

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06594

研究課題名(和文)計測対象の大きさによらない高精度動的表面形状計測法

研究課題名(英文)High Accuracy Measurement Method of Dynamic Surface Shape Irrespective of the Object Size

研究代表者

樋口 健 (HIGUCHI, Ken)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：60165090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙膜面構造物や大型展開構造物の柔軟な表面形状の静的計測のみならず展開挙動や動的挙動を高精度計測すること、および、三次元形状計測と三次元変位分布計測を同時に行う方法を提案し、本手法を提案者らの共同実験により実証した。静的形状計測について、表面状計測手法である格子投影法に三次元マッチング技術を組み合わせることにより、計測対象の大きさによらない、大型構造物にも拡張可能な計測手法の原理を確認した。また小型化・可搬型化された計測装置を試作した。柔軟薄膜構造要素の振動計測に格子投影法を適用することにより、波動伝播を可視化して提示することができた。

研究成果の概要(英文)：This research treats not only the static surface flexible shape measurement of space membrane structures and large deployable structures, but also deployment behaviors and dynamic surface behaviors, and the shape and the deformation are shown in three-dimensional data. This research issues and the method have been verified through the cooperative experiment by the proposers. The principle of the proposed measurement method was confirmed to static shape of measurement objects. The proposed method is composed of the grating projection method as a non-contact surface shape measurement and the three-dimensional matching technique, and so by this composition, the method can be extensible to large structures irrespective of the object size. The noteworthy achievement is that the surface wave propagation of flexible membrane structural component was measured and also visualized by the vibration measurement using a grating projection method.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：宇宙構造物 表面形状計測手法 変形計測手法 格子投影法 高精度構造 大型構造物

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 背景とニーズ

宇宙構造物は、収納性と軽量性の観点から膜面を構成主体とした柔軟構造物となるが、構造精度が要求される柔軟構造物が軌道上で機能・性能を発揮するためには、展開形状監視・形状維持・形状制御のために超高精度な面形状計測と面形状変位量計測が必須となる。しかしながら、軌道上で超高精度な面形状計測と面形状変位量計測の技術がなく実際には行われていなかった。点計測や距離計測など面形状計測ではない分野においては高精度に計測することは可能であったが、大型構造物の面形状を高精度に計測することは新しい発想の技術が求められていた。そこで、本研究課題では、人工衛星搭載可能な簡便な構成で面形状計測できる格子投影法の可能性に着目し、大型構造物であっても高精度に計測できる技術開発を目指した。

### (2) 展開構造物の課題

大型宇宙構造物は、打ち上げ時の収容体積の制約により自ずと展開構造物にならざるを得ず、上記のような展開後の形状計測のみならず、展開過程が正常に進行していることのモニターとしても精密で動的な表面形状計測法が必要とされている。フレキシブルソーラーアレイやソーラーセイルは実現されている大型宇宙構造物の代表例であるが、構造高精度化のためにはそれらの動的な表面形状計測技術が強く要望されていた。

### (3) 熱変形の課題

軌道上では太陽指向角により熱入力が変わるので構造の熱変形も無視できず、計測対象物が静止していることを前提としたそれまでの表面形状計測法では要求精度を実現できなくなっているのが宇宙構造物の現状であった。軌道上で形状計測できるメリットは非常に大きい。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、上記の研究開始当初の背景の(1),(2),(3)の課題を解決するための技術開発を学術的にかつ実証的に進めるために、宇宙膜面構造物や大型展開構造物の柔軟な表面形状の静的計測のみならず展開挙動や動的挙動を直接に(in situ)高精度計測すること、および、三次元形状計測と三次元変位分布計測を同時に行う方法を提案し、本手法を提案者らの共同実験により実証することを目的とした。

光学的計測手法に三次元マッチング技術を融合させることにより、これまで到達できなかった「大型構造」の「動的振る舞い」を「三次元形状および変位分布」について「高精度」で「面計測」できる計測システムを狙っているところに独創性がある。大規模膜面構造物の“剪断しわ”や“たるみ”の発生原理や成長または消滅の過程を研究する基礎的分野の実証研究においても、本提案の観察装置を用いることにより学術的な飛躍的發展が望

