

## 端子電圧型自己結合レーザー距離センサの 単一パルス測定に関する研究

樋口 悠人, 佐藤 大輝, 岩田 侑典, 水嶋 大輔, 津田 紀生, 山田 諄  
愛知工業大学(〒 470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)

### Study on Single Pulse Measurement of Terminal Voltage Self-Coupled Laser Distance Sensor

Yuto HIGUCHI, Daiki SATO, Yusuke IWATA, Daisuke MIZUSHIMA,  
Norio TSUDA, and Jun YAMADA

Aichi Institute of Technology, 1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota, Aichi 470-0392

(Received April 9, 2022)

Previous research on distance sensors using the self-coupling effect of semiconductor lasers used current-spouting type LD driver circuits. As a result, the triangular current wave injected into the LD has poor linearity, requiring multiple triangular waves for measurement, which is time-consuming. We improved the triangular wave current's linearity with a newly created current-absorbing LD drive circuit. We also proposed a novel signal processing method using a self-coupled signal obtained with a single triangular wave and experimentally confirmed that measurements performed with a single triangular wave have the same accuracy as conventional measurements using multiple pulses.

**Key Words:** Self-coupling effect, Distance measurement sensor, Semiconductor laser, Vertical cavity surface emitting laser

#### 1. はじめに

自己結合効果<sup>1)</sup>とは, Laser Diode(LD)から出射した光が対象物表面で散乱し, その光の一部がLDの活性層内に再入射することでLDの外部にも共振器が形成され, その結果光出力やLDの端子電圧がわずかに増減する現象のことである<sup>2)</sup>. 自己結合効果は, 戻り光雑音として抑制する研究が多く行われてきた. しかし, 戻り光雑音を積極的に利用する研究もおこなわれ, 距離<sup>3,4)</sup>, 速度<sup>5,6)</sup>, 微小変位<sup>7,8)</sup>, 音波<sup>9,10)</sup>等の様々なセンサとして研究が行われてきた. これらの研究では, LDに内蔵したPhoto Diode(PD)を利用して自己結合信号を取得してきた. 近年LDのアレイ化などの要求に伴い, PDを内蔵しないLDが増えてきた. 一般的に端子電圧から得られる自己結合信号は, PDによって得られる自己結合信号に比べて, 信号が非常に小さくノイズも多い. そのため, 端子電圧から自己結合信号を得て利用する研究は, あまり研究されてこなかった.

これまでPDを内蔵したFabry-Perot型LDやVertical Cavity Surface Emitting Laser(VCSEL)を使用した自己結合型距離センサ<sup>4)</sup>に関する研究は数多く行われてきた. VCSELを使って距離測定を行なう研究では, LD駆動回路に三角波電圧波形を加えて変調し, LDの発振波長を線形的に変化させてきた. しかし, 自己結合効果を利用

したセンサは, 測定精度が悪かった. この原因は, ノイズの影響と長らく考えられてきた. しかし, LD直前の電流を観測したところ, 電流吐き出し方式のLD駆動回路の場合, 時定数の影響により, LDを三角波で変調しても, 線形的な電流がLDに流れていないことが確認された. そのため, 三角波の代わりに任意波形を使用し, LDの発振波長が線形的に変化するよう補正することで, 測定精度を改善した<sup>11)</sup>.

端子電圧型自己結合レーザー距離センサをアレイ化配置すれば, 対象物までの距離を測定できるだけでなく, 形状認識など他の用途での利用も期待できる. VCSELの端子電圧を利用したセンサは, LD内にPDを内蔵していないのでセンサ部が小さくアレイ化に向いている. しかし, アレイ化測定では, 複数のLDを使用するため, LDの数だけそれぞれのLDの特性に合わせた任意波形が必要となる. そのため, LDをこれまで行なってきた電流吐き出し方式でなく, 電流吸い込み方式で変調し, 距離測定を行なった.

