

## 博士學位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

氏名	Tatsuya Ueno 上野 達也
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博 甲 第40号
学位授与	平成24年2月23日
学位授与条件	学位規程第3条第3項該当
論文題目	自己結合型レーザセンサの信号処理方法に関する研究 (Study on signal processing for self-coupling laser sensor)
論文審査委員	(主査) 教授 山田 諄 <sup>1</sup> 教授 森正和 <sup>1</sup> 教授 鳥井昭宏 <sup>1</sup> 准教授 津田紀生 <sup>1</sup>

## 論文内容の要旨

自己結合型レーザセンサの信号処理方法に関する研究  
(Study on signal processing for self-coupling laser sensor)

1970年代後半に半導体レーザにおける戻り光の活性層への再注入による発振光増大現象は三橋慶喜氏らによって「自己結合効果 (Self-coupling effects)」と名づけられ、ノイズとしての抑制対象ではなく積極的に利用する信号としての研究が始められた。レーザデバイスの発展と共に自己結合効果は、距離、振動、速度など様々な物理量計測で利用が検討され、国内外で多くの研究が報告されるようになったが、自己結合効果が本質的に内在するカオス的なノイズなどによる不安定性のため、産業分野での実用化が難しくセンサや計測器として普及しなかった。従来、干渉現象を利用した計測器は精密機器であり測定環境を整えた状態での主にオフライン計測が前提であったため、精度や信頼性などの高いノイズ耐性と高速な信号処理が要求されるインライン計測などの工業市場をはじめとした産業分野での利用には欠かせない信号処理技術が開発されてこなかったためである。

本論文では、自己結合型レーザセンサの産業分野での実用化を目指し、精度と測定速度を両立した信号処理及び物理量算出方法の開発と共に算出された値に対する信頼性を定量的に評価する方法を併せて提案するものである。これらの信号処理方法と信頼性評価方法は、共に2値化処理を施した信号とノイズの統計的特徴を利用することで精度と速度を両立したものである。

本論文は、9章から成り、第1章では、本研究の背景と動機、研究の推移とあらましについて記す。

第2章では、半導体レーザの特性とその自己結合効果について記す。半導体レーザの構造と自己結合効果型レーザセンサの特性に係る波長特性とスペクトル特性を複数のレーザで比較結果を示し、評価に用いるレーザデバイスを選択した。さらに半導体レーザの自己結合効果と自己結合効果型レーザセンサの信号に重畳するノイズについて記した。半導体レーザの戻り光ノイズの一つとして捕らえられてきた自己結合効果による干渉信号 (モードホップパルス: MHP) をその他の戻り光ノイズと区別し整理した結果は、本論文で提案する『信号計数補正法』と『信号有効性判定方法』の論理的な根拠になるものである。

第3章では、自己結合型レーザセンサでの物理量算出方法について説明する。まず、静的物理量である絶対距離の算出方法を説明し、本論文で用いる定在波表現が広く使われているドップラーシフトによる表現と本質的に同じであることを具体的な数値例を用いて説明する。次に、動的物理量の算出方法で、干渉原理を用いたセンサの中で半導体レーザを用いた計測固有の現象である「負のビート周波数」の発生原因とその課題及び解決方法を考案した『距離・速度算出方法』と併せて説明する。最後に自己結合型レーザセンサの信号であるMHPの計数値から直接算出できる距離・速度の算出方法に加え、工業市場などの産業分野でのニーズが多い振動振幅について考案した『統計的特徴を利用した振動振幅算出法』について記す。

第4章では、本論文で提案する『信号計数補正法』と『信号有効性判定方法』の論理的根拠となる2値化されたMHPとMHPに重畳するノイズが有する統計的特徴について説明する。第2章に記したMHPに重畳するノイズであるガウシアンホワイトノイズが2値化することでそのランレングスは幾何分布を、周期は幾何分布の重畳和を形成することを初めて明らかにした。

1 愛知工業大学 工学部 電気学科 (豊田市)

第5章では、第4章に記した2値化信号と2値化ノイズの統計的特徴を基にした『信号計数補正法』を記す。『信号計数補正法』は、2値化信号の度数分布から2値化による信号の歯抜けと分割を判別し信号計数値に補正を施す方法で、従来の信号処理の周波数解析であるFFTや単純信号計数法の課題を記した後、開発した種々の信号計数補正法を説明する。計数補正を施す際の基準の取り方や計数単位は、産業分野での利用を想定して劣悪な条件下での実測結果を基に課題解決に取り組みノイズ耐性を向上させてきた過程で検討されたものである。

第6章では、得られた2値化信号及び計数値が測定対象物の物理状態を反映した情報であるかを判定する『信号有効性判定法』を説明する。自己結合型レーザセンサは、測定対象物がなく干渉信号が発生しない場合でもレーザや回路に内在するノイズを信号として出力するため、得られた信号が「測定対象物の物理情報を含み信号計数補正法で物理量を算出できる信号」であるかの「信号有効性」を評価する方法が実用化には不可欠であり、『信号有効性判定法』は2値化工程で得られた度数分布を第4章に記した2値化ノイズの分布である幾何分布との相関を表す「決定係数」を用いて定量表現したものである。

第7章では、本論文で提案する信号計数補正法などを実測データと比較するために試作した評価システムを紹介する。また、自己結合型レーザセンサに必要なVCSEL(面発光レーザ)のパッケージを自ら設計・作製したため、VCSELの実装に使用した部品についても紹介する。

第8章では、各『信号計数補正法』に対応した測定結果を算出方法による結果の違いや課題の説明を併せて記す。本論文で提案する『信号計数補正法』と『信号有効性判定法』の理論を実測した結果と比較することで、産業分野での実用化に耐えうるノイズ耐性と信頼性を兼ね備えた信号処理方法であることを確認した。

第9章では、研究を総括し、今後の展望について記す。

上述のように、信号計数補正法及びその有効性判定方法、さらに信号計数値を用いた物理算出方法を体系的に研究・開発した本論文は、自己結合型レーザセンサの工業分野などの産業上での実用化に大きな展望をもたらすものである。

## 論文審査結果の要旨

本研究では、半導体レーザを用いた自己結合型センサの信号処理方法を新たに提案し、シミュレーションと試作機によるその性能評価について研究を行っている。

半導体レーザにおける戻り光の再注入による発光増大現象は、「自己結合効果」と呼ばれ、距離、振動、速度など様々な物理量計測に関する研究が多く報告されている。しかし、従来の信号処理方法である単純計数法は測定精度が悪く、高速フーリエ変換法は測定速度が遅いなど、多くの課題がある。その上、自己結合効果が本質的に内在するカオス的なノイズなどによる不安定性のため、産業分野での実用化が難しくセンサや計測器として普及しなかった。

そこで本研究では、自己結合型レーザセンサの産業分野での実用化を目指し、測定精度と測定速度を両立した信号処理方法及び物理量算出方法と、算出された値に対する信頼性を定量的に評価する方法を提案している。また、実測データを得るための評価システムを試作し、提案した信号処理方法の有効性を確認している。

本論文は、9章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、半導体レーザの特性とその自己結合効果について述べている。また、複数の半導体レーザの発振スペクトル特性を測定し、試作する評価システムに用いるレーザデバイスを選定している。

第3章では、自己結合型レーザセンサでの物理量算出方法について説明している。静的物理量である絶対距離の算出方法を説明した後、動的物理量である速度算出方法について説明している。自己結合型レーザセンサの信号であるMHP(Mode Hop Pulse)の計数値から直接算出できる距離・速度の算出方法に加え、振動振幅について考案された統計的特徴を利用した振動振幅算出法について説明している。

第4章では、2値化されたMHPとMHPに重畳するノイズが有する統計的特徴について述べている。MHPに重畳するノイズであるガウシアンホワイトノイズが2値化することでランレングスは幾何分布を、周期は幾何分布の重畳和を形成することを初めて明らかにしている。

第5章では、2値化信号と2値化ノイズの統計的特徴を基にした「信号計数補正法」について述べている。信号計数補正法は、2値化信号の度数分布から2値化による信号の歯抜けと分割を判別し、信号計数値に補正を施す方法である。計数補正を施す際の基準は度数分布の最頻値より階級値と度数の積である占有値の最大を用いた方が、計数単位は周期よりランレングスを用いた方がノイズに強いことを示している。これらは産業分野での利用を想定して劣悪な条件下でのノイズ耐性を向上させるために工夫されたものである。

第6章では、得られた2値化信号及び計数値が測定対象物の物理状態を反映した情報であるかを判定する「信号有効性判定法」について説明している。自己結合型レーザセンサは、測定対象物がなく干渉信号が発生しない場合でもレーザや回路に内在するノイズを信号として出力するため、得られた信号が測定対象物の物理情報を含み信号計数補正法で物理量を算出できる信号であるかを評価する方法が実用化には不可欠である。「信号有効性判定法」は2値化工程で得られた度数分布を2値化ノイズの分布である幾何分布との相関を表す「決定係数」を用いて定量的に表現したものである。

第7章では、提案した信号計数補正法などを実測データと比較するために、試作した評価システムを紹介している。評価システムは、投光・受光アナログ回路基板、搬送波発生用及び信号収集用DSP評価ボード、パーソナルコンピュータから成る。

第8章では、信号処理方法の理論を実測した結果と比較している。単純計測法に比べ計数補正を施すことにより平均誤差が1/10程度低減することを示している。また基準として最頻値より最大占有値を用いた方

が、計数単位として周期よりランレングスを用いた方がノイズに強いことなどが示されている。これらの結果、本研究で提案する信号処理方法は、実用化に耐えうるノイズ耐性と信頼性を兼ね備えた優れた方法であることを確認している。

第9章では、研究を総括し、今後の展望について述べている。

以上のように、本研究は自己結合型レーザーセンサの信号処理方法を新たに考案し、測定精度と測定速度を両立した優れた信号処理方法であることを明らかにする等、工学上高い価値を有するものと認められる。よって、本論文提出者上野達也氏は博士（工学）の学位を受けるのに十分な資格を有すると判定した。

（平成24年2月23日受理）