める。さらには、本計測結果から実験モード解析への応用にも発展できると考えている。

「大型構造物の動的振る舞いを全視野で取得できる」インパクトは大きく、宇宙構造物用途に限らず、地上用途においても、大型輸送機械構造の地上試験での需要、ならびに建築土木構造の現地計測の需要などがあり、適用できる裾野の広い技術であり、広範囲な有用性に富む。

柔軟薄膜構造要素の振動計測に格子投影法を適用することにより、波動伝播を可視化して提示することができたことは、数値計算手法が先行していながら実現象を再現しているのか立証されていないこの分野に、比較すべき実験データを提供することも学術的に極めて有益な目的である。

## 3. 研究の方法

### (1) 任意の大きさの構造物に対する高精度計測法の確立

面形状の区分的高精度計測データを別計測手法によりつなぐことにより大型構造物全体の面形状を再構築することが本研究の主たる提案である。高精度に点位置を計測する手法には既に様々な原理の計測手法が実用化されているが、標記のように初めから“面形状”の計測を目的として考えた場合、ターゲットマーカーなしで直接に連続的にかつ非接触で短時間に計測できる光学的手法としての格子投影法が有利であると着目した。

### (2) 動的挙動の計測法の確立

面形状の区分的高精度計測データをつなぐ手法を、時間変化する面形状をも計測対象として拡張する。

### (3) 計測系の小型・可搬型化

それまでの格子投影法においては、大型計測対象を高精度で計測するために計測系も治具も大型化し、その設置においても高精度が要求された。しかし、ここで提案するように事前の基準面測定と計測対象物の測定との2段階を時間的にも場所的にも分離し、かつ計測系を小型化し可搬型にすれば計測対象物を治具のある実験室に持ち込むことなく出先で計測できることになる。計測対象を治具のある実験室に持ち込むことを前提としていては大型計測対象を計測することができない。大型構造物の計測や軌道上での形状計測には不可欠な、計測系の小型化・可搬型化も本提案において行った。

## 4. 研究成果

### (1) 任意の大きさの構造物に対する高精度計測法の確立

計測対象物の表面形状を短時間で計測する画像計測方は一般に計測範囲が大きくなるほど計測精度と解像度が劣化するため、大型構造物の表面形状を高精度に計測するにはデジタルカメラの有効画素数を上げることが直接的である。しかし、デジタルカメラの有効画素数には自ずと制約があるため、必

ずしも大型構造物の表面形状の高精度計測に柔軟に対応できるわけではない。そこで部分的な高精度面計測法と高精度の点計測法とを組み合わせながら面計測データをつないでいく方法が提案されていた。この手法では結合部における結合誤差が高精度化のために解決すべき課題であった。その後、本研究課題においては、点計測を用いなくても複数領域の計測データをつないでいくために、専用の凹面ターゲットマーカを用いて対応点を予め作成し、それをマッチングすることで形状データを高精度に結合する方法を試みた。

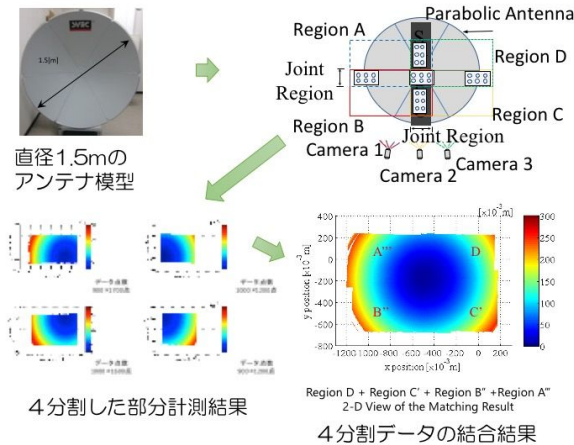


図1 対応点マッチングによる3次元形状データの結合

その結果、凹面ターゲットマーカを用いた対応点マッチングによる3次元形状データの結合精度は、格子投影法の計測精度と同程度となり、特に対応点が4個以上あれば対応点の数が結合精度に及ぼす影響は小さいことがわかった。

