

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17767

研究課題名（和文）圧縮型ロバスト動的モード分解に基づく動画成分分離とその応用

研究課題名（英文）Video Component Separation Based on Compressed Robust Dynamic Mode Decomposition and Its Applications

研究代表者

松岡 諒（Matsuoka, Ryo）

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：40780391

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：デジタルカメラの高性能化やAI技術の発展により、監視・車載カメラで撮影した画像から人や車などのオブジェクトを認識する技術が急速に進化している。既存手法では、背景を静止成分とし、動きのある成分を大まかに前景として分離する。しかし、撮影視点はしばしば動き、人や車など動きの異なる被写体に加え、雨や雪の軌跡がノイズとして混入することがある。

本研究では、動的モード分解、スパースモデリング、圧縮センシング技術を融合し、背景の動きに頑健で高次元データを高効率に処理できる動画成分分離アルゴリズムを提案した。さらに、ハイパースペクトル画像などの超高次元データへの応用も検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主要な成果は、既存の動画成分分離技術に比べてノイズなどによる劣化にロバストな手法であるため、動画の物体認識や動き予測の精度改善に貢献し、監視カメラ技術などの応用領域における飛躍的な技術発展が期待できる。さらに、動画やその解析が重要な役割を果たす産業・サイエンス・工学の諸分野に大きく貢献するものである。また、ノイズなどによる劣化の観点から実現が困難であった画期的な動画処理応用を切り開き、医療・農業・産業などの広範な分野に大きなインパクトを与えるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：With the advancement of digital camera technology and AI techniques, the ability to recognize objects such as people and cars in images captured by surveillance and in-vehicle cameras has rapidly evolved. Existing methods typically treat the background as static and roughly separate the moving components as the foreground. However, the camera viewpoint often moves, and noise from rain or snow streaks can be introduced, along with multiple subjects like people and cars, which have different motion characteristics.

This study proposes a video component separation algorithm that integrates dynamic mode decomposition, sparse modeling, and compressed sensing techniques to process high-dimensional data while efficiently being robust to background movement. Additionally, we explore the application of this algorithm to hyperspectral images and other ultra-high-dimensional data.

研究分野：Image processing

キーワード：動的モード分解 スパースコーディング 動画復元 凸最適化

1. 研究開始当初の背景

近年、監視・車載カメラで撮影した画像からシーン中の人や動物、車などのオブジェクトを認識する技術が急速に発展している。これらの技術発展は、自動運転、自律型ロボットの実現に必要不可欠であり、悪天候や災害時に人が踏み込めない危険な地域の災害状況の把握、迅速な救助活動の実現など、Society 5.0 時代における新たな防災システムの創成に繋がる。街並みや風景などのシーン(背景)を撮影した動画画像から人や車などの動きのある物体(前景)を抽出する問題は、前景/背景分離と呼ばれ、盛んに研究されている。

既存手法では、背景成分は静止しているという仮定のもと動きのある成分を大雑把に前景成分として分離を行っている。しかし、車載カメラでは撮影視点は緩やかに動き背景は完全には静止していない。さらに悪天候下では、雨や雪の軌跡が映り込み、分離が困難となる。また、物体認識への応用において、人や車などの複数の前景成分の識別・分離が求められる。一方、4K/8K 動画画像などの超高次元データに対する計算コスト削減、高効率なアルゴリズムの開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究課題では、上述した課題を解決する背景の動きや不要な映り込みに頑健な動画成分分離技術の開発を目的とし、圧縮センシングやスパースモデリング技術を動的モード分解法に高度に融合した超高効率な前景/背景分離アルゴリズムを確立する。

既存手法では、背景成分は完全に静止しており時間軸方向に定常性を有する(低ランク性)、前景成分は時間軸方向に変動し疎に点在する(スパース性)という仮定のもと、動画画像の各フレームをベクトル化しそれらを横に並べた観測行列を低ランクな行列とスパースな行列に分解する。行列分解には、ロバスト主成分分析(RPCA)が用いられている。しかし、背景に緩やかな動きがある場合は、行列が低ランクにならないため、正しく分離ができない。また、計算コストの非常に高い特異値分解を繰り返し計算する必要があり、4K/8K など画像サイズが大きく、フレーム数が多い場合は、ハードウェアのメモリ不足により計算が困難となる。

一方、流体・熱力学の分野で用いられている動的モード分解法(DMD)は、比較的少ない計算コストで時系列データから流れ場の構成成分(モード)を解析・抽出する可能性を秘めている。具体的には、データ行列に対して特異値分解/固有値分解をそれぞれ一度計算するだけで良く、行列サイズが小さい場合はリアルタイム処理に適している。

