

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

Takeshi Yoshimatsu

氏名 吉松 剛
学位の種類 博士 (工学)
学位記番号 博 甲 第 57 号
学位授与 平成 30 年 3 月 23 日
学位授与条件 学位規定第 3 条第 3 項該当
論文題目 端子電圧型自己結合レーザー距離センサの実時間測定に関する研究
論文審査委員 (主査) 教授 津田 紀生¹
(審査委員) 教授 小塚 晃透¹ 教授 鳥井 昭宏¹ 教授 森 正和¹

論文内容の要旨

端子電圧型自己結合レーザー距離センサの実時間測定に関する研究

半導体レーザー(LD)は、自立走行型無人ロボットの衝突防止センサや、ロボットアームの位置制御センサ、形状測定センサなど、様々な産業用センサとして積極的に活用されている。しかし、1m 程度の近距離を短時間に高精度で測定できるレーザー距離センサは少なく、実用化されている近距離センサは、干渉計を使う為光学系が複雑になり、コストが高く、実用的な製品が無かった。そこで、比較的取り扱いが簡単で、1m 以内の近距離測定に特化し、光の干渉を利用しているが、複雑な光学系は用いずに測定出来る自己結合レーザー距離センサの実用化を目指し研究を行った。

LD は、出力光が対象物で反射し、その一部の光が LD 内の共振器に再注入すると、LD の光強度をわずかに増減させるノイズが生じる。この現象は自己結合効果として広く知られている。自己結合効果によって LD の端子電圧が僅かに変動する事や、その変動をフォトダイオード(PD)の代わりとして利用できる事も知られていたが、端子電圧型自己結合レーザー距離センサを実際に製作し、距離を測定した研究は、ほとんど行われていなかった。そのため、端子電圧型自己結合レーザー距離センサの有用性は全く未知であり、自己結合信号内に存在する距離の情報(Mode Hop Pulse:MHP)の解析には、高速フーリエ変換(FFT)を用いるのが一般的であった。

自己結合レーザー距離センサに必要とされる理論的な信号処理時間は、三角波駆動電流の 1 周期であるが、FFT は計算量が膨大な為、信号処理に必要な時間が変調信号の 1 周期より長くなる。また、デジタル信号処理分野において、FFT の回路規模は比較的大きく、コストが高くなる。これに対し、端子電圧型自己結合レーザー距離センサによって検出した MHP を解析できる FFT 以外の信号処理は、これまで提案された事がなく、端子電圧型自己結合レーザー距離センサを実用化する上で大きな課題だった。

そこで本論文では、端子電圧型自己結合レーザー距離センサの距離測定精度を明らかにし、LD 変調信号の 1 周期以内に自己結合信号の信号処理を行う方法を提案し、その成果をまとめたものであり、本論文は 7 章からなる。

第 1 章 序論

研究の背景と目的を論述した。

第 2 章 半導体レーザー

代表的な LD である Fabry-Perot レーザーと実験で使用した垂直共振器面発光レーザー (Vertical Cavity Surface Emitting Laser : VCSEL) の特徴を比較し、PD による光検出の原理、および LD と PD のレーザーパッケージへの実装方法について論述した。

第 3 章 自己結合効果と自己結合信号を利用した距離測定の基本原理

自己結合効果によって生じる LD の光強度の増減の大きさは、対象物までの距離と LD の発振波長によって変動する。自己結合レーザー距離センサでは、LD に VCSEL を用いた。VCSEL は、単一波長で発振し、LD 駆動電流に比例し

て発振波長が線形的に変化する特徴を持つ。そこで、VCSELを三角波電流で変調し、MHPを、LDの出力変化に伴い生じるLD端子の僅かな電圧変動から検出し、距離測定を行った。

三角波駆動電流の1周期の間に生じる全てのMHP周波数の平均値が、測定距離と比例関係にある事、端子電圧型自己結合レーザー距離センサに使用するLDの選定方法、MHPに重畳するホワイトガウスノイズとMHPに対する高次高調波について論述した。

第4章 VCSEL端子電圧の変動を利用した距離測定の精度

端子電圧型自己結合レーザー距離センサを使って距離測定を行った報告は、ほとんどない。そこで、VCSELを用い、端子電圧型自己結合レーザー距離センサの距離測定の実験を行い、精度について検討を行った。

端子電圧型自己結合レーザー距離センサで用いる回路について述べ、距離に対するMHP周波数の測定結果、戻り光強度が非常に低い場合の測定精度の変化や、角度依存性について実験を行った。VCSELは発振波長の単一性が良く、光の干渉性が高い。自己結合レーザー距離センサは、光の干渉を利用したセンサの一種なのでVCSELとの相性は良い。そこで、MHPをVCSELの端子電圧から検出し、VCSELの端子電圧から得たMHPをFFTで信号処理し、求めた距離の精度について論述した。