今まで自己結合効果の端子電圧を利用したセンサの研究は, LD駆動電流の線形性の悪さから, LDの発振波長の変化が一定でなく, 測定には複数のパルスが必要であり計測に時間がかかった. しかし, アレイ化測定は, 常にすべてのLDを長時間駆動するのではなく, スwitchングにより各LDの発振タイミングをコントロールし,

LDの駆動時間を短くする必要もある。従ってアレイ化により高速かつ低消費電力な測定を行うためには単一パルスでの測定技術が必要となる。そこで今回、端子電圧型自己結合レーザー距離センサの単一パルス測定に必要な変調回路と自己結合信号の信号処理について研究を行った。

## 2. 測定原理

距離測定の原理と Mode Hop Pulse(MHP)周波数 $F_{MHP}$ の理論式<sup>6,11)</sup>は、距離を $L$ 、レンズの影響による光路長の変化 $L_x$ 、LDの駆動電流を $I$ 、LDの発振波長を $\lambda$ 、LDを三角波変調した時、LD駆動電流の最大値を $I_m$ 、変調周波数を $f_m$ 、LD駆動電流 $I$ の変化に伴うLD発振波長の変化率を $d\lambda/dI$ とすると $F_{MHP}$ は、Eq.(1)と表すことができる。

$$F_{MHP} = \left( 4f_m I_m \frac{1}{\lambda^2} \frac{d\lambda}{dI} \right) (L + L_x) \quad (1)$$

Eq.(1)から距離 $L$ を求めるとEq.(2)となる。距離 $L$ 以外の変数をレーザーの特性や回路によって決まる定数とした場合、MHP周波数 $F_{MHP}$ は、距離 $L$ に対して一次関数的に変化することが分かる。

$$L = \frac{F_{MHP}}{\left( 4f_m I_m \frac{1}{\lambda^2} \frac{d\lambda}{dI} \right)} - L_x \quad (2)$$

しかし、実際には設計した回路定数や測定した特性通りの動作を、常に満たしているわけではなく、ノイズ成分も多く含まれる。そこでfast Fourier transform(FFT)を行い、結果のピーク値をMHP周波数の測定値としている。次に、結果の評価に用いる $F_{MHP}$ の理論式について説明する。レーザー光を対象物に照射した際、出射光と戻り光が合成し、LDから対象物までの区間に定在波が発生する。この定在波の波数はEq.(3)で示すことができる。従って、Fig.1に示す発振波長 $\lambda_{max}$ 、 $\lambda_{min}$ より、LDを三角波変調駆動させた際に発生するMHP個数 $N_{MHP}$ はEq.(4)で表すことができる。取得時間 $t_m$ の間に発生するMHPの個数 $N_{MHP}$ が分かれば、その値を取得

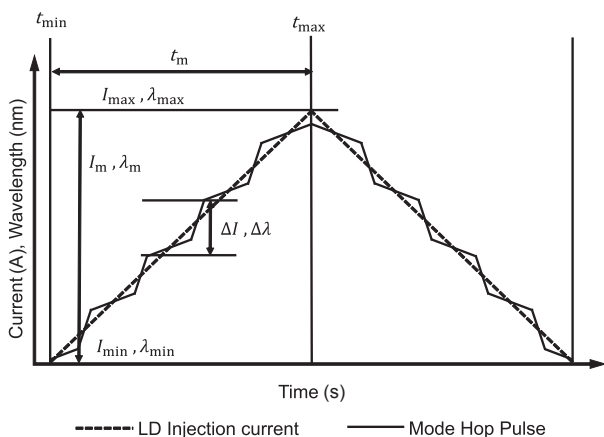


Fig. 1 Terminal voltage variation due to self-coupling effects during triangular modulation.

時間 $t_m$ で割ることにより、MHP周波数 $F_{MHP}$ はEq.(5)のように求めることができる。

$$n = \frac{2L}{\lambda} \quad (3)$$

$$N_{MHP} = \frac{2L}{\lambda_{min}} - \frac{2L}{\lambda_{max}} \quad (4)$$

$$F_{MHP} = \frac{N_{MHP}}{t_m} = \frac{N_{MHP}}{t_{max} - t_{min}} \quad (5)$$

距離分解能 $\Delta L$ は、MHPが1個分変化する距離であり、これは共振条件を1回満たす距離である<sup>6)</sup>。よって、距離分解能 $\Delta L$ は、LD注入電流の振幅を大きくすることで、向上することができる。

## 3. LDの波長特性

今回実験に使用したLDは、Philips Photonics(旧ULM Photonics)社のVCSEL(ULM850-B2-PL-S46FZP)である。自己結合効果を用いた距離センサは、LDの発振波長の変化が線形的で、なおかつ単色性が良いことが望ましい。

