。また、この波形には、回路における遅れも含まれる。これを測定原理に基づいて処理すると、図8の加算信号の波形と比べてピークがやや小さくなるが、加算信号は負から正に傾斜が急に变化する波形が得られるため遅れ時間が分かる。

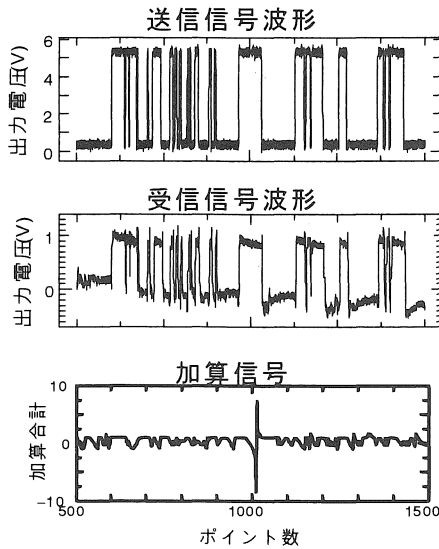


図9 ノイズの影響がある波形

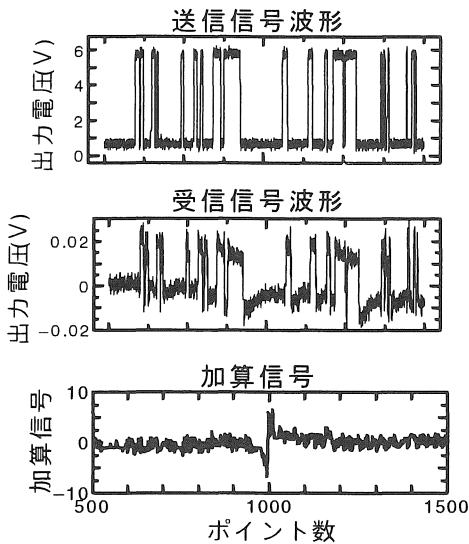


図10 ノイズの影響が大きい波形

最後にノイズの影響が大きい波形を図10に示す。受信信号波形については距離が遠くなったり、反射率が悪いものを使用した場合、信号がノイズに埋もれるので送信信号波形とかなり異なる。これを測定原理に基づいて処理すると、加算信号のピークは、図9の加算信号のピークよりもさらに小さくなるが、負から正に傾斜が急に变

化する波形が得られるため遅れ時間が分かる。またノイズが多いときにはパルス数を増やせばさらに遠距離まで測定できることが予想される。

### 5.2 距離測定結果

実験装置を用いて距離測定を行った実験結果を図11に示す。ターゲットはプラスチック製のコーナキューブ反射板を使用した。距離が遠ざかると、測定距離は実際の距離に対して比例的に増加する。またこの結果には回路の遅れが差し引いてある。誤差については1m付近では近すぎるために反射光がPDの受光面にうまく当たらなかったことが考えられ、また6m付近では戻り光が小さくなってノイズに埋もれてしまったことが考えられる。また2m~5mまでの小さな誤差についてはサンプリングレートの影響が考えられ、250MS/sで処理したため、0.60m程度の誤差が生じる。

以上のように、本測定原理から予想されるように、ノイズに埋もれた信号でも遅れ時間が明確に分かり、本測定原理が有効であることが確認できた。

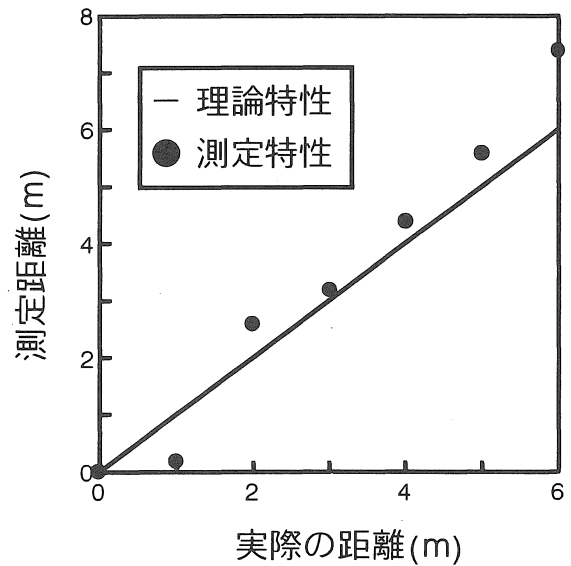


図11 測定結果

### 6.まとめ

本研究では、ノイズに埋もれても、ある程度測定できるように、非周期的な信号であるカオス信号で変調をかけ、加算処理のみで距離測定を行う新しいタイプのレーザレーダを提案し、カオスレーザレーダの有効性を示すために確認実験を行った。その結果、測定原理に基づいて処理できることが分かり、これによりカオスレーザレーダの有効性を示すことが出来た。また、ノイズの影響がある信号波形の場合はピーク値がやや小さくなるだけで、それ以外はノイズによって上下することが分かる。また測定結果では、近距離では反射光がPDの受光面に

うまく当たらなかったため誤差が生じ、5m 以上の測定では 5m 先に集光させたため、戻り光がノイズに埋もれてしまったことが考えられる。さらに 2m~5m までの小さな誤差については、サンプリングレートの影響が考えられ、250MS/s で処理したため 0.6m 程度の誤差が生じる。

今後は、80m 程度の距離測定が出来るように本格的な距離計を試作し、また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を用い、オンライン処理することである。

#### 参考文献

- 1) 桜庭一郎：レーザー工学, pp.10-11, 東京, 森北出版, 1998
- 2) 桜庭一郎：オプトエレクトロニクス入門, pp.126-129, 東京, 森北出版, 1997
- 3) レーザー学会：レーザー応用に関する 47 章, pp.102-106, 東京, オプトロニクス社, 1998
- 4) 長島弘幸・馬場良和：カオス入門 現象の解析と数理, pp.1-5, 東京, 培風館, 1993
- 5) 合原一幸：カオスセミナー, p.1 pp.31-37, 東京, 海文堂, 1994
- 6) F.R.コナー・広田修：ノイズ入門, pp.34-35, 東京, 森北出版, 1991

(受理 平成15年 3 月19日)