第5章 端子電圧型自己結合レーザー距離センサに対する統計的信号処理

信号計数補正法で行われる統計的補正処理を基礎とした、VCSEL端子電圧の変動分中に含まれる全ての情報を利用したデジタル信号処理法を新たに提案し実験を行った。

信号係数補正法とは、LDパッケージ内にPDを設置した、特殊なVCSELを用いた自己結合型レーザー距離センサにおいて、信号処理にFFTを用いない新たな方法として以前提案されたものである。信号係数補正法は、センサの出力電圧を2値化し、一定の時間領域において、センサの出力信号内の各周期信号が占める割合(占有値)を求め、最大占有値に相当する信号をMHPとする。さらに、2値化MHPが、ホワイトガウスノイズの影響を受け、2値化MHPのパルス幅の分割・延長が生じた場合、2値化MHPの統計的特徴を利用した信号の補正処理を行った。

しかし、ホワイトガウスノイズが占める割合が比較的大きな端子電圧型自己結合レーザー距離センサにおいて、従来の方法では占有値を求める事ができない。そこでFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて、信号係数補正法の統計的補正処理を、VCSEL端子電圧の変動分の中に含まれる全ての信号に対して実行し、三角波駆動電流の3周期分で信号処理できた事について論述した。

第6章 端子電圧型自己結合レーザー距離センサによ

る実時間距離測定

信号処理に必要な時間を三角波駆動電流の3周期分から1周期分まで短縮するには、より多くのMHPの2値化が必要であったが、同時にホワイトガウスノイズが2値化される割合が大きくなり、信号係数補正法で利用していた統計的特徴や2値化MHPのパルス幅が全く判断できなくなった。さらに、自己結合レーザー距離センサの出力電圧には高調波も混在する為、2値化MHPの検出に必要な、全く新しい信号処理の方法を提案し実験を行った。

三角波電流で駆動する自己結合レーザー距離センサから得られるMHPは、パルス幅が等間隔に表れる。これに対し、ホワイトガウスノイズはパルス幅が等間隔でなく、ランダムに変化する。そこで、VCSELを三角波電流で駆動した時のみ生じるMHPの等間隔性を利用し、入力信号を一時的に記憶させ、記憶した入力信号と新たに入力する信号との論理積を求める事で、2値化ホワイトガウスノイズを低減した。加えて、高調波がMHP周波数の定数倍であることを利用し、ヒストグラム上の高周波の信号の度数の半分を低周波の信号の度数に加算して、信号を補正した。このMHPの信号処理デバイスとして、新たにARMコアを内蔵したSoC(System on a Chip)FPGAを用い、そのPL(Programmable Logic)部とPS(Processing System)部を利用した。

これにより、VCSELの端子電圧から検出したMHPを、三角波駆動電流の1周期以内に信号処理できた事について論述した。

第7章 総括

得られた成果をまとめ、今後の課題・展望を論述した。

論文審査結果の要旨

半導体レーザー(LD)の自己結合効果とは、対象物からの戻り光が、LD内に再注入する事により、LD内部のみならず、外部にも干渉計が構成される事により生じる現象で、戻り光ノイズとも呼ばれ、最近まで取り除く方向で多くの研究が行われてきた。

自己結合効果を利用したセンサのセンサ部は、レンズとLDのみで構成でき、安価で軽量のセンサとして様々な場所に設置する事が可能である。しかしながら、これまで自己結合効果を利用したセンサは開発されてこなかった。この原因として、自己結合効果は、干渉を利用した現象であるが、近年まで単一波長で発振し、駆動電流に比例して、光出力と発振波長が連続的に変化するLDが存在しなかったからである。近年、垂直共振器面発光レーザー(Vertical Cavity Surface Emitting Laser:VCSEL)が開発され、これらの問題は一気に解消した。

単一波長で発振し、駆動電流を線形的に変化させると、

光出力が線形的に変化すると共に、発振波長も線形的に変化する。その時、対象物からの戻り光を VCSEL 内に再注入すると、周期的に自己結合効果が生じ MHP が生じる。MHP は、外部共振器で共振条件を満たした時、最も大きくなる。

MHP は、光出力の僅かな変化として生じる為、半導体レーザー (LD) のパッケージ内部や外部に設置したフォトダイオード (PD) を使って MHP を検出する方法と、半導体レーザーの光出力の僅かな変化に伴い半導体レーザーの端子電圧の僅かな変化から検出する方法が存在する。VCSEL は、Fabry-Perot (FP) 型の半導体レーザーと構造が異なる為、PD を内蔵した VCSEL は、ほとんど存在しない。また、端子電圧型自己結合レーザー距離センサを実際に製作し、距離を測定した研究は、端子電圧から得られる信号にノイズが多い為、ほとんど行われていなかった。

