

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360156

研究課題名(和文)力センサの動的誤差補正の高精度化

研究課題名(英文)Improvement of dynamic-error collection method for force transducers

研究代表者

藤井 雄作(Fujii, Yusaku)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：80357904

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：力センサの動的校正・補正法の高精度化を行う事を目的とし、高精度な動的特性評価装置の開発と、力センサの動的特性の評価・解析を行った。実験装置と解析手法(周波数推定法)の改良により、精度が向上し、測定レンジも拡大した。いくつかの力センサを対象として動的特性の評価を行い、実験結果、および、有限要素法解析結果から、動的特性の解明を行った。誤差要因として、慣性項の他に、粘性や計測器の時間遅れが影響することが明らかになった。これらの結果を元に、高精度な動的補正法を開発し、高精度な動的補正法を組み込んだソフトウェアを開発した。力センサの動的校正法・補正法が存在しない現状を打開する道を示した。

研究成果の概要(英文)：In order to improve dynamic correction method for a force sensor, we develop high-precision evaluating system of dynamic property of force sensors and evaluated and analyses the dynamic property. The measurement range and accuracy of evaluating system were improved. Some types of force sensors were evaluated and were investigated their dynamic properties by experimental results and FEM analysis. In addition to inertial, viscosity and delay of measurement equipment seemed to affect the dynamic error. We develop the correction method for the dynamic error and develop a software to correct the dynamic error with the correction method. We showed a way to resolve the problem that there is no evaluation method nor correction method for force transducers in the present state.

研究分野：精密計測工学

キーワード：計測システム 力センサ

1. 研究開始当初の背景

「浮上質量法」(The Levitation Mass Method, The LMM)は、研究代表者が考案・開発してきた、世界的にも類例のない、ユニークな力の計測手法である。「浮上質量法」は、浮上支持した慣性質量に作用する慣性力を、光波干渉計を利用して高精度に測定することを特徴とする、「変動する力」の発生・計測法である。本手法では、実験中に光波干渉計で測定するのは、物体にあてた信号光のドップラーシフト周波数 f のみである。このドップラーシフト周波数 f から、物体の速度 v 、位置 x 、加速度 a 、慣性力 F 、を数値微分、数値積分などにより求める。これにより、物体の速度 v 、位置 x 、加速度 a 、慣性力 F を高精度に、かつ、完全に同期したデータとして、測定することができる。「力」は、最も基本的な力学量の一つであるので、その「力」の高精度計測法である浮上質量法の応用分野は多岐に渡る。

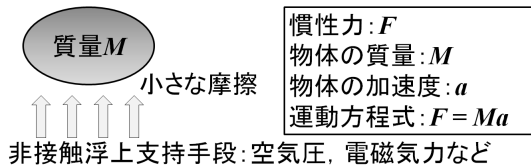


図1 浮上質量法の概略

浮上質量法に関して、我々のグループが行ってきた研究は、以下のように分類される。

- (1) 浮上質量法を応用した力センサの動的特性評価法
- (2) 浮上質量法を応用した材料試験法, 生体計測法
- (3) 浮上質量法を応用したマイクロフォース発生・計測法
- (4) 浮上質量法の精度向上・機能向上に関する研究

力センサは、一般に、弾性体であり、力に比例した変形をする。そのため、動的な力の計測では、力センサ内部に作用する、慣性、粘性、クリープなどに起因する誤差が生じる。我々は、LMM を用いて動的な力を精密に計測し、力センサの出力と比較することで、力センサの動的誤差の評価、誤差の補正方法の開発を行ってきた。力センサの受感部の変位は、作用力(センサの出力電圧)にほぼ比例する。同様に、力センサの受感部の速度、加速度は、それぞれ、作用力の1階微分、2階微分に、ほぼ比例する。この性質から、動的誤差を、力センサの出力電圧から推定できる可能性がある。これまでの研究で、力センサの動的誤差の大きな部分は、力センサ自身の一部の慣性力で説明できること、またそれは、力センサ出力電圧の2階微分にほぼ比例することなどを、突き止めてきた。一方、動的誤差は、慣性力だけでは説明しきれないことも、同時に、判明した。しかしながら、従来の評価装置では、測定精度が十分でなく、実際に起こっている現象を、十分な精度で観測することは困難であることが判明した。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに蓄積してきた技術基盤の上にたち、浮上質量法を応用した力センサの動的校正・補正法の高精度化を行う事を目的としている。そのために、まず高精度な動的特性評価を可能とする評価装置を開発する。次に、いくつかのタイプの力センサを対象として、高精度な動的特性評価・解析を行い、動的特性の解明を行う。その結果から、高精度な動的補正法を開発する。最後に、高精度な動的補正法を組み込んだソフトウェアを開発し、実用性の高いシステムとして提供する。