3. 研究の方法

本研究では、動画画像を空気や流水などのように時間軸方向に一貫した流体構造を持つデータと見なし、DMD を適用することで物理的に意味をもつ特徴をモードとして抽出することを試みる(図1)。具体的には、時間軸方向に全く変化が無い、または比較的動きが小さいが画像全体を占めるモード成分を背景成分として抽出し、一方で、動きが比較的大きくかつ画像の一部を占めるスパースなモード成分を前景成分として抽出する。雨や雪の軌跡が映り込んでいるシーンでは、これらを外れ値(ノイズ)として扱い、スパースな再構成誤差を考慮することで、ノイズに頑健な分離を行う。また、超高次元データに対しては、圧縮センシングの理論を導入し、観測行列を低次元化した行列に対して分離を行う。

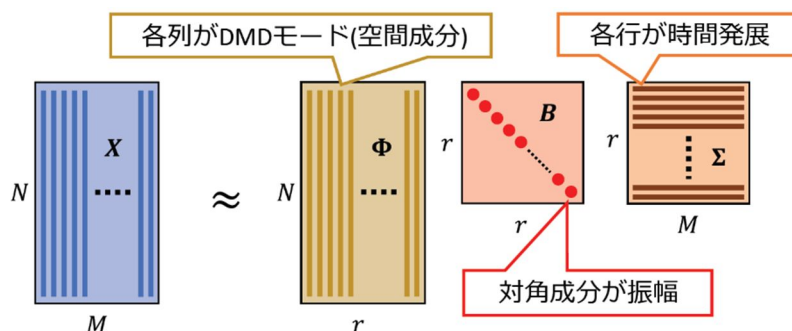


図1 動画画像の動的モード分解

4. 研究成果

本研究における代表的な成果を抜粋して以下に述べる。

(1) 動画画像ノイズ除去のための動的モード分解(DMD)の最適化

緩やかな動きのある背景や複数の動的成分を有するシーンの前景背景分離問題を動的モード分解をベースに定式化し、暗所での撮影などで問題となるセンサノイズによる劣

化を復元するために、動的モードの分解を介した前景背景分離においてノイズも同時に分離するアルゴリズムの構築を行った。具体的には、全変動正則化 (TV) や BM3D などの既存のノイズ除去デノイザを用いた最適化問題を提案した。提案手法により、ノイズにより劣化した動画像からノイズを含まない動的モード成分を高精度に推定することができ、それらを用いてノイズのない背景成分と前景成分を再構成することができる。また、推定した DMD モードで再構成される動画像データが複素数を含まないようにするための制約を新たに加えて、より安定した動画像復元を実現する手法を提案した。人工的にノイズを付加した動画像や実際に高感度撮影により取得したノイジーな動画像に提案手法を適用し、関連する既存手法と比較することで、提案手法の有効性を示した。実験結果の一例を図 2 に示す。TV や BM3D などの既存のノイズ除去手法と比較して、提案手法は PSNR [dB] の値が向上していることが確認できる。また、被写体の輪郭やテクスチャなどの勾配情報を保存しつつ、平滑化やノイズ除去を行う勾配正則化による画像復元手法を提案し、関連手法との比較実験によりその有効性を示した。これらの成果をまとめた論文を国際学術論文誌に投稿し、採択された。

