

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 5 日現在

機関番号：25403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02779

研究課題名(和文) 高輝度小型パターン光源を用いた3次元内視鏡の開発と人体消化器官計測の試み

研究課題名(英文) Development of 3D endoscope using high-luminance micro pattern projector and trial of measurement of human-body digestive organs

研究代表者

古川 亮 (Furukawa, Ryo)

広島市立大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：50295838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,820,000円

研究成果の概要(和文)：内視鏡の鉗子孔に通すことが可能な、超小型、高輝度化、長焦点深度のパターン光源を開発した。さらに、生体組織のように、パターン光源を照射した時に、散乱、鏡面反射によるハイライト、パターン中の輝点による露出過多の起きる物体でも、安定した計測が可能な能動ステレオ方式の形状計測手法を開発した。これらの成果を通常の内視鏡と組み合わせることで、豚の消化管内部の形状を、実際と同じスケールで計測することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We developed a pattern-light projector with ultra small size, with high brightness and long depth of focus, that can be passed through the instrument channel of normal endoscopes. Furthermore, we have developed 3D reconstruction algorithms based on active stereo methods, which is robust against subsurface scattering effects or over-exposure effects, which are typically occurs on bio-tissues lit by patterns with bright spots. By combining these results with ordinary endoscopes, we succeeded in measuring the shape of the surfaces inside stomach of a pig with the real scale.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：3次元内視鏡 能動ステレオ法 形状計測 自己校正 プロジェクタカメラ系

1. 研究開始当初の背景

胃や小腸、大腸など、消化器官の内部の内視鏡を使った検査は、現代の医療現場において重要な役割を果たしている。内視鏡による腫瘍の検査において、画像のみから腫瘍のサイズを計測することは難しく、誤差が生じやすいなどの問題もあり、より簡易に精度の高いサイズの計測手法が求められている。

申請者らの研究グループでは、従来から研究してきたパターン光源を利用したアクティブステレオ法を内視鏡に応用し、パターン光源による3次元内視鏡を提案してきた。具体的には、パターン光源を小型化し、インパクトシュータと呼ばれる医療器具で内視鏡の『外部に』固定することで、生体組織の3次元計測が可能であることを実証してきた。

しかし、実際に計測を通して複数の問題が明らかとなった。第一に、パターン光源を内視鏡の『外部に』固定する方式では、消化管に実際に挿入する場合の患者の負担が増え、またわずかではあるがリスクも増えること、第二に、消化管の生体組織を計測する場合、表面部分で生じるハイライトや透過性などの影響を受け、計測時の精度や安定性に問題が生じる場合があったことである。そのため、実際に内視鏡で消化管内部の計測実験を行うためには、これらの問題の解決が急務であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究開始以前から申請者らが開発してきた3次元内視鏡システムを改良することで、安全かつ安定的に形状計測を行うことのできる内視鏡システムを開発することである。

具体的には、研究開始時までのシステムで、内視鏡の外側に取り付けられていた、小型パターン光源について、さらなる小型化、高輝度化、長焦点深度化を実現する。これにより、鉗子孔（内視鏡の手術器具を通す穴）に通すことができ、鮮明なパターン投光が可能なパターン光源を実現する。

また、上記高輝度小型パターン光源によって、鉗子孔にパターン光源を通した状態で撮影された画像から、安定的に広範囲な3次元形状復元を行うことのできるアルゴリズムを開発する。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、内視鏡の鉗子孔に通すことが可能な、超小型、高輝度化、長焦点深度のパターン光源を DOE (Diffractive Optical Elements) を用いた高輝度光源を開発することで解決した。DOE は、レーザビームを通すとビームを任意に分岐させることができる。このため、通常のプロジェクタのように、結像用のレンズを利用しなくて良いため、焦点深度が飛躍的に広がる。さらに、広い範囲で明瞭なパターンを投影できる。また、レーザ光源のエネルギーのほとんどをパター

ン光にできるため、高輝度のパターン投影を実現できる。また、レンズを使う方式に比べて構造が簡単になるため、内視鏡の鉗子孔を通過できるような小型化投光器が実現できる。

