

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15461

研究課題名（和文）時間超解像デジタルホログラフィック動画像計測システムの創成

研究課題名（英文）Temporal super-resolution digital-holographic measurement system for dynamic phenomena

研究代表者

角江 崇（Kakue, Takashi）

千葉大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：40634580

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題ではイメージセンサの性能限界を超える撮影速度での計測を可能にする、時間超解像デジタルホログラフィを提案、実証した。等速度で回転する円分度器を用いた原理検証実験により、毎秒10コマでしか撮影できないイメージセンサで、その2倍の速度となる毎秒20コマでのホログラフィック動画像の取得に成功した。この結果より、時間超解像デジタルホログラフィが有用であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界最高性能の高速度カメラにも記録速度の限界がある。本研究課題で達成した時間超解像デジタルホログラフィは、この限界の超越を可能にする画期的な成果である。ホログラフィに基づく計測手法であれば広く適用可能であり、本研究結果によって従来は計測が困難であった対象へもホログラフィを応用できるようになる。ひいては、ホログラフィック3次元動画像計測の実用化を大きく手繰り寄せるものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：Temporal super-resolution digital holography was proposed and demonstrated. The proposed method allows us to measure dynamic phenomena at a speed that exceeds the frame rate of an image sensor. I recorded holograms based on the proposed method to validate it. I used an image sensor whose frame rate was 10 frames per second. A circular protractor was used as a moving object. Because I confirmed the proposed method successfully recorded holograms at 20 frames per second, the validity of the proposed method was demonstrated.

研究分野：光工学

キーワード：ホログラフィ 高速度イメージング 3次元計測 動画像計測

### 1. 研究開始当初の背景

生物や生体の機能、構造、動きの解析、光照射で発現する生命機能の発見や解明には、顕微鏡のように微小な領域を観察する技術に加えて、高速度イメージングを可能にする技術が必要である。巨視的な視点からはわずかな動きであったとしても、微視的な視点では大きな動きとして捉えられるため、その動きに追従できるだけの撮影速度が求められるからである。加えて、生物や生体は一般に立体的な構造を有しているため、その機能を正確に計測するためには3次元計測技術が求められる。すなわち、高速度イメージングと3次元計測を同時に実現することは極めて有用であるといえる。しかし、3次元計測を実現するためには、奥行き(または距離)方向に対しての走査と、走査に同期した逐次的記録が必要であり、高速度イメージングとの両立は困難であった。

逐次的記録を必要とせずに3次元動画像計測を実現する手法としては、大きく分けて「ライトフィールドイメージング」と「デジタルホログラフィ」の二つがある。前者は幾何光学に基づくため光の強度情報しか扱えない。一方、後者は波動光学に基づくため、位相情報を含めた光の複素振幅情報を取得可能である。光の位相情報は、光の波長オーダでの精密な位置情報を含んでいるだけでなく、光の振幅情報のみでは計測できない透明な被写体のイメージングをも可能にする。これらの特長を活かして、デジタルホログラフィによる透明流体の高速度3次元動画像計測が実証されている[T. Kakue, *et al.*, *Opt. Lett.* **36** (2011) 4131.]。

