

博士学位論文審査要旨

2021年1月19日

論文題目： マシニングセンタを用いたスレッドミルのヘリカル補間運動に基づく雌ねじ切り加工法に関する研究

学位申請者： 松井 翔太

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：理工学研究科 教授 松岡 敬

副査：理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

要 旨：

近年、AIやロボット、IoT (Internet of things) など新たな技術をモノづくりに活用するための動きが活発である。しかし、モノづくりに新たな技術を実装するためには熟練技能者の持つ暗黙知の見える化が必要である、しかし、熟練技能者の作業の見える化には作業中の動作だけでなく加工現象を知る必要がある。一方、医療機器業界、航空機業界などで用いられているチタン合金などの難削材の雌ねじ加工において、ねじ切り工具であるタップの突発的な折損が問題となっている。そこで、本研究では最近開発されたねじ切り用フライス工具であるスレッドミルを研究対象に取り上げ、加工中の切削現象を遠隔モニタリングする技術の開発とその技術を応用して、突発的な折損のない安定した加工とねじ精度確保のための基礎的な研究を行い、その有効性と課題を検討している。

本論文は全7章で構成されている。第1章では、本論文に関する研究の背景と研究概要を述べることにより、本研究の目的を明らかにしている。第2章では、スレッドミル加工中の切削力を圧電式動力計を用いて、工具接線方向力と半径方向力に分離する手法を提案している。第3章では、びびり振動解析のために、圧電式動力計と曲げおよびねじり方向の振動加速度が測定可能な無線式ホルダを使用し、びびり振動が加工時に与える影響を検討している。第4章では、切削力測定用無線式ホルダを使用して工具回転座標系から見た切削力の特徴を明らかにしている。第5章では、チタン合金にねじ切り加工をおこない、切削力測定用無線式ホルダとサーモグラフィカメラでのモニタリングにより難削材への有効性を検討している。第6章では、底刃での下穴と側刃での雌ねじの同時加工での底刃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、難削材のねじ切り加工の信頼性を高めるとともに、遠隔モニタリングの活用に重要な指針を与えており、熟練技能の伝承に頼らない生産システムの開発に大きく寄与するものである。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

2021年1月19日

論文題目： マシニングセンタを用いたスレッドミルのヘリカル補間運動に
基づく雌ねじ切り加工法に関する研究

学位申請者： 松井 翔太

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：理工学研究科 教授 松岡 敬

副査：理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

要 旨：

本論文提出者は、企業に就職後、資格認定を受けて本学大学院理工学研究科博士課程（後期課程）に在籍している。本論文の主たる内容は、砥粒加工学会誌 Vol.62, No.12, pp.632-637, 砥粒加工学会誌, Vol.64, No.5, pp.260-266, International Journal of Automation Technology, Vol.14, No.3, pp.467-474, Journal of Advances in Materials and Processing Technologies, DOI:10.1080/2374068X.2020.179327, 砥粒加工学会誌（掲載決定済み）等に掲載され、すでに十分な評価を受けている。

2020年12月19日午後1時30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、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により、十分な理解が得られた。講演会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、十分な学力を確認できた。提出者は英語による論文発表や語学試験にも合格しており、十分な語学能力を有すると認められる。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： マシニングセンタを用いたスレッドミルのヘリカル補間運動に基づく
雌ねじ切り加工法に関する研究

