

# 博士学位論文審査要旨

2018年12月22日

論文題目：ワイヤレス多機能無線ホルダーシステムを用いた加工現象のモニタ  
と診断に関する研究

学位申請者：松田 亮

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 宮本 博之

要 旨：

次世代のものづくりにおける競争力として、IoT(Internet of Things)に基づくスマート工場・つながる工場の技術が着目されてきている。その中で、工場内の工作機械の機上で加工現象を見える化する技術が不可欠であるが、工具が回転する工程を対象にして様々な物理量を現場で容易にモニタする技術に関する体系的な研究はなされていない。そこで本論文では、工具ホルダーに汎用的な無線 LAN システムを搭載し、回転工具の加工現象で生じる様々な物理量を現場で容易にモニタ可能な手法を研究開発し、その有効性の検討を遂行している。

本論文は全6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章では回転工具から温度および振動の情報を取得するためのワイヤレス多機能無線ホルダシステムの開発を遂行してエンドミルおよびボーリング加工のモニタに応用している。第3章ではタップおよび高速エンドミル加工に適用して工具の曲げ・ねじり振動に対するモニタ手法の有効性を検討している。第4章ではドリル加工に対して温度モニタに基づく加工条件の設定手法および皿穴加工のびびり振動の管理手法を提案している。第5章ではエンドミル加工に対して温度および振動の同時計測に基づく再生びびり振動のモニタ、さらに工作機械のサーボ内部情報からのプロセスモニタとの比較検討を遂行して提案する手法の有効性を示している。第6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、無線 LAN 技術と IoT を融合した次世代のスマート工場の構築に対する指針を示すものであり、日本のものづくり技術の国際競争力の向上に資する新たな知見である。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

2018年12月22日

論文題目：ワイヤレス多機能無線ホルダーシステムを用いた加工現象のモニタ  
と診断に関する研究

学位申請者：松田 亮

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 宮本 博之

要 旨：

本論文の提出者は、2016年4月に本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、Material Science Forum, Vol.874, pp.519-524, 砥粒加工学会誌, Vol.61, No.1, pp.34-39, 砥粒加工学会誌, Vol.61, No.12, pp.674-680, International Journal of Automation Technology, Vol.12, No.12, pp. 876-882, Proceedings of 21th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2018), ID068, に掲載され、さらに日本機械学会論文集, Vol.85, 砥粒加工学会誌, Vol.63, に掲載決定済で、既に十分な評価を受けている。

2018年12月22日午後3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、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： ワイヤレス多機能無線ホルダーシステムを用いた加工現象のモニタと診断に関する研究

氏名： 松田 亮

## 要旨：

急速なグローバル化やIT (Information Technology) 化で国家間の競争が激化する時代において、我が国の生産性向上は不可欠かつ急務である。そこで、この現状を打破すべく、日本政府は2013年から総務省を中心に「ICT 成長戦略」を打ち立てている。広くはアベノミクスの一環であり、ICT (Information and Communications Technologies) 利活用によって広範な分野においてイノベーションを起こすことで国家競争力強化、社会問題の解決を図っている。

ここで、世界の製造業の技術動向に着目すると、ヨーロッパではドイツをはじめとした先進工業国が「IoT (Internet of Things), モノのインターネット」の分野に積極的に取り組み、「高度技術戦略」と呼ばれるさまざまな研究により技術イノベーションを生み出し、競争力を高めることを目指している。それらの多くの研究を統合して発足したのがIoTを基盤にした「Industry 4.0」プロジェクトが推進され始めている。「Industry 4.0」は、第4次産業革命を目指すものであり、インテリジェント監視システムや自立システムの開発を推し進め、インターネットにより工場内外のモノ (IoT) と連携することで新しい価値やビジネスモデルの実現、さらにはビッグデータを元に自律的な最適化を可能とする産業を目指すドイツ政府の戦略的施策プロジェクトでもある。