3. 研究の方法

本研究では、研究代表者が提案(発明)・開発を進めている「浮上質量法(The Levitation Mass Method)」を活用し、高精度な力センサの動的校正・評価法の開発を以下のように分けて進めた。

(1) 動的特性評価装置の開発: これまで研究代表者が開発してきた力センサの動的特性評価装置(Impact 応答評価装置, Step 応答評価装置, Oscillation 応答評価装置, 慣性質量の影響評価装置など)を、さらに、高精度化・高機能化する。具体的には、[i]評価精度の向上,[ii]周波数応答の拡張,[iii]測定レンジの拡張,[iv]力センサの固定条件の拡張,[v]試験時間の短縮(これまで、一部、手作業であったデータ収録から解析、結果表示までの一連の作業を自動的に行うソフトウェアを開発する)を行った。

(2) 動的校正・補正法の開発: 開発した動的特性評価装置を用いて、主要な形式の力センサについて、様々な条件において、動的特性評価を行う。また、有限要素法解析(FEM 解析)により、力センサの構造体としての動的特性を解析する。実験と数値解析により得られるセンサ出力の動的特性に基づき、力センサの機械的・電気的な動的応答特性の高精度なモデル化を行う。さらに、力センサの動的誤差について、その物理的要因の解明を行う。物理的要因が解明され、かつ、予測可能なものについて、その成分を補正する手法を開発する。補正後の補正值(補正波形)の不確かさ評価式も合わせて開発する。

(3) ソフトウェアの開発: 開発した動的校正・補正法(動的誤差の校正式・補正式)を組み込んだソフトウェアを開発し、実用性の高いシステムとして提案する。このソフトウェアを用いることにより、力センサで測定した「変動する力」の不確かさを知ることができる。力センサの動的校正法が確立されていない現状において、このことは、画期的な成果となる。さらに、このソフトウェアにより、測定値(測定波形)の補正を行うこともできる。

4. 研究成果

(1) **動的特性評価装置の開発**では以下のような成果が得られた

[a] **力センサ固定台の改良**: これまでの力センサの固定方法では、衝突実験の際に台の変形により力センサがわずかに移動してしまう問題があった。これを解決するため、重量約 500 kg の鋳鉄定盤上に力センサを固定した。その結果、力センサ固定部の移動が約 60 μm から 10 μm に減少し、より高精度な計測が可能になった。

[b] **微小な力の高精度な動的特性評価を可能とする評価装置の開発**: これまでの浮上質量法では、慣性力を発生させる剛体として質量が数 kg の空気軸受を使用していた。より微小な力での衝突応答の試験のため、質量が約 30 g の小型空気軸受け、約 3 g の超小型空気軸受を用い、その摩擦特性を評価した。その結果、超小型空気軸受の動摩擦は、0.1 mN 以下であり、かつその値を多項式で近似できることが明らかになった。この装置により、0.1 mN オーダーの微小な力の発生・計測が可能である。

[c] **周波数計測手法の改良**: これまで開発してきた Zero-crossing Fitting Method (ZFM) では、“ある区間内の周波数は一定である”として周波数を推定していたが、これを“ある区間内で加速度が一定である”として推定を行う、新しい周波数推定手法を開発した。計算機シミュレーション上では、本手法はこれまでの手法に比べノイズに強いことがわかった。また、本手法では、ドップラ周波数（速度）の微分を計算せずに、加速度を直接求めることが可能である。