### 2. 研究の目的

デジタルホログラフィによる高速度3次元動画像計測が実証された一方で新たな問題も顕在化した。デジタルホログラフィではイメージセンサを用いて、光の複素振幅情報を「ホログラム」と呼ばれる2次元画像として記録する。記録したホログラムに対する再構成計算により、光の複素振幅情報をコンピュータ上で数値的に再生できる。記録する情報がホログラムである点が違うだけで、イメージセンサを用いて画像を記録するという点は、一般の写真技術と同じである。したがって、ホログラムの記録速度はイメージセンサの撮影速度と等しくなる。言い換えるなら、3次元動画像の撮影速度はイメージセンサの性能で制限されることになる。イメージセンサの性能を超える撮影速度でホログラムを撮影可能な手法を提案、実証する。本研究課題における提案手法を時間超解像デジタルホログラフィと呼ぶ。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、ホログラムの角度多重記録を利用して時間超解像デジタルホログラフィを実現する。図1にホログラムの角度多重記録の概念図を示す。ホログラムは、計測対象の情報をもった光(物体光)と、基準となる光(参照光)との干渉で生じる干渉縞である。干渉縞の縞周期は物体光と参照光とのなす角により決まる。光学系を適切に調整して図1(a)上段のような干渉縞を形成し、ホログラムとして記録する場合を考える。ホログラムは2次元画像としてイメージセンサにより記録されるため、一般的な画像処理で用いられるフーリエ変換に基づく周波数解析を適用すると、図1(a)下段のような空間周波数分布が得られる。すなわち、形成された干渉縞の縞周期に応じた位置に、空間周波数のピークが生じる。同様に、図1(b)上段のような縞周期のホログラムを記録し、周波数解析を適用すると、図1(b)下段に示す分布が得られる。さらに、

図1(c)に示すように、図1(a)および(b)の上段で示した2種類の干渉縞を同時に記録したホログラムに対して周波数解析を適用すると、各干渉縞の縞周期に相当する空間周波数においてそれぞれピークが立つ。ここで、デジタルホログラフィにおける物体光の情報は、ホログラム画像の状態では画像全体に分布しているが、空間周波数分布においては、干渉縞の縞周期に対応する空間周波数のピーク近傍に分布する性質がある。この性質により、図2のようにフィルタ処理を利用すれば、それぞれの空間周波数に相当する縞周期の干渉縞画像を独立に再構成

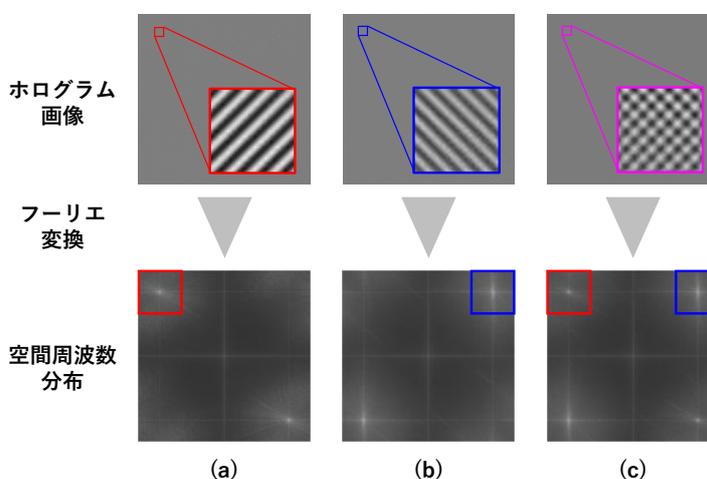


図1 ホログラムの角度多重記録の概念図

できる。これがホログラムの角度多重記録の原理である[M. Takeda, *et al.*, *J. Opt. Soc. Amer.* **72** (1982) 156.]。つまり、異なる時間における物体光を、それぞれ異なる角度の参照光を用いて干渉させ、それらを同時に1枚の画像として多重記録すれば、多重数分だけの時間情報を同時に再構成できることを意味する。理論的には、6多重までであれば情報のクロストークや欠落なく、ホログラムを多重記録できることが示されている[M. Rubin, *et al.*, *Opt. Lett.* **42** (2017) 4611.]。