### (2) 動的挙動の計測法の確立

格子投影法は計測対象物に投影した格子画像を移送解析し計測対象物の3次元形状を復元する能動的画像計測法の1つである。格子投影法は撮影画像の画素毎に3次元位置座標が得られるため、空間分解能に極めて優れ、したがって計測対象物の広域的形状のみならず局所的な形状をも一度に取得できる特徴がある。特に、位相解析法に一枚の撮影画像で済むサンプリングモアレ法を適用すれば、計測対象物の動的な挙動も取得することができるはずであり、膜構造物のような極めて柔軟で静止状態を維持することが困難な計測対象物であっても非接触でその表面形状を取得することができる大きな利点がある。静的計測において開発された結合解析法をサンプリングモアレ法による格子投影法に適用した。基準面を利用した格子投影法に結合計測法を組み合わせることにより、取得した面計測データを座標変換することなく容易に結合できる計測システムをここでは用いた。

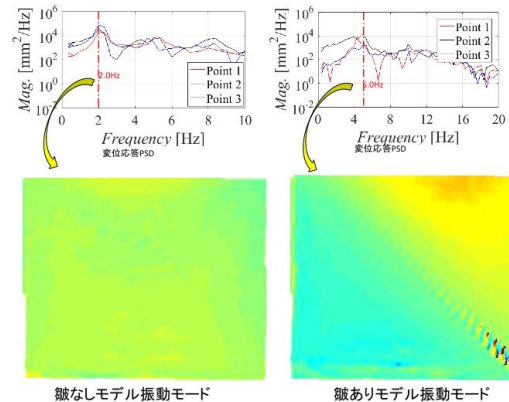
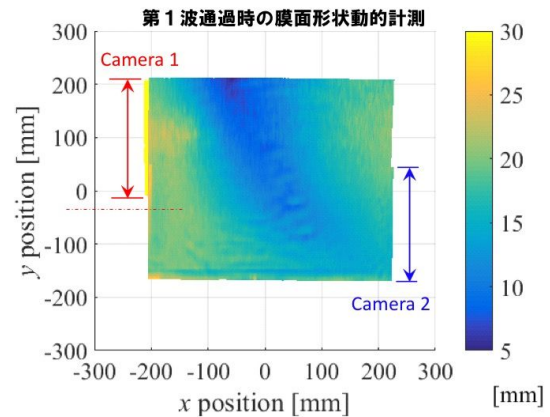
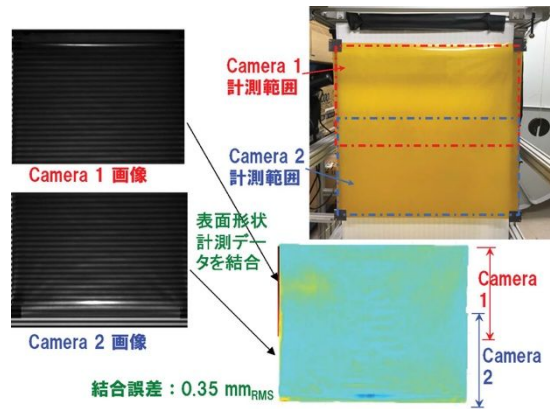


図2 薄膜の振動計測 (上から、結合原理、波動計測、振動モード)

その結果、高い空間分解能と計測精度を維持したまま計測範囲を拡張できることを示した。この時、適切なノイズ除去方法を併用すれば計測データの結合精度もあげられることがわかった。サンプリングモアレ法の計測データから振動モードを抽出することにより、複雑なモード形状であってもこの計測システムを適用することにより高い空間分解能で取得できることを示した。これまではデジタルカメラの撮影範囲によって制約され部分的にしか得られていなかった広域的モード形状を全視野で取得できるようになった。

### (3) 計測系の小型・可搬型化

格子投影法の計測装置は元来簡便な構成であるが、人工衛星に搭載することまで考え

ると、地上において用いている計測系を先ず小型・可搬型化できることが必要である。環境が整った実験室内で計測することだけを前提とするのではなく、地上においても計測対象を打ち上げ場などの現場で計測しなければならないことは多い。また、屋外設置型の計測対象であることも多い。そこで、図2に示す可搬型の格子投影法計測系を製作した。基準面撮影は実験室内で済ませておくこともでき、計測対象のある現場で計測対象物の撮影だけを行えば、形状計測できる。図2はCFRP薄板の熱変形を出先で計測した例である。