一方で、ZFM では、測定する周波数が変動すると計算後のデータの時間間隔も変動するという特徴があった。このため、その他の時間間隔が一定のデータと比較する際には、線形補間によりその時刻のデータを算出する必要があった。この問題を解決するため、新たにゲート時間一定 ZFM を開発した。開発された手法は、計算機シミュレーション上で、これまでの手法と同程度の正確性を持ち、線形補間を用いた場合よりも誤差が小さくなった。本手法により、今までよりも高精度に LMM による実験データと力センサによる計測データを比較することが可能となった。

(2) **動的校正・補正法の開発**では、以下のような成果が得られた。

[d] **小型力センサの動的校正**: [b] で開発された微小力の評価試験装置を用い、定格 5N の力センサを対象とし、大きさ 5 N 以下、半値幅 1~2 ms の衝突力に対する応答を観測した。入力する衝撃力の最大値と誤差の二乗平均値の関係、パルス幅による誤差の変動などを明らかにした。実験の結果から、この力センサでは、時間遅れが主な誤差の原因となることを明らかにした。今後、計測された誤差の要因を解明し、それを補正する方法を開発

する。

[e] **ピエゾ素子の高精度な動的特性評価・解析**: ピエゾ素子を力センサとして用いることを考え、構築した評価装置を用いて動的特性の評価試験を行った。力センサの動的誤差要因として、慣性質量、粘性、時間遅れの影響について解析を行い、それらの補正手法を考案した。

[f] **FEM 解析**: 有限要素法解析 (FEM 解析) により、力センサの構造体としての動的特性を解析し、力センサの動的誤差のモデル化に役立てた。

(3) **動的補正法を組み込んだソフトウェアの開発**: これまでの研究成果を元に、力センサの出力とその力センサの動的校正係数を受け取り、動的誤差の補正されたデータを入力するソフトウェアを作成した。図 2 に買う初されたソフトウェアによる力センサの動的誤差補正の様子を示す。

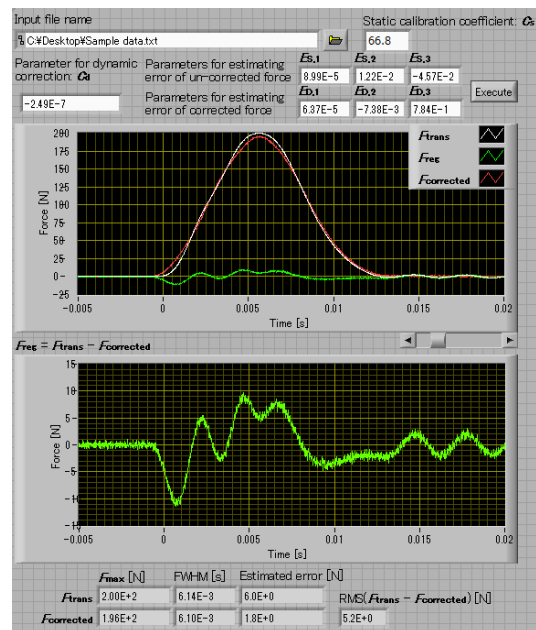


図 2 開発されたソフトウェア

このソフトウェアでは、補正後の力以外にも、力のピーク値、補正前と補正後の推定誤差を算出し表示する。このソフトウェアは容易に拡張が可能であり、今後、入力パラメータを増やすことにより、様々な測定条件に対応した補正ソフトを派生させることが可能である。

上記のように、本研究では、浮上質量法 (Levitation Mass Method: LMM) を応用した力センサの動的校正・補正法の高精度化を行うため、高精度な動的特性評価を可能とする評価装置を開発し、いくつかのタイプの力センサを対象として、高精度な動的特性評価・解析を行い、動的特性の解明を行った。その結果から、高精度な動的補正法を開発し、その動的補正法を組み込んだソフトウェアを開発し、実用性の高いシステムとして提案し

た。

また、新たな LMM の応用例として、鋼球が水面へ突入する際の鋼球が受ける力の精密計測、振動センサの板ばねの特性評価、竹刀の衝突応答試験を行い、本研究で用いる手法が様々な力の動的計測に応用できることを示した。

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 21 件)

