

平成 30 年 9 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際活動支援班）

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21718

研究課題名（和文）スパースモデリングと高次元データ駆動科学の国際活動支援

研究課題名（英文）Support for the international activities of sparse modeling

研究代表者

岡田 真人（Okada, Masato）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90233345

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 30,100,000円

研究成果の概要（和文）：医学班では、スパースモデリング（SpM）法により呼吸位相画像と三次元MR指紋法の再構成法を可能とした。地球科学班では、東北地方太平洋沖地震および歴史津波の堆積物を対象に、データ駆動SpM解析による海成堆積物の判別を可能にした。惑星班ではSpMが効果的な火星を対象に、地形・地質解析で津波堆積物の存在や地下水流動の影響を新たに提唱した。天文班では、国際協力でブラックホール観測データの取得と解析を進め、ブラックホール撮像に必要な解像度が達成されることを実証した。セミパラベイズ班では、セミパラメトリックなベイズ推論で重要となる積分近似、カーネル埋め込み法の共同研究により有効な方法を新たに提案した。

研究成果の概要（英文）：Medicine Group realized reconstruction of multi-phase respiratory and MR fingerprinting images from sparsely sampled data. In the research of geo-sciences, the advanced techniques of sparse modeling have been developed and made great progress in order to utilize domestic and overseas tsunami data acquisition in the international research program. Planetary Science Group applied the SpM techniques to a series of remote-sensing data of Mars, which helped geological interpretations. Results include identifications tsunami deposits on Mars and processes forming Noctis Labyrinthus. In astronomy group, we have conducted black hole imaging observations and data analysis under international collaboration and demonstrated that the angular resolution necessary for direct imaging of black hole shadows has been achieved. Semiparametric Bayes Group has conducted international collaborations which developed new methods for integral approximations and kernel mean embeddings.

研究分野：データ駆動科学

キーワード：スパースモデリング データ駆動科学 津波堆積物 火星リモートセンシング 磁気共鳴医学 巨大ブラックホールの撮像

1. 研究開始当初の背景

本研究は新学術研究(複合領域)「スパースモデリングと高次元データ駆動科学創成」において、自然科学の情報をスパースに収集し表現・解析することで、効率的で詳細な情報を得てその本質に迫ろうとするものである。本国際共同研究加速基金研究により新学術研究計画研究5班(医学・地球科学・惑星科学・天文学・セミパラメトリックベイズ)を対象にスパースモデリング(SpM)法を活用した国際共同研究を促進するものである。

医学班では、医用画像に生じる呼吸などの体動による画像劣化、および得られた画素値の定量性という問題がある。それらを解決することで、画像診断能の向上とより客観的な画像評価が可能となると期待されている。

地球科学班では、2011 大津波による堆積物の判別を目的として、SpM 手法をはじめとするデータ駆動手法を駆使して実験・解析を進めてきたが、過去の歴史堆積物や諸外国の津波堆積物を取扱うことが必須であり、国際共同研究を通じて研究開発の飛躍的な進展が期待できる。

惑星班では小惑星と隕石の反射スペクトルを対比させる活動を行っていたが、類似した手法は他の惑星や衛星等にも広く応用可能であるため、国際共同研究を通じてさまざまな分野へとこの手法を応用し手法のさらなる発展が期待できる。

天文班では巨大ブラックホールの“影”の直接撮像を目指して、地球規模のミリ波 VLBI 観測網を構築する国際プロジェクト EHT (Event Horizon Telescope) を推進しており、スパースモデリングを電波干渉計解析に適用することで、超解像撮像によって高画質な電波写真を得られると期待されていた。

セミパラベイズ班では、方法論の中心であるカーネル法に関して計画班代表者と長く共同研究を進めている University College London および Max Planck 研究所のグループと研究者の相互派遣を行って共同研究を推進することにより、その分野の研究を国際的にリードするグループ形成が期待できる。

