

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00742

研究課題名(和文) 歯車表面へのin-situセンサシステムの印刷によるスマートギヤの実現

研究課題名(英文) Development of Smart Gears Printed In-Situ Sensors on the Surface

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) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、歯車の状態を運転中に観測できるスマートギヤシステムの開発を目的としている。スマートギヤとは、導電性インクで印刷されたセンサ回路とアンテナ回路が表面に実装された歯車である。センサから得られた情報を外部にアンテナを介して送信することができ、歯車の状態を高速運転中に非接触で監視することが可能となる。これまでに樹脂歯車に対してき裂検知センサとアンテナを組み合わせた観測対象側システムの設計・印刷を行い、観測用アンテナとネットワークアナライザによって構成された観測用送受信システムと磁気結合させることによって、き裂センサの状態がモニタリング可能なシステムを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械装置が、自らの完全性自覚し、自身を構成する要素の損傷や劣化を予見する能力を持つことができれば、機械装置の可用性を高度に保ちつつ、保全を効率的に行うことが可能となる。本研究で提案するように、センサを印刷する歯車側に電池等の電源を用意することなく、無線での監視が可能となれば、歯車のみならず高速で運動する機械要素全般がモニタリング対象とすることができ、これまでにない高付加価値を機械要素に持たせることが可能となる。これにより、本研究から派生する応用研究が広がっていくものと期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a smart gear system that can observe the state of gears during operation. Smart gears are gears with sensor and antenna circuits printed with conductive ink on their surfaces. By transmitting information obtained from the sensors to the outside through the antenna, the state of the gears can be monitored without contact during high-speed operation. An observation target side system combining a crack detection sensor and an antenna has been designed and printed on plastic gears so far. By magnetically coupling the system with an observation transmitter/receiver system consisting of an observation antenna and a network analyzer, the system is capable of monitoring the condition of the crack sensor.

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 樹脂歯車

1. 研究開始当初の背景

自動車、飛行機などを代表とする輸送機械、ものづくり日本を支える各種生産設備や発電プラントなど、これら機械装置の健全性をモニタリングすることは非常に重要な課題となっている。機械装置の「損傷検知」システムを開発しようとする研究は日本に限らず世界各国で行われているが、稼働寿命の最終段階における大きな損傷の検知しかできないのが実状である。寿命の最終段階ではなく、「損傷の予兆」を検知するためには、機械要素の本来の状態をその場で計測し、着目する機械要素から直接得られた情報が必要と考えられる。

一方、近年、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。そのプリントドエレクトロニクス技術の一つとしてレーザー焼結の技術を電子回路形成に応用したものがあ。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た“導電性インク”を基板上に吹き付けて乾燥させた後、これをレーザーで焼結することで電子デバイスの一部を作るという方法である。このようなレーザー焼結による印刷は、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いる。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、プリントドエレクトロニクス技術を利用して、歯車の状態をモニタリングするためのセンサを歯車に直接印刷する手法の開発を始めた。複雑な3次元形状を有した歯車にひずみゲージを手作業で貼付する代わりに、歯車の必要な箇所に導電性インクを吹き付けた後、レーザー焼結でセンサを「印刷」しようというものである。この「印刷機」を開発し、そのセンサを実際に歯車に印刷し、これを利用して回転中の歯車の状態を観測する研究を始めた。これまでの成果として、半導体レーザーモジュールをNCフライス盤に組み込み、導電性インクを印刷できる4軸制御のプリンタの開発し(図1)、3D-CAD、CAEによるセンサ設計、CAMによるGコード出力及び4軸制御プリンタによるセンサパターンの印刷が行える生産プロセスを開発してきた。そして、歯元に発生するき裂を検出できるセンサを設計し、モジュール1、歯数48の樹脂歯車の側面に複数個印刷した後(図2)、運転試験中にセンサの抵抗値がどのように変化するか調べた。また、無線での情報送信を目指し、アンテナの試験印刷を行い、特性評価を行った。

