

博士学位論文審査要旨

2022年12月24日

論文題目：数値制御工作機械と協働ロボットの高度なCAM加工情報の統合化に関する研究

学位申請者：山本 隆将

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 伊藤 彰人

要 旨：

日本の生産システムにおいて、IoT に基づくつながる工場からつながる社会に向けた技術革新が必要とされてきている。しかしながら、つながる工場において各機械の加工や状態診断の情報の有機的な利活用を体系化した例がなく、その技術革新が求められてきている。そこで本論文では、荒加工工程の工作機械の加工や状態診断の情報を、CAMの出力座標で仕上げ工程の協働ロボットと共有化し、各機械間で高度につながる生産システムの構築を遂行したものである。

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章では無線式回転工具ホルダを用いた工作機械の状態診断の手法を提案して、その有効性を明らかにしている。第3章では無線式回転工具ホルダで取得した情報と工作機械のサーバ内部情報のCAM出力を用いた統合化の手法を提案して、その有効性を示している。第4章ではCAM出力に基づき3軸制御工作機械の状態診断情報と協働ロボットの動作の統合化を試み、その有効性を明らかにしている。第5章ではCAM出力に基づき5軸制御工作機械の状態診断情報と協働ロボットの動作の統合化を試み、複雑形状において荒加工と仕上げ磨きに対する高度な生産システムの構築を遂行している。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、IoTに基づく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：数値制御工作機械と協働ロボットの高度なCAM加工情報の統合化に関する研究

学位申請者：山本 隆将

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 伊藤 彰人

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、*Int. J. of Automation Technology*, Vol.15, No.3, pp.335-342, *Int. J. of Mech. Eng. and Robotics Research*, Vol. 11, No. 11, pp.801-806, 日本機械学会論文集, Vol.88, No.913, pp.1-14, 砥粒加工学会誌, Vol. 64, No. 2, pp.91-97, Vol.65, No.4, pp.195-200 および Vol.67（掲載決定済）に掲載され、既に十分な評価を受けている。

2022年12月24日13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、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： 数値制御工作機械と協働ロボットの高度な CAM 加工情報の統合化に関する研究

氏名： 山本 隆将

要旨：

世界各国の GDP に着目すると数年先には世界における日本の GDP の順位は現在よりもさらに低下することが予想される。これらのことから国内経済の停滞や、中国や新興国のシェア拡大により、日本の国際競争力が低下することが明確であり、この状況を覆す新たな技術立国としての新たな働き方が求められている。その一方で直近数十年において IT・通信業界の成長は大きくなってきている。これに伴い AI や IoT などが大きな関心を集めており、データに対する価値が非常に上がっている。多くの業種においてもこれらの技術やデバイスを上手に導入することにより効率的に業務を実施することが求められている。さらに、近年においては COVID-19 などの影響もあり、日本でも IoT 技術導入による働き方の変革が急激に進むようになった。製造業においてはこれら技術の導入により、ビジネスモデルの変革が求められており、データを活用した生産性向上の活用なども期待されている。このように危機的な状況である日本経済に対して、IT 技術を導入した働き方の改革により経済危機脱却が期待されている。

日本の生産年齢人口に着目すると、深刻な労働者不足と消費活動の縮小が指摘されている。この問題に対し、日本政府は定年延長や定年後再雇用などの政策により労働人口の確保と、65 歳以上の高齢者の経験やスキルを積極的に生産活動に取り込む取り組みを実施している。また労働人口の確保は高齢者にとどまらず、女性や外国人労働者の採用なども執り行われており、各業種の現場ではますます多様な個性や力量を持つ人員が協調して働くことが求められている。製造業などの専門性が高い業種においては個人に知識や技量が求められるが、日本の若手技術者の候補は年々減少していく傾向がある。その一方で高齢者は引退していくため、技術が伝承されず消失してしまうリスクが存在する。これらのような課題に対して、工学分野からそれらを解消するツールや仕組みが求められている。

日本政府は上記のような課題の解決方法として Connected Industries という概念を提唱している。この中で、ものづくり業界に求められることは生産の自動化や全体最適化などを行うことによりスマートものづくりを実現することである。スマートファクトリーの構築においては産業用ロボットによる省人・無人化を取り込むことに加えて様々な機器がつながることが求められている。また、つながるだけでなく、状況に合わせて最適な制御を実行することが理想とされている。そのために各社においてはモニタリング技術やデータベース構築、正常・異常の判断を実施するために、IoT でのデータ通信技術や AI によるデータから状況を分析するための技術開発を実施している。

しかしながら、機械加工現場はスマートファクトリーの実現が求められているが、実際には自律制御型工場は十分に実現できていない。その大きな原因の 1 つ目として機械加工で生じるトラブルがあげられる。特に切削加工を行う現場においては加工現象が原因となる課題が多く残っている。この問題を解決するために、原因を高度な技術者以外でも把握できる必要がある。具体的には「加工現象を見える化」し、モニタリングできるようにする技術が必要である。2 つ目として産業用ロボットを容易に導入できない難しさがある。その要因として、広大なスペースを要する安全柵の取り付けによりレイアウト変更に通が利かない点などがあげられる。そのような課