実験に使用するLDは、個体により発振波長や温度特性が異なるため、使用するLD毎に静特性を調べ、条件を決める必要がある。周囲温度が25°Cにおける、VCSELの発振波長特性を、ADVANTEST社製スペクトラムアナライザQ8347(最高分解能3pm)を用いて測定した。VCSELの注入電流対発振波長特性をFig.2に示す。Fig.2から発振波長は、注入電流に対してほぼ線形的に変化していることがわかる。以前使用したLD<sup>11)</sup>と同じ品番の製品であるが、ロットが異なるため、発振波長が異なる。本研究では注入電流を三角波変調して、発振波長を変化させるため、発振波長の変化がより線形的で、なおかつ光出力が十分な範囲でLDを駆動させるために3.7mA~5.6mAの電流値を使用し、波長範囲は851.0nm~852.0nmとした。

## 4. 測定環境

本研究を行った測定環境をFig.3に示す。センサ部は、

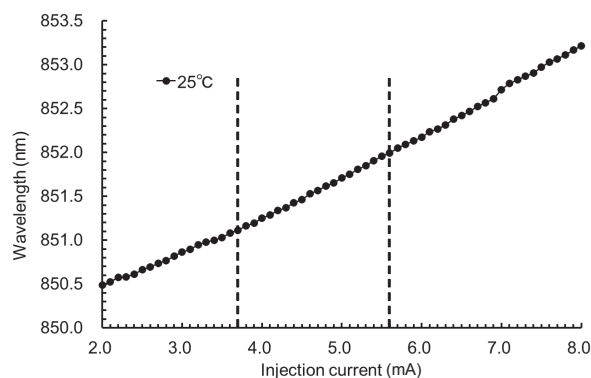


Fig. 2 Wavelength characteristics for VCSEL injection current.

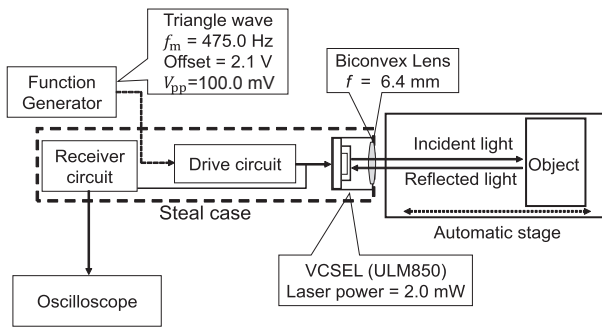


Fig. 3 Experimental arrangement.

直径 6.0 mm, 焦点距離 6.4 mm の球面両凸レンズと VCSEL (ULM850), これらを取る Edmund Optics 社製レーザーマウントから構成される. LD 出射光は, 平行ビームにした. 測定対象物の表面には, 戻り光量を調整するために, 蛍光反射テープ(3M 社製)を貼り実験を行った. 距離は, シグマ光機社製の自動ステージ OSMS (CS)26-200 を使用し調整した. LD 駆動回路は, Fig. 4 に示す電流吸い込み型の LD 駆動回路を新たに作成した. 電流吸い込み型の変調回路は, N チャネル MOS FET のゲート電圧をファンクションジェネレータによって制御し, 定電流からグラウンドに電流を逃すことで, 電流変調を行った.

自己結合信号は, 受信回路により, LD の端子電圧から得られる MHP を増幅した後, フィルタ回路によってノイズ除去を行ったが, フィルタ回路後の自己結合信号にも, まだノイズ成分が多い. そこで, オシロスコープの FFT 機能(ハニング窓)を用いて周波数解析を行った.