我が国の製造業は、人手不足が顕在化しつつあり、現場力の維持・向上が難しい状態にある。特に中小企業においては、年々人手不足を訴える声が増えつつあり、深刻な経営課題となっている。しかしながら従来からの賃加工をメインとした収益体制ではその改善は難しく、新たな付加価値の創出が必要となってきている。そこで着目されているのが、近年目覚ましい発展を遂げているICTの利活用である。製造業に携わる企業の多くが「スマートファクトリー」に関する技術開発に注目し、製造現場へのIoTの適用を進めており、効率的な生産管理、設備の予知保全、生産ラインの自動化などによる付加価値、生産性の向上に努めている。

製造現場の「スマートファクトリー化」は生産性向上に大きく寄与することが期待されているものの、自律改善型の工場になるまでは至っていないのが現状である。その最も大きな要因は、実際に工具が被削材を加工しているときに生じるトラブルに対応できていないことである。特に、切削加工を行う現場においては様々なトラブル・課題が残っている。1つは、突発的な工具破損である。工具の破損モードは複雑であり、ねじり・曲げ・溶損などが挙げられる。その破損に至るまでの要因は多岐に及ぶ。その他、工具の異常摩耗・チッピング、加工時のびびり振動の発生により品質不良になってしまうこともしばしばである。そうした不具合は、生産ラインの「チョコ停」や対応する作業員の工数増につながり、工場の無人化ができず、損害が膨らむ原因となっている。他方では、顧客のコストダウンや高精度化への要求に伴って、従来の加工条件の改善を求められている。近年では特に、航空機や医療などの分野においては、耐熱性や生体適合性などを達成するために難削材が使用され、かつ形状が複雑である場合が多い。それに伴って、従来よりも高度な加工技術が求められているが、熟練技能者のリタイアや人手不足の影響でスムーズに対応することが難しくなっている。

上述の課題を解決し、工場の自動化・無人化を達成するために最も重要なことは、「加工現象の見える化」である。特に、現象が生じている加工点に近いところでのセンシングが求められる。

しかしながら、生産管理や設備の予知保全、人の代わりとなるロボット等により生産プロセスの自動化ができるハード・ソフトは普及しつつあるが、現場で実用化可能かつ加工点近傍での物理量のリアルタイムモニタリングデバイスは無く、それに関する研究もほとんどないようである。

ここで、加工現象を示す重要な物理量としては、①工具と被削材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被削材の振動、③工具と被削材の温度上昇（切削温度）が挙げられる。加工力のモニタリングに関しては、圧電型の切削動力計が徐々に普及しており、固定した工具や被削材においては比較的容易にモニタが可能になってきた。また、センサを用いずに工作機械のサーボ情報から加工力を推定する研究もなされている。加工中に生じる振動のモニタリングに関しては、圧電型の加速度センサが比較的安価に入手可能であり、びびり振動現象を中心にして主軸の振動を考察した例などの研究成果に基づき、そのモニタに関する研究も進みつつある。また、加工力同様にセンサを用いずにサーボ情報からの振動検知に関する研究もなされている。切削温度のモニタリングに関しては、サーモグラフィによる被削材、工具表面の温度解析例や、工具の刃先近傍に微細な熱電対を内蔵させ、工具-切屑接触行きの温度分布を計測した例などが挙げられる。しかしながら、いずれの手法においても常に生産活動を行っている工場での利用は困難であることや、加工点近傍で生じる現象に対してS/N比が十分でない。

