

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560517

研究課題名(和文) レーザ光の光周波数掃引法による高精度で非接触な物体形状計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of highly accurate non-contact object profiling system by using optical frequency-swept laser source

研究代表者

飯山 宏一 (Iiyama, Koichi)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：90202837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：光周波数が掃引されたレーザ光源を用いるFMCWセンシングシステムを用いて、距離測定精度100μmの光距離センサを開発した。本システムでは、レーザ光の光周波数掃引の非線形性により距離測定精度が大きく劣化する。そこで、非線形性の影響を除去できる同期サンプリング法を開発するとともに、測定信号に補間法を適用することにより、標準偏差10μm以下の距離測定精度を達成した。このシステムを用いて工作加工物や硬貨の形状計測を行い、段差150μm以下の形状計測が可能であることを実証した。また、光周波数掃引が線形となるようにレーザ光源の変調波形を補正する方法を考案し、その有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：Optical ranging system with 100um measurement accuracy has been developed by utilizing FMCW sensing system using an optical frequency-swept laser source. The measurement accuracy of the system is seriously affected by nonlinearity in the optical frequency sweep. Highly accurate measurement system with the standard deviation of less than 10um was realized by developing synchronous sampling method to eliminate the effect of nonlinear optical frequency sweep and by applying interpolation to measurement result. The developed system is then used for three-dimensional object profiling, and we have succeeded profiling of objects such as coins with the steps less than 150um. In addition, we have developed a method to modify and optimize modulation waveform of a laser to achieve linear optical frequency sweep.

研究分野：光電子計測工学

キーワード：光干渉計測 FMCW 距離計測 物体形状計測 レーザの周波数変調

1. 研究開始当初の背景

レーザ光を用いた光距離センサは、遠隔計測が可能であること、光の干渉を利用することにより高感度測定が可能であること、強い電磁波環境下でも影響を受けずに測定が可能であること、測定対象まで光ファイバを用いてフレキシブルに導光可能であること、などの利点を持つ。このことから、光距離センサは、大型建造物の形状測定、ロボットにおける距離センサ、工作機械における位置制御用計測、プリント基板部品実装時のリアルタイム表面凹凸測定や大型医療機器（陽子線癌治療システムなど）における治療時の照射位置計測などへの応用が検討されている。

これらの応用分野においては、光距離センサに求められる最も重要な性能は、距離測定精度である。特に、電子部品実装時には電子部品が小型化しているため、1 mm 未満の高い距離計測精度が要求される。

2. 研究の目的

本研究では、100 μm の距離計測精度を持つ光距離センサを開発するとともに、物体形状計測へ応用することを目的とする。光距離センサには多くの方式があるが、本研究では、光周波数が掃引されたレーザを光源に用いる FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) センシングシステムを利用して、上記性能を満足する光距離センサを実現する。さらに、レーザ光を空間的に走査して測定物体に照射することにより、物体の 3 次元計測システムを構築する。

3. 研究の方法

FMCW センシングシステムでは、レーザ光源の光周波数を時間的に線形に掃引し、参照光と測定物体からの反射光の干渉信号を測定する。光周波数が掃引されているので、干渉信号は参照光と反射光の距離差（時間差）に比例するビート周波数を持つ。そのため、干渉信号をフーリエ解析してビート周波数を測定することにより、測定対象までの距離を測定することができる。

FMCW センシングシステムでは、レーザ光の光周波数の掃引は線形でなければならないが、一般には光周波数掃引は非線形となり、距離測定精度が大きく劣化する。そこで、以下の方法により距離測定精度を大きく向上させ、精度 100 μm を実現する。

- ・ 光周波数掃引の非線形性をキャンセルする測定方法の確立
- ・ 信号処理による距離測定精度の向上
- ・ 光周波数掃引の線形化のための、レーザ光源の変調波形の最適化

