

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「計測技術と高度情報処理の融合による
インテリジェント計測・解析手法の開発と応用」
研究課題「多元光情報の符号化計測と
高次元化処理の協調設計」

研究終了報告書

研究期間 2017年10月～2023年3月

研究代表者：向川 康博
(奈良先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科 教授)

§1 研究実施の概要

(1)実施概要

コンピュータビジョンは、カメラで撮影した画像からシーンを理解する技術である。本来、シーンを飛び交う光線は、その通過位置、角度、波長、時刻、偏光状態などをパラメータに持つ極めて多元な情報であるため、光線はシーンに関する幾何学的・光学的な手がかりを豊富に含んでいる。しかし、シーンを通常のカメラで撮影すると、各軸が低次元化されて縮退した2次元画像となり、せっかくの貴重な情報が激減してしまう。一方、光線を高次元で計測することも可能であるが、直接的な高次元計測は、高いコスト、多いノイズ、長い計測時間、膨大なデータ量など、代償が大きい。さらに、物理的、光学的な限界も存在するため、いくらでも高次元計測できるわけでもない。

そこで本研究では、光線が持つシーンに関する多元情報を効率よく計測・解析することを目的とし、計測デバイスの光学設計と情報科学分野における計算アルゴリズムを協調的に設計することを目指す。さらに、高次元光イメージングの幅広い分野での活用を開拓する。当初は、波長軸、視点位置軸、ナノ秒単位時間軸の3通りの軸で高次元計測することを目指し、計測グループ、解析グループ、活用グループがそれぞれの問題に取り組んだ。

研究開始2年後の2019年度には、光線の高次元化計測に関する計測・解析・活用のそれぞれについて一定の成果が得られたことから、特に波長軸に焦点を当て、3グループが協調して一連の流れを具現化した。具体的には、高速・高精度回転ミラーシステムと分光器を組み合わせたパノラマ分光計測システムを構築し、得られた分光データの特異値分解による圧縮表現と乱択アルゴリズムによる計算の高速化、さらにフランス・アミアンの大聖堂のステンドグラスのアーカイブに活用した。

また、各軸ごとに独立して高次元計測するのではなく、複数の軸を同時に高次元計測するという新しい試みに取り組むために、2020年度より活用グループを2分割し、特定の応用に合わせて最適化する特定活用グループと、複数の軸を融合する融合活用グループを加え、合計4グループに再編した。これにより、様々な軸を組み合わせた新しい取り組みが加速し、多くの研究成果を出すことができた。各グループの主な成果と、チーム全体への貢献は以下のとおりである。

計測グループ(代表:奈良先端大 向川)

波長軸では、パノラマ分光計測システムや、傾けた画像センサを用いた波長の超解像計測システムなどを開発した。また時間軸では、13ピコ秒単位の光伝播を計測するシステムを構築し、距離、反射率、材質推定に利用できることを確認した。

解析グループ(代表:阪大 松下)

各多元軸に共通に利用できる高次元データ解析法として、ロバスト主成分分析、L1最小化、乱択アルゴリズム、クラスタリング等のアルゴリズムを開発した。これらの一連の成果は、計測・活用グループも活用している。

特定活用グループ(代表:立命館大 田中)

波長軸ではステンドグラスの分光デジタルアーカイブを実現した。時間軸では、車載カメラによる悪天候下での画像の鮮明化や距離計測を実現した。また、古文書や被災した文化財の修復にも取り組んだ。

融合活用グループ(代表:千葉大 久保)

視点位置軸と波長軸の計測技術を融合させ、医療分野への応用を目指して皮膚の奥にある血管をリアルタイムで鮮明に可視化する技術等を開発した。また、遠赤外帯域での視点位置軸の活用により、遮蔽物の影響を除去した人体温度計測に応用した。

チーム全体への貢献

当初は役割分担の明確化のために、計測・解析・活用に分けて研究を開始したが、研究が進むにつれ、計測データの特性に合わせた解析法や、ある目的に活用するために必要な計測手法や解析手法を考案するなど、互いに連携することが多くなった。ほぼすべての研究成果が、複数のグループの共同成果となっている。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1.

