

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04095

研究課題名（和文）FMCW-DH法による多波長絶対変位計測及び無変位UV接着システムの開発

研究課題名（英文）Development of multi-wavelength absolute displacement measurement and displacement-free UV adhesion system using FMCW-DH method

研究代表者

横田 正幸（Yokota, Masayuki）

島根大学・学術研究院理工学系・教授

研究者番号：80323335

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：FMCW-DHにおいて、3波長による3次元形状計測を実施し、誤差要因の解明やその回避方法を考案した。また、光源の周波数変調時における非線形性を実験により定量的に検出し、数値計算により誤差への影響を調べた。更に、GPUを用いた並列計算によるホログラム再生の高速化を検討し、通常計算よりも25倍以上の高速化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

FMCW法を導入したデジタルホログラフィ法は、空間周波数面での情報を低減することなく、時間周波数面においてホログラムを多重記録する技術であり、本法に展開による多波長形状計測やそれを基にした絶対変位計測法は、軸外し記録等の方法に比べて優位な結果を与えるものである。また、FMCW-DH法は信号処理方法や誤差要因、その多重化による応用展開などは余り研究されておらず、本研究で得られた知見は今後、同法の展開において非常に有益な知見を与えるものと思われる。

研究成果の概要（英文）：We have conducted 3D shape measurement of a step-object by using three wavelengths method in FMCW-DH, and clarified the error factors, and devised a method to avoid them. Non-linearity occurring in frequency modulation of the light source was quantitatively detected experimentally, and its effect on the error for 3D profile measurements was investigated numerically. Furthermore, we investigated the speed-up of hologram reproduction by parallel computation using GPUs, and achieved a speed-up of more than 25 times faster than that of normal computation.

研究分野：光計測

キーワード：FMCW 多重記録 多波長法 マルチスケール計測 マルチモーダル計測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

非接触の変位計測法としては、モアレ法や格子投影法、スペックル相関法があるが横分解能や立体面の計測に難を有する。また、レーザ変位計や光パルス法は点計測法であり、白色光を含む干渉計は粗面への適用が難しい。光周波数コムによる絶対変位計測は粗面適用性に難があり、複雑・高価な光源は産業用途に向かず、現状では粗面を含む立体面の3次元絶対変位計測を可能とする有効な方法は無く、産業界ではUV接着剤の塗膜硬化解析、接着部材位置ずれの評価やその対応に苦慮している。

以上を鑑み、申請者はDH変位計測により塗膜乾燥/硬化を解析するDH逐次記録法を世界で初めて提案し装置も実用化した。DH法では物体のレーザ反射光と参照光から成る干渉縞(ホログラム)をCCDで記録し、回折計算で得た位相情報による変位計測が実施できるが、波長以上の変位に対する位相不確定の問題や参照面無しでの絶対変位計測ができない欠点がある。

2. 研究の目的

本研究の目的はDH+FMCW法による絶対変位計測法の確立と、これを信号検出系とした無変位接着システム開発により広く産業界に貢献することである。提案法ではレーザ光を周波数変調するFMCW技術導入により時間周波数面でのビート(うなり)周波数多重化が可能になる。具体的には、干渉信号から検出されるビート周波数が参照光と物体光間の光路長差に依存することを利用して光源の多重化と測定対象(部材と接着塗膜)の分離解析を行う。本法では複数光源からのレーザ光は同一光路を経るため、振動、空気揺らぎ等の外乱の影響を相殺した二波長法による形状計測を可能にし、逐次記録による形状差から絶対変位計測を行う。このため、多波長による形状計測法の確立とその実施、FMCW-DH法における信号処理の高速化の為にGPUを用いた高速計算法の検討、また、光源の周波数掃引時に生じる非線形性が測定結果に与える影響の検討、を柱として研究を行う。

