

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06470

研究課題名(和文) 自己結合信号を利用した距離・速度同時計測センサの開発

研究課題名(英文) Development of distance and speed simultaneous measurement sensor using self-coupled signal

研究代表者

津田 紀生 (Tsuda, Norio)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：20278229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：今まで研究されてきた自己結合信号効果を利用した距離・速度計測に関する研究は、三角波電圧波形を用いて半導体レーザー(LD)を変調し、計測を行ってきた。LDの自己結合効果を利用した計測は、発振した光と対象物で反射した戻り光との干渉を利用する。しかし、自己結合効果を利用した計測は、戻り光ノイズが発生するばかりでなく、自己結合信号は広がり、信号強度は低く、測定精度は低かった。そこで、まず距離測定時に、LDに流れ込む電流を直接観測し、任意波形を用いてLDの発振波長が線形的に変化するよう変調した所、自己結合信号の広がりが抑えられ、信号強度が上がり、測定精度が向上した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の研究を通じて得られた学術的意義や社会的意義は、半導体レーザー(LD)の自己結合効果を利用したセンサの測定精度の向上に繋がるLDの変調技術を明らかにしたことである。その変調技術とは、今まで行われてきた多くの研究では、三角波電圧波形を用いてLDを変調していた。しかし今回LDに流れ込む電流に注目し、LDの発振波長を線形的に変化するよう変調した所、自己結合信号の広がりを抑え、信号強度が上がり、測定精度の向上に繋がった。

研究成果の概要(英文)：In the research on distance and velocity measurements using the self-coupling signal effect, a semiconductor laser has been modulated by using triangular wave voltage waveform. Measurements based on the self-coupling effect of LDs are based on the interference between the oscillating light and the return light reflected from the surface of the object. However, conventional measurements using the self-coupling effect have not only generated return noise, but also spread the self-coupling signal, resulting in low signal strength and low measurement accuracy. As a result of direct observation of the current flowing into the LD and linearly modulating the oscillation wavelength of the LD using arbitrary waveform, the spread of the self-coupled signal is reduced, the signal strength is increased and the measurement accuracy is improved.

研究分野：光計測

キーワード：VCSEL 自己結合信号 距離・速度同時測定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 複雑な形状を持つアルミやカーボン複合材に対するレーザー加工やレーザー溶接の技術が求められている。しかし、多軸ロボットアームに取り付けた加工用レーザーヘッドは、等速度で移動させる事が難しく、加工や溶接が安定しない問題がある。そこで、多軸ロボットアームの速度制御と加工対象物への距離を同時に測定しながら制御できる、安価で小型軽量のセンサの開発を目指し研究を行った。

(2) 半導体レーザー (LD) の自己結合効果を利用した研究は、センサ部をレンズと LD のみで構成できる為、多くの研究が行われているが、測定に干渉を利用しているのだが、戻り光ノイズの影響もあり、測定精度が高くない、まだ実用化された計測装置はなかった。そこで、自己結合効果を利用した計測に置いて、測定精度を向上させる事を目指し研究を行った。

2. 研究の目的

(1) LD の自己結合効果を利用したセンサを作成し、距離と速度を同時に精度よく測定する為の自己結合効果を利用したセンサを開発することである。

(2) LD の自己結合効果を利用したセンサは、LD とレンズのみでセンサ部を構成できる。しかしながら、自己結合効果が生じた時に発生する戻り光ノイズの影響もあり、自己結合効果を利用したセンサの測定精度は高くなかった。そこで、自己結合信号について研究し、自己結合効果を利用したセンサの精度改善を目指した。

3. 研究の方法

LD の自己結合効果とは、対象物表面で反射したレーザー光の一部が LD の活性層内に戻り出力光と干渉する。この時、LD から対象物表面までの距離が LD の半波長の整数倍の干渉条件を満たすと、LD 内部の共振器だけでなく、LD 外部にも共振器が成立し、光出力がわずかに増加する。この現象を自己結合効果と言い、その時得られる信号を自己結合信号という。自己結合信号は、LD が単一波長で発振し、かつサイドモード抑圧比が大きい方が、戻り光ノイズの中から求めやすい事は分かっていたが、自己結合効果を利用した計測の測定精度は、改善しなかった。

