

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	センサ信号解析および機械学習に基づくエンドミル加工の状態モニタリング
Title(English)	
著者(和文)	高口 順一
Author(English)	Junichi Kouguchi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12687号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:進士 忠彦,吉野 雅彦,田中 智久,赤坂 大樹,中野 寛,吉岡 勇人
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12687号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

センサ信号解析および機械学習に基づく エンドミル加工の状態モニタリング

高口 順一

目次

第 1 章 緒論.....	1
1.1 背景および先行研究事例	1
1.2 課題および研究の目的.....	10
1.3 論文の全体構成.....	11
第 2 章 モデルベースアプローチによる切削力および振動モニタリング	13
2.1 緒言.....	13
2.2 切削力および振動のモニタリング.....	13
2.2.1 提案方法の概要.....	13
2.2.2 加速度信号の逐次 2 次回帰近似.....	15
2.2.3 切削力の推定	16
2.2.4 切削力特徴量	18
2.2.5 振動特徴量.....	19
2.3 実験加工機	20
2.4 直線送り加工における提案方法の評価	23
2.4.1 加速度センサ信号の逐次 2 次回帰近似の評価	23
2.4.2 切削力推定の評価	30
2.4.3 切削力特徴量の評価	35
2.4.4 振動特徴量の評価	36
2.4.5 周波数分析による振幅スペクトルとの比較	38
2.5 コーナー加工での評価.....	39
2.6 加工中の異常振動の評価	45
2.7 摩耗工具での加工における評価	50
2.8 結言.....	55
第 3 章 工具主軸の静的変位のモニタリング	56
3.1 緒言.....	56
3.2 工具主軸の静的変位の計測.....	58
3.2.1 実験加工機およびセンサ	58
3.2.2 計測および評価.....	59

3.3	静的変位のモニタリングおよび切削力推定の高精度化の提案	64
3.3.1	提案方法の概要	64
3.3.2	テーブル変位の計測	65
3.3.3	モデルパラメータの同定と切削力推定	66
3.3.4	工具主軸の静的変位の推定	67
3.4	実験加工機およびモデルパラメータ	68
3.4.1	実験加工機	68
3.4.2	テーブルのモデルパラメータ	69
3.5	評価	71
3.5.1	一定の切削負荷での直線送り加工	71
3.5.2	切削負荷を変化させた加工	76
3.5.3	加工方向を変化させた切削加工	80
3.6	結言	85
第4章	機械学習を用いたモデルパラメータ同定による切削力推定法	86
4.1	緒言	86
4.2	切削力推定法	87
4.2.1	提案方法の概要	87
4.2.2	振動モデル	88
4.2.3	モデルパラメータ同定のための機械学習	92
4.3	実験加工機および学習データ	94
4.3.1	実験加工機	94
4.3.2	機械学習のための学習データ	97
4.4	モデルパラメータの同定	100
4.4.1	Y方向のモデルパラメータ	100
4.4.2	X方向のモデルパラメータ	102
4.4.3	Z方向のモデルパラメータ	105
4.5	同定したモデルパラメータの評価	107
4.5.1	Y方向のモデルパラメータの評価	107
4.5.2	X方向のモデルパラメータの評価	110
4.5.3	Z方向のモデルパラメータの評価	111

4.6	様々な条件下での評価結果	112
4.6.1	切削負荷を変化させた加工	112
4.6.2	加工方向を変化させた切削加工	114
4.6.3	工具回転速度を変化させた加工	117
4.6.4	異なる切削工具での加工	117
4.6.5	異なる被削材での加工	119
4.7	中間層を導入した機械学習	120
4.8	結言	122
第 5 章	結論	124
5.1	本研究の成果	124
5.2	今後の課題および展望	126
参考文献		127

論文要旨

近年、環境負荷低減の要求といった社会的背景により、製造プロセスも一層の高度化が求められている。そのために切削加工の状態モニタリングは重要な技術であるが、特に小径エンドミル加工においてはまだ課題がある。そこで本研究の目的は、高速回転工具を用いた形状加工における切削力および振動モニタリングの実現である。具体的には工具主軸に付けた加速度センサを用いて、センサ信号解析によりモニタリングを行う。これには切削力や振動についての特徴量を定義して提案し、さらには計測した駆動テーブル側の変位情報を加えてより高精度なモニタリングを提案する。結果として、小径エンドミルでの形状加工への適切なモニタリングを実現している。

本論文は全 5 章で構成され、各章の内容は以下の通りである。

第 1 章「緒論」では、社会的背景から製品の複雑化と製品プロセスの高度化が求められる中で、切削加工の状態モニタリングが重要な技術であることを指摘した。また、切削加工の状態モニタリングに関する現状を明らかにし、小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工への適用における問題点を説明した。そして、この問題を解決する切削加工の状態モニタリングの実現を本研究の目的とすることを述べた。

第 2 章「モデルベースアプローチによる切削力および振動モニタリング」では、モデルベースアプローチによる切削力および振動モニタリングについて提案した。工具径の小さい切削工具を使用する場合には、工具先端付近で発生する高周波の振動が加速度センサ等の計測値に含まれるため、切削加工の状態モニタリングが困難である。そこで、提案方法では逐次 2 次回帰近似を用いて加速度センサ信号から一刃周期の加速度変動と高周波振動成分の分離を行い、モデルベースアプローチから切削力を推定する。その後、新たに定義した切削力と振動の 2 つの特徴量を算出し、切削加工の状態モニタリングを行う。この提案方法を用いて、直線送りでの加工やコーナー加工において適切なモニタリングが可能であることを確認した。また、X, Y 方向に加えて Z 方向に対してもモニタリングが可能であることを確認した。さらに、切削加工中の異常振動や摩耗工具による切削力の変動など、問題となる状況を意図的に発生させてモニタリングを行った。このように、従来では難しかった小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工に対して、切削力および振動の適切なモニタリングを実現した。

第 3 章「工具主軸の静的変位のモニタリング」では、工具主軸の静的変位のモニタリングおよびそれを利用した高精度な切削力の推定方法を提案した。まず、工具主軸を外部から変位センサにより計測することで、切削加工中に工具主軸の静的変位が存在することを確認した。その上で、変位センサを追加することなく静的変位を推定する方法について提案を行った。具体的には、モータエンコーダとリニアスケールの相対変位をテーブル変位と定義し、ここから推定切削力を算出し、静的変位の推定値を求める。そして、静的変位の推定値を利用して工具主軸側のモデルからより正確な切削力を推定する方法である。この提案方法について、一定の切込み

量での直線送り加工，切込み量を変化させた加工，加工方向を変化させた切削加工において評価を行った．その結果，推定切削力について改善が見られることを確認した．本章では，センサを用いて実現している切削加工の状態モニタリングに対して，別のセンサを加えて活用することにより，状態モニタリングの高度化が実現できることを示した．これは，センサを増やして組み合わせていくことで更なるモニタリングの精度向上が可能であることを示しており，今後の展開を示唆する有用な成果であると考えられる．

第 4 章「機械学習を用いたモデルパラメータ同定による切削力推定法」では，機械構造のモデルパラメータの同定に機械学習を利用することで，高度なモデル化を実現する方法を提案した．実際の加工実験で計測したデータを用いるため，特別な装置やシミュレーションデータを必要としないことが特長である．この提案方法について，数ある機械学習の手法の中でも **MLP** を利用してモデルパラメータを同定し，これを用いて切削力を推定して評価を行った．一定の切込み量での直線送り加工，切込み量を変化させた加工，加工方向を変化させた切削加工，工具主軸の回転数を変化させた加工，切削工具を変化させた加工，被削材を変えた加工に対して検証し，機械学習によるモデルパラメータの同定から適切な切削力が推定できることを確認した．さらに，機械学習において中間層を追加してパラメータ数を増やした **MLP** 構成を用いると，より高精度な切削力の推定が可能であった．このように **MLP** を用いると中間層の追加が可能であり，将来的な拡張性があることを確認した．

第 5 章「結論」では，センサ信号解析および機械学習に基づくエンドミル加工の状態モニタリングについて総括した．

以上のように，本研究によって小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工における状態モニタリングについて，有用な研究成果が得られた．すなわち，工具主軸に取り付けた加速度センサおよび一般的な工作機械に取り付けられているモータエンコーダおよびリニアスケールを用いて，センサ信号解析および機械学習といった方法を活用することで，小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工における状態モニタリングが可能であることを実証できた．これまで実現が困難であった切削加工を対象にした状態モニタリングの可能性を示しており，新たな展開が考えられる有用な成果であると考えられる．

第 1 章 緒論

1.1 背景および先行研究事例

近年，地球規模の環境問題が大きな課題となっており，大量生産および大量消費の社会から持続可能な社会への転換が求められている．これを実現するために，環境負荷を低減させることを目的とした材料転換やエネルギー転換が必要とされており，結果として様々な製品がこれまでよりも複雑に変化している．このような社会的背景は生産システムにも影響を与えている．まず，製品の複雑化により製造プロセスも高度化が進んでいる．さらに，加工プロセスに対しては微細加工への要求も高まっている．加えて，必要な時に必要な物をつくる多品種少量の製造システムが求められる機会も増えてきている．高度な製品をオンデマンドで製造するためには，製造および加工プロセスの監視する仕組みが必要不可欠であり，加工の状態モニタリングは重要な技術課題となっている．

こうした社会的背景から，重要な生産システムの一つである工作機械は高機能化が進んでいる[1, 2]．その一つの例として，工作機械が自らを監視して自律的に最適な加工を実現するシステムが提案されている[3] (図 1.1)．これは生産効率化のために，高度な生産計画，シミュレーション，人工知能(AI)，適応制御などといった様々な機能を組み合わせた生産システムである．こういった統合型の生産設備は，2013 年頃からサイバーフィジカルシステム(CPS)やデジタルツインといったキーワードの普及と共に研究や開発が加速されてきた [4-6] (図 1.2)．工作機械を含む工場内にある全ての生産設備をネットワークに接続し，生産性向上に結び付けようという取り組みである．

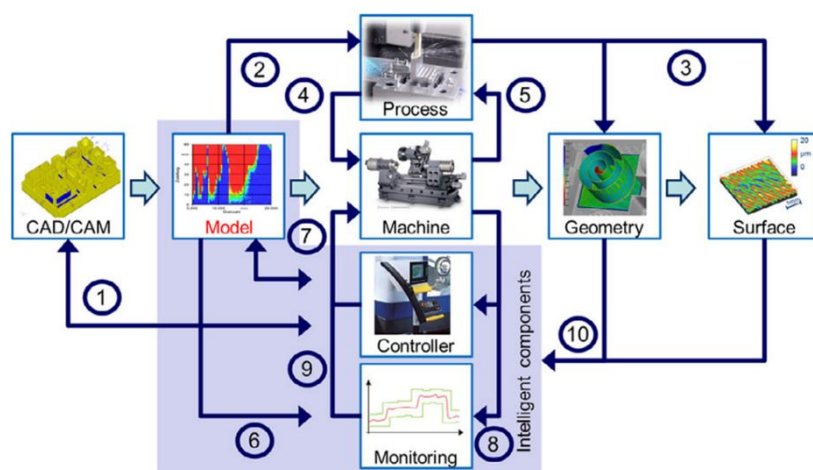


図 1.1 工作機械が自律的に最適な加工を実現するシステム [3]

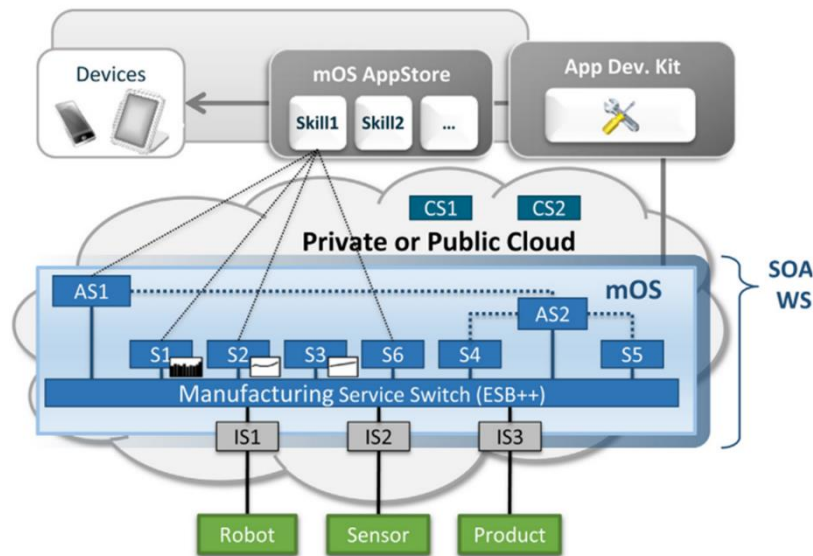


図 1.2 生産設備をネットワークにつなげるサイバーフィジカルシステム [4]

一方で，加工プロセスのモニタリング自体は長らく研究開発が行われている重要技術である[7-11]．工作機械に制御装置(CNC)と連携した切削力センサ，振動センサ，画像センサ，電流計測器などを搭載し，さらには解析演算用のコンピュータまで組み込み計測およびフィードバックを実現する事例が 1988 年にはすでに報告されている[12] (図 1.3)．こういったモニタリングには実に様々なセンサが用いられる[13-18]．切削加工プロセス，あるいは工作機械，切削工具，加工物などを計測する代表的なセンサを図 1.4 に示す．また，モニタリングの要素とそれらのセンサとの関係を示したのが表 1.1 であり，多岐に渡るモニタリングが実施されていることが確認できる．

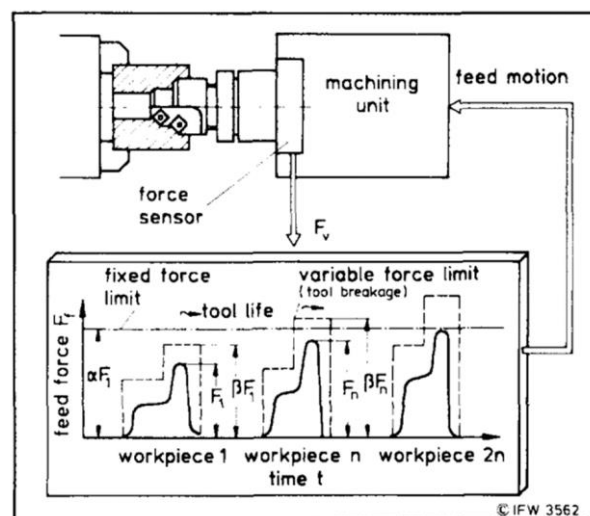


図 1.3 工作機械にセンサを組み込み計測とフィードバックを実現したシステム [12]

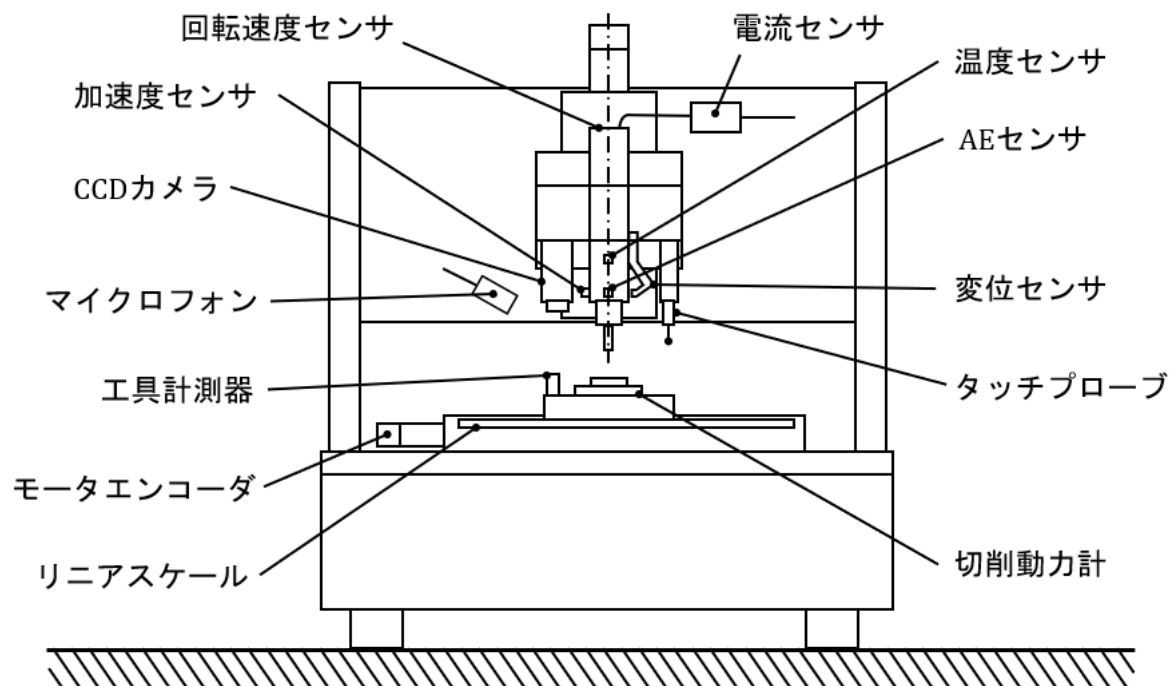


図 1.4 切削加工，工作機械，切削工具，加工物などを計測する代表的なセンサ

表 1.1 モニタリングの要素とセンサの関係

モニタリングの要素		センサ
大項目	項目	
加工プロセスの状態	切削力	・ 切削動力計 ・ ひずみゲージ ・ モータ電流
	熱	・ 熱電対 ・ サーミスタ ・ 赤外線カメラ
	振動	・ 加速度センサ
	切りくず破断	・ AEセンサ
	切削音	・ マイクロフォン
装置の状態	駆動軸の位置	・ リニアスケール ・ モータエンコーダ
	構造変位	・ レーザ変位計 ・ 渦電流式変位計 ・ 静電容量式変位計 ・ CCDカメラ
	工具主軸速度	・ ロータリエンコーダ ・ 回転速度センサ
工具の状態	工具長, 工具径	・ 接触式刃先検出センサ ・ レーザ遮断検知式 工具測定器 ・ CCDカメラ ・ AEセンサ
	工具摩耗	・ レーザ遮断検知式 工具測定器 ・ CCDカメラ
加工物の状態	寸法	・ タッチプローブ ・ CCDカメラ
	加工面粗さ, 形状	・ 接触式粗さ計 ・ 光干渉計 ・ CCDカメラ ・ レーザ反射光検知式 形状測定器

状態モニタリングの中でも最も重要な要素の一つが切削力である[19-26]。切削加工に影響を与える要因の相関図を図 1.5 に示す。切削加工の状態には、切削工具、切削熱、切削条件、切れ刃の摩耗状態、工具主軸の状態など実に様々な要素が関係している。これらの結果として、切削工具の刃先が被削材を切断する際の切削抵抗の変化に最終的に表れるため、これに相当する切削力のモニタリングが重要であると捉えられている。

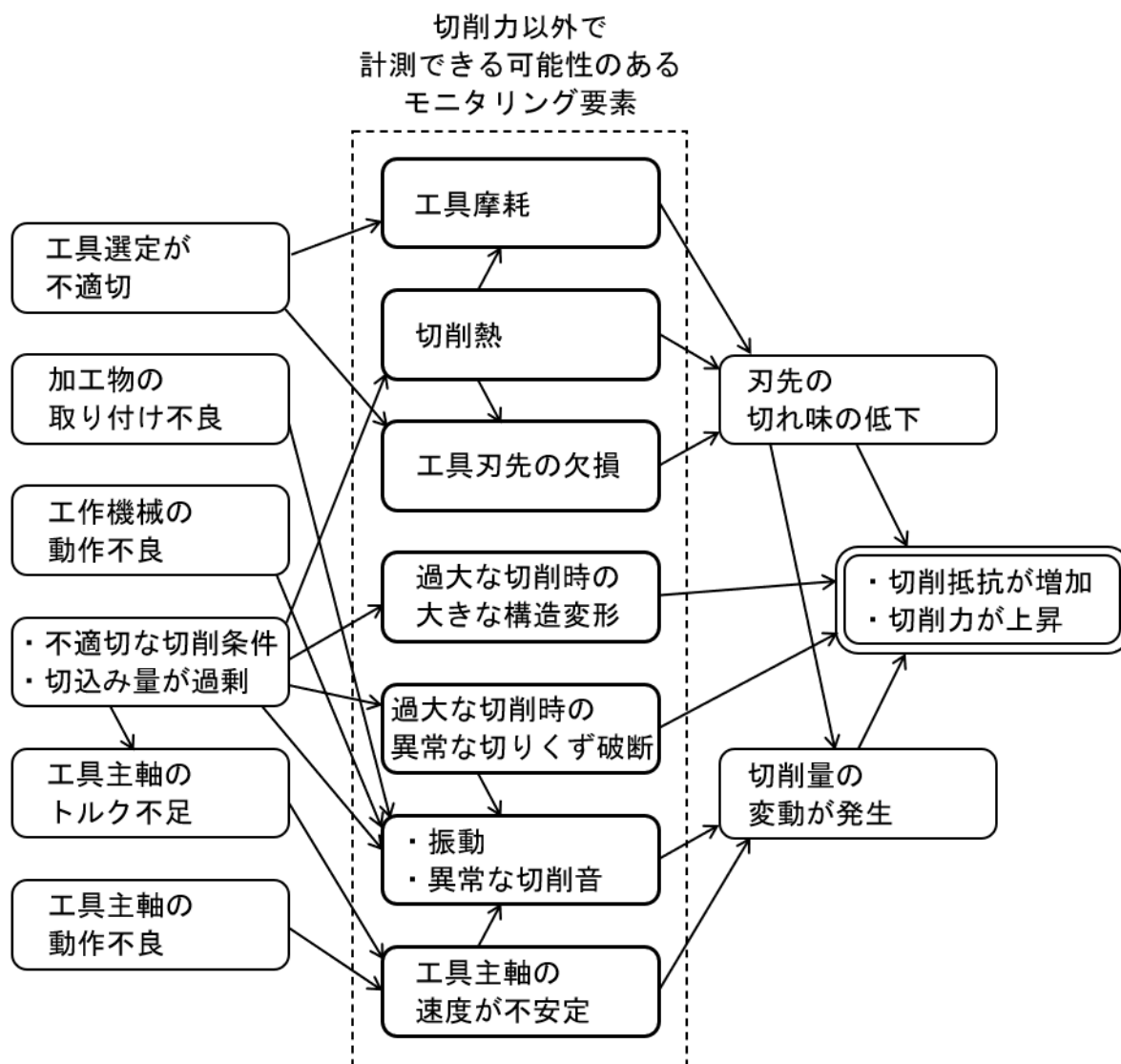


図 1.5 切削加工に影響を与える要因の相関図

切削力のモニタリングには、計測の信頼性が高い切削動力計が使われることが多い。しかし、切削動力計はそれ自体が高価であり、また、使用時にはワークピースの取り付けに制約がある等の課題があり、全ての工作機械に搭載することは現実的には難しい。もう一つの方法として、力センサを工具主軸の内部に組み込むことにより切削力をモニタリングすることが挙げられる。工具主軸の構造特性に応じて、力センサの取り付け位置を検討したり、フィルタリングなどの解析処理を加えたりすることにより、1,000Hz といった高周波数における切削力のモニタリングを実現した研究事例も報告されている[27] (図 1.6)。

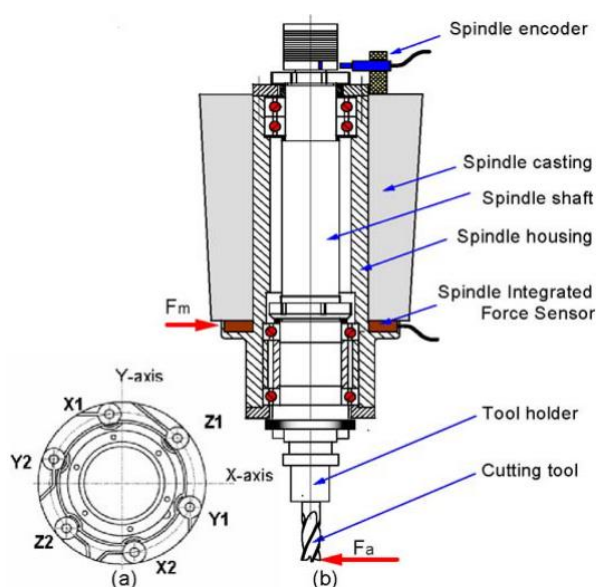


図 1.6 切削力をモニタリングするために力センサを組み込んだ工具主軸 [27]

しかし、力センサを工具主軸の内部に取り付けるためには専用の機械装置を開発する必要があるため実現が困難であり、より簡単なモニタリングの方法が求められることも多い。その一つが工具主軸のハウジングに加速度センサを取り付けてモニタリングする方法である。加速度センサでの計測値に対して、FFT 等の周波数応答解析により切削加工の状態モニタリングを行う方法などが知られている[28-30] (図 1.7)。その他にも、加速度センサを用いたモニタリングとして、工具主軸に取り付けた加速度センサの信号から切削力を推定する方法がある[31-35] (図 1.8)。センサの取り付けが簡単でありながら、状態モニタリングの要素として重要な切削力の推定値を監視できるため効果的である。ただし、ハンマリングなどを用いてインパルス応答を取得し、工具主軸構造のモデルパラメータを把握する必要がある[36-38] (図 1.9)。そのため機械構造が複雑な場合にはその同定が困難であることも多い。

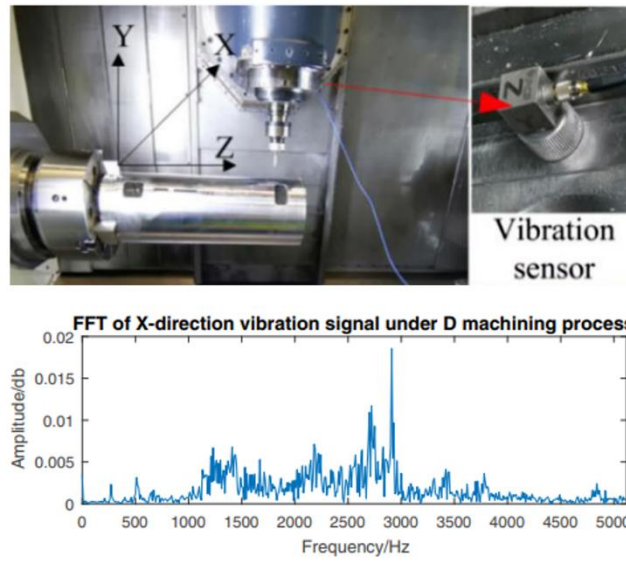


図 1.7 周波数応答解析による切削加工の状態モニタリング [30]

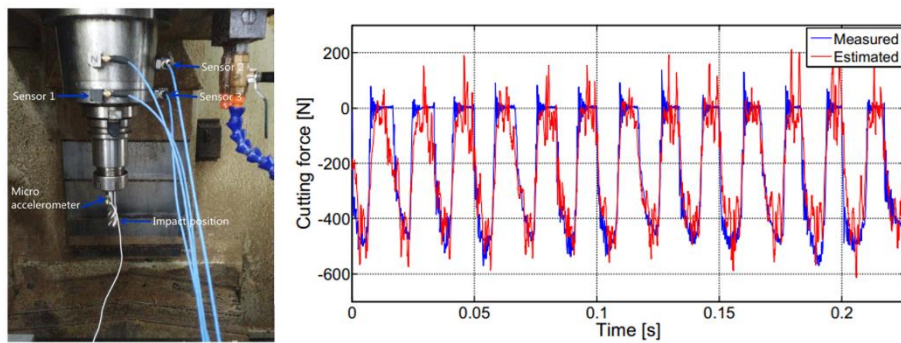


図 1.8 工具主軸に取り付けた加速度センサの信号を用いた切削力の推定 [34]

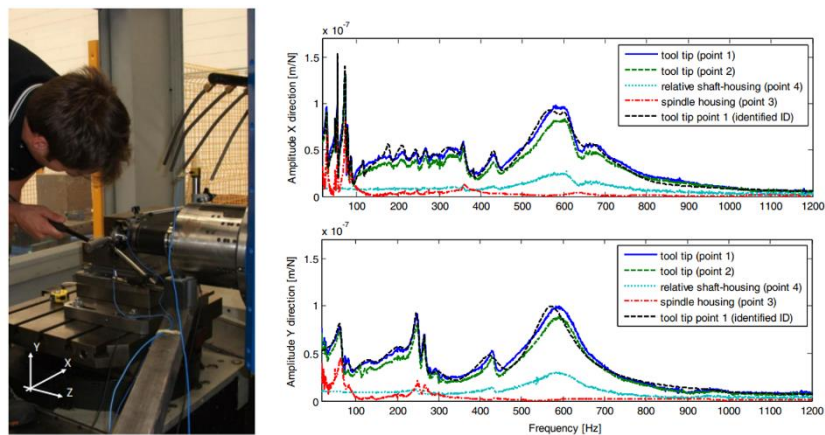
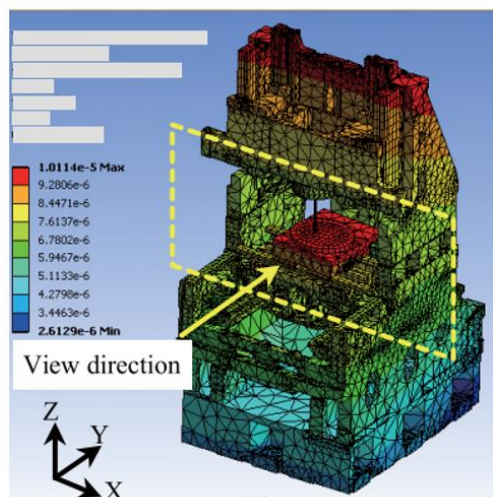
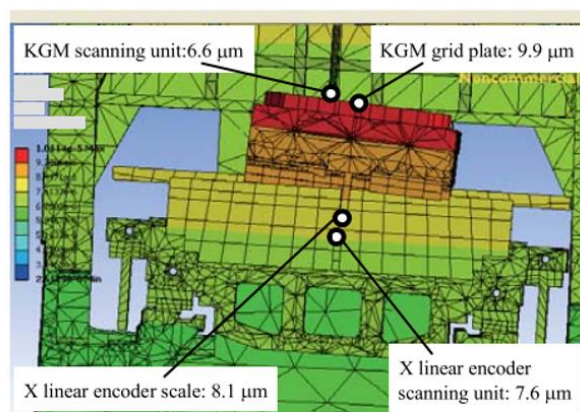


図 1.9 インパルス応答を用いた工具主軸構造のモデルパラメータ同定 [37]

複雑な機構構造のモデルパラメータを同定するためには、インパルス応答ではなく構造解析が用いられている[39-41] (図 1.10). しかし、そのためには機械の設計データを基にした正確なモデル作成が必要であったり、部品間の締結方法といった制約条件を的確に把握しモデルに組み込む必要があったりと困難を要する. また、正確で複雑であるほど計算コストが高くなることも課題である.



(a) Outview



(b) Cross section in the XZ plane

図 1.10 構造解析による工作機械テーブルのモデル化 [39]

加工プロセスへの高度化する要求に対して、近年では工作機械や切削加工の研究に機械学習や深層学習といった技術が広く取り入れられるようになってきている[42-47]。一例として、マイクロレンズ金型を加工した際にその形状精度と駆動電流値を計測しておき、機械学習により推定モデルを作成することで、加工時の電流値から仕上がりの形状精度を推測する方法などが報告されている[48] (図 1.11)。さらに、これまでも活用されてきたセンサを、複数利用することにより高度なモニタリングを実現する取り組みもある。複数のセンサ信号の情報を統合する方法の一つが、カルマンフィルタである。例えば、加速度センサとスピンドルモータ電流の計測値をカルマンフィルタにより統合し、より高精度な切削力推定を行いモニタリングに活用する研究などが報告されている[49] (図 1.12)。

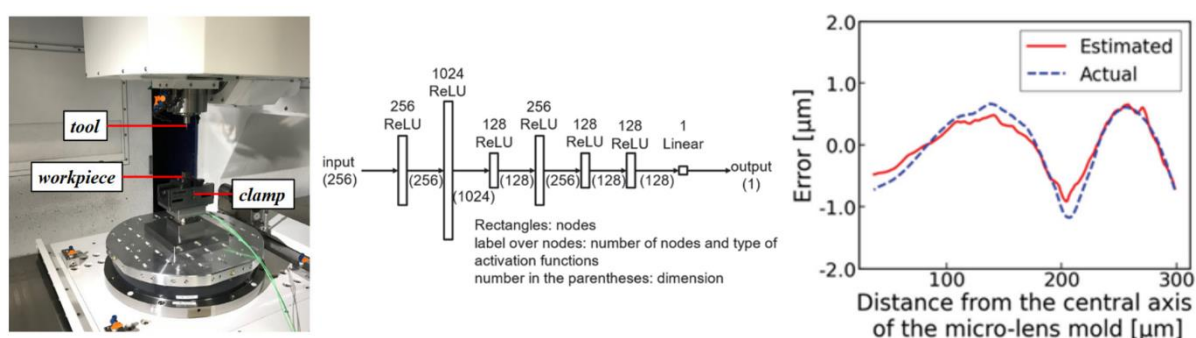


図 1.11 機械学習による推定モデルと加工時の電流値を用いた形状精度の推定 [48]

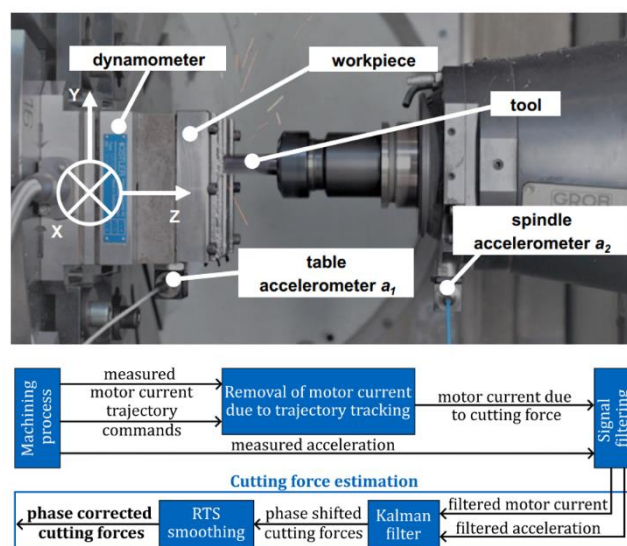


図 1.12 加速度センサとスピンドルモータ電流の計測値を統合した切削力推定 [49]

1.2 課題および研究の目的

これまでに述べた背景および現状をふまえ、ここでは改めて工具主軸に取り付けた加速度センサの信号から切削力を推定する方法に注目する。先にも述べたように、センサの取り付けが簡単でありながら、重要な切削力の推定値をモニタリングできる有用な方法である。ただし、多くの事例において直径 10mm 以上という大径の切削工具を用いており、その一刃周波数は 300Hz 以下にて実施されている。つまり、大径のスクエアエンドミルを用いた低い工具回転速度での事例がほとんどと言える。この理由として、小径のボールエンドミルによる高い工具回転速度での形状加工においては、実現のために以下の課題が挙げられる。

- 一刃周波数が高くなると、高周波での計測が必要となりノイズ等の影響によりセンサ信号から必要な情報を取り出すことが難しくなる。
- 同じく一刃周波数が高くなると短い時間での切削力の変動するため、切削力がそのままではモニタリングの特徴量とはならず、解析等が必要となる。
- 切削力がそのままではモニタリングの特徴量とはならず、解析等が必要となる。
- 高い周波数領域においてのモデル化およびそのモデルパラメータの同定は、様々な固有振動数やノイズの影響を受けやすくなる。

このような理由で小径のボールエンドミルでの事例は少ないものと考えている。

そこで本研究では、小径のボールエンドミルによる高い工具回転速度での形状加工を対象とし、工具主軸に取り付けた加速度センサの信号を用いてモニタリングを実現することを目的とする。ここで、小径とは工具直径 10mm 以下、高い工具回転速度とは一刃周波数 300Hz 以上を想定している。工具主軸に取り付けた加速度センサを用いた低コストのモニタリング方法であり、課題であった高周波領域での加工における計測値へのノイズ等への対策をセンサ信号解析により行う。また、形状加工に適したモニタリング特徴量についても提案する。

1.3 論文の全体構成

本論文は図 1.13 に示すように本章を含めた全 5 章から構成され、第 2 章から第 5 章に関してはそれぞれ以下に示す内容となっている。

第 2 章では、モデルベースアプローチによる切削力および振動モニタリングについて述べる。まず前提として、工具径の小さい切削工具を使用する場合には工具先端付近で発生する高周波の振動により切削力の推定が困難である。また、小径工具は精密な形状加工のために使用されるため、ボールエンドミルを使用することが多い。このような場合、X 方向や Y 方向の切削力だけでなく、Z 方向の切削力推定も重要である。そこで本章では、小径工具を用いた切削加工において、工具主軸側のモデルから切削力と振動を推定する方法を提案する。切削工具はボールエンドミルを想定し、X、Y、Z 方向の 3 軸方向成分について推定を行う。

第 3 章では、工具主軸の静的変位のモニタリングについて述べる。第 2 章で提案したモニタリング方法では、切削負荷が大きく変化したり、加工方向が変化したりした場合には切削力の推定に課題がある。その原因は工具主軸の静的変位であると指摘し、まずはそれを明らかにした上で、その偏りを推定する手法を提案する。具体的には、テーブル変位を計測することにより切削力が発生している方向とその大きさを予測し、そこから工具主軸側の偏りを推定する。

第 4 章では、機械学習を用いたモデルパラメータ導出による切削力推定法について述べる。第 3 章までにおいて、モデルパラメータを用いた切削力推定およびテーブル変位計測による切削方向の推定について述べてきたが、これらの手法を活用するのに必要となるのが機械構造のモデル化である。そのためにはインパルスハンマを用いてインパルス応答を取得する方法が一般的である。しかし、この方法では複雑な機械構造を正確にモデル化することは困難である。そこで本章では、モデルパラメータの同定のために機械学習を用いた手法を提案する。この方法を用いて本章では X、Y、Z 方向の切削力をインプロセスで推定し、モデル化に活用することを提案する。

第 5 章では、本研究で得られた成果を総括すると共に、今後の課題や将来展望について述べる。

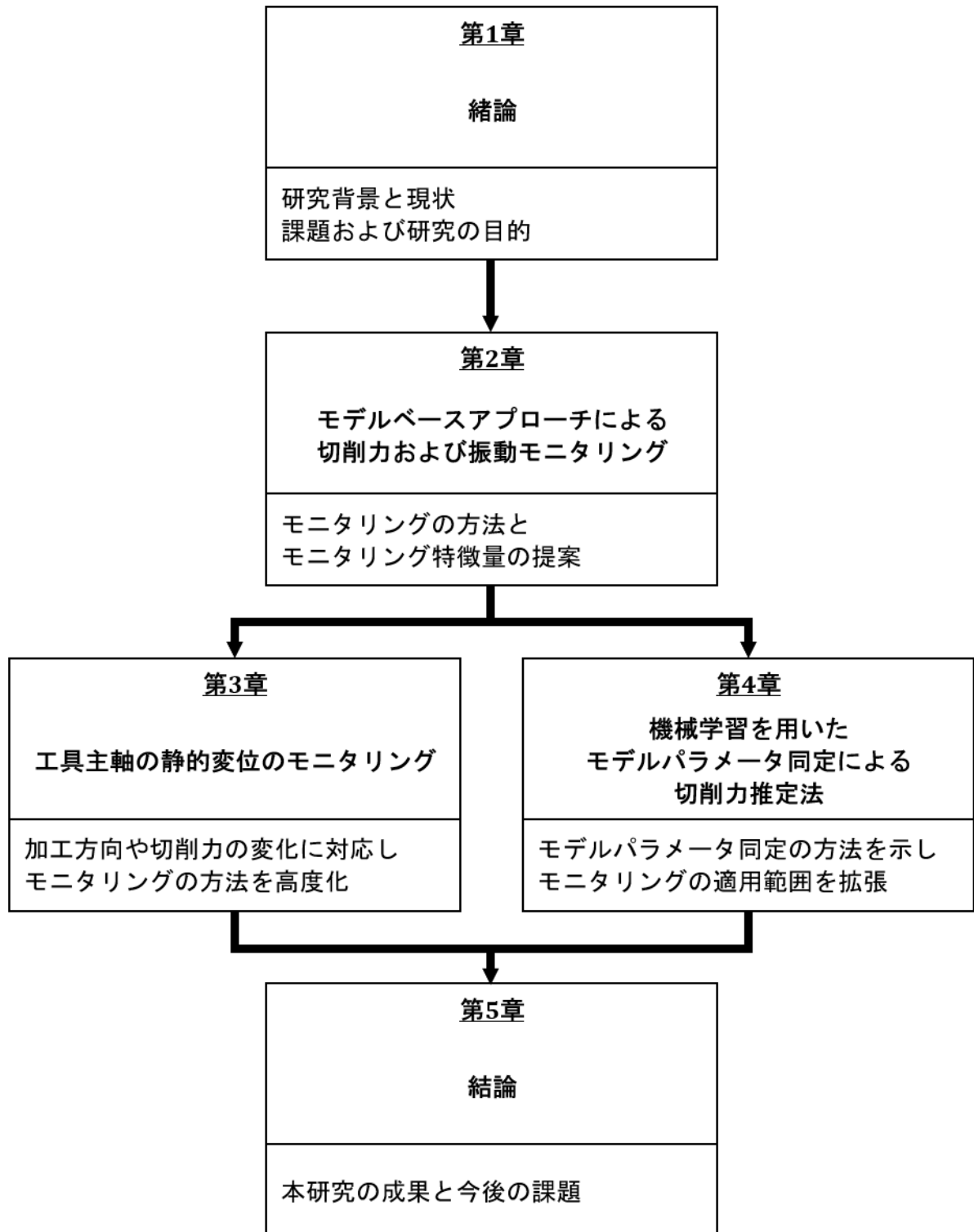


図 1.13 本論文の構成

第2章 モデルベースアプローチによる切削力および振動モニタリング

2.1 緒言

第1章で述べたように、工具径の小さい切削工具を使用する場合には工具先端付近で発生する高周波振動により切削力の推定が困難である。また、小径工具は精密な形状加工のために使用されるため、ボールエンドミルを使用することが多い。このような場合、X方向やY方向の切削力だけでなく、Z方向の切削力推定も重要である。そこで本章では、小径工具を用いた切削加工において、工具主軸側の力学モデルから切削力と振動を推定する方法を提案する。切削工具はボールエンドミルを想定し、X、Y、Z方向の3軸方向成分について切削力と振動を推定する。

2.2 切削力および振動のモニタリング

2.2.1 提案方法の概要

図2.1に提案するモニタリング方法の概要を示す。まず、工具主軸に取り付けたセンサにより加速度の計測を行い、その計測値を信号解析により機械的変位と高周波振動とを分離する。そして、前者からはモデルベースのアプローチによって切削力を推定し、後者からは振動強度を推定して、切削加工の状態モニタリングを行う。