3. 研究の方法

(1) 多波長を用いたFMCW-DHによる絶対変位計測

絶対変位計測の前段階として三波長を用いた多波長形状計測を実施した。Fig.1の光学系における光源数を $N=3$ とし、中心波長が $\lambda_1=784.33$ nm, $\lambda_2=784.46$ nm, $\lambda_3=783.41$ nmの3つのLDを用いた。各LDに対する周波数変調幅は、それぞれ $\Delta f_1=29.75$ GHz, $\Delta f_2=19.50$ GHz, $\Delta f_3=10.27$ GHzとした。この実験では、レーザ強度補償器を導入し、各LDの周波数変調中の光強度変化を7%以内に低減した。干渉計部では、物体光路長と参照光路長をそれぞれ $r_O=287$ mmと $r_R=702$ mmとした。撮像素子として、画素数 1024×1024 px, 画素サイズ 13.68 mm \times 13.68 μm^2 の高速CMOSカメラを用い、時系列ホログラムを2000 fpsで1.0 s間記録した。

測定物体はオプティカルフラット上に3つのゲージブロック(GB)を並べて構成し、異なる3つの段差(1.00 mm, 0.90 mm, 0.10 mm)を持たせた。3つの段差の内、1.00 mmの段差は測定用の高さであり、その他の段差は合成波長の校正用として使用した。

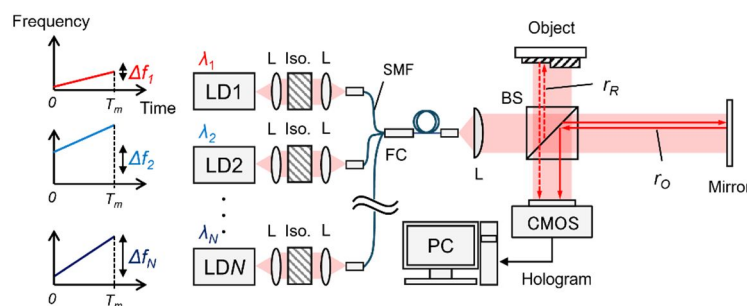


Fig. 1 多波長 FMCW-DH の光学系。

(2) GPU を用いた信号処理の高速化の検討

Fig. 2 に示すように、物体面と参照ミラー面は、それぞれイメージセンサ面から l_o と l_r の距離にある。シミュレーションでは、物体面を $N_o=64 \times 64$ 画素、イメージセンサ面を $N=512 \times 512$ 画素とし、各物体画素から $\lambda=800$ nm に相当する球面波が放射される。イメージセンサ面に向かって伝播する物体光波は、すべての球面波を加算することで計算できる。参照光と球面物体光波を重ね合わせることで、1枚のホログラムを算出する。

FMCW 法では光周波数掃引された光源に対する干渉縞（ホログラム）を求めるため、各時間 t における干渉縞強度 I はカメラのフレームレートよりも十分短い露光時間内で時間平均して計算する。GPU には多数の計算コアが搭載されており、それぞれのコアが並列計算を行うことができます。本研究では、ホログラム上の 1 画素の計算を GPU（Geforce RTX3060）の 1 つの計算コアで行う並列計算を応用し、数値計算を高速化した。

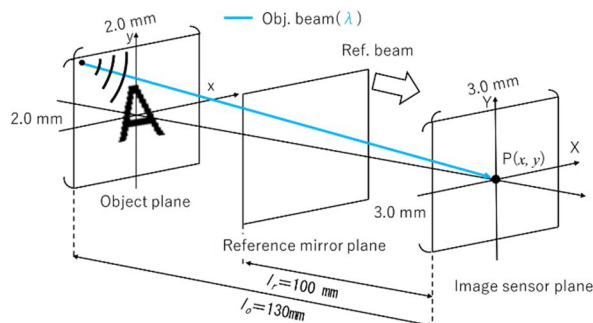


Fig. 2 ホログラム計算用の座標系.

(3) 半導体レーザーの周波数掃引時における非線形性の影響に関する検討

FMCW を実施する際に光源である半導体レーザーの光周波数掃引時における非線形性の周波数幅 Δf 依存性を調べるため、 $\Delta f = 9.778\text{GHz}$ 、 20.53GHz 、 27.86GHz 、 38.62GHz の場合に軸外し記録配置を用いて一定時間間隔で時系列ホログラムを記録した。光源の周波数変化は、カメラで記録した時系列ホログラム（干渉縞）を 2 次元フーリエ変換することから得られた位相変化を用いて評価した。1 枚のホログラムから位相を取得するために、軸外し記録を採用した。光源にはファブリペロー型半導体レーザー（LD）を用い、測定対象はミラーとした。ホログラムの撮影には 1024×1024 画素、画素サイズ $13.68 \times 13.68 \mu\text{m}^2$ の高速 CMOS カメラを用い、 200fps の時系列ホログラムを $T_m = 1.0$ 秒の間連続記録した。