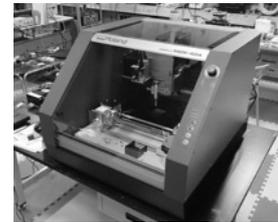


図1. 導電性インク用4軸印刷機

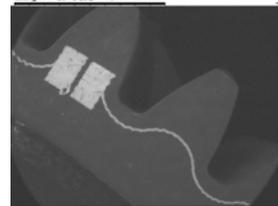


図2. き裂検知センサ

しかしながら、このき裂検知センサの抵抗値の変化は、運転試験を一度中断してLCRメーターにて計測した結果であり、センサの抵抗値を運転中に測定したものではなかった。高速で回転する歯車に印刷されたセンサから情報を直接、動的に引き出すことができなければ、歯車の状態量を監視していることにはならない。歯車の状態を表すセンサの情報を、アンテナを利用してワイヤレスで伝送できれば自由度の高い計測が可能となる。しかし、これまでにセンサとアンテナを直接歯車に印刷し、その状態を観測した研究例は皆無であった。

2. 研究の目的

本研究は、動力伝達機構の主要機械要素である歯車を取り上げ、導電性インクの印刷によってセンサとアンテナからなる回路を表面実装した「スマートギア」の開発を目的とする。高速回転中の歯車に外部のシステムとして用意したアンテナから無線で電力伝送を行い、印刷したセンサとアンテナで構成された回路のインピーダンス変化を非接触でモニタリングすることにより歯車の状態変化の把握を試みる。本研究の目的を達成するために、研究期間中には特に重要な次の課題に取り組んだ。

- 課題1. 歯車形状に適したアンテナの設計とその特性評価
- 課題2. 樹脂歯車へのシステム印刷とその特性評価
- 課題3. スマートギヤと観測アンテナ間の回転位相が磁界結合に与える影響
- 課題4. スマートギヤシステムのパラメータ同定
- 課題5. 微細回路印刷と積層回路印刷の工程開発
- 課題6. 金属歯車上でのアンテナ機能を実現

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課題に対して次に示す方法で研究に臨んだ。

【課題1. 歯車形状に適したアンテナの設計とその特性評価】

これまでに50mm×50mmサイズのPOM製の平板上に数種類のアンテナを試印刷し、ネットワークアナライザによりその周波数特性を計測し、2.0GHz周辺に共振周波数を有することを確認し

てきた。このアンテナは、回転用に軸穴を有し、印刷スペースが限定される歯車の側面に印刷できないことから、歯車専用のアンテナを新規に設計・印刷し、その周波数特性を評価する。ここでは、所有している歯車運転試験機に搭載できるモジュール 1.0mm、歯数 48、軸穴直径 25mm を有する樹脂歯車の側面に印刷できるアンテナの設計を試みる。歯車用のアンテナ設計には幾何的な制約が多く、また回転するという条件がある中で、外部の静止系に用意するアンテナを相対運動に対してロバストに利用できる適切な形状設計を検討する。

【課題 2. 樹脂歯車へのシステム印刷】

歯車用に開発したアンテナ及びき裂検知センサを歯切り加工された樹脂歯車側面に印刷し、スマートギヤの実装を試みる。POM 板と異なり表面性状が劣る樹脂歯車側面に導電性インクを印刷するため、歯車側面の研磨工程を追加して、表面性状を向上させる。また、センサとアンテナで構成されたスマートギヤ側の電気回路と、観測用のアンテナのみで構成された電気回路間で磁界結合が成立し、ワイヤレス給電が実現できるか確認する。

【課題 3. スマートギヤと観測アンテナ間の回転位相が磁界結合に与える影響】

スマートギヤの運転試験による評価を実施する前に、静止している観測用アンテナに対するスマートギヤ化した歯車の回転位相の変化及び設置距離がリターンロスに与える影響を詳しく調査する。アンテナ対での電力伝送に関する研究では、一般的にアンテナ間の距離が伸びると伝送効率が低下することが知られている。本研究では、歯車に印刷したセンサの影響を受けて変化するリターンロスの形状により、歯車の状態を推定するが、設定するアンテナ間の距離やアンテナ間の回転位相によってリターンロスの形状がどのように変化するか把握することが重要となる。そこで、アンテナ間の相対的な距離・位相を変化させてリターンロスを計測してその影響を詳細に調べる。