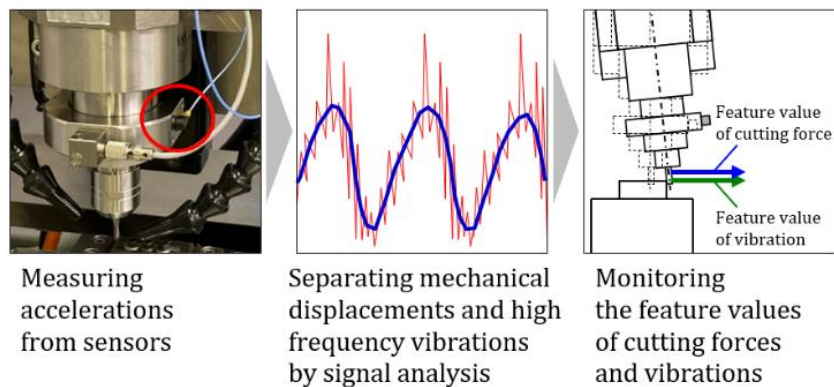


図 2.1 切削力および振動モニタリングの概要

モニタリング方法の詳細プロセスを図 2.2 に示す．最初に，工具主軸側の加速度をセンサにより計測する．しかし，本研究の対象は小径工具であり，工具自体が細く工具先端付近の剛性が低い．そのため，加速度センサの信号には切削加工時の自励振動や強制振動による高周波振動が含まれている．加えて，切削力に起因する工具主軸側の機械的変位も含まれている．これらの 2 つの成分を逐次 2 次回帰近似の解析処理を用いて分離する．工具主軸側の機械的変位からは，工具主軸の構造モデルを基に切削力を推定する．高周波振動からは振動強度を推定する．これらの特徴量により，切削加工中の状態モニタリングを行う．

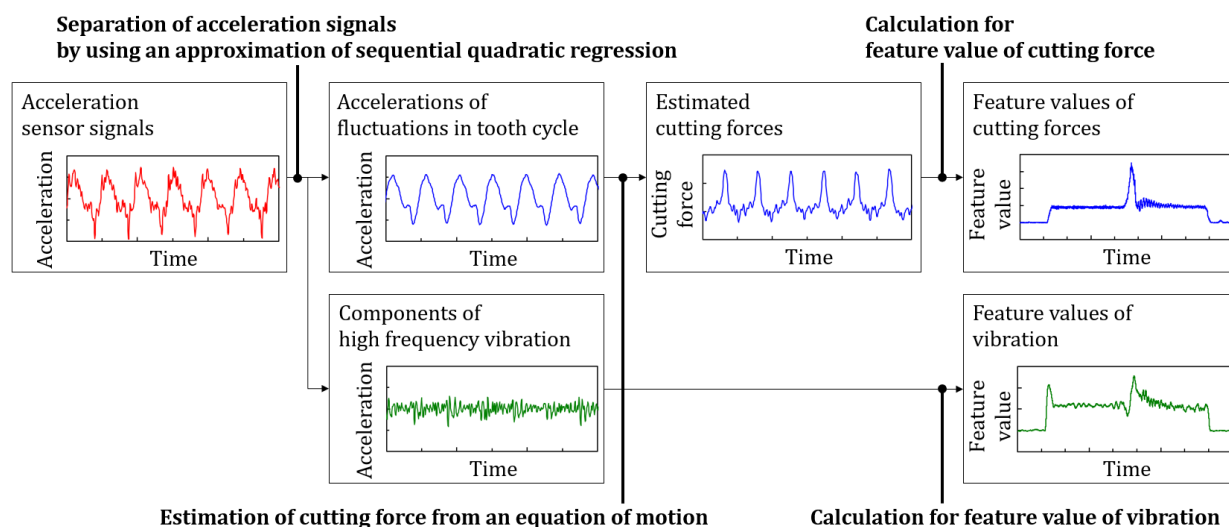


図 2.2 切削力および振動モニタリングの詳細プロセス

2.2.2 加速度信号の逐次 2 次回帰近似

最初に、加速度センサで取得した信号値の分離方法について詳細を説明する．計測された加速度信号には工具主軸構造自体の加速度変化に加えて、工具先端付近で発生する高周波振動が含まれている．この高周波振動を逐次 2 次回帰近似を用いて取り除く．

フィルタ処理には様々な方法が存在するが、ローパスフィルタといった周波数フィルタリングはある程度長い区間の計測値を必要とするため、インプロセスでのモニタリングには適していない．インプロセスのモニタリングに適しているのは、直近の計測値のみを利用するフィルタ処理である．この代表的なものが移動平均フィルタなどであるが、本研究では逐次 2 次回帰近似を利用した．逐次 2 次回帰近似は、近似区間内において 2 次曲線で近似可能なピーク値を残すことができる処理であるため、ローパスフィルタや移動平均フィルタに比べて加速度の変動成分を除去することなくフィルタ処理できると考えられる．

加速度センサ信号 a_0 に対する 2 次回帰の近似式を式(2.1)に示す． $\bar{a}_0$ は計測された加速度の平均値を表している． S_{a_0a} は偏差積和であり、偏差 a_0 と偏差 a の積和を示している．逐次 2 次回帰近似を行うことで、計測した信号から高周波振動の成分を除去し、工具の一刃周期における加速度変動 a を抽出することができる．また、式(2.2)を用いることで高周波振動の成分 a_v も抽出することができる．ここでは加速度センサが 1 つの場合を例として説明したが、センサが複数ある場合についても同様に演算することが可能である．

$$a = A + B a_0 + C (a_0)^2 \quad (2.1)$$

$$B = \frac{S_{a_0a} S_{a_0^2 a_0^2} - S_{a_0a} S_{a_0 a_0^2}}{S_{a_0 a_0} S_{a_0^2 a_0^2} - (S_{a_0 a_0^2})^2}, \quad C = \frac{S_{a_0^2 a} S_{a_0 a_0} - S_{a_0 a} S_{a_0 a_0^2}}{S_{a_0 a_0} S_{a_0^2 a_0^2} - (S_{a_0 a_0^2})^2},$$

$$A = \bar{a} - B \bar{a}_0 - C \bar{a_0^2},$$

$$S_{a_0 a_0} = \sum_{i=1}^n (a_{0i} - \bar{a}_0)^2, \quad S_{a_0 a} = \sum_{i=1}^n (a_{0i} - \bar{a}_0)(a_i - \bar{a}),$$

$$S_{a_0 a_0^2} = \sum_{i=1}^n (a_{0i} - \bar{a}_0)(a_{0i}^2 - \bar{a_0^2}), \quad S_{a_0^2 a_0^2} = \sum_{i=1}^n (a_{0i}^2 - \bar{a_0^2})^2,$$

$$S_{a_0^2 a} = \sum_{i=1}^n (a_{0i}^2 - \bar{a_0^2})(a_i - \bar{a})$$

$$a_v = a_0 - a \quad (2.2)$$

2.2.3 切削力の推定

続いて、一刃周期における加速度変動から切削力を推定する．ここでは、工具主軸構造の X 方向における加速度変動を例として説明する．切削力の推定はモデルアプローチにより行い、それを図 2.3 に示す．図 2.3(a)は工作機械の一般的な工具主軸の構造を示している．これを力学モデルで表したのが図 2.3(b)である．

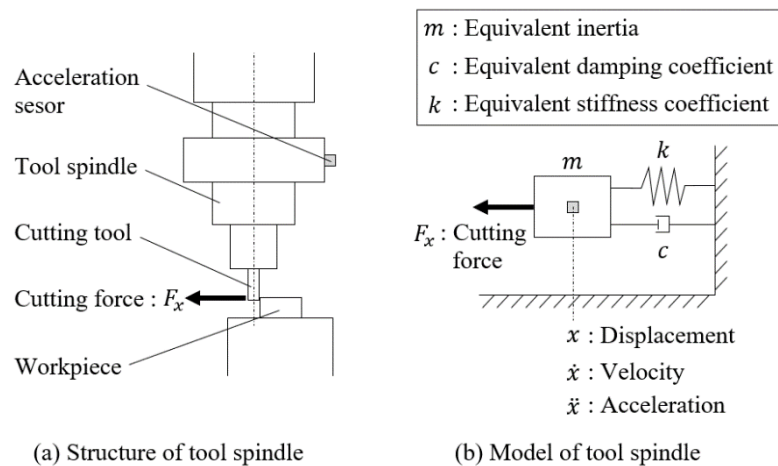


図 2.3 工作機械の工具主軸構造とモデル化

式(2.3)に基づき X 方向における運動方程式を作成すると式(2.4)のようになる． f_x [N]は工具先端における X 方向の切削力を表している．また，加速度センサが取り付けられている箇所における X 方向の変位を x [m]，速度を $\dot{x}$ [m/s]，加速度を $\ddot{x}$ [m/s²]としている． m [kg]， c [N/(m/s)]， k [N/m]はそれぞれ等価慣性，等価減衰係数，等価剛性係数を表している．式(2.5)は，この運動方程式をラプラス変換した式である． M ， C ， K はそれぞれ定数 m ， c ， k をラプラス変換したものであり， ω_n [rad/s]は固有角周波数， ζ は減衰比である．

$$\ddot{x} = a \quad (2.3)$$

$$f_x = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (2.4)$$

$$\frac{Xs^2}{F_x} = \frac{\frac{1}{K}\omega_n^2 s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.5)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad \zeta = \frac{C}{2\sqrt{MK}}$$

インパルスハンマで工具先端を叩き，加速度センサを用いて工具主軸構造のインパルス応答を計測することでパラメータ ω_n, ζ, m, c を求める．パラメータ ω_n と ζ は，計測結果をフィッティングすることにより同定を行う．また，インパルスハンマで叩いた直後の力 f_x と加速度 $\ddot{x}$ の変化からパラメータ m を同定する．このようにして同定した ω_n, ζ, m から，残りの c と k も同定を行う．実際に切削加工を行い計測した信号値に対して近似を行うことで，一刃周期における加速度変動 $\ddot{x}$ を求めることができる．加速度 $\ddot{x}$ を積分すると速度 $\dot{x}$ と変位 x が算出でき，これにより式(2.4)を用いて X 方向の切削力を推定することができる．ここでは X 方向を例にして説明したが，Y 方向および Z 方向についても同様に切削力を推定することができる．

2.2.4 切削力特徴量

前述の演算方法にて推定される切削力は、短い時間間隔で変化する．そのため、切削工具の刃先がワークに切り込んでから抜けるまでの切削力の変化を詳細にモニタリングすることができる．しかし、刃先がワークに切り込む直前の切削力が 0 の状態だけを捉えても、刃先がワークに切り込んだピーク時の切削力のみを捉えても、実際の状態モニタリングとしては適切ではない．もっと長い一刃周期の時間で切削加工の状態をとらえる必要がある．そこで、推定切削力を一刃の時間間隔の特徴量に変換し、切削加工の状態モニタリングに利用する．

X方向を例にその演算方法を説明する．まず、式(2.6)に示すように、X方向の切削力 f_x の絶対値に対して一刃周期の移動平均 $f_{\bar{x}}$ を算出する．刃先がワークに切り込んでから抜けるまでの期間をモニタリングすることがこの特徴量の目的であるため、移動平均を計算する期間 L_c は一刃周期としている．次に、この値を評価指標として取り扱いやすいように正規化を行う．そのために、切削していない時の切削力の移動平均 $f_{\bar{x}_{\text{base}}}$ および標準切削条件で安定的に切削加工が行われている状態の切削力の移動平均 $f_{\bar{x}_{\text{std}}}$ を用意する．工作機械オペレータは通常、事前に加工実験を行い工具メーカーが推奨する切削条件を基に実際の切削条件を設定する．これを標準切削条件として利用することが望ましい．切削力特徴量 C_x は式(2.7)を用いて算出する．例えば、 C_x は標準切削条件より低い切削力で加工した場合には 0 から 1 の間の値となる．また、標準切削条件よりも高い切削力で加工した場合には 1 よりも大きな値となる．このように、切削力特徴量はモニタリングに使いやすい値として定義を行った．

ここではX方向の切削力特徴量 C_x について説明したが、Y方向の切削力特徴量 C_y およびZ方向の切削力特徴量 C_z も同様に算出できる．また、X方向とY方向の切削力は加工方向に依存するため、本質的に異なるものではない．そのため、それらの合成切削力 C_r を式(2.8)のように定義する．結果として、X方向とY方向の合成切削力 C_r とZ方向の C_z という2つの値を切削力特徴量として用いる．

$$f_{\bar{x}}[n] = \frac{1}{L_c} (|f_x[n]| + |f_x[n-1]| + \dots + |f_x[n-L_c+1]|) \quad (2.6)$$

$$C_x = \frac{f_{\bar{x}} - f_{\bar{x}_{\text{base}}}}{f_{\bar{x}_{\text{std}}} - f_{\bar{x}_{\text{base}}}} \quad (2.7)$$

$$C_r = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \quad (2.8)$$

2.2.5 振動特徴量

切削力特徴量に続いて、切削加工中の振動をモニタリングするための別の特徴量をもう一つ定義する．このためには加速度センサ信号から逐次 2 次回帰近似を用いて抽出した高周波振動成分を利用する．高周波振動成分は、一刀周期よりも短い間隔で振動している成分である．これをモニタリングするためには、ある程度の時間間隔での特徴量として変化を捉える必要がある．このため、二乗平均平方根(RMS)を算出することで振動強度の評価に利用する．本研究では、RMS を算出するための間隔時間は切削工具が 2 回転する時間とした．この時間を L_v よりも長く設定したのは、切削力の変化よりも高周波振動の変化の方が敏感でノイズの影響を受けやすいためである．この演算処理が平滑フィルタとして機能するため、高周波のノイズの影響が無い程度まで低減することができると考えている．

以下に実際の計算方法を示す．まず、式(2.9)は X 方向の高周波振動成分 $\ddot{x}_v$ から RMS $v_{x\text{RMS}}$ を求める式である． L_v は RMS を算出するための間隔時間を表しており、前述のように切削工具の 2 回転分の時間を今回は適用する．次に、この値が評価指標として扱いやすいように正規化を行う．そのために、切削していない状態での高周波振動成分の RMS $v_{x\text{base}}$ および標準切削条件で安定的に切削加工が行われている時の高周波振動成分の RMS $v_{x\text{std}}$ を用意する．振動特徴量 V_x は式(2.10)にて算出される．例えば、 V_x は標準切削条件よりも振動の小さい加工の場合には 0 から 1 の間の値となり、標準切削条件よりも振動の大きい加工の場合には 1 より大きな値となる．このように、振動特徴量はモニタリングに使いやすい値として定義を行った．

ここでは X 方向の振動特徴量 V_x について説明したが、Y 方向の振動特徴量 V_y および Z 方向の振動特徴量 V_z も同様に算出できる．また、X 方向と Y 方向の振動は加工方向に依存するため、本質的に異なるものではない．そのため、それらの合成値 V_r を式(2.11)のように定義する．結果として、X 方向と Y 方向の合成値 V_r と Z 方向の V_z という 2 つの値を振動特徴量として用いる．

$$v_{x\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{L_v} \int_0^{L_v} \ddot{x}_v(t)^2 dt} \quad (2.9)$$

$$V_x = \frac{v_{x\text{RMS}} - v_{x\text{base}}}{v_{x\text{std}} - v_{x\text{base}}} \quad (2.10)$$

$$V_r = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (2.11)$$

以上のように、切削力および振動に対する新たな特徴量を定義した．これらの特徴量を切削加工のインプロセスモニタリングに活用することを提案する．

2.3 実験加工機

提案したモニタリング手法を評価するために、NC 加工機を製作した。図 2.4 にこの実験加工機を示し、そのシステム構成を図 2.5 に示す。駆動軸はワークテーブル側に 2 軸、工具主軸側に 1 軸を持っている。工具主軸に切削工具が取り付け、各軸を駆動して切削加工を行う。駆動軸としてはテーブル側の下部に X 軸ユニット(駿河精機製, KXS18100-N10-J)を設置し、その上に Y 軸ユニット(X 軸ユニットと同じ型式)を直交するように重ねて取り付けている。これらのユニットは、ボールねじおよびリニアガイド 2 本でそれぞれ構成されている。一方で工具主軸側の Z 軸ユニット(駿河精機製, LX3005P-L200)は、ボールねじおよびリニアガイド 1 本で構成したものとなっている。加工範囲については X および Y 方向は約 100mm, Z 方向は約 50mm である。工具主軸(ナカニシ製, BMS-4020)の仕様としては、最高回転速度 $20,000\text{min}^{-1}$, 最大トルク 1.0Nm, 最大出力 1,200W, 転がり軸受タイプとなっている。工具主軸には圧電式加速度センサ(小野測器製, NP-3211 および RION 製, PV-97)を取り付け、テーブルには切削力の参照計測用の切削動力計(KISTLER 製, 9256A1)を取り付けている。PC コントローラ(Beckhoff 製, C6920/TwinCAT)が駆動軸を制御すると共に、全てのセンサからデータ収集を行う。高速通信プロトコル EtherCAT を使用することにより、インプロセスでの計測と制御の高い同期性を実現している。加速度センサと切削動力計での計測は、サンプリング周波数 50kHz にて実施した。

使用した切削条件等を表 2.1 に示す。この切削条件は工具メーカーの推奨条件を参考に、実験加工機を用いて事前に切削加工実験を行い、安定的な加工が可能な条件として選定した。切削工具には半径 1.5mm の 2 枚刃のボールエンドミルを使用した。被削材には被削性の高いプリハードン鋼(大同特殊鋼製, NAK55)を用いた。

工具主軸に取り付けた加速度センサの位置を図 2.4 に示す。1 軸の加速度センサを 3 個、3 軸の加速度センサを 1 個使用した。ただし、3 軸の加速度センサについては 3 軸のうち 2 軸分の計測データのみを利用した。そのため、合計 5 つの加速度の計測値を利用している。そのうち 2 つは X 方向の加速度($X1, X2$), 1 つは Y 方向の加速度($Y1$), 残りの 2 つは Z 方向の加速度($Z1, Z2$)を計測するために使用している。

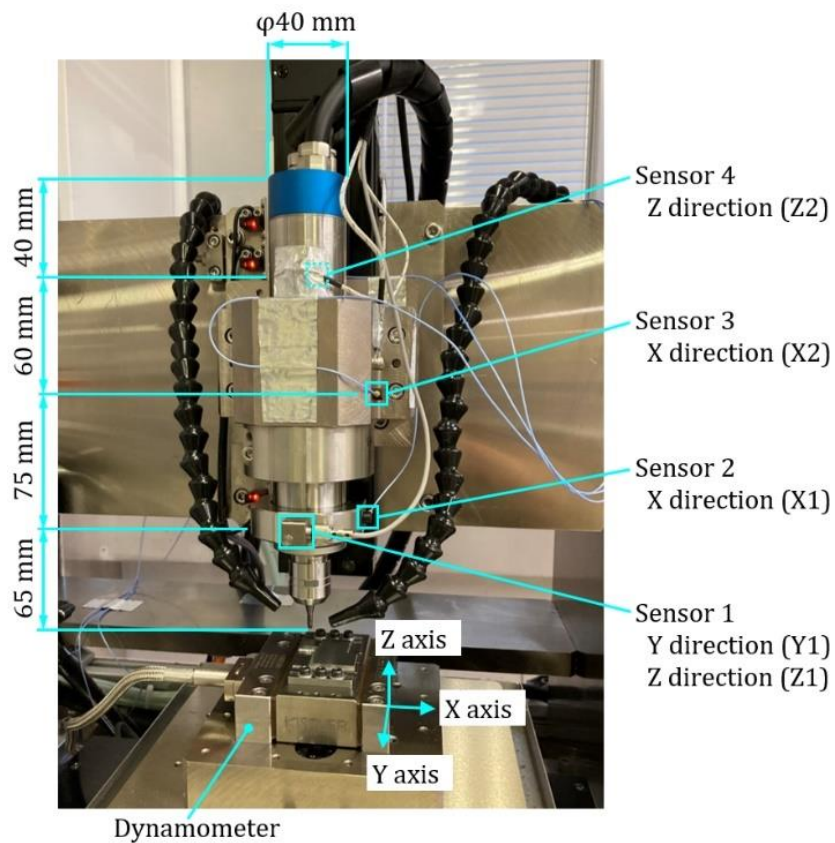


図 2.4 実験加工機およびセンサ取り付け位置

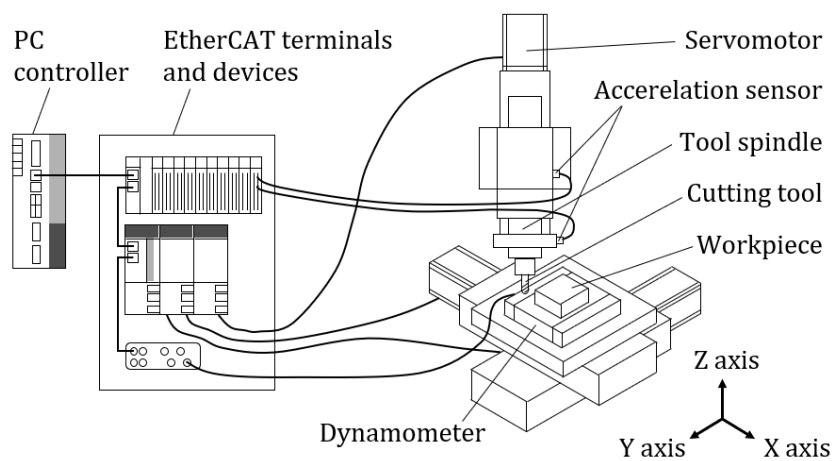


図 2.5 実験加工機のシステム構成

表 2.1 切削条件，切削工具および被削材

Cutting condition	Method of cutting	Down milling
	Rotational speed of spindle	16,000 min ⁻¹
	Feed rate	1,500 mm/min
	Feed per tooth	0.047 mm
	Radial cutting depth	0.1 mm
	Axial cutting depth	0.45 mm
	Coolant	Semi dry (Oil mist)
Cutting tool	Type of tool	Ball end mill
	Cutting flutes	2-flute
	Radius of tool	1.5 mm
	Effective length	8 mm
Workpiece	Material overview	Pre-hardened steel with high machinability
	Main material component	Fe
	Hardness	37-43 HRC

2.4 直線送り加工における提案方法の評価

2.4.1 加速度センサ信号の逐次 2 次回帰近似の評価

図 2.6 に示した直線送り加工を実施し、提案方法による切削力および振動モニタリングを評価した。なお、加工実験は 5 回実施し、切削力と加速度の計測値に大きな差がないことを確認することでデータの再現性を確認している。5 つの加速度センサからの計測値を a_{X1_0} , a_{X2_0} , a_{Y1_0} , a_{Z1_0} , a_{Z2_0} と定義する。逐次 2 次回帰による近似値 a_{X1} , a_{X2} , a_{Y1} , a_{Z1} , a_{Z2} は、式(2.1)を参照して式(2.12)のように表すことができる。

Y 方向については、工具先端に Y 方向に力を受けることで、Sensor 1(Y1)の取り付け位置の加速度が生じることが事前の検証で明らかになっている。このことから Y 方向の切削力推定には Y1 の加速度を利用し、Y 方向の一刃周期での加速度 $\ddot{y}$ および高周波振動成分 $\ddot{y}_v$ を式(2.13)のように定義する。図 2.7 に Y1 の加速度を逐次 2 次回帰で近似した結果を示す。センサ信号の計測値から高周波振動の成分が除去され、一刃周期での加速度変動が抽出されている。さらに、センサ計測値と一刃周期での加速度変動の差分を取ることで高周波振動成分についても抽出されることが確認できる。なお、本研究の提案方法はインプロセスでのモニタリングを想定しているため、逐次 2 次回帰近似を利用した信号解析も実験加工機を制御するコントローラにてインプロセスで実施している。処理のために位相遅れが生じるが、その遅れ時間は一刃周期の時間以下であるため、応答性の高いモニタリングを実現している。

$$a_{X1} = A_{X1} + B_{X1} a_{X1_0} + C_{X1} (a_{X1_0})^2, \quad a_{X1_v} = a_{X1_0} - a_{X1}, \quad (2.12)$$

$$a_{X2} = A_{X2} + B_{X2} a_{X2_0} + C_{X2} (a_{X2_0})^2, \quad a_{X2_v} = a_{X2_0} - a_{X2},$$

$$a_{Y1} = A_{Y1} + B_{Y1} a_{Y1_0} + C_{Y1} (a_{Y1_0})^2, \quad a_{Y1_v} = a_{Y1_0} - a_{Y1},$$

$$a_{Z1} = A_{Z1} + B_{Z1} a_{Z1_0} + C_{Z1} (a_{Z1_0})^2, \quad a_{Z1_v} = a_{Z1_0} - a_{Z1},$$

$$a_{Z2} = A_{Z2} + B_{Z2} a_{Z2_0} + C_{Z2} (a_{Z2_0})^2, \quad a_{Z2_v} = a_{Z2_0} - a_{Z2}$$

$$\ddot{y} = a_{Y1}, \quad \ddot{y}_v = a_{Y1_v} \quad (2.13)$$

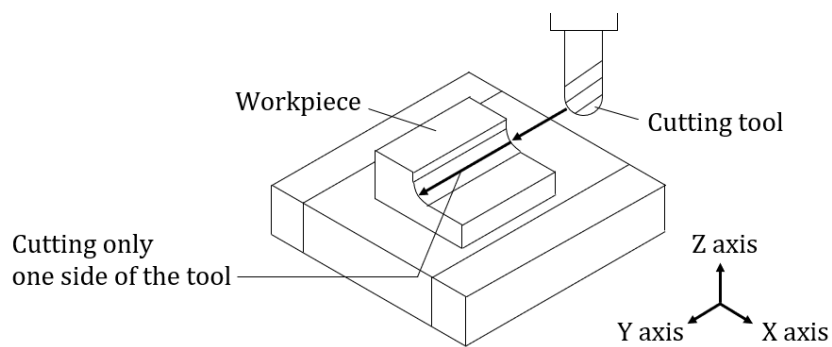


図 2.6 モニタリングの評価に利用した直線送り加工の経路

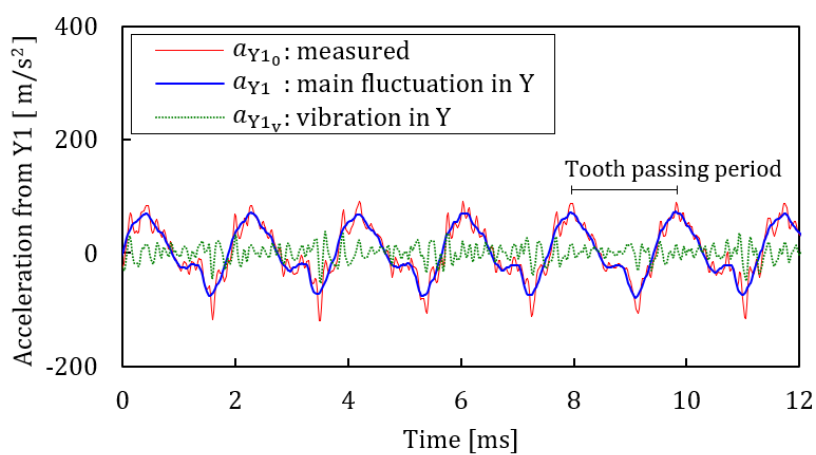


図 2.7 Y 方向における加速度センサ信号の分離

次に、X 方向の加速度について評価を行った。図 2.8 に示したように、工具主軸が X 方向に力を受けると θ 方向と ψ 方向の 2 つの方向にも加速度が変化する。センサ X1 は θ 方向と ψ 方向の両方の動作による X 方向の加速度を計測している。一方でセンサ X2 は ψ 方向の動作 X 方向の加速度のみを計測している。センサの取り付け位置の関係上、X2 には θ 方向の動作による X 方向の加速度は含まれない。従って、X1 と X2 の加速度の差分を取ることで θ 方向の加速度変化のみを抽出できる。センサ X2 の取り付け高さについては事前の実験によって同定を行った。工具先端に衝撃を与えた場合に、最も影響を受ける周波数は θ 方向と ψ 方向とでそれぞれ異なっている。そこで、X2 の取り付け高さを徐々にずらし、 θ 方向の影響が最も小さくなる位置を取り付け高さとして定めた。さらに、工具先端が X 方向に力を受けることで X1 を取り付けした位置の θ 方向の加速度が変化することが事前の検証で明らかになっている。このことから X 方向の切削力推定には θ 方向の加速度を利用し、式(2.14)のように定義する。センサ X1, X2 にて計測した加速度に対して逐次 2 次回帰近似を行ったのが a_{X1} , a_{X2} である。 $\ddot{x}$ はセンサ X1 の位置における θ 方向の一刃周期での加速度変動を表している。厳密に言えば θ 方向は円周方向であるため、センサにて計測できる X 方向の加速度変動とは異なっている。ただし、その誤差は小さいため近似できるとしてそのまま利用している。また、 $\ddot{x}_v$ は X 方向における高周波振動成分を表しており、これにはより工具先端に近いセンサ X1 からの高周波振動成分を用いている。

$$\ddot{x} = a_{X1} - a_{X2}, \quad \ddot{x}_v = a_{X1v} \quad (2.14)$$

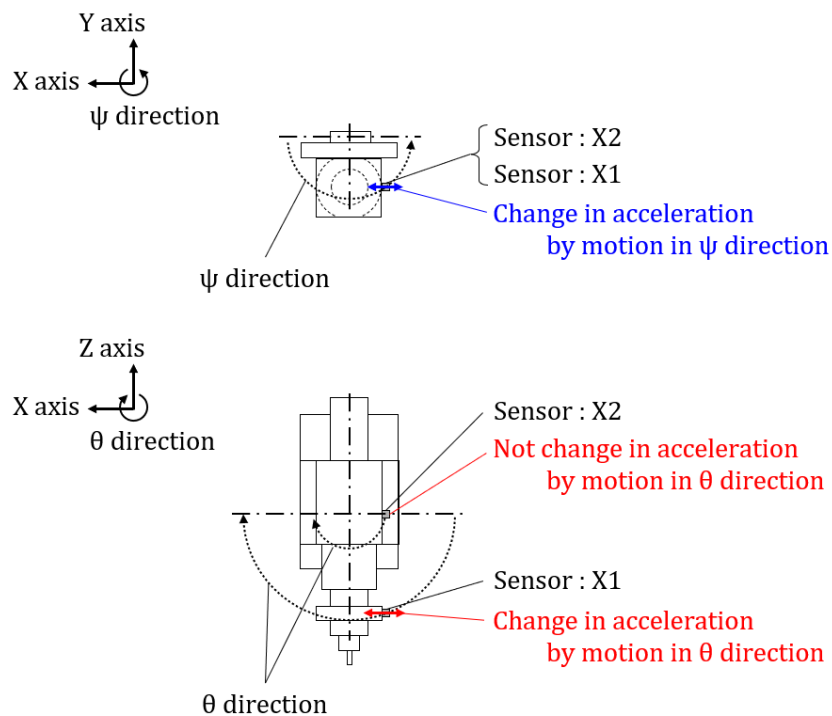


図 2.8 X 方向における加速度成分

X 方向の加速度の信号解析結果を図 2.9 に示す．センサ X1 についての上段のグラフおよびセンサ X2 についての中段のグラフから，一刀周期の加速度変動と高周波振動成分を逐次 2 次回帰近似により分離して抽出できていることがわかる．下段のグラフでは，式(2.14)により求めた X 方向の一刀周期の加速度変動 $\ddot{x}$ および高周波振動成分 $\ddot{x}_v$ が示されている．

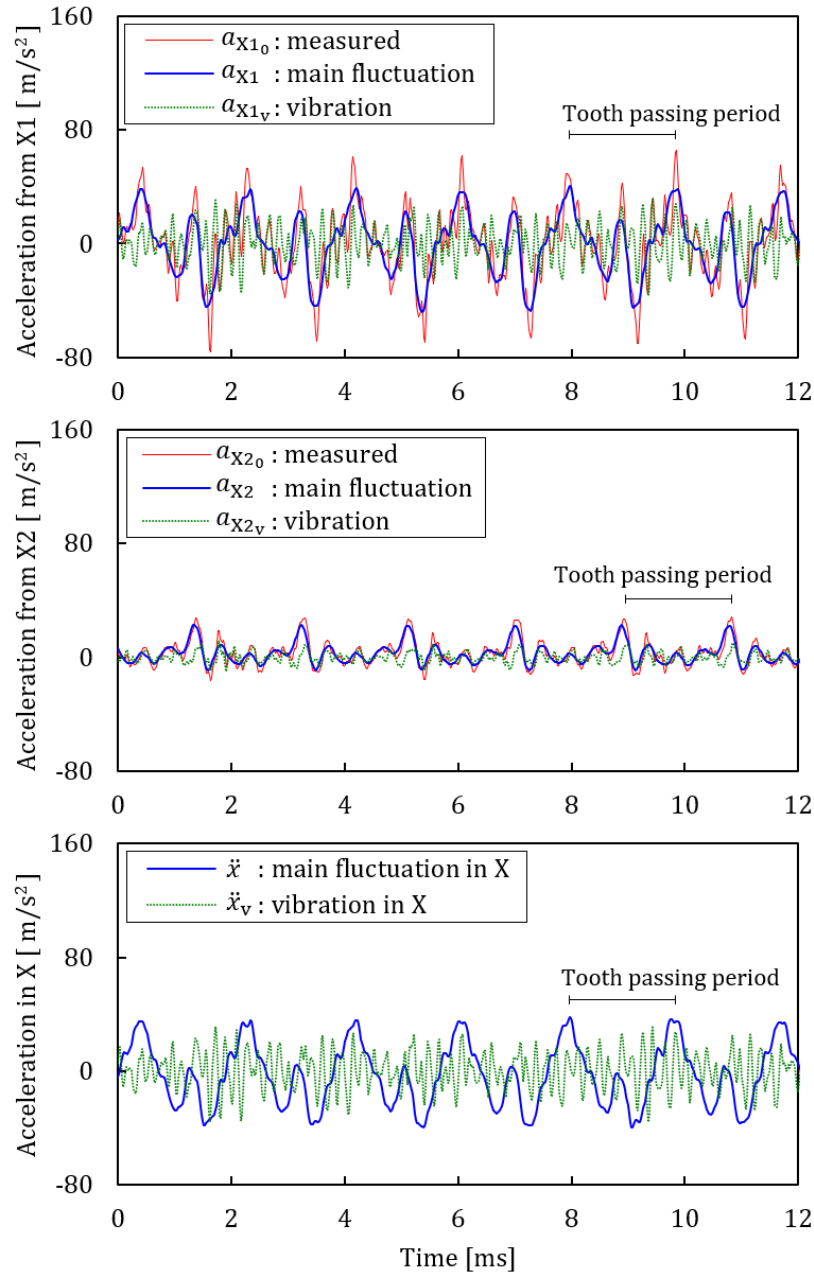


図 2.9 X 方向における加速度センサ信号の分離

最後に、Z 方向の加速度について評価を行った．実験加工機の工具主軸構造は全体が一体として十分な剛性を持っているため、工具先端に Z 方向に力受けることにより、Z 軸ステージ自体が変位することが事前の検証により明らかになっている．このことから、Z 軸ステージに取り付けたセンサ Z2 を用いて Z 方向の加速度変化を計測し、Z 方向の切削力推定に利用した．一方で、Z 軸のスライダおよび駆動構造は、工具主軸構造に比べて剛性が低い．そのため、工具先端付近で Y 方向の加速度が変化すると、それに伴い Z 軸ステージの加速度も変化することも事前の検証により判明している．これを図 2.10 および式(2.15)に示す． a_{Z2} , a_{Y1} はそれぞれセンサ Z2, Y1 にて計測した加速度に対して逐次 2 次回帰近似を実施したものであり、係数 p は実験により同定を行っている．これらにより Z 方向の一刃周期における加速度変動 $\ddot{z}$ が得られる．また、 $\ddot{z}_v$ は Z 方向における高周波振動成分を表しており、これにはより工具先端に近いセンサ Z1 からの高周波振動成分を用いている．

なお、今回の実験加工機は Z 軸ステージの上に工具主軸が載っているため、Z 軸が移動すると工具主軸も移動する．そのため、Z 軸ステージの位置によりモデルが変わる可能性がある．しかし、Z 軸ステージの位置により工具主軸がオーバーハングする距離が変わることはないため、その影響は小さいものと考えている．さらに、今回の加工実験では小径工具を使用したため Z 方向の加工範囲は数 mm 程度の狭い範囲であり、その影響はさらに小さいと考察している．

$$\ddot{z} = a_{Z2} - p a_{Y1}, \quad \ddot{z}_v = a_{Z1v} \quad (2.15)$$

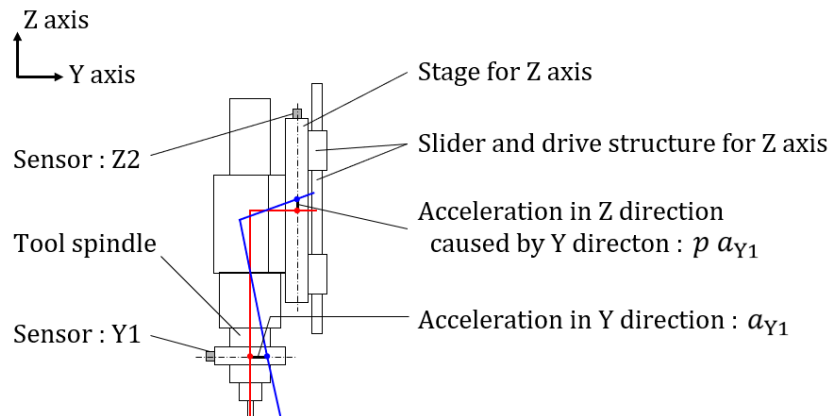


図 2.10 Z 軸ステージの加速度変化についての構造図

Z 方向の加速度の信号解析結果を図 2.11 に示す．センサ Z1 についての上段のグラフおよびセンサ Z2 についての中段のグラフから，一刃周期の加速度変動と高周波振動成分を逐次 2 次回帰近似により分離して抽出できていることがわかる．下段のグラフでは，式(2.15)により求めた Z 方向の一刃周期の加速度変動 $\ddot{z}$ および高周波振動成分 $\ddot{z}_v$ を示す．

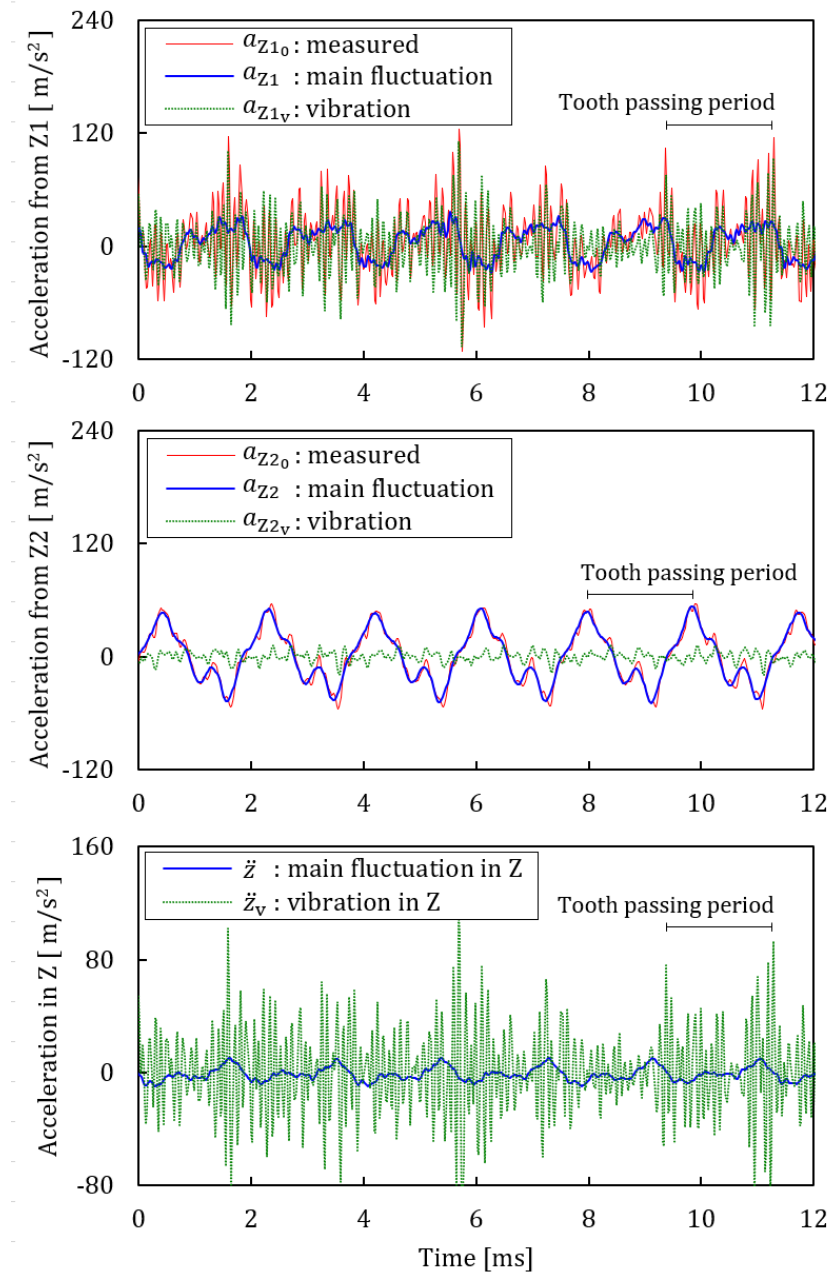


図 2.11 Z 方向の加速度センサ信号の分離

以上のように、X、Y、Z の各方向において、加速度センサ信号の計測値から一刃周期における加速度変動と高周波振動成分を分離して抽出することに成功した。

ここで、逐次 2 次回帰近似によりカットオフし分離できる高周波成分について確認を行った結果を示す。逐次 2 次回帰近似によりカットオフされる周波数は、2 次曲線で近似を行う区間に影響を受ける。実験で使用した切削条件の一刃周波数は約 533Hz であり、一刃周期は 1.875ms である。今回は一刃周波数よりも十分に大きい周波数を分離することを目的とし、一刃周期 1/4 である 0.46ms を 2 次曲線で近似を行う区間と設定した。この区間に相当する周波数は約 2.2kHz となり、その 1/2 の周波数である約 1.1kHz を超える周波数から逐次 2 次回帰近似によりカットオフされ始めると考えられる。この効果を確認するために評価を実施した。まず、実験で使用した切削条件の一刃周波数である約 533Hz の正弦波と、1kHz 以上の高い周波数の正弦波を足し合わせた信号を用意した。この信号に対して近似区間 0.46ms にて逐次 2 次回帰近似を実施し、高周波信号の透過率を確認した。透過率は、逐次 2 次回帰近似の処理前後で、周波数解析の振幅スペクトラムの比をとることで算出を行った。図 2.12 にその結果を示す。逐次 2 次回帰近似ではカットオフされないと考えられる 1kHz では透過率 98%，それを超える 1.6kHz では透過率 91%となっており、効果が表れ始めていることが確認できる。また、3.4kHz 以上の周波数では透過率は 25%以下となっており、高周波の信号が効果的にカットオフされることが見てとれる。

