

令和 6 年 5 月 8 日現在

機関番号：32644

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K20303

研究課題名（和文）超高解像度なマルチスペクトル-深度撮像器における信号処理系の確立

研究課題名（英文）Signal processing approaches for super-resolution multispectrum-depth camera

研究代表者

高橋 智博（Takahashi, Tomohiro）

東海大学・情報理工学部・講師

研究者番号：40756300

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）：本研究の目的は、レーザー屈折結晶を用いた新たなレーザー撮像方式を提案し、信号処理の側面からその基礎理論を確立することである。不均一な観測と画像補間の技術を組み合わせることで、必要な部分に必要なだけの解像度を実現するための新たな信号処理的アプローチを探索した。研究期間において、画像の全体像がわからない状況下における適切な観測方法を明らかにし、論文等でその成果を公表した。提案法はランダムに観測を行う場合と比較してPSNRと呼ばれる評価量において平均1dBの画質改善効果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、単一センサを用いた撮像装置において不均一サンプリングと画像修復を組み合わせ使用した場合に、サンプリングの密度を動的に変化させる方法が最終的な修復画像に与える影響について明らかにした。この成果は必ずしも単一センサを用いた撮像装置のみに限らず、不均一サンプリングを活用する様々な観測装置において応用が可能であると考えられる。例えば磁気共鳴分光装置でも不均一サンプリングが用いられており、こうした化学計測の分野でも活用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to propose a new laser imaging method using laser refractive crystals and to establish its basic theory from the aspect of signal processing. By combining non-uniform observation and image interpolation techniques, a new signal processing approach was explored to achieve the required resolution in the required areas. During the research period, we clarified an appropriate observation method for situations where the entire image is unknown, and published the results in papers and other publications. The proposed method improved the image quality by an average of 1 dB in a metric called PSNR compared to the case of random observation.

研究分野：画像処理

キーワード：不均一サンプリング 信号修復

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

通常のカラーカメラとレーザーを組み合わせることによりカラー画像とセンサーから見た深度とを同時に計測可能な撮像器 (RGB-D カメラ) はすでに市販されており、Microsoft が発売した Kinect などがよく知られている。しかしながら、通常のカメラに使用されているセンサーは製造時に画像の空間分解能 (解像度) が決まっており、一般に解像度を高くするほどセンサーは高価になる。さらに深度情報の解像度はセンサーの解像度よりも低くなるため、極めて高い深度情報の解像度が必要なアプリケーションには対応できない。

この問題に対して、深度情報よりは高い解像度が得られやすい通常のカメラ画像の情報を用いて適切な補間を行う研究も知られているが、適用できるのは画像と深度情報との間に強い相関がある場合などに限られるため、より本質的な解決が必要である。

レーザー屈折結晶を用いた撮像システムは、通常のカメラのようにセンサーアレイを用いるのではなく、電気信号によって制御されるレーザー屈折結晶と単一センサーによって撮像を行うものである。照射光と反射光の位相差によって深度情報を、照射光と反射光の振幅比および深度情報を用いて撮像点の色を同時に測定することが可能となる。

本システムでは計測位置を偏向制御電圧によって制御するため、通常のカメラアレイを用いたカメラとは異なり計測回数を多く取るほど解像度を向上させることができるため、超高解像撮像が可能となる。また、レーザーの波長を変更することで人の目に見える赤、青、緑だけではなく可視外波長を含めた多波長 (マルチスペクトル) 画像を得ることも可能であり、工学的に広く応用が可能と考えられる。

解像度の高いマルチスペクトル画像と深度情報とを位置ずれ無く取得できれば、例えば価値の高い油絵を絵の具が重なってできた立体構造や使用されている絵の具の種類までを含めて撮像することが可能となり、文化遺産の記録など様々な分野に貢献することができる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記撮像システムのための信号処理的基盤を整備することにある。これにより、高解像度かつ高速な撮像を実現する新たな撮像システムの枠組みを創造する。

3. 研究の方法

本研究課題では以上のような撮像器を想定して、信号処理の側面から高解像かつ高速な撮像を行うために必要な以下 3 つの基礎理論を確立する。

1. 画像修復アルゴリズムのための適応的スキャン方法

本撮像システムに必要な画像のピクセル数だけレーザーを照射し、反射光を測定する必要があり、高解像度な画像を得るためには解像度に比例した時間が必要になる。この問題を軽減するため、測定する回数を減らして欠落が生じた画像データを画像修復アルゴリズムによって修復することで測定時間の削減と画像の解像度とを両立する方法について検討する。