高精度の距離測定が可能となった後、レーザ光を空間的に走査して、物体の形状測定システムを構築・実証する。

4. 研究成果

(1) システム構成

図 1 に、構成したシステムを示す。光源には波長 1550 nm 帯の DFB レーザを用い、その注入電流を三角波で変調することにより、光周波数を掃引した。変調周波数は 100 Hz である。DFB レーザからの出射光は、光ファイバカップラ FC1 により 2 分割される。FC1 を直進した光は FC2 により 2 分割され、一方は参照光として直接バランス光検出器に入射し、他方は測定対象に照射され、その反射光（信号光）がバランス光検出器に入射する。バランス光検出器で生じた参照光と信号光との干渉信号を、AD 変換後にコンピュータに取り込んで FFT 解析することにより距離を測定する。FFT 解析に際しては、ハニング窓関数を適用した。

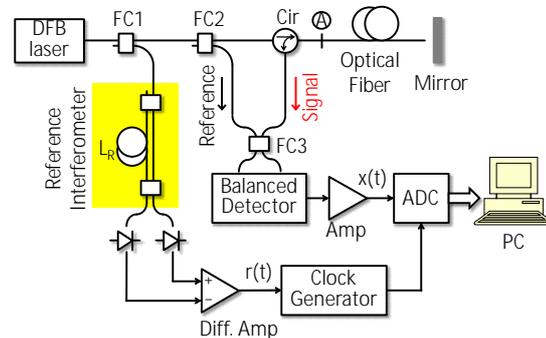


図 1：システム構成図

(2) 同期サンプリング法

図 1 の A 点に 5 m 長の光ファイバを接続して測定対象とし、一定のサンプリング間隔で干渉信号を取得したときの測定結果を図 2 に示す。本来は長さ 5 m の箇所のみ信号が現れるはずであるが、5 m 以外にも信号が現れており、正確な距離測定ができていない。これは、DFB レーザの光周波数掃引の非線形性によるものである。本研究では、DFB レーザの注入電流変調により光周波数を掃引しているが、DFB レーザの熱抵抗などによる応答遅れのため、三角波で注入電流を変調しても光周波数掃引は非線形になってしまう。

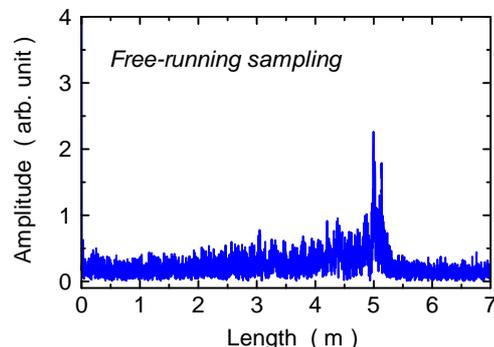


図 2：等サンプリング間隔時の測定結果

そこで、光周波数掃引の非線形性をキャンセルする測定方法を構築した。その実現のた

めに、図1のFC1で分岐した光を参照干渉計に入射し、その干渉信号をTTL信号に変換し、このTTL信号を用いて距離測定信号をAD変換し、FFT解析する。このとき、TTL信号も光周波数掃引の非線形性の影響を受け、その瞬間周波数、つまり、サンプリング間隔は不等間隔となる。このTTL信号で距離測定の干渉信号をサンプルすることにより、非線形性の影響を取り除くことが可能である。このサンプリング方法を、本研究では「同期サンプリング法」と呼ぶ。

同期サンプリング法による測定結果を図3に示す。長さ5mの筒所にデルタ関数上の鋭い信号が測定されており、正しく距離が測定されていることがわかる。

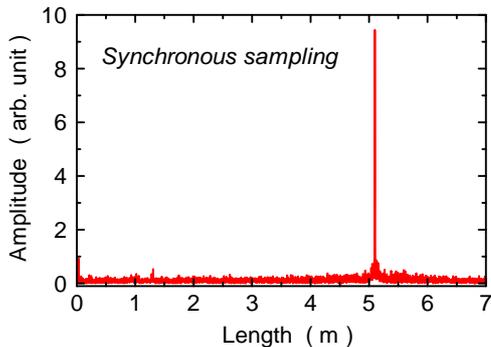


図3：同期サンプリング法による測定結果

(3) ピーク補間による測定精度向上

さて、FFT解析は有限のデータ数に対して演算されるため、図3の結果における横軸の点は離散的であり、必ずしもピークの場合が得られるとは限らない。その結果、微小な距離変化に対して追従できない。