- [1] T. Jin, A. Takita, M. Djamal, W. Hou, H. Jia and Y. Fujii, “A method for evaluating the electro-mechanical characteristics of piezo-electric actuators during motion”, *Sensors*, Vol.12, No.9, pp.11559-11570, 2012, DOI 10.3390/s120911559.(査読有)
- [2] T. Yamaguchi, Y. Fujii, A. Takita and T. Kanai, “FEA for transient responses of an S-shaped force transducer with a viscoelastic absorber using a nonlinear complex spring”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 71, No.11, pp.802-809, 2012. (査読有)
- [3] T. Jin, A. Takita, S. Mitatha, P. P. Yupapin, H. Z. Jia, W. M. Hou and Y. Fujii, “Method for acceleration measurement using a laser Doppler interferometer”, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 24, No.7, 077001, 2013, DOI 10.1088/0957-0233/24/7/077001. (査読有)
- [4] T. Jin, K. Watanabe, I. Aji, A. Takita, S. Mitatha, M. Djamal, H. Z. Jia, W. M. Hou and Y. Fujii, “High-speed impact test using an inertial mass and an optical interferometer”, *Rev. Sci. Instrum.* Vol.84, 075116, 2013, DOI 10.1063/1.4816537. (査読有)
- [5] T. Yamaguchi, Y. Fujii, T. Fukushima, N. Tomita, A. Takita, K. Nagai and S. Maruyama, “Damping response analysis for a structure connected with a nonlinear complex spring and application for a finger protected by absorbers under impact forces”, *Mech. Syst. Signal Pr.*, Vol.42, No.1-2, pp.88-96, 2014, DOI 10.1016/j.ymssp.2013.08.018. (査読有)
- [6] M. Djamal, K. Watanabe, K. Irisa, I. A. Prayogi, A. Takita, T. Yamaguchi and Y. Fujii, “Dynamic characteristics measurements of a force transducer against small and short-duration impact forces”, *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 21, No. 1, pp. 59–66, 2014, DOI 10.2478/mms-2014-0006. (査読有)
- [7] A. Takita, Y. Ono and Y. Fujii, “Review of dynamic force correction method for a force transducer with the Levitation Mass Method”, *Information*, Vol.17, No.2, pp.539-544, 2014. (査読有)
- [8] R. Araki, K. Irisa, K. Watanabe, N. Miyashita, A. Takita and Y. Fujii, “The dynamic

characteristics of gelled food materials against small impact force”, *Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers*, Vol.2, No.1, pp.19-23, 2014. (査読有)

- [9] J. Pastoril, K. Watanabe, K. Irisa, I. Prayogi, A. Takita, E. Carcasona and Y. Fujii, “Determination of reaction force in a toothbrush tuft using Levitation Mass Method (LMM)”, *Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers*, Vol.2, No.2, pp.48-53, 2014. (査読有)
- [10] R. Araki, A. Takita, T. Ishima, H. Kawashima, N. Pornsuwancharoen, S. Punthawanunt, E. Carcasona, and Y. Fujii, “Impact force measurement of a spherical body dropping onto a water surface”, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.85, 075108, 2014. doi: 10.1063/1.4878629(査読有)
- [11] N. Miyashita, K. Watanabe, K. Irisa, H. Iwashita, R. Araki, A. Takita, T. Yamaguchi and Y. Fujii, “Software for correcting the dynamic error of force transducers” *Sensors*, Vol.14, No.7, pp.12093-12103, 2014. doi:10.3390/s140712093(査読有)
- [12] M. Djamal, I. A. Prayogi, K. Watanabe, A. Takita and Y. Fujii, “New method for evaluating dynamic characteristics of cantilever spring of vibration sensor”, *Advanced Materials Research*, Vol.1025-1026, pp.372-378, 2014. (査読有)
- [13] N. Miyashita, R. Araki, A. Takita, T. Yamaguchi, A. S. Budi and Y. Fujii, “Improvement of software for dynamic force correction of force transducers”, *J. Inst. Ind. Appl. Eng.*, Vol.2, No.4, pp.131-136, 2014. (査読有)
- [14] R. Araki, A. Takita, T. Ishima, E. Carcasona and Y. Fujii, “Impact force measurement of a spherical body dropping onto a water surface from different heights”, *J. Inst. Ind. Appl. Eng.*, Vol.2, No.4, pp.137-142, 2014. (査読有)
- [15] K. Maru and K. Watanabe, “Non-mechanical scanning laser Doppler velocimetry with sensitivity to direction of transverse velocity component using optical serrodyne frequency shifting,” *Opt. Commun.*, Vol. 319, pp. 80-84, 2014. (査読有)
- [16] K. Maru and K. Watanabe, “Cross-sectional laser Doppler velocimetry with nonmechanical scanning of points spatially encoded by multichannel serrodyne frequency shifting,” *Opt. Lett.*, Vol. 39, No. 1, pp. 135-138, 2014. (査読有)
- [17] T. Yamaguchi, H. Hozumi, Y. Hirano, T. Kazuhiro and Y. Kurosawa, “Nonlinear transient response analysis for double walls with a porous material supported by nonlinear springs using FEM and MSKE method”, *Mech. Syst. Signal Pr.*, Vol. 42, pp.115-128, 2014. (査読有)
- [18] T. Jin, H. Jia, W. Hou and Y. Fujii, “A measurement of human body rotation during parabolic flight experiment”, *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, Vol. 87, No.1, pp.79-82, 2015. (査読有)