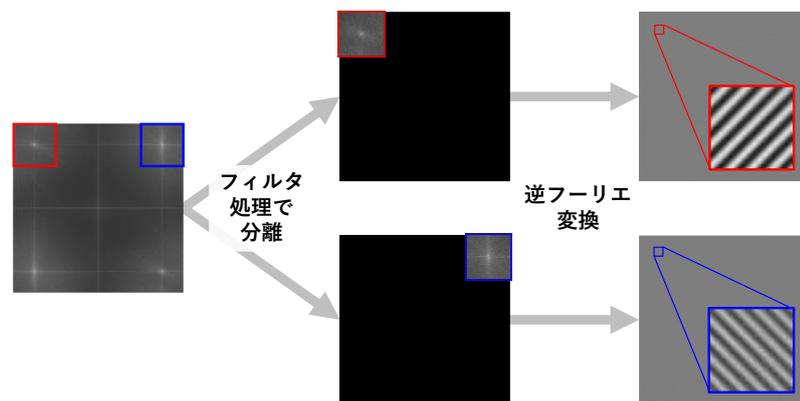


図2 空間周波数分布を利用したホログラム情報の分離

図3に、提案手法を実証するために構築した光学系の模式図を示す。原理検証であるため、もっとも簡単な2多重の場合にて光学系を構築した。レーザ光源からの光を、ビームスプリッタ(BS1)で二分し、それぞれ音響光学変調器(AOM1, AOM2)へと導入する。AOMは、外部からの信号入力に応じて光波のオンオフを切り替え可能な素子である。本研究課題では、イメージセンサの撮影速度に対して2倍となる速度で、AOM1とAOM2のオン状態を交互に切り替える。AOM1から出た光はBS2により、参照光(透過側)と物体光(反射側)とに分けられる。参照光は顕微鏡対物レンズ(MO1)とコリメータレンズ(CL1)により光束を広げられた後、ミラー(M1)、ビームコンバイナを介してイメージセンサへと導入される。物体光はMO2, CL2により光束を広げられた後、計測対象となる物体へと照射する。物体を透過した光は、BC2, BC3を介してイメージセンサへ到達し、参照光と干渉して干渉縞を形成する。AOM2から出た光も同様にして、イメージセンサ上で干渉縞を形成する。先述したように、AOM1とAOM2は交互にオン状態になるため、それぞれの物体光は異なるタイミングで物体を照明し、異なるタイミングで干渉縞を形成する。AOMの切り替え速度はイメージセンサの撮影速度の2倍に設定しているため、異なるタイミングで形成された各干渉縞は、1枚の画像としてイメージセンサで多重記録される。M1およびM3を適切に調整し、それぞれのタイミングで形成される干渉縞が、図2のように空間周波数上で分離できるようにしておけば、イメージセンサの撮影速度に対して2倍の速度にてホログラムを記録できることになる。

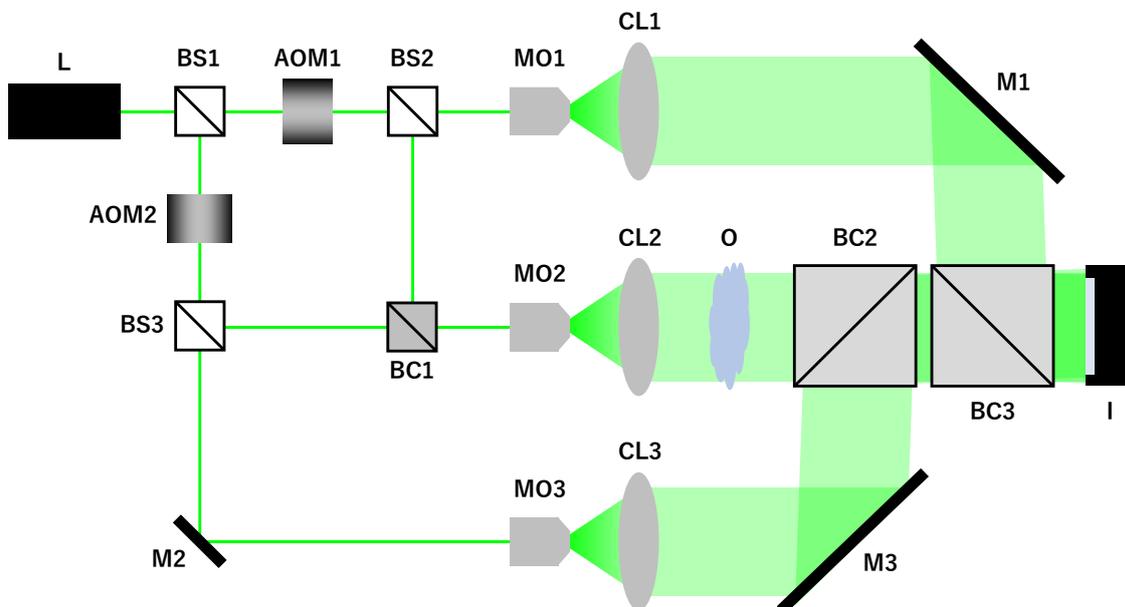


図3 提案手法を実証するための光学系の模式図

図中において、L: レーザ光源、BS: ビームスプリッタ、AOM: 音響光学変調器、MO: 顕微鏡対物レンズ、CL: コリメータレンズ、BC: ビームコンバイナ、O: 物体、I: イメージセンサをそれぞれ表す。

#### 4. 研究成果

##### (1) 主な成果

図3に基づいて光学系を構築した。光源には昭和オプトロニクス製のLD励起固体レーザJ200GS-

11-12-23 (波長 532nm) を用いた。AOM には Isomet の M1205-P80L-2 を用いた。AOM を制御するためのファンクションジェネレータとして NF 回路設計ブロックの WF1974 を用いた。イメージセンサには Baumer の TSG50 (解像度 2448×2050 画素, 画素ピッチ 3.45 $\mu$ m) を用い、イメージセンサの撮影速度を 10 フレーム毎秒 (fps) に設定した。物体として、図 4(a)に示すような円分度器を用いた。モータの軸に円分度器を固定し、等速 (毎秒約 60 度) で回転する様子を撮影した。実際には、赤枠で示された範囲のみに光を照射してホログラムを記録した。得られた再生動画像の一例を図 4(b)に示す。円分度器に描かれている目盛りの変化から、フレーム間の時間差が約 50 ミリ秒であることが読み取れた。つまり、20fps でホログラムを記録できていることが示された。イメージセンサの撮影速度は 10fps であるため、その 2 倍の速度が達成されていることが分かる。一方、比較のために提案手法を適用していない場合 (従来手法) において得られた再生動画像の一例を図 4(c)に示す。図 4(b)の場合と同様に目盛りの変化から撮影速度を求めると約 10fps であり、こちらはイメージセンサの撮影速度と一致した。以上の実験結果より、提案手法の実証に成功したことが示された。