(2) 生体組織など、表面下散乱の強い物体を計測する場合、明瞭なパターンを照射しても、撮影結果が散乱によってぼやけてしまうという問題がある。これに対処するために、パターンのぼけに強い、新しいパターンを提案する。新しいパターンの一つは、格子状のパターンに、線の段差による位置コードを付与したもので、従来研究してきた波形格子パターンなどと比較して、画像のぼけに強いという性質を持つ。別の新しいパターンとしては、平行線状のパターンと点を組み合わせ、段差コードを擬似的に実現するものを提案する。

(3) (1)の光源を鉗子孔に通して、パターン照射を行いながら画像を取得する場合、カメラに対する光源位置が未知になる。このため、パターン中のマーカーや、内視鏡カメラで観測された光源パターン光源のシルエットなどを利用して、光源位置の自己校正を行う。(4) (1)の光源の照射範囲は、従来の高原より広いが、内視鏡カメラの画角に対しては狭いため、ソフトウェアによる解決も同時に試みる。具体的には、複数回の計測結果を統合し、より精度が高く、範囲の広い形状データを獲得するアルゴリズムを開発する。

(5) (1)の光源を照射しながら計測を行う場合、対象と光源の距離によるパターンの明るさの変化、鏡面反射によるハイライト、DOEの0次項（中央付近の明るい輝点）が問題となる。これらの箇所は画像の白飛びや、黒つぶれなどの原因となるためである。このために、光源パターンを高速で点滅させながら、カメラで連続撮影を行い、露出の異なる画像を複数計測することで、ハイダイナミックレンジ画像(HDR画像)を取得し、計測の安定化を行う。

(6) (1)-(5)の結果を利用して、実際に豚の胃の内部の計測を行った。計測時には、豚の胃袋の内部に内視鏡を挿入して3次元計測を行い、対象の内壁の内部につけたマーカー同士の距離を推定した。計測後、胃を切り開いてマーカー同士の距離を実測し、推定値と比較した。

(7) 内視鏡の計測では、対象が液体中にあるような状況も考えられる。また、内視鏡による計測技術は、狭い配管の内部などの観測などにも応用可能であり、そうした状況では水中での計測も必要となる。このため、水中におけるパターン投影方式による3次元計測を実現する。

(8) パターンを投影した状況で内視鏡を動かした場合、パターンの見かけの動きは対象への距離情報を一部含んだものとなる。これは、内視鏡計測に利用できる可能性があるため、パターンの動きから距離情報を推定する方法を提案する。

4. 研究成果

(1) 研究の方法(1)について、内視鏡の鉗子孔に通すことが可能な、超小型、高輝度化、長焦点深度のパターン光源を開発することができた(図 1,2)。鉗子孔に挿入可能で、図のように鮮明なパターンを投影可能な投光器は、研究者らの知る限り世界初である。この成果は、医用生体工学の国際会議である EMBC2016 で発表された。

(2) 研究の方法(2)について、段差コードを付与した格子パターンを提案し、上記パターン光源での投影を実現した(図 2)。さらに、画像から計測されたパターンと、元のパターンとの対応を求めるために、局所的な部分グラフで照合する手法を提案し、グラフ構造の誤差に頑健な復元を実現した(図 3)。この成果は、後の(4)と併せて、computer vision の top conference の一つである ECCV2016 での口頭発表論文(採択率 1.8%)に選ばれた。

