

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：62615

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2015～2019

課題番号：15H05918

研究課題名（和文）コンピュータビジョンで実現する多様で複雑な質感の認識機構

研究課題名（英文）Understanding Complex Shitsukan Mechanisms

研究代表者

佐藤 いまり（Sato, Imari）

国立情報学研究所・コンテンツ科学研究系・教授

研究者番号：50413927

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 47,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究計画では、既存の反射モデルでは表現することが難しい微細構造を持つ物体を対象に、その複雑で多様な質感をモデル化する手法の開発を進めた。具体的には、様々な照射方向・物体表面の光照射点、観察方向のもとで対象物体を観察し、相互反射や内部散乱といった光学現象の各要素を分離して計測する技術や物体の3次元構造を理解する技術を開発し、人間の質感認知のためにどのような光学現象の正確な再現が必要であるのかについての検討を進めた。この解析に基づき、対象物体の多様な質感を効果的にモデル化する手法を研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

肉、果物、野菜といった生鮮食品や草花や石などの自然物の多くは半透明で不均一な散乱特性を持ち、物体表面の反射のみならず内部散乱に起因した光学現象が物体の質感知覚に大きな影響を与えていることが予想される。このような背景のもと、少ない計測に基づき複雑で多様な質感を効率良くモデル化できる技術の創出は、複雑な光学現象と質感の関係解明という新たな研究分野を広げ、美術品の解析、工業製品の質感向上など幅広い社会実装が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we analyzed the microstructure of objects for Shitsukan analysis that are difficult to represent with conventional reflection models. We developed techniques to estimate optical phenomena, such as reflections and internal scattering, and the three-dimensional structure of objects by observing objects under various lighting and viewing directions. The question of what kind of accurate reproduction of optical phenomena is necessary for human Shitsukan recognition was investigated.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：反射解析 分光解析 インバースレンダリング 質感合成

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

コンピュータグラフィックス(CG)により現実感の高い映像コンテンツを生成するためには、その入力としてシーンの物体(形状や反射特性)および光源分布に関する精密なモデルを必要とする。実物体の観察に基づき、詳細な幾何および光学モデルを実物体から自動的に獲得する手法の開発が1990年代後半より活発に進められてきた。物体表面の材質を決定する反射特性に関しても、物体表面における光の伝搬を近似する反射モデル式が提案され、実在物体の観察に基づき反射パラメタを推定する手法が提案されてきている。しかしながら、反射モデル式に基づく解析で扱うことがきる光学現象は限られており、物体表面の微細構造や内部構造に起因する内部散乱、異方性反射、構造色などの複雑で多様な光学現象をモデル化する簡便な手法は実現できていない。これに対し、肉、果物、野菜といった生鮮食品や草花や石などの自然物の多くは半透明で不均一な散乱係数を持ち、物体表面の反射のみならず内部散乱に起因した光学現象が物体の質感知覚に大きな影響を与えていることが予想される。このような背景のもと、少ない計測に基づき複雑で多様な質感を効率良くモデル化できる技術の実現が待たれていた。

### 2. 研究の目的

本研究計画は、理論検証型アプローチにより質感認識メカニズムを解明することを目的とする。本計画研究では、物体表面の微細構造に起因する表面下散乱、内部散乱、異方性反射、構造色、相互反射といった複雑な光学現象に起因する質感を効率的に記録・再現・加工する手法は未だ確立されていない。具体的には、様々な照射方向・物体表面の光照射点や観察方向のもとで対象物体を観察し、相互反射や内部散乱といった光学現象の各要素を分離して計測することで、対象物の詳細情報(3次元構造、反射、吸収、散乱)を獲得し、対象物体の多様な質感を効果的にモデル化・再現する手法の開発を目指す。

### 3. 研究の方法

本計画研究では、実物体表面・内部の微細な構造に起因して発生する複雑で多様な質感を対象として、質感のモデル化・合成技術を開発した。

**物体表面で観察される光学要素の分離計測:** 照明条件の変化に伴い物体表面で観察される明るさを構成する光学的要素を分離して計測する技術や物体形状および分光情報を獲得する技術を開発した。具体的には、直接反射成分(物体表面における一次反射)、物体の透過性など物体の内部構造に起因する間接反射成分(物体内部、物体表面における多重反射)、物体表面の鏡面反射(艶具合)や拡散反射などの詳細な要素を分離計測可能な技術を開発した。

