

博士論文

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

2023 年

山本 隆将

目次

第1章 緒論

1.1 経済問題からみた日本の課題とIoT技術の導入-----	1
1.2 人口問題からみた日本の課題と技術の伝承-----	3
1.3 製造業における課題解決と次世代工場-----	4
1.4 スマートファクトリー実現に向けた機械加工の課題-----	6
1.5 スマートファクトリー実現に向けた産業用協働ロボット導入とその課題----	7
1.6 機械加工分野におけるIoT技術の活用-----	9
参考文献	

第2章 無線式多機能工具ホルダシステムを用いた数値制御工作機械の状態診断

2.1 緒言-----	15
2.2 提案するモニタ手法および実験方法-----	16
2.2.1 無線ホルダシステムと使用する工作機械-----	16
2.2.2 実験条件およびモニタ方法-----	16
2.2.3 ホルダ・主軸系の振動特性-----	18
2.3 実験結果および考察-----	21
2.3.1 主軸最高回転数の違いと空転時の特性-----	22
2.3.2 主軸最高回転数の違いとエンドミル側面切削特性-----	24
2.3.3 ボールエンドミルの凹凸面の仕上げ切削-----	25
2.3.4 ボールエンドミル加工におけるケーススタディ-----	29
2.4 結論-----	31
参考文献	

第3章 無線式多機能工具ホルダシステムの情報と数値制御工作機械のサーボ内部情報のCAMへの統合

3.1 緒言-----	34
3.2 提案するモニタ手法および実験方法-----	35
3.2.1 無線ホルダシステムと使用する工作機械とCLに基づくカラーマッピング手法-----	35

3. 2. 2	実験条件およびモニタ方法	36
3. 2. 3	ケーススタディ加工条件	36
3. 3	実験結果および考察	38
3. 3. 1	主軸回転変化の角加減速特性	38
3. 3. 2	送り速度変化の加減速特性	40
3. 3. 3	回転送り量一定での主軸送り速度同時変化の特性	42
3. 3. 4	ボールエンドミル加工における仕上げ加工	47
3. 3. 5	びびり振動抑制のための回転数制御の検討	49
3. 4	結論	52
	参考文献	

第4章 数値制御工作機械のサーボ内部情報と協働ロボットの仕上げ動作の統合化

4. 1	緒言	54
4. 2	提案する前工程のインプロセス情報を用いた後工程の効率化のコンセプト	55
4. 2. 1	無線ホルダシステムと使用する工作機械	55
4. 3	無線ホルダシステムと仕上げ作業用協働ロボットシステム概要と基礎特性	56
4. 3. 1	無線ホルダシステムと工作機械 CNC 通信の概要	56
4. 3. 2	仕上げ作業用協働ロボットシステムとロボット用無線振動計測システムの概要	57
4. 3. 3	協働ロボット内部力センサの基礎特性評価と温度センサの評価	59
4. 4	実験方法と結果および考察	63
4. 4. 1	切削加工による荒加工とロボットでの仕上げ加工の手法と条件	63
4. 4. 2	切削加工での無線ホルダによるインプロセス振動加速度情報と加工面の表面粗さ	66
4. 4. 3	協働ロボットの内部情報取得による磨き加工のモニタリング	68
4. 4. 4	外部センサ付加による磨き加工のモニタリングと協働ロボット内部情報との同期計測	71

4. 4. 5 エンドミル荒加工の情報に基づく協働ロボット仕上げ磨きの加工能 率改善方法と効果 -----	75
4. 5 結言 -----	77
参考文献	

第5章 5軸制御マシニングセンタと協働ロボットのサーボ内部情報のCAM統合化

5. 1 緒言 -----	80
5. 2 IoT対応型センシングシステムと加工条件 -----	81
5. 2. 1 無線ホルダシステムとCNC内部情報の取得方法 -----	81
5. 2. 2 磨き作業用の協働ロボットと内部情報の取得方法 -----	83
5. 2. 3 ワーク形状と切削加工および荒・仕上げ磨き条件 -----	84
5. 3 実験結果と考察 -----	84
5. 3. 1 切削加工時のインプロセス計測 -----	84
5. 3. 2 協働ロボットによる磨き時のインプロセス計測 -----	90
5. 3. 3 加工後ワークの評価 -----	93
5. 4 結論 -----	98
参考文献	

第6章 結論

6. 1 本研究の成果 -----	100
6. 2 今後の課題 -----	102

謝辞

第 1 章

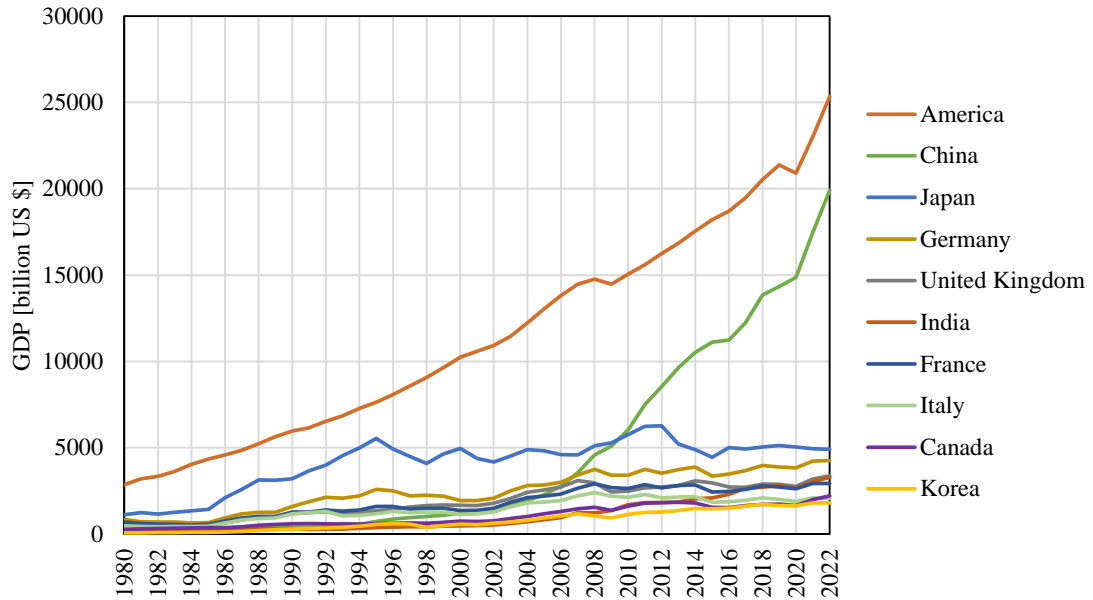
緒 論

1.1 経済問題からみた日本の課題とIoT 技術の導入

図 1-1 に 2021 年時点で名目 GDP が上位 10 か国における 1980 年から 2021 年までの GDP の推移を示す。日本の GDP に着目すると第二次世界大戦後の高度経済成長ののち、バブルと呼ばれた 1980 年台後半までアメリカと同等の傾き(年度毎の増加率)で急激に経済成長してきた。しかし、バブル崩壊と言われた 1995 年以降 GDP の急激な成長は停滞し、その傾きはゼロに近い状況にある。高度経済成長期に入ってから日本の GDP は長期にわたって米国に次ぐ世界 2 位の位置にあった。しかしながら、近年の中国の著しい経済成長により、2010 年より日本の GDP は世界 3 位という現状である。さらに現在は 4 位以下のドイツやフランスなどの国々について 2000 年以降に着目すると、GDP の傾きは常にプラスを維持しており、数年先には世界における日本の GDP の順位は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。

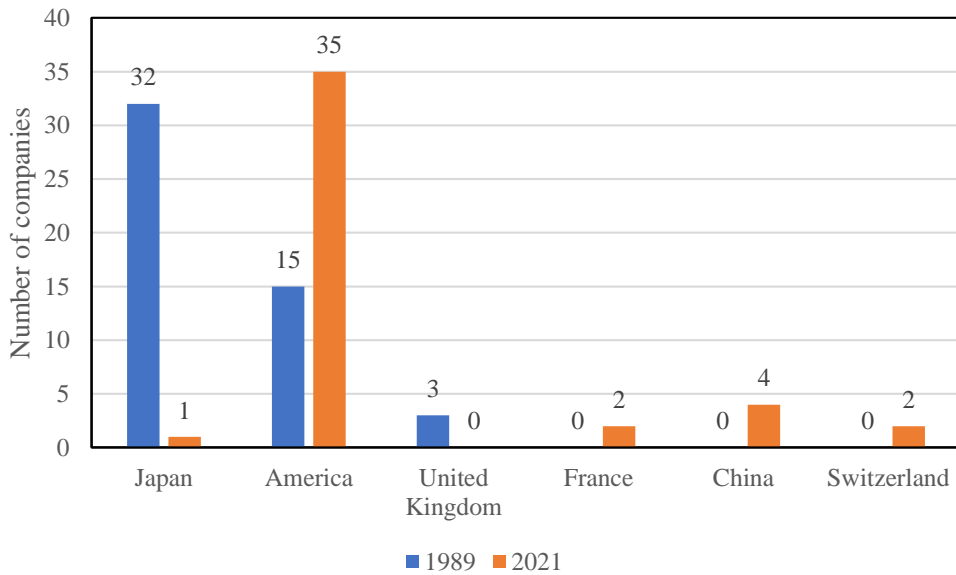
1989 年と 2021 年における世界の時価総額ランキング上位 50 位のランクイン企業数の国別まとめを図 1-2 に示す。1989 年においては日本企業が 32 社もランクインしていたが、2022 年には 1 社のみとなっている。米国は 15 社から 35 社に伸びているが、ランクインしている会社は大きく入れ替わっている。業種を確認すると、1989 年は銀行などの金融機関が 17 社と最も多く日本企業におけるバブル経済の影響を示している。2021 年においては IT・通信業界が最も多くなり、特に米国大手 IT5 社である通称 GAFAM においては 2021 年の時価総額が 9.51 兆ドルにまで達し、世界企業時価総額 116.1 兆ドルの 8%以上を占有していた。このことから近年では IT・通信業界の成長が非常に大きく、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。他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。

2019 年より COVID-19 による世界的なパンデミックを受けて世界各国で働き方が見直されてきた。日本も例外でなく、事務業務を中心に自宅に PC を設置して業務を实



Souse : IMF World Economic Outlook Databases

Fig.1-1 GDP trends from 1980 to 2021 for the top 10 countries.



Souse : in 1989 DIAMOND online / in 2021 companiesmarketcap.com

Fig.1-2 Summary of the top 50 countries by market capitalization among world companies in 1989 and 2021.

施するリモートワークを採用する企業が増加した。一時的に多くの企業がテレワークを実施してこのような危機に対応するなどして、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。さらに、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¹⁾、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。

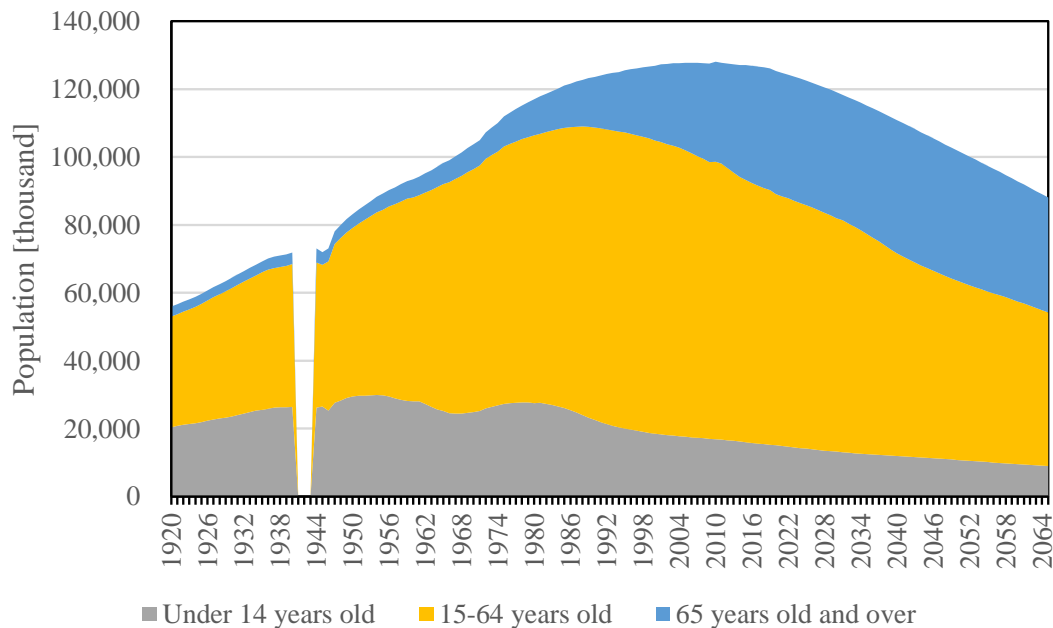
このように危機的な状況である日本経済に対して、IT 技術を導入した働き方の改革により経済危機脱却が期待されている。

1.2 人口問題からみた日本の課題と技術の伝承

図 1-3 に日本の人口推移を示す。歴史的に経済発展を遂げた国々は一度だけの人口ボーナス期が生じ(日本においてはいわゆるベビーブームが該当)、その後は人口オーナス期を迎える。いわゆる先進各国で必ず生じる問題とされている。日本の生産年齢人口(15-64 歳)に着眼すると 2060 年には 2021 年より半減することが予測され、人口オーナス期を迎えつつあるものと考えられる。これにより、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強い業種においては個人に知識や技量が求められる。日本の若手技術者の候補は大学の工学分野や工業高等専門学校生であるが、2021 年度の日本全国の大学卒業者数の中で工学部の学生は全体の 15%にあたる 86796 名であり、工業高等専門学校生の卒業者数は 9710 名であり合計で 10 万人にも満たない¹⁻²⁾。さらに、その中でも機械工学系の学生はさらに少数となる。その一方で先述のように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。



Source : Population Estimates, Statistics Bureau, Ministry of Internal Affairs and Communications

Fig.1-3 Projected Population Change by Age Group in Japan

1.3 製造業における課題解決と次世代工場

2017年に日本政府は上記のような課題の解決方法として **Connected Industries** という概念が経済産業省から提唱されている。**Connected Industries** は産業の指針であり、ICT技術などの先端技術を用いて人・技術・機械といった様々なモノをつなぎ、企業や産業、国家をこえてつながることによって、新たな製品やサービス、価値を生み出すことで社会課題を解決していこうという思想である。**Connected Industries** において、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。中小企業でもこのようなスマートものづくりの考え方で生産性向上をした企業が出てきている¹⁻³⁾が、さらなる生産性向上のためには加工現場全体をより効率的にしていく必要がある。

機械加工現場を持つ製造業においては大きな生産性向上を目標に、**図 1-4**に示すようなスマートファクトリーを実現することを目指し技術開発を進めている。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。様々な機器がつながることにより、効率的な生産管理や、設備の予防保全といった活用が可能となり、さらなる省人化が期待

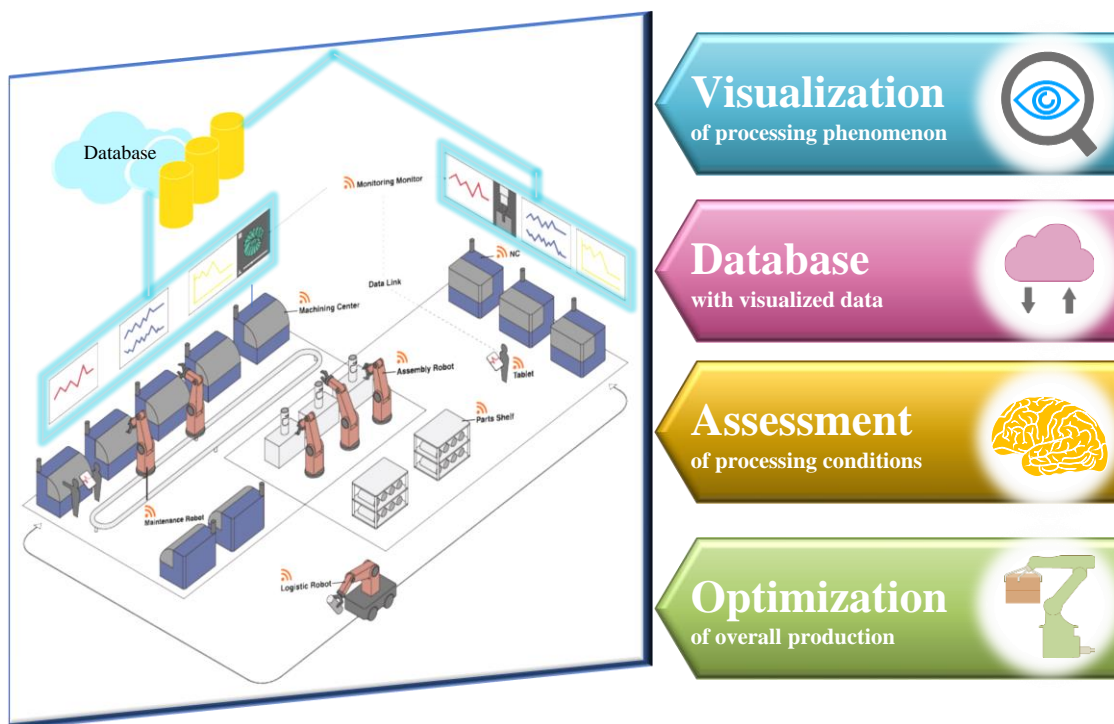


Fig.1-4 Model of Smart Factory.

されている。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。このような工場の構築においては、最初に「生産に重要な情報である物理現象や生産状況などをリアルタイムモニタリング」し、「モニタリングデータでデータベースを構築」することが求められる。その後、リアルタイムモニタリング値とデータベースを比較することで「瞬時に現在の状態が正常か異常かをシステムが自動で判断」し、異常であればその異常に合わせて「加工設備を最適化制御する」ことで高度に智能化した自律制御型工場が実現可能である。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。既に、日立製作所やNEC、富士通といった国内大手ITベンダーの3社からは、IoTプラットフォームが確立されており、効率的なデータ収集やAIによる分析などのサービスが展開されているほか¹⁻⁴⁾、電気機器メーカーであるオムロンではあらゆる機器・システムから得られたセンシングデータを、それを必要としている人々に提供し、様々な社会課題の解決のためのデータ流通市場の創設に取り組んでいる¹⁻⁵⁾。このような技術を製造業でも組み込み、スマートファクトリーを構築していくことが求められている。

1.4 スマートファクトリー実現に向けた機械加工の課題

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。その大きな原因の一つ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。例えば、突発的な工具破損であり、その破損モードは複雑で、ねじり・曲げ・溶損などがあげられる¹⁻⁶⁾。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る品質不良などもあげられる^{1-7~9)}。航空機や医療機器部品に関しては、難削材に対する需要も高まっており、形状も複雑化してきている。しかしながら、これらのトラブルを正確に把握できる高度な技術者が先述のように引退することで、対応していくことがさらに難しくなっている。そのため、加工現象の原因把握はより重要な課題となっており、その課題解決のツールが求められている。

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「加工現象が見える化」し、モニタリングできるようにする技術が必要である。特に加工現象を把握する場合、加工点近傍の物理量のモニタリングを実施する必要がある。しかしながら、近年の工作機械は高出力・高性能化や切りくず飛散に対する安全確保のためにフルカバー設計となっている。また、高圧クーラントなどの周辺装置も発達してきている。これらにより、有線接続や耐環境性の低い計測機器を用いて加工現象をモニタリングすることが困難となっており、加工高度化研究においては「加工現象が見える化」する新たな手法を確立することは非常に重要なテーマである。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¹⁻¹⁰⁾。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^{1-11,12)}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^{1-13,14)}に基づき、そのモニタに関する研究¹⁻¹⁵⁾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¹⁻¹⁶⁾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¹⁻¹⁷⁾や、工具の刃先近傍に微細な熱電対を内蔵させ、工具-切屑接触点付近の温度分布を計測した例¹⁻¹⁸⁾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。また、1.3 節での自律制御型工場の実現においても加工中の異常を検出することが求められており、情報取得・解析の幅を広げるための技術開発が求められる。一例として、「加工現象を見える化」とともに、工作機械制御装置(以下 CNC)から得られる情報を同時収集・統合することで、「どの加工点で起きた加工現象か」を解析することが可能となるが、CNC 情報と外部デバイスを統合してモニタリングした事例はほとんどなく、技術開発の課題となっている。さらに、CNC との接続はセンシングで得られた情報から加工異常発生と判断された場合、即座にその情報を CNC フィードバックし、最適制御を実行するためには必須の技術となり、その技術開発が急務である。

1.5 スマートファクトリー実現に向けた産業用協働ロボット導入とその課題

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、実際に自律制御型工場は十分に実現できていないもう一つの要因として産業用ロボットが容易に導入できない難しさがある。日本において産業用ロボットは 1970 年代より導入が進み、現在でも製造業においては労働人口不足に対応していくため、産業用ロボットの導入が進んでいる。特に 2013 年から 2017 年の 5 年間で世界の産業用ロボットの販売台数が 2 倍に増加し、今後も年 14% で増加するという報告もあり¹⁻¹⁹⁾、生産活動を無人化または省人化を促進している。しかしながら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融が利かないといった理由から、特に中小企業などの変種少量生産を行う企業には導入が難しいと考えられており、今後の課題とされてきた。

その課題解決のため、近年では力センサやトルクセンサを搭載することで、人との接触を検知し瞬時に停止する協働ロボットの開発が進んでいる。そのような機構を設けているため、協働ロボットは人と同じ空間で動作可能とされており、安全柵レスでの稼働が可能である。日本においても、2013 年に労働安全衛生規則第 150 条の 4 の改正により、危険源について十分検討した場合、安全柵を設置する必要がなくなり、以降様々なメーカーが協働ロボット市場に参入している。協働ロボットは安全柵レスであるため容易にレイアウト変更が可能である手軽さに加え、マニピュレータの高度化により様々なタスクを実行することも可能となっており、今後も需要が大きくなっていくことが見込まれており、組み立て工場や農業だけでなくごみ処理作業においても人と協調作業が必要な現場での導入が検討され、進められている^{1-20~22)}。機械加工現場にお

いても例外ではなく、協働ロボットの特徴を生かして省スペースで搬送作業、バリ取り作業、磨き作業、溶接作業などを自動化するために用いられており、これらを実施することで人手不足に対応していくことが求められている。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知識量が多くなるのは必然で、ロボットシステムを導入のエキスパート、すなわちロボット SIer に対して専門知識の習得が追い付かないことが課題となっている。一例として、搬送・加工作業に対する専門知識が乏しいと、正しい動作がわからず、異常加工や不具合を引き起こす原因につながってしまう。特にロボットが実施する作業のほとんどが自動運転になるため、長時間放置した結果、不具合品を大量に加工してしまうリスクがある。このように、高度な制御を行うにあたってロボット技術者に求められる知識が、ロボット操作や制御に関する知識はもちろんであるが、各作業の専門知識も求められるようになってきており、ロボット SIer の負担となってきた。先述のロボット需要増大も含め、ロボット SIer 業務に対応するためのロボット技術者育成や負担軽減が非常に大きな課題となってきた。

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かが求められている。これにより、知識の乏しいロボット技術者がロボット動作の正常・異常を判断できる指標にすることで知識の欠落を補うことができる。さらに、ロボットでの自動生産においてもその判断の指標とし、異常に合わせた動作を教えることでリスク回避が可能となる。このようにロボットでの加工においての知能化が求められており、様々なセンシングが行われている。特に力センサのセンシングは多く、一例としてエンドエフェクタ部に外部力センサを取り付け、その値を制御することによりエッジのバリ取りや面取り作業を実施した事例^{1-23~25)}があげられる。また、協働ロボットでは先述のように人との接触を検知するために力センサやトルクセンサを搭載している機種が多い。すなわち、内部パラメータを読み取ることで力のセンシングが可能となっており、それによる力制御を実施可能な機種も市場に出ている。

しかしながら、ロボットでの加工において力センサ以外での情報をリアルタイムモニタリングする事例はほとんどない。さらに、協働ロボットの力情報を含むコントローラ内部情報と外部センサを統合して解析するような事例もなく、需要が増える協働ロボットをより活用していくための課題となっている。特に磨き作業においては切削と同じく、1.4 節で示したような加工中の力、振動、熱が重要な物理量となり、それらをモニタリングできる技術が求められている。

1.6 機械加工分野における IoT 技術の活用

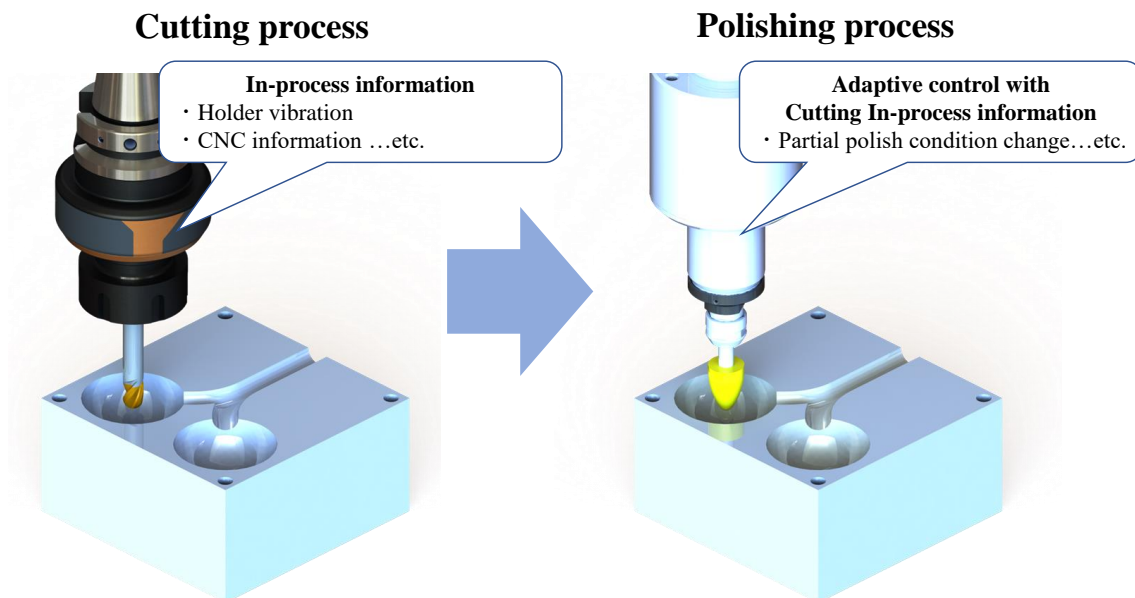
そこで本研究ではスマートファクトリー実現のため、IoT 統合型のつながる工場の応用技術を開発する。具体的には金型製作などによくみられる工程である、前工程としてマシニングセンタ加工を実施したのち、後工程として協働ロボットを用いた磨き加工を実施する加工を対象とした。後工程の磨き加工において前工程のインプロセス加工情報を用いて加工改善を行うことで、情報をつなげることによる全体最適化を行う手法について検討した。その概念図を図 1-5 に示す。

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。この無線ホルダシステムを用いて加工振動を検出により加工現象をあきらかにした事例はある¹⁻²⁶⁾が、工作機械の違いによる加工への影響や自由曲面加工への影響を調査したものはなかった。そのため、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



Monitoring of machining phenomena and optimization in each process

Fig.1-5 Conceptual diagram of this study. Detecting problem areas from in-process data during cutting and changing the polishing method for these areas..

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 (Cutter location) 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。

参考文献

- 1-1) 日本情報システム・ユーザー協会, “企業 IT 動向調査 2021(2020 年度調査)～第 2 回緊急実態調査結果～”, (2020)
- 1-2) 文部科学省, “文部科学統計要覧 (令和 4 年版)”, https://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/002/002b/1417059_00007.htm
- 1-3) 経済産業省 製造産業局 ものづくり政策審議室, ““Connected Industries”推進に向けた 我が国 製造業 の 課題 と 今後 の 取組”, (2018), https://jp.opcfoundation.org/wp-content/uploads/sites/2/2018/12/1_Sumita_Keynote.pdf
- 1-4) 山田直史, 高島洋典, 木村康則, “超スマート社会 (Society5.0) 実現に向けて”, 情報管理, Vol.60, No.5 (2017), pp.325-334.
- 1-5) 歌代豊, “IoT-ビッグデータ-AI 時代の企業戦略とビジネス革新”, 経営情報学会全国研究発表大会要旨集, (2018), pp.146-149.
- 1-6) 藤澤政泰, “機械孔加工の極限”, 精密工学会誌, Vol.78, No.6 (2012), pp.448-452.
- 1-7) 河原弘樹, 吉村博仁, 渡邊昌英, “プリント配線板の小径穴あけ加工における工具摩耗が加工穴品質におよぼす影響”, 北陸信越支部総会・講演会講演論文集, Vol.54, (2017), F043.
- 1-8) 山田保之, 青木太一, 田中裕介, 脇平浩一郎, “コーティッド超硬工具による高硬度材の切削”, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.60, No.577 (1994), pp.14-18.
- 1-9) 近藤英二, 太田博, 川合忠雄, “旋削材に発生する再生びびり振動の検知”, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.59, No.567 (1993), pp.27-32.
- 1-10) 山根八州男, 関谷克彦, “難削指数による難削性の評価”, 精密工学会誌, Vol.70, No.3 (2004), pp.407-411.
- 1-11) 藤嶋誠, 垣野義昭, 松原厚, 佐藤智典, 西浦勲, “知能化工作機械によるドリル加工に関する研究(第 1 報)”, 精密工学会誌, Vol.66, No.11 (2000), pp.1792-1796.
- 1-12) 柿沼康弘, “センサレス切削力計測技術とその応用”, 精密工学会誌, Vol.83, No.3 (2017), pp.210-213.
- 1-13) E. Kuljanic, G. Totis, M. Sortino, “Development of an intelligent multisensor chatter detection system in milling”, Mechanical Systems and

Signal Processing, Vol.23 (2009), pp.1704-1718.

1-14) L. Wang, M. Liang, “ Chatter detection based on probability distribution of wavelet modulus maxima”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.25 (2009), pp.989-998.

1-15) 千田治光, “工作機械の知能化の現状と加工事例”, 精密工学会誌, Vol.78, No.9 (2012), pp.748-751.

1-16) 小池綾, 柿沼康弘, 青山藤詞朗, 大西公平, “エンドミル加工における外乱オブザーバを用いたセンサレスびびり振動検出技術の開発(第 2 報)”, 精密工学会誌, Vol.81, No.7 (2015), pp.692-698.

1-17) 新堂正俊, 松田亮, 児玉紘之幸, 廣垣俊樹, 青山栄一, “赤外線サーモグラフィ画像の解析に基づくエンドミル加工温度の解明”, 砥粒加工学会誌, Vol.58, No.7 (2014), pp.457-462.

1-18) Shinozuka, J., JAHARADAK, Binti, H., “Measurement of the temperature distribution at the tool-chip interface by using a cutting tool with seven pairs of built-in micro Cu/Ni thermocouples”, Advanced Materials Research, Vol.1136, (2016), pp.586-591.

1-19) 橋本尚久, “日本のロボット分野における産業技術者育成に関する取り組み”, 日本ロボット学会誌, Vol. 38, No. 9, (2020), pp.785-788

1-20) 萬礼応, “人と協働する農作業支援ロボットの実践と評価”, 第 64 回自動制御連合講演会, (2021), pp.269-271

1-21) 中野裕, 川本直哉, 梅本司, 桂木格, “協働ロボットを適用した資源ごみ選別作業支援システムの開発”, 第 32 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿, (2021), pp.97-98

1-22) 衣川潤, 若林勇太, 金澤亮, 小菅一弘, “自動車組立工程のための協働ロボット PaDY”, 日本ロボット学会誌 Vol. 37 No. 10, (2019), pp.928-933

1-23) 曾根原光治, 林浩一郎, 西嶋和之, 村上弘記, “ロボットアームによる精密仕上げ自動化技術の開発”, IHI 技報 Vol.52 No.2, (2012), pp.58-65

1-24) 林浩一郎, 上野光, 村上弘記, “精密仕上げロボットシステムの開発”, 計測自動制御学会論文集, Vol.51, No.1, (2015), pp.32-40

1-25) 三上知三, “精密仕上げロボットシステムを用いた実用化例と今後の展開”, 日本ロボット学会誌 Vol. 34 No. 10, (2016), pp.676-679

1-26) 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, “無線多機能ホルダによるタップおよびエンドミル工具の回転方向振動モニタと現象解明”, 砥粒加工学会誌, Vol.61 No.12, (2017), pp.39-45

第 2 章

無線式多機能工具ホルダシステムを用いた 数値制御工作機械の状態診断

2.1 緒言

前章で述べたように近年の製造業の現場では IoT (Internet of Things) に基づく「つながる工場」に関する技術開発が求められ、それらに関連する新しい研究開発が不可欠である。そこで直近ではマシニングセンタなどに用いられている回転工具ホルダに無線通信機能を具備した IoT 対応のモニタリングシステムの開発に取り組まれてきている。その応用として、エンドミル加工における工具内部の温度モニタリング²⁻¹⁾、さらに難削材のタップ加工時の回転方向スティックスリップ振動や高速エンドミル加工の工具ねじり振動²⁻²⁾さらにびびり振動中のホルダ振動と工具温度の同時計測²⁻³⁾などで工具回転座標系でのモニタリング技術の有効性が示されてきている。

一方で、加工現場では工作機械の主軸において、機体差やわずかな仕様の違いなどによる差や経年変化の管理が重要と考えられる。しかしながら、動的な要因に関してはそれらを容易に判別する手法はなく、主軸モータ電流の差に着目したモニタ²⁻⁴⁾が検討されている程度である。さらに 5 軸制御マシニングセンタや高性能 CAM などの普及でボールエンドミルを用いた複雑形状の加工が増大しており、その場合に長い工具突出しでの加工が多用されるため、びびり振動による加工トラブルが顕在化してきている。ボールエンドミルに対するびびり振動の知見としてワークや主軸フレームに加速度センサを貼り付けた例²⁻⁵⁾があるが、加工点から離れた位置のモニタで負荷の少ない仕上げ加工では検出が難しいことが予想される。

そこで本章では²⁻⁶⁾、先行研究^{2-1~3)}で開発された無線ホルダシステムを新たに加工前の主軸回転中のホルダ内の回転方向および半径方向の振動振幅を主軸の状態モニタにも適用し、同一機種で主軸最高回転数が異なる主軸の特性の差を診断し、その後エンドミル切削加工時の自励びびり振動の違いについて検討した。さらに、金型加工を想定したボールエンドミルによる仕上げ曲面加工についてモニタリングを実施し、びびり振動が複雑に生じる場合についても検討した。

2.2 提案するモニタ手法および実験方法

2.2.1 無線ホルダシステムと使用する工作機械

図 2-1 に無線ホルダシステムによる振動加速度のモニタ方法を示す。BT30 ホルダ内に 1 軸方向に感度をもつ圧電型加速度センサを回転中心から径方向 5.5mm の距離(ゲージラインから 45mm)で回転座標系の回転(接線)方向に感度を有するように等間隔に 2 つ配置した。各センサの加速度 a_{x1} , a_{x2} は図中に示す矢印の方向に+の感度を有しており、半径方向として Xm は $(a_{x1} - a_{x2})/2$ で振動加速度の差分演算(アナログオペアンプ演算)により算出できる。また、回転方向を示す Rm の振動加速度は、 $(a_{x1} + a_{x2})/2$ の加算演算により算出できる。したがって半径方向、回転 1 方向の計 2 方向の振動加速度のモニタが可能である。任意時間 t における差分または加算演算の出力を $x(t)$ としたとき、ホルダ振動の実効値 RMS(Root Mean Square)演算 $a(t)$ は次式で示される。

$$a(t) = \left(\frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau)^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

無線ホルダシステム内のマイコンでは、積分時間を $T=0.1s$ と設定しリアルタイムにアナログ演算し、演算結果の $a(t)$ を A/D 変換した後ワイヤレス送信の転送周波数 50Hz, すなわち 0.02s 間隔で回転中のホルダより機外 PC に設置した受信機に向けて送信する仕様となっている。ここで用いたセンサの固有振動数は 20kHz で 10kHz 程度までの振動加速度の検出が可能である。また振動試験機上でホルダを Xm 方向に加振校正し、その時に $Rm=ゼロ$ も確認して精度保証をしている。

実験に使用した 2 台の工作機械は同一メーカーで同機種に分類されている表 2-1 とした。いずれも BT30 主軸を保有する、小型マシニングセンタに分類される機種である。M, S の機械における、主な違いは主軸の最高回転数の仕様である。

2.2.2 実験条件およびモニタ方法

加工実験は材質 JIS S50C 素材を対象に、スクエアエンドミルによる側面切削加工とボールエンドミルによる円弧面仕上げ加工を行った。

加工実験時にはホルダ振動加速度以外にも、マシニングセンタのサーボより主軸トルク指令電流値{以下、定格電流に対する割合 TCMD(torque command)値}, 切削抵抗も同時に計測した。サーボ値は FANUC 社 / SERVO VIEWER を用いて、CNC 内

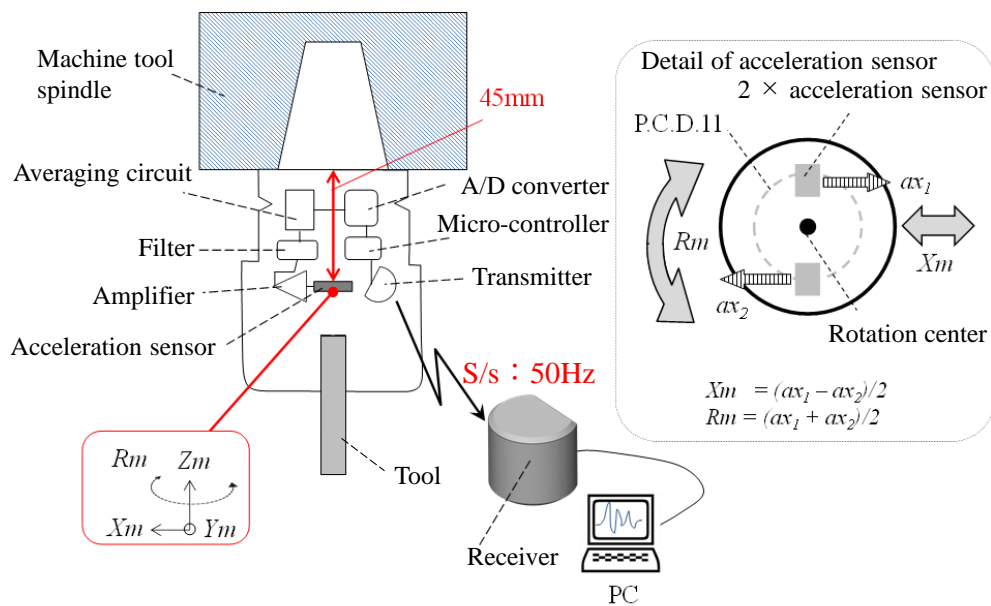


Fig.2-1 Schematic of the wireless measurement tool holder system used to measure vibration.