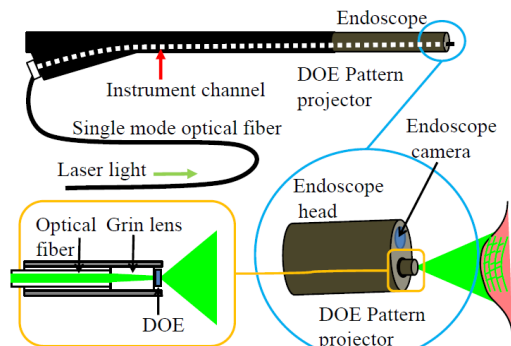


図 1: DOE パターン光源と 3 次元内視鏡システム

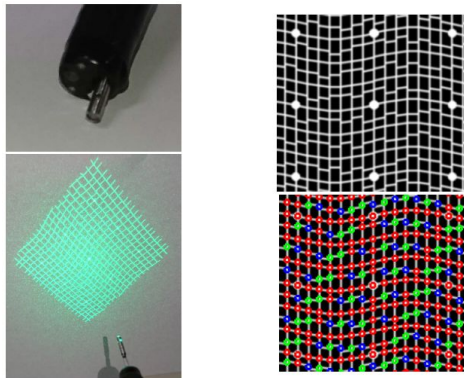


図 2: (左)DOE パターン光源を内視鏡鉗子孔に挿入した状態。(右)投影される段差コードパターンと、段差コード。

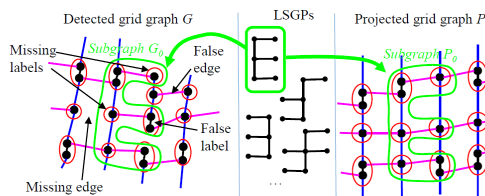


図 3: 画像から検出された格子パターン(左)

と、元の段差コードパターン(右)とのマッチングを行うための局所部分グラフパターン(中)。

(3) 研究の方法(3)について、鉗子孔に挿入した投光器位置について、主な動きである 2 自由度と、その他の小さな動きの 4 自由度をモデル化し、パターン中のマーカ位置と、カメラで観測される投光器シルエットで、これらの変数を推定する方法を提案した。その結果、投光器位置を、真値(校正儀による校正結果)に近い精度で推定可能であることを示した。この成果は、computer vision の国際会議 PSIVT2017 での Best Presentation Paper Award に選ばれた。

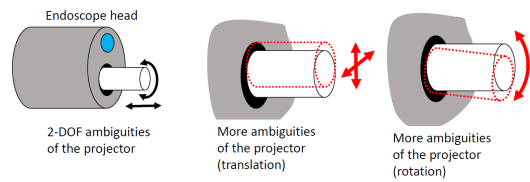


図 4: 鉗子孔に挿入した投光器位置の自由度。(左) 主な 2 自由度の動き。(中、右)鉗子孔内での投光器のがたつきなどによる自由度。

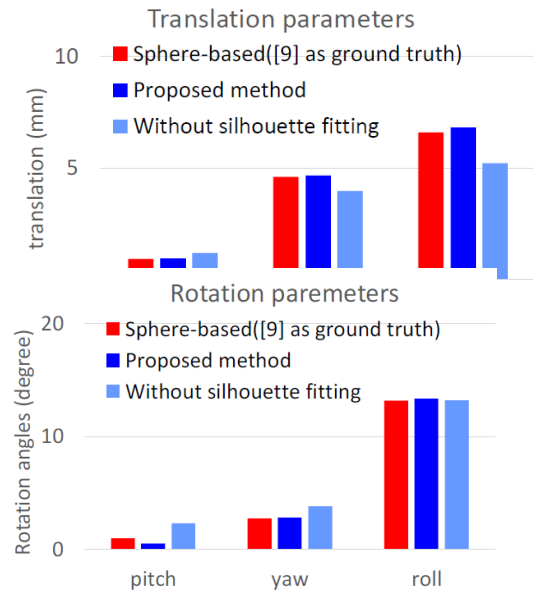
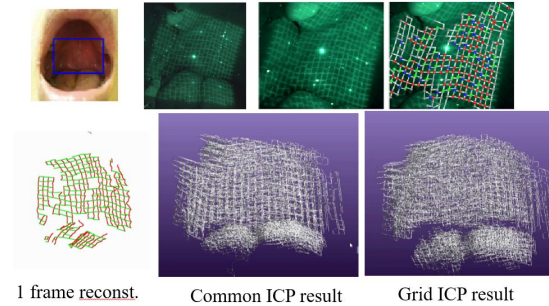


図 5: 投光器位置の自己校正結果と、真値(校正儀による校正結果)の比較。

(4) 研究の方法(4)について、格子状パターンで、カメラあるいは投光器を動かしながら形状を計測し、それらの結果を統合するためのアルゴリズムとして grid ICP を提案し、通常の ICP よりも位置合わせの精度が改善することを示した。これにより、格子状パターンでの計測結果を統合し、より解像度の高い形状計測を行うことができた(図 6)。この成果は ECCV2016 の口頭発表論文(採択率 1.8%)

に選ばれた。



1 frame reconst. Common ICP result Grid ICP result
 図 6: (左上から右に)計測対象、計測画像 2 例、線とコードの検出結果。(左下から右に) 1 フレームの 3 次元復元、通常の ICP による位置合わせ結果、提案手法(grid ICP)による位置合わせ結果。提案手法による位置合わせでは、線が等分に分布し、より解像度の高い結果を得ることができた。