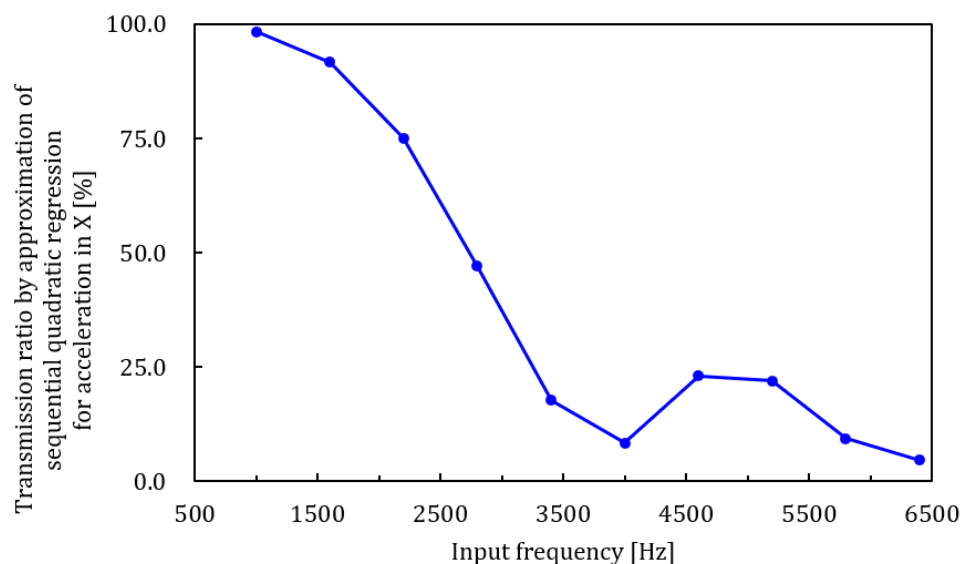


図 2.12 逐次 2 次回帰近似における高周波信号の透過率

2.4.2 切削力推定の評価

一刃周期における加速度変動から、X、Y、Z の各方向の切削力推定を行った。まずは X 方向について、式(2.4)および式(2.5)の各パラメータの同定を行う。工具先端をインパルスハンマで X 方向に叩き、加速度センサを用いて工具主軸構造のインパルス応答を計測した。図 2.13 にその様子を示す。工具先端を正確に叩くために、インパルスハンマで叩く方向にボールエンドミルの逃げ面を予め向けておくようにしている。

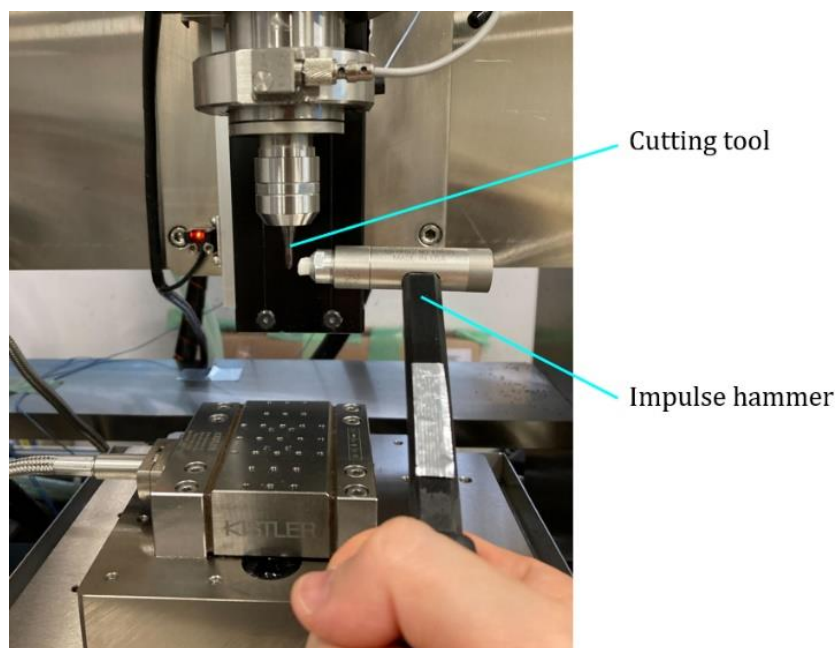


図 2.13 インパルスハンマを用いた工具先端のハンマリング

その結果を図 2.14 の上段のグラフに示す。X 方向の加速度応答は、式(2.14)により $X1$ と $X2$ の加速度の差を取ることで得ている。パラメータ ω_n および ζ は、加速度の計測結果をフィッティングすることで同定した。このフィッティングは、インパルスハンマにより加えられた力が解放され、叩かれた方向と逆方向に加速度が変化し始めたタイミングを起点として行っている。この理由として以下が挙げられる。本来、インパルスハンマでは瞬間的な力が加えられるべきである。しかし、実際には叩いた直後からゆっくりと力が加わりピークに到達する。瞬間的な力とはならない部分を取り除くことで、より正確にパラメータの同定を行った。図 2.14 の下段のグラフは、インパルスハンマで X 方向に叩いた直後の力 f_x と X 方向の加速度 $\ddot{x}$ である。叩いた力および加速度が共に増加している期間を評価期間とし、これらの変化量からパラメータ m を同定した。これについても、インパルスハンマにより加えられる力が、本来あるべき瞬間的な力ではないことが理由である。これに極力近い箇所として、力と加速度の両方が大きく変化している期間を抽出してパラメータの同定を行った。

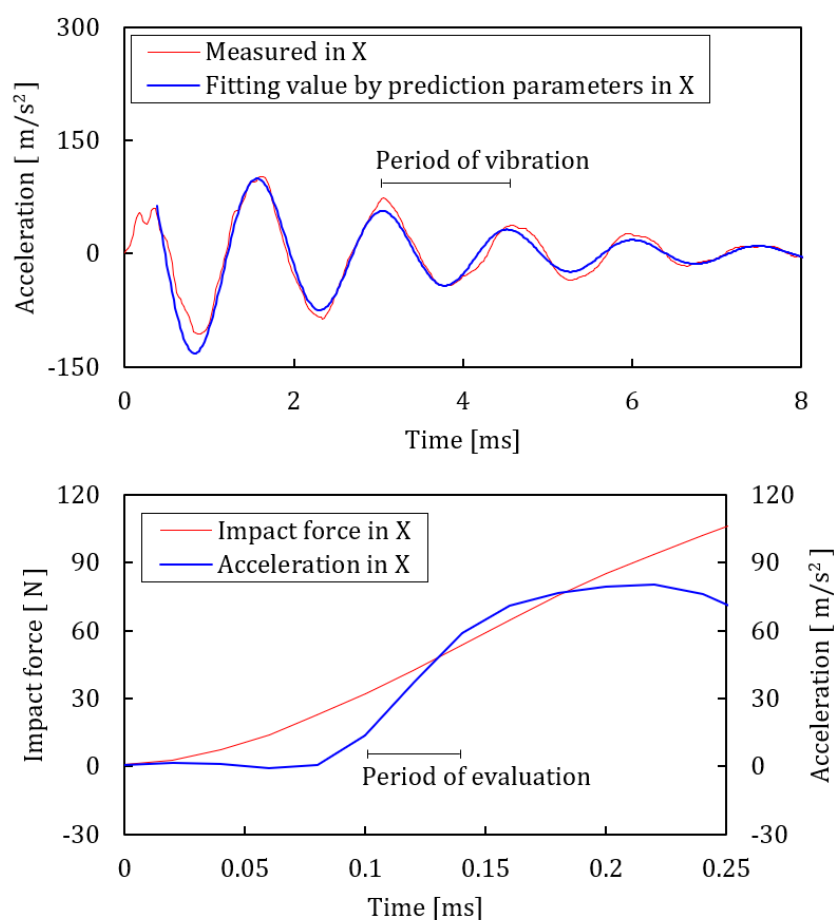


図 2.14 インパルス応答およびハンマーでの衝撃力と加速度の関係性

Y 方向と Z 方向のパラメータについても，X 方向と同様に同定を行った．特に Z 方向の加速度については，センサ Z2 とセンサ Y1 から式(2.15)に基づき求めている．以上より，X, Y, Z の各方向においてパラメータ ω_n , ζ , m , c , k を最終的に同定した．それらを表 2.2 に示す．

表 2.2 工具主軸構造のモデルパラメータ

Parameters	X direction	Y direction	Z direction
ω_n [rad/s]	4.26×10^3	3.97×10^3	1.58×10^3
ζ	0.09	0.05	0.10
m [kg]	0.90	0.65	2.34
c [N/(m/s)]	6.96×10^2	2.66×10^2	7.45×10^2
k [N/m]	1.65×10^7	1.04×10^7	0.59×10^7

参考実験として，工具先端に加速度センサを取り付け，インパルスハンマで X 方向に工具先端を叩いて X 方向の加速度の計測を行った．工具先端に取り付けた加速度センサの質量の影響は，本来であれば完全には無視することはできない．しかし，その影響を低減するために，工具主軸の質量に対して極力軽量で小さい加速度センサを利用した．その結果を図 2.15 に示す．本研究では小径のボールエンドミルを使用しているため，最も応答の大きい振動数は 2.2 kHz 付近と高い周波数となっている．切削加工中に，工具先端においてこの周波数の振動をモニタリングすることが望ましいが，現実的にはセンサを取り付けることができず計測は困難である．一方で，図 2.14 の上段のグラフは加速度センサを工具主軸に取り付けた場合の計測結果であるが，工具先端にて計測された 2.2kHz の振動がこちらでは減衰しておりほとんど見られない．最も応答の大きい振動数は 675Hz 付近である．以上の考察から本研究では工具主軸に加速度センサを取り付けて計測した図 2.14 の結果に基づき，モデル化を行っている．

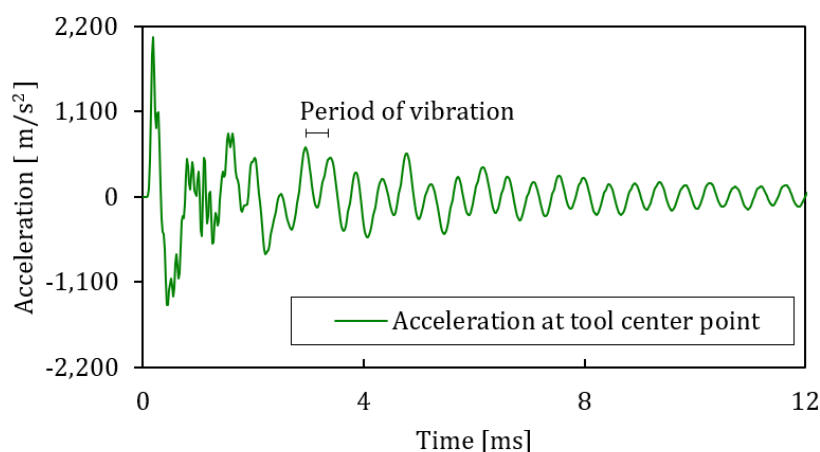


図 2.15 工具先端での X 方向の加速度におけるインパルス応答

これらのモデルパラメータと運動方程式より各方向の切削力を推定し，計測切削力との比較を行った．その結果を図 2.16 に示す．X 方向と Y 方向では，推定切削力と計測切削力がほぼ等しく一致しており，切削力が適切に推定されていることが確認できる．Z 方向においては推定切削力と計測切削力との間に，同じ傾向があることは見てとれる．しかし，その変化の位相は完全には一致しておらず，これは今後の課題である．その理由としては，Z 方向においてはその構造上の複雑さから，1 自由度モデルでは正確な切削力の推定が難しいためと考えられる．

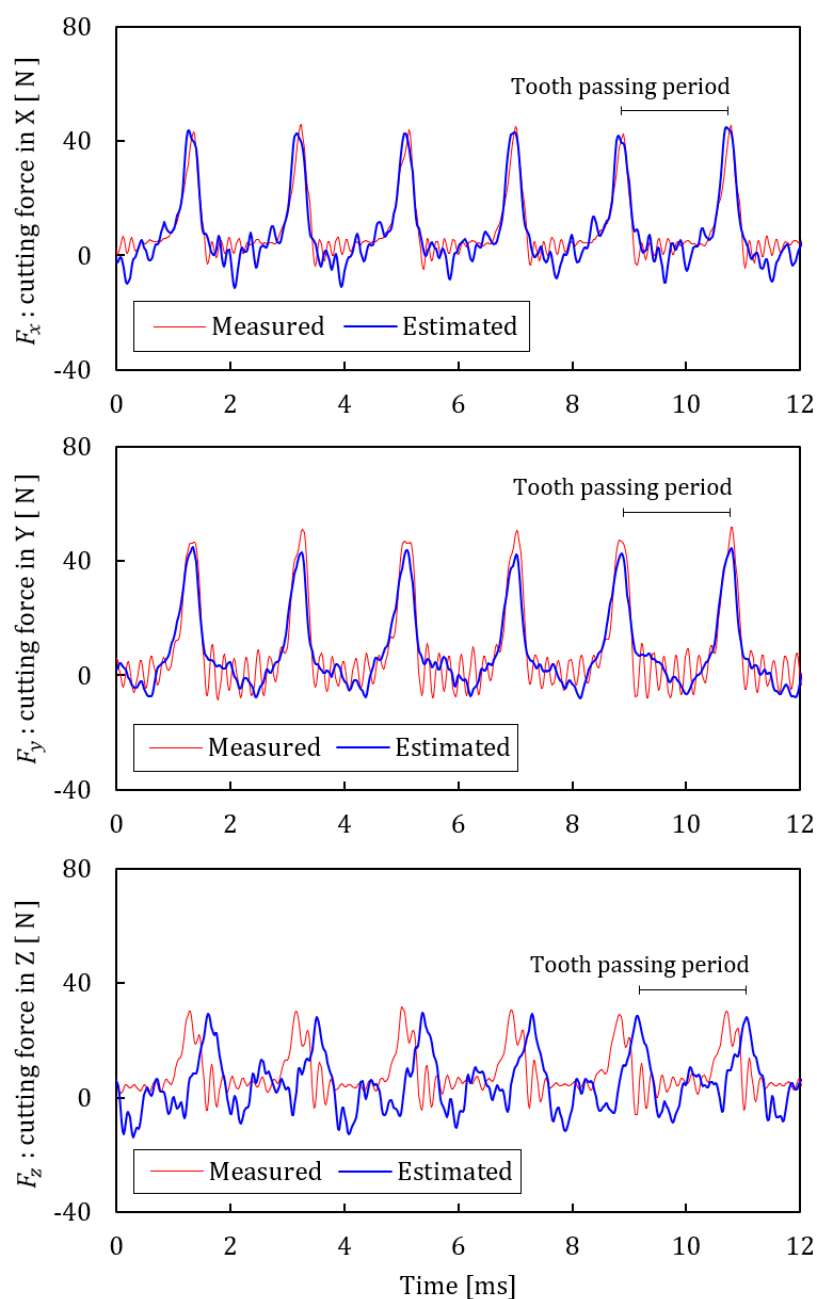


図 2.16 計測切削力と推定切削力の比較

ここで，計測切削力と推定切削力のさらなる評価を行った．図 2.17 に計測切削力と推定切削力の散布図を示す．X 方向および Y 方向の切削力は計測値と推定値に正の相関関係があるが，Z 方向の切削力は相関が低いと確認できる．また，表 2.3 に各方向における相関係数を示す．X 方向および Y 方向の切削力には正の相関関係があると見てとれる．一方で，Z 方向の切削力は相関が低い，図 2.16 の時間軸のグラフでは形状に近いことが確認でき位相のずれが原因であると考察している．このように推定切削力と計測切削力の比較について，散布図や相関係数を用いることにより確認できると考えられる．

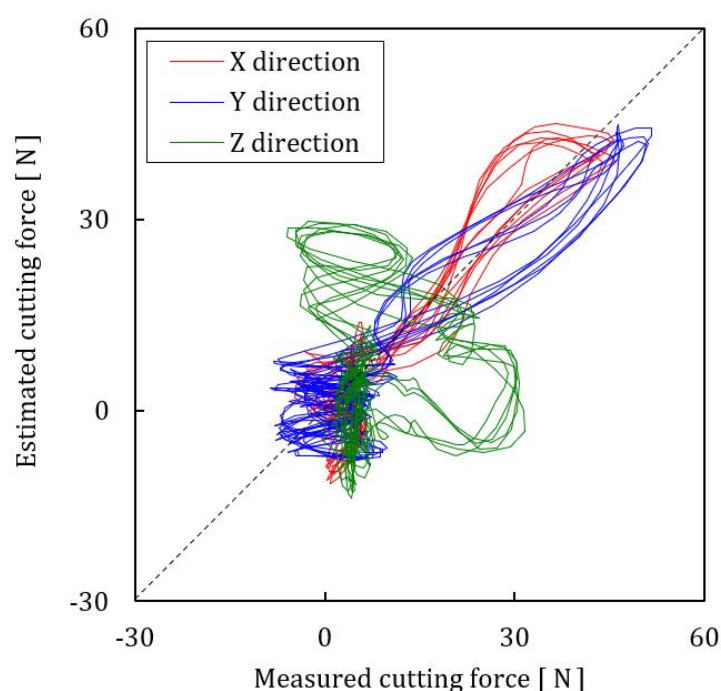


図 2.17 計測切削力と推定切削力の散布図

表 2.3 計測切削力と推定切削力の相関係数

	correlation coefficient
X direction	0.92
Y direction	0.91
Z direction	-0.01

2.4.3 切削力特徴量の評価

前項では切削動力計を用いて計測した切削力に対して、X、Y、Z の各方向の切削力の傾向は同じであることを確認した。そこで、その推定切削力を用いて切削特徴量を算出して評価を行った。そのためにはまず、正規化が必要である。切削していない状態での切削力の移動平均 $f_{\bar{x}_{\text{base}}}$ および本研究で利用した切削条件で安定的に切削加工が行われている時の切削力の移動平均 $f_{\bar{x}_{\text{std}}}$ を演算により求め、正規化を行った。Y 方向と Z 方向についても同様の正規化を行い、切削力特徴量を算出した。その結果を図 2.18 に示す。上段のグラフは式(2.8)に示した R 方向の切削力特徴量 C_r 、つまりは X 方向と Y 方向の切削力特徴量を示している。下段のグラフは Z 方向の切削力特徴量 C_z である。R 方向および Z 方向ともに、計測値と推定値の切削力特徴量がほぼ一致していることが見てとれる。例えば、切削していない状態では切削力特徴量はほぼ 0 である。その後、設定した切削条件での加工が始まると切削力特徴量は徐々に増加し、最終的には 1 に近い値で安定した。この結果から切削力特徴量により、切削していない状態から安定した切削加工への変化が適切にモニタリングできることを確認した。

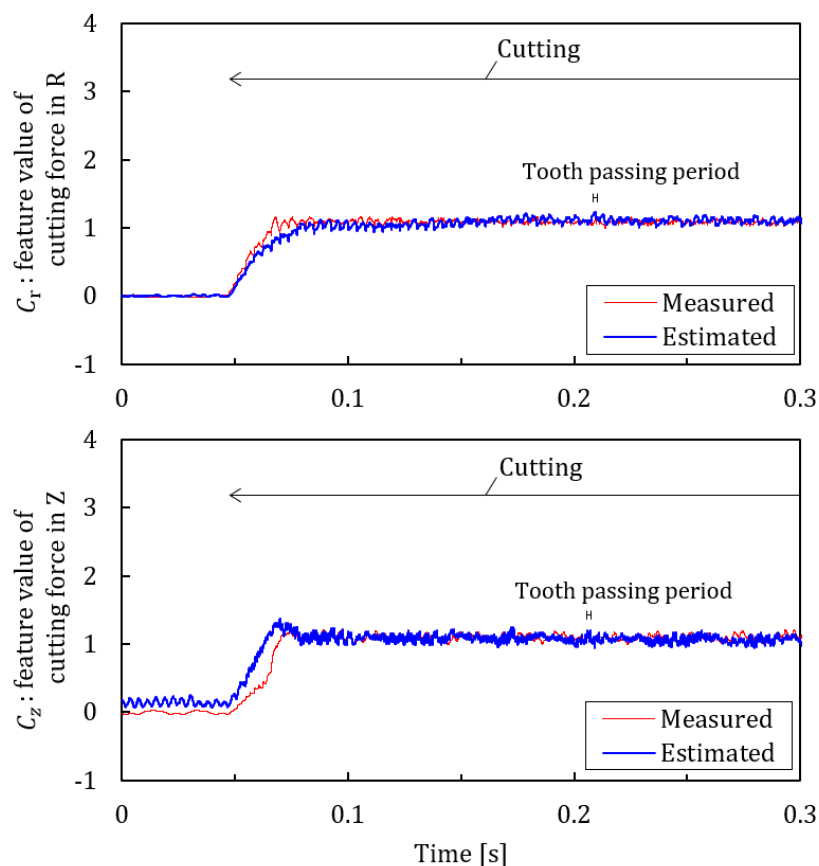


図 2.18 直線送り加工における切削力特徴量の評価

2.4.4 振動特徴量の評価

続いて、振動特徴量を算出して評価を行った。この算出にも正規化が必要である。切削していない状態での高周波振動成分の RMS $v_{x_{base}}$ および本研究で利用した切削条件で安定的に切削加工が行われている時の高周波振動成分の RMS $v_{x_{std}}$ を演算により求め、正規化を行った。ここで、 $v_{x_{std}}$ は切削開始から 0.15s 以上経過することで十分に安定するため、それ以降に算出を行っている。Y 方向と Z 方向についても同様の正規化を行い、振動特徴量を算出した。その結果を図 2.19 に示す。上段のグラフは式(2.11)に示した R 方向の振動特徴量 V_r 、つまりは X 方向と Y 方向の振動特徴量を示している。下段のグラフは Z 方向の振動特徴量 V_z である。R 方向に着目すると、切削していない状態では振動特徴量はほぼ 0 であるが、設定した切削条件での加工が始まると急激にその値は 2 付近まで上昇している。しかし、その後は徐々に減少し最終的には 1 付近で安定している。Z 方向の振動特徴量も同様の傾向を示しているが、R 方向に比べてその変化が大きくなっている。その理由は V_z の算出に使用する加速度センサ Z1 の取り付け位置にあると考えている。図 2.20 は Sensor 1(Z1) の取り付け位置の拡大写真である。Sensor 1 は一辺が約 12mm の立方体形状の 3 軸加速度センサであり、取り付け方法の都合上、工具主軸の前面からオーバーハングして取り付けられているため、Z 方向の高周波振動成分はより敏感になっていると考察している。この影響により、 V_z は切削していない状態でもわずかに値が変化していると考えている。また、安定して切削している時に V_r よりも V_z の値の変化が大きいのも同様の理由と考えている。以上の結果から振動特徴量により、切削していない状態、切削開始直後不安定な切削状態、そして、安定した切削状態への変化が適切にモニタリングできることを確認した。

直線送り加工での評価のまとめとして、モニタリングにより判明した切削プロセスに関する考察を以下に述べる。まず、本実験においては安定した状態での切削加工が再現されている。一方で、切削力が大きく変化した場合、すなわち切削していない状態から加工を開始した場合には状況が異なり、切削力が大きく増加する。これに伴い振動は急激に増加し、一定期間の残留振動を残しながら徐々にその振動が減少する。切削力の変化が振動を引き起こしているものと考えている。

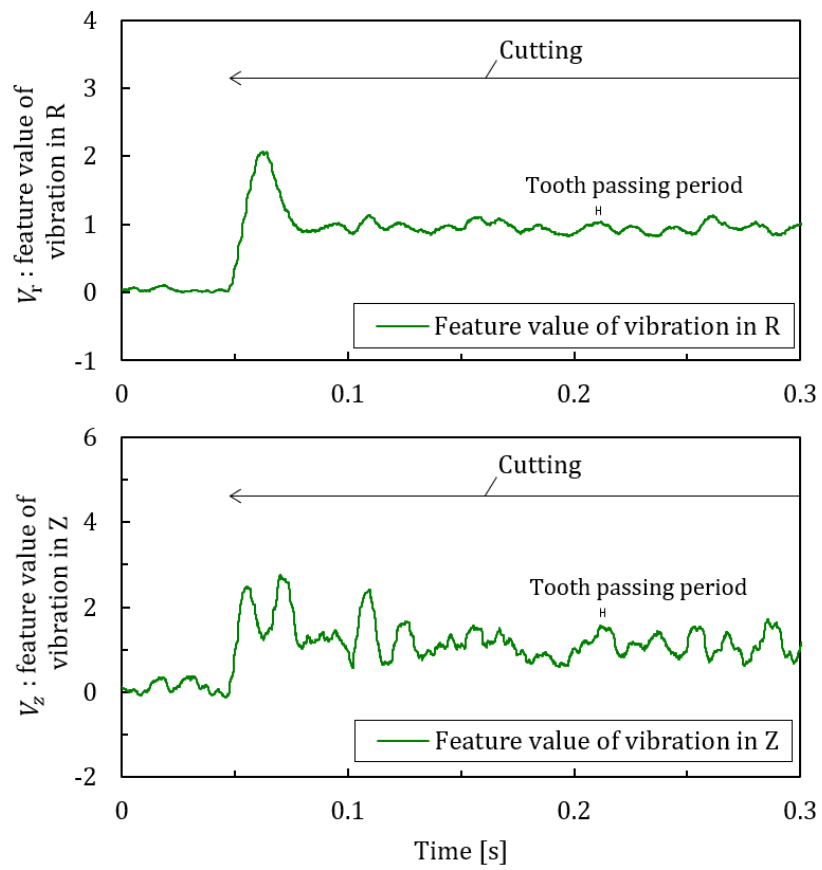


図 2.19 直線送り加工における振動特徴量の評価

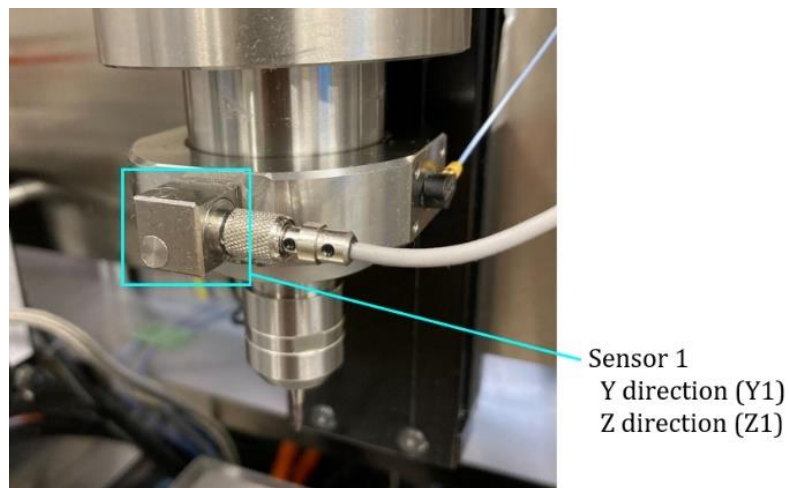


図 2.20 Sensor 1(Z1)の取り付け位置

2.4.5 周波数分析による振幅スペクトルとの比較

ここで、本研究で提案した特徴量によるモニタリングと、周波数解析による振幅スペクトルを用いたモニタリングとを比較する。この比較は Y 方向の直線送り加工において実施した。図 2.21 はセンサ Y1 にて計測した加速度に対して、周波数解析により振幅スペクトルを求め、正規化した値を示したものである。一刀周期の周波数である 533Hz 付近で最も大きいピークが存在することが確認できる。この値を利用することで、切削加工の状態モニタリングが可能と思われる。しかし、一般的に周波数解析は一定期間のデータを必要とするため、応答遅れが避けられない。一方で本研究にて提案する特徴量を用いた場合には応答遅れが無いとため、切削状態が短時間で多様に変化する形状切削加工においては周波数解析よりも優れていると考えている。

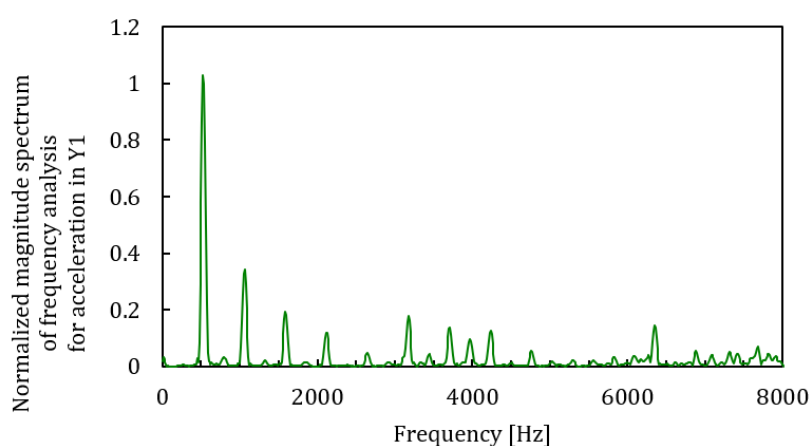


図 2.21 加速度の周波数解析による振幅スペクトラム

2.5 コーナー加工での評価

2.4 節では、直線送り加工における評価を行った。続いて、コーナー加工における提案方法の評価を実施した。図 2.22 にコーナー加工の経路を示す。切削していない状態から切削工具がワークに接近し、最初は X 方向に送りながら工具の片側で切削加工を行う。途中で切削工具は切削負荷が大きくなるコーナー部に入り、その後、送り方向を直角方向に変えて Y 方向に送りながら工具の片側で切削を行う。最後に切削工具はワークから離れて切削していない状態となる。ここで、工具の片側で加工を行う場合とコーナー加工を行う場合の切削範囲の比較を図 2.23 に示す。コーナー一部では切削負荷が非常に大きくなることが見てとれる。

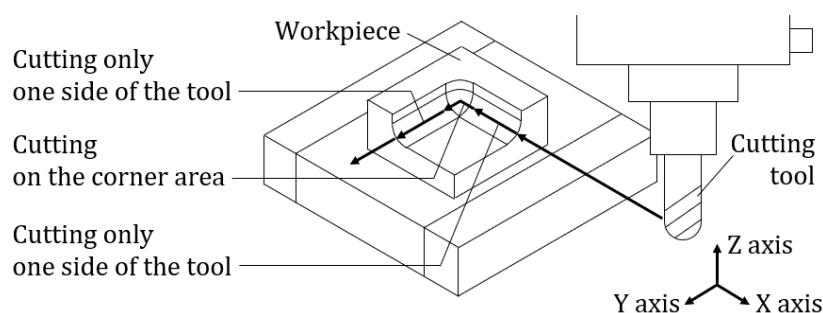


図 2.22 モニタリングの評価に利用したコーナー加工の経路

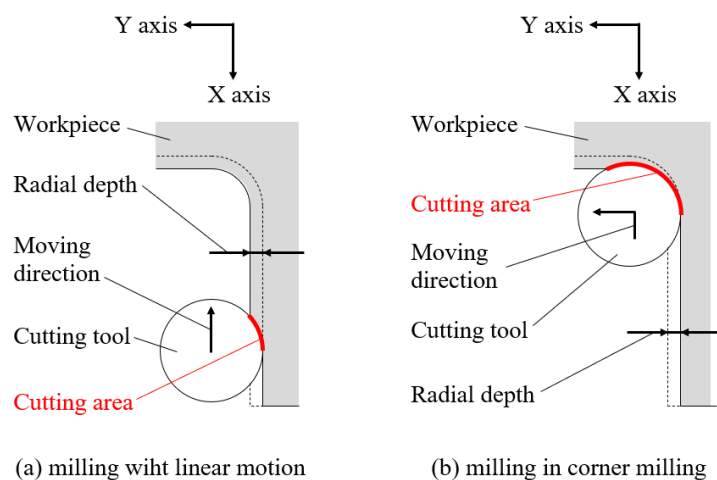


図 2.23 直線送り加工とコーナー加工における切削範囲の比較

コーナー加工における切削力特徴量の算出結果を図 2.24 に示す。上段のグラフは R 方向における計測値と推定値の切削力特徴量である。前述の直線送り加工の場合と同様に、切削していない状態では値は 0 付近であり、切削開始時には値は 1 付近まで上昇している。その後、コーナー近辺に差し掛かると値はさらに大きく上昇する。コーナーを通過した後はしばらく不安定になるが、やがて値は 1 付近で再び安定し、最終的に切削していない状態になると値は 0 付近となった。この傾向は切削力特徴量の計測値と推定値とでほぼ同じであり、切削力が適切にモニタリングされていることが確認できた。次に、図 2.24 の下段のグラフである Z 方向における計測値と推定値の切削力特徴量に着目すると、R 方向と同様にコーナー加工が適切にモニタリングされていることが確認できる。ここで、R 方向および Z 方向の両方に対して、切削力が急激に増加するコーナー近辺において推定値と実測値の切削力特徴量の比較を行った。この 2 つの値は完全には一致しておらず、推定値の方が若干大きくなる傾向であった。このことから今回のコーナー加工のように急激に大きな切削力が掛かる加工では、現状の手法では切削力の正確な絶対値を推定することは困難であることがわかる。しかし、切削力の急激な増大などの異常状態を検出するためのモニタリングには、十分に利用可能であると考えられる。

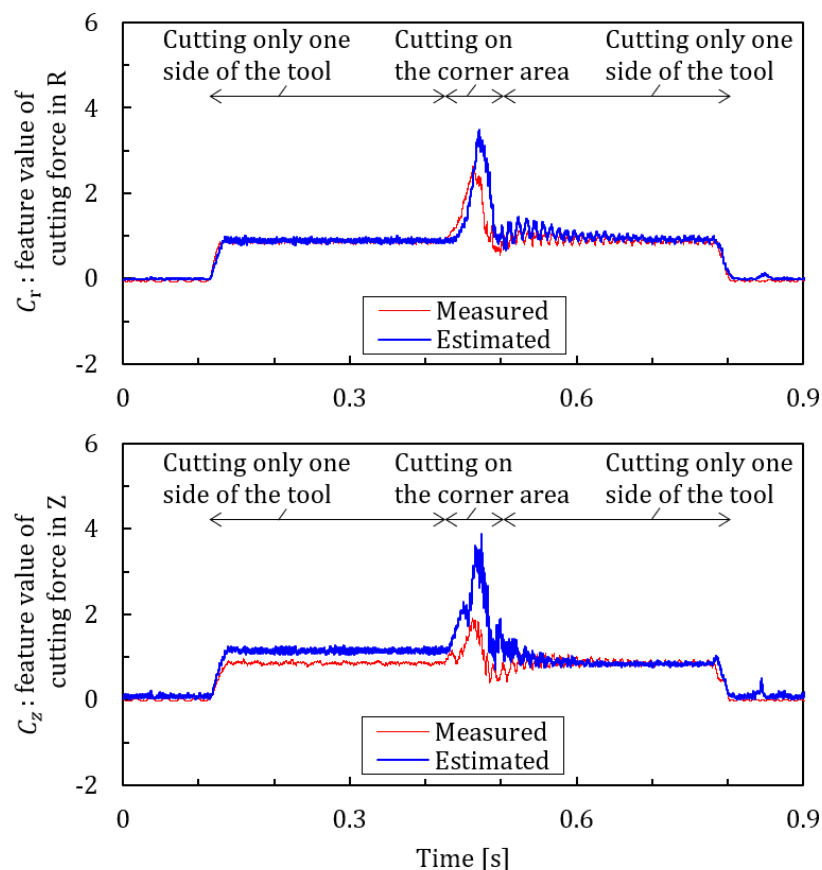


図 2.24 コーナー加工における切削力特徴量の評価

コーナー加工における振動特徴値についても同様に算出を行った．その結果を図 2.25 に示す．上段のグラフは R 方向の振動特徴量である．直線送り加工の場合と同様に，切削していない状態では値は 0 付近であり，切削加工が始まると急激に値が上昇し，安定した切削加工になると値は 1 付近に減少している．その後，コーナー近辺に差し掛かると値はさらに大きく上昇する．コーナーを通過した後はしばらく不安定になるが，やがて値は 1 付近で再び安定し，最終的に切削していない状態になると値は 0 付近となった．この傾向は実際の切削加工の様子においてもほぼ同様であった．次に，図 2.25 の下段のグラフにある Z 方向における振動特徴量に着目すると，R 方向と同様の傾向を示している．しかし，その変化は R 方向よりも Z 方向の方が大きくなっている．これは Z 方向の切削力をまだ正確に推定できていないことが理由と考えている．このように若干の差はあるものの，振動特徴量を用いることでコーナー加工において適切なモニタリングが可能であることが確認できた．

ここで，コーナーを通過した後の残留振動について考察する．改めて図 2.25 に注目すると，R 方向と Z 方向の両方においてコーナーを通過した後の 0.15s 程度の期間に残留振動が確認できる．一方で図 2.24 に注目すると，コーナーを通過した後の切削力特徴量の値はそれほど大きくはないが，値が変動していることが見てとれる．これは残留振動が発生している影響と考えられる．

本実験の結果から， C_r ， C_z ， V_r ， V_z の全ての特徴量を用いてモニタリングを行うことが適切であると考えられる．まず， C_r と C_z はそれぞれ切削工具の径方向と軸方向の切削負荷をモニタリングするために必要である．これらの特徴量により，切削していない状態，安定した切削状態，コーナー加工における過負荷切削状態，コーナー加工後の安定した切削状態，切削加工が終了した状態といった変化をモニタリングする．そして， V_r と V_z はそれぞれ切削工具の径方向と軸方向の振動をモニタリングするために必要である．これらの特徴量により，加工開始時に発生する振動，急激な過負荷により発生する振動，およびその残留振動についてモニタリングが可能である．

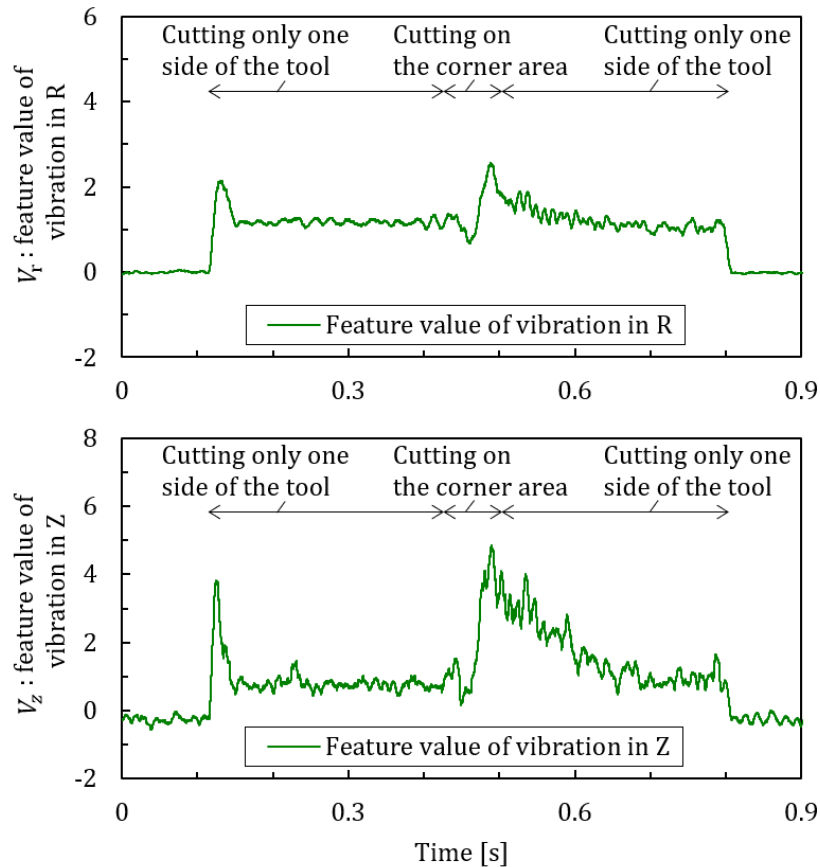


図 2.25 コーナー加工における振動特徴量の評価

コーナー加工に関して、もう一つ別の実験を行ったので以下に説明する．最初のコーナー加工実験では、コーナー部において送り方向を直角に変更する加工経路を使用した．これに対し、今回はコーナー部に半径 **0.3mm** の円弧軌跡を挿入した別の加工経路を作成して加工実験を行った．挿入した小さな円弧によりコーナー部において切削力および振動が低減されると考えており、その状態をモニタリングすることを目的とした実験である．図 2.26 に切削力特徴量の算出結果を示す．**R** 方向と **Z** 方向の両方において、図 2.24 と比較してコーナー付近での切削力特徴量が減少しているのが確認できる．また、図 2.27 に振動特徴量の算出結果を示す．**R** 方向と **Z** 方向の両方において、図 2.25 と比較してコーナー近辺での振動特徴量が大幅に減少しているのが確認できる．コーナー近辺におけるこれらの特徴量の値は、コーナー部に入る前に安定して切削加工が行われていた時の値とほぼ等しい．これらの結果から、加工経路の違いによる切削状態の変化をモニタリングするために、提案した特徴量を活用できることが確認した．

コーナー加工での評価のまとめとして、モニタリングにより判明した切削プロセスに関する考察を以下に述べる．まず、コーナー部での加工においては、切削力特徴量の値が安定した切削状態に比べておよそ **2 倍から 4 倍** となっており、これは切削の除去量が急激に増加していることを示している．この切削力の急激な増加は、

0.2s という長い時間に及ぶ残留振動を引き起こすと考えている。一方で，コーナー部の加工軌跡に微小 R を挿入することにより，コーナー部の切削力の増加を抑制することが可能であったと考察している。

