

博士学位論文審査要旨

2022年12月24日

論文題目：エンドミル加工面びびり模様画像の2次元離散フーリエ変換に基づく状態診断法の研究

学位申請者：尾崎 信利

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：理工学研究科 教授 辻内 伸好

要 旨：

日本の生産システムにおいて、生産現場の勘・コツに依存することなく、かつリモートでの加工状態の診断技術が必要とされてきている。その中で、特に画像診断技術の高度化が求められてきている。そこで本論文では、エンドミル加工において加工能率の向上を阻害するびびり振動に対して、その加工面模様を2次元離散フーリエ変換を適用する手法を提案し、さらにその診断に基づき振動抑制と加工能率の向上を両立する条件探索法に取り組んでいる。

本論文は全7章で構成され、第1章において本研究の背景および目的とその意義について述べている。第2章では加工面びびり模様に対して2次元離散フーリエ変換を適用する手法を提案して、その有効性を明らかにしている。第3章ではびびり振動中の加工面創成シミュレーションを遂行して提案手法の精度を検証している。第4章では適用範囲を拡大するため、曲面に対する画像の補正方法を考察している。第5章では5kHz弱までの非常に高い振動数のびびり振動に対する有効性を検討している。第6章ではマクロなびびり模様の中に存在するマイクロな模様に着目して、その影響について検討している。第7章では得られた結果とその要点および結論を総括し、今後の展望について述べている。これらの成果は、製造現場のリモート診断に資するものであり、日本の新しい生産システムの技術革新に向けた指針を示すものである。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2022年12月24日

論文題目：エンドミル加工面びびり模様画像の2次元離散フーリエ変換に基づく状態診断法の研究

学位申請者：尾崎 信利

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：理工学研究科 教授 辻内 伸好

要 旨：

本論文の提出者は、2020年4月に本学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に入学し、現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、日本機械学会論文集, Vol.85, No.879, pp.19-00292 および Vol.87, No.899, pp. 21-00095, 精密工学会誌, Vol.88, No.8, pp.645-652, 砥粒加工学会誌, Vol.67 (掲載決定済み), に掲載され、既に十分な評価を受けている。

2022年12月24日9時00分より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員より、論文に関する諸問題につき口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、語学に関しては英語の語学試験に合格しており、さらに多数の国際会議発表の実績も有することから、十分な語学力を有しているものと認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力および語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： エンドミル加工面びびり模様画像の2次元離散フーリエ変換に基づく状態診断法の研究

氏名：尾崎 信利

要旨：

身のまわりのあらゆるモノをインターネットに接続する IoT (Internet of Things) 技術の発展によって、産業界はパラダイムシフトを迎えつつある。特に製造業界における IoT は IIoT (Industrial Internet of Things) と呼ばれ、次世代の生産システムを実現する技術として世界各国で精力的に開発・導入が進められている。IIoT は、近年センサ類が安価になり多数の機械設備への搭載が可能になったことに加え、コンピュータ性能の飛躍的な向上、ビッグデータ解析や機械学習などの統計・情報処理技術の発達により、センサによって測定された膨大な製造現場の情報を有効に活用できるようになったことで実用化された技術である。ビッグデータ解析や機械学習は近年急速に発展する強力な解析技術であり、IIoT においても従来技術では知りえなかった新たな知見・価値や最適解を発掘でき、生産性を大幅に向上させることができるとして注目されている。IIoT は、特に超高齢化社会に突入している現在の日本には重要な技術であるといえる。国の産業活力につながる生産年齢人口 (15~64 歳) は、2065 年には 4500 万人にまで急減すると見込まれている。これに加え、製造現場の熟練技能者は高齢化により減少を続け、さらには熟練技能の次世代への伝承が上手く進んでいないのが現状である。これらは、製造業を主力産業とし、いわゆる職人による製造現場の優秀な技能を強みとしてきた日本にとって、深刻な問題である。IIoT は上記の新たな価値創出だけでなく、その高度なセンシング・解析技術によって職人の熟練技能を定量化・体系化する技術としても活用が進められており、既に多くの成功例が報告されている。これにより、熟練技能を単に継承するだけでなく、複数の技能の相互活用やコンピュータ解析を用いた最適化などにより、さらなる高度化を可能にすると期待されている。一方で、この熟練技能の定量化は発展途上であり、未だ十分な対応ができていない工程・課題も多く存在する。製造業に欠かせない切削加工で発生するびびり振動現象もその課題の一つである。

びびり振動現象は、切削加工時に工具や被削材 (工作物) が激しく振動する現象であり、加工精度や仕上げ面の悪化、工具や工作機械の損傷、騒音の発生など、切削加工に様々な悪影響を及ぼす代表的な問題である。びびり振動はその発生機構からいくつかの種類に分類されるが、再生効果によって引き起こされる再生びびりは、特に加工現場で問題となりやすい。再生びびりが生じない安定切削条件は、安定限界線図と呼ばれる主軸回転数との関係図に従うことが知られており、これを予測する研究が古くから多くなされている。しかし安定限界線図の予測には、工具系の伝達関数や比切削抵抗、工具摩耗など、切削に関する多くのパラメータが必要であり、これらの同定には多くの労力を要する。また、工具系の伝達関数や工具摩耗などのパラメータは加工中に変化するため、事前に予測した安定限界線図が加工中に変化してしまう場合もある。このように再生びびりが発生しない安定切削条件は、事前の完全な予測が困難であるため、最終的には熟練技能者の知識と経験による試行錯誤的な探索が必要となるのが現状である。こういった加工前の準備工程は、今後の多品種少量生産への移行に伴い増えていくことが予想される。以上により、びびり振動は製造現場の自動化、生産性向上のボトルネックとなりつつあり、IIoT にとって重要なテーマの一つであることがわかる。

