

# FPGA を用いたカオスレーザレーダの オンライン処理に関する研究

## Study on on-line processing of the chaos laser radar using FPGA

中川 達也<sup>†</sup> , 津田 紀生<sup>††</sup> , 山田 諄<sup>††</sup>

Tatsuya NAKAGAWA , Norio TSUDA , Jun YAMADA

**Abstract** Today, a car industry puts effort into making intelligent car to realize a safe and comfortable car society. As one of the sensing technology, laser radar is widely studied as in-car radar. The received signal in the laser radar becomes to be buried in noise with increasing distance. When the long distance is measured, it needs a high power laser, or the repetitive process that uses multiplication and integration. Therefore, a new type of the chaos laser radar has been studied. This laser radar is relatively resistant to noise and can simply process because of using only additional process. But, the chaos laser radar has been off-line processing thus far. Then using FPGA in the signal processing, the on-line measurement system is developed.

### 1. はじめに

近年、自動車業界が様々な技術を利用して自動車のインテリジェント化を進めている。これは高度道路交通システム(ITS: Intelligent Transport System)によって、安全で快適な車社会を実現する目的で行われている。このインテリジェント化を進める上で、核となる技術が車両周辺のセンシング技術であり、研究が広く行われている。このセンシング技術としてレーダシステムがあり、ミリ波、超音波、レーザなどを用いたものがある。

ミリ波を用いたものは全天候下で安定した長距離計測が可能だが、他のものと比べて装置が大型で、空間分解能が低いという欠点がある。超音波を用いたものは検出距離が短いため、低速車での周辺監視装置としての応用が主流である。レーザを用いたものは、自動車のテールランプの反射板に向けてレーザ光を照射し、その反射光の遅れ時間を求める。このように、様々なレーダの研究が行われており、車載用レーダとしてレーザレーダが多く研究されている。

これまでのレーザレーダ方式としては、周期的な信号で変調をかける方式と、単一パルスを用いて遅れ時間を求める方式が一般的である。しかし、これらは距離が遠くなると戻り光が小さくなり、信号がノイズに

埋もれてしまう。このため乗算と積分を用いた繰り返し処理といった複雑な処理を行うか、高い出力のレーザを必要とする。また、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が、これらの相関を取る方式では、受信信号を一時的にメモリした上、距離分解能に応じた間隔で乗算と積分を繰り返さなくてはならないので、処理が複雑で時間がかかる。

そこで、低出力の半導体レーザを用いて、比較的ノイズに対して強く、加算処理のみで遅れ時間を求めることができるカオスレーザレーダの研究を行ってきた<sup>2)</sup>。これはカオス信号で変調をかけ、ターゲットから戻ってきた受信信号を進ませ、加算を行う簡単な信号処理で遅れ時間を求める方式である。この方式は加算のみで遅れ時間を求めるので、乗算と積分を用いて繰り返し処理を行う方式に比べて、処理時間が早くなる利点を持つ。また、非周期的なカオス信号を用いる為、ある程度ノイズに対して強く、混信に対しても強い。

これまでの研究では<sup>3)</sup>、平均出力 1mW 以下の半導体レーザを用いて 80m 程度の距離計測が可能であるが、信号処理にパソコンを用いてオフラインで行っているため、実時間で計測を行うことが出来ない。

そこで、FPGA を用いた信号処理システムを製作し、オンライン処理の方法について研究を行った。このカオスレーザレーダでは、受信信号を進めてから加算をするためオフラインでは簡単に処理できるが、オンラインでは困難と思われた。しかし、信号をシフトレジスタでクロックに同期して進ませながら、同時に加算を行う方法

<sup>†</sup> 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)

<sup>††</sup> 愛知工業大学 電気学科 電子工学専攻 (豊田市)

を新たに考案し、オンラインシステムの開発を行った。

### 2. カオスについて

カオスレーザレーダは信号源にカオスを用いるが<sup>3)</sup>、これまではツェナーダイオードのショットノイズを信号源として用いていた。しかしこれでは、FPGA を用いて信号処理を行う上で送信信号がクロックに同期しないため、誤差の原因となってしまう。