氏名： 松井 翔太

要旨：

第四次産業革命の進展に伴い、AIやロボット、IoT (Internet of things) などの技術を社会実装していくことが可能となった。国内製造業におけるデータ活用の取組も成熟しはじめ、具体的な展望やニーズ、課題も見えてきた第二段階を迎えつつある。我が国の製造現場には、品質力、現場のカイゼン力の裏付けともなる良質なデータの蓄積があり、これをいかに戦略的に活用し、今後の変革に適応するかが重要となる。一方、ものづくり産業は、消費者ニーズの多様化に伴い、必要な価値を必要な人へ必要な時に必要なだけ提供する変種変量生産への変革が迫られている。変種変量生産では、生産（加工）条件を製品に合わせて変更する必要があるため、加工条件の選定等で、全自動化は困難となっている。現状の生産条件の選定は、経験を積んだ熟練技術者が独自の経験や勘・コツをもとに選定しているのが大半である。そのため、熟練技術者からの技能伝承は各企業の必須の課題となっている。しかし、熟練技術者の知識は、経験および勘・コツによる知識であり、継承が困難な一面もある。また、我が国では、2060年には国民の40%が高齢者という超高齢化社会が到来し、人材の量的不足が大きな課題となっている。そのため生産プロセスの再構築が必要となり、技能伝承が重要な課題となってくる。そこで、その課題を解決するために、ものづくり産業ではAIやIoT技術を利用した生産プロセスに着目し、生産プロセスへのAIやIoT技術の導入が進められている。しかし、現在のAIやIoT技術を用いて、生産（加工）条件を決定する手法は、まだ目標とする熟練技術者が選定する生産条件と大きなギャップがある。特に加工分野では、熟練技術者の経験や勘・コツによる加工条件の選定や手作業等で大きなギャップがある分野となっている。熟練技術者の手法を理解するためには、加工現象を理解する必要がある。ここで、加工現象を示す重要な物理量としては、①工具と工作物の間に生じる加工力（切削抵抗）、②加工中に生じる工具または工作物の振動、③工具と工作物の温度上昇（切削温度）が挙げられる。それぞれのモニタリング手法は発展してきているが、いずれの手法においても製造現場で容易におこなうことが困難である。また、計測点が加工点からも遠いモニタリング方法となっており、熟練技術者の技術解析には不十分であると考えられる。

そこで、本研究では、加工分野で、熟練技術者の経験と勘に頼っていた技術を対象とし、モニタリングし、分析および解析をおこなうことにより、技能伝承および現場の潜在能力を引き出し、競争力維持および発展させることを目的としている。モニタリング手法としては、加工力を加工点付近で測定できる無線ホルダやサーボドライブからの出力情報を用いて加工時にかかる力やびり振動等をリアルタイムにモニタリングをおこない、加工状態を適切に把握し、把握した情報をAIや機械学習を用いて分析および解析することにより、高精度かつ高能率に加工できる新しい生産システムの構築を目指す。

本研究では雌ねじ加工を対象とした。雌ねじ加工は、ドリルで下穴を開けてタップ工具を用いたタップ加工が一般的とされている。手作業および工作機械を用いた自動化においても長年、タップ工具を用いた雌ねじ加工が唯一の手法となっている。しかし、タップ加工は切りくずが工具に絡まり工具の折損が問題となることがある。本現象は、耐熱合金（チタン合金など）の難削材ではより顕著におこる現象である。難削材を利用する業界としては、医療機器業界、航空機業界

などがあげられる。医療機器業界は、世界的に着実な成長が見込まれており、世界の年間売上は、年率5%超で増加し、2030年までに8000億米ドル近くに達すると予想されている。また、日本産業界での市場規模の動向も増加傾向にある。しかし、輸入額も増加しており貿易収支ではマイナスである。そのような情勢のなか昨年閣議決定された「成長戦略フォローアップ」内に次世代ヘルスケア部門があり、経済産業省主体でオールジャパンでの医療機器開発が進められている。医療機器業界は、日本が一体となって進めており成長が見込まれる産業となっている。

しかしながら、難削材に対してはタップ加工の研究も遂行されてきているが、工作機械での自動化において速度制御軸である主軸の回転運動と速度・位置制御である主軸の送り運動の同期が工具の特性上での必須の制約となり、新たな技術革新につながっていない問題点が顕在化してきている。難削材加工の技術革新を具現化するためには、歴史的にみて工作機械と工具の両面の発展が必要となる。工作機械の視点からは、近年、5軸制御マシニングセンタ(5MC)やターニングセンタを含む工作機械の運動は高速・高精度化が進展し、高速域における同時3軸の運動精度が飛躍的に向上した。これら工作機械の制御技術の発展により、同時3軸制御の高速な送り速度でのヘリカル補間運動に対する運動精度も加工現場において十分なレベルを達成してきている。その一方で工具の視点から、最近では工具メーカー各社よりエンドミル工具にねじ山を創成した雌ねじ加工用の工具であるスレッドミルが市販され、ヘリカル補間運動を活用した新たな加工技術として着目されてきている。スレッドミルでの加工は、タップ加工と異なり工具の自転回転数の制限がなく、工作物の特性に合わせて回転数すなわち切削速度を適切に選ぶことができる。また工具とねじ穴の間に半径方向の隙間も確保できるため、難削材加工で問題となる切りくず詰まりの抑制も可能と考えられる。その一方で、半径方向に隙間を確保しているために工具径を細くする必要があり、切削力による工具の弾性たわみ変形やびびり振動などの影響が懸念され、それらを考慮した適切な加工条件の設定に関する研究が必要となってきている。しかしながら、ヘリカル補間運動を用いたスレッドミルによる雌ねじ切り加工の解明に取り組んだ体系的な研究は日本では例がない。そこで、本研究では、成長産業である医療機器業界で使用されている難削材にも対応できるスレッドミルによる雌ねじ加工に対する研究をおこなう。