(5)研究の方法(5)について、投光器を点滅させながら撮影することで、HDR 画像を合成し、それによって形状計測の頑健性が向上することを示した(図 7, 8)。この成果は、医用画像内視鏡画像についての国際 workshop である CARE2017 で発表され、KUKA award (the 3rd best paper)を受賞した。

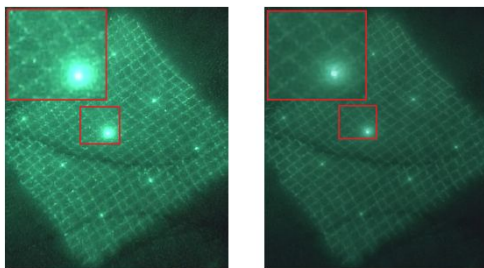


図 7: 点滅光源を用いた HDR 画像生成。(左)撮影された内視鏡画像、(右)左の画像を含む複数の画像から生成された HDR 画像。

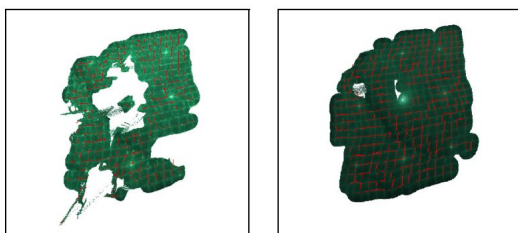


図 8: 図 7 の画像のそれぞれについての 3 次元復元結果。HDR 画像の復元結果は、復元の頑健性が向上している。

(6)研究の方法(6)について、内視鏡を豚の胃袋に挿入し、形状計測を行い、豚の胃壁の内部につけられたマーカー同士の距離を測定し、実験後に計測された真値と比較した。その結果、真値に近い距離が計測可能であることが示され、内視鏡による 3 次元計測の有用性を示すことができた(図 9, 10, 11, 12)。この

成果は、医用画像内視鏡画像についての国際 workshop である CARE2017 で発表され、KUKA award (the 3rd best paper)を受賞した。人の消化管内部を実際に計測するために、安全性、計測の安定性をさらに高めていくことが今後の課題である。



図 9: 豚の胃の計測実験。(左)計測中の状況、(右)計測後に胃を切り開いた画像。

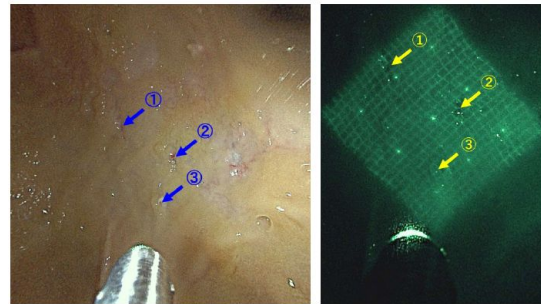


図 10: 計測中の内視鏡カメラ画像。(左)豚の胃壁に付与したマーカー位置。(右)パターン投影中の画像。

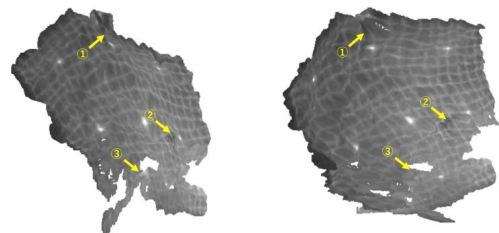


図 11: 計測された豚の胃壁の 3 次元形状。

Marker IDs	Ground Truth	Ground Truth (expanded)	Our result
1 and 2	24.6 mm	29.4 mm	25.9 mm
2 and 3	14.2 mm	15.1 mm	13.9 mm

図 12: 計測されたマーカー同士の距離と、実験後に計測された真値の比較。

(7)研究の方法(7)について、パターン投影による形状計測を水中で行う場合、カメラが非中心投影になる問題や、カメラと投光器を校正する方法が問題となる。これについて、最初カメラの非中心投影を中心投影で近似し、後で厳密なモデルで補正する手法と、カメラと投光器の校正を行う統合的な方法を提案

し、形状計測を行った。この成果は、computer vision の国際学会である WACV2017 で発表され、Best Paper Honorable mention を受賞した。