Table2-1 Machines information.

Name	M	S
Machine type	α -D21MiB5	α -D14DSe
Manufacturer	FANUC	FANUC
Max speed [min^{-1}]	10000	20000
Adapter type	BT30	BT30

部から情報をリアルタイムに採取した。切削抵抗はテーブル上に設置した Kistler 社 / 動力計 9129AA を使用し、3 成分(マシニングセンタの固定座標系 X,Y,Z 方向)の切削抵抗値を取得した。

加工実験の詳細に関して、スクエアエンドミルによる側面切削加工では、 $\phi 6$ のエンドミルを用いて、工具直径 D に対する突き出し $3.3D$ とした安定な条件で、軸方向切込み 8.162mm 、径方向切込み 0.5mm にて加工をおこなった。実験時のセットアップと工具刃先と半径方向振動加速度 X_m の検知方向(4 刃中、対角 2 刃先対して、他 2 刃先に対して直角)、回転振動加速度 R_m の検知方向の関係模式図および、切削方向と動力計の検知方向を図 2-2 に示す。また、表 2-2 にスクエアエンドミル加工実験に用いた刃具のスペックおよび実験条件を示す。

ボールエンドミルによる円弧面仕上げ加工では、 $\phi 4, 6, 8$ の 3 本のボールエンドミルを用いて 5 軸制御マシニングセンタなどへの応用も考慮して、突き出し量 $9D$ とし、仕上げ代 0.2mm にて加工を実施した。実験時のセットアップと工具刃先と半径方向振

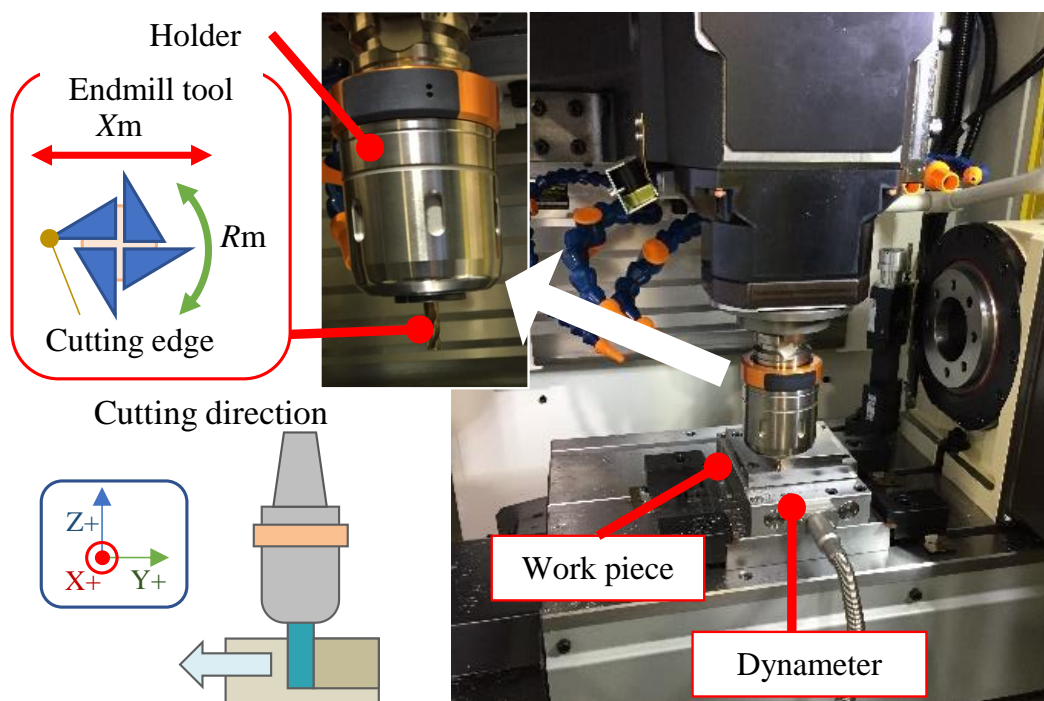


Fig.2-2 Setting and machining path of a square end mill.

Table2-2 Tool information and cutting condition in milling by a square end mill.

Tool information		Cutting condition	
Tool model	TSC-EM4S 6 (MISMI)	Speed	3200~3575 rpm
Diameter	6 mm	Feed	0.04 mm/tooth
Length(L/D)	20 mm(3.3D)	Ap	8.162 mm
Num of edge	4	Ae	0.5 mm
		Coolant	Dry

動加速度 X_m の検知方向(刃先の対角線に直角), 回転振動加速度 R_m の検知方向の関係模式図および, 加工方向と切削動力計設置方向, 後述のグラフの横軸基準を 図 2-3 に示す. 加工方向は凹・凸面ともに走査線でかけ下がりでの加工とした. 後述の当実験に関するグラフはボールエンドミルの先端を $\theta=0^\circ$, 側面を $\theta=90^\circ$ とした加工点の角度を横軸とした. また, 表 2-3 にボールエンドミル加工実験に用いた刃具のスペックおよび実験条件を示す.

2.2.3 ホルダ・主軸系の振動特性

機械 M については先行研究²⁻³⁾で主軸系の加振試験を遂行しているため, 本報では機械 S の加振試験を追加して, 工具・ホルダ・主軸系の動剛性(周波数応答)を調べた. 加振実験時の加速度センサ設置位置および機内の様子を 図 2-4 に示す. 加振時の工具はスクエアエンドミル $\phi 6$ mm を把持した. 加速度センサは工具の先端, ホルダ, 主軸の回転軸に各 1 箇所計 3 箇所に設置し, 加振点はホルダ先端とした. 加

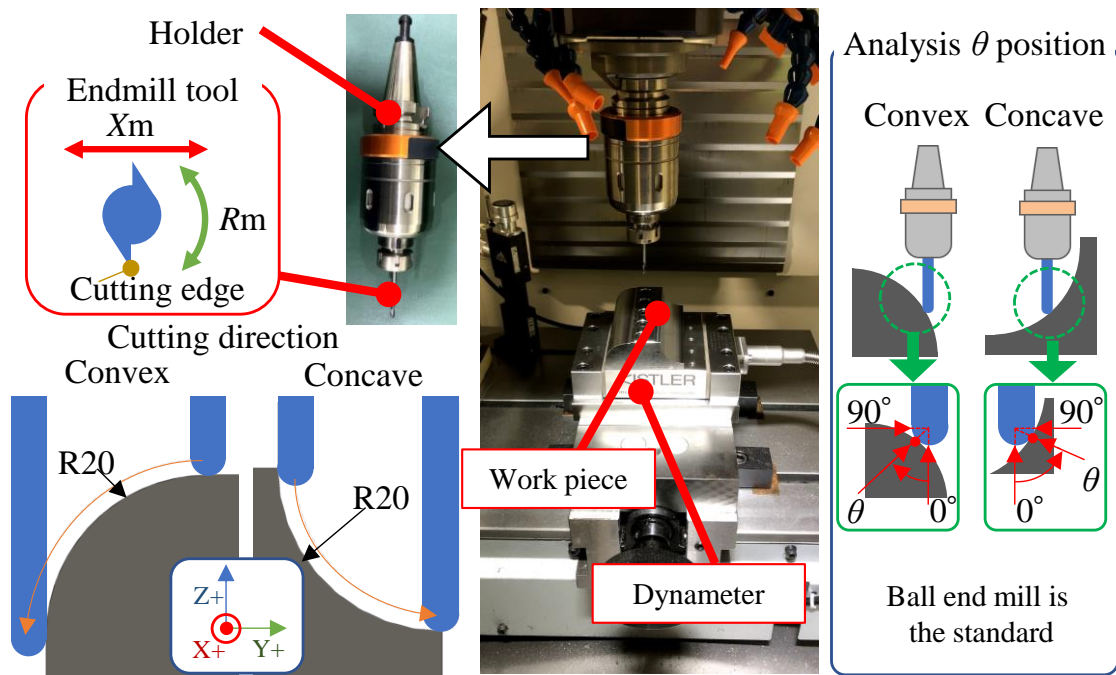


Fig.2-3 Setting and machining path of a ball end mill.

Table2-3 Tool information and cutting condition in milling by a ball end mill.

Tool information		Cutting condition	
Tool model	MP-2MB-2R/3R/4R	Speed	2000-6000 rpm
Diameter	4 / 6 / 8 mm	Feed	0.2 mm/tooth
Length(L/D)	72 mm (9D)	A_p	0.2 mm
Num of edge	2	Coolant	Dry

振方向はマシニングセンタ X 軸方向と、Y 軸方向の 2 通り実施した。そのときのアクセラランス ($0dB=1m/s^2/N$) を図 2-5 に示す。X 軸方向に加振した際は 450Hz と 1330Hz にピークが観測された。450Hz のピークは工具の先端およびホルダでの観測値に対し、主軸回転軸での値が小さく出る傾向に見られた。そのため、工具・ホルダ系の曲げ共振と考えられる。それに対し 1330Hz のピークでは 3 か所の加速度に大差がみられなかった。そのため、主軸全体が曲げ共振しているものと考えられる。機械 M における同試験結果のピークは 530Hz と 1450Hz であり、若干高い固有振動数を示していた。一方、機械 S において Y 軸方向に加振すると、510Hz, 1310Hz に固有振動数が現れ、X 軸と Y 軸方向で主軸の動剛性に若干の異方性も確認できた。

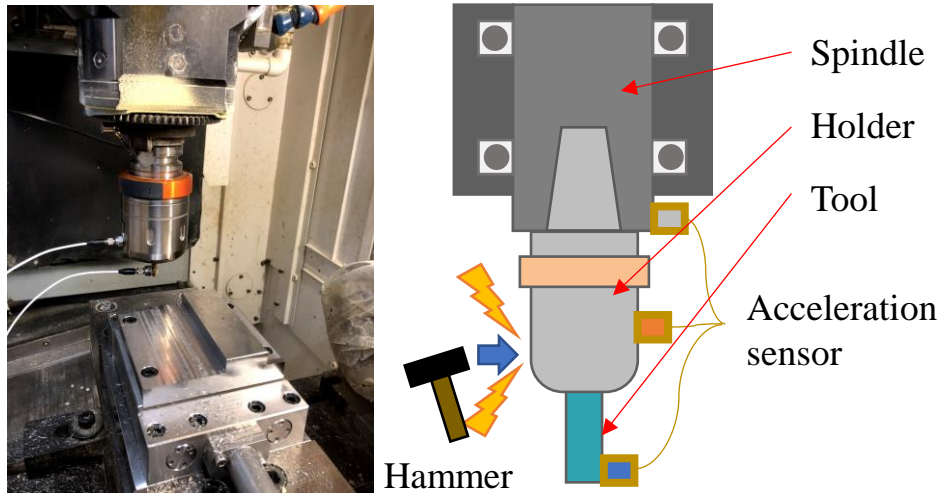


Fig.2-4 Schematic diagram of hammering test.

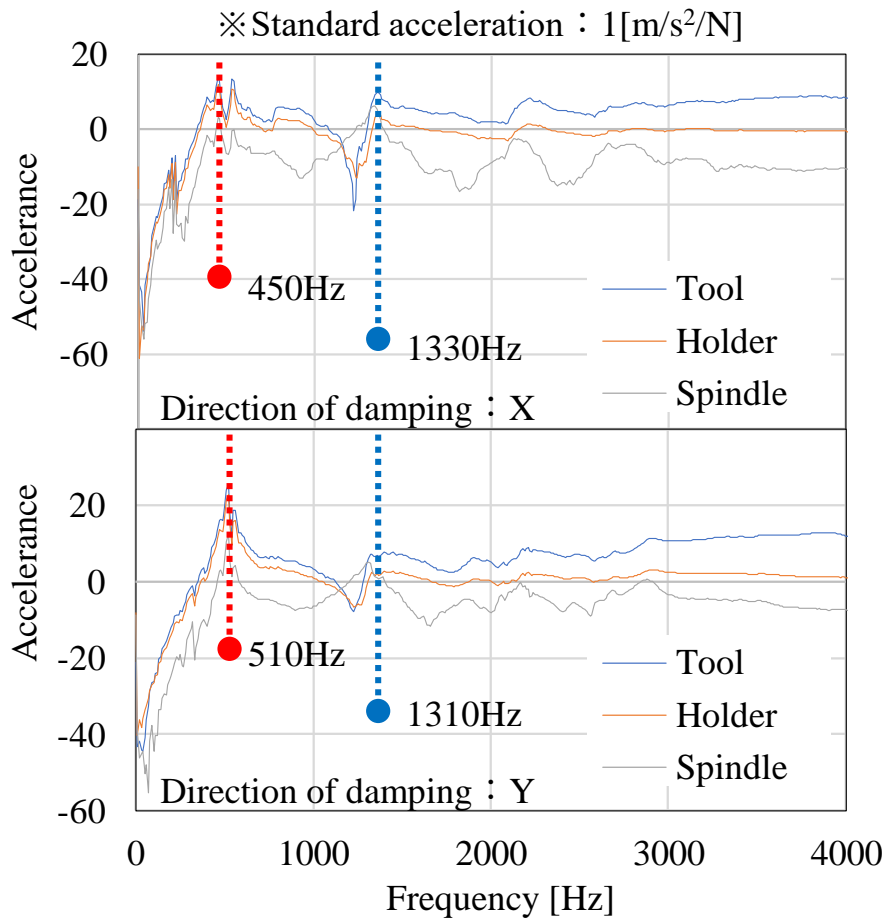


Fig.2-5 Relationship between acceleration and frequency when hammering test is performed.

2.3 実験結果および考察

2.3.1 主軸最高回転数の違いと空転時の特性

動的性能を確認するため、機械 M、S の主軸を空転 3s 間における主軸トルク TCMD 平均値、およびホルダシステムの X_m , R_m 平均値を取得した。空転試験で使用した回転数は 1000min^{-1} から 10000min^{-1} (機械 M) と 12000min^{-1} (機械 S) であり、各回転数と取得データの関係を図 2-6 にまとめた。データはいずれも、主軸を 4000min^{-1} で 30min 以上暖気運転させてから取得した。TCMD 平均値を見ると、 4000min^{-1} 付近から機体差がみられ、さらに高回転領域ではその差が大きく開くことがわかった。一方、無線ホルダシステムで得られた X_m 平均値や R_m 平均値においてはより低回転 (2000min^{-1}) 領域からその差が顕著に生じることがわかった。原因としては、主軸軸受の予圧・隙間の違いが考えられ、最高回転数 10000min^{-1} 主軸の機械 M では 20000min^{-1} 主軸の機械 S と比較し、予圧が高く隙間が狭いため摺動抵抗が高く、とくに 4000min^{-1} 以上でその影響が顕著になり TCMD 値が高くなったものと推測される。

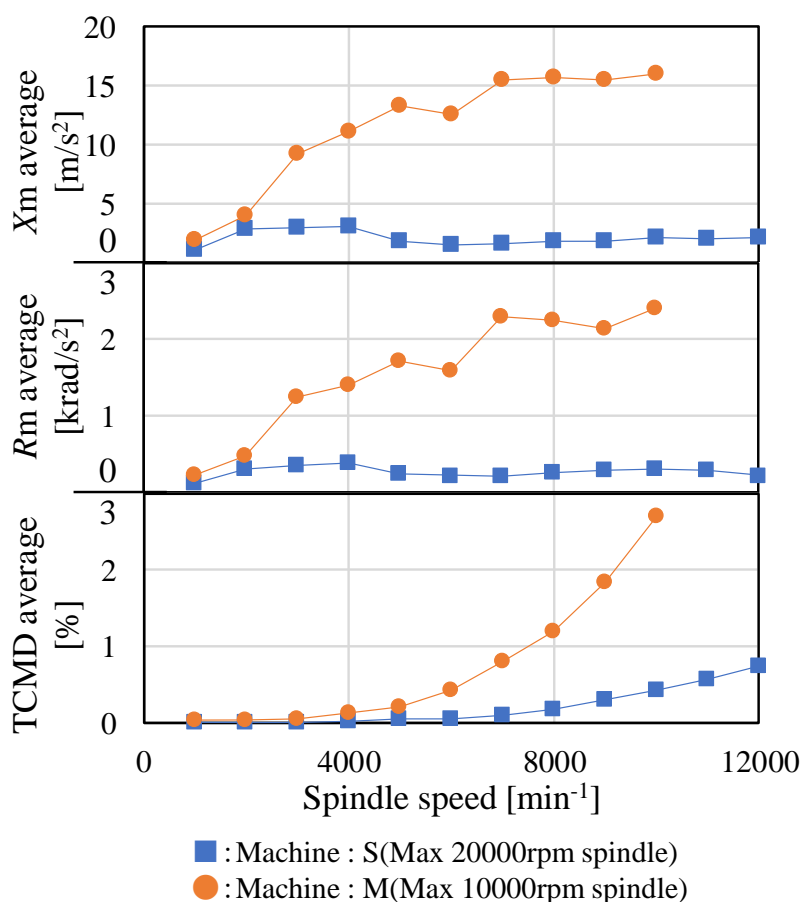


Fig.2-6 Relationship between X_m average, R_m average, TCMD average and spindle speed in idle state.

また、一般に転がり軸受けにおいて、回転時の軸受け音が極小となる軸受け隙間が存在する現象が知られている²⁻⁷⁾。すなわちその隙間付近では軸受け隙間が増大すると振動も減少する現象が生じる場合が存在すると考えられ、予圧が低く、隙間の大きな機械 S では振動も減少しているものと考えられる。従来、工作機械は主軸サイズ(本報の場合なら BT30)が同じでも機種により動剛性等の差が生じる²⁻⁸⁾ことが知られている。この結果は、同機種でも主軸の最高回転数の仕様の違いでも特性差が生じることを示している。さらにモータ電流の変動(モータからのトルク変動)により生じる回転方向振動の外乱の増大のサーボからの情報でもある程度検出できるが、開発したホルダシステムではより感度よく(低回転の領域より顕著に)その差を検出できることを示すものである。

2.3.2 主軸最高回転数の違いとエンドミル側面切削特性

機械 S における、主軸回転数 3450min^{-1} および、 3500min^{-1} でのスクエアエンドミルによる側面切削加工を実施したときの、テーブル X 軸方向の切削力値 F_x 、TCMD 値、 X_m 値の任意の 1 秒間の時間波形と切削面の接写写真を図 2-7 に示す。主軸回転数 3450min^{-1} では安定切削していたが、 3500min^{-1} ではびびり振動が生じた。主軸回転数 3500min^{-1} 加工時の F_x 波形を FFT 解析した結果を図 2-8 に示す。 3450min^{-1} 加工時にはなかった 439Hz , 556Hz , 879Hz , 1318Hz のピークがみられた。2.2.3 節の加振試験の結果と照らし合わせると、 439Hz , 556Hz は工具・ホルダ系起因であることが予想され、 879Hz はエンドミルの切れ刃通過振動数の高次成分が顕著に表れたと考えられる。 1318Hz は機械主軸起因の再生効果の自励びびり振動であることが予想され、 F_x 波形とびびり振動は連動していることがわかる。また、びびりの生じた主軸回転数 3500min^{-1} では 3450min^{-1} と比較し、 X_m の全体的な値、TCMD の振幅(以下、評価範囲内の最大値、最小値の差)、 F_x の振幅のいずれもが上昇していることがわかる。機械 S, M 共に X_m 平均値、TCMD 振幅、 F_x 振幅を回転数ごとに図 2-9 にプロットした。機械 S に比べ機械 M では低い回転数の 3350min^{-1} 付近からびびり振動が生じて F_x の振幅が上昇していることがわかり、主軸の最高回転数の仕様の違いの影響が生じていることが確認できる。そこで各項目の組み合わせで、各回転数の結果の相関関係と相関係数を調べた結果を図 2-10 に示す。相関係数を確認すると機械によらず 0.8 近くを保つのは F_x 振幅と X_m 平均値の関係だけである。すなわちびびり振動の検出に X_m のモニタが機械によらず有効な手段になることがわかった。

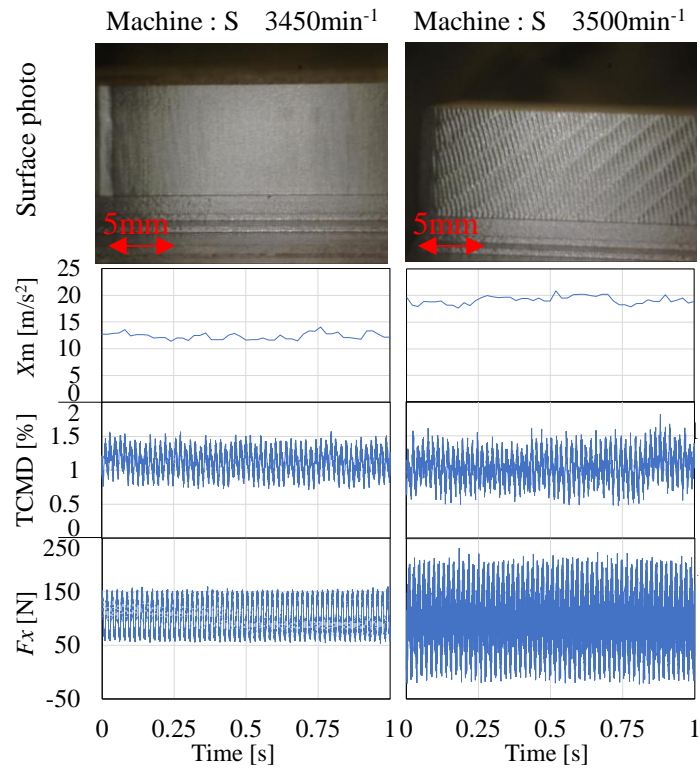


Fig.2-7 Cutting surface photo and time variation of X_m , TCMD, and F_x at spindle speeds 3450min^{-1} and 3500min^{-1} .

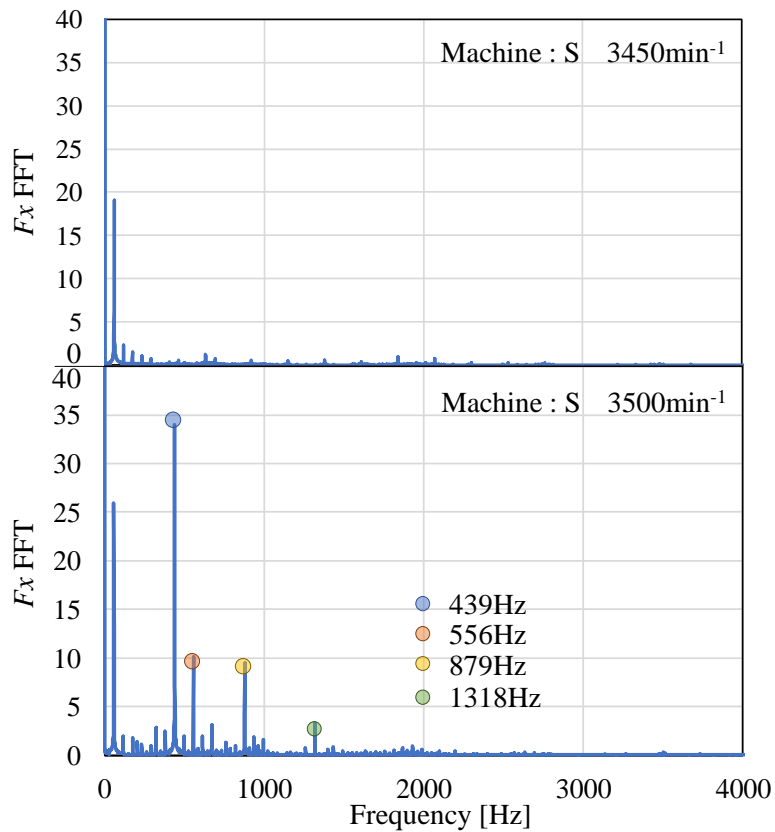


Fig.2-8 FFT analysis result of F_x at spindle speeds 3450min^{-1} and 3500min^{-1} .

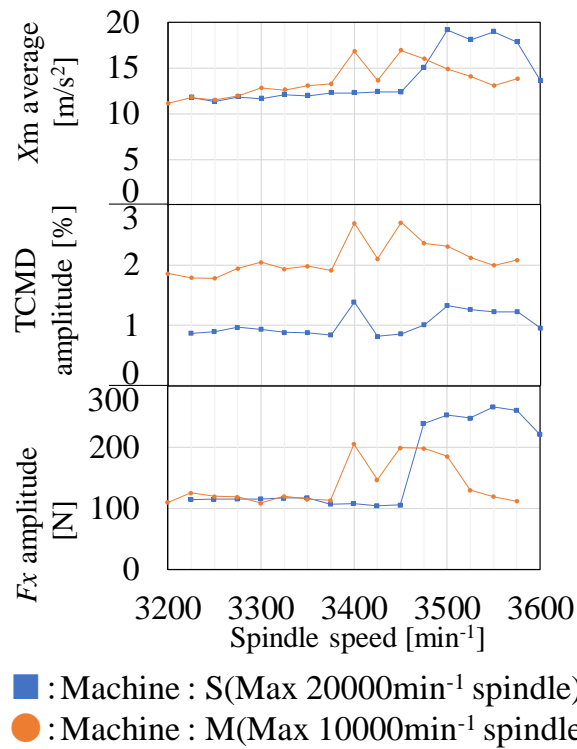


Fig.2-9 Relationship between X_m average, TCMD amplitude, F_x amplitude and spindle speed.

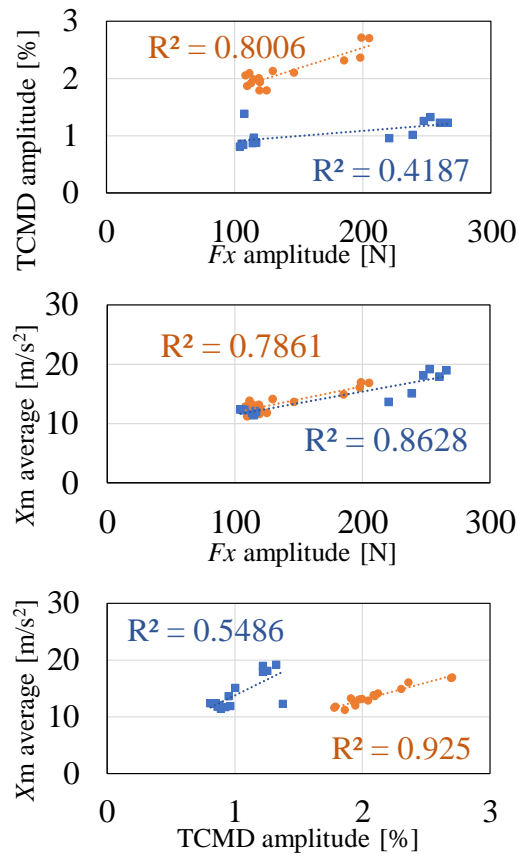


Fig.2-10 Correlation between X_m average, TCMD amplitude and F_x amplitude

2.3.3 ボールエンドミルの凹凸面の仕上げ切削

機械 M による $\phi 8$ ボールエンドミルを使用して主軸回転数 3600min^{-1} および 4000min^{-1} にて凸面切削加工時のボールエンドミル加工点の角度 θ に対する F_x の値および X_m のグラフを図 2-11 に示す. ここで加工点の角度 θ に起因する加工現象の変化の要因を避けるため, 主分力成分となる F_x に着目する. またサーボ情報の TCMD 振幅も取得したが, 負荷が小さく差異を検出することができなかった. 主軸回転数 3600min^{-1} は比較的安定で 4000min^{-1} は不安定であるが, どちらも X_m は $\theta=15^\circ$, F_x は $\theta=30^\circ$ 以上の角度で値や振幅が増加傾向にある. また側面加工時と同様 F_x の振幅に比べ X_m の値が感度良く検出されている. 4000min^{-1} 加工時を詳細に解析するため $\theta=15^\circ$ (R 先端付近), 45° , 75° (側面付近) のそれぞれ周囲 $\pm 2.5^\circ$ の範囲の F_x を FFT 解析した結果とその加工面の接写写真を図 2-12 に示す. $\theta=15^\circ$ では切削目にびびり振動はみられなかったが, $\theta=45^\circ$ および 75° では切削目にびびり振動がみられ, 最大値を示す F_x の周波数はいずれも 2110Hz であった. 特定の角度毎に F_x の振幅と X_m の最大値を回転数毎にプロットしたものを図 2-13 に示す.

$\phi 8$ ボールエンドミルはホルダ端面を固定端とした一端固定で他端自由のほりとモデル化した場合, 曲げの固有振動数は一般的に次式であらわされる.

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2-2)$$

ただし, λ_n は n 次の無次元定数, L は工具突出し量, E は縦弾性係数, I は断面二次モーメント, ρ は密度, A は断面積である. ここで, 工具断面形状を丸, 1 次モードの振動と考慮し $I=\pi D^2/64$, $A=\pi D^2/4$, $\lambda_1=1.875$ とすると, (2-2)式は,

$$f_1 = 0.14 \frac{D}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-3)$$

となる. $D=0.008$ m, $L=0.072$ m, $E=4.6 \times 10^{11}$ Pa, $\rho=14900$ kg/m^3 とすると, $f_1=1200$ Hz と導出される. 凹凸面の加工時の F_x の FFT 解析からわかったびびり振動が生じたとき固有振動数 $f_2=2100$ Hz 前後であった. ドリル加工のように工具が長く突き出た場合, 加工中の固有振動数は他端が弾性支持になり, その比が最大約 2 程度になることが知られている²⁻⁹⁾. 本報の場合も突き出し長さ $9D$ とドリル並に長く, 実加工時には加工

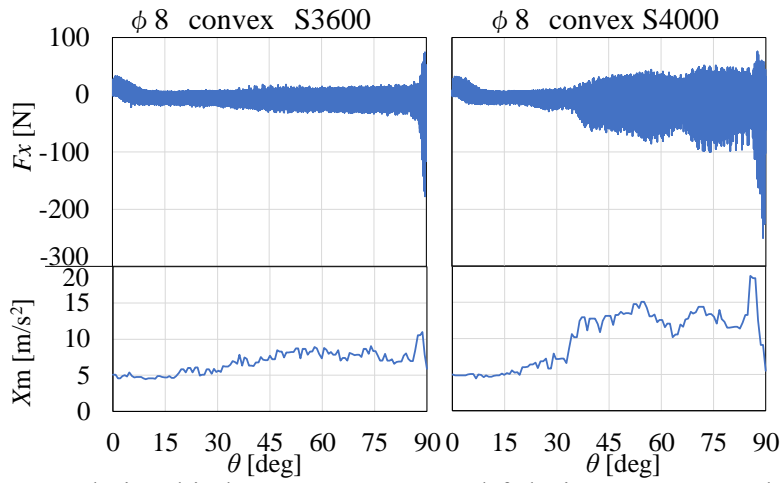


Fig.2-11 Relationship between F_x , X_m and θ during convex machining at 3600min^{-1} and 4000min^{-1} .

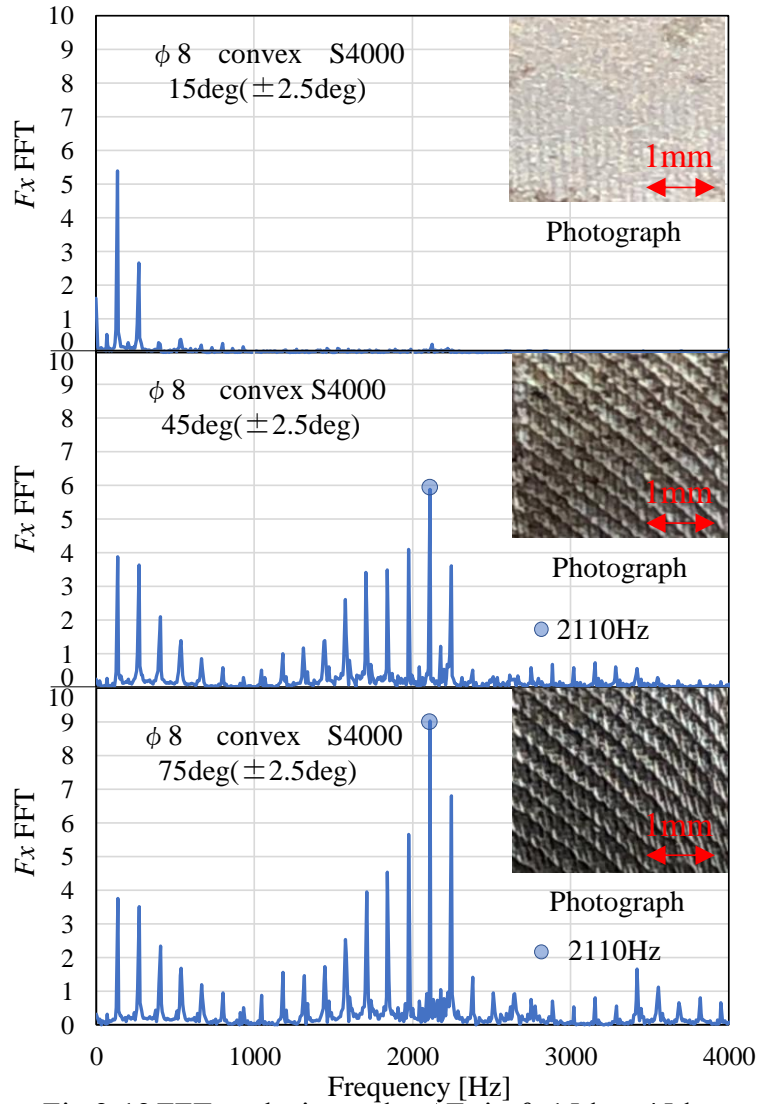


Fig.2-12 FFT analysis result of F_x in $\theta=15\text{deg}$, 45deg , and 75deg during convex face machining.

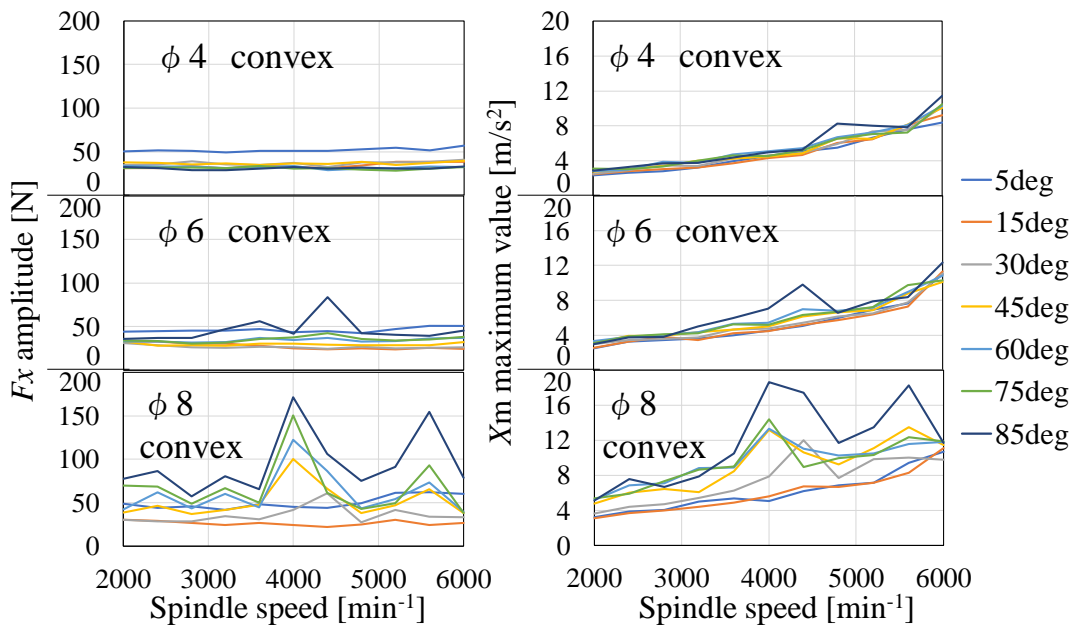


Fig.2-13 Relationship between F_x amplitude, X_m maximum value and spindle speed when machining convex surfaces.

点に負荷がかかると一端固定のほりから、加工点で弾性支持されたモードに変化することが想定される。モード変化前後の周波数比は $f_2/f_1=1.75$ であった。加工点を完全支持としたとき $f_2/f_1=4.39$ となる。ドリル加工の実測で最大 $f_2/f_1=2$ 程度とされ、 $f_2/f_1=1.75$ は妥当でと考えられ、複雑なびびり振動の現象であることもわかる。また図 2-13 で $\phi 8$ に比べ $\phi 6$ で極大を示す回転数が高いが、式(2-3)において $\varepsilon=L/D$ として ε が一定となるよう変化させる場合、 f_1 は $(1/D)$ に比例し、 $\phi 6$ と $\phi 4$ の f_1 はそれぞれ1600Hz、2400Hzに上昇するためと考えられる。したがって ε が同じなら、工具径が大きいほど固有振動数 f_1 が低くなる。さらに同一の半径方向切込み・送り量の場合、工具の切れ刃と工作物の接触長さの増大も影響し、低い回転数でびびり振動が生じやすい傾向になるものと考えられる。さらに $\phi 8$ ボールエンドミルを使用して主軸回転数 3600min^{-1} および 4000min^{-1} にて凹面切削加工時のボールエンドミル加工点の角度に対する F_x の値および X_m のグラフを図 2-14 に示す。凸面とほぼ同様の傾向を示すが、 4000min^{-1} の $\theta=30^\circ$ 以上の角度のびびり振動が若干大きい。凸面同様 4000min^{-1} 加工時の $\theta=15^\circ$ 、 45° 、 75° におけるFFT解析結果と接写写真を図 2-15 に示す。FFT解析結果から、びびり振動が生じる際の最大値の周波数は2115Hzと凸面加工時と類似した値となったため、再現性の高い現象であることもわかる。凸面同様に、凹面加工時の特定の角度毎に F_x の振幅と X_m の最大値を回転数毎にプロットしたものを図 2-16 に示す。

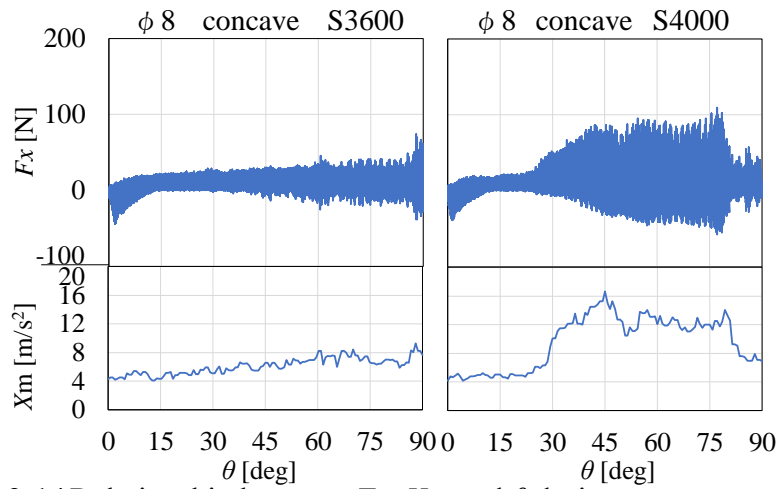


Fig.2-14 Relationship between F_x , X_m and θ during concave machining at 3600min⁻¹ and 4000min⁻¹.