【課題 4. スマートギヤシステムのパラメータ同定】

スマートギヤと磁界結合している観測用アンテナのリターンロスから、歯車に印刷されたセンサからの情報を読み取ることで、運転中の歯車の状態が把握できることになる。そこで、磁界結合している二つのアンテナから構成されるシステムを電気回路としてモデル化し、実験で得られる周波数特性と、そのモデルが有する周波数特性とを比較することで、電気回路のパラメータを同定する方法を確立する。

【課題 5. 微細回路印刷と積層回路印刷の工程開発】

研究開始当初には、歯車の歯の形状変化を敏感に計測可能なセンサの開発と、積層技術を利用した加速度センサの開発を研究課題として取り上げていたが、新型コロナウイルス感染拡大に伴って一部の実験の進捗が滞り、前述したセンサを最終的に開発するには至っていない。しかしながら、それらを今後開発していくために必要となる基礎的技術の開発を実施する。具体的には、半導体製造の際に用いられるフォトレジストの技術を利用した微細回路印刷の工程開発と、複数の機能性膜から構成される積層回路印刷の工程開発を行う。

【課題 6. 金属歯車上でのアンテナ機能を実現】

一般的にアンテナは金属がその周辺にあった場合、鏡像効果によってアンテナ特性が悪化する。そのため、樹脂歯車の表面に印刷したスマートギヤシステムを、金属歯車で実現するためには、金属歯車表面上に構成したアンテナの性能を低下させることとなる利用する工夫が必要となる。そこで、RFID タグ分野で開発されてきた磁性シート等を利用し、アンテナ機能を確保するための手法を開発する。

4. 研究成果

【研究成果 1. 歯車形状に適したアンテナの設計とその特性評価】

研究代表者の研究室が所有する歯車運転試験機において運転試験可能なサイズの歯車、すなわち、モジュール 1.0mm、歯数 48 の歯車の側面に印刷可能なオープンスパイラルアンテナを設計した(図 3)。軸対象の形状ではないものの、それに近い形状としてスパイラルアンテナを採用し、回転位相に対して特性変化が少ないアンテナを設計した。そして、その周波数特性をネットワークアナライザで解析したところ、リターンロス形状には単一の深い谷が現れ、0.3GHz 近傍に 1 次の共振周波数が存在していることが確認された。また、同じ特性のアンテナを接近させることで、アンテナ対間で磁界結合は発生し、そのリターンロス形状が双溪となって周波数特性が大きく変化することが確認できた。これによって、設計したアンテナ対を利用して非接触で歯車側の電気回路の状態がネットワークアナライザにより観測できることがわかった。

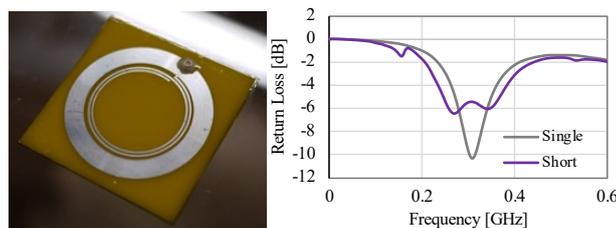


図 3. オープンスパイラルアンテナと周波数特性

【研究成果 2. 樹脂歯車へのシステム印刷】

歯切り加工された樹脂歯車の側面に、開発したオープンスパイラルアンテナを導電性インクで印刷するために、研磨工程を追加した。樹脂歯車表面は加工時の表面性状が悪いため、研磨による仕上げ加工を行なった後に、導電性インクの塗布及びスピコートによる一様なインク厚を形成し、レーザー焼結によるパターン印刷を行う製作プロセスを開発した。図 4 左に、研磨工程での研磨時間と表面性状の変化を調べた結果について示す。また、き裂検知センサとオープンスパイラルアンテナを組み合わせた電気回路を実際のナイロン製歯車に印刷した結果を図 4 右に示す。