(8)研究の方法(8)について、パターンを投影したときのパターンのカメラでの見かけの動きと、実際の距離との関係を解析し、パターンの動き情報から対象物体への距離情報が得られることを示した。この成果は、国内での vision の最大の会議である MIRU2017 で MIRU フロンティア賞を受賞し、computer vision の top conference である ICCV2017(採択率 28.9%)で発表された。

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 1 件)

アクティブステレオ法による 3 次元内視鏡のための HDR 画像生成と投光器位置の自己校正 古川亮, 内藤雅仁, 溝森将輝, 宮崎大輔, 馬場雅志, 日浦慎作, 佐野村洋次, 田中信治, 川崎洋 電子情報通信学会論文誌 D 2018, 掲載決定

[学会発表](計 19 件)

Ryo Furukawa, Masahito Naito, Daisuke Miyazaki, Masahi Baba, Shinsaku Hiura, Yoji Sanomura, Shinji Tanaka and Hiroshi Kawasaki, "Auto-calibration method for active 3D endoscope system using silhouette of pattern projector", 8th pacific-rim symposium on image and video technology (PSIVT 2017), pp.222-236, 11.2017 (Best Presentation Paper Award)

内藤雅仁, 古川亮, 宮崎大輔, 馬場雅志, 日浦慎作, 佐野村洋次, 田中信治, 川崎洋 "3次元内視鏡のための CNN による投影パターンマーカ自動検出", 情報処理学会研究報告 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, CVIM-209, No.39, 11.2017

Ryo Furukawa, Ryusuke Sagawa, Hiroshi Kawasaki, "Depth estimation using structured light flow -analysis of projected pattern flow on an object's surface-", IEEE International Conference on Computer Vision 2017 (ICCV2017), 9pages, 10.2017(採択率 28.9%)

Shiba Yuki, Satoshi Ono, Ryo Furukawa, Shinsaku Hiura, Hiroshi Kawasaki, "Temporal shape super-resolution by intra-frame motion encoding using high-fps structured light", IEEE International Conference on Computer Vision 2017 (ICCV2017), pp.115-123, 10.2017(spotlight papers: 採択率 2.61%)

Ryo Furukawa, Masahito Naito, Daisuke Miyazaki, Masahi Baba, Shinsaku Hiura, Yoji Sanomura, Shinji Tanaka, Hiroshi Kawasaki, "3D endoscope system using asynchronously blinking grid pattern projection for HDR image synthesis", 4th International Workshop, Computer Assisted and Robotics Endoscopy and Clinical Image-based Procedures (CARE 2017), Held in Conjunction with MICCAI 2017, 16--28, 9.2017 (KUKA award (the 3rd best paper))

内藤雅仁, 古川亮, 宮崎大輔, 馬場雅志, 日浦慎作, 川崎洋, "3次元内視鏡のための点滅パターン光源による HDR 画像生成", 第 20 回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2017) 論文集, 4pages, 8.2017

Ryo Furukawa, Hiroshi Kawasaki, Ryusuke Sagawa, "Depth and motion estimation from projected pattern's flow on object's surface", 第 20 回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2017) 論文集 (口頭発表), 4pages, 8.2017 (MIRU フロンティア賞)

Ryo Furukawa, Masahito Naito, Daisuke Miyazaki, Masashi Baba, Shinsaku Hiura, Hiroshi Kawasaki, "HDR Image Synthesis Technique for Active Stereo 3D Endoscope System", 39th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2017), 4pages, 7.2017

馬場博久, 中井 英晶, 佐川 立昌, 古川亮, 川崎 洋, "デプスに依存したレンズ歪みで屈折を近似した水中アクティブワンショットスキャンシステム", 情報処理学会研究報告 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会 CVIM(第 206 回), CVIM-206, No.4, 8pages, 3.2017

Hiroshi Kawasaki, Hideaki Nakai, Hirohisa Baba, Ryusuke Sagawa, Ryo Furukawa, "Calibration technique for underwater active oneshot scanning system with static pattern projector and multiple cameras", Proceeding of IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), DOI: 10.1109/WACV.2017.40, 9 pages, 3.2017 (Best Paper Honorable mention)