**光学特性と質感知覚関係の解明:** 光学的要素を変化させた時の質感の変化を解析することにより、質感知覚のためには、どのような光学情報の再現が必要であるのかについて調べた。また、デッサン画データベースを構築し、質感の描き方の解析により質感の構成要素を調査した。

### 4. 研究成果

(1) 物体表層内での光の伝搬の特性に着目し、通常のカメラを可視光下で用いて物体表層内の光の伝搬過程を可視化する画像撮像法を開発した。具体的には、物体表面の各点を中心とした徐々に大きくなる半径のリングライトで照射した放射輝度を、各点を個別に照射した画像列から仮想的に作成し、それぞれの半径に対応する画像同士の差分を取ることに

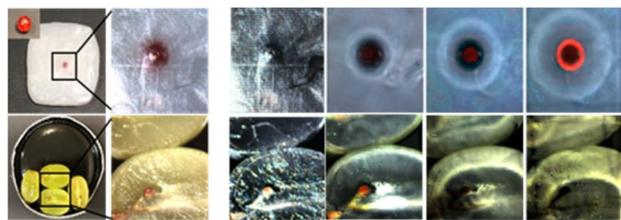


図1: 可変リングライトイメージングによる半透明物体の物体表層における光伝搬の観測。

より光の伝搬距離がそれらの半径の差に限定された画像列を生成できることを示した。このようにして得られた画像列は、物体表層内で光が拡散・散乱しつつ伝搬する様子を捉えていることを、果物や人間の皮膚を含めた様々な自然物体を用いて実証した(図1)。さらに、これらの復元された伝搬画像から物体表層内の異なる深さにおける色の特定をおこなえることも示した。

本成果は、その簡便な実装から、実用的な物体表層の解析手段として役立つと考えられる。

(2)機械学習に基づき1枚のRGB画像からシーンの直接反射成分と間接反射成分の分離する技術を開発し、直接反射と相互反射成分の割合を調整することにより異なる質感を生み出せることが分かった。図2に提案技術の概要と質感操作の一例を示す。

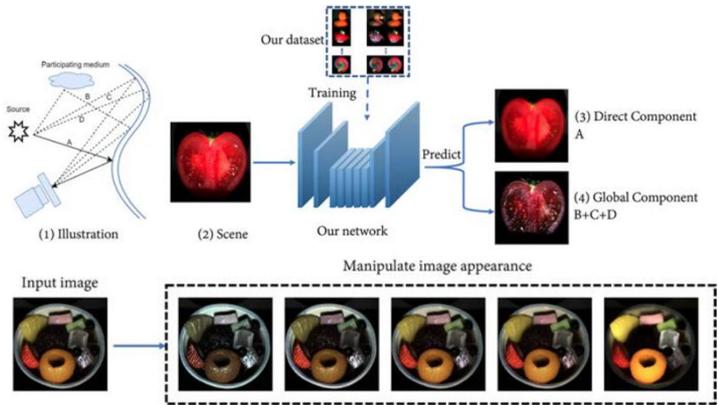


図2：機械学習による光学特性の分離計測と質感操作。

(3) 光伝播を効率的に獲得できる計測システムを開発にも取り組んだ。従来のプロジェクタ・カメラ系による光伝播計測では、特定の伝播距離の光伝播を計測するためには複数回の計測が必要であったが、本研究では図3に示すように平行化された小型のレーザー走査方式のプロジェクタとローリングシャッター式のカメラを用い、照明を照射する行とカメラで観測する行との間に一定のオフセットを保ちながら計測することにより、特定の距離の光伝播を画像として取得することを可能にした。この時間同期プロジェクタ・カメラシステムを用いることで、通常の画像では見ることができなかった皮下の静脈の様子を鮮明に可視化できることも示した。

