

第 1 章 緒論

1.1 工作機械の歴史

1.1.1 工作機械の発祥から NC の出現まで ^{1-1)~1-3)}

工作機械の発祥は，遺跡から発掘された木鉢や装飾品より推定して，古代オリエント時代(紀元前 1200 年頃)に旋盤や中ぐり盤の原型になる道具が使われていたと推定される。

14 世紀の終わり頃，レオナルド・ダヴィンチは近代工作機械につながるようなアイデアをスケッチに残している。それ以降，精密時計の製作，大砲など武器の製造のため金属加工用工作機械が進化してきた。

18 世紀後半，ジェームズ・ワットが蒸気機関を発明するが，このシリンダー加工には図 1.1 に示すような大砲の中ぐり技術が使われた。そして産業革命を迎え，蒸気機関，紡績機械を大量に製造するために欧米で次々と工作機械が開発され広く使われるようになった。

19 世紀から 20 世紀にかけて，熟練工の技術に頼らぬようカムや倣い装置などを活用した自動加工技術が発達し，自動車および航空機などの少品種大量生産を可能にした。

20 世紀中頃，後述する NC(数値制御)が開発され，ツーリングをソフトウェア化することにより多品種少量生産から大量生産までの自動化を可能とする革命的な技術となった。

1.1.2 フライス盤の歴史と CAD/CAM システム ^{1-1)~1-4)}

19 世紀の初め，アメリカで旋盤の主軸にフライスカッタをつけ部品加工を行ったのがフライス盤の始まりといわれている。やがて横型フライスが開発され，19 世紀後半，南北戦

争の際、武器製造に大量の横フライス盤が使われた。一方、縦型のフライス盤は 19 世紀中頃イギリスで開発された。

20 世紀になり、フライス盤の自動化に関しては航空産業では機体外形状(曲面)を作り出すため倣い加工が主流であった。しかしこれにはモデルが必要であり、モデルと倣い制御の累積誤差も課題であった。

1952 年、MIT はアメリカ空軍より複雑形状の航空機部品を削るための研究を委託され、各軸をパルスで制御する 3 軸 NC フライス盤を開発した。

1958 年、カーネイ&トレッカーが ATC (Automatic Tool Changer), AWC (Automatic Work Changer), 割り出し台を付けた NC 機ミルウォークーマチックを完成させ(図 1.2), これがいわゆるマシニングセンタの始まりとなった。

1970 年代、数値制御技術は設計の自動化システムと結合され(CAD/CAM/CAE), 設計から製造まで一貫したシステムの構築が航空機産業から始まった。

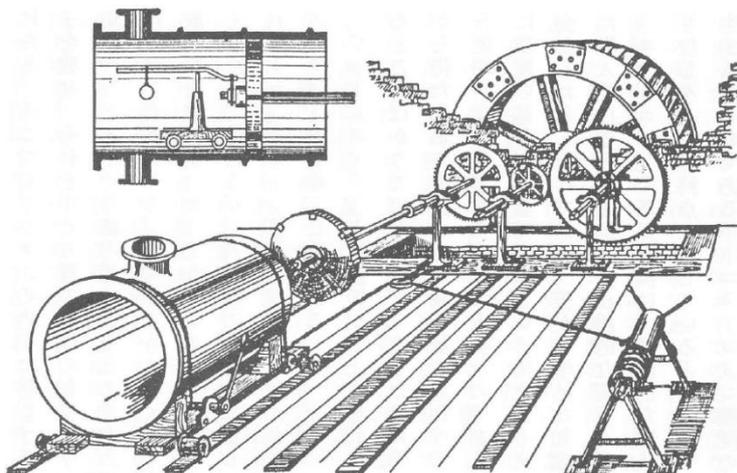


図 1.1 ワット蒸気機関に貢献したスミートンが製作した初期の中ぐり盤¹⁻¹⁾

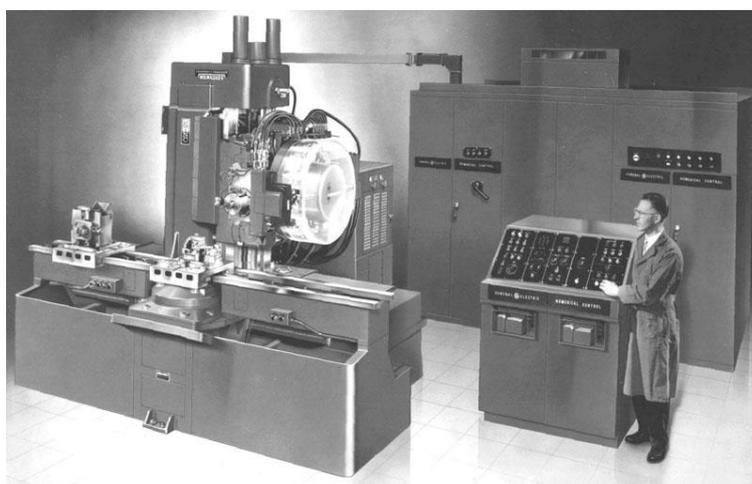


図 1.2 カーネイ&トレッカー社の NC 機ミルウォークーマチック¹⁻⁴⁾

1.1.3 日本の工作機械^{1-2)~1-5)}

鎖国していた日本にとって工作機械近代化の契機となったのは 19 世紀中頃の黒船来航であった。

幕府は日本の工業技術力の遅れを痛感し、造船および兵器製造を奨励した。次々と工作機械を欧米から輸入し、これらの多くはマザーマシンとなり工作機械の国産化が始まった。そして軍需産業の拡大とともに工作機械の国産化が加速された。

戦後、工作機械製造工場は廃墟と化した。日本は米国で開発された NC の技術の実用化にいち早く取り組んだ。1960 年頃には NC 機を実生産に供し初め、1970 年代には日本の NC 制御技術が世界の市場で認められるようになり、1982 年には米国を抜いて世界一の工作機械生産国となった。図 1.3 はアイコクアルファ(株)で 1975 年に導入した同時 5 軸マシニングセンタである。



図 1.3 アイコクアルファ(株)で 1975 年に初めて導入した同時 5 軸マシニングセンタ

その後、日本の工作機械は生産量では図 1.4 に示すように 2009 年より中国に首位の座を奪われたが、NC 制御機とマシニングセンタなどの機能面では世界トップレベルを維持している。

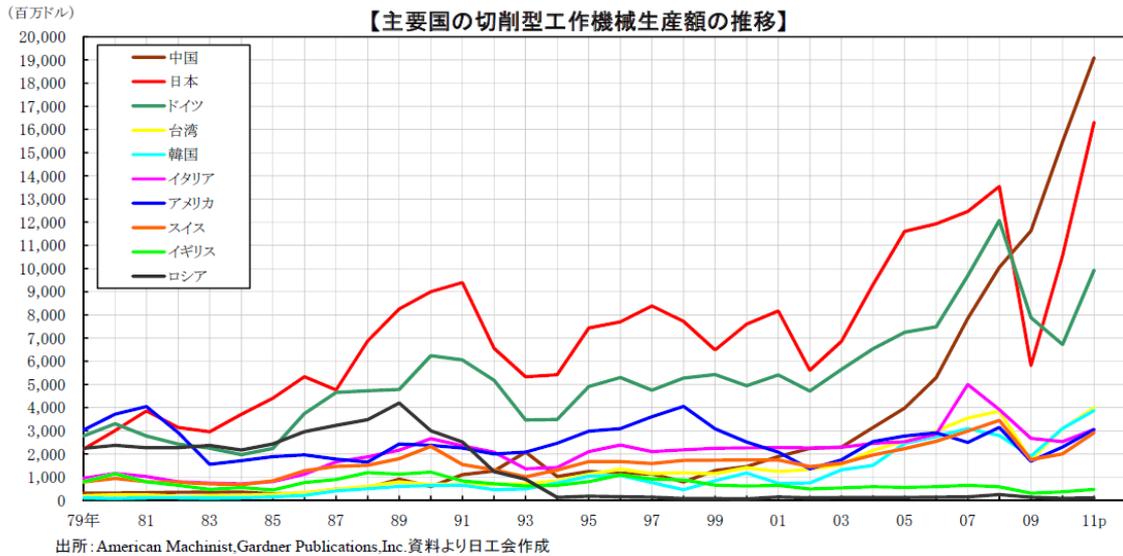


図 1.4 国別工作機械 生産額の推移 (日本工作機械工業会)

今後、日本が質的、技術的にこの業界をリードして行くには、更なる無人化、自動化につながるような工作機械のインテリジェント化(多軸機の高付加価値化)が差別化技術の一つとなるだろう。

1.2 機械加工の傾向

1.2.1 航空機部品加工の例 ^{1-6)~1-14)}

1950年代にNCが誕生してから、機械加工技術は大きく進化してきた。中でも航空機産業がNCの利用技術をリードしてきたといえる。ここで航空機機体部品を例にNC加工の現場を考察してみる。

数十年前、航空機の機体構造は多くの板金部品をリベットで結合して組み立てられる構造であった。しかし航空機機体がより軽量、より高強度、より高精度を求めるようになったため、数点ないし数十点の板金部品をリベットで結合する組立構造体から、これらを集積して図 1.5 に示すように無垢の材料から一体構造体として削り出す機械加工部品へと変化してきた。このため部品は大型化し、形状は複雑となり、一般に素材の90%以上が切屑になる場合が多い。その結果、航空機部品加工用には大型の高速5軸マシニングセンタが多用されるようになった。

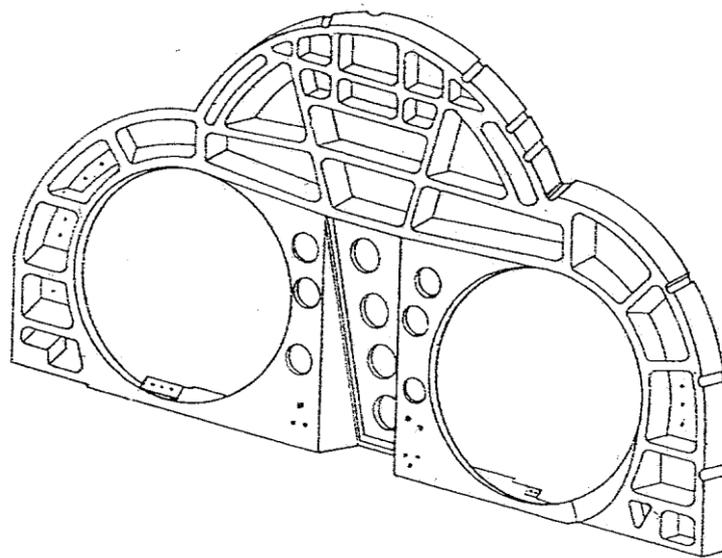


図 1.5 航空機一体構造部品の例 (F-15 バルクヘッド)

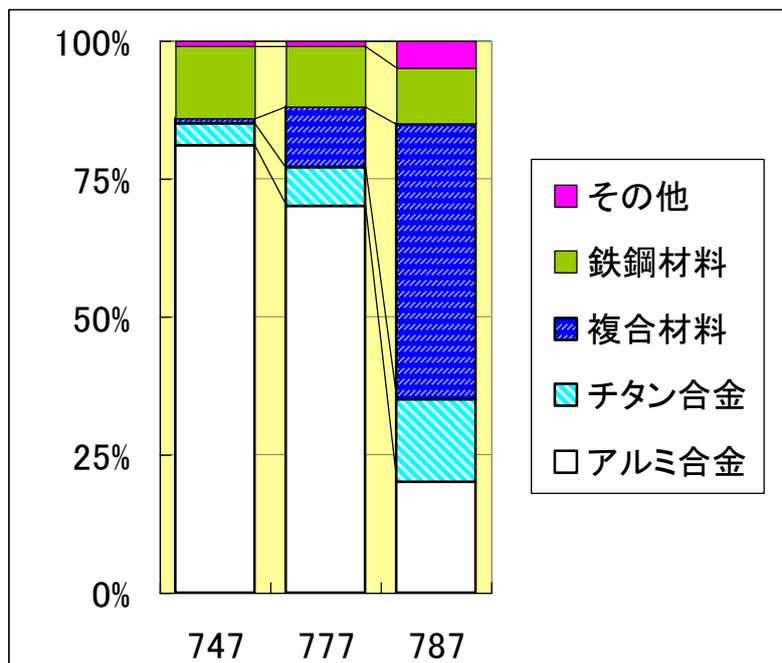


図 1.6 航空機機体材料の変化の例 (ボーイング)

また機体材料は図 1.6 に示すようにアルミ合金が主体であるが、比強度が高く、かつ熱膨張率が低いため複合材との組み合わせに有利なチタニウム合金が増大してきた。

一方コストに関しては、図 1.7 に示すように東西冷戦の終結とともに官需航空機の需要は減少し、民間機の需要が増えてきた。

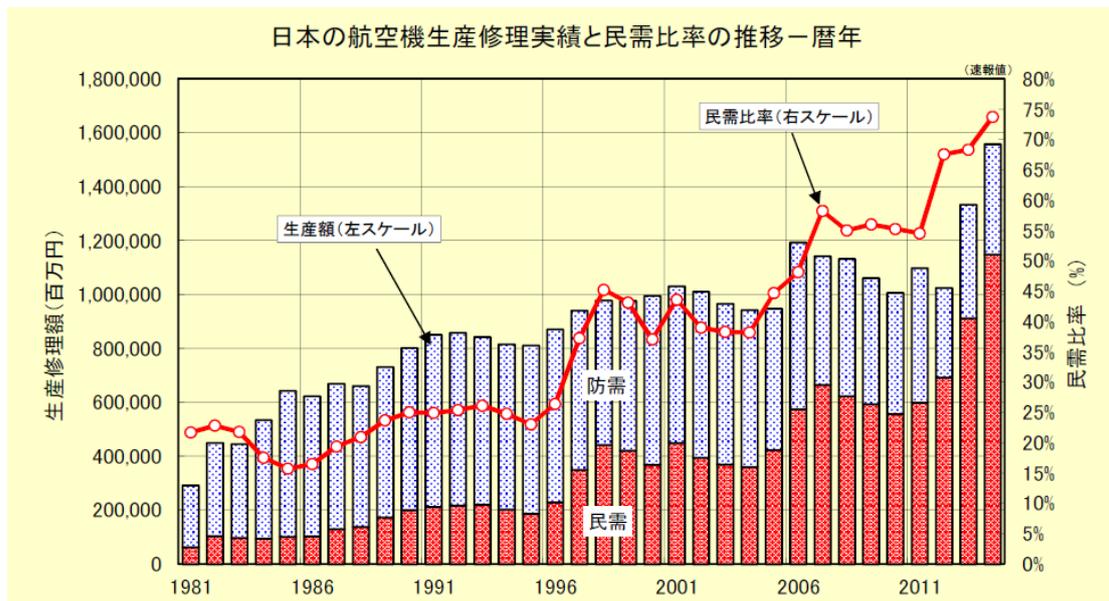


図 1.7 日本の航空機生産 官需/民需 比率 (日本航空機開発協会)

大型民間機(約 100 席以上)については米国ボーイング社(米国)とエアバス社(欧州), 中型民間機(約 100 席未満)についてはボンバルディア社(カナダ)とエンブライエル社(ブラジル)の競争が激化している. 図 1.8 にボーイング対エアバスの売上推移が示されている. 今後, 中型民間機に MRJ(日本)が加わり, コストダウンの圧力がさらに大きくなるだろう.

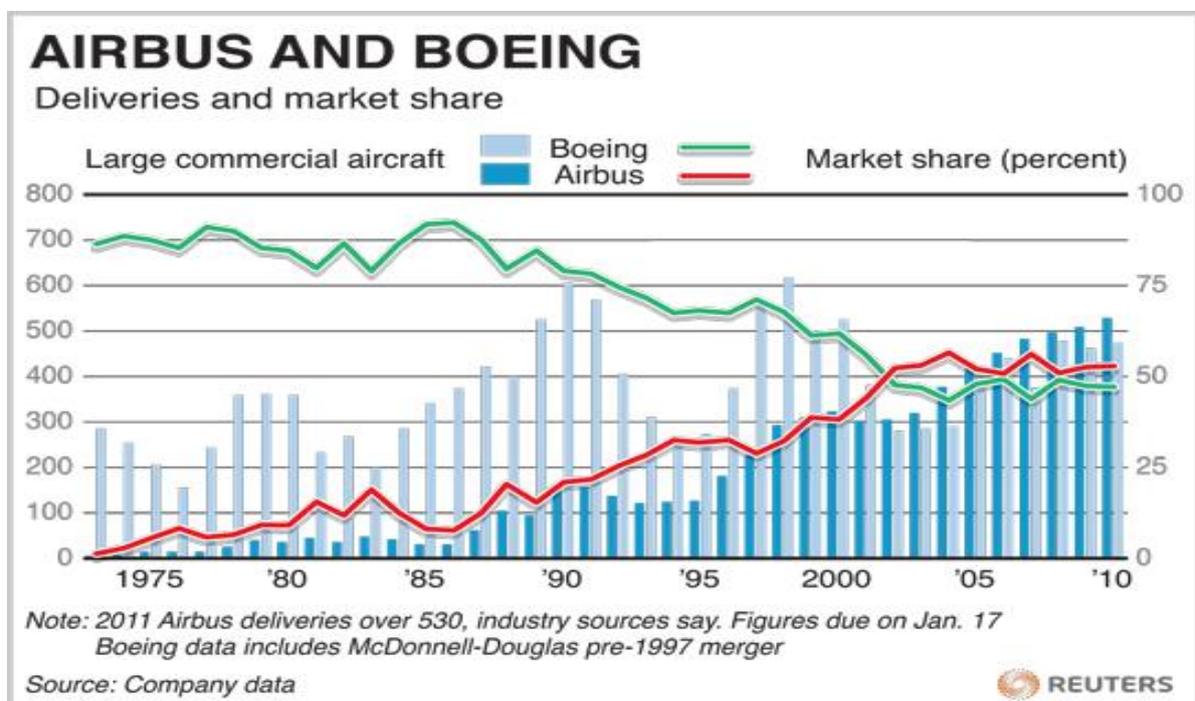


図 1.8 ボーイング 対 エアバス 売上推移(Reuters)

このため、これらの機械部品加工に際しては剛性のある重量の大きい大型 5 軸マシンニングセンタが、高速、高馬力で機械の能力いっぱいの切削を行うようになった。さらに生産性を上げるための図 1.9 に示すように多頭(Multi Head), 多工具 (Multi Cutter) による複数個同時加工, 複合機加工も行なわれている。



図 1.9 大型多頭 5 軸機の例 (シンシナチ 3 頭 5 軸プロファイラ)

1.2.2 産業機器部品加工の例¹⁻⁸⁾

航空機部品の事例について述べたが、自動車、一般産業機器についても図 1.10 に示すように部品の一体化、部品点数の削減、軽量化、高付加価値化が進んでおり、基本的には機械加工の傾向はどの業種も同じと思われる。

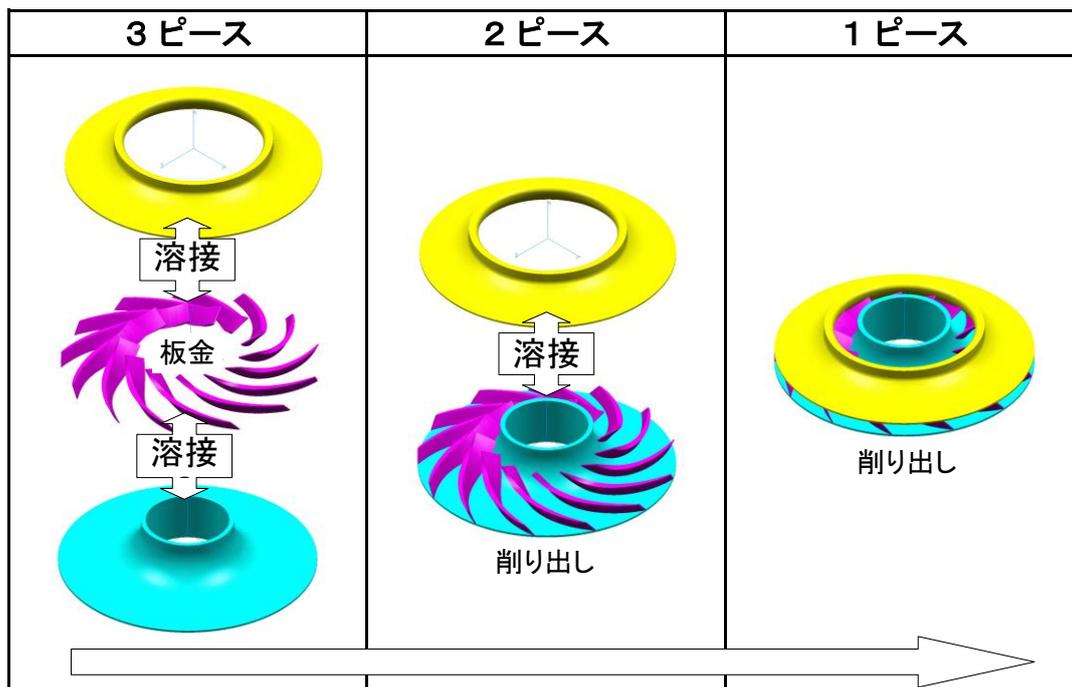


図 1.10 産業機器部品一体化の例 (コンプレッサホイール)

1.3 工作機械の安全運転に関する研究開発の狙い

1.3.1 NC 加工の危険性と安全対策¹⁻¹⁵⁾

しかしながら、このような高機能の大型 5 軸マシニングセンタを使う現場では、安全面での課題が増大し、NC プログラム、オペレータの精神的負担は大きい。その一つは高速で動く想定しにくい 5 軸動作中の機械の衝突(機械，工具，治具/ワークの間)であり、もう一つは高加速，高速切削中に起こりやすい過負荷による工具の折損，飛散などである。

機械が衝突を起こすと修理に多大な費用と時間を要し，ワークがスクラップになる場合もあり，ひいては顧客にも迷惑をかける。

また過負荷切削については，工具の飛散によるオペレータの負傷の可能性や，チタニウム合金を油性切削油にて切削の場合は火災発生のある恐れがある。その結果，企業として大きな時間的，経済的なリスクを負うことになる。

「NC 機械加工の安全運転」を要因図に纏めると図 1.11 のようになる。図の下側が従来から行ってきた安全対策であり，図の上側が近年問題になり，本研究で取り組んでいる課題である。

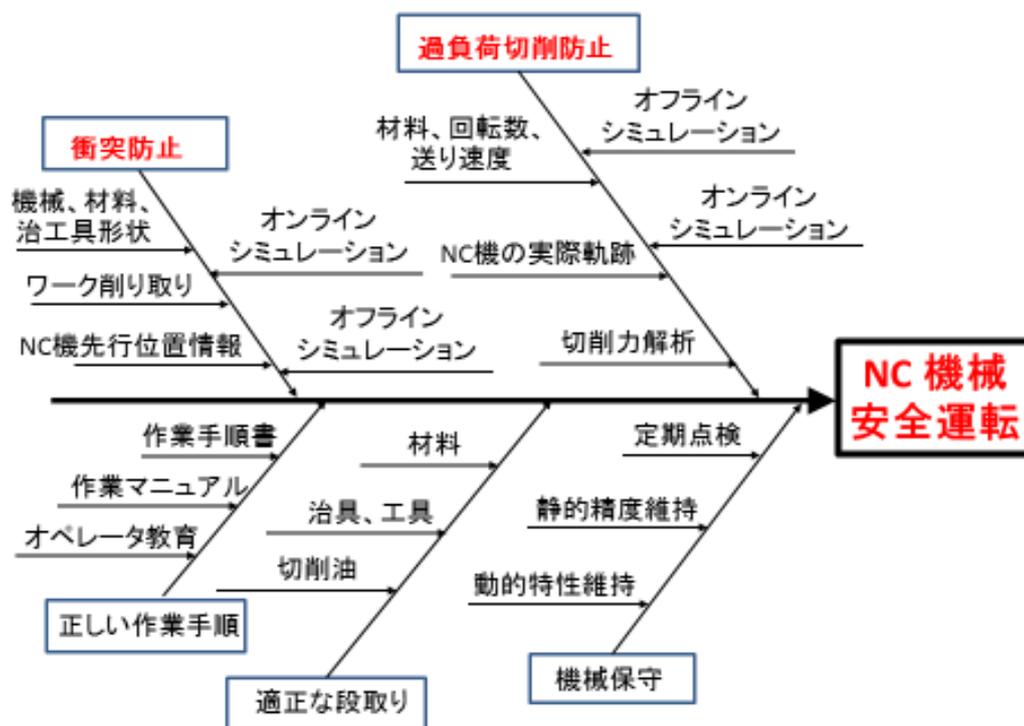


図 1.11 NC 機械 安全運転要因図

1.3.2 研究目的

本研究は 5 軸マシニングセンタなどにおいて，従来行ってきた安全対策に加えて，シミュレーション技術を活用してインテリジェント化を図る。つまり「衝突防止」，「過負荷切削防止」を付加することでより安全な加工システムを実現し，更なる自動化，無人化を狙うのが研究の目的である。

ただし，過負荷切削の防止については，安全対策だけでなくシミュレーションで負荷が過少と判断した場合はフィードを上げ，切削能力を向上させる制御を行って生産性を向上させる。

1.4 本論文の構成

本論文は本章を含めて 5 章より構成されている。その構成は図 1.12 に示す通りである。また、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、工作機械の発祥と NC の出現までの工作機械の歴史、さらには日本の工作機械がどのように生まれたのかについても概観する。また、機械加工の傾向を、航空機機体部品と産業機器部品の加工を例にとり説明し、本研究の目的である安全運転の必要性について述べる。

第 2 章では、工作機械の安全運転の研究開発に至るまでの背景についてまとめる。特に、加工中に発生しうる危険を防ぐための安全運転のシステム(オペレータの予期せぬ衝突や、過負荷切削により発生しうる工具折損が引き起こす危険などを防止する方策)の必要性を説明する。さらに、これらの開発に欠かすことのできない加工シミュレーション技術を今までの開発遷移と共にどのようなシミュレーション手法があるのかを概説する。そして、本研究テーマである加工中の安全運転に関する現状分析と課題を述べ、それらを解決するための開発コンセプトについて述べる。

第 3 章では、第 2 章で提案した開発コンセプトに基づいてオンライン・リアルタイム衝突防止システムを構築する。このシステムに必要な開発技術要素、実用化のための手法をまとめ、実験と結果について説明する。そして、このオンライン・リアルタイム衝突防止システムが同時 3 軸加工では有効ではあるが、同時 5 軸加工に関してはまだ課題が残るため、実現化に必要な将来技術について述べる。

第 4 章では、現場にて危険を脅かすもう一つの要因である予期せぬ過負荷切削による工具の折損や飛散、最悪時には火災などが発生する危険を未然に防ぐためのより正確な切削負荷を評価するシステムについて概説する。従来の切削負荷検証と同じオフライン型だが、従来の NC データをもとに切削負荷を評価する手法とは異なり、実際の工具運動情報を用いることでより正確な切削負荷を予測できるシステムを提案する。この開発したシステムの概要・開発技術要素を説明し、実験と結果について述べ、さらに本実験で得られた結果をもとに今後の課題と展望について考察する。

第 5 章では、本研究により得られた成果をまとめ、今後の研究課題と展望について説明する。

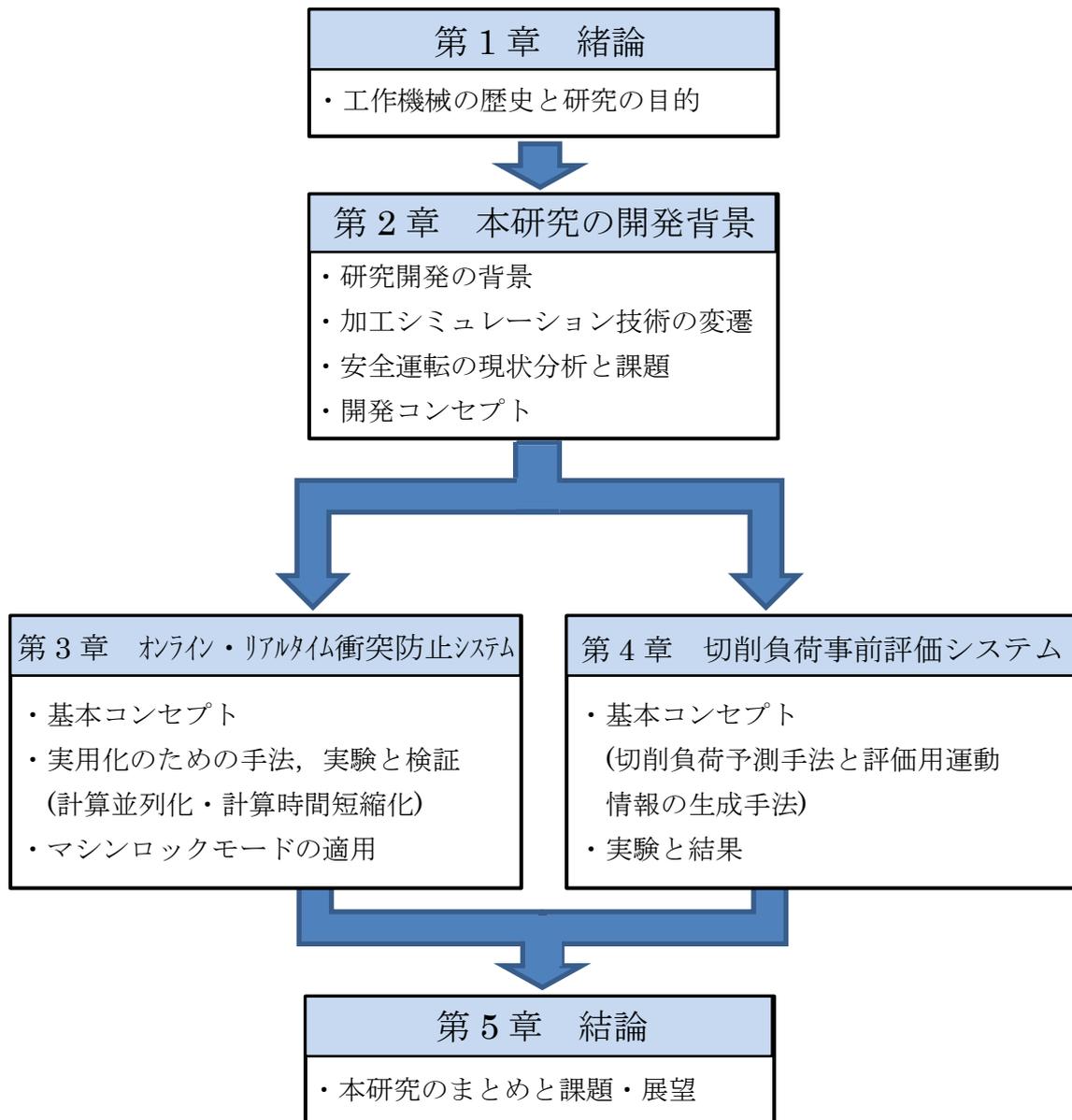


図 1.12 本論文のフローチャート

【1章の参考文献】

- 1-1) L.T.C.Rolt, 磯田浩 訳, 工作機械の歴史, 平凡社, 1989.
- 1-2) 日本機械学会編, 新・機械技術史, 丸善, 2010.
- 1-3) 日本工作機械工業会, 工作機械の歴史 <http://www.jmtba.or.jp/machine/history>.
- 1-4) CNC Machine Overview and Computer Numerical Control History, <http://www.cnccookbook.com/CCNCMachine.htm>
- 1-5) 日本工作機械工業会, 世界の工作機械の生産状況 http://www.meti.go.jp/topic/downloadfiles/120727a07_02j.pdf10.
- 1-6) 竹内芳美, 多軸・複合・高機能・超精密加工機の最新の動向について, 精密工学会会誌, 2012-9.
- 1-7) 竹内芳美, 多軸・複合切削加工, 日刊工業新聞社, 2008年.
- 1-8) 金丸允昭, 航空機部品の機械加工技術と自動車部品への波及, 機械と工具, 2007-5, pp.10-16.
- 1-9) 金丸允昭, ユーザより見た同時5軸加工の事例と課題, 第12回国際工作機械技術者会議, 2006-5-4.
- 1-10) 金丸允昭, 複雑形状部品の同時5軸NC加工とその課題, 日本機械学会講習会「5軸マシニングセンタの有効利用」, 2002-3.
- 1-11) 金丸允昭, ボーイング777国際共同開発, 日本機械学会誌, 1996-7.
- 1-12) 日本航空機開発協会, 日本の航空機生産修理実績と民需比率の推移 http://www.jadc.jp/files/topics/45_ext_01_0.pdf.
- 1-13) Reuters, Airbus and Boeing, <http://blog.thomsonreuters.com/wp-content/uploads/2012/01/AirbusBoeingGraphic.jpg>.
- 1-14) Fives, Cincinnati WR Profiler, <http://metal-cutting-composites.fivesgroup.com/products/milling/profilers/multi-spindle/cincinnati-profiler/cincinnati-wr-profiler.html>.
- 1-15) M.Kanamaru, N.Sakai, A.Goto, T.Hida, Development of Simulation Technology for 5-Axis Machines-Verification of Material Removal Model and Collision Avoidance-, Int. J. of Automation Technology, Vol.1, No.2, 2007, pp.141-146.