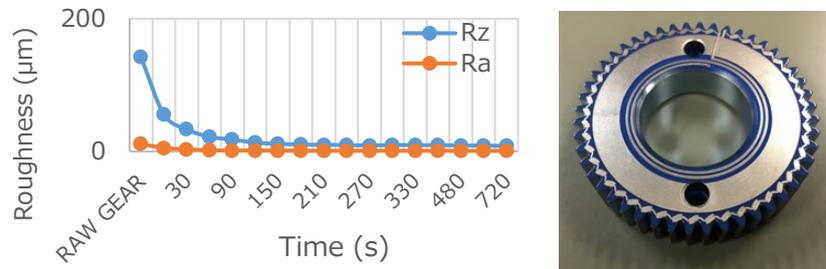


図 4. 樹脂歯車側面の研磨結果とスマートギヤ印刷

【研究成果 3. スマートギヤと観測アンテナ間の回転位相が磁界結合に与える影響】

スマートギヤと観測アンテナ間の距離と位相の変化がリターンロスに与える影響を実験的に調査した。xyz- θ ステージ上に設置したスマートギヤとその上部に設置し、磁界結合している観測用アンテナのリターンロスを計測した。実験の様子を図 5 左に、回転位相を変化させた場合のリターンロスの計測結果を図 5 右に示す。この結果より、回転位相に対して変動するリターンロスは最大で 0.2dB 程度であり、歯元き裂等によってそれ以上の変化が生じれば損傷検知が可能であることがわかった。さらに、小型木工旋盤を利用して、スマートギヤを 500rpm から 3,500rpm まで回転速度を変化させた場合に、測定された観測用アンテナのリターンロスを図 6 に示す。この図より、回転速度を変化させても測定されるリターンロスには大きな影響がないことがわかる。

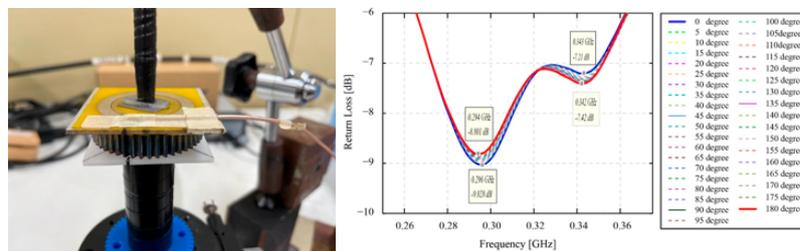


図 5. アンテナ対の回転位相が観測アンテナのリターンロスに与える影響

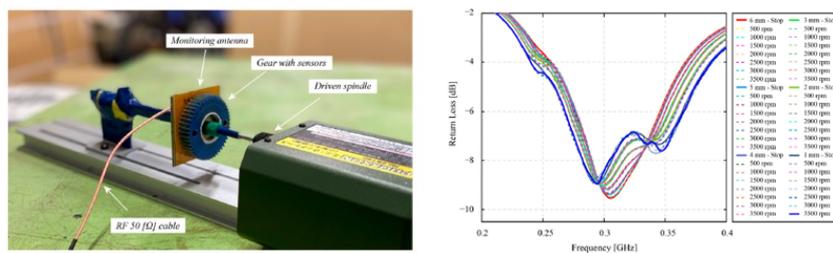


図 6. アンテナ対の回転位相が観測アンテナのリターンロスに与える影響

【研究成果 4. スマートギヤシステムのパラメータ同定】

磁界結合している二つのアンテナ回路を 2 自由度モデルで表現し、そのリターンロスを解析的に導出した。そして実験によって得られたリターンロスとの誤差が最小になるように、モデルのパラメータを同定した。パラメータ同定には最急降下法と遺伝的アルゴリズムを適用した方法を利用し、7つのパラメータを同時に同定することが可能となった。磁界結合している二つのアンテナ対の 2 自由度モデルを図 7 左に示す。さらに、実験で得られたリターンロスに対して、理論式から導出されたリターンロスとの差を最小にすることで得られたパラメータを用いてプロットしたリターンロスを図 7 右に示す。この図において、赤い実線が実験で測定されたり

ターンロスであり、青い実線がパラメータ同定で得られた推定値を解析解に代入した結果、得られたリターンロスを示している。実際のアンテナ回路は複数の共振点を有していることから、高い周波数領域で、リターンロスの結果に差が生じているが、アンテナの共振点である 0.3GHz 近傍では両者の曲線は非常に一致していることが確認できた。