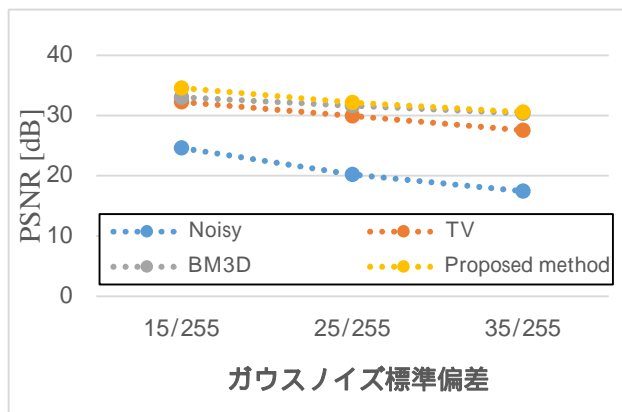


図 2 DMD モードの最適化による動画像ノイズ除去結果の比較

(2) ハイパースペクトル画像の最適復元

ハイパースペクトル画像は、航空撮影などのリモートセンシング分野で非常に重要な役割を果たしている。これらの画像は高分解能の波長情報を含んでおり、そのデータ容量は比較的大きいため、伝送やストレージの負荷が問題となっている。そこで、ハイパースペクトル画像の JPEG 圧縮における最適な画像復元技術を提案し、関連手法との比較によりその有効性を確認した。さらに、非スパースノイズで劣化したハイパースペクトル画像の新しい異常検出手法を提案した。まず、背景成分の空間的な局所低ランク性を特徴付けるために、局所テンソル核ノルム (LTNN) と呼ばれる正則化関数を導入した。次に、LTNN を用いたテンソルロバスト主成分分析 (TRPCA) に基づく最小化問題を定式化し、観測された HS 画像を低ランクな背景成分、スパースな異常成分、およびノイズ成分に分解する。この最適化問題の最適解は、交互方向乗数法 (ADMM) を用いて求めた。実験では、提案手法が Reed-XiaoLi ベースの手法や既存の TRPCA ベースの手法と比較して効果的であることを示した。これらの成果をまとめた論文を国際会議に投稿し、採択された。

(3) 雨の軌跡やガラス面の映り込み除去、ハイパースペクトル画像の異常検知

上述した技術を応用し、ガラス越しの映り込み成分や雨天の屋外での撮影の際に問題となる雨の軌跡の映り込みを多重露光撮影したマルチフレーム画像を用いて除去する手法を提案した。また、超高次元データであるハイパースペクトル画像の異常検知にも応用し、関連手法との比較によりその有効性を確認した。これらの成果をまとめた論文を国内会議や IEEE 主催の国際会議に投稿し、採択された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yamamoto Hyoga, Anami Shunki, Matsuoka Ryo	4. 巻 5
2. 論文標題 Optimizing Dynamic Mode Decomposition for Video Denoising via Plug-and-Play Alternating Direction Method of Multipliers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Signals	6. 最初と最後の頁 202 ~ 215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/signals5020011	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 -
1. 著者名 Matsuoka Ryo, Okuda Masahiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Beyond Staircasing Effect: Robust Image Smoothing via ℓ_0 Gradient Minimization and Novel Gradient Constraints	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Signals	6. 最初と最後の頁 669 ~ 686
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/signals4040037	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 -
1. 著者名 Eguchi Ryunosuke, Kobayashi Iori, Ono Shunsuke, Matsuoka Ryo	4. 巻 -
2. 論文標題 JPEG Artifact Removal for Hyperspectral Images Based on Spatial-Spectral Regularization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of 2023 Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)	6. 最初と最後の頁 784--787
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/APSIPAASC58517.2023.10317509	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 Mishima Mio, Kobayashi Iori, Matsuoka Ryo	4. 巻 -
2. 論文標題 Hyperspectral Anomaly Detection Based on Local-Tensor-Nuclear-Norm	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)	6. 最初と最後の頁 2157--2160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IGARSS52108.2023.10281637	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 Mishima Mio, Matsuoka Ryo	4. 巻 -
2. 論文標題 Weighted median based multiple exposure blending for rain streak removal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)	6. 最初と最後の頁 732--733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/GCCE56475.2022.10014341	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 Takuma Aizu, Ryo Matsuoka	4. 巻 -
2. 論文標題 Reflection Removal Using Multiple Polarized Images with Different Exposure Times	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 2022 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)	6. 最初と最後の頁 498--502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/EUSIPCO55093.2022.9909712	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 Kobayashi Iori, Matsuoka Ryo	4. 巻 -
2. 論文標題 A Study on JPEG Artifact Removal by Four-Directional Difference-based l_1 norm Regularization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)	6. 最初と最後の頁 724--725
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/GCCE56475.2022.10014200	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 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 岡崎圭哉, 松岡諒
2. 発表標題 局所テンソル核ノルムに基づくハイパースペクトルパンシャープニングに関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 會津巧真, 松岡諒
2. 発表標題 多重露光偏光画像を用いたガラス面の映り込み除去
3. 学会等名 電子情報通信学会 SIPシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林伊織, 枝光皓太郎, 松岡諒
2. 発表標題 テンソルロバストPCAを用いたノイズに頑健なハイパースペクトル画像の異常検知
3. 学会等名 電子情報通信学会 SIPシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunki Anami, Ryo Matsuoka
2. 発表標題 Noise Removal for Dynamic Mode Decomposition Based on Plug-and-Play ADMM
3. 学会等名 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association, Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 穴見駿樹, 松岡諒
2. 発表標題 PnP-ADMMに基づく動的モード分解のためのノイズ除去に関する考察
3. 学会等名 電子情報通信学会信号処理シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究者HP https://sites.google.com/site/phdmatsuokadx/home 所属機関が作成した研究者紹介ページ https://www.kitakyu-u.ac.jp/env/faculty/d-media/introduction/ryo-matsuoka.html 研究者HP https://sites.google.com/site/phdmatsuokadx 業績紹介HP https://sites.google.com/site/phdmatsuokadx/achievements

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
---------	---------