

令和元年6月26日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04258

研究課題名(和文) 損傷予兆検知に基づくインテグリティ損失の予見が可能なスマートギアの開発

研究課題名(英文) Smart Gears Featuring Prognostics as Integrity-Loss Detector

研究代表者

森脇 一郎 (MORIWAKI, Ichiro)

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：20157936

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：歯車を回転中に無線観測できるシステムを実現するため、導電性インクでセンサおよびアンテナを直接歯車に印刷する手法の開発を行った。始めに歯車への回路印刷を可能にするため、4軸のレーザー印刷機を開発した。そして、き裂検知センサを設計・印刷を行った後、運転試験によりかみ合い回数の増加に伴うセンサ抵抗値の増加を確認した。さらに、同じ歯車に印刷可能なアンテナ、そしてそのアンテナとき裂検知センサを組み合わせたセンサ・アンテナ系を設計し、実際に印刷した。受信側のアンテナ特性を評価し、き裂の有無で送信側のセンサ・アンテナ系との共振特性が大きく変化することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

情報化社会の発展を支える無線通信機器の技術開発は凄まじい速度で進められており、IoTを駆使したSociety 5.0といわれる世界の実現が目前に迫っている印象がある。ところが、非常に厳しい環境で利用される歯車などの機械要素の状態を直接観測するためにこうした通信の技術が利用された例はなかった。その理由として、形状に制約を有する機械要素にアンテナやセンサを直接形成する技術が存在していなかったことなどが挙げられる。本研究では、その技術課題を明確にし、歯車の状態をワイヤレスで監視するシステムの基礎を確立した。この成果は、まだ僅かではあるが、Society 5.0の具現化に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：The present study initiated the development of a system for printing sensors and antennas with conductive ink to realize smart gears, which enable their own integrity to be wirelessly monitored during their operation. First of all, a 4-axis laser printer was developed for printing circuits directly on gears. After some crack-detection sensors were designed, running tests were carried out on gears printed the sensors. The results showed that the resistance of the sensors increased with the increased in mesh cycles. Furthermore, designed were an open spiral antenna and an antenna-sensor system which consists of the antenna and the sensor. The printed antenna and antenna-sensor system were evaluated through the measurement of return losses. The results showed that the resonance property depends strongly on the presence of cracks.

研究分野：機械要素

キーワード：損傷検知 スマートギヤ 導電性インク 印刷センサ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

歯車などの機械要素の損傷は大きな事故や過大な不良品発生に発展する恐れがあるため、その健全性をモニタリングすることは、非常に重要な課題である。そこで、こうした故障を防ぐため、「損傷検知」システムを開発しようとする研究が、日本に限らず世界各国で行われているが、回転軸を支持する軸受用ハウジングや歯車箱等、その機械要素から離れた場所での振動計測を基に機械要素の状態推定を行うことでの評価するものが主であった。しかしながら、こうした評価方法では、稼働寿命の最終段階における損傷の検知しかできないのが現状である。そのため、回転する機械要素の「損傷検知」ではなく、「損傷の予兆検知」に基づく機械の完全性の損失の予見する方法が求められている。こうした問題に対して、歯車の損傷が発生する前に変化していく状態量を推定しようとする試みも報告されている。例えば、歯車の状況に合わせて変化する物理量として歯元応力に着目し、ひずみゲージを歯元に直接に貼付し、歯車の動荷重に対してひずみを計測する方法がある。これによって、歯車のひずみが直接計測可能なため、歯車の運転状態を直接監視でき、損傷に至る歯車の状態を常時モニタリングすることが可能である。しかしながら、先述の事例においては、ひずみゲージをモジュール 8mm の比較的大きな平歯車に貼付してモニタリングを行っており、モジュール 1mm といった小型の歯車にこの手法を直接適用することは難しく、一般的なひずみゲージの貼付に変わる別の手法が必要とされている。

一方で、プリントドエレクトロニクスと呼ばれる技術を利用して電子回路を作製する方法が注目されている。この方法はその名の通り、印刷技術を用いて電子回路を生産しようとする試みであり、その市場規模の増加が予想されている。例えば、微小な金属粒子、例えば銀ナノ粒子を特殊な溶剤中に分散させておき、こうした“導電性インク”をインクジェットプリンタによって基板上に吹き付けて乾燥させることで電子デバイスの一部を作る方法が開発されている。このようなインクジェットによる印刷は、他の印刷技術（例えばスクリーン印刷やオフセット印刷）と比較すると、生産速度は劣るがマスク等の版画の版に相当するものがいらぬため、少量でフレキシブルな生産に向いており、微細配線が可能となれば電子機器の高機能化・高性能化に貢献できると期待されている。