ベストフィット平面からの変位量計測（平織CFRP薄膜下向き負荷）

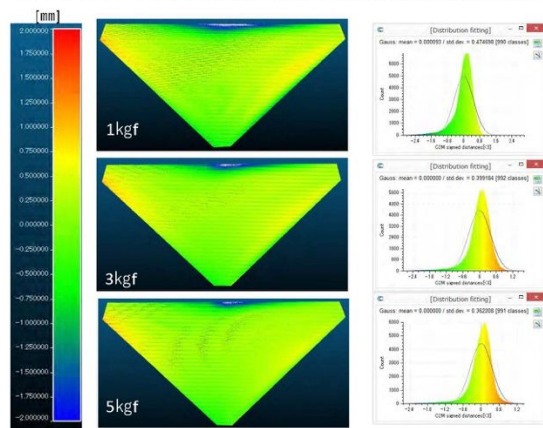


図3 小型可搬型計測系とその計測例

#### <引用文献>

岩佐貴史, 岸本直子, 樋口 健, 藤垣元治, 小木曾望: 面計測と点計測を統合した大型宇宙構造物の高精度形状計測法の提案, 航空宇宙技術, Vol.14, pp.95-103, (2015)

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

岩佐貴史, 青木友宏, 天本拓哉, 複数カメラを用いたサンプリングモアレ法による柔軟物体表面形状の高解像度振動計測, 実験力学, 査読有, Vol. 17, 2017, pp.97-102. doi:10.11395/jjsem.17.97

Akatsuka, Y., Fujigaki, M., Matui, T., Three-dimensional Shape Measurement Using Optimal Number of Phase-shifting Steps Based on Light-source-stepping Method, Advanced Experimental Mechanics, 査読有, Vol. 2, pp.105-111, (2017).

林 拓実, 村田頼信, 藤垣元治, Talbot効果による傾斜角度格子投影手法とリニアファイバアレイを用いた位相シフトによる3次元計測, 電気学会論文誌, 査読有, Vol. 136, No. 8, pp.1063-1070 (2016).

Fujigaki, M., Sakaguchi, T., Murata, Y., Development of a Compact 3D Shape Measurement Unit Using the Light-source-stepping Method, Optics and Lasers in Engineering, 査読有, Vol. 85, pp.9-17(2016).  
<http://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.04.016>

岩佐貴史, 原田 卓, 凹面ターゲットマーカーを用いた3次元形状計測データのマッチング精度検証, 実験力学, 査読有, 日本実験力学会, Vol.16, No.3, 2016. pp.221-225.  
<http://doi.org/10.11395/jjsem.16.221>.

岩佐貴史, 岸本直子, 樋口 健, 藤垣元治, 小木曾望, 面計測と点計測を統合した大型宇宙構造物の高精度形状計測法の提案, 航空宇宙技術(AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES), 査読有, Vol. 14, pp.95-103, (2015).  
<http://doi.org/10.2322/astj.14.95>

金子健太郎, 藤垣元治, 村田頼信, 格子投影法を用いた高さ測定装置における計測精度予測手法の提案, 実験力学, 査読有, Vol.15, No.3, pp.210-216, (2015).

〔学会発表〕(計35件)

楠 芳之, 藤垣元治, 高田大嗣, 田中秀行, 特徴量型全空間テーブル化手法による3次元計測手法におけるテーブル作成手法の検討, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会, (2018).  
大路秀太, 富永一希, 福村優彦, 山崎堅太, 岸本直子, 画像計測による構造物の平面度計測, 日本機械学会関西支部2017年度学生員卒業研究発表講演会, (2018).  
高田大嗣, 楠芳之, 藤垣元治, 3個の特徴量から求める特徴量型全空間テーブル化手法による3次元計測の検証試験, 日本機械学会北陸信越支部学生会第47回学生員卒業研究発表講演会, (2018).

岸本直子, 樋口 健, 岩佐貴史, 熱設計との干涉緩和を目的とした画像計測の計測波長拡大, 第 26 回スペースエンジニアリングコンファレンス SEC ' 17, (2017).

山崎健次, 樋口 健, 勝又暢久, 岸本直子, 岩佐貴史, 藤垣元治, アンテナ反射鏡の変形計測手法と装置設計, 第 33 回宇宙構造・材料シンポジウム (2017).