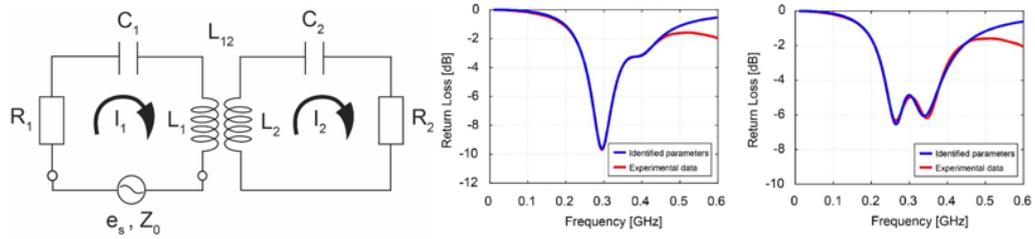


図 7. アンテナ対の 2 自由度モデルと同定で得られたパラメータを用いたリターンロス

【研究成果 5. 微細回路印刷と積層回路印刷の工程開発】

モジュール 1.0mm の歯車の一歯側面に細かなメッシュ上のパターンを形成し、歯形状の変化に対して感度良く変化するセンサとして WEB 型センサを提案したが、これを実現するためには 10 μ m 以下の線幅を有する電気回路を印刷する技術が必要となる。そこで、半導体や MEMS を製作する際に用いられるレジスト材を露光して回路の型を成形する装置を用いてセンサを製作する工程開発に取り組んだ。図 8 にマスクレス露光装置、レジスト材の成形結果と顕微鏡による観察の様子を示す。この技術の導入によって、最小の線幅が 3 μ m の電気回路を印刷できるようになり、従来の最小値である 100 μ m と比較して、大幅に回路製作能力が改善された。また、機能の異なる複数の層を積層し、圧電型センサやコンデンサ型センサの開発ができるように、スピコーターを利用した材料塗布を行えるようにした。これにより導電層、絶縁層などを積層させることが可能となった。しかしながら、新型コロナウイルス感染拡大の影響で研究が適切に進められなかった時期があり、新しく導入した技術を用いて新型センサの製作を完了させるところまでは到達できなかった。



図 8. マスクレス露光装置による回路用型の成形とスピコーター

【研究成果 6. 金属歯車上でのアンテナ機能を実現】

金属歯車上でシステムを具現化する第一歩として、鉄板上に印刷したアンテナ対同士で磁界結合を発生させるために、磁気エネルギーを吸収する磁性シートを利用した。また、フェライト粉末をポリイミド液もしくはレジスト材に混練することで自作の磁性シート層を製作するための基礎検討を行った。まずは、アンテナに金属板を接近させてリターンロスの変化を観測した。その結果、アンテナへの距離が近づくにつれてアンテナの共振周波数が高周波数側にシフトすることが確認できた。また、金属板上に貼付した磁性シート上に導電性インクの印刷でオープンパイルアンテナを製作した。そして、二つのアンテナ間で磁界結合を伴うリターンロスが測定された。これによって金属歯車への適用が可能であることが示された。