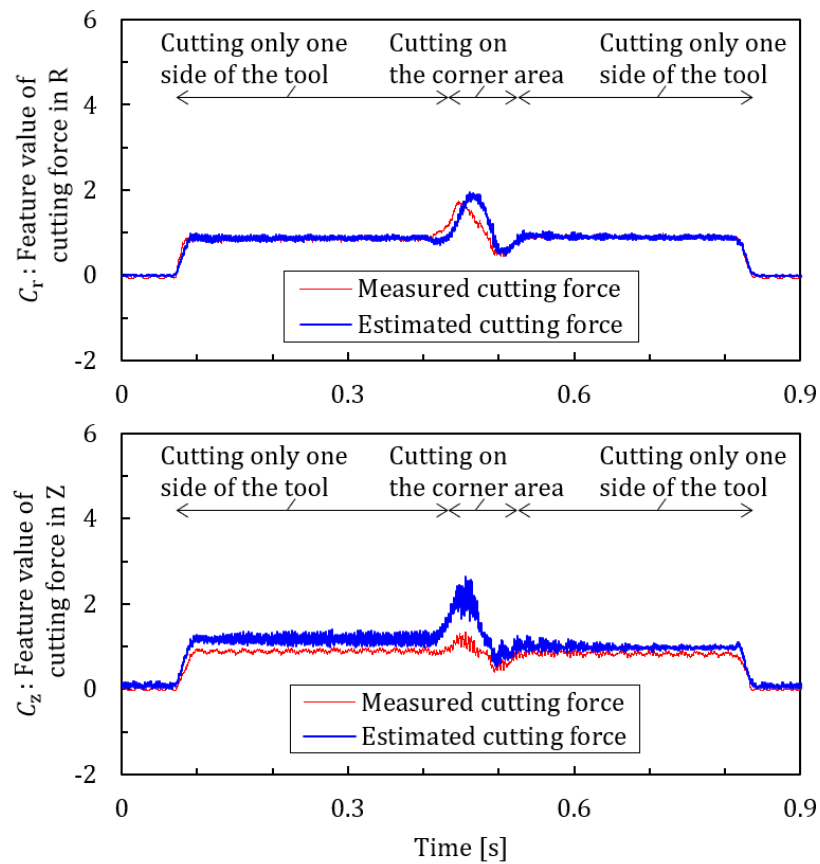


図 2.26 微小 R を挿入したコーナー加工における切削力特徴量の評価

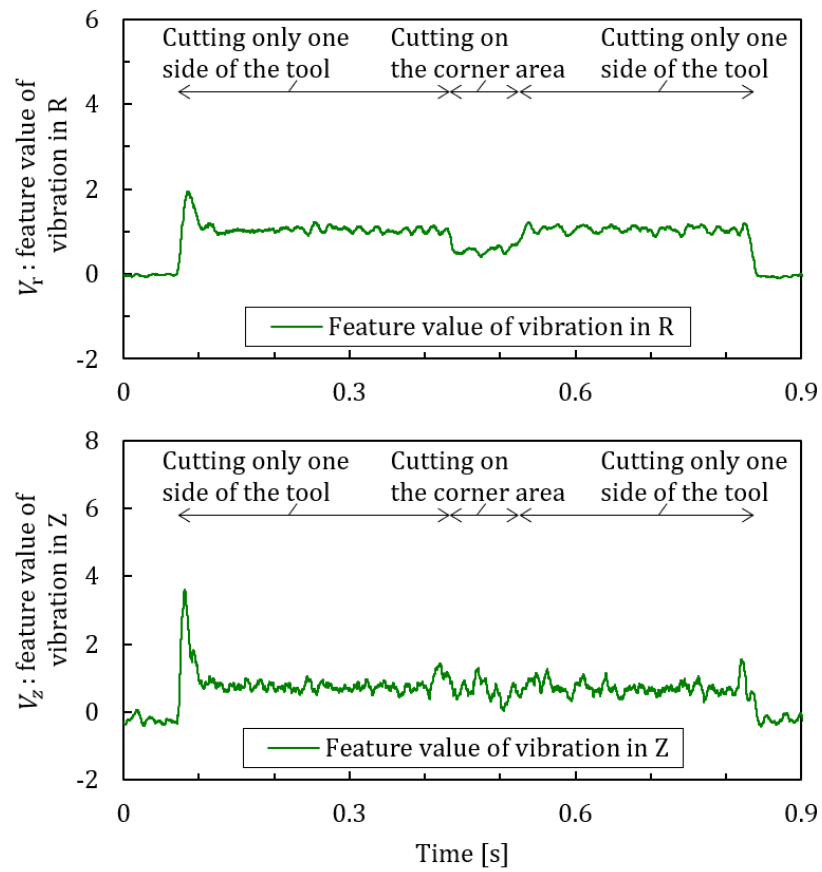


図 2.27 微小 R を挿入したコーナー加工における振動特徴量の評価

2.6 加工中の異常振動の評価

特徴量についての更なる評価のために、加工中に異常振動を発生させて評価を行った。具体的にはボールエンドミルの先端がワークに接触していない開放した状態で、高い切削負荷での加工を実施した。その加工の様子を図 2.28 に示す。これまでの実験では左側の図のように、ボールエンドミルの先端がワークで保持された状態で切削加工を行っていた。一方で今回は右側の図のように、ボールエンドミルの先端がワークに保持されていない開放した状態で実験を行っている。意図的にこのような形状を用意して加工を実施した。

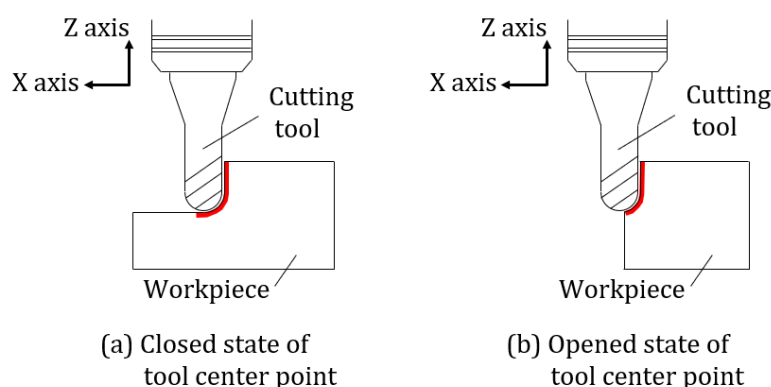


図 2.28 工具先端が接触した状態と開放された状態での加工

この工具先端が開放された状態での実験は、直線送りでの加工にて評価を行った。まず、加速度センサによる計測値に注目する。図 2.29 の上段のグラフは、工具先端が開放された状態での加工における Y 方向の加速度を示している。センサ信号の計測値、逐次 2 次回帰近似により抽出した一刀周期の加速度変動、および高周波振動成分をそれぞれグラフに示す。図 2.7 は工具先端がワークに接触した状態で、同じ切削条件で加工を行った場合の同じ Y 方向の加速度である。図 2.29 の上段のグラフと比較すると、工具先端が開放された状態の加工では高周波振動が大きくなっていることが見てとれる。図 2.29 の下段のグラフは、工具先端が開放された状態の加工での計測切削力と推定切削力を示している。計測切削力のピークが変動していることから、不安定な切削加工となっていると考えられる。ただし、この不安定な切削加工においても、推定切削力は計測切削力の変化にほぼ追従していることが確認できる。図 2.16 の中段のグラフは、工具先端がワークに接触した状態で、同じ切削条件で加工を行った場合の同じ Y 方向の切削力である。図 2.29 の下段のグラフと比較すると、計測切削力の波形に違いがあることがわかる。工具先端が開放された状態の不安定な加工での切削力波形は、比較的細く高いピーク値を持っていると見てとれる。

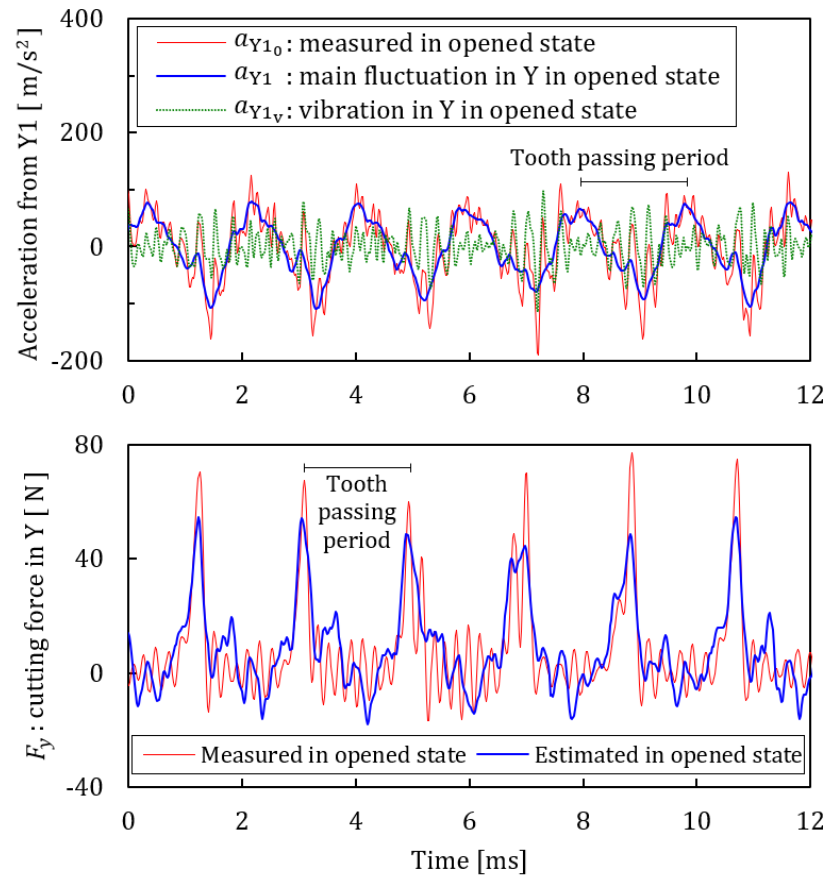


図 2.29 工具先端が開放された状態での加工における加速度および切削力

この違いをより明確に確認するために、より長い期間での切削力を示したのが図 2.30 である。計測切削力と推定切削力が一定の周期で変動していることが確認できる。この変動の周期は約 9.4ms であり、今回の切削条件における一刃周期は約 1.88ms である。この結果から、切れ刃が 5 回切削するごとに切削力が変動していると考えられる。

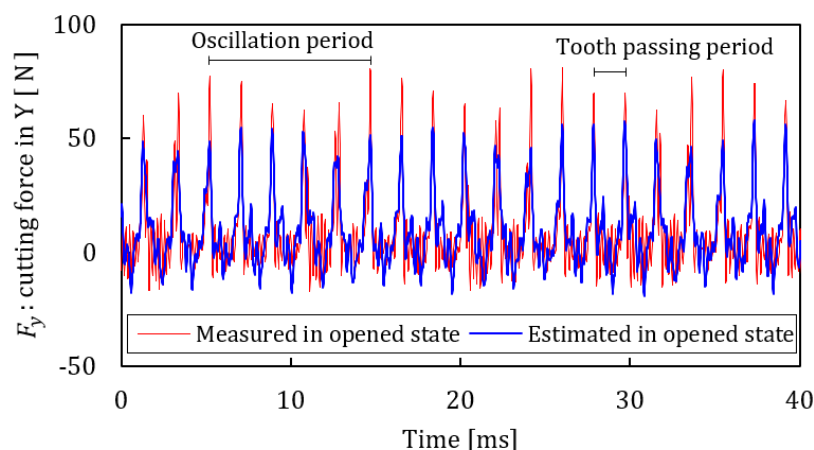


図 2.30 工具先端が開放された状態での加工における切削力 (時間軸: 40ms)

切削力が変動しているこの不安定な加工において、切削力特徴量を算出して評価を行った。図 2.31 は、工具先端が開放された状態での加工における R 方向と Z 方向の切削力特徴量を示している。グラフには参考として、工具先端がワークにより保持された状態での加工における推定値の切削力特徴量も含まれている。工具先端が開放された状態での加工における計測値と推定値の切削力特徴量に注目すると、一定の周期で変動していることが確認できる。この変動周期は約 9.4ms であり、図 2.30 にて確認した切削力の変動周期と同じである。このことから、切削力が周期的に変動するような不安定な切削状態は、切削力特徴量によりモニタリングが可能であることが確認できる。しかし、図 2.31 において工具先端が開放された状態での加工における計測値と推定値の切削力特徴量を比較すると、両者の絶対値は完全には一致していない。今回の実験のように切削力が変動する不安定な加工においては、提案する方法では正確な切削力の絶対値を推定することは困難であると考えられる。一方で、切削力が変動する不安定な加工が発生しているというその異常な状態を検出するためのモニタリングには、十分活用できると考察している。

今回の実験において、切れ刃が 5 回切削するごとに切削力が変動していたが、これは切削条件、切削工具、機械構造など様々な要因によるものと思われる。この切削力の変動周期に基づき、切削力特徴量を算出するための移動平均時間 L_c を状況によりチューニングするということも考えられる。しかし、今回のように L_c を一刃周期に設定して固定したとしても、図 2.31 に示すように切削力特徴量が変化する周期から変動周期をモニタリングすることができる。そこで本研究では、 L_c は一刃周期としてチューニングは行わないものとしている。

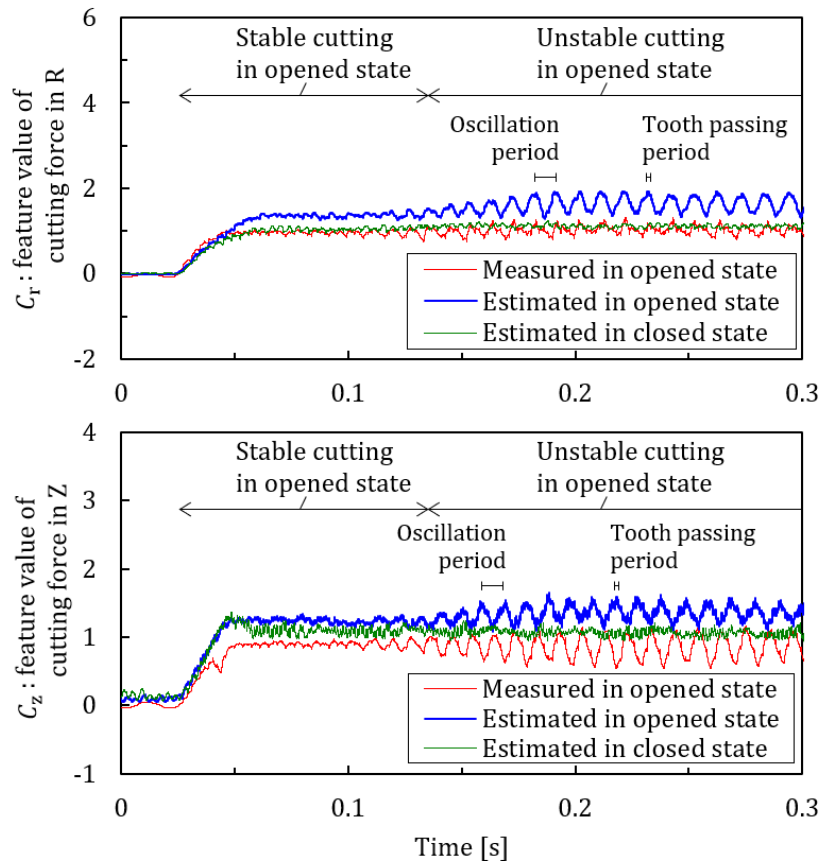


図 2.31 工具先端が開放された状態での加工における切削力特徴量の評価

次に、工具先端が開放された状態での加工において振動特徴量を算出した結果を図 2.32 に示す。まず、切削していない状態からワークに接触して切削加工が始まり、しばらくは加工が安定していた。その様子は上段のグラフにある R 方向の振動特徴量にも表れており、切削していない状態では 0 に近い値であるが、切削加工が始まると急激に上昇し、しばらくすると 1 付近で安定している。その後、加工は不安定な状態となり、切削音がこれまでよりも大きくなった。この様子を R 方向の振動特徴量で確認すると、値が 2 付近まで上昇しており、切削加工が不安定になったことが確認できる。グラフには比較として、工具先端がワークに接触した状態での加工における振動特徴量も示している。こちらはほぼ安定した値が保たれており安定した切削加工状態であったと考えられ、違いを見てとることができる。また、図 2.32 の下段のグラフは Z 方向の振動特徴量の結果であり、R 方向の特徴量とほぼ同じ傾向が見られると考えている。

工具先端が開放された状態での加工における評価のまとめとして、モニタリングにより判明した切削プロセスに関する考察を以下に述べる。工具先端が開放された状態での加工では、切削力特徴量に変動が見られ、また、振動特徴量に増加が見られる。これは工具先端がワークによって保持されていないため、不安定な切削状態になっていると考えられる。今後さらなる検討が必要ではあるが、今回確認された

9.4ms 周期，つまり約 106Hz の切削力の変動の原因はテーブル側にあると考えている．理由としては，テーブル側において 106Hz 付近の固有振動数が計測されているからである．一方で工具主軸側においてはこの 106Hz 付近の固有振動数は見つかっていない．また，今回の加工実験で発生した振動は，振動特徴量を用いてモニタリングが可能であると考えている．

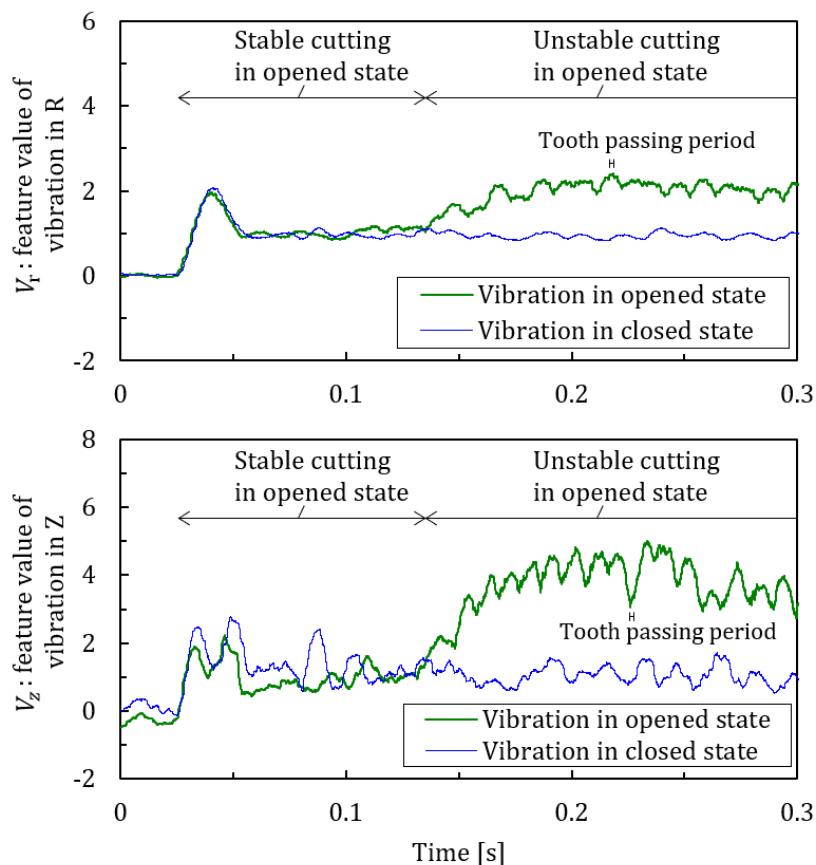


図 2.32 工具先端が開放された状態での加工における振動特徴量の評価

2.7 摩耗工具での加工における評価

続いて、これまでの加工実験よりも切削力の変動が大きくなる状況での評価を行った。2枚刃の切削工具における切れ刃のうち片方だけが急激に摩耗すると、摩耗した刃と摩耗していない刃により切削力が変動した状態で切削加工が行われることになる。そこで、今回は2枚刃のボールエンドミルの片方の切れ刃をオイルストーンで30分ほど削って意図的に丸みをつけ、その切削工具を利用して加工実験を行った。その切れ刃の拡大写真を図2.31に示す。図2.33(a)が新しい工具の鋭利な刃先であり、図2.33(b)がオイルストーンで削った丸みを帯びた刃先である。オイルストーンで削った刃先は工具顕微鏡で計測し、逃げ面摩耗幅VBが0.08mm以上であることを確認している。

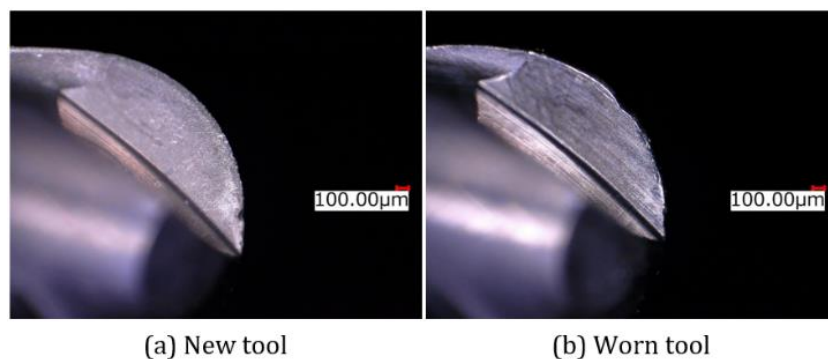


図 2.33 新しい工具と摩耗工具の刃先

片刃のみを摩耗させた工具を用いて、切削加工を実施した場合の X 方向の加速度と切削力を図 2.34 に示す。上段のグラフは、X 方向における一刃周期の加速度変動および高周波振動成分を示している。同じ切削条件で新しい工具を用いて切削加工を行った場合の同じ X 方向の加速度が図 2.9 の下段のグラフであり、図 2.35 の上段に再掲する。この 2 つの結果を比較すると、一刃周期の加速度変動の波形は新しい工具での加工では安定しているのに対し、摩耗工具での加工ではより大きく変化していることが確認できる。次に、図 2.34 の下段のグラフに注目すると、摩耗工具で加工したときの計測切削力と推定切削力が示されている。ここで、計測切削力が切れ刃ごとに変動していることが確認できる。また、計測切削力と推定切削力が概ね一致している。同じ切削条件で新しい工具を用いて切削加工を行った場合の同じ X 方向の切削力が図 2.16 の上段のグラフであり、図 2.35 の下段に再掲する。こちらは切れ刃ごとの切削力の変動は無く、摩耗工具での加工との違いが確認できる。

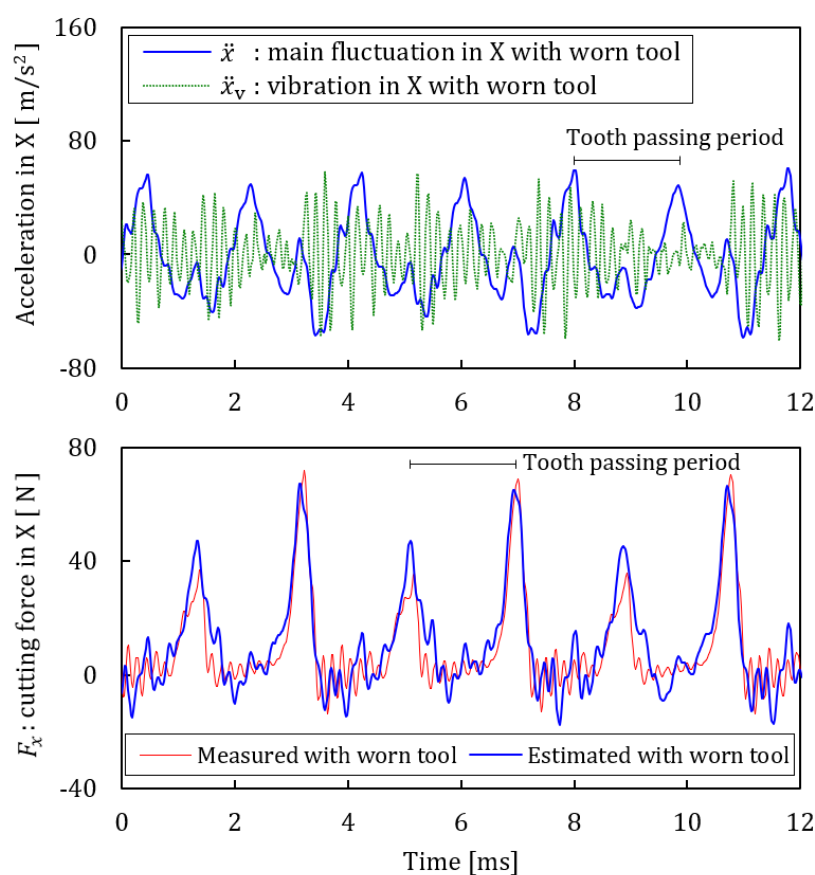


図 2.34 摩耗工具での加工における X 方向の加速度および切削力

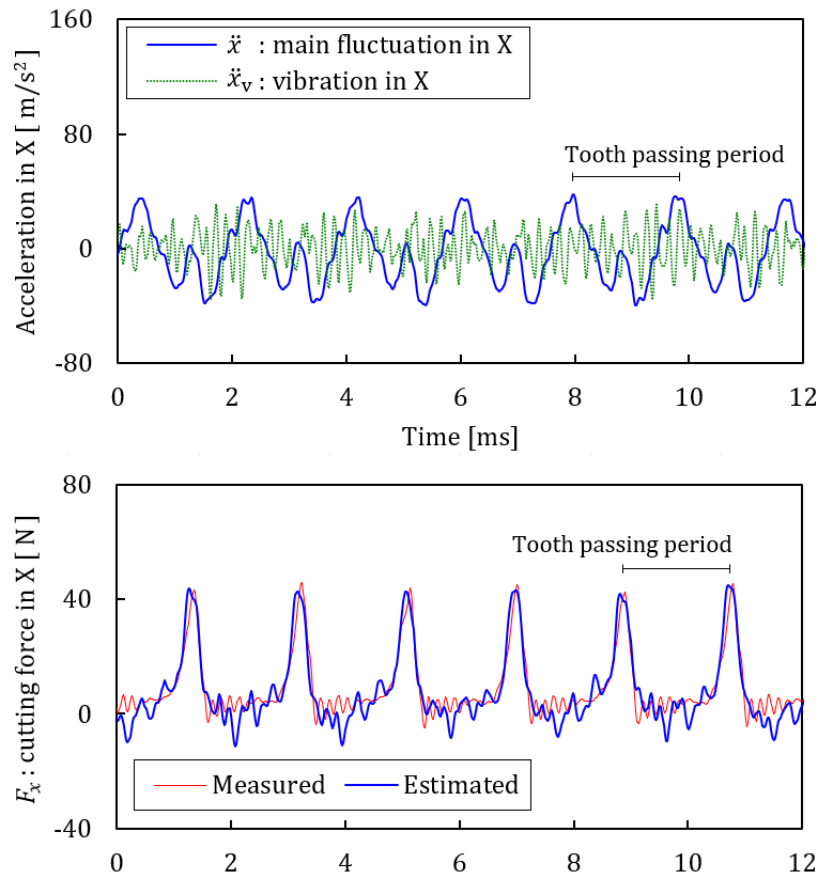


図 2.35 新しい工具での加工における X 方向の加速度および切削力(再掲)

続いて、摩耗工具と新しい工具を用いた場合の加工における切削力特徴量を図 2.36 に示す。この実験では直線送り加工にて評価を実施した。切削していない状態からワークに接近し、工具の片側で切削加工を行っている。上段のグラフにある R 方向の切削力特徴量に注目すると、摩耗工具で加工した場合には、計測値および推定値の切削力特徴量が切れ刃ごとに変動していることが確認できる。図 2.36 の下段のグラフに示すように、この傾向は摩耗工具での加工における Z 方向の切削力特徴量でも同様である。以上の結果から、切削力特徴量を用いることで、一つの刃が摩耗した工具により切削力が変動する加工の適切なモニタリングが可能であることが確認できた。

今回の実験においては新しい工具と大きく摩耗した工具との比較を実施したが、片方の切れ刃の摩耗が徐々に進行しているといった摩耗の中間状態についてもモニタリングが可能と考えられる。図 2.36 の大きく摩耗した工具における推定切削力の特徴量は一刃ごとに大きく値が変動しているが、摩耗が中間状態である工具の場合には、この切削力特徴量は一刃ごとに小さく変動すると考えられ、これによりモニタリングが可能であると考察している。

また、摩耗工具と新しい工具を用いた場合の加工における振動特徴量を図 2.37 に示す。R 方向と Z 方向の両方において、切削開始直後の振動特徴量は摩耗工具の方

が新しい工具よりも高くなっている。しかし、切削開始から約 30ms 後には、摩耗工具と新しい工具の加工における振動特徴量の値はほぼ同じになっている。ただし、現状よりもさらに工具の摩耗が進行すると、振動が発生すると考えられる。その場合には振動特徴量によりモニタリングが可能であると考察している。

摩耗工具を用いた加工における評価のまとめとして、モニタリングにより判明した切削プロセスに関する考察を以下に述べる。片方の切れ刃だけが摩耗した工具での加工では、切れ味の違いから刃ごとに切削力の差が生じる。一方で、安定して切削加工が行われている場合には、高周波振動については新しい工具と摩耗工具とで大きく変わらないことも確認できた。

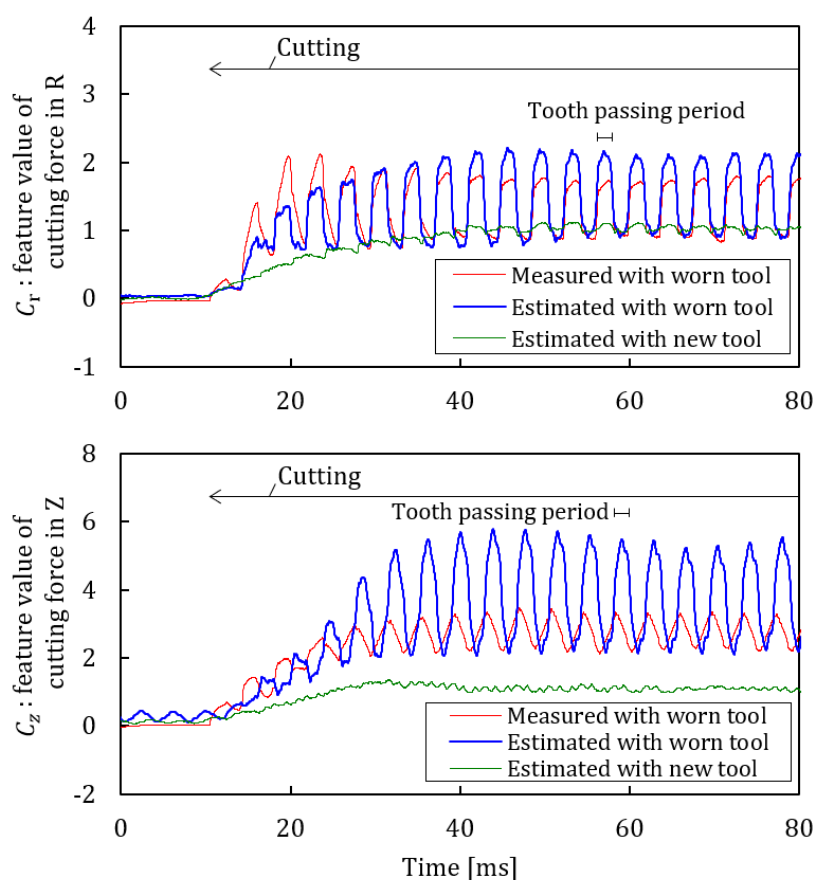


図 2.36 摩耗工具と新しい工具での加工における切削力特徴量の評価

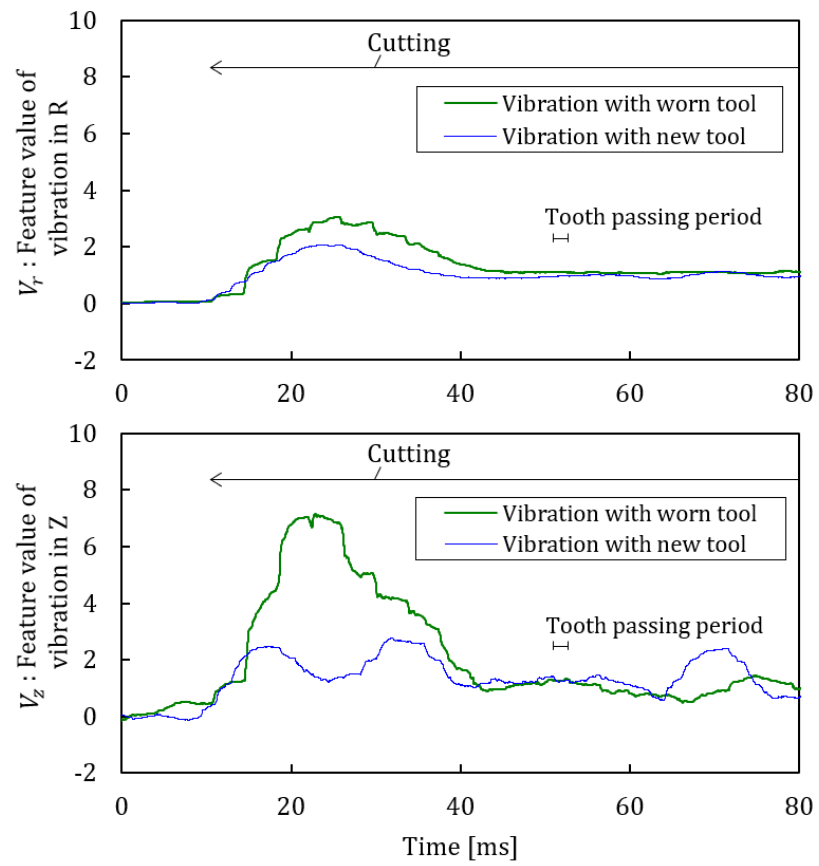


図 2.37 摩耗工具と新しい工具での加工における振動特徴量の評価

2.8 結言

本章では切削加工時の切削力と振動をモニタリングする手法を提案した．本手法は，逐次 2 次回帰近似を用いて加速度センサ信号から一刃周期の加速度変動と高周波振動成分の分離を行う．続いて，モデルベースアプローチから切削力を推定する．その後，切削力特徴量と振動特徴量の 2 つの特徴量を算出し，切削加工の状態モニタリングを行うものである．加工実験により得られた結果を以下に示す．

- 加工時の切削負荷を切削力特徴量によってモニタリングできる．具体的には切削していない状態，安定的に切削している状態，コーナー加工における過負荷切削状態などを判別することが可能である．また，切削力特徴量 C_r と C_z を比較することで，切削負荷が径方向あるいは軸方向のどちらから受けているかを判別することも可能である．
- 加工中の振動を振動特徴量によってモニタリングできる．具体的には加工開始時に発生する振動，急激な過負荷による振動，その残留振動，工作機械等の固有振動の影響による振動などの判別することが可能である．また，振動特徴量 V_r と V_z を比較することで，振動が径方向あるいは軸方向のどちらに発生しているかを判別することも可能である．
- 切削力特徴量により工具の摩耗状態をモニタリングできる．新しい工具で加工した場合の切削力特徴量と比較することでモニタリングが可能である．

以上の結果より，従来では難しかった小径ボールエンドミルによる高い回転速度での形状加工において，切削力特徴量と振動特徴量を利用することで，切削力と振動の適切なモニタリングを実現した．

第3章 工具主軸の静的変位のモニタリング

3.1 緒言

第2章においては、工具主軸に取り付けた加速度センサを用いた状態モニタリング方法を提案し、加工時における適切な切削力および振動モニタリングを実現した。しかし、実際の切削加工は実に様々な切削条件、切削工具、工作機械、周辺環境などの状況下で行われる。工作機械の構造によりセンサを最適な位置に取り付けることが難しかったり、モニタリングしたい内容を安定的に計測できるセンサが無かったりなど制約があることも多い。工具主軸に取り付けた加速度センサを用いて理想的な計測ができなかった場合に、それを補う形で別のセンサを組み合わせることで高精度に推定する方法を提案する。

まず、切削負荷や加工方向が変化した場合の切削力の推定結果が不十分である原因は、工具主軸の静的変位であると考察している。その概要を図3.1に示す。エンドミルを用いての加工は通常、一刃ごとの断続切削である。図3.1(a)にて示すように、刃先が左方向に切削力を受けると工具主軸が押されて左方向に変位する。しかし、刃先とワークの接触が終わる、つまり刃先が抜けると工具主軸は引き戻され右方向に変位する。この後、次の刃先とワークが接触して切削が始まると、再び左方向に切削力を受けて工具主軸が左方向に変位する。この一連の動きが繰り返されている。この時、工具主軸構造が左右に行き来する変位の中心は、工具主軸が力を受けていない元々の位置付近であると考えられる。この理由は、エンドミルを用いた切削加工においては通常、一刃ごとの断続切削となるためである。しかし、実際には図3.1(b)にて示すように、使用する切削工具や切削条件によっては、刃先がワークとの接触から抜けた後、工具主軸が戻りきらずに次の刃先による切削力を受けることが考えられる。このような場合に、工具主軸の静的変位が発生する。静的変位が発生すると、切削力の正確な推定が難しくなるだけでなく、寸法精度に対しても影響すると考えられる。それは、静的変位により工具主軸の一刃周期での変動の中心が変わってしまうため、目標とする仕上げ面の位置に誤差が生じることが理由である。このため、切削加工中の静的変位のモニタリングは重要であると考えられる。

本章ではこの静的変位について、変位センサを用いた計測によりその状況を明らかにする。そして、静的変位を推定することにより、より正確に切削力を推定する方法を提案する。また、その提案方法を通して、複数のセンサを組み合わせたモニタリング方法の提案も行う。

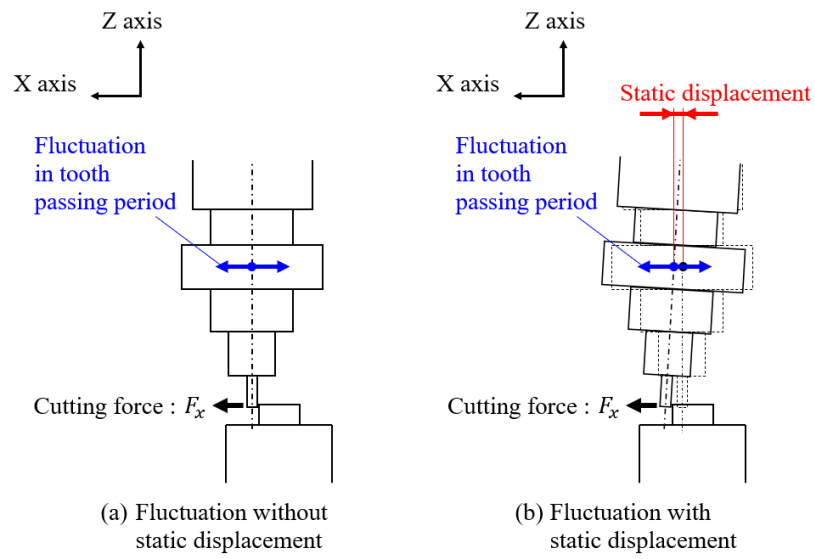


図 3.1 切削加工時における工具主軸の静的変位

3.2 工具主軸の静的変位の計測

3.2.1 実験加工機およびセンサ

まずは工具主軸の静的変位について変位センサを用いて計測を行った。第 2 章で使用した NC 加工機を今回も使用しており，それを図 3.2 に示す。計測には渦電流式変位センサ(電子応用，PU-05)を用いており，X 方向の変位を計測している。工具主軸，Z 軸ステージ，Z 軸駆動機構といった工具主軸構造全体の変位が計測できるように，実験加工機のブリッジに取り付けたマグネットスタンドを用いてセンサを固定し，工具主軸構造の変位を外側から非接触で計測した。計測は，センサ信号をアナログ電圧に変換して行っている。また，比較のために加速度センサ(小野測器，NP-3211)での計測も行った。1 軸の加速度センサを 2 個(X1, X2)使用し，X 方向の加速度を計測している。計測はサンプリング周波数 50kHz で行った。

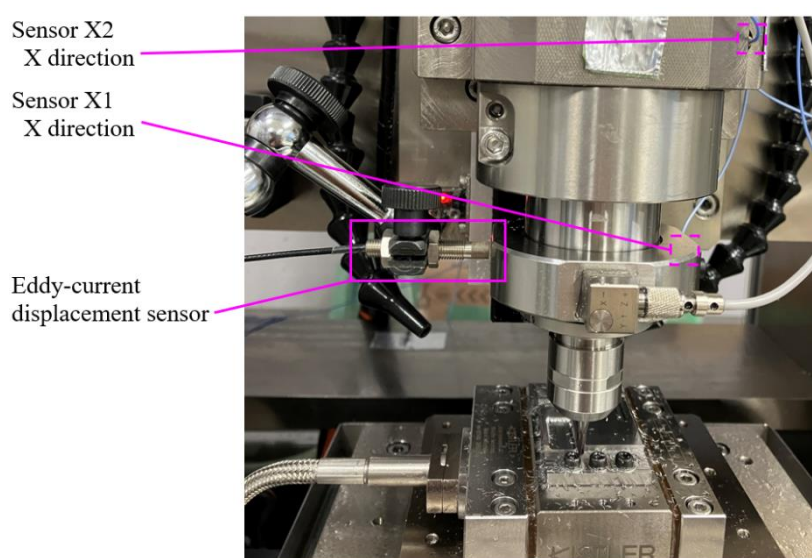


図 3.2 渦電流式変位センサによる工具主軸変位の計測

使用した切削条件の一覧を表 3.1 に示す。切削工具には第 2 章の実験と同じく半径 1.5mm の 2 枚刃のボールエンドミルを使用した。被削材には被削性の高いプリハードン鋼(大同特殊鋼製，NAK55)を用いた。

表 3.1 切削条件，切削工具および被削材

Milling condition code		MC-A	MC-B	MC-C
Cutting condition	Method of cutting	Down milling		
	Rotational speed of spindle	16,000 min ⁻¹		
	Feed rate	1,500 mm/min		
	Feed per tooth	0.047 mm		
	Radial cutting depth	0.05 mm	0.1 mm	0.15 mm
	Axial cutting depth	0.45 mm		
	Coolant	Semi dry (Oil mist)		
Cutting tool	Type of tool	Ball end mill		
	Cutting flutes	2-flute		
	Radius of tool	1.5 mm		
	Effective length	8 mm		
Workpiece	Material overview	Pre-hardened steel with high machinability		
	Main material component	Fe		
	Hardness	37-43 HRC		

3.2.2 計測および評価

図 3.3 に示した Y 軸の正方向への直線送り加工を行い，工具主軸の X 方向の変位について計測および評価を行った．切削していない状態から，切削工具がワークに接触して安定的な加工が始まったところまでの変位センサの計測値を図 3.4 に示す．表 3.1 に示した切削条件の中で，MC-B (Rd 0.1mm) を利用している．ここで，フィルタ処理をしていない変位センサの計測値，すなわち計測の生データに注目すると，おおよそ 20ms の周期(50Hz)で値の変動が見られた．これは，センサ信号をアナログ電圧に変換して計測を行っているため，電源周波数の影響を受けているものと考えられる．そのため，フィルタ処理により 50Hz の変動要素は取り除き評価を行った．50Hz のフィルタ処理後の変位に注目すると，切削していない状態ではほとんど変化していない変位が，切削開始後には一刃周期で変動していることが確認できる．さらに詳細に確認するために，一刃周期(533Hz)の変動要素をフィルタ処理により取り除き評価を行った．切削開始後に変位が X 方向のプラス側に 1.6 μm 程度，変化していることが確認できる．これが工具主軸の静的変位と考えられる．

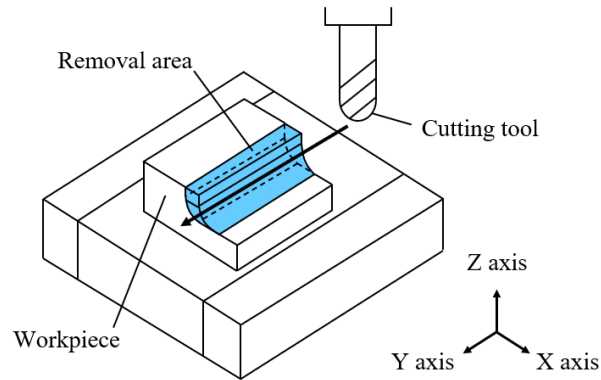


図 3.3 Y 軸の正方向への直線送り加工

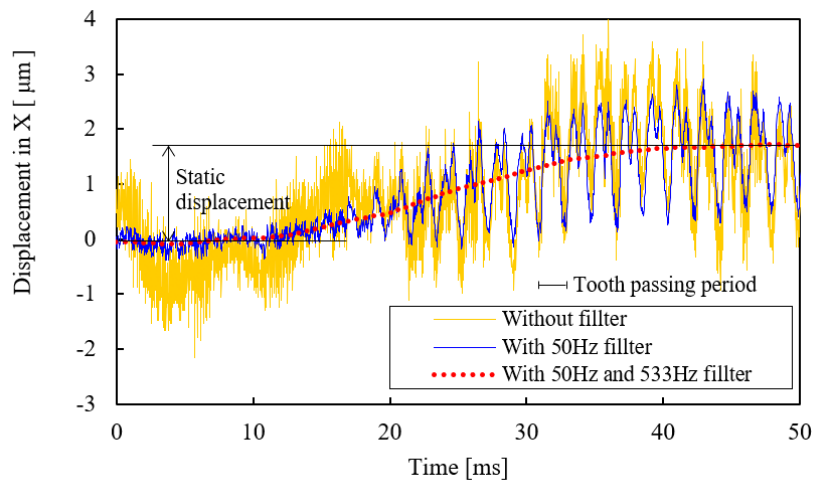


図 3.4 変位センサによる工具主軸の変位 (切削条件 : Rd 0.1mm)