4. 研究成果

(1) 多波長を用いた FMCW-DH による絶対変位計測

Fig. 3 は時系列ホログラム中の一画素（512, 300）における信号スペクトルを示しており、三波長に対応して 3 つのビート周波数（ $f_{b1} = -85\text{ Hz}$ 、 $f_{b2} = -54\text{ Hz}$ 、 $f_{b3} = -31\text{ Hz}$ ）が発生している。時間周波数領域において、各ビート周波数成分を個別に抽出し、再生することで Fig. 4 に示すように三波長分の位相画像が得られる。続いて、各位相画像間の位相差画像を計算後、既知段差を用いた校正により、3 つの実効的な合成波長 $\lambda'_{12} = 5.48\text{ mm}$ 、 $\lambda'_{23} = 0.536\text{ mm}$ 、 $\lambda'_{31} = 0.612\text{ mm}$ を得た。

3 つの実効的な合成波長と位相差画像を用いて、多波長アンラッピングを適用した。Fig. 5 に、最小合成波長 λ'_{23} でアンラップした、解析領域内（Fig. 4(c)の白枠線内）の三次元形状と点線で示した部分の縦横断面形状を示す。Fig. 5(c)の横断面形状と理論値 1.00 mm 間の RMSE は 0.011 mm であった。この結果から、光源の波長を増やすことで、軸方向の測定範囲の拡大と、測定精度の改善が両立できることを示した。

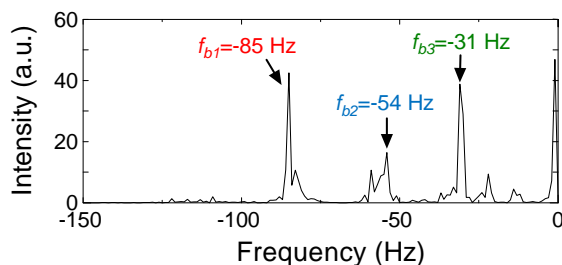


Fig. 3 三波長 FMCW-DH で得たビート信号の周波数スペクトル.

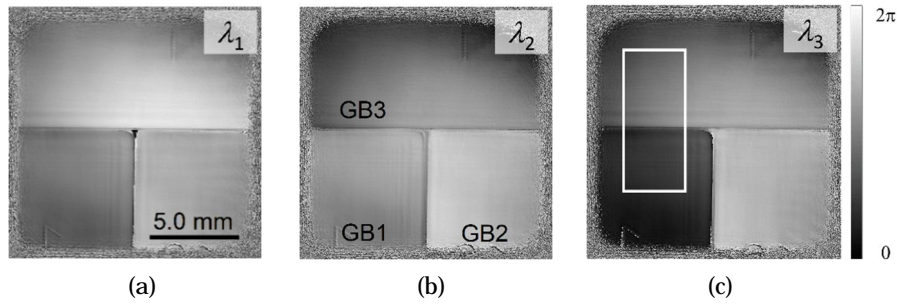


Fig. 4 三波長に対応する位相画像: (a) $\lambda_1=784.33$ nm, (b) $\lambda_2=784.46$ nm, (c) $\lambda_3=783.41$ nm.