こうした背景のもと、申請者らは、機械工学分野における回転する機械要素の状態をモニタリングするシステムを直接機械要素上に構成する難しさを、プリントドエレクトロニクスの技術を利用して克服できるのではないかとこの着想に至った。すなわち、複雑な 3 次元形状を有した回転する機械要素である歯車にひずみゲージを手作業で貼付する代わりに、状態モニタリングを行うためセンサを、歯車の必要な箇所に直接導電性インクを印刷することにより製作する方法の開発し、さらにそのセンサを利用して回転中の歯車の状態を観測するためのシステムについて研究を始めた。これまでの成果として、小型シングルノズルインクジェットヘッドを NC フライス盤に組み込み、導電性インクを印刷できる 3 軸プリンタの開発に成功し、3D-CAD、CAE によるセンサ設計、CAM による G コード出力及び 3 軸プリンタによるセンサパターン印刷が行える生産プロセスの開発にも成功した。

2. 研究の目的

本研究では、複雑形状を有する機械要素に直接センサを印刷するために多軸の動作が可能な印刷機を開発することを一つの目的とした。特に、ハイポイドギヤのようにねじれた形状が顕著であり、複雑な 3 次元形状を有する機械要素の表面に導電性インクを直接印刷するためには、4 軸以上の印刷機を開発する必要がある。また、これまで開発した印刷機はインクジェットヘッドを使用していたが、例えば歯溝へのアクセスが困難であるなど、制約が多かったため、これに代わる印刷用ヘッドが必要とされている。また、開発するプリンタによって印刷するセンサには歯車の様々な状態量をモニタリングする機能が求められるが、歯車に特化した利用しやすい歯車用センサを設計・開発することも求められている。そして開発されたセンサは、その有効性を歯車の運転試験によって評価しなければならない。さらに、印刷センサシステムを実用化するためには高速で回転する機械要素からその状態量をセンサで計測した後、外部にワイヤレスでデータを送信するシステムがあれば、配線を行う煩わしさから解放され、また、スリップリング等の摺動部を有し、摩擦を考慮しなければならない要素が必要無くなるなど、利便性が格段に上がることが予想される。

このような機能を有する歯車用のセンサシステムを、設計から製作、そして実験による評価に至るまで一貫した開発を行うことが本研究の目的となる。そして本研究を進展させるために、特に重要となる次の 5 つの課題の解決を本申請の研究開発期間で達成すべき目標とした。

1. プリントドひずみセンサの特性評価
2. レーザープリントヘッドと 4 軸加工機との同期制御による 4 軸印刷機の開発
3. 歯元き裂の検出、き裂発生の予兆を検出できる歯車用センサの開発
4. 歯車運転試験によるき裂検知センサの特性評価
5. 高周波回路とセンサを組み合わせたワイヤレスモニタリングシステムの開発

3. 研究の方法

前述したスマートギヤセンサシステムを実現するための 5 つの研究目標を達成するために、次に示す方法で研究に臨んだ。

平成 28 年度は先行研究で開発を行っていた導電性インク用 3 軸のインクジェット型の印刷

機を改良し、印刷ヘッド部のインクジェットヘッドをレーザーモジュールに取り替えてレーザー型の印刷機に変更することから始めた。これは、インクジェットヘッドでは歯元近傍にアプローチすることができず、歯元に電気回路を印刷するために不可能であった問題を解決するためである。そこで対象物とヘッド間に十分な距離を設けることが可能となるレーザーモジュール(波長 455nm,最大出力 3.5W)を導入し、導電性インクをレーザー焼結することによって電気回路の印刷が行えるようにした。この時に必要となる電気回路の製作手順を確立し、さらにインクの焼結に適切なレーザーの照射条件を調べた。また本装置を利用してポリイミドテープ上にひずみゲージを印刷して引張試験を行い、印刷した回路のひずみに対する抵抗値の変化を評価した。そして複雑な形状を有する機械要素の表面に導電性インクの印刷が行えるよう、4軸のNC工作機械をベースにレーザーモジュールを組み込んだ4軸レーザー印刷機の開発も行い、円柱上にひずみゲージを印刷する実験を行った。