題解決のため、近年では協働ロボットの開発・導入が進んでいるが、ロボットが実施する作業が増えるほど、ロボット技術者に求められる専門的な知識量が多くなるのは必然でロボット技術者の負担の増大が新たな問題となってきている。この問題解決の手法の一つとして、機械加工同様にロボットによる作業で生じる現象の原因把握のために様々なセンシングによる作業の見える化が求められている。

そこで本研究ではスマートファクトリー実現のため、IoT 統合型のつながる工場の応用技術を開発する。具体的には金型製作などによくみられる工程である、前工程としてマシニングセンタ加工を実施したのち、後工程として協働ロボットを用いた磨き加工を実施する加工を対象とした。後工程の磨き加工において前工程のインプロセス加工情報を用いて加工改善を行うことで、情報をつなげることによる全体最適化を行う手法について検討した。

前工程では回転工具用の無線式多機能工具ホルダシステム（以後、無線ホルダシステムと称する）を用いてマシニングセンタ切削加工中の加工振動情報を取得する。加工振動は工具ホルダ内に埋め込まれた加速度センサの情報を無線通信により外部 PC で受信することによりリアルタイムに取得可能としている。本研究ではまず工作機械主軸の違いによる加工ワーク表面への影響について考察する。その後、実切削時の振動情報と工作機械 CNC から得られる情報を統合し、加工ワークの表面状態と加工条件調整による改善手法について検討する。後工程においてはロボットシステムを新たに開発して磨き加工を実施する。構築したロボットシステムでは協働ロボットを採用し、内部コントローラーの情報と外部センサの情報を統合することで様々な考察が可能とした。また、前工程・後工程それぞれにおいて工程内での改善についても検討した。

第 1 章は、本研究の目的と概要を述べている。

第 2 章では、無線ホルダシステムで振動の移動実効値を 50Hz のサンプリング周波数で計測することにより、同一機種で主軸の最高回転数が異なる仕様の BT30 主軸を持つ 3 軸制御小型マシニングセンタの主軸の状態診断とその加工特性を対象に、サーボ内部情報との比較検討を遂行しながら考察した。さらにサーボ内部情報では状態診断が難しいボールエンドミル仕上げ加工を想定したモニタも遂行して、びびり振動が複雑に生じる現象に対するシステムの有効性も検討した。

第 3 章では、無線ホルダシステムで振動計測の新たな応用としてボールエンドミルによる自由曲面仕上げ加工時のホルダ振動と 3 軸制御小型マシニングセンタの CNC 情報の同時取得を試みた。同時取得することで、ホルダ振動情報と CAM で出力されてきている CL による工作機械の加工座標位置情報の統合が可能となり、視覚的に振動強度がわかりやすいカラーマッピング手法での分析を実施した。また、得られたデータに基づき工作機械の主軸・送り軸の運動加減速の特性を考察して考慮することで、CAM から出力されるプログラムの修正が可能となるため、自由曲面の仕上げ加工の加工改善においてこれらモニタリングの有効性を検討した。

第 4 章では、3 軸制御小型マシニングセンタを用いて第 3 章にて開発した無線振動モニタリングシステムの技術と CNC 内部情報を融合させる手法で得られた加工情報を用いて、磨き作業の高度化に取り組んだ。その際、新たに協働ロボットの磨きシステムを開発した。そのシステムは内部コントローラーの情報と外部センサの情報を統合することで磨き加工における温度・振動・力が同時取得可能である。特に力の情報取得においては、協働ロボット土台に具備されている力センサの内部情報を、単に人との接触を検出するだけでなく、加工の高精度化にも活用した。CAM から出力される CL で前工程としてマシニングセンタ加工を実施したのち、この CAM の座標系のシステムを用いて後工程として磨き加工を実施し、統一した CAM 座標系による効率的な磨き加工について考察した。

第 5 章では、BT40 主軸の 5 軸制御中型マシニングセンタを用いて第 4 章のさらなる発展としてブレード形状を模したワークについて前工程としてマシニングセンタ加工を実施したのち、後工程として磨き加工を実施した。前工程においては新たに開発した 44.1kHz の高速サンプリング周波数で振動の詳細な波形情報が取得可能な無線ホルダシステムを開発し、切削加工中のびびり

り振動の原因についても検討を行った。また、第 3 章で開発した CAM 出力の CL の座標系で CNC 情報と同時取得による切削振動の強度分布を発展させ、CAD 上にカラープロットすることにより、ワークの表面状態に異常がある箇所をより視覚的にピンポイントで把握が可能である。この技術を第 4 章で構築したロボットシステムによる磨き作業に応用し、インプロセス振動情報のみを用いてびびり現象が生じる異常箇所のみをピンポイントで荒磨きを遂行し、その時間の短縮を検討した。その後、全面仕上げ加工を行う過程で協働ロボットシステムから得られた情報を用いて品質改善について考察した。

第 6 章は、以上をまとめた本研究の結論を示している。

上記より、本論文で用いた手法が IoT 統合型のつながる工場における応用技術として有効であることを示しており、この手段が次世代のスマートファクトリー実現に求められる成果であることが判明した。