そこで本研究では、「スマートファクトリー」実現のために、マシニングセンタなどを用いる現場でも容易に利用できる加工現象の見える化を可能にした、IoT対応の工具ホルダシステムを開発する。現場での利用性も考慮し、開発するホルダシステムに無線通信機能を具備させ、取得する加工現象のデータは工作機外に設けた受信機に送信させることでリアルタイムにモニタリングが可能な仕様を検討する。見える化する加工現象としては、加工中の切削温度および振動を対象とする。切削温度は、一般的な手法である熱電対を工具内部に埋め込み、従来の計測技術である赤外線サーモグラフィとの比較検証を行う。さらに、取得した温度データを基に非定常熱伝導解析を行い、最適な切削条件の検討を行う。振動は、ホルダ内部に加速度センサを搭載させ、加工時のびびり振動に対する感度を検討する。さらに、回転方向の振動に対しても感度を持たせ、難削材のタップ加工時の折損時の現象およびエンドミル加工時の振動現象の解明を検討する。また、切削温度と振動の同時モニタにも取り組み、圧電式切削動力計や工作機械サーボ情報との比較・検討を行う。

本論文は、以下のように全6章で構成している。

第1章は、本研究の目的と概要を述べた。

第2章では、マシニングセンタなど回転工具を用いる工作機械を対象として、回転工具から振動および温度の情報を取得するためのワイヤレス多機能無線ホルダシステムの開発に取り組んだ。さらにその応用として、エンドミル加工中の工具温度のモニタにも取り組み、赤外線サーモグラフィ画像による工具温度のモニタ結果と比較してその精度の検証と有効性も検討した。その上、ボーリング加工中の回転工具座標系で半径方向成分のびびり振動のモニタも試み、その結果に対して再生びびり自励振動の理論に基づき考察も遂行し、加工現象の診断に取り組んだ。その結果、開発したホルダシステムは加工温度の情報だけでなく、工具半径方向にびびり振動が生じる現象の診断にも有効であることを示すことができた。

第3章では、ワイヤレス多機能無線ホルダシステムの振動センサに関する内部回路を改良し、ホルダ内で複数の加速度センサからの出力の加算・減算を具現化することで、回転工具座標系で半径方向および回転方向の振動モニタを可能とした。その応用として、難削材のタップ加工中において工具折損の予兆としてステックスリップ振動の検出を試みた。さらにエンドミル加工において、高速切削時に生じる高周波のびびり振動の特徴として回転方向の工具・ホルダのねじり振動の検出も取り組んだ。その結果、従来はほとんど扱われていなかった工具ねじり方向の振動のモニタにより、難削材の高度なタップ加工の遂行、さらに高回転域でのエンドミル加工で生じる高い周波数帯のびびり振動の抑制に対して、開発したシステムが有効であることを示すことがで

きた。

第4章では、ドリル加工中に工具内部でモニタした温度に対して、工具先端に熱源を有する非定常伝熱のモデルを導入し、工具の溶損の限界となる切削速度の予測を試みた。さらに皿穴加工中の回転工具座標系で半径方向と回転方向の振動のモニタにより、高速加工時の皿穴加工中に生じる工具の曲げ・ねじり連成のびびり振動の検出にも取り組んだ。その結果、モニタ技術によりドリル加工の限界切削速度の予想が可能であることが判明した。さらに皿穴加工のような工具の抜け際の僅かな振動が加工品質に大きな影響を与える現象に対して、開発したシステムが極めて効果的な手法となることを示すことができた。

第5章では、エンドミル加工中に温度および振動の同時モニタを遂行し、びびり振動の発生と工具温度の関係の解明を試みた。さらに主軸および送り軸のサーボ内部情報に基づく加工状態のモニタも遂行し、その結果の比較検討に基づき提案するワイヤレス多機能無線ホルダシステムで取得した振動モニタの有効性について考察した。それらにより、従来は不明であったエンドミルびびり振動中の工具側の昇温現象を解明することができ、工具寿命の予測に資する知見を示すことができた。さらにサーボの内部情報では取得と判定が難しい高い周波数帯のびびり振動に対して、提案するモニタと診断の手法が有効であることを示すことができた。

以上が、開発したワイヤレス多機能無線ホルダシステムを用いた様々な加工現象の見える化への取り組み成果である。加工現象の定量的な評価を遂行して、スマートファクトリー化に向けた新たなモニタリングツールであることを示すことができ、我が国の製造業のイノベーションに向けた嚆矢を示すことが出来た。