

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 4 月 2 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00226

研究課題名（和文）対象依存型データ解析による高次次元画像の理解と認識

研究課題名（英文）Multimodal and Multidimensional Pattern Understanding based Object Oriented Data Analysis

研究代表者

井宮 淳 (Imiya, Atsushi)

千葉大学・統合情報センター・教授

研究者番号：10176505

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：旧来のベクトル形式のパターン認識法では、標準化された画像データを超高次元のベクトルとして扱うため、データ表現すると臓器や細胞の幾何構造や、帯域間の相関を対象の認識・理解に加味するには観測者の対象に対する知識を必要としてきた。したがって、臓器や細胞、材料内部の幾何構造としての性質を考慮しながら判別を行うためには、対象依存データ解析手法に従って、対象の幾何構造や階層構造をも保存したまま、パターン認識理論が適用可能な形式で、高次元配列データを表現する必要するために、多重線形型式を利用して、高次元高次元配列データに対するパターン認識理論を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生物学・医学・材料科学において解析の対象となる高次元画像は、高次元配列データとして時空間の位置に割り付けられた物理量や化学量である。物理量や化学量は、物理計測に基づく原子のスピンに基づく物理情報、生物物理的な情報、光の散乱や放射に基づく多周波数データなど多岐にわたる多元データである。観測され蓄積された大量のデータを対象として、新現象の発見や分類、過去の計測データの検索、計測したデータ間の整合を行う、発見科学の手法を時空間高解像度多元データに適用するためには、多次元多元配列データを機能的に表現し、認識・分類・検索する手法を構築する必要がある。

研究成果の概要（英文）：Analysis, manipulation and recognition of patterns in biomedical images play essential roles in applications such as computer-aided diagnosis for anatomical structure extraction, abnormality detection and image-based histological and pathological classifications. Organs, cells in organs and microstructures in cells, which are the main targets in these medical procedures, are spatial and temporal textures. Using tensor-based data expression, we propose a classification method for temporal morphogenesis of spatiotemporal volumetric sequences. By expressing a digital object in a volumetric video sequence as a set of third-order tensors, orthogonal tensor decomposition yields an extension of the subspace method for classification in vector spaces to that in tensor spaces

研究分野：数値画像解析

キーワード：多重線形型式 主成分分析 多次元多元情報 概略情報 情報圧縮 情報検索 情報蓄積

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

生物学における画像の利用は、観察対象の精密絵画による記録[1,2], 顕微鏡下の現象の目視観察など、観察と記録のために古くから利用されている[3]. 観測装置の進歩に伴い、目視では見えない大きさや現象が記録されてきた[4]. これらの画像データを計算機で処理するためには、多次元配列データの高速・高精度処理が必要となる[5,6,7,8,9]. 例えば、画像隔測において近年注目されている超広帯域(ハイパースペクトラル)画像計測では、周波数解像度 100 チャンネル以上で、ハイビジョン相当解像度の画像が計測される. このような高精細多元画像は多次元配列データとして計算機の記憶装置に格納される. また、3 次元空間に存在する臓器や細胞はその幾何化的な形態、事件的な変化が生物学的な意味を持っている. 生理現象、病理現象をも記録した高次多元画像の認識・分類・検索は、病理検査・細胞診の高度化に伴いさらにその需要が増している. また、病理画像検査からの病変部の検出、病状の推定・予測には、空間分布をそのまま幾何情報として扱う事のできる、新しいパターン認識手法が求められる. さらに、材料科学において対象とされるデータはその空間幾何構造や配置が科学的な意味を持っている. 加えて、衛星から遠隔撮像される画像は、超広帯域の高解像画像に発展している.