Ryo Furukawa, Hiroki Morinaga, Yoji Sanomura, Shinji Tanaka, Shigeto Yoshida and Hiroshi Kawasaki, "Shape acquisition

and registration for 3D endoscope based on grid pattern projection", European Conference on Computer Vision ECCV16, 17 pages, 10.2016
(Oral presentation: 採択率 1.8%)

Ryo Furukawa, Yoji Sanomura, Shinji Tanaka, Shigeto Yoshida, Ryusuke Sagawa, Marco Visentini-Scanzanella, and Hiroshi Kawasaki, "3D endoscope system using DOE projector", The 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2016), pp.2091-2094, 8.2016

沖友真志, 古川亮, 宮崎大輔, 馬場雅志, 日浦慎作, 川崎洋, "3次元計測のための学習に基づく投影パターンの検出", 第19回画像の認識・理解シンポジウム MIRU2016, 2 pages, 8.2016

馬場博久, 華山達也, 森永寛紀, 中井英晶, 古川亮, 佐川立昌, 川崎洋, "グリッド方式水中アクティブ・ワンショット計測システムのARマーカーを用いた校正および形状復元手法", MIRU2016, 2 pages, 8.2016

古川亮, 川崎洋, 佐川立昌, 佐野村洋次, 田中信治, 吉田成人, "DOEパターン投光器を用いた動的ステレオ3次元内視鏡", 画像センシングシンポジウム(SSII2016), 5 pages, 6.2016 (優秀学術賞)

Marco Visentini-Scanzanella, Ryo Furukawa, Hiroshi Kawasaki, "A Combined Structured Light and Photometric Stereo Endoscope for Dynamic Tissue Measurement" International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) Workshop on Robotic Endoscopic Capsules for Gastrointestinal Screening (REC), 1, 10.2015

Ryo Furukawa, Ryunosuke Masutani, Daisuke Miyazaki, Masashi Baba, Shinsaku Hiura, Marco Visentini-Scanzanella, Hiroki Morinaga, Hiroshi Kawasaki, Ryusuke Sagawa, "2-dof auto-calibration for a 3d endoscope system based on active stereo". In Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE (pp. 7937-7941). IEEE.

増谷龍之輔, 古川亮, 馬場雅志, 宮崎大輔, 青山正人, 日浦慎作, 川崎洋, Marco Visentini-Scanzanella, 佐川立昌, "アクティブステレオに基づく三次元内視鏡システムの2自由度自己校正", MIRU2015, 2, 7.2015

Tatsuya Hanayama, Hirohisa Baba, Marco Visentini-Scanzanella, Ryo Furukawa, Ryusuke Sagawa, Hiroshi Kawasaki, "Underwater 3D Shape Measurement with Static Wave Pattern for One-Shot Scan", MIRU2015, 7.2015

〔産業財産権〕

出願状況(計 2件)
名称: 3次元形状計測装置、診断システム及び3次元形状計測方法
発明者: 古川 亮, 佐川 立昌, 川崎 洋, マルコ ヴィゼンティーニ スカルツァネッラ, 吉田 成人
権利者: 公立大学法人広島市立大学, 国立研究開発法人産業技術総合研究所, 国立大学法人 鹿児島大学
種類: 特許
番号: 特願 2015-147244(P2015-147244)
出願年月日: 平成 27 年 7 月 24 日(2015.7.24)
国内外の別: 国内

名称: 3次元形状計測装置及び3次元形状計測方法
発明者: 古川 亮, 川崎 洋
権利者: 公立大学法人広島市立大学, 国立大学法人 鹿児島大学
種類: 特許
番号: 特願 2016-113925(P2016-113925)
出願年月日: 平成 28 年 6 月 7 日(2016.6.7)
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古川 亮 (FURUKAWA, Ryo)
広島市立大学 情報科学研究科 准教授
研究者番号: 50295838

(2) 研究分担者

川崎 洋 (KAWASAKI, Hiroshi)
九州大学 理学部工学系 教授
研究者番号: 80361393

研究分担者

佐川立昌 (SAGAWA, Ryusuke)
産業技術総合研究所 情報・人間工学領域
研究グループ 研究員
研究者番号: 80362627

研究分担者

田中 信治 (TANAKA, Shinji)
広島大学 病院(医)教授
研究者番号: 00260670

(4) 研究協力者

吉田成人 (YOSHIDA, Shigeto)
広島鉄道病院
研究者番号: 00335689