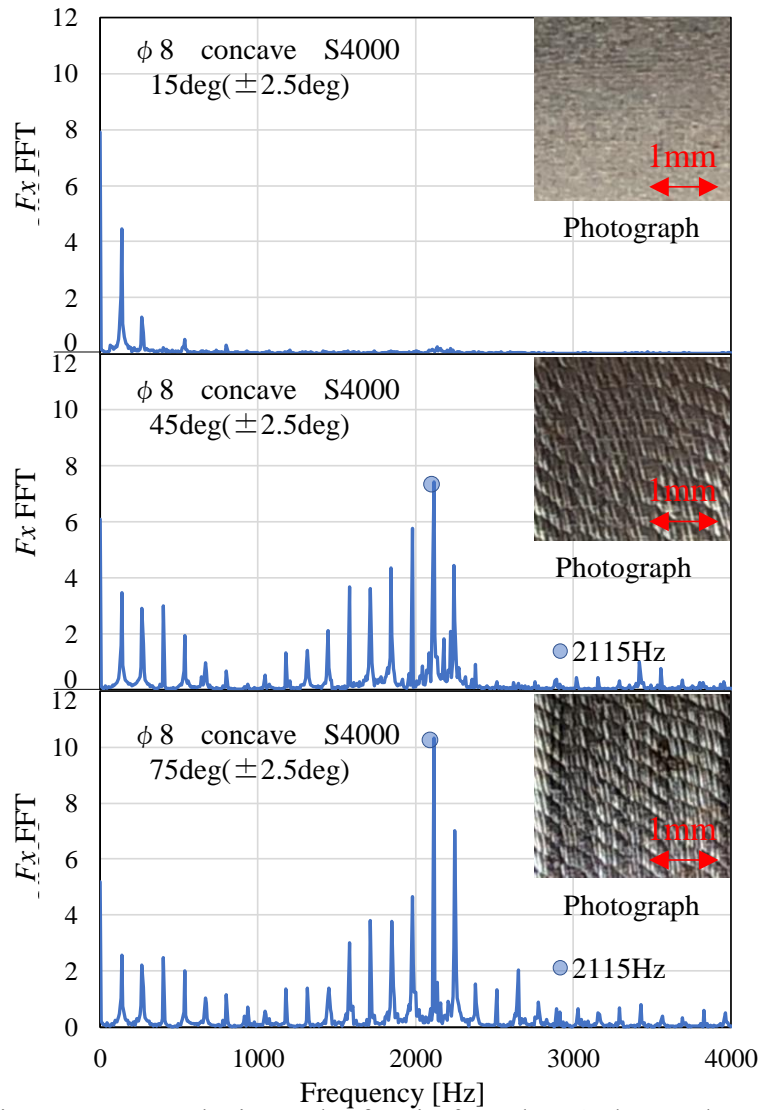


Fig.2-15 FFT analysis result of F_x in $\theta=15\text{deg}$, 45deg , and 75deg during concave face machining.

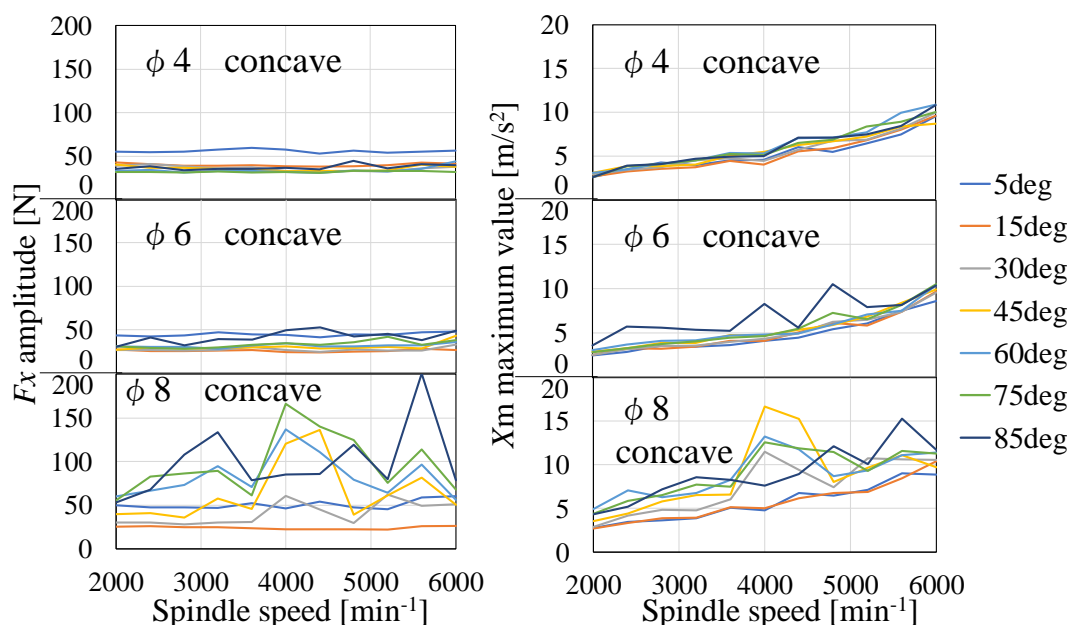


Fig.2-16 Relationship between F_x amplitude, X_m maximum value and spindle speed when machining concave surfaces.

図 2-13 とあわせて $\phi 4$ の主軸回転数 4000min^{-1} 付近に共通して極大値がみられる。凸面でも同様の位置に大きな数値がみられた。複雑な曲面形状のボールエンドミルの加工では、角度と回転数だけでなく工具径や突き出し比 $\varepsilon=L/D$ もびびり振動に影響することがわかった。また、この場合 X_m の感度が高いので、小径エンドミルを使う場合などでサーボモニタ等の従来手法よりも有効だということがわかった。

2.3.4 ボールエンドミル加工におけるケーススタディ

前節の結果を考慮し、機械 M で半球凹面の仕上げ加工のケーススタディを実施した。対象は図 2-17 に示すように SR25、 $\phi 8$ ボールエンドミルで突出し長さ仕上げ代は前節と同様とした。切削速度の変化を小さくするため、 $\theta=30^\circ$ 毎に 3 分割し、 $90^\circ\sim 60^\circ$ は 3600min^{-1} 、 $60^\circ\sim 30^\circ$ は 4800min^{-1} 、 $30^\circ\sim 0^\circ$ は 6000min^{-1} 、テーブル送り量 0.2mm/tooth で、スパイラルかけ下がり加工を実施した。切削後表面の写真を図 2-18 に示す。観察面①(3600min^{-1})、②(4800min^{-1})、③(6000min^{-1})は実験を実施したときとテーブルに対する向きが同じであり、びびり振動は生じなかったが、観察面④(3600min^{-1})、⑤(4800min^{-1})に関してはびびり振動が発生した痕跡がみられた。また、この痕跡は球面の 180° 対象の位置にも発生していた。これはマシニングセンタのテーブルには XY 軸方向によって機械剛性などの異方性があることを示している。加工時

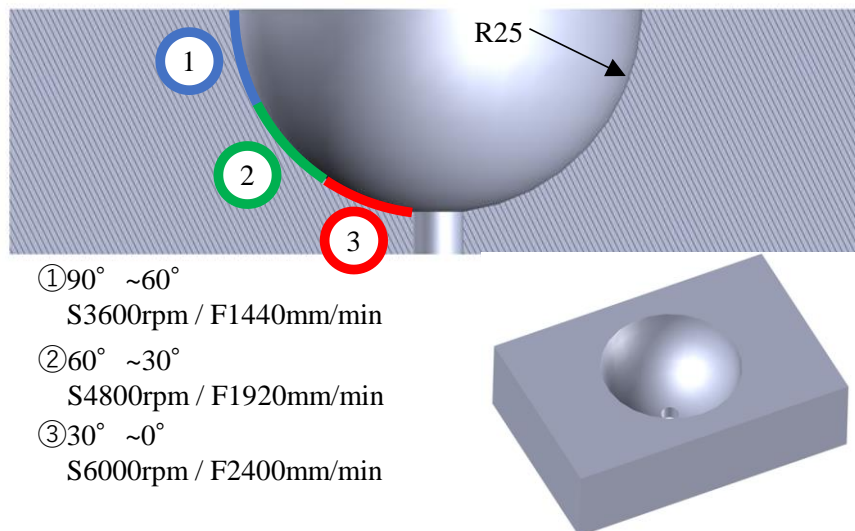


Fig.2-17 Workpiece geometry and cutting conditions in the case study.

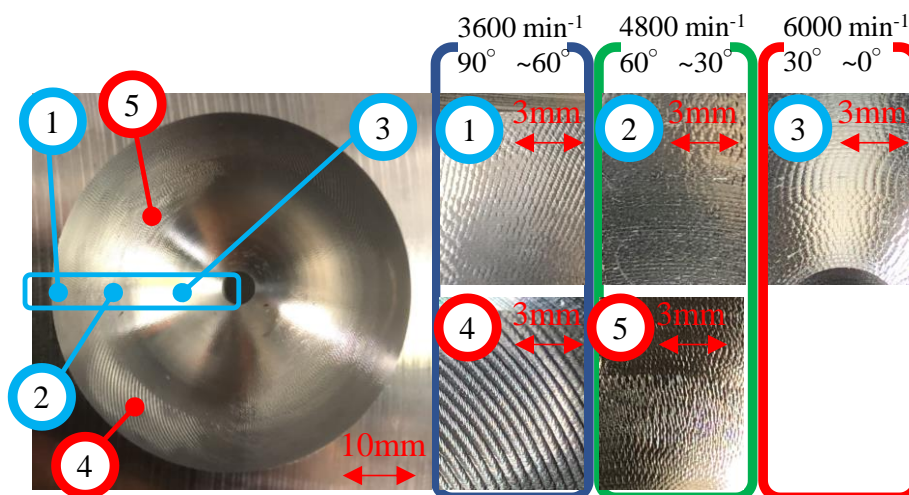


Fig.2-18 Surface after test workpiece finish.

の X_m を図 2-19 に示す. X_m の波形を確認すると, 3600min^{-1} 加工時はスパイラル XY 平面 1 周期 5.5s 内に 2 つのピークが確認できた. このことからびびり振動が 1 周当たり 2 か所で生じていることが予想され, 観察面とも一致する. 4800min^{-1} 加工時にも 1 周期 3.6s 内に 2 つのピークが確認でき, 観察面と一致した. さらに X_m のピークで R_m も大きくなる場合も多く, 曲げねじりの連成となる高い周波数²⁻²⁾または曲げと主軸系の回転方向の振動が混じる複雑な振動もみられた. これらより, 機械の XY 方向の異方性に起因するような曲げだけでなくねじりも含む微小なびびり振動の変化も含め, 開発したホルダシステムではそれらを検出することが可能であることがわかった.

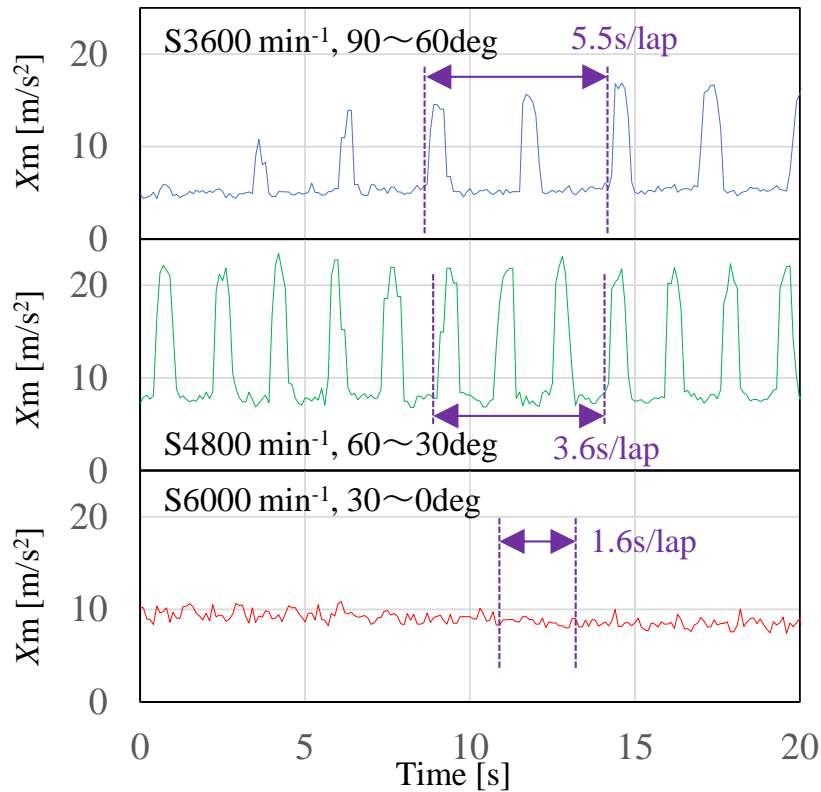


Fig.2-19 Relationship between X_m and time during test workpiece finish machining.

2.4 結論

マシニングセンタなどに用いられている回転工具ホルダに無線通信機能を具備したIoT対応のモニタリングシステムとして無線式多機能ホルダシステムの開発が進展する中、その新たな応用としてホルダの半径方向 X_m 、回転方向 R_m の振動加速度をモニタすると同時に、サーボ情報として主軸の電流およびテーブル上の切削力もモニタして考察した結果を以下にまとめる。

- (1) 空転時のホルダ振動加速度モニタにより、主軸の最高回転数の仕様差による主軸与圧や隙間などの影響を確認でき、とくにホルダの出力で感度良く検出できることがわかった。
- (2) スクエアエンドミルの側面切削において、スピンドル電流でもある程度の再生びびり振動モニタが可能であるが、切削力とホルダ振動の相関性が最も高い結果であった。
- (3) 工具突き出し (L) が長い ($L/D=9$) のボールエンドミルで仕上げ切削のような場合においては、強制びびり振動が顕著に現れ、その共振は刃先が弾性支持されたモードが混じり複雑な挙動を示すが、ホルダシステムはそのびびり振動を感度よく

検出できる。

- (4) ケーススタディより、工作機械軸方向のびびり振動の異方性をホルダシステムで検出可能であり、任意の切削角度・位置においてもびびり振動を感度よくリアルタイムモニタできたことから、複雑形状の仕上げ加工時にもびびり振動抑制による加工精度・品質向上に有効となる可能性を示すことができた。

参考文献

2-1) 新堂正俊, 松田亮, 古木辰也, 廣垣俊樹, 青山栄一, “無線ホルダシステムを用いたエンドミル加工時の工具内部温度の考察”, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.826 ,(2015), pp.1-15,00046.

2-2) 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, “無線多機能ホルダによるタップおよびエンドミル工具の回転方向振動モニタと現象解明”, 砥粒加工学会誌, Vol.61 No.12, (2017), pp.39-45.

2-3) 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, “無線多機能ホルダシステムとサーボ内部情報モニタを用いたエンドミル加工現象の解明”, 砥粒加工学会誌, Vol.63, No.1, (2019), pp.24-30.

2-4) 高澤拓也, 前田敏男, 天谷浩一, 矢野宏, “MT システムによる主軸寿命予知システムの開発”, 品質工学, Vol.20, No.6, (2012), pp.55-64

2-5) 品川幹, 社本英二, “案内面での摩擦減衰を考慮した工作機械のびびり振動安定性予測(基本的モデルの構築と摩擦および剛性がおよぼす影響の検討)”, 日本機械学会論文集C編, Vol.78, No.787, (2012), pp.1013-1025.

2-6) 山本隆将, 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, “無線ホルダシステムを用いた主軸状態診断と加工現象モニタの考察”, 砥粒加工学会誌, Vol.64, No.2, (2020), pp.91-97

2-7) 飯田幸作, “ころがり軸受の音響”, 精密機械, Vol.31, No.361, (1965), pp.139-146.

2-8) 山根八洲男, 山戸一弘, 柳耕, 鳴瀧則彦, “マシニングセンタ主軸用簡易動剛性評価法”, 精密工学会誌, Vol.65, No.1, (1999), pp.136-140.

2-9) 藤井洋, 丸井悦男, 江馬諭, “ドリルのびびり振動の発生機構”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.51, No.462, (1985), pp.436-445.

第 3 章

無線式多機能工具ホルダシステムの情報と 数値制御工作機械のサーボ内部情報の

CAM への統合

3.1 緒言

第 1 章でも述べたように、製造業の現場では IoT (Internet of Things) に基づく「つながる工場」に関する技術開発が求められており、スマートファクトリーの実現が求められている。スマートファクトリーでは加工現象を見える化し、適応制御を行うことが求められている。加工現象の見える化においてはマシニングセンタなどに用いられている回転工具ホルダに無線通信機能を具備した IoT 対応のモニタリングシステムの開発に取まれており、エンドミル加工における工具内部の温度モニタリング³⁻¹⁾、さらに難削材のタップ加工時の回転方向スティックスリップ振動や高速エンドミル加工の工具ねじり振動³⁻²⁾さらにびびり振動中のホルダ振動と工具温度の同時計測³⁻³⁾などで工具回転座標系でのモニタリング技術の有効性を示されている。しかしながら、それらモニタリングデータから適応制御をおこなった事例はほとんどない。

その一方で、加工現場では加工品質の管理には、工作機械の主軸機体差やわずかな仕様の違いなどによる差、経年変化の管理が重要と考えられる。しかしながら、動的な要因に関してはそれらを容易に計測する手法はなく、主軸モータ電流の差に着目したモニタ³⁻⁴⁾が検討されている程度である。さらに 5 軸制御マシニングセンタや高性能 CAM などの普及でボールエンドミルを用いた複雑形状の加工が増大しており、その場合に長い工具突出しでの加工が多用される。その加工環境では、びびり振動による加工トラブルが顕在化し、加工品質の管理がより難しくなっている。ボールエンドミルに対するびびり振動の知見としてワークや主軸フレームに加速度センサを貼り付けた例³⁻⁵⁾があるが、加工点から離れた位置のモニタで負荷の少ない仕上げ加工では検出が難しいことが予想される。つまり、加工品質の管理ができないために切削能率を落として対応しているのが現状である。

前章では無線ホルダシステムの新たな応用として、ボールエンドミルによる仕上げ加工についてモニタリングを実施し、その際に生じた工作機械やワークの異方性により一部でびびり振動が生じる現象に対し、無線ホルダシステムで十分な精度のモニタリングが可能であることを示した³⁻⁶⁾。しかしながら、そのモニタ結果の製造現場の高度化に向けた利活用についての検討に至っていなかった。

そこで本章では^{3-7,8)}、製造現場における無線ホルダシステムからのモニタリングデータを活用した加工改善の手法について検討を実施した。すなわち、加工現象の見える化から適応制御につながる技術開発の検討を試みた。最初に工作機械の主軸回転・送り軸制御のサーボ特性の検討を遂行して、工作機械の性能を詳細に把握した。次に前章のケーススタディの形状を対象に無線ホルダシステムにて加工振動をモニタリングした。この際、新たに工作機械 CNC から得られる情報を同時取得する技術を開発し、適応させた。さらに、無線ホルダシステムから得られる情報と CNC から得られる内部サーボ情報を統合し、CAM から出力される CL (Cutter location) に対してカラーマッピングにて表示する技術も開発した。これらを用いて、工作機械の性能を考慮しながら加工中に得られるモニタ情報に基づき切削条件を変化させることで適応制御を行い、加工品質を維持しながら能率の低下を最小限にする加工プログラムを作成する手法について検討した。

3.2 提案するモニタ手法および実験方法

3.2.1 無線ホルダシステムと使用する工作機械と CL に基づくカラーマッピング手法

無線ホルダシステムは第 2 章で用いたものと同機種であり、BT30 ホルダ内にある 2 つの圧電型加速度センサから半径方向を示す X_m と回転方向を示す R_m の 2 方向の振動加速度を計測可能としている。モニタする値はホルダ振動の実効値 RMS (Root Mean Square) であり、積分時間を 0.1s と設定しリアルタイムにアナログ演算し、A/D 変換した後にワイヤレス送信の転送周波数 50Hz、すなわち 0.02s 間隔で回転中のホルダより機外 PC に設置した受信機に向けて送信する仕様である。加速度センサの固有振動数は 20kHz で 10kHz 程度までの振動加速度の検出が可能であり、振動試験機上でホルダを X_m 方向に加振校正し、その時に $R_m = 0$ も確認して精度保証をしている。

マシニングセンタに搭載される CNC と外部 PC の接続は有線 LAN による接続であり、マシニングセンタの XYZ の現在位置情報や現在の主軸回転数などの情報を取得

した。 X_m , R_m と同時に取得することで、解析時においては時間経過による変化だけでなく、CAM から出力される CL における XY 座標平面上に X_m あるいは R_m の出力 (実効値であるので常に正の数) に対応して着色して表現するカラーマッピング手法を提案して、その実装を遂行した。

3.2.2 実験条件およびモニタ方法

実験に使用した縦型小型マシニングセンタの詳細を表 3-1 に示す。加工中の主軸の回転数変化時、切削送り速度変化時、それらの同時変化時のモニタ実験は空転状態にて実施した。

主軸回転数変化のモニタ実験は移動軸を停止した状態で実施した。主軸回転数を 0min^{-1} から 10000min^{-1} まで 1000min^{-1} 刻みで断続的に上昇させ、 10000min^{-1} に達すると 0min^{-1} まで連続して減少させた。次に主軸回転数を 0min^{-1} から 10000min^{-1} まで連続して上昇させ、 10000min^{-1} に達すると 0min^{-1} まで 1000min^{-1} まで断続的に減少させ、その角加減速について検討した。

送り速度変化の加減速モニタ実験はマシニングセンタ Y 軸を 300mm 直線切削送りで移動させた。この際の指令送り速度の指令は $54000\text{mm}/\text{min}$ で、往復運動で加減速について検討した。


次に主軸回転数と送り速度を同時に変化させた際のモニタ実験は主軸を 1000min^{-1} から 6000min^{-1} まで 1000min^{-1} ずつ加速させて実施した。送り速度は $400\text{mm}/\text{min}$ から $2400\text{mm}/\text{min}$ まで $0.4\text{mm}/\text{rev}$ を保つように指令した。指令する際は主軸回転数変化、送り速度変化を同一ブロックで指令し、Y 軸+方向に動作させた。その後、 5000min^{-1} から 10000min^{-1} まで、 10000min^{-1} から 5000min^{-1} まで、 6000min^{-1} から 1000min^{-1} まで加減速させた。その際も同様に回転送り量を一定 ($0.4\text{mm}/\text{rev}$) に保つように同一ブロックで主軸回転数変化、送り速度変化を指令した。

上記実験の際のマシニングセンタ動作中の主軸トルク指令電流値{以下、定格電流に対する割合 TCMD(torque command)値}、座標位置情報(実送り速度情報)、実回転数情報は FANUC 社 / SERVO VIEWER を用いて、CNC 内部から情報を取得した。

3.2.3 ケーススタディ加工条件

自由曲面の創成を想定して、半球凹面の仕上げ加工のケーススタディを実施した。実験時のセットアップと工具刃先と半径方向振動加速度 X_m の検知方向、回転振動加速度 R_m の検知方向の関係模式図、切削方向、加工形状の詳細を図 3-1、使用した工具と切削条件を表 3-2 に示す。対象仕上げ形状は図 3-1 に示すように $\text{SR}25\text{mm}$

Table3-1 Machines information.

Machine type	α -D21MiB5ADV	
Manufacturer	FANUC	
Max speed[rpm]	10000	
Adapter type	BT30	

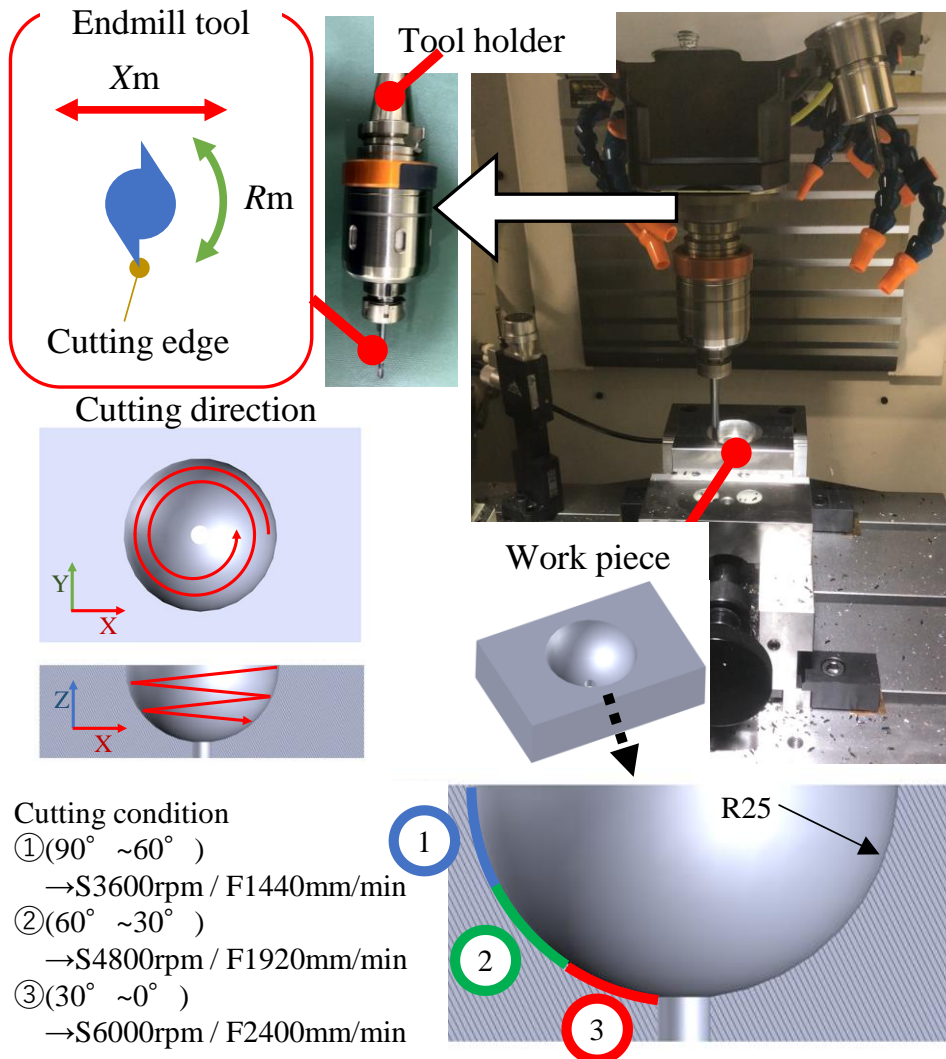


Fig.3-1 Setting, machining path, workpiece geometry and cutting conditions in the case study.

Table3-2 Tool information and cutting condition in the case study.

Tool information		Cutting condition	
Tool model	MP-2MB-4R	Speed	3600-6000 rpm
Diameter	8 mm	Feed	0.2 mm/tooth
Length(L/D)	72 mm (9D)	A_p	0.2 mm
Num of edge	2	Coolant	Dry

の半球凹面であり被削材は S50C とした。使用工具は $\phi 8$ ボールエンドミルで突出し長さ 72mm, 仕上げ代は 0.2mm とした。切削速度の変化を小さくするため, $\theta=30^\circ$ 毎に 3 分割し, $90^\circ\sim 60^\circ$ は 3600min^{-1} , $60^\circ\sim 30^\circ$ は 4800min^{-1} , $30^\circ\sim 0^\circ$ は 6000min^{-1} , テーブル送り量 0.2mm/tooth で, CL はスパイラルかけ下がりとして加工を実施した。この際, 前節同様マシニングセンタ動作中の TCMD 値, 座標位置情報, 実回転数情報は FANUC 社 / SERVO VIEWER を用いて取得した。同時に無線ホルダシステムから X_m , R_m 情報の取得と, これら計測点での位置情報同時に取得した。

3.3 実験結果および考察

3.3.1 主軸回転変化の角加減速特性

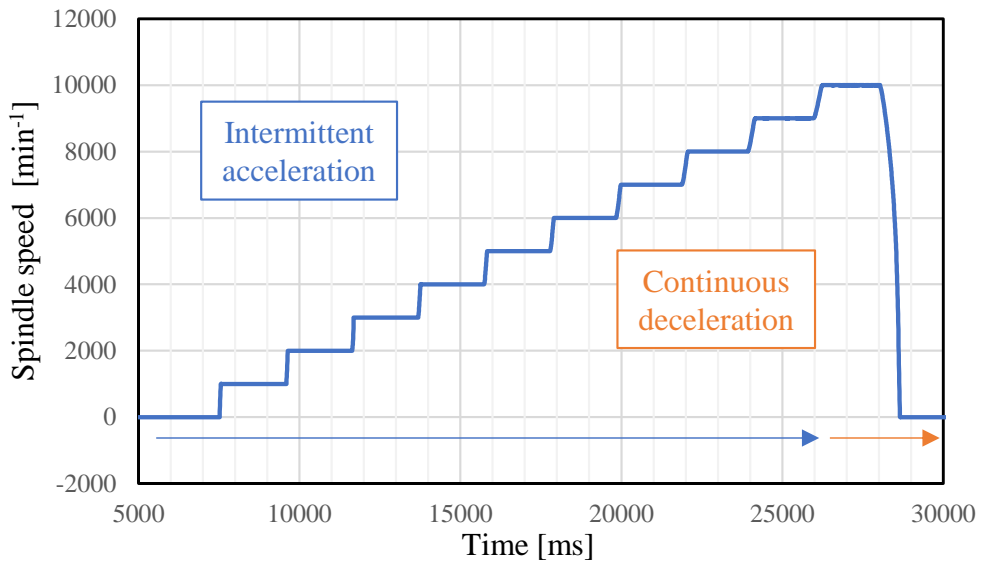
エンドミル加工中に主軸回転速度を変化させる場合, 加工面品質の維持のためには主軸の角加速度特性が重要であることが判明³⁻⁹⁾している。そこで主軸回転数変更指令に対する特性を調べるため主軸回転数を 0min^{-1} から 10000min^{-1} まで 1000min^{-1} 刻みで断続的に上昇させ, 10000min^{-1} に達すると 0min^{-1} まで連続して減少させたときの回転数の時間変化を図 3-2(a) に示す。同様に主軸回転数を 0min^{-1} から 10000min^{-1} まで連続して上昇させ, 10000min^{-1} に達すると 0min^{-1} まで 1000min^{-1} まで断続的に減少させたときの回転数の時間変化を図 3-2(b) に示す。T を時定数, C を減速時に 0min^{-1} になるまで所要した時間として加速時を次式(3-1) の一次遅れ系で, 減速時を次式(3-2)の一次遅れ系から修正した指数関数型で予想できるかを検討した。

$$x(t) = 10000 \times (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (3-1)$$

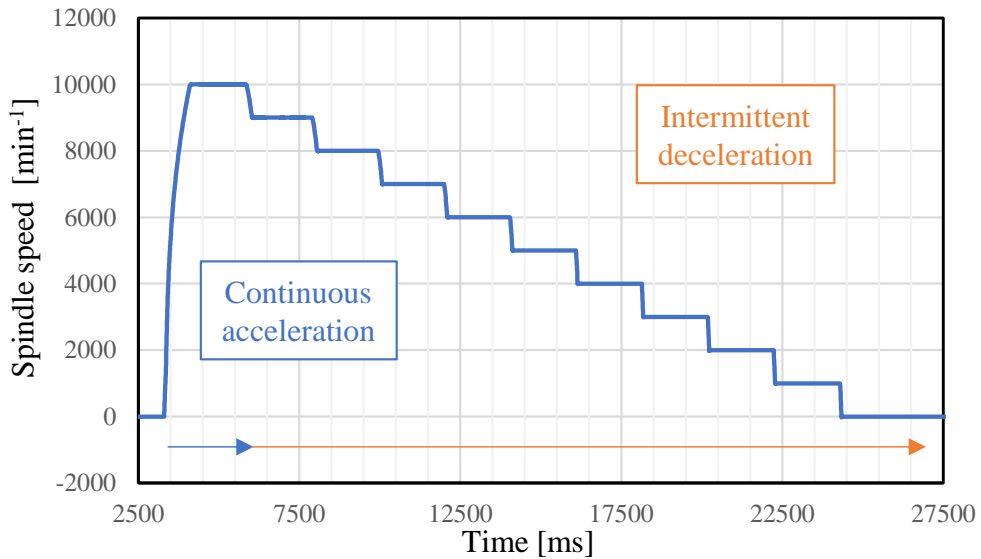
$$x(t) = 10000 \times \left(1 - e^{\frac{C+t}{T}}\right) \quad (3-2)$$

連続的に加速させた際の経過時間と断続的に加速させた際の累積経過時間と(3-1)式の時定数 $T=280\text{ms}, 510\text{ms}$ とした際のグラフを図 3-3(a) に示す。(3-1)式を用いることで連続的に加速する際は時定数 $T=280\text{ms}$, 断続的に加速する際の累計は時定数 $T=510\text{ms}$ でほぼ予想することができた。連続的に加速する際と断続的に加速する際には加減速にかかる時間分時定数に差が出ているものと考えられる。連続・断続共に 9000min^{-1} から 10000min^{-1} にかけてはずれが生じるが 0min^{-1} から 8000min^{-1} 付近までは大きな差がなくその領域では再現することができた。同様にして連続的・断続的に減速させた際の経過・累積経過時間の関係と, (3-2)式で再現した際のグラフを図 3-3(b) に示す。(3-2)式を用いることで連続的に減速する際は $T=190\text{ms}$, $C=-615\text{ms}$, 断

続的に加速する際の累計は $T=380\text{ms}$, $C=-980\text{ms}$ でほぼ予想することができた. 加速時と同じく連測・断続共に 10000min^{-1} から 9000min^{-1} にかけてはずれが生じるが, 8000min^{-1} から 0min^{-1} 付近までは大きな差がなくその領域でほぼ予想することができた.

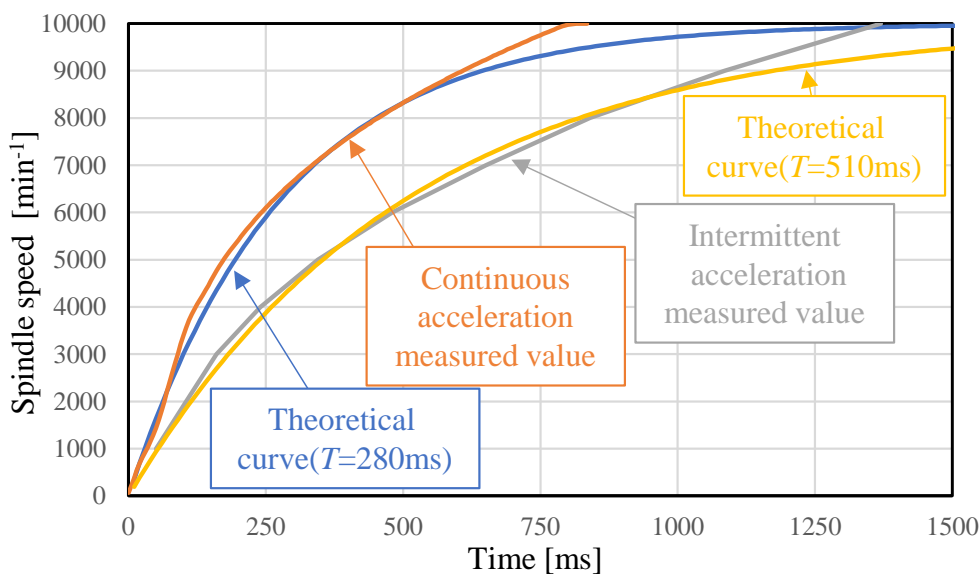


(a) Intermittent acceleration, Continuous deceleration

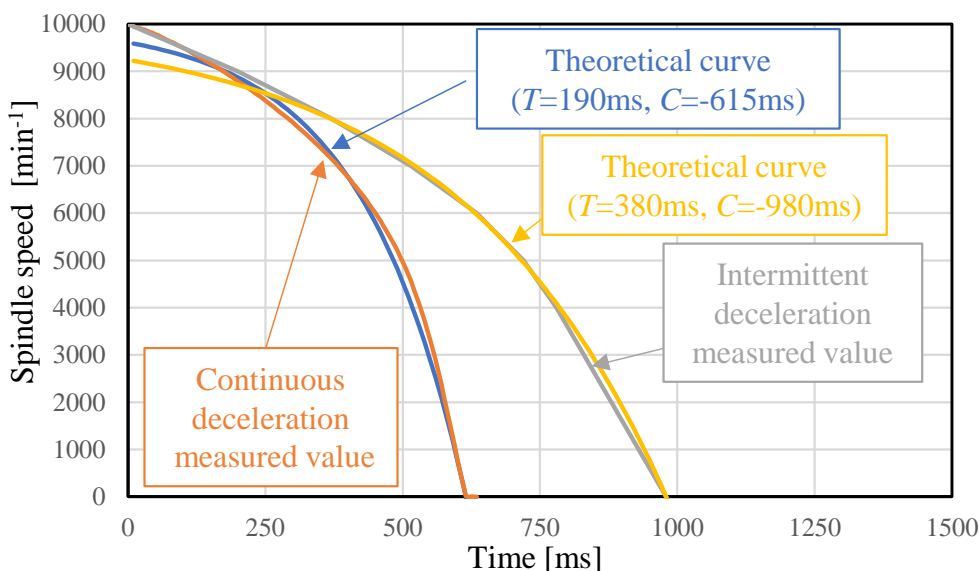


(b) Continuous acceleration, Intermittent deceleration

Fig.3-2 Time variation due to acceleration/deceleration of spindle speed.



(a) During acceleration



(b) During deceleration

Fig.3-3 Relationship between spindle speed and time during spindle acceleration/deceleration.