第2章 工作機械の安全運転に関する開発背景とコンセプト

2.1 はじめに

本章においては、工作機械の安全運転に関する開発に至るまでの背景について述べる。加工現場における危険は無数にあるが、本論文では加工中に発生しうる危険を排除するための安全加工、特に予期せぬ衝突を防止するためのシステムと、過負荷切削により工具折損が引き起こす危険を予防するシステムについて概説する。この開発に欠かすことのできない加工シミュレーション技術の開発変遷、それに伴うシミュレーション手法を説明して、加工中の安全対策に関する現状分析および、考えられる課題を考察する。最後にこれらの課題を解決するための工作機械の安全運転の開発コンセプトについて述べる。

2.2 研究開発の背景

2.2.1 工作機械とマシニングセンタ

現在我々の身の回りに存在している様々な製品やその製品を構成している部品、また各種工業製品の殆どは工作機械を使用して製造されている。工作機械は材料を加工して様々な形の製品に作り上げる機械であるが、その中には旋盤を使う旋削加工、ボール盤を使うドリル加工、フライス盤を使うフライス加工、ブローチ盤を使うブローチ加工、研削盤を使う研削加工など様々な種類や加工方法がある。戦後数値制御技術開発が活発に行われ、世界で初めて1952年にMITがNC工作機械を開発してから各種加工方法に数値制御技術が取り入れられ、今まで目覚ましい発展を遂げてきた。それぞれの加工方法でNC化が進んできたと同時に、1つの機械で様々な加工を遂行しようとするマシニングセンタも開発され、普及してきた。マシニングセンタとは「主として回転工具を使用し、工具の自動交換

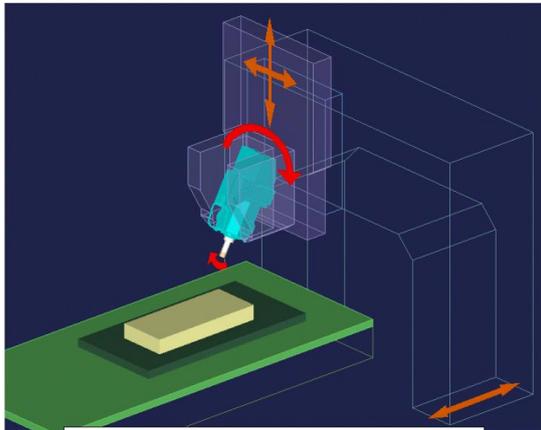
装置を備え、工作物の取り付け替えなしに多種類加工を施す数値制御工作機械」^{2-1), 2-5)}と JIS B0105 に定義されている。

2.2.2 5 軸加工

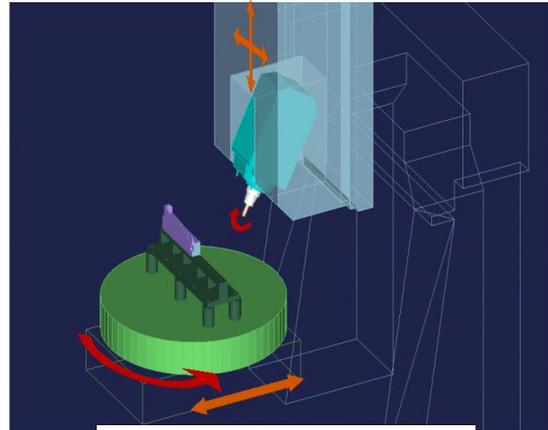
マシニングセンタには必ず X, Y, Z, の直交座標系による 3 軸またはそれ以上の移動軸をもつが、1960 年代から世界中で開発されてきた色々なマシニングセンタは実現場にもしだいに使用され、特に直交 3 軸(X, Y, Z 軸)に加えて回転 2 軸(A, B, C 軸など)を制御して行う 5 軸加工機は 1970 年代から我が国でもまだ僅かではあったが使用され始めた(アイコクアルファ(株)では国産初の同時 5 軸マシニングセンタである「OM3」(新潟サンドストランド製)を 1975 年に全国でも先駆けて導入した^{2-3), 2-4)}。それからこの 40 年の間に飛躍的な技術発展を遂げ、初めは航空宇宙のような限られた分野でしか使用されなかったが、近年では 5 軸加工機は自動車、金型産業といった分野にまで波及し、使用されるようになった。

5 軸加工機は 5 軸を制御することで空間の任意の点を任意の方向から加工できるが、この動作を連続的に制御する同時 5 軸加工は、その特性よりねじれ面や複雑な曲面のような形状まで滑らかに加工することが可能となる。一般に 5 軸加工用の NC データは CAM が部品座標系で計算した CL データ(加工に必要な工具先端位置と工具軸ベクトル)をポストプロセスして、G コードで表現される。5 軸加工機には図 2.1 に示すような回転軸をスピンドル側にするか、テーブル側にするか、または回転軸の作動範囲をどうするかによって様々な形態の機械が存在する。加工対象部品によりどのタイプの機械を選択するかは生産効率に影響するため非常に重要である^{2-2), 2-3), 2-5)}。

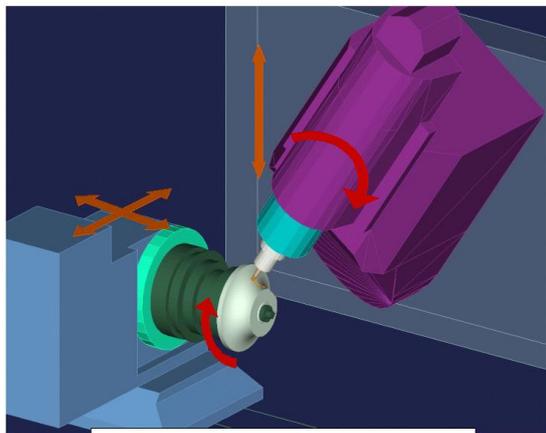
5 軸加工機のように 5 軸を同時に制御する動作は工程数の削減や、取り付け具の簡素化に繋がり生産効率が上がるが、一方では制御軸が多いため、工具長さ、工具経路、工具姿勢など加工戦略上の選択肢が多く、NC データ作成の難易度が高い。また、この複雑さゆえに NC プログラマが予測しがたい機械動作がしばしば発生し、製品や治具・工具・機械などとの衝突が発生する。いったん衝突が発生すると機械や治具の修理に多くの費用と期間が生じ、生産計画にも影響をもたらすため、生産現場では大きな問題となる。これらを打開するために図 2.2 に示すように昔は試し削りといった事前加工テストを行っていた²⁻²⁾が、毎回この方法を行うと、人・時間・機械をその都度このテストに当てる必要が生じ、生産上問題となったため、それに代わるシミュレーション技術が発展してきた。加工前のシミュレーション技術により実生産現場では大幅な時間とコストの削減に繋がった。



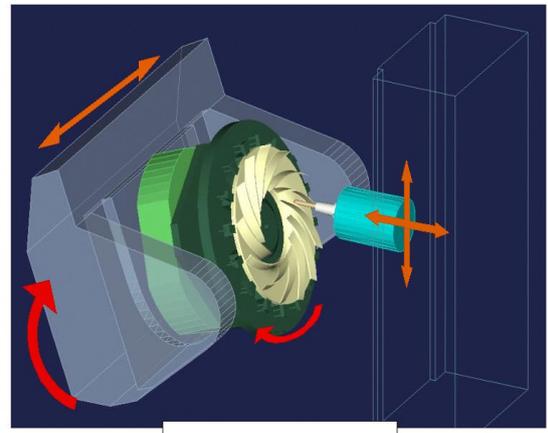
ユニバーサル ヘッドチルト型



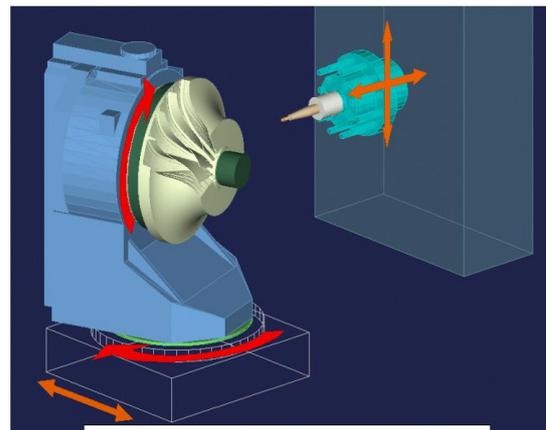
テーブル/ヘッドチルト型



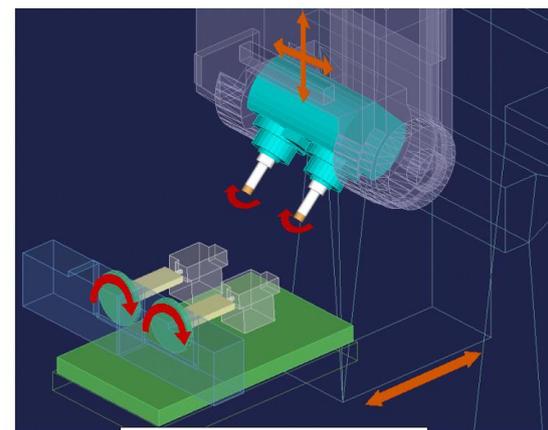
テーブル/ヘッドチルト型
(工具先端点固定)



トラニオン型



テーブル オン テーブル型



マルチスピンドル型

図 2.1 様々な種類の 5 軸加工機

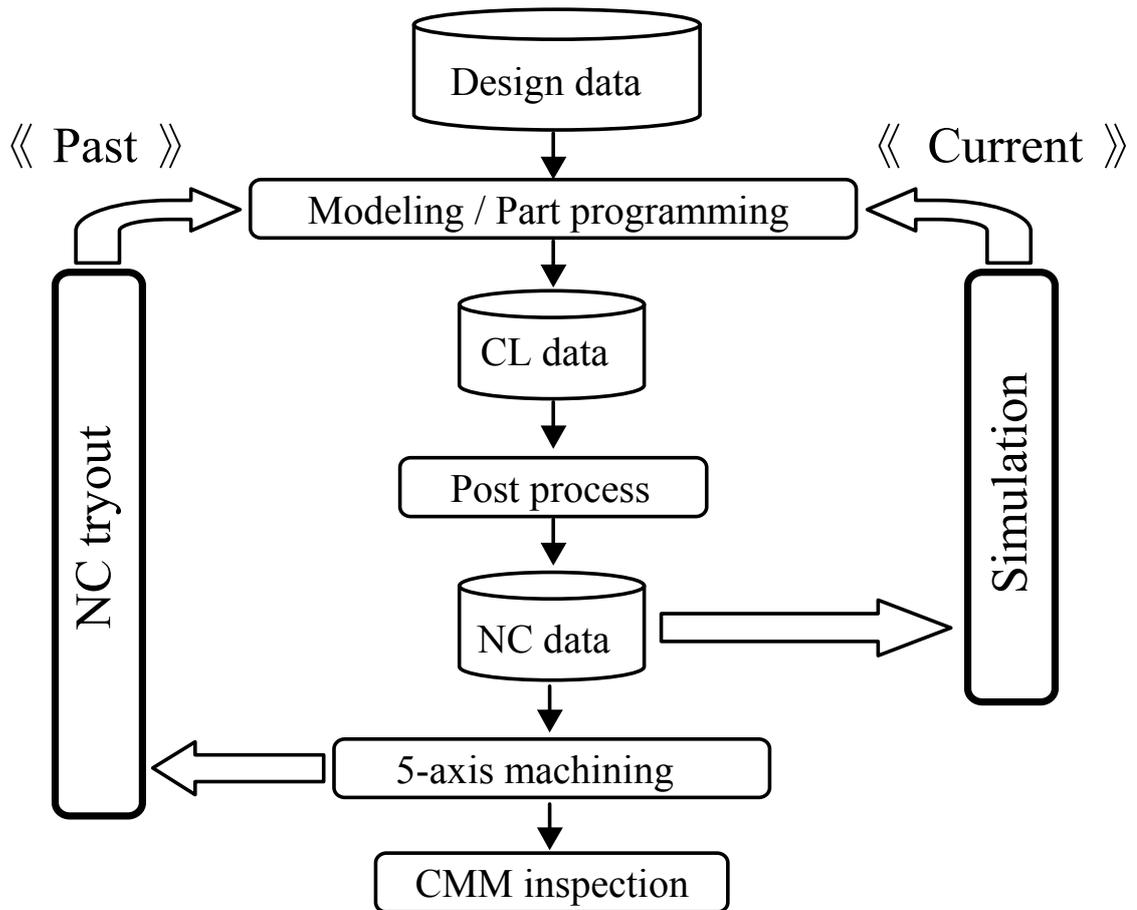


図 2.2 5 軸加工製品の生産工程(過去と現在)

2.2.3 切削力予測による高効率加工

生産現場では安全に加工を行うことが生産効率を上げ、結果的に人・時間・費用といったあらゆる面でメリットが生じるが、ただ単に安全に加工することだけを目指しては顧客要求の納期・価格といった面で競争力が生まれない。したがって、安全に加えていかに最適に加工するかということも重要になってくる。例えば、必要以上に安全を考慮して切削送りを遅くしては加工時間が長くなるだけで近年の短納期・価格競争力に対応することが難しくなる。そこで正確な切削力を予測して適切な切削力に送り速度などを制御することが必要になると考えられる。図 2.3 は近年の機械加工の動向と対策を表したものであるが、最終的には突発的な衝突を防止するシステムといかに実際の切削力に近い切削力をシミュレーションで把握するか、という 2 つの対策がこれからの高効率加工においては重要になると考えられる。

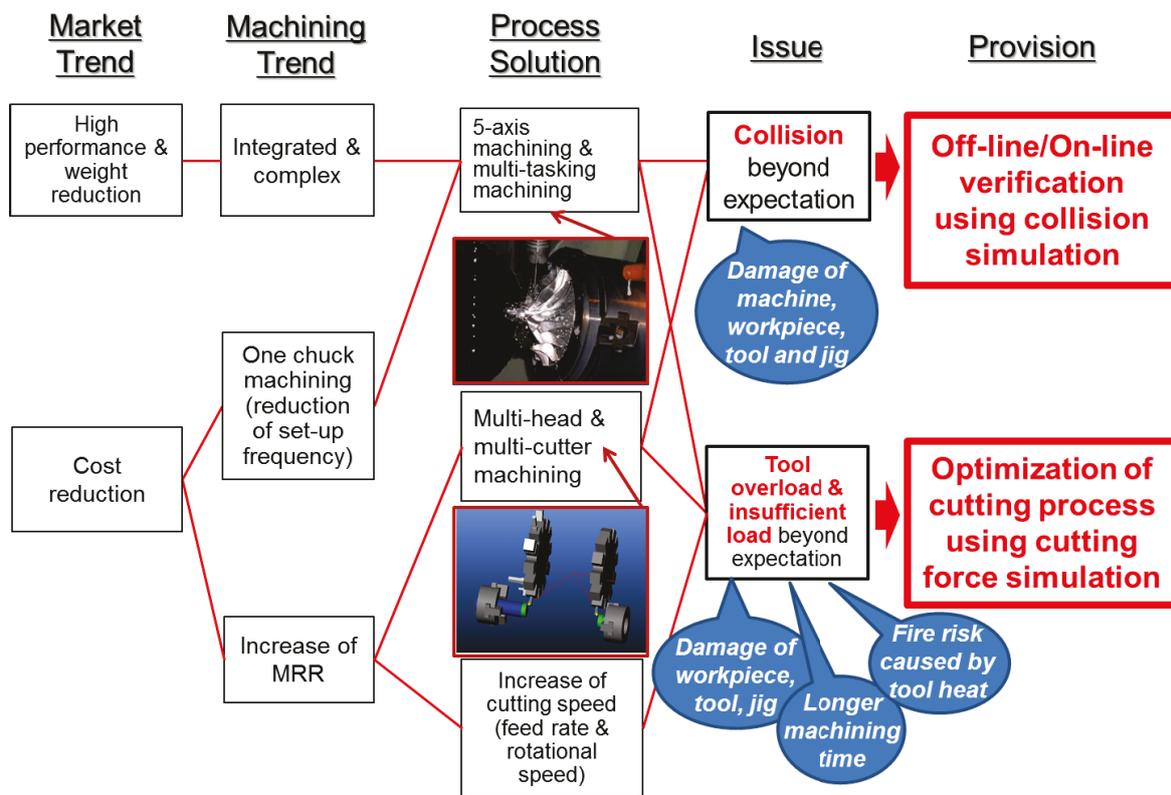
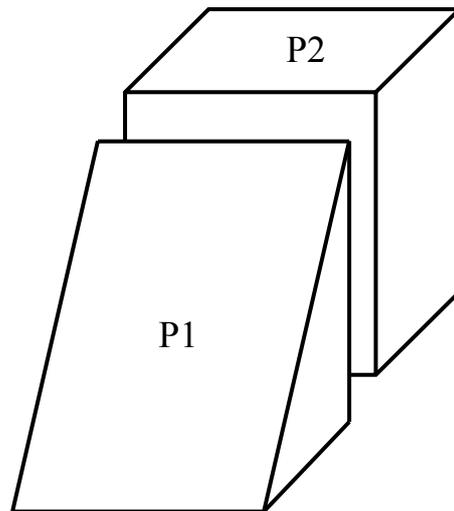
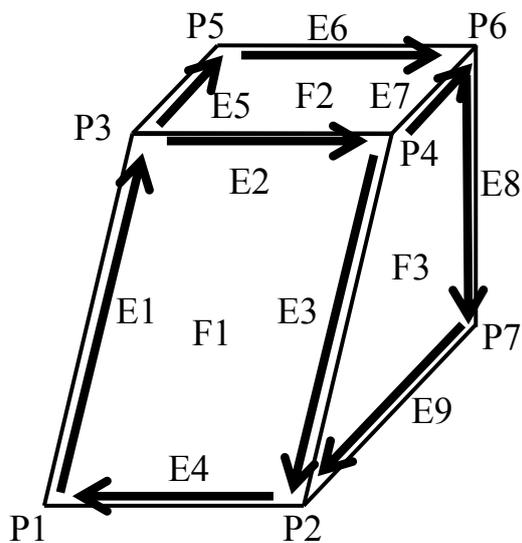


図 2.3 近年の機械加工の動向と対策

2.3 加工シミュレーション技術の変遷

2.3.1 機械動作・切削形状シミュレーションの表現手法^{2-6)~2-10)}

機械動作を事前にシミュレーションするには Boundary Representations(B-reps)や Constructive Solid Geometry(CSG)といったソリッドモデルが主として使われる。これらの手法は主に CAD で 3 次元形状を表現するのに使用されている。B-reps は Braid が 1973 年に提唱した手法で境界表現法とも呼ばれるもので、図 2.4(a)に示すような多面体を頂点、稜線、面とそれらの接続関係をデータベースとして保存するもので、データ構造が複雑であるためシミュレーション時間に要する時間が大きくなる傾向があるが、加工過程での形状の変更が容易であるといった長所をもつ。CSG は沖野が 1973 年に提唱した手法で図 2.4(b)に示すような多面体をプリミティブの基本形状として定義し、それらの基本形状を集合演算させることで 3 次元形状を表現するもので、B-reps と同様に複雑な形状変更の過程において処理時間が長くなる傾向があるが、形状精度が良く、形状変更も容易であるといった長所をもつ。



Point Table

	X	Y	Z
P1⇒	0	0	0
P2⇒	8	0	0

Edge Table

	Start	End
E1⇒	P1	P3
E2⇒	P3	P4

Face Table

	Edge
F1⇒	E1, E2, E3, E4
F2⇒	E2, E5, E6, E7

P1 : Trigonal primitive

P2 : Rectangular primitive

(a) B-reps 表現方法

(b) CSG 表現方法

図 2.4 ソリッドモデルの代表的表現手法

その他のソリッドモデルの表現手法としては、Voxel model や Octree model, Z-mapping といった離散モデル(Decomposition model)があるが、これらは空間であらかじめ定められた形状を微小な集合体で表した手法で、加工過程における形状の変更が容易(工具経路生成が簡単、形状処理が簡単)で計算も高速といった長所をもつためこれらの手法は主に CAM や切削形状シミュレーションに適用される^{2-11), 2-12)}。しかし、形状が近似的にしか表現できないため、幾何形状の精度が劣り、必要に応じた精度を得るには時として膨大な情報量が必要となる。これらの手法は近年では医療データの可視化技術としても多く使われている。

2.3.2 機械加工シミュレーション技術の変遷

1980 年代の終わり頃、5 軸加工機は我が国にはまだ十数台程度しかなかった。前述したように 5 軸加工機は航空宇宙での複雑な形状を求められるごく限られた分野でしか使用されなかったため、実際に加工してみないとどういった形状になるのかわからない世界で一品一品機械加工していた。当時は多大な時間をかけて機械加工をしていたが、プログラマが組んだ NC プログラム通りに機械が動くと思っても工具や治具によっては実際には予期

せぬ位置で衝突する事があった。したがってオペレータは常に機械に張り付いて送り速度や位置などを確認しながら切削加工をする必要があった。また実際に加工する前に発泡スチロールなどを使って試し削りをする事も度々あった。

しかし、それでも予期せぬ衝突が起きると製品の賠償、機械修理の費用、さらには1ヶ月間の機械修理を余儀なくされ、納入先に多大な迷惑をかけることがあった²⁻²⁾。このような問題に直面していたユーザーは当時まだ世の中にユーザーが要求するようなシミュレーションソフトウェアが存在していなかったため、独自で機械動作シミュレーション開発をするようになった。図 2.5 は機械加工シミュレーションの開発ロードマップ(アイコクアルファ(株)の事例)を表したものであるが、1980年代終わり頃から B-reps や CSG のようなソリッドモデルベースで機械動作のシミュレーションをするソフトウェアが開発され、これにより機械、治具、ワークなどの干渉をチェックすることが可能となった(図 2.6 参照)。さらに 1990 年代中頃から一般的にワークを固定して工具を位置座標と工具ベクトルにて動作させるピクセルベースのアルゴリズム(Z バッファ法)を利用した切削形状シミュレーション(図 2.7 参照)の開発も盛んに行われた。

しかし、当時のシミュレーションは一般的にそれぞれ別々にシミュレーションさせるもので、2つのシミュレーションを利用するうえで以下の問題点があった²⁻²⁾。

(1) 機械動作シミュレーション

- ・ 切削と機械動作シミュレーションが同時に行われていないため、削り取られたワークと機械構造物との干渉チェックができない(図 2.6 に示すように、当時の機械動作シミュレーションは完成形状のワークをクランプした状態で実際に工具を動かして機械、治具、工具間の干渉がないかをチェック)。

(2) 切削形状シミュレーション

- ・ 一般にピクセルベースの描画手法が採用されていたため、シミュレーション中にワーク形状を平行移動、回転、拡大縮小といったビュー変化を自由自在に行うことができず、死角部分の確認が難しい。
- ・ 切削形状精度が画面解像度に依存するため、ワークの要求精度、形状により拡大、縮小のやり直し計算が必要となる。

切削形状シミュレーションの課題は、ピクセルからソリッド技術を利用することで、また機械動作シミュレーションの課題は、切削形状シミュレーションと機械動作シミュレーションを1画面同時に検証することで改善できることがわかり、1990年代後半から2000年代初期にかけて切削形状シミュレーションと機械動作シミュレーションの統合型製品が開発された。この統合型シミュレーションの代表例として2002年に開発されたアイコクアルファ(株)の「G-Navi」製品があげられる。

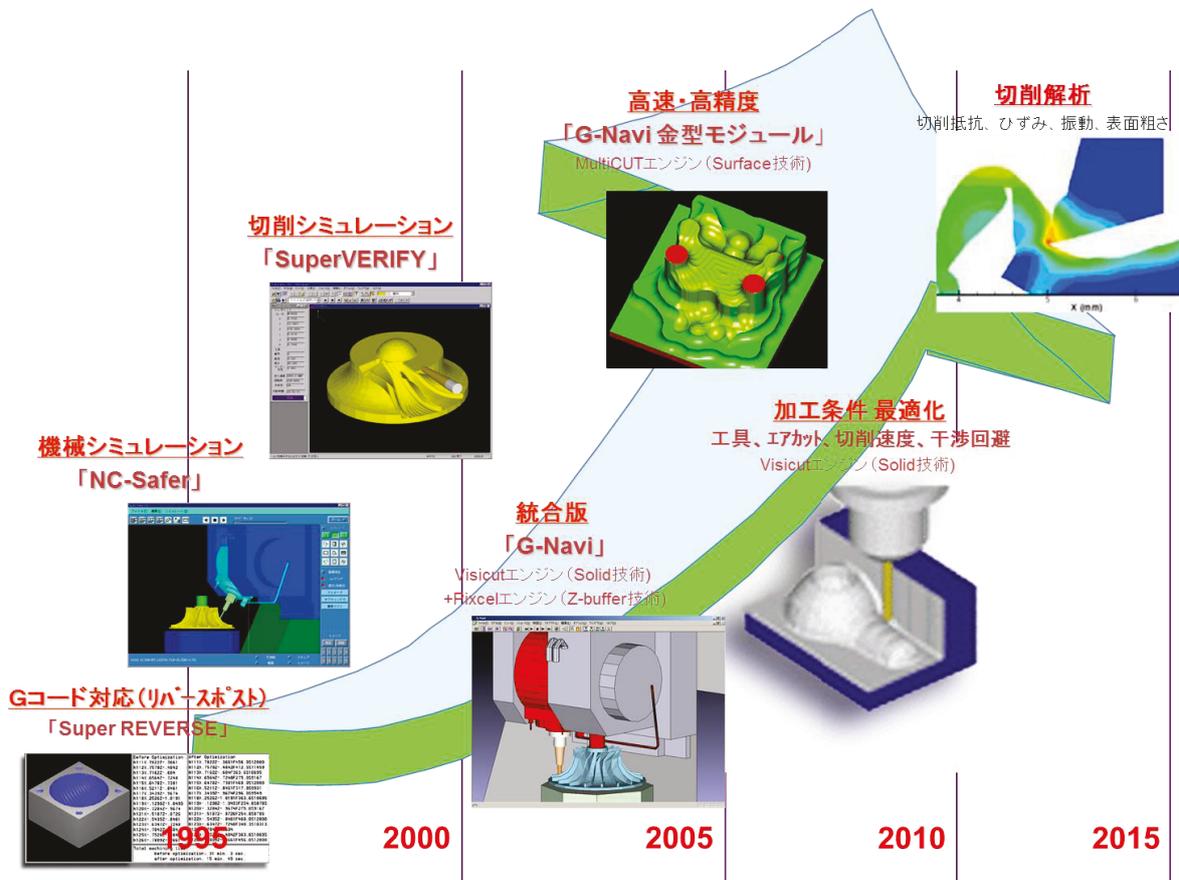


図 2.5 機械加工シミュレーションのロードマップ(アイコクアルファ(株)の開発例)



図 2.6 1990年代初期の機械加工シミュレーション

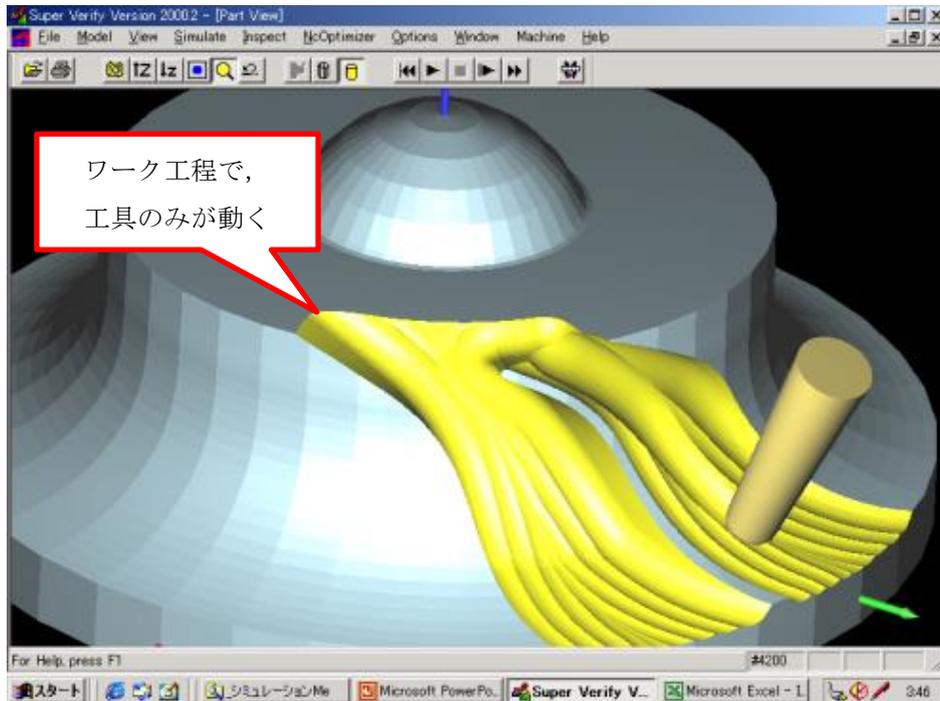


図 2.7 1990 年代中頃の切削加工シミュレーション

機械動作・切削形状の統合型シミュレーションの導入が進むと、切削形状と機械動作のチェックが 1 画面同時に検証でき、またシミュレーション中のダイナミックなビュー変更が可能となり、図 2.8 に示すように NC データを作成する時間が全体で約 30%削減することができる²⁻²⁾。これは元々 2 種類のシミュレーションソフトウェアを使い平均 3 回以上行っていたシミュレーションを 1 回に集約できたことと、少ないシミュレーション回数で NC データを検証することにより、パートプログラミングやポスト処理といった CL データと NC データの変換作業が減らせたことが大きな要因である。

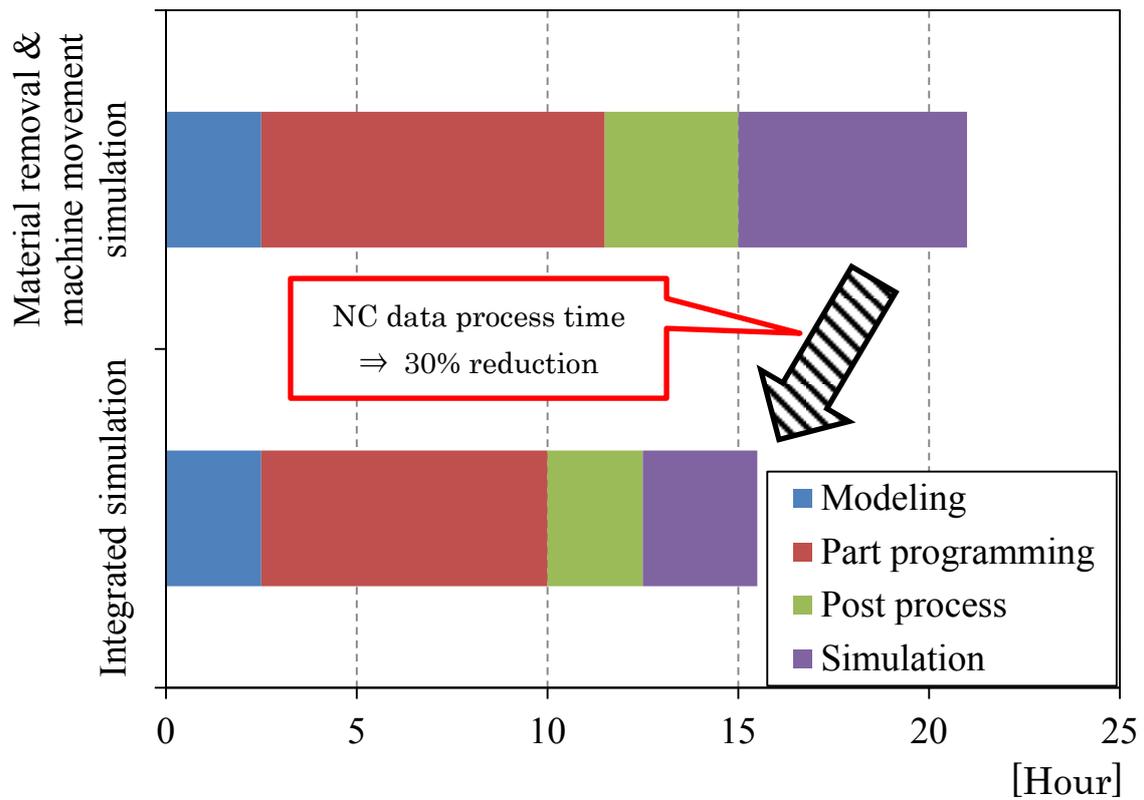


図 2.8 統合型シミュレーション導入前後の NC データ作成時間比較

また、特に新規部品において必ず試し削りを実施していた工程が統合型シミュレーションの導入により、2000 年中頃から廃止することが可能となり、図 2.9 に示すように導入から 4 年後には 95%以上の試し削り廃止率を達成させることができた²⁻²⁾。これによって生産現場においても機械稼働率を高水準で維持できるようになった。

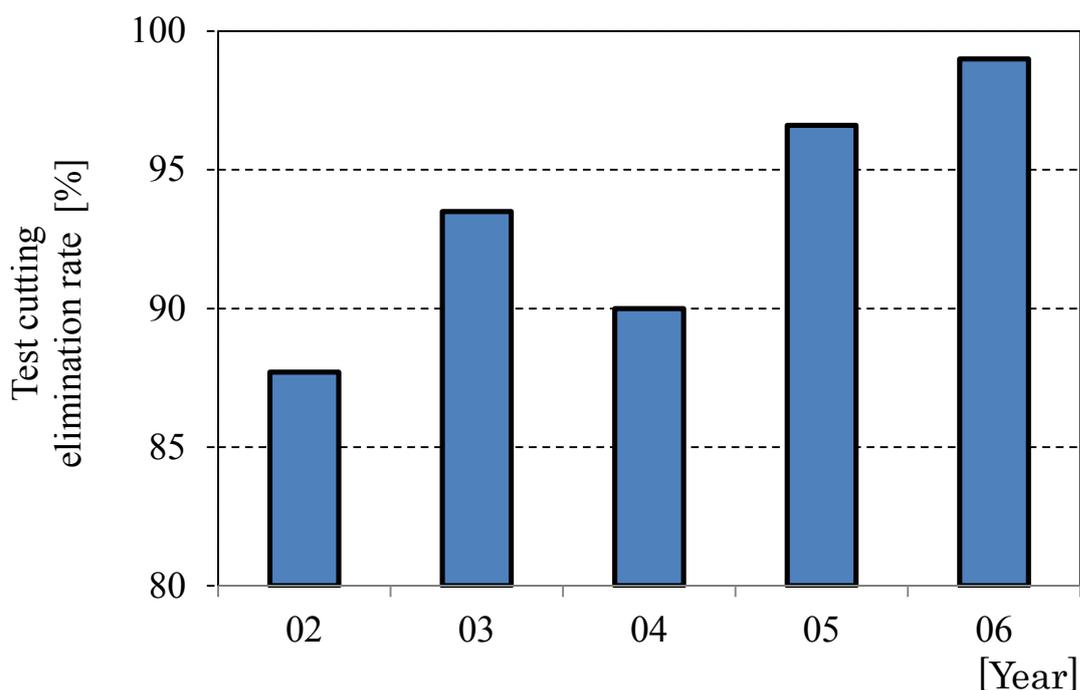


図 2.9 試し削り廃止率の推移

2.4 安全に運転するための現状分析および、課題

機械動作と切削形状の統合型シミュレーションで加工前に机上でチェックすると、大幅に機械、治具、工具間の衝突を防ぐことができるため、5 軸加工機がまだ国内に数十台しかなかった時代と比較すると安全性の面では大きな改善が図れた。しかし、ここ 10 年で 5 軸加工機も高速化・複雑化し、さらに多頭・多軸加工機なども開発され、複雑高付加価値部品を高能率・高精度で加工する目的で、5 軸加工機および複合加工機などは航空宇宙分野のみならず、自動車や金型・電子産業といった分野にまで広く普及してきた。このような機械加工は工程集約ができ、治具や段取りの簡素化も可能となるため、機械の特長を最大限に活かしながら安全かつ適正な加工運転を考慮することが重要である。したがって機械の有効利用と共に高速切削や切削量を最大化にする研究や開発も盛んに行われている。機械や工具の能力をフルに活用することは製造現場での自動化や費用削減に大きく貢献するが、その特長の反面、5 軸加工機や複合加工機、多軸加工機といった機械はその動作特性上、事前のシミュレーションで機械動作を NC プログラマがチェックしている現在でもまだ NC プログラマやオペレータの想定を超える機械動作がしばしば発生し、また高速切削や切削量を最大にするような過酷な加工には予期せぬ工具折損が多発している。衝突や工具折損が起きると、機械や治具、工具、時には製品の破損が起き、最悪は工具発熱による火災も発生するため、製造現場の安全をも脅かす要因となる。したがって、近年の複雑加工機を利用した加工と同時に、いかに安全に加工を行うか、ということが製造上重要

な課題である。

安全に 5 軸加工機や複合加工機などを使用するには図 2.10 に示すようにまずはオフラインで実加工前に干渉チェックする^{2-2), 2-13)~2-15)}ことが重要である。これにより前述したように大部分の衝突は防げるし、生産効率も上がる。しかし、依然として下記のようなケースで衝突が製造現場で発生する可能性がある²⁻¹⁶⁾。

- (1) 工具オフセットの変更
- (2) 工具破損，機械異常，停電発生時などのマニュアル操作
- (3) 複合機における多頭，多工具部の送り速度のずれ(同期ずれ)
- (4) G0 モードでの複合早送り
- (5) 治具，素材などの変更
- (6) マニュアルプログラムによる試作作業

