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

湊 淳*・伊多波正徳*
若狭雅哉*・小澤 哲*

Fundamental Experiment of Ranging Using Chaotically Modulated Laser Diode

Atsushi MINATO*, Masanori ITABA*,
Masaya WAKASA* and Satoru OZAWA*

We proposed a new laser ranging technique using the correlation of chaotic modulation in the previous paper. In this paper we have described the preliminary experiment for ranging using a chaotically modulated laser diode. Chaotic signal was produced by R, L and diode circuit. A visible laser diode was modulated by this signal. Chaotically modulated laser was divided by a beam splitter. One beam was directly detected and the other one was detected via an optical fiber having effective length of 50 m. We can measure the delay of beam by taking the correlation of two detected signals. When the modulation of signal was 2 MHz, error in the round-trip path length was 0.6 m in one measurement.

Key Words: chaos, laser ranging, laser remote sensing, laser diode, modulation, correlation

1. はじめに

Haken のレーザカオスに関する研究以来、多くのレーザにおいて様々なカオス発振の研究が行われている^{1)~9)}。これらの研究のほとんどは、カオスの物理的な振る舞いの解明を目的としたものである。カオス発振レーザの計測などの工学的応用に関する研究はほとんど見あたらない。様々な要因で発生するレーザのカオス発振は、一般的に制御し除去すべき対象となっている。たとえば半導体レーザの場合、戻り光により発振がカオス的に振動する現象が知られている²⁾。

筆者らはカオス的に変調されたレーザ光を用いたレーザ遠隔計測手法を提案した¹⁰⁾。カオス変調したレーザ光を測定対象となる光路を伝搬させ、検出器により電気信号に変換し記録する。カオス変調したレーザ光のパワーモニタ光も同時に記録する。カオス信号の自己相関がデルタ関数に近い性質を利用すると、パワーモニタ信号と受信信号の相関関数は、パルス光を光源としたレーザ距離計の受信信号に相当する応答関数となる。実際に数値実験による基礎的な評価を行い、Lorenz のストレンジアトラクタをカオス変調として用いた場合に、雑音が信号と同程度の強度であっても、相関関数を取ることで受信信号の同定が可能であることを示した¹⁰⁾。

カオス変調レーザを用いた遠隔計測手法の開発によって、従来であれば雑音が多く実用に耐えられないと判断されていたレーザが利用できる可能性がある。また、振動や熱変化などの状況で安定してカオス発振するレーザが存在すれば、耐環境性に優れた計測システムを実現できる可能性もある。

一方、電気回路によるカオス信号の発生が、様々な方法で実現されている^{11)~15)}。たとえば抵抗、コイル、ダイオードを直列に接続し、交流電圧を加えると、素子の端子間の電圧が特定の条件においてカオス的に発振する¹¹⁾。この現象はダイオードの非線形性によるものである。

本研究では、カオス変調レーザを用いた遠隔計測手法の開発を目指し、カオス変調レーザ光による測距の基礎実験を行った。一般にレーザ測距は、短パルスレーザの往復時間を測定する方法と、周期的に変調したレーザ光を用いる方法とがある^{16), 17)}。前者は主に長距離のレーザ測距に、後者は中、短距離のレーザ距離計として用いられる。

測量などに用いられるレーザ距離計では、送信光を周期的に強度変調し、送信光と受信光との位相差が求められる。この場合レーザ光の往復時間のうち変調周期の整数倍が未知数として残る。そのため複数の変調周波数を用いて距離を求めている¹⁷⁾。これに対して、カオス信号は自己相関がデルタ関数的であるため、カオス信号でレーザを変調した場合には、1種類の変調信号で距離の導出が可能である。また、本手法と同様に変調信号と受信信号の相関を利用したレーザレーダ手法として、疑似雑音コードで変調したレーザレーダ手法が提案されている^{18)~21)}。

* 茨城大学大学院理工学研究科 日立市中成沢 4-12-1

* Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi
(Received March 28, 2000)
(Revised August 28, 2000)

本論文では、光ファイバを光路としたカオス変調レーザ光による測距の室内実験を行った。レーザ光源には、電気的なカオス信号によってレーザダイオードを変調する方法を採用した。次章では、カオス変調を用いたレーザ測距の原理について説明し、第3章において実験の方法と結果について述べる。

2. カオス変調を用いたレーザ測距

Fig. 1にカオス変調を用いたレーザ測距の概念図を示す。カオス変調されたレーザ光は、大気中を伝播し、建物やリフレクタによって後方に散乱または反射される。望遠鏡により集光されたレーザ光は、検出器により電気信号に変換される。受信信号とカオス変調されたレーザ光のパワーモニタ信号は、2チャンネルのデジタルオシロスコープによりA/D変換され、コンピュータに記録される。