3.3.2 送り速度変化の加減速特性

送り速度変更指令に対する特性を調べるために Y 軸を 300mm 直線切削送りさせたときの送り速度の時間変化を図 3-4 に、加速度の時間変化を図 3-5 に示す。CNC パラメータを確認すると、機械 Y 軸の送り速度の変化はベル型であり、その加速度パラメータは 1000mm/s と設定した。また、加速度変化時間のパラメータは 48ms と設定した。

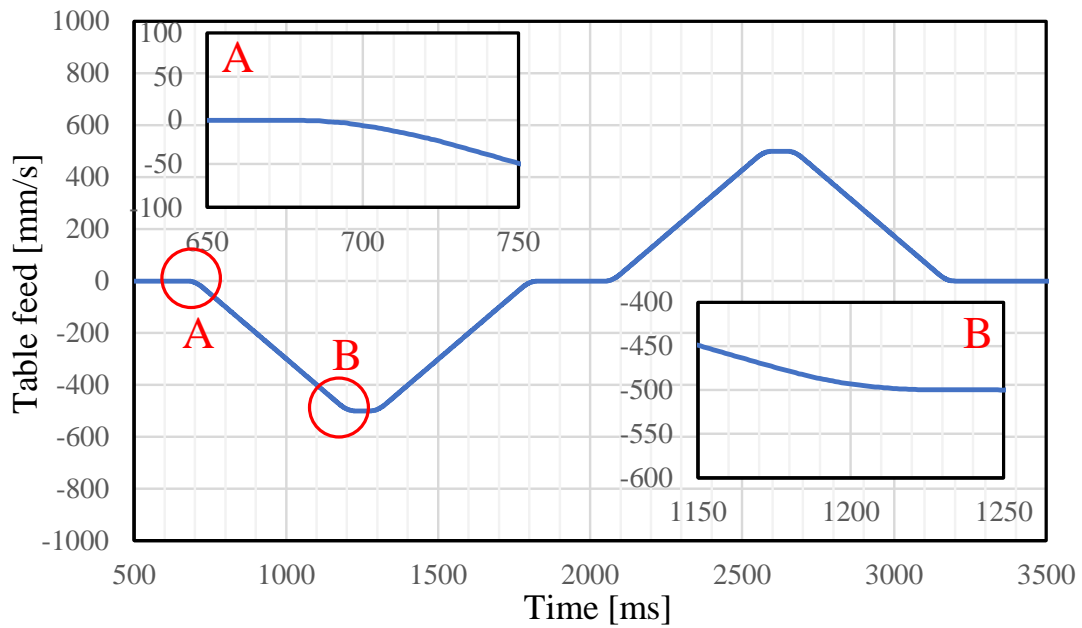


Fig.3-4 Relationship between feed rate and time during feed axis acceleration/deceleration.

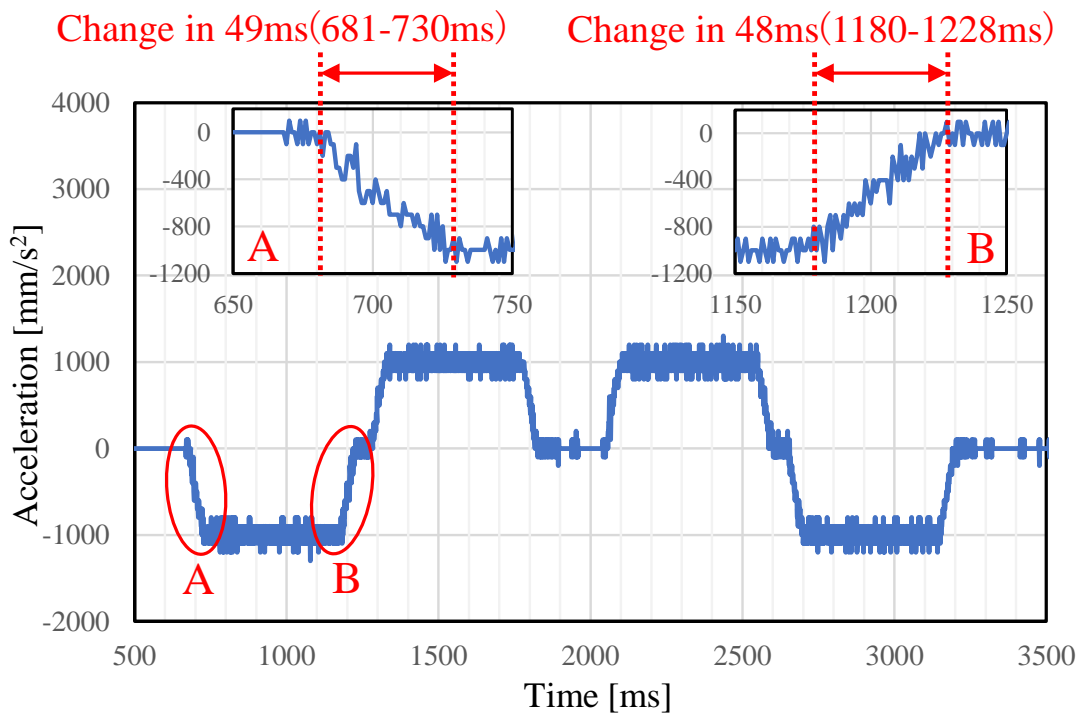


Fig.3-5 Relationship between acceleration and time during feed axis acceleration/deceleration.

実際の送り速度を確認すると、図 3-4, 3-5 の変化点 A,B では加速度がそれぞれ 48ms 前後で線形的に変化しており、パラメータに従った値で加速度が変化していることが確認できた。送り速度が 0 から 1000m/s², 1000 から 0 m/s² に変化する間、加速度が各 48ms, 合計 96ms で線形的に変化していたことから次式で速度変化を計算できる。

0<t≤0.096 のとき

$$\begin{aligned} |\Delta v(t)| &= 2 \times \frac{a}{2t_0} \times \left(\frac{t}{2}\right)^2 \\ &= 5208.3t^2 \end{aligned} \quad (3-3)$$

t > 0.096 のとき

$$\begin{aligned} |\Delta v(t)| &= a(t - 2 \times t_0) + 2 \times \frac{a}{2t_0} \times t_0^2 \\ &= 1000t - 48 \end{aligned} \quad (3-4)$$

これらの式より、指令時の送り速度に依存せず、送り速度の変化量が一定であれば送り速度加減速時間は一定となることがわかった。

3.3.3 回転送り量一定での主軸送り速度同時変化の特性

主軸回転数と送り速度を同時に変化させた際の特性調査のために主軸回転数を 1000min⁻¹ から 6000min⁻¹ まで 1000min⁻¹ ずつ加速させながら、同じタイミングで送り速度は 400mm/min から 2400mm/min まで 0.4mm/rev を保つように指令した。主軸回転数実測値と送り速度の実測値をそれぞれ 10000min⁻¹, 4000mm/min が 1 となるように規格化し、図 3-6 に示した。同様に 5000min⁻¹ から 10000min⁻¹ まで加速したときを図 3-7 に、10000min⁻¹ から 5000min⁻¹ まで減速したときを図 3-8 に、6000min⁻¹ から 1000min⁻¹ まで減速したときを図 3-9 に示す。いずれのグラフも主軸回転の加減速の方が送り速度の加減速よりも早く開始しており、これによって生じる 1 刃送りの変動が加工(特に仕上表面)に影響すると考えられた。主軸回転と送り速度の加減速の関係は図 3-6 中 A, 図 3-9 中 D のように交差せず送り速度が指令値に達するより先に回転数が指令値に達する場合と、図 3-7 中 B, 図 3-8 中 C のように送り回転数が指令値に達するより速度が指令値に達するほうが早い場合があることがわかった。そこでその現象をモデル化するため、図 3-6 中に示すように主軸回転数の加減速が開始する時間(以下 SS)・終了する時間(以下 SE), 送り速度の加減速が開始する時間(以下 FS)・終了する時間(以下 FE)として、評価を実施した。SE-SS を回転数変更時間, FE-FS を送り速度変更時間, FS-SS を加減速開始時間のタイムラグとし、それぞれ指令回転数を横軸にプロットしたものを図 3-10,3-11,3-12 に示す。データを検討するにあたって、数式による近似

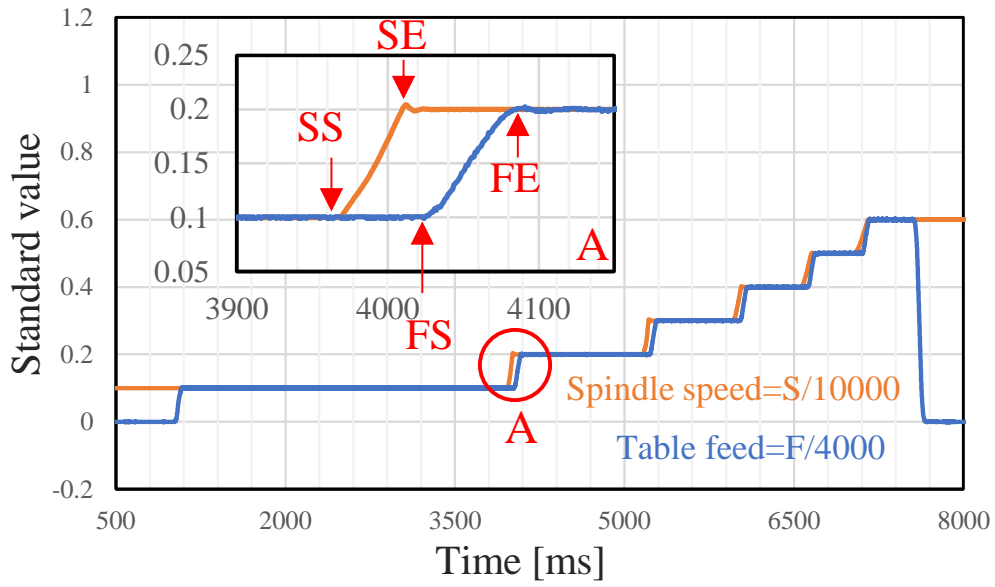


Fig.3-6 Change in spindle speed and table feed during acceleration from 1000 to 6000 min^{-1}

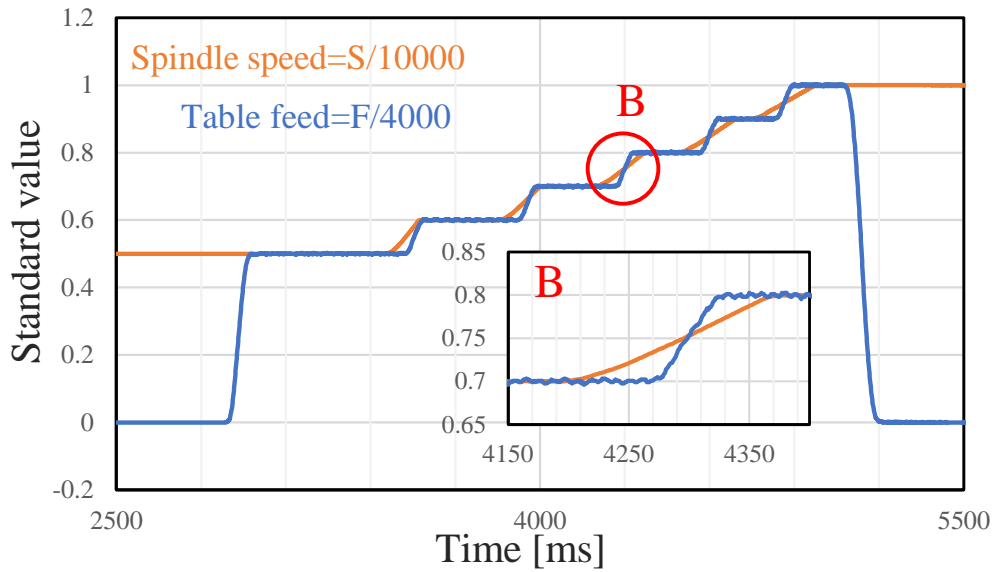


Fig.3-7 Change in spindle speed and table feed during acceleration from 5000 to 10000 min^{-1}

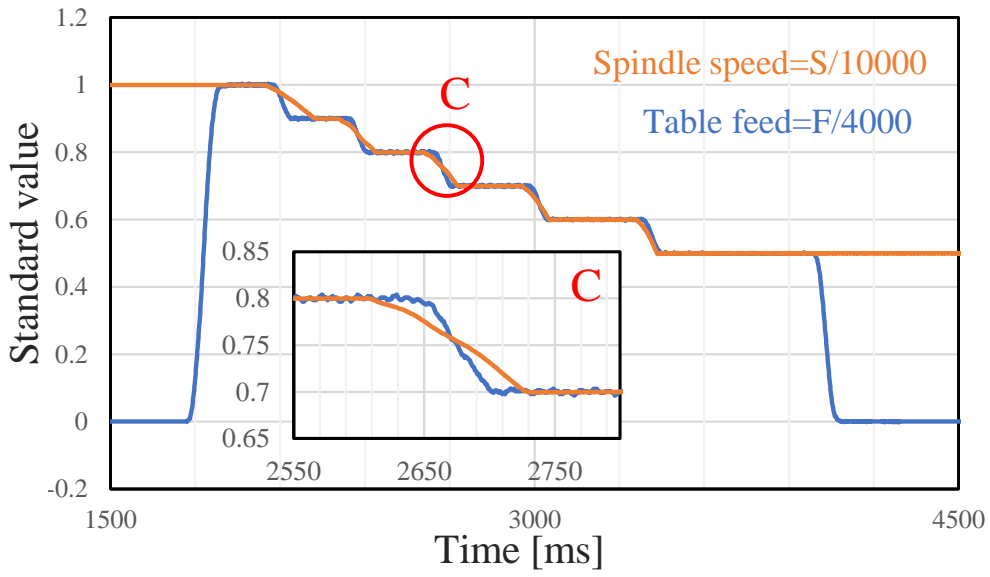


Fig.3-8 Change in spindle speed and table feed during deceleration from 10000 to 5000 min^{-1}

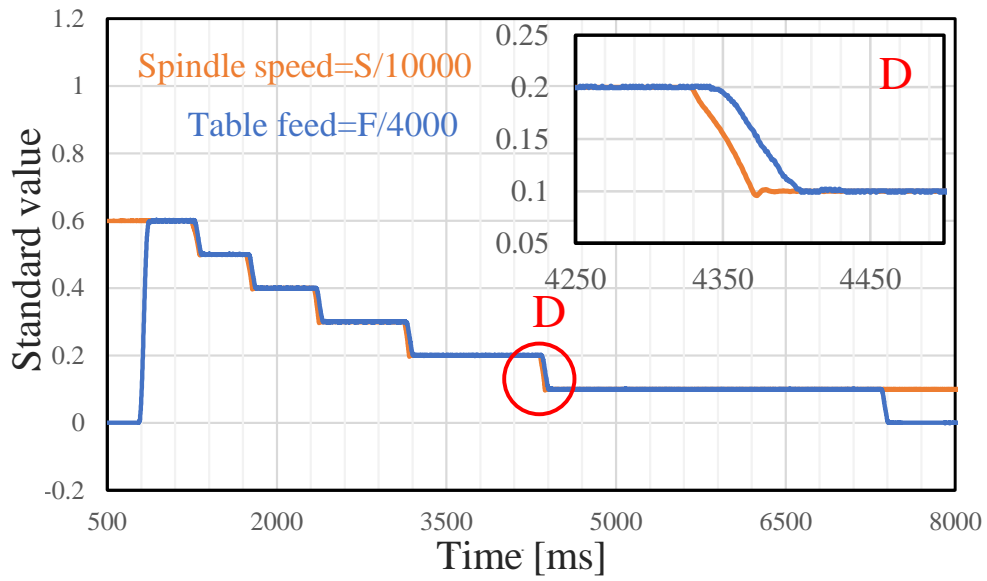
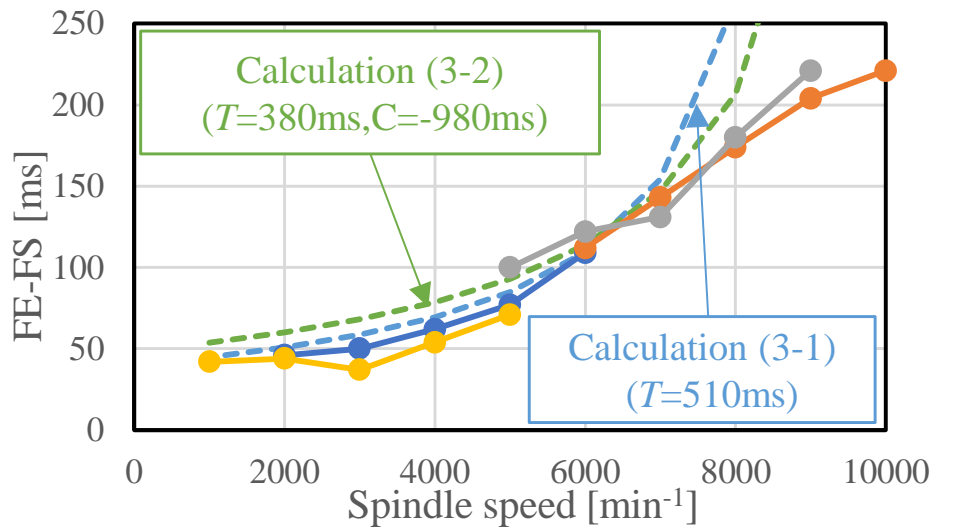
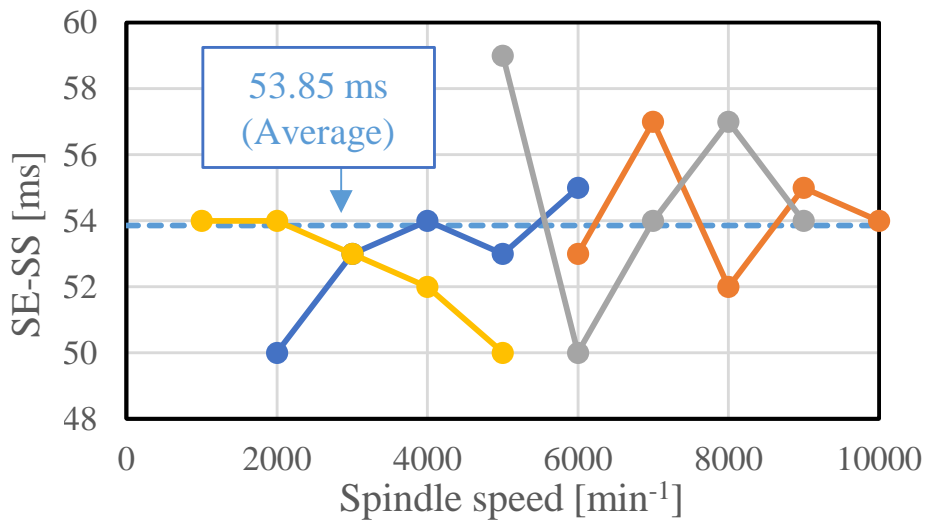


Fig.3-9 Change in spindle speed and table feed during deceleration from 6000 to 10000 min^{-1}



●—● Acceleration from 1000 to 6000 min⁻¹ ●—● Deceleration from 10000 to 6000 min⁻¹
●—● Acceleration from 6000 to 10000 min⁻¹ ●—● Deceleration from 6000 to 1000 min⁻¹

Fig.3-10 Relationship between FE-FS time and spindle speed command.



●—● Acceleration from 1000 to 6000 min⁻¹ ●—● Deceleration from 10000 to 6000 min⁻¹
●—● Acceleration from 6000 to 10000 min⁻¹ ●—● Deceleration from 6000 to 1000 min⁻¹

Fig.3-11 Relationship between SE-SS time and spindle speed command.

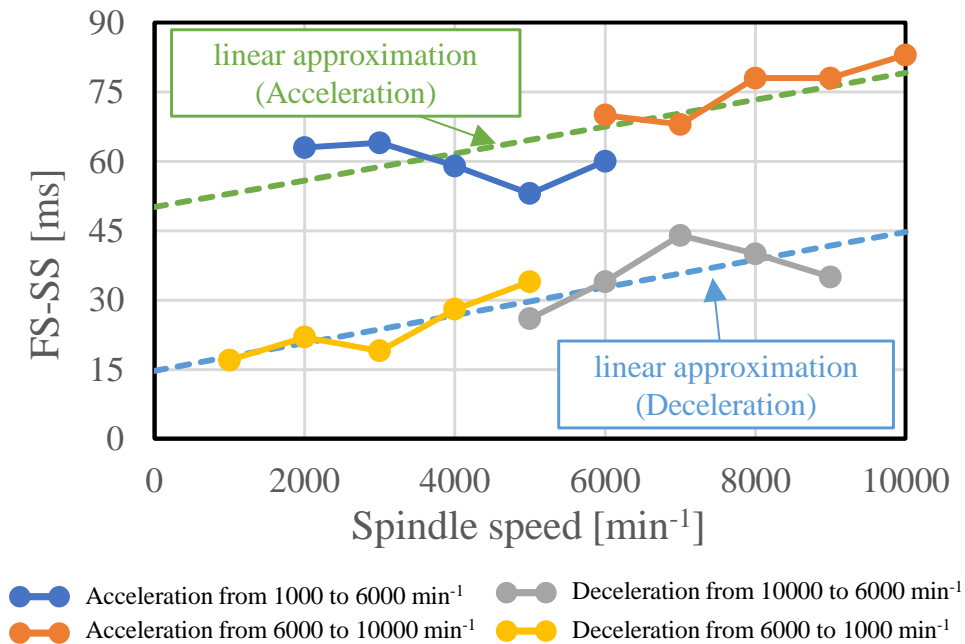


Fig.3-12 Relationship between FE-SS time and spindle speed command.

を用いた。主軸加減速時間は3.3.1節で求めた数式(3-1),(3-2)を用いて加速時間の差を加減速それぞれにプロットしたが、およそ 7000min^{-1} 付近までは予想できた。送り速度加減速時間に関しては3.3.2節より、どの送り速度においても変化する送り速度が一定であれば加速時間も一定であることがわかったので、今回取得した平均値をプロットした。加減速タイムラグは加速時・減速時それぞれに対して得られたデータから1次関数にて近似した。以上により、主軸回転数と送り速度の時間変化を図 3-13 のようにモデル化した。すなわち回転送り量の不一致度合いを示す指標として、図 3-13 中に示すように4直線からなる面積を x とした。さらに面積 x は主軸回転数規格値を S 、送り速度規格値を F とし、面積 x を図 3-13 中に示す変化時間で割ることによって得られる1s当たりの面積 x の変化量 Δx は以下の式で表現される。

$$\Delta x = \frac{\int |S-F| dt}{\Delta t} \quad (3-5)$$

任意の指令回転数に向けて 1000min^{-1} 変化させたときに1s当たりのタイムラグ面積平均変化量 Δx をプロットしたのが図 3-14 である。図 3-6 に示した $1000-6000\text{min}^{-1}$ 変化時の1回転送りの変化量の変動を図 3-15 示す。図 3-14, 3-15 においてポイント A-E は同じ位置から取得したデータとなる。両図を比較すると、1回転送りが短い時間に大きく変動している個所ほど Δx の値が大きくなることがわかる。

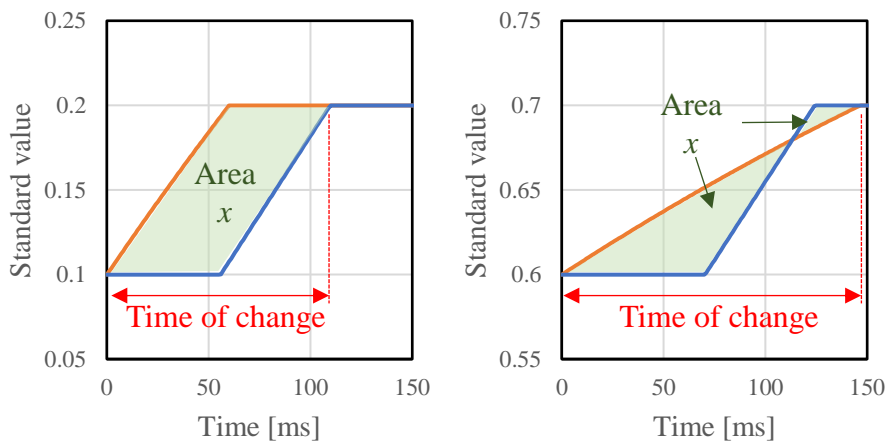


Fig.3-13 Delay time model for simultaneous spindle speed and table feed commands.

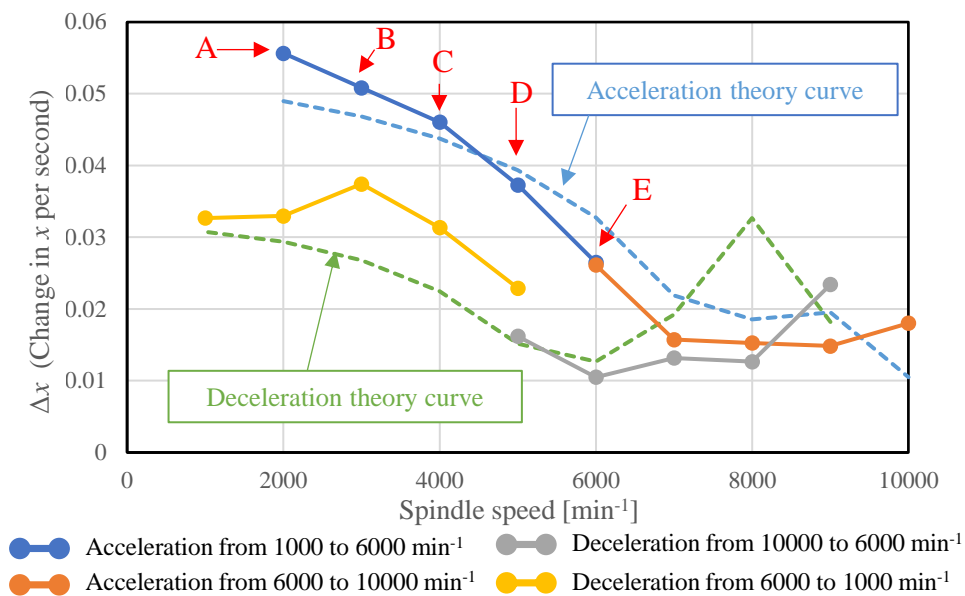


Fig.3-14 Relationship between spindle speed and Δx per second at spindle speed change command.

3.3.4 ボールエンドミル加工における仕上げ加工

SR25mm 半球凹面にスパイラル仕上げ加工を実施したときの仕上げ面全体の写真を図 3-16, X_m の値を CL における XY 座標値でカラーマッピングしたグラフを図 3-17 に示す. 仕上げ加工中に図 3-1 領域①, ②で 1 周毎に 2 回大きなびびり音が観察された. X_m のカラーマッピングを確認すると, 領域①で第一象限, 第三象限に赤色に近い大きな値が得られ, 領域②では第二象限, 第四象限に赤色に近い大きな値が得られており, びびり音と対応していることが確認できた. 実際の切削後表面観察とカラ

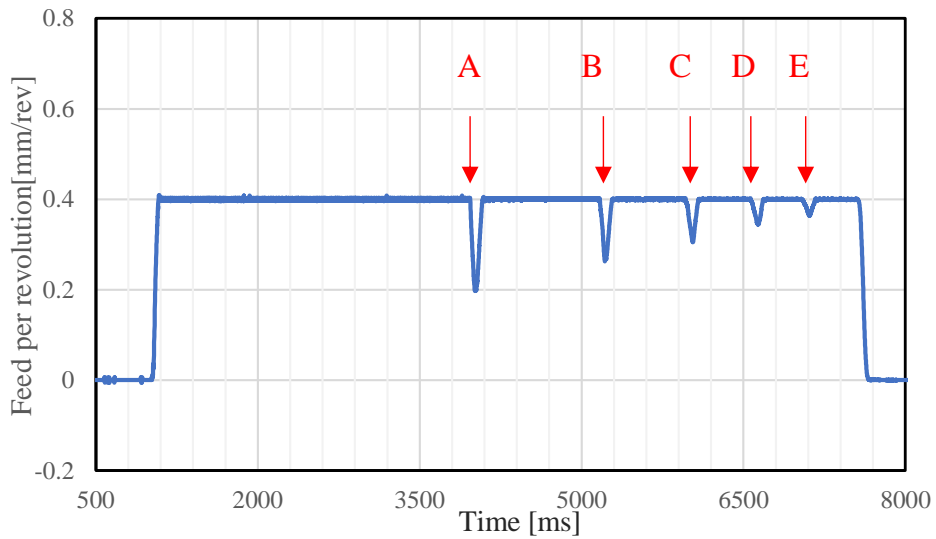


Fig.3-15 Change in feed rate per revolution during acceleration from 1000 to 6000 min^{-1} .

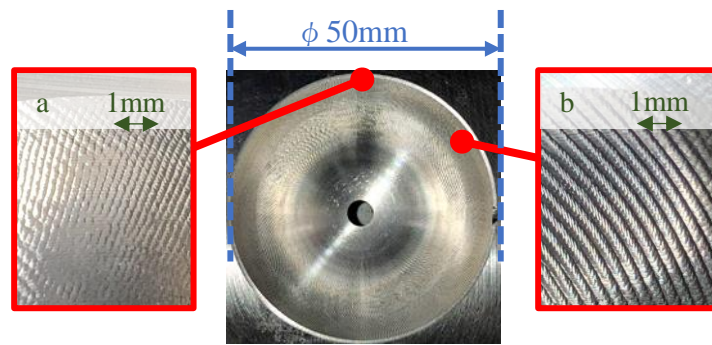


Fig.3-16 Photograph of surface after sphere finishing process.

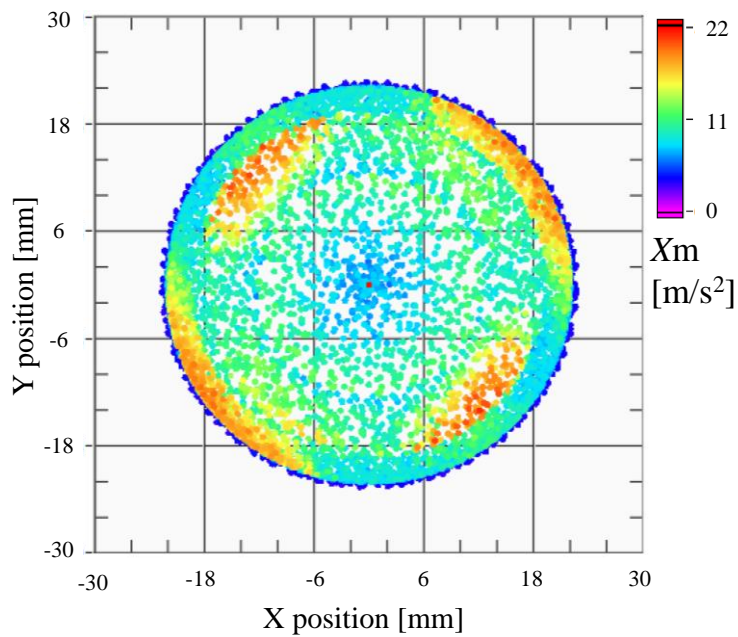


Fig.3-17 X_m values during sphere finishing process operations XY-plane color plot.

一マッピングよりびびり振動の大きい箇所では X_m の値も大きくなっていった。これにより、 X_m のモニタリングでびびり振動の検知ができることがわかった。このびびり現象の原因は工具が片端固定・他端弾性支持のモードで生じる高い振動数(約 2100Hz)の現象であることが先行研究³⁻⁶⁾で明らかになっている。加えて、マシニングセンタの剛性、テーブル加工位置、XY 送り軸の差などのマシニングセンタの固有振動数が XY 平面方向によりわずかに異なる異方性の差が顕著に生じたものと考えられる。そのような場合のびびり振動において、 X_m を座標平面カラーマッピングすることで、どの箇所でもびびり振動が生じているかを明確化できることがわかった。

3.3.5 びびり振動抑制のための回転数制御の検討

前節のびびり振動に対して、1 刃送りを一定とした条件下において主軸回転数を変更することで、びびり振動を抑制できないかを検討した。3.3.3 節の 1s 当たりのタイムラグ面積平均変化量 Δx が大きい領域で主軸回転数と送り速度を同時に変更すると 1 刃送りが短い時間に大きく変動するため、仕上げ面品質に影響が出る可能性が考えられる。そのため、 Δx が大きな値をとらない範囲で主軸回転数・送り速度共に急激な加減速にならないよう設定した。ここでしきい値として $\Delta x < 0.03$ となるように 10%区切り(領域①では 360min^{-1} 、領域②では 480min^{-1})で主軸回転数を変更するように検討した。加えて、図 3-17 の X_m が高い領域では 80%(領域①では 2880min^{-1} 、領域②では 3840min^{-1})まで主軸回転数が落ちるように NC プログラムを変更した。その NC プログラムを用いて加工したときの実際の加工時の主軸回転数を図 3-18、領域①での主軸回転数と送り速度の経時変化を図 3-19、領域①での主軸回転数と送り速度の経時変化を図 3-20 に示す。主軸回転数は狙いどおり図 3-17 の X_m の値が大きい領域では下げて加工できていた。その際の送り速度の変化を確認すると、予想通り主軸回転数変化に対して送り速度の変化が遅れて出ていた。その遅れに対して各箇所を図 3-13 のモデルにあてはめ(3-5)式に従って Δx を求めるといずれも 0.02 を下回っていた。加工改善後の仕上げ面全体の写真を図 3-21、 X_m の値を CL における XY 座標値でカラーマッピングしたグラフを図 3-22 に示す。加工面を確認すると大きなびびり振動はなくなり、1 刃送りの急激な変化によって発生が予想された加工表面への影響も最小限であることが確認できた。 X_m の値からも改善前ほどの大きな振動値は確認できなかった。この手法によりびびり振動に対して、加工能率を維持しながら加工改善を行うことができた。

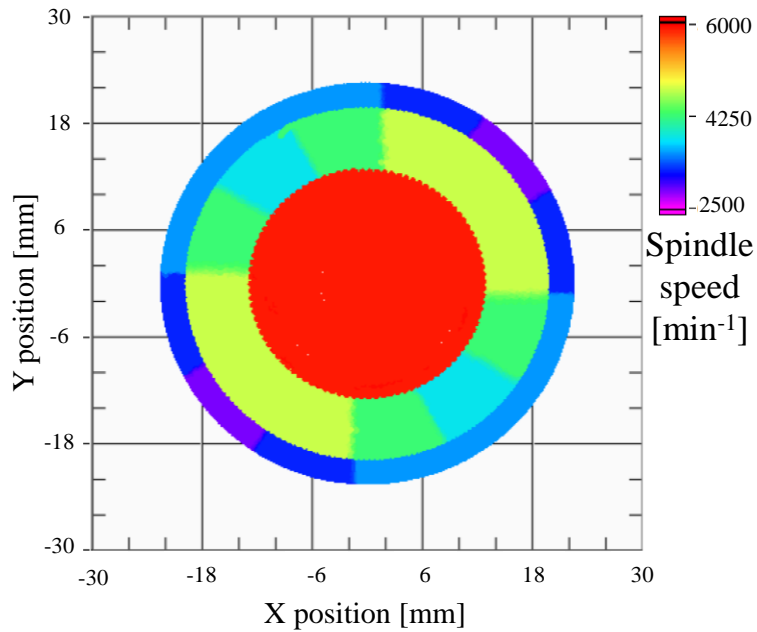


Fig.3-18 Spindle speed XY plane color plot during vibration suppression study.

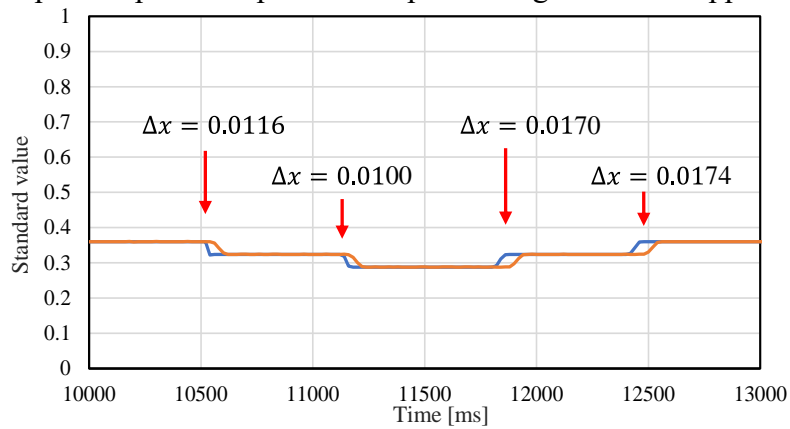


Fig.3-19 Change over time in spindle speed and feed rate in area ① during the vibration suppression study.

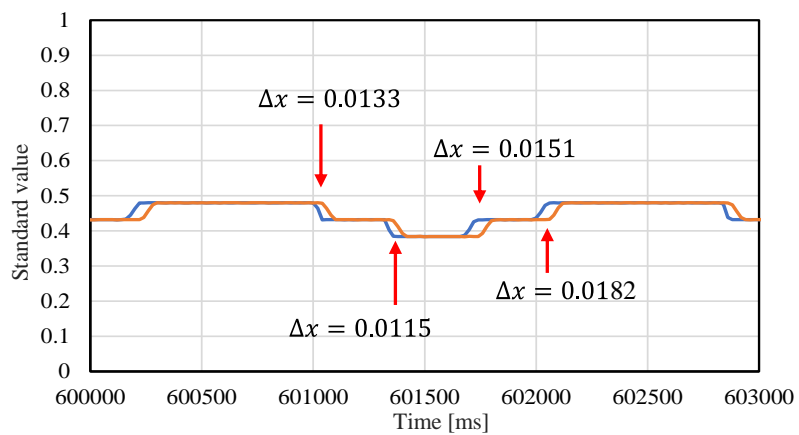


Fig.3-20 Change over time in spindle speed and feed rate in area ② during the vibration suppression study.

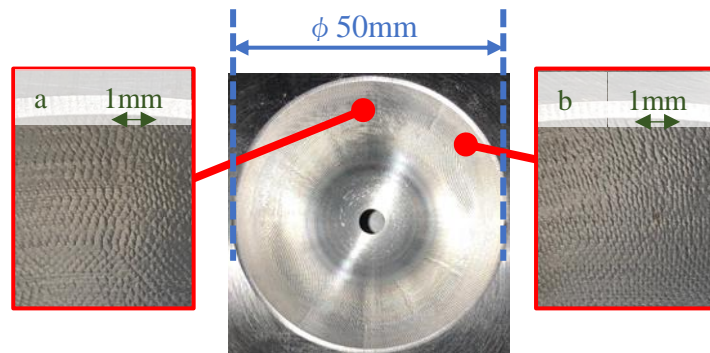


Fig.3-21 Photograph of surface after sphere finishing process after the vibration suppression study.

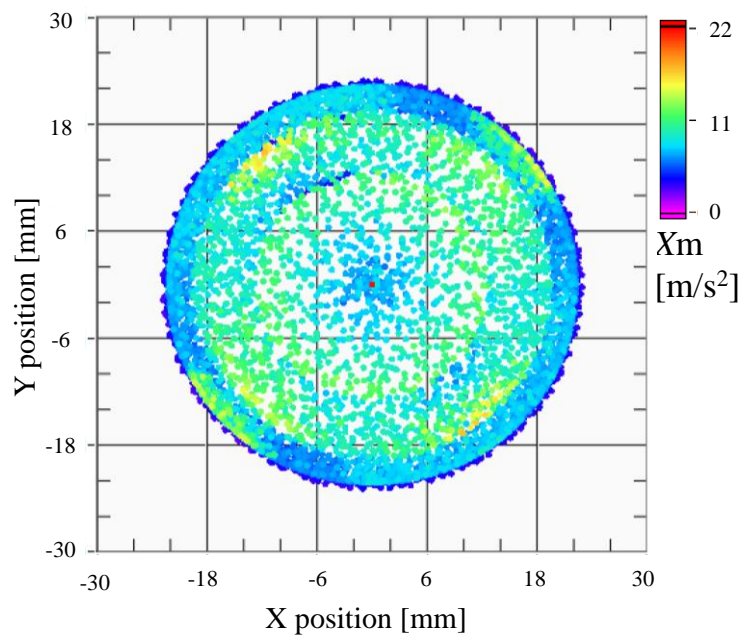


Fig.3-22 X_m values during sphere finishing process operations XY-plane color plot during the vibration suppression study.