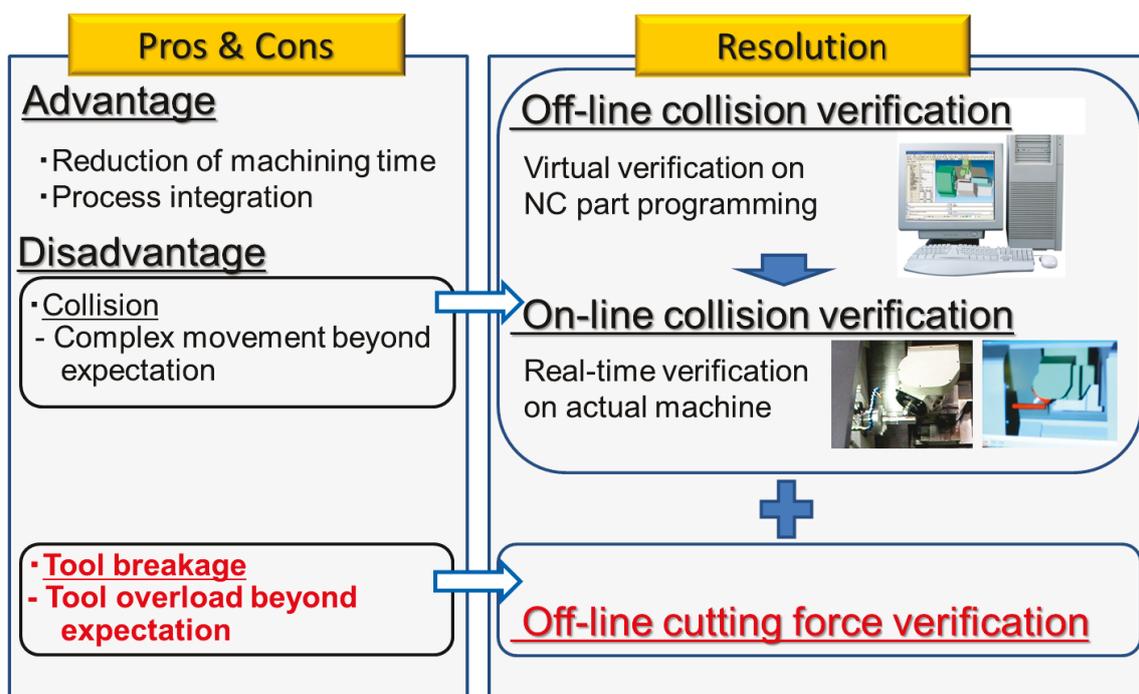


図 2.10 NC 機械を使用した複雑加工の長所と短所および，その対策

上記内容はすべて製造現場で機械加工オペレータが突発的にプログラムを入力しないといけない作業で，いずれの場合においても NC プログラマでは事前予測不可能のケースである。このような場合，加工前に机上で検証した機械動作シミュレーションとは異なった工具位置や素材・治具形状となるため，どうしてもオフライン衝突検証では予測することが難しい。機械加工オペレータがマニュアルで CNC に入力した後に，また素材や治具

などが変更された後に再度机上で(オフラインにて)機械動作シミュレーションで衝突検証を行っても良いが、毎回そのような作業を実施すると非常に時間がかかり実用的でない。したがって、これらの改善のためには図 2.10 に示すように機械加工オペレータが突発的にマニュアル作業を行った後や、素材や治具などの変更を行った後に、機械加工が実際に行われている時と同時に衝突検証を行うことが理想である。本研究ではこのような検証を「オンライン・リアルタイム衝突検証」と呼び、2.5 章にそのオンライン・リアルタイム衝突防止システムの機能と要点を説明する。

また NC プログラムが作成した工具経路で最近加工前に机上で切削負荷を検証するソフトウェアが普及され始めている。これを実施することにより、大部分の工具経路での切削中に突発的に切削負荷が急増したり、減少したりするような現象は防止できる。しかし、下記のようなケースで切削負荷が急増して工具折れが発生するケースが存在する。

(1) コーナー部での仕上げ加工時での予期せぬ高切削負荷

(a) 荒加工を効率良く加工するためには通常大径工具を使用する(剛性大 ⇒ 除去能力大)が、コーナー部で工具 R と等しい荒加工の NC プログラムを作成しても、図 2.11(a)に示すように必ずしも NC プログラム通りに工具は移動しない。

(b) そこで想定以上に余肉が残ったまま小径工具で仕上げ加工を実施すると図 2.11(b)に示すように径方向切り込み過大となり工具折損となる可能性が高い。対策として図 2.11(b)のようにプランジング(突き)加工で余肉部を除去する方法があるが、この方法では切削時間が長くなるし、この方法を考えつくまでに工具折損を経験し、それに基づいたノウハウも蓄積していく必要があるため、仕上げ加工時に正確な切削負荷を予測できれば工具折損前に NC プログラムにて適切な送り速度に設定することが可能となり、現在のような手間を省くことができる。

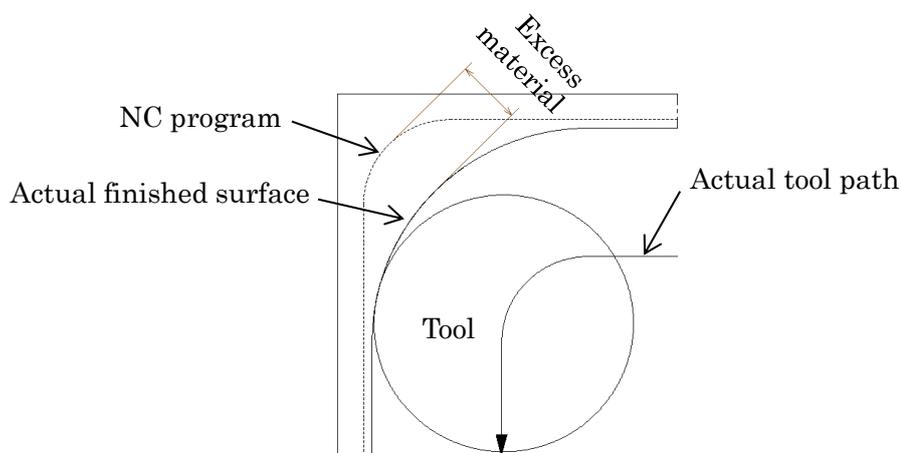
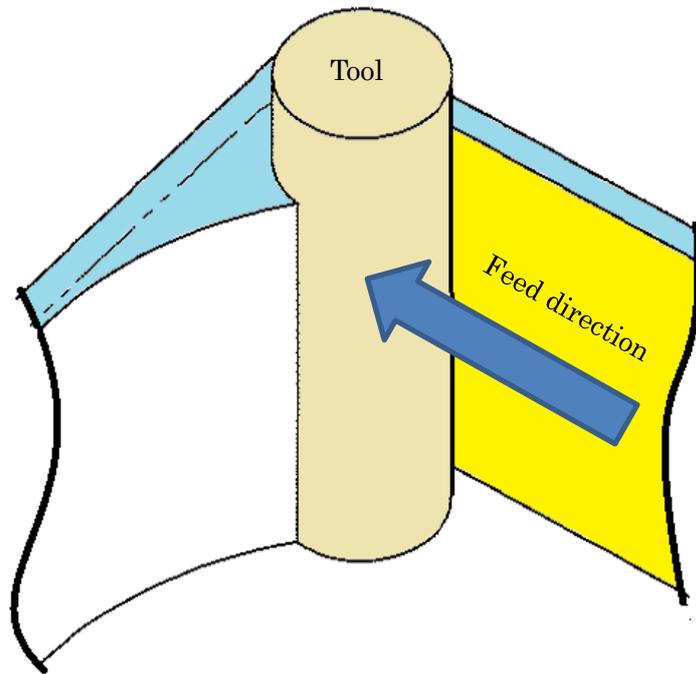
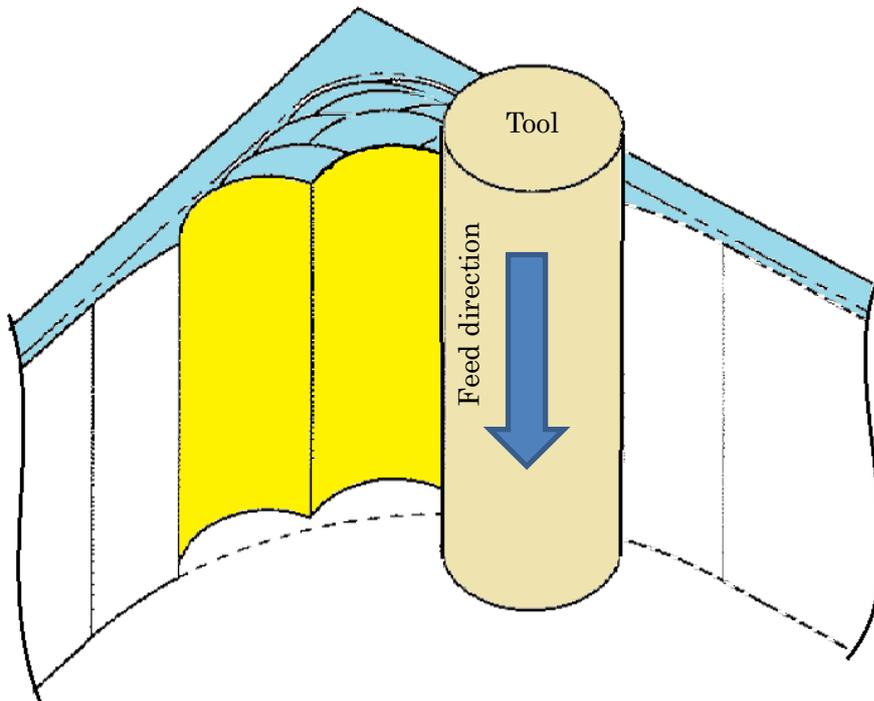


図 2.11(a) 荒加工時の NC プログラム指令値と実際の工具経路の差異による余肉



【仕上げ加工での径方向切り込み過大状態】



【コーナー部余肉除去対策—プランジング加工】

図 2.11(b) 荒加工で予想以上に余肉が残った場合の工具折損防止のための余肉除去方法

(2) 下穴に荒加工工具を軸方向に下した際の側面加工開始時の予期せぬ高切削負荷

- (a) 図 2.12(a)のように荒加工を展開する時にまずは下穴をあけて(例： $\phi 33\text{mm}$)から工具径と下穴径のクリアランスが僅か 0.5mm しかないような工具(例： $\phi 32\text{mm}$)を軸方向におろしてから最下点到達後、径方向移動で側面加工を開始する。被削材がチタンやステンレスといったような難削材の場合、NC プログラムでは最大切削送り(例：F25000)で軸方向におろして最下点到達後、送り速度を大幅に落として(例：F100)から径方向移動で側面加工を開始する。
- (b) しかし、実際一般的な同時 5 軸加工機では軸方向から径方向への移動で送り速度が F25000 から F100 まで落ち切らず図 2.12(b)に示すように NC プログラム通りの経路には移動せずそのまま早い切削送りで側面加工を開始することがある。この場合被削材が難削材のため、工具が折損する可能性が非常に高くなる。被削材がアルミ材の場合は、多少経路が NC プログラム通りに移動せず、また径方向の送り速度が速くても工具折損までは発生しない可能性が高いが、難削材の場合は特にこのような現象が起きやすい。
- (c) したがって、対策としては図 2.12(c)のように軸方向の最下点から 1mm 程離れた位置から NC プログラムにて故意に最大切削送り F25000 から F100 に落とした切削送りのパスを追加してから径方向移動で側面加工を開始させる。しかし、このような対策は長年の加工経験やノウハウから学べるもので、事前に CNC から正確な機械の運動情報を利用して、より適正な切削負荷を事前に把握していれば工具折損させずに適正な送り速度で NC プログラムを作成することができる。

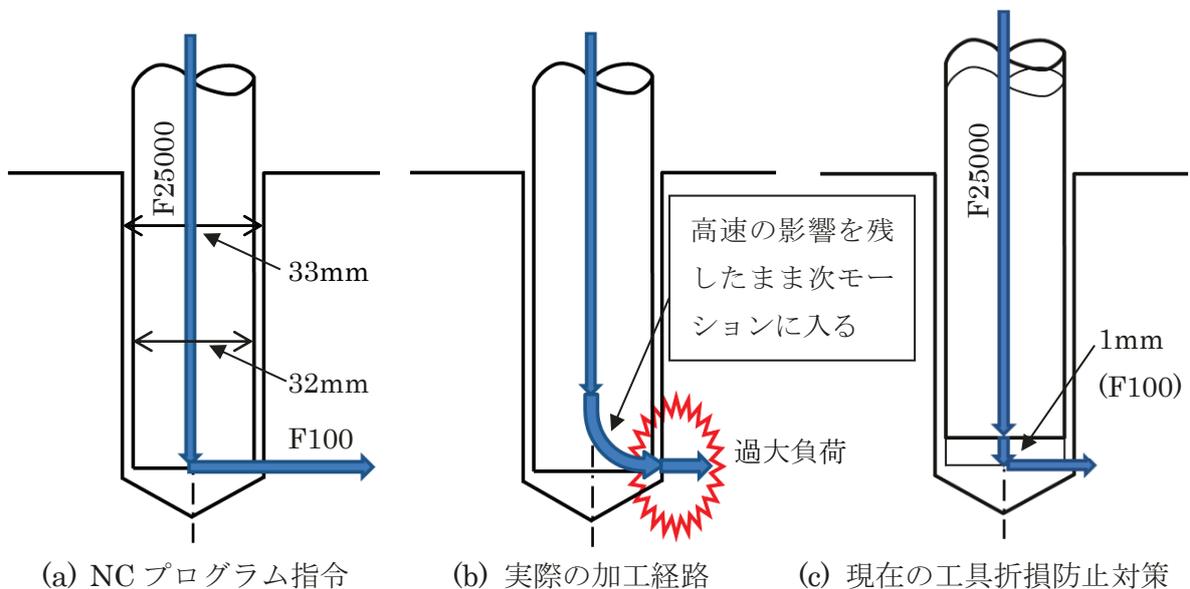


図 2.12 下穴に高速送りで入る工具の次モーシオン時に発生する予期せぬ高切削負荷

このようなケースの多くは実際の工作機械が NC プログラムの指令値通り運動していないことが原因として挙げられる。加工前に机上にて切削負荷を検証し、送り速度や回転数などを適正化する手法は全て NC プログラムから推定した工具位置を用いて切削負荷を予測しており、工作機械が NC プログラムの指令値通りに運動することを前提としている。しかし、実際には全ての工具の運動が指令値通りに動かないことが原因で前述のような現象が発生する。逆に荒加工終了後に過去の切削経験値より仕上げ加工のコーナー部で必要以上に切削速度を落とした場合は、無駄に加工時間を増やしているだけで、生産効率を下げることになる。したがって、両条件において安全が脅かされたり、生産効率が下げられたりすることが発生するため、切削負荷を正確に検証することが必要である。

以上のような課題を解決することが本研究での最終目標であり、2.5 章に述べるような本研究の開発コンセプトに繋がる。

2.5 実機の運動情報に基づく安全運転

5 軸加工機や複合加工機といった高速・複雑加工を行うような NC 工作機械の安全シミュレータのロードマップを図 2.13 に示す。図 2.13 の横軸はシミュレータの変遷、縦軸はオフラインからオンラインへの変遷を表している。同時 5 軸加工機や複合加工機などが出始めた頃は、シミュレータは幾何ベースのシミュレータ(機械動作シミュレータ、切削形状シミュレータなど)であったが、これからは材料特性を考慮した応力や切削力、刃先温度、歪み、加工中の切屑形状といったようなより動的なシミュレータ²⁻¹⁷⁾が必要になってくると考える。現在、動的シミュレータの開発は盛んに行われているが、シミュレータとして実用的になっているのはまだ少ないため、この動的シミュレータを実用的にすることが課題であると考え。また、今まではオフラインで実加工前に検証することが主だったが、これからはよりオンラインでリアルタイムに検証できるシステムが必要になってくると考える。これらを実現するためには下記 3 点が重要課題になる。

- (1) リアルタイムに処理できるような高速計算
- (2) データを多く保存できるような大容量
- (3) 工作機械の実際の運動情報を CNC からユーザー側に抽出できるような CNC のオープン化²⁻¹⁸⁾

アイコクアルファ(株)では 100 台以上の様々なメーカーの同時 5 軸加工機を所有し、日夜稼働させているが、自動車・航空機といったような分野では常に競争力、かつ最高の品質、さらには短納期を求められ、年々顧客の要求度合が厳しくなっている。それらに対応するためにはアイコクアルファ(株)のような加工ユーザー側が工作機械メーカーと密に課題に取り組み、いかなる状況でも加工ユーザー側で事前に対処できるようにしていかなければ

れば最近の短納期にはついていけない。そのような背景もあり、本研究では機械加工メーカーの協力を得て、オープン CNC をベースに実際の運動情報に基づく安全運転を実現化させるためのシステムに取り組んだ。

本研究をスタートさせるにあたり、まずは実加工現場で今でも問題となっている課題を解決するためには将来的にどのような加工方法が現場として必要なのか、また製品の市場ニーズを考えてどのような加工方法に将来ビジョンを置かないといけないかを検討した。その結果、いかなる場合でも「安全運転」ができるよう実際の加工現場でリアルタイムに検証して処理することが最も重要で、その条件下で生産能率が最も上がるような加工が最終的な理想形である、という結論に至った。図 2.13 の右上の「衝突防止+切削負荷適応制御(リアルタイム)」という内容が本研究の将来像である。本研究ではリアルタイムにこだわっているが、本論文ではリアルタイムで衝突防止を図るシステムを開発し、さらに切削負荷予測システムをリアルタイムに検証するためのスタートとしてまずは CNC からの実運動情報に基づく切削負荷予測システムの開発を行った(図 2.13 の青枠)。

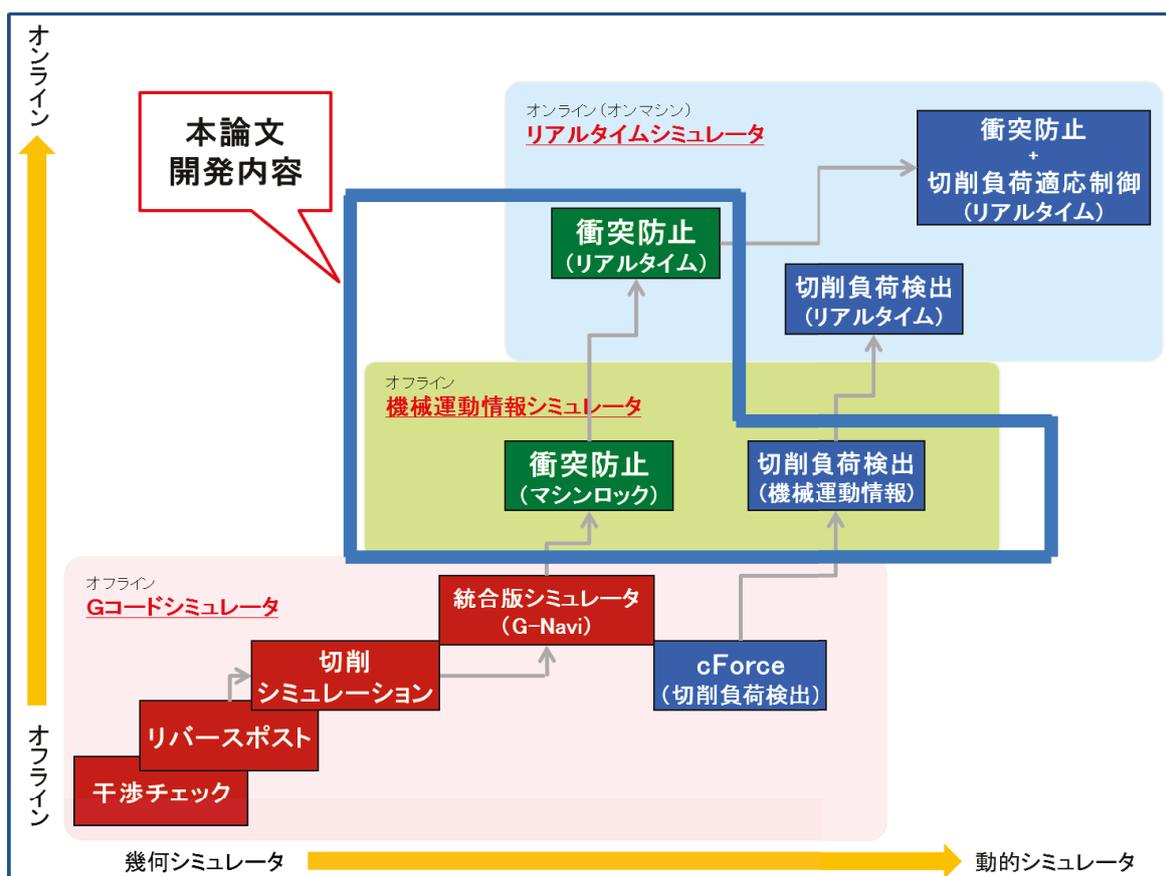


図 2.13 工作機械の安全運転シミュレータのロードマップ

2.6 まとめ

本章では工作機械の安全運転に関する開発に至るまでの背景を、5軸加工機の特徴や近年の市場の要求に対しての切削加工の動向を含めて説明した。

近年の高速・高効率加工においては、シミュレーション技術は非常に重要な位置を占めているが、オフラインの机上にてNCプログラマが機械動作や切削形状のシミュレーションを実施したとしても複雑かつ高速な動作を加工機が行うため実現場でのオペレータでは予想できない動作が発生し、今でもワーク、治具、工具、機械などの衝突が発生する。実現場において「安全」というのは最も大切な項目であり、前述のような衝突は時には安全を脅かすため、この課題を克服するために実加工中に機械が衝突する前に衝突を予想して強制停止させるオンライン・リアルタイム衝突防止システムの必要性を述べた。

また、例えば難削材を加工する時には切削負荷が工具の寿命に大きく左右するが、工具が折損したり、折損したまま加工すると場合によっては火災発生のリスクが生じる。このような安全対策には事前に切削負荷を正確に推測して、安全、かつ高効率で加工できるような送り速度を設定することが必要である。実際に同時5軸加工を使用している経験から実機械がNCプログラム通り動いていない事例を本章で説明し、より正確に切削負荷を測定する方法には直接実機の運動情報に基づいた切削負荷予測システムが必要であることを述べた。

上記の研究開発に欠かせないのがシミュレーション技術であるため、シミュレーション技術がどう時代とともに変化してきたか、また本研究で必要なシミュレーション技術はどのようなものなのか、アイコクアルファ(株)での開発事例をもとに本章にて説明した。

【2章の参考文献】

- 2-1) 左山邦彦, 機械加工プログラミングシリーズ 2, マシニングセンタ, 日刊工業新聞社, 2004, pp.1-16.
- 2-2) M.Kanamaru, N.Sakai, A.Goto, T.Hida, Development of Simulation Technology for 5-Axis Machines-Verification of Material Removal Model and Collision Avoidance-, Int. J. of Automation Technology, Vol.1, No.2, 2007, pp.141-146.
- 2-3) 金丸允昭, 航空機部品の機械加工技術と自動車部品への波及, 機械と工具, 2007-5, pp.10-16.
- 2-4) 編集部, 航空機部品加工現場の実際 -5 軸加工にこだわるアイコクアルファ(株) -, 機械と工具, 2007-5, pp.26-28.
- 2-5) 竹内芳美, 多軸・複合切削加工, 日刊工業新聞社, 2008年, pp.36-109
- 2-6) 岩田一明, 荒井栄司, NEDEK 研究会, モデリング工学入門, 培風館, 1999.
- 2-7) 金子順一, 高精度エンドミル仕上げ加工のための加工プロセスモデリングに関する研究, 大阪大学博士学位論文, 2003.
- 2-8) 乾正知, コンピュータグラフィックスと形状モデリングの基礎, 講義資料, 2014.
- 2-9) 茨木創一, 京都大学設計生産論講義資料, 2013.
- 2-10) 竹内芳美, 多軸・複合加工用 CAM, 日刊工業新聞社, 2013年.
- 2-11) O.Ilushin, G.Elber, D.Halperin, R.Wein, M-S.Kim, Precise global collision detection in multi-axis NC-machining, Computer-Aided Design, Vol.37, 2005, pp.909-920.
- 2-12) S.Du, T.Surmann, O.Webber, K.Weinert, Formulating swept profiles for five-axis tool motions, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.45, 2005, pp.849-861.
- 2-13) Y.Takeuchi and T.Watanabe, Generation of 5-axis Control Collision-Free Tool Path and Postprocessing for NC-Data, Annals of the CIRP, Vol.41, No.1, 1992, pp.539-542.
- 2-14) B.Lauwers, J.P.Kruth, P.Dejonghe, and R.Vreys, Efficient NC-Programming of Multi-Axes Milling Machines Through the Integration of Tool Path Generation and NC-Simulation, Annals of the CIRP, Vol.49, No.1, 2000, pp.367-370.
- 2-15) X.Tian, H.Deng, M.Fujishima, and K.Yamazaki, Quick 3D Modeling of Machining Environment by Means of On-machine Stereo Vision with Digital Decomposition, Annals of the CIRP, Vol.56, No.1, 2007, pp.411-414.
- 2-16) T.Hida, T.Asano, K.Nishita, N.Sakai, A.Goto, and Y.Takeuchi, Development of Online Real-Time Collision Free Machining Using Simulation with CNC Openness, Int. J. of Automation Technology, Vol.9, No.4, 2015, pp.403-410.

- 2-17) AdvantEdge Website: <http://www.thirdwavesys.com/advantedge/>.
- 2-18) M.Sudo, Advanced Control Technologies for 5-Axis Machining, Int. J. of Automation Technology, Vol.1, No.2, 2007, pp.108-112.

第3章 オンライン・リアルタイム衝突防止システムの開発

3.1 はじめに

本章においては、工作機械の安全システムの主内容であるオンライン・リアルタイム衝突防止システムの開発について述べる。オンライン・リアルタイム衝突防止システムの基本コンセプトとして必要な開発技術要素，さらにそれを実用化させるために必要な手法，そして具体的に実施した実験内容および，結果について概説する。最後に今後の課題や展望を説明する。

3.2 基本コンセプト

3.2.1 システム概要

第2章で述べたように5軸加工や複合機加工，多頭機加工などは加工の工程集約や治具や段取りの簡素化につながるため，生産効率を大幅に上げることができるが，機械動作が非常に複雑であることからオフラインにて機械干渉チェックのシミュレーションを実施^{3-1)~3-4)}してもオペレータによるマニュアル動作が入ると予期せぬ干渉が今でも発生することがある。これらの課題を克服するために本研究ではオンライン・リアルタイムにて干渉チェックが必要であると考え。実加工中に衝突する直前で衝突を防ぐオンライン・リアルタイムでの衝突防止の研究は歴史が浅く，あまり開発されていない。しかし，その中にも幾つかの手法があり，まとめると下記のようなになる。

(1) 衝突領域設定手法^{3-5), 3-6)}

初期の段階で開発されたのは図 3.1 に示すような加工機内で衝突領域をあらかじめ設定し、その領域内に制御軸を進入させない手法である。この手法は、CNC 内部で制御軸ごとに実ストロークに加え衝突領域を設定することにより、移動の制限を持たせるため、必要以上に衝突検知をすることになり精度良く衝突を検証することができない。

(2) 各要素の単純形状近似化手法^{3-7), 3-14)}

(1)の改良された手法として、図 3.1 に示すようにワーク、治具、工具などの要素を、それらを包括する円柱、立方体などの単純形状に近似し CNC 上でリアルタイムに衝突チェックを行う手法である。この手法は、単純形状した素材の段階では有効だが、加工中にワーク形状が逐次変化することには対応できないため、確実な衝突予測は困難である。

(3) 加工機内での形状取得手法^{3-8), 3-9)}

工作機械内にカメラや非接触型三次元測定機などを設置し、実際にワーク、治具、工具などの形状を測定あるいは画像にて描写し、CNC に形状を認識させて干渉するかどうかを検証する手法である。このシステムは(2)と同様にワーク形状が変化することには対応できず、さらにクーラントなどの液体が飛散すると精度の良い画像や形状が取り出せないといった欠点が考えられる。さらにシステム全体が非常に高価になると予想される。

(4) 主軸緩衝部材設置による接触検知手法^{3-10)~3-13)}

主軸先端に緩衝部材を設置し、実際に主軸に衝突した時に主軸内に取り付けられているセンサが感知して強制停止する手法である。この手法は主軸や機械を壊さないことを主に考えており、オペレータがマニュアル操作した際に誤った工具位置でワークと接触することに対しては防止できない。したがって、製品の不良品防止にはつながらないと思われる。

これらの手法ではいずれも加工形状が変化する場合には精度良く衝突検証することが難しく、また製品そのものの不良品発生を防ぐことも難しい。そこで、本研究では第 2 章で述べたような基本的な **Polygonal B-reps** のようなソリッドベースで機械動作シミュレーションと切削形状シミュレーションの両方を可能とする統合型シミュレーションであるジオメトリックシミュレータを使い、工作機械の CNC と対話形式のソフトウェアを開発し、CNC から現在の加工位置より時間的に先行した位置の座標値を取得して、機械がその時間的に先行した位置に到達する前にジオメトリックシミュレータで先行位置での機械動作シミュレーションによる衝突検証を行い、衝突を検知させて実際に NC 機の動作を強制停止させる手法を考案した。この手法が確実にリアルタイムで衝突検知できると考えた。

《 Collision area 》	Conventional	Improved	Suggested
	<div style="border: 1px solid red; padding: 2px; display: inline-block;">Against work</div> <div style="border: 1px solid blue; padding: 2px; display: inline-block;">Against fixture</div>		
Collision area definition	Axis coordinate	Simple geometry	Precision geometry
Material removal shape of work	Not considering	Not considering	Considering

図 3.1 オンライン・リアルタイム衝突防止の従来手法と本研究提案手法の違い

従来の CNC はブラックボックス化しており, 工作機械の現在の加工位置(現在位置)座標や, 現在位置より時間的に先行した時間(先行時間)までの加工位置(先行位置)座標の履歴を取得することはできなかったが, 近年 CNC のオープン化が進み, 図 3.2 に示すように現在位置座標や先行位置座標などを外部インターフェースから取得すること(サンプリング)が可能となった³⁻¹⁵⁾.