岩佐貴史, 太田賢人, 格子投影法による 1.5m アンテナモデルの表面形状計測, 第 33 回宇宙構造・材料シンポジウム, (2017).

藤垣元治, 高田大嗣, 赤塚優一, 楠芳之, カメラキャリブレーションが不要な特徴量型全空間テーブル化手法による三次元計測, 日本実験力学会分科合同ワークショップ 2017, (2017).

坂野琢弥, 藤垣元治, LED 光源の Talbot 効果を用いた格子投影手法による小型物体の三次元計測日本非破壊検査協会平成 29 年度第 49 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, (2017).

岸本直子, 藤垣元治, 岩佐貴史, 樋口 健, 勝又暢久, 画像による複合材料板の変形・ひずみ計測, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, (2017).

樋口 健, 勝又暢久, 山崎健次, 岸本直子, 岩佐貴史, 藤垣元治, 物体表面の二次元格子を利用した相対変位の光学的計測法, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, (2017).

藤垣元治, 赤塚優一, 高田大嗣, カメラキャリブレーションが不要な格子投影による 3 次元計測手法の提案, 精密工学会 2017 年度秋期大会学術講演会, (2017).

山崎健次, 伊藤良磨, 先崎美由紀, 樋口 健, 勝又暢久, 計測対象への二次元格子貼付による簡易型表面形状計測法, 第 59 回構造強度に関する講演会, (2017).

岸本直子, 岩佐貴史, 樋口 健, 勝又暢久, 黒瀬豊敏, 渡邊秋人, 上土井大助, CFRP 製パネル構造物の 3 次元形状計測, 第 59 回構造強度に関する講演会, (2017).

岩佐貴史, 青木友宏, 天本拓哉, サンプルリングモアレ法を用いた結合計測による張力膜の動的 3 次元形状計測, 第 59 回構造強度に関する講演会, (2017).

Naoko Kishimoto, Measuring three dimensional shape of structure with high accuracy: from micro to macro, 3rd Joint Turkey-Japan Workshop on Polymeric Composite Materials, (2017).

Naoko KISHIMOTO, Takashi IWASA, and Ken Higuchi, Surface Shape Measuring Method for Space Structures based on Images in Ultra Violet Range, 31st International Symposium on Space Technology and Science (ISTS2017) (2017).

K. Ota, T. Harada and T. Iwasa, Three-dimensional Surface Shape Measurement of Parabola Antenna Model

with 1.5m diameter using Grating Projection Method, 31st International Symposium on Space Technology and Science (ISTS2017), (2017).

Fujigaki, M., Prototype of Linear LED Devices for Large Object Utilized for Real-time 3D Shape Measurement, 2017 The International Conference on Electrical Engineering (ICEE2017).

Kishimoto, T. and Fujigaki, M., Prototype and Evaluation of Robust Small 3D Measuring Unit Using Line LED Device against Temperature Change, Asian Conference on Experimental Mechanics (ACEM 2017), (2017).

Sakano, T., Fujigaki, M., Small Pitch Fringe Projection Method 3D Shape Measurement Using LED Light Sources, International Symposium on Optomechatronic Technology (ISOT2017), (2017).

⑳ T. Aoki, T. Iwasa, Vibration mode measurement of flexible thin membrane using grating projection method, The 6th Joint Symposium on Materials and Mechanical Engineering (JSMME), (2016).

㉑ 太田賢人, 岩佐貴史, 基準面を利用した格子投影法による 1.5m パラボラアンテナの表形状計測, 日本機械学会中国四国支部第 55 期総会・講演会, (2017).

㉒ Fujigaki, M., Hayashi, T., Murata, Y., Application of Phase-shifted Fringe Projection Method with Linear Fiber Arrays Using Talbot Effect to Height Measurement of BGA, 3rd International Conference on Optoelectronics and Applied Optics (OPTRONIX 2016), (2016).

㉓ Akatsuka, Y., Fujigaki, M., 3D Shape Measurement Using Optimal Number of Phase-shifting Steps Based on Light-source-stepping Method, Proc. of the 11th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (11th ISEM'16-Ho Chi Minh), (2016).