そこで、図3の測定結果のピーク付近を補間することにより、真の位置を推察した。ピーク位置ではグラフの傾きがゼロとなることから、図3のピーク付近の微係数がゼロとなる距離を真の位置と推察した。

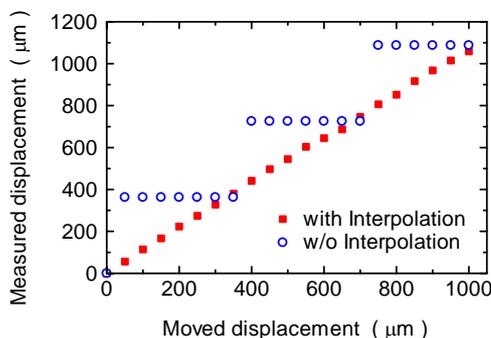


図4：微小変位に対する測定結果

図4は、測定物体の位置を50μmずつ変化させたときの測定距離の追従性の結果であり、は補間を使用しない場合の測定結果、は補間を使用した場合の測定結果である。補間を使用しない場合は、測定された距離が

離散的であるが、これはFFT演算による距離間隔である。一方、補間を使用した場合は変位に対して線形に距離が測定されており、補間法が有効であることがわかる。

図5は、補間法を使用した場合の、1000回の距離測定のばらつきを示している。ほぼ正規分布のばらつきであり、標準偏差は7.6μmと、高い再現性が得られていることがわかる。以上の結果より、同期サンプリング法とピーク補間の併用により、高精度な距離測定が実現できたといえる。

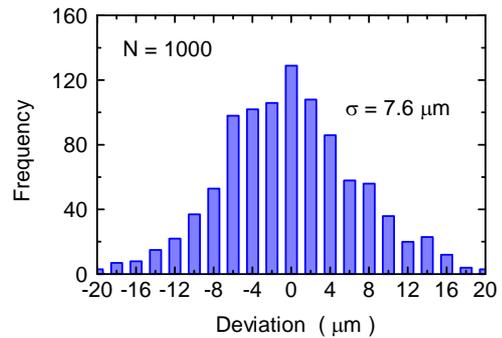


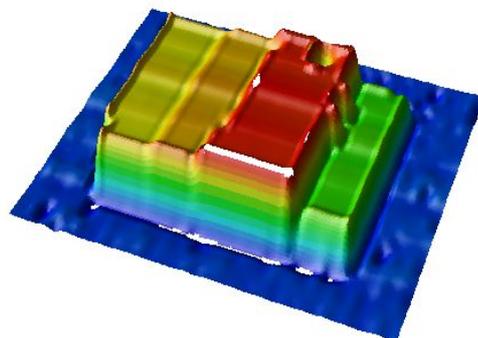
図5：測定の再現性

(4) 物体形状計測

上記のシステムにより高精度の光距離センサが実現できたので、3次元物体形状への応用を検討した。システム構成は図1と同じであるが、A点からレーザー光を空間に放出しビームスキャナにより2次元的にレーザー光を走査することにより、物体形状計測を実現した。なお、ビームスキャンによる光路長差の変化は、プログラムで補正している。



(a) 測定対象(段差は1.3 mm、2.9 mm、6.8 mm)



(b) 測定結果

図6：工作加工物の物体形状計測結果

図 6 に、アルミニウムの工作加工物の物体形状計測の結果を示す。測定対象は同図(a)に示すように段差が 3 か所あり、段差は左から 1.3 mm、2.9 mm、6.8 mm である。測定結果は同図(b)に示すように、3 か所の段差が正しく測定されていることがわかる。

図 7 は、100 円硬貨の裏面の形状計測結果である。100 円硬貨の「100」の刻印部の段差は 150 μm である。同図より、「100」の刻印がはっきり測定されており、本システムが高い測定精度を持つことがわかる。