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、スレッドミル加工中の切削力を圧電式動力計を用いてX, Y, Zおよびトルクの4成分力を測定し、雌ねじ加工時の工具接線方向力と工具半径方向力を導出する手法を提案した。提案手法を用いて、工作物を炭素鋼S50C、高硬度金型鋼SKD61(HRC40, 53)加工時の工具半径方向のたわみ量を計算し補正をおこなった。加工後の雌ねじ精度の確認をおこない、高精度で加工する手法を提案した。

第3章では、スレッドミル加工中の切削条件によってはびびり振動が発生しており、雌ねじの精度の上では、びびり振動は無視することができないものと考えられる。びびり振動解析のために、圧電式動力計、近年開発し工具回転座標系での曲げ方向およびねじり方向の振動加速度が測定可能な無線ホルダを使用し、びびり振動について検討をおこなった。結果、びびり振動ではねじ切り加工時に与える影響は無視できないことが判明し、雌ねじ切り加工には、びびり振動を抑制する必要があることを示した。

第4章では、最新の無線ホルダを使用して工具回転座標系から切削力を測定し、その極座標表示の特徴と正葉曲線近似に基づく考察をおこなった。また第2章にて提案していた圧電式動力計を用いて、工具接線方向力、工具半径方向力を導出する手法と最新の無線ホルダの整合性の確認をおこなった。また、第2章での提案手法、無線ホルダ、サーボドライブユニットからの出力情報を用いてねじ切り加工時の粗加工切れ刃と仕上げ加工切れ刃にかかる切削力を測定した。その結果を用いて工作物硬度の変化による雌ねじ切り加工の影響を検討し、高硬度材料においても良好な雌ねじ切り加工が可能であることを示した。

第5章では、工作物をS50Cと難削材とされている耐熱用オーステナイトステンレス鋼

SUS310S およびチタン合金 (Ti-6Al-4V ELI) の 3 種類の雌ねじ切り加工をおこなった。モニタリング手法は、無線ホルダを用いた切削力の測定や、サーモグラフィカメラによる加工温度の測定をおこなった。そして、工作物と切削条件の変化について検討し、難削材とされているチタン合金に対しても良好な雌ねじ切り加工が可能であることを示した。

第 6 章では、底刃での下穴と側刃での雌ねじの同時創成加工の特徴を解明するために、下穴径を変更し、雌ねじ部のみを加工する側刃のみで加工している状態と、下穴と雌ねじの同時加工をおこなう際の、側刃と底刃への影響について検討した。結果下穴なしでの加工は、複数の底刃が加工に関与することにより切削力の相殺作用が働き、正規の下穴径である $\phi 8.5 \text{ mm}$ での加工時と比べても切削力が数割程度の増大であることがわかった。したがって、下穴と雌ねじ部の同時加工時は、下穴加工を省略でき加工能率向上と加工精度の維持の両立が可能となる可能性を示した。また、下穴なしでの加工では、雌ねじ深さの影響が顕著となり、工作物硬度が増大するほど逆テーパが生じるなど、加工精度の維持が難しくなることを示した。

第 7 章は、以上をまとめた本研究の結論を示している。

以上より、ヘリカル補間運動を用いたスレッドミルによる雌ねじ切り加工を用いることで、工作物の材質に関わらず高精度な雌ねじ加工が可能であることを示した。また、最新の無線ホルダや、サーボドライブからの出力情報を利用することで、加工情報の高度な見える化技術を確立することで次世代の生産システム・次世代の工作機械に求められる情報のフィードバックを遂行して、自律的かつスマートな新しい加工システム技術を構築する方法の指針を示すことができ、ものづくり技術現場のイノベーションに寄与することができた。