

令和元年6月14日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K15019

研究課題名（和文）計算食料科学へ向けた牛肉脂肪の3次元幾何・位相解析

研究課題名（英文）Geometry and Topology of 3D Beef Marbling for Computational Food Science

研究代表者

吉澤 信 (Yoshizawa, Shin)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・上級研究員

研究者番号：10455371

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：牛肉の品質評価は重要な課題であり、特に脂肪交雜の客観的・定量的な評価が畜産・食品産業にて注目されている。本研究は牛脂肪交雜の3次元幾何・位相解析を目的に実施した。実際の牛肉試料に対して、3次元計測の方法を開発し、画像としてデジタル化した。計測時に現れるノイズを除去する計算法、脂肪領域を画像から抽出する計算フレームワーク、及び幾何計算を行うプログラムの開発を行った。今後、幾何・位相解析結果、畜産学的な基準及び生化学的な解析との相関を調査することで客観的・定量的な品質評価が可能となる。さらに、本研究を通して食品・素材を数学的に不変な特徴量解析を行うパラダイムを提案し、計算食料科学の先駆けとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は今までの2次元画像に基づく牛肉解析とは一線を画し、実際の3次元形状を数学的に不変な幾何・位相特徴で解析を行う独創的な学術成果である。開発した画像化・計算法は情報学のみならず計算食料科学の礎となることが期待される。さらに、社会的に重要な和牛の客観的・定量的な品質評価に寄与する意義が有る。

研究成果の概要（英文）：Quality evaluation of Wagyu (Japanese beef) is important in animal husbandry, zootechnical science, and food industry. Especially, quantitative and objective analysis of fat marbling has been demanded. In this research, we proposed 3D geometric and topological analysis of beef fat marbling. For a given real beef fresh meat, we developed an imaging framework, noise reduction filters, fat marbling segmentation and labeling methods, geometric and topological feature analysis programs. We believe that our research contributes to beginning of Computational Food Science by combining geometry and topology, animal husbandry, and biochemical analysis.

研究分野：Computer Science

キーワード：牛脂肪 3次元画像処理 牛脂肪幾何解析 牛脂肪位相解析 計算食料科学

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

牛肉は我々の食生活及び畜産・食品産業にて経済的・産業的な価値が非常に高い食料であり、その評価法の研究・開発は学術的に重要である。一般によく知られている肉質等級は、牛脂肪交雑基準 (BMS)、色基準 (BFS, BCS) や締まり・きめ等の指標から構成され、その評価は検査員の主観に大きく依存する。それゆえ、牛脂肪の生化学解析や画像認識を用いた BMS 推定など、品質評価の定量化や自動化を目指した研究が盛んである。残念ながら、2次元画像に基づく研究が主であり、現実の3次元脂肪形状が正しくは評価されてはいない現状である。しかしながら、複雑な3次元幾何・位相構造を有する「サシ (霜降り)」と呼ばれる脂肪の網目は、風味・香り・触感に直接関係すると考えられている。したがって、その3次元構造を正しく理解し、現在用いられている生化学的・畜産学的な指標との関係を科学的に明らかにする事は、牛肉の品質評価を革新するために重要である。

2. 研究の目的

本研究では、牛肉脂肪の3次元幾何・位相解析を目的とし、背景で述べた問題の克服を試みた。新たに幾何・位相解析の計算モデルを開発し、3次元脂肪の特徴を定量化する。畜産学的指標 (BMS・価格等) 及び生化学的実験結果と、三位一体の相関解析を行うことで、「サシ」構造と旨味・価格 (等級) の関係を明らかにすることが期待される。本研究により、初めて3次元で牛肉品質の客観的かつ定量的な評価が可能になり、畜産・食品産業応用だけでなく、計算食料科学 (Computational Food Science) への礎を目指した。

3. 研究の方法

(1): **牛肉の3次元画像化**: 牛脂肪の「サシ」は微細構造であり、その形状を正確に計測する事は難しい問題である。そこで本研究では、3次元内部構造顕微鏡 (以下 3D-ISM) を用いて、試料を実際に切削する破壊検査により、3次元カラー画像として牛肉試料を計測する。3D-ISM はミクロン精度の精密な試料計測が可能な装置であり、マウス脳の3次元遺伝子解析や鉄鋼材料の形態解析など多数の実績がある手法である。牛肉試料の計測へは未だ適用されていないため、予備実験にて試料調整や画像化の実験条件選定を行う。