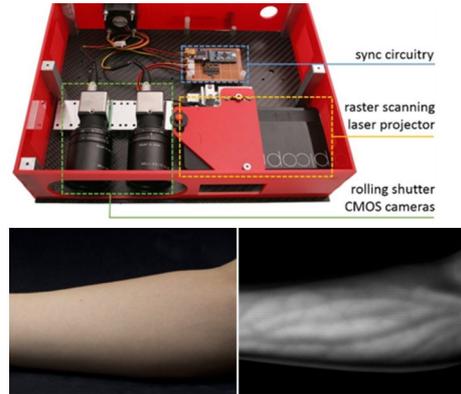


図3：時間同期式プロジェクタ・カメラシステム。

(4) 照明変動を考慮した分光計測の開発も行った。通常のカメラでは、色をRGBの3色で計測するが、実はそれだけでは不十分であることが知られている。そこで、我々は図4のように、回転ミラーシステムと分光器を組み合わせ、200nm~1,100nmの波長を0.5nm刻みで計測できるパノラマ分光計測システムを構築した。このシステムで、フランスのアミアンにあるノートルダム大聖堂のステンドグラスを分光計測した(図4)。この時、計測時間が長いことに起因する照明変動の問題がある。すなわち、計測中に太陽の位置が変わってしまい、ステンドグラスの位置によって照明の影響が異なる。そこで、ステンドグラスの一部だけを高速に追加計測することで、照明変動を補償する手法の開発を行った。



図4：パノラマ分光計測による色再現。

(5) 物体表面の分光情報は、従来のRGB信号では計測できない詳細な光反射の観測や、吸収・透過・散乱といった物体内部で起こる現象の解析に用いられる。物体表面の分光情報と三次元情報を同時に取得する技術を開発した。レンズに入射する光線は屈折により、波長に応じて角度が変化し、波長依存の焦点距離の変化によって、各波長で異なる焦点ぼけが発生する。焦点ぼけがガウシアンぼけであると仮定したDfD (Depth from Defocus)

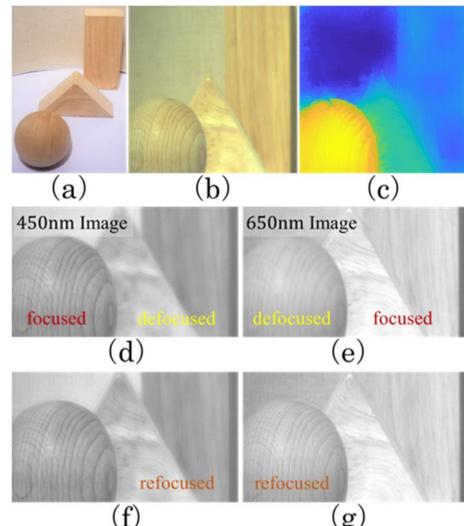


図5：分光・形状の同時計測。

にもとづいて、色収差を生じる単一の分光画像から物体表面の三次元情報が取得可能であることを示した。図5(a)撮影シーン、(b)入力分光画像のRGB表示、(c)色収差に基づき推定され

た三次元情報に対応し、球体表面の形状や各物体の前後関係が表れている。被写界深度合成を適用することで元画像の焦点ぼけの改善も実現できた。

(6) 光を伝搬する媒体としての水に着目し、その吸収特性および反射特性に基づく三次元復元法も導出した。図6では、近赤外光の方向も変化させることにより、吸収および反射度合いの変化を用いた精緻な三次元復元方法を導出した。この手法では、物体表面各点において深度のみならず法線を復元できること、最低で4つの光源が必要であること、さらにそれらの光源の方向と波長選択法を数理的に解析した。さらに、水面における反射像が仮想的な視点を鏡面の裏に追加することに着目し、水面反射像を含む一枚の写真より、対象物体の三次元形状を復元できるばかりではなく、その見えのハイダイナミックレンジ(HDR)復元、さらにカメラの内部(焦点距離推定)ならびに外部較正を自動的に行えることを示した。提案技術により、何も制約なく取られた一枚の画像から豊かな見えの3次元構造として対象物体を観察できるようになった。

