

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2012～2014
課題番号：24760045
研究課題名(和文) レーザー発光パターン制御によるゴーストイメージング

研究課題名(英文) Ghost imaging with laser array modulation

研究代表者
仁田 功一 (Kouichi, Nitta)

神戸大学・その他の研究科・准教授

研究者番号：20379340
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：単一画素を用いる光計測と信号処理により測定対象を画像化するゴーストイメージングについて計測時間を劇的に高速化する方法を提案し、その有用性を検証している。
この方法では光源に広帯域で変調することが可能な面発光レーザーアレイを光源に用いる。レーザーアレイの発光位置を変更する事で、ランダムな散乱照射光分布を高速に更新することが可能である。
提案手法を検証するためのシミュレータを作成した。シミュレータによる解析から、提案手法が従来手法と同程度の画質を有するイメージングを提供できることを示している。また、原理検証を行う実験系を作成し、良好な結果を提示している。

研究成果の概要(英文)：This research is about novel optical imaging called computational ghost imaging. A method for acceleration is proposed and verified. In this method, speckle illumination patterns are refreshed with changing emission position of array of vertical cavity surface emitting laser. This laser array is suitable for high speed measurement due to wide bandwidth.
An optical system for the measurement is developed. Usefulness of the system is verified numerically. it is shown that some parameters are optimized in the optical system. And then, it is demonstrated that the propose method can provide the reconstructed image which quality is almost same as that obtained by the conventional method. Also, an optical setup is constructed to verify the proposed method.
Though the constructed system is quite not same as the proposed method, it is considered to be enough to show effectiveness of principle of the proposed method. From the verification, usefulness of the method is experimentally confirmed.

研究分野：情報光学

キーワード：光イメージング 散乱計測 画像処理 光情報処理 微弱光イメージング 情報可視化 スペックル

1. 研究開始当初の背景

電子計算機のハードウェア、ソフトウェア双方の技術進展と、近年のレーザーやLED等の発光素子および、CCDやCMOSイメージセンサー等光電子デバイスの高性能化は、情報通信技術の象徴的な例といえる。これらの技術を基により、光計測と信号処理を組み合わせるデジタルイメージングが提案されて多くが実用化されている。例として、種々のプロジェクタや、内視鏡に代表される医療機器などが挙げられる。自然環境や、生体の構造を直感的に可視化できる技術は、人間に多くの情報を喚起するうえで非常に有益である。

近年、デジタルイメージングにおける計測法としてゴーストイメージングが注目されつつある。ゴーストイメージングが最初に提唱された1995年において、この計測法は光源に量子性を有する特殊な計測方法として提案された。その後、一般的なレーザー光源を散乱させる方法でゴーストイメージングが実装されることが示された。さらに、液晶の空間光変調器を散乱媒体として用い照射分布を電子計算でシミュレーションすることによる計算機ゴーストイメージングが報告されて以来、微弱光イメージングに適する手段として注目が高まっている。

本申請研究を開始してからも、反射物体に対する計測、位相イメージング、3次元計測法等多様な応用例が提示されている。また、リモートセンシングにゴーストイメージングを適用する事が提唱されている。

一方で得られる画像の画質は既存技術と比較して充分とはいえない。また、計測時間も実用的とはいえない。

2. 研究の目的

本申請研究では、計算機ゴーストイメージングの計測を高速化し、実用性を向上させる手法を提案し、その実証を行うことを目的とする。また、提案手法により得られる画像の画質を評価するとともに、画質を向上させるための計測システムの設計方法を検討する。

3. 研究の方法

既存の計算機ゴーストイメージングでは、空間光変調器のリフレッシュレートと、光受光素子の動作帯域が計測時間の律速となる。特に、市販の位相変調液晶型空間光変調器では、ビデオレート(30-60Hz)から最速でも数kHz程度に制限される。