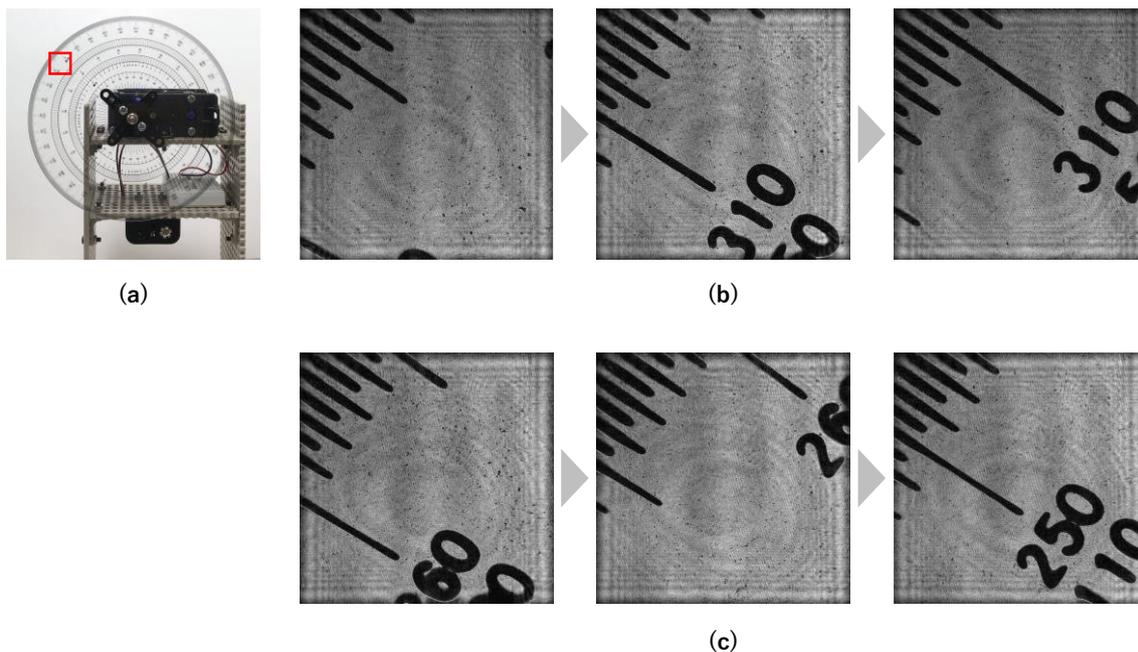


図 4 実験結果

(a) 撮影対象, (b) 提案手法により得られた再生像, (c) 従来手法により得られた再生像

## (2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究課題と同様の試みが 2020 年 7 月に報告されている [N. Hai and J. Rosen, *Opt. Lett.* **45** (2020) 3439.]. この論文では、符号化開口と呼ばれる特殊なマスクパターンを物体光に重畳させてホログラムを多重記録している。本研究課題と同様に、ホログラム記録後の適切な数値計算処理によって、多重記録された各ホログラムを独立に分離できる。符号化開口を利用したホログラムの多重記録は、空間分解能の向上などのような空間的な情報に対して数多く適用されていたが、この論文により初めて時間的な情報に対して適用された。本研究課題に先駆けて時間超解像デジタルホログラフィが実証されたことになるが、課題が残されている。Hai らの論文において、符号化開口のマスクパターンは、液晶技術に基づいた位相変調型の空間光変調器 (SLM) によって制御されている。液晶の応答性能が高くないことが課題であり、数 kHz を超える高速変調が可能な位相変調型 SLM は実用化されていない。すなわち、符号化開口に基づくホログラム多重記録は、高速度 3 次元動画像計測には不適である。一方、ホログラムの角度多重記録に基づく本研究課題のアプローチは、AOM を利用して光を制御している。SLM と比較して AOM は高速応答性を有しており、kHz 領域から MHz 領域での高速変調が可能である。つまり、高速度 3 次元動画像計測により適した手法である。この点が本研究課題の優位性であり、本成果を踏まえて将来的に提案手法を高速度 3 次元動画像計測へと適用できた際には、世界中に大きなインパクトを与えうる可能性を有している。

## (3) 今後の展望

先述のように、提案手法は高速度 3 次元動画像計測へと適用して真価を発揮する。本研究課題においては提案手法の原理検証が目的であったため、高速撮影が可能なイメージセンサを用いてはいなかった。今後は、高速度 3 次元動画像計測に関する先行研究 [T. Kakue, *et al.*, *Sci. Rep.* **7**

(2017) 10413.]において使用していた高速度カメラに搭載されているイメージセンサのような、500,000fps を超える速度で撮影可能なデバイスと提案手法とを組み合わせ、従来は撮影が困難であった高速現象を世界で初めて捉えることを目指す。またそのためには、さらなる時間超解像化が必要である。原理検証では2多重記録であったため、これを理論限界である6多重まで増加させる。さらには、信号処理技術や深層学習などを導入し、理論限界を超える10多重以上のプログラム記録を可能にするアルゴリズムの開発も目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 安齋 亘, 角江 崇, 下馬場 朋禄, 伊藤 智義
2. 発表標題 音響光学変調器を用いた時間超解像デジタルホログラフィの実証
3. 学会等名 日本光学会情報フォトンクス研究グループ第15回関東学生研究論文講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wataru Anzai, Takashi Kakue, Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito
2. 発表標題 Temporal Multiplexing Method with Off-axis Digital Holography using Acousto-optic Modulators
3. 学会等名 2021 OSA Imaging and Applied Optics Congress (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------