3.4 結論

前章で工作機械や加工状態の診断への有効性を確認した無線式多機能工具ホルダシステムに対して、新たに工作機械のサーボ情報内部情報モニタとそのホルダからの半径方向 X_m の加速度振動モニタの情報を CAM からの出力である CL を用いて統合する手法を試み、加工運動中の主軸回転数と送り速度の可変動作プログラミングに応用して、その効果を検討した。結果を以下にまとめる。

- (1) 主軸の角加減速は角速度(回転数)の一次遅れ系でモデル化が可能である一方、送り速度の加減速は送り速度に依存せず一定で近似できることを示した。
- (2) 回転送り量を一定にするため回転数と送り速度をプログラムで同時変更の指令にすると、それぞれの加減速開始時間にタイムラグが発生し、回転数の方が若干速く変更されることがわかった。
- (3) 自由曲面の創成時の局所的なびびり振動に対して、 X_m の値をリアルタイムモニタして、サーボ情報と統合してその明確化を遂行する手法がプログラム改良に有効である。
- (4) X_m の値に基づき局所的に工具回転数指令値を Δx がしきい値を超えない範囲でプログラム変更して加工することで、加工能率を維持しながらびびり振動の無い仕上げ加工を実現することが可能であることを確認できた。

参考文献

3-1) 新堂正俊, 松田亮, 古木辰也, 廣垣俊樹, 青山栄一, “無線ホルダシステムを用いたエンドミル加工時の工具内部温度の考察”, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.826 ,(2015), pp.1-15,00046.

3-2) 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, “無線多機能ホルダによるタップおよびエンドミル工具の回転方向振動モニタと現象解明”, 砥粒加工学会誌, Vol.61 No.12, (2017), pp.39-45.

3-3) 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, “無線多機能ホルダシステムとサーボ内部情報モニタを用いたエンドミル加工現象の解明”, 砥粒加工学会誌, Vol.63, No.1, (2019), pp.24-30.

3-4) 高澤拓也, 前田敏男, 天谷浩一, 矢野宏, “MT システムによる主軸寿命予知システムの開発”, 品質工学, Vol.20, No.6, (2012), pp.55-64.

3-5) 中川純一, 杉野敦, 八田武士, “強制びびり振動条件下における工具寿命と表面粗さにおよぼす振動変位の影響”, 電気製鋼, Vol.87, No.1, (2016), pp.5-12.

3-6) 山本隆将, 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, “無線ホルダシステムを用いた主軸状態診断と加工現象モニタの考察”, 砥粒加工学会誌, Vol.64, No.2, (2020), pp.91-97

3-7) 山本隆将, 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, “無線多機能ホルダシステムによるボールエンドミル自由曲面加工の振動モニタとその効果”, 砥粒加工学会誌, Vol.65, No.4, (2021), pp.201-206.

3-8) Takamasa Yamamoto, Ryo Matsuda, Masatoshi Shindou, Toshiki Hirogaki, Eiichi Aoyama, “Monitoring of Vibrations in Free-Form Surface Processing Using Ball Nose End Mill Tools with Wireless Tool Holder Systems”, International Journal of Automation Technology, Vol.15, No.3, (2021), pp.335-342.

3-9) 西田晋, 垣野義昭, 藤本一也, 中川平三郎, “金型加工における送りと主軸回転数制御による切削抵抗の一定化に関する研究”, 精密工学会誌, Vol.73, No.3, (2007), pp.367-371.

第 4 章

数値制御工作機械のサーボ内部情報と 協働ロボットの仕上げ動作の統合化

4.1 緒言

第 1 章でも述べたように、近年の製造現場で IoT (Internet of Things) に基づく「つながる工場」に関する技術開発において工場内外の機器間での情報の共有と活用は重要な要素である。自動化においては産業用ロボットの活用は益々重要であり、「つながる工場」において産業用ロボットに求められるのは単純な動作制御だけでなく、様々な外部センサを具備してセンシングにてあらゆる現象をモニタリングし、そのデータをフィードバックし自律動作することと考えられ、その発展性が期待されてきている⁴⁻¹⁾。また、2013 年「産業用ロボットに係る労働安全衛生規則 第 150 条の 4 の施行通達の一部改正」により、人との接触を検出するセンシング機能を有してその情報でサーボの割り込み停止が可能な機能を具備することで、安全柵レスで人と産業用ロボットが協調できる協働ロボットの導入も進みつつある。一方で仕上げ面粗さに高いレベルが求められるような金型製造などにおいて、マシニングセンタで複雑形状の荒加工を遂行し、その後に熟練技能者が加工面の状態を観察しながら手仕上げ作業で金型面を仕上げるような多品種少量生産の現場において、手仕上げ作業の代替として力覚外部センサを付加して産業用ロボットで自動化する試み例⁴⁻²⁾もある。しかしながら、マシニングセンタでの荒加工工程の情報と後工程となる手仕上げ作業の間での情報のつながりがなく、工程別で熟練技能者の加工面の洞察力や外部の力覚センサの性能で製品の品質が左右されている。これは荒加工と仕上げ作業間での情報のつながりと活用に欠け、IoT 対応型をつながる工場としては発展途上であるとも考えられる。

一方、先行研究⁴⁻³⁾では荒加工工程に着目して、マシニングセンタなどに用いられている回転工具ホルダに無線通信機能を具備した IoT 対応のモニタリングシステムの開発がすすめられ、加工工程の新しいインプロセスのセンシング技術に取り組みられてきた。工作機械の加工中のサーボ内部情報を活用した知能化工作機械に関する研究⁴⁻⁴⁾に基づき、前章においては CAM から出力される CL (Cutter location) に基づき工作

機械のサーボ内部情報と無線ホルダシステムのモニタリングを融合させる手法も提案した。その結果、複雑曲面形状を有する金型などのボールエンドミル加工中に無線ホルダシステムによる加工振動モニタを実施することで、工作機械剛性の異方性などに起因するびびり振動を検知でき、サーボ内部情報より得られる加工位置情報と融合させることで生産効率をより高めた改善が可能であることを示した。しかしながら、その改善効果は同一工程内での適応制御にとどまっており、他工程と情報の共有と活用には至っておらず、「つながる工場」の構築においてはこの点についても検討する必要がある。

そこで本章⁴⁻⁵⁾では、複雑形状を有する金型の製造を想定して、CAMで出力されるCLの座標系を活用しながら、エンドミル荒加工時のインプロセス情報取得として無線振動モニタリングシステムと工作機械CNC情報を取得し、それらの情報に基づく協働ロボットによる仕上げ作業の技術に取り組んだ。特に協働ロボットとして人との接触を検出するインプロセスセンシング情報の新たな活用に着目し、さらに様々な外部センサによるセンシング情報の組み合わせることで、加工品質の向上と能率の改善が可能であることが判明したので、その結果を記述する。

4.2 提案する前工程のインプロセス情報を用いた後工程の効率化のコンセプト

4.2.1 無線ホルダシステムと使用する工作機械

本章で提案する手法は、前工程のインプロセスによる加工情報を用いて、後工程の加工の効率化を具現化するIoT型の統合システムある。具体的には、CNC制御工作機械で切削加工によって荒加工を実施したワークの表面の情報をCAMで統合し、その情報に基づき産業用協働ロボットでの高度かつ効率的な磨き作業を遂行した。図4-1に本手法のコンセプト図を示す。切削加工の荒加工においては第2章、前章で使用した無線ホルダシステムを用いて振動情報を収集した。工作機械CNC情報の取得に

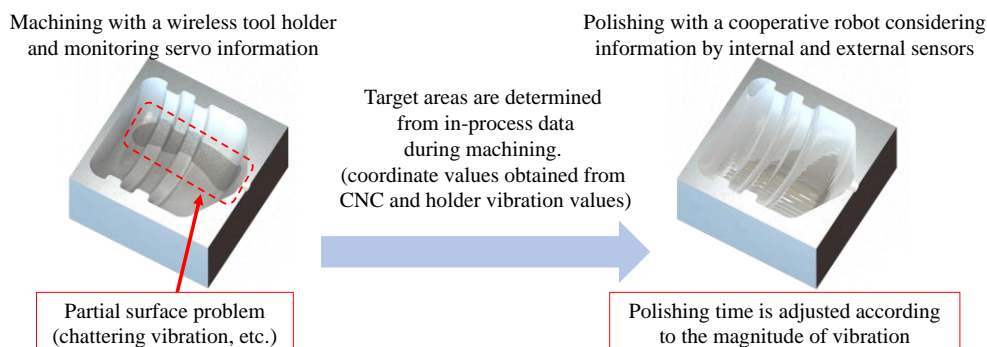


Fig.4-1 Conceptual diagram of this study. Detecting problem areas from in-process data during cutting and changing the polishing method for these areas.

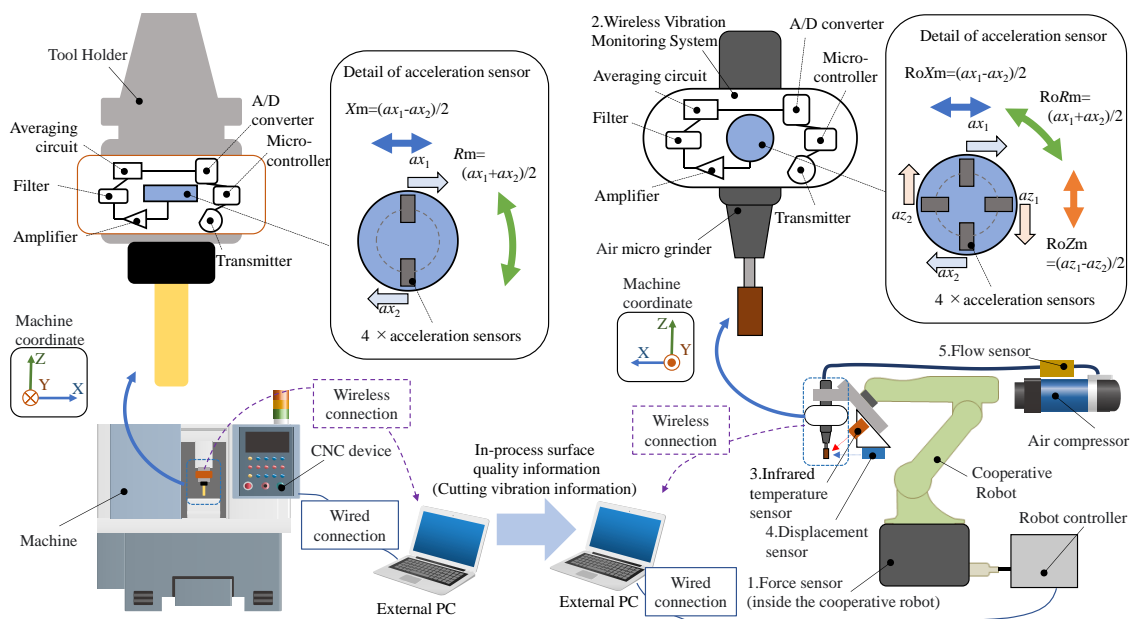
ついて、本章では前章まで使用していた FANUC 社 /SERVO VIEWER と同じ通信方式を採用した新たな情報収集用の PC ソフトウェアを構築した。これにより、無線ホルダシステムの振動情報と工作機械 CNC 情報を時間軸で同期して収集可能となり、データ分析の時間が大幅に短縮可能となった。また、同期してデータ取得することでワーク表面の任意の位置における振動値を取得することができる。さらに、前章で述べたようにワーク表面状態と加工中の振動の大きさの関係を調査することで、インプロセスの加工情報からワーク表面状態を推測することが可能となる。その後、同じワークに対して、ロボットシステムでの磨き作業を実施した。その際、切削加工時のインプロセス振動情報を用いて磨き時間を変更する手法を検討した。すなわち、切削加工時に無線ホルダシステムを用いて得られた振動情報と工作機械 CNC 情報から得られた加工位置情報より荒加工時の表面粗さを予測し、ロボット磨き作業における磨き回数を加工位置毎に調整することで効率よく狙いの表面粗さに仕上げていくことが本研究の手法である。また、ロボットの磨き作業においてもセンサを複数配置し、加工中の現象のモニタリングを実施することで加工状態の良否をリアルタイムで判断できるシステム構築を検討した。センサの中でも特に協働ロボットに内蔵された力センサに着目し、外部で力センサを後付けすることなくロボットにかかる力のモニタが可能とした。このロボットシステムを用いて磨き加工の高度化についても検討した。

本章は、CAM で出力される CL の座標系を両工程でも共通として、後節である 4.3 節で前工程と後工程を実現する、すなわち切削加工およびロボット磨きシステムの概要を述べ、ロボットシステムにおいては使用するセンサの評価を実施し、その検証結果も述べる。その後の 4.4 節では加工実験の手法と結果および考察について述べる。

4.3 無線ホルダシステムと仕上げ作業用協働ロボットシステム概要と基礎特性

4.3.1 無線ホルダシステムと工作機械 CNC 通信の概要

図 4-2(a)に無線ホルダシステムとマシニングセンタの CNC との接続の概要を示す。無線ホルダシステムは第 2 章、前章で用いたものと同機種であり、BT30 ホルダ内にある 2 つの圧電型加速度センサから半径方向を示す X_m と回転方向を示す R_m の 2 方向の振動加速度を計測可能としている。モニタする値はホルダ振動の実効値 RMS(Root Mean Square)であり、積分時間を 0.1s と設定しリアルタイムにアナログ演算し、A/D 変換した後にワイヤレス送信の転送周波数 50Hz、すなわち 0.02s 間隔で回転中のホルダより機外 PC に設置した受信機に向けて送信する仕様である。加速度セン



(a) Schematic of vibration detection and CNC communication with wireless tool holder system.

(b) Schematic diagram of a cooperative robot-based polishing system and wireless vibration detection system.

Fig.4-2 Schematic diagram of the product used in this study.

サの固有振動数は 20kHz で 10kHz 程度までの振動加速度の検出が可能であり、振動試験機上でホルダを Xm 方向に加振校正し、その時に $Rm = 0$ も確認して精度保証をしている。無線による情報取得の遅れは 0.1s 程度であった。

マシニングセンタに搭載される CNC と外部 PC の接続は有線 LAN による接続である。外部 PC は無線ホルダシステムの受信で用いたものと同一である。これにより、ホルダ振動の情報とマシニングセンタの XYZ の現在位置情報や現在の主軸回転数などの情報を同期して情報取得可能とした。ホルダ振動と CNC の情報を同期して取得することで、前節でも用いた解析時における XY 座標平面上に Xm あるいは Rm の出力（実効値であるので常に正の数）に対応して着色して表現するカラーマッピング手法を容易に可能とした。

4.3.2 仕上げ作業用協働ロボットシステムとロボット用無線振動計測システムの概要

実験に使用したロボットシステムはロボット先端部にエンドエフェクタとして治具を介しエアマイクログラインダー(UHT 社:MSG-3BSPPlus)を取り付けた磨き作業用のロボットシステムである。エアマイクログラインダー本体が小型であり、細かな凹凸ある自由曲面などに対しても干渉が少ないため広く仕上げ加工への拡張性が期待できる構成としてある。ロボット本体は 7kg 可搬の 6 軸協働ロボット(FANUC 社:CR-7iA/L)であり、安

全柵なしでの運用のためロボット本体土台部に内蔵の力センサを有している。この土台部の力センサで人との接触を認識するようになっており、力センサの出力値はコントローラシステム変数(サーボ情報の内部パラメータ)を取得することで外部 PC に出力することができる。また J1 軸において直交座標系の成分で出力されるため、CAM で出力される CL の座標系との統合が容易である。ロボットシステムに取り付けた周辺センサと軸付回転砥石の配置図を図 4-2(b)に、使用したセンサの一覧を表 4-1 に示す。これら周辺センサから得られる情報とロボット内部から得られる内蔵力センサや姿勢の情報を同時に取得できるシステムとなっており、このシステムを用いて手仕上げ作業である磨きの高度化の可能性を検討する。また、IoT 対応で産業用ロボットによる仕上げ工程の自動化のために様々な外部センサの付加とインプロセスでの情報活用の可能性が示唆⁴⁾されている。そこで次のような様々な外部センサを具備した。工具表面温度の計測にはサーモパイル検出型(検出波長 8~14 μ m, 検出距離 35mm でスポット直径 1.5mm)の非接触温度センサを利用し、砥石底面から 5mm の位置で磨き加工中の砥石表面の 1 点における温度情報を 1 方向から取得した。振動加速度の計測には、図 4-2(a)のシステムの回路を改良してロボット用無線振動計測システムを開発して、工具の振動情報を取得した。具体的には図 2(b)に示すように小型ケース内に 1 軸方向に感度をもつ圧電型加速度センサを同一円周上に等間隔に 4 つ配置した。図 4-2(a)と同様に円周 180°対向の 2 つの検出値の差分演算でロボット原位置でのロボット固有座標系における X 方向の振動加速度成分 $RoXm$ および Z 方向の振動加速度成分 $RoZm$ を、加算演算で Y 軸中心の回転方向の振動加速度 $RoRm$ を検出可能である。検出した振動は切削モデルと同様に内部回路で処理され移動実効値として外部 PC へ無線送信する仕様である。 $RoXm$ および $RoZm$ の値の校正は、別途校正済みの加速度センサを配置し、 $RoRm$ の値の校正は工作機械用の無線ホルダシステムに加速

Table 4-1 List of sensors simultaneously acquired by the robot systemacquired.

Number	Name	Model	Manufacturer	Position	Remarks
1	Force sensor	CR-7iA/L	FANUC	Inside the robot	System variable : \$DCSS_CLLB[1].\$FS_FORCE[1]-[3]
2	Wireless Vibration Monitoring System (Prototype for robots)	-	Yamamoto Metal Technos Co., Ltd	Robot Hand	Under development
3	Infrared temperature sensor	FT-H10	KEYENCE	Robot Hand	Thermopile type
4	Displacement sensor	IL-S100	KEYENCE	Robot Hand	Laser triangulation type
5	Flow sensor	FD-A250	KEYENCE	Near air input	Thermal type

度センサを取り付けた電子基盤が同軸上に取りつくように配置し、各々加振することで実施した。さらに砥石工具の表面の位置変位の計測には、図 4-2(b)に示すように三角測量型レーザー変位センサ(レーザー波長:655nm,基準距離 100mm でのスポット直径約 $110 \times 2700 \mu\text{m}$)による工具半径方向の変化をインプロセスモニタした。変位センサは温度センサと同様の位置で計測しており、工具の送り方向の倒れ・曲げたわみおよび砥石摩耗のインプロセスモニタを可能とした。さらにエアマイクログラインダーへ流れるエア流量を計測の計測には、空圧元付近に熱式流量センサも組み込、エア流量をインプロセスモニタした。

以上をもって、ロボット内部情報と外部センサからロボット座標(姿勢)情報、磨き動作中の力、工具温度、工具振動、工具位置変位、エア流量を同時にモニタリング可能な磨きシステムとした。これら情報を取得することで磨き加工に生じる現象を明らかにするとともに、磨き加工面への影響を検討した。

4.3.3 協働ロボット内部力センサの基礎特性評価と温度センサの評価

従来のロボットの応用による磨き作業では外部センサとして力覚センサを付加して遂行⁴²⁾する 경우가多いが、協働ロボットでは人との検出のための内部センサが具備されている。本システムを用いて内部情報の新たな活用に着目し、本章においては協働ロボット土台直下にある内蔵力センサを磨き作業にも活用する手法を試みる。センサの基本特性の評価として、ロボットの姿勢を後述の 4.4 節の磨き実験での開始位置の姿勢にし、ロボット機械座標系で X,Y,Z 方向それぞれに対してばねばかりにてステップ階段状(0.98N)に 4.9N まで負荷したのち、0N まで逆ステップ階段状に除荷して力センサの値を確認した。この時、確認した力センサの値はロボット内部情報のシステム変数 \$DCSS_CLLB[1].SFS_FORCE[1],[2],[3]\$ (以降、システム変数 S1,S2,S3 とする)であり、これらシステム変数の値の変化と加えた力の関係を図 4-3 に示す。図 4-3 より、力とシステム変数の関係は成分間の交互作用やヒステリシスもほとんどなく線形であることがわかり、対応するシステム変数値 S1,S2,S3 を式(4-1)~(4-3)で力に換算した。

$$F_x = 0.887 \times S_1 + C_1 \quad (4-1)$$

$$F_y = 0.980 \times S_2 + C_2 \quad (4-2)$$

$$F_z = 1.012 \times S_3 + C_3 \quad (4-3)$$

この式の傾きは図 4-3 より校正値として求められたものである。ただし C1,C2,C3 は長期運転時のドリフトを考慮し、加工直前の空転時に 0N となるよう作業毎に同定して更新することにした。また、データ取得サンプリング間隔は 16ms であった。動的な応

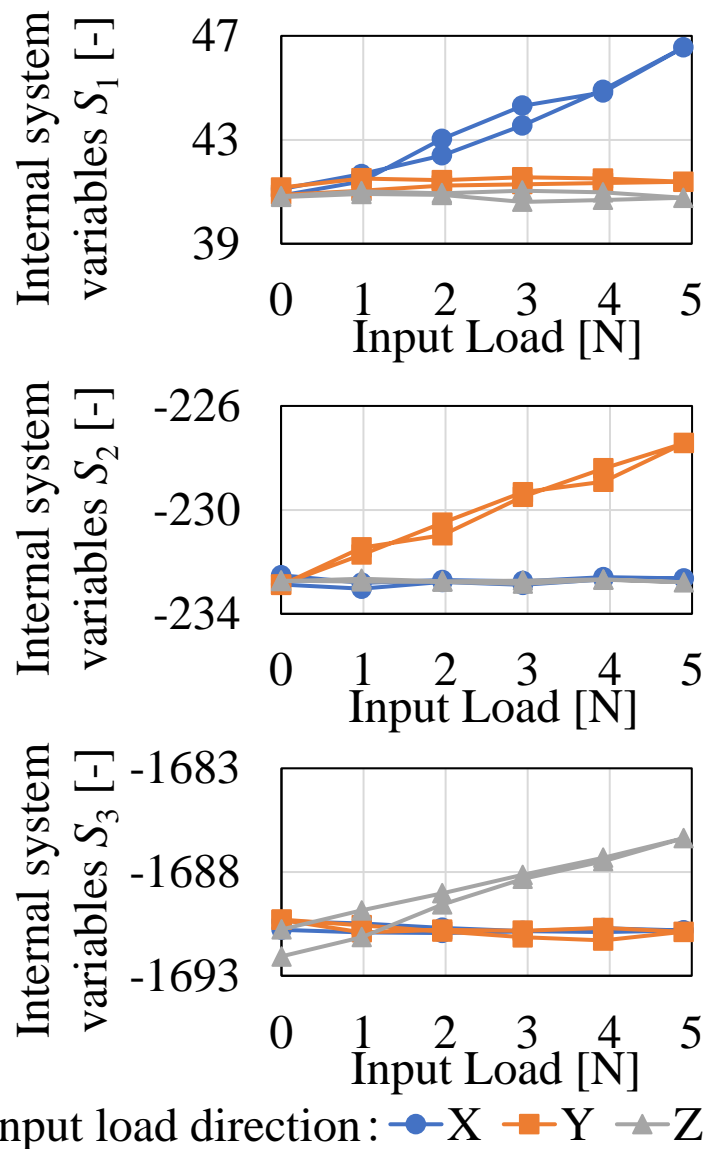


Fig.4-3 Responsiveness of the force sensors built into the collaborative robot. It can be seen that S1, S2, and S3 are highly sensitive to X, Y, and Z directions.

答性は図 4-2 に示す関節姿勢でエンドエフェクタに固定したロードセル(CM085-50N/ミネベアミツミ社)を固定台に接触させながら往復運動させて正弦波加振した時のロードセルおよびロボットのカセンサの値をそれぞれ入力と出力にした伝達関数を調べた。その結果、入力 3.5Hz で 40ms 程度遅れ(位相差 51°)が生じる、振幅比も 0.7 程度であることが判明し、一次遅れ系として時定数 0.29s であることがわかった。また時間軸の波形の振幅比からロボット内部カセンサは振幅±0.5N 程度のノイズがあることもわかった。

次に工具表面温度計測の評価を実施した。非接触温度センサの温度検出位置は

砥石底面から 5mm の位置であり、先述のように磨き加工中の砥石表面の 1 点における温度情報を 1 方向から取得するシステムとなっている。その情報の妥当性の検証のため、図 4-4 に示すような配置で赤外線サーモグラフィカメラ(H2640 / NEC Avio Infrared Technologies 社)を設置して異なる 3 方向より砥石表面温度をアウトプロセスでモニタして比較検討した。この時の磨き条件を表 4-2 に示す。実験の対象ワークは材質 JIS:S50C であり加工前表面は切削仕上げ面である。砥石をワークに押し当てた際のサーモグラフィカメラの映像を図 4-5 に示す。ワーク接触部付近の砥石表面温度は熱的平衡状態にあり、工具円周方向に一定であることがわかった。これは撮影角度に問わず 30fps の撮影速度では同様であった。磨き面垂直に対する角度 $\theta = -60^\circ, 0^\circ, 60^\circ$ におけるサーモグラフィカメラ温度と $\theta = 90^\circ$ でのサーモパイルセンサ温度の経時変化を図 4-6 にあわせて示す。両者の立ち上がり方および整定後の温度はほとんど一致しており、砥石表面温度が室温状態から加工開始すれば 1 か所の温度測定でも十分なインプロセス評価が可能であることが検証できた。

エアマイクログラインダーの回転数と磨き代の関係を調査した。エアマイクログラインダーの回転数は無負荷時に 20000min^{-1} 以上回転するが、砥石の磨き代により生じる研磨トルク変化の影響を受ける。そこで表 4-2 に示す条件で軸方向磨き代 A_p を 5mm とし、径方向磨き代 A_e を変化させたときの回転数の推移を図 4-7 に示す。この数値は切り込んでから 10s 経過したときのものである。径方向磨き代 A_e が 0.6mm の時は過負荷で回転が 0min^{-1} となり停止した。

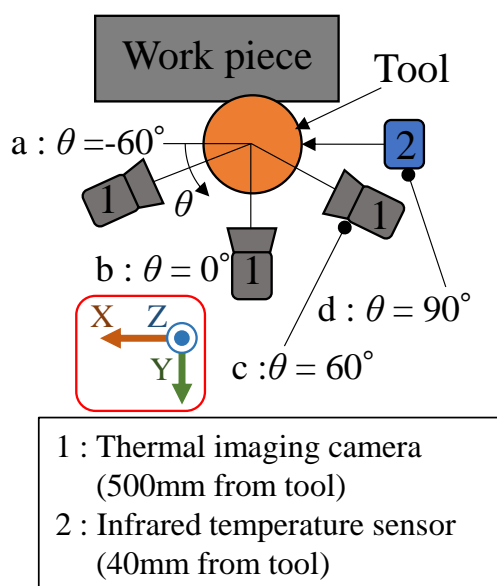


Fig.4-4 Layout during wheel surface temperature verification.

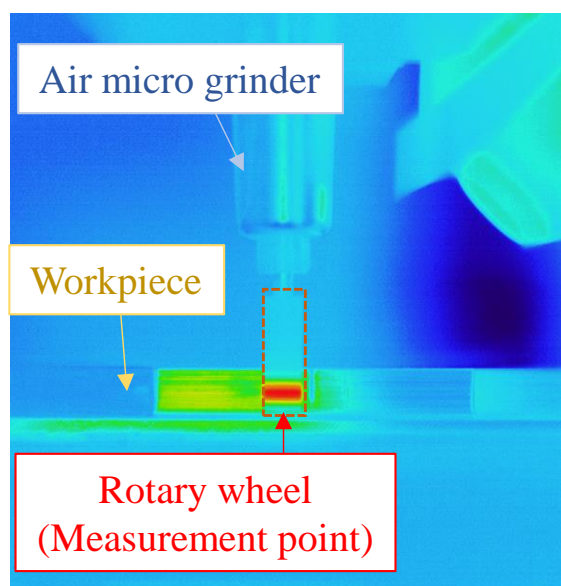


Fig.4-5 Images taken during verification using a thermography camera.

Table 4-2 Polishing conditions during temperature verification.

Polishing tool	GCME-614 (YANASE)		
Particle size	#400 Rubber grindstone		
Diameter	6 mm	Ap	5 mm
Length	25 mm	Ae	0-0.6 mm

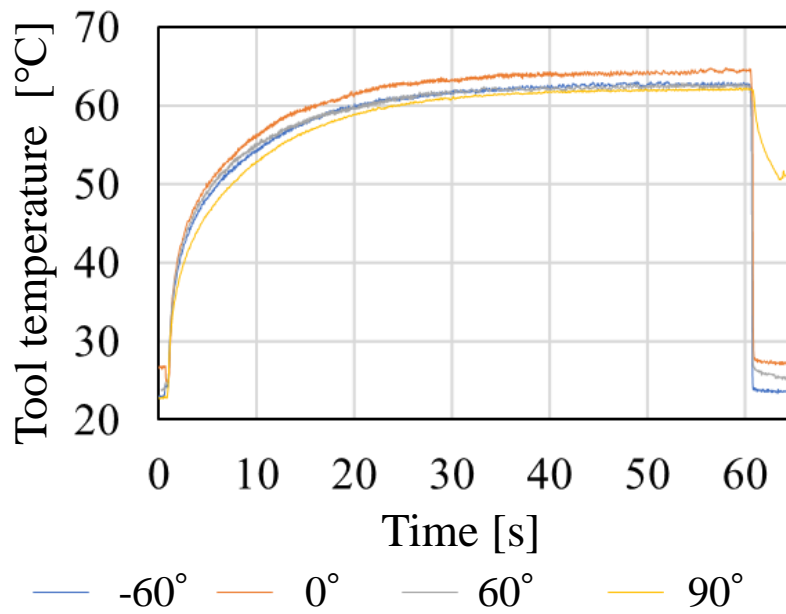


Fig.4-6 Time transition of grinding wheel surface temperature.

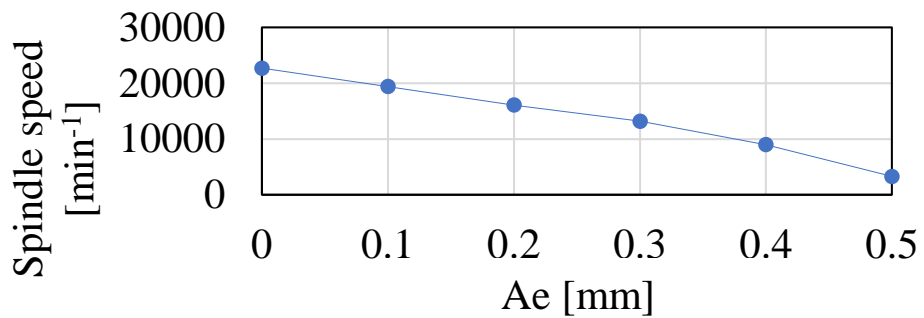


Fig.4-7 Relationship between radial depth of cut and air micro grinder rotation speed.


4.4 実験方法と結果および考察

4.4.1 切削加工による荒加工とロボットでの仕上げ加工の手法と条件

実験の対象ワークは材質 JIS:S50C の 8 角形ワークとした。表 4-3 に仕上げ磨き作業前のエンドミル荒加工を実施した小型マシニングセンタの仕様を示す。第 3 章でこのマシニングセンタは水平面内のエンドミル加工時にマシニングセンタの異方性により部分的にびびり振動が生じることが判明している。そのマシニングセンタを使用して、エンドミル側面荒加工を実施した。ワークと加工方向の関係と無線ホルダシステムでの振動計測方向の位置関係および実験雰囲気を図 4-8 に、加工条件を表 4-4 に示す。用いた切削工具はストレートエンドミル(ねじれ角 30°)の 2 枚刃であり、ダウンカットにて加工した。

切削加工による荒加工を実施したワークに対し仕上げ作業としてロボット磨きシステムで磨き動作を実施した。この際、4.3.2 節で記述した手法でロボット位置(姿勢)情報、磨き動作中の力、工具温度、工具振動、工具位置変位、エア流量のモニタリングを実施した。磨き作業におけるワークと加工方向の関係とセンシング位置関係および実験雰囲気を図 4-9 に、磨きの条件を表 4-5 に示す。鋼材の乾式磨きに適したゴム砥石を選定し、前節でも調べたようにエアマイクログラインダーは回転トルクが小さいため、ストレート型の小径砥石を採用した。小径砥石は全周表面積が小さく作用砥粒数が少なくなるため、十分な粗さの改善や回転周方向の条痕による磨き面の異方性が生じる可能性がある。それらの問題を解決するため、マシニングセンタによる小径砥石を用いた磨きではオシレーション動作が有効であることが判明⁴⁻⁶⁾している。そこでエアマイクログラインダーを用いた産業用ロボットでの仕上げ加工において、磨き動作は 8 角形ワー

Table 4-3 Machining center used during the cutting process.
CNC internal information acquired.

Machine type	α -D21MiB5ADV
Manufacturer	FANUC
Max speed[min^{-1}]	10000
Adapter type	BT30
Picture	

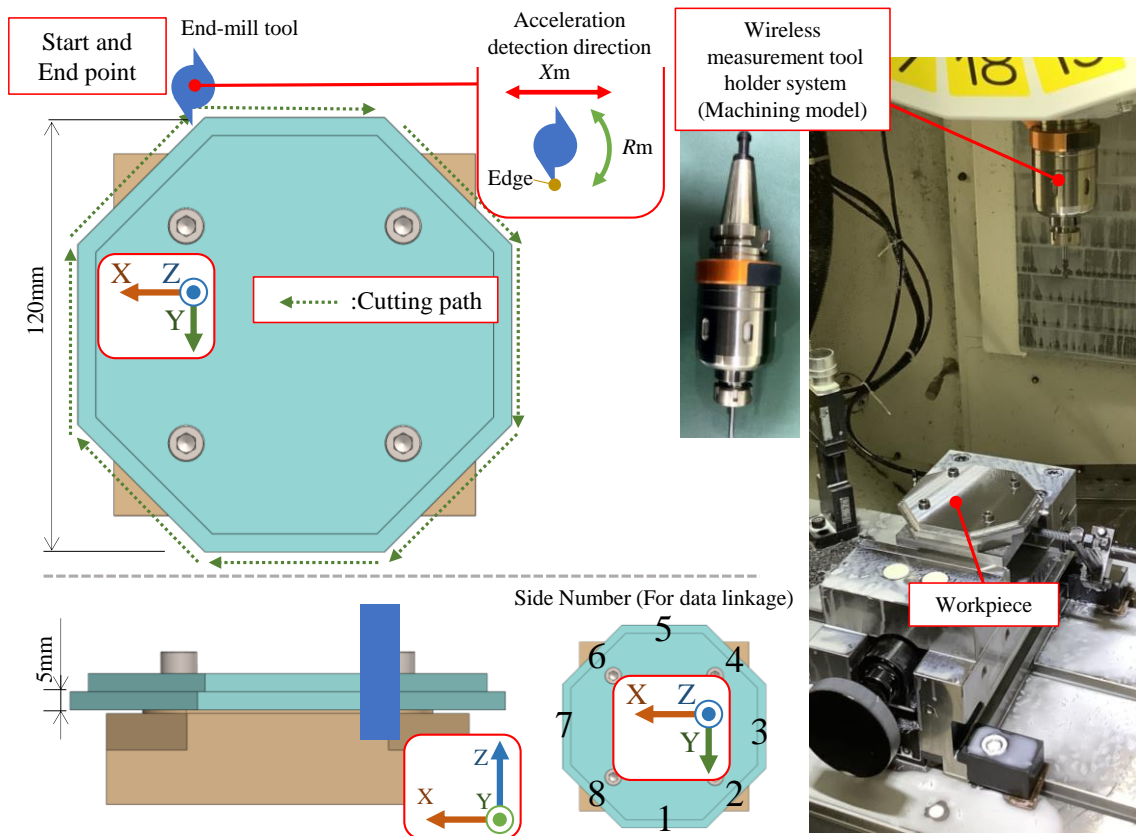


Fig.4-8 Image during cutting process. The direction of vibration detection relative to the cutting edge is also shown.

Table 4-4 Machining conditions when finishing by cutting.

Cutting tool	WXL-2D-DE-6(OSG)		
Spindle speed	3200 rpm	Feed	320 mm/min
Diameter	6 mm	Ap	5 mm
Length	20 mm	Ae	0.05 mm

Table 4-5 Processing conditions for robot polishing.

Polishing tool	GCME-614 (YANASE)		
Particle size	#400 Rubber grindstone		
Diameter	6 mm	Ap	5 mm
Length	25 mm	Ae	0.2 mm

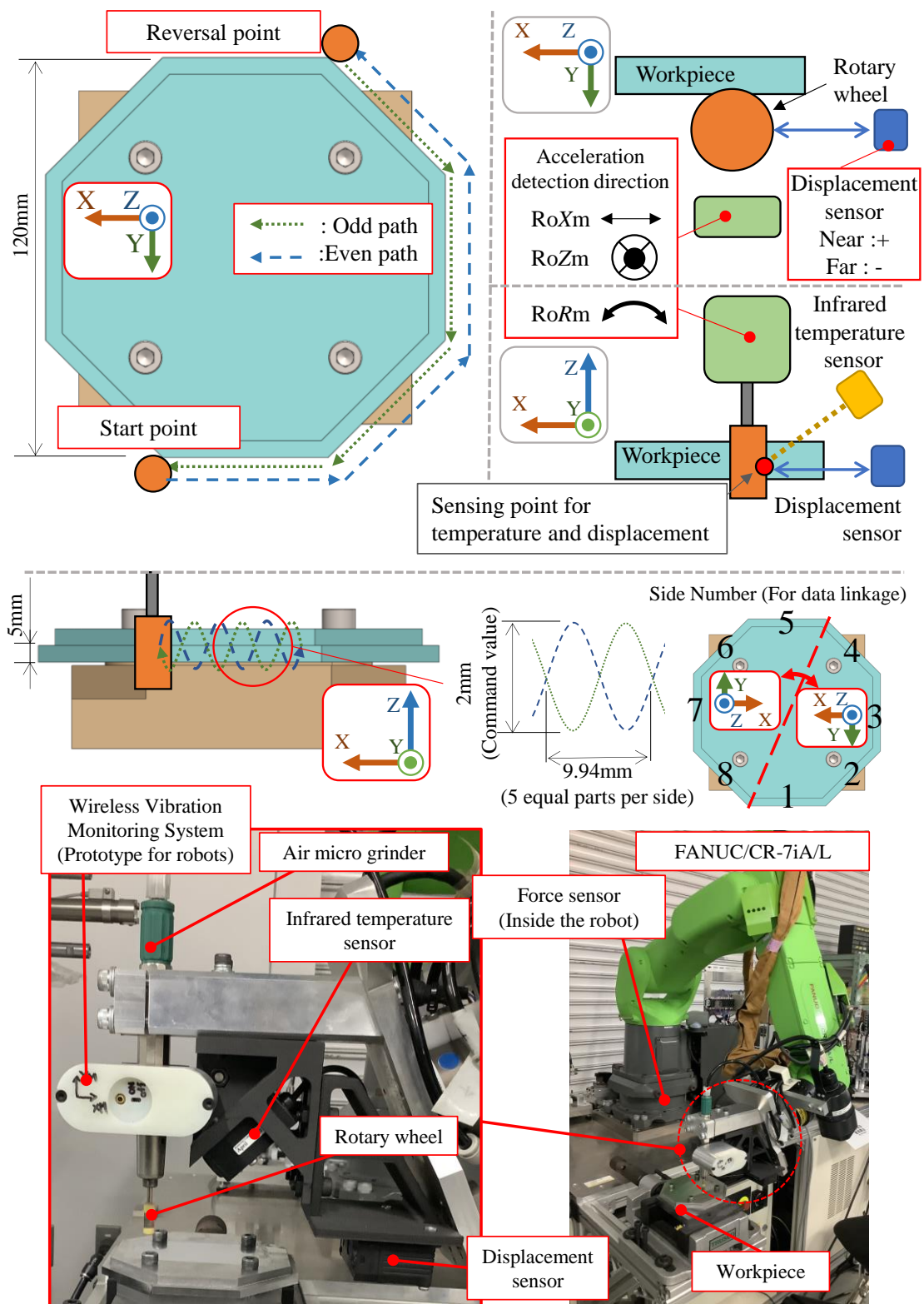


Fig.4-9 Schematic diagram of the direction of motion during robot polishing. The direction of motion, the direction of sensor detection, and the measurement position for data link are shown.