デジタルオシロスコープのチャンネル1に、レーザ光のパワーモニタ信号(カオス変調信号)が記録され、チャンネル2に、受信信号が記録されるものとする。チャンネル1のカオス信号を $f_1(t)$ とすれば、チャンネル2の信号 $f_2(t)$ は次式で与えられる。

$$f_2(t) = Af_1\left(t - \frac{2R}{c}\right) \quad (1)$$

ここに、 A は送信レーザ光の総合的な受信効率を示す定数で、 R は反射体までの距離、 c は光速である。両者の相関関数を次式で定義する。

$$F(T) = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} f_1(t)f_2(t+T)dt \quad (2)$$

ここに、 T_0 は積分を行う時間幅である。カオス信号 $f_1(t)$ は自己相関がデルタ関数に近い性質を持つため、相関関数 $F(T)$ は $T=2R/c$ でピークを持つ関数となる。相関関数のピークを求めることにより対象物までの距離を求めることができる。

実際には、 $f_1(t)$ と $f_2(t)$ を測定する際に雑音が含まれる。数値実験による評価では、信号と雑音がほぼ同レベルであっても距離の導出が可能であるという結果が得られている¹⁰⁾。

Fig. 1 Concept of laser ranging using chaotically modulated laser

3. 基礎実験

カオス変調のレーザダイオードを用いて、光ファイバの光路における測距の検証実験を行った。

本論文では、カオス変調レーザ光源として、電気的なカオス信号で半導体レーザを直接変調する方法を採用した。この方法は、簡単に再現性が高いカオス変調光が得られる。Fig. 2に電気的なカオス信号により半導体レーザを駆動する回路図を示す。抵抗、コイル、ダイオードからなる回路に交流電圧を加えると、ある条件において、端子間の電圧がカオス的になる^{11)~15)}。ダイオードの内部容量は電圧に依存して変化する。このダイオードの内部容量の非線形性により、カオス信号が得られる。

回路に加える正弦波の電圧、周波数を変えていったものがFig. 3である。横軸が外部電圧、縦軸がダイオードの端子電圧である。Fig. 3(a)の1本のトレースで表される状態から、Fig. 3(b)の2つの成分を含む分岐、Fig. 3(c)の4つの成分を含む分岐を経て、Fig. 3(d)のカオス的な状態になる。

Fig. 3(d)のカオス的な状態で、回路に加えられる交流信号とダイオードの端子間電圧を表示したものがFig. 4である。

カオス的な状態では、パルスの同期は外部の変調信号と合っているが、パルスの強度が毎回ランダムに変化している。ダイオードにレーザダイオードを直接接続すると回路の特性が変化してカオス的な振動でなくなってしまう。そこでFig. 2に示すように、ダイオードに高入力インピーダンスのボルテージフォロワを接続し、ボルテージフォロワの出力でレーザダイオードを駆動した。使用した抵抗は200Ω、コイルは100μH、ダイオードは1N4001(General Semiconductor)、ボルテージフォロワに用いたオペアンプはAD826(Analog Devices)、レーザダイオードは中心波長635nmのDL-3038-011(Sanyo)である。実験では、外部の変調信号を2MHz、10Vの正弦波として、カオス信号を発生させた。Fig. 5に示すように、光ファイバを用いて、測距の基礎実験を行った。カオス変調するレーザ光をビームスプリッタで二つに分け、一つは直接アバランシェフォトダイオードAPS-R216V(松定

Fig. 2 Configuration of circuit. A series circuit of R, L, and diode generates chaotic signal. A voltage follower drives visible laser diode

Fig. 3 Phase of input and output signal. X-axis corresponds to input on the series circuit. Y-axis corresponds to output on the diode. (a) normal response, (b) Period-two bifurcation, (c) Period-four bifurcation, (d) Chaotic state

Fig. 4 Input and output signals as a function of time in the chaotic state. Upper trace and lower trace correspond to input and output signals for R, L, and diode circuit

Fig. 5 Configuration of experiment. Chaotic laser beam is divided by beam splitter. One beam is delayed by an optical fiber and detected by APD

プレジジョン)で検出した.もう一方のビームはプラスチック光ファイバを通して検出した.光ファイバの実効的な長さは約50mである.受信信号とパワーモニタ信号の例をFig. 6に示す.図においてCh2が光ファイバを通った信号で,Ch1がパワーモニタ信号である.使用したデジタルオシロスコープはHP 54615 B (Hewlett Packard)で,400 MS/sの時間分解能で測定を行った.