平成29年度は前年度に開発した4軸レーザー印刷機を利用して、樹脂製歯車表面上に吹き付けた導電性インクを焼結することでセンサとなる回路の形成条件を明らかにした。はじめに、PA66製の歯車の表面性状を改善するため、ポリイミドによるコーティングを試みた。ポリイミド噴霧後のスピコート条件、イミド結合を促す加熱条件を明らかにした後、密着性を確認する歯車運転試験を実施した。次に、スマートギヤセンサシステムを実現する対象としてモジュールが1.0mmで歯数が48の歯車を選び、その表面上に印刷するためのき裂検知センサの設計を行った。そしてこれまでに明らかにした導電性インクの焼結条件によってセンサの印刷を実際に行った。また、センサを印刷した樹脂歯車の運転試験を実施することによって印刷したセンサの歯車への密着性を調べる予備実験を行った。さらに、センサが取得した情報を送信するために必要となるアンテナの印刷に取り組み、印刷されたアンテナの特性評価を開始した。また、鉄板上での導電性インクの印刷を安定させるため、厚いポリイミド層を形成するための技術開発及び小型無線通信モジュールを鉄板上に表面実装する技術の開発も行った。

平成30年度はモジュールが前述の諸元を有する歯車に対してき裂検知センサを追加で2種類設計し、これまでに開発した4軸レーザー印刷機を利用してPA66製の歯車に印刷した。さらにそれらき裂検知センサの特性を評価するために運転試験を実施した。一つ目の新たに設計したセンサは、4歯毎の歯元を観測できるタイプの形状をしており、このき裂検知センサの特性評価実験では、800min⁻¹の回転数、2Nmのトルクの条件でき裂が発生するまで運転試験を実施した。途中、運転を停止してセンサの抵抗を測定することでかみ合い回数に対する抵抗値の変化を記録した結果、一部のセンサは初期状態から20%程度の抵抗値の増加が見られた。センサの感度を上げるため、歯の圧縮側と引張り側でセンサの形状を変更した非対称なき裂検知センサも開発した。現在、このセンサ特性を評価するための実験を計画中である。

さらに、同じ諸元の樹脂歯車上に印刷可能なアンテナの設計を行った。アンテナは歯車のサイズに合わせたオープンスパイラルタイプのアンテナである。非対称なき裂検知センサとこのアンテナを繋げた“スマートギヤセンサシステム”の試作機も設計し、1mm厚のPOM製の樹脂板に印刷した。同じ特性を有するアンテナをネットワークアナライザに接続し、そのアンテナにスマートギヤシステムを接近させることで、き裂検知センサ部の状態(導通の有無)によって観測用アンテナのリターンロス特性がどのように変化するか実験的に確認した。

4. 研究成果

平成28年度は、導電性インクの機械要素への印刷手段を、既存のインクジェット型からレーザー焼結型へと改良した。さらに印刷機の軸数を3軸から4軸へと改良した。4軸レーザープリンターのレーザーモジュールは445nmの波長を有し、最大出力が3.5Wとなるダイオードレーザーを用いた。また、4軸化を実現するために、ローランド社製の4軸CNC切削加工機(Roland MDX-40A)を導入した(図1)。従来のインクジェットタイプの印刷機では印刷ヘッドと印刷対象物間の距離を1mm以下と設定する必要があったが、改良したレーザー印刷機は40mm程度の印刷距離が確保できることになった。これによって、複雑な表面形状を有する機械要素部品に直接導電性インクを印刷する準備が整った。

次に鉄製の歯車を印刷対象として想定し、そこに回路やセンサを印刷する方法・手順を確立した。まず始めに印刷対象表面に絶縁層となるポリイミド層を形成し、その上に導電性インクを吹き付けてスピコート技術によってインクを同じ厚みに調整する。続いて短時間の乾燥を行う印刷前の処理を行い、そして最後に吹き付けられた導電性インクをレーザー焼結する。このときの導電性インクの焼結のためにレーザー加工機に与える適切な条件を与えるための基礎実験を行なった(図1)。この結果より、レーザーモジュールより41.5mm離れた距離に印刷対象物を設置することで低い抵抗で細い線幅の電気回路が得られることがわかった。これらの結果より、今後のセンサやアンテナの開発環境が整えられたと言える。また、この印刷条件を利用し、ポリイミドテープ上にひずみゲージ形状の回路を印刷し、その回路の引張試験を行った結果、ひずみゲージと同様の機能を有する回路が得られたことがわかった。さらに4軸印刷機の機能を利用し、円柱の外周部に同様のひずみゲージを印刷することにも成功した。