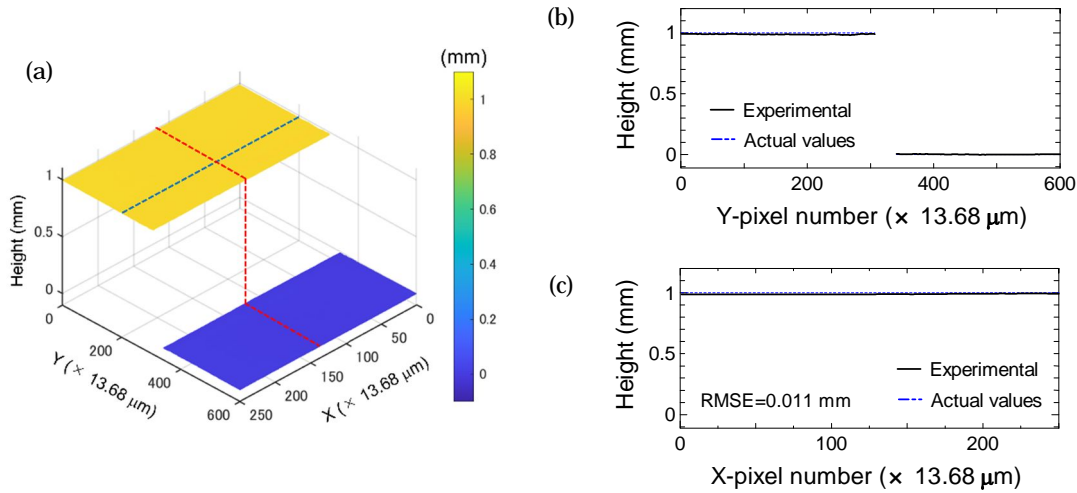


Fig. 5 多波長アンラップで得た高さ分布と断面形状: (a) λ_1 でアンラップされた解析領域内の高さ分布, (b) 縦断面 (a)の赤線部), (c) 横断面 (a)の青線部).

今回は 3 波長を用いた形状計測を行い、多波長アンラッピングによる精密形状計測まで実施することができた。残念ながら時系列 FMCW ホログラムを取得した絶対変位計測までは辿り着けなかったが、その前段階である絶対形状計測までを実現し、高精度化を達成することができた。

(2) GPU を用いた信号処理の高速化の検討

数値計算において時系列ホログラムを作成するために、CPU のみで計算する場合、さらに GPU でも計算を行い、それぞれの計算時間を比較した。CPU のみでは 3 時間 55 分かかった計算が、GPU を用いることで 8 分 30 秒に短縮することができた。これは凡そ 28 倍の高速化が達成できたことになる。また、得られた再生像の強度及び位相画像を Fig. 6, 7 に示す。それぞれの図では (a) が強度、(b) が位相である。また、それぞれの断面を比較すると Fig. 8 のようになり、これからも CPU と GPU の計算結果が一致していることが分かる。よって計算精度を損なわずに高速化することができた。今後は信号処理を複雑化した場合の高速化を目指し、実験における FMCW-DH ホログラム解析へ導入することを検討する。

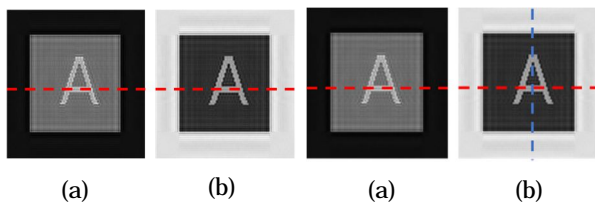


Fig. 6 再生像(CPU).

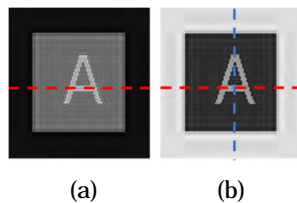
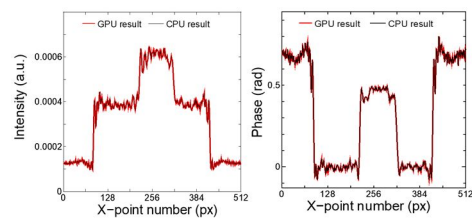


Fig. 7 再生像(GPU).



(a) 強度

(b) 位相

Fig. 8 再生像の断面の比較.

(3) 半導体レーザの周波数掃引時における非線形性の影響に関する検討

FMCW において半導体レーザの注入電流を変調することで発振周波数を変調している。このとき線形掃引しているつもりでも、非線形性により掃引周波数が変化している。これを調べるため、光周波数の変化について、干渉縞の時間変化から算出した。各結果と線形掃引を仮定した理想値との差を示す。Fig.9 から、線形に掃引した場合の理想値に対して $\pm 0.5\text{GHz}$ の範囲で掃引中に誤差が生じており、非線形性が現れていることがわかる。次に、非直線性掃引による位相誤差を評価するために、FMCW-DH の記録・像再生シミュレーションに Fig. 9 の時間周波数変動を導入した。時間周波数変動を数値計算に導入するために、最小二乗法から 10 次の多項式近似を行い、数学モデルを設計した。データを複数の時間区間に分割し、各区間を近似した後、近似値を積分することで精度を向上させた。