次に、切削条件を変更して加工を実施し評価を行った。その結果を図 3.5 に示す。計測した変位の値に対して、50Hz の変動を取り除くフィルタ処理を行った結果である。切削条件には表 3.1 に示した MC-A(Rd 0.05mm)、MC-B(Rd 0.1mm)、MC-C(Rd 0.15mm)の 3 種類を用いている。全ての切削条件において、切削していない状態では変化していない変位が、切削開始後には一刃周期で変動しており、また、切込み量が多いほどその変動も大きいことが確認できる。さらに、一刃周期(533Hz)のフィルタ処理後の結果に着目すると、変位は X 方向のプラス側に変化していることも見てとれる。切込み量が多いほど変位が大きく変化しており、切込み量が大きくなり切削力が大きくなると、工具主軸の静的変位も大きくなると考えられる。

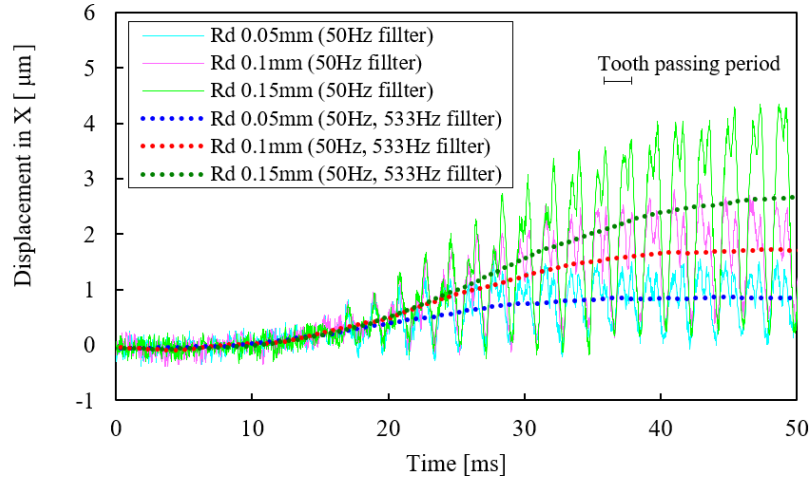


図 3.5 変位センサによる工具主軸の変位 (切削条件 : Rd 0.05mm, 0.1mm, 0.15mm)

続いて，加工方向を変更して切削加工を実施し評価を行った．図 3.6 に示すように，Y 軸の負方向に送り直線的な加工を行っている．切削条件には表 3.1 に示した MC-A(Rd 0.05mm)，MC-B(Rd 0.1mm)，MC-C(Rd 0.15mm)の 3 種類を用いている．変位の計測結果を図 3.7 に示す．計測した変位の値に対して，50Hz の変動を取り除くフィルタ処理を行った結果である．全ての切削条件において，切削していない状態では変化していない変位が，切削開始後には一刃周期で変動しており，また，切込み量が多いほどその変動が大きいことも確認できる．さらに，一刃周期(533Hz)のフィルタ処理後の結果に着目すると，変位は X 方向のマイナス側に変化していることも見てとれる．これは Y 軸の正方向に送り加工を行った場合の加工実験とは反対の結果となっている．切削力を受ける方向が X のプラス方向から X のマイナス方向へと反対に変わると，工具主軸の静的変位の方法も反対に変わると考えられる．

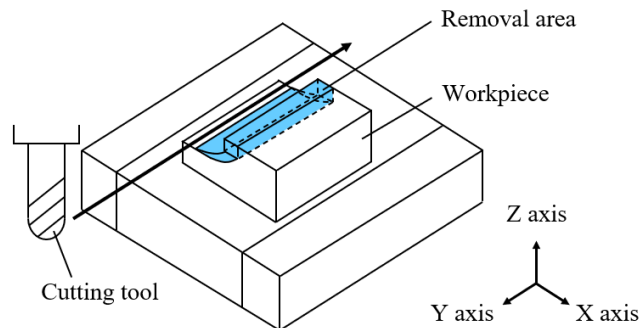


図 3.6 Y 軸の負方向への直線送り加工

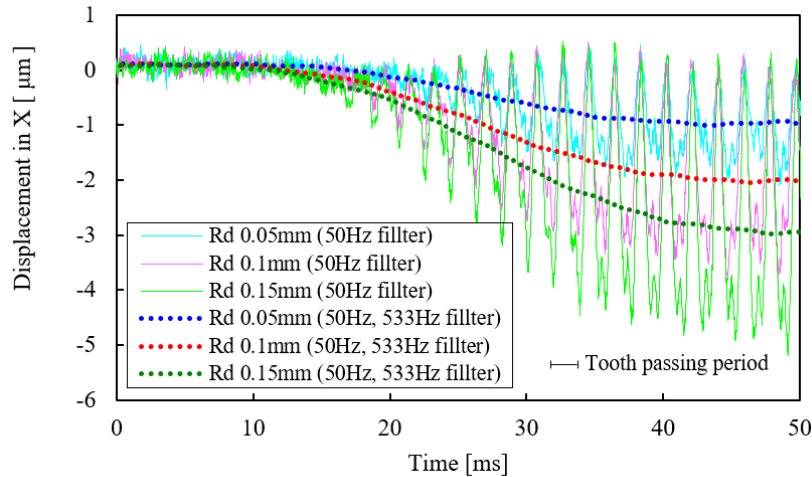


図 3.7 変位センサによる工具主軸の変位 (加工方向 : Y 軸の負方向への加工)

さらに、これまでの評価に使用した渦電流式変位センサと、第 2 章にて使用した加速度センサでの計測について比較を行った。加速度センサには図 3.2 で示した加速度センサ X1 および X2 を利用し、式(2.14)を用いて X 方向の加速度を算出している。ただし、加速度センサにて計測するのは加速度であるため、積分することで速度を求め、さらに速度を積分することで変位を求めている。これにより、変位センサにて計測した変位と、加速度センサにて計測した値を演算することで求めた変位についての比較を行った。その結果を図 3.8 に示す。加工方向としては図 3.3 に示した Y 軸の正方向に送っており、切削条件については表 3.1 に示した MC-B(Rd 0.1mm) の切削条件を用いている。変位センサでの計測結果に着目すると、切削加工が始まった後に工具主軸の静的変位が見てとれる。しかし、加速度センサから求めた変位では、加工開始後にも静的変位が確認できない。この理由は以下のように考えられる。まず、加速度センサの計測にはドリフトによる誤差が含まれている。計測値に対してそのまま積分処理を実施すると値が発散してしまうため、ドリフトを除去する処理が必要とされる。これにより静的変位についても補正され、結果として算出されるのは静的変位の無い変位である。このように、加速度センサから求めた変位では静的変位を把握することは困難であり、静的変位を計測あるいは推定するための方法が必要であると考えられる。

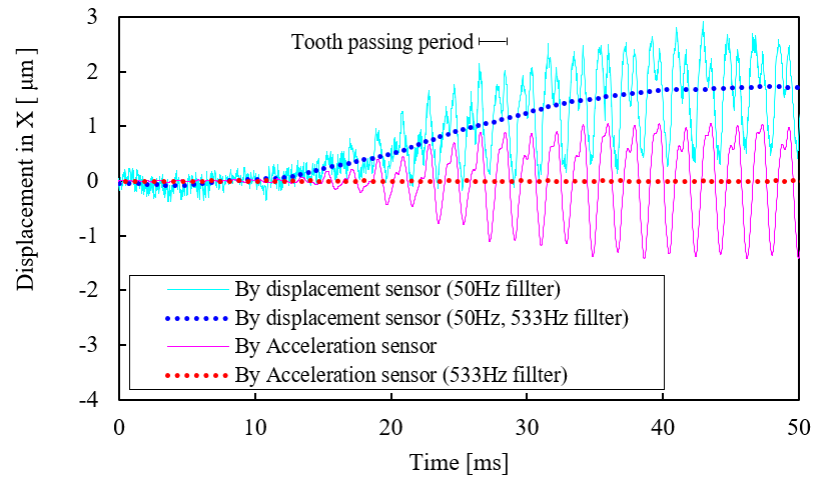


図 3.8 変位センサと加速度センサの計測結果の比較

3.3 静的変位のモニタリングおよび切削力推定の高精度化の提案

3.3.1 提案方法の概要

3.2 節では、切削加工時における工具主軸の静的変位について、変位センサを用いることで計測が可能であることを確認した。しかし、Z 軸上に工具主軸が搭載されており、Z 軸が移動することで工具主軸も移動する機械構造においては、工具主軸を外部から変位センサで計測することは困難である。また、極力センサを増やさずに静的変位を把握できることが望ましい。そこで、本節では変位センサを用いずに静的変位を推定する方法を提案する。

静的変位を推定するその提案方法について、概要を図 3.9 に示す。まず、工作機械のテーブル側に取り付けているモータエンコーダおよびリニアスケールによる計測値を用いて、テーブル変位を算出する。続いて、このテーブル変位に対してインパルスハンマを用いてインパルス応答を取得することで、テーブル構造のモデルパラメータを同定する。実際の切削加工時には、このモデルパラメータと計測したテーブル変位から切削力の推定を行う。最終的には、こうして推定した切削力から工具主軸の静的変位の推定を行い、さらには静的変位の推定結果を用いてより高精度に切削力推定を実施する方法である。この方法を用いるメリットとしては、駆動テーブル側にはリニアスケールが取り付けられていることが多いため、新しい変位センサを追加することなく計測が可能である。ただし、テーブル変位からの切削力の推定は、計測している値が変位であることから応答性の観点により切削力波形を正確に推定することは難しい。しかし、工具主軸の静的変位は一刀周期ごとの切削力がわかればおおよそその推定が可能である。こうして推定した静的変位から最終的には、工具主軸側の加速度センサおよびモデルパラメータにより、切削力推定を高い精度と応答性で実現することを目的としている。

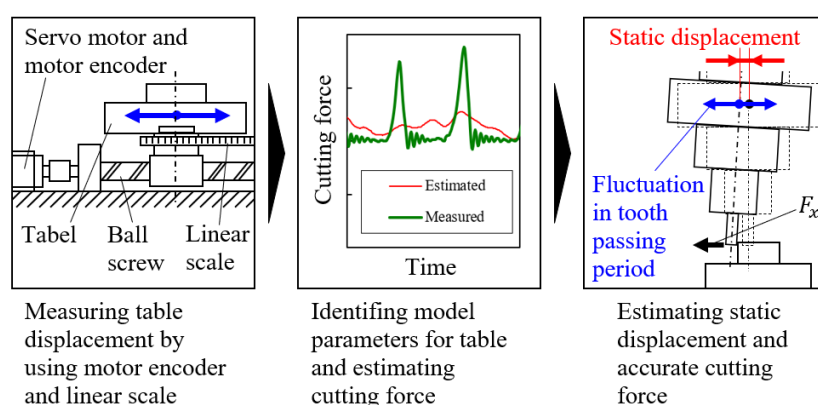


図 3.9 静的変位の推定および切削力推定の高精度化の概要

3.3.2 テーブル変位の計測

最初に、テーブル変位の計測を行う．図 3.10 に工作機械のテーブル構造とそのモデルを示す．図 3.10(a)は，一般的な工作機械のテーブル側の構造である．テーブルを動作させるためのトルク出力をサーボモータが行い，その回転の変位はモータエンコーダにより計測している．モータのシャフトにはボールねじが締結されており，ボールねじが回転することで加工ワークを載せたテーブルが移動する．そして，テーブルの位置はリニアスケールにより計測しているという構成である．制御のためのコントローラやドライブアンプは，モータエンコーダあるいはリニアスケールからのフィードバック値を受けながら指令を払い出し，最終的にはサーボモータのトルク出力によりテーブルが位置決めされる．モータエンコーダは回転系，リニアスケールは直進系の変位計測となるが，モータエンコーダについても直進系に変換してモデル化したのが図 3.10(b)である．ここで，直進系に変換したモータエンコーダの位置を基準とした場合のリニアスケールの位置を「テーブル変位」と定義する．サーボモータのシャフトとテーブル機構をつなぐボールねじ等の剛性が十分であれば，切削力を受けてもこのテーブル変位は変動することなく一定であると考えられる．その時のテーブル変位の値を 0 と定義する．式(3.1)にて示したように，テーブル変位 x_t は直動系に変換したモータエンコーダの変位 x_e とリニアスケールの変位 x_l を計測することで求められる．

$$x_t = x_l - x_e \quad (3.1)$$

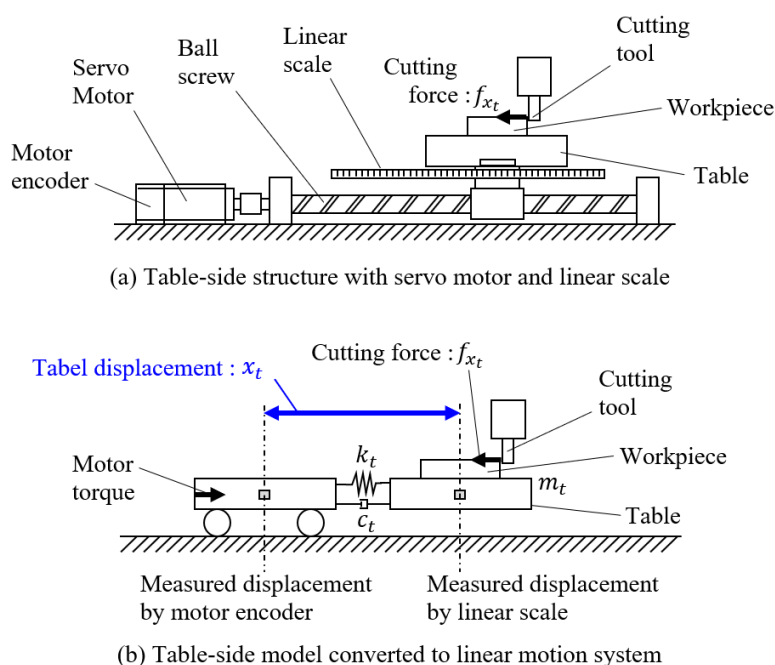


図 3.10 工作機械のテーブル構造とモデル化

3.3.3 モデルパラメータの同定と切削力推定

3.3.2 項にて説明したテーブル変位は、実際には切削力を受けるとボールねじ等の機構がわずかに変形することにより変動する．その運動方程式を式(3.2)に示す．

$$f_{x_t} = m_t \ddot{x}_t + c_t \dot{x}_t + k_t x_t \quad (3.2)$$

ここで、 f_{x_t} はテーブルが受ける切削力、 $\ddot{x}_t$ はテーブルの加速度、 $\dot{x}_t$ はテーブルの速度を表している．また、 m_t 、 c_t 、 k_t はテーブルについてのモデルパラメータであり、それぞれ等価慣性、等価減衰係数、等価剛性係数を表している．第 2 章にて工具主軸側のモデルパラメータを同定した場合と同じ方法を用いて、テーブルのモデルパラメータの同定を行う．具体的には、テーブルに加速度センサを取り付け、インパルスハンマでテーブルを叩くことによりインパルス応答を取得し、 m_t 、 c_t 、 k_t を同定する．

このようにしてモデルパラメータを同定すると、式(3.2)から切削力の推定が可能となる．実際の切削加工時にモータエンコーダ x_e 、リニアスケール x_l の値は計測できるため、式(3.1)を用いてテーブル変位 x_t が得られる．これを微分することでテーブルの速度 $\dot{x}_t$ 、テーブルの加速度 $\ddot{x}_t$ を算出できる．さらに同定したモデルパラメータを用いると、テーブルが受ける切削力 f_{x_t} を推定することが可能である．ここで求めた切削力は、モータエンコーダやリニアスケールにより計測した変位を利用したものである．微分演算により速度や加速度を算出しているが、速度や加速度そのものについては計測していない．そのため、高い応答性での切削力推定が難しく、切削力の正確なピーク値を得ることは困難である．そのため、式(3.3)により切削力推定値の一刃周期の移動平均 $f_{\bar{x}_t}$ を算出して利用する．

$$f_{\bar{x}_t}[n] = \frac{1}{L_c} (|f_{x_t}[n]| + |f_{x_t}[n-1]| + \dots + |f_{x_t}[n-L_c+1]|) \quad (3.3)$$

なお、ここではテーブルが切削力を受けることによりテーブル変位が変動するとして切削力の推定を行っているが、実際にはテーブル変位は切削力以外にも影響を受ける．例えば、テーブルが動作する場合における慣性力や摩擦力である．しかし、現在使用している切削条件における一刃周期は非常に短いため、切削力の変化に比べてこれらの力の変化はゆるやかである．そのため、今回の対象である一刃周期の短い期間においては慣性力や摩擦力の影響は小さいと考えられる．

3.3.4 工具主軸の静的変位の推定

続いて，3.3.3 項にて求めたテーブルが受ける推定切削力の移動平均 $f_{\bar{x}_t}$ を用いて，工具主軸の静的変位を推定する．まず，テーブルが受ける切削力はそのまま工具主軸側が受ける切削力として捉えることができる．ここで，工具主軸側が切削力を受けた場合の運動方程式は第 2 章でも検討したように式(3.4)にて表される．

$$f_x = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (3.4)$$

f_x は工具主軸が受ける切削力であり， m ， c ， k は工具主軸側のモデルパラメータである．また， x ， $\dot{x}$ ， $\ddot{x}$ はそれぞれ工具主軸の変位，速度，加速度を示している．ここで，変位 x について一刃周期で変動する値 x_f と静的変位 x_b に分けて記述すると，式(3.5)にて表すことができる．

$$f_x = m\ddot{x} + c\dot{x} + k(x_f + x_b) \quad (3.5)$$

この時，式(3.5)の両辺に対して一刃周期での移動平均値を算出する．安定して一刃ごとの切削が行われている場合には，加速度 $\ddot{x}$ ，速度 $\dot{x}$ ，変位の変動値 x_f の一刃周期での移動平均値は 0 と推定される．このことから，式(3.6)が得られる．

$$f_{\bar{x}_t} = k x_b \quad (3.6)$$

これより，式(3.6)を用いてテーブルが受ける推定切削力の移動平均 $f_{\bar{x}_t}$ と工具主軸側のモデルパラメータ k から，工具主軸の静的変位 x_b を推定する．こうして求めた工具主軸の静的変位 x_b を用いて，最終的には式(3.5)により工具主軸側のモデルから切削力の推定を行う．具体的には，切削加工中に加速度センサにより計測した加速度 $\ddot{x}$ ，それを積分して算出した速度 $\dot{x}$ および変位の変動値 x_f を用いて，推定切削力の演算を行う．

3.4 実験加工機およびモデルパラメータ

3.4.1 実験加工機

提案方法の評価のために加工実験を実施した．そのための実験加工機を図 3.11 に示す．第 1 章での加工に使用した実験加工機と同じ NC 加工機を利用している．図 3.12 に示すように，ワークテーブルの位置を計測するリニアスケール(HEIDENHAIN 製, LC415)，サーボモータの回転位置を計測するモータエンコーダ付きサーボモータ(Beckhoff 製, AM8023)が取り付けられており，X 方向におけるテーブル変位の計測を行っている．また，工具主軸には圧電式加速度センサ(小野測器製, NP-3211)，テーブルには切削力の参照計測用の切削動力計(KISTLER 製, 9256A1)を取り付けている．PC コントローラ(Beckhoff 製, C6920/TwinCAT)が各軸の制御を行い，全てのセンサからデータ収集を行う．

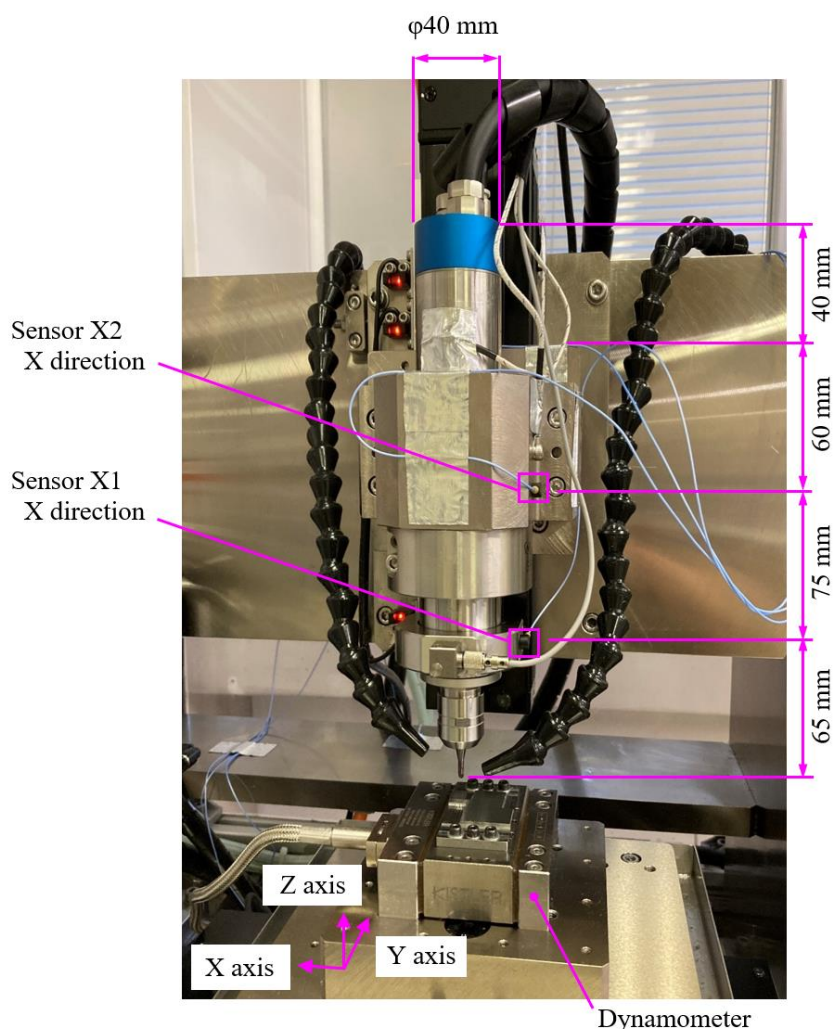


図 3.11 実験加工機およびセンサ取り付け位置

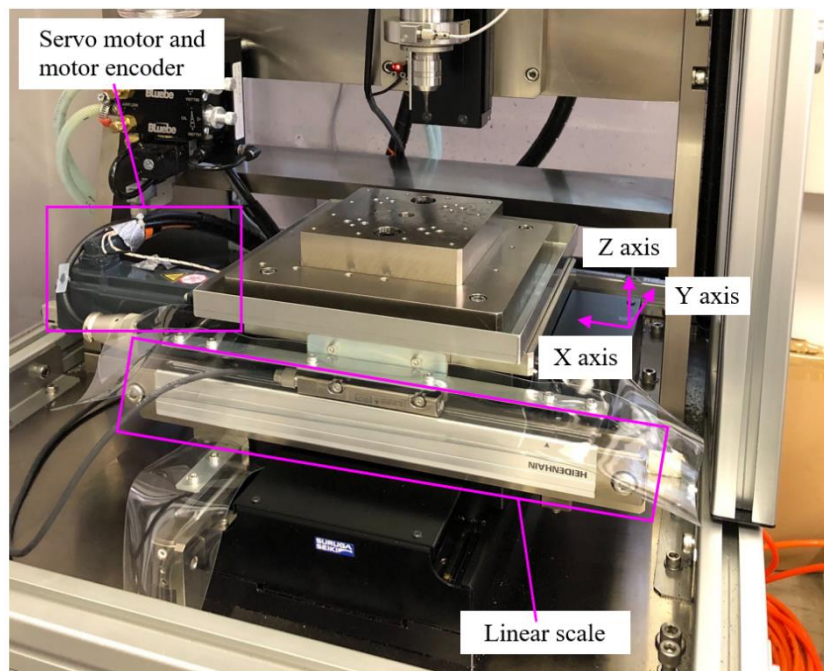


図 3.12 実験加工機に取り付けられているモータエンコーダおよびリニアスケール

評価には，3.2 節の加工実験で利用した切削条件と同じ切削条件を利用した．前述の表 3.1 がその切削条件の一覧である．軸方向の切込み量(Rd)が 0.05mm, 0.1mm, 0.15mm と異なる 3 つの切削条件を利用している．切削工具には第 2 章の実験と同じく半径 1.5mm の 2 枚刃のボールエンドミルを使用した．被削材には被削性の高いプリハードン鋼(大同特殊鋼製，NAK55)を用いた．

3.4.2 テーブルのモデルパラメータ

テーブルのモデルパラメータは，インパルス応答により同定を行った．その様子を図 3.13 に示す．テーブルの X 方向の加速度を計測できるように，テーブルに加速度センサ(小野測器製，NP-3211)を取り付けて計測を行った．インパルスハンマによりテーブルを X 方向に叩き，インパルス応答を取得することによりテーブルの X 方向のモデルパラメータを同定している．同定したパラメータを表 3.2 に示す．

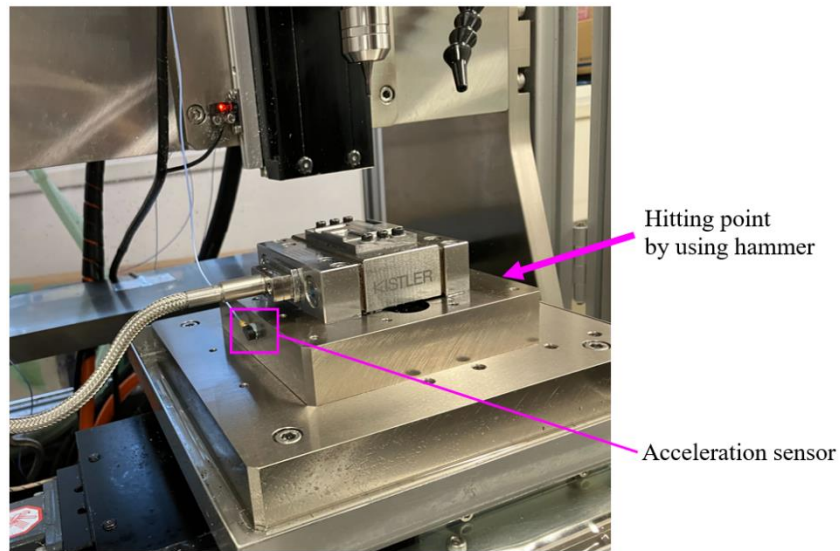


図 3.13 テーブルのモデルパラメータ同定時のハンマリング
およびセンサ取付け位置

表 3.2 テーブルの X 方向のモデルパラメータ

Model parameter	X direction
ω_n [rad/s]	3.14×10^3
ζ	0.06
m [kg]	4.37
c [N/(m/s)]	1.65×10^3
k [N/m]	4.33×10^7

3.5 評価

3.5.1 一定の切削負荷での直線送り加工

最初の評価は、図 3.3 に示した一定の切込み量での直線送り加工にて行った。表 3.1 にて示した切削条件の中で、MC-B(Rd 0.1mm)の切削条件を利用している。この加工において計測した X 方向のテーブル変位、そして、それを微分して算出したテーブル速度とテーブル加速度を図 3.15 に示す。一刃周期ごとにテーブル変位、テーブル速度、テーブル加速度が変動していることが見てとれる。ここで、上段のグラフのテーブル変位に着目すると、一刃周期ごとのテーブル変位の振幅はおおよそ $0.2\ \mu\text{m}$ 程度となっている。図 3.4 にて、渦電流式変位センサにて工具主軸の変位を計測したが、その場合の一刃周期ごとの工具主軸の変位の振幅はおおよそ $2\ \mu\text{m}$ 程度であった。テーブル側と工具主軸側は、反対の方向に同じ大きさの切削力を受けているのだが、それらの変位の振幅は大きく差があり、その理由はテーブル側と工具主軸側でモデルパラメータが異なっているためだと考えられる。表 3.2 にて示したテーブル側のモデルパラメータ k と、表 2.2 にて示した工具主軸側の X 方向のモデルパラメータ k を比較すると、テーブル側の方がおおよそ 2.5 倍ほど大きくなっている。これにより、同じ大きさの力を受けてもテーブル変位の変動が小さいのだと考えられる。

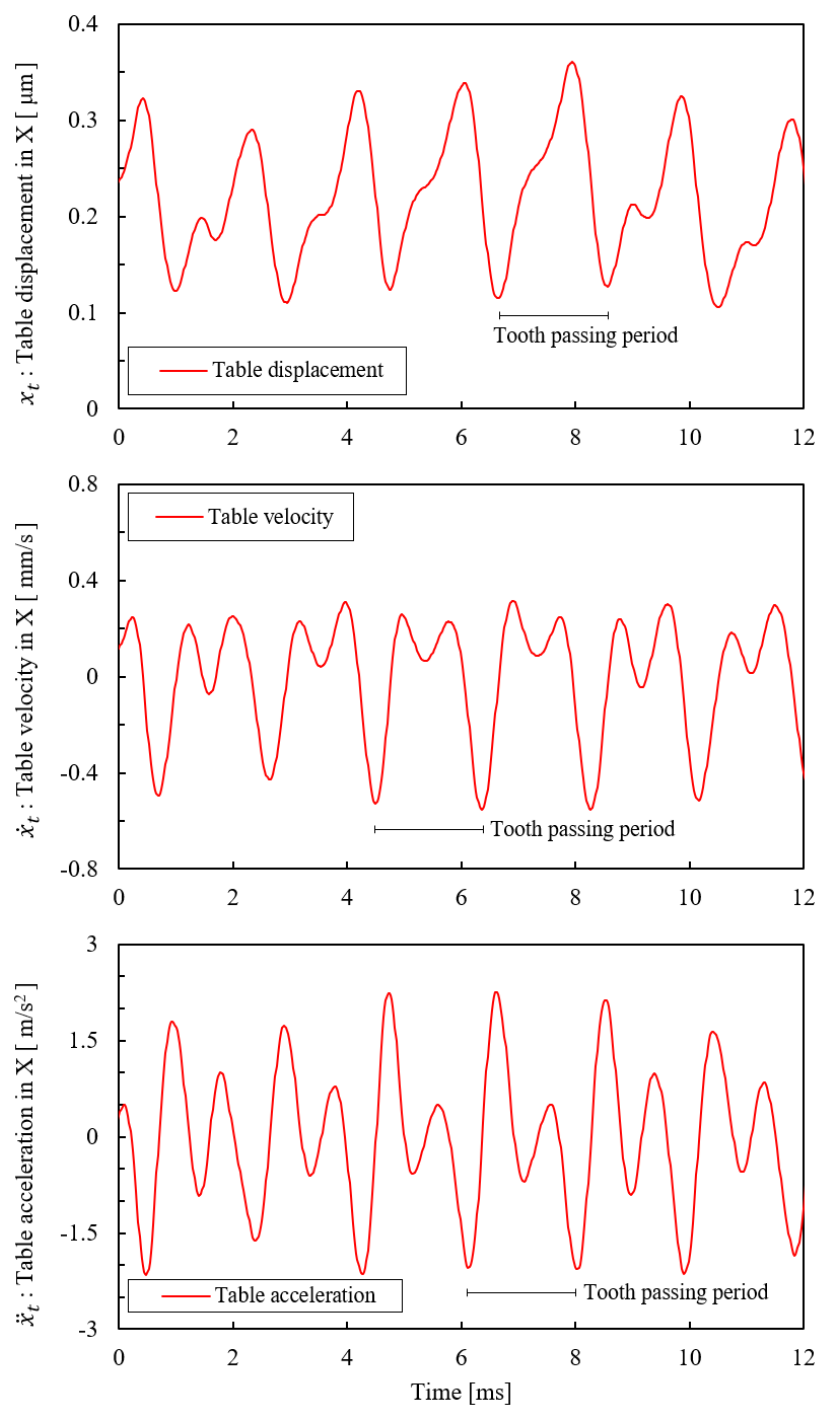


図 3.14 X 方向のテーブル変位, テーブル速度およびテーブル加速度

さらに、この加工における切削力、切削力の移動平均値、静的変位の推定値を図 3.15 に示す。まず、上段のグラフではテーブルが受ける切削力を推定した結果を示している。式(3.2)を用いて、計測したテーブル変位、算出したテーブル速度と加速度および 3.4.2 項で同定したモデルパラメータから演算している。また、比較のために計測切削力も同じグラフに示している。ここから、計測切削力と提案方法の推定切削力とは正確には一致していないことが見てとれる。これは、ここでの推定切削力は計測した変位から求めていることにより高い応答性が得られず、そのため、切削力のピーク値を正確に推定できていないと考えている。そこで、図 3.15 の中段のグラフに着目する。ここには式(3.3)を用いて求めた切削力の移動平均値が示されており、テーブル変位からの推定切削力と計測切削力に対する移動平均値が、おおそ一致していることが見てとれる。このように、高い応答性は得られないが一刃周期などある一定期間での切削力については、テーブル変位から切削力を推定することが可能であることが確認できる。また、式(3.6)を用いて求めた静的変位の推定値を図 3.15 の下段のグラフに示す。今回の切削条件を用いた場合には、静的変位の推定値は $0.4\ \mu\text{m}$ 程度ということが見てとれる。3.2.2 項にて同じ切削条件で実験を行い、渦電流式変位センサを用いて計測した静的変位は $1.6\ \mu\text{m}$ であったため、差があることが確認できる。この理由としては、工具主軸のモデル化に課題があると考えられる。第 2 章で述べたように、現状では工具主軸のモデルは 1 自由度の線形モデルと想定しているが、モデルの自由度の数の検討や非線形モデルを含めた検討が必要な可能性がある。また、工具主軸の力学モデルはインパルス応答を取得してモデルパラメータを同定し、実際の加工における切削力により評価を行っている。これは変化し続ける切削力を工具主軸が受けている状態であり、動的な状態に対するモデル化である。本章で検証している連続的で安定的な力を工具主軸が受けている状態、つまり、静的な力の成分に対しては異なるモデルの想定が必要な可能性がある。こういった影響を考慮し、式(3.6)を改めて検討することが必要と考察している。

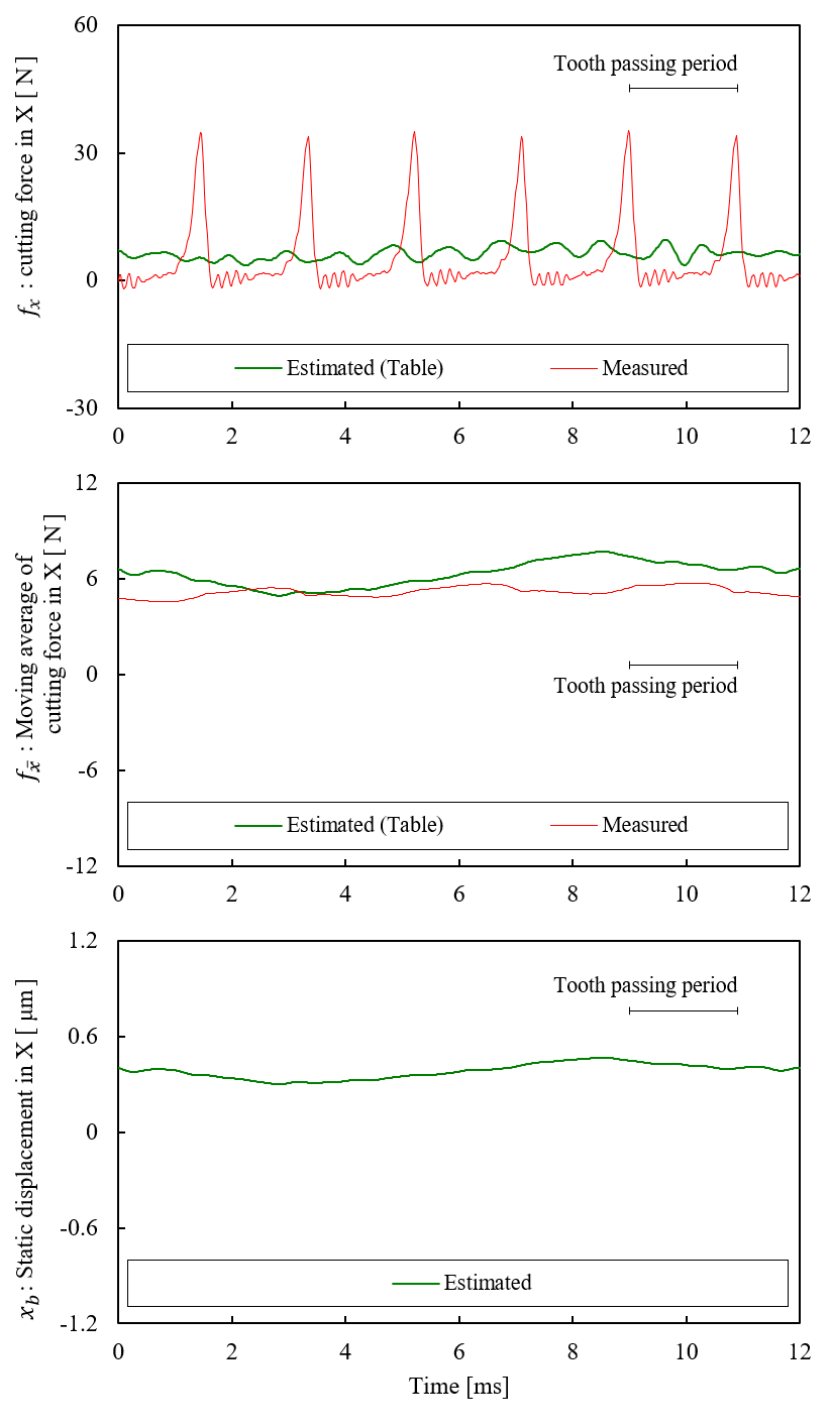


図 3.15 一定の切込み量での加工における切削力，切削力の移動平均値および静的変位の推定値

続いて，工具主軸側のモデルより求めた推定切削力を図 3.16 に示す．静的変位を考慮して補正した推定切削力，計測切削力，および静的変位による補正をしていない推定切削力の比較を示している．静的変位による補正をしていない推定切削力は全体的に値が小さく，計測切削力との間に差が見られる．これに対して，静的変位を考慮して補正した推定切削力は比較的計測切削力に近くなっており，高精度化の傾向が見てとれる．しかし，完全には計測切削力と一致していない．これは，静的変位の推定値が変位センサにより計測した実際の値と一致していないことが理由と考えている．静的変位の推定値が大きいと，推定切削力は全体的に X のプラス方向にオフセットされるため，切削力のピーク値付近ではより正確な切削力の推定が可能と想定される．しかし，その一方で推定切削力が X のプラス方向にオフセットされると，刃先がワークと離れて切削力がおおよそ 0 となるはずの期間においても，切削力を受けていると推定されてしまうと見込まれる．ここから，現状の工具主軸のモデル化にはまだ課題があり，より正確な切削力推定のためにはモデル化の更なる検討が必要であると考えられる．

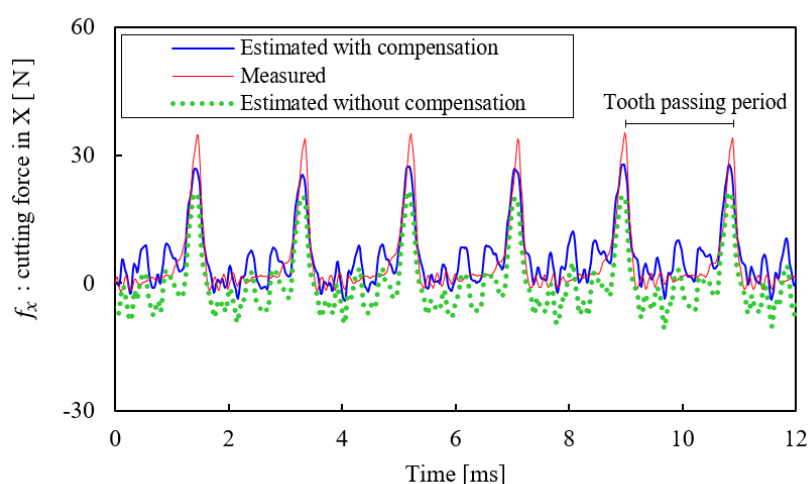


図 3.16 一定の切込み量での加工における推定切削力と計測切削力の比較

3.5.2 切削負荷を変化させた加工

次に、切込み量を変化させることにより、切削負荷を変化させて評価を行った。切削加工の経路については、図 3.3 に示す直線送り加工を用いている。切削条件は表 3.1 に示した切削条件を用いており、MC-A(Rd 0.05mm)、MC-B(Rd 0.1mm)、MC-C(Rd 0.15mm)と切込み量を 3 種類に変化させて実験を行っている。これらの 3 つの加工における計測切削力、テーブル変位からの推定切削力、切削力の移動平均値、静的変位の推定値を図 3.17 に示す。まず、一番上の計測切削力に着目する。切込み量が大きくなると、計測切削力が大きくなっていることが見てとれる。続いて、上から二番目のテーブル変位からの推定切削力に着目すると、こちらも切込み量が大きくなると、推定切削力が大きくなっているのが見てとれる。しかし、計測切削力とは波形が異なっており、正確な切削力の波形の推定は難しいことも確認できる。次に、上から三番目の切削力の移動平均値に着目すると、それぞれの切込み量において、テーブル変位からの推定切削力と計測切削力の移動平均値が概ね一致していることが見てとれる。最後に、一番下の静的変位の推定値に着目すると、切込み量が大きくなると静的変位の推定値が大きくなっていることが確認できる。ここで、改めて上から二番目のテーブル変位からの推定切削力に着目する。3 種類の切込み量の全ての実験において、約 1ms 周期での変動が見てとれる。加工時の一刃周期である約 1.88ms とは異なる周期での変動である。第 2 章にて述べた工具主軸側のモデルから推定した切削力には、この約 1ms 周期の変動は確認できない。そのため、この理由はテーブル側の固有振動数のためであり、この変動の影響がテーブル変位からの正確な切削力推定を阻害している可能性があると考えしている。