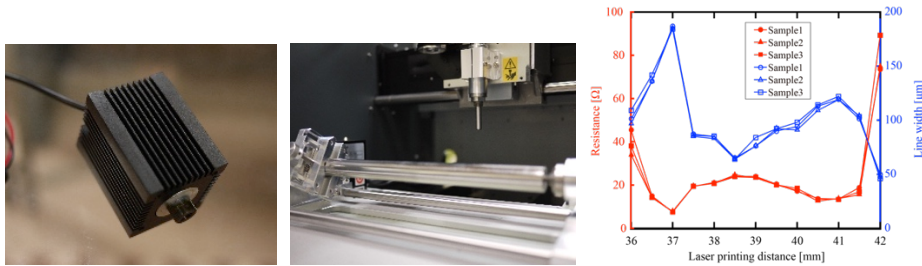


図 1. 4 軸レーザー印刷機と導電性インクのレーザー焼結条件

平成 29 年度は、前年度に明らかにした導電性インクのレーザー焼結条件を用いて、樹脂歯車に歯車用センサを印刷する方法の検討を行なった。印刷対象とする樹脂歯車には融点等を考慮して PA66 を選択した。導電性インクを直接 PA66 歯車へ印刷すると、樹脂歯車の成形時に用いる金型の切削痕の影響で断線が発生することが SEM による観察で確認できたことから、PA66 歯車の表面性状を改善するためのコーティング技術の開発を行った。そして PA66 歯車の融点以下でコーティング材としてのポリイミド膜を形成する技術を開発した後、き裂検知センサの開発を開始した。始めに設計したき裂検知センサは、インボリュート歯車の縁に沿って繋がった形状を有したものであり、実際に PA66 歯車に印刷した結果を SEM で観察した結果を図 2 に示す。

また、印刷されたセンサを有する PA66 歯車の運転試験を行い、運転試験中に印刷されたセンサの剥がれ等生じることがないか確認試験を行なった。

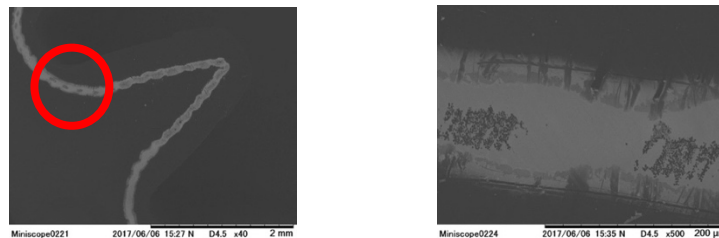


図 2. PA66 歯車に印刷したき裂検知センサの SEM による観察結果

続いて、き裂検知センサから歯車の状態を無線で送信するために必要となるアンテナの開発に着手した。WiFi や Bluetooth 等の無線通信で利用されるアンテナの形状を参考に、直径 50mm 程度の大きさの歯車に搭載可能なサイズのアンテナを設計し、そのアンテナ特性を調べる基礎実験を行なった。

平成 30 年度は、さらに 2 種類のき裂検知用センサを新たに設計するところから始めた。これまでに開発したき裂検知センサは、歯車全周に渡って一様な線幅の回路を印刷することで構成しており、途中、少しでも異物等が入ると断線することから製作の再現性が悪く、運転試験を実施するまでには至らなかった。そこで、4 歯毎の歯元を観測できるタイプの形状を考案し、48 歯の歯車に対して 12 個のセンサを印刷する方法を試みた。そしてこのタイプのき裂検知センサを印刷した PA66 歯車に対して運転試験を実施した。この試験によって一部のセンサは運転時間が経過するに従い抵抗値が増加していることが確認でき、き裂が発生するまでにセンサの抵抗が変化していくことが確認できた。しかしながら、き裂発生までの抵抗値変化が小さく、センサとしての感度が十分ではなかった。そこで、圧縮側と引張り側で線幅を変化させた非対称な形状のセンサを開発した(図 3)。