復元を精度良く行うためには、既に撮像された周囲の点からは推定することが困難な点を優先的に計測することが重要である。すなわち、その時点までに計測された情報から画像を仮復元し、その結果に応じてレーザー屈折結晶の制御を適応的に変更する必要がある。そのような制御を行うため、まず周波数スペクトルや予測誤差などの情報から非観測ピクセルの推定困難性を表す量を定義する。そして、撮像するべき位置を確率変数、その確率密度を推定困難性から算出される関数で与えることで、確率的に次のスキャン位置を決定する方法について検討する。

2. ラインスキャンを前提とした高速な画像修復アルゴリズム

1. で述べたような画像修復アルゴリズムの適用を考えたとき、その精度と演算量は本システムの性能を左右する重要な要素となる。特に線状の観測が得られている場合を想定した画像修復アルゴリズムは知られていないが、各線の法線方向への情報伝播が重要であることは明らかである。

本研究では一般化 TV 正則化に基づく高速な画像修復アルゴリズムを基礎として、法線方向への伝搬を考慮した重み行列の与え方と、申請者らの既存法でも使用したオブジェクトごとにクラスタリングを行うことで修復精度を向上させる技術の適用とをそれぞれ行い、本撮像システムでの利用に特化した画像修復アルゴリズムの導出を行う。

3. 複数の波長を用いる場合の交互スキャンとその補間法

本システムでは光源として可変波長レーザーを用いているが、同時に測定できるのは単一波長のみである。例えば赤青緑の 3 波長を測定する場合には、単一波長の場合と比べて 3 倍の測

定回数を要する。しかしながら、一般的なカメラでもベイヤー配列と呼ばれるセンサー配列により、赤と青は4ピクセルにつき1ピクセル、緑は2ピクセルにつき1ピクセルしか測定せず、測定しなかったピクセルについては補間を行っている。

本撮像システムでは疎に撮像を行うためより高度な最適化が必要になるが、例えば白黒画像のカラー化を行うようなアルゴリズムで用いられているように色相の変化が疎である性質を用いれば、十分な精度で補間が行えると考えられる。

1.2.で述べたような従来の画像修復アルゴリズムは各画素でRGB全ての観測値がわかっていることを前提としており、波長間の関係は考慮していない。そのため、本研究課題ではカラー画像およびマルチスペクトル画像の撮像を行うために、色相変化の疎性や各波長間の相関を考慮した新たな画像修復法を構築する。

4. 研究成果

3つの研究課題のうち、1.の適応的スキャン方法に関する研究を進展させることができた。既存法ではスキャン位置を決定するために低解像度の補助カメラを必要としていたが、補助カメラとレーザー撮像器間の視野差が考慮されていないという問題があった。この問題を解消するために、提案法では補助カメラを使用せず、繰り返しスキャンを行う中で複数回の途中修復を行い、途中修復結果の前回差分を用いて優先的にスキャンすべき領域を特定する新たな手法を提案した。