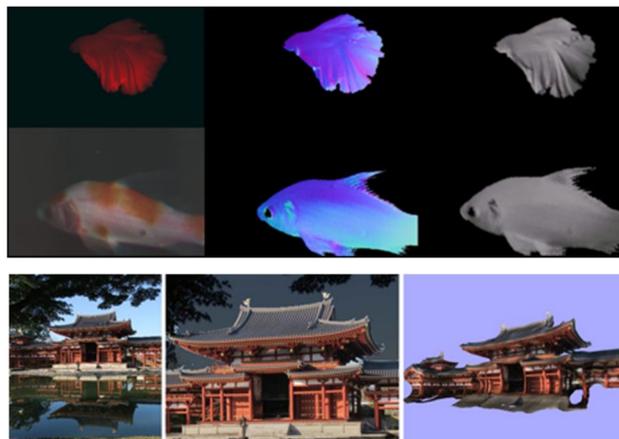


図6：水による近赤外光の吸収と反射特性を利用した形状推定技術。(下)3次元形状と見えのHDR復元およびカメラ較正を実現。

(7) 植物や果物など身近な物体に含まれている「蛍光物質」に注目した識別技術を開発した。蛍光物質は、短波長の光を吸収し、長波長の光を発光するため、光源色に依存せず独特の質感が生じる。本研究では、蛍光物質による吸光・発光特性の差異をRGB画像から検出するのに適した光源色を機械学習により導出することで、蛍光物質を識別する手法を開発した。蛍光物質が吸収する光と発光する光の分光分布は、物質毎に異なる。この吸光と発光の波長の関係性を特徴量として活用するために、狭帯域波長の光を対象に照射した時のRGB画像を学習データとしてサポートベクターマシンに適用することで、反射光と蛍光発光の特徴を抽出し、識別に適した光源色を算出した。これにより、白色光のもとでは識別が難しい対象に対しても高い精度で識別を実現できることを示した。

(8) デッサン熟練者と非熟練者のキャンバス上での視線を解析、比較することで、人が物体の質感を認識する際に重要となる要素の抽出を検討した。キャンバスを映した映像から、手や鉛筆といった視線解析に不要な領域を取り除き、視線解析のためのプラットフォームの構築を実現し、注視点の可視化により質感を生み出す視覚的要素を解析した。具体的には、デッサンの様子を撮影した固定カメラ映像を入力とし、各フレームを斜影変換してキャンバス領域のみを抽出する。変換後のフレームについて、遮蔽物が映るフレームと映らないフレームに分け、各フレームでデッサンが描かれた領域のみを抽出することで不要な領域を取り除き解析がしやすいデータに変換した(図7)。注視点の可視化については、眼鏡型視線計測装置から取得した一人称映像と視線位置情報を、固定カメラ映像の時空間に重畳することで、キャンバス上への視線情報の可視化技術を開発した(図8)。質感の違いによる注視点の動きが違うことが確認できた。また、ガラス、布、紙など、様々な質感を持つ物体を対象としたデッサン画のデータベース構築を行い、機械学習にもとづくデッサン画の自動生成を行うアルゴリズムを開発した。デッサン画解析の展示会(10/9-10/14「ヒトは描くときに何をみているか」)を東京藝術大学で開催し、広く成果発

表をおこなった。

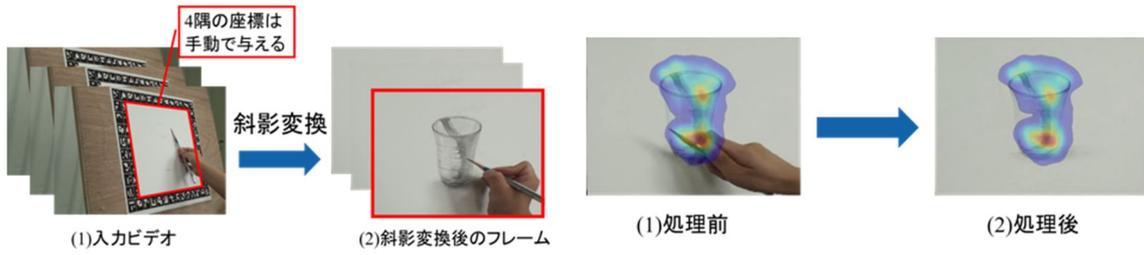


図 7 : 固定カメラ映像からキャンバス領域を抽出 .

図 8 : 不要な領域を取り除く前後の例 .

図中のヒートマップは注視点を可視化したもの .