(2): **脂肪交雑領域抽出**: 計測した3次元カラー画像から、脂肪領域を自動抽出する計算法の考案・実装・テストを実施する。「サシ」構造は微細かつ複雑なため正解教師画像を用意する事は困難である。一方、脂肪と赤身は色空間にて特異的な分布を得る事が予測される。したがって、非学習的な色空間での領域抽出法を適応する事で抽出法の選定・考案を行う。また、3次元で連結した脂肪領域のラベル付を行う計算法を開発する。

(3): **幾何・位相特徴抽出**: 領域抽出された牛脂肪の3次元領域はラベル付された画像であり、ホモロジー及び曲率極値線を直接は適用できない。それゆえ、ボクセル表面を曲面と考えた場合及び高次元ユークリッド空間に埋め込まれた陽の曲面 (画像多様体) と考えた場合を検証する事で、新たな計算モデルを考案・実装しテストする。

(4): **相関解析**: 畜産学・生物学的な指標と考案した幾何・位相特徴の相関を調査する。

4. 研究成果

(1): **3次元画像化と評価法・観察法の調査**: 精肉店及び精肉問屋で購入した食肉・リブブロックに対して、試料調整の検討及び3D-ISMの条件検討を実施し、脂肪交雑が画像工学及び畜産学の意味で適切に観察される実験プロトコル・3次元画像化法の開発に成功した (図1)。また、中央畜産会、日本食肉格付協会、及び農研機構畜産研究部門に聞き取り調査を実施し、畜産学・生物学的な指標の検討、試料調整法の整理を得た。さらに細胞集団移動の分子生物学的な発見を得たことにより、生物学的な観点からの筋肉構造の理解を深めた。今後は引き続き各団体と協力し、本研究期間では困難であった脂肪の生化学・官能評価と本研究で得た幾何・位相特徴の相関を研究予定である。

(2): **3次元スライス画像のノイズ除去計算法**: 3D-ISMは試料をスライスし2次元の画像を積み重ねて3次元画像を生成する。また、試料は凍結して包埋材で3D-ISMの試料枠に固定している。それゆえ、観察時の切りくずや氷塊などがノイズとして撮影される。脂肪交雑の正確な幾何・位相解析のために、この様なノイズを除去する計算法の開発を行った。新たに適応型幾何中央値フィルタをスライス方向に限定適用することで、物理メモリで処理するのは困難な大規模3次元カラー画像 (例えば 6016x4016x1199 画素: 163G Byte) でも高速に切りくずや氷塊ノイズを除去することに成功した。通常の加算・インパルスランダムノイズ除去法では困難な複雑なノイズに対して、(前後スライスを考慮し)元の形状を復元する非常に良い結果を得た (図2)。

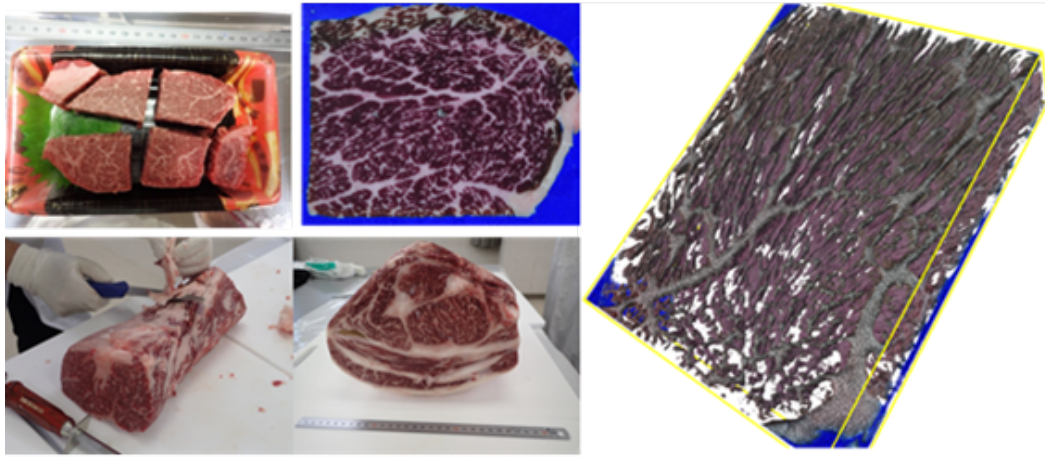


図1：実験に用いた試料・試料調整の様子(左，下段中)と観察・画像化結果（スライス：上段中，メモリ内におさまる様に縮小した3次元画像のVolume Rendering：右）. A4肉を使用しており，複雑な3次元脂肪交雑が確認できる．また，3D-ISMにより，1画素が約細胞1個の解像度で詳細な小ザシの可視化に成功している．