### 5. 端子電圧型自己結合レーザー距離センサの単一パルス測定用信号処理

これまで端子電圧型自己結合レーザー距離センサでは, 連続した三角波を利用し, 三角波の立ち上がり部の MHP に対してのみ FFT を行なってきた. これは, 電流吐き出し型の LD 駆動回路に問題があったためである. 電流吐き出し型の LD 駆動回路は, 定電流回路と変調回路の 2 ブロックにより構成されており, 定電流回路により生成された電流に変調用電流を合成する(吐き出す)ことで三角波電流を生成している. しかし, 吐き出し型の

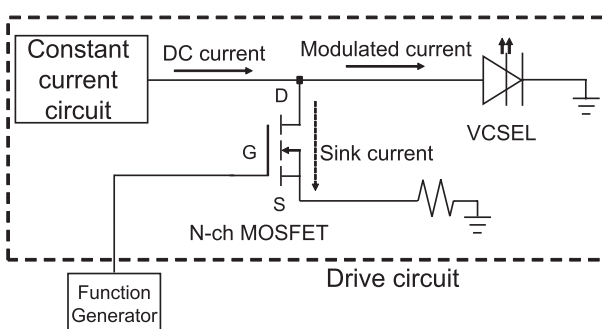


Fig. 4 Sink current modulation circuit.

場合, 定電流回路で生成された電流が変調回路に逆流するのを防ぐため, 各回路出力の間にカップリングコンデンサを差し込む必要がある. これにより, 三角波変調する際にカップリングコンデンサの時定数の影響を受け, 波形が湾曲する. 波形が湾曲すると MHP の間隔にばらつきが生じてしまい, 測定精度が悪かった. そこで, 三角波でなく任意波形を作成し LD に注入する三角波電流波形の傾きを補正することで, 測定精度を改善した<sup>11)</sup>. しかし, 任意波形を使って LD 駆動電流の線形性を改善しても, 三角波の立ち上がり部と立ち下がり部の頂点部分の傾きを同じにすることが難しいという理由により, 三角波の立ち上がり部のみしか利用できなかった. 従って, 変調回路を MOSFET に置き換えた電流吸い込み型変調回路(Fig. 4)を新たに作成した. これによりカップリングコンデンサが不要となるため, 時定数の影響を排除でき, より簡単に三角波変調することができる.

端子電圧型自己結合レーザー距離センサのアレイ化に向けて, 信号取得時間の短縮, リアルタイム性の向上などの観点から, LD 駆動回路を電流吸い込み型にしたところ, 三角波電流の問題が改善されたため, 三角波を単一パルス発振して得られた自己結合信号を信号処理して距離を求めた.

自己結合信号から距離を求めるための信号処理には, 様々な方法があるが, 単一パルスから多くの自己結合信号を取得するため, 三角波の立ち上がり部のみだけでなく, 立ち下がり部も利用し, それぞれ FFT を行った. その際の MHP 取得範囲の概略図を Fig. 5 に示す. 図より, 単一パルス測定では, 立ち上がり部と立ち下がり部, それぞれの上部, 中心部, 下部に FFT を施したもの中から, 距離を求め, どの部分を使用するのが望ましいかを検証した. もし, 上部, 中心部, 下部においてわずかに傾きが異なれば, 取得する MHP 周波数にも違いが生じると考えられる.

### 6. 測定結果及び考察

電流吐き出し型変調回路で任意波形を使用した場合と, 電流吸い込み型変調回路の時間に対する発振波長の変化の確認を行なった結果を Fig. 6 に示す. 図中の Before

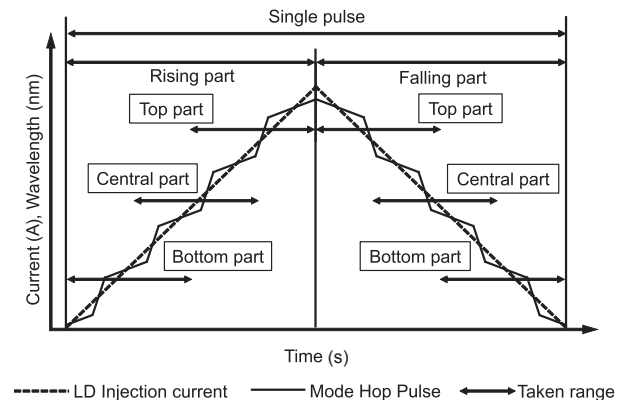


Fig. 5 MHP signal acquisition range.