計算機ゴーストイメージングでは、一般的に数千回から数万回の計測が必要とされる。したがって、測定対象の動的現象をとらえることが難しい。そこで、申請者は、位相変調素子の変調分布を更新せずに散乱信号のランダム分布を形成する方法を提案している。この方法の、原理検証を実験および実験的に行うと。また、従来手法との性能を比較し、評価する。また、実用化にむけた課題を示す。

4. 研究成果

4-1 基本システムの提案

計算機ゴーストイメージングを高速化するためのシステム構成を考案している。図1にシステム構成の概念図を示す。従来手法では、空間光変調器の位相変調分布を変更することで、照射散乱光分布をランダムに操作する。照射光分布のランダム性は、干渉性が高いレーザー光を散乱させることで発生するスペックルと呼ばれる現象が保証する。

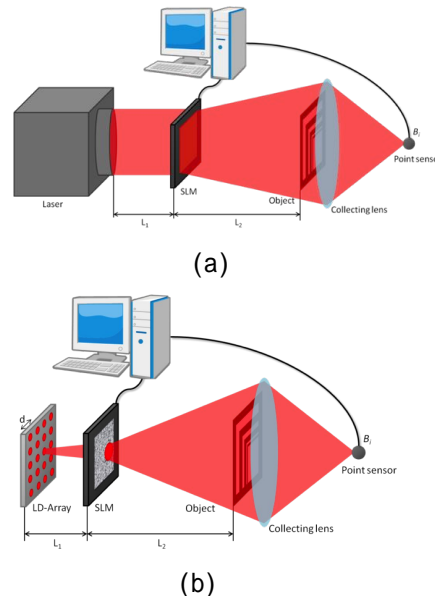


図1 計算機ゴーストイメージングの概念図：
(a) 従来手法 (b) 提案手法

一方で、提案手法では空間光変調器の位相変調分布を固定にし、光源に配置した面発光レーザーアレイの発光位置を制御することによりランダムなスペックル分布を生成させる。面発光レーザーアレイに関しては、広帯域な変調が可能であり、発光パターンを最速でGHzレベルで変更できる。この特性は計算機ゴーストイメージングを高速化するうえで非常に重要である。

4-2 シミュレーションによる検証

提案手法を検証するためのシミュレータを作成している。シミュレーションでは、偏光を考慮しないスカラー回折にもとづく計算を採用している。まず、各光源から射出される信号分布をガウス関数であると仮定する。各光現位置から空間光変調器までをガウスビーム伝搬法で計算する。また、空間光変調器面での変調を付加したのち、測定対象面までの光伝搬を角スペクトル伝搬で計算する。ここで、照射光強度分布をデジタルデータとして保存する。最後に測定対象を透過する信号成分の強度分布の総和を受光素子で検出される信号として蓄積する。

レーザーアレイの発光位置のインデックスを i , 測定 i における照射光強度分布を $I_i(x,y)$, 受光素子における測定光強度を B_i とおくと測定対象の強度透過率分布は式(1)で

推定される。

$$T(x,y) \propto \langle B_i I_i(x,y) \rangle - \langle B_i \rangle \langle I_i(x,y) \rangle \quad (1)$$

上式に関しては、従来の計算機ゴーストイメージングと等価な原理である。

以上に示したシミュレータを用いて数値解析により提案手法を検証した。その結果、計測系のパラメータを考慮する必要があることを明らかにしている。計算機ゴーストイメージングにより得られる画像の空間分解能は、少なくとも照射光分布のスペックル径に依存する。スペックル理論から、光源と変調器間の距離が長ければ長い程、また変調器と対象物間の距離が短ければ短いほど、平均スペックル径が小さくなり高い分解能を有することが予想される。しかしながら、シミュレーションの結果からは理論との整合性がとれず、とくに、光源と変調器間の距離が長い場合、良好な再構成画像がえられなかった。この結果を考察した結果、距離が長い場合、発光箇所的位置の差異に起因する照射光の独立性が十分でなく、その結果、測定対象面に形成されるスペックル分布のデータセットのランダム性が不足していることがわかった。このことにより、再構成画像の視認性が悪化している。