2. 研究の目的

医学班では、1) 軀幹部の MRI 画像収集時に問題となる呼吸などの体動への対処、2) MRI 定量値を高速に収集する手法、という2つの課題を解決するために、国際共同研究を推進することを目的とした。

地球科学班では、これまでは国内の沿岸部を中心として津波堆積物や表層土壌の元素組成およびその分布に関する統計数理解析について検討を進めてきた。これらの成果を踏まえ、研究者の招聘や派遣などの国際共同研究により得られた新たなデータへも適用して研究領域を広げてデータ駆動科学の飛躍的な進展をはかる。

惑星班では主に可視～近赤外の反射スペクトルおよび画像、さらに組成情報を整理して対比される活動を行っている。この成果を踏まえて特に火星、土星等の衛星の探査データへの応用を狙う。

天文班では、電波干渉計による巨大ブラックホールの直接撮像を現実のものとするため、国際ミリ波 VLBI 観測網による巨大ブラックホール観測の実現と、その画像解析を国際協力で進めることを目的とする。

セミパラベイズ班では、計画班の研究課題であるセミパラメトリックなダイナミクスの推定法を高度化するために、その基礎技術であるカーネル分布埋め込み法の理論と方法を発展させることを目的とする。

3. 研究の方法

医学班では、ニューヨーク大学放射線科に研究者・藤本晃司を派遣した。彼は肝臓造影ダイナミック検査で用いられている GRASP 法 (SpM 法を活用した撮像および画像再構成法) の改良について研究した。さらに疎収集データから画像定量値を推定する MR 指紋法の研究へと展開した。

地球科学班では、これまで収集した歴史津波堆積物の地質試料およびジオスライサーによる掘削試料を用いて、XRF や ITRAX を駆使した精密な分析作業を実施した。また、収集した膨大なデータを SpM 手法や既往の数理解析手法により解析し、地質学的データの解析を総合して歴史津波堆積物データベースを作成した。

惑星班では、探査情報を整理し反射スペクトルに応じた構成鉱物の検出などの情報に基づき、火星や土星衛星のマッピングを行った。さらに同一地域の繰り返し撮像のメリットを生かし、経時変化の追跡や超解像の可能性についての検討を行った。

天文班においては、観測面では 2017 年春に行われた ALMA を含む初めての国際ミリ波 VLBI 観測において、日本の国立天文台が運用シェアを有する JCMT 望遠鏡(米国ハワイ州マウナケア山)の運用に参加し、ブラックホール観測のデータ取得に貢献した。また、解析面では国際ミリ波 VLBI のデータ解析を米国ハーバード大にて国際共同研究者と協力のもと集中的に行い、特に実際のデータを用いてスパースモデリングによるイメージング法の性能評価を行った。

セミパラベイズ班では、カーネル分布埋め込み法によるノンパラメトリック・セミパラメトリックな方法に関して、University College London、Max Planck 研究所のグループら研究者を相互派遣し、理論的な議論と計算機実験によって共同研究を進めた。

4. 研究成果

医学班では、GRASP 法を発展させて、呼吸位相が同じデータをグループ化し、非剛体位置合わせを行う動きベクトルを定式化に組

み込むことで動きによる画質劣化を最小限にとどめた画像再構成を新たに提案し、2017年4月末の国際学会(ISMRM)で報告した。帰国後は京都大学脳機能総合研究センターの特定助教として、NYUとの共同研究を開始した。彼はNYUの研究者Martijn Cloos氏の開発した三次元MR Fingerprinting法と、ワシントン大学で開発されたヒト生体脳皮質の定量値を三次元曲面上にマッピングする手法を融合させることに成功し、2018年6月の国際学会(ISMRM)で報告する予定である。