今まで自己結合信号を利用した研究に用いられてきた LD は、ファブリペロータイプのレーザーである。このタイプのレーザーは、光出力が大きく、単一波長で発振させる事も出来るが、発振波長が突然大きく変化するモードホップという現象が起き、LD 駆動電流の変化に対して波長変化が線形的に変化する波長範囲が狭かった。そこで、近年は VCSEL タイプの面発光レーザーが自己結合効果を利用した計測に用いられている。VCSEL は、単一モードで発振出来、モードホップも発生せず、LD 駆動電流を変化させると発振波長も変化するが、光出力は小さい。その為、戻り光も小さくなり、自己結合信号の信号強度も小さく、計測精度の向上が難しかった。

(1) 自己結合効果を利用した距離測定原理

三角波電圧波形を用いて LD を変調する事で、LD の波長を連続的に変化させる。この時、共振条件を満たすと、光出力信号上に自己結合効果による信号が出現し、これをモードホップパルス (MHP) と言う。また、対象物までの距離に比べて、レーザーの発振波長は大変短い為、注入電流の三角波が一周期変化する間に、共振条件を何度か満たし、複数の自己結合信号が光出力上に現れる。その様子を図 1 に示す。

三角波変調電流の振幅を i_{PDm} 、三角波変調電圧の周波数を f_m 、距離 L 、MHP の周波数を F と

し、距離 L を求める式を導くと $L = \frac{F}{(4 \times i_{PDm} \times f_m \times \frac{1}{\lambda^2} \times \frac{d\lambda}{di})}$ ・ ・ (1) で表される。

ここで、波長 λ は、三角波変調電圧波形において、最低電圧時の波長 λ_1 、最大電圧時の波長 λ_2 とした時、 $\lambda = \frac{\lambda_2 + \lambda_1}{2}$ ・ ・ (2) の値となる。

次に、距離分解能を ΔL とすると $\Delta L = \frac{1}{(2 \times i_{PDm} \times \frac{1}{\lambda^2} \times \frac{d\lambda}{di})}$ ・ ・ (3) となり、LD 発振波長の線形性の

影響をうける事が分かった。

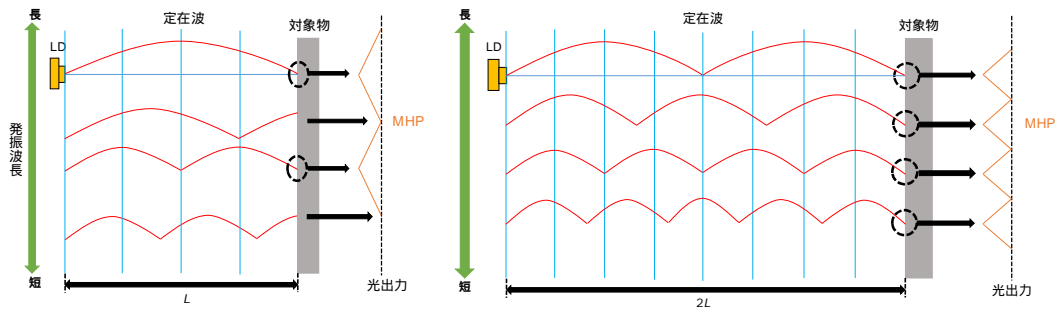


図 1 . 距離 L 及び $2L$ 時の MHP の変化

(2) 自己結合効果を利用した速度測定原理

θ_{LD} はレーザー光の入射角、 θ_c は対象物のセンサ設置方向に対する角度、 $F_{up} - F_{down}$ は三角波変調の立上り時と立ち下がり時の MHP 周波数の差とすると、対象物の速度 v は、 $v = \frac{\lambda}{4 \cos \theta_{LD}} \times$

$(F_{up} - F_{down}) \times \frac{1}{\cos \theta_c}$ ・ ・ (4) となり、レーザーの照射角度や対象物の移動方向に対する角度の

影響を受ける。一方、速度の分解能は、 $\Delta v = \frac{\lambda}{\cos \theta_{LD}} \times f_m \times \frac{1}{\cos \theta_c}$ ・ ・ (5) となり、角度の影響を受ける。

研究当初、自己結合効果を利用した距離・速度同時計測センサの開発を目指し、フォトダイオード (PD) 内蔵の VCSEL を用いて研究を行って来た。この VCSEL は、PD を内蔵し単一モードで発振するが、光出力は 1mW 程度までしか出力できず、対象物を動かすとドップラー効果の影響から自己結合信号が広がり、信号強度が低く、測定精度が低かった。