そこで、FPGA 内でカオス信号の生成を行う事で、送信信号をクロックに同期して出力させることにした。本研究では、LFSR を用いて信号の生成を行った。LFSR(Linear Feedback Shift Register)とは、線形帰還シフトレジスタの略称で、シフトレジスタを用いて帰還をかけることで疑似乱数を生成することが出来る。本研究では、8 ビットの LFSR を用いて信号の生成を行った。LFSR で生成した不規則数列を図 1 に、ロジスティック写像を図 2 に示す。図 1 のように一見すると不規則な変化をしているが、図 2 のロジスティック写像を見ると右上がりの関係を示している。この形はベルヌーイシフトといい、カオスの基本操作である引き延ばしと折り畳みを有しており、カオス的な振る舞いを示している<sup>4)</sup>。この事から、LFSR において生成した信号はカオスの要素を含んでいる事が確認できた。なお本研究では、この信号を 2 値化したものを送信信号として使用している。

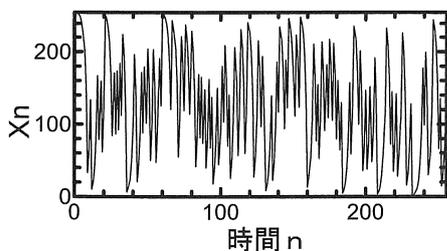


図 1 LFSR で生成した不規則数列

### 3. 測定原理

カオスの特性を利用した測定原理を図 3 に示す。送信信号は±1 に 2 値化を行い、最初の立ち上がりの時間を基準時間とする。そして、基準時間以降との時間差 T1・T2・T3…を求める。また、受信信号も 2 値化を行い、送信信号で求めた時間差 T1・T2・T3…だけ受信信号を進ませ、移動させた受信信号をすべて加算する。すると、遅れ時間となる所で、加算信号の値が負から正に急に变化するゼロクロス点を持つ波形が得られる。それ以外の所では、受信信号は不規則に負または正になるので、加算信号は限りなく 0 に収束する。この加算信号の最大ピ

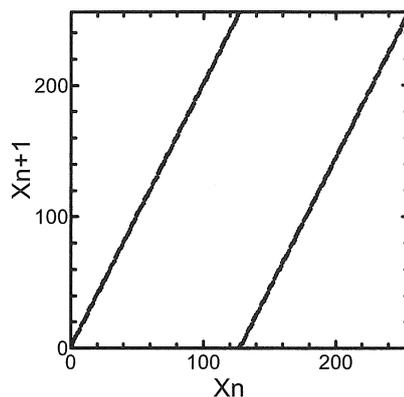


図 2 LFSR で生成した信号のロジスティック写像

ークとなるゼロクロス点と基準時間との時間差が、送信信号との遅れ時間を示すので、これに光速を乗算する事でターゲットまでの距離を測定する事が出来る。この原理を利用すると、処理が加算のみであるので、従来の乗算や積分を用いた方式よりも高速に処理が出来る。また、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た場合でも、加算信号の最大ピーク値が減少するだけで位置は変化しないので、ノイズによる影響を受けにくい。

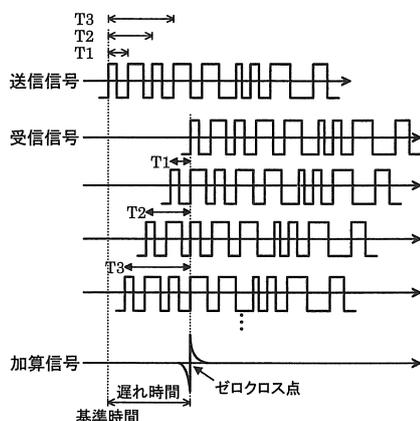


図 3 測定原理

### 4. 測定システム

オンラインで計測を行うために試作した測定システムを図 4 に示す。本装置は、光学系、投光回路、受光回路、処理系から構成される。ターゲットには、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(幅 5cm、長さ 97cm)を使用した。

#### 4.1 光学系

光学系は、投光部と受光部からなる複眼式を用いた。この方式は、レンズの面積をフルに活用できる利点があるが、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存在するという欠点がある。

投光部は、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 を用いて、発振波長 780nm、平均出力 1mW 以下で使用した。本研究では、長距離の計測を行うため、レーザ光を平行ビームにして照射した。

受光部は、フォトダイオード(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 を使用した。受光面は 3.7mm 角であるが、水平方向を広く取るために 45° 傾けて使用した。

なお、投光、受光レンズ間距離は 46mm、測定限界距離は 69cm である。

光学系は縦 160mm×横 200mm×高さ 80mm のボックスに、受光回路は縦 100mm×横 150mm×高さ 50mm のボックスに、投光回路と処理系の電圧レベル変換回路は、縦 70mm×横 100mm×高さ 30mm のボックスに個々に収めた。