地球科学班では、平成27年度から28年度にかけてNSW大学のChatherine Chague-Goff博士を招聘して、仙台市若林区および南相馬市小高区において歴史津波堆積を採取するための現地調査を実施した。新たに30カ所の地質調査および掘削調査を実施し、歴史津波堆積物に関する元素組成および地球化学的データを収集した。また、XRFによる元素分析に加えて、高知コアセンターが保有する高精度のXRFコアスキャナー分析装置を用いて、採取した堆積物コア試料(全長約20m)を対象として、高密度の元素組成分布を把握した。収集された分析データについては、統計数理処理を適用した後にデータ駆動科学によるSpM手法を適用して解析結果を集積させた。これらの研究成果をとりまとめ、研究論文および国際研究集会等において発表した。

惑星班では、予定通りPlanetary Science InstituteのAlexis Rodriguez博士を招聘して、火星の地形・地質解析を行った。効果的にSpMを応用でき、かつSpM研究の発展につながる有望なテーマの洗い出しを行い、特に火星北部低地にみられるローブ状地形の分布と特徴的な浸食地形の欠如を、津波堆積物の存在を仮定することで統一的に説明できることを示した。さらにノクティスラビリンサス地域における地下水の流出に伴う陥没地形の形成史を明らかにした。これらの成果は国際誌論文2本にまとめた。さらにFitchburg state universityのReid Parsons博士も招聘し、特に火星の高解像度画像について、超解像の検討と繰り返し撮像の結果についてのPCA解析を行い、地質学的変化のみを抽出する手法の開発を行った。

天文班では、国際ミリ波VLBIの観測を2017年春に行い、6カ所8台の電波望遠鏡による地球規模の観測を無事に実行し、ブラックホール撮像を達成可能なデータの取得に成功した。さらに、相関処理やキャリブレーションを施したのち、2017年秋には米国ハーバード大にてこの観測データの初期解析を行うイメージングワークショップを開催した。そこでは我々を含め国際チーム内の画像解析に関係する研究者が一同に会し、データの評価を進めた。これによって、ブラックホールを撮像するために必要な分解能をスパースモデリングで達成できることが、実データをもとに示された。

セミパラベイズ班では、ベイズ推論で重要な技術であるカーネル法による積分近似の方法に関して、ペンシルバニア州立大学Sriepmudur氏と共同研究を行い、研究成果NIPS2016において発表した。University Colloge Londonの博士課程学生Jitkrittumを招聘し、カーネル法による新しいノンパラメトリック検定法を提案した。確率分布のフィッティングの場所ごとの有効度を評価することの可能な有望な方法であり、この成果をまとめた論文が機械学習分野の最難関国際会議NIPS2017においてBest Paper Awardを受賞した。また、Max Planck研究所のグループらとともにカーネル分布埋め込み法を普及・発展させる目的でサーベイ論文を出版した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

地球科学班

1. Kengo Nakamura, Tatsu Kuwatani, Takeshi Komai and Shinichi Yamasaki, Extraction of geo-chemical Characteristics of Subsurface Soils -Using Principal component analysis, J. MMIJ, 134(2), 13-21, 2018. (査読あり)
2. Kengo Nakamura, Tetsuo Yasutaka, Tatsu Kuwatani, Takeshi Komai, Development of a predictive model for lead, cadmium and fluorine soilwater partition coefficients using sparse multiple linear regression analysis, Chemosphere, (186), 501-509, 2017. (査読あり)
3. Kengo Nakamura, Tatsu Kuwatani, Yoshishige Kawabe, Takeshi Komai, Extraction of heavy metals characteristics of the 2011 Tohoku tsunami deposits, Chemosphere, 144, 1241-1248, 2016. (査読あり)
4. Takeshi Komai, Tatsu Kuwatani, Kengo Nakamura, Noriyoshi Tsuchiya, Discrimination of tsunami deposits using sparse modeling technique, J.IEIC, 99, 418-423, 2016. (査読あり)

惑星班

5. Ruj, T, G. Komatsu, G, J.M. Dohm, H. Miyamoto, F. Salese, Generic identification and classification of morphostructures in the Noachis-Sabaea region, southern highlands of Mars, J. Maps, 13, 2, 755-766, 2017. (査読あり)
6. Xu, L. N. Hirata, and H. Miyamoto, Ray craters on Ganymede: Implications for cratering apex-antapex asymmetry and surface modification processes, Icarus, 295, 140-148, 2017. (査読あり)
7. Rodriguez, JAP, A.G. Fairen, K.L. Tanaka, M. Zarroca, R. Linares, T. Platz, G. Komatsu, H. Miyamoto, J.S. Kargel, J.G. Yan, Tsunami waves extensively resurfaced the shorelines of an early