- [1] Darwin C. D. (1875) *On the Movements and Habits of Climbing Plants*, John Murray, London
- [2] v. Siebold P. F. J. G. Zuccarini J. G. (1835-1860) *Flora Japonica*, Leiden
- [3] Thompson, D. W. (1917) *On Growth and Form*, Cambridge University Press (On Growth and Form: The Complete Revised Edition, Dover 1992)
- [4] Hooke R. (1665) *Micrographia: or, Some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses*, London: J. Martyn and J. Allestry (first edition) (http://www.gutenberg.org/ebooks/15491?msg=welcome_stranger)
- [5] Smilde A., Bro R., Geladi P. (2005) *Multi-way Analysis: Applications in the Chemical Sciences*, Wiley-Interscience
- [6] Hans Grahn H., Geladi P. eds (2007) *Techniques and Applications of Hyperspectral Image Analysis*, Wiley-Interscience
- [7] G. Kolda G.T., Bader B.W. (2009) Tensor decompositions and applications, *SIAM Review*, 51, 455–500
- [8] Kroonenberg P.M. (2008) *Applied Multiway Data Analysis*, Wiley-Interscience
- [9] Kroonenberg P. M., de Leeuw J. (1980) Principal component analysis of three-mode data by means of alternating least squares algorithms, *Psychometrika*, 45, 69-97

2. 研究の目的

旧来のベクトル形式のパターン認識法では、標本化された画像データを超高次元のベクトルとして扱うため、データ表現すると臓器や細胞の幾何構造や、帯域間の相関を対象の認識・理解に加味するには観測者の対象に対する知識を必要としてきた. したがって、臓器や細胞、材料内部の幾何構造としての性質を考慮しながら判別を行うためには、対象依存データ解析手法[10]に従って、対象の幾何構造や階層構造をも保存したまま、パターン認識理論が適用可能な形式で、高次元配列データを表現する必要がある.

そこで、本研究では、多重線形形式の記述形式であるテンソルを利用して、高次多元高次

元配列データに対するパターン認識理論と画像理解の手法を構築し、多元画像を理解し、認識、分類、検索を統一的に取り扱うことのできるテンソルパターン認識法を開発する。すなわち、パターン認識の方法論を、生命科学・材料科学・医科学等における新たな知識を発見する基本的手法として実現するための数理的基礎を構築する。そして、効率的でかつ高速・高精度の認識・分類・検索法を、パターン認識において実績と蓄積のある部分空間法に基づき構築する。

3. 研究の方法

本研究では、細胞中や材料中の変化部位の特定抽出、3次元構造の時間的変化の追跡、臓器画像や病理画像からの微細な病変部位の判別、などを目的として、材料、細胞、臓器の内部のテクスチャーの3次元構造も加味でき、幾何情報と統計情報とを同時に判別できる部分空間法によるデータ判別手法を構築し、数値解析と数値実験によりその有効性を確認する。そのために、多元的な高次元配列データの幾何構造や階層構造をも保存したまま効果的・高能率に表現する手法として多重線形形式の表現法であるテンソルを利用する。

(1)まず、ベクトルデータの相関行列の固有値問題を解くことによって推定されるパターン空間を近似する線形部分空間の計算法を、多重線形形式を表現するテンソルをデータとする手法に拡張し、テンソル部分空間法を構築する。

(2)そして、多次元配列データの空間を近似する集合である線形部分空間を、ベクトル表現を経由せずにテンソル表現したデータからそのまま計算する手法を構築する。これは、計量心理学において利用される3相主成分分析[8,9]をさらに高次元に一般化したものになる。

(3)また、病理画像検査からの病変部の検出、病状の推定、新規開発材料の検出には、微小な変化部位の形状を、そのまま幾何情報として扱う事のできる、新しいパターン認識手法が求められる。

(4)そこで、対象の位置ずれや微小変化に対して堅固な画像認識手法である相互部分空間法を、多重線形形式表現されたテンソルデータに対して適用できるように拡張し、テンソル相互部分空間法を構築する。

(5)次いで、テンソル形式で表現された多次元配列データをベクトル形式に変換せずに、そのまま分類できる深層構造学習機構を設計し、新規開発材料内部の幾何構造や3次元の臓器画像や細胞画像の高度な分類・検索に適用する。

(6)さらに、辞書として利用される線形部分空間を逐次更新するために、テンソルデータに対する逐次更新部分空間法を構築する。本手法は、通常のベクトルデータに対するOja[12,13]の手法をテンソル形式データに拡張したものに相当する。