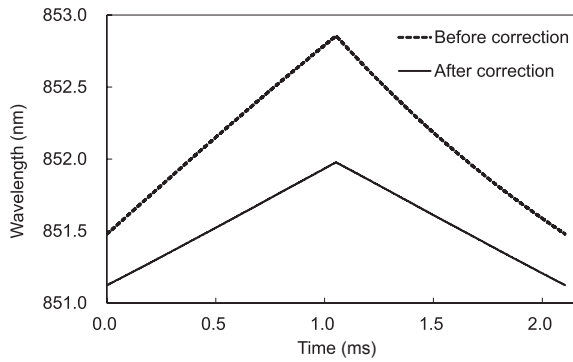


Fig. 6 Wavelength characteristics for time before and after correction.

correction は任意波形, After correction は吸い込み変調の LD 駆動電流から求めた LD 発振波長を示す. Fig. 6 より吸い込み型変調回路は, 任意波形と同程度の波長補正ができていていることが分かる. 特に, 波長の線形性は, 立ち下がり部でより改善されている. しかし, 変化は小さくなっており, 距離分解能は低下する. これは, 今回電流吸い込み変調に使用した FET の  $I_D$ - $V_{GS}$  特性の直線範囲により決まるためである.

また, 電流吸い込み型変調回路により, 三角波パルス全体の測定精度がどの程度改善するのか検証した. 電流吐き出し型変調回路で任意波形を使用した場合 (Fig. 7) と, 電流吸い込み型変調回路を使用し単一パルス内において取得した場合 (Fig. 8) においてそれぞれ距離測定を行った. Fig. 7 のデータは三角波の立ち上がり部分のみを, Fig. 8 のデータは単一パルス全体, 立ち上がり部全体, 立ち下がり部全体の MHP を取得し, FFT により周波数を求め距離換算した結果である. また, Fig. 8 のデータは, 従来の電流吐き出し型変調回路で測定できなかった区間の精度検証を行うためにパルス全体と立ち下り部分を追加している. それぞれの平均誤差は, Fig. 7 では 0.7 mm, Fig. 8 では単一パルスで 0.4 mm, 立ち上がり部で 0.6 mm, 立ち下がり部で 0.6 mm となった. 従って, 電流吸い込み型変調回路を用いた場合, 立ち上がり部では従来と同程度の精度で測定が可能であり, 従来は不可能であった立ち下がり部においても十分な精度で測定可能であることが分かった. また, 三角波の頂点を含む単一パルス分の MHP を使った測定でも理論値と近い結果

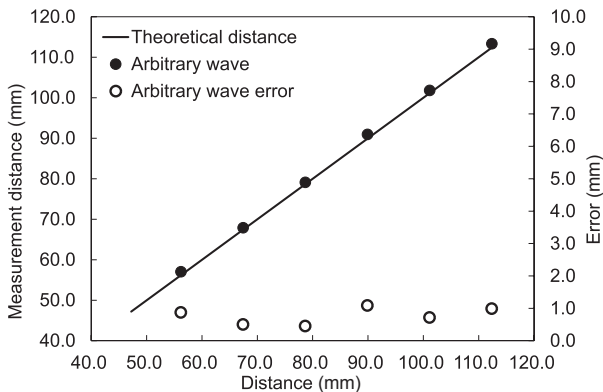


Fig. 7 Distance measurement by arbitrary waveforms.

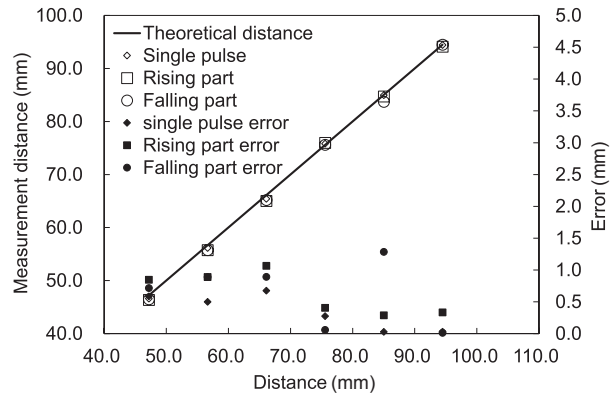


Fig. 8 Distance measurement by sink current modulation.

を取得できることが分かった. 従って, 単一パルス内で使用できる測定区間を大きくすることができるため, 多くの MHP 周波数データを得ることができ, より精度の高い測定が可能になると考えられる.

次に Fig. 5 に示すように, 三角波変調電流の立ち上がり部の Top, Center, Bottom (各 520  $\mu$ s), 立ち下がり部の Top, Center, Bottom (各 520  $\mu$ s) の部分の MHP だけ利用して距離測定した結果を Fig. 9 に示し, Fig. 9 の平均誤差を Table 1 に示す. Fig. 9 内の A, D は近距離, B, E は中距離, C, F は遠距離の代表点である.