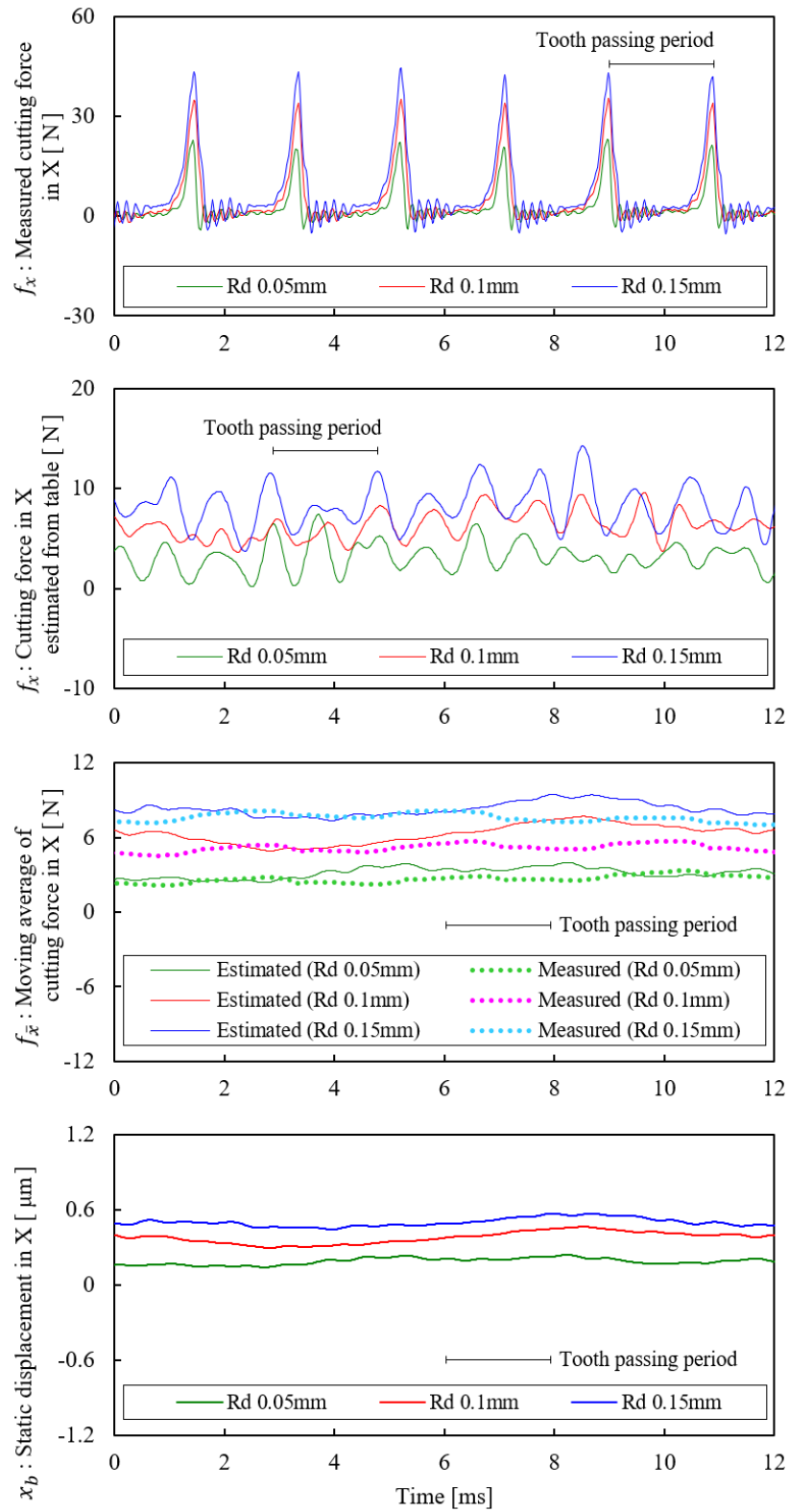


図 3.17 切込み量を変化させた場合の計測切削力, 推定切削力, 切削力の移動平均値, および静的変位の推定値

さらに，工具主軸側のモデルより求めた推定切削力を図 3.18 に示す．切込み量を 0.05mm, 0.1mm, 0.15mm と変化させた場合において，それぞれの推定切削力と計測切削力の比較を表しており，全ての切込み量において同様の傾向が見られる．まず，静的変位による補正をしていない推定切削力は全体的に値が小さく，計測切削力との間に差が見られる．これに対して，静的変位を考慮して補正した推定切削力は比較的計測切削力に近くなっており，高精度化の傾向が見てとれる．しかし，完全には計測切削力と一致していない．これは，静的変位の推定値が変位センサにより計測した実際の値と一致していないことが理由と考えている．ここで，3 種類の切込み量での実験における違いに着目する．最も小さい切込み量である Rd 0.05mm の時には特に，静的変位を考慮して補正した推定切削力と計測切削力との差が最も小さくなっている．これは，切込み量が小さい時には切削力も小さくなり，その場合には静的変位の値もかなり低減されている可能性があると考えしている．

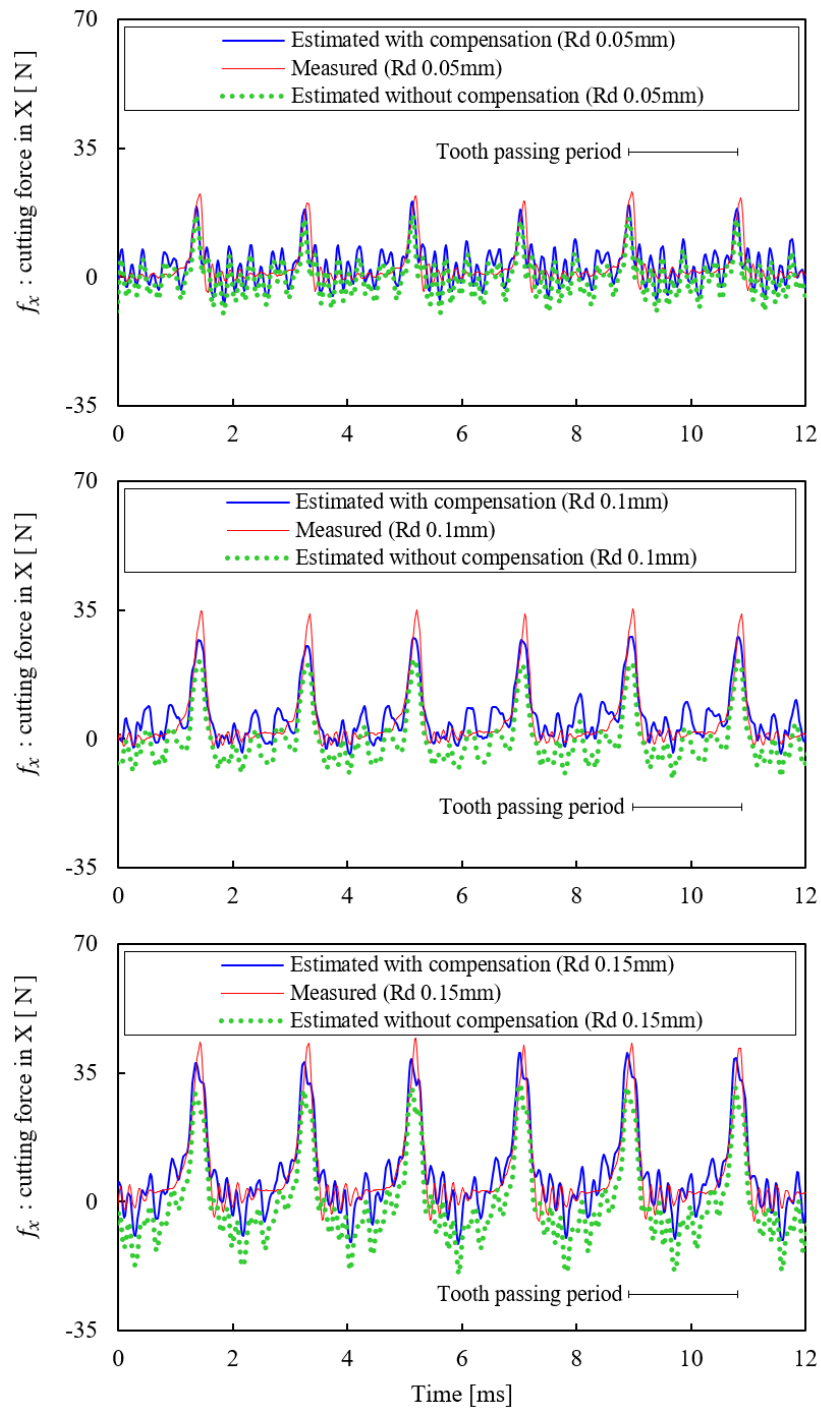


図 3.18 切込み量を変化させた場合の推定切削力と計測切削力の比較

3.5.3 加工方向を変化させた切削加工

続いて、加工方向を変化させた切削加工において提案方法の評価を行った。図 3.19 に示したように、八角形の形状に対して加工方向を八方向に変化させて切削加工を実施した。切削条件には表 3.1 に示した MC-B(Rd 0.1mm)を利用している。

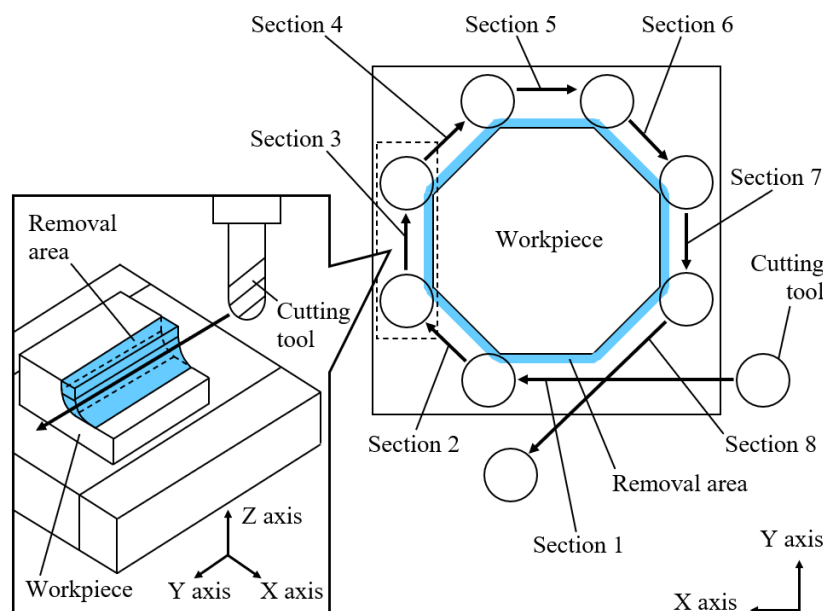


図 3.19 加工方向を八方向に変化させた切削加工

ここでは八方向の加工の中から、4つの加工方向を抽出して詳細を説明する。Section 1 は X 軸を正方向に送り加工しており、工具主軸は X のプラス方向に比較的小さな切削力を受ける。Section 2 は X 軸を正方向および Y 軸を正方向に送り加工しており、工具主軸は X のプラス方向に比較的大きな切削力を受ける。Section 5 は X 軸を負方向に送り加工しており、工具主軸は X のマイナス方向に比較的小さな切削力を受ける。Section 6 は X 軸を負方向および Y 軸を負方向に送り加工しており、工具主軸は X のマイナス方向に比較的大きな切削力を受ける。

上記の加工方向への切削加工に対して、計測切削力、テーブル変位からの推定切削力、静的変位の推定値を図 3.20 に示す。まず、上段の計測切削力に着目する。加工方向が変化することにより、計測切削力の正負およびその大きさが変化しているのが見てとれる。続いて、中段のテーブル変位からの推定切削力に着目すると、こちらも加工方向が変化することにより、計測切削力の正負およびその大きさが変化しているのが見てとれる。しかし、計測切削力とは波形が異なっており、正確な切削力の推定が難しいことも確認できる。次に、下段の静的変位の推定値に着目すると、加工方向が変化することにより、静的変位の推定値の方向および大きさが変化していることが確認できる。この変化は計測切削力から想定される傾向と一致していることが確認できる。ここで、Section 5 および Section 6 における静的変位の推定

値に着目する．両方の結果において約 5ms 周期での変動が見られ，特に切削力の大きい **Section 6** においてその変動が大きいことが確認できる．この約 5ms 周期での変動は工具主軸側には見られないため，テーブル側の固有振動等が理由であると考えられる．**Section 5** および **Section 6** は工具を X の負方向に送り加工しており，つまり，実際にはテーブルを X の正方向に動かして加工をしている．一方で，テーブルを反対方向に動かしている **Section 1** および **Section 2** においてはこの約 5ms 周期の変動は見られない．そのため，テーブルを X の正方向に動かす場合におけるテーブル機構を理由とした変動の発生であると考察している．

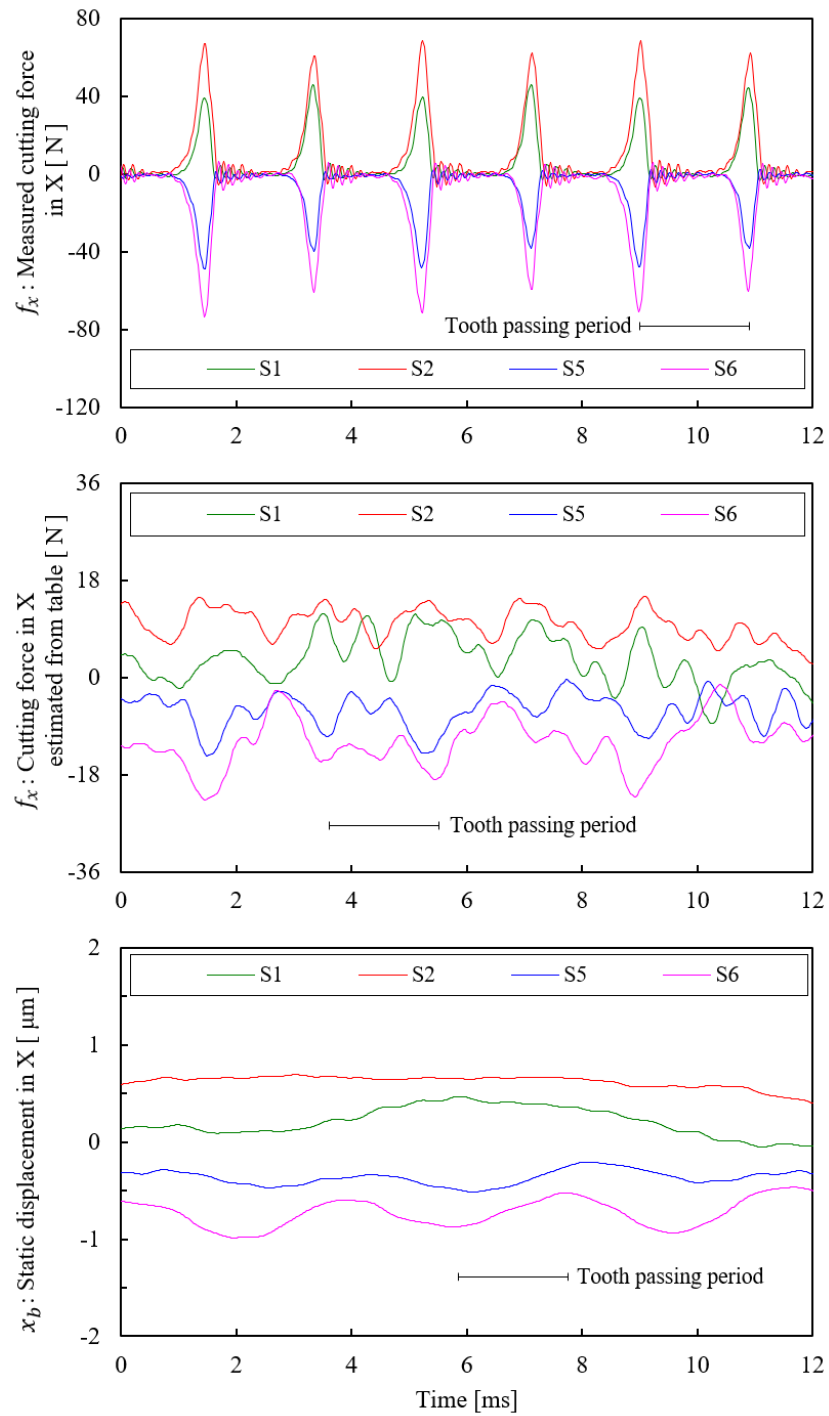


図 3.20 加工方向を変化させた切削加工における計測切削力，推定切削力，および静的変位の推定値

さらに、工具主軸側のモデルより求めた推定切削力を図 3.21 に示す。加工方向を Section 1, Section 2, Section 5, Section 6 と変化させた場合において、それぞれの推定切削力と計測切削力の比較を表している。全ての加工方向において同様の傾向が見られる。まず、静的変位による補正をしていない推定切削力は全体的に値が小さく、計測切削力との間に差が確認できる。この傾向は全ての加工方向において同様に見られる。これに対して、静的変位を考慮して補正した推定切削力は計測切削力に比較的近くなっており、高精度化の傾向が見てとれる。しかし、完全には計測切削力と一致しておらず、この傾向も全ての加工方向において同様である。これは、静的変位の推定値が変位センサにより計測した実際の値と一致していないことが理由と考えている。ここで、Section 1 と Section 5 における推定切削力に着目する。Section 1 と Section 5 は八角形の形状の反対側に位置しており、同じ大きさの切削力を Section 1 は X のプラス方向へ、Section 5 は X のマイナス方向へと反対向きに受けている。この時、Section 1 における静的変位は X のプラス方向であり、そのため推定切削力は X のプラス方向に補正されて計測切削力に近づいている。一方で、Section 5 における静的変位は X のマイナス方向であり、そのため推定切削力は X のマイナス方向に補正されて計測切削力に近づいている。この傾向は Section 2 と Section 6 においても傾向は同じである。このように、静的変位による推定切削力の補正は、切削力の正負による適切な方向への補正となっていると考察している。

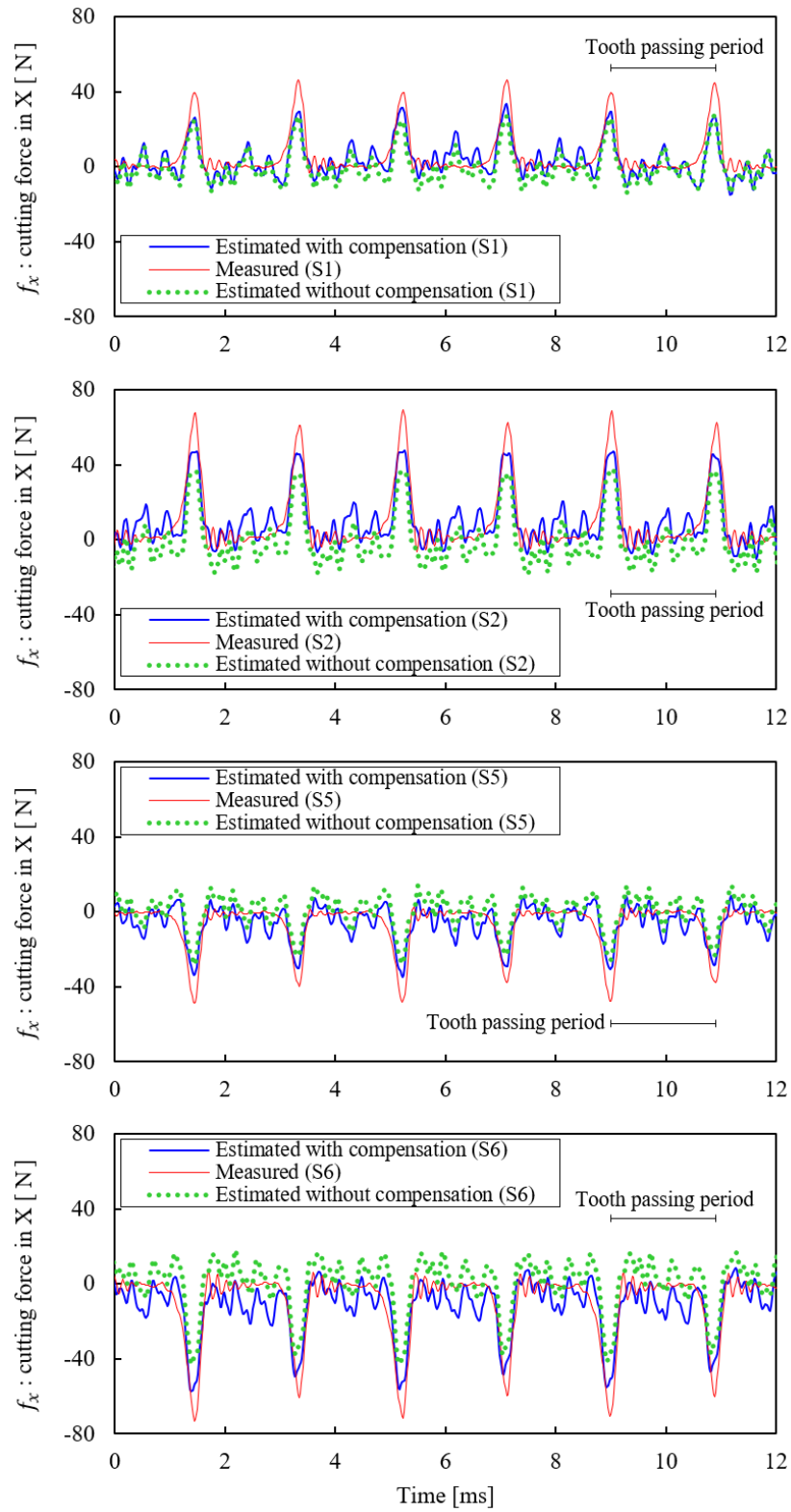


図 3.21 加工方向を変化させた切削加工における計測切削力と推定切削力の比較

3.6 結言

本章では、工具主軸の静的変位のモニタリングについて述べた。まず、切削加工時における工具主軸を外部から変位センサにより計測することで、工具主軸の静的変位が切削加工中に存在することを確認した。続いて、この静的変位について変位センサを追加することなく推定する方法について提案を行った。具体的には、モータエンコーダとリニアスケールの相対変位をテーブル変位と定義し、ここから推定切削力を算出し、静的変位の推定値を求める。そして、静的変位の推定値を利用することで工具主軸側のモデルからより正確な切削力を推定する方法である。この提案方法に対して、一定の切込み量での直線送り加工、切込み量を変化させた加工、加工方向を変化させた切削加工において、評価を行った。その結果、推定切削力について高精度化の傾向が見られることが確認できた。

また、第 2 章では工具主軸の加速度センサの信号から切削力および振動をモニタリングする方法を提案したが、これに対して本章の内容はリニアスケールおよびモータエンコーダという別のセンサの信号を用いて、切削力のモニタリングの高度化を行うというものである。適切な状態モニタリングを実現するためには、工作機械の最適な箇所に最適なセンサを取り付けて計測を行うことが本来は望ましい。しかし、実際には工作機械の構造によりセンサを取り付けたい箇所に取り付けられなかったり、モニタリングしたい内容を安定的に計測できるセンサが無かったりなど制約があることも多い。本章では、センサを用いて実現している切削加工の状態モニタリングに対して、別のセンサを加えて活用することにより、状態モニタリングの高度化を実現することができることを示した。これは、さらにセンサを増やして組み合わせることで更なるモニタリングの精度向上を見込むことができ、今後の展開を示唆する有用な成果であると考えられる。

一方で、現状としては影響を考慮できていない要素も存在しており、考えられる内容を以下に挙げる。

- ボールねじの構造を考えると、ボールねじのナットの位置によりテーブルのモデル特性が動的に変わるため、これを考慮する必要がある。
- 切削加工の送り方向によって、テーブルが動作している場合と停止している場合があり、これにより摩擦力の状況が異なるため、その影響を考慮する必要がある。
- テーブルの動作方向によって、ボールねじの構造の変形や内部油膜の状況が異なりモデル特性が変わるため、これを考慮する必要がある。

これらの要素については影響を検討し、モデル等への反映を検討する必要があると考えられる。

第 4 章 機械学習を用いたモデルパラメータ同定による切削力推定法

4.1 緒言

これまでモデルパラメータを用いた切削力推定およびテーブル変位計測による切削方向の推定について述べてきた。これらの提案方法を適用するのに必要となるのが機械構造のモデリングであるが、それにはインパルスハンマを用いてインパルス応答を取得する方法が一般的である。しかし、この方法では複雑な機械構造を正確にモデル化することは困難であることが多い。他の方法として、構造解析によるモデリングが考えられ、これは複雑な構造にも適用できることである。しかし、そのためには設計データから正確なモデルを作成し、全ての要素間の締結情報といった正確な制約条件をモデルに組み込む必要があり実現は容易ではない。また、構造が高精度で複雑であればあるほど、計算コストも高くなる。そこで本章では、モデルパラメータの同定のために機械学習を用いたシンプルな方法を提案する。機械学習や深層学習は近年、工作機械や切削加工に関する研究に広く取り入れられている新しい技術である。今回提案する方法は、機械学習に基づいて機械構造のモデルパラメータを同定することで、切削力を推定する。ここで、パラメータとは力学的特性を表すモデルパラメータを指している。これは、機械構造が力を受けることにより変形するという特性を表しているものである。これらのパラメータを同定することで、計測した変位などから切削力を算出することが可能となる。提案方法の特徴は、実際の加工実験で計測したデータを用いるため、特別な装置や膨大なシミュレーションデータを必要としないことである。この方法を用いて本章では X, Y, Z 方向の切削力をインプロセスで推定し、モニタリングに活用することを提案する。

4.2 切削力推定法

4.2.1 提案方法の概要

本章で提案する方法の概要を図 4.1 に示す．最初に，モニタリングの対象とする工作機械の振動モデルを検討する．この振動モデルは加速度センサを取り付ける位置に基づいて選定を行う．次に，実際に使用する切削条件と切削工具を用いて加工実験を行い，加速度センサと切削力動力計からデータを取得する．こうして計測した加速度と，それを積分して算出した速度および変位，さらに計測した切削力から機械学習に基づいてモデルパラメータを同定する．最後に，実際の加工中に計測した加速度と算出した速度および変位から，モデルパラメータを用いて切削力を推定し，インプロセスでの状態モニタリングを実現する．

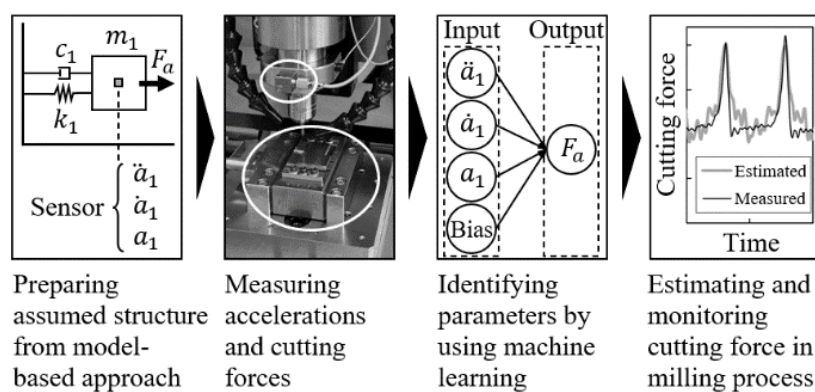


図 4.1 機械学習によりモデルパラメータを同定する方法の概要

4.2.2 振動モデル

ここではモデルベースアプローチに基づき定義した振動モデルについて説明する．図 4.2 に最もシンプルな 1 自由度の振動モデルを示す．このモデルは工具先端に切削力 F_a を与えた場合に，Sensor 1 が取り付けられている位置の加速度，速度，変位がどのように変化するかということに着目したものである．Sensor 1 は加速度センサであるため， $\ddot{a}_1$ は計測された加速度である．その加速度を積分することで，速度 $\dot{a}_1$ および変位 a_1 が算出できる．センサでの計測方向と切削力 F_a の方向が逆になる可能性があるため，極性 δ_1 を定義する． δ_1 の値は 1 または -1 となる．以上より運動方程式を表すと式(4.1)となる．

$$F_a = \delta_1 (m_1 \ddot{a}_1 + c_1 \dot{a}_1 + k_1 a_1) \quad (4.1)$$

ここで， m_1 は等価慣性， c_1 は等価減衰係数， k_1 は等価剛性係数を表し，これらはセンサ 1 が取り付けられている位置におけるモデルパラメータとなる．これらのパラメータを同定することで，式(4.1)を用いて 1 自由度の振動モデルにおける切削力を推定することができる．

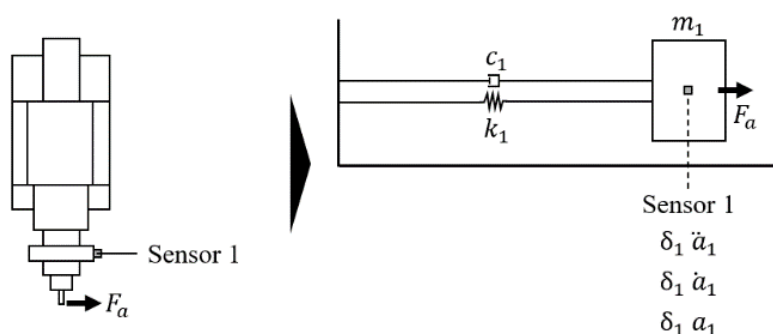


図 4.2 1 自由度の振動モデル

次は 2 自由度の振動モデルであり，それを図 4.3 に示す．工具先端に切削力が与えられた場合に変位する位置に **Sensor 1** を取り付ける．これは，1 自由度の振動モデルと同じである．しかし，工具主軸側の構造が複雑である場合には 1 つのセンサではその状態を表現することは難しい．そこで，別の位置に取り付けた **Sensor 2** も利用する．**Sensor 2** は加速度センサであるが，実際には計測した加速度を積分して算出した速度 $\dot{a}_2$ と変位 a_2 を使用する．極性 δ_2 はセンサの計測値と切削力との間の相対方向により定義する．以上より運動方程式を表すと式(4.2)となる．

$$\begin{aligned}
 F_a &= m_1 \delta_1 \ddot{a}_1 + c_1 \delta_1 \dot{a}_1 + k_1 \delta_1 a_1 + c_2 (\delta_1 \dot{a}_1 - \delta_2 \dot{a}_2) + k_2 (\delta_1 a_1 - \delta_2 a_2) \\
 &= \delta_1 \{ m_1 \ddot{a}_1 + (c_1 + c_2) \dot{a}_1 + (k_1 + k_2) a_1 \} - \delta_2 (c_2 \dot{a}_2 + k_2 a_2)
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

ここで， c_2 は等価減衰係数， k_2 は等価剛性係数を表しており，**Sensor 1** と **Sensor 2** が取り付けられている位置の相対運動についてのモデルパラメータである．この時， F_a の推定には等価慣性 m_2 ，等価減衰係数 c_{2b} ，等価剛性係数 k_{2b} は不要であることが確認できる．これらは m_1 に直接接続されていないため， m_1 の運動方程式に含まれないことが理由である．これらの必要なパラメータを同定することで，2 自由度の振動モデルの切削力を式(4.2)から推定することができる．

効果的に 2 自由度の振動モデルを活用するためには，**Sensor 1** と **Sensor 2** にどの位置に取り付けるかが重要となる．**Sensor 1** は工具先端に切削力 F_a が与えられた場合に，最も直接的に変位する位置に取り付けるのが適している．一方で **Sensor 2** は，**Sensor 1** が取り付けられている位置に対して，その変位が影響する位置に取り付けるのが適している．つまり，センサ間の伝達関数を考慮して取り付け位置を定めることが望ましい．例えば，**Sensor 1** が取り付けられている位置の根元にあたる節に，**Sensor 2** を取り付けることができるとよい．ただし，この場合の **Sensor 2** の位置は，正確に節と一致している必要はない．節の位置の近くに **Sensor 2** を取り付ければ，その計測値から節の位置の変位の傾向を捉えられることが理由である．

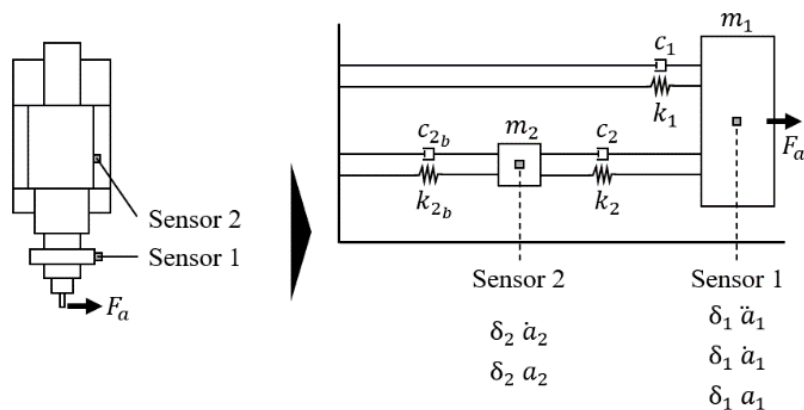


図 4.3 2 自由度の振動モデル

最後に、 n 自由度の振動モデルを図 4.4 に示す．工具先端に切削力が与えられた場合に変位する位置に **Sensor 1** を取り付ける．これは、これまでの振動モデルと同じである．これに加えて、複数のセンサにより工具主軸側の複雑な構造を表現する．**Sensor n** は加速度センサであり、計測した加速度を積分することで速度 $\dot{a}_n$ と変位 a_n が算出される．極性 δ_n はセンサによる計測値と切削力の相対的な方向により定義される．以上より運動方程式を表すと式(4.3)となる．

$$\begin{aligned}
 F_a &= m_1 \delta_1 \ddot{a}_1 + c_1 \delta_1 \dot{a}_1 + k_1 \delta_1 a_1 + c_2 (\delta_1 \dot{a}_1 - \delta_2 \dot{a}_2) + k_2 (\delta_1 a_1 - \delta_2 a_2) + \cdots \\
 &\quad + k_n (\delta_1 a_1 - \delta_n a_n) \\
 &= \delta_1 \{ m_1 \ddot{a}_1 + (c_1 + c_2 + \cdots + c_n) \dot{a}_1 + (k_1 + k_2 + \cdots + k_n) a_1 \} - \delta_2 (c_2 \dot{a}_2 + k_2 a_2) - \cdots \\
 &\quad - \delta_n (c_n \dot{a}_n + k_n a_n)
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

ここで、モデルパラメータ c_n は等価減衰係数、 k_n は等価剛性係数を表している．一方で等価慣性 m_n 、等価減衰係数 c_{nb} 、等価剛性係数 k_{nb} は、この場合においては F_a の推定には必要がない．これらの必要なパラメータを同定することで、式(4.3)から n 自由度の振動モデルにおける切削力を推定することができる．なお、次数 n は対象となる装置の構造に振動の節がいくつ存在するかによって予想することができる．

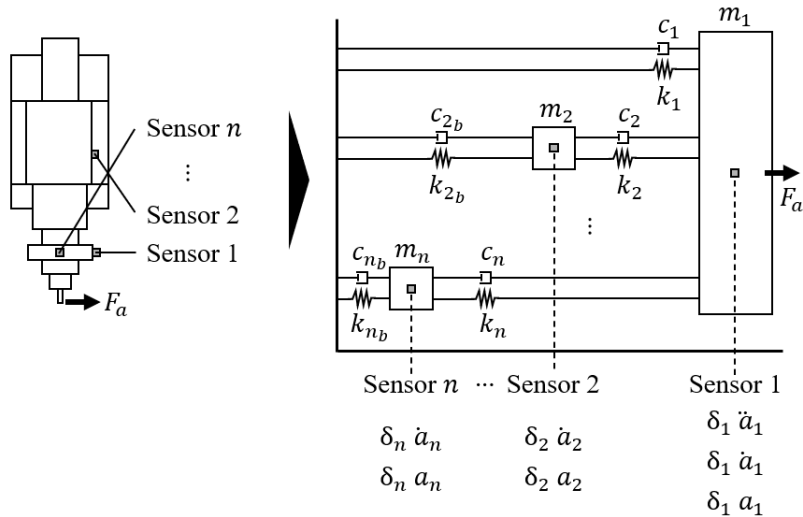


図 4.4 n 自由度の振動モデル

以上の振動モデルに基づき，工作機械の工具主軸側に加速度センサの取り付けを行う．また，切削力を計測するための切削動力計をテーブルに取り付ける．そして，実際の加工に使用する切削条件で実験を行い，センサデータを取得する．ただし，ここで提案している振動モデルは理想的なものであり，実際には制約があることに注意が必要である．例えば，摩擦力のように非線形となるものは扱うことができない．また，工具主軸側を制御上旋回させて動作する工作機械においては，その傾きによって力学モデルが変化する可能性があるため，適用が困難である．さらに，ワークテーブル側の剛性が工具主軸側に比べて相対的に低い場合には，提案手法をワークテーブル側にも拡張する必要があると考えられる．

4.2.3 モデルパラメータ同定のための機械学習

次に、計測結果に基づき機械学習(ML)を利用してモデルパラメータの同定を行う。実際の切削加工においては様々な加工パターンが存在するため、膨大な量のデータが収集され、また、それらは高いサンプリングレートで計測される。このような膨大なデータを用いた最適化計算には機械学習が適している。本研究では様々な機械学習の手法の中から、多層パーセプトロン(MLP)を利用する。MLP は入力と出力の間に複数の中間層を定義し、学習により多数の遷移パラメータ(重み)の特定を行う手法である。通常ならば多くの中間層を定義して利用するため、一般には深層学習と呼ばれることもある。しかし、本研究では多くの中間層は必要なく、入力層と出力層が 1 セットの遷移パラメータで直接接続される構造となる。したがって、本研究ではこれを深層学習ではなく機械学習と呼ぶ。

ここで注意すべきこととして、機械学習を用いて適切なモデルパラメータを同定する際には、一般的には線形回帰を用いることが多いということである。特に今回のように力学モデルを採用している場合には対象が線形モデルと想定されるため、線形回帰を利用することは適切である。しかし、本研究では MLP を利用する。これはパラメータの同定については、線形回帰と同様に適切な同定が可能であり、また、将来的に中間層を追加することでさらなる拡張を容易とするためである。

n 自由度の振動モデルを MLP の手法に沿って構成したのが図 4.5 である。入力層には加速度、速度、変位を定義し、出力層には切削力を定義する。ここで、 b は偏差を表しておりパラメータの一つである。学習により入力層から出力層への遷移パラメータに対して適切な値を同定する。式(4.4)は図 4.5 の行列式である。このように機械学習により同定したモデルパラメータ、つまり遷移パラメータを用いて切削力を推定する。

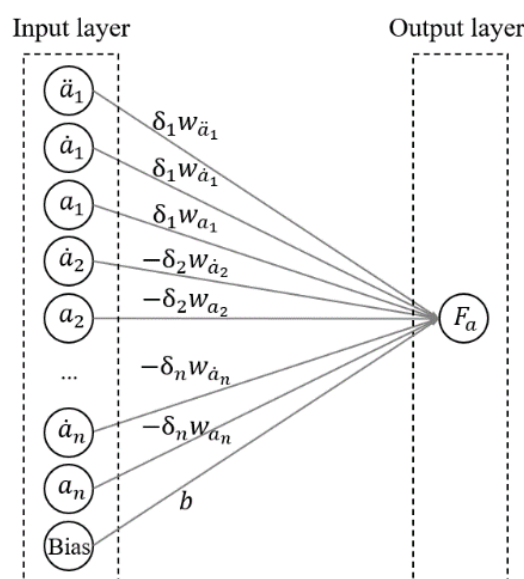


図 4.5 n 自由度の振動モデルにおける機械学習の構成図

$$F_a = [\ddot{a}_1 \quad \dot{a}_1 \quad a_1 \quad \dot{a}_2 \quad a_2 \quad \dots \quad \dot{a}_n \quad a_n \quad 1] \begin{bmatrix} \delta_1 w_{\ddot{a}_1} \\ \delta_1 w_{\dot{a}_1} \\ \delta_1 w_{a_1} \\ -\delta_2 w_{\dot{a}_2} \\ -\delta_2 w_{a_2} \\ \dots \\ -\delta_n w_{\dot{a}_n} \\ -\delta_n w_{a_n} \\ b \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

ここで,

$$\begin{aligned} w_{\ddot{a}_1} &= m_1, & w_{\dot{a}_1} &= c_1 + c_2 + \dots + c_n, \\ w_{a_1} &= k_1 + k_2 + \dots + k_n, & w_{\dot{a}_2} &= c_2, \\ w_{a_2} &= k_2, & \dots, & w_{\dot{a}_n} = c_n, & w_{a_n} &= k_n \end{aligned}$$

機械学習において、学習のプロセスは重要である．実際に発生し得る数多くのケースについて、膨大なデータに基づいて繰り返し学習する必要があるため、学習のための演算には相当の時間を要する．しかし、学習が終わりパラメータを同定することができれば、入力値に基づき出力値を推論するための計算は簡単である．したがって、本研究の提案方法は切削加工の状態をインプロセスでモニタリングするには適していると考えている．

4.3 実験加工機および学習データ

4.3.1 実験加工機

提案手法を評価するために、加工実験を実施した。そのための実験加工機を図 4.6 に示す。第 2 章および第 3 章にて使用した実験加工機と同じ NC 加工機を利用している。工具主軸側には圧電式加速度センサ(小野測器製, NP-3211 および RION 製, PV-97)を取り付け、ワークテーブルには切削動力計(KISTLER 製, 9256A1)を設置した。PC コントローラ(Beckhoff 製, C6920/TwinCAT)が駆動軸を制御し、全てのセンサからデータ収集を行う。

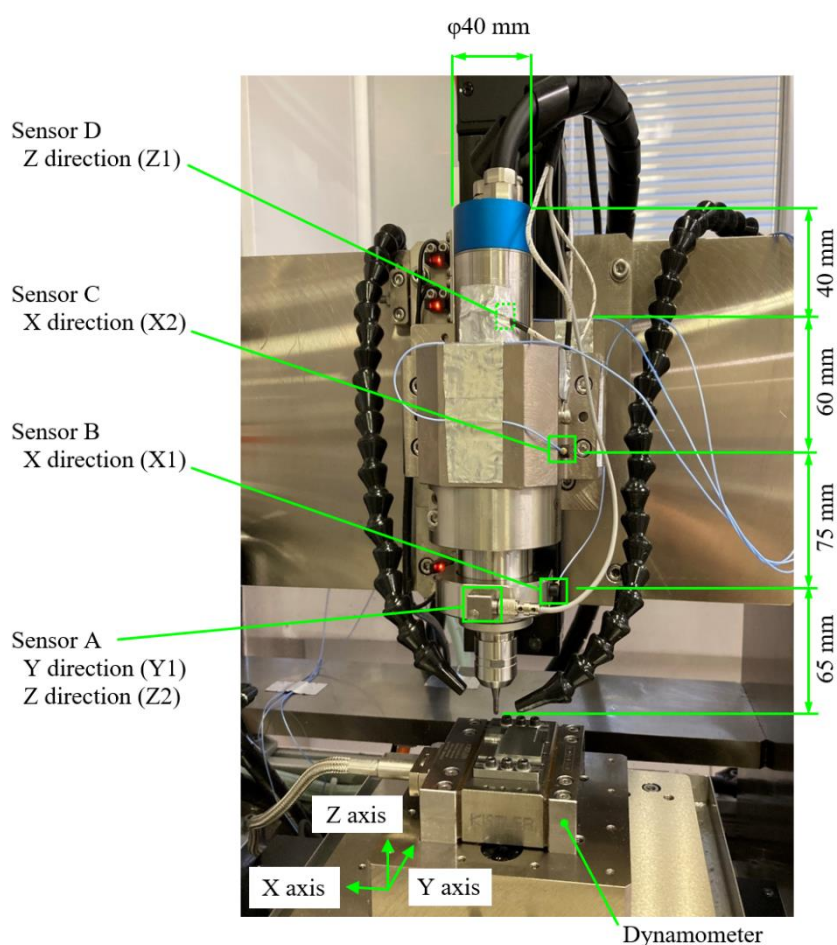


図 4.6 実験加工機およびセンサ取付け位置

実験においては 2 種類の切削工具を使用した。切削工具 T1 は半径 1.5mm のボールエンドミル、切削工具 T2 は直径 3mm のラジウスエンドミルであり詳細は表 4.1 に示す。被削材はプリハードン鋼とアルミニウム合金(JIS 規格表記で A5052)の 2 種類を利用した。表 4.2 に実験に用いた切削条件の詳細を示す。径方向の切込み量，軸方向の切込み量，工具回転速度，切削工具，被削材などを変えて 6 種類の切削条件を用意した。これらは切削工具メーカーの推奨条件を参考に，事前の加工実験を行うことで定めている。

表 4.1 加工実験に利用した切削工具

Tool parameters	Cutting tool code	
	T1	T2
Type of tool	Ball end mill	Radius end mill
Cutting flutes	2	4
Diameter of tool [mm]	3.0	3.0
Radius of tool [mm]	1.5	0.5
Effective length [mm]	Over 8.0	Over 8.0
Tool material	Cemented carbide (WC, Co)	Cemented carbide (WC, Co)
Coating	TiAlN	TiAlN

表 4.2 加工実験に利用した切削条件

Milling conditions	Milling condition code					
	MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	MC6
Rotational speed of spindle [min^{-1}]	16,000	16,000	16,000	18,000	16,000	16,000
Feed rate [mm/min]	1,500	1,500	1,500	1,688	2,400	1,500
Feed per tooth [mm]	0.047	0.047	0.047	0.047	0.038	0.047
Radial cutting depth [mm]	0-0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3
Axial cutting depth [mm]	0.45	0.45	0-0.2	0.15	0.5	0.45
Cutting tool	T1: ball end mill	T1: ball end mill	T1: ball end mill	T1: ball end mill	T2: radius end mill	T1: ball end mill
Workpiece material	Pre-hardened steel	Pre-hardened steel	Pre-hardened steel	Pre-hardened steel	Pre-hardened steel	Aluminum alloy

工具主軸側に取り付けた加速度センサの位置を図 4.6 に示す. 1 軸の加速度センサを 3 個, 3 軸の加速度センサを 1 個使用した. ただし, 3 軸の加速度センサは 3 軸のうち 2 軸分のみ利用した. そのため, 合計 5 つの加速度を計測している. そのうち 2 つは X 方向の加速度(X1, X2), 1 つは Y 方向の加速度(Y1), 残りの 2 つは Z 方向の加速度(Z1, Z2)を計測するのに使用している.