このセンサを印刷した歯車の運転試験を実施し、センサの評価を行う中で高トルクの条件下で運転試験を行うと、歯車が直ぐに折損し、十分なデータを回収することができない事象が発生した。この原因を調査した結果、センサ印刷過程でポリイミド層の形成を行う際に 200 度の加熱を行う工程が問題であることがわかり、その工程を必要としないセンサ印刷方法・条件を一から見出す必要が生じた。現在、その印刷については適切な条件がわかりつつあるが、ポリイミド層を設けないことから印刷面の表面性状が悪化するため、さらなる改善を必要としている。

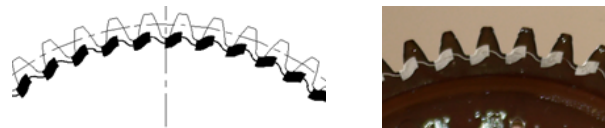


図 3. 非対称型き裂検知センサ

また、最終年度においては、本研究で提案しているスマートギヤセンサシステムのプロトタイプを製作した。前述したモジュール 1.0mm、歯数 48 の歯車に印刷可能なオープンスパイラルアンテナを設計し、POM 製の 50mm 角の板に印刷した。さらに、このオープンスパイラルアンテナとき裂検知センサを接続したアンテナ・センサシステムの設計・印刷を行なった(図 4)。そしてこれらのアンテナ、センサ・アンテナシステムを接近させた状態でアンテナ単体側にネットワークアナライザを接続し、リターンロス特性を計測した。その結果、センサ・アンテナ側のセン

サが正常な状態と、センサが断線した状態でリターンロスが大きく変化する結果が得られた (図4). 当初計画していた, ワイヤレスでの歯車の状態観測の実現に大きく近づく結果であった.

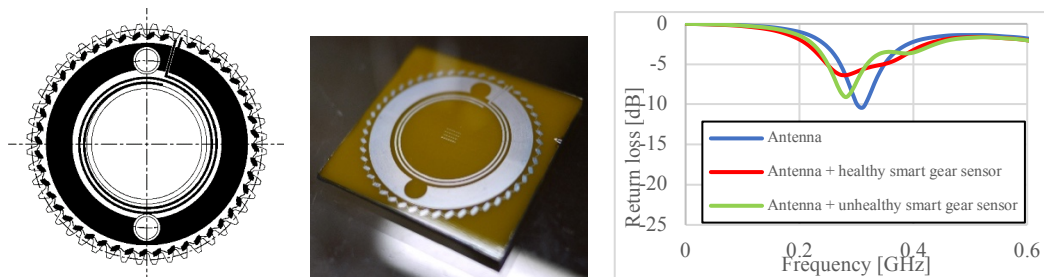


図4. 歯車用センサ・アンテナシステムとリターンロス計測

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計1件)

1. Printed gear sensor for health monitoring (Development of three-axis laser printer for conductive ink and evaluation of laser-sintered electric circuits), Daisuke IBA, Shintaro FUTAGAWA, Takahiro KAMIMOTO, Morimasa NAKAMURA, Nanako MIURA, Takashi IIZUKA, Arata MASUDA, Akira SONE, Ichiro MORIWAKI, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.11, No.6, 2017, Paper No.17-00396, [DOI: 10.1299/jamdsm.2017jamdsm0090] (10 ページ)

〔学会発表〕 (計11件)