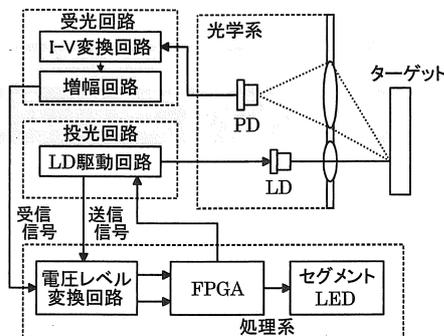


図4 測定装置

#### 4.2 投光回路

投光回路は、LD を発振させるための LD 駆動回路で構成される。LD 駆動回路は、LD の光出力が一定になるように供給電流を制御し、この供給電流を外部から吸い取ることで変調をかけ、LD を発振させている。供給電流の制御には、LT022PD0 の専用 IC である IR3C07 を使用した。また、送信信号を処理部の電圧レベル変換回路へと出力している。

#### 4.3 受光回路

受光回路は、PD の電流変化を電圧変化へ変換する I-V 変換回路と、受信信号を増幅するための増幅回路で構成される。I-V 変換回路には BURR-BROWN 社製のオペアンプである OPA655 を用い、10k $\Omega$  の帰還抵抗を用いて電圧に変換を行っている。この I-V 変換回路で検出される信号は、長距離の場合 1mV 程度と微弱であるため、初段にオペアンプを用いた反転増幅回路を用いて増幅を行い、更にカスコード回路を用いて増幅を行った。増幅回路全体での増幅度は 80dB である。なお、増幅回路の周波数帯域は、オペアンプを用いた反転増幅回路では高域カットオフ周波数が 16MHz 以上、カスコード回路では高域カットオフ周波数が 10MHz 程度である。

#### 4.4 処理系

処理系は、電圧レベル変換回路、FPGA、セグメント LED で構成される。電圧レベル変換回路では、5V 程度の送信、受信信号の振幅を FPGA に入力可能な電圧振幅である 3.3V に変換を行う回路である。この回路から出力された信号を FPGA へと入力し、信号処理を行い、距離を算出する。なお、本研究では FPGA に Xilinx 社製の Spartan II (XC2S100) を使用した。このデバイスの詳細を表 1 に示す。このデバイスを、HUMAN DATA 社製の評価ボードに実装し、クロック周波数を 80MHz に設定して使用した。なお、今回のプログラムによるデバイスの使用率は 80% 程度である。その後、算出された距離をセグメント LED によって表示するが、セグメント LED を表示させるために、ドライバ IC である 74LS47 を使用した。

表 1 FPGA デバイスの詳細

XC2S100の詳細						
ロジックセル数	総ゲート数	CLB Array	全CLBs	総I/Oピン数	全ブロックRAM数	全ブロックRAMビット数
2,700	100,000	20X30	600	92	10	40,960

### 5. FPGA での処理

本研究では FPGA を用いて信号処理を行っているが、処理は送信側と受信側の 2 つに分けられる。なお、プログラム設計には、Xilinx 社の ISE WebPack を用いて、VHDL 言語で設計した。

#### 5.1 送信側での処理

送信側では、カオス信号の生成を行っており、図 5 のような LFSR (Linear Feedback Shift Register) を用いて信号の生成を行っている。LFSR とは線形帰還シフトレジスタの略称で、EX-OR で帰還をかけたシフトレジスタ

タで構成される。本研究では、8 ビットの LFSR を用いてランダムな信号を発生させている。なお、フィードバックの値  $D_0$  は式(1)のように設定した。このシフトレジスタの最上位ビットを出力としている。なお、この出力はカオス信号を 2 値化したものである。また、80MHz のクロックを 12 分周したものをクロック信号として使用している。これは、クロックをそのまま用いると出力された信号の周波数が高すぎるためである。なお、送信信号の平均周波数は 2MHz 程度である。

$$D_0 = Q(7) \text{ xor } Q(3) \text{ xor } Q(2) \text{ xor } Q(1) \dots\dots(1)$$