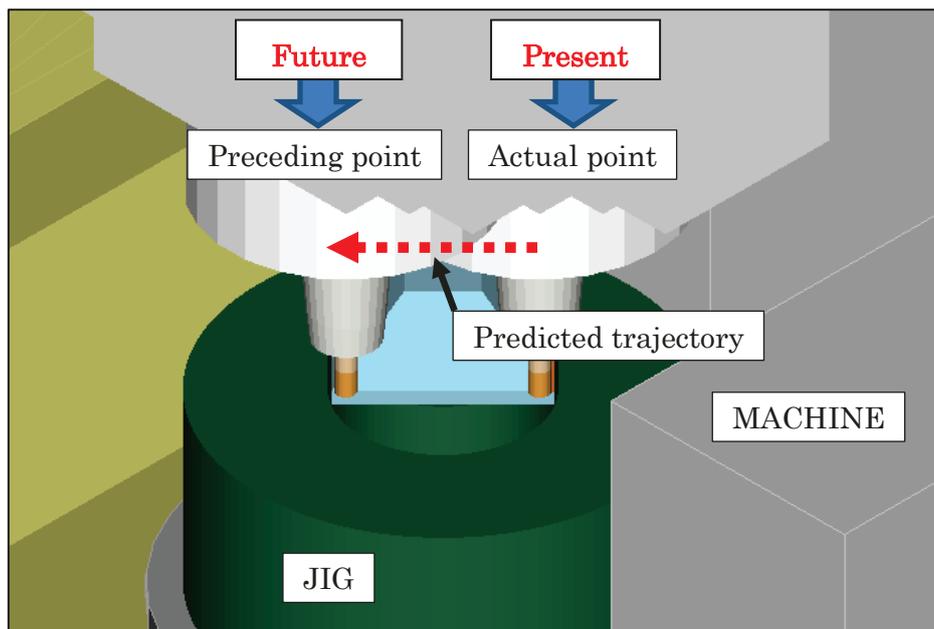


図 3.2 予測の軌道から取得した先行位置での衝突検証

本研究で開発したオンライン・リアルタイム衝突防止システムはこの先行位置履歴を利用した。このシステムは図 3.3 に示すように、オープン CNC コミュニケータとジオメトリックシミュレータで構成される。オープン CNC コミュニケータは、CNC から先行位置履歴をサンプリングし、工具位置座標をジオメトリックシミュレータに伝達する。ジオメトリックシミュレータは、工具位置座標を受け取った際、切削によるワーク形状の変化、衝突計算、描画といったシミュレーションを実施し、衝突を検知すると、干渉メッセージをオープン CNC コミュニケータに伝達する。オープン CNC コミュニケータは、干渉メッセージを受け取ると、強制停止を CNC に伝達する。CNC は、強制停止メッセージを受け取ると、実際に工作機械の強制停止が行われる。このオンライン・リアルタイムシミュレーションシステムは、市販の工作機械に搭載される CNC にプラグインで使用可能となる。

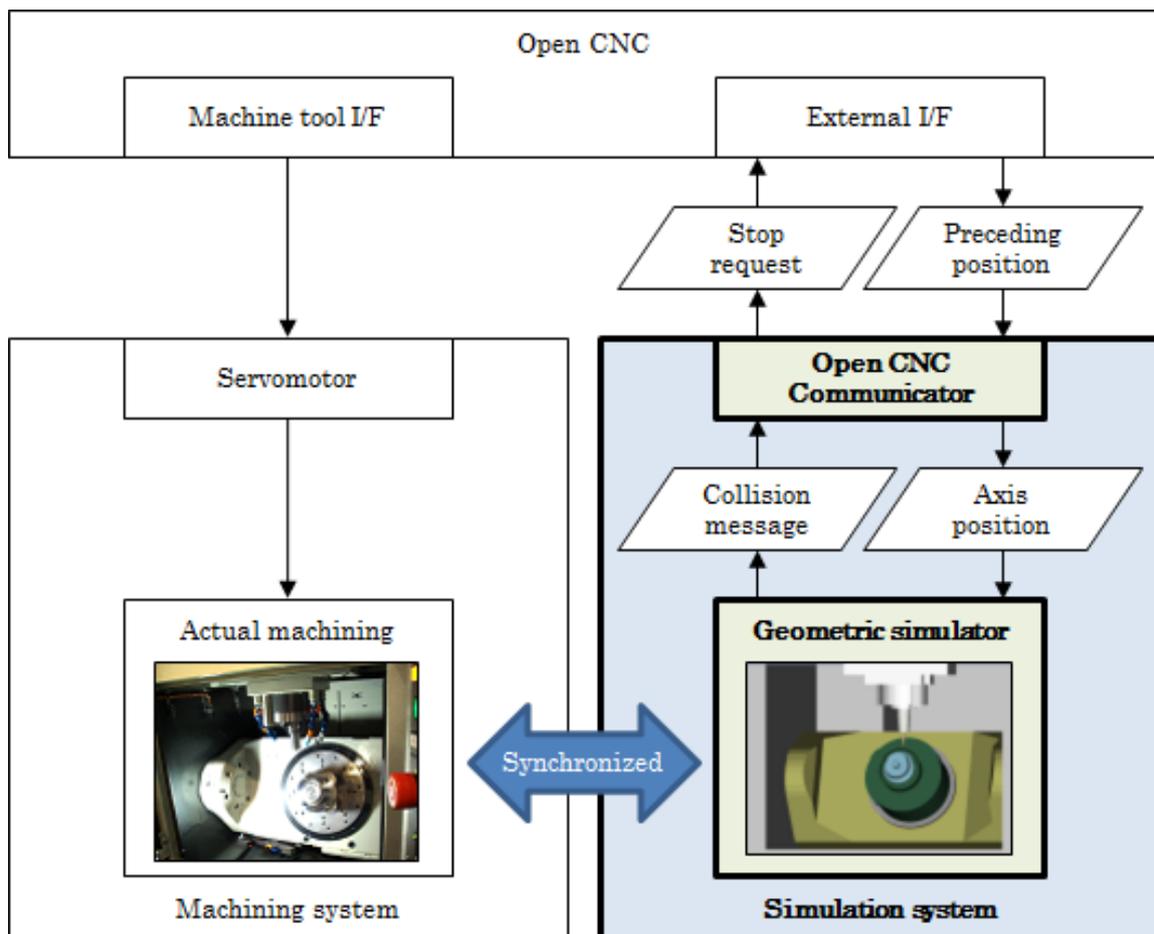


図 3.3 オンライン・リアルタイム衝突防止システムの概略図

3.2.2 開発技術要素

図 3.3 で示すように本研究ではどのようなジオメトリックシミュレータを使用して衝突検証を実施するかが重要となる。第 2 章で述べたように **Z-Mapping** や **Voxel model** のような離散モデルは、構造が単純であるため、シミュレーションに要する時間が短くなる特徴をもつが、切削によりワーク形状を変化させる精度(切削の精度)や衝突計算の精度がモデル形状の寸法に依存する^{3-16), 3-17)}。一方、**B-reps** は構造が複雑であるため、シミュレーションに要する時間が大きくなる傾向があるが、切削の精度や衝突計算の精度がモデル形状の寸法に依存せず、複雑な形状定義や切削精度の設定、工作機械の動作シミュレーション統合は比較的容易に表現できる^{3-18)~3-20)}。本研究では、衝突を防止するため、切削の精度や衝突計算の精度が一定である必要がある。したがって、図 3.4 に示すような **B-reps** を用いたジオメトリックシミュレータを使用した。

このジオメトリックシミュレータはオープン CNC コミュニケータから伝達された工具位置座標を入力とし、ワークを切削しながら機械動作の干渉チェックを行う。並行してアニメーション描画により動作の目視確認が可能である。切削量および機械動作の幾何計算はポリゴンソリッドで定義されたワーク、治具、工具や機械構造物など各々の構成要素の移動体積をブーリアン演算することで行う。ワークや治具と工具や加工機との衝突を検知すると干渉メッセージを出力する。また、ポリゴンソリッドの描画特性を用いて、シミュレーション途中でのビュー回転や拡大/縮小なども可能である。

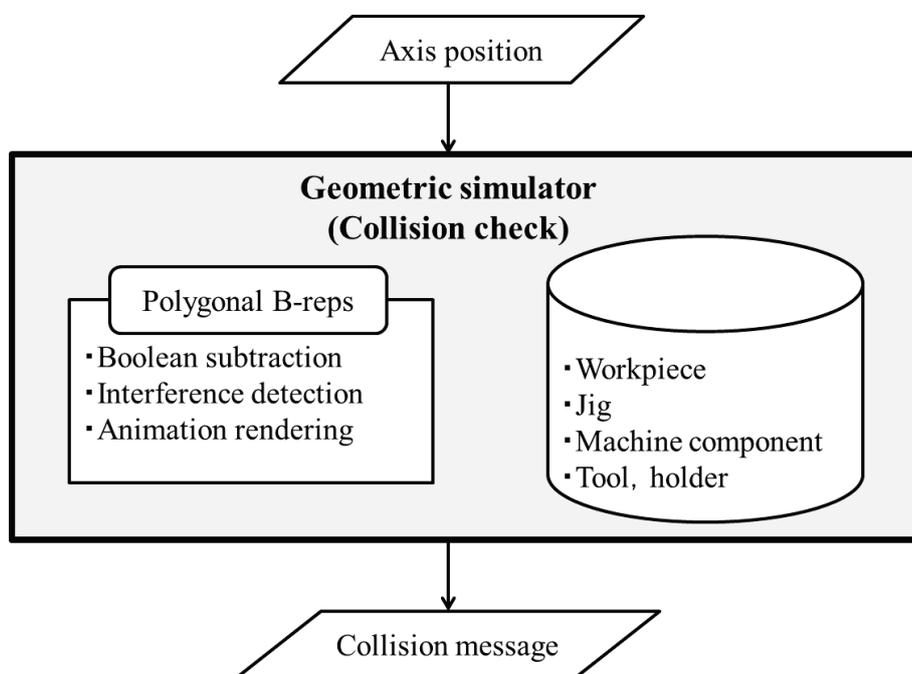


図 3.4 ジオメトリックシミュレータのデータフロー

本研究では CNC から一定時間単位で取得される機械先行位置座標，現在位置から先行位置までの機械移動所要時間，運転モードとその状態を利用している．工作機械の予測経路を断続的に取得し，工作機械の軸座標を計算してジオメトリックシミュレータを実行するオープン CNC コミュニケーターを開発した．これがオープン CNC とジオメトリックシミュレータとの仲介役を行い，サンプリング周期(T_s)毎に衝突チェックを行う．これによって図 3.5 に示すプロセスフローのように衝突のない安全な機械加工を実現することができる．

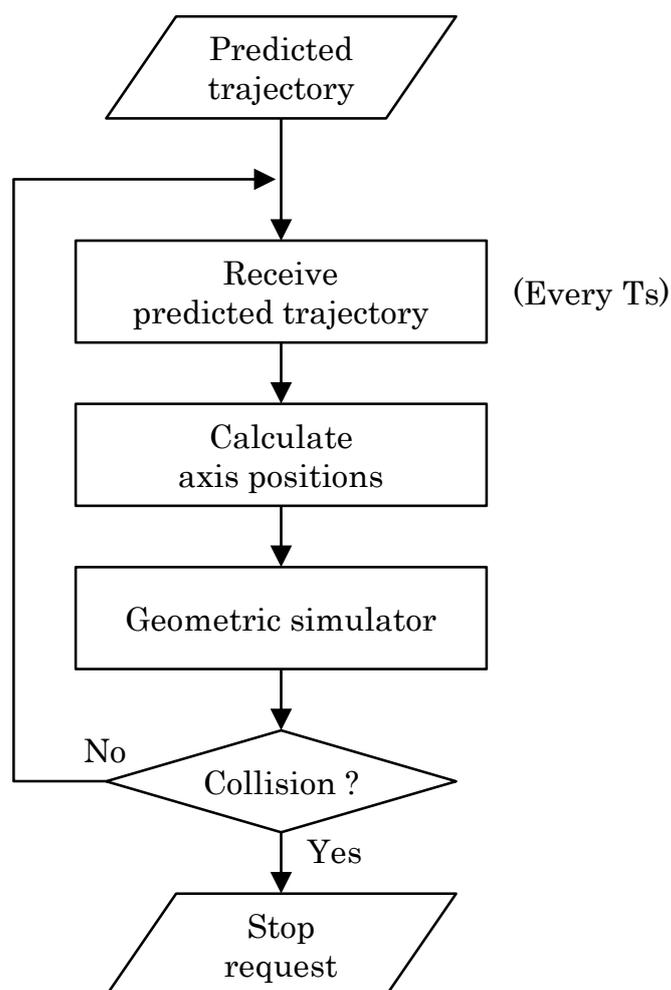


図3.5 オープンCNCコミュニケーターのプロセスフロー

3.3 実用化のための計算並列化手法

3.3.1 オープン CNC コミュニケータの並列化

ジオメトリックシミュレータは前章に述べたように構造が複雑である **B-reps** を用いているため、シミュレーションに要する時間が大きくなる。しかし一方では、データ取得時間やシミュレーション時間、強制停止する時間などの全ての計算を実際に予測される将来の軌道の位置で衝突が発生する前に終了していないといけない。その際、実際に CNC から取得する先行位置座標を現在位置に対してどれくらい先の時間まで取得すればオープン CNC コミュニケータを介して衝突前に加工機を強制停止させることができるのか検討する必要がある。CNC 側に先行位置座標取得のために現在位置より先行させる時間 T_f を入力するが、現在位置から T_f 時間後の先行位置座標の衝突検証を実施する時間内に、先行位置座標のオープン CNC コミュニケータがサンプリングに要する時間 T_a と、ジオメトリックシミュレータがシミュレーションに要する時間 T_c と、工作機械の強制停止に要する時間 T_m の全てを完了していないと T_f 時間後に衝突する危険性がある。したがって、衝突を事前に防止するには下記条件を満たす必要がある。

$$T_f > T_a + T_c + T_m \quad (3.1)$$

- T_f = 先行位置座標取得の為に現在位置より先行させる時間
- T_a = オープン CNC コミュニケータが先行位置座標のサンプリングに要する時間
- T_c = ジオメトリックシミュレータによるシミュレーションに要する時間
- T_m = 工作機械の強制停止に要する時間

図 3.6 に示すようにオープン CNC コミュニケータが先行位置座標を取得するサンプリングの周期 T_s は短くすればするほど工作機械の実軌道と予測軌道の誤差量が小さくなるので、より精度高く衝突を検知することができる。しかし、より多くの座標の衝突検証を実施することになるので、ジオメトリックシミュレータの計算時間が長くなり、衝突を検知することが難しくなる。逆にサンプリング周期を大きく設定すると衝突検知精度が低いことから誤った衝突の検知や、衝突を検知できない可能性が高くなる。これらの関係から、オープン CNC コミュニケータのサンプリング周期 T_s と、CNC で先行位置座標取得のために現在位置より先行させる時間 T_f をどのように設定するかが重要となる。また、 T_a はオープン CNC コミュニケータがオープン CNC から位置座標のデータ 1 個分を取得する

のにかかる時間と，オープン CNC が先行位置情報を取得した履歴数の積で求められるが，もし T_s が T_a より小さい値に設定されると取得する履歴数が少なくなり，間引きできる履歴数が少なくなるため，必ず T_s は T_a より大きい値で設定する必要がある．

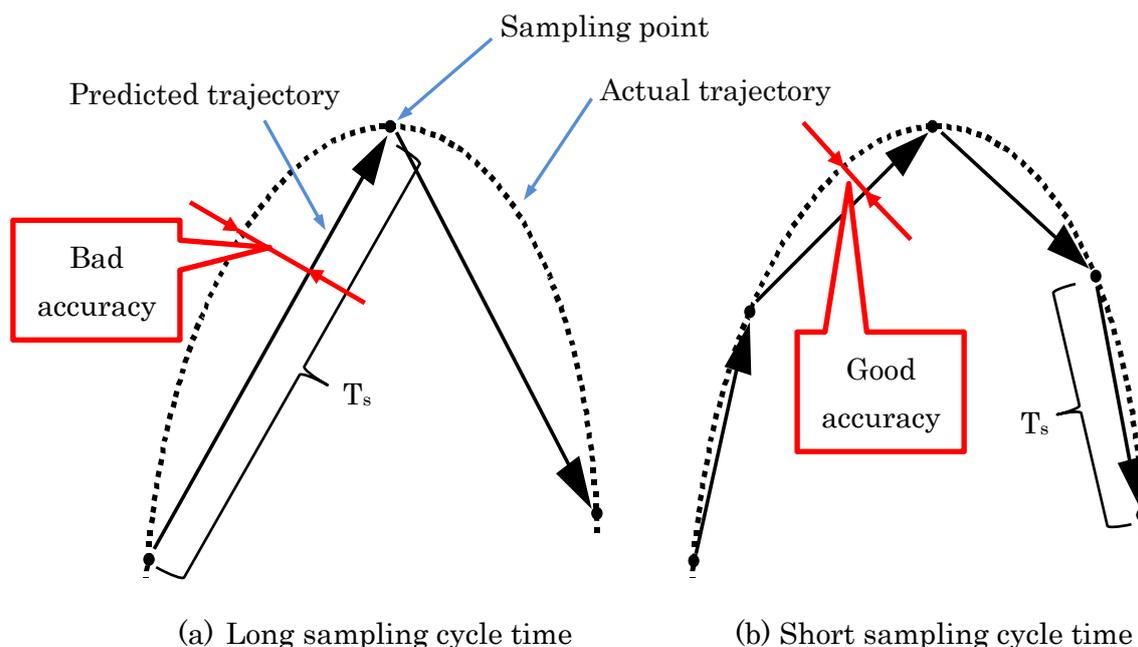


図3.6 サンプル周期 T_s と精度の関係

予備実験として実機に加工物を取り付け，機械の手動操作による衝突テスト試験を行った結果，図 3.7 に示すようにジオメトリックシミュレータの処理時間が 17~50ms であることがわかった．さらに衝突検証の計算過程で切削(ブーリアン演算)，干渉チェック，描画(アニメーションレンダリング)を行うと 2.4GHz CPU, 2GB RAM の PC ではおよそ 50ms が限界であることがわかった．

T_f と T_m は本研究で使用した加工機のオープン CNC(3.3.2 章に詳細記述)の仕様により最大 50ms と 8.1ms と制限がある．前述したようにシミュレーション時間が 17~50ms では，計算時間が長いと考え，シミュレーションに割り当てる時間を多くとるために先行位置座標のサンプリングと，シミュレーション・工作機械の強制停止の計算を 2 個の CPU を使用して並列化させた．並列化の場合の各時間設定の関係は図 3.8 に示す．図 3.8 は工作機械の工具先行位置座標が P_0 から P_1 への移動で工作機械を強制停止するケースを示す．衝突を防止するためにオープン CNC コミュニケータは，周期的にオープン CNC から先行位置座標をサンプリングし，ジオメトリックシミュレータに工具位置座標を伝達する．ある工具現在位置での計算には，その時に先行位置座標のサンプリングに要する時間 T_a

と一つ前のサンプリングで取得した先行位置座標でのジオメトリックシミュレータによるシミュレーション時間 T_c が常に計算される。図 3.8 に示すように工具現在位置が T_f 時間後の先行位置座標(P0)を取得して、実際に P1 にて衝突が生じるのを事前に防ぐには T_f 時間に到達する前に $2T_s + T_c + T_m$ の計算を全て完了する必要がある。また、前述されているようにオープン CNC コミュニケータが先行位置座標のサンプリングに要する時間 T_a より T_s は大きくならないといけないので、サンプリング周期は下記式(3.2)を満たさなければいけない。

$$T_a < T_s < (T_f - T_c - T_m) / 2 \quad (3.2)$$

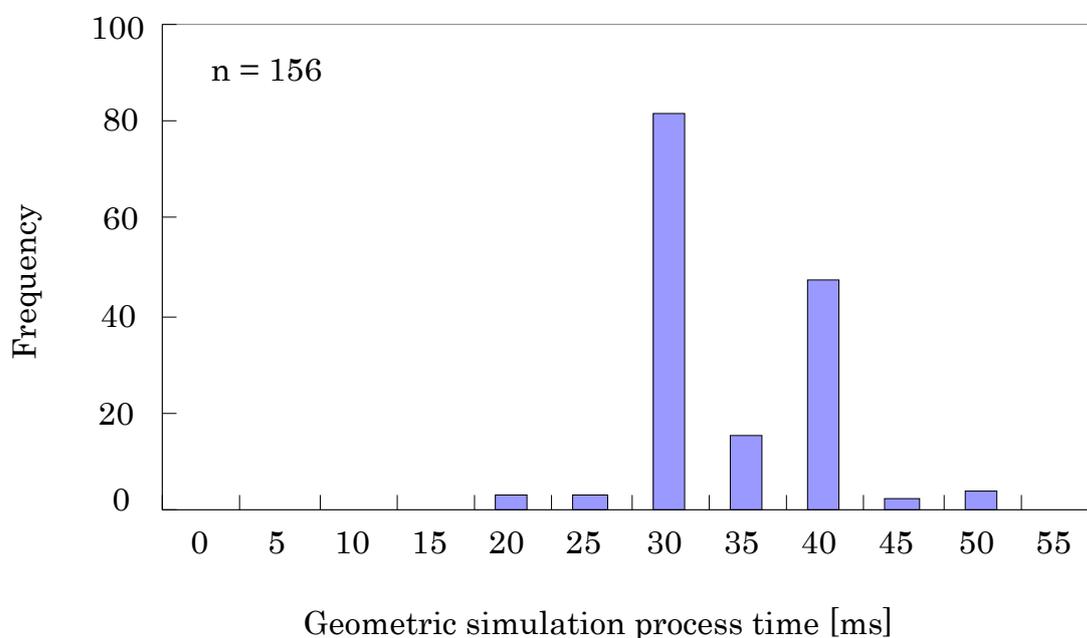


図3.7 ジオメトリックシミュレーションの処理時間分布

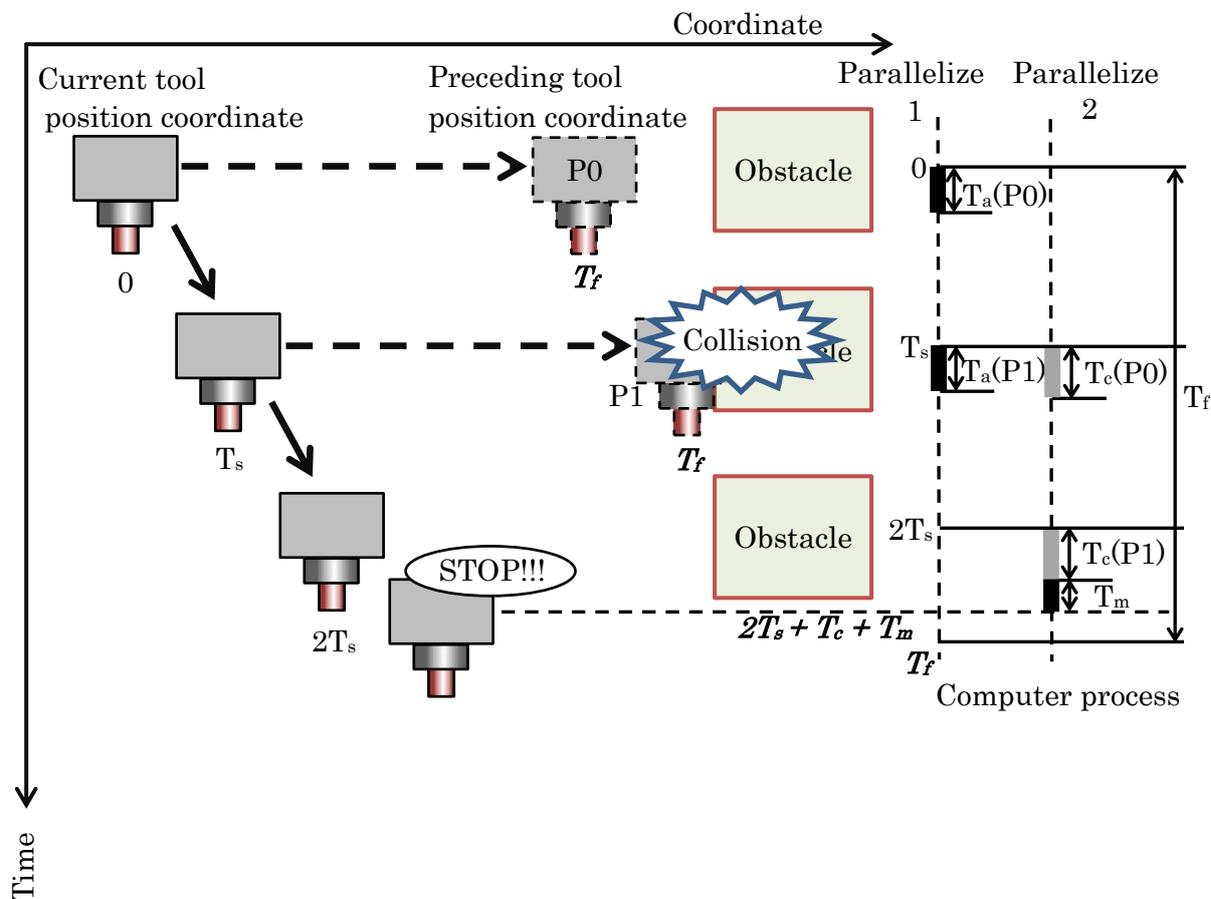
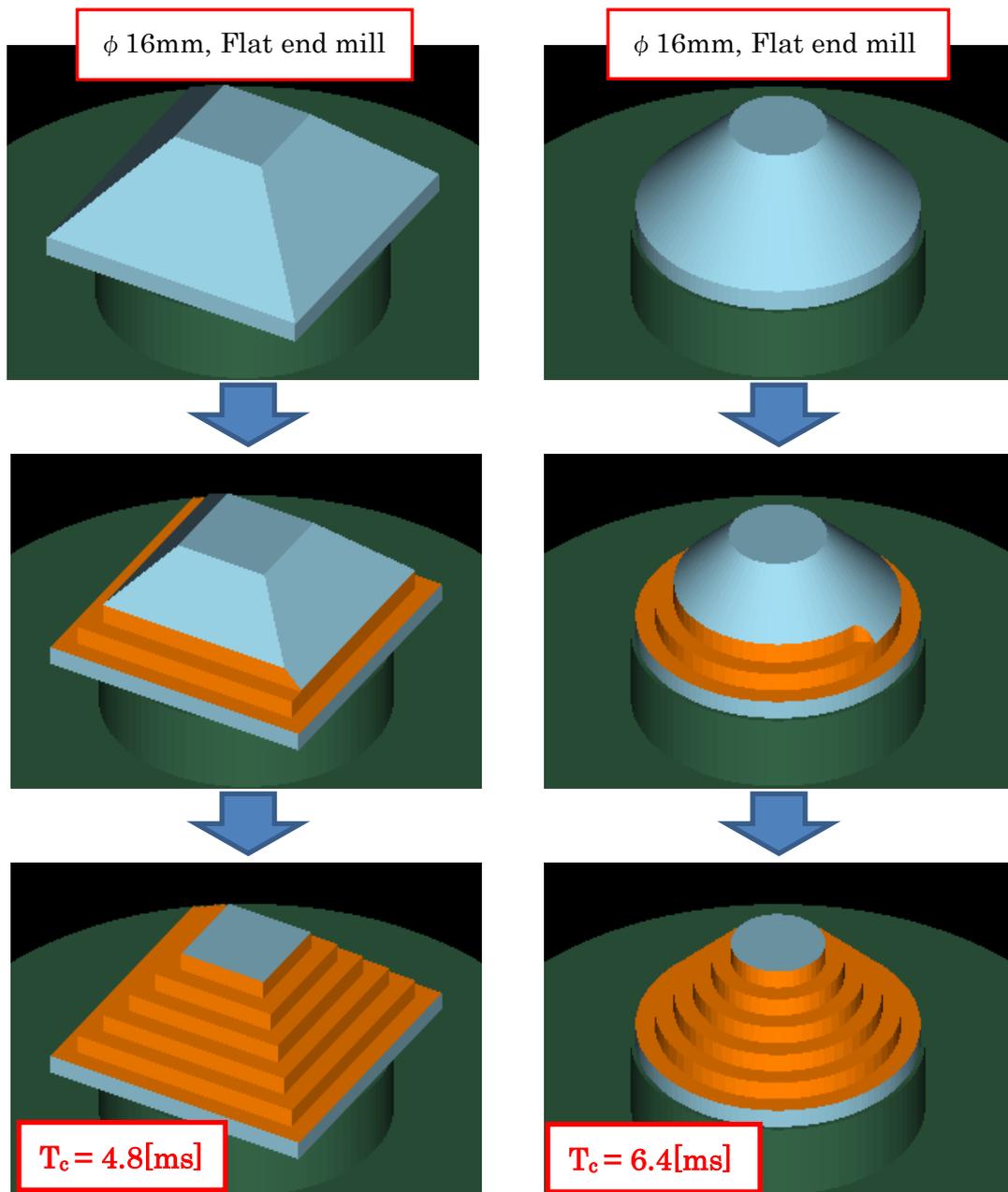


図 3.8 工具現在位置から予測先行位置に移動するまでの並列計算

3.3.2 実験方法

本研究で使用したオープン CNC(FANUC Series 3li-MODEL A5)では T_f は最大 50.0ms, T_m が最大 8.1ms であった. T_s を算出するためには T_c を設定する必要がある, ジオメトリックシミュレータのみを導入した PC(Intel Core2Quad Q6600 2.4GHz CPU, 2GB memory, NVIDIA Quadro FX1500 GPU)と 5 軸加工機(三井精機工業 Vertex550-5X)のオープン CNC(前述と同じ)を切断した状態で, 直線補間と円弧補間による最大シミュレーション時間 T_c を測定した. 工具は $\phi 16\text{mm}$ のフラットエンドミルを使用した. なお, 図 3.9 に示すように直線補間はピラミッド形状のワークを下から各平面毎に上まで削り落とし, 円弧補間は円錐形状のワークを下から円弧運動で上まで削り落とすような加工を実施した. 使用した加工工具および, 最大シミュレーション時間を同図に示す. 最大シミュレーション時間が 6.4ms であったため, T_c を 6.4ms と設定し, 式(3.2)より T_s は 17.0ms と設定した.



(a) 直線補間による切削加工 (b) 円弧補間による切削加工
 図 3.9 ジオメトリックシミュレータによる 2 種類での加工による T_c の結果

3.3.3 実験検証結果

PC と 5 軸加工機のオープン CNC を接続した状態で同様の加工を実際に行い、その際、シミュレーションに要した時間と切削によるワークモデルのポリゴン数(ワーク面数)の推移を測定した。直線補間による加工のシミュレーションに要した時間の推移を図 3.10 に、ワークモデルのポリゴン数の推移を図 3.11 に示す。また、円弧補間による加工のシミュ

ュレーションに要した時間の推移を図 3.12 に、ワークモデルのポリゴン数の推移を図 3.13 に示す。

図 3.10 より直線補間による加工を行ったとき、シミュレーションに要した時間は 3.3.2 章で設定したジオメトリックシミュレータによるシミュレーション時間 $T_c=6.4ms$ を超えることはなかったが、図 3.12 より円弧補間による加工を行ったときは、設定した $6.4ms$ を超えた。これは図 3.11 と図 3.13 に示すように円弧補間による加工の方が直線補間による加工よりも加工に伴うワークモデルのポリゴン数が数千単位で増加するからである。図 3.13 で、ポリゴン総数の増加率推移が 2000 近傍とそれ以外の場所でさほど差がないのに図 3.12 ではサンプリング位置 2000 近傍で処理時間が増加する現象が発生しているが、これはエンジンの一貫性のない現象により生じているものである。工具がワークを削り取る時にワークのポリゴンの各面を内部では細分化する(Sub-division)が、その細分化処理時に一貫性のない現象がエンジン内で起きており、この現象に関しては現在改良中である。それでも円弧補間による加工では所々で設定した $6.4ms$ を超えており、式(3.2)を満たさないことが生じた。これは衝突を防止できないことを意味する。この結果より、例え並列化してシミュレーション時間の容量を増やしても衝突は防げない場合もあることを示している。同時に、切削によるワークモデルのポリゴン数とシミュレーションに要する時間が比例することから、ワークモデルのポリゴン数の削減が衝突回避の課題となることがわかった。

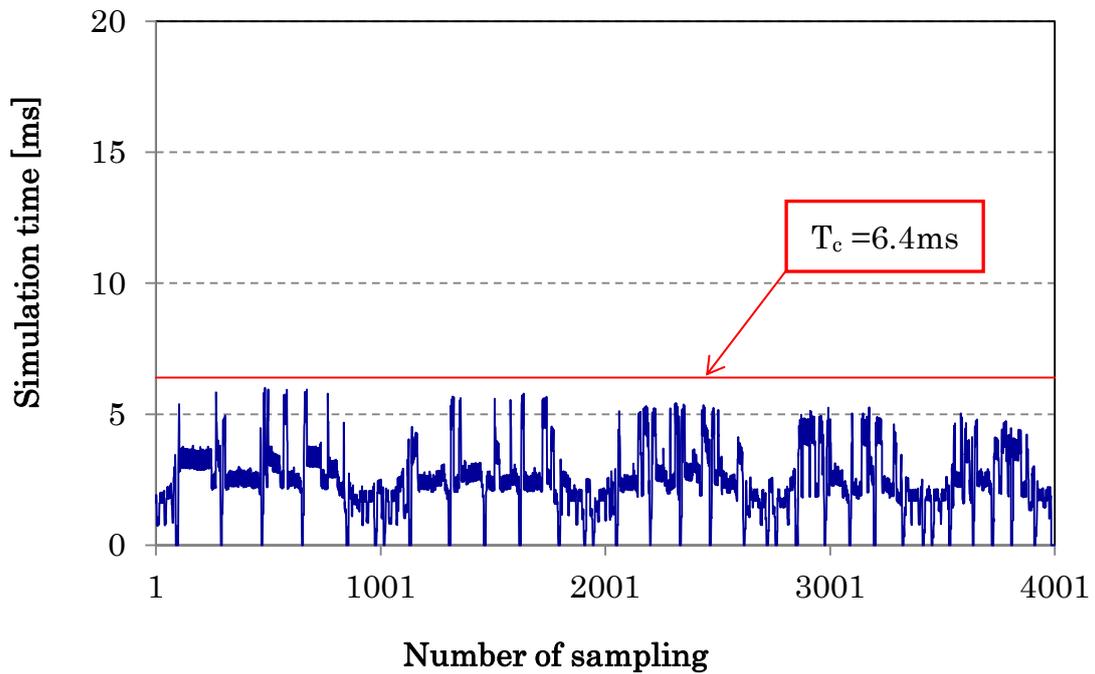


図 3.10 直線補間による加工のシミュレーション時間の推移実績

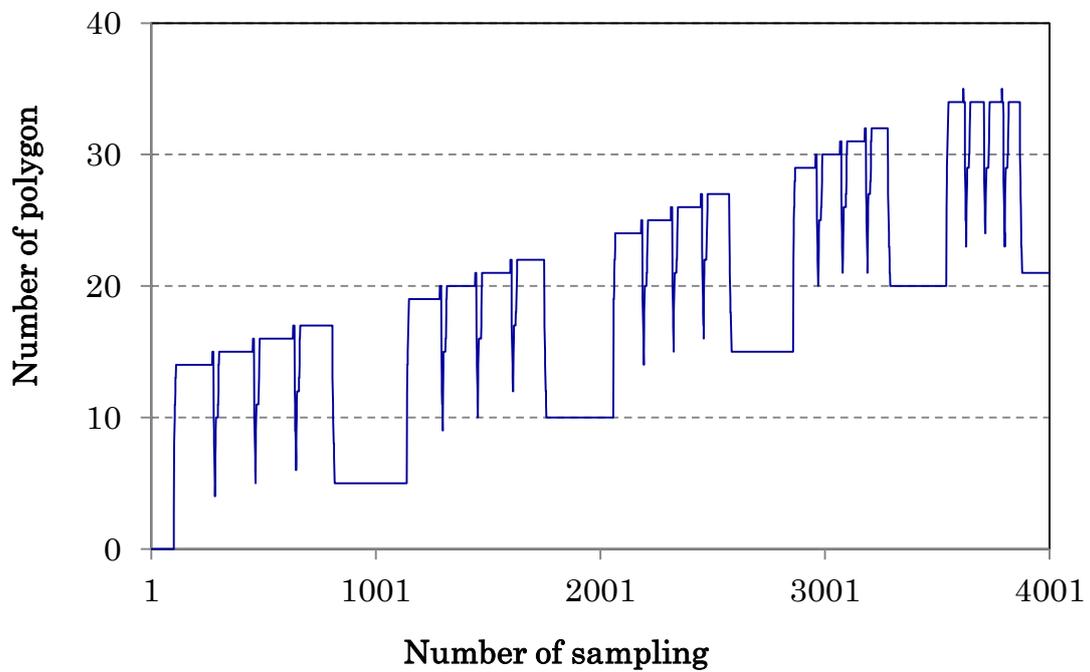


図 3.11 直線補間による加工のワークモデルのポリゴン数推移実績

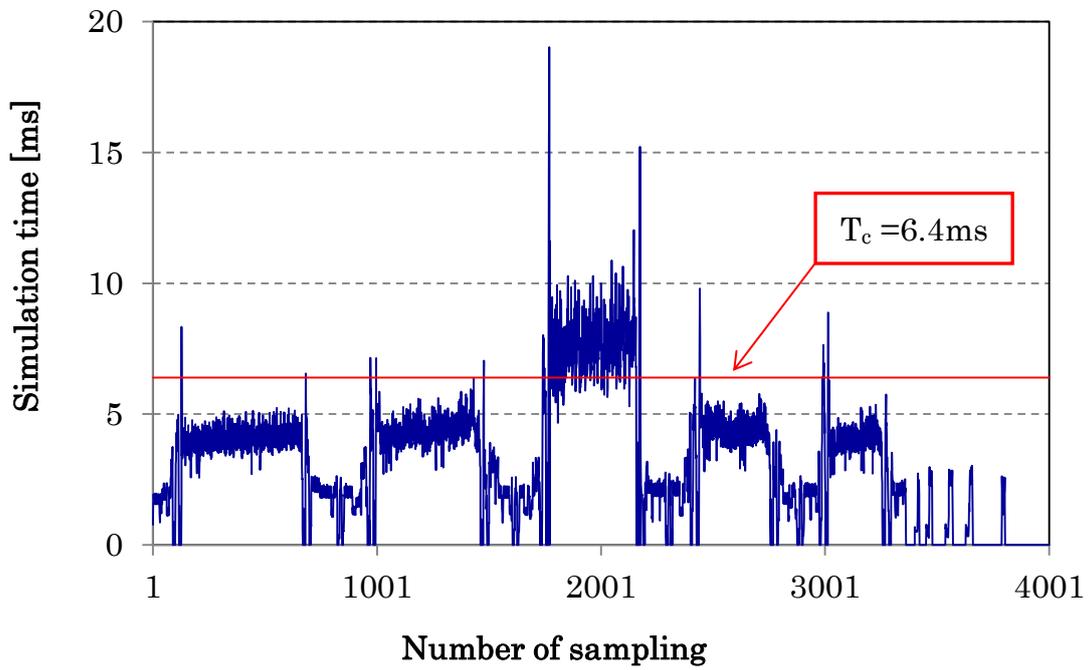


図 3.12 円弧補間による加工のシミュレーション時間の推移実績

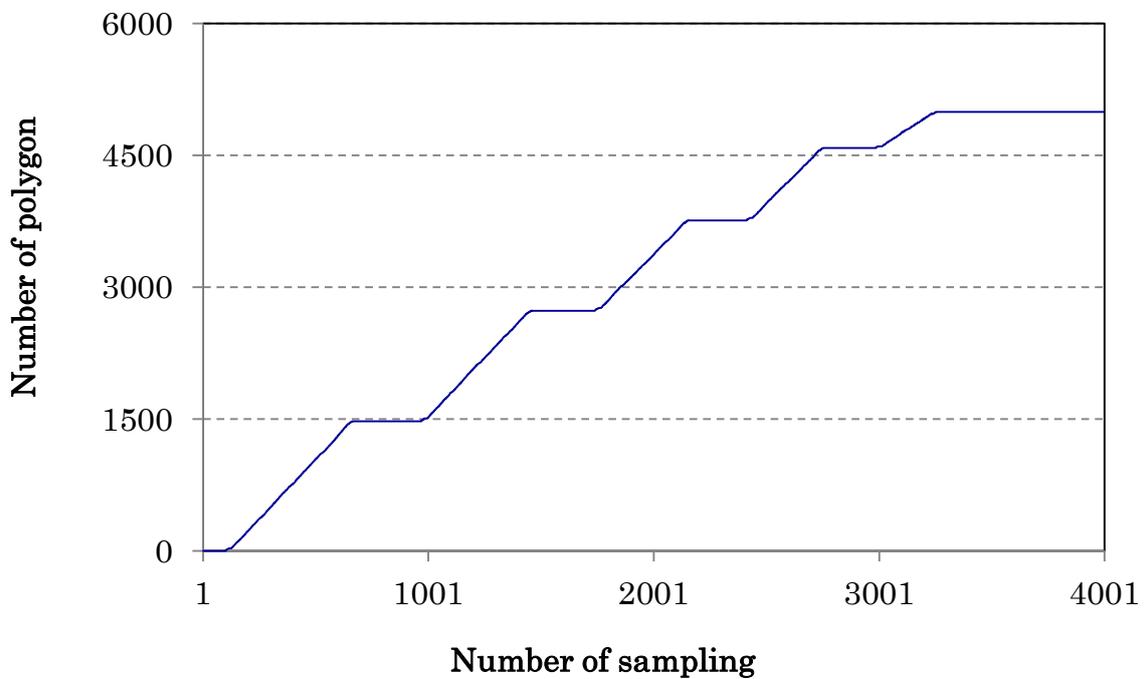


図 3.13 円弧補間による加工のワークモデルのポリゴン数推移実績

3.4 実用化のための間引き手法

3.4.1 シミュレーション計算時間の短縮化

ジオメトリックシミュレータに用いた **B-reps** 手法より，切削によるワークモデルのポリゴン数の増加を必要最小限に抑制することで，シミュレーションに要する時間は低減できる．本研究で用いたオープン CNC(3.3.2 章に詳細記述)からサンプリングできる情報は先行位置座標の履歴のみであるため，本研究ではこの制約において可能な，先行位置座標の履歴をある条件時に間引く手法を考案し，オープン CNC コミュニケータに組み込んだ．ジオメトリックシミュレータで用いた **B-reps** 手法では，工具軌跡の曲線は直線で近似される．この近似する精度をファセットトレランスと呼ぶ．図 3.14 に示すようにオープン CNC からサンプリングした先行位置座標の履歴のうち，ファセットトレランスより小さく移動する先行位置座標は間引き，ファセットトレランスより大きく移動する直前の先行位置座標をジオメトリックシミュレータで新工具軌跡とみなす手法を考案した．これを「間引き手法」と呼んだ．

