

氏 名	まっく たん とうん MAC THANH TUNG
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 1 0 6 0 号
学位授与の日付	令和 4 年 9 月 26 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学 位 論 文 題 目	Development and Evaluation of a Smart Gear System Fabricated by Laser Sintering Technique for Condition Monitoring (レーザー焼結技術によって製作した状態監視用スマートギヤ システムの開発と評価)
審 査 委 員	(主査)教授 射場大輔 教授 増田 新 教授 澤田祐一

論文内容の要旨

本論文は、高速回転している歯車の状態量を非接触でモニタリングするために開発したスマートギヤシステムについて述べている。スマートギヤシステムは、導電性インクを印刷することでセンサやアンテナを表面に搭載したスマートギヤと、同じ形状のアンテナを有する観測用アンテナ、そして観測用アンテナに接続するネットワークアナライザより構成されている。4 軸レーザー印刷機を利用して歯車表面上にセンサやアンテナを印刷するための工程開発に始まり、スマートギヤと観測用アンテナの磁界結合時のモデルを用いたパラメータ同定方法の開発、スマートギヤと磁界結合した観測用アンテナの周波数特性の実験的評価等について論じている。

本論文は、全 8 章から構成されている。第 1 章は本論文の構成及び関連する研究分野に対する貢献内容について述べた後、これまでに発表した関連論文について紹介している。第 2 章は研究背景について述べている。歯車を対象としたヘルスモニタリングについて、従来の方法、特にかみ合い振動を解析する手法について紹介し、それら手法が有する根本的な問題点、回転中の歯車の状態量を直接計測することが困難である、ということを指摘している。また、この従来手法の問題を解決するために提案されたスマートギヤシステムの基本構成について述べ、先行して開発された内容と現在残されている課題について説明している。

第 3 章では、導電性インクをレーザー焼結することによるスマートギヤの製作工程について述べている。これまでに開発された製作工程（導電性インクの塗布、レーザー焼結時の出力等の条件、残余インクの除去方法等）についての紹介と、新たに製作工程に追加した導電性インクを印刷する樹脂歯車表面の研磨工程について、その方法と条件について解説している。

第 4 章は、スマートギヤと磁界結合した観測用アンテナのリターンロスの計測と、得られたデータからシステムのパラメータを同定する手法について論じている。ポリアセタール板に印刷した観測用のオープンスパイラルアンテナにネットワークアナライザを接続して電力を供給し、スマートギヤとして歯車に印刷したオープンスパイラルアンテナと磁界結合した状態を 2 自由度の

LCR 回路としてモデル化している．そしてその回路モデルのリターンロスについての式を導出し，実験によって計測されたリターンロスとの比較を行うことで回路のパラメータを導出する．実験値とモデルから得られた値との誤差を減少させるために遺伝的アルゴリズムを用いて 6 つのパラメータを同定し，その同定された結果の評価を行うことで提案手法の有効性を検討し，十分な精度であることを述べている．

第 5 章では，POM 板に印刷したオープンスパイラルアンテナ同士を磁界結合させて，片側のアンテナに回転位相を与えた場合に生じる磁界結合への影響について述べている．実際の樹脂歯車の運転試験では，スマートギヤが回転することにより，観測用アンテナとの位相が動的に変化していくことになる．ここでは，まず， $xyz-\theta$ ステージに設置したアンテナを回転させてアンテナ間に回転位相を静的に与えることによる影響が磁界結合にどのように現れるのか，片側のアンテナのリターンロスを計測することによって評価した．回転によってリターンロスに現れた二つの谷の深さの変化は最大で 0.3dB 程度であり，十分小さな変化であることがわかった．

続く第 6 章では，スマートギヤと観測用アンテナ間の磁界結合についての静的及び動的評価を行っている．第 5 章と同様に $xyz-\theta$ ステージにスマートギヤを設置し，静的に回転位相を与えた際の観測用アンテナのリターンロス評価を実施し，最大で 0.2dB 程度の変化が生じることを示している．その後，歯車運転試験を想定し，スマートギヤをスピンドルに設置して動的に高速で回転させた状態において観測用アンテナのリターンロスの変化を確認している．500rpm から 3500rpm まで速度を変化させた状態でリターンロスを計測し，高速回転時に振動による若干の影響が生じたが，き裂検知センサにき裂が発生した時に得られるリターンロスの変化と比較しても十分に小さな変化であることを確認した．