- [19] K. Kitabata, H. Iwashita, A. Takita, M. Djamal, N. Pornsuwancharoen and Y. Fujii, “Frictional characteristics measurement of a ceramic aerostatic linear bearing”, Key Engineering Materials, Vol. 643, p.167-172, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.643.167. (査読有)
- [20] K. Watanabe, N. Miyashita, D. Bin, K. Irisa, A. Takita, T. Yamaguchi, E. Carcasona, S. Mitatha and Y. Fujii, “Impact response measurement of contact lenses”, Key Engineering Materials, Vol. 643, pp. 173-177, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.643.167. (査読有)
- [21] R. Araki, A. Takita, P. Nachaisit, D.-W. Shu and Y. Fujii, “Frictional characteristics of a small aerostatic linear bearing, lubricants”, Vol. 3, pp. 132-141, 2015. doi:10.3390/lubricants3020132. (査読有)

〔学会発表〕(計 25 件)

- [1] Y. Fujii, “Precision Material Tester using the Levitation Mass Method, International Conference on Production”, Materials and Automobile Engineering 2012(招待講演), 2012年7月28日, Pattaya, Thailand.
- [2] Y. Fujii, “Basics and Applications of the Levitation Mass Method”, 4th International Conference on Mathematics and Natural Science 2012 (招待講演), 2012年11月8日, Pattaya, Thailand.
- [3] Y. Fujii, “Basics and Applications of the Levitation Mass Method”, 4th International Science, Social, Science, Engineering and Energy Conference 2012(招待講演), 2012年12月11日, Bangkok, Thailand.
- [4] K. Irisa, “Method for restoring zero-crossing points calculated from a noisy waveform for use in the Zero-crossing Fitting Method (ZFM)”, 4th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, 2012年12月7日, Kiryu, Japan.
- [5] H. Iwashita, “Dynamic Error Correction of force transducer”, 4th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, 2012年12月7日, Kiryu, Japan.
- [6] A. Takita, “Review of the Levitation Mass Method: A Precision Force Measurement Method”, The 1st International Conference on Industrial Application Engineering 2013 (招待講演), 2013年3月28日, Kitakyusyu, Japan.
- [7] Y. Fujii, “Review of the Levitation Mass Method (LMM)”, 2nd International Conference on Computer Science and Data Mining (招待講演), 2013年4月24日, Pattaya, Thailand.
- [8] Y. Fujii, “Mass Measurement in Space”, Aerospace Medical Association 84th Annual Scientific Meeting, 2013年5月12日, Chicago, USA.
- [9] Y. Fujii, “The Levitation Mass Method – A precision force measurement method using an optical interferometer and a levitated mass”, Intelligent Systems and Image Processing 2013 (招待講演), 2013年9月26日, Kitakyushu, Japan.
- [10] Y. Fujii, “Precision Dynamic Force Measurements using the Levitation Mass Method (LMM)”, Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (招待講演), 2013年11月7日, Bandung, Indonesia.
- [11] Y. Fujii, “Review of the Levitation Mass Method: A Precision Mechanical Measurement Method”, 5th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference 2013 (招待講演), 2013年12月8日, Kanchanaburi, Thailand.
- [12] T. Yamaguchi, “Numerical Analysis of Transient Responses for Elastic Structures Connected to a Viscoelastic Shock Absorber Using FEM with a Nonlinear Complex Spring”, 7th International Conference Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques (Surveillance 7), 2013年10月29日-30, Chartres, France.