提案法により修復精度の安定的な向上が実現されたため、この結果を電気学会論文誌に投稿し、採録された。下図は提案法のフローチャートであり、上記論文より引用した。

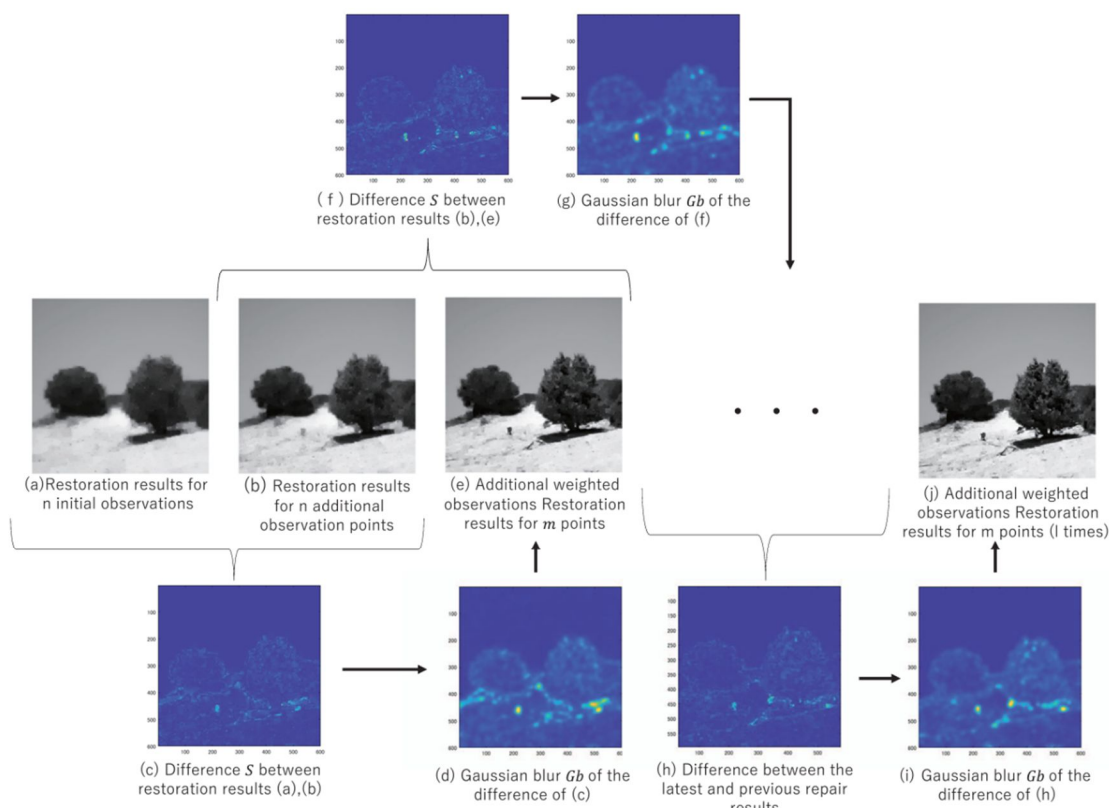


図1 提案法のフローチャート(三枝将太郎, 高橋智博, “レーザー撮像器のための修復誤差を用いた不均一スキャン方法”, 電気学会論文誌C(電子・情報・システム部門誌), Vol.143, No.7, pp.718-727, 2023.より引用)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Saigusa Shotaro, Takahashi Tomohiro	4. 巻 143
2. 論文標題 レーザー撮像器のための修復誤差を用いた不均一スキャン方法	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 718 ~ 727
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.143.718	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 今野 翔太、高橋 智博、雨車 和憲、古川 利博	4. 巻 J105-D
2. 論文標題 次世代型レーザー撮像器の実現に向けた画像の高周波成分に着目したスキャン方法の提案	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D 情報・システム	6. 最初と最後の頁 254 ~ 258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2021JDL8006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TAKAHASHI Tomohiro, KONISHI Katsumi, URUMA Kazunori, FURUKAWA Toshihiro	4. 巻 E103.D
2. 論文標題 Multiple Subspace Model and Image-Inpainting Algorithm Based on Multiple Matrix Rank Minimization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 2682 ~ 2692
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2020EDP7086	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sasaki Ryohei, Konishi Katsumi, Takahashi Tomohiro, Furukawa Toshihiro	4. 巻 2021
2. 論文標題 Local low-rank approach to nonlinear matrix completion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 EURASIP Journal on Advances in Signal Processing	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s13634-021-00717-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 三枝将太郎, 高橋智博
2. 発表標題 修復誤差を用いた適応的ドットスキャン方法
3. 学会等名 電気学会システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三枝将太郎, 高橋智博
2. 発表標題 レーザー撮像器のためのランダムラインスキャン方法
3. 学会等名 電気学会システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田勇人, 高橋智博
2. 発表標題 構造化行列と画像のインデックスを対応付ける写像を用いたランク最小化に基づく画像修復法の高速化
3. 学会等名 電気学会システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今野翔太, 高橋智博, 雨車和憲, 小西克巳, 古川利博
2. 発表標題 ラインスキャン型撮像器の実現に向けたスキャン方法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今野翔太, 高橋智博, 雨車和憲, 小西克巳, 古川利博
2. 発表標題 次世代型レーザー撮像器の実現に向けた縮小誤差を用いたスキャン方法の提案
3. 学会等名 電気学会システム研究会
4. 発表年 2020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
---------	---------