クの4辺(図4-9中で辺に沿った矢印で示す)を鉛直方向にオシレーションさせながら連続して繰り返して磨く動作 $N=10$ 回(5往復)を3セット繰り返す手法の導入を試みた。往復動作の際、往路と復路ではアップカットとダウンカットが入れ替わるように磨き動作を教示した。また、1セットごとに径方向磨き代 A_e を 0.2mm 増加させて磨いた。磨き対象の4辺は、まず辺1-4に対して磨きを実施した。その後、工具を新品に、ワークをZ軸まわりに 180° 反転させ、残りの辺5-8を加工した。すなわち理論上、八角形の辺1と5、2と6、3と7、4と8は同じ動作によって磨くようにしてある。この時、ワークの向きは図4-8および図4-9中の辺番号にある座標系を合わせるようにセッティングした。また、図4-9の辺番号5-8においては上記のようにワークをZ軸まわりに 180° 反転させたとき、座標系もZ軸回りに 180° 回転することを示している。加工後、表面の状態と砥石送り方向の面粗さを確認した。産業用ロボットでのオシレーション研削では、関節モータトルクの上限によりエンドエフェクタの最高加速度の制限が生じる可能性が高い。同程度のサイズの産業用ロボットにおいて円運動させた場合の周波数応答特性の振幅-3dBとなる時定数は 0.2s 程度とされており⁴⁻⁷⁾周波数では 5Hz 程度となることがわかっている。本実験ではオシレーション動作は工具送り方向と鉛直方向の合成運動を円弧で近似して送り速度を設定した。具体的には、1辺を5周期で仕上げる前提で、協働ロボットであること、エンドエフェクタ質量が参考文献とは異なることを考慮し周波数 3Hz 、砥石面の有効軸方向長さを考慮し(鉛直方向)片振幅 1mm に設定すると最高加速度は 355mm/s^2 (0.035G)、最高送り速度は 18mm/s となった。鉛直方向に対する水平方向の送り速度を約2倍とし砥石送り速度は 30mm/s とした。すなわち往復の磨き動作で生じる工具軌跡の最大交差角は約 120° に設定した。

4.4.2 切削加工での無線ホルダによるインプロセス振動加速度情報と加工面の表面粗さ

最初にエンドミル荒加工時に無線ホルダでインプロセスモニタしたホルダ振動加速度と CNC 位置情報で特定した各辺とそれぞれの表面粗さの関係を検討する。図4-9に示す計測位置と工具送り方向の荒加工面の表面粗さの関係を図4-10に示す。 R_a (平均粗さ)および R_z (最大粗さ)ともに辺6において他の辺に対して1.5倍ほど大きな値であった。エンドミル荒加工時の振動値 X_m , R_m (それぞれエンドミル工具の切れ刃の主分力方向および回転方向)の振動加速度の移動実効値の平均値を辺毎に図4-11に示す。インプロセスモニタした X_m , R_m ともに計測辺6が最も大きな値を示している。前章より、主に金型のキャビティ(内円)側のエンドミル加工時に、水平面内での

エンドミルの送り運動の方向によってびびり振動に差が生じていた。これは第3節同様にマシニングセンタの剛性、テーブル加工位置、XY 送り軸の差などのマシニングセンタの固有振動数が XY 平面方向によりわずかに異なる異方性の差によって生じていると考えられ、無線ホルダシステムでその差を定量的にインプロセスモニタできることが判明している。本章においては金型のコア(外円)側に近い形状を対象にしたエンドミル加工を遂行したが、辺6と対の面である辺2の振動は辺6ほど顕著に上がることはなかった。これはテーブル上の加工位置によっても剛性が変化⁴⁻⁸⁾して、異方性のさらに複雑な現象が生じていたと考えられる。結果として、対の面で異なる振動が生じたものと考えられる。また、その場合でも加工振動の僅かな差を無線ホルダシステムがインプロセスでモニタできているものと考えられる。切削加工後のワーク表面粗さと加工振動との関係に着目する。Xm および Rm と Ra および Rz の相関関係を図 4-12(a),(b)

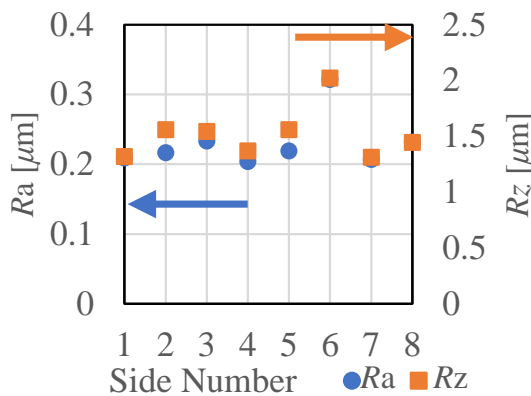


Fig.4-10 Relationship between side number and surface roughness during cutting.

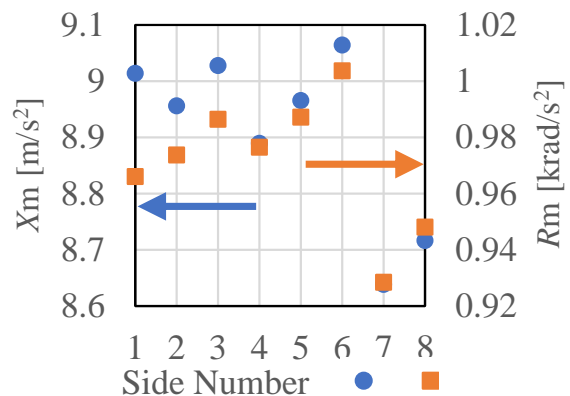
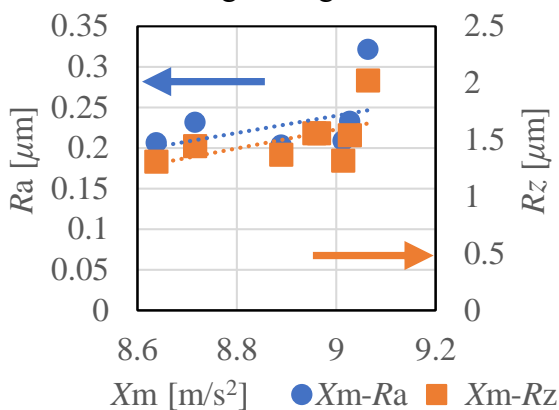
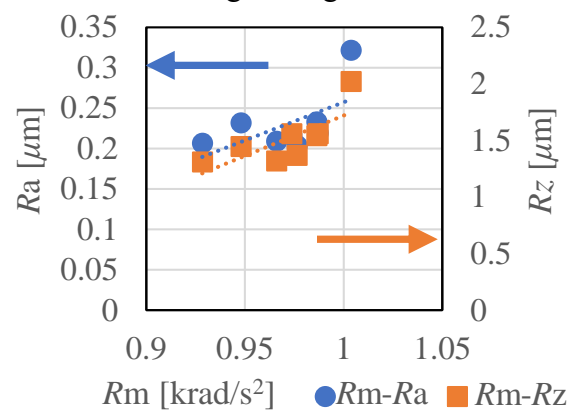


Fig.4-11 Relationship between side number and holder vibration during cutting



(a) Correlation between Xm and surface roughness.



(b) Correlation between Rm and surface roughness.

Fig.4-12 Correlation between holder vibration and surface roughness.

に示す. 図より X_m でも R_m でも相関性は確認できるが, R_m と R_z の相関関係が強く, 次に R_m と R_a であった. よって, R_m に着目すると荒加工の仕上げ面の加工状態との S/N 比が良い情報共有ができることがわかった. 本条件におけるエンドミル荒加工では加工方向で表面状態が異なり, インプロセス振動情報から加工表面を予測できることがわかった.

4.4.3 協働ロボットの内部情報取得による磨き加工のモニタリング

工作機械の運動プログラミングは基本的に慣性系で構成される. 一方で産業用ロボットが磨き動作を遂行する場合, 後付けで外部センサを付加するため, エンドエフェクタに力覚センサを付加して具現化される場合⁴⁻²⁾が多く, その場合に力覚センサは非慣性系になり, 慣性系との間では座標変換等が必要となる. これはマシニングセンタを用いたエンドミル荒加工の工程と産業用ロボットを用いた仕上げ作業の工程間で, CAM などの情報の共有をする上での難易度を上げる一つの要因と考えられる. しかしながら, 用いた協働ロボットは慣性系で直交 3 方向の力を検出することが可能な土台の内部センサを標準装備しており, 対象ワークの座標原点だけを管理しておけば, マシニングセンタの運動プログラミングとの情報の共有が容易である. そこでマシニングセンタの運動プログラミングにおける慣性系の X, Y 座標系を共用して, 磨き動作中に得られた力センサ S_1-S_3 の値を式(4-1)-(4-3)にてロボット座標系における力 F_x, F_y, F_z に変換した. 厳密には姿勢等の変化により検出精度にはモーメントの影響が生じるものと考えられるが, ここではその影響は少ないとして検討した. さらに, F_x, F_y を用いて磨き面に対する力の方向 θ を式(4-4)にて計算した.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{F_y}{F_x} \right) - C_\theta \quad (4-4)$$

ここで, C_θ はロボット座標系での加工面の角度であり, $\theta = 0$ のとき面垂直方向となる. さらに, 加工面に対する垂直成分の力 F_V と水平成分の力 F_H を式(4-5)および(4-6)にて算出した.

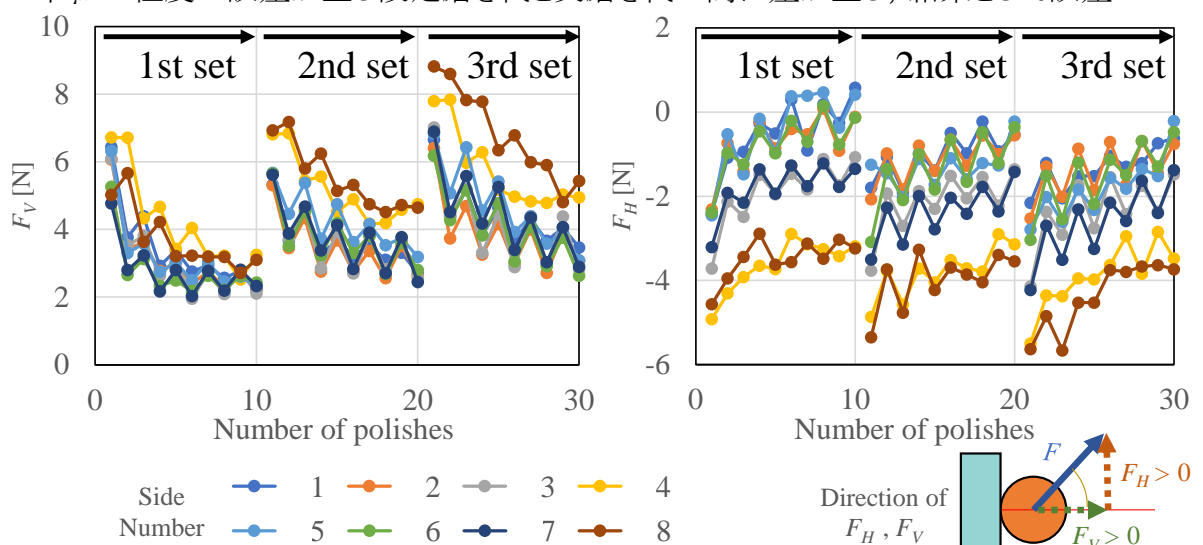
$$F_V = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \times \cos \theta \quad (4-5)$$

$$F_H = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \times \sin \theta \quad (4-6)$$

この計算式において F_V は正の値の時に工具(ロボット)はワーク表面に対して垂直方向に力を認識しており, F_H は正の値の時に工具(ロボット)はワーク表面に向かって右方向に力を認識することになる. この F_V と F_H の磨き回数(3 セット分)と各辺の平均値

の関係を図 4-13(a),(b)に示す. F_V と F_H のいずれにおいても各セットで磨き代を増加させた最初となる $N=1,11,21$ 回目で大きな絶対値を示し, その後にセットが終了するまで徐々に下がり, 次第にゼロに収束する傾向があることがわかる. これは工具の摩耗による影響で, 徐々に接触力が小さくなっていると考えられる. F_H においては, 主に負の値をとっており, このことから工具(ロボット)はワーク表面に向かって左方向に力を認識していたことがわかる. これは回転中の工具とワークの接触で生じる摩擦力が工具を送る力よりも強く表れていると考えられ, 工具の送り方向によらず負の値であったと考えられる. 辺 1-3,5-7 において磨き回数が奇数回時と偶数回時(図 4-10 中の往路と復路)で F_V と F_H ともに上下動することがわかる. これはクリープフィード研削ではアップカットとダウンカットで研削抵抗が異なる⁴⁹⁾ことが知られており, 同様の現象が生じているものと考えられ, 内部の力センサのモニタはこのような現象に対する感度も有していることがわかる.

また, 辺 4, 8 においては他の辺ほど顕著に加工方向による傾向がみられなかった. 一方で, F_V と F_H の絶対値が大きくなっていることがわかる. この原因は 2 点あると考えられ, 1 点目は辺 1-4 および 5-8 を加工する際にワークを取り外し・180°反転・取り付けの一連作業を行う際に生じる取り付け誤差であり, 2 点目はマシニングセンタの加工原点位置とロボットの加工原点位置がわずかに一致していないことで生じる原点位置誤差と考えられる. 本システムではマシニングセンタと協働ロボットがともに慣性系の X,Y 座標系を共用したプログラミングであったが, ワーク取付誤差と原点位置誤差により数十 μm 程度の誤差が生じ設定磨き代と実磨き代の上に差が生じ, 結果として誤差の



(a) F_V (Vertical direction of the surface). (b) F_H (Horizon direction of the surface).

Fig.4-13 Relationship between number of polishes and force for each side number.

方向によって各辺にかかる磨き負荷の絶対値が変化したと考えられる。原点の誤差の方向としてはロボット座標系で X-方向かつ Y-方向であると考えられ、辺 4 と 180°反転させて加工した際の辺 8 で面直方向の力成分 F_V が増大したと考えられる。 F_V が増大することによって、回転中の工具とワークの接触で生じる摩擦力も増大し、 F_H の絶対値が大きくなったと考えられる。さらに、磨き負荷が増大したことによりグラインダー一回転数が低下して、他の辺ほど加工方向の影響を受けなかったものと考えられる。このようなわずかな取り付け誤差に起因する現象も内部の力センサのモニタにより検知できることがわかった。

F_z の磨き回数と各辺ごとの平均値の関係を図 4-14 に示す。 Z 方向にオシレーションした結果であるので、プラスマイナスで相殺して平均値はいずれの辺、磨き回数においてもほとんど 0N であることがわかる。次に辺 1 の磨き開始時の 5s 間の F_z の時間波形に着目してその結果を図 4-15 に示す。加工開始直後の砥石の食いつきの瞬間(時刻 0~1s)を除き、振幅±6N 程、約 3Hz で上下に振動していることがわかった。これはオシレーション動作起因の力の振動を検出できており、協働ロボットにおいてはこの程度の低周波の振動成分のモニタ監視は、ロボット内部の人との接触検出用の力センサ情報の活用が有効であることもわかった。

これらより、協働ロボットの内部情報を取得することで内部の力センサ情報を取得した結果、人との接触検知だけでなく、磨き加工の解析などにも積極的に活用できることがわかった。また、同時にロボットの位置(姿勢)情報を取得し力センサ情報を解析することで、位置と力の関係だけでなく、ワークに対する力の向きを考慮した解析が可能となった。

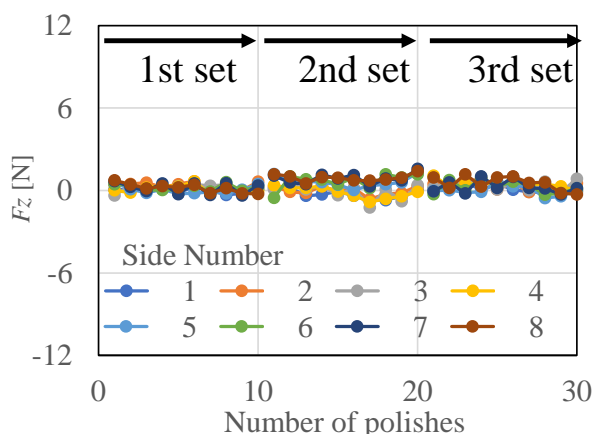


Fig.4-14 Relationship between number of polishes and F_z (force of Z direction) for each side number.

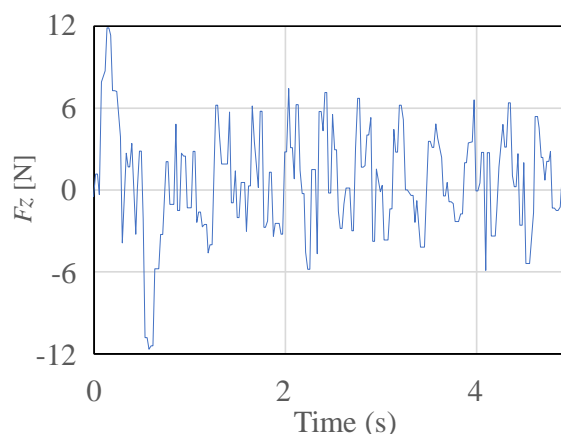


Fig.4-15 Time transition of F_z for 5 seconds from the start of polishing side number 1.

4.4.4 外部センサ付加による磨き加工のモニタリングと協働ロボット内部情報との同期計測

産業用ロボットによる仕上げ工程の自動化においても、様々な外部センサの情報と荒加工におけるインプロセス情報を組み合わせることで、新たな加工品質の向上と安定化が求められている。本節においては 4.3.2 章で示したロボットシステム磨き作業中のモニタリングを遂行し、加工現象との関係性について検討した。ここでは前節に示す内部情報と同期計測している。そのため、時間軸だけでなく加工座標位置での解析が可能であり、8 角形の各辺での取得情報の解析を実施した。

最初に外部センサの中でも砥石表面の温度に着目して、磨き仕上げを実施した際の磨き回数と加工温度の各辺ごとの平均値の関係を図 4-16 に示す。砥石表面温度は磨きの仕事量を示していると考えられ、回転数の上昇や磨き代 (接触面積) の増加などに伴い増加していくものと考えられる。辺 1-4 を磨く際、セット間で磨き代 A_e を増加させた $N=1,11,21$ 回目からそれぞれの直後 $N=2-4$ 回の時に温度の極大値がみられた。この傾向は 4.4.3 章の F_V の傾向と一致しており、最高温度上昇まで時間がかかるため $N=2-4$ に極大値がみられると考えられる。しかしながら、辺 5-8 においては $N=11-20, 21-30$ 回で温度の極大値はそれぞれの直後 $N=4-6$ 回の時にシフトしていた。またその温度の極大値の値は辺 1-4 に対し辺 5-8 が低くなる現象がわかる。また磨き回数 $N=1-10$ 回(1st セット), 次に $N=11-20$ 回(2nd セット), さらに $N=21-30$ 回(3rd セット)のそれぞれのセットの平均値が次第に増大していることもわかる。このことから砥石が次第に摩耗または目詰まりを生じ、仕事量が低下している可能性を示唆するものと考えられ、磨きの仕事量に影響する加工異常を検知可能であることがわかった。

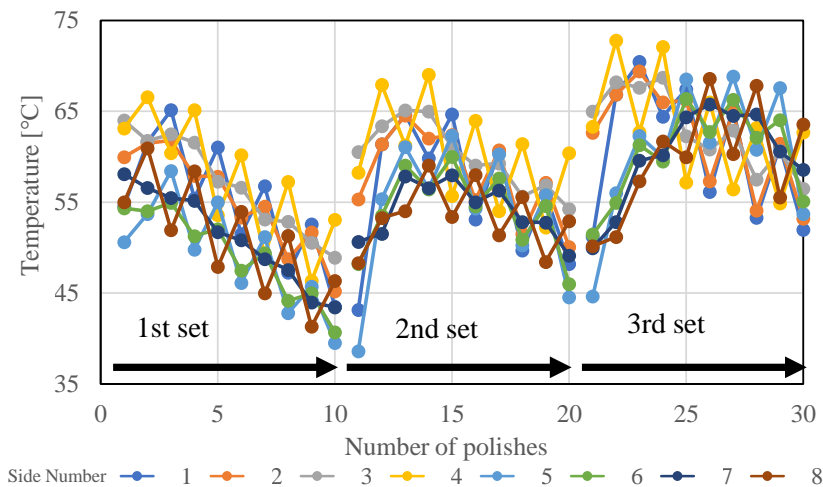


Fig.4-16 Relationship between the number of polishes per side number and the surface temperature of the grinding wheel.

次に外部センサの中でも砥石表面の位置の変化に着目して、磨き回数と変位の各辺ごとの平均値の関係を図 4-17 に示す。図 4-17 において、加工開始直前に 1s 間空転させたときの平均値を変位 0mm とした。レーザー変位センサの値は、磨き回数の増大で砥石表面が半径方向に摩耗すればマイナス側に出力し、研磨力の反力で砥石軸が曲げ変形して砥石に倒れを生じると、プラス側に出力する設定にした。各辺で変位がわずかに異なるのは磨き動作中の工具倒れが辺ごと、工具の走査方向で異なるためであると考えられる。辺 1-4 においては温度同様に磨き代 A_e を増加させた $N=1,11,21$ 回目から $N=2-4$ 回ほどで一定になる傾向がみられた。マイナスの出力が大部分であるので研磨力に起因する砥石軸の曲げ変形に起因する現象よりも、砥石表面の摩耗現象が支配的でありが支配的であることもわかる。変位センサにおいても辺 5-8 では温度と同様に $N=11-20, 21-30$ 回でなだらかな減少となっていた。よって、変位センサ出力値においても辺 1-4 に対し辺 5-8 のほうが工具摩耗に起因する値の減少傾向がみられたが、温度ほど顕著な差ではないことがわかる。また、ロボットへの指令により磨き回数 $N=1-10$ 回目の 1st セットに対し 2nd セットとなる $N=11-20$ 回目は 0.2mm 磨き代 A_e が多く、3rd セットとなる $N=21-30$ 回目はさらに 0.2mm 磨き代 A_e が多い。そこでレーザー変位計の出力値から磨き代変化量を考慮してワーク接触面を基準とした変位と面垂直方向にかかる力 F_V の関係を図 4-18 に示す。その結果、ばらつきは存在するものの正の線形に近い関係が確認できる。したがって、変位計からは砥石表面の摩耗や倒れなどを検知することができ、その結果から内部の力センサの情報から工具摩耗量や磨き代の変化で生じる研磨押しつけ力の変化がモニタ可能であることがわかった。

次に磨き回数とエア流量の各辺ごとの平均値の関係を図 4-19 に示す。エア流量は辺 1-4 においてセット間で磨き代を増加させた $N=1,11,21$ 回目から $N=2-4$ 回ほどで一定になる傾向である。しかしながら、辺 5-8 においては $N=11-20, 21-30$ 回で著しく減少していた。すなわちエア流量の不足でグラインダー回転数が低下して研磨効率が下がり、辺 5-8 において最大温度の低下や摩耗量減少につながったものと考えられる。工場においてエアはコンプレッサーからの配管により各種の機械で共用する 경우가多く、各機械のエア消費が重なるとエア圧等が変動する場合がある。八角ワークの 180° 回転後の 2nd セット前後でエア流量値が低下していることから、そのタイミングで上記の現象が生じエア圧低下し、結果として流量が低下した可能性があると考えられる。ここで磨き回数と振動加速度の無線出力(図 4-7)の各辺ごとの平均値を図 4-20 に示す。

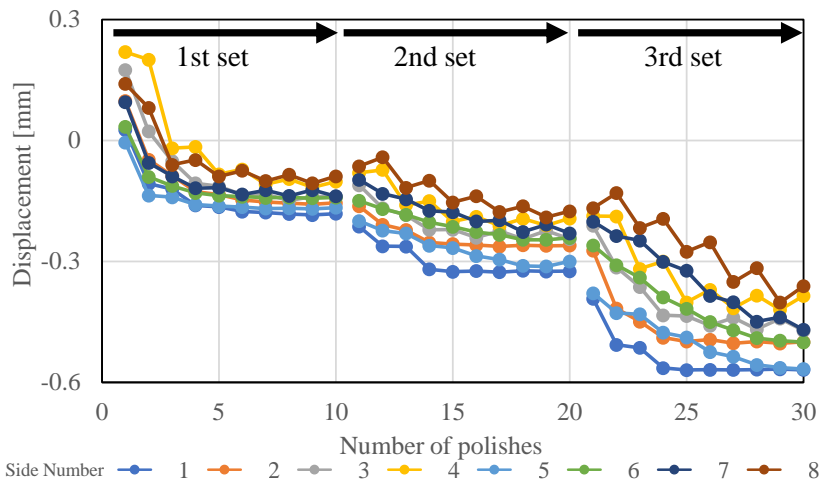


Fig.4-17 Relationship between number of polishes and displacement for each side number.

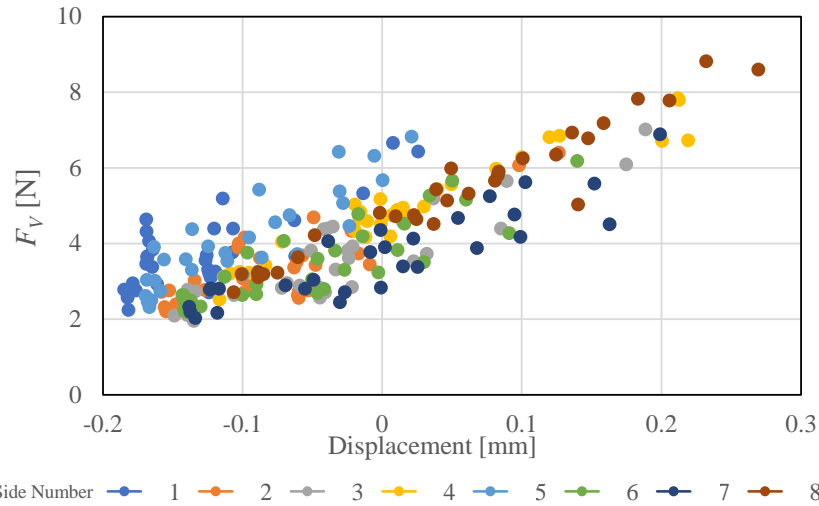


Fig.4-18 Correlation between F_V and displacement (considering infeed).

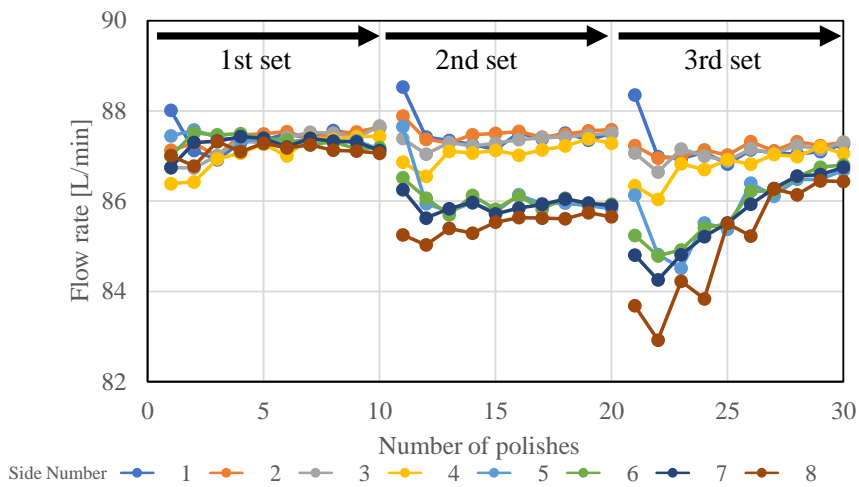


Fig.4-19 Relationship between number of polishes and air flow rate for each side number.

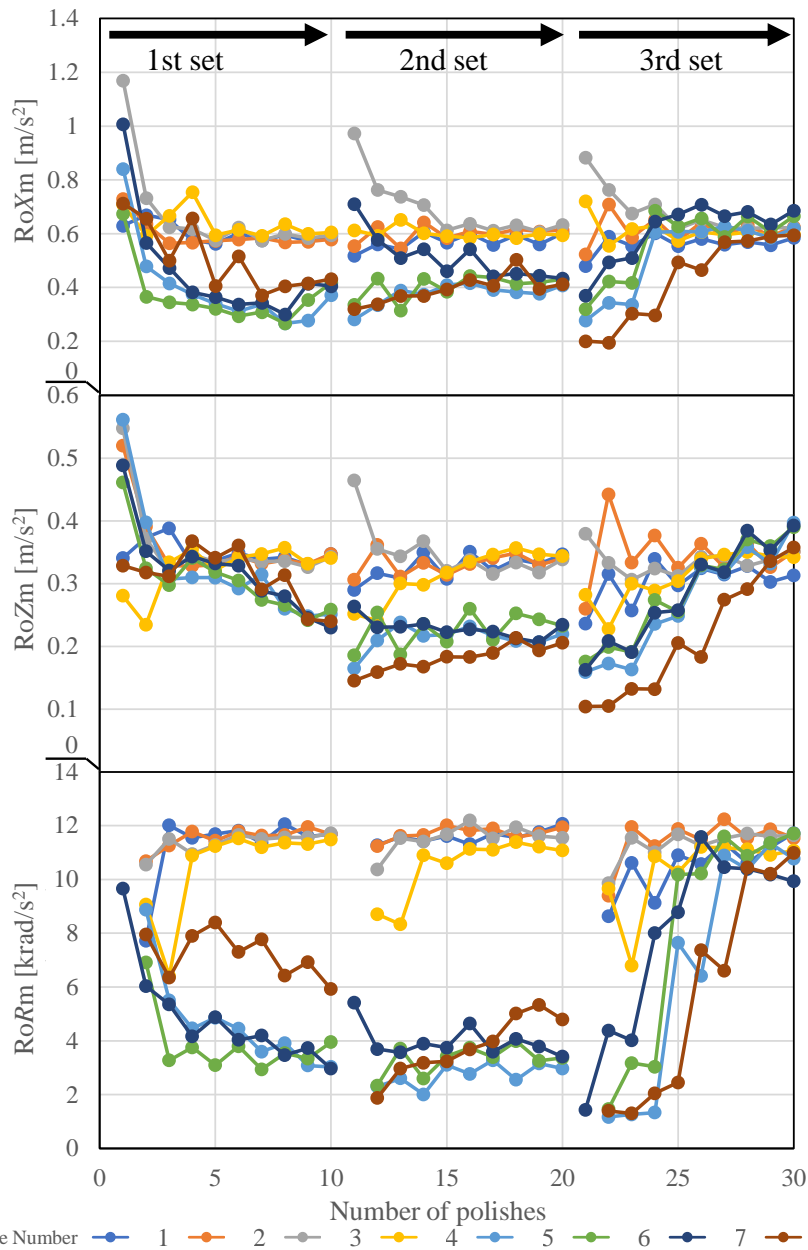


Fig.4-20 Relationship between number of polishes and vibration value for each side number.

辺 1-4 と 5-8 の RoXm, RoRm を比較すると、 $N=2-26$ 回の範囲のほとんどで辺 5-8 が低い値であった。特に RoRm に注目すると、辺 5-8 で磨き回数 $N=2$ 回から低下しており、エア供給の変動で生じるグラインダーの状態変化を流量モニタよりも敏感に検出していることがわかる。このことから、エア流量をモニタすることでグラインダー回転数に起因する異常を検知でき、無線振動計測システムではそれらをさらに敏感に検知できることがわかった。

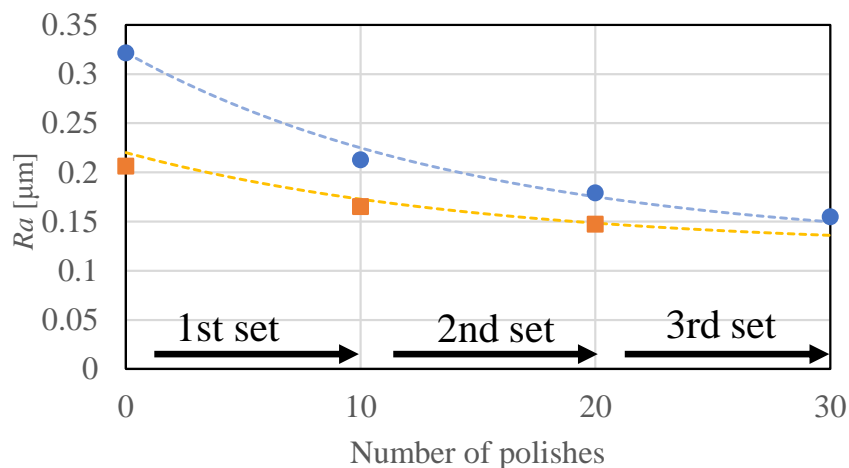
4.4.5 エンドミル荒加工の情報に基づく協働ロボット仕上げ磨きの加工能率改善方法と効果

図 4-11 に示したように、八角形の各辺で荒加工の切削時にホルダ振動加速度に差(特に R_m で顕著)が生じ、その結果として振動加速度が最小であった辺 7 に対して最大であった辺 6 で 50%程度(粗さが約 1.5 倍)悪化していた。また、今回の手法における振動加速度と粗さについて、図 4-12(b)に示すように両者は直線関係で近似できるものと考えられる。したがって荒加工時の無線ホルダシステムを用いた振動加速度で各辺の仕上げ面粗さの差が予想可能と考えられる。そこでモニタ情報を考慮して次のように仕上げ工程の協働ロボットでの磨き動作の効率化を検討する。すなわちケーススタディとして上記の辺 7 と辺 6 に対する適切な磨き回数の検討を遂行する。また磨き動作においてワーク接触面の法線方向の押しつけ力 F_V の管理が重要と考えられるので、図 4-18 に示したように協働ロボット土台の内部力センサによる力モニタで各辺の加工セット開始時に F_V は一定になるように磨き代を管理する。そのような条件下においての仕上げ面粗さ R_N の改善は、磨き回数 N (すなわち磨き時間)、初期の粗さ R_i 、十分に磨きを遂行した後の収束粗さ R_f 、として、

$$R_N = (R_i - R_f) \text{EXP}(-N/N_i) + R_f \quad (4-7)$$

の予想モデルとなることが知られている⁴⁻¹⁰⁾。同形状の別ワークを同条件で 50 往復 ($N=100$)以上磨いたときの中心線平均粗さは $Ra=0.125\mu\text{m}$ であり、この値を収束粗さ R_f とした。また、 N_i は磨き時定数であり事前検証より $N=10$ のときに磨き改善率が 50%程度であったため、これを満たすように $N_i=15$ とした。今回の実験では狙いの粗さを $Ra=0.15\mu\text{m}$ に近づくように磨き回数の予測を立てた。辺 6 の荒加工時の粗さは $Ra=0.32\mu\text{m}$ 程度であり、式(4-7)より $N=30$ 回のときに $Ra=0.15\mu\text{m}$ になると予想した。他辺の荒加工時の粗さの平均は $Ra=0.22\mu\text{m}$ 程度であり、同様に $N=20$ 回のときに $Ra=0.15\mu\text{m}$ になると予想した。磨き回数と式(4-7)による推移の予想と辺 6 および 7 における実際の粗さの変化の関係を図 4-21、その時の磨き回数と加工表面変化の様子の写真を図 4-22 に示す。図 4-21 では荒加工直後を $N=ゼロ$ としており、表面粗さのモデル予想曲線と辺 6 および 7 の両者で実測値とほぼ一致しており、辺 6 の磨き回数が $N=30$ 回の時、辺 7 磨き回数が $N=20$ 回の時の粗さがともに $Ra=0.15\mu\text{m}$ となり狙い通り一致したことがわかる。図 4-22 の荒加工直後(磨き回数 $N=ゼロ$)で比較すると、辺 7

では均一な切削目が得られているのに対し、辺 6 では切削目が不均一となっており、びびり模様が若干強く生じていることがわかる。このことは、無線ホルダシステムでの振動加速度のモニタ結果の差からもびびり振動が生じていることが予測され、仕上げ面の外観としても一致している。一方で図 4-22 において辺 7 の磨き回数 $N=20$ 回と辺 6 の磨き回数 $N=30$ 回ではほぼその差が識別不能となり切削目も消えて均一な光沢面



- - - - - Theoretical curve No.6 - - - - - Theoretical curve other side
 ● Measured value No.6 ■ Measured value No.7

Fig.4-21 Relationship between number of polishes and surface roughness for each side number.