概要:

本研究課題で扱う光の多次元情報のうち、ナノ秒単位の時間軸情報は光が反射や散乱する過程を直接解析できることから、物体の内部状態や材質に関する情報を得ることができ、コンピュータに高度な視覚機能を与えることができる。本研究では、光の伝播と熱の伝播の共通点と相違点を整理し、熱の伝播は光の伝播よりも圧倒的に遅いことを利用して、温度の経時変化から観測画像を様々な成分に分解する手法を明らかにした。これにより、これまで困難であった透明や半透明の物体について、非接触で3次元形状を復元できることを明らかにした。本成果は、その新規性を認められ、当該分野で最高レベルの論文誌 TPAMI (インパクトファクター 24.314) に採択された。

K. Tanaka, N. Ikeya, T. Takatani, H. Kubo, T. Funatomi, V. Ravi, A. Kadambi, Y. Mukaigawa, "Time-resolved Far Infrared Light Transport Decomposition for Thermal Photometric Stereo", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2019.

2.

概要:

分光計測は様々な分野で物質の解析やシーン理解に利用されている基礎技術である。従来の分光器は、波長の分解能と計測範囲にトレードオフが生じるために、これらの両立が難しいという課題があった。本研究成果は、傾斜させたエリアセンサを用いたオーバーサンプリングと原子輝線を用いた波長依存なボケ関数の推定手法の組み合わせにより、トレードオフを解消する手法を提案した。提案手法により、従来の20倍の分解能向上を達成した。

K. Kitano, T. Funatomi, R. Yasukuni, K. Tanaka, H. Kubo, Y. Hosokawa, Y. Mukaigawa, "Super-resolution for Dispersive Spectrometer Using Tilted Area Sensor and Spectrally-varying Blur Kernel Interpolation", Optics Express, vol.29, no.2, pp.2809-2818, 2021.

3.

概要:

カメラを用いたシーン理解能力を向上させるため、時間的に変調した光と空間的に変調した光を組み合わせた時空間変調照明を利用した新たな画像計測装置を設計した。この装置を利用して、精度を落とすことなく広範囲に距離を計測する技術を開発した。本技術はコンピュータショナルフォトグラフィに関する国際会議 ICCP に採択され国際的に高く評価されたほか、特許を出願しており、今後の社会への波及が期待できる。

T. Kushida, K. Tanaka, T. Aoto, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, "Spatio-temporal Phase Disambiguation in Depth Sensing", IEEE ICCP2019, 2019.

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1.

概要:

被写体を撮像素子に直接載せて観測するコンタクトイメージングは、レンズがないために全焦点画像が得られるが、前後関係が把握しにくいという問題があった。我々は視点位置軸の高次元化と画像の鮮明化を同時に行い、計測回数を大幅に減らしても、画像の品質が低下しない新しい光線サンプリング法を考案した。これは、本研究課題の目的である、光学デバイスと解析アルゴリズムの協調設計の具体例となっている。本成果は、当該分野で最高レベルの論文誌 IJCV (インパクトファクター 13.369) に採択された。

F. Kuniyoshi, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Sawada, Y. O. Kato, Y. Mukaigawa, "Visibility Enhancement by Integrating Refocusing and Direct-Global Separation with Contact Imaging", International Journal of Computer Vision, Mar. 2019.

2.

概要:

ナノ秒単位の時間軸の高次元計測の活用として、車の自動運転への利用が期待されている Time-of-Flight カメラを用いて、悪天候の環境下であっても正確な距離と鮮明な画像を同時に計測できる技術の開発に取り組んだ。雨霧のある環境において Time-of-Flight カメラで距離計測した場合、画像が不鮮明になってしまうだけでなく、散乱の影響によって誤った距離が計測されてしまう。本研究成果では、ナノ秒単位の高次元計測が可能な 3 タップ Time-of-Flight カメラを用いて散乱光の影響を解析するアルゴリズムを開発し、距離計測の補正と画像の鮮明化をリアルタイムで同時に行うことに成功した。

D. Kijima, T. Kushida, H. Kitajima, K. Tanaka, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, "Time-of-flight Imaging in Fog Using Multiple Time-gated Exposures", OSA Optics Express, Vol. 29, Issue 5, pp. 6453-6467, Feb. 2021.

3.

概要:

通常の画像計測では縮退してしまうナノ秒単位の表面下散乱光の時間遅れを、Time-of-Flight 計測による距離歪みとして間接的に計測し、プラスチックなどの材質推定の手がかりとして利用できることを示した。光の高次元計測により、これまで利用できなかった潜在的な特徴を画像解析に利用するという独創的なアイデアは国際的にも高く評価されている。

K. Tanaka, Y. Mukaigawa, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, "Material Classification from Time-of-Flight Distortions", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.41, No.12, pp.2906-2918, Sep. 2018.

< 代表的な論文 >

1.

概要:

世界遺産に代表される貴重な文化遺産は、破損や損失のおそれがあるため、現存するうちに詳細にデジタルアーカイブしておくことが望ましい。フランス・パリにあるノートルダム大聖堂や沖縄の首里城が火災によって大きな被害を受けたことは記憶に新しい。本研究では、フランス・アミアンにあるノートルダム大聖堂を対象とし、スタンドグラスの分光情報のデジタルアーカイブを実現した。400nm～2500nm の範囲において 1nm 以下の分解能で詳細に計測したが、その詳細さゆえの代償として、計測が長時間となり、日照などの環境変動の影響を受ける問題がある。本研究では、環境変動を補正するための短時間の追加計測でこの問題を解決した。本成果についてはプレスリリースを出し、一般人を対象にその位置づけを広く知らしめた。

T. Funatomi, T. Ogawa, K. Tanaka, H. Kubo, G. Caron, E. M. Mouaddib, Y. Matsushita, Y. Mukaigawa, "Eliminating Temporal Illumination Variations in Whisk-broom Hyperspectral Imaging", *International Journal of Computer Vision*, Mar. 2022.

2.

概要:

通常の画像計測では縮退してしまうナノ秒単位の表面下散乱光の時間遅れを、Time-of-Flight計測による距離歪みとして間接的に計測し、プラスチックなどの材質推定の手がかりとして利用できることを示した。光の高次元計測により、これまでに利用してこなかった潜在的な特徴を画像解析に利用するという独創的なアイデアは国際的にも高く評価されている。この成果は、本分野の最高レベルの論文誌 TPAMI (インパクトファクター 24.314) に採択された。

K. Tanaka, Y. Mukaigawa, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, "Material Classification from Time-of-Flight Distortions", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.41, No.12, pp.2906-2918, Sep. 2018.

3.

概要:

物体に対して異なる方向から照明した画像の陰影から、物体表面の法線方向を推定する照度差ステレオ法は、コンピュータビジョン分野において、古くから取り組まれている問題であり、ひとつの研究分野ともいえる学問領域である。この問題に対し、本研究課題で扱っている波長の高次元化を適用し、12種類の波長を用いた多波長照度差ステレオ法は、これまで一意に解くことができないとされてきた不良設定問題を、色度に関する制約を加えることで良設定問題とすることができることから大きな意味をもつ。この成果は、本分野の最高レベルの論文誌 IJCV (インパクトファクター 13.369) に採択され、国際的にも高く評価されている。

H. Guo, F. Okura, B. Shi, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, Y. Matsushita, "Multispectral Photometric Stereo for Spatially-Varying Spectral Reflectances", *International Journal of Computer Vision*, 2022.

§2 研究実施体制

(1)研究チームの体制について

① 「計測」グループ

研究代表者:向川 康博 (奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 教授)

研究項目

- ・各軸での高次元データの計測
- ・符号化計測のための光学設計

② 「解析」グループ

主たる共同研究者:松下 康之 (大阪大学大学院情報科学研究科 教授)

研究項目

- ・スパースコーディングによる高次元光情報の基底系の解析
- ・高次元データ解析アルゴリズム設計及びソフトウェア開発

③ 「特定活用」グループ

主たる共同研究者:田中 賢一郎 (立命館大学情報理工学部 准教授)

研究項目

- ・様々な応用に向けた効率的な高次元光計測
- ・応用に合わせた計測デバイスと計算アルゴリズムの協調設計

④ 「融合活用」グループ

主たる共同研究者:久保 尋之 (千葉大学大学院 工学研究院 准教授)

研究項目

- ・多元光情報の融合活用による応用開発

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

本プロジェクトに関連する各個別技術に関して、早期の実用化や社会還元を目指して、以下の国内企業と共同研修を実施している。

- ・小糸製作所(車載カメラによる霧中での画像計測)
- ・パナソニック(レンズレスカメラの設計)
- ・ヤンマー(圃場でのトラクター自動運転)
- ・東芝(時間軸解析による距離計測)
- ・ヴィーネックス(食品異物検査)
- ・NTT(非視線方向撮影)

また、研究活動の国際化の一貫として、以下の海外の大学との共同研究を実施している。

- ・アリゾナ州立大学(視点位置軸の高次元化計測、熱画像の伝播計測)
- ・カーネギーメロン大学(視点位置軸の高次元化計測)
- ・カリフォルニア大学ロサンゼルス校(非視線方向撮影)
- ・ピカルディジュールヴェルヌ大学(ステンドグラス分光計測)
- ・シンガポールマネジメント大学(次元圧縮)
- ・オーストラリア国立大学(スパースコーディング)
- ・北京大学(多波長照度差ステレオ)