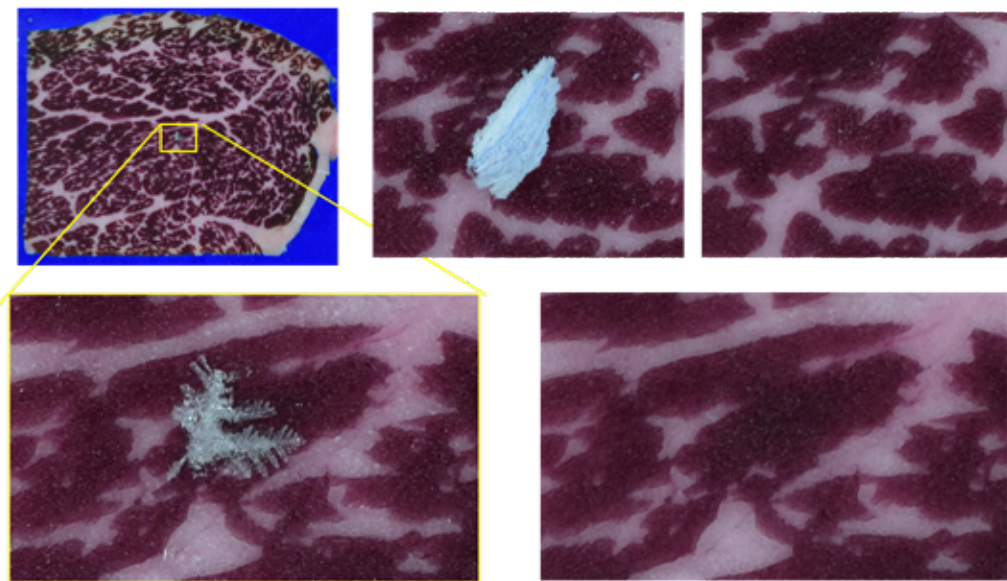


図2：開発したフィルタを用いたノイズ除去結果例．切りくず(上段中左)や氷塊(下段)が綺麗に削除され，元の脂肪交雑の形状を復元している．6016x4016画素の1断面を約1秒で処理する高速な計算速度を達成した(同じサイズの画像ファイルI/Oの方が約6秒と遅い)．

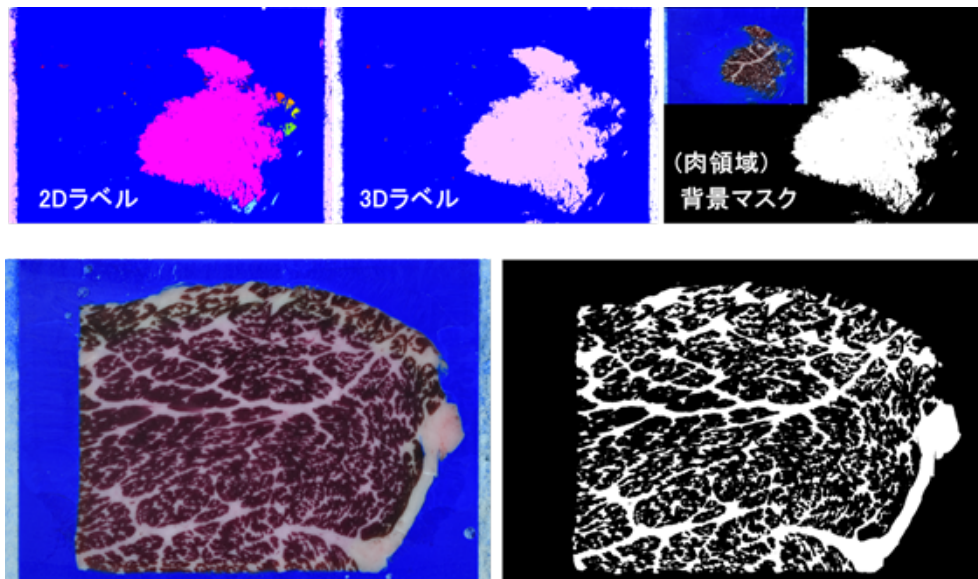


図3：脂肪交雑抽出結果例．上段：2次元ラベル(左)と3次元グラフのラベル(中)，3次元体積最大な背景マスク(右)．2次元的には分離している領域が3次元的には連結していることが確認できる．下段：抽出結果の入力(左)と出力(右)．