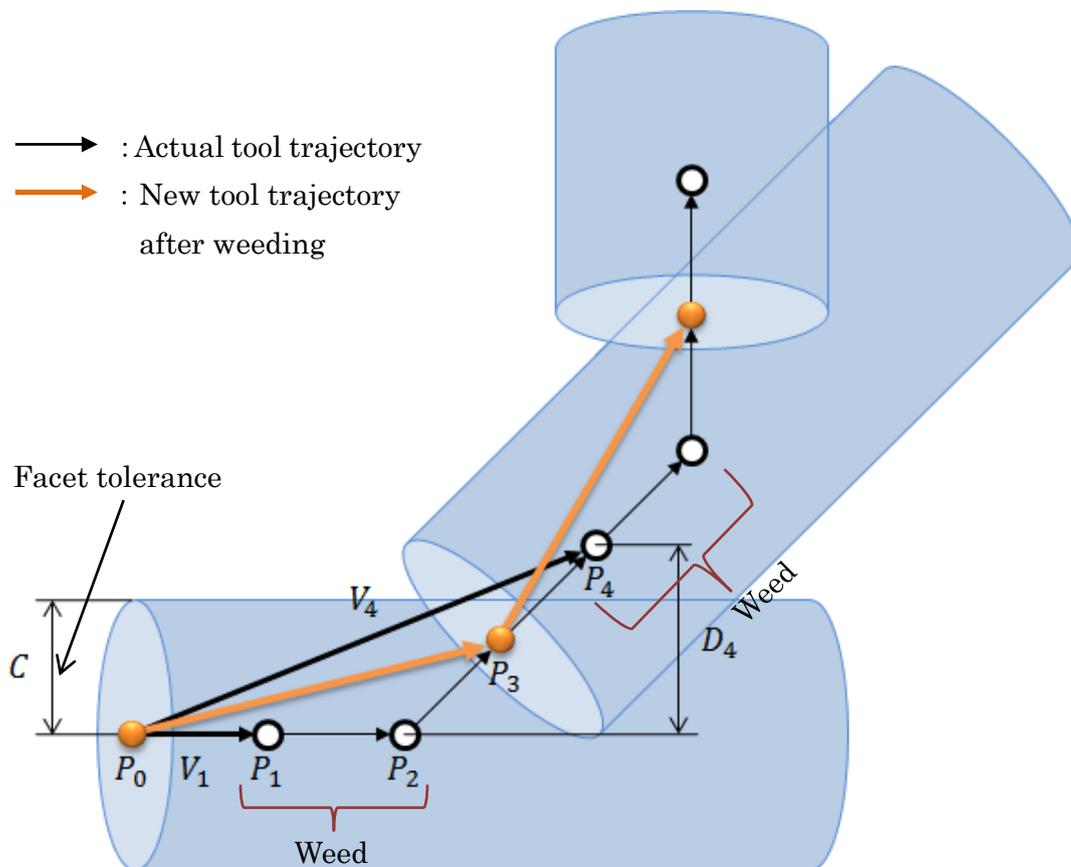


図 3.14 ジオメトリックシミュレータでの間引き手法

先行座標位置 P_0 でシミュレーションした後、 P_1 から P_4 までの先行位置履歴をオープン CNC からサンプリングしたとする。このとき、 P_0 と P_n の移動量をファセットトレランス C と比較するために投影した距離を D_n とすると、下記式となる。

$$D_n = \sqrt{Vn^2 - \left\{ \frac{(V_1 \cdot V_n)}{|V_1|} \right\}^2} \quad (3.3)$$

ここで、

Vn : P_0 から P_n への位置ベクトル

この D_n と C を比較することで、 P_n の先行位置の間引きの可否を判断できる。図 3.14 の場合、 C より小さく移動する P_1 , P_2 の先行位置を間引き、 C より大きく移動する直前の P_3 の先行位置をジオメトリックシミュレータでシミュレーションする。ただし、工作機械が衝突する前に制御軸を停止する必要があるため、先行時間からシミュレーションに要する時間と工作機械の強制停止に要する時間を引いた時間内の先行位置しか間引くことができない。そのため、間引ける先行位置の数は限られる。ここでオープン CNC の先行位置計算周期を T_i 、間引ける先行位置数を N とすると、 N と T_i を掛けた値は必ずサンプリング周期 T_s より小さくなる必要があるため、式(3.2)を利用すると次のようになる。

$$N < ((T_f - T_c - T_m) / 2) / T_i \quad (3.4)$$

ここで、本研究で使用したオープン CNC の仕様により、 T_i は 4ms である。

また、工具の送り速度が異なれば移動距離も変わり、先行位置座標取得のために現在位置より先行させる時間 T_f が一定であるため、衝突の判定精度も変わってくる。この場合、基本的には安全側に常に判定させる必要があるため、最大工具送り速度で T_i 時間分動いた最大移動距離分の近接を検出するように工具、治具、素材などの形状はマージンを持たせる事が妥当であると考ええる。

3.4.2 実験方法

3.3.2 章で実施した実験と同様に、ジオメトリックシミュレータを導入した PC と 5 軸加

工機のオープン CNC を接続した状態で再度図 3.9 の円弧補間による加工を行ったときのシミュレーションに要する時間と切削によるワークモデルのポリゴン数の推移を測定した(使用工具, 加工条件などは全て同じにした)。また, 複雑な曲面を加工する代表例として, 図 3.15 に示すような同時 5 軸加工のインペラ製品を取りあげた。インペラ加工の場合は荒加工に $\phi 6.9\text{mm}$ のボールエンドミル, 中仕上げ加工に $\phi 6.0\text{mm}$ のボールエンドミル, そして仕上げ加工に $\phi 5.5\text{mm}$ のボールエンドミルを使用した。

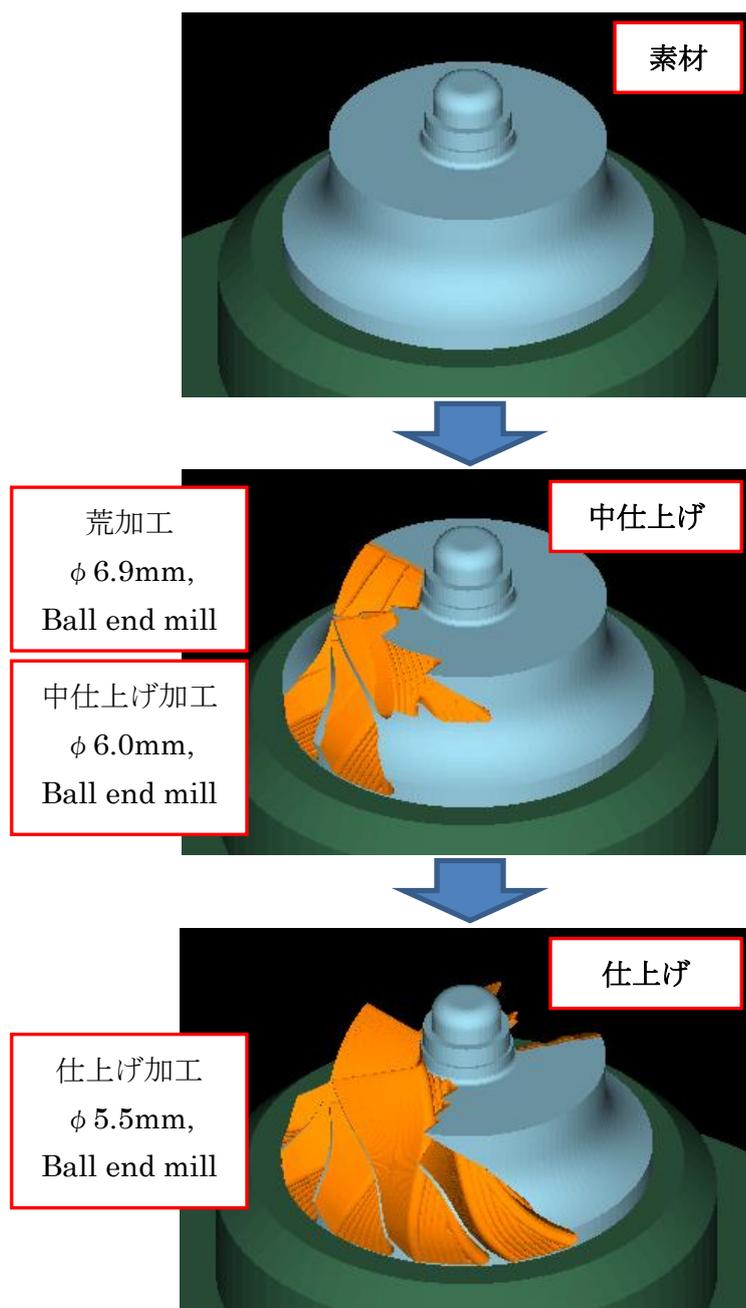


図 3.15 同時 5 軸加工機による切削加工(インペラ)

3.4.3 実験検証結果

図 3.9 の円弧補間による加工を行ったときのオープン CNC コミュニケータに間引き手法を用いた場合のシミュレーションに要する時間と切削によるワークモデルのポリゴン数(ワーク面数)の推移を測定した結果を図 3.16, 図 3.17 に示す. また, 同時 5 軸加工の代表例であるインペラ製品で間引き手法を用いた場合のシミュレーションに要した時間と切削によるワークモデルのポリゴン数の推移を測定した結果を図 3.18, 図 3.19 に示す.

間引き手法により, 円弧補間を加工した際のシミュレーションに要する時間と切削によるワークモデルのポリゴン数が低減し, シミュレーションに要した時間は, 設定した 6.4ms を超えなかった. この結果は式(3.2)を満たすため, 衝突防止ができることを意味する. しかし, 間引き手法を適用しても, インペラ製品を加工した際のシミュレーションに要する時間と切削によるワークモデルのポリゴン数は減少せず, シミュレーションに要した時間は, 設定した 6.4ms を大幅に超えたため, 衝突を防止できないことになる.

オープン CNC コミュニケータに組み込んだ間引き手法を適用すると, 直線補間や円弧補間で同時 2 軸加工する際のシミュレーションに要する時間を短縮することができ, この範囲ではリアルタイムで衝突を防止するオンライン・リアルタイム衝突防止システムの有効性が確認できた. しかし, 複雑な動作を行う同時 5 軸加工においては, 間引き手法を用いても困難である. 手動操作時には計算の追従性の問題が発生しないために, オンライン・リアルタイム衝突防止システムとしては有効であるが自動運転の場合は難しい. ここで, 本研究で開発したオンライン・リアルタイム衝突防止システムの有効性を表 3.1 に示す.

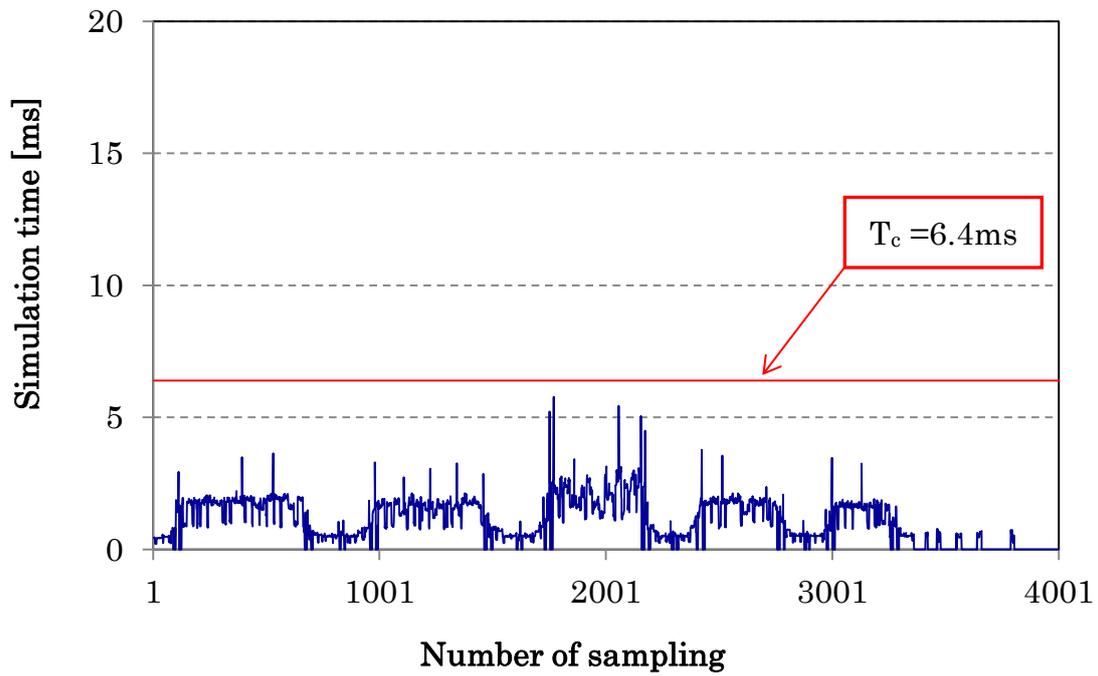


図 3.16 間引き手法を用いた円弧補間による加工のシミュレーション時間の推移実績

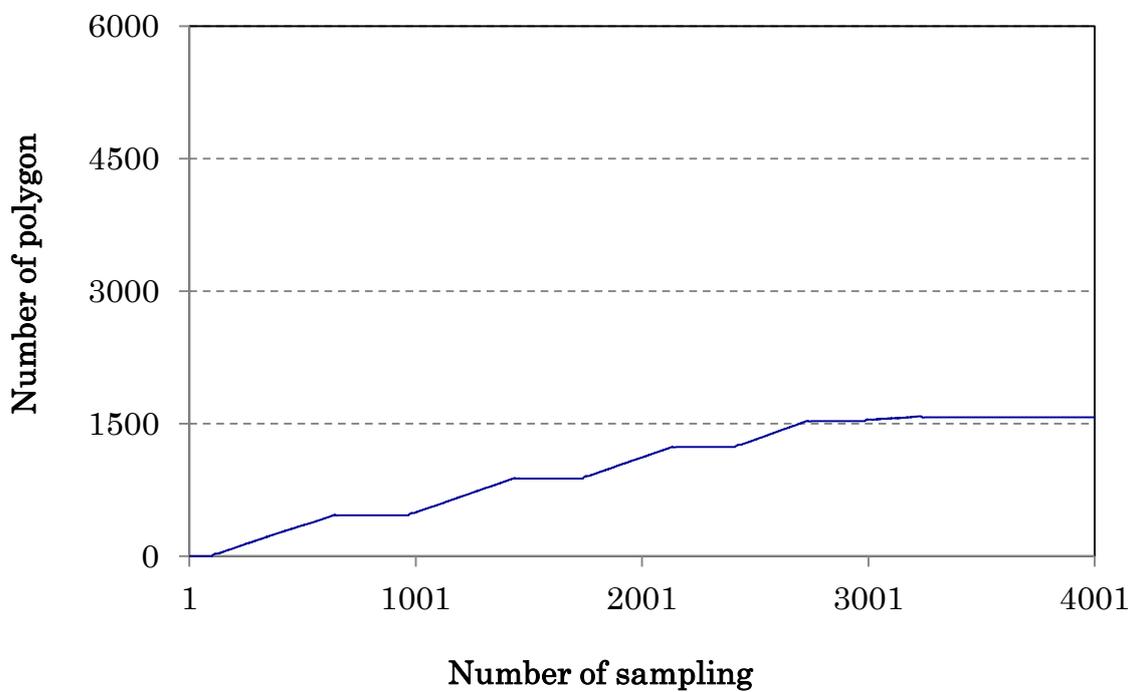


図 3.17 間引き手法を用いた円弧補間による加工のワークモデルのポリゴン数推移実績

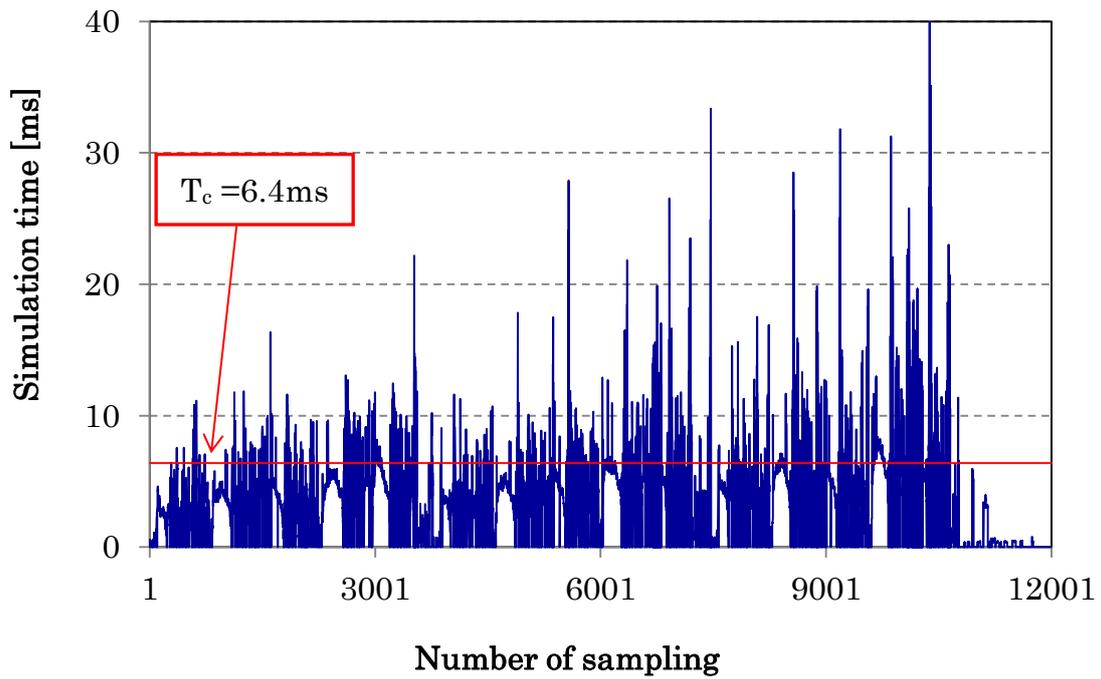


図 3.18 間引き手法を用いた同時 5 軸加工によるシミュレーション時間の推移実績(インペラ製品)

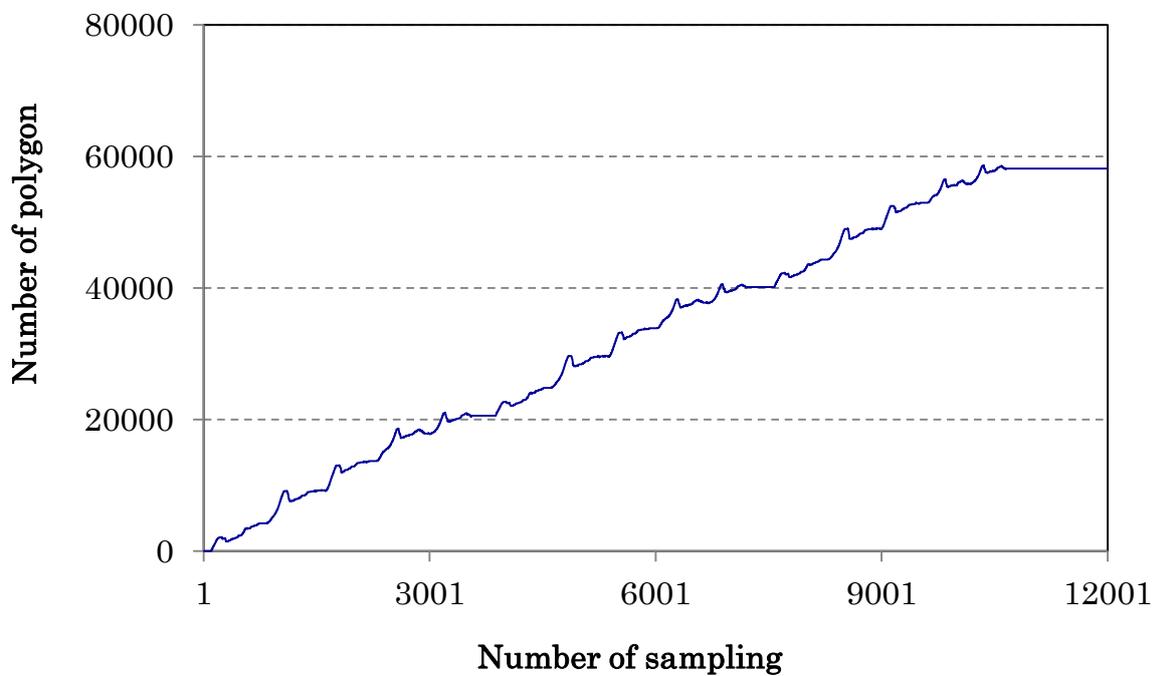


図 3.19 間引き手法を用いた同時 5 軸加工によるワークモデルのポリゴン数推移実績(インペラ製品)

表 3.1 オンライン・リアルタイム衝突防止システムの有効性

	制御軸数	ワークモデル ポリゴン数	適用可否 判定	有効性
直線補間 (ピラミッド形状)	1～2 軸	小	◎	基本機能で可能
円弧補間 (円錐形状)	2～3 軸	中	○	間引き処理で可能
同時 5 軸加工 (インペラ製品)	～5 軸	大	×	対応不可(現状)

本研究では同時 5 軸加工の衝突防止が目標である。同時 5 軸加工のインペラ製品に代表される複雑曲面の加工での対応要求は今後さらに高くなることを考え、特に複雑形状加工においてはリアルタイムではないが、機械 CNC 上で動作する「マシンロック」モード方法を次章で提案する。

3.5 本実験の問題に対する解決手段—マシンロックモードの適用

前章で複雑加工品の代表例である同時 5 軸で加工するインペラ製品はワークモデルのポリゴン数の多さによりシミュレーション時間が設定値より大幅に超えてリアルタイムでの衝突防止を図ることができないことを説明した。シミュレーションに要する時間を短縮するための手法をさらに考えることは勿論重要だが、日々品質や精度の厳しいインペラやその他の複雑形状品が設計されるため、たとえ手法で一つ改良されてもすぐにさらに厳しい複雑形状製品が現れる。本研究では実用的な方法を考えることも考慮にいられているので、今後複雑形状品の加工にはリアルタイムではないが、オンラインで機械の軸は動かないが CNC だけが動く「マシンロック」状態で実加工前に CNC 上で確認することを提案する。これはオフラインの机上でのシミュレーションと違い、実際の機械の動きを入力データとして使用することができるので、リアルタイムと同等の正確性が得られ、十分に衝突防止の機能を発揮できる。また、実際に加工オペレータがすぐにその場で確認できるという利点もある。「マシンロック」モードを使用することで衝突を安全に回避することが可能となるケースを以下に補足する。

(1) 工具オフセットの変更

工具摩耗などの理由により工具オフセット値の変更が必要となった場合、オペレータの補正値入力ミスが原因で衝突を起こす危険性がある。この場合は機械を停めた状態の検証となるが「マシンロック」モードにより安全性が確認できる。

(2) 工具破損，機械異常，停電発生時などのマニュアル操作

突発的な異常発生時には，機械原点の再設定など初期設定が必要となり，マニュアル操作によるミスが原因で衝突を起こす可能性がある．CNC 上で「マシンロック」モードによる検証で安全性が確認できる．

(3) 治具，素材などの変更

治具，素材などの配置はオペレータの判断により臨機応変に変更される場合がある．この場合，オフライン検証に戻ることなく，CNC 上の「マシンロック」モードにより検証が可能となる．ただし，治具や素材のモデルはあらかじめ CNC 内に登録しなければならないが，その方法は CNC メーカーに検討してもらう必要がある．

3.6 今後の課題

本研究では今後複雑形状加工においては「マシンロック」モードにて対応する方法を提案したが，精度への要求はさらに高くなると考えられる．同時 5 軸加工のような複雑形状の自動運転の場合でもオンライン・リアルタイム衝突防止システムが有効となるには，以下の対策をとる必要があると考える．

(1) T_f (先行位置座標取得のために現在位置より先行させる時間)の拡大化

オープン CNC コミュニケータにおいて， T_f はオープン CNC 性能に依存している．先行位置座標は CNC 側の自動速度制御や自動加減速，オーバーライド値の変化などの要因で誤差が大きくなる可能性があるため， T_f が大きくなればなるほど信頼性に劣るデータになる傾向がある．しかし，干渉前に确实停止させるには，信頼性のあるデータが必要であるため， T_f は現状大きな値にすることができないという制約がある．誤差が大きくならず，かつ T_f の拡大化が図れることが必要であり，CNC メーカーの技術開発に期待する．

(2) T_c (ジオメトリックシミュレータによるシミュレーションに要する時間)の短縮化

形状モデルの複雑さに比例して計算速度が低下する．さらなる短縮が必要であり，同時 5 軸加工のような複雑形状でも，先行位置座標のサンプリング周期内で計算可能とする高速化が目標である．実現手段として，切削による加工物形状の変化，衝突計算，描画といった各シミュレーション計算の並列処理化をたとえば CPU や GPU のマルチコア並列処理を利用して行う開発や，形状モデルを自動簡素化するアルゴリズム開発，といった課題に取り組む必要がある．

3.7 まとめ

本研究では 2.5 章で述べたようにリアルタイムでの衝突防止+切削負荷適応制御システムが最終目標である。しかし、本研究でリアルタイム衝突防止システムを開発するにあたり、幾度も大きな壁に直面した。一つは、アイコクアルファ(株)は 100 台以上の同時 5 軸加工機を現在所有し、約 40 年ものあいだ、同時 5 軸加工に特化して製造してきたが、実際の機械や CNC を製造していないので、どうしても解決できない領域があり、工作機械メーカーからできるだけ協力を得ないといけなかったことだ。もう一つはたとえ提案手法でオンライン・リアルタイムにて衝突を防ぐシステムを開発してもすぐに精度の厳しい、複雑な形状の製品がでてきて、ポリゴン数や計算時間が間に合わない問題が頻繁に発生したことだ。まだ課題は多いが、本開発をしたことで今後どういう技術が必要なのか、また現在のレベルが将来像に対してどれ程の位置にあるのか明確にすることができた。本研究で開発したオンライン・リアルタイム衝突防止システムで達成できたことをまとめると下記の通りである。

- (1) B-reps のソリッドモデルを用いたジオメトリックシミュレータとオープン CNC をオープン CNC コミュニケータでつなぐことにより、衝突を防止するオンライン・リアルタイム衝突防止システムを構築することができた。
- (2) オープン CNC コミュニケータに間引き手法を適用させて、直線補間や円弧補間で同時 2 軸加工する際のシミュレーションに要する時間を短縮できた。この範囲では衝突を防止するオンライン・リアルタイム衝突防止システムの有効性を確認することができた。
- (3) 同時 5 軸加工が必要な複雑形状に関しては計算容量が大きくなるため、リアルタイムでのシミュレーションは確認できない。このような場合には CNC 装置を「マシンロック」モードにして作動させると衝突防止機能になりうる。なお、手動操作においては十分にシステムとして有効であることが確認できた。

【3章の参考文献】

- 3-1) Y.Takeuchi and T.Watanabe, Generation of 5-axis Control Collision-Free Tool Path and Postprocessing for NC-Data, Annals of the CIRP, Vol.41, No.1, 1992, pp.539-542.
- 3-2) B.Lauwers, J.P.Kruth, P.Dejonghe, and R.Vreys, Efficient NC-Programming of Multi-Axes Milling Machines Through the Integration of Tool Path Generation and NC-Simulation, Annals of the CIRP, Vol.49, No.1, 2000, pp.367-370.
- 3-3) X.Tian, H.Deng, M.Fujishima, and K.Yamazaki, Quick 3D Modeling of Machining Environment by Means of On-machine Stereo Vision with Digital Decomposition, Annals of the CIRP, Vol.56, No.1, 2007, pp.411-414.
- 3-4) M.Kanamaru, N.Sakai, A.Goto, T.Hida, Development of Simulation Technology for 5-Axis Machines-Verification of Material Removal Model and Collision Avoidance-, Int. J. of Automation Technology, Vol.1, No.2, 2007, pp.141-146.
- 3-5) FANUC, Lathe/Machining Center Users-Manual, B-63944JA/02, pp.952.
- 3-6) Okuma, OSP-E100M/OSP-E10M Programming Instruction (4th Edition), Pub. No. MJ33-015-R4 Apr.2001, pp.18.
- 3-7) FANUC, F30i-A(J)-05, 2008.10, pp.5.
- 3-8) 特許(特開 2007-48210), 工作機械稼働部の衝突防止方法, 中村留精密工業株式会社, 2007年.
- 3-9) 特許(特開 2006-102923), 工作機械稼働部の衝突防止方法, 中村留精密工業株式会社, 2006年.
- 3-10) 特許(特開平 11-333656), 工作機械の主軸ヘッド部衝突防止装置, 株式会社エヌエスティー, 1999年.
- 3-11) 特許(特開平 11-138380), 衝突時の損傷防止機能を有する工作機械, 株式会社牧野フライス製作所, 1999年.
- 3-12) 特許(特開平 9-262744), 工作機械のヘッド衝突検知装置, 東芝機械株式会社, 1997年.
- 3-13) 特許(特開平 9-131645), 衝突防止装置を備えた NC 工作機械, オークマ株式会社, 1997年.
- 3-14) 特許(特開 2007-18145), 工作機械の干渉チェック装置, 株式会社ジェイテクト, 2007年.
- 3-15) M.Sudo, Advanced Control Technologies for 5-Axis Machining, Int. J. of Automation Technology, Vol.1, No.2, 2007, pp.108-112.

- 3-16) O.Ilushin, G.Elber, D.Halperin, R.Wein, M-S.Kim, Precise global collision detection in multi-axis NC-machining, *Computer-Aided Design*, Vol.37, 2005, pp.909-920.
- 3-17) S.Du, T.Surmann, O.Webber, K.Weinert, Formulating swept profiles for five-axis tool motions, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.45, 2005, pp.849-861.
- 3-18) R.O.Andersen, Detecting and eliminating collisions in NC machining, *Computer-Aided Design*, Vol.10, No.4, 1978, pp.231-237.
- 3-19) S.Takata, M.D.Tsai, M.Inui, T.Sata, A Cutting Simulation System for Machinability Evaluation Using a Workpiece Model, *Annals of the CIRP*, Vol.38, 1989, pp.417-420.
- 3-20) W.H.Walstra, W.F.Bronsvort, and J.S.M.Vergeest, Interactive Simulation of Robot Milling For Rapid Shape Prototyping, *Computer & Graphics*, Vol.18, No.6, 1994, pp.861-871.
- 3-21) T.Hida, T.Asano, K.Nishita, N.Sakai, A.Goto, and Y.Takeuchi, Development of Online Real-Time Collision Free Machining Using Simulation with CNC Openness, *Int. J. of Automation Technology*, Vol.9, No.4, 2015, pp.403-410.