Martian ocean, *Scientific Reports*, 6, 25106, 2016. (査読あり)

8. Rodriguez J.A.P., Zarroca M., Linares R., Gulick V., Weitz C.M., Yan J., Fairen A.G., Miyamoto H. Groundwater flow induced collapse and flooding in Noctis Labyrinthus, Mars. *Planetary and Space Science*, 124, 1-14, 2016. (査読あり)

天文班

9. Shadow, Kuramochi, K., Akiyama, K., Ikeda, S., Tazaki, F., Fish, V. L., Pu, H. Y., Asada, K., Honma, M. Superresolution Interferometric Imaging with Sparse Modeling Using Total Squared Variation --- Application to Imaging the Black Hole. *The Astrophysical Journal*, in press, 2018. (査読あり)

10. Matthews, L. D., Crew, G. B., Doleman, S. S., 他 40 名 (19 番目 Honma, Mareki), The ALMA Phasing System: A Beamforming Capability for Ultra-high-resolution Science at (Sub)Millimeter Wavelengths, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 130, Issue 983, id. 015002, pp.1-28, 2018. (査読あり)

11. Akiyama, K., Ikeda, S., Pleau, M., Fish, V. L., Tazaki, F., Kuramochi, K., Broderick, A. E., Dexter, J., Moscibrodzka, M., Gowanlock, M., Honma, M., Doleman, S. S. Superresolution Full-polarimetric Imaging for Radio Interferometry with Sparse Modeling, *The Astronomical Journal*, Volume 153, Issue 4, id. 159, pp.1-10, 2017. (査読あり)

セミパラベイズ班

12. Bharath Sriperumbudur, Kenji Fukumizu, Arthur Gretton, Aapo Hyvärinen, Revant Kumar. Density Estimation in Infinite Dimensional Exponential Families. *Journal of Machine Learning Research* 18(57):1-59, 2017. (査読あり)

13. Krikamol Muandet, Kenji Fukumizu, Bharath K. Sriperumbudur, Bernhard Schölkopf. Kernel Mean Embedding of Distributions: A Review and Beyond. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 10, 1-141, 2017. (査読あり)

14. Jitkrittum, W., Xu, W., Szabo, Z., Fukumizu, K. and Gretton, A. A Linear-Time Kernel Goodness-of-Fit Test. *Advances in Neural Information Processing Systems* 30 (NIPS 2017), 262-271, 2017. (査読あり)

15. Motonobu Kanagawa, Barath K. Sriperumbudur, Kenji Fukumizu. Learning sparse structural changes in high-dimensional Markov networks (NIPS 2016) *Advances in Neural Information Processing Systems* 29, 3288-3296, 2016. (査読あり)

〔学会発表〕 (計 10 件)

医学班

1. Fujimoto K., Cloos MA, Urushibata Y, Okada T. Cortical T1 mapping with 3D MR Fingerprinting at 7T using a single transmit

channel. The Joint Annual Meeting of ISMRM-ESMRMB Jun 16-21, 2018. Paris, France.

2. Akasaka T, Fujimoto K., Cloos MA, Okada T. In Vivo Evaluation of MR Fingerprinting at 7T. The Joint Annual Meeting of ISMRM-ESMRMB Jun 16-21, 2018. Paris, France.

3. Fujimoto K., Feng L, Otazo R, Block KT, Rusinek H, Wake N, Chandarana H. GRASP with Motion Compensation for DCE-MRI of the Abdomen. The ISMRM 25th Annual Meeting & Exhibition April 22-27, 2017. Hawaii, USA.