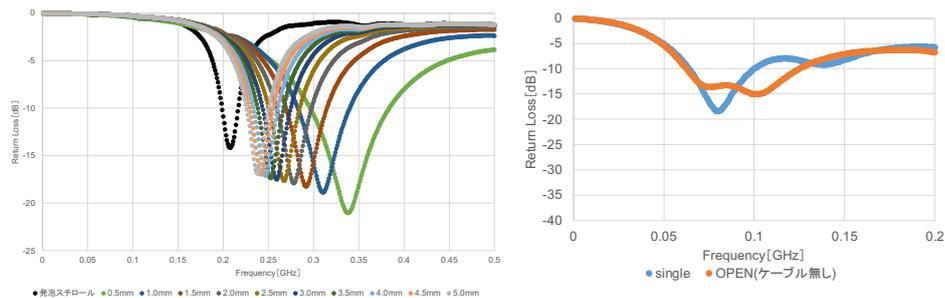


図 9. 金属板の接近によるアンテナ特性の変化と金属板上のアンテナ対で実現した磁界結合

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mac T-T, Iba D, Matsushita Y, Mukai S, Miura N, Masuda A, Moriwaki I.	4. 巻 22(9):3231
2. 論文標題 Effect of Phase Fluctuation on the Proper Operation of Smart Gear Health Monitoring System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22093231	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 T. T. Mac, D. Iba, Y. Matsushita, S. Mukai, T. Inoue, A. Fukushima, N. Miura, T. Iizuka, A. Masuda, I. Moriwaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Application of genetic algorithms for parameters identification in a developing smart gear system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Forschung im Ingenieurwesen	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10010-021-00574-8	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8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 T. T. Mac, D. Iba, Y. Matsushita, S. Mukai, T. Inoue, A. Fukushima, N. Miura, T. Iizuka, A. Masuda, and I. Moriwaki
2. 発表標題 Effect of phase fluctuation at high speed of smart gear on return loss of receiver antenna
3. 学会等名 Proc. SPIE 11591, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke MATSUSHITA, Tung Thanh MAC, Daisuke IBA, Seiya MUKAI, Nanako MIURA, Masashi YAMAKAWA, Takashi IIZUKA, Arata MASUDA, Akira SONE, Ichiro MORIWAKI
2. 発表標題 Effect of variable resistance and capacitance on return loss of monitoring side antenna
3. 学会等名 The 15th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2020), Paper ID: 10108, pp.1-10 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tung Thanh MAC, Daisuke IBA, Yusuke MATSUSHITA, Seiya MUKAI, Nanako MIURA, Takashi IIZUKA, Arata MASUDA, Akira SONE, Ichiro MORIWAKI
2. 発表標題 Effect of phase fluctuation and distance of smart gear on return loss of receiver antenna
3. 学会等名 The 15th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2020), Paper ID:10020, pp.1-11 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 向 誠也, Mac Tung, 松下 悠介, 射場 大輔, 三浦 奈々子, 飯塚 高志, 増田 新, 曾根 彰, 森脇 一郎
2. 発表標題 金属材料へ印刷したスマートギヤ用アンテナの性能評価
3. 学会等名 日本機械学会 2020 年度年次大会, S11521, pp 1-5
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tung Thanh Mac, 射場 大輔, 松下 悠介, 三浦 奈々子, 飯塚 高志, 増田 新, 曾根 彰, 森脇 一郎
2. 発表標題 受信アンテナのリターンロス解析によるスマートギヤのQ 値の同定
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2020 講演論文集, 436, pp 1-10
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 射場大輔, 二川真太郎, 松下悠介, 三浦奈々子, 飯塚高志, 増田新, 曾根彰, 森脇一郎
2. 発表標題 印刷されたき裂検知センサシステムの開発(アンテナ対の 磁気結合を利用した無線観測に関する基礎的検討)
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Matsushita, Daisuke Iba, Shintaro Fuatagawa, Nanako Miura, Takashi Izuka, Arata Masuda, Akira Sone, Ichiro Moriwaki
2. 発表標題 Evaluation of Printed Crack Detection Sensors by Static Load and Endurance Test of Gears
3. 学会等名 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Inoue, D. Iba, T. T. Mac, S. Mukai, N. Fujita, R. Takahashi, N. Miura, T. Izuka, A. Masuda, A. Sone, and I. Moriwaki
2. 発表標題 Effect of temperature on the magnetically coupled return loss of smart gear system
3. 学会等名 Proc. SPIE 12046, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都工芸繊維大学 精密加工研究室ホームページ http://www.pml.mech.kit.ac.jp 京都工芸繊維大学 精密加工研究室 http://www.pml.mech.kit.ac.jp</p>

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	射場 大輔 (IBA Daisuke) (10402984)	京都工芸繊維大学・機械工学系・教授 (14303)	

6. 研究組織（つづき）

	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	増田 新 (MASUDA Arata) (90252543)	京都工芸繊維大学・機械工学系・教授 (14303)	
研究分担者	飯塚 高志 (IIZUKA Takashi) (60335312)	京都工芸繊維大学・機械工学系・准教授 (14303)	
研究分担者	三浦 奈々子 (MIURA Nanako) (80735340)	京都工芸繊維大学・機械工学系・助教 (14303)	
研究分担者	曽根 彰 (SONE Akira) (20197015)	京都工芸繊維大学・機械工学系・教授 (14303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関