そこで、単一モードで発振し、PD は内蔵しないが、最大光出力が 2mW の VCSEL を用い、対象物を停止させ、VCSEL の端子電圧から自己結合信号を得る方法を用いて、測定精度の向上を目指し、研究を進めた。VCSEL の電流に対する発振波長特性を図 2 に示す。

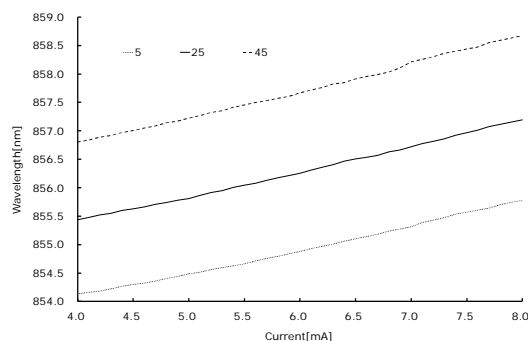


図 2 . VCSEL の電流に対する発振波長特性

図より、VCSEL の電流に対する発振波長は、線形からわずかにずれている事が分かった。

4 . 研究成果

(1) 対象物が静止している状態での距離測定の精度改善

端子電圧から得た MHP を FFT で信号処理して得られた自己結合信号を利用し、距離測定を行った。自己結合信号を利用した距離測定では、式(1)や式(3)から電流変調時の発振波長の線形性の影響を受ける。そこで、VCSEL 駆動用三角波電流波形を任意波形で補正する前と補正後の自己結合信号を図3に示す。