- [13] A. Takita, “Evaluating the Mechanical Response of Materials against Small Impact Force”, 1st IEEE/IAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2013, 2013年9月26日, Kitakyusyu, Japan.
- [14] A. Takita, “Measurement of Friction Force in a Toothbrush Tuft Using Levitation Mass Method (LMM)”, 1st IEEE/IAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2013, 2013年9月26日, Kitakyusyu, Japan.
- [15] R. Araki, “Measuring The Dynamic Mechanical Characteristics of Japanese Food Materials against Small Impact Force”, 1st IEEE/IAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2013, 2013年9月26日, Kitakyusyu, Japan.
- [16] R. Araki, “Method for Frequency Estimation by Constant Gate Time”, Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering, 2013年11月7日, Bandung, Indonesia.
- [17] K. Watanabe, “Impact response measurement of contact lenses”, 5th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, 2013年12月19日, Kiryu, Japan.
- [18] K. Nakaya, “Evaluation of the Skylab Body Mass Measurement Device (BMMD) - World 1st BMMD for use in space”, 5th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, 2013年12月19日, Kiryu, Japan.
- [19] K. Kitabata, “Frictional Characteristics Measurement of a Aerostatic Linear Bearing”, 5th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering, 2013年12月19日,

Kiryu, Japan.

[20] Y. Fujii, “Biomechanical properties measurements using the Levitation Mass Methods”, The 2nd International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2014, 2014年9月26-29, Kitakyushu (Japan).

[21] A. Takita, “Improvement of software for dynamic force correction of force transducers”, The 2nd International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2014, 2014年9月26-29, Kitakyushu (Japan).

[22] Y. Fujii, “Fundamentals and Applications of the Levitation Mass Method”, The 4th International Conference on theoretical and Applied Physics 2014, 2014年10月16-17日, Bali (Indonesia).

[23] N. Miyashita, “Measurement of dynamic responses of a force sensor against small impact forces with various durations”, 6th International Conference on Advance Micro-Device Engineering, 2014年12月5日, Kiryu (Japan).

[24] K. Suzuki, “Improved method of direct measurement of the first-order mass moments of human body segments”, 6th International Conference on Advance Micro-Device Engineering, 2014年12月5日, Kiryu (Japan).

[25] R. Kojima, “Impact response measurement of bamboo shinai and carbon shinai”, 6th International Conference on Advance Micro-Device Engineering, 2014年12月5日, Kiryu (Japan).

〔図書〕(計 1件)

[1] A. Takita, J. Tao and Y. Fujii, CRC Press, “Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook (Second edition)”, Chapter 12. Dynamic Error Measurements of Force Sensors”, 2014年, pp. 12-1 - 12-15.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1件)

名称：落下試験装置および落下試験方法
発明者：藤井雄作，田北啓洋，石間経章，川島久宜，新木亮佑
権利者：群馬大学
種類：特許
番号：特願 2014-143357
出願年月日：2014年7月11日
国内外の別：国内

取得状況(計 0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤井 雄作 (YUSAKU FUJII)
群馬大学・大学院理工学府・教授
研究者番号：80357904

(2)研究分担者

田北 啓洋 (AKIHIRO TAKITA)
群馬大学・大学院理工学府・助教
研究者番号：20432768

山口 誉夫 (TAKAO YAMAGUCHI)
群馬大学・大学院理工学府・教授
研究者番号：90323328

丸 浩一 (KOUICHI MARU)
香川大学・工学部・准教授
研究者番号：00530164