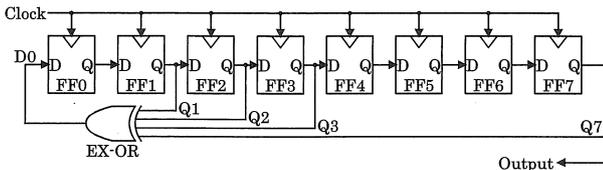


図 5 LFSR の構成

5.2 受信側での処理

受信側では、測定原理に基づいた信号処理を行い、距離を算出している。受信側の処理の模式図を図 6 に示す。本方式ではメモリなどを用いて信号をストックすることなく、実時間で信号処理を、シフトレジスタでの移動と同時にカウンタで加算を行う新しい方式で実現している。まず、送信信号を 80 ビットシフトレジスタでクロックに同期して左シフトさせ、送信信号の下位 2 ビットから送信信号の立ち上がりを検出し、CE(Counter Enable)を出力する。同時に受信信号も 80 ビットシフトレジスタで左シフトさせ、CE が High の時に加算を行う。こうして加算を行っていき、最大値となったカウンタをコンパレータで検出する。この最大値となったカウンタが遅れ時間を示すので、これに光速とクロック周期を掛けることでターゲットまでの距離を算出する。また、算

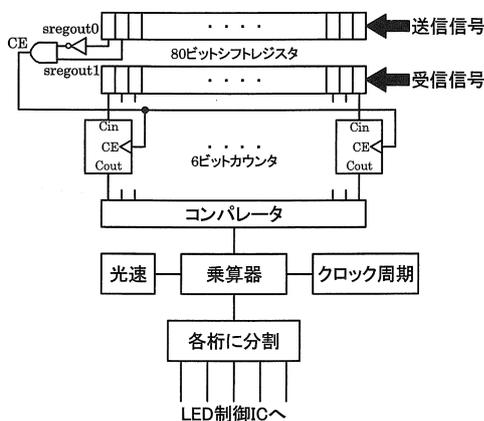


図 6 受信側の構成

出した結果をセグメント LED によって表示するので、各桁の値に分割してそれぞれ出力している。

以上の処理を測定原理と比較すると、シフトレジスタでクロックに同期して移動すると同時に CE を出力するのは、測定原理において立ち上がりの検出と時間差ごとの移動に相当する。また、カウンタでの加算処理は、測定原理においての加算処理に相当する。そして、コンパレータで最大値となるカウンタを検出するのは、測定原理においての加算信号の最大値となる時刻を検出するのに相当する。

これらのことから、シフトレジスタ、カウンタ、コンパレータを用いた簡単な処理を FPGA で行う事で、複雑な処理で相関をとることなく遅れ時間を実時間で算出することが出来る。

5.3 シミュレーション結果

送信、受信側のシミュレーション結果について示す。シミュレーションには、Model Technology 社製の Modelsim を用いた。図 7 は送信側、図 8 は受信側の結果を示している。

まずは送信側の結果について確認する。図 7 において、Clock はクロック信号を、s\_out は出力信号を示す。結果から、Clock に同期して s\_out が出力されている。また、s\_out はランダムなパルス幅を示している。このことから、LFSR を用いて信号の生成が行えていることが確認できた。



図 7 送信側シミュレーション結果

続いて、受信側の結果について確認する。図 8 において、Clock はクロック信号、Send は送信信号、Receive は受信信号、dataout\_a~dataout\_e は LED の制御信号であり、それぞれ 4 ビットの信号である。dataout\_a が小数点以下の桁を表し、dataout\_b~dataout\_e は下 1 桁目から順に表す。なお、本来ならば 80 ビットシフトレジスタと 6 ビットカウンタを用いているが、ここではわかりやすくするために 6 ビットシフトレジスタと 3 ビットカウンタを用いた。送信信号に対して受信信号は 4 クロック遅れているので、7.6m と表示されるはずである。結果を見ると、dataout\_a が"0110"と出力され 6 を、dataout\_b が"0111"と出力され 7 を示している。よって結果は 7.6m と表示され、受信側の処理が正しく行われていることが確認できた。

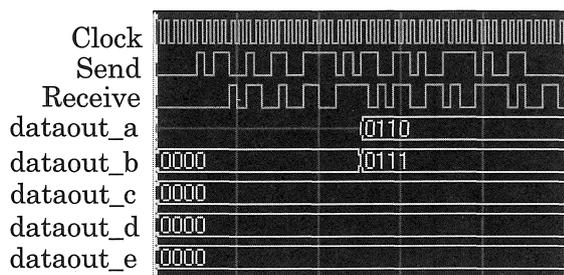


図 8 受信側シミュレーション結果

## 6. 測定結果および検討

### 6.1 加算回数による影響

本測定原理では、加算回数が増加すればノイズに対する耐性も向上する。そこで、加算信号の最大ピークとノイズによるピークを比較することで、加算回数の影響を調べることが出来るが、FPGA 内で行っているため、加算信号波形を確認することが出来ない。そこで、加算回数をパラメータとして、距離に対する LED 表示の誤り回数の変化を確認した。各距離に対する表示誤り回数の結果を図 9 に示す。これは 40 回の表示の間に、何回表示誤りがあるかをグラフ化したものである。図 5 より、距離が遠くなると戻り光が小さくなり、信号がノイズに影響を受けるので、表示誤り回数が増加している。しかし、加算回数が増加するに従って、表示誤り回数が減少しているのが確認できる。このことから、加算回数が多いほどノイズによる影響を改善できている。また、加算回数を 63 個とすると、表示誤り回数が 95m まで 0 回であったので、以降の測定では加算回数を 63 個として処理を行っている。

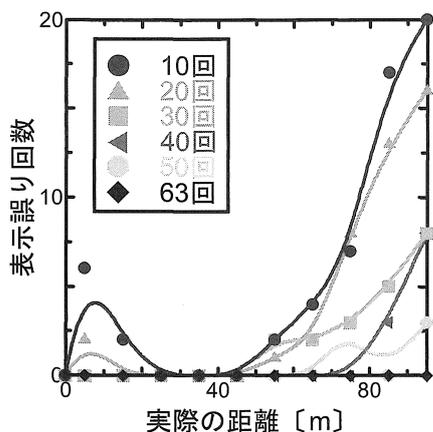


図 9 加算回数による表示誤り回数の変化

### 6.2 各距離における信号波形

距離 10m の時の信号波形を図 10 に示す。送信信号にはカオス信号を 2 値化したものを用いているので、パル

ス波形が不規則となっている。また、送信信号に対して受信信号が時間的に遅れていることが確認できる。また、ターゲットの位置が近いいため戻り光が強く、受信信号が送信信号とほぼ同様の波形を示している。

続いて、距離 95m の時の信号波形を図 11 に示す。距離 10m の場合に比べて、送信信号に対して受信信号が更に遅れていることが確認できる。これは、ターゲットの位置が遠くなったためである。また、受信信号が送信信号に対して崩れていることが確認できる。これは、距離が遠くなったため戻り光が小さくなり、信号がノイズの影響を受けたためである。

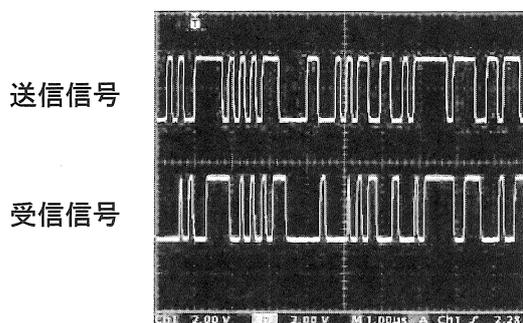


図 10 近距離(10m)における信号波形

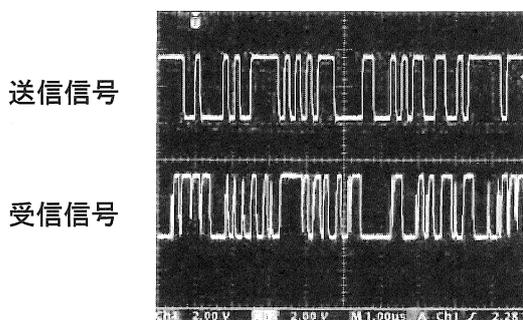


図 11 長距離(95m)における信号波形

### 6.3 距離測定

試作した測定装置を用いて距離計測を行った結果を図 12 に示す。この結果は、1 つの距離に対して 20 回測定し、その平均値から算出した。また、回路中の遅れ時間が含まれるので、差し引いてグラフ化してある。結果を見ると、測定値が実際の距離に対して比例的に増加し、95m まで計測が出来た。しかし、50m 以下の近距離において、測定値が実際の距離よりも高い値を示している。これはレーザパワーが一定であるため、近距離では戻り光が強すぎて受信信号が飽和したためと考えられる。また、90m 付近の遠距離において誤差が生じているが、これは戻り光が小さくなり、受信信号がノイズの影響を受けたためと考えられる。また、全体で 5.71m 程度の平均

絶対誤差が発生しているが、近距離での受信信号の飽和を解消すれば、誤差は更に低くなると思われる。なお、今回の測定は研究室前の廊下を用いて行ったが、廊下の長さが 95m のため、これ以上の距離計測を行うことが出来なかった。よって、今後はどの程度まで計測が行えるのかを確認する必要がある。