第4章 切削負荷事前評価システムの開発

4.1 はじめに

本章においては、NC 工作機械を安全に加工させるための NC 機の実際の運動情報に基づく切削負荷を事前に予測するシステムの開発について概説する。この開発の詳細な背景は第2章で述べたが、予期せぬ工具過負荷による工具折損対策や、安全を考慮し過ぎて過度に送り速度を落して生産効率を悪化させる対策として近年プログラマが NC データを使用して机上にて切削負荷の事前シミュレーションを実施するようになってきたが、高速・高効率加工においては実機が NC データ指令通りに運動していない場合があり、必ずしも切削負荷が予測通りいかない場合がある。それを解決させるために本章ではより正確な工具切削負荷を事前に評価できるシステムを考案したので、具体的にシステムの概要を説明して、適用した切削負荷予測手法と考案した評価用運動情報の生成手法を述べる。さらに開発したシステムで実験を行い、提案手法の有効性を検証する。最後に本実験から得られた今後の課題と展望について説明する。

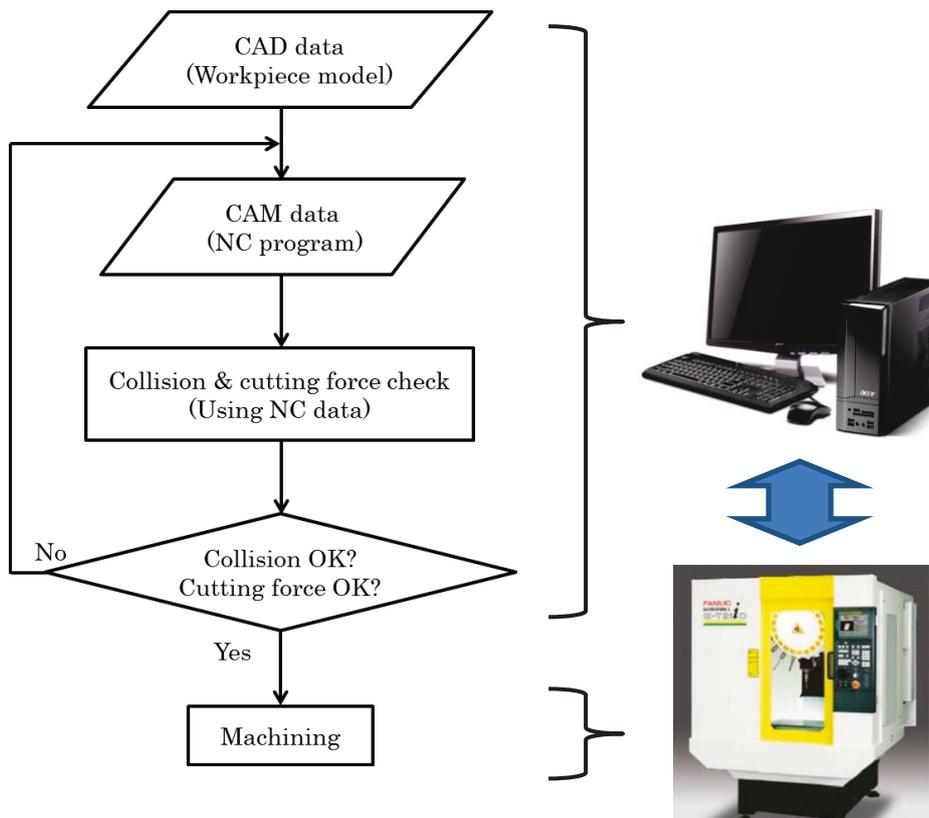
4.2 基本コンセプト

4.2.1 システム概要

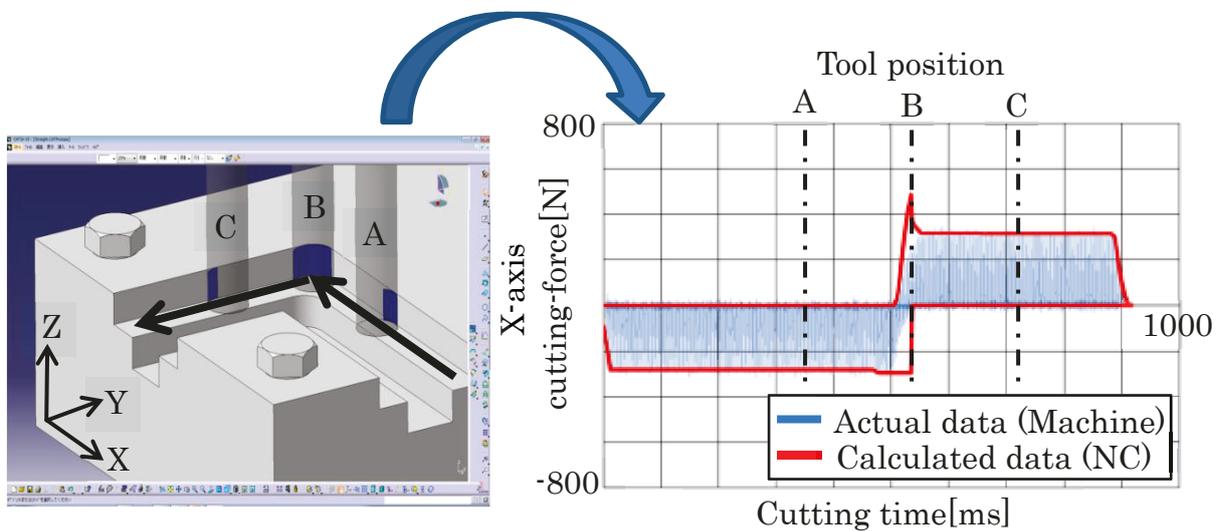
第2章で述べたように安全加工を目指すには衝突を検知するシステムと現在でもしばしば起きる予期せぬ工具折損を未然に防ぐシステムが必要であると考えられる。近年の高速・高効率加工では切削力を最大にするような過酷な加工が実現現場で行われており、時として予期せぬ工具折損が起きている。第2章で工具折損の事例を述べたが、工具折損を防いだり、逆に工具が折れないように過度に送り速度を落したりすることは危険と生産効率の低下

につながるため、近年では図 4.1 に示すように実加工前の NC プログラムが工具パスや切削条件を検討している段階で机上にて切削負荷を検証し、それに基づいて再度プログラムが工具経路や送り速度などを変更してより適正な切削負荷条件を実加工前に検証するシステムが適用されている^{4-1)~4-2)}。加工時の切削負荷や工具状況の評価は、長い間研究開発されてきている切削力予測理論^{4-3)~4-8), 4-14), 4-15), 4-18)~4-23)}にて行っているが、これらのシステムは、NC プログラムから推定した工具位置を用いて切削負荷を予測しており、工作機械が NC プログラムの指令値通りに運動することを前提としている。しかし、第 2.4 章に事例として説明したように、工作機械は実際には NC プログラム通りに運動していない場合がある⁴⁻⁹⁾。そこで、実際にコーナー部を工具が走るような NC プログラムを作成し、NC プログラムの指令値に基づく工具経路と工作機械の実運動情報(実際の工具経路)をサーボモータから抽出して比較してみると図 4.2 のようになる。図 4.2 を見ても、実工具運動は NC プログラム指令値通りに動いていないことがわかる。直線部分は NC プログラム指令値と実工具運動はほぼ同じでも、コーナー部近傍になると違いが生じているのがわかる。なお、この確認時には工作機械の CNC に付加されている輪郭制御や各種制御は全て OFF にして評価した。さらに、送り速度に関しても NC プログラム指令値と、実際にサーボモータから抽出した情報とで比較すると図 4.3 のようになる。位置情報同様に、実際の送り速度は NC プログラム指令値とはコーナー部近傍で異なっていることがわかる。また、図 4.4 に示すように、たとえ NC プログラムの工具位置指令が同じでも、送り速度を変えただけでコーナー部での実工具経路は変わっていくことがわかる(図 4.4 では実際に機械で送り速度を変更させた場合の実工具位置情報を抽出)。このように NC プログラムからオフラインで切削負荷を評価すると、実際に工作機械が動いた時には NC プログラムとは異なった運動情報となるので精度良く切削負荷を予測することが難しいと考えられる。そこで、工作機械の運動をモデル化し、そのモデルを用いて切削負荷を予測する手法⁴⁻¹⁰⁾も考えられるが、工作機械の運動のモデル化は、特定の運動に限られており、実際の切削加工での多種多様な運動や運動に影響する各種パラメータに対応し続けることは実用的でない。そこで、CNC から取得した工作機械の実際の位置や送り速度などを用いて切削負荷を予測することで、より正確に切削負荷が予測でき、さらなる切削負荷の適正化が図れるようになる。本章ではこのような切削負荷予測システムの概要について説明する。

前述したように、CNC から取得した工作機械の実際の運動情報を用いて切削負荷を予測、確認し、切削負荷が急増、あるいは生産効率が落ちるような過度な低速送り速度の加工の切削条件とならないように NC プログラムを変更することで、これらの対策を図ることができる。本研究において CNC から取得した工作機械の実際の運動情報とは、CNC からサーボモータに渡される情報である。本実験では小型加工機を使用したアルミ合金の切削であり、セミクローズドループで制御されるサーボモータにつながるボールねじの弾性変形および、工具のたおれなどは考慮していない(将来的には大型加工機の実験も行い、弾性変形などの研究も実施する必要はある)。このシステム概要を図 4.5 に示す。

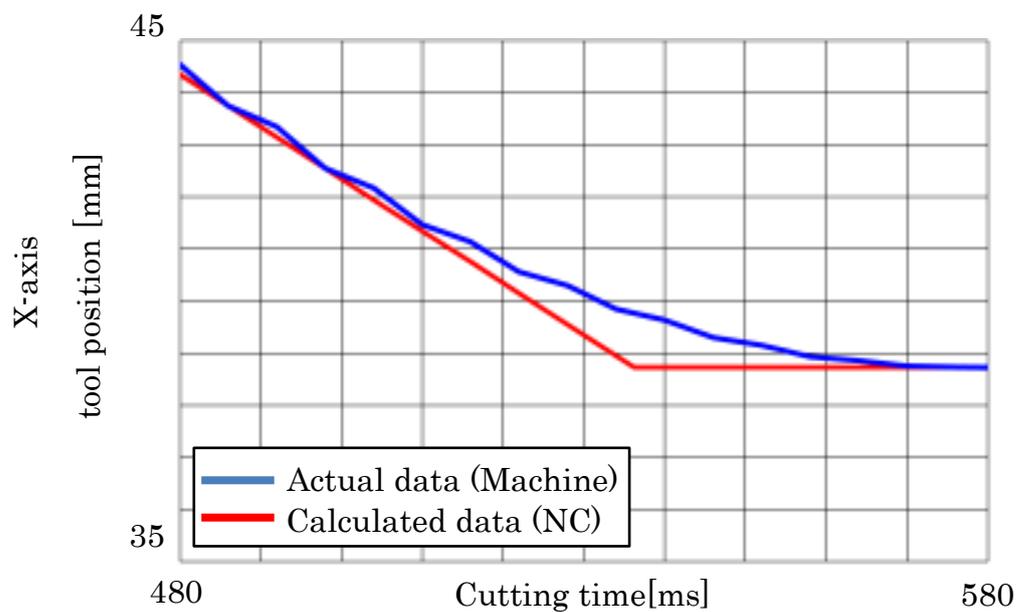


(a) 実加工前の切削負荷シミュレーションのプロセスフロー

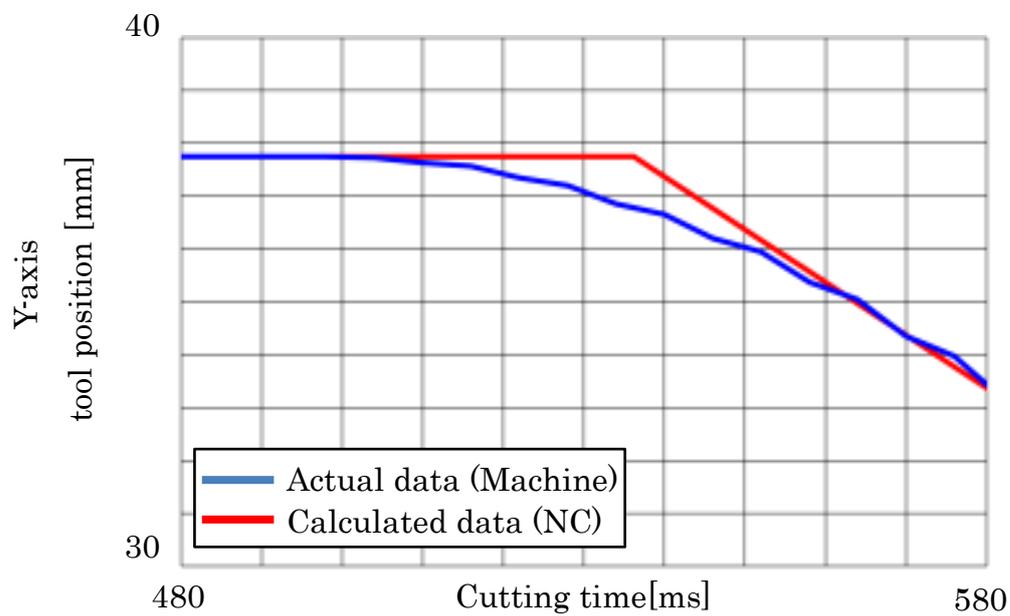


(b) NC プログラム指令値から算出した切削負荷
と工作機械にて実測した切削負荷の例

図 4.1 NC プログラムによる実加工前の切削負荷予測

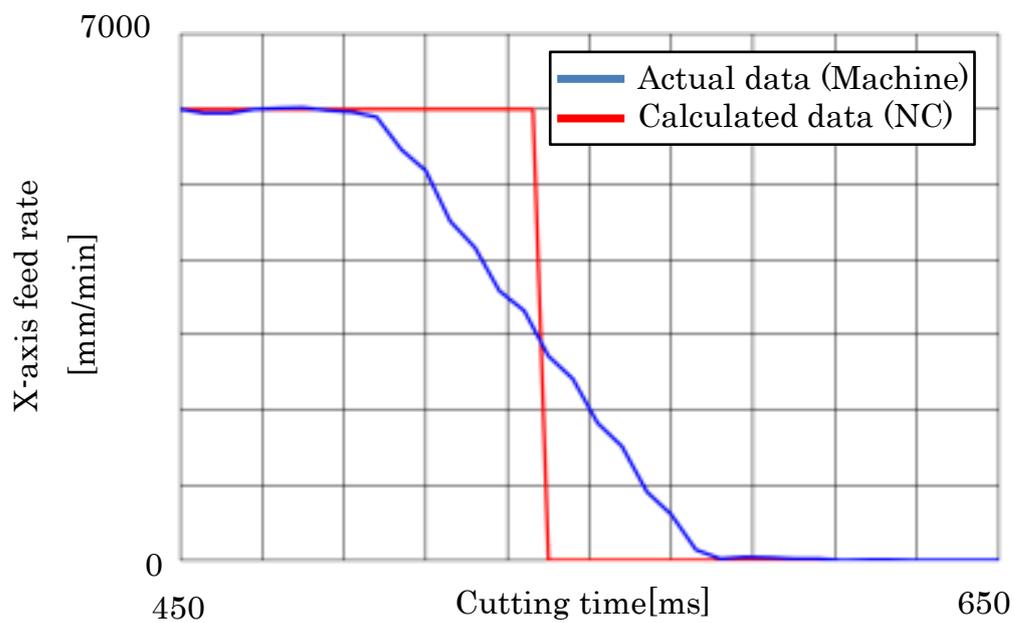


(a) X 軸方向の工具位置

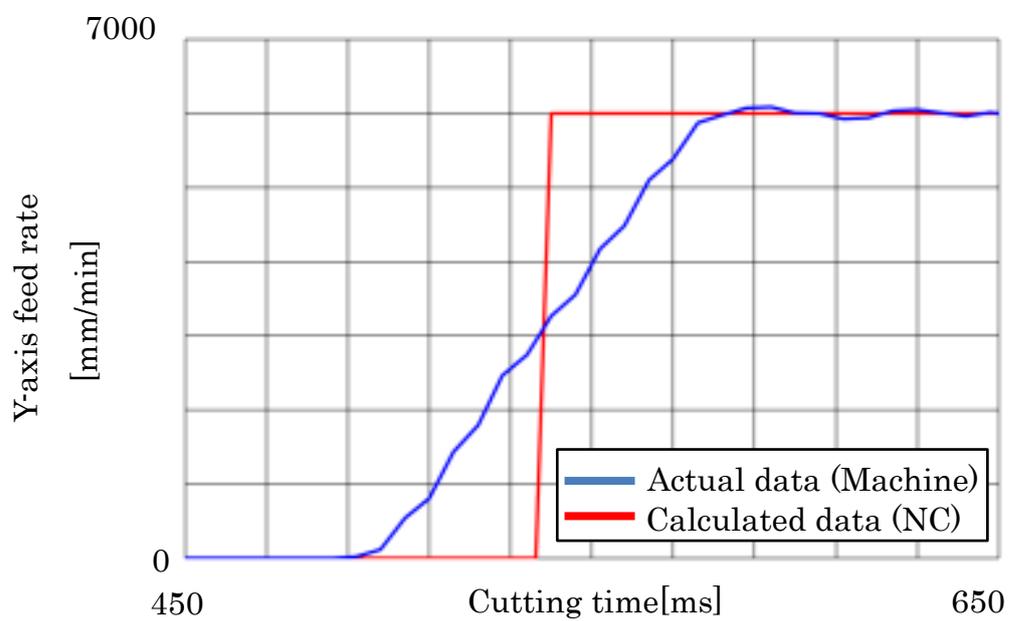


(b) Y 軸方向の工具位置

図 4.2 NC プログラム指令値による工具経路と
実運動情報による実際の工具経路



(a) X 軸方向の送り速度



(b) Y 軸方向の送り速度

図 4.3 NC プログラム指令値による送り速度と
実運動情報による実際の送り速度

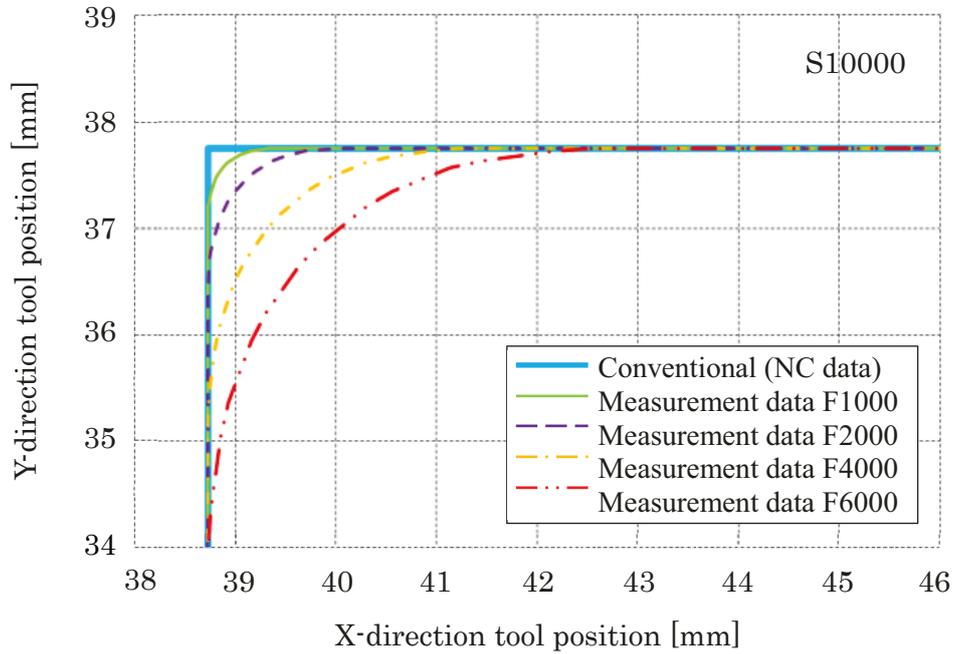


図 4.4 送り速度と工具経路の関係

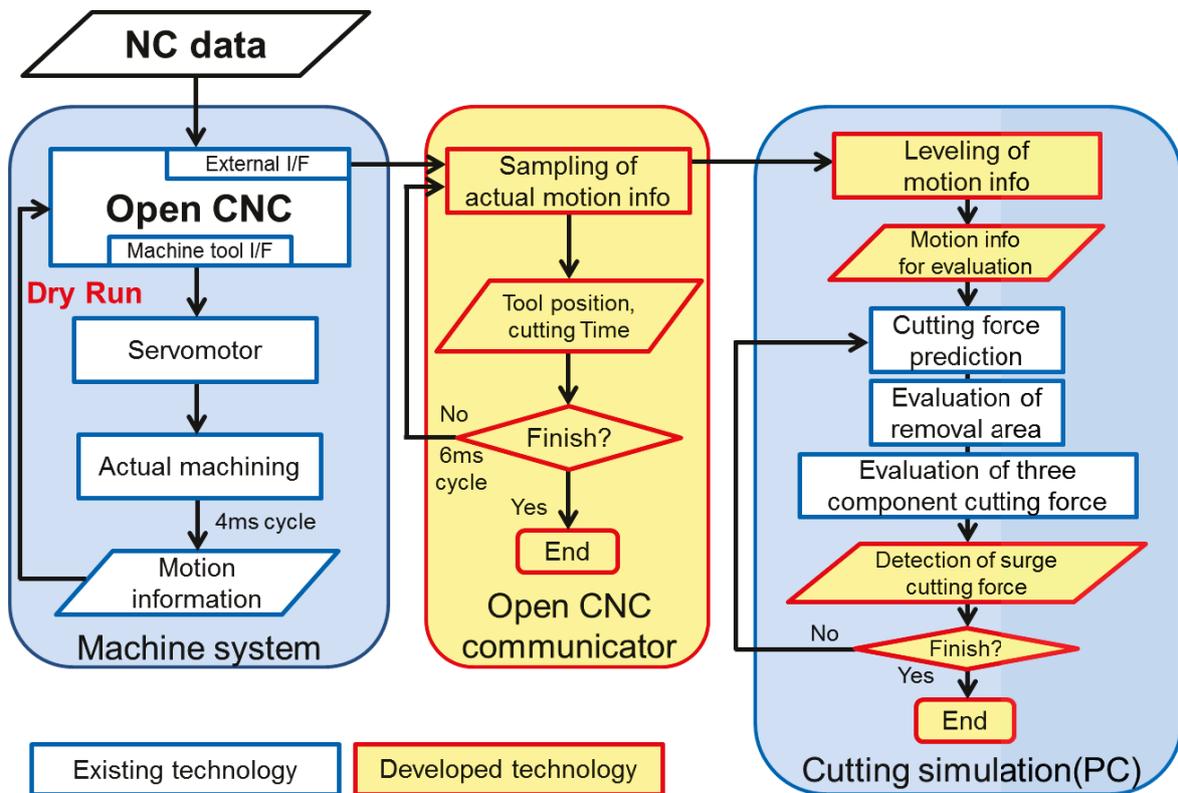


図 4.5 本研究で開発した切削負荷予測システム概要

本システムは、CNC から一定周期毎に取得される現在の実工具位置、実送り速度、実回転数を利用して切削負荷を計算する。従来 CNC はブラックボックス化されており実機械運動情報を取得することは困難であったが、近年徐々に CNC のオープン化が進み、いくつかの情報がオプション機能にて取得可能となっている⁴⁻¹¹⁾。それらの情報を取得するには CNC と接続されているソフトウェアが必要で、本研究では工作機械から一定周期毎に運動情報を取得して保存するオープン CNC コミュニケータ^{4-12)~4-13)}を使用した。このコミュニケータは衝突防止システムでも使用できるものである。オープン CNC コミュニケータが工具やワークを取りつける前の工作機械で NC プログラムによる空運転中に一定周期でサンプリングした実運動情報を保存し、空運転終了後、平滑化した評価用の運動情報を用いて切削負荷を予測する。

本システムを実現化するためには、実用的な計算速度の切削負荷予測手法と、評価用の運動情報を生成する手法が重要となる。

4.2.2 切削負荷予測手法

本研究で用いている切削負荷予測手法は、工具に作用する切削抵抗の大きさと向きを同時に求める切削三分力を導出するための手法のことである。この切削負荷を予測する手法は古くから研究されてきており、主に3つの手法に大別される—比切削抵抗法、エネルギー解析法と、有限要素法である。

(1) 比切削抵抗法^{4-3)~4-8), 4-14)~4-15), 4-18), 4-23), 4-29)}

比切削抵抗法は工具切れ刃の微小領域ごとに加わる力がそれぞれ独立して求められ、それらを合成することで工具全体にかかる力と仮定する手法で、具体的には個々の微小領域に作用する力を、切れ刃の被削物に対する局所ごとの切り込み深さと比例定数の和によって切削力を算出する。この手法は材質や工具形状によって比切削抵抗値を実験的に求める必要があり、それらを全てデータベースにて管理しないとイケないという難点はあるが、計算時間が早いため、びびり振動の解析まで容易に可能となる。近年の研究では比切削抵抗値を全て実験的に求める必要もなく、工具のねじれや刃数、送り速度、回転数、軸方向や径方向の切り込み厚さなどの情報で、ある程度の推定ができる。

(2) エネルギー解析法^{4-19)~4-22)}

3次元の切削モデルを切り屑流出角によって決まる切り屑流出方向と切削速度方向を含む二次元切削の重ね合わせとして考えて、切削力を算出する手法である。その際、切り屑流出角は二次元切削データを用いて、せん断面のせん断仕事とすくい面の摩擦仕事の和を計算し、これが最小となる方向に設定する。この手法は切り屑流出方向が解析的に得られ、またデータベースの管理が容易であるが、切り屑流出方向の探索に計算時間を要する。

(3) 有限要素法⁴⁻²⁴⁾

塑性力学に基づく数値解析で、流動応力特定による材料の変形を逐次解析する手法である。切り屑形状も得られることから、切り屑処理の具体化が可能であるが、現状では計算に要する時間の問題から解析時間が非常に長くなる傾向がある。このため、一般的には任意形状の切削を行う際の工程の検討ではなく、工具切れ刃の形状を設計する際に広く用いられている。

本研究開発では、有限要素法やエネルギー解析法による切削負荷の予測に比べて切削負荷の予測が時間を要しない比切削抵抗法を用いた。具体的には金子らが開発した切れ刃からみた主分力と背分力に分離して比切削抵抗値を設定し、それを座標変換して工具にかかる力を合成した手法を取り入れた^{4-14)~4-15)}。

金子らが開発した比切削抵抗法^{4-14)~4-15)}は、図 4.6 に示すように工具切れ刃を微小直線刃の集合とみなして、有限個の微小切れ刃に作用する切削抵抗の合計が工具への作用力と等しいと仮定している。

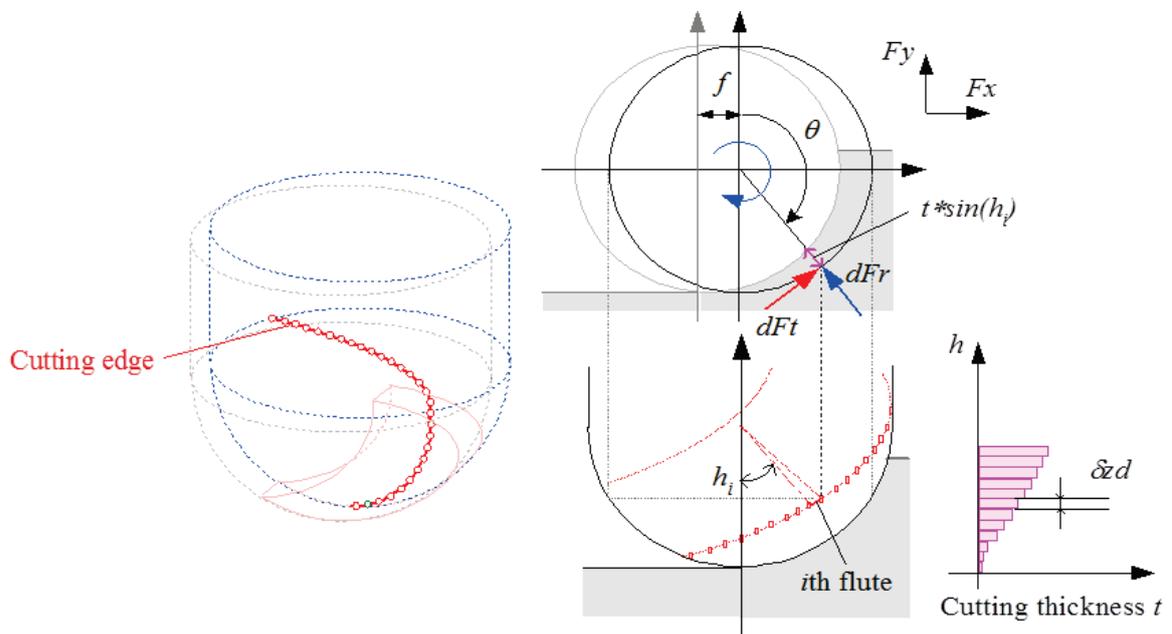


図 4.6 比切削抵抗モデルによる切削抵抗予測の仮定⁴⁻¹⁵⁾

前述の仮定を前提に、図 4.7 に示すように主分力と背分力に分離して比切削抵抗値を設定し、切れ刃のねじれ角などに応じて合成して、工具にかかる力を合計している。図 4.6、図 4.7 の各記号は下記を意味する。

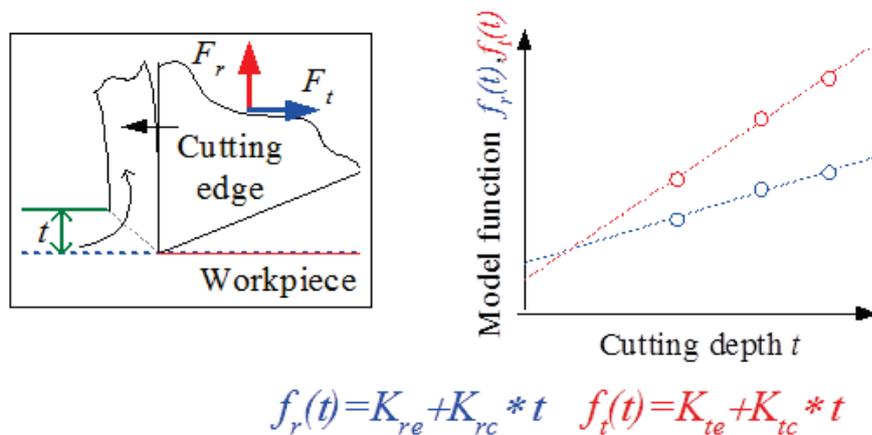


図 4.7 比切削抵抗モデルによる切削抵抗予測手法⁴⁻¹⁵⁾

- K_{re} = 工具の背分力方向に作用する，単位切れ刃長さあたりの工具切れ刃部の作用力を導出する比例定数[N/mm]
- K_{rc} = 工具の背分力方向に作用する，単位除去面積あたりの工具すくい面への作用力を導出する比例定数[N/mm²]
- K_{te} = 工具の主分力方向に作用する，単位切れ刃長さあたりの工具切れ刃部の作用力を導出する比例定数[N/mm]
- K_{tc} = 工具の主分力方向に作用する，単位除去面積あたりの工具すくい面への作用力を導出する比例定数[N/mm²]
- δzd = 微小切れ刃の長さ[mm]
- t = 切り込み深さ[mm]

また，本研究開発で適用した比切削抵抗法は工具切れ刃の回転軌跡上での離散点群においての内外判定を実施するのに GPU を使用しており，計算の高速化も図っている^{4-14), 4-16), 4-17)}。

4.2.3 評価用運動情報の生成手法

実際の運動情報は、図 4.8 に示すように CNC とオープン CNC コミュニケータ(PC)をファストイーサネット接続し、ワークや工具、治具などを全て取り外した状態の工作機械で NC プログラムによる空運転中に、オープン CNC コミュニケータは CNC からある一定周期で取得する。

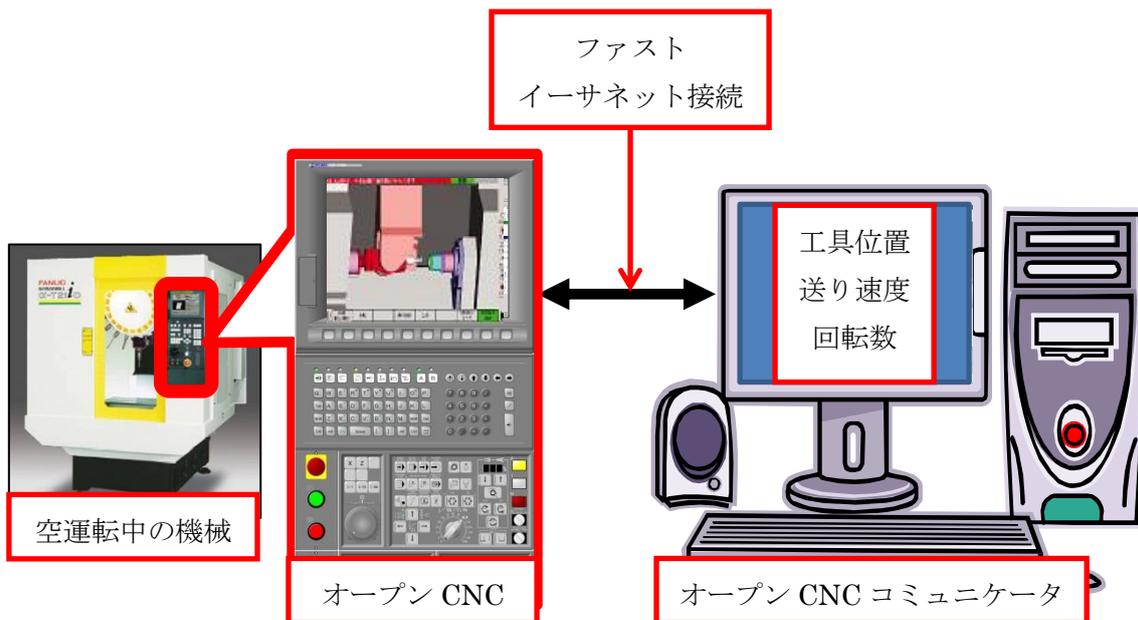


図 4.8 空運転中のオープン CNC コミュニケータのデータ取得

ファストイーサネットの通信速度、CNC の処理速度などの都合上工具位置、送り速度、回転数の情報は表 4.1 に示されるようにそれぞれ最短で約 2ms 毎にしか取得できないため合計で最短約 6ms のサンプリング周期となる。一方 CNC 内で工具位置や運動情報などを更新する周期が 4ms 周期であるため、オープン CNC コミュニケータとの周期のずれが生じ、情報の取得もれが発生することがある。工具情報のサンプリング周期は切削時間や表面品質に影響することが研究されており⁴⁻²⁵⁾、どのようなサンプリング周期を適用するかは重要であるが、本研究ではオープン CNC コミュニケータが取得する CNC からの情報が非連続のため、オープン CNC コミュニケータでの工具位置の取得周期と取得した工具位置から求まる速度が図 4.9 に示すように一定とならずオープン CNC コミュニケータが取得するデータを内挿する必要があると考えた。

内挿するには図 4.10(a), (b)に示すように CNC が機械位置を更新する時間 t_n とオープン CNC コミュニケータが工具位置を更新する時間 t'_n との差 α が $0 \leq \alpha < 2$ の場合と $2 \leq \alpha < 4$ の 2 通りの場合で考える必要がある。 $0 \leq \alpha < 2$ の場合、内挿して得られた送り速度 v'_n は式(4.1)を満たさなければいけない。また、 $2 \leq \alpha < 4$ の場合、内挿して得られた送り速度

v'_n は式(4.2)を満たさなければいけない. ここで p_n は CNC の時間 t_n での工具位置, p'_n はオープン CNC コミュニケータの時間 t'_n での工具位置を表す.