Fig. 6の受信信号とパワーモニタ信号の相関関数を求めた例をFig. 7に示す.ピークの位置がチャンネル1と2の信号の遅延時間すなわち光路長に相当する.同一条件で複数回の測定を行い,得られた遅延時間の標準偏差は4 nsであった.距離の精度に換算すると1.2 mに相当し,往復の光路で距離を測った場合の精度は0.6 mとなる.

A/D変換され記録されるパワーモニタ信号 $f_1(t)$ と受信信号 $f_2(t)$ は,以下のように表すことができる.

$$f_1(t_i) = f(\Delta t i) + \varepsilon_{1i} \quad (3)$$

$$f_2(t_i) = f\left(\Delta t i - \frac{2R}{c}\right) + \varepsilon_{2i} \quad (4)$$

ここに Δt はA/D変換のサンプリングの時間間隔, ε_{1i} と ε_{2i} は雑音成分である. $f_2(t_i)$ は,式(1)のように受信効率 A が含まれるが,ここでは測定時間内において A が一定と見なして省いている.このとき相関関数は次式で表すことができる.

$$\begin{aligned} F(\Delta t k) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_1(t_i) f_2(t_i + \Delta t k) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(\Delta t i) f\left(\Delta t i + \Delta t k - \frac{2R}{c}\right) \end{aligned}$$

Fig. 6 Received laser powers. Upper trace (Ch 2) corresponds to delayed signal via an optical fiber. Lower trace (Ch 1) corresponds to monitored signal. Configuration of experiment. Chaotic laser beam is divided by beam splitter. One beam is delayed by an optical fiber and detected by APD

Fig. 7 Correlation function between channel 1 and channel 2 in Fig. 6

$$+ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(\Delta t i) \varepsilon_{2i} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(\Delta t i + \Delta t k - \frac{2R}{c}) \varepsilon_{1i} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{1i} \varepsilon_{2i} \quad (5)$$

ここで $\Delta t k$ は式(2)の T に相当する。上の式で第一項は雑音を含まない受信信号とパワーモニタ信号の相関関数である。第二項および第三項は受信信号およびパワーモニタ信号と雑音との相関関数である。第四項は両チャンネルの雑音同士の相関関数である。第二項から第四項までが誤差に寄与する。距離の精度は、第一項の相関関数の形状と、第二項から第四項までの大きさによって決まるものと考えられる。また、A/D変換の時間分解能や測定時間も距離の精度に影響を与える。

4. ま と め

本論文では筆者らが提案した手法であるカオス変調のレーザ光によるレーザ測距手法の基礎実験を行った。レーザ光源としては、電気的なカオス信号によってレーザダイオードを変調する方法を採用した。R+L+ダイオード、アンプ、レーザダイオードという非常に簡単な構成によって、レーザ測距の実験を行うことができた。2 MHzの外部変調を用いた場合、往復光路の測距の精度として0.6 mという値が得られた。

実際の測定システムの設計の際には、希望する距離分解能や距離の範囲に合わせて、カオス変調の周波数、記録するワード数、サンプリング速度を最適化する必要がある。

今回は光ファイバを用いた室内実験であったので、比較的信号対雑音比の高い測定であった。今後は屋外光路において、同様の測定を行う予定である。

測距の精度は、変調信号の周波数に大きく依存する。このため距離の精度を上げ実用的なシステムを開発するためには、高い周波数のカオス変調レーザ光源が不可欠である。今回の実験では、手法の検証として、比較的簡単で再現性の高い電気回路のカオスによる変調を採用した。電気回路のカオス信号の場合、ダイオードの内部容量などで周波数が決まってしまうので、一般に数 MHz 程度の変調周波数が限度である。今後はさらに高い周波数で安定したカオス変調のレーザ光源を用いて、実用化に向けた実験を行っていきたい。