図 7：100 円硬貨の形状計測結果

(5) レーザ変調波形の最適化

上記のシステムは、DFB レーザの光周波数掃引の非線形性を残したまま、サンプリング方法の最適化により非線形性の影響を取り除くシステムである。簡便で有効な方法であるが、参照干渉計から得られた TTL 信号と距離測定信号の間にはサンプリング定理が満足されなければならない。つまり、測定可能距離は参照干渉計の光路長差で決定される。一方、DFB レーザの光周波数を線形に掃引できれば、測定可能距離に制限はなくなり、応用範囲は広がる。

そこで、光周波数掃引の線形化を目指して、DFB レーザの変調波形の補正についても研究を行った。

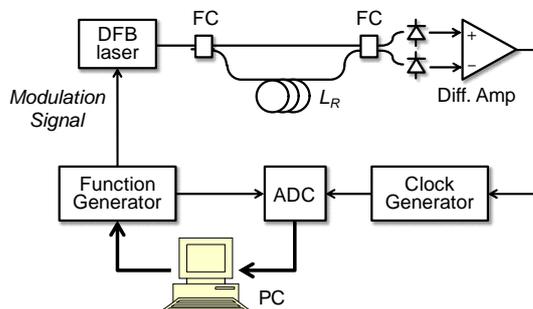


図 8：変調波形最適化のためのシステム構成

図 8 にシステム構成を示す。まず、発振器から三角波を出力して DFB レーザを変調して光周波数を掃引し、干渉波形を得る。この干渉波形を TTL 信号に変換して発振器の波

形を AD 変換してコンピュータに取り込む。このとき、光周波数変化が小さな領域では TTL 信号周期は遅くなり、サンプル点間の電圧変化分は大きくなる。一方、光周波数変化が大きな領域では TTL 信号周期は速くなるため、サンプル点間の電圧変化は小さくなる。そこで、サンプルされた三角波を発振器に送信して DFB レーザの変調波形とすることにより、光周波数掃引が線形化される。この操作を数回繰り返し、変調波形を最適化して光周波数掃引の線形化が可能となる。

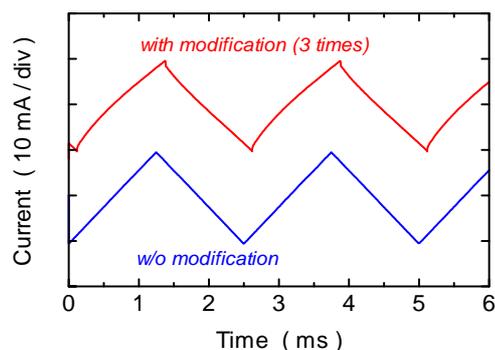


図 9：光周波数掃引の線形化のための変調波形の補正結果

図 9 に、提案した方法により補正された変調波形を示す。変調振幅は 20 mA、変調の繰り返し周波数は 400 Hz である。補正前は通常の三角波であるが、3 回補正後は変調波形が多少丸みを帯びるとともに、三角波の折り返し直後で波形が大きく補正されていることがわかる。

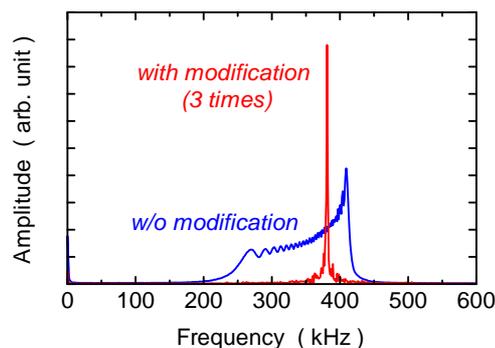


図 10：補正変調波形による距離測定結果

図 10 は、図 9 に示した補正変調波形を用いて DFB レーザを変調した際の、3 m 長の光ファイバに対する測定結果である。横軸は周波数で記載してあるが、測定距離に相当する。補正前の測定結果は大きく広がり正確な距離測定は不可能であるが、3 回補正後は 1 本の鋭い信号のみが測定され、正しく距離が測定されていることがわかる。

以上の結果より、提案した変調波形の補正方法は、高精度な距離測定に非常に有効であるといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

G. Li, T. Maruyama, K. Iiyama: “Over 10 GHz Lateral Silicon Photodetector Fabricated on Silicon-on-insulator Substrate by CMOS-compatible Process”, Japanese Journal of Applied Physics., vol. 54, no. 4S, pp. 04DG06(4 pages) (2015), 査読有.