表 4.1 各運動情報の取得時間実績の一例

主軸回転数		送り速度		機械位置				合計取得時間 [ms]
取得時間 [ms]	主軸回転数 [rpm]	取得時間 [ms]	送り速度 [mm/min]	取得時間 [ms]	X 軸 [mm]	Y 軸 [mm]	Z 軸 [mm]	
1.788	9998	1.968	6000	2.199	238.555	-279.308	-321.958	5.955
1.820	9998	1.957	6000	2.248	238.353	-279.508	-321.958	6.025
1.773	9998	1.962	6000	2.266	238.013	-279.961	-321.958	6.001
1.752	9998	1.942	6000	2.307	237.871	-280.218	-321.958	6.001
1.732	9998	1.984	5715	2.263	237.648	-280.796	-321.958	5.979
1.774	9998	1.934	5715	2.229	237.567	-281.116	-321.958	5.937
1.787	9998	1.989	5715	2.256	237.466	-281.816	-321.958	6.032
1.733	9998	1.997	5715	2.268	237.444	-282.195	-321.958	5.998
1.814	9998	1.891	5715	2.230	237.438	-282.989	-321.958	5.935
1.769	9998	1.991	5715	2.276	237.439	-283.389	-321.958	6.036

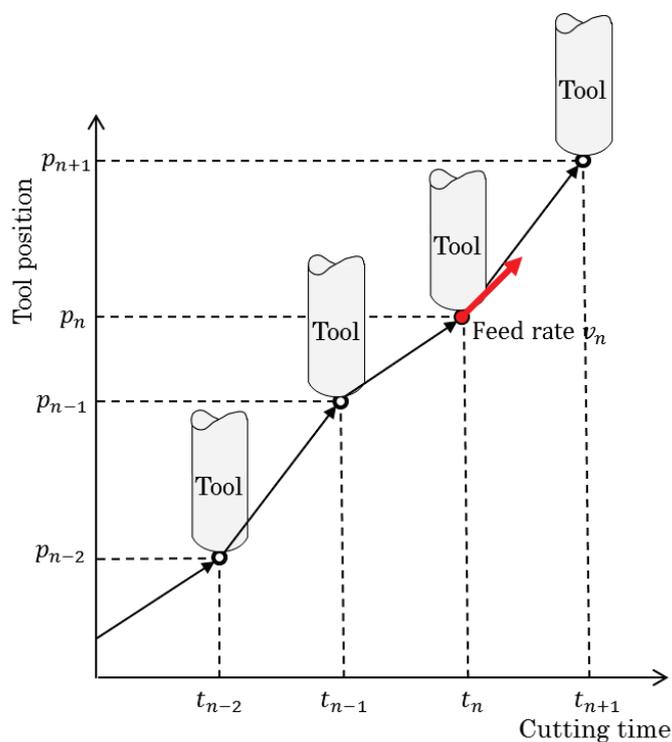
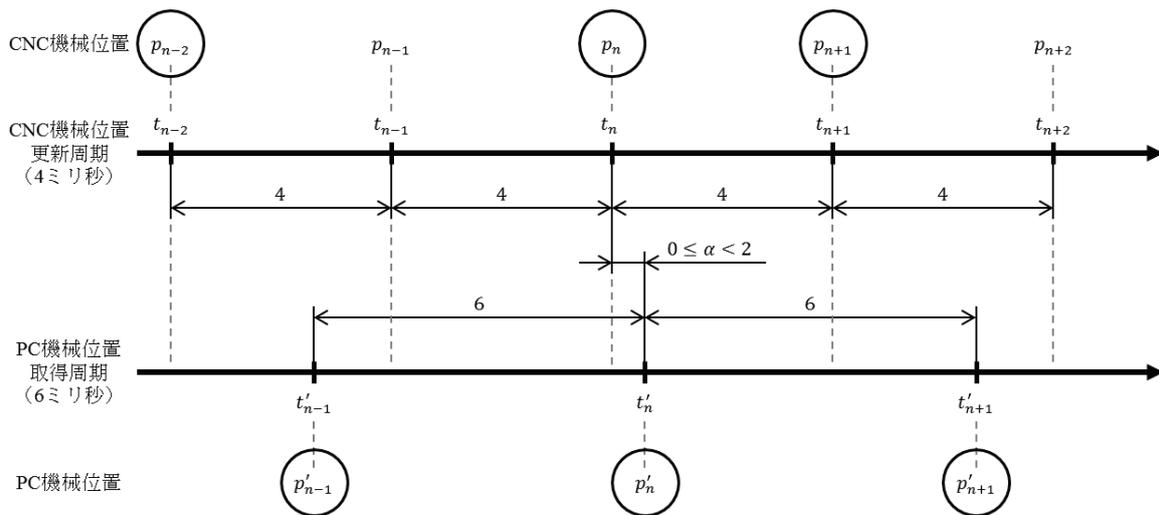
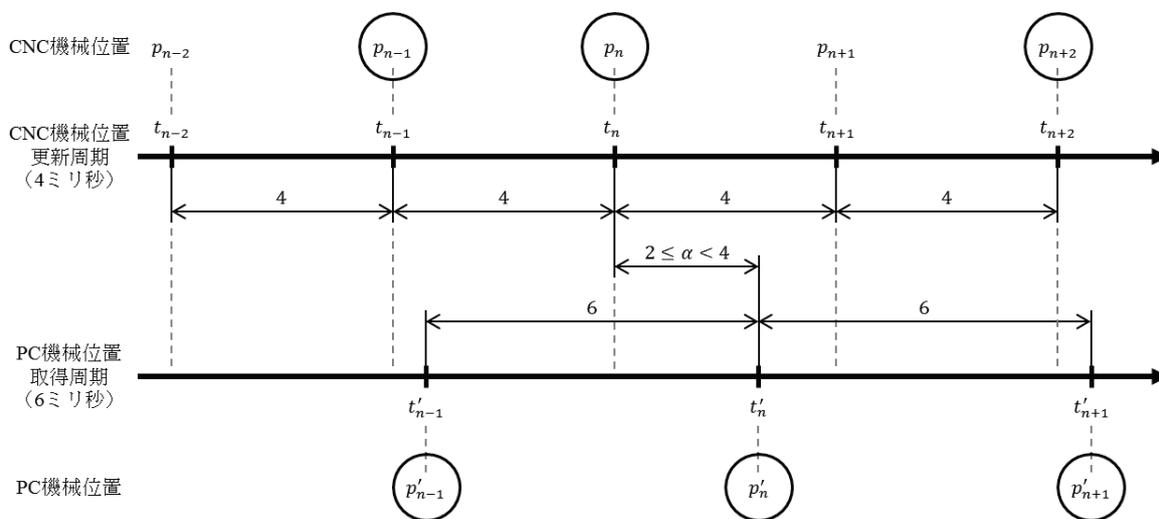


図 4.9 CNC とオープン CNC コミュニケータのサンプリング周期の違いによる不安定な送り速度



(a) $0 \leq \alpha < 2$ の場合

$$v'_n = \frac{|p'_{n+1} - p'_{n-1}|}{t'_{n+1} - t'_{n-1}} = \frac{|p_{n+1} - p_{n-2}|}{t_{n+1} - t_{n-2}} \quad (4.1)$$



(b) $2 \leq \alpha < 4$ の場合

$$v'_n = \frac{|p'_{n+1} - p'_{n-1}|}{t'_{n+1} - t'_{n-1}} = \frac{|p_{n+2} - p_{n-1}|}{t_{n+2} - t_{n-1}} \quad (4.2)$$

図 4.10 CNC と PC 工具位置取得周期の相違による送り速度データの内挿手法

式(4.1), (4.2)に示すようにオープン CNC コミュニケータが取得する 2 周期分(CNC が工具位置を更新する 3 周期分のデータ)の時間と工具位置から速度を内挿することで図 4.11 に示すように周期的な送り速度の乱れを平滑化することができ, 切削負荷予測を行うことが可能となった. この内挿手法がないと切削負荷を予測することができない.

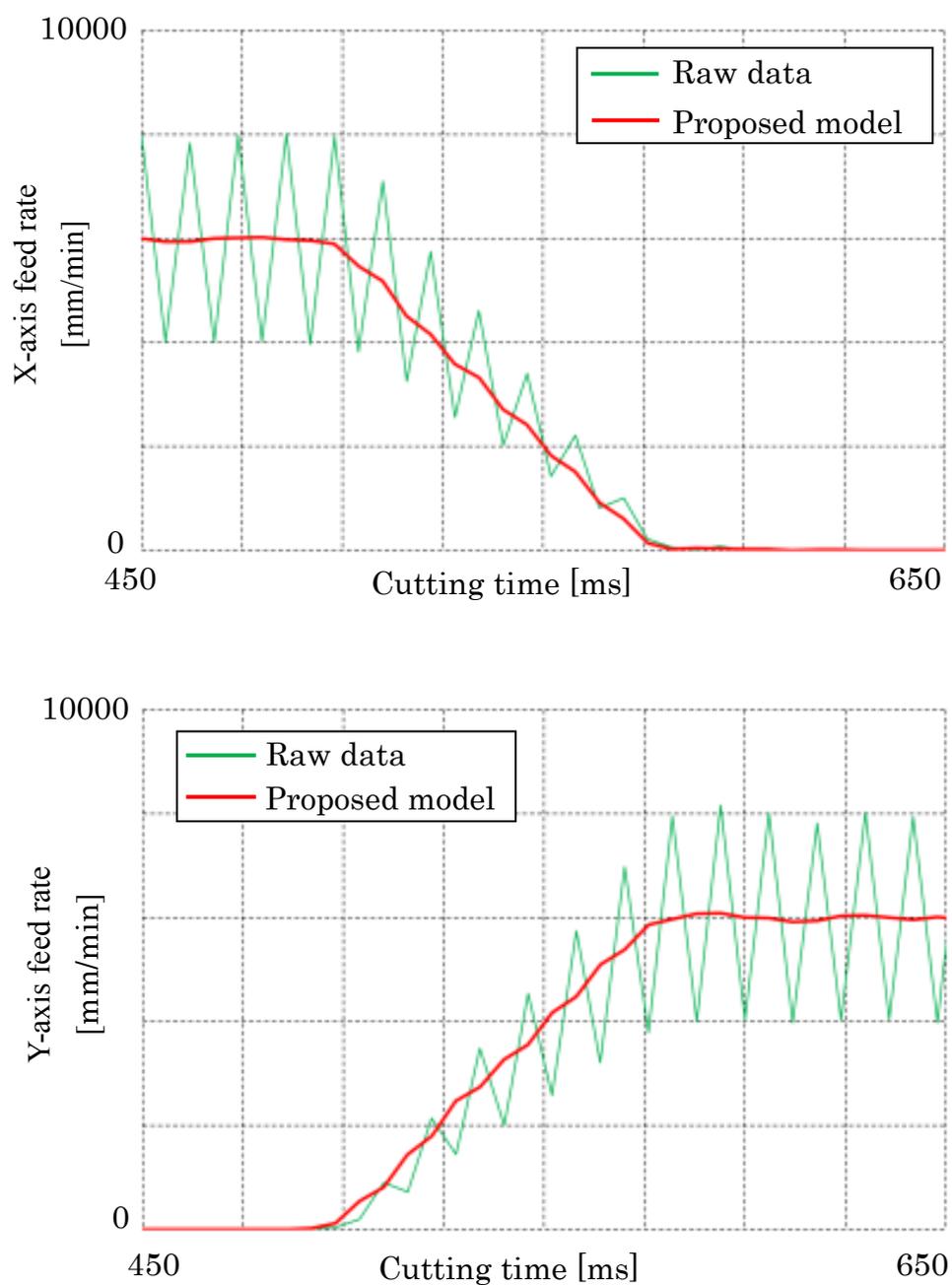


図 4.11 工具送り速度内挿モデル適用前後の X 軸, Y 軸方向の送り速度

4.3 実機による加工実験

4.3.1 切削負荷測定方法

実験に使用した機器の概略構成を図 4.12 に示す。5 軸加工機はファナック(株)の高加速主軸切削を行う「ROBODRILL D14MiA5」を使用し、ファストイーサネットにて切削負荷予測用の GPU 搭載の PC と接続した。3 分力動力計には KISTLER 社製の「9129AA」を使用し、データ収集用システム「5697A1」と 8 チャンネルチャージアンプ「5070A」を介して切削負荷測定モニタリング PC と接続した。

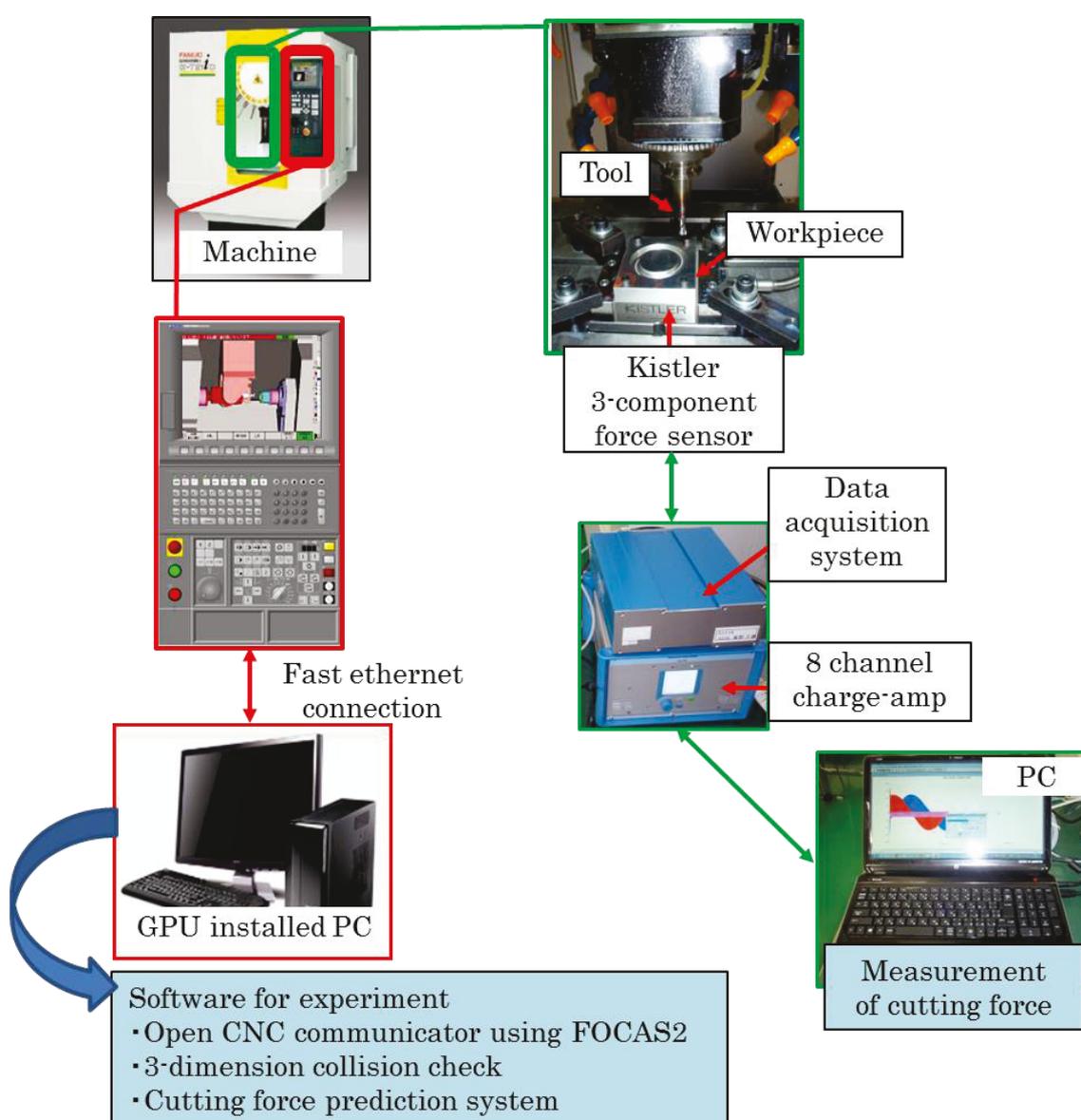


図 4.12 実験機器の概略構成

切削負荷測定は図 4.13 に示すように、工作機械のテーブルに 3 分力動力計を押え金で取り付け、3 分力動力計にワークを直接ねじで取りつける。そこでワーク上面に対して NC プログラムによる運転中の切削負荷を 3 分力動力計にて測定する。

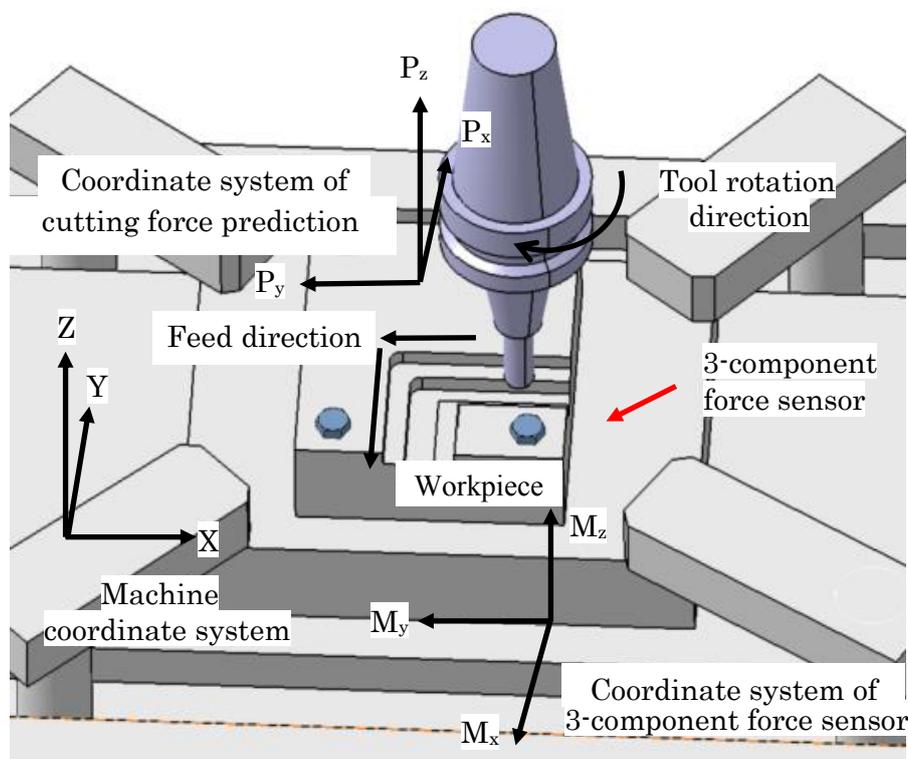


図 4.13 切削負荷測定と各座標系の概略図

一般的な工作機械と条件を合わせるために、ファナック(株)の協力を得て AI 輪郭制御や熱変位補正などの補正機能をあえて OFF にして実験を行った。ワークには一般的に自動車部品や航空機部品でよく使用されるアルミニウム合金 A7050(105 x 90 x 30mm)の板材を用いた。図 4.14 に示すようにワークの上面をあらかじめ荒加工して溝形状を生成し、その後仕上げ加工で切削負荷を測定する。また、図 4.15 のようにコーナー部で表れるような NC プログラム指令値と実機械の動きとの差がさほど表れない円弧でも切削負荷を測定する。

工具は表 4.2 に示すように工具刃のねじれ角 30° 、外径 8mm の超硬合金 2 枚刃スクウェアエンドミルを使用した。工具の突き出し量は弾性変形が無視できる程度に設定する。ワークへの切り込み量は工具径方向に 1mm、工具軸方向に 3mm、一刃あたりの送り量を 0.3mm とし、図 4.14 と図 4.15 のようにワークの上面の溝形状と円弧形状に 2 回切り込む NC プログラムとする。また切削油には、水溶性切削油剤である Castrol「アルーソル B」を使用した⁴⁻²⁶⁾。

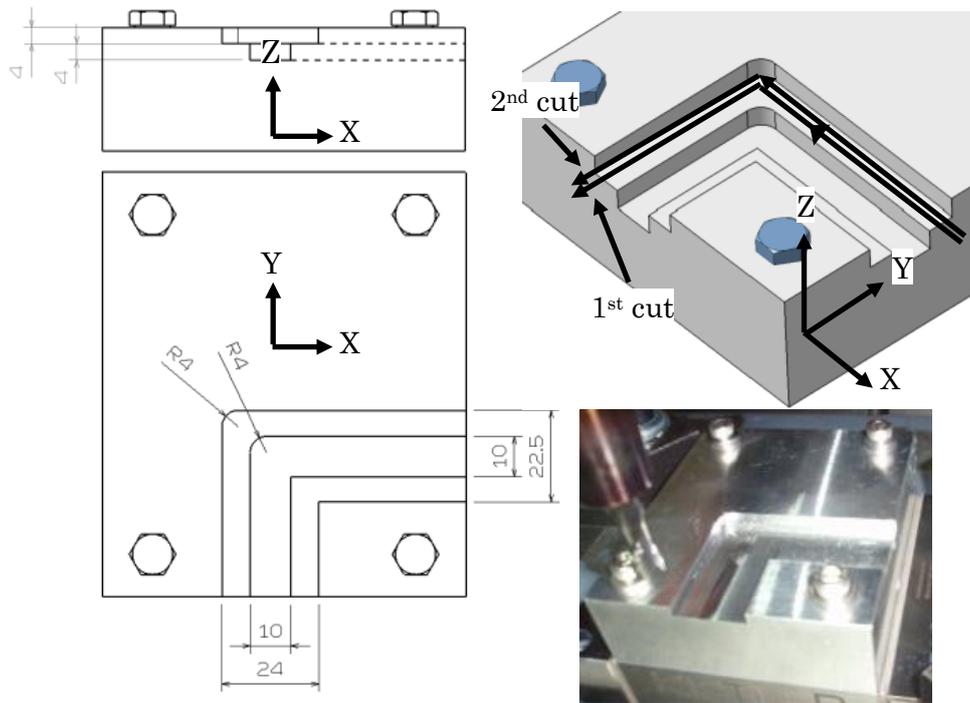


図 4.14 ワーク上面に形成した溝形状と NC プログラムによる工具経路

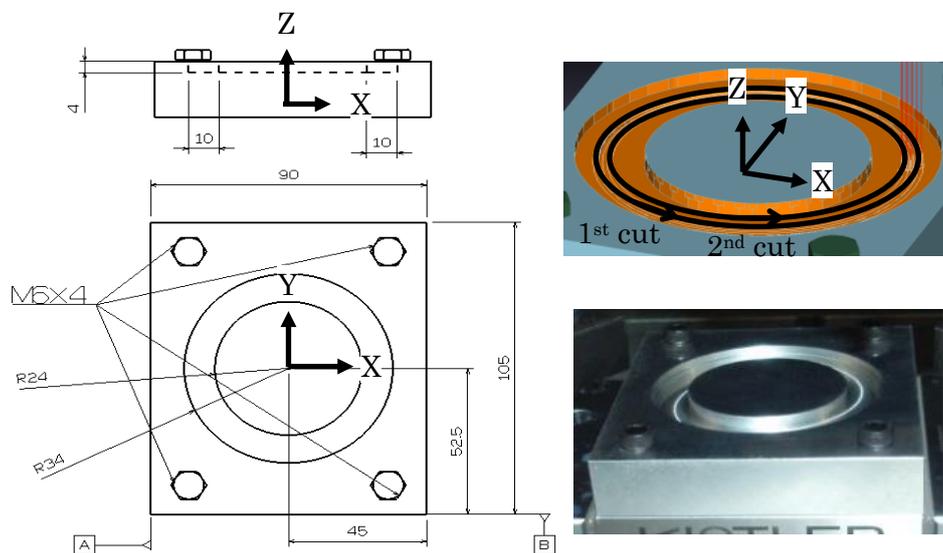


図 4.15 ワーク上面に形成した円弧形状と NC プログラムによる工具経路

表 4.2 実験機器内容および、測定条件

NC machine	Type	ROBODRILL D14MiA5
3-component force sensor	—	KISTLER 9129AA
Tool	Type	Square end mill
	Material	Cemented carbide
	Diameter	8 mm
	Number of flutes	2
	Helix angle	30 degree
	Coating	No coating
Cutting style	-	Down cut
Depth of cut	Radial direction	1 mm
	Axial direction	3 mm
Feed	Speed	6000 mm/min
	Rate	0.3 mm/tooth
Workpiece	Material	Al alloy A7050
	Size	105×90×30 mm

図 4.13 に示すように 3 分力動力計の座標系(M_x, M_y, M_z)での測定切削力($F_{M_x}, F_{M_y}, F_{M_z}$)を式(4.3)のように機械座標系(X, Y, Z)での測定切削力($F_{M_x'}, F_{M_y'}, F_{M_z'}$)に変換する。

$$\begin{bmatrix} F_{M_x'} \\ F_{M_y'} \\ F_{M_z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{M_x} \\ F_{M_y} \\ F_{M_z} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

4.3.2 切削負荷予測方法

切削負荷予測は比較のため、切削負荷測定の測定条件と同じにする。切削負荷予測計算用に使用する PC やシステムなどの条件を表 4.3 に示す。工具とワークを取り外した工作機械で NC プログラムによる空運転中にオープン CNC コミュニケータが 6ms 周期で実際の工具位置座標や、送り速度、主軸回転数などの運動情報をオープン CNC から取得する。さらに取得した実際の運動情報を用いて比切削抵抗法により切削負荷を予測する。また、図 4.13 に示すように切削負荷予測座標系(P_x, P_y, P_z)での予測切削力($F_{P_x}, F_{P_y}, F_{P_z}$)を式

(4.4)のように機械座標系(X, Y, Z)での予測切削力(F_{Px}' , F_{Py}' , F_{Pz}')に変換する.

$$\begin{bmatrix} F_{Px}' \\ F_{Py}' \\ F_{Pz}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Px} \\ F_{Py} \\ F_{Pz} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

表 4.3 切削予測計算に使用した機器内容

PC	Lenovo Think Station S30
CPU	Intel Xeon E5-1650 3.5 GHz
RAM	64 GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 780 Ti
CNC-PC connect	Fast ethernet (Gigabit)
Cycle of motion information	6 ms

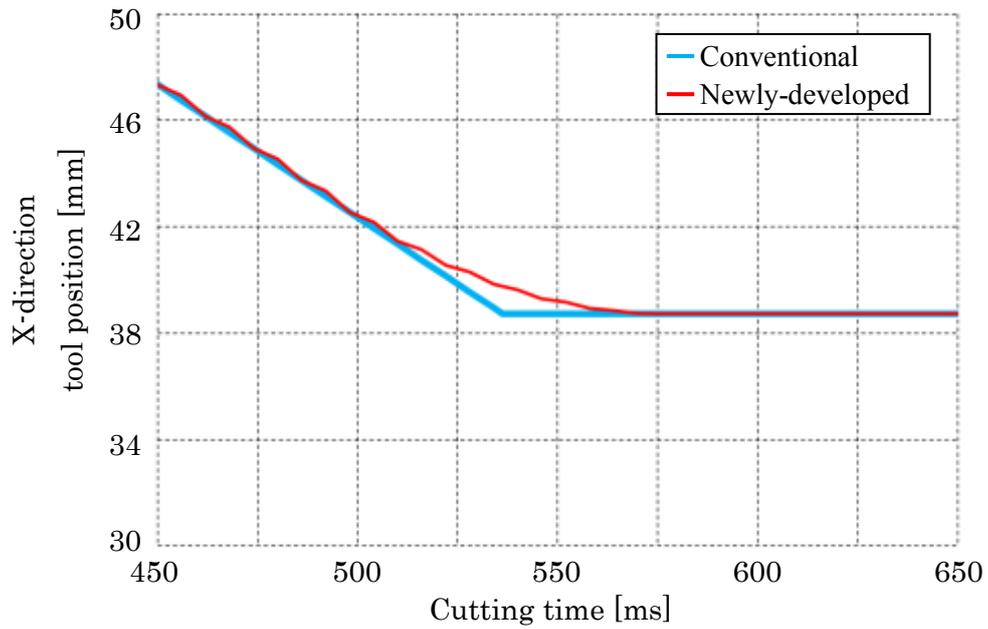
4.3.3 検証結果

(1) コーナー部における検証結果

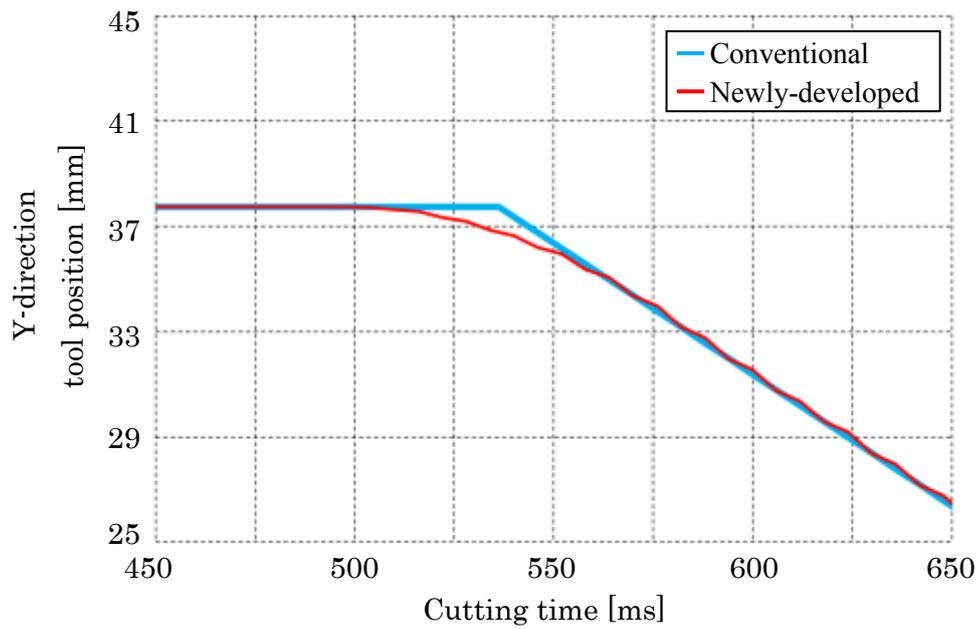
図 4.14 のように溝形状を切削した場合の工具位置の変化を, X, Y の各方向について表した結果を図 4.16 に示す. 青線は NC プログラムから取得した指令の工具位置(従来手法)を, 赤線は CNC から取得した実際の工具位置(本研究開発手法)を表している. 図中の横軸は NC プログラムによる加工時間を表し, 工具がワークを切削し始めた瞬間を 0ms としている. 従来手法と本研究開発手法を比較すると, 工具の移動方向が X 方向から Y 方向に変化する 500ms の所までは, X, Y の各方向ともに, 両者の示す値はよく一致している. ところが, その後, 工具の移動方向が X 方向から Y 方向に変化する過程では, 両者の示す値は食い違っている. これは, 加工機に装備されている標準的な自動加減速などの CNC 機能の影響であると考えられる.

また, 図 4.17 は切削負荷の変化を, X, Y の各方向について表している. 緑線は 3 分力動力計によって得られた測定結果を, 青線は従来から提案されている NC プログラムから取得した指令の工具位置を用いて比切削抵抗法によって得られた予測結果を表している. 赤線は本論文で提案する CNC から取得した実際の工具位置を用いて比切削抵抗法によって得られた予測結果を表している. 緑線と青線を比較すると, 工具の移動方向が X 方向から Y 方向に変化する 500ms の所までは, X, Y の各方向ともに, 両者の示す値はよく一致している. ところが, その後, 工具の移動方向が X 方向から Y 方向に変化する過程では, 両者の示す値は大きく食い違っており, 自動加減速などの CNC 機能の影響を考慮しない

従来の予測手法では、切削負荷を正確に予測することは難しいと考えられる。一方、提案した手法によって予測した赤線は緑線とよく一致している。特に従来の手法によって予測した結果で大きな食い違いが表れた工具の移動方向がX方向からY方向に変化する過程の切削負荷についても、赤線は実験結果とほぼ等しい予測結果が得られており、より精度の高い切削力が計算できたことがわかる。高精度の切削負荷が予測できることにより、より正確な加工が実現化でき、予期せぬ工具破損や、必要以上に送り速度を落とすことで生産効率を落とすような現象を防ぐことが可能であると考えられる。

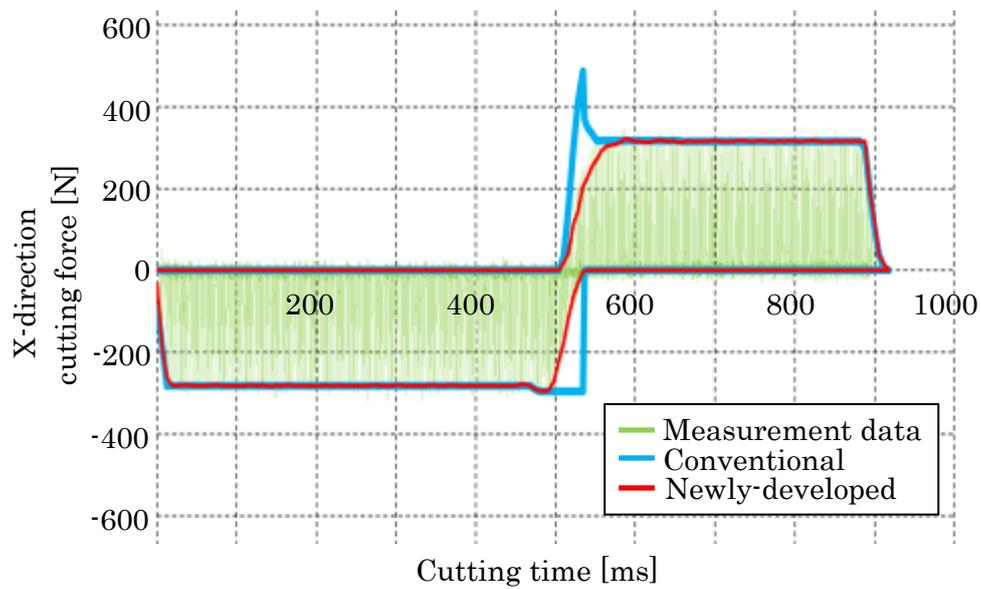


(a) X 軸方向の工具位置

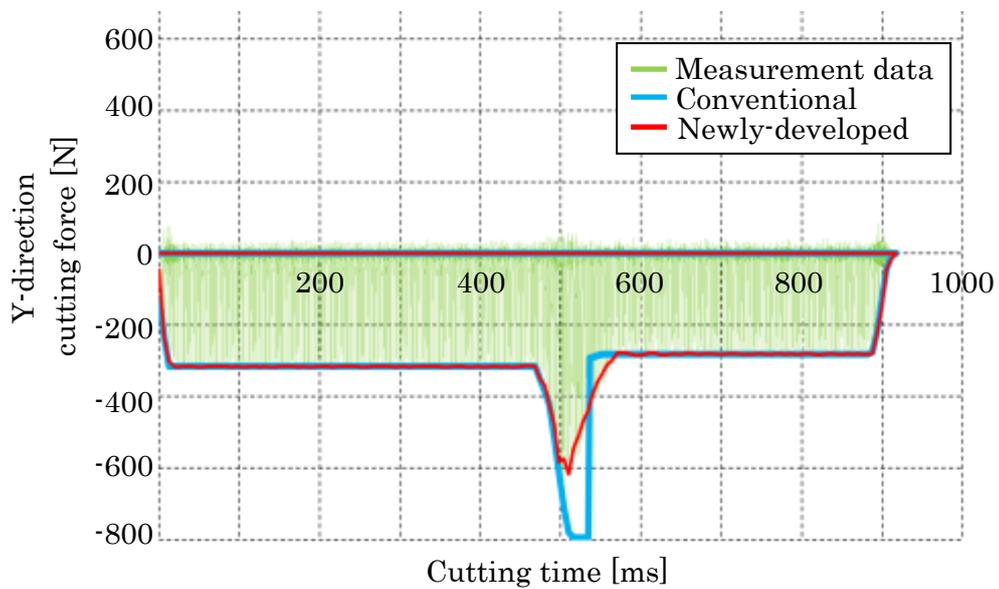


(b) Y 軸方向の工具位置

図 4.16 溝形状加工における工具位置経路の比較(従来手法と本研究開発手法)