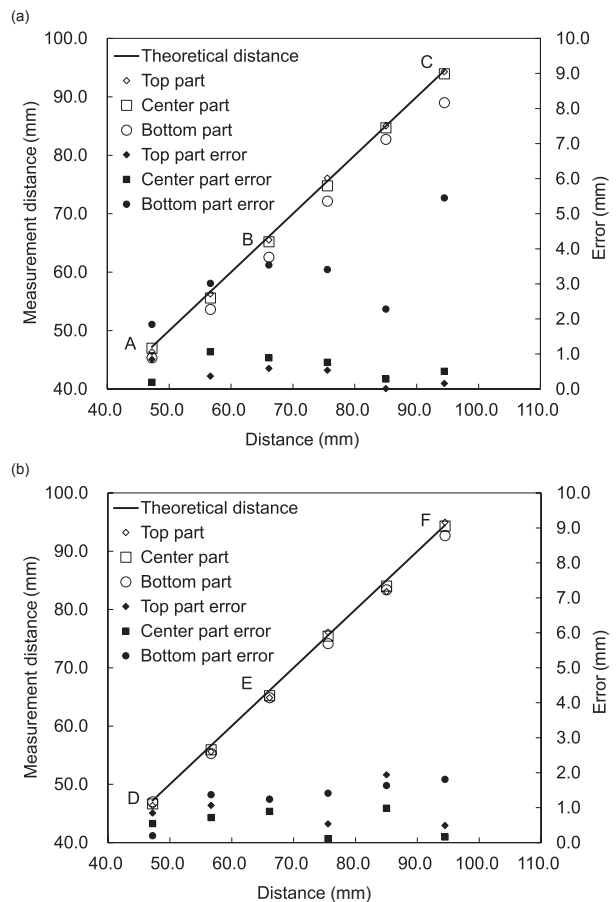


Fig. 9 Distance measurement results for different MHP signal acquisition positions in triangular wave. (a) Rising part. (b) Falling part.

Table 1 Average error results at different FFT position.

	Top part [mm]	Center part [mm]	Bottom part [mm]
Rising part	0.4	0.6	3.3
Falling part	1.0	0.6	1.3

Table 1 より三角波の立ち上がり部、立ち下がり部のどちらにおいても三角波の中心付近の信号を取得することで、平均誤差が1 mm 以下となり、精度の高い測定が行える事が分かった。Top や Bottom で誤差が増える原因は、LD 駆動電流に三角波を用いると、LD の発振出力が常に変化するので Top や Bottom で MHP 信号に影響が出た結果によるものと考えられる<sup>12)</sup>。

次に、単一パルスの Center 部から得られる MHP を使って距離測定を行なう場合、正確に測定可能なパルス照射時間を調べた結果を Table 2 に示す。Table 2 より、LD 駆動電流の立ち上がり部、立ち下がり部共に三角波 LD 変調電流の中心付近の信号を取得することで、どの測定距離でも約 300  $\mu$ s の MHP 信号があれば正確に測定できることが分かった。

また、測定距離を変化させた場合、測定対象物との距離に近い A、D、測定対象物との距離が遠い C、F では約 300  $\mu$ s の MHP 信号が必要であるのに対し、B、E では約 200  $\mu$ s の MHP 信号があれば高い精度で測定可能であることが分かった。これは、測定対象物との距離が近いと戻り光が強くなり、距離が遠いと戻り光が弱くなり、それぞれ MHP 信号に影響が出た結果によるものと考えられる。

## 7. 総括

本研究では、端子電圧型自己結合レーザー距離センサのアレイ化に向け変調回路と自己結合信号の信号処理に関する研究を行った。LD の端子電圧から得られる自己結合信号は、PD によって得られる自己結合信号に比べてノイズが多く測定誤差が大きかった。また、これまで一般的であった電流吐き出し型の LD 駆動回路では、LD の波長変化の線形性を改善するためには、任意波形の作成が必要であった。そこで LD 駆動回路を電流吸い込み型に変更し、LD 駆動電流の直線性を改善した。次に、三角波の連続パルスでなく、三角波の単一パルス分の MHP を使えば理論値と近い値を得られることが分かった。しかし、LD のアレイ化を考えると、パルス取得時間は短い方が良い。そこで、三角波の立ち上がり部、立ち下がり部の Top、Center、Bottom 部の 6 つの部分に分け、それぞれの部分から得られる MHP を使って距離測定を行なったところ、三角波の Top や Bottom 付近の MHP 信号のみ利用すると測定精度が悪化することが分

Table 2 Minimum acquisition time of the MHP signal obtained from the central part of the triangular wave at each of the positions shown in Fig. 9.