再生びびりには、安定切削条件が局所的に大きくなる (すなわち再生びびりを回避しながら高

能率な切削が可能となる) 特定の主軸回転数が存在し、安定ポケットと呼ばれている。主軸回転数は加工プログラムで容易に変更できるため、安定限界線図によってこの安定ポケットを同定することで、非常に合理的かつ経済的な再生びびり対策が可能となる。一方で、先述のように安定限界線図の予測に必要なパラメータは事前の予測が困難である。このため、実際の加工（あるいは加工に近い状況）から効率的にパラメータを同定し、加工中の安定限界線図を予測する取組みがいくつかなされている。また安定限界線図は主軸回転数ごとの安定切削条件だけでなく、その主軸回転数で発生し得る再生びびりの振動数と位相差（以下、振動情報）も予測することができる。再生びびりの振動情報は基本的には主軸回転数に伴って連続的に変化するが、安定ポケットでは急激に変化することが知られている。この性質に着目し、切削時の再生びびりの振動情報を指標にすることで、安定ポケットを効率的に探索する方法もいくつか提案されている。この探索方法は、実際の切削で生じた再生びびりを測定し解析するだけで実行できるため、様々なパラメータを必要とする安定限界線図よりも、さらに手軽な再生びびり対策であるといえる。しかし、再生びびりは切削時の工具刃先と被削材の間で生じる相対振動であり、エンドミル切削の場合、これを直接計測することは高速で回転する工具刃先のため困難である。そのため再生びびりは一般に、加速度センサによって主軸や被削材に伝わった振動、非接触式の変位センサによって工具のシャンク部に伝わった振動、マイクロフォンによって振動で生じた切削音などから、いずれも間接的に測定される。これらの方法で再生びびりを精度よく測定するには、工作機械の構造や切削条件、びびり振動の発生位置などに合わせて、その都度取り付けるセンサの位置や種類を適切に見極め、調整しなければならない。例えば、工具シャンク部の振動はシャンク部が十分長くなければ測定できない。また、被削材が支配的に振動する場合には被削材側に加速度センサを取り付ける必要があるが、取り付け位置は回転工具に接触しないように調整しなければならない。さらに、マイクロフォンはノイズ（周囲の音）の影響を受けやすい。このため、間接的な測定方法では、汎用的・自動的な再生びびり測定が困難となっている。そこで本研究は、エンドミル切削の加工面に着目した。加工面には、切削時の振動が起伏として転写される、すなわち切削時の振動情報が直接的に記録されていると考えられる。実際、切削時に再生びびりが生じると、その加工面にはびびり模様と呼ばれる周期的な模様が生じることが知られている。本研究はこのびびり模様と再生びびりの関係を明らかにすることで、2次元離散フーリエ変換によって同定したびびり模様の周期（縞の間隔および向き）から、切削時に生じていた再生びびりの振動情報を逆解析する手法を提案する。

第1章では、前述の通り本研究の目的と概要を述べている。

第2章では、平面形状の加工面に形成されたびびり模様を対象に、2次元離散フーリエ変換によって加工面画像から同定したびびり模様の周期に基づき、切削時に生じた再生びびりの振動情報を逆解析する手法を提案する。また工作機械の送り運動に基づき、加工面に写るびびり模様と工作機械座標系の関係を同定した（撮影画像を校正した）。提案手法で解析した再生びびりの振動情報は、変位センサで測定した工具ホルダの振動変位から解析された結果とよく一致することがわかり、1 kHz程度のびびり振動に対する提案手法の有効性が確かめられた。

第3章では、再生びびりで振動する工具刃先の動きを推定し、これによって切削される加工面をシミュレートすることで、加工面に形成されるびびり模様が切削時の再生びびりによって形成されることを定量的に確認した。シミュレーションで得られたびびり模様は、実加工面のびびり模様とよく一致しており、加工面に形成されるびびり模様が切削時の加工面法線方向のびびり振動によって形成されることを定量的に確認することができた。

第4章では、第2章のびびり模様解析手法および加工面撮影画像の校正方法を円弧形状の加工面にも適応できるように拡張した。また、実際に加工面起伏が周期的に変動することで形成されるびびり模様と、撮影画像から確認できるびびり模様の関係を体系化した。提案手法で解析した再生びびりの振動情報は、変位センサで測定した工具シャンク部の振動変位から解析された結果

と比較し、その有効性を確かめた。

第5章では、高い振動数の再生びびりを解析対象とした、びびり模様解析をおこなった。また、第1～4章ではびびり振動が激しく生じる単一の切削条件を対象とするが、第5章では主軸回転数を変化させながら切削した際に生じたびびり振動を提案手法によって解析とした。加速度センサによって測定した再生びびりと、びびり模様から解析した再生びびりの振動情報を比較することで、提案手法が高い振動数の再生びびりに対しても有効であること、さらに安定限界線図に従った（主軸回転数に伴った）びびり振動情報の変動を検出できることを確認した。

第6章では、第3章の加工面模様シミュレーションを用い、びびり切削された加工面の各座標がどのタイミングで形成されたかを新たに同定することで、びびり模様の形成過程をよりミクロな視点から解明した。またびびり模様から再生びびりの振動情報を解析できる原理を厳密に確認した。

第7章では、以上をまとめた本研究の結論を示している。