地球科学班

4. Catherine Chague-goff, Takeshi Komai, Geochemical analysis of palaeotsunami deposits, ITRAX core scanning and statistical analysis, 14th International Workshop on WATER DYNAMICS, Sendai, (2015.3)

惑星班

5. J. A. P. Rodriguez, D. L. Domingue, J. S. Kargel, V. R. Baker, L. F. Teodoro, D. C. Berman, H. Miyamoto, M. Banks, EVIDENCE OF PERVASIVE COLLAPSE OVER A BURIED VOLATILE-RICH CRUST ON MERCURY, 49th Lunar and Planetary Science Conf (LPI Contrib No 2083), 1309, 2018 (March, 2018)

6. H. Miyamoto, T. Niihara, K. Wada, K. Ogawa, N. Baresi, P. Abell, E. Asphaug, D. Britt, G. Dodbiba, T. Fujita, K., Fukui, M. Grott, K. Hashiba, R. Hemmi, P. Hong, T. Imada, H. Kikuchi, P. Michel, K. Mogi, T. Nakamura, PHOBOS ENVIRONMENT MODEL AND REGOLITH SIMULANT FOR MMX MISSION. 49th Lunar and Planetary Science Conf (LPI Contrib No 2083), 1882, 2018(March, 2018)

7. Reid A. Parsons, H. Miyamoto, ICE VISCOSITY REDUCTION RESULTING FROM REGOLITH INSULATION ON MARS, 49th Lunar and Planetary Science Conf (LPI Contrib No 2083), 1927, 2018(March, 2018)

8. Xu, L.Y. H. Miyamoto, N. Hirata, The apex-antapex cratering asymmetry on Jovian satellites: implications from ray craters on Callisto and Ganymede, Lunar Planet. Sci. Conf., XLVIII, Houston, TX, USA, March 20-24, #1774, 2017(March, 2017)

セミパラベイズ班

9. Jitkrittum, W., Xu, W., Szabo, Z., Fukumizu, K. and Gretton, A. (2017) A Linear-Time Kernel Goodness-of-Fit Test. *Neural Information Processing Systems* 2017.

10. Motonobu Kanagawa, Barath K. Sriperumbudur, Kenji Fukumizu. Learning sparse structural changes in high-dimensional Markov networks (NIPS 2016) *Neural Information Processing Systems* 2016.

〔図書〕 (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://sparse-modeling.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 真人 (Okada, Masato)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号: 90233345

(2) 研究分担者

医学班

富樫 かおり (Togashi, Kaori)

京都大学・医学研究科・教授

研究者番号: 90135484

地球科学班

駒井 武 (Komai, Takeshi)

東北大学・環境科学研究科・教授

研究者番号: 30357024

惑星班

宮本 英昭 (Miyamoto, Hideaki)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 00312992

天文班

本間 希樹 (Honma, Mareki)

国立天文台・水沢 VLBI 観測所・教授

研究者番号: 20332166

セミパラベイズ班

福水 健次 (Fukumizu, Kenji)

統計数理研究所・数理・推論研究系・教授

研究者番号: 60311362

(3) 連携研究者

医学班

岡田 知久 (Okada, Tomohisa)

京都大学・医学研究科・特定准教授

研究者番号: 30321607

藤本 晃司 (Fujimoto, Koji)

京都大学・医学研究科・特定助教

研究者番号: 10580110

地球科学班

桑谷立 (Kuwatani, Tatsu)

海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野・研究員

研究者番号: 60646785

(4) 研究協力者

医学班

Hersh Chandarana (New York Univ.),

Martijn A. Cloos (New York Univ.)

地球科学班

Chatherine Chague-goff

(New South Wales University, Australia)

セミパラベイズ班

Bharath Sriperumbudur

(Pennsylvania State University)

Arthur Gretton

(University College London)

Wittawat Jitkrittum

(University College London)

Krikamol Muandet (Mahidol University)

天文班

秋山和徳 (Akiyama, Kazunori)

(Massachusetts Institute of Technology)

Shep Doeleman

(Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)