数値計算では、位相誤差を評価するために、既知の 100nm の 2 ステップを持つ物体を測定した。光路長はスペクトルの漏れがないように設定した。Fig. 10 に $\Delta f = 9.778\text{GHz}$ の場合の物体プロファイルの計算結果を示す。

Fig. 11 に周波数変調幅の設定値に対する各計算結果の誤差率を示す。これより最大誤差率は周波数変調幅に反比例して減少することがわかり、このことから、周波数変調幅を大きくすることで測定誤差が減少すると考えられる。しかし、本研究で得られた誤差率は最大でも 1% 程度であり、他の要因による誤差に比べると小さい。非線形性の影響は無視できると考えられる。今後、任意の非線形性を与えた場合の数値計算による測定誤差の検討を行う予定である。

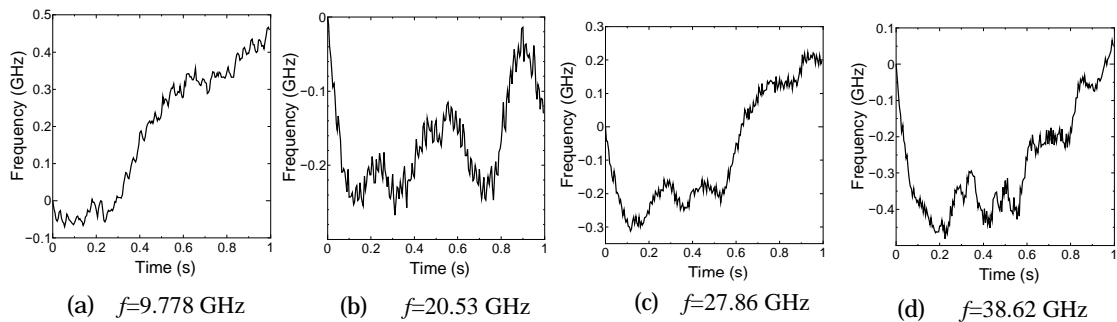


Fig. 9 周波数掃引における理論値からのずれ.

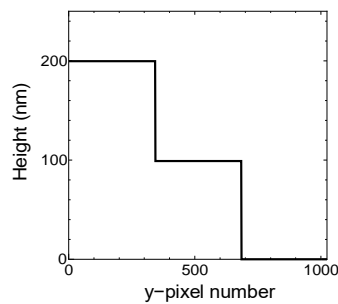


Fig. 10 形状($\Delta f = 9.778\text{GHz}$).

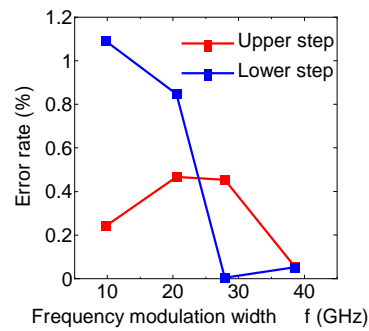


Fig. 11 誤差.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 濱田光, 横田正幸
2. 発表標題 2波長FMCW-デジタルホログラフィを用いた3次元形状計測
3. 学会等名 精密工学会春季大会（オンライン開催）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Hamada and M. Yokota
2. 発表標題 Three-Dimensional Shape Measurement using Two-Wavelength FMCW-Digital Holography
3. 学会等名 Optics & Photonics International Congress 2022 (OPIC2022) Information Photonics 2022 (IP2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Yokota
2. 発表標題 Digital holography for industrial applications
3. 学会等名 The 10-th IIAE International conference on industrial application engineering 2022 (ICIAE2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Hamada, Y. Aoki and M. Yokota
2. 発表標題 FMCW-Digital holography to analyze the curing process of UV-curable adhesive with the temporal polarization states of the object wave
3. 学会等名 ISOM2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Hamada, R. Ozono and M. Yokota
2. 発表標題 Three-Dimensional Shape Measurement using Two-Wavelength FMCW-Digital Holography
3. 学会等名 IP2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Yokota, K. Inagaki, K. Kito, and K. Iwasaki
2. 発表標題 Analysis of Behavior of Mirror on UV-curable Adhesives in Their Curing Process by using Digital Holography
3. 学会等名 IP2022 (国際学会)
4. 発表年 2022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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関