謝辞 本研究の一部は、文部省科学研究費補助金奨励研究(A)(11750358)の援助を受けて遂行されました。ここに記して感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) H. Haken: Analogy Between Higher Instabilities in Fluids and Lasers, Phys. Lett. A 53, 77/78 (1975)
- 2) T. Mukai and K. Otsuka: New Route to Optical Chaos: Successive-subharmonic-oscillation Cascade in a Semiconductor Laser Coupled to an External Cavity, Phys. Rev. Lett. 55, 1711/1714 (1985)
- 3) M. Tachikawa, F. Hong, K. Tanii and T. Shimizu: Deterministic Chaos in Passive Q-switching Pulsation of a CO Laser with Saturable Absorber, Phys. Rev. Lett. 60, 2266/2268 (1988)
- 4) 立川真樹: レーザー発振における不安定性とカオス, 応用物理 36, 1722/1730 (1989)
- 5) C. O. Weiss, N. B. Abraham and U. Hubner: Homoclinic and Heteroclinic Chaos in a Single Mode Laser, Phys. Rev. Lett. 61, 1587/1590 (1987)
- 6) T. Ogawa: Quasiperiodic Instability and Chaos in the Bad-cavity Laser with Modulated Inversion: Numerical Analysis of a Toda Oscillator System, Phys. Rev. A 37, 4286/4302 (1988)
- 7) M. Tachikawa, F. L. Hong, K. Tanii and T. Shimizu: Deterministic Chaos in Passive Q-Switched Pulsation of a CO₂ Laser with Saturable Absorber, Phys. Rev. Lett., 60, 2266/2268 (1988)
- 8) Y. Cho and T. Umeda: Observation of Chaos in a Semiconductor Laser with Delayed Feedback, Opt. Comm. 59, 131/

- 136 (1986)
- 9) R. Roy, T.W. Murphy, Jr., T.D. Maier and Z. Gills: Dynamical Control of a Chaotic Laser: Experimental Stabilization of a Globally Coupled System, Phys. Rev. Lett., 68, 1259/1262 (1992)
- 10) 湊淳: カオス変調を用いたレーザ遠隔計測手法の提案, 計測自動制御学会論文集 34-10, 1316/1320 (1998)
- 11) P. S. Linsay: Period doubling and chaotic behavior in a driven anharmonic oscillator, Phys. Rev. Lett. 47, 1349/1352 (1981)
- 12) T. Matsumoto, L. O. Chua and S. Tanaka: Simplest Chaotic Nonautonomous Circuit, Phys. Rev. A 30, 1155/1157 (1984)
- 13) M. J. Hasler: Electrical Circuit with Chaotic Behavior, Proc. of the IEEE 75, 1009/1021 (1987)
- 14) T. Matsumoto: Chaos in Electronic Circuit, Proc. of the IEEE 75, 1033/1057 (1987)
- 15) A. Cumming and P. S. Linsay: Quasiperiodicity and Chaos in a System with Three Competing Frequencies, Phys. Rev. Lett. 60, 2719/2722 (1988)
- 16) レーザー学会編: レーザーハンドブック, オーム社, Chap. 27 (1982)
- 17) 藤村貞夫: 光計測の基礎, 森北出版, Chap. 2. (1993)
- 18) N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba and K. Sakurai: Random Modulation CW Lidar, Appl. Opt. 22, 1382/1386 (1983)
- 19) N. Takeuchi, H. Baba, K. Sakurai and T. Ueno: Diode-Laser Random-Modulation CW Lidar, Appl. Opt. 25, 63/67 (1986)
- 20) 竹内, 馬場, 桜井, 上野: 半導体レーザを光源とする疑似ランダム変調 CW ライダー, 応用物理 56, 1630/1636 (1987)
- 21) C. Nagasawa, M. Abo, H. Yamamoto and O. Uchino: Random Modulation CW Lidar Using New Random Sequence, Appl. Opt. 29, 1466/1470 (1990)

[著者紹介]

湊

淳 (正会員)

1984年京都大学理学部(地球物理)卒業。日立工機(株)勤務の後、88年東京大学大学院物理学専攻修士課程修了。博士(工学)。国立環境研究所に勤務の後、現在茨城大学大学院理工学研究科情報・システム科学専攻助教授。レーザ計測手法、数理感性工学などの研究を行っている。

伊多波正徳

2000年茨城大学大学院理工学研究科博士前期課程機械工学専攻修了。現在茨城大学工学部共通講座応用物理文部技官。計算機シミュレーション、特にFDTD法による光ソリトンの研究に従事している。応用物理学会の会員。

若狭雅哉

1999年茨城大学工学部機械工学科卒業。現在茨城大学大学院理工学研究科博士前期課程機械工学専攻在籍中。数理感性工学などの研究に従事している。

小澤 哲

昭和52年東京教育大学大学院理学研究科博士課程修了。平成4年茨城大学工学部教授。平成10年茨城大学大学院理工学研究科情報システム科学専攻教授。茨城大学総合情報処理センター長。非平衡物理系の計算機シミュレーション、感性情報処理などの研究に従事。日本物理学会、形の科学会、日本感性工学会の会員。