4.3.2 機械学習のための学習データ

続いて、機械学習のための学習データを表 4.3 に示す。入力値となるセンサでの計測データ，出力値となる切削力の異なる計 4 パターンで学習を行った。図 4.7 は学習に用いた加工パターンである。半径方向の切り込み量(Rd)を変えながら八角形の形状を加工する軌跡となっている。8 つの加工方向は Section 1 から Section 8 と定義し，Rd を変化させながら切削加工を行った。図 4.8 に，この八角形の形状を加工した時の X 方向の計測切削力を示す。Section 1 から Section 8 へ加工方向が変わることで，X 方向の切削力が変化していることが見てとれる。八角形の形状としたのは多くの加工方向での切削加工の結果を学習データに含めるためであり，Rd を変化させたのは異なる切削負荷での加工結果を学習データに含めるためである。このように，加工方向と切削負荷を変化させて盛り込むことにより，機械構造の変形による加速度変化が学習データに含まれるようにした。切削条件は表 4.2 における MC1，切削工具はボールエンドミル，被削材はプリハードン鋼を用いた。実際に使用される切削条件は，MC1 以外にも多種多様に存在する。ここでは一刃送り量や工具回転速度などといった切削条件の設定値それぞれを変化させて加工し，学習データとして利用するという事は行わなかった。工具主軸の力学的な変位を網羅的に学習することが目的であるため，切削力の大きさと切削力を受ける方向を変化させて，これらを網羅的に含む切削条件と加工パターンを設定した。Z 方向の切削力を用いた学習においては，実験加工機の Z 軸の構造上，Sensor Z1 の位置の変位 z_1 が正の時と負の時とで計測データを分離して使用した。具体的には表 4.3 における TZ1 の学習には z_1 が正の時の計測データのみを使用し，TZ2 の学習には z_1 が負の時の計測データのみを使用している。この理由については，Z 方向の切削力推定を評価している 4.4.3 項にて詳細を説明する。

表 4.3 機械学習のための学習データ

Training condition code	Input: Sensor data	Output: Direction of cutting force	Training target of milling pattern	Number of Training data set	Measurement total time (sampling rate: 50kHz)
TY1	Sensor 1: Y1	Y	Octagonal shape with Rd change	360,000	7.2 s
TX1	Sensor 1: X1 Sensor 2: X2	X	Octagonal shape with Rd change	360,000	7.2 s
TZ1	Sensor 1: Z1 Sensor 2: Z2	Z	Octagonal shape with Rd change (In case Z1 is positive)	260,000	5.2 s
TZ2	Sensor 1: Z1 Sensor 2: Z2	Z	Octagonal shape with Rd change (In case Z1 is negative)	245,000	4.9 s

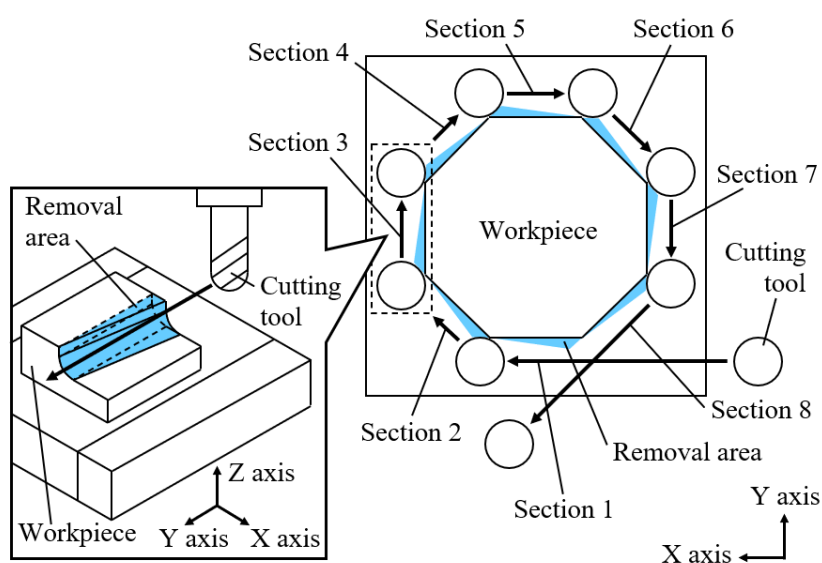


図 4.7 加工方向と切削負荷を変化させた八角形の形状の加工

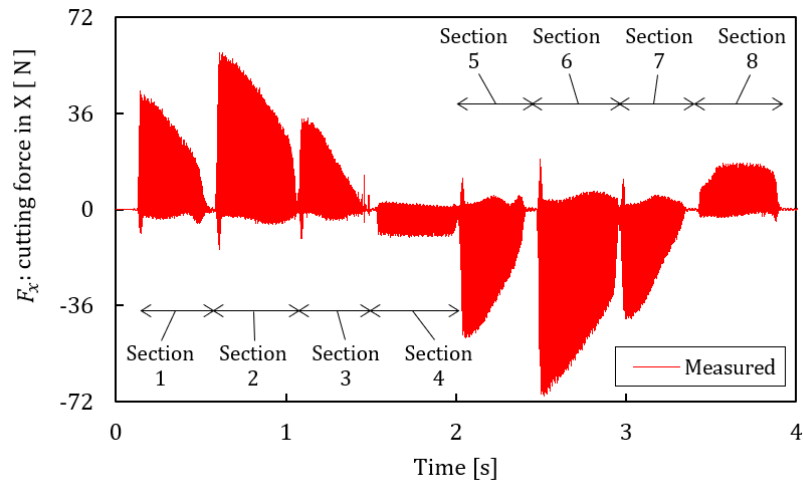


図 4.8 八角形の形状の加工における X 方向の計測切削力

実際の機械学習には Keras(Version 2.12.0)の AI フレームワークを利用した．入力値である加速度，速度，変位，そして出力値である切削力は，事前の演算処理としてそれぞれの最小値および最大値から正規化を行っている．そのため，これらを値は 0 から 1 の範囲で準備し，学習と推定に使用している．その結果，推定値も 0 から 1 の範囲で出力されることになるので，最終的には絶対値で評価できるように切削力を正規化した値から戻すための再計算を行っている．表 4.4 に，MLP 利用時の設定条件および設定値を示す．活性化関数には ReLU を使用し，学習時のバッチサイズは 256，学習の反復回数であるエポック数は 1,000 とした．エポック数を大きく設定した理由は，機械学習の構成が単純であるため過学習の可能性が低いためである．最適化アルゴリズムには adam を選択し，推定値と正解の値の差，つまり損失が最小になるように学習によってモデルパラメータを同定した．

表 4.4 MLP 利用時の設定条件および設定値

AI framework	Keras (Version 2.12.0)
Activation function	ReLU (ramp function)
Batch size	256
Number of epochs	1,000
Optimization Algorithm	adam

4.4 モデルパラメータの同定

4.4.1 Y方向のモデルパラメータ

ここでは，提案方法を用いたモデルパラメータの同定を実施し，その結果を説明する．前述したように学習に用いた加工パターンは図 4.7 に示したものであり，Rdを変化させながら八角形の形状を加工したものである．

まず，Y方向におけるモデルパラメータの同定について述べる．Y方向の工具先端に切削力を与えられた場合，Sensor Y1 が取り付けられている位置の加速度がこの切削力に応答して変化することが事前に実験により判明している．それに加えて，Sensor Y1 を取り付けられている位置の上方にあたる根元には節に相当するような構造がないと思われるも予めわかっている．そこで，図 4.9 に示すように，Y方向の切削力の推定には1自由度の振動モデルを選択した．また，Sensor 1 には，Sensor Y1 を適用した．今回のY方向の場合において，モデルパラメータの行列である式(4.4)に1自由度の振動モデルの運動方程式である式(4.1)を当てはめたのが式(4.5)である．

$$F_y = \delta_1(w_{\ddot{y}_1}\ddot{y}_1 + w_{\dot{y}_1}\dot{y}_1 + w_{y_1}y_1) + b \quad (4.5)$$

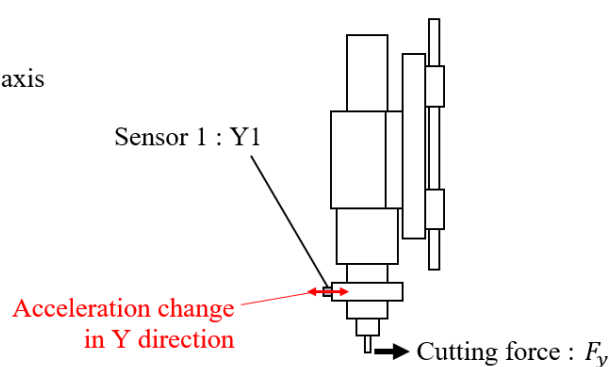


図 4.9 Y方向における工具主軸の構造

ここで、 $\ddot{y}_1$ は Sensor Y1 にて計測した加速度であり、これを積分することで速度 $\dot{y}_1$ と変位 y_1 を算出できる．表 4.3 の TY1 を用いて機械学習を実施することで、パラメータ $w_{\dot{y}_1}$ 、 $w_{\ddot{y}_1}$ 、 w_{y_1} を同定した．さらに、偏差 b と極性 δ_1 も同時に同定している．なおここで注意すべきこととして、 b は切削負荷が定常的に掛かっているような、いわば DC 成分に相当するものではないということを補足しておく．このパラメータは誤差を補正するためのものであり、値としては 0 が同定されることが理想的なものである．以上のパラメータから切削力 F_y を推定することができる．

表 4.5 に、機械学習(ML)を用いて同定したパラメータを示す．さらに、比較のために、工具先端をインパルスハンマで Y 方向に叩き、Sensor Y1 からインパルス応答(IR)を計測し、モデルパラメータの同定を行った結果も表 4.5 に示す．機械学習(ML)とインパルス応答(IR)のモデルパラメータがおおよそ一致していることが見てとれる．このことから、本研究で提案している機械学習を用いた手法により、インパルス応答を用いた場合と同様なパラメータの同定が可能であることが確認できる．

表 4.5 Y 方向のモデルパラメータ

Parameters	Method for identifying	
	IR	ML (TY1)
$w_{\dot{y}_1}$ [kg]	6.58×10^{-1}	7.19×10^{-1}
$w_{\ddot{y}_1}$ [N/(m/s)]	0.27×10^3	0.46×10^3
w_{y_1} [N/m]	10.40×10^6	11.38×10^6
δ_1	1	1
b [N]	0.00	-0.35

4.4.2 X方向のモデルパラメータ

続いて、X方向におけるモデルパラメータの同定について述べる．X方向の工具先端に切削力が与えられた場合、Sensor X1 が取り付けられている位置の加速度が応答することが事前に検証により判明している．また、Sensor X2 が取り付けられている位置の加速度も同様に応答する．そこで、X方向の切削力推定には、図 4.10 に示すように 2 自由度の振動モデルを選択した．Sensor 1 には Sensor X1 を、Sensor 2 には Sensor X2 を適用した．今回の X方向の場合において、モデルパラメータの行列である式(4.4)に 2 自由度の振動モデルの運動方程式である式(4.2)を当てはめたのが式(4.6)である．

$$F_x = \delta_1(w_{\ddot{x}_1}\ddot{x}_1 + w_{\dot{x}_1}\dot{x}_1 + w_{x_1}x_1) - \delta_2(w_{\ddot{x}_2}\ddot{x}_2 + w_{\dot{x}_2}\dot{x}_2 + w_{x_2}x_2) + b \quad (4.6)$$

ここで、 $\ddot{x}_1$ は Sensor X1 にて計測した加速度であり、これを積分することで速度 $\dot{x}_1$ と変位 x_1 を算出できる．Sensor X2 も加速度センサであり、計測値を積分することで速度 $\dot{x}_2$ と変位 x_2 を算出できる．表 4.3 の TX1 を用いて機械学習を実施することで、パラメータ $w_{\ddot{x}_1}$ 、 $w_{\dot{x}_1}$ 、 w_{x_1} 、 $w_{\ddot{x}_2}$ 、 $w_{\dot{x}_2}$ 、 w_{x_2} を同定した．さらに、偏差 b 、極性 δ_1 、 δ_2 も同時に同定している．以上のパラメータから切削力 F_x を推定することができる．

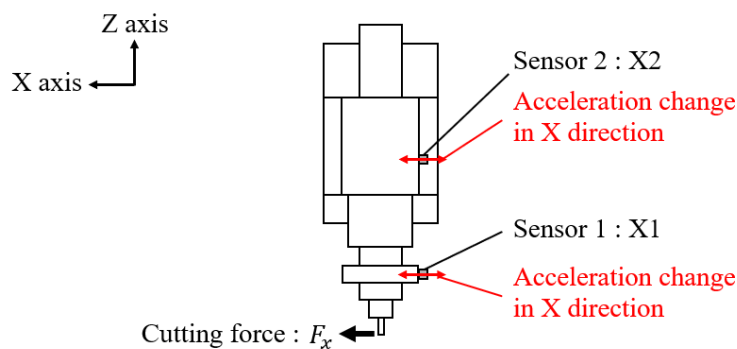


図 4.10 X方向における工具主軸の構造

表 4.6 に、2 自由度の振動モデルにて機械学習により同定したモデルパラメータを示す。1 自由度の振動モデルを適用した Y 方向と比較して、より複雑な機械構造である X 方向に対して、2 自由度の振動モデルの適用によりパラメータの推定ができたと考えている。また、センサ X1 についてのモデルパラメータとセンサ X2 についてのモデルパラメータを比較すると、推定切削力に対する影響の大きさを確認することができる。これを応用すると、センサを追加して機械学習によるモデルパラメータ同定を実施し、得られた結果から影響の大きさを確認しセンサの必要性を判断することも可能であると考察している。

さらに、インパルス応答によるパラメータ同定との比較について考察を行った。インパルス応答を用いても 2 自由度の振動モデルのパラメータ同定が可能である場合が存在する。例えば、各センサの位置の加速度変化の影響が独立しているような場合などである。しかし、そうでない場合には 2 自由度の振動モデルに対してインパルス応答によりパラメータ同定を行うことは困難である。これに比べて、本研究で提案している手法では複雑なモデルに対してパラメータ同定が可能であり、優れていると考えている。

表 4.6 X 方向のモデルパラメータ

Parameters	Method for identifying
	ML (TX1)
$w_{\ddot{x}_1}$ [kg]	6.15×10^{-1}
$w_{\dot{x}_1}$ [N/(m/s)]	0.10×10^3
w_{x_1} [N/m]	13.84×10^6
δ_1	1
$w_{\ddot{x}_2}$ [N/(m/s)]	1.33×10^3
$w_{\dot{x}_2}$ [N/m]	11.92×10^6
δ_2	1
b [N]	0.38

ここで、X 方向における振動モデルの自由度および加速度センサの取付け位置を定めた方法について詳細を説明する。まず、工具先端に加速度センサを取り付け、インパルスハンマで X 方向に工具先端を叩いて X 方向の加速度の計測を行った。その結果は第 2 章の図 2.15 に示しているが、図 4.11 に再掲する。さらに、図 4.12 は周波数解析により振幅スペクトルを求め、正規化した値を示したものである。最も値の大きな周波数は 2,197Hz 付近であるが、これは工具先端付近の固有振動と考えられる。これを除くと、646Hz 付近および 280Hz 付近が値の大きな周波数であると見てとれる。これらの周波数の振動を計測できる位置を加速度センサの取付け位置とした。

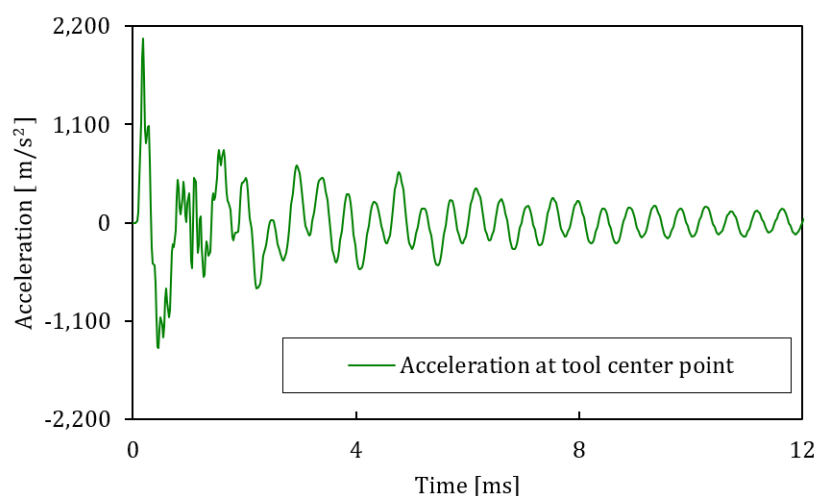


図 4.11 工具先端での X 方向の加速度におけるインパルス応答

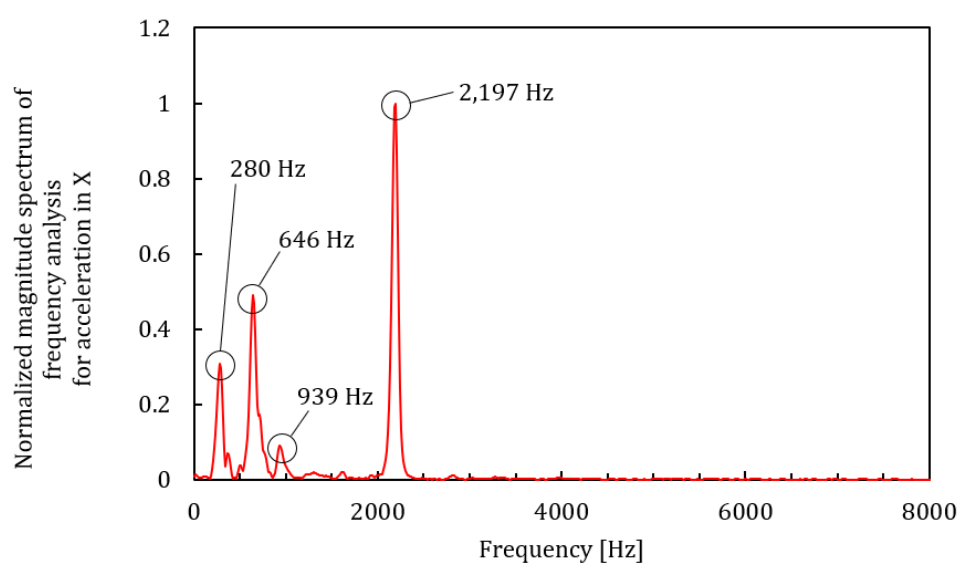


図 4.12 工具先端での X 方向のインパルス応答における周波数解析結果

4.4.3 Z方向のモデルパラメータ

次に，Z方向におけるモデルパラメータの同定について述べる．Z方向の切削力推定には2自由度の振動モデルを選択し，それを図4.13に示す．今回の実験加工機の工具主軸側の構造は，一体のユニットとなっているため十分な剛性を有しており，工具先端にZ方向へ切削力を与えられた場合には，Z軸ステージの加速度が変化することが事前の検証により判明している．この特性を利用して，Sensor 1にはZ軸ステージに取り付けたSensor Z1を適用した．一方で，Z軸のスライダと駆動機構は，工具主軸構造よりも剛性が相対的に低くなっている．この影響による加速度の変化は工具主軸に取り付けたSensor Z2から計測できるため，Sensor 2にはSensor Z2を適用した．ここでさらなる事前の実験により，Sensor Z1の取り付け位置の変位である z_1 が正の場合と負の場合では，機械構造の特性が異なりモデルパラメータも異なることがわかった．そこで， z_1 が正の場合と負の場合に分けてモデルパラメータを同定し，切削力の推定を行った．今回のZ方向の場合において，モデルパラメータの行列である式(4.4)に2自由度の振動モデルの運動方程式である式(4.2)を当てはめたのが式(4.7)である．

$$F_z = \delta_1(w_{\ddot{z}_1}\ddot{z}_1 + w_{\dot{z}_1}\dot{z}_1 + w_{z_1}z_1) - \delta_2(w_{\ddot{z}_2}\ddot{z}_2 + w_{\dot{z}_2}\dot{z}_2) + b \quad (4.7)$$

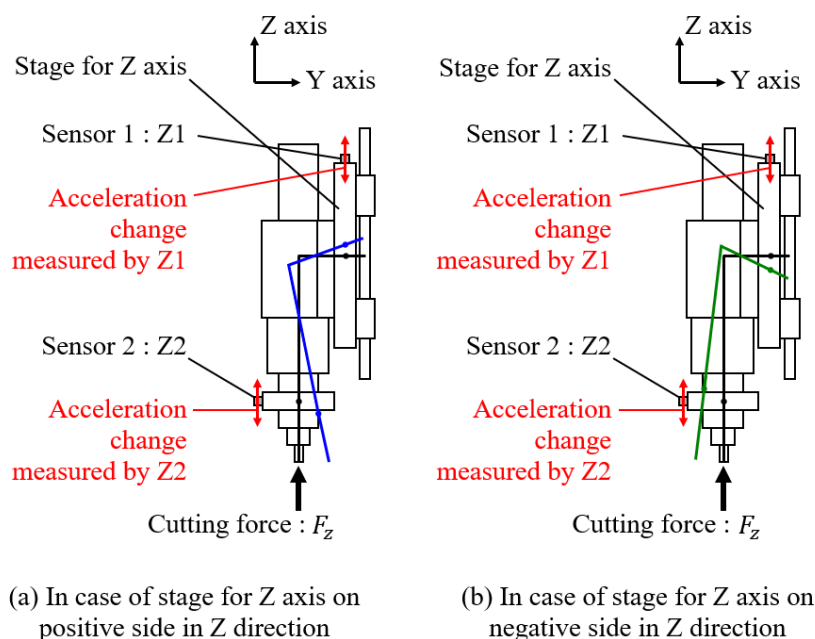


図 4.13 Z方向における工具主軸の構造

ここで、 $\dot{z}_1$ は Sensor Z1 にて計測した加速度であり、これを積分することで速度 $\dot{z}_1$ と変位 z_1 を算出できる。Sensor Z2 も加速度センサであり、計測値を積分することで速度 $\dot{z}_2$ と変位 z_2 を算出できる。表 4.3 の TZ1 と TZ2 を用いて機械学習を実施しており、 z_1 が正の時のみの計測データが TZ1、 z_1 が負の時のみの計測データが TZ2 となっている。それぞれの場合において、パラメータ $w_{\dot{z}_1}$ 、 $w_{\dot{z}_2}$ 、 w_{z_1} 、 w_{z_2} 、 w_{z_2} を同定した。さらに、偏差 b 、極性 δ_1 、 δ_2 も同時に同定している。学習のための実験は Y 方向や X 方向と同様であり、Rd を変化させながら八角形の形状に対して切削加工を行っている。しかし、ボールエンドミルの形状の特性上、同じ切削条件であっても Z 方向に切削力が与えられる区間は一刃周期の中でも相対的に短く、また、切削力の絶対値についても Z 方向は他の方向に比べて相対的に小さくなっている。そこで、切削力の値が十分に大きい状態での学習データ量を増やすために、Z 方向の切削力の絶対値が 10N を超えるデータを 4 倍に増強して学習を行っている。

表 4.7 に、機械学習により同定したモデルパラメータを示す。 z_1 が正の場合と負の場合とでそれぞれモデルパラメータを同定している。パラメータ $w_{\dot{z}_1}$ と $w_{\dot{z}_2}$ に注目すると、 z_1 が負の場合にはパラメータの値が負となっている。これらのパラメータは等価減衰係数 c_1 、 c_2 に相当するため、本来であれば正の値になることが予想される。この理由として、これらのパラメータの切削力に対する寄与率が比較的小さいため、正確なパラメータを特定することが困難であったと考えている。ただ一方で、寄与率が小さいことから実際の推定切削力に与える影響も小さくため、本研究では同定されたパラメータをそのまま使用した。

表 4.7 Z 方向のモデルパラメータ

Parameters	Method for identifying	
	ML (TZ1) In case Z1 is positive	ML (TZ2) In case Z1 is negative
$w_{\dot{z}_1}$ [kg]	6.94×10^{-1}	4.87×10^{-1}
$w_{\dot{z}_1}$ [N/(m/s)]	0.16×10^3	-0.07×10^3
w_{z_1} [N/m]	9.37×10^6	15.46×10^6
δ_1	1	-1
$w_{\dot{z}_2}$ [N/(m/s)]	0.41×10^3	-0.10×10^3
w_{z_2} [N/m]	3.52×10^6	12.24×10^6
δ_2	1	1
b [N]	2.41	1.51

4.5 同定したモデルパラメータの評価

4.5.1 Y 方向のモデルパラメータの評価

ここからは同定したモデルパラメータの評価結果について説明する．学習により同定したモデルパラメータを用いて，図 4.14 に示す一定の切込み量での直線送り加工にて評価を行った．直線送りの方向は Y 軸の正方向であり，図 4.7 における Section 3 に相当する．切削条件は表 4.2 の MC2，切削工具はボールエンドミル，被削材はプリハードン鋼を用いた．なお，評価のために使用したこの切削条件は機械学習の学習データに含まれているものである．加工方向や切込み量が様々に変化する加工パターンを用いて同定したモデルパラメータを，シンプルで基本的な加工で評価を行っている．

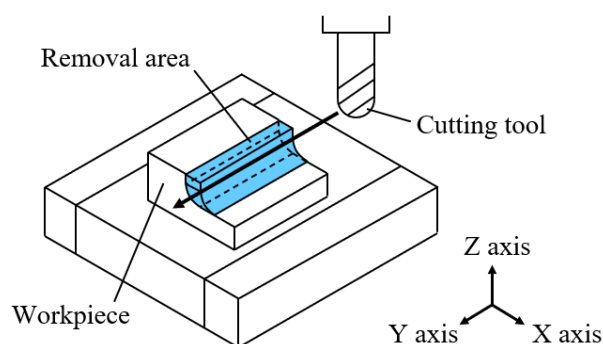


図 4.14 一定の切込み量での直線送りの加工

まず，Y 方向における切削力の評価について述べる．図 4.15 に今回の Y 方向の評価を行った場合の加速度 $\ddot{y}_1$ ，速度 $\dot{y}_1$ ，変位 y_1 を示す．これらは一定の周期ごとに安定して変化しており，これが一刃周期であることがわかる．

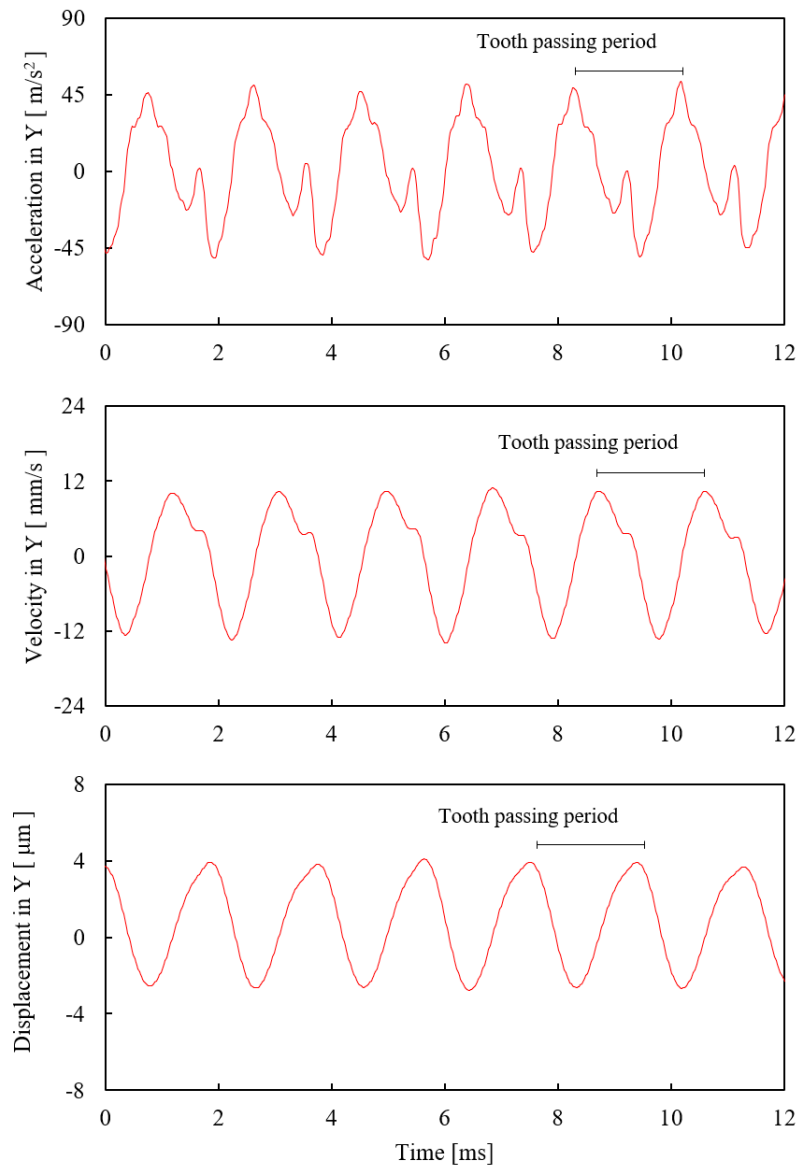


図 4.15 Sensor Y1 を取り付けた位置における加速度，速度，変位

機械学習で同定したパラメータにより式(4.5)から推定した切削力と、計測した切削力を比較した結果を図 4.16 に示す。推定切削力(ML)と計測切削力が一致していることが確認できる。図 4.16 には、インパルス応答にて同定したパラメータを利用した推定切削力(IR)も示している。これについても計測切削力と一致していることが確認できる。

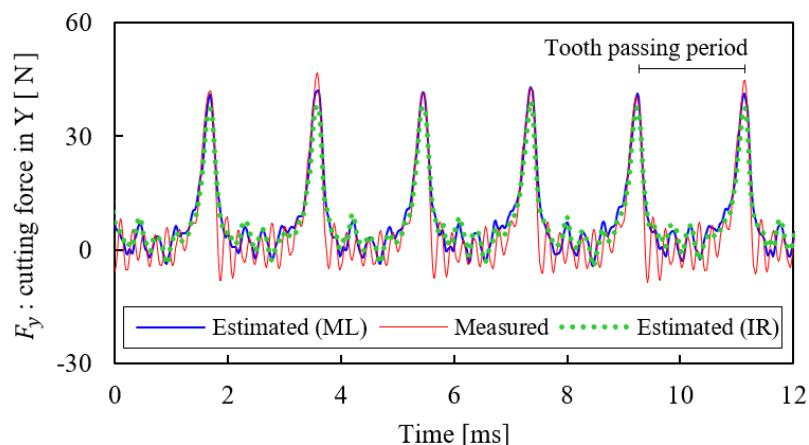


図 4.16 Y 方向の推定切削力と計測切削力の比較

さらなる考察として、図 4.15 の加速度、速度、変位の値と表 4.5 のパラメータの値、および式(4.5)から、推定切削力は加速度と変位に大きく依存していることがわかる。また、図 4.16 の計測切削力の値からわかるように、切削工具とワークが接触していない時に振動が計測されている。これは、切削力の計測のためにワーク側に取り付けた切削動力計の固有振動によるものと考えている。しかし、切削工具とワークが接触して実際に切削が行われている時にはこの振動は計測されておらず、その影響は小さいものと考えている。さらには、こういった振動はたとえ発生していたとしても、機械学習はこの振動の中間値を取るパラメータを同定するように働くため、影響はさらに小さいと考えている。

4.5.2 X 方向のモデルパラメータの評価

続いて、X 方向の切削力について述べる．図 4.17 に、機械学習で同定したパラメータから推定した切削力 "Estimated(ML, 2-Sensor)" と、計測した切削力を比較した結果を示す．推定切削力と計測切削力が一致していることが確認できる．比較のために、SensorX1 のみによる 1 自由度の振動モデルで同定したパラメータを用いた推定切削力を図 4.17 の "Estimated(ML, single-Sensor)" に示す．最も重要な切削力のピーク付近において、1 自由度の振動モデルよりも 2 自由度の振動モデルの方が適切に切削力の推定ができています．1 自由度の振動モデルにおいては根本の節によりピーク付近での切削力が低減されてしまうと考えているが、2 自由度の振動モデルにおいては節の近くに配置したセンサによりピーク付近での切削力を適切にモニタリングすることができていると考察している．ここで、2 自由度の振動モデルでの切削力推定に着目すると、切削工具とワークが接触していない時に変動が見られる．これは、現在使用しているセンサでは計測することができない別の節が存在するためと考えている．しかし、切削工具とワークが接触して実際に切削が行われている時にはこの影響は小さいため、考慮の必要はないと考察する．

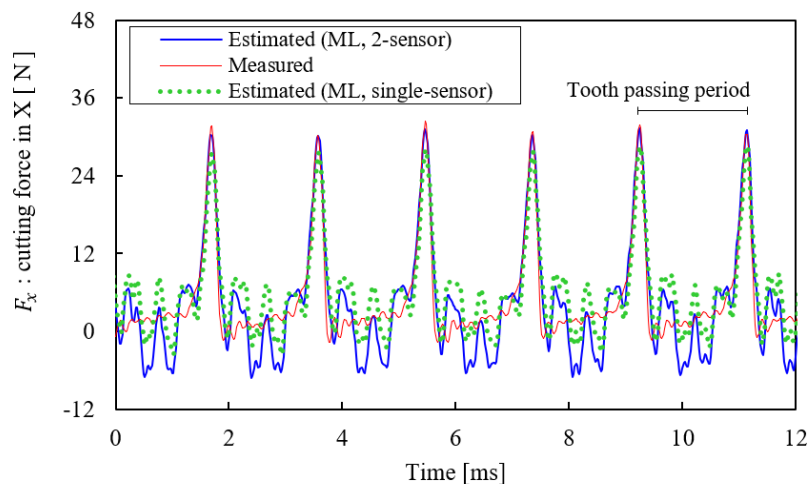


図 4.17 X 方向の推定切削力と計測切削力の比較

4.5.3 Z 方向のモデルパラメータの評価

次に，Z 方向の切削力について述べる．図 4.18 に，機械学習で同定したパラメータから推定した切削力 "Estimated(ML, 2-Sensor)" と，計測した切削力を比較した結果を示す．推定切削力と計測切削力が一致していることが確認できる．比較のために，Sensor Z2 のみによる 1 自由度の振動モデルで同定したパラメータを用いた推定切削力を図 4.18 の "Estimated(ML, single-Sensor)" に示す．2 自由度の振動モデルの方が 1 自由度の振動モデルよりも適切に切削力を推定できていることが見てとれる．

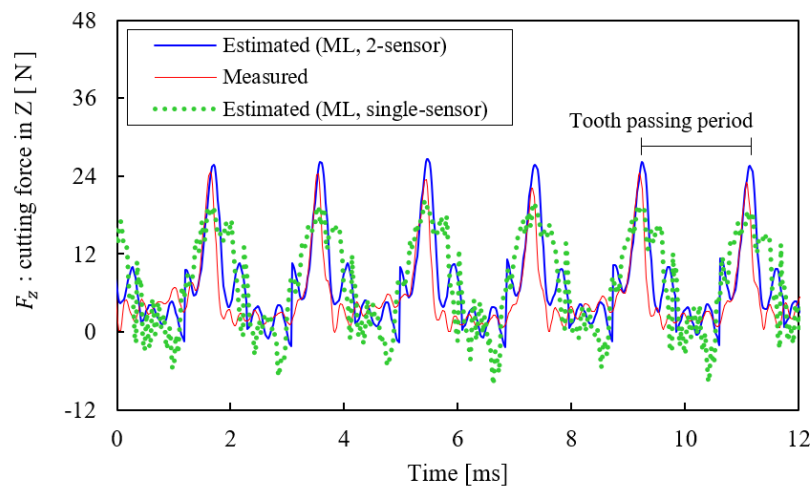


図 4.18 Z 方向の推定切削力と計測切削力の比較

これまで，同定したモデルパラメータを用いた切削力推定の評価について述べてきた．その結果として，一定の切込み量での直線送りの加工において，X，Y，Z の全ての方向に対して適切に切削力が推定され，モニタリングが可能であることを確認した．

4.6 様々な条件下での評価結果

4.6.1 切削負荷を変化させた加工

本節での最初の評価は、切込み量を変化させた加工における評価である。機械学習については、前節と同様に表 4.3 の学習データを用いており、また、加工パターンについては図 4.7 に示した径方向の切込み量 R_d を変化させて八角形の形状に対して切削加工を行っている。これは本節の全ての評価において同様である。一方、本項での評価に用いた加工パターンは図 4.19 に示すように、軸方向の切込み量 A_d を変化させて直線送り加工を行ったのである。切削条件は MC3 を使用している。切削加工中に切込み量を変化させているという点では学習時と評価時とで同様であるが、学習時には R_d を、評価時には A_d を変化させており、これによる影響を確認することが今回の評価の目的である。

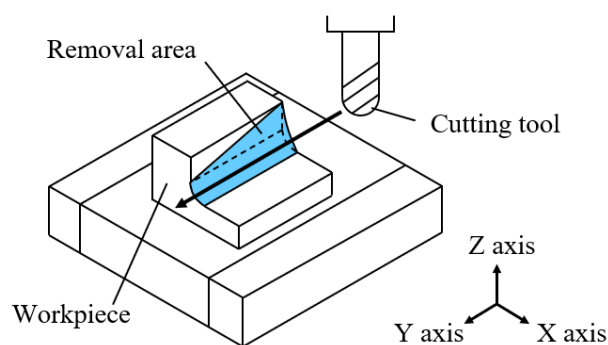
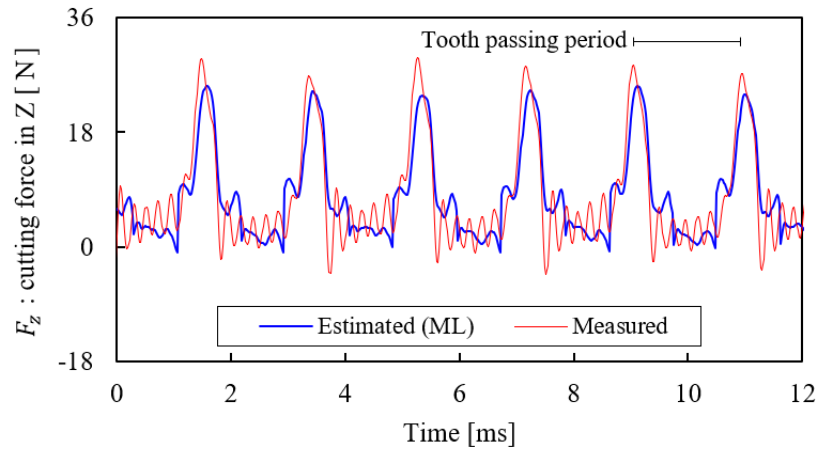
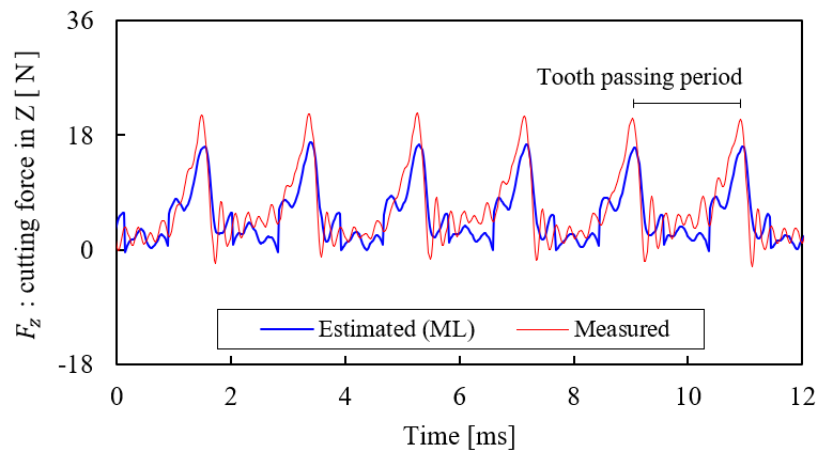


図 4.19 A_d を変化させた直線送り加工

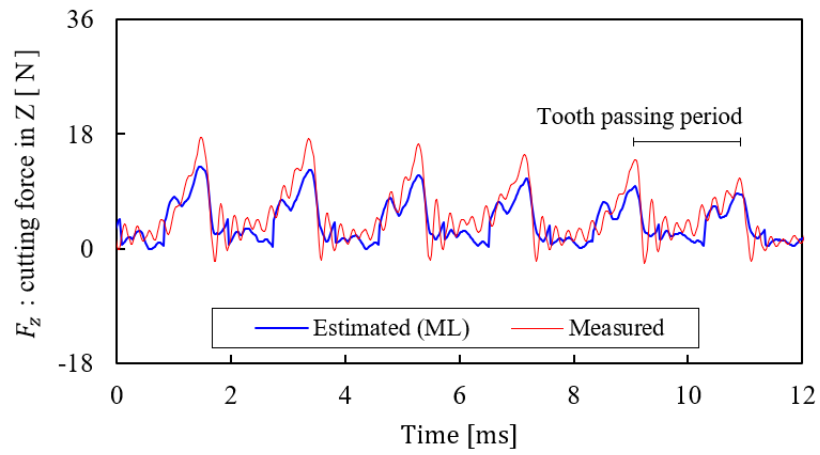
機械学習により同定したパラメータを用いて推定した切削力と計測した切削力について、Z 方向においての比較を行ったのが図 4.20 である。図 4.20(a)は A_d の値が大きい場合、図 4.20(b)は A_d の値が中間程度の場合、図 4.20(c)は A_d の値が小さい場合について示しており、それぞれにおいて推定切削力と計測切削力が一致していることが見てとれる。結果として切削力の変化に追従して、切削力が推定されることが確認できる。本研究で提案している手法は、モデルベースのアプローチである。機械学習により、機械構造に力を与えた時のモデルパラメータを同定し、これにより切削力の推定を行っている。そのため、評価の加工パターンが学習データに直接的には含まれていなかったとしても、加工による機械構造の変化が学習時の範囲に含まれているものであれば、適切に切削力を推定できると考えられる。