(3): **脂肪交雑抽出法**: 3D-ISM で得られる 3 次元牛肉画像は前述のとおり物理メモリ上で複雑な処理を行うことが困難である. それゆえ, 大規模な 3 次元牛肉画像から脂肪交雑領域を Out of Core (メモリ外) で抽出する新しい領域抽出計算法を開発した. 提案法は, まず背景 (肉領域) を 3 次元で抽出し, 赤身と脂肪の分離はスライス毎に行う. 背景抽出は 3 次元グラフ構造を用いて Out of Core での適用が可能である. 赤身と脂肪の分離は背景マスク内の領域に色空間を考慮した再帰的大津法を適用する. 最終的な 3 次元連結脂肪ラベルは上記背景マスク抽出と同様の 3 次元グラフの領域拡張法で抽出される. 小ザシが複雑に入った脂肪交雑領域を正確に抽出することに成功した (図 3).

(4): **幾何・位相特徴計算法**: 脂肪交雑の山尾根谷特徴は曲率及び曲率導関数を領域抽出後の画像多様体への多項式フィットで計算する方法を開発した. 大規模 3 次元画像に対する Out of Core パーシステンスホモロジー及びオイラー数の計算法は現在開発中であるが, 要素であるベッチ数 (連結数, 空洞数) は, 上記 3 次元グラフの領域拡張法で計算しており, 3 次元解析である本研究特有の結果を得ている (図 4). また, ノイズに堅牢な主成分分析法の開発やオプティカルフローの調査・実装・実験を行い, (細胞内筋骨格系を制御する) 細胞集団画像での幾何特徴抽出に成功している. 今後幾何・位相解析結果と畜産学・生物学的な指標とのより詳細な相関解析を実施予定である.

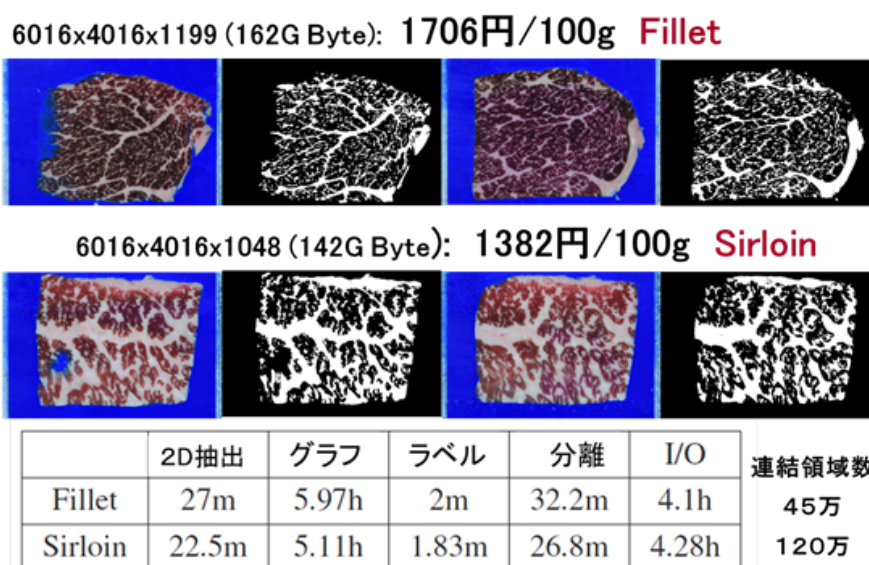


図 4 : A4 ヒレ (上段) と A4 サーロイン (中段) に対しての解析結果例 (解像度等の条件は同じ), 下段表内の数値は計算時間. ヒレの方が細かく複雑であり, サーロインの方がサシの領域占有率が高くヒレほど複雑でないにも関わらず, ヒレの方が連結数は 1/3 ほど小さい. これは 2 次元で見る直観と逆であり, ヒレのサシ構造は 3 次元的に繋がりが強くサーロインでは反対に 3 次元的に細切れなことが分かり, 本研究の 3 次元解析でしか得られない結果である.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