本論文は、端子電圧型距離センサを作成し、自己結合信号のリアルタイム処理に関する一連の研究結果をまとめたもので全体は 7 章で構成されており、以下に各章の内容を示す。

第 1 章は序論で、研究の背景と目的について論述されている。

第 2 章では、代表的な LD である FP 型レーザーと実験で使用した VCSEL の特徴をそれぞれ説明し、PD による光検出の原理、LD と PD のレーザーパッケージへの実装方法について論述されている。

第 3 章では、VCSEL を三角波電流で線形的に電流駆動した場合、発振波長と光出力は線形的に変化し、距離が一定の場合、自己結合効果も周期的に生じる。この周期的に生じる自己結合効果の事を Mode Hop Pulse (MHP) と定義し、自己結合信号を利用した距離測定の基本原理について論述されている。

第 4 章では、VCSEL 端子電圧の変動を利用した距離測定の精度について論述されている。

端子電圧型自己結合レーザー距離センサの理論についての報告はあるが、装置を実際作成し、実験を行った報告はほとんどない。そこで、まず実験装置を作成し、距離測定を行い、測定精度について論述されている。

作成した端子電圧型自己結合レーザー距離センサで使用に適した VCSEL を見つける為、VCSEL の静特性、発振波長の温度特性等の試験を行った結果について、まず述べている。その後、VCSEL を用いた距離測定に必要な基本回路と自己結合信号の信号処理に必要な測定システムについて説明し、距離に対する MHP 周波数の測定結果、戻り光強度が距離の測定精度に与える影響、測定対象物の角度依存性について実験を行い調べた結果について論述されている。

VCSEL は、発振波長の単一性が良い為、光の干渉性が高い。自己結合レーザー距離センサは、光の干渉を利用したセンサの一種なので、VCSEL との相性は良い。そこで、MHP

を VCSEL の端子電圧から検出し、VCSEL の端子電圧から得た MHP を FFT で信号処理を行った。FFT を用いた信号処理は、精度は高いが、信号処理に時間がかかる。その為、端子電圧から得た自己結合信号を利用して測定した、距離の精度について論述されている。

第 5 章では、FFT より短時間で自己結合信号の信号処理を行う為、統計的信号処理として用いられる信号係数補正法に基づいた、デジタル信号処理方法を新たに提案し、実験を行った結果について論述されている。

信号係数補正法は、VCSEL パッケージ内に PD を設置した、特殊な VCSEL を用いた実験で、FFT を用いず、MHP の信号処理において測定精度を高める為、新たな信号処理方法として、以前行った研究で提案された信号処理法である。

端子電圧から得られる自己結合信号は、PD から得られる自己結合信号と比較するとホワイトガウスノイズ (WGN) が占める割合が大きく、従来の信号係数補正法では MHP の占有値を求める事ができなかった。そこで FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いて、信号係数補正法の統計的補正処理を、VCSEL 端子電圧の変動分の中に含まれる全ての信号に対して実行し、LD 駆動電流の 3 周期分で信号処理を行えるようになった結果について論述されている。

第 6 章では、信号処理に必要な MHP を駆動電流の 3 周期分から 1 周期分まで短縮する為、MHP の検出に必要な、新しい信号処理の方法を提案し、実験を行った結果について論述されている。

自己結合信号のリアルタイム信号処理を行うには、WGN を減らし、より多くの MHP を LD 駆動電流の 1 周期分の間に得る事が必要であった。

VCSEL を三角波電流で駆動した場合、発振波長は線形的に変化する為、周期的に干渉条件を満たし、MHP は周期的に等間隔で生じる。一方、WGN には周期性が存在しない。そこで、MHP の等間隔性を利用し、2 値化した MHP の論理積を求め、高調波が MHP 周波数の定数倍であることを利用し、MHP 信号を補正した。その結果、WGN のみ減らす事に成功し、自己結合信号のリアルタイム信号処理を可能とした。この MHP の信号処理デバイスとして、新たに ARM コアを内蔵した SoC (System on a Chip) タイプの FPGA を用い、その PL (Programmable Logic) 部と PS (Processing System) 部を利用した結果について論述されている。

第 7 章は総括で、本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題や展望について論述されている。

本研究で得られた新たな知見は、半導体レーザーの自己結合効果を利用した計測分野の発展に大きく寄与できるものと期待され、工学的に高い価値が認められる。以上の事から、当該論文が電気・材料工学専攻における博士 (工学) の学位のレベルを十分に満たしていると判定する。