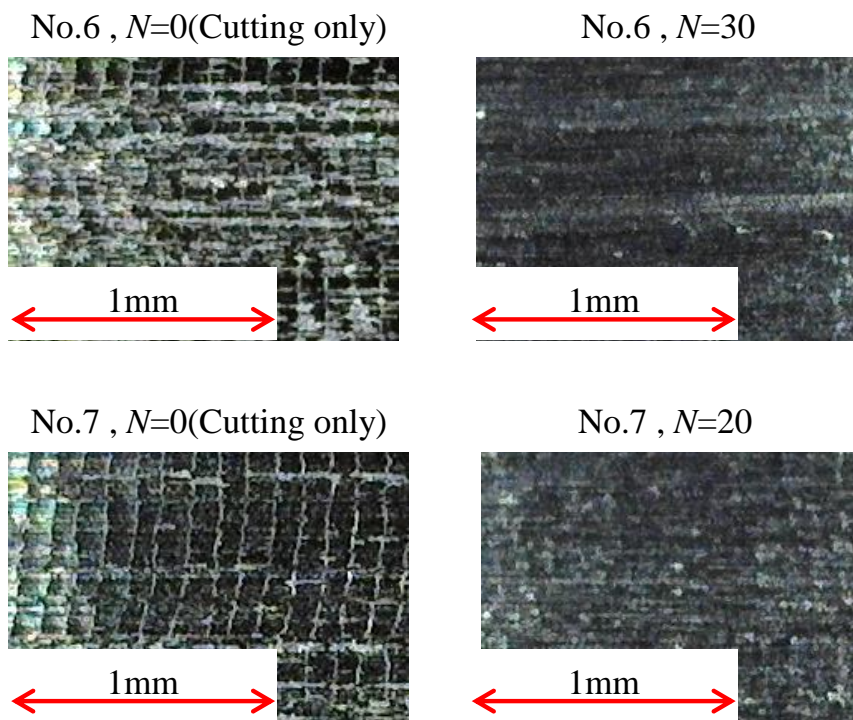


Fig.4-22 Surface observation photo at side number 6 and 7(x300).

に近くなっていることがわかる. すなわち荒加工中に無線ホルダシステムからの振動加速度とその CNC 位置情報の同時取得したインプロセス情報を活用することで, 対応する辺の仕上げ工程における磨き時間を最大 33%短縮できることがわかった.

これらの結果より, 4.4.1 節に示すオシレーション動作を導入して, 繰り返し磨き回数を増やすごとにいずれの面も切削目が消えて均一な光沢面に近づき, 切削目を残さない均一化した磨き加工を具現化できていることがわかった. また, 磨き前の表面粗さをもとに磨き動作の回数 N を式(4-7)の粗さ改善の予想モデルで求め, その差にあわせて磨き回数を検討することで, 十分な加工能率の改善を具現化できる可能性を示すことができた. 磨き前の表面粗さは切削荒加工時に無線ホルダシステムで振動加速度と CNC 位置情報から予想で可能である. すなわち, 前工程である荒加工のインプロセス情報を用いて後工程である磨き工程の磨き動作を変更することで加工能率改善が実現可能である可能性を示すことができた. 最後に, 提案する統合システムにおいてセンシングを実施することで検知できる物理現象を表 4-6 にまとめる.

Table 4-6 List of sensors used in this paper and their effects, etc.

Operation	Number	Name	measurement object	Effect, error detection, etc.
Cutting process	1	Wireless tool holder System	Holder vibration	Processed surface condition
	2	CNC information	Process position	Detection position
Polishing process	1	Robot controller information	Process position, Internal Force Sensor	Detection position, Forcr of polishing Tool consumption, Tool deflection
	2	Wireless Vibration Monitoring System (Prototype for robots)	End-effector vibration	Vibration of air microgrinder
	3	Infrared temperature sensor	Grinding wheel surface temperature	Polishing workload
	4	Displacement sensor	Tool location	Tool consumption, Tool deflection
	5	Flow sensor	Air flow rate	Rotation of air microgrinder

4.5 結論

本章では, CAM で出力される CL の座標系を共通として, 前工程となるエンドミル荒加工時の工作機械からのインプロセス情報(無線式多機能工具ホルダシステムからの振動情報と CNC 位置情報の同時取得)を, 後工程となる協働ロボットによる磨き加工に統合する新たな手法を検討した. 加えて, 協働ロボットでの磨き加工の際には人

との接触検知用の内部の力センサ情報, 無線通信機能を具備した振動モニタリングシステム, 赤外線温度センサでの砥石表面温度モニタ, 変位センサでの砥石変位モニタおよび流量センサでのエアマイクログラインダーのエア流量モニタを実施しながら磨き仕上げ動作における加工現象を考察した. これらの結果を以下にまとめる.

- (1) 八角形ワークのエンドミル側面荒加工時に生じる僅かな振動の変化を, 開発した無線多機能工具ホルダシステムでリアルタイムセンシング可能であり, その振動値が表面粗さと対応していることがわかった. その表面を後工程で磨く際には, 切削加工時のインプロセスデータに基づき表面粗さを予測し, 仕上げ磨き動作の適切な回数 N を粗さ改善予想モデル式で求める手法を用いることで, 十分な加工能率の改善を具現化できる可能性を示すことができた.
- (2) 協働ロボットに具備されている人との接触検知用の土台にあるロボット内部の力センサ情報においては, 工具摩耗や曲げたわみ量が検出できる感度を有することが判明し, さらに動的なオシレーション動作の監視も可能であり, 磨き動作の安定した管理と高度化に有効に活用できることがわかった.
- (3) エアマイクログラインダーで磨く作業を遂行するような場合に外部センサを用いることは有効で, 温度センサをリアルタイムモニタリングすることで摩耗や目詰まりなどの加工異常を検知できる可能性があることがわかった. 変位センサからは砥石の摩耗や工具曲げたわみの異常検知が可能であることがわかった. 流量センサをリアルタイムモニタリングすることで, 工場の供給エアの変動によるエアグラインダーへの影響をモニタリングできることがわかった. また, その変動によるエアグラインダーへの影響は新たに開発したロボット用の無線振動加速度モニタシステムでの監視で検出の感度が高いこともわかった.
- (4) エアマイクログラインダーを用いた産業用ロボットでの磨きにおいてもオシレーション動作を導入し, ロボットの関節モータトルク上限を考慮しながら適切に周期と振幅を設定して適切な磨き回数 N を設定することで, 小径砥石でも前工程で生じるエンドミル荒加工時の切削目を消去し, 均一な磨き面を得ることができることがわかった.

参考文献

- 4-1)原口林太郎, 植村幸市, ”IoT 時代の産業用ロボットと活用事例”, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.8 (2019), pp.690-693.
- 4-2)三上知三, “精密仕上げロボットシステムを用いた実用化例と今後の展開”, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.10(2016), pp. 676-679.
- 4-3)新堂正俊, 松田亮, 古木辰也, 廣垣俊樹, 青山栄一, ”無線ホルダシステムを用いたエンドミル加工時の工具内部温度の考察”, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.826 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00046.
- 4-4)藤嶋誠, 垣野義昭, 松原厚, 佐藤智典, 西浦勲, “知能化工作機械によるドリル加工に関する研究(第1報)”, 精密工学会誌, Vol.66, No.11(2000), pp. 1792-1796.
- 4-5) 山本隆将, 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, ”エンドミル荒加工のインプロセス情報と協働ロボットの仕上げ作業工程における内部および外部センサ情報取得の統合の考察”, 日本機械学会論文集, Vol.88, No.913 (2022), DOI: 10.1299/transjsme.22-00091.
- 4-6)中川平三郎, 廣垣俊樹, 岩崎義範, 林猛晴, 喜田義宏, 垣野義昭, “マシンングセンタによる数値制御オシレーション研削に関する研究”, 精密工学会誌, Vol.68, No.7(2002), pp. 923-927
- 4-7)木原康之, 林浩一郎, 藤平祥孝, 上野光, 村上弘記, 吉川恒夫, 永井清, “外部制御 PC の導入による産業用ロボットの応答特性整形”, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.5(2019), pp. 419-426.
- 4-8)廣垣俊樹, 青山栄一, 山下竜弥, 岸本昌大, 河添佑矢, “左右ボールねじカウンタバランス制振機構と超高速スピンドルを搭載した工作機械によるマイクロドリル加工に向けた基礎研究”, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.850(2017), p. 17-00052.
- 4-9)塩崎進, 古川勇二, 大石進, ”クリープフィード研削における上向きおよび下向き研削機構の相違”, 精密工学会誌, Vol. 45, No.533 (1979), pp. 599-606.
- 4-10)佐々木哲夫, 三好隆志, 斎藤勝政, 岡田信一郎, “金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究 (第3報)”, 精密工学会誌, Vol. 58, No.12(1992), pp. 2037-2043

第 5 章

5 軸制御マシニングセンタと協働ロボットの

サーボ内部情報の CAM 統合化

5.1 緒言

第 1 章でも述べたように、近年の製造現場で IoT (Internet of Things) に基づく「つながる工場」に関する技術、すなわち様々なセンサによるインプロセスモニタやサーボ内部情報の活用に関する研究開発が益々重要となりつつあり、それは工程間で物と情報が同期する加工技術のニーズとなってきた。

機械加工の見える化に関する技術においてはマシニングセンタなどに用いられている回転工具ホルダに無線通信機能を具備した IoT 対応のモニタリングシステムの開発に取り組まれてきている⁵⁻¹⁾。第 2 章ではその新たな応用としてマシニングセンタの主軸や送り軸等の状態診断も含めた考察を遂行した。第 3 章においては CAM で出力される CL の座標系に基づき、無線ホルダシステムから得られる情報と工作機械の CNC 内部情報を融合させ、複雑曲面形状のボールエンドミル仕上げ加工中の振動モニタすることにより、機械剛性や案内面の異方性で工具の位置や運動方向で変化するびびり振動のモニタを具現化して、その改善に有効であると示すことができた。一方で加工技術に着目すると、工作機械の高性能化などにより同時 5 軸をベースとした高能率加工技術が普及してきている。そのなかでもバレル工具による高能率仕上げ加工が着目されてきているが、同径のボールエンドミルと比較してワークとの接触が長く、再生効果が生じやすいため、びびり振動などの加工トラブルが生じやすいという課題もある。

また産業用ロボットに求められるのは単純な動作制御だけでなく、センシングにてあらゆる現象をモニタリングし、そのデータをフィードバックし自律動作することと考えられている⁵⁻²⁾。また、2013 年「産業用ロボットに係る労働安全衛生規則 第 150 条の 4 の施行通達の一部改正」により、安全柵レスで人と産業用ロボットが協調できる協働ロボットの導入が進んでいる。しかしながら、実際の現場においては複雑な作業が多く、デ

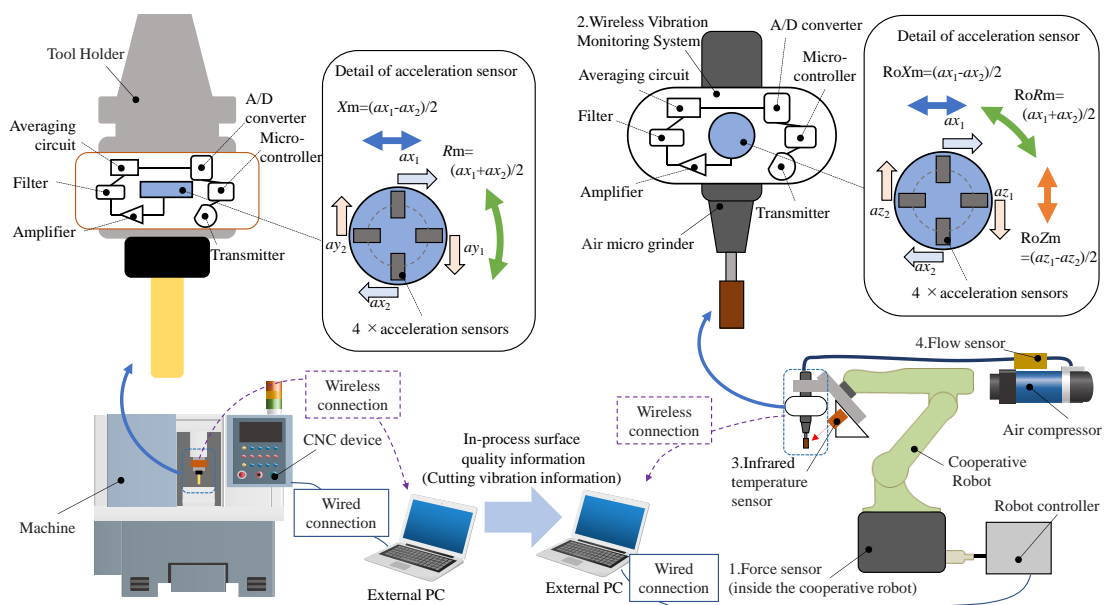
一タ化できない、自動化が難しいという問題が少なくない。一例として、複雑形状の磨き作業があり、産業用ロボットの応用として多くの報告例⁵⁻³⁾がなされてきたが、サーボの内部情報や無線通信機能を具備しての IoT 対応型ではなかった。

これらの問題に対して、前章では第 2 章で検討した工作機械の状態診断の情報にも基づきながら、比較的単純な 8 角形ワークの側面加工に対して前工程のインプロセスによる加工情報 (NC の各ワーク座標と対応する無線ホルダシステムからの振動の大きさの同時取得) を用いて、後工程の協働ロボットのサーボ内部情報も融合ながら加工の効率化を具現化する「つながる工程間」IoT 型の統合システムの有効性を示すことができた。しかしながら、前章では単純な加工に適応したのみであり、切削における同時 5 軸加工への適応やロボット磨き動作の検討、さらには磨き仕上げ後の表面状態について表面粗さ以外の考察を実施できておらず、実用性に課題があった。そこで本章では^{5-4,5)}、タービンプレード形状を模したワークに対して本手法による有効性を検証した。一般に 5 軸加工においては CAM から出力される CL が不可欠でもあり、その座標系に基づき、具体的には同時 5 軸制御の切削加工時における無線ホルダシステムの振動情報と工作機械 CNC 情報を取得し、これらの情報を後工程となる切削加工後のワークに対し活用する前章で使用した協働ロボットシステムによる磨き加工への適用を試みた。この際、切削時のインプロセス振動データを用いてロボット磨き動作の最適化を実施し、磨き動作のインプロセスデータから最適な磨き条件の検討を実施した。これにより、工程間をデータでまたいだ「つながる工場」を実現した。さらに画像処理から加工後の表面品質に対しても定量的な評価を実施したのでそれらの詳細について述べる。

5.2 IoT 対応型センシングシステムと加工条件

5.2.1 無線ホルダシステムと CNC 内部情報の取得方法

図 5-1(a)に機械加工におけるモニタリングシステムの概略図を示す。前章まで用いた無線ホルダシステムに対して改良を実施した。改良内容として、前章では主軸サイズ BT30 と比較的小型のマシニングセンタで検証したが、本章では主軸サイズ BT40 の中型のマシニングセンタのホルダ内に 1 軸方向に感度をもつ圧電型加速度センサを回転中心から径方向に等距離で回転座標系の回転 (接線) 方向に感度を有するように等間隔に 4 つ配置した。各センサの加速度 a_{x1}, a_{x2} は図 5-1(a)に示す矢印の方向に + の感度を有しており、半径方向として X_m は $(a_{x1} - a_{x2})/2$ で振動加速度の差分演算に



(a) Schematic of vibration detection and CNC communication with wireless tool holder system.

(b) Schematic diagram of a cooperative robot-based polishing system and wireless vibration detection system.

Fig.5-1 Schematic diagram of the product used in this study.

より算出できる。また、回転方向を示す Rm の振動加速度は、 $(a_{y1}+a_{y2})/2$ の加算演算により算出できる。したがって半径方向、回転 1 方向の計 2 方向の振動加速度のモニタが可能である。加速度センサも変更しており、その固有振動数は 31kHz である。その他、増幅器、A/D 変換器、マイクロコントローラおよび無線送信機を配置した。増幅器でアナログ演算処理して情報を圧縮したあとに A/D 変換し、その結果を無線送信し、受信機に接続された PC により計測結果をリアルタイムに表示・記録可能にした。

本章では 2 種類の無線ホルダのモデルを準備した。すなわち新たに内部回路での振動データ処理および無線送信頻度について無線送信サンプリング周波数 44.1kHz で振動の詳細な波形が取得可能なモデル(本章では、生波形取得モデルと称する)を用いて、振動瞬間値を外部 PC に送信が可能である。高速サンプリング周波数によりデータ数が多いためより細かく分析することができ、1 刃毎においても加工現象の解析が実現可能である。もう一方は前章と同様な実効値取得モデルで前章まで用いた無線ホルダシステムと同様の処理を実施しており、内部回路で実効値を計算してサンプリング周波数 50Hz にて送信するモデル(本章では、実効値取得モデルと称する)である。無線ホルダシステム内のマイコンでは、式(2-1)における積分時間を $T=0.1s$ と設定しリアルタイムにアナログ演算した。すなわち、得られたデータからは振動の大きさを把

握ることができるため異常が生じているかどうか分かりやすい。

実験時には両モデルとも X_m , R_m と同時に CAM の出力である CL に基づくマシンニングセンタの XYZ の位置情報の情報も時系列で同期して取得した。そのため、解析時においては時間による変化だけでなく、座標位置からの解析も可能である。前章ではカラーマッピングによるグラフ化の手法を用いたが、本章では 3DCAD 空間上にワーク形状と共に X_m あるいは R_m の強弱に合わせて色を変化させる新たなカラーマッピング手法も取り入れた。これにより、さらに視覚的にわかりやすい解析が可能となった。

5.2.2 磨き作業用の協働ロボットと内部情報の取得方法

図 5-1(b)に構築した磨き加工におけるロボットシステムの概略図を示す。第 4 章で用いたロボットシステムと同じシステムであり、J1 軸直下の土台部に内蔵の力センサを有している 7kg 可搬の 6 軸協働ロボット(FANUC 社:CR-7iA/L)のエンドエフェクタとして治具を介しエアマイクログラインダー(UHT 社:MSG-3BSPlus)を取り付けた磨き作業用のロボットシステムである。今回の使用したセンサの一覧を表 5-1 に示す。いずれのセンサにおいても前章で用いたものである。温度の計測にはサーモパイル検出型の非接触温度センサを利用し、磨き加工中の砥石表面の 1 点における温度情報を 1 方向から取得した。振動加速度の計測は、ロボット用無線ホルダシステムから無線でデータ取得を可能とした。前章同様の手法でロボットツール座標系の X 方向成分 RoX_m および Z 方向成分 RoZ_m の振動を、加算演算で Y 軸中心の回転方向 RoR_m の振動を検出可能であり、実効値取得モデル同様に式(2-1)で振動の実効値として外部 PC へ無線送信する仕様である。空圧元付近に熱式流量センサも組み込み、エアマイクログラインダーへ流れるエア流量を計測した。これらのセンサ情報と協働ロボット内部の力センサや位置情報などのロボット内部情報を統合的に取得するシステムにより磨き動作の高度化を試みた。

Table 5-1 List of sensors simultaneously acquired by the robot systemacquired.

Number	Name	Model	Manufacturer	Position	Remarks
1	Force sensor	CR-7iA/L	FANUC	Inside the robot	System variable : \$DCSS_CLLB[1].\$FS_FORCE[1]-[3]
2	Wireless vibration monitoring system (Prototype for robots)	-	Yamamoto Metal Technos Co., Ltd	Robot Hand	Under development
3	Infrared temperature sensor	FT-H10	KEYENCE	Robot Hand	Thermopile type
4	Flow sensor	FD-A250	KEYENCE	Near air input	Thermal type

5.2.3 ワーク形状と切削加工および荒・仕上げ磨き条件

ターゲットとしたワーク形状は翼厚 2mm, 幅 54mm, 高さ 55mm のブレードを模した平板形状とし, 材質は JIS:SUS430 とした. 形状精度は従来手法である手磨き時に求められる翼面の表面粗さ $Ra0.4\mu\text{m}$ 以内, 形状誤差 0.1mm 以内を目標とした. また, 表面粗さだけでなく目視による官能検査も重要となるため, その評価に対しても鏡面度を用いて検討を実施した.

このワークの加工プロセスとしては, 切削加工, ロボット荒磨き, ロボット仕上げ磨きの手順で加工を実施した. その際, 加工情報を取得しながら翼面に対する加工を実施した.

切削加工における工具動作方向とホルダ振動計測方向の定義をおよび機内雰囲気とセンシング方向を図 5-2 に, 加工条件を表 5-2 に示す. 使用工具はバレル工具を用いてワーク表面から 15° 倒れるように傾斜させながら $A_p=1\text{mm}$ ピッチ, $A_e=0.1\text{mm}$ 切り込みで同時 5 軸等高線仕上げ加工を実施した.

ロボット磨きにおいてはオシレーションで荒磨きと仕上げ磨きを実施した. 工具走査方向と各センサ計測方向の定義を図 5-3 に, 磨き条件を表 5-3 に示す. 工具はワーク表面から 15° 倒れるように傾斜するように教示した. このとき, 荒・仕上げ磨きいずれにおいても仕上げ精度を維持するために定切込みによる制御となるように磨き開始時の A_e が表 5-3 の値になるように設定し, N 回往復するように磨いた. 工具は荒磨きの際に #60 のビトリファイド砥石を, 仕上げ磨きの際は #80 のゴム砥石を用いた.

これらの加工実験は切削および磨き加工前にマシニングセンタやロボットを停止させた状態で加速度がほとんど 0m/s^2 であることを確認し, 外部からの振動ノイズがないことを確認して実験を開始した.

5.3 実験結果と考察

5.3.1 切削加工時のインプロセス計測

一般にドリルやタップ加工ではねじり方向に該当するトルクが加工現象を顕著に表す場合が多く, そのような場合には回転方向振動が重要になる. その一方で, エンドミルなどの工具では曲げ方向に該当する主分力や背分力が加工現象を顕著に表す場合が多い. そこで, 本加工実験の解析においては並進方向である X_m を中心に解析を実施した. 本加工実験の切削加工後ワークの写真を図 5-4(a)に, 実効値取得モデルで取得した切削加工中の実効値 X_m の値を同時に取得したマシニングセンタの座

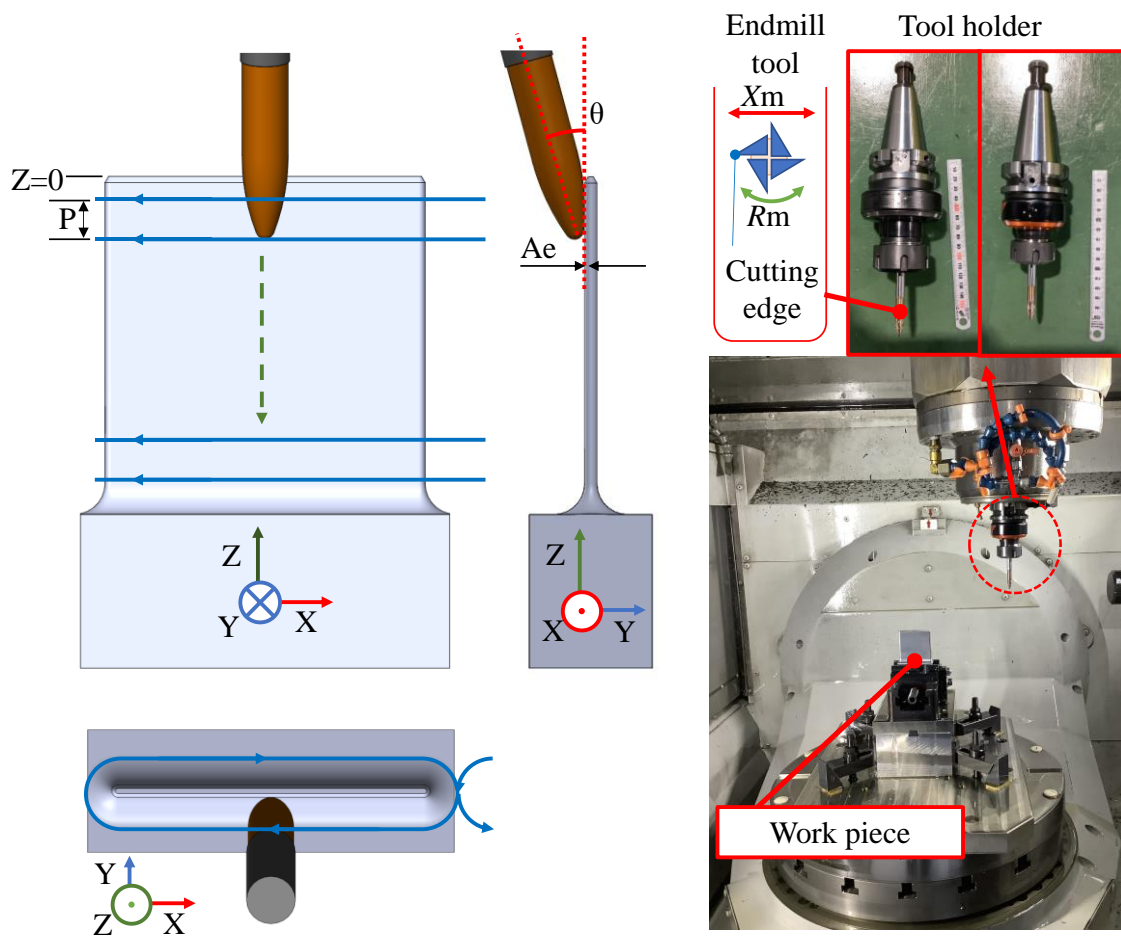


Fig.5-2 Workpiece machining direction and machining atmosphere.

Table 5-3 Machine and cutting conditions used for machining.

Machine model	NMV5000 DCG		Image		
Manufacturer	DMG moriseiki				
Max spindle speed	20000 min ⁻¹				
Adapter type	BBT40				
Number of axes	5				
Cutting model	GS4TN7.5-37.5R-TH3 (MOLDINO)		Image		
Particle size	R37.5 barrel tool				
Number of tooth	4	Length			52 mm
Diameter	7.5 mm	θ			15 deg
Spindle speed	4000 min ⁻¹	A_p			1.0 mm
Feed	800 mm/s	A_e			0.1 mm
Coolant	Oil (External lubrication)				

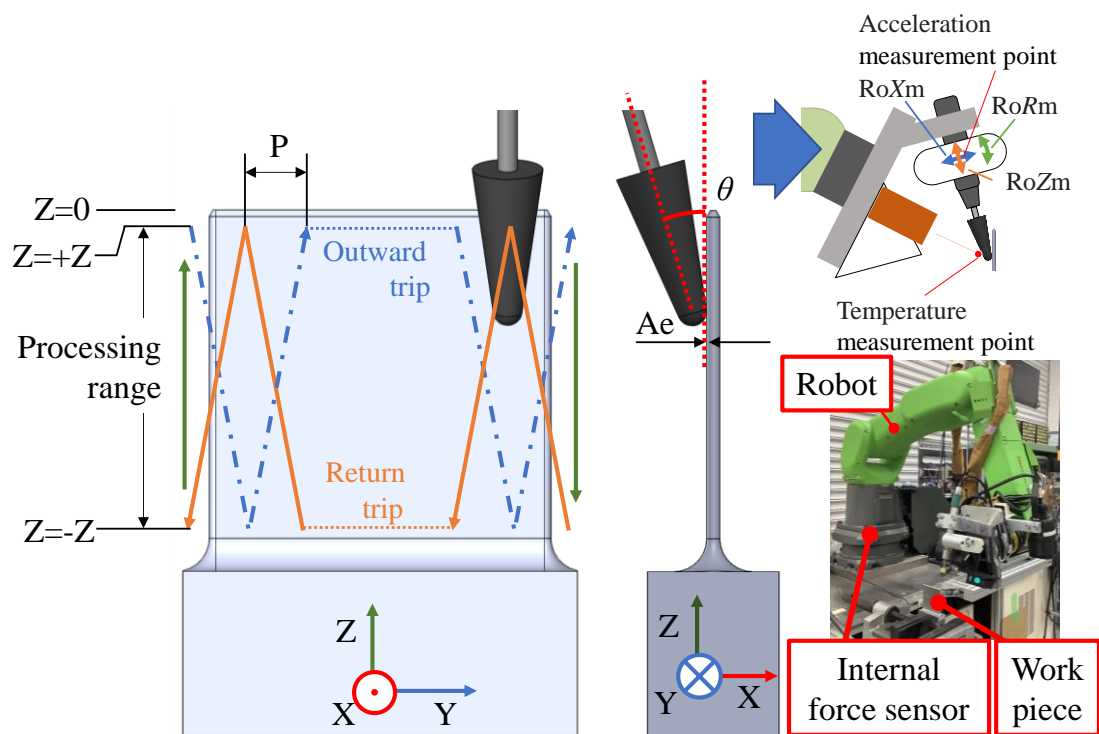
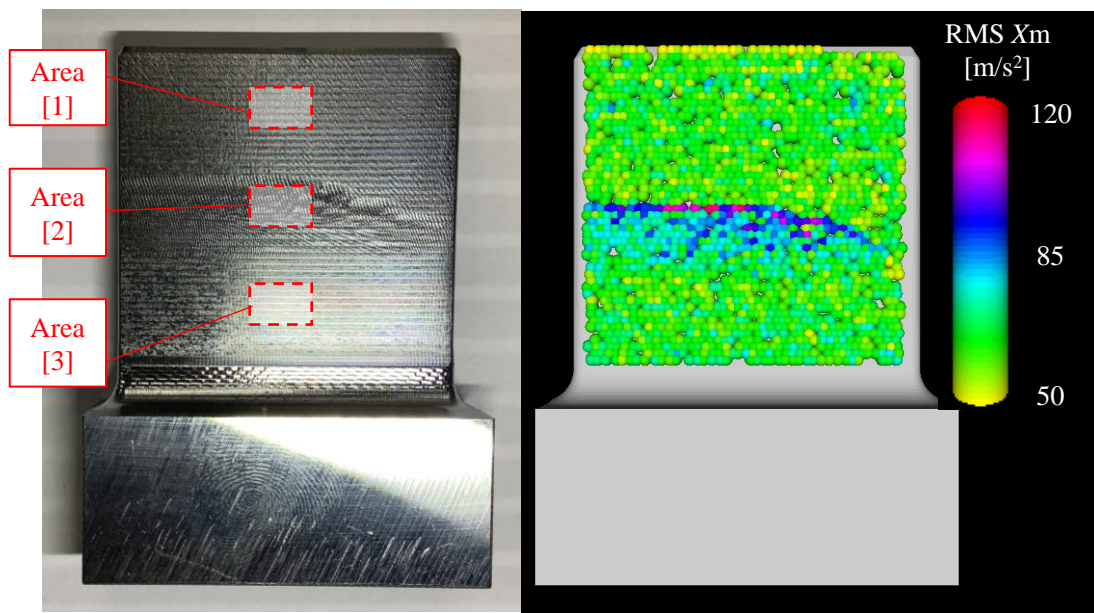


Fig.5-3 Workpiece machining direction and robot atmosphere.

Table 5-3 Roughing and finishing tools used for polishing.

Grindstone model	G3511 (Nihon Seimitsu Kikai Kosaku)			Image	
Particle size	#60 vitrified grindstone			$\phi 13$	
Number of cycles	2	Shape	Taper cone		
Diameter	Max 13mm	P	0.1 mm		
Length	30 mm	Ae	0.08 mm		
Feed	80 mm/s	θ	15 deg		
Range	14 mm($Z_{+/-} = 18 / Z_{-} = -32$)				
Grindstone model	GCMH-125 (Yanase Co., Ltd.)				Image
Particle size	#80 rubber grindstone				$\phi 12$
Number of cycles	3	Shape	Bullet-shaped		
Diameter	Max 12mm	P	0.4 mm		
Length	32 mm	Ae	0.2 mm		
Feed	80 mm/s	θ	15 deg		
Range	48 mm($Z_{+} = 4 / Z_{-} = -44$)				



(a) Surface photo. (b) Color plot of RMS value of X_m on 3DCAD.
 Fig.5-4 Image of surface condition after machining.

標位置情報を用いて 3DCAD 上へのカラープロットした図を図 5-4(b)に示す. 今後の解析のために $Z=0$ の面から -10mm , -25mm , -40mm の領域を着目しそれぞれ [1],[2],[3]とした. バレル工具では同径のボールエンドミルと比較してワークとの接触が長い. そのため再生効果が生じやすく, びびり振動も生じやすいと推測された. ワーク写真を確認すると中間位置で大きなびびり振動が生じていたことがわかる. カラーマップした CAD 図と比較すると, X_m の大きい位置とびびり振動の位置が対応していることがわかる. このことから同時 5 軸加工においても第 3 章同様にびびり振動起因の加工表面異常をインプロセスで把握できていることがわかる.

生波形取得モデルを用いて同様の切削条件で切削加工を実施した. 生波形取得モデルでも実効値取得モデルと同様の位置でびびり振動が生じており, 今回の加工手法では 2 種類のホルダ変更の影響は見られなかった. 領域[1],[2],[3]での切削加工中の 0.1s の生波形を図 5-5 に, その FFT 解析結果を図 5-6 に示す. 生波形データから領域[1],[3]では安定しているが, 領域[2]では大きな振動が生じていることがわかる. 位置 2 における FFT 解析結果のみ $700\sim 800\text{Hz}$, $2200\sim 3000\text{Hz}$ に大きなピークがみられた. ワークの FEM 解析による固有振動数は 1 次が 645Hz , 2 次が 1562Hz , 3 次が 3902Hz であった. 第 3 章では片端支持, 他端弾性支持の状態では計算した固有振動数より少し高い周波数でびびり振動が生じており, 同様の現象が生じたと考えた場合, 1-2 次のモードが強く生じていると想定される.

これらより、実効値のインプロセスデータを 3DCAD 上にプロットすることで切削時に生じた複数のモードのびびり振動に対して、その大きさを座標空間上で視覚的に理解することができた。

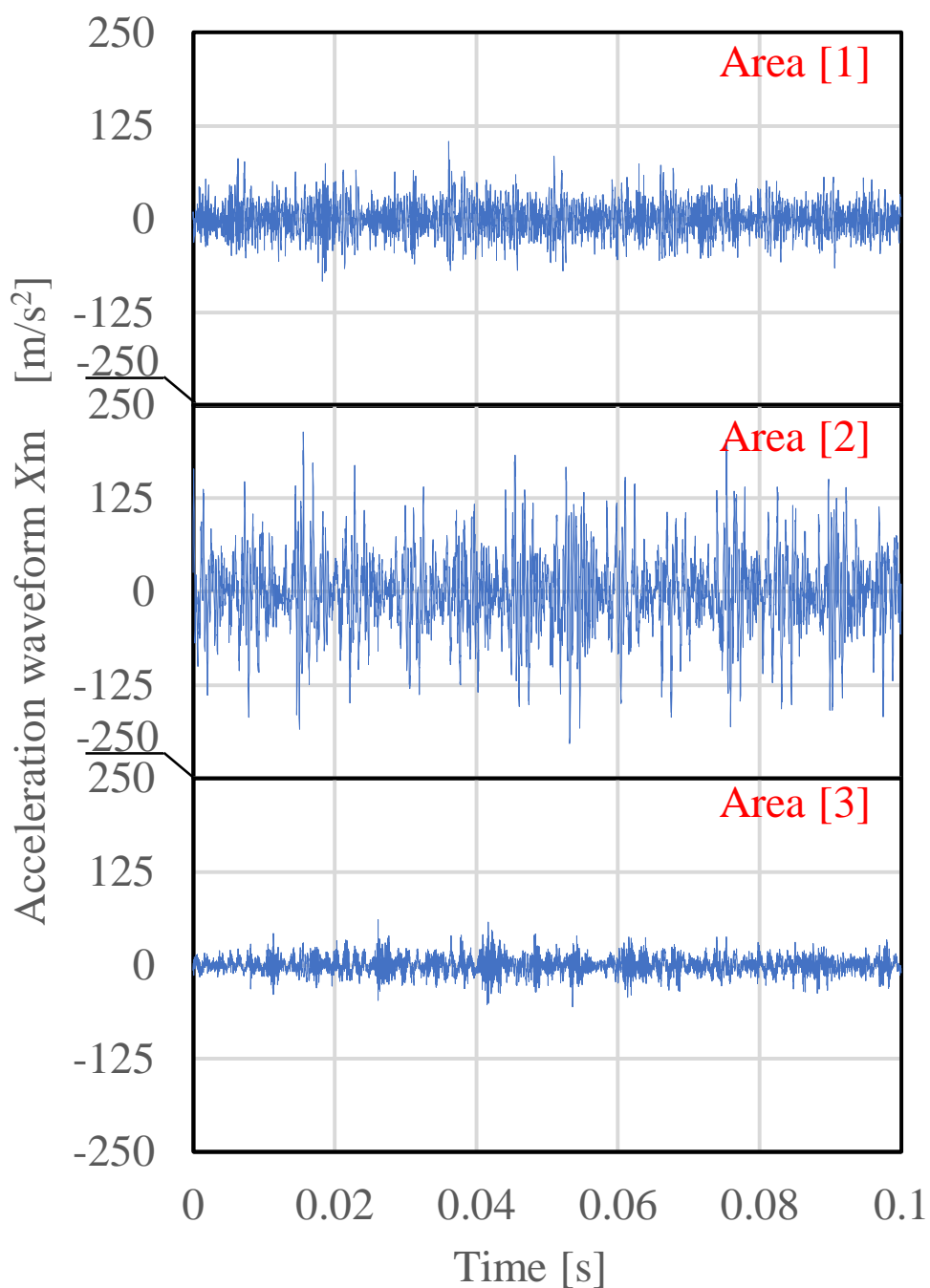


Fig.5-5 Waveform of X_m during cutting for areas 1-3.