㉔ 伊藤良磨, 樋口 健, 勝又暢久, 岩佐貴史, 岸本直子, 藤垣元治, 計測対象表面に二次元格子を貼り付けた表面形状相対変位計測, 第 32 回宇宙構造・材料シンポジウム, (2016).

㉕ 岸本直子, 樋口 健, 岩佐貴史, 勝又暢久, SfM を使った構造物の形状計測, 第 58 回構造強度に関する講演会, (2016).

㉖ 岸本直子, 樋口 健, 岩佐貴史, 藤垣元治, 勝又暢久, 大型宇宙構造物の高速かつ高精度な軌道上形状計測を可能にする画像計測法の研究開発, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, (2016).

㉗ 岸本直子, 昆虫の目で構造物の形を測る

～紫外線領域を使った画像計測システム  
～, イノベーション・ジャパン 2016,  
(2016).

- ②9 Fujigaki, M., Real-time 3D Shape Measurement with Light Source Stepping Method, College of Electronics and Information Engineering, SPIE student chapter in Sichuan University (2016).
- ③0 伊藤良磨, 樋口 健, 相原弘匡, 格子投影法 2 カメラ法による相対変位計測, 第 57 回構造強度に関する講演会, (2015).
- ③1 岸本直子, 樋口 健, 岩佐貴史, 格子投影法による電波天文用パラボラアンテナの変形計測, 第 24 回スペースエンジニアリングコンファレンス, (SEC ' 15), (2015).
- ③2 樋口 健, 岸本直子, 岩佐貴史, 勝又暢久, 格子投影法による曲面変位計測 ～格子を投影しない格子投影法～, 第 31 回宇宙構造材料シンポジウム, (2015).
- ③3 岸本直子, 可搬型高精度 3 次元計測装置によるパラボラアンテナの形状計測, 第 57 回構造強度に関する講演会, (2015).
- ③4 T. Harada, T. Iwasa, Connection Accuracy of Multiple 3D Shape Data Sets due to Feature-Point Matching with Virtual Targets, 26th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST2015), (2015).
- ③5 原田 卓, 岩佐貴史, 分割された形状データの結合による大型宇宙構造物の高精度 3 次元 形状計測法の検討, 日本機械学会中国四国支部, 第 54 期総会・講演会, (2016).

〔図書〕(計 2 件)

Fujigaki, M., Hayashi, T., Murata, Y., Advances in Optical Science and Engineering, Springer, (2017), 689.

藤垣元治, 三次元画像センシングの新展開 -リアルタイム・高精度に向けた要素技術から産業応用まで, 株式会社エヌ・ティー・エス(2015), 402(39-53).

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件)

名称: 特徴量を用いた 3 次元計測方法およびその装置  
発明者: 藤垣元治, 赤塚優一, 高田大嗣  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特願 2017-92144  
出願年月日: 2017 年 5 月 8 日  
国内外の別: 国内

名称: 曲面を基準面とする三次元形状計測方法

発明者: 藤垣元治, 坂口俊雅, 氏家涼汰  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特願 2015-160644  
出願年月日: 2015 年 8 月 17 日  
国内外の別: 国内

名称: 形状計測装置および形状計測方法  
発明者: 藤垣元治, 坂口俊雅  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特願 2015-078639  
出願年月日: 2015 年 4 月 7 日  
国内外の別: 国内

取得状況 (計 2 件)

名称: 曲面を基準面とする三次元形状計測方法  
発明者: 藤垣元治, 赤塚優一, 高田大嗣  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特許第 6308637  
取得年月日: 2018 年 3 月 23 日  
国内外の別: 国内

名称: 形状計測装置および形状計測方法  
発明者: 藤垣元治, 坂口俊雅  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特許第 5854544 号  
取得年月日: 2015 年 12 月 18 日  
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ:  
<http://www3.muroran-it.ac.jp/sslab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樋口 健 (HIGUCHI, Ken)  
室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 6 0 1 6 5 0 9 0

(2) 研究分担者

岩佐 貴史 (IWASA, Takashi)  
鳥取大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 9 0 4 5 0 7 1 7

岸本 直子 (KISHIMOTO, Naoko)  
摂南大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 6 0 4 5 0 7 1 4

藤垣 元治 (FUJIGAKI, Motoharu)  
福井大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 4 0 2 7 3 8 7 5

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし