

氏 名	TRUONG CONG TUAN
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 1123 号
学位授与年月日	平成 31 年 3 月 20 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Study of 2D single-shot optical interferometry for high-speed surface profilometry (高速物体表面形状計測のための 2 次元シングルショット光干渉計の研究)
論文審査委員	委員長 准教授 塩田 達俊 委員 教授 門野 博史 委員 准教授 吉川 宣一 委員 教授 伊藤 和人

論文の内容の要旨

Inspecting goods or products at the time of production is required to prevent defects in manufacturing process for quality assurance. It also increases the productivity because the inspection and manufacturing are simultaneously performance. Therefore, there is a huge demand to develop a real-time measurement system for the inline inspection, which required a high-speed volume measurement, μm order resolution in the range of ten mm order, non-destructive and non-contact, available to measure in variable environments, and strong for vibration. Several techniques include time of fly, confocal sensor, triangulations, laser interferometry, and low-coherence interferometry, are the candidate to meet the above requirements. However, resolution of time of fly has limitation of mm; measurement range of confocal sensor and laser interferometry are limited in hundred nm and mm, respectively; triangulation is restricted by blind region. Therefore, the low-coherence interferometry has become potential candidate for inline inspection in industry. The 2D single-shot imaging based on low-coherence interferometry has been introduced for industrial application. The axial measurement range of single interference order of a 2D image, achieved by 2D single-shot interferometry, was limited to a millimeter order, due to the restrictions of the total pixel number of the 2D image sensor (thousand pixels) and the axial resolution (micrometers order). To extend the axial measurement range of 2D single-shot interferometry, the incoherent optical frequency comb (OFC), which had hundreds GHz free spectral range (FSR) to match with a millimeter axial range of single 2D image, was proposed. However, the incoherent OFC, which generated by placing an Fabry-Perot etalon after broadband light source, suffered from energy loss causing low sensitivity in the 2D single-shot system.

Hence, in this research, we develop a pseudo OFC interferometry to expand the axial measurement range and to increase the usage energy efficiency of 2-D single-shot interferometry. The pseudo OFC interferometry is realized by a discrete frequency swept laser. In which, the frequency is oscillated in frequency-domain at hundreds gigahertz step and scanned in time-domain at nanosecond step. By setting the sweep repetition time is sufficient faster than shutter speed of CCD camera, the discrete frequency swept laser can be utilized for 2D single-shot pseudo comb

interferometry for expanding the axial measurement range. At each instant, as the entire source energy is concentrated in one comb line, the generated pseudo OFC interferometry has high energy efficiency for metrology, compared to the conventional incoherent OFC.

In additionally, we also proposed the axial zoomable 2-D single-shot interferometry to vary the axial measurement and to increase usage energy efficiency of conventional 2-D single-shot interferometry. In which, the etalon is omitted, the Spatial Phase Modulator (SPM) is utilized for tuning the measurement range of 2D single-shot system. Thus, the resolution is improved by hundreds nm bandwidth in visible region of SC light source.

From the explanation of the research background, the thesis's objective issues:

Expand the axial measurement range and increase the energy usage efficiency of the conventional 2D single-shot interferometry.

From the research objective, we create the research chart as follow:

- Zoomable axial measurement range and increase the usage energy efficiency of 2D single-shot interferometry by using SPM.

- Expand the axial measurement range and enhance the energy efficiency of 2D single-shot interferometry by developing a discrete frequency swept laser for a pseudo OFC interferometry. Therefore, the thesis is classified into 5 chapter:

Chapter 1 – General Introduction: this chapter mention the requirement of inline inspection for industrial, which is target of this research. From these requirements, several candidate technics are listed to make the comparison. Accordingly, the low-coherence is pointed out as a potential candidate to meet al requirements. The low-coherence interferometry in time-domain and frequency-domain, are introduced as a background of this research. The of 2-D single-shot system, which base on the time-domain low-coherence interferometry and already developed by our group, is introduced. The remained problems of the conventional 2-D single-shot to the motivation of the thesis are presented. Finally, research objective and the outline of the thesis will be also briefly described.

Chapter 2 – Development of 2D zooming single-shot imaging: the axial zoomable 2-D single-shot interferometry is proposed to vary the axial measurement range as well as improve usage energy efficiency of conventional 2-D single-shot interferometry. Theory of grating (SPM) leads to the operation principle and optical setup of system is presented. Several experiments were performed to show the efficiency of proposed system: the measurement range of 2-D single-shot system can be changing from approximate 200 μm to 3500 μm , the tomography resolution is achieved at approximate 2.5 μm , the energy efficiency of grating (SPM) is mentioned to comparison to the energy loss of etalon of previous report. A flexibility of the 2-D zooming single-shot interferometry is also demonstrated for profilometry and tomography of coin sample, multi gauge block, and multilayer-glass sample, respectively.

Chapter 3 – Realize a convenience type of pseudo optical frequency comb interferometry by a discrete frequency swept laser: this chapter shows the development of discrete frequency swept laser. The cavity of the proposed light source consists of semiconductor amplifier as a lasing medium, a frequency tuning part is combination of polygon mirror scanner and grating, and a frequency step controller. In which, the frequency is oscillated at hundreds giga-hertz step in frequency-domain and scanned at nanosecond step in time-domain. The sweep repetition rate (SRR) is achieved at approximate 29 kHz corresponds to the sweep repetition time of approximate 34 μs . Therefore, the discrete frequency swept laser can be utilized for 2D single-shot pseudo comb interferometry, where shutter speed of CCD camera is typically controlled at 10 μs second order. At each instant, as the entire source energy is concentrated in one comb line, the generated pseudo comb has high energy efficiency for metrology, compared to the conventional

OFC, where the energy is separated in several comb lines or longitudinal frequency modes. The intensity pseudo comb peak and average power is 12dB and 9 dB higher than that of filtered-comb of conventional 2-D single-shot system, respectively. The proposed light source with the frequency step of approximate 200 GHz and the SRR of 29 kHz is demonstrated, showing an effectiveness for the axial range expansion of 2D single-shot industrial profilometry and tomography in several tens millimeters.

A crystal $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (KTN) optical beam scanner is also mentioned to improve the SRR of a convenience type of discrete frequency swept laser. Instead of 29 kHz of SRR of polygon scanner, 100 kHz sweep repetition rate of discrete frequency swept laser is achieved by KTN scanner.

Chapter 4 – High power pseudo optical frequency comb interferometry: In this chapter a new approach of lasing medium and frequency scanner using Pr^{3+} doped to fiber and Acousto Optic Deflector (AOD) are presented, respectively. The wavelength can be scanned within several nm (from 636 nm to 638 nm). The average power is measured at approximate 29 mW with stability of approximate $\pm 3\%$. The initial experimental results show the potential of these approach for generating high power pseudo comb. For the future work, the system's setup needs to be considered to expand the wavelength scanning range and enhance the average power of the system.

Chapter 5 – Conclusion and future work. A summary of my research work and the future work of pseudo comb light source are discussed.

論文の審査結果の要旨

本学位論文審査委員会は、平成 31 年 2 月 6 日に論文発表会を開催し、論文発表、質疑応答および論文内容の審査をおこなった。以下に審査結果を要約する。

ものづくりの製造現場において、例えば機械加工品やプラスチック成形品のような製品表面のキズブツ検査や内部構造の品質を保証することは、製造や組み立て工程後の不良を防ぐために重要である。特に短時間に多数の製品を生み出す製造ライン上で全数検査を行うことは、製品の信頼性が飛躍的に向上するうえに、製造と検査が同時に行えて生産性が向上するために、多くの産業分野で全数検査を可能にする検査技術が求められている。ここで、製品表面形状の全数検査を実現するためには、10 ミクロン以下の分解能、非破壊・非接触、振動に強いといった性能が必要になるが、特に製造ラインにおいて計測対象の物体は制御外に振動していることが多く、ミクロン精度を求める形状計測の精度劣化を招く。ミクロンオーダーの間隔で数百から数千の測定点の表面形状を同時に高速測定する 2 次元シングルショット光形状計測法は、振動環境下においても高い精度で表面形状を検査できる技術である。そこで、本学位論文では 2 次元シングルショット光形状計測法の高機能化のために、特に計測レンジと感度についての性能を向上するための光システムを提案し、実験的に評価したものである。