(a) Area with large value of Ad



(b) Area with middle value of Ad



(c) Area with small value of Ad

図 4.20 Ad を変化させた直線送り加工における切削力

4.6.2 加工方向を変化させた切削加工

続いて、様々に加工方向を変化させた切削加工を行い、同定したパラメータを評価した。図 4.21 は、評価に用いた一定の切込み量で八角形の形状を加工するパターンである。また、この加工を実施した時の実験加工機内を図 4.22 に示す。切削条件には MC2 を使用した。加工方向については、学習時と評価時の両方において Section 1 から Section 8 までの全ての方向が含まれている。しかし、切削条件については学習時と評価時とで異なっている。

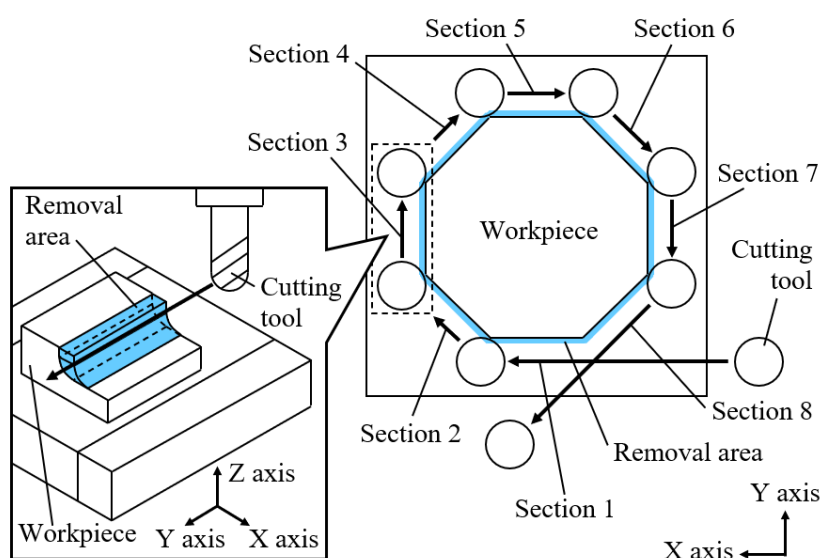


図 4.21 一定の切込み量での八角形の形状の加工

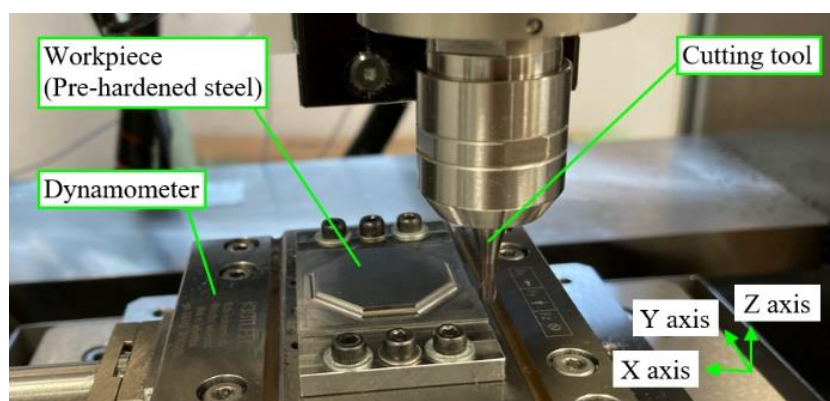
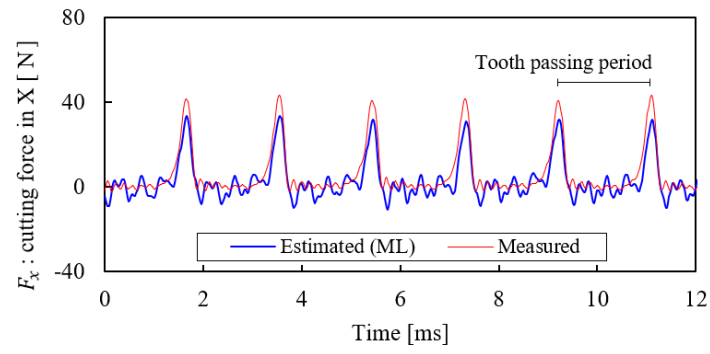
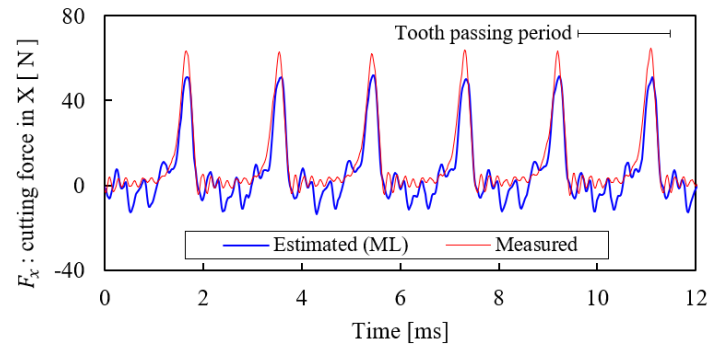


図 4.22 実験加工機での八角形の形状の加工

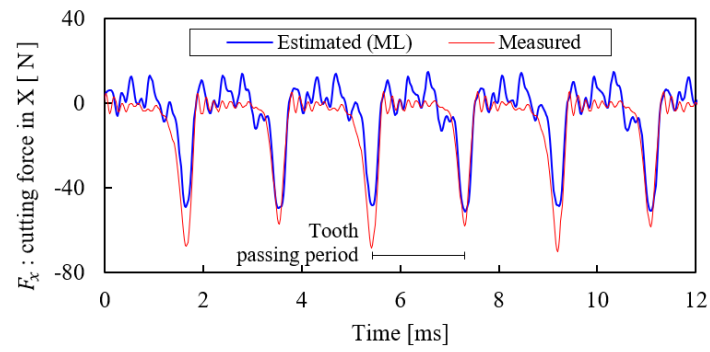
機械学習により同定したパラメータを用いて推定した切削力と計測した切削力について、X 方向における比較を図 4.23 に示す。8 つのセクションのうち、4 つのセクションを抽出して示している。Section 1 は X の正方向に送り加工した場合、Section 2 は X の正方向と Y の正方向に送り加工した場合、Section 6 は X の負方向と Y の負方向に送り加工した場合、Section 7 は Y の負方向に送り加工した場合であり、それぞれにおいて推定切削力と計測切削力が一致していることが見てとれる。結果として加工方向とそれに伴う切削力の変化に追従して、切削力が推定されていることが確認できる。今回の評価に用いた加工パターンには様々な加工方向が含まれているが、機械学習によって同定したモデルパラメータは 1 セットのみである。加工方向が変化したとしても、加工による機械構造の変化が同定した 1 セットのパラメータで推定できる範囲内であれば、適切に切削力を推定できると考えられる。



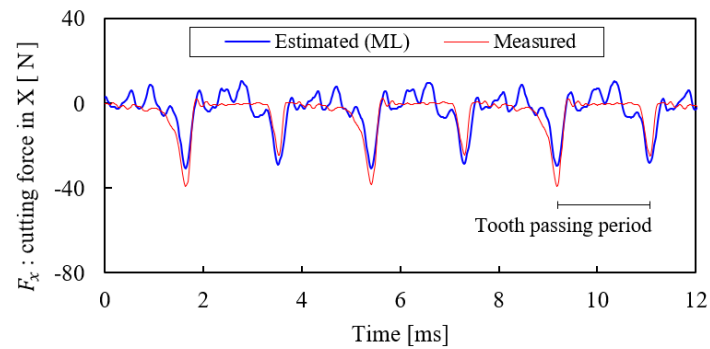
(a) Cutting force at Section 1



(b) Cutting force at Section 2



(c) Cutting force at Section 6



(d) Cutting force at Section 7

図 4.23 異なる切削送り方向における推定切削力の評価

4.6.3 工具回転速度を変化させた加工

次に，工具主軸の回転速度を変化させた加工における評価を実施した．図 4.14 に示す加工パターンを用いて，一定の切込み量で直線送りの加工を行っている．切削条件は MC4 を使用し，工具主軸の回転速度についてこれまでの $16,000\text{min}^{-1}$ から $18,000\text{min}^{-1}$ に変更した．

機械学習により同定したパラメータを用いて推定した切削力と計測した切削力について，X 方向において比較を行った結果を図 4.24 に示す．推定した切削力が計測した切削力と一致していることが確認できる．ここで，学習時のデータには工具回転速度 $18,000\text{min}^{-1}$ の切削条件での加工は含まれていない．しかし，主軸回転速度を変更したことによる機械構造の変化は，同定したモデルパラメータで推定できる範囲内であったため，適切に切削力を推定できたと考えられる．

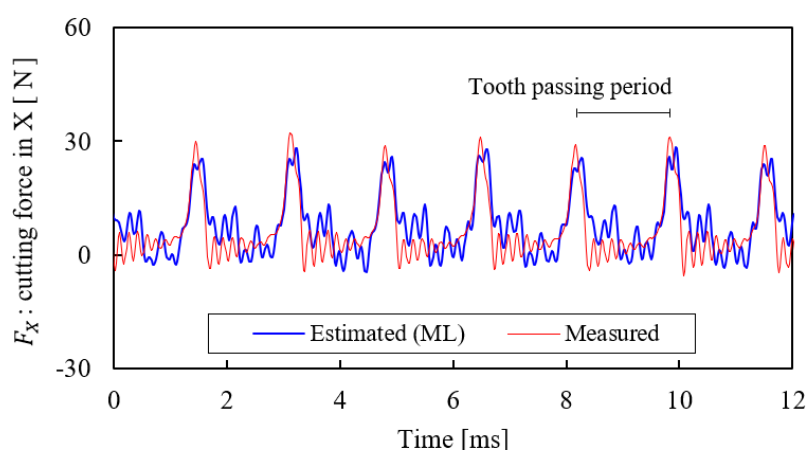


図 4.24 学習データと異なる工具回転速度で加工した場合の推定切削力

4.6.4 異なる切削工具での加工

続いて，切削工具を変更して加工した場合の評価について述べる．評価に用いた加工パターンは図 4.14 に示したもので，一定の切込み量にて直線送りの加工を行っている．切削条件は MC5 を使用した．切削工具について，これまでの評価では 2 枚刃のボールエンドミル T1 を用いたが，今回は 4 枚刃のラジアスエンドミル T2 を使用した．図 4.25 にこれら 2 つの切削工具を示す．切削条件について，工具主軸の回転速度は $16,000\text{min}^{-1}$ とこれまでに使用してきた切削条件と同じであるが，刃数が 2 枚から 4 枚に変わっているため，一刃周期は半減している．

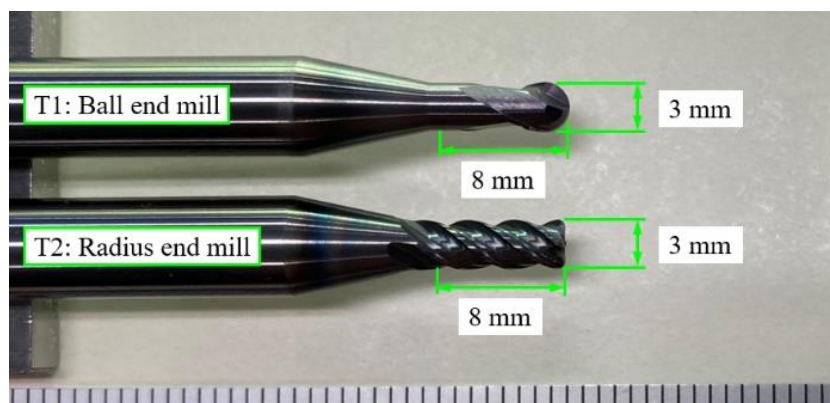


図 4.25 使用した切削工具のボールエンドミルとラジラスエンドミル

機械学習により同定したパラメータを用いて推定した切削力と計測した切削力について、Y 方向において比較を行ったのが図 4.26 である。推定した切削力は計測した切削力と一致していることが確認できる。この理由は、今回の一連の実験で使用したボールエンドミルとラジラスエンドミルの形状が比較的類似しているからだと考えている。厳密に言えば、2 つの切削工具は形状が異なるためモデルパラメータは完全には一致しない。しかし、形状が似ているためモデルパラメータも近いものと想定される。これにより、今回は切削力を適切に推定できたと考察している。

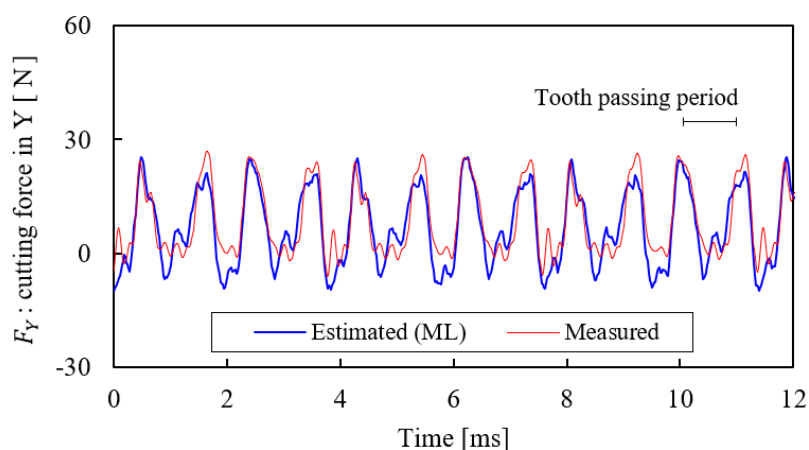


図 4.26 ラジラスエンドミルを用いた加工における切削力

4.6.5 異なる被削材での加工

最後に，被削材を変更した加工での評価を行った．評価に用いた加工パターンは図 4.14 に示したもので，一定の切込み量での直線送りの加工を行っている．切削条件は MC6 を使用し，被削材にはアルミニウム合金を用いた．学習時とは異なる被削材を加工した場合の評価を，ここでの実験の目的としている．

機械学習により同定したパラメータを用いて推定した切削力と計測した切削力について，Y 方向における比較を行ったが図 4.27 である．推定した切削力が計測した切削力と一致しており，学習時には含まれていないアルミニウム合金の加工において切削力が適切に推定されていることが確認できる．被削材を変更して加工した際の機械構造の変化が，同定したパラメータで推定できる範囲内であったため，適切に切削力を推定できたと考えられる．

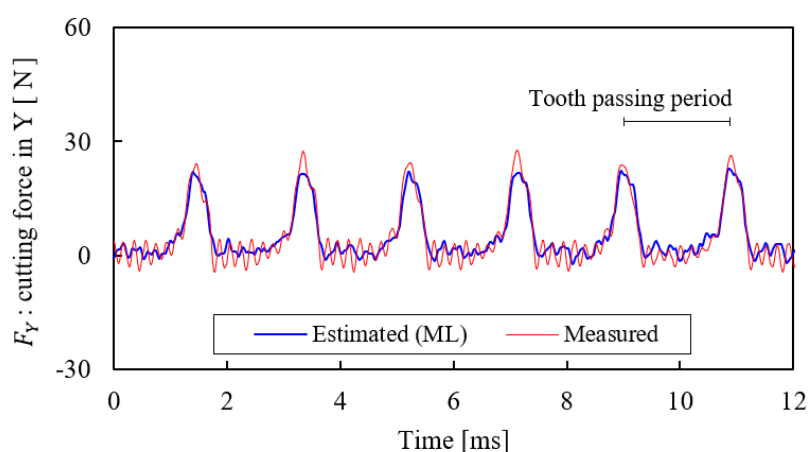


図 4.27 アルミニウム合金の加工における切削力

4.7 中間層を導入した機械学習

これまでの機械学習では MLP の手法を採用し、中間層を設定しない簡素な構成を利用してきた。そして、この構成を用いたモデルパラメータ同定および適切な切削力推定が可能であることを検証してきた。しかし、この中間層を設定しない構成は対象を線形モデルと捉えたモデル化である。そのため、線形モデルを解くために、機械学習手法の中でも最も一般的な線形回帰を用いても、同様のモデルパラメータ同定は可能であると考えられる。一方で、MLP を用いると将来的に拡張ができることがメリットである。これまでは利用していなかった中間層を設定することにより、より複雑なモデルを解くことができると考えられる。

ここで、その一例として中間層を追加した検証を行った。Z 方向に対して、4.4.3 節では Z1 の変位に応じて 2 つのモデルに分けてモデルパラメータを同定し、切削力を推定している。ここでは、より難しい条件とするためにモデルを 1 つに変更し、これまで利用してきた中間層を設定しない MLP 構成と、新しく中間層を 2 つ追加した MLP 構成にて Z 方向の切削力推定について比較を行った。図 4.28 に新しく中間層を 2 つ追加した MLP 構成を示す。入力値は、2 自由度の振動モデルと同じく 5 個、一つ目の中間層のノードは 14 個、二つ目の中間層のノード数は 4 個、出力値はこれも 2 自由度の振動モデルと同じく 1 個とした。図 4.29 が 2 つの MLP 構成に対してパラメータの同定を行い、切削力を推定した結果である。中間層を設定しない MLP 構成による推定切削力は、計測切削力との間に差があることが見てとれる。一方で、中間層を 2 つ追加した MLP による推定切削力は、計測切削力とおおよそ一致していることが確認できる。このように、MLP を用いると中間層の追加により拡張が可能であると考えられる。ここで、それぞれの MLP 構成において同定する必要があるパラメータ数を確認すると、中間層を設定しない MLP 構成では 8 個であったのに対して、中間層を 2 つ追加した MLP 構成では 135 個と非常に多い。これほどの数のパラメータにて構成されるモデル化を行うのは難しく、今後更なる検討が必要である。また、同定した数多くの個々のパラメータをどのように評価するのか、あるいは、パラメータの同定を行うための学習時間が長くなるといった点についても課題と考えられる。

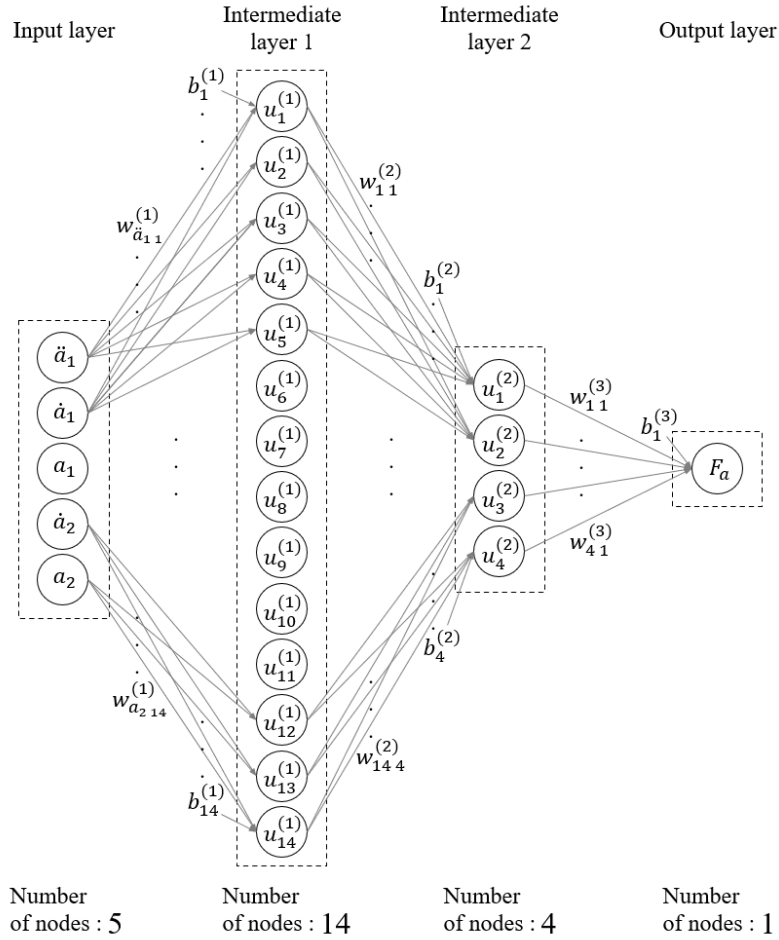


図 4.28 中間層を 2 つ追加した MLP 構成 (中間層のノード数 : 14 個, 4 個)

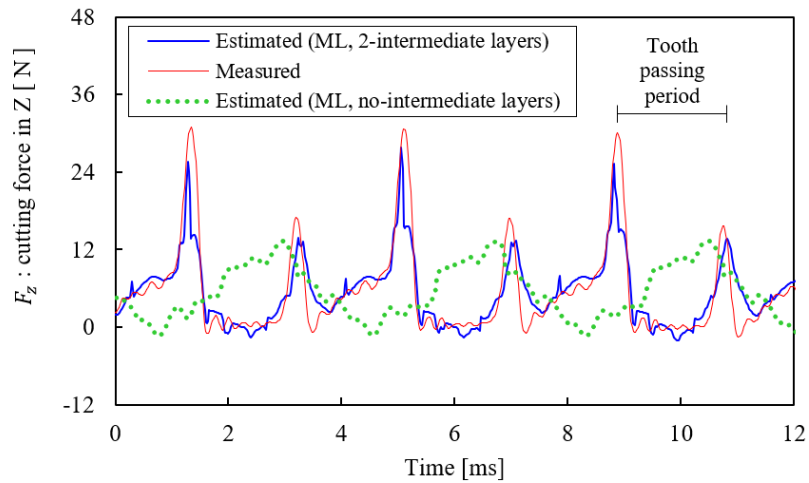


図 4.29 Z 方向に対して 1 つのモデルのみで切削力を推定した結果

4.8 結言

本章では、機械学習に基づいてモデルパラメータを同定し、切削力を推定するインプロセスでのモニタリング手法を提案した。そして、この手法について実際の加工実験により評価を実施した。加工方向と切削負荷を様々に変化させた加工パターンを機械学習のためのデータとしてモデルパラメータを同定し、評価を行った。表 4.8 に結果を示す。

- 一定の切削負荷で直線送りの加工では、 X , Y , Z の全ての方向において適切に切削力を推定することができた。
- 切削負荷が変化させた加工では、切込み量の切削条件が学習時に含まれていない場合においても、切削負荷の変化に追従して適切に切削力を推定することができた。
- 加工方向を変化させた加工では、同定した 1 セットのモデルパラメータのみで各加工方向に対して適切に切削力を推定することができた。
- 工具主軸の回転速度を変化させた加工では、回転速度の切削条件が学習時に含まれていない場合においても、適切に切削力を推定することができた。
- 切削工具を変えた加工においては、切削工具の形状が学習時と類似のものであれば、適切に切削力を推定することができた。
- 被削材を変えた加工においては、変更した被削材が学習時に含まれていない場合においても、適切に切削力を推定することができた。
- 機械学習において、中間層を追加してパラメータ数を増やした MLP 構成を用いると、中間層を設定しない MLP 構成と比較して、より高精度な切削力の推定が可能であった。MLP を用いると中間層の追加が可能であり、将来的な拡張性があることが確認できた。

表 4.8 同定したモデルパラメータの評価内容と結果

Conditions of Experiment	Training Condition	Evaluation Condition	Evaluation Result
Constant cutting load	Rd 0-0.1mm	Rd 0.1	○
Change of cutting load	Rd 0-0.1mm	Ad 0-0.2mm	○
Various cutting directions	8 directions	8 directions	○
Change of rotational spindle speed	16,000 min ⁻¹	18,000 min ⁻¹	○
Change of cutting tool	Ball end mill (ϕ 3, R1.5)	Radius end mill (ϕ 3, R0.5)	○
Change of workpiece material	Pre-hardened steel	Aluminum alloy	○

結果として、提案手法により適切に切削力を推定し、モニタリングが可能であることが確認できた。

また、本研究では使用した実験加工機に対するモデル化を実施したが、これとは異なる新規の加工機に対してモデル化を実施する場合の検討方法を以下に述べる。現状の一般的な工作機械はその多くが高機能であるため複雑化しており、モデルを把握するには通常はモード形状解析の実施が必要となる。しかし、その実施には正確な設計データや解析技術が必要とされるため困難である。一方で、本研究での提案方法を用いると、数多くのセンサを取付けてモデルパラメータを同定し、その結果から影響の少ないセンサを外したり位置を変えたりすることでモデル化を行うことが可能である。モード形状解析を実施することなくモデル化が実現できるため、本研究での提案方法の優位な点であると考えられる。

なお、本章での成果はモデル化およびモデルパラメータ同定を高度に実現する方法である。この方法を用いても、第 3 章にて提案した静的変位の推定は必要である。実際の切削加工時にはセンサにて計測した加速度を積分することで速度および変位を求めているが、静的変位自体を求めることは困難である。本章にて提案したモデル化およびモデルパラメータの同定に加えて、第 3 章にて提案した静的変位の推定を組み合わせることで、より適切な切削力推定が可能であると考えられる。

第 5 章 結論

5.1 本研究の成果

本研究では、小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工を対象とし、切削加工の状態モニタリングを実現することを目的として実際の加工実験を行い詳細な検討を行った。その結果、以下に示す結論が得られた。

第 1 章「緒論」では、社会的背景から製品の複雑化と製品プロセスの高度化が求められる中で、切削加工の状態モニタリングが重要な技術であることを指摘した。また、切削加工の状態モニタリングに関する現状を明らかにし、小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工への適用における問題点を説明した。そして、この問題を解決する切削加工の状態モニタリングの実現を本研究の目的とすることを述べた。

第 2 章「モデルベースアプローチによる切削力および振動モニタリング」では、モデルベースアプローチによる切削力および振動モニタリングについて提案した。工具径の小さい切削工具を使用する場合には、工具先端付近で発生する高周波の振動が加速度センサ等の計測値に含まれるため、切削加工の状態モニタリングが困難である。そこで、提案方法では逐次 2 次回帰近似を用いて加速度センサ信号から一刃周期の加速度変動と高周波振動成分の分離を行い、モデルベースアプローチから切削力を推定する。その後、新たに定義した切削力と振動の 2 つの特徴量を算出し、切削加工の状態モニタリングを行う。この提案方法を用いて、直線送りでの加工やコーナー加工において適切なモニタリングが可能であることを確認した。また、X、Y 方向に加えて Z 方向に対してもモニタリングが可能であることを確認した。さらに、切削加工中の異常振動や摩耗工具による切削力の変動など、問題となる状況を意図的に発生させてモニタリングを行った。このように、従来では難しかった小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工に対して、切削力および振動の適切なモニタリングを実現した。

第 3 章「工具主軸の静的変位のモニタリング」では、工具主軸の静的変位のモニタリングおよびそれを利用した高精度な切削力の推定方法を提案した。まず、工具主軸を外部から変位センサにより計測することで、切削加工中に工具主軸の静的変位が存在することを確認した。その上で、変位センサを追加することなく静的変位を推定する方法について提案を行った。具体的には、モータエンコーダとリニアスケールの相対変位をテーブル変位と定義し、ここから推定切削力を算出し、静的変位の推定値を求める。そして、静的変位の推定値を利用して工具主軸側のモデルからより正確な切削力を推定する方法である。この提案方法について、一定の切込み量での直線送り加工、切込み量を変化させた加工、加工方向を変化させた切削加工において評価を行った。その結果、推定切削力について改善が見られることを確認した。

第 4 章「機械学習を用いたモデルパラメータ同定による切削力推定法」では、機械構造のモデルパラメータの同定に機械学習を利用することで、高度なモデル化を

実現する方法を提案した．実際の加工実験で計測したデータを用いるため，特別な装置やシミュレーションデータを必要としないことが特長である．この提案方法について，切削加工実験を行い同定したモデルパラメータとそれによる切削力の推定結果について評価を行った．一定の切込み量での直線送り加工，切込み量を変化させた加工，加工方向を変化させた切削加工，工具主軸の回転数を変化させた加工，切削工具を変化させた加工，被削材を変えた加工に対して検証し，その結果，機械学習によるモデルパラメータの同定から適切な切削力が推定できることを確認した．

以上のように，本研究によって小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工における状態モニタリングについて，有用な研究成果が得られた．すなわち，工具主軸に取り付けた加速度センサおよび一般的な工作機械に取り付けられているモータエンコーダおよびリニアスケールを用いて，センサ信号解析および機械学習といった方法を活用することで，小径エンドミルによる高い工具回転速度での形状加工における状態モニタリングが可能であることを実証できた．これまで実現が困難であった切削加工を対象にした状態モニタリングの可能性を示しており，新たな展開が考えられる有用な成果であると考えられる．

5.2 今後の課題および展望

本研究にて実施した状態モニタリングについて、今後の課題もまだ残されている。第 2 章にて提案した切削力および振動モニタリングは、エンドミルを用いた 3 次元形状加工を想定したモニタリングの方法である。しかし、現状では様々な加工形状に対する評価は実施出来ておらず、今後検証が必要と考えられる。これから製品の高度化が一層進んでいく中で、加工形状への要求もより高度化されてくると想定される。これから要求の高まる具体的な加工形状に対する検証に取り組む必要がある。

第 3 章にて提案した静的変位のモニタリングにおいては、静的変位の絶対値の正確な推定が課題である。この推定精度が高まると、切込み量が大きくなり切削負荷が大きくなった加工においても切削力の推定精度が向上し、適用範囲を拡げることができると考えている。

第 4 章にて提案した機械学習によるモデルパラメータ同定の方法については、より複雑な機械装置に対するモデルパラメータの同定方法が今後の課題である。そのためには、より高度な機械学習を活用することが必要である。本研究では簡単な機械学習モデルを利用していたが、より高度な機械学習モデルを利用することで様々な機械装置におけるモデルパラメータ同定を、より簡単に実現できる可能性がある。

以上の取り組みにより状態モニタリングが一層活用されるようになると、これまでの切削加工の考え方が変化すると想定している。現在では、加工開始する前の CAM を用いた加工プログラム作成の時点ですでに加工後の品質が大きく決まっている。状態モニタリングは行われているが、加工中の大きな異常を発見することが目的である。しかし、より高精度に、そして高い応答性で状態モニタリングが実現されるようになると、そのモニタリングした内容を加工中にフィードバックして加工品質を高めるという取り組みも可能となってくる。状態モニタリングの発展は、こうした加工技術につながってくると捉えており、モニタリングした情報を基にしたフィードバックについての取り組みが必要であると考えている。

参考文献

- [1] H. Shinno, H. Yoshioka and H. Sawano, "A Framework for Systematizing Machine Tool Engineering," *Int. J. of Automation Technology*, Vol.7, No.6, pp. 760-768, 2013.
- [2] I. Nishida, R. Tsuyama, K. Shirase, M. Onishi, and K. Koarashi, "Development of Innovative Intelligent Machine Tool Based on CAM-CNC Integration Concept - Adaptive Control Based on Predicted Cutting Force -," *Int. J. of Automation Technology*, Vol.13, No.3, pp. 373-381, 2019.
- [3] H. -C. Möhring, P. Wiederkehr, K. Erkorkmaz, and Y. Kakinuma, "Self-optimizing machining systems," *Annals of the CIRP*, Vol.69, No.2, pp. 740-763, 2020.
- [4] L. Monostori, B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn, and K. Ueda, "Cyber-Physical Systems in Manufacturing," *Annals of the CIRP*, Vol.65, No.2, pp. 621-641, 2016.
- [5] C. Liu, X. Xu, "Cyber-Physical Machine Tool - The Era of Machine Tool 4.0." *Procedia CIRP*, Vol.63, pp. 70-75, 2017.
- [6] J. Lee, C. Jin, B. Bagheri, "Cyber Physical Systems for Predictive Production Systems," *Prod Eng*, Vol.11, pp.155-165, 2017.
- [7] J. Tlustý, G. C. Andrews. "A critical review of sensors for unmanned machining," *CIRP Ann Manuf Technol*, Vol.23, No.2, pp. 563-572, 1983.
- [8] A. Al-Habaibeh, N. Gindy, "A new approach for systematic design of condition monitoring systems for milling processes," *J Mater Process Technol*, Vol.107, No.1-3, pp. 243-251, 2000.
- [9] A. Matsubara and S. Ibaraki, "Monitoring and Control of Cutting Forces in Machining Processes: A Review," *Int. J. of Automation Technology*, Vol.3, No.4, pp. 445-456, 2009.
- [10] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, and D. Dornfeld, "Advanced Monitoring of Machining Operations," *Annals of the CIRP*, Vol.59, No.2, pp. 717-739, 2010.
- [11] T. Matsumura, M. Shimada, and K. Teramoto, "Predictive Cutting Force Model and Cutting Force Chart for Milling with Cutter Axis Inclination," *Int. J. of Automation Technology*, Vol.7, No.1, pp. 30-38, 2013.
- [12] H. K. Tönshoff, J. P. Wulfsberg, H. J. J. Kals, W. König, and C. A. van Luttervelt, "Development and trends in monitoring and control of machining process," *Annals of the CIRP*, Vol.37, No.2, pp. 611-622, 1988.
- [13] 三輪祐司, 稲崎一郎, 米津栄, "アコースティックエミッションによる工具損傷のインプロセス検出," *日本機械学会論文集(C)*, Vol.47, No.424, pp. 1680-1689, 1981.
- [14] 新井実, 中山一雄, 塚田康夫, 加賀美信明, "放射温度計による切りくず排出状態の監視," *精密工学会誌*, Vol.51, No.4, pp. 784-789, 1985.

- [15] 柳本憲作, 荻野隆, 一宮亮一, "定常な切削音からびびり音への移行と切削状況変化との相関," 日本機械学会論文集(C), Vol.53, No.489, pp. 1108-1112, 1987.
- [16] 藤井義也, 李勇, "主軸電流値による切削状態の監視について," 精密工学会誌, Vol.55, No.7, pp. 1301-1306, 1989.
- [17] 山品元, 奥村進, 熊本博光, "2 台の ITV カメラと画像処理によるドリル損耗の自動測定," 精密工学会誌, Vol.56, No.10, pp. 1841-1846, 1990.
- [18] 新野秀憲, 黄国金, R. Mustafizur, "熱流束センサによる加工状態のインプロセスモニタリング: 工具摩耗の監視," 日本機械学会論文集(C), Vol.57, No.538, pp. 2149-2153, 1991.
- [19] 渡辺敏昭, 樫村幸辰, 日比紀彦, 東野靖道, "工作機械の適応制御に関する研究: 第 1 報, 切削分力比率による工具寿命のインプロセス判定法," 日本機械学会論文集, Vol.43, No.375, pp. 4307-4314, 1977.
- [20] 頼光哲, 齊藤義夫, 伊東誼, ""切削抵抗の動的成分に関する研究: 第 1 報, 切削条件と被削材材質の動的成分に及ぼす影響," 精密機械, Vol.47, No.11, pp. 1391-1398, 1981.
- [21] N. Tounsi, A. Otho, "Dynamic cutting force measuring," Int J Mach Tool Manuf, Vol.40, No.8, pp.1157-1170, 2000.
- [22] R. Teti, I. S. Jawahir, K. Jemielniak, T. Segreto, S. Chen, J. Kossakowska, "Chip form monitoring through advanced processing of cutting force sensor signals," CIRP Ann Manuf Technol, Vol.55, No.1, pp. 75-80, 2006.
- [23] C. Andersson, M. Andersson, and J. -E. Ståhl, "Experimental studies of cutting force variation in face milling," Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol.51, No.1, pp. 67-76, 2011.
- [24] M. Takei, D. Kurihara, S. Katsura and Y. Kakinuma, "Hybrid Control for Machine Tool Table Applying Sensorless Cutting Force Monitoring," Int. J. of Automation Technology, Vol.5, No.4, pp. 587-593, 2011.
- [25] T. Kamigochi, Y. Kakinuma, "Development of an Intelligent Stage with Sensor-Less Cutting Force and Torque Monitoring Function," Int. J. of Automation Technology, Vol.6, No.6, pp.736-741, 2012.
- [26] T. Hida, T. Asano, C. Higashino, M. Kanamaru, J. Kaneko, and Y. Takeuchi, "Development of Cutting Force Prediction Method Using Motion Information from CNC Controller," Int. J. of Automation Technology, Vol.10, No.2, pp. 253-261, 2016.
- [27] Y. Altintas, and S. S. Park, "Dynamic Compensation of Spindle-Integrated Force Sensors," Annals of the CIRP, Vol.53, No.1, pp. 305-308, 2004.
- [28] L. J. Milner, T. J. Roth, "CONDITION MONITORING FOR INDEXABLE CARBIDE END MILL USING ACCELERATION DATA," Mach Sci Technol, Vol.14, pp. 63-80, 2010.

- [29] C. B. Shin, J. S. Ha, W. M. Cho, I. T. Seo, S. G. Y, M. Y. Heo, "Indirect cutting force measurement in the micro end-milling process based on frequency analysis of sensor signals," *J Mech Sci Technol*, Vol.24, pp. 165-168, 2010.
- [30] Z. Lu, M. Wang, W. Dai, J. Sun, "In-process complex machining condition monitoring based on deep forest and process information fusion," *Int J Adv Manuf Technol*, Vol.104, pp. 1953-1966, 2019.
- [31] 碓井雄一, 宮沢伸一, 澤井信重, "工作機械のひずみや振動を利用した切削力の測定," *精密工学会誌*, Vol.63, No.11, pp. 1605-1608, 1997.
- [32] A. Albrecht, S. S. Park, Y. Altintas, and G. Pritschow, "High Frequency Bandwidth Cutting Force Measurement in Milling Using Capacitance Displacement Sensors," *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, Vol.45, No.9, pp. 993-1008, 2005.
- [33] C. Wang, X. Zhang, B. Qiao, X. Chen, and H. Cao, "Milling force identification from acceleration signals using regularization method based on TSVD in peripheral milling," *Procedia CIRP*, Vol.77, pp. 18-21, 2018.
- [34] J. Zhou, X. Mao, H. Liu, B. Li, and Y. Peng, "Prediction of cutting force in milling process using vibration signals of machine tool," *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.99, pp. 965-984, 2018.
- [35] C. Brecher, M. H. Eckel, T. Motschke, M. Fey, A. Eppele, "Estimation of the Virtual Workpiece Quality by the Use of a Spindle-Integrated Process Force Measurement," *CIRP Annals*, Vol.68, pp. 381-384, 2019.
- [36] M. Salehi, P. Albertelli, M. Goletti, F. Ripamonti, G. Tomasini, and M. Monno, "Indirect model based estimation of cutting force and tool tip vibrational behavior in milling machines by sensor fusion," *Procedia CIRP*, Vol.33, pp. 239-244, 2015.
- [37] P. Albertelli, M. Goletti, M. Torta, M. Salehi, and M. Monno, "Model-based broadband estimation of cutting forces and tool vibration in milling through in-process indirect multiple-sensors measurements," *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.82, pp. 779-796, 2016.
- [38] M. Postel, D. Aslan, K. Wegener, and Y. Altintas, "Monitoring of vibrations and cutting forces with spindle mounted vibration sensors," *Annals of the CIRP*, Vol.68, No.1, pp. 413-416, 2019.
- [39] D. Kono, S. Weikert, A. Matsubara, and K. Yamazaki, "Estimation of Dynamic Mechanical Error for Evaluation of Machine Tool Structures," *Int. J. of Automation Technology*, Vol.6, No.2, pp. 147-153, 2012.
- [40] B. Liu, K. T. Miura, and S. Usuki, "Structure Analysis with 3D Hexahedral Meshes Generated by a Label-Driven Subdivision," *Int. J. of Automation Technology*, Vol.12, No.1, pp. 113-122, 2018.
- [41] N. Lanz, D. Spescha, S. Weikert, and K. Wegener, "Efficient Static and Dynamic Modelling of Machine Structures with Large Linear Motions," *Int. J. of Automation Technology*, Vol.12, No.5, pp. 622-630, 2018.

- [42] A. Saadallah, F. Finkeldey, K. Morika and P. Wiederkehr, "Stability prediction in milling processes using a simulation-based Machine Learning approach," *Procedia CIRP*, Vol.72, 1493-1498, 2018.
- [43] E. Traini, G. Bruno, G. D'Antonio, F. Lombardi, "Machine Learning Framework for Predictive Maintenance in Milling," *IFAC PAPERSONLINE*, Vol.52, No.13, pp. 177-182, 2019.
- [44] P. Charalampous, "Prediction of Cutting Forces in Milling Using Machine Learning Algorithms and Finite Element Analysis," *J. of Materials Engineering and Performance*, Vol.30, pp. 2002-2013, 2021.
- [45] G. S. Sestito, G. D. Venter, K. S. B. Ribeiro, A. R. Rodrigues, M. M. da Silva, "In-process chatter detection in micro-milling using acoustic emission via machine learning classifiers," *J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol.120, No.11, pp. 7293-7302, 2022.
- [46] J. Yu, K. Raju, S. H. Jin, Y. Lee, H. K. Lee, "A machine learning approach for ball milling of alumina ceramics," *J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol.123, No.11-12, pp. 4293-4308, 2022.
- [47] N. Komura, K. Matsumoto, S. Igari, T. Ogawa, S. Fujita, and K. Nakamoto, "Computer Aided Process Planning for Rough Machining Based on Machine Learning with Certainty Evaluation of Inferred Results," *Int. J. of Automation Technology*, Vol.17, No.2, pp.120-127, 2023.
- [48] K. Mizuhara, D. Nakamichi, W. Yanagihara, and Y. Kakinuma, "Machine Learning-Based Shape Error Estimation Using the Servomotor Current Generated During Micro-Milling of a Micro-Lens Mold," *Int. J. of Automation Technology*, Vol.17, No.2, pp. 92-102, 2023.
- [49] B. Schmuckera, C. Wang, M. F. Zaeh, and K. Erkorkmaz, "Wide-bandwidth cutting force monitoring via motor current and accelerometer signals," *Annals of the CIRP*, Vol.72, pp. 309-312, 2023.

謝辞

本研究を未熟ながらもこのようにまとめることが出来たのは、周囲の方々の温かいご指導のおかげであり、このようなご支援なしにやり遂げることは不可能でした。特に東京工業大学 未来産業技術研究所 吉岡勇人 特定教授におかれましては、4年間に渡り適切なご指導を賜り、心より感謝を申し上げます。そして、東京工業大学 未来産業技術研究所 進士忠彦 教授におかれましては、急なお願いにも関わらず指導教官をお引き受けいただき、ご指導を賜りまして感謝を申し上げます。また、東京工業大学 未来産業技術研究所 田島真吾 助教には日々の研究における助言や細やかなご配慮をいただき、感謝致します。先生方からは研究に対する基本的な姿勢を始めとして研究遂行に必要な様々な知識や考え方などをご教授いただきまして、大変勉強になりました。今後における大きな指針とし、精進して参りたいと思います。

さらに、ご多忙の中、東京工業大学 工学院 吉野雅彦 教授、東京工業大学 工学院 田中智久 准教授、東京工業大学 工学院 赤坂大樹 准教授、ならびに東京工業大学 工学院 中野寛 准教授につきましては、本研究論文について適切なご指導をいただきました。厚く感謝を申し上げます。

そして、私が本研究に取り組むこと快く受け入れ、最後まで多くのご支援をいただいたベッコフオートメーション株式会社に感謝致します。また、本研究のための実験加工機の準備にご支援いただいた数々の協力企業の方々にも感謝致します。

最後に、このような研究遂行に対して理解いただき、常に支えてくれた両親ならびに家族に感謝致します。

2024 年 1 月

高口 順一