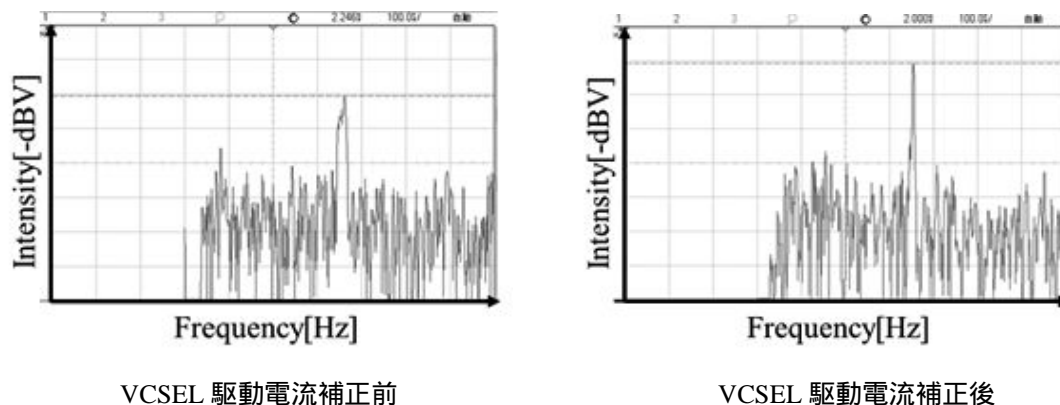


図3 . VCSEL 駆動電流補正前と補正後の自己結合信号の変化

図より、VCSEL 駆動電流を補正し、VCSEL の発振波長を線形的に変化させることにより、自己結合信号が広がらず、自己結合信号の信号強度が強くなる事が解った。

そこで、補正前と補正後の距離を比べた結果を図4に示す。

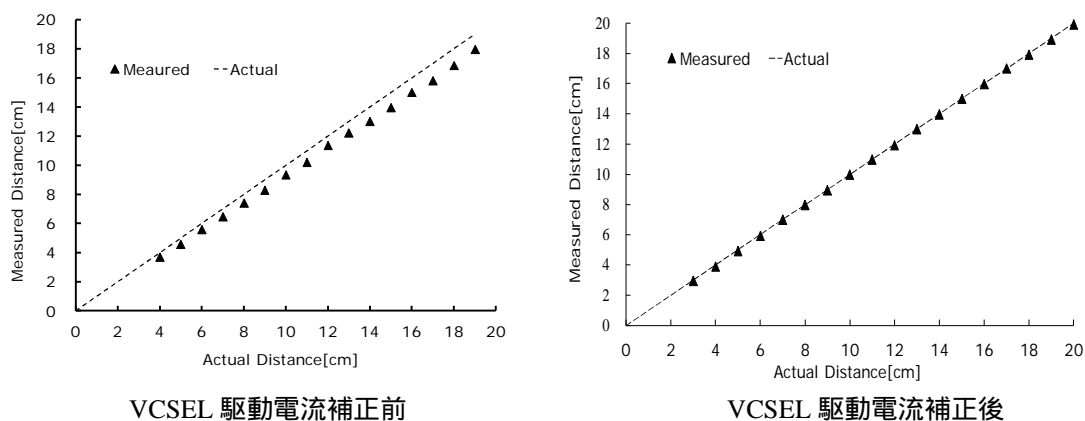


図4 . LD 駆動電流補正の距離測定結果

図より VCSEL の発振波長が線形的に変化するように、任意三角波電圧波形を用いて駆動電流を変調すると、測定精度が向上する事が分かった。

(2) 対象物が動いている状態での距離測定の精度改善

対象物が動いている状態の時、自己結合信号を利用した距離測定では、静止した状態と同じく、

式(1)や式(3)より、発振波長の線形性の影響を受ける。そのうえ、対象物が動いていると、ドップラー効果の影響を受け、自己結合信号が広がり、信号強度が下がる為、LDの出力が同じ場合、測定精度が下がる。その為、対象物が静止した状態で自己結合効果を利用して計測する時に使用するLDの特性に加えて、より高出力なLDが計測に向いていることが分かった。

(3) 対象物が動いている状態での速度測定の精度改善

自己結合効果を利用して求める対象物の速度は、式(4)からLDの発振波長の線形性には依存しない。しかし、速度も距離と同じくドップラー効果の影響を受け、自己結合信号が広がり、信号強度が下がる。その為、速度測定の精度を改善するには、単一波長で発振し、LDの線形性は多少悪くても良いが、光出力のより大きなLDが計測に向いていることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takeshi Yoshimatsu, Norio Tsuda, Jun Yamada	4. 巻 29
2. 論文標題 Signal Processing for Distance Measurement Using Laser Voltage Fluctuation due to Self-Coupling Effect	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 1315 ~ 1324
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2017.1609	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Keiichi Shibata, Norio Tsuda, Jun Yamada
2. 発表標題 Velocity and Distance Simultaneous Measurement by Digital Processing of Self-Coupling Signal
3. 学会等名 The 7th Advanced Laser and Photon Sources ALPS2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大羽達也, 五島敬史郎, 津田紀生, 山田諄
2. 発表標題 自己結合効果によるレーザー端子電圧変動を利用した距離センサの精度向上について
3. 学会等名 平成30年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大羽達也, 津田紀生, 山田諄
2. 発表標題 自己結合効果によるレーザー端子電圧変動を利用した距離センサの分解能向上に対する取り組み
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Ohba, Norio Tsuda, Jun Yamada
2. 発表標題 Research for improvement of resolution of distance sensor using fluctuation of laser terminal voltage due to self-coupling effect
3. 学会等名 The Fourth International Conference on Advances in Sensors, Actuators, Metering and Sensing ALLSENSORS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田慧一, 津田紀生, 山田諄
2. 発表標題 自己結合効果を用いた距離・速度デジタル測定
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiichi SHIBATA, Norio TSUDA, Jun YAMADA
2. 発表標題 Study on simultaneous measurement sensor in distance and velocity using self-coupling effect
3. 学会等名 The 24th Congress of the International Commission of Optic (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tatsuya OHBA, Takeshi YOSHIMATSU, Norio TSUDA, Jun YAMADA
2. 発表標題 Velocity sensor utilizing terminal voltage fluctuation of laser due to self-coupling effect
3. 学会等名 International Workshop on Green Energy System and Devices (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉松剛, 五島敬史郎, 津田紀生, 山田諄
2. 発表標題 自己結合効果によるレーザー端子電圧変動を利用した距離測定のための信号処理
3. 学会等名 平成29年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉松 剛, 五島敬史郎, 津田紀生, 山田 諄
2. 発表標題 2値化信号の加算平均を用いた端子電圧型自己結合レーザー距離センサのための信号処理
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴田 慧一, 津田 紀生, 山田 諄
2. 発表標題 レーザを用いた距離・速度デジタル測定
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	五島 敬史郎 (Goshima Keishirou) (00550146)	愛知工業大学・工学部・教授 (33903)	