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kubo Hiroyuki, Jayasuriya Suren, Iwaguchi Takafumi, Funatomi Takuya, Mukaigawa Yasuhiro, Narasimhan Srinivasa G.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Programmable Non-Epipolar Indirect Light Transport: Capture and Analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVCG.2019.2946812	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 該当する
1. 著者名 ASADA Shigenobu, KUBO Hiroyuki, FUNATOMI Takuya, MUKAIGAWA Yasuhiro	4. 巻 E102.D
2. 論文標題 Simultaneous Reproduction of Reflectance and Transmittance of Ink Paintings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 691~701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2018AWI0003	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 Chen Lixiong, Zheng Yinqiang, Shi Boxin, Subpa-asa Art, Sato Imari	4. 巻 N/A
2. 論文標題 A Microfacet-based Model for Photometric Stereo with General Isotropic Reflectance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPAMI.2019.2927909	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 Asano Yuta, Zheng Yinqiang, Nishino Ko, Sato Imari	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Depth Sensing by Near-Infrared Light Absorption in Water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPAMI.2020.2973986	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 H. Okawa, M. Shimano, Y. Asano, R. Bise, K. Nishino, I. Sato	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Estimation of Wetness and Color from a Single Multispectral Image	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)	6. 最初と最後の頁 00-00
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1109/TPAMI.2019.2903496	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 T. Takatani, Y. Mukaigawa, Y. Matsushita, Y. Yagi	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Decomposition of Reflection and Scattering by Multiple Weighted Measurements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IPSI Transactions on Computer Vision and Applications	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s41074-018-0049-4	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 K. Tanaka, Y. Mukaigawa, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Material Classification from Time-of-Flight Distortions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence	6. 最初と最後の頁 00-00
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2869885	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 T. Takatani, K. Fujita, K. Tanaka, T. Funatomi, Y. Mukaigawa	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Controlling translucency by UV printing on a translucent object	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IPSI Transactions on Computer Vision and Applications	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) N/A	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 K. Kitano, T. Okamoto, K. Tanaka, T. Aoto, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa	4. 巻 9
2. 論文標題 Recovering Temporal PSF using ToF Camera with Delayed Light Emission	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IP SJ Transactions on Computer Vision and Applications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s41074-017-0026-3.	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 Y. Fu, A. Lam, I. Sato, Y. Sato.	4. 巻 122-2
2. 論文標題 Adaptive spatial-spectral dictionary learning for hyperspectral image restoration	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Computer Vision	6. 最初と最後の頁 228-245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11263-016-0921-6	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 Tanaka K, Mukaigawa Y, Kubo H, Matsushita Y, Yagi Y	4. 巻 39(4)
2. 論文標題 Recovering Inner Slices of Layered Translucent Objects by Multi-frequency Illumination	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence	6. 最初と最後の頁 746-757
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPAMI.2016.2631625	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 浅田繁伸, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博	4. 巻 Vol. J99-D, No. 8
2. 論文標題 書画の質感再現を目的とした反射率と透過率を同時に再現するレプリカの作成	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 D	6. 最初と最後の頁 747-756
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 Fu Y, Lam A, Sato I, Okabe T, Sato Y.	4. 巻 38(7)
2. 論文標題 Reflectance and Fluorescence Spectral Recovery via Actively Lit RGB Images	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence	6. 最初と最後の頁 1313-1326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPAMI.2015.2439270	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43件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 31件)

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 画像処理装置及び方法	発明者 シジエ、リン、鄭、 佐藤、ラム、小野	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-110453	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 形状測定装置、形状測定方法、形状測定プログラム及び内視鏡システム	発明者 西野、延原、川原、 Kuo, 村井	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、JP2019-188208	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 形状測定装置および方法	発明者 Nishino, Sato, Zheng, Asano Y.	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2017/036510	出願年 2017年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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
研究分担者	平 諭一郎 (Taira Yuichiro) (10582819)	東京藝術大学・学内共同利用施設等・准教授  (12606)	
研究分担者	鄭 銀強 (Zheng Yinqiang) (30756896)	国立情報学研究所・コンテンツ科学研究系・准教授  (62615)	

## 6. 研究組織 (つづき)

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	向川 康博 (Mukaigawa Yasuhiro) (60294435)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授  (14603)	
研究分担者	西野 恒 (Ko Nishino) (60814754)	京都大学・情報学研究科・教授  (14301)	
研究分担者	佐藤 洋一 (Sato Yoichi) (70302627)	東京大学・生産技術研究所・教授  (12601)	
研究分担者	久保 尋之 (Kubo Hiroyuki) (90613951)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教  (14603)	