国際会議

1. Daisuke Iba, Shintaro Futagawa, Nanako Miura, Takashi Iizuka, Arata Masuda, Akira Sone, Ichiro Moriwaki, "Development of smart gear system by conductive-ink print (impedance variation of a gear sensor with loads and data transmission from an antenna)", Proc. SPIE 10973, Smart Structures and NDE for Energy Systems and Industry 4.0, 1097309 (18 March 2019); doi: 10.1117/12.2515339; (10 ページ)
2. Fabrication of antennas on spur gears for condition monitoring by conductive-ink print, S. Futagawa, D. Iba, T. Kamimoto, M. Nakamura, N. Miura, T. Iizuka, A. Masuda, A. Sone, I. Moriwaki, Proceedings of International Gear Conference, Lyon, France, August 27-29, 2018, pp.1-9.
3. Shintaro Futagawa, Daisuke Iba, Takahiro Kamimoto, Morimasa Nakamura, Nanako Miura, Takashi Iizuka, Arata Masuda, Akira Sone, Ichiro Moriwaki, "Conductive ink print on PA66 gear for manufacturing condition monitoring sensors", Proc. SPIE 10602, Smart Structures and NDE for Industry 4.0, 106020R (27 March 2018); doi: 10.1117/12.2295771; (10 ページ)
4. Print of crack detection sensor for spur gears by laser sintering of conductive ink, D. Iba, S. Futagawa, T. Kamimoto, M. Nakamura, N. Miura, T. Iizuka, A. Masuda, A. Sone, I. Moriwaki, Proceedings of International Conference on Gears 2017, pp.869-880, 2017. (10 ページ)
5. D. Iba, S. Futagawa, T. Kamimoto, N. Miura, M. Nakamura, T. Iizuka, A. Masuda, A. Sone, I. Moriwaki, Development of sensing systems printed with conductive ink on gear surfaces: manufacturing of meander line antenna by laser-sintered silver nano-particles, Proc. SPIE 10168, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2017, 2017/03/25-2017/03/29, Portland, Oregon, USA
6. Takahiro Kamimoto, Daisuke Iba, Shintaro Futagawa, Morimasa Nakamura, Nanako Miura, Takashi Iizuka, Arata Masuda, Akira Sone, Ichiro Moriwaki, Development of printed sensor for gear health monitoring system (Development of three-axis printer for conductive ink laser sintering process and properties evaluation of sintered electric circuit), The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (MPT 2017 – Kyoto), 2017/03/01-2017/03/03, 京都
7. D. Iba, R. Rodriguez Lopez, S. Futagawa, T. Kamimoto, M. Nakamura, N. Miura, T. Iizuka, A. Masuda, A. Sone and I. Moriwaki, Development of 3-axis laser printing system for manufacturing smart gear sensor systems (printing conditions by laser sintering and prototyping of meander line antenna), International Conference on Advanced Materials, Mechanics and Manufacturing, 2016/12/19-2016/12/21, Hammamet, Tunisia

国内会議

8. 導電性インク印刷技術を用いた歯車用センサシステムの開発 (歯車表面に印刷されるアンテナの設計), 二川 真太郎, 射場 大輔, 三浦 奈々子, 飯塚 高志, 増田 新, 曾根 彰, 森脇 一郎, 2018 年度日本機械学会年次大会講演論文集, 9月10日~12日, 関西大学, S1120203, pp.1-5.
9. 導電性インク印刷による回路形成技術を用いた歯車用センサ開発 (プラスチック歯車側面に印刷したき裂検知センサの特性評価), 二川 真太郎, 射場 大輔, 神本 貴裕, 市川 嵩人, 三浦 奈々子, 飯塚 高志, 増田 新, 曾根 彰, 森脇 一郎, 日本機械学会機素潤滑設計部門

- 講演会講演論文集, 2018, 18 巻, pp.71-74, 4 月 22 日, 山形.
10. POM 製平歯車側面への導電性インクの印刷によるき裂検知センサの製作, 二川 真太郎, 射場大輔, 神本貴裕, 中村守正, 三浦奈々子, 飯塚高志, 増田新, 曾根彰, 森脇一郎, 日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集, J1110104, pp.1-5, 2017.
 11. 神本貴祐, 射場大輔, 二川真太郎, 中村守正, 三浦奈々子, 飯塚高志, 増田新, 森脇一郎, 曾根彰, 導電性インクのレーザー焼結によるインポリュート曲線の印刷, 第 15 回評価・診断に関するシンポジウム, 2016 年 12 月 15 日(木)-12 月 16 日(金), 京都

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

研究室ホームページ: <http://www.pml.mech.kit.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 曾根 彰

ローマ字氏名: Sone Akira

所属研究機関名: 京都工芸繊維大学

部局名: 機械工学系

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 20197015

研究分担者氏名: 増田 新

ローマ字氏名: Masuda Arata

所属研究機関名: 京都工芸繊維大学

部局名: 機械工学系

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 90252543

研究分担者氏名: 飯塚 高志

ローマ字氏名: Iizuka Takashi

所属研究機関名: 京都工芸繊維大学

部局名: 機械工学系

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 60335312

研究分担者氏名: 射場 大輔

ローマ字氏名: Iba Daisuke

所属研究機関名: 京都工芸繊維大学

部局名: 機械工学系

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 10402984

研究分担者氏名: 三浦 奈々子

ローマ字氏名: Miura Nanako

所属研究機関名: 京都工芸繊維大学

部局名: 機械工学系

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 80735340

(2)研究協力者

無し

※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。