そこで、光源と変調器間の距離を、スペックルの独立性が保持できる範囲で長くし、画像再構成を試みた。その結果を図2に示す。

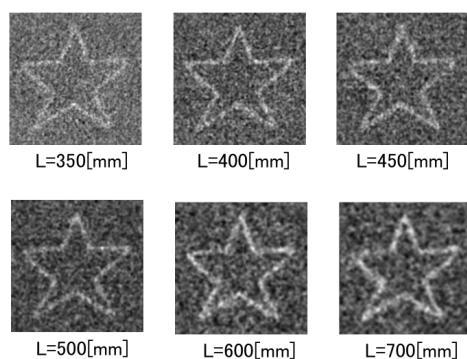


図2 対象物体シミュレーション結果。変調器・測定対象間の距離と画像の関係

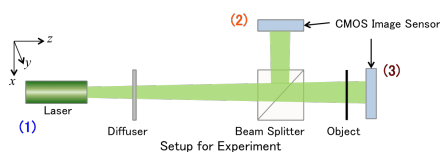
図2より、変調器と測定対象間の距離と再構成画像の分解能について、スペックル理論と整合性のよい結果がえられた。また、図より変調器と測定対象間の距離が長い程、コントラストが高いことがわかる。この結果より、提案するシステムについて分解能とコントラストがトレードオフの関係にあることを示すことができた。

また、従来手法と比較してシステム設計に多くのパラメータ(面発光レーザーアレイのアレイ間隔、レーザーアレイ・空間光変調器間の距離)が必要であること、パラメータ調整によりイメージング性能を向上させる事が可能であることを示している。

4-3 実験による検証

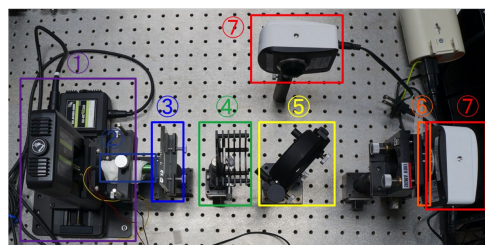
実験による検証を試みている。面発光レーザーアレイの実装に時間を要するため、まずアレイ光源によるスペックル照射系を用いた原理検証を行っている。図3に実験系の概念図と写真を示す。図3の系は原理検証のために提案システムに対して構成を変更している。

第一に光源には、レーザーアレイの代わりに、垂直および水平方向に走査できる移動ステージに取り付けられた単一のレーザーダイオードを用いる。発光位置の切り替えは、レーザーの位置走査により代行される。この構成により、高速動作を実現することはできないものの、原理検証には支障はない。



- (1) Laser array
→ Scanning of LD
- (2) SLM
→ Diffuser, CMOS sensor (NOT CG)
- (3) With CMOS sensor in stead of PD.
→ Use of integral on CMOS sensor

(a)



- ① movable stage
- ② LD (λ=532nm)
- ③ Diffuser
- ④ ND filter
- ⑤ Beam Splitter
- ⑥ Test target
- ⑦ Image sensor (1280x1024 pixels, 10bits)

(b)

図3 原理検証のための実験系の概念図 (a) と実験系の写真(b)

次に、散乱因子として、空間光変調器のかわりに磨りガラスを用いる。また、光学系にビームスプリッターと CMOS イメージセンサーを付加し、照射光強度分布を得るための系を挿入している。この変更の理由を述べる。計算機ゴーストイメージングでは、位相変調分布と伝播シミュレーションにより照射分布を推定しなければならない。実際の照射分布とシミュレーションで得られる照射光強度分布の誤差が画像再構成に悪影響を及ぼすことが考えられる。図3に示す系を用いる実験では、レーザーアレイ変調によるスペックル生成系の計算機ゴーストイメージングにおける有用性を原理検証レベルで示すことを目的とする。実験とシミュレーションの

誤差については、位置合わせ技術の問題であり、原理に対して本質的な問題をもたない。したがって、研究レベルの検証として有意義である。

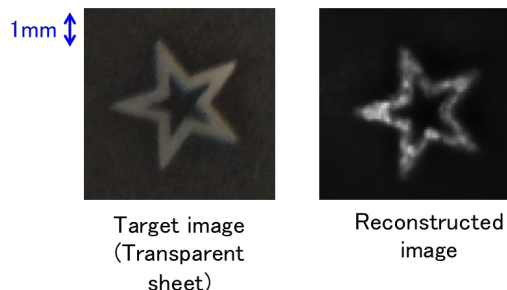


図 4 Results of verification. (a) a target object and (b) the reconstructed image.

図 4 に結果を示す。実験において、光源の波長は 532nm, 計測回数が 900 である。図より、対象物体と比較すると再構成画像にはノイズ成分が観察されるもののおおよその概形は得られていることがわかる。以上より、提案手法の正当性を実験的に確認できている。

4-4 面発光レーザーアレイの実装

面発光レーザーの実装を検討している。まず、1 素子ごとに独立駆動できるデバイスのベアチップを購入した。電子回路と接続するためのパッケージング処理を行っている。パッケージの動作を確認している。

現状(2015 年 5 月)において、計算機ゴーストイメージングシステムに組み込まれておらず今後の課題となっている。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 10 件)

国内学会

1. 矢野 佑樹, 仁田 功一, 的場 修, "LD アレイを用いたゴーストイメージングにおけるスペックル径の影響", 第 73 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集 03-083 (2012). 講演番号 12p-F3-10. 2012.9.12 松山市
2. 仁田 功一, 矢野 佑樹, 的場 修, "レーザーアレイ変調によるゴーストイメージングにおける再構成画像の評価", レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会講演予稿集, H130aIV03 (2013). 講演番号 H130aIV03. 2013.1.30 姫路市
3. 矢野 佑樹, 仁田 功一, 的場 修, "レーザーアレイによるゴーストイメージングの実装に関する検討", 第 60 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 p 03-080, 講演番号 29p-A1-VIII. 2013.3.29 厚木市
4. 仁田 功一, "レーザーアレイの変調を用いた計算機ゴーストイメージング", 第 145 回応用光学懇談会, 2013.4.12 大阪市.
5. 仁田 功一, 保澤 辰至, 的場 修, "ゴーストイメージングの高速計測に関する研究," 第 7 回新画像システム・情報フォトンクス研究討論会講演予稿集 pp.32-33 (2013). 横浜市

6. 仁田 功一, "点計測と信号処理によるゴーストイメージング," 2013 年度精密工学会秋季大会シンポジウム資料集, pp.7-10 (2013). 吹田市

7. 保澤 辰至, 仁田 功一, 的場 修, "シングルショットゴーストイメージングにおける散乱光分布形成についての検討", 2013 年日本光学会年次学術講演会講演予稿集 CD 12pP11 (2013). 奈良市

国際学会

国際学会

8. Y. Yano, K. Nitta, and O. Matoba, "Ghost imaging with laser diode," 1st Laser Display Conference (LDC2012), LDCp7-23, 2012.4.23 Yokohama.

9. Y. Yano, K. Nitta, and O. Matoba, "Study on speckle size in ghost imaging by use of laser array," The second Japan-Korea workshops on digital holography and information photonics (DHIP 2012). in CD-ROM of digest of DHIP, 2012.11.20, Tokushima.

10. S. Hozawa, K. Nitta, and O. Matoba, "Single shot ghost imaging," Proceeding of The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), TuP0-16, 2013.7.2 (2013).

[その他]

<http://brian.cs.kobe-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仁田功一(Kouichi Nitta)
神戸大学大学院
システム情報学研究所・准教授
研究者番号：20379340