第 7 章では，温度上昇に伴うアンテナ共振周波数の変化と潤滑油がアンテナ間の磁界結合に与える影響について調査している．歯車の運転試験中に摩擦によって温度が上昇することになる．こうした温度上昇によってスマートギヤのアンテナがどのような影響を受けるか確認するため，ホットプレート上でスマートギヤを加熱しながら観測用アンテナのリターンロスを計測した．その結果，磁界結合した状態のリターンロスはスマートギヤ側の共振周波数が温度上昇に伴って低くなっていくことが確認された．また，POM 板に印刷したアンテナ 2 枚を近接された状態で潤滑油に浸けた状態で空気中と同様な磁界結合が得られるか確認している．極性のある潤滑油，極性の無い潤滑油，ギヤオイル，エンジンオイル，水で行った実験の結果，油中に浸すことによってリターンロスで確認した共振周波数が低い周波数へとシフトしたが，磁界結合による特徴的なリターンロスの波形が維持できていることが確認できた．しかしながら，空気中でのアンテナ対の磁界結合中に共振周波数近傍で得られるリターンロスの二つの谷形状が水中では消失し，単一のアンテナが有するリターンロスと同様の形状になることがわかった．

第 8 章は本論文の結論であり，実験で得られた結果の総括を行い，提案したスマートギヤの有用性について述べた後，今後の課題と将来展望について述べている．

論文審査の結果の要旨

本論文では，歯車表面に直接センサとアンテナを設けて「スマートギヤ」を構成し，外部に設

置した観測アンテナでスマートギヤ側アンテナの周波数特性を読み取ることで、減速機内で稼働中の歯車の状態を非接触で観測するシステムを開発することを目的としている。

まず、先行研究で形状が検討されていた歯元き裂センサとオープンスパイラルアンテナを、樹脂歯車の側面に搭載するため、塗布した導電性インクをレーザー焼結することによって印刷する製作工程について検討した。その後、製作したスマートギヤ側アンテナと磁界結合している観測用アンテナの周波数特性をネットワークアナライザで観測することによって非接触で歯車の状態が観測できることを示した。また、歯車に印刷したアンテナと観測アンテナの磁界結合の状態が、歯車の回転によってどのような影響を受けるか実験的に検討し、歯元き裂発生によるセンサの断線による影響と比較して回転による影響が十分小さいことを示した。

そして磁界結合中の二つのアンテナを 2 自由度の電気回路モデルで表現し、観測アンテナの周波数特性であるリターンロスからスマートギヤ側のパラメータを同定する手法の提案を行った。実験によって観測アンテナのリターンロスを計測し、2 自由度モデルの理想的なリターンロスとの差を最小にする遺伝的アルゴリズムを用いた手法が有効であることを示した。

また、予備実験として実施したスマートギヤの運転試験において得られた観測アンテナのリターンロスが、試験開始当初から変化した結果を受け、摩擦等により温度が上昇する樹脂歯車に印刷したアンテナと磁界結合している観測アンテナのリターンロスが温度によってうける影響について調べ、スマートギヤ側回路の抵抗値が増加した結果、観測アンテナのリターンロス形状が二つの谷から一つの谷へと変わっていくことが明らかとなった。

そして最後に実際の運転状況を想定し、潤滑油等が存在する場所において、アンテナ間の磁界結合が実現できるかどうか、実験的に確認している。その結果、一般的なエンジンオイルやギヤオイル内でもアンテナ間の磁界結合が成立し、非接触での観測が可能であることを示した。

本研究で提案した樹脂歯車に直接、導電性インクをレーザー焼結することによってセンサとアンテナを印刷してスマートギヤを構成し、さらに観測用アンテナとの磁界結合によって非接触で歯車の状態を観測するシステムは工業的に非常に需要が高い。本論文は、このシステムの具現化に向けた基礎的研究となっているが、今後の研究の進展によって広くシステムの普及が期待できる。

本論文の内容は、以下に示す 2 編の学術論文と 1 編の査読付き国際会議論文として公表されており、全ての論文の筆頭著者が申請者である。

査読付き論文

- (1) T. T. Mac, D. Iba, Y. Matsushita, S. Mukai, T. Inoue, A. Fukushima, N. Miura, T. Iizuka, A. Masuda, I. Moriwaki, Application of genetic algorithms for parameters identification in a developing smart gear system, *Forschung im Ingenieurwesen*, DOI: 10.1007/s10010-021-00574-8.
- (2) Mac T-T, Iba D, Matsushita Y, Mukai S, Miura N, Masuda A, Moriwaki I. Effect of Phase Fluctuation on the Proper Operation of Smart Gear Health Monitoring System. *Sensors*. 2022; 22(9):3231. <https://doi.org/10.3390/s22093231>.

査読付き国際会議論文

- (3) Tung Thanh MAC, Daisuke IBA, Yusuke MATSUSHITA, Seiya MUKAI, Nanako MIURA, Takashi IIZUKA, Arata MASUDA, Akira SONE, Ichiro MORIWAKI, Effect of phase fluctuation and distance of smart gear on return loss of receiver antenna, The 15th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2020), Paper ID:10020, pp.1-11, 8th - 11th December 2020, <https://doi.org/10.1299/jsmeintmovic.2020.15.10020>.