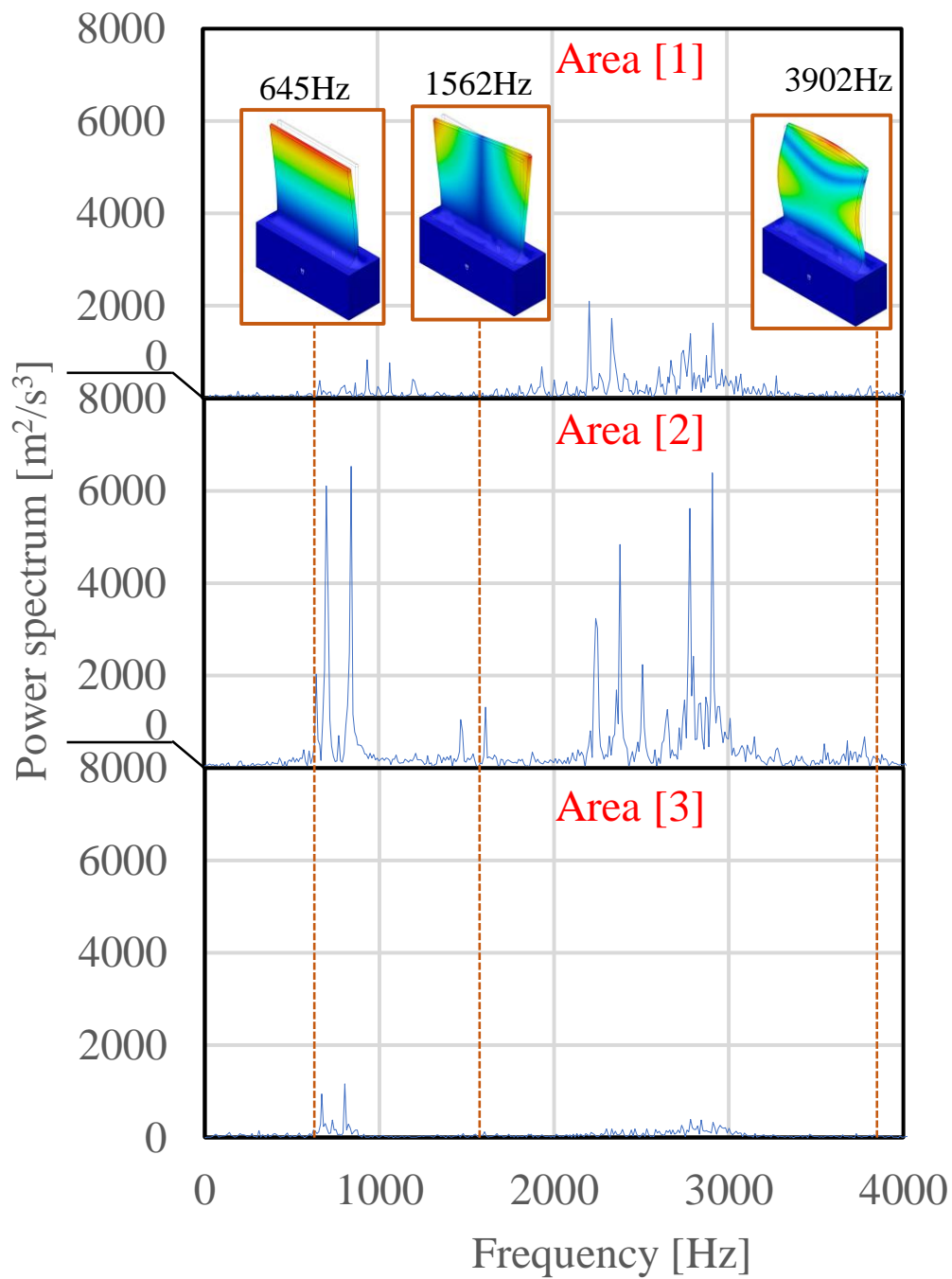


Fig.5-6 FFT transform at 0.1 s of X_m during cutting for areas 1–3.

5.3.2 協働ロボットによる磨き時のインプロセス計測

荒磨きにおいて磨き時間を短縮するために、大きなびびり振動が生じている面(領域[2])のみを実施することを検討した. 具体的には, 図 5-7 に示すように X_m 実効値の Z 高さ毎の平均値を取得し, 振動値が大きい範囲 $Z=-18\sim-32\text{mm}$ に着目して荒磨きを適応させた. 荒磨き動作中のロボット内蔵力センサ F_x (=ワーク磨き面垂直方向の力)の値, エア流量, 加速度振動 RoX_m , 砥石表面温度のそれぞれの値に対し, ロボットの加工座標値から往路磨きと復路磨きを切り分けたときの平均値を算出した. この値を往復回数 N 毎にプロットした図を図 5-8(a)に, 同様にして仕上げ磨きに適応した図を図 8(b)示す.

荒磨き時の F_x を確認すると, N が増加するほど F_x の値が 0 に近づく傾向がみられた. 磨き開始時の切込み A_e が一定となるように設定したため, 工具摩耗が進行すると接触面積および接触力が低下する. この影響をモニタリングすることができた. エア流量および RoX_m の値においては $N=1.5$ 以降で低下する傾向にあることがわかった. エア流量の低下はエアマイクログラインダーの工具回転数の低下につながるため, それに伴い加速度振動が低下した. 工具摩耗と回転数低下により, ワークに対する仕事量が低下したため, 温度センサから得られた工具表面温度が下がった. このように 4 種のセンサ値から複合的に情報分析することで磨きの状態を把握することができた.

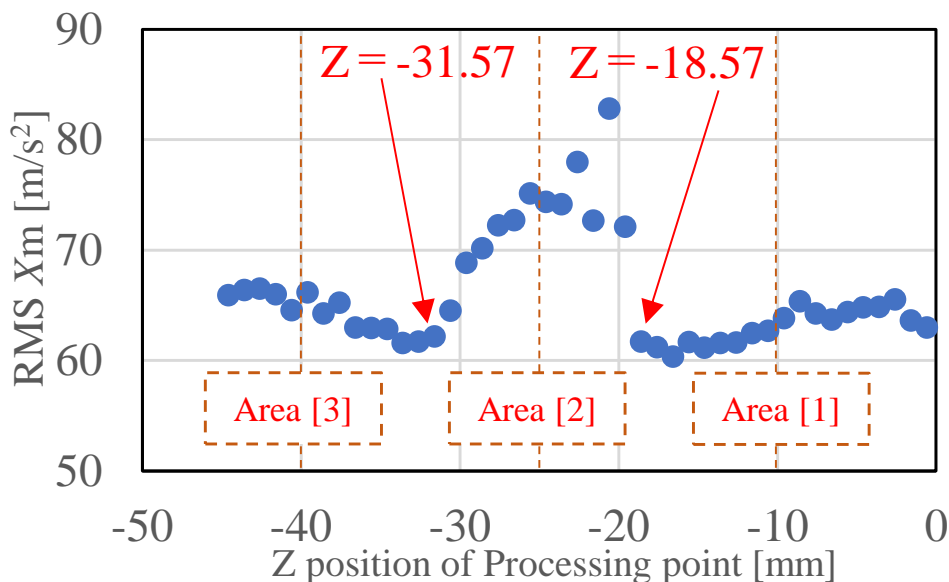


Fig.5-7 Average of the RMS values of X_m for each Z-level.

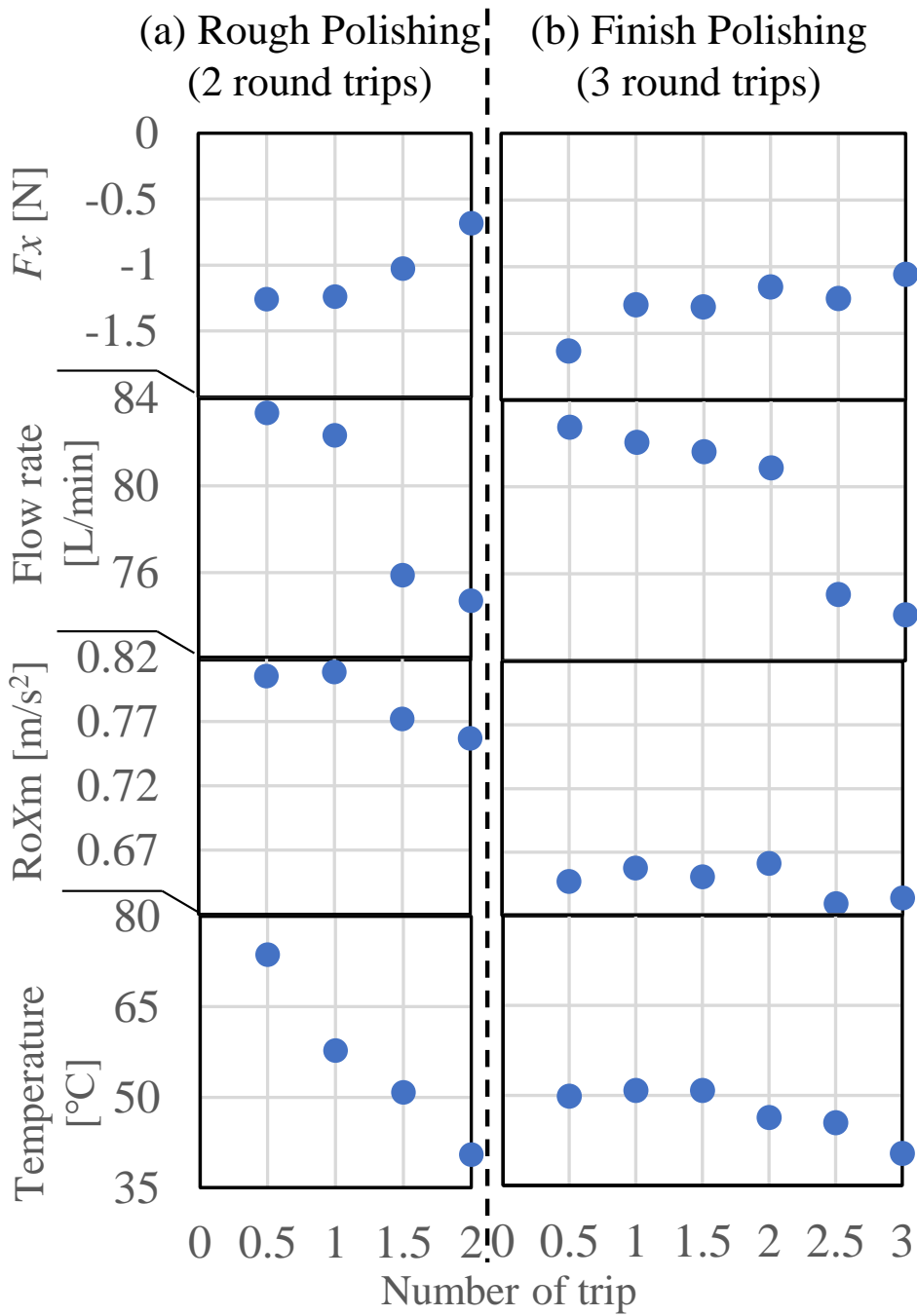
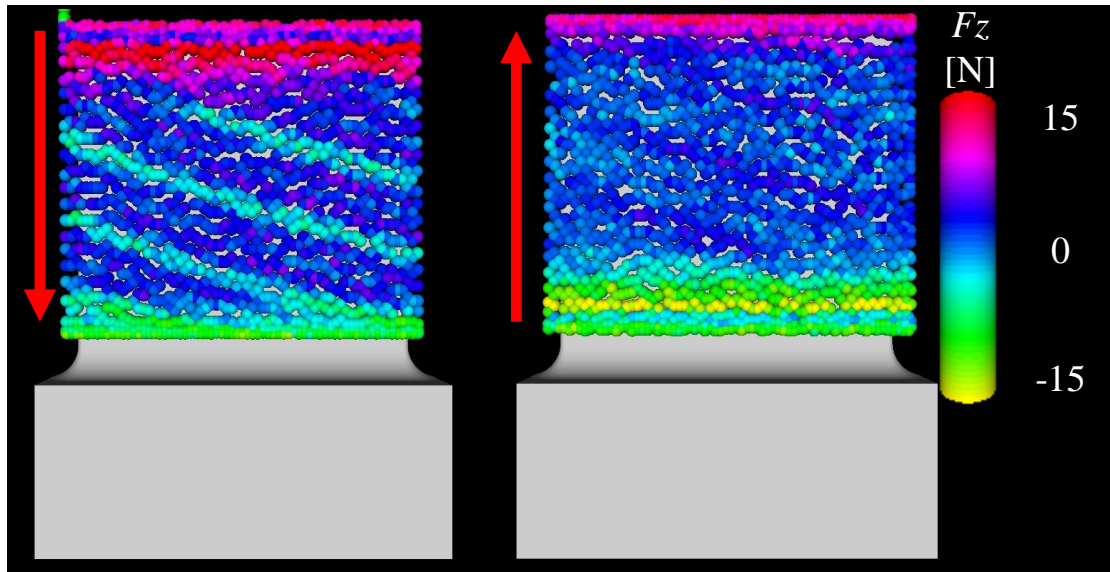


Fig.5-8 Relationship between the number of round trips, F_x , flow rate, RoXm, and temperature in (a) rough polishing and (b) finish polishing.

仕上げ磨きは領域[1],[2],[3]を含む切削加工全面に対して実施した。 F_x を確認すると荒磨き同様に 0 に近づく傾向がみられた。 その一方で復路は往路と比較して力が 0N に近い傾向がみられた。 これは往路がアップカット、復路がダウンカットとなり、先行研究⁵⁻⁶⁾と同様に磨き方向の違いによって生じている力の差であるとわかった。 エア流量や $RoXm$ は $N=2.5$ から低下しており、その低下量も同等であることから荒磨き同様に回転数が低下していることが判明した。 $RoXm$ において詳細に確認すると、空転時と比較して磨き時にワークと接触すると若干小さな値となっていた。 工具振れが大きい場合、振動が大きく出力されるが、ワークに接触することで振動が小さくなる。 今回はこの現象が顕著に出たことがモニタリングできた。 また、荒磨き時と比較して全体的に小さな値を出力していた。 これは工具材質が荒磨き時はビトリファイド砥石、仕上げ磨き時はゴム砥石と工具材質の弾性の違いにより振動にも違いが生じており、その結果エアグラインダーでの振動差としてモニタリングできた。 砥石表面温度においては荒磨き時と異なり、磨き開始から上昇し、 $N=1.5$ でピークを迎え、その後下がっていく結果であった。 $N=1.5$ 以降では荒磨きと同様に工具摩耗と回転数低下により、ワークに対する仕事量が低下したため工具表面温度が下がった。 また、切込み Ae を比較すると荒磨き時より仕上げ磨き時が多い。 一方、最高温度は荒磨き時より仕上げ磨き時が低い。 さらに温度の上昇しやすさを比較すると、荒磨き時は $N=0.5$ で最高温度に達しているが、仕上げ磨き時には $N=1.5$ で最高温度に達していた。 ことから荒磨きと比較し、仕上げ磨きでは仕事量が少ないことが判明し、最高温度が低くかつ温度上昇が少なかった。 このように工具の振れによる影響や工具材質の弾性の違いによる影響もモニタリングすることができた。

仕上げ磨きにおける F_z の値に着目する。 $N=0-0.5$ においてロボットで得られた Z 座標値の 1 点前に得られた値との差分を取得した。 その値が負の値であれば Z-方向にかけ下がっていることを示し、正の値であれば Z+方向にかけ上がって磨いていることを示す。 このようにかげ上がりおよびかけ下がりの動作を切り分けて 3DCAD 上にカラーマッピングした図をそれぞれ図 5-9(a)および(b)に示す。 Z-方向にかけ下がる場合においては F_z が波打ちながら変化していることがわかる。 一方で Z+方向に駆け上がって磨く場合は比較的安定していることがわかった。 このことより、Z+方向へ駆け上がりのみで仕上げた場合に品質や工具摩耗が安定する可能性があることがわかり、磨きのモニタリングは動作の検討にも有効なツールであることがわかった。

一定切込みによる制御のため、荒磨きにより領域[2]のみ磨き代が変化し、加工状



(a) Running down motion only. (b) Running up motion only.

Fig.5-9 Color plot of F_z in finish polishing for $N=0-0.5$.

態に影響を及ぼすことが懸念された。最も顕著に表れるのが初回仕上げ磨き時の $N=0-0.5$ であり、その時の F_x , エア流量, RoX_m , 砥石表面温度の値を図 5-10 に示す。確認するといずれのセンシングにおいても磨き代の違いによる影響はほとんどないことがわかる。これより、荒磨きによる磨き代変化は仕上げ磨き加工に影響を与えていないことがわかった。

5.3.3 加工後ワークの評価

加工後ワークの表面状態は粗さ測定と鏡面度の測定にて評価を実施した。

各工程の加工後ワークの表面写真と表面粗さを図 5-11 に示す。表面粗さ R_a は領域[1],[2],[3]に対して接触式粗さ測定器にて計測した。切削加工後の領域[2]においてはびびり振動の影響により $R_a = 4.09\mu\text{m}$ と他計測点の 3 倍以上の数値となっていることがわかる。荒磨き後の領域[2]においては表面の状態が改善され、 $R_a = 0.79\mu\text{m}$ を実現した。これにより、仕上げ磨き後にはすべての領域において $R_a = 0.3\mu\text{m}$ 前後となり、領域[1],[2],[3]全面にわたって均一で狙い値を満たす表面粗さを得ることができた。

最終仕上げ後の加工後ワークの板厚をマイクロメーターで計測すると切削仕上げ時と比較して領域[1]は $-10\mu\text{m}$, 領域[2]は $-36\mu\text{m}$, 領域[3]は $-11\mu\text{m}$ となっていた。領域[2]のみ荒磨きを実施したため、他領域より $25\mu\text{m}$ ほど多く削られていたが、形状としては大きく崩れることなく形状誤差は十分に狙い値を満たすことができた。

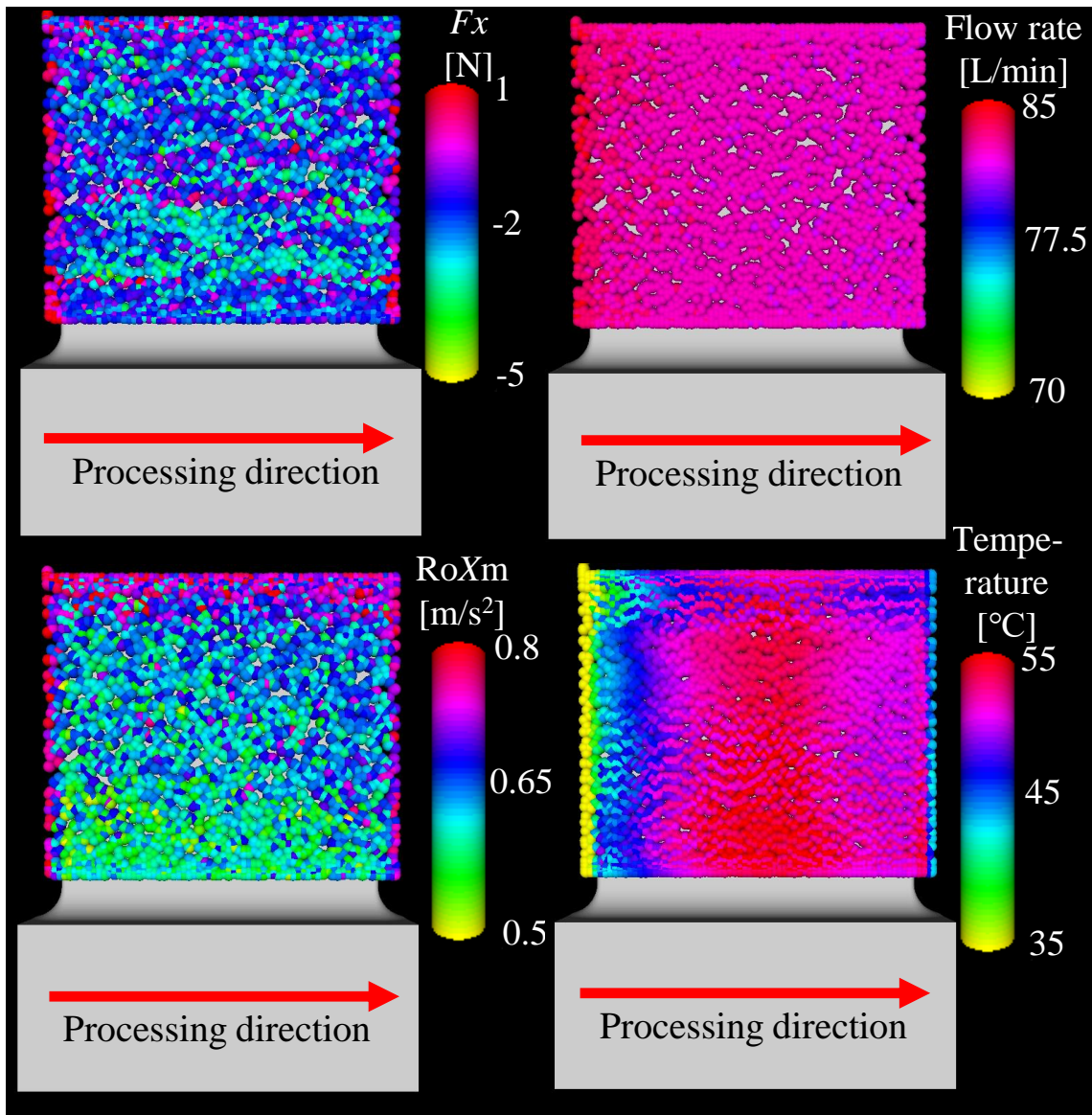


Fig.5-10 Color plot of F_x , air flow rate, $RoXm$, and temperature in finish polishing for $N=0-0.5$.

鏡面度を測定するために先行研究⁵⁻⁷⁾に従い鏡面度測定を実施した。その際のレイアウトを図 5-12 に示す。白色平面光を 2mm の間隔に並んだスプリッターを通すことで、平行スリット光にした。これを加工面に照射し、映った像をカメラで撮影して画像処理した。画像処理では平面補正を実施したのち赤色成分のみを抽出しグレースケール処理を実施した。その処理後の画像に対し、領域[1],[2],[3]の高さでラインプロファイルを取得した。切削加工後、仕上げ磨き後のワークおよび市販の鏡面に対して上記の処理後の画像を図 5-13(a)に、ラインプロファイルを図 5-13(b)に示す。切削加工後のワークの表面にはスプリッターによる縞模様がほとんど見えておらず、ワークに反射した際

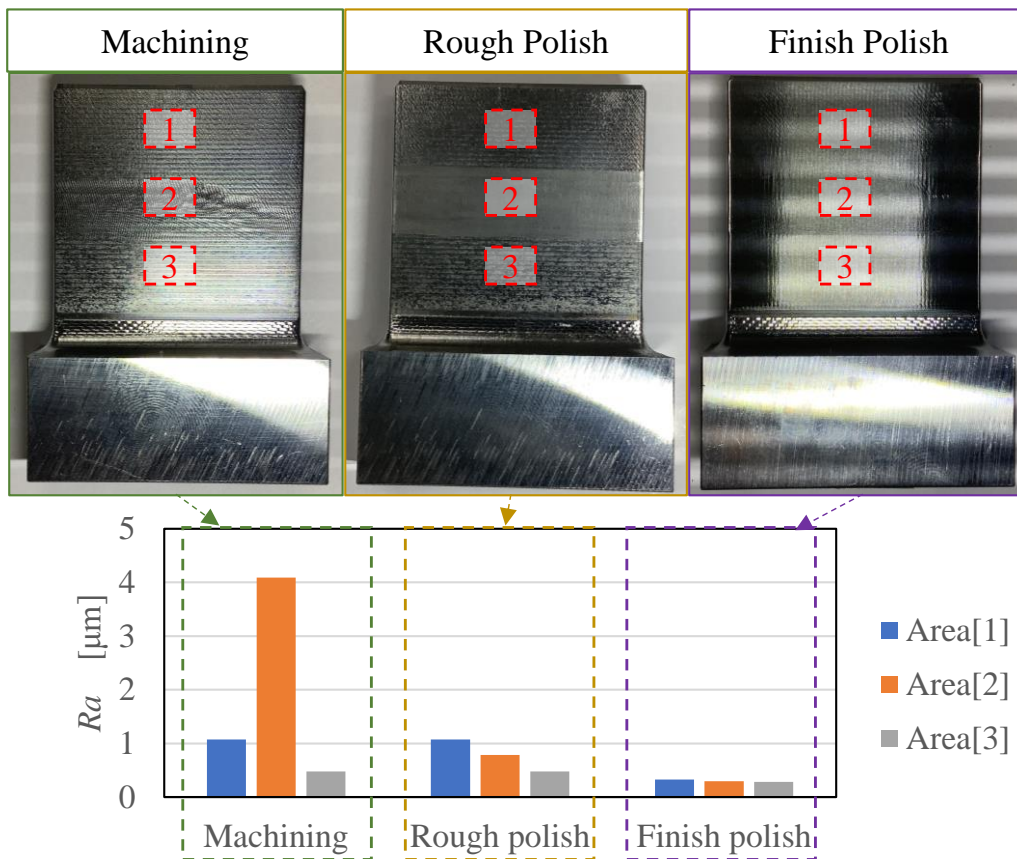


Fig.5-11 Photograph of the surface after processing and surface roughness Ra .

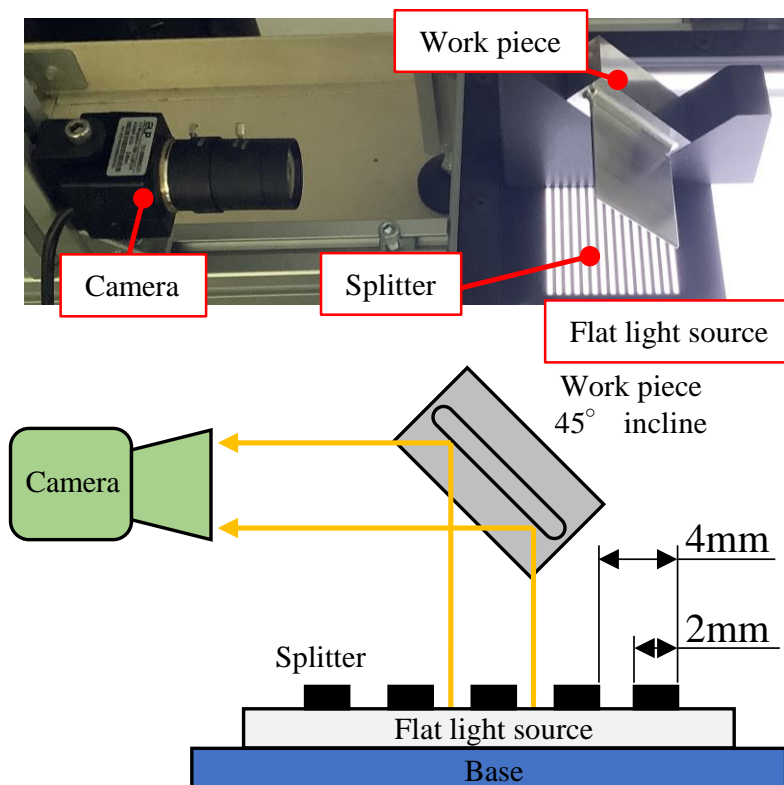


Fig.5-12 Atmosphere and schematic diagram of specularity measurement.

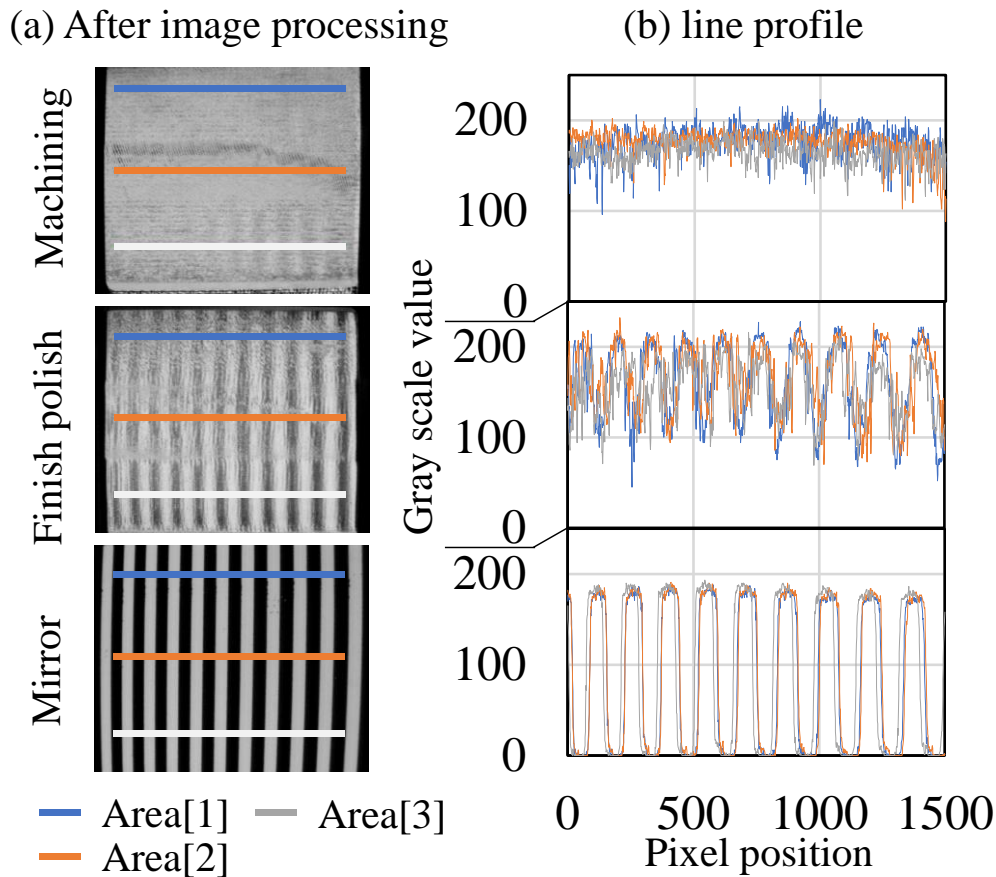


Fig.5-13 Specularity measurement results

(a) after image processing and (b) line profile.

に反射光が散乱していることがわかる。その一方で仕上げ磨き後のワークにおいては縞模様が転写されていることがわかる。これを市販の鏡で実施すると鮮明に転写され、光が散乱せず正反射していることがわかる。ラインプロファイルにおいてピクセル 1500 点からグレースケール値が大きい 10 点の平均値から小さい 10 点の平均値の差分をコントラスト差とした。各々のラインプロファイルのコントラスト差を図 5-14 に示す。コントラスト差の切削加工後、仕上げ磨き後および鏡での平均値はそれぞれ 93, 149, 189 となっており、仕上げ磨きまで実施することで鏡面に近づいていることがわかる。さらに、仕上げ磨き後のコントラスト差はいずれの断面においても切削加工後よりも鏡面に近づいており、均一に表面を改善できていることがわかる。また、切削加工後の領域 2 のコントラスト差を確認すると 105 であり、切削加工後の範囲では最も高かった。表面粗さが最も悪いということを考慮すると、びびり振動による切削模様によって濃淡が生じコントラスト差が高くなったものと考えられる。このように、鏡面度を評価するにはコントラスト差と表面粗さを並行して確認していく必要があることがわかった。また表面の評

価値として、表面粗さと鏡面度の観点からびびり面が一部に含まれる場合でも均一な磨き面を得ることができることがわかった。つまり、今回試みた切削加工時のインプロセス情報を磨き動作にフィードバックする手法の有効性を示すことができた。

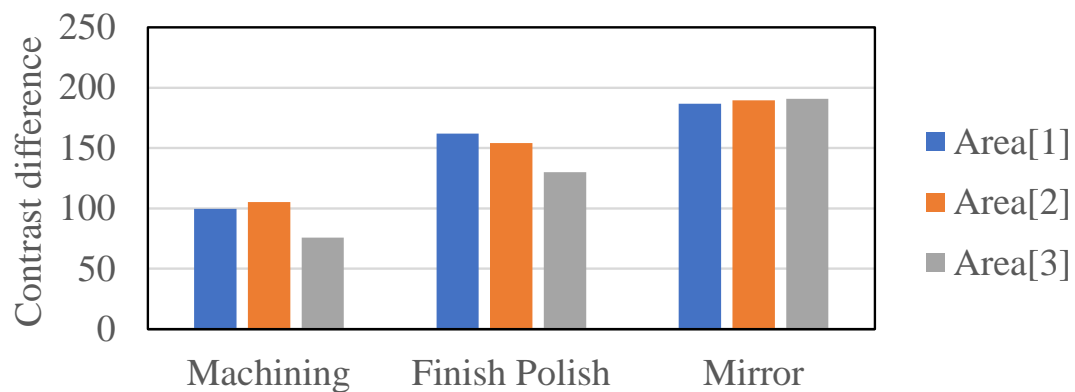


Fig.5-14 Contrast difference in specularity measurement.

5.4 結論

CAM で出力される CL の座標系で統合して、中型の 5 軸制御マシニングセンタ(5 軸制御工作機械)のインプロセス振動情報と、協働ロボットをベースとしたセンシングシステムを用いて磨き動作を検証し、それらの前工程(荒切削加工)と後工程(砥石による磨き仕上げ加工)のつながる工程間情報の有効性について考察した。結果を以下にまとめる。

- (1) 薄いワーク形状やバレル工具ならびに同時 5 軸を用いた切削加工においても、無線多機能工具ホルダシステムでびびり振動を取得することができることがわかり、FEM 解析と生波形計測モデルを合わせて分析することでびびり振動の原因を予想することができた。
- (2) 切削加工時の振動情報と CNC 内部情報を組み合わせ 3DCAD 上に情報をプロットすることで、加工表面の状態が予想できることがわかった。
- (3) 切削加工におけるインプロセス振動情報の強弱で、次工程である荒磨きの動作範囲を変更することで、磨き時間の効率化を実施することができた。
- (4) ロボットでの磨き動作時にモニタリングした情報から工具の摩耗状態やエアグラインダーの状態を把握できることがわかった。加えて、協働ロボットの人との接触の認識センサの内部情報から Fz のモニタリングをすることで、その値が安定する磨き動作が存在することが確認できた。
- (5) コントラスト差と表面粗さを並行して確認していくことで鏡面度を評価可能であることがわかった。また磨き仕上げ後の表面の評価として、表面粗さと鏡面度の観点から、びびり面が含まれていても仕上げ磨き後には均一な磨き面を得ることがわかった。

参考文献

5-1) 新堂正俊, 松田亮, 古木辰也, 廣垣俊樹, 青山栄一, ”無線ホルダシステムを用いたエンドミル加工時の工具内部温度の考察”, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.826 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00046.

5-2) 原口林太郎, 植村幸市, ”IoT時代の産業用ロボットと活用事例”, 日本ロボット学会誌, Vol.37, No.8 (2019), pp.690-693.

5-3) 三上知三, “精密仕上げロボットシステムを用いた実用化例と今後の展開”, 日本ロボット学会誌, Vol34, No10(2016), pp. 676-679.

5-4) 山本隆将, 松田亮, 新堂正俊, 廣垣俊樹, 青山栄一, “5軸制御マシニングセンターからの加工情報と協働ロボットによる仕上げ作業の統合”, 砥粒加工学会誌, 掲載決定済み

5-5) Takamasa Yamamoto, Ryo Matsuda, Masatoshi Shindou, Toshiki Hirogaki, Eiichi Aoyama, “Polishing System with Integrated Five Axis Controlled Machine Tools and Cooperative Robots based on Wireless Communication and Acquisition of Servo Information” , International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol.11, No.11(2022), pp.801-806

5-6) 塩崎進, 古川勇二, 大石進, ”クリープフィード研削における上向きおよび下向き研削機構の相違”, 精密工学会誌, Vol. 45, No.533 (1979), pp. 599-606.

5-7) 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, 川口二俊, 末田秀則, 須知亮, “5軸制御マシニングセンターで創成される仕上げ加工面の考察”, 精密工学会誌, Vol.75, No.10 (2009), pp.1238-1244.

第 6 章

結 論

本章では、これまで述べてきた各章の結論の要点をまとめ、本研究によって得られた成果を明確にしている。

6.1 本研究の成果

本論文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した。特に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想定した。これらの生産において物理量のモニタリングから検討・考察を実施した。さらに、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、その事例を示すことができた。このことから、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。

第 2 章から第 5 章までに得られた結果を総括すると以下ようになる。

第 2 章では、無線式多機能工具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を遂行することで、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して、サーボ内部情報との比較検討を遂行しながら考察した。その結果、本手法で工作機械の主軸特性の違いを感度良く検出できることがわかった。さらにサーボ内部情報や切削抵抗と複合的にモニタリングすることで、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においてびびり振動が複雑に生じる現象の状態診断においても本システムの有効性を示すことができた。

第 3 章では、無線式多機能工具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 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が有効であることを示した。

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、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・力が同時取得可能なシステム構築を行った。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前章までで用いたシステムで振動モニタリングを行いながら実施したのち、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するにあたり、統一した CAM 座標系に基づく効率的な磨き加工方法について考察し、その有効性を示した。

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 44kHz の高速サンプリング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から、ワークの表面状態に異常がある箇所をピンポイントで把握可能な解析手法を開発した。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個所のみをピンポイントで荒磨きを遂行して、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加工現象の確認と品質改善について考察し、その有効性を示した。

第 6 章は、以上をまとめた本研究の結論を示している。

6.2 今後の課題

本研究では、スマートファクトリー実現のための応用技術としてその有効性を示すことができたが、実際の製造現場に適応するにあたって主に3つの問題が残されている。

1つ目は、切削加工で使用する無線式多機能工具ホルダシステムの長時間稼働である。第5章では2つのタイプのあらたな無線式多機能工具ホルダシステムを用いたが、いずれにおいても内蔵バッテリーを保有しており充電は必須である。スマートファクトリーでは無人・省人工場が想定されており、その生産ラインに組み込む場合、長時間稼働が求められる。その中では、電池切れなどにより本来検知しなければならない異常を検知できなければ製品品質が損なわれたものが大量生産されるリスクがある。本研究で得られた知見をより有効的に活用していくためにも、無線給電や、自己発電機能など、本ホルダシステムへの給電方法について検討する必要がある。

2つ目はロボットでのモニタリングデータの高度活用である。切削においては第3章で示すように、加工データを同工程内でフィードバック制御することが可能である。しかしながらロボットでの磨きシステムにおいては第5章で品質評価や品質向上のための可能性を示すことができたが、その実践まで行うことができていない。今後これらインプロセスデータを用いていくことでロボットの加工動作や加工条件へフィードバック制御を実施し品質の安定化・高度化を試み、さらには検査レス化を行うことで高度なスマートファクトリー化が期待できる。

3つ目はデータ処理の自動化である。スマートファクトリー化が進むにつれ、取得されるデータが増大していくことが予想される。本論文で用いたすべての手法においても多くのデータ処理が必要となっていた。特に第5章で用いた無線式多機能工具ホルダシステムの生波形取得モデルにおいては1秒間44100点もの振動データが取得され、長時間の加工においてはそれだけで膨大なデータ量となってしまう。スマートファクトリーにおいては適応制御が求められるため、リアルタイムにデータ取得と処理していく技術が求められる。本論文ではリアルタイムのデータ取得において実践してきたが、データ処理においては机上で行っていたため、常時最適制御を実践することはできなかった。今後、現場でのリアルタイムでの適応制御が実施可能となるように、AI技術など導入したリアルタイムデータ処理について検討していく必要がある。

スマートファクトリー実現のために、上述した課題を解決し、従来のものづくりからの革新的な進化の一助となれるよう、研究開発を進めていく。

謝 辞

本研究を遂行し学位論文をまとめるにあたり、多大なるご支援とご指導を賜りました指導教官である、同志社大学理工学部 教授 廣垣俊樹 博士に深く感謝いたします。また、本研究を遂行し学位論文をまとめるにあたり、懇切丁寧なご指導、ご助言を賜りました同志社大学理工学部 教授 青山栄一 博士に感謝の意を表します。さらに、貴重なご助言を賜りました同志社大学理工学部 教授 伊藤彰人 博士に感謝申し上げます。

本研究を遂行するに当たり、所属する株式会社山本金属製作所の皆様には多大な援助を承りました。山本憲吾社長にはご指導頂くと共に学位取得の機会を与えて頂きましたことを深く感謝申し上げます。さらに、本研究に欠かせない技術・知識を賜りました新堂正俊課長、松田亮係長に感謝の意を表します。

最後に、本研究の実験全般にご協力いただきました同志社大学理工学部機械系学科・生産システムデザイン研究室の皆様、株式会社山本金属製作所の皆様に感謝いたします。