以上のことから、平均出力 1mW 以下と低出力の半導体レーザを用いても、95m と長距離の計測をオンラインで行えることが確認できた。

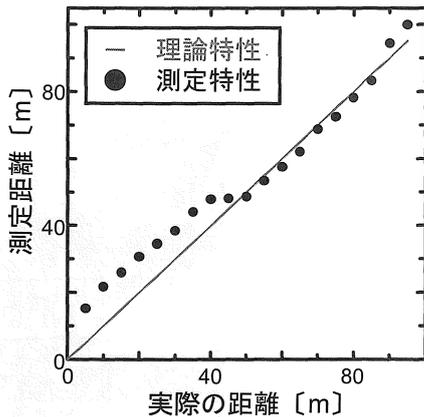


図 12 測定結果

#### 6.4 距離-電圧振幅特性

図 12 の結果において、50m 以下の近距離で実際の距離に対して測定結果が高い値を示した。この原因として増幅回路での信号の飽和が考えられる。これは、増幅回路の増幅度を長距離の場合に対して設定しているため、近距離では飽和してしまうからである。そこで、距離に対する受信信号振幅を測定し、その結果を図 13 に示す。なお、飽和していない信号を見るため、増幅回路への入力を測定した。結果を見ると、長距離では 1mV 程度なのに対して、近距離では最大 160mV と約 160 倍もの差が生じている。増幅回路の増幅度が約 1 万倍であるため、近距離での信号は飽和してしまう。そのため、図 12 のように近距離で誤差が発生したと考えられる。よって今後は APC(Auto Power Control)回路を用いるなどして、受信信号の飽和を防ぐ必要がある。

#### 7. まとめ

本研究では、低出力の半導体レーザを用いても長距離の計測を行うことが出来るカオスレーザレーダの信号処理の方法として、FPGA を用いた信号処理を提案し、計測のオンライン化を行った。このカオスレーザレーダでは、受信信号を進ませて加算を行う方式なので、オフラインではメモリなどを用いて容易に実行できるが、オンラインでの信号処理は困難に思われた。しかし、FPGA

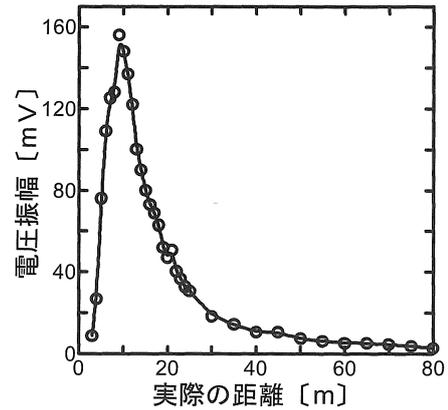


図 13 距離-電圧特性

内で信号をシフトレジスタでクロックに同期して進ませながら、同時にカウンタで加算を行い、コンパレータで最大値を検出することで、計測のオンライン化が可能となった。その結果、平均出力 1mW 以下と低出力の半導体レーザを用いて 95m の距離を、本研究で提案した方式を用いて FPGA で信号処理を行う事で、オンライン計測が可能となった。しかし、近距離において実際の距離よりも高い値を示した。これは、ターゲットの距離が近いことにより戻り光が強く、受信信号が飽和したためである。

今後の課題としては、APC 回路を用いるなどして、距離にかかわらず受信信号振幅を一定に保つよう、レーザパワーを制御し、より実際に距離に近い計測を行う必要がある。また、距離分解能の向上が挙げられる。現在の信号処理では、距離分解能をクロック周波数に依存しているため、より細かい距離分解能で計測を行うためには、クロック周波数を高くする必要がある。しかし、クロック周波数を高くするのは回路やデバイスの関係上、望ましくない。そこで、位相遅延回路を用いて、送信側のクロックを僅かずつ遅らせながら計測を行う事で向上させる方法を検討中である。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 成田義之・津田紀生・山田諄：カオスレーザレーダの有効性に関する研究, 愛知工業大学研究報告書, No.38, pp.63-68, 2003
- 3) 成田義之・津田紀生・山田諄：カオスレーザレーダを用いた衝突防止センサの研究, 電気学会論文誌 C, 123, 12, pp.2079-2084, 2003
- 4) 香田徹：現代非線形科学シリーズ 2 離散力学系のカオス, pp.117-121, 東京, コロナ社, 1998

(受理 平成 17 年 3 月 17 日)