1. S. Miyagawa, **S. Yoshizawa**, and H. Yokota, "Trimmed Median PCA for Robust Plane Fitting", Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, 査読有, pp. 753-757, 2018, DOI: 10.1109/ICIP.2018.8451752
2. A. Sakane, **S. Yoshizawa**, H. Yokota, and T. Sasaki, "Dancing Styles of Collective Cell Migration: Image-Based Computational Analysis of JRAB/MICAL-L2", Frontiers in Cell and Developmental Biology, 査読有, 6(4):1-7, 2018, DOI: 10.3389/fcell.2018.00004
3. **吉澤 信**, 西村 将臣, 辻村 有紀, **横田 秀夫**, "オプティカルフロー: 動きの画像解析", 実験医学 (ISBN: 978-4-7581-0375-6), 査読無し, 36(20): 3546-3547, 2018.
4. **吉澤 信**, 宮川 雄, **横田 秀夫**, "ロボラスト主成分分析", 実験医学, 査読無し, 36(20): 3548-3549, 2018.
5. **吉澤 信**, 森田 正彦, **横田 秀夫**, "生物画像管理システム", 実験医学, 査読無し, 36(20): 3556-3558, 2018.
6. D. Bashkirova, **S. Yoshizawa**, R. Latypov, and H. Yokota, "Fast L1 Gauss Transforms for Edge-Aware Image Filtering", Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 査読有, 29(4): 55-72, 2017, DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(4)-4
7. D. Bashkirova, **S. Yoshizawa**, R. Latypov, and H. Yokota, "Fast L1 Gauss 2D Image Transforms", Proceedings of Spring/Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering (ISSN :

- 2311-7230), 査読有, pp. 145-149, 2017,
8. 吉澤 信, 中村 佐紀子, 横田 秀夫, “3次元スライス画像のノイズ除去”, Proceedings of 画像センシングシンポジウム, 査読有, pp. S02-IS2-07: 1-6, 2017.
 9. A. Sakane, S. Yoshizawa, et al., “Conformational plasticity of JRAB/MICAL-L2 provides “law and order” in collective cell migration”, Molecular Bi-ology of Cell, 査読有, 27, 2016, DOI: 10.1091/mbc.e16-05-0332

[学会発表] (計 21 件)