Position	A	B	C
Time [ $\mu$ s]	280	180	260
Position	D	E	F
Time [ $\mu$ s]	280	180	260

かった。

そこで、三角波の立ち上がり、立ち下がり部の Center 部分の MHP 信号のみ使い、どれ位パルス幅を短くしても測定精度が悪化しないか調べた結果、今回の測定条件では、約 300  $\mu$ s 程度の MHP があれば、同じ測定精度で距離測定できることが確認された。

## 参考文献

- 1) T. Ueda, J. Yamada, S. Shitou, and N. Tsuda: IEEJ Trans. EIS **117** (1997) 954 (in Japanese).  
上田 正, 山田 諄, 柴藤 進, 津田 紀生: 電気学会論文誌 C **117** (1997) 954.
- 2) J. Hashizume, S. Shinada, F. Koyama, and K. Iga: Optical Review **9** (2002) 186.
- 3) A. Sakamoto, N. Tsuda, and J. Yamada: IEEJ Trans. EIS **126** (2006) 1454 (in Japanese).  
坂本 明紀, 津田 紀生, 山田 諄: 電気学会論文誌 C **126** (2006) 1454.
- 4) T. Yoshimatsu, K. Goshima, N. Tsuda, and J. Yamada: IEEJ Trans. EIS **134** (2014) 1796 (in Japanese).  
吉松 剛, 五島 敬史郎, 津田 紀生, 山田 諄: 電気学会論文誌 C **134** (2014) 1796.
- 5) S. Shinohara, A. Mochizuki, H. Yoshida, and M. Sumi: Appl. Opt. **25** (1986) 1417.
- 6) M. Yamada, D. Sato, D. Mizushima, K. Goshima, N. Tsuda, and J. Yamada: IEEJ Trans. EIS **141** (2021) 1250 (in Japanese).  
山田 将成, 佐藤 大輝, 水嶋 大輔, 五島 敬史郎, 津田 紀生, 山田 諄: 電気学会論文誌 C **141** (2021) 1250.
- 7) Y. Nawa, N. Tsuda, and J. Yamada: IEEJ Trans. EIS **129** (2009) 2115 (in Japanese).  
名和 靖彦, 津田 紀生, 山田 諄: 電気学会論文誌 C **129** (2009) 2115.
- 8) Y. L. Lim, K. Bertling, J. R. Tucker, and A. D. Rakic: Proc. SPIE **6038** (2006) 603810I-10.
- 9) D. Mizushima, T. Yoshimatsu, K. Goshima, N. Tsuda, and J. Yamada: IEEJ Trans. EIS **136** (2016) 1021 (in Japanese).  
水嶋 大輔, 吉松 剛, 五島 敬史郎, 津田 紀生, 山田 諄: 電気学会論文誌 C **136** (2016) 1021.
- 10) D. Mizushima, T. Yoshimatsu, T. Yamaguchi, K. Goshima, N. Tsuda, and J. Yamada: IEEJ Trans. EIS **137** (2017) 489 (in Japanese).  
水嶋 大輔, 吉松 剛, 山口 剛, 五島 敬史郎, 津田 紀生, 山田 諄: 電気学会論文誌 C **137** (2017) 489.
- 11) T. Ohba, D. Mizushima, K. Goshima, N. Tsuda, and J. Yamada: IEEJ Trans. EIS **140** (2020) 1264 (in Japanese).  
大羽 達也, 水嶋 大輔, 五島 敬史郎, 津田 紀生, 山田 諄: 電気学会論文誌 C **140** (2020) 1264.
- 12) T. Taimre, M. Nikolic, K. Bertling, Y. L. Lim, T. Bosch, and A. D. Rakic: Adv. Opt. Photonics **7** (2015) 570.