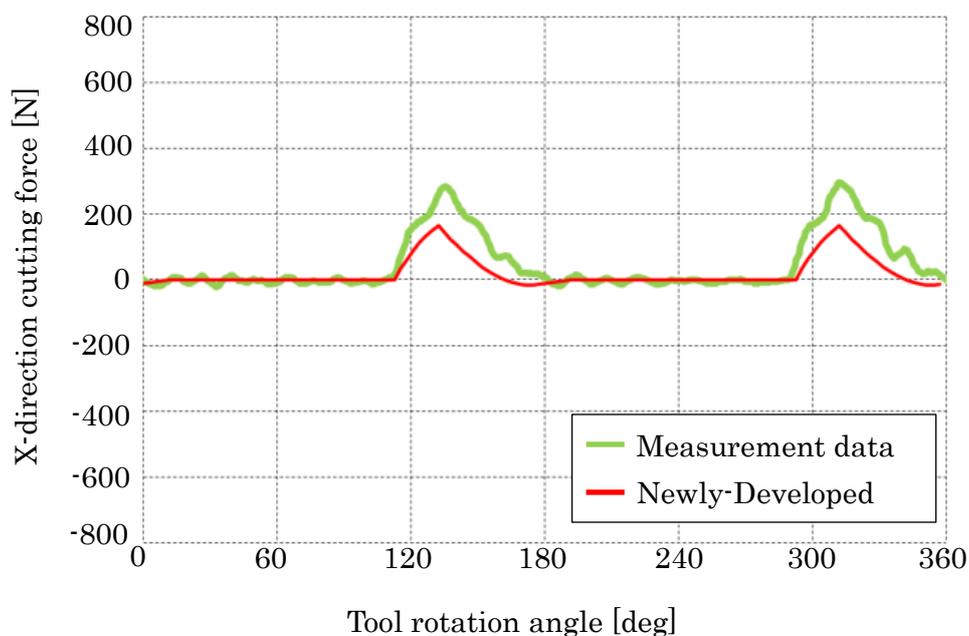
(a) X 軸方向の切削負荷



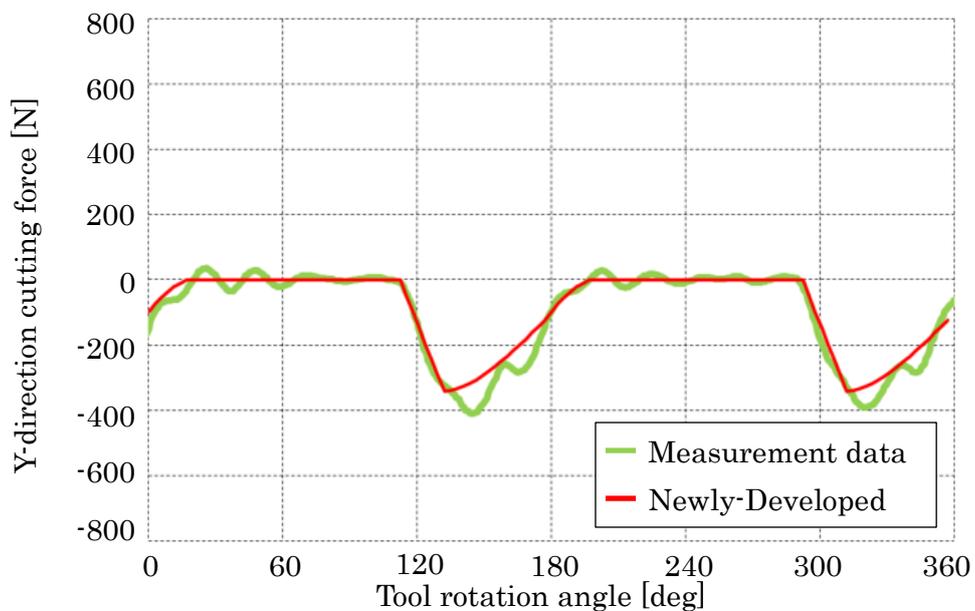
(b) Y 軸方向の切削負荷

図 4.17 溝形状加工における切削負荷の比較(従来手法と本研究開発手法)

次にコーナー部での工具 1 回転分の本研究で開発した切削負荷予測と 3 分力動力計にて計測した結果を比較した。図 4.18 に切削負荷を X, Y 各方向にて比較した結果を示しているが、工具 1 回転分の切削負荷予測は実切削力計測値とかなり近い値となり、工具の 1 回転分においても本研究で開発した CNC から直接運動情報を抽出して切削負荷を計算する手法が精度良く結果が得られていることがわかる。



(a) X 軸方向の切削負荷



(b) Y 軸方向の切削負荷

図 4.18 コーナー部での工具 1 回転分の切削力測定結果

(2) 運動が連続的に変化する場合の検証結果

円弧形状の場合の NC プログラムから取得した工具指令位置の変化を、X、Y 各方向について表した結果が図 4.19 である。赤線は実機械の工具位置変化で、青線が NC プログラムから取得した工具指令位置変化だが、コーナー部がないことから従来手法でも実機械の工具位置とほぼ同じ軌跡となった。これは、円弧形状の場合は従来手法でも実加工の切削力とほぼ同じ切削負荷予測が可能であることを示す。図 4.20 は 3 分力動力計によって得られた切削負荷結果(図中緑線)と本論文で提案する CNC から取得した実際の工具位置を用いて比切削抵抗法によって得られた切削負荷予測結果(図中赤線)とを比較した図だが、ほぼ同じ切削負荷変化が得られた。これは円弧形状でも比較的正確な切削負荷を予測することでき、それにより正確な加工が実現化でき、予期せぬ工具破損や、安全を考慮するあまり過度に送り速度を落とすような現象を防ぐことが可能であると考えられる。

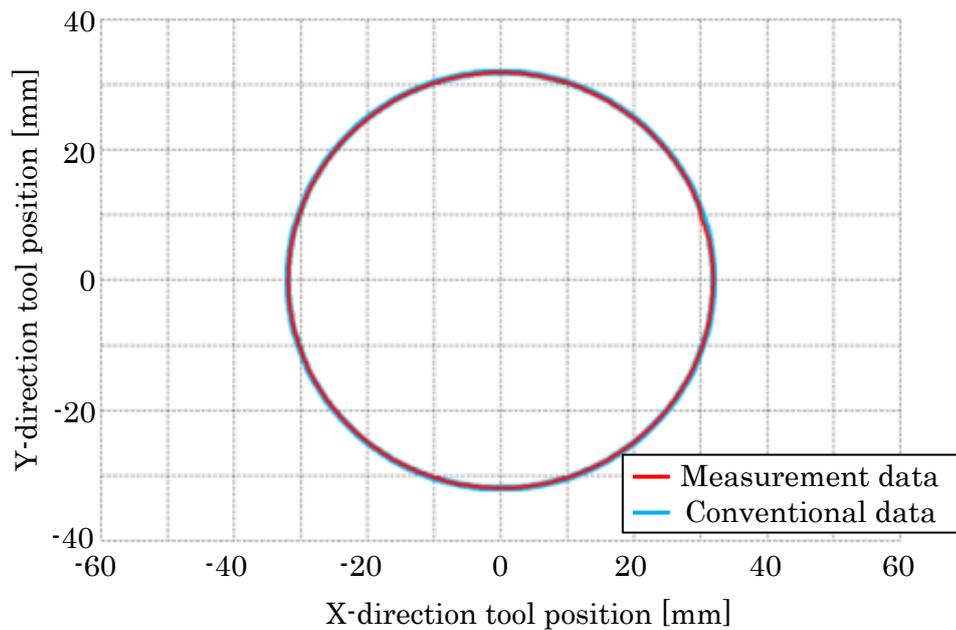
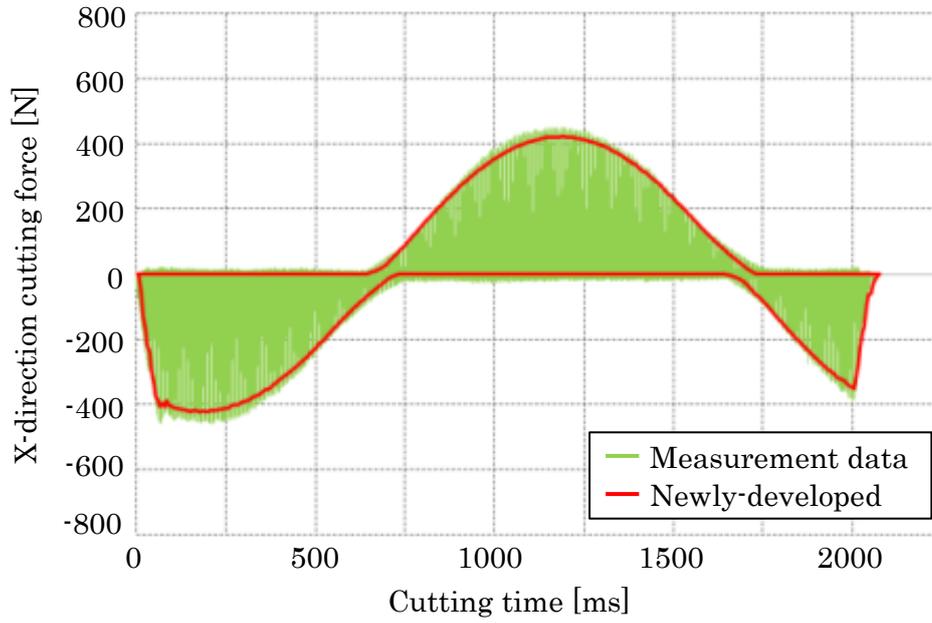
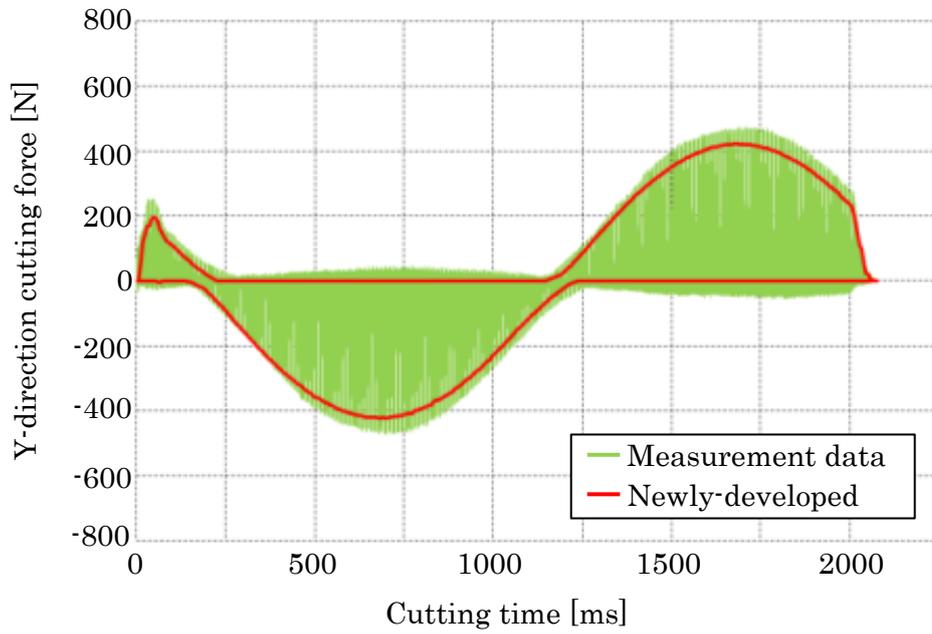


図 4.19 円弧形状加工における工具位置変化の比較(従来手法と実測定値)



(a) X 軸方向の切削負荷



(b) Y 軸方向の切削負荷

図 4.20 円弧形状加工における切削負荷変化の比較(新規開発手法と実測定値)

(3) 切削負荷予測の処理時間

図 4.21 は切削負荷の計算時間をある一定時間で測定した結果を示しているが、平均して約 10ms 以内で計算が終了している。オンライン・リアルタイム衝突防止システムで実際に衝突する前に衝突を止めるにはシミュレーション時間を 6.4ms 以下に抑えることが目安であったことより、切削負荷予測の計算時間も目安として 6ms 程度に抑えることがリアルタイムに最適化処理を可能とする時間と考えている。本研究での切削負荷予測は GPU を使って計算していることから、GPU カード増により切削負荷予測の時間を短縮することができ、リアルタイムでの切削負荷予測は可能であると考えている。

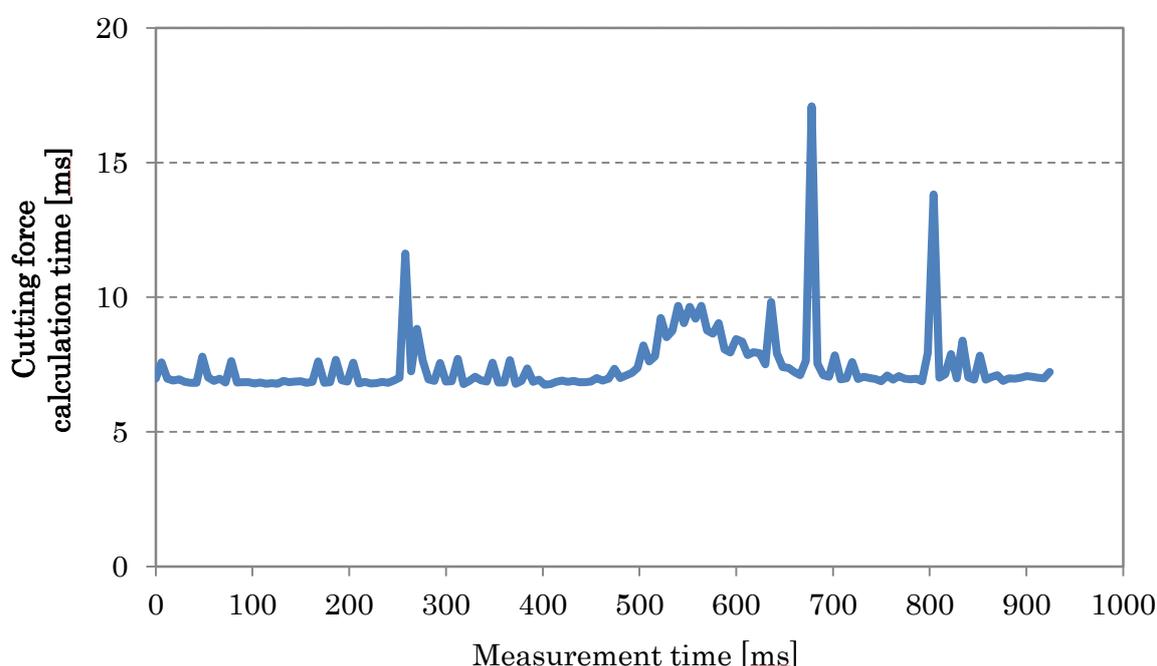


図 4.21 切削負荷の計算時間

4.4 今後の課題

本研究で開発した実際の機械から得られる工具位置、送り速度、主軸回転数などの情報に基づいた切削負荷予測を空運転中に評価することにより、精度良く具体的にどの位置で急激な切削負荷がかかっているのか、またどの位置でさらなる切削負荷をかけても安全か、実際に加工する前に把握することができ、再度 NC プログラムを作成し直して適切な加工経路や送り速度を検討することで切削負荷急増による工具折損回避や安全にさらなる加工時間の短縮化が可能となる。

本研究の最終目標はリアルタイム化である。最新の高効率加工機には切削中に工具の切削負荷を安定化させるシステム⁴⁻²⁷⁾や、実際に切削負荷を計測しながらあるしきい値を超

えた場合には自動的に送り速度を低下させるシステム⁴⁻²⁸⁾などが実用化されてきている。また、最近では(手法は異なるものの)加工中に最適な切削送り速度に制御するシステムも特許化されている^{4-30)~4-32)}。しかし、実際に切削負荷が高くなった後に処理を行うシステムや、NC データをもとに送り速度を制御するシステムなどを提案しており、本研究開発で目指しているような実機械の運動情報をもとに実際に近い切削負荷を事前に予測し、切削負荷が高くなる前に適応制御を行うようなシステムはまだ開発されていない。リアルタイムに精度良く予測した切削負荷を用いて、適正な送り速度を設定し、切削負荷が過小な送り速度に対しては、送り速度を大きくすることで、加工時間を短縮し、切削負荷が過大な送り速度に対しては、送り速度を小さくすることで、工具折損を回避する、リアルタイム自動送り速度適応制御の実現化を目指す。さらに、その先の目標としてオンライン・リアルタイムで衝突検証を行うシステムと融合させて製造現場で究極の安全加工を目指す。

4.5 まとめ

本章では NC 工作機械を安全に加工させるための過負荷切削を従来よりも正確な切削負荷で予測できるシステム開発を行い，以下の結論を得た．

- (1) より精度良く切削負荷を予測するために NC データからでは得られない実機械の工具運動誤差を考慮した CNC からの運動情報をオープン CNC コミュニケータで抽出し，比切削抵抗モデルと送り速度の内挿手法を適用し，効果が確認できた．
- (2) 提案した手法(CNC から取得した工作機械の実際の運動情報を用いて切削負荷を予測)により，従来の手法(NC プログラムから取得した指令の工具位置を用いて切削負荷を予測)より正確な切削負荷予測が得られた．加工前に正確な切削負荷を予測することで，工具折損回避や，生産性向上に寄与する安全かつ適正な加工を図ることが可能となる．
- (3) 切削負荷の計算時間が平均して約 10ms 以内であった．オンライン・リアルタイム衝突防止システムでシミュレーション時間を 6.4ms 以内に抑えることがリアルタイムに衝突を防止する一つの目安であったが，切削負荷のリアルタイム化も 6ms 程度に抑えることが必要であると考えている．今後 GPU を増やして切削負荷の計算時間を短縮することでリアルタイムでの切削負荷予測は可能であると考えている．

【4章の参考文献】

- 4-1) VERICUT Website: http://main.vericut.jp/vericut/vericut_optipath.html
- 4-2) NCBRAIN Website: <http://www.marubeni-sys.com/de/ncbrain/5x/index.html>
- 4-3) J.Thusty, S.Smith, An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process, Trans of ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.113, No.2, May 1991, pp.169-175.
- 4-4) S.Takata, M.D.Tsai, M.Inui, T.Sata, A Cutting Simulation System for Machinability Evaluation Using a Workpiece Model, Annals of the CIRP, Vol.38, 1989, pp.417-420.
- 4-5) 高田祥三, 山崎好幸, 切削形状予測のためのモデルベース切削加工シミュレーションシステム, 日本機械学会論文集(C編), 61巻, 581号, 1995-1, pp.266-272.
- 4-6) H.Narita, K.Shirase, H.Wakamatsu, E.Arai, Pre-Process Evaluation of End Milling Operation Using Virtual Machining Simulator, JSME International Journal, Series C, Vol.43, No.2, 2000, pp.492-497.
- 4-7) H.Narita, K.Shirase, H.Wakamatsu, E.Arai, Pre-Process Evaluation of Machining Accuracy Using Virtual Machining Simulator, Proceedings of The 2nd International Workshop on Strategic Knowledge and Concept Formation, 1999, pp.271-280.
- 4-8) T.Hasegawa, R.Sato, K.Shirase, Cutting Force Simulation Referring Workpiece Voxel Model for End-milling Operation 2nd Report: Adaptive Control Based on Predicted Cutting Force, 2015年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.379-380.
- 4-9) L.Almad, J.Kaneko, K.Horio, T.Yamazaki, Development of Tool Motion Estimation Method for Cutting Force Prediction in High Speed Machining, MJIT-JUC Joint International Symposium, 2015.
- 4-10) 佐藤隆太, 堤正臣, 長島一男, 円運動象限切替え時における送り駆動系の動的挙動, 精密工学会誌, Vol.72, No.2, 2006, pp.208-213.
- 4-11) M.Sudo, Advanced Control Technologies for 5-Axis Machining, Int. J. of Automation Technology, Vol.1, No.2, 2007, pp.108-112.
- 4-12) T.Asano, T.Hida, A.Goto, Collision Free Machining using Simulation with CNC Openness, Proceeding of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Vol.2, 2010, pp.149-152.
- 4-13) T.Hida, T.Asano, K.Nishita, N.Sakai, A.Goto, and Y.Takeuchi, Development of Online Real-Time Collision Free Machining Using Simulation with CNC Openness, Int. J. of Automation Technology, Vol.9, No.4, 2015, pp.403-410.

- 4-14) J.Kaneko, K.Horio, Fast Cutter Workpiece Engagement Estimation Method for Prediction of Instantaneous Cutting Force in Continuous Multi-Axis Controlled Machining, *Int. J. of Automation Technology*, Vol.7, No.4, 2013, pp.391-400.
- 4-15) 金子順一, 研究の背景 エンドミル加工技術の進化に伴う課題, ものづくりデジタル化研究会講演資料, 2006.
- 4-16) 金子順一, GPU を用いた切削加工支援のための並列計算手法への取り組み, 研究事例紹介, 2011.
- 4-17) 金子順一, 大規模並列処理切削抵抗予測システム評価, 研究打ち合わせ資料, 2012.
- 4-18) Y.Altintas, *Manufacturing Automation 2nd Edition*, Cambridge, 2012.
- 4-19) T.Matsumura, I.Hori, T.Shirakashi, E.Usui, Simulation of Drilling Process Based on Energy Approach, *Proceedings of the 8th International ESAFORM Conference on Material Forming*, Vol.2, 2005, pp.757-760.
- 4-20) T.Matsumura, T.Shimada, K.Teramoto, Analysis of Cutting Process on Machining Centers, *Proceedings of the International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, 2005, pp.1093-1098.
- 4-21) T.Shimada, K.Teramoto, T.Matsumura, Development of Cutting Simulation System for Machining of Mold and Dies, *Proceedings of the International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, 2005, pp.1099-1104.
- 4-22) T.Matsumura, T.Shirakashi, E.Usui, Prediction of Milling Process Based on 2D FEM Simulation, *Proceedings of the 9th International ESAFORM Conference on Material Forming*, Vol.2, 2006, pp.623-626.
- 4-23) Y.Altintas, A.Spence, End Milling Force Algorithms for CAD Systems, *Annals of the CIRP*, Vol.40/1/1991, pp.31-34.
- 4-24) AdvantEdge Website: <http://www.thirdwavesys.com/advantedge/>
- 4-25) Y.Yamamoto, H.Aoyama, N.Sano, A Method for Identification of Control Parameters of NC Machine Tool and its Utilization for High-Speed Machining and Accurate Machining Time Estimation, *Proceedings of the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, 2015.
- 4-26) Msdspds Castrol Website:
[http://msdspds.castrol.com/bpglis/FusionPDS.nsf/Files/771C26670F1D9B7680257796002F5E4C/\\$File/Alusol%20B.pdf#search='Castrol+Alusol+B+Product+Data+sheet'](http://msdspds.castrol.com/bpglis/FusionPDS.nsf/Files/771C26670F1D9B7680257796002F5E4C/$File/Alusol%20B.pdf#search='Castrol+Alusol+B+Product+Data+sheet')
- 4-27) 稲垣浩, 難削材加工を変える「シンクロドライビング」, *機械と工具*, 9月号, 2015, pp. 76-78.
- 4-28) MAKINO, AST3 操作説明書, No.0807B-1406JA, pp.3-1~5-5.

- 4-29) 竹内芳美, 中本圭一, Excel で学ぶ生産加工ソフトウェアの基礎, 日刊工業新聞社, 2011年, pp.75-97.
- 4-30) 特許(特開 2013-61884), 加工シミュレーション装置, 加工シミュレーション方法, 加工制御装置および加工制御方法, 株式会社ジェイテクト, 2013年.
- 4-31) 特許(特開 2012-152884), 工作機械の制御システム, 株式会社森精機製作所, 2012年.
- 4-32) 特許(特開 2009-12092), 工作機械の制御装置, 富士通株式会社, 2009年.

第5章 結論

5.1 本研究の結論

本研究では、工作機械の安全運転に関するテーマを実際の加工現場の視点から見た問題点をベースに考察し、課題解決のための手法を開発した。

近年の NC 工作機械が多軸化、複合化され、生産能率を上げるためにより高速・高出力化されている現状に対して、確かに段取り替えの減少や、複雑で高精度な形状のものを短時間で加工できるようになったものの、一方ではこのような高機能な NC 工作機械を使う現場ではその複雑かつ高速な動きゆえに、NC オペレータや NC プログラマが想定しなかったような機械、治具、工具、ワーク間の衝突が起きたり、過負荷切削による工具の折損、場合によっては火災が発生するなどの事故が起きたりして、ハイリスクハイリターン加工が行われている。これらの諸問題を解決するためにオフラインシミュレーションにて干渉チェックが広く現在行われているが、加工途中に NC プログラムとは異なった加工にオペレータがマニュアルで変更した場合には事前干渉チェックが活用できなくなるため、オンライン・リアルタイムで衝突検証ができるようなシステムが必要と考え、実用化できる手法を提案し、その効果を確認した。

また、過負荷切削による工具折損防止対策に関しては、オフラインにて切削負荷を計算にて予測する手法は既に現在広く普及されているが、実際に加工してみると必ずしも計算にて予測した切削負荷と合わないことが度々ある。したがって、荒加工で予想以上に削り残しがあり、仕上げ加工する際に過度な切削負荷がかかり工具が折損してしまう現象が今でも発生している。この現象の原因は実際に機械が NC プログラム指令値通りに動いてないことにある。したがって、現在オフラインにて切削負荷を計算する手法は殆どが NC プログラム指令値をベースに予測しているので、実際に機械が動く運動情報を用いて切削負荷を計算する手法が適切と考え、空運転時に CNC からの実運動情報に基づいて切削負荷

を予測するシステムを開発し、実用化するための手法を提案し、その効果を確認した。

以下に各章の結論を具体的に示す。

第 1 章では、工作機械の歴史を説明し、本研究の目的を航空機部品の加工を例にとって説明した。航空機部品の傾向はそのまま自動車部品などの傾向にもつながっているが、最近では工作機械が高速化・高機能化してきたおかげで、一体部品で短時間にて製品を加工することができるようになった一方で、実際にこのような高機能なマシニングセンタを使う現場では、安全面での課題が増えてきた。これらの背景から本研究のテーマである「機械加工の安全運転」にはどのような対策を打てば良いのかまとめ、第 3 章、第 4 章のテーマの必要性について言及した。

第 2 章では、第 1 章で述べた諸問題をさらに深く掘り下げ、研究開発の背景を述べて、安全に加工するために必要不可欠な加工シミュレーション技術の今までの変遷について説明した。さらに、安全に運転するための現状分析と課題を考察し、将来的にはオンラインでリアルタイムに検証できるシステムが必要であるという考えを述べた。現状で「衝突」や「過負荷切削」をリアルタイムで検証するには以下の重要課題があるが、本研究での今後の方向性としては安全加工に加えていかに適応制御加工を実施していくか、ということが重要であることを説明した。

- (1) リアルタイムに処理できるような高速計算
- (2) データを多く保存できるような大容量
- (3) 工作機械の実際の運動情報を CNC からユーザー側に抽出できるような CNC のオープン化

第 3 章では、オンライン・リアルタイム衝突防止システムの開発について述べ、得られた効果についても説明した。まだ課題はあるものの、下記のような内容が達成できた。

- (1) B-reps のソリッドモデルを用いたジオメトリックシミュレータとオープン CNC をオープン CNC コミュニケータでつなぐことにより、衝突を防止するオンライン・リアルタイム衝突防止システムを構築することができた。
- (2) オープン CNC コミュニケータに間引き手法を適用させて、直線補間や円弧補間で同時 2 軸加工する際のシミュレーションに要する時間を短縮できた。この範囲では衝突を防止するオンライン・リアルタイム衝突防止システムの有効性を確認することができた。
- (3) 同時 5 軸加工が必要な複雑形状に関しては計算容量が大きくなるため、リアルタイムでのシミュレーションは確認できない。このような場合には CNC 装置を「マシンロック」モードにして作動させると衝突防止機能になりうる。なお、手動操作においては

十分にシステムとして有効であることが確認できた。

第4章では、切削負荷事前評価システムの開発について述べ、提案手法の有効性を検証し、下記のような結果が得られた。

- (1) より精度良く切削負荷を予測するために NC データからでは得られない実機械の工具運動誤差を考慮した CNC からの運動情報をオープン CNC コミュニケータで抽出し、比切削抵抗モデルと送り速度の内挿手法を適用し、効果が確認できた。
- (2) 提案した手法(CNC から取得した工作機械の実際の運動情報を用いて切削負荷を予測)により、従来の手法(NC プログラムから取得した指令の工具位置を用いて切削負荷を予測)より正確な切削負荷予測が得られた。加工前に正確な切削負荷を予測することで、工具折損回避や、生産性向上に寄与する安全かつ適正な加工を図ることが可能となる。
- (3) 切削負荷の計算時間が平均して約 10ms 以内であった。オンライン・リアルタイム衝突防止システムでシミュレーション時間を 6.4ms 以内に抑えることがリアルタイムに衝突を防止する一つの目安であったが、切削負荷のリアルタイム化も 6ms 程度に抑えることが必要であると考えている。今後 GPU を増やして切削負荷の計算時間を短縮することでリアルタイムでの切削負荷予測は可能であると考えている。

5.2 今後の研究課題と展望

本研究の将来的な機械加工の理想像は第2章でも述べたように、リアルタイムに衝突防止と切削負荷を制御することである。したがって、本論文で得られた知見・実績はまだ最終的な将来像には到達しておらず、これらの実績をもとに更に研究開発する必要がある。これからその目的に近づけるために解決せねばならない内容を下記にまとめる。

(1) 衝突防止システム

- ・「先行位置座標取得のために現在位置より先行させる時間 (T_f)」の拡大化

オープン CNC コミュニケータにおいて、 T_f はオープン CNC 性能に依存している。先行位置座標は CNC 側の自動速度制御や自動加減速、オーバーライド値の変化などの要因で誤差が大きくなる可能性があるため、 T_f が大きくなればなるほど信頼性に劣るデータになる傾向がある。しかし、干渉前に確実に停止させるには、信頼性のあるデータが必要であるため、 T_f は現状大きな値にすることができないという制約がある。誤差が大きくならず、かつ T_f の拡大化が図れることが必要であり、CNC メーカーの技術開発に期待する。

- ・「ジオメトリックシミュレータによるシミュレーションに要する時間 (T_s)」の短縮化
形状モデルの複雑さに比例して計算速度が低下する。さらなる短縮が必要であり、同時5軸加工のような複雑形状でも、先行位置座標のサンプリング周期内で計算可能とする高速化が目標である。実現手段として、切削による加工物形状の変化、衝突計算、描画といった各シミュレーション計算の並列処理化をたとえば CPU や GPU のマルチコア並列処理を利用して行う開発や、形状モデルを自動簡素化するアルゴリズム開発、といった課題に取り組む必要がある。

(2) 切削負荷事前評価システム

- ・リアルタイム切削負荷予測の開発

本論文では空運転中に切削負荷評価を行っているが、現在行っている GPU での切削負荷計算にさらに GPU カードを増して計算時間を短縮化することができ、その結果リアルタイムでの切削負荷予測は可能であると考えられる。GPU 増での実験を行ってリアルタイム化の開発に取り組む必要がある。

- ・切削負荷適応制御の開発

本論文で従来手法より正確な切削負荷を予測することはできたが、切削負荷が異常に高い、あるいは低い時にどのような判断で切削負荷を適応制御するかを開発する必要がある。あるしきい値をユーザー側に設定してもらい、そのしきい値を超えた場合に如何ほどの時間内にそのしきい値以下あるいは、以上にするかを、その手法に関して取り組まねばならない。

本研究のような無人化、自動化につながる工作機械のインテリジェント化により、今後日本の工作機械業界が質的、技術的に世界をリードすると考える。これからより一層ユーザーと工作機械メーカーが協力しあい、差別化技術に取り組む必要がある。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，中部大学工学部機械工学科の竹内芳美教授には，およそ 2 年間，幅広い見地からご指導を賜り深甚なる謝意を表します．また，審査においてご助言を賜りました中部大学工学部機械工学科の水谷秀行教授，鈴木浩文教授，神戸大学工学研究科機械工学専攻の白瀬敬一教授に深く感謝申し上げます．

本研究の礎は 35 年程前に遡るが，その間に私の所属するアイコクアルファ株式会社の皆様の並々ならぬ努力が今日の研究に至っているのは過言ではない．その業績を受け継ぎ，本研究の開発を開始させたが，その間に開発を支えて頂きました故樋田成二会長，故樋田誠社長，そして今回の学位取得の機会を与えて頂きました代表取締役社長 樋田克史氏には深く感謝申し上げます．また，本研究を最初から事業部とともに引っ張り，本論文をまとめることを強く進めて頂き，研究を進める上での考え方や知識など，技術面でも常にご支援して頂きました顧問の金丸允昭氏には心より篤く感謝申し上げます．

次に本研究をともに進めて頂きました関係各位から終始ご協力を賜り心より御礼申し上げます．特にアイコクアルファ株式会社の MS 事業部取締役の三國哲氏，チーフマネージャーの城伸輔氏，マネージャーの東野千春氏には本論文をまとめる環境作りに終始ご協力して頂き深く感謝申し上げます．また，これまでの開発とともに邁進し，本研究開発のさらなる発展にも繋いで頂ける MS 事業部の坂井紀夫氏，浅野哲也氏，AP 事業部の後藤晃延氏にはいつも興味深い議論が交わせることができ，ここに謹んで御礼申し上げます．

さらに本論文の研究開発を進めていくうえでモデルを最適化して頂き，ご助言，ご協力を賜りました埼玉大学大学院理工学研究科准教授の金子順一氏には心から感謝の意を表します．また，コンピューターグラフィックスや形状モデリングに関してご指導して頂きました茨城大学工学部教授の乾正知氏，そして本研究の実験のご支援を頂きました中村留精密工業株式会社の山本正氏，蓮野剛氏，ファナック株式会社の栢野一司氏，藤井隆亮氏に篤く御礼申し上げます．

最後に，本研究を遂行するにあたり，私を陰ながら支えてくれた家族に心からの感謝の意を表します．

研究業績

原著論文

1. M.Kanamaru, N.Sakai, A.Goto, T.Hida, Development of Simulation Technology for 5-Axis Machines-Verification of Material Removal Model and Collision Avoidance-, Int. J. of Automation Technology, Vol.1, No.2, 2007, pp.141-146.
2. T.Hida, T.Asano, K.Nishita, N.Sakai, A.Goto, and Y.Takeuchi, Development of Online Real-Time Collision Free Machining Using Simulation with CNC Openness, Int. J. of Automation Technology, Vol.9, No.4, 2015, pp.403-410. (第 3 章)
3. T.Hida, T.Asano, C.Higashino, M.Kanamaru, J.Kaneko, Y.Takeuchi, Development of Cutting Force Prediction Method using Motion Information from CNC Controller, Int. J. of Automation Technology, Vol.10, No.2, 2016, pp.253-261. (第 4 章)

国際学会 Proceedings

1. T.Asano, T.Hida, A.Goto, Collision Free Machining using Simulation with CNC Openness, Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, 2010. (第 3 章)
2. T.Asano, T.Hida, A.Goto, Study on Collision Free Machining Using Simulation and CNC Openness, The 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2009-Dec. (第 3 章)
3. T.Hida, T.Asano, C.Higashino, M.Kanamaru, J.Kaneko, Y.Takeuchi, Development of Cutting Force Prediction Method Considering Cutting Tool Motion Error— Prediction of Surge Cutting Force Using Motion Information from CNC Controller, The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2015-Oct. (第 4 章)

経歴

- 1973年8月 愛知県生まれ
- 1997年3月 同志社大学工学部機械工学第二学科卒業
- 1999年3月 九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻修士課程修了
- 1999年4月 住友金属(株)和歌山製鉄所鋼管部中径管工場 技術
- 2004年2月 アイコクアルファ(株)(現在に至る)
- 2016年3月 中部大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了