一方、通常のRGB三色で表現される画像、カメラからの深度を追加したRGB-D画像、超広帯域画像なども多重線形形式で表現することができる。そこで、これらの多色画像、超広帯域画像をテンソル表現し[6]、情報圧縮や、認識・分類・検索をテンソル主成分分析によって実現する手法を検討する。RGB画像、RGB-D画像を多重線形形式として表現するテンソルは、特定の方向に対してデータの層数が少ない偏りのある多次元データ配列である。

(7)そのため、一方向に対してデータの層数が少ないテンソルを薄いテンソルと呼び、薄いテンソルに対するテンソル主成分分析法を確立する。

4. 研究成果

ベクトル空間における主成分分析では、最適化関数

$$J(\mathbf{U})=f([\mathbf{X}]:\mathbf{U})+ g(\mathbf{U})$$

を停留化し、主成分を記述する直交行列である主成分行列 \mathbf{U} を計算する。ここで、 $g(\mathbf{U})$ は \mathbf{U} に関する制約条件である。このとき、停留値 \mathbf{U} がデータ集合 $[\mathbf{X}]$ の決める自己対称行列の固有行列になる。したがって、特異値分解の算法を利用して容易に主成分を計算することが可能となる。

一方、3次元テンソルの主成分を、Tucker-3 分解[5,6,7,8,9]に基づいて計算する場合には、最適化関数

$$J(\mathbf{U},\mathbf{V},\mathbf{W})=f([\mathbf{X}]:\mathbf{U},\mathbf{V},\mathbf{W})+ g(\mathbf{U})+ g(\mathbf{V})+ g(\mathbf{W})$$

を最適化し、テンソルの主成分を決める 3 つの主成分行列 $\mathbf{U},\mathbf{V},\mathbf{W}$ を計算する必要がある [9,14]。しかし、 $f([\mathbf{X}]:\mathbf{U},\mathbf{V},\mathbf{W})$ が $\mathbf{U},\mathbf{V},\mathbf{W}$ に関する 3 重線形形式であるため、上式の停留値を与える主成分行列 $\mathbf{U},\mathbf{V},\mathbf{W}$ は、ベクトルの主成分解析の場合と異なり、それぞれが、自己対称行列の固有値問題とはならない。

関数 $J(\mathbf{U},\mathbf{V},\mathbf{W})$ を最適化する従来の方法は、 $\mathbf{U},\mathbf{V},\mathbf{W}$ を周期的に順次繰り返し最小化する反復法が利用される。そこで、以下の点を中心に、データ集合 $[\mathbf{X}]$ から、テンソル主成分を決める行列 $\mathbf{U},\mathbf{V},\mathbf{W}$ を直接計算する緩和法を導き、計算が簡便で近似精度の高いテンソル主成分分析法を構築した。

1. 適切な初期値を設定すると、反復解法の 1 回目で十分に精度の高い主成分が計算されることが知られている。そこで、データ集合 $[\mathbf{X}]$ の性質から、適切な初期値を構成する手法を、データ集合 $[\mathbf{X}]$ の決めるテンソルから推定する手法の考案。
2. 信号のパターン認識では、離散コサイン変換行列がデータ集合 $[\mathbf{X}]$ の主成分行列を精度よく近似することが知られている。この性質の 3 次元テンソルで表されるデータへの適用可能性を、情報理論と数値精度の両面からの検討。

また、通常の商用カメラで撮像される画像は RGB の 3 チャンネルであり、近年は、3 次元空間の画像理解において、さらにカメラから対象までの深度を加えた RGB-D の 4 チャンネル画像も利用される。これら画像の決める多次元配列データを表現するテンソルは、特定の方向の層数の小さいテンソルとなる。このような薄いテンソルは、各方向に均質な層数のテンソルと異なる処理が必要となる。そこで、薄いテンソルに対して、上の 2 点を適用し、薄いテンソルのためのテンソル主成分法を合わせて確立する。さらに、多種多様な計測手法によって得られた計測画像を、高次多次元多元画像として表示、蓄積するために、解像度の異なる画像を高精度・高精細で重ね合わせる手法を、画像のレジストレーション技法に基づいて構築した。