本学位論文で検討した 2 次元シングルショット断層計測法は具体的には、時間領域の低コヒーレンス光学干渉による物体の距離計測を空間並列的に行うものである。時間領域の低コヒーレンス光学干渉とは、スペクトルが広帯域な光源を 2 光路で構成される光学干渉計に導入し、物体に照射するとは異なる光路を走査したときに、2 光路の距離差が一致した際のみ干渉波形が得られるものである。これにより参照光路を根拠に物体の位置を把握できるものである。光学干渉計の 2 光路の一方に空間位相変調器を用いて伝播光路長を空間的に変調し、変調された伝播光路長は検出器の 2 次元イメージセンサの 1 次元方向に展開しつつ 2 次元的に照射され、計測物体に照射した戻り光を同じイメージセンサの同軸方向に拡大入射し、他の軸方向は単に物体と結像系とすることで物体の深さ方向の 2 次元断層像を干渉波形として 2 次元イメージセンサにより撮像することが可能となる。物体側に注目すれば、物体には光軸と垂直な物体表面方向に線状に光を照射するので、物体表面の 1 次元と深さ方向の 1 次元の 2 次元断層像となる。この 2 次元シングルショット断層計測法は、深さ方向空間を面内方向に並列に同時測定できるため、シャッター速度または露光時間を高速に行えば、振動に極めて強い表面の検査が可能になる。しかし、イメージセンサを用いることにより、一般に深さ方向の距離分解能と計測範囲の比が、イメージセンサの一方向のピクセル数により制限されるという問題がある。光周波数コムを光源とした干渉は、コム干渉とも呼ばれ、物体の深さ方向の位置に応じて一定周期で繰り返し干渉波形を与える。つまり、表面形状計測において、単なる低コヒーレンス干渉が距離差のゼロ点のみに感度があるのに対して、繰り返して信号が得られるために、計測範囲を拡大することができる。一般に光周波数コムを 2 次元シングルショット断層計測法の光源に用いれば、深さ方向の 2 次元断層像を重ね書きした画像が得られることになるが、表面形状計測においてはある奥行方向 1 次元内に表面は 1 箇所であるために、実際に画像が重なることなく広範囲の 2 次元断層像を撮像できることを示した。さらに、参照光路中の空間位相変調器による単位面内方向長さあたりの光路長変調量を調整することで、普及しているカメラの様に、2 次元断層画像の倍率を変えることができることを示した。実験では、空間位相変調器に回折格子を用いた 1 次元方向の光散乱表面を用いて 2 次元イメージセンサと間に $4 - f$ 光学系の配置による回折格子表面との結像系をレンズにより構成して構成した。回折格子表面からの光は伝播時間差を線形に 2 次元イメージセンサの 1 次元方向に射影する様に展開した。複数発生する回折次数を選択することで、回折格子

表面の傾斜角を変え、結果として2次元イメージセンサまでの伝播時間の変化率を変えることで深さ方向の計測範囲つまり画像の光学倍率を調整できること示した。

前述の振動に強い検査のために2次元イメージセンサのシャッタースピードを高速化する場合、センサの積分時間が短くなるために最少受光パワーが大きくなる問題が生じる。この問題を解決するためには光源のパワーを増大させることが有効であるが、既存の半導体を用いたコム発生器では平均出力に限界があるし、モードロックした光周波数コムは時間波形は超短パルスとなり、短時間に高エネルギーが集中するために測定物体への損傷の心配が生じる。そこで、できるだけ簡便に高い光パワーの光コム干渉の光源を得るために、光コム干渉が光源の時間領域での自己相関関数であることから縦モード間の位相関係に依存しないことを利用して、敢えて離散的に波長を走査できる離散波長可変レーザーを開発した。周波数軸上では等間隔に走査ステップをとるが、走査時間の1周期は2次元イメージセンサのシャッタースピードより速く設定しておけばよい。こうすることで、疑似的に光コム干渉が得られることを実験的に示し、光源パワーを増大させて、検出感度を向上させることができることを示した。

本学位論文の内容は、ものづくりの製造現場において、製造や組み立て工程後の不良を防ぐために重要な実験結果であり、学術的な新規性と独創性を有す研究成果である。

以上より、学位論文審査委員会は、本学位論文が博士（工学）の学位論文としてふさわしいものであると認め、合格と判定した。