DOI:10.7567/JJAP.54.04DG06

H. Morino, T. Maruyama, K. Iiyama: “Reduction of Wavelength Dependence of Coupling Characteristics Using Si Optical Waveguide Curved Directional Coupler”, Journal of Lightwave Technology, 32(12), pp. 2188-2192 (2014), 査読有.

DOI: 10.1109/JLT.2014.2321660

G. Li, T. Maruyama, K. Iiyama: “Low-propagation-loss Ta₂O₅ optical waveguides on silica substrate”, Japanese Journal of Applied Physics, 53(4), vol. 53, no. 4S, pp. 04EG12 (4 pages) (2014), 査読有.

DOI:10.7567/JJAP.53.04EG12

K. Maekita, T. Maruyama, K. Iiyama: “GHz response of metamorphic InAlAs metal-semiconductor-metal photodetector on GaAs substrate”, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53, no. 2S, pp. 02BC16 (5 pages) (2014), 査読有.

DOI:10.7567/JJAP.53.02BC16

G. Li, Y. Hashimoto, T. Maruyama, K. Iiyama: “High-efficiency optical coupling to planar photodiode using metal reflector loaded waveguide grating coupler”, Optical and Quantum Electronics, vol. 45, no. 7, pp. 657-663 (July 2013), 査読有.

DOI: 10.1007/s11082-013-9674-4

〔学会発表〕(計 53 件)

Nor Azlinah Binti Md Lasam, Koichi Iiyama, Takeo Maruyama, Yosuke Kimura, and Nguyen Van Tu: “Linearization of nonlinear beat frequency in FMCW interferometry through waveform modifying technique”, 2014 2nd International Conference on Electronic Design (ICED 2014), Penang, Malaysia, (August 21, 2014).

木村洋介、五十嵐彬宏、Nor Azlinah Md Lazam、Nguyen Van Tu、丸山武男、飯山宏一: “FMCW 光センサシステムによる物体形状計測”、電子情報通信学会 2014 年ソサイエティ大会、C-3-47、徳島大学、徳島県徳島市 (2014 年 9 月 26 日)

五十嵐彬宏、木村洋介、Nguyen Van Tu、Nor Azlinah Md Lazam、丸山武男、飯山宏一: “FMCW 光距離センシングシステムを応用した物体形状計測”、平成 26 年度電気関係学会北陸支部連合大会、H7、富山高等専門学校、富山県富山市 (2014 年 9 月 11 日)

K. Iiyama, T. Shimotori, R. Gyobu, T. Hishi-

ki, T. Maruyama: “10 GHz bandwidth of Si avalanche photodiode fabricated by standard 0.18 um CMOS process”, 19th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2014), TU4C-3, Melbourne, Australia, (July 8, 2014)

木村洋介、五十嵐彬宏、Nguyen Van Tu、Nor Azlinah Md Lazam、丸山武男、飯山宏一: “FMCW 光距離センサの距離測定精度の検討”、電子情報通信学会 2014 年総合大会、C-3-28、新潟大学、新潟県新潟市 (2014 年 3 月 20 日)

木村洋介、丸山武男、飯山宏一: “FMCW センシングシステムにおける微小変位測定の検討”、平成 25 年電気関係学会北陸支部連合大会、D-6、金沢大学、石川県金沢市 (2013 年 9 月 21 日)

T. Shimotori, K. Maekita, R. Gyobu, T. Maruyama, K. Iiyama: “Optimizing interdigital electrode spacing of CMOS APD for 10 Gb/s application”, 18th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2013), MM1-3, 京都府京都市 (July 1, 2013).

木村洋介、吉本大祐、丸山武男、飯山宏一: “FMCW センシングシステムにおける測距精度に関する検討”、平成 24 年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会、16p-D-9、富山県民会館、富山県富山市 (2012 年 11 月 16 日)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: スロット導波路及び光集積回路

発明者: 丸山武男、飯山宏一、森野久康

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許公開 2014- 164273

出願日: 2013 年 2 月 27 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

飯山 宏一 (Iiyama, Koichi)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号: 90202837