大量データの高速分類や、入力と大量の辞書データとの高速照合・高速検索の実現には、概略データを使って事前大分類を行うことが効率的である。概略情報は情報圧縮を行って構成される。臓器などの形状情報の概略情報は概略形状と呼ばれる。主成分分析の結果を利用すれば、元のデータを概略的に表現する情報を抽出できると共に、データを近似する集合である線形部分空間の次元を選択的に抑制することが可能となり、概略形状の幾何的性質を能動的に変化させて、情報濾波の精度を階層的に制御可能となる。そこで、以下の点を中心に、概略形状の計算法と近似の精度について理論解析と数値解析を行い、有効な圧縮法を検討した。

1. 固有値の順序に基づいた主成分行列の決まる固有空間の配置と、近似概略形状の近似度との関係の解明。

2 . 計測されるデータは幾何学的な微小変化を受けている. このような微小変化に対して不変な概略形状を算出するために必要な主成分の数の推定法の確立.

さらに, 3 次元空間に存在する臓器や細胞は, その幾何化的な形態や時間的な変化が, 生理・医学的な意味を持っている. 新たな計測方式の開発, 動的なトレーサーやマーカーによる計測方法の能動化に伴い, 3 次元, 時空間 4 次元, さらに, 彩色情報も含む多チャンネル化された生命・生体の情報が高次多次元画像として非侵襲計測が可能となった. これらの多種多様な情報から診断・治療に有用な情報を抽出するためには, 解像度や計測方法の異なる高次多次元画像から, 画像間に共通の特徴量を抽出する手法を開発すると共に, 微細構造の時空間変化の解析の手法を構築する必要がある. 加えて, 高次多次元画像の解析・認識・分類・蓄積・検索・判別は, 病理検査・細胞診の高度化に伴い, その需要がさらに増しているため, 高次多次元動画像に対する新しいパターン認識手法が求められることを明らかにした.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6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 Hayato Itoh, Atsushi Imiya, Tomoya Sakai	4. 巻 310
2. 論文標題 Distances Between Tensor Subspaces	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Artificial Intelligence and Applications	6. 最初と最後の頁 50-59
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Kento Hosoya, Ryo Sasaki, Kaori Tanji, Hayato Itoh, Atsushi Imiya	4. 巻 310
2. 論文標題 Variational Method for Multiresolution Image Registration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Artificial Intelligence and Applications	6. 最初と最後の頁 157-168
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Hayato Itoh, Atsushi Imiya	4. 巻 11167
2. 論文標題 Discrimination of Volumetric Shapes Using Orthogonal Tensor Decomposition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 277-290
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1007/978-3-030-04747-4_26	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 Hayato Itoh, Atsushi Imiya, Tomoya Sakai	4. 巻 10424
2. 論文標題 Multilinear Methods for Spatio-Temporal Image Recognition	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 148-159
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Hayato Itoh, Atsushi Imiya, Tomoya Sakai	4. 巻 10424
2. 論文標題 Analysis of Multilinear Subspaces Based on Geodesic Distance	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 384-396
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Hayato Itoh, Atsushi Imiya, Tomoya Sakai	4. 巻 1
2. 論文標題 Fast Approximate Karhunen-Loeve Transform for Three-Way Array Data	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops	6. 最初と最後の頁 1827-1834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kaori Tanji, Atsushi Imiya, Hayato Itoh, Hiroaki Kuze, Naohiro Manago	4. 巻 1
2. 論文標題 Linear Data Compression of Hyperspectral Images	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops	6. 最初と最後の頁 3001-3007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Hayato Itoh, Atsushi Imiya, Tomoya Sakai
2. 発表標題 Distances between Tensor Subspaces
3. 学会等名 APPSI2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Hayato Itoh Atsushi Imiya Tomoya Sakai (Xue-Cheng Tai, Egil Bae, Marius Lysaker eds)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 255
3. 書名 Chap. 8 Relaxed Optimisation for Tensor Principal Component Analysis and Applications to Recognition, Compression and Retrieval of Volumetric Shapes in Imaging, Vision and Learning Based on Optimization and PDEs	

1. 著者名 Xue-Cheng Tai	4. 発行年 2018年
2. 出版社 springer	5. 総ページ数 未定
3. 書名 Imaging, vision and learning based on optimization and PDEs	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----