1. 吉澤 信, 宮川 雄, 横田 秀夫, “中央値共分散行列のトリミングによる堅牢な平面推定”, 精密工学会春季学術講演会, 東京電機大学, 2019.
2. S. Yoshizawa, “Fast and accurate edge-aware image filters”, ABiS-GBI-OIST-RB Joint Symposium: Frontiers in Bioimaging, 招待講演, 国際学会, OIST, 2018.
3. 吉澤 信, 宮川 雄, 横田 秀夫, “Trimmed Median Principal Component Analysis”, 理研シンポジウム: 第6回光量子工学研究, 理化学研究所, 2018.
4. S. Yoshizawa, S. Nakamura, and H. Yokota, “3D Beef Marbling Extraction”, International Meeting on Bioimaging for Young Researchers, 国際学会, OIST, 2018.
5. 坂根 亜由子, 吉澤 信, 松井 翼, 土屋 裕子, 水口 賢司, 出口 真次, 横田 秀夫, 佐々木 卓也, “組織構築・修復過程において一分子構造変化が織り成す多彩な細胞移動とその意義”, 日本生化学会, 京都国際会館, 2018.
6. 坂根 亜由子, 吉澤 信, 土屋 裕子, 松井 翼, 出口 真次, 水口 賢司, 横田 秀夫, 佐々木 卓也, “集団的細胞運動において一分子構造変化が生み出す多様な運動様式とその役割”, 日本分子生物学会年会, パシフィコ横浜, 2018.
7. 吉澤 信, 中村 佐紀子, 横田 秀夫, “大規模3次元画像からの牛脂肪交雑形状抽出”, 精密工学会春季大会学術講演会, 中央大学, 2018.
8. 吉澤 信, 横田 秀夫, “グラフ理論による4D画像のZ-Drift補正”, 精密工学会春季大会学術講演会, 中央大学, 2018.
9. 吉澤 信, 中村 佐紀子, 横田 秀夫, “大規模3次元牛肉画像の脂肪交雑抽出”, 理研シンポジウム: 第6回光量子工学研究, 理化学研究所, 2017.
10. S. Yoshizawa, S. Nakamura, and H. Yokota, “Towards to Geometrical and Topological Analysis of Beef Marbling”, 2nd Biomechanics Visualization Workshop, Kumejima, 2017.
11. D. Bashkurova, S. Yoshizawa, and H. Yokota, “Fast Image Filtering with L1 Gauss Transform”, International Computer Vision Summer School, 国際学会, Sicily, 2017.
12. 吉澤 信, 横田 秀夫, “超解像へ向けた高速画像フィルタ”, 日本細胞生物学会, 招待講演, 仙台国際センター, 2017.
13. 吉澤 信, 横田 秀夫, “Edge-aware Image Processing”, 1st Biomechanics Visualization Workshop, 名古屋大学, 2017.
14. M. Morita, G. Masumoto, M. Nishimura, Y. Tsujimura, S. Takemoto, S. Yoshizawa, R. Himeno, and H. Yokota, “Cloud computing system for image processing and sharing in 4D Cell project”, Taiwan-Japan Joint Meeting on Bioimaging for Young Researcher, Academia Sinica, 2017.
15. 宮川 雄, 吉澤 信, 加曾利 直人, 横田 秀夫, “道路点群の効率的なセグメンテーション”, 精密工学会春季学術講演会, 慶應義塾大学, 2017.
16. 吉澤 信, 中村 佐紀子, 横田 秀夫, “異方性適応型ベクトル中央値フィルタを用いた3次元牛肉画像のノイズ除去”, 精密工学会春季学術講演会, 慶應義塾大学, 2017.
17. 山下 典理男, 森田 正彦, 吉澤 信, 横田 秀夫, 井上 純哉, 糟谷 正, “鉄鋼組織の全自動三次元観察システムと組織形状の特徴量抽出のための画像処理クラウド”, SIP「革新的構造材料」マテリアルズインテグレーション シンポジウム, 東京大学, 2016.
18. 吉澤 信, 中村 佐紀子, 横田 秀夫, “3次元牛肉画像のノイズ除去”, 理研シンポジウム: 第4回光量子工学研究, 理化学研究所, 2016.
19. 吉澤 信, 横田 秀夫, “高速Ridge回帰フィルタ”, 理研シンポジウム: 第4回光量子工学研究, 理化学研究所, 2016.
20. 森田 正彦, 西村 将臣, 井尻 敬, 吉澤 信, 辻村 有紀, 山下 典理男, 横田 秀夫 “画像・処理履歴の一元管理による効率的な画像処理クラウド”, 理研シンポジウム: 第4回光量子工学研究, 理化学研究所, 2016.

21. 吉澤 信, ベリヤエフ アレキサンダー, “*Curvature-based Mobius-invariants*”, レゾナンスバ
イオ若手の会, 東京理科大, 2016.

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: 点群データの抽出方法、及び点群データの抽出装置

発明者: 吉澤 信、横田 秀夫、宮川 雄

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2017-037620

出願年: 2017

国内外の別: 国内

名称: 点群データの分割方法、及び点群データの分割装置

発明者: 吉澤 信、横田 秀夫、宮川 雄

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2017- 037621

出願年: 2017

国内外の別: 国内

名称: 点群データからの基準平面生成方法、及び装置

発明者: 吉澤 信、横田 秀夫、宮川 雄

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2017- 037624

出願年: 2017

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

www.riken.jp/briect/Yoshizawa

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 横田 秀夫

ローマ字氏名: Yokota Hideo

所属研究機関名: 国立研究開発法人理化学研究所

部局名: 光量子工学センター

職名: チームリーダー

研究者番号 (8 桁): 00261206

研究分担者氏名: 竹本 智子

ローマ字氏名: Takemoto Satoko

所属研究機関名: 国立研究開発法人理化学研究所

部局名: 光量子工学センター

職名: 研究員

研究者番号 (8 桁): 00450403

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 中村 左紀子

ローマ字氏名: Nakamura Sakiko

※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。