



加工面への誤差の転写特性に基づく面品位向上技術に関する研究

西口, 直浩

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2018-03-25

(Date of Publication)

2019-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7187号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007187>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

加工面への誤差の転写特性に基づく 面品位向上技術に関する研究

平成 30 年 1月

神戸大学大学院工学研究科

西口 直浩

目 次

第 1 章 緒 論	1
1.1. 研究の背景	1
1.1.1. 製造業を取り巻く環境	1
1.1.2. 工作機械に対する課題	3
1.1.3. 加工精度向上への取組み	6
1.2. 研究の目的	8
1.3. 本論文の構成	9
第 2 章 5軸制御マシニングセンタにおける回転軸運動方向 反転時の動的挙動の評価とその補正	16
2.1. 諸 言	16
2.2. 運動精度測定方法	18
2.2.1. 測定対象	18
2.2.2. 測定装置	19
2.2.3. 測定方法および測定結果	24
2.2.4. 加工試験	29
2.3. 軌跡誤差と加工結果の関係	33
2.4. 軌跡誤差の特性を活用した補正	37
2.5. 結 言	40
第 3 章 5軸制御マシニングセンタにおける回転軸運動方向 反転に伴う軸方向変位の評価とその補正	43
3.1. 諸 言	43
3.2. 軸方向変位の測定方法	45
3.2.1. 測定対象	45
3.2.2. 測定方法	46
3.2.3. 測定結果	48
3.3. 実加工試験	50
3.3.1. 直進軸との同期運動による平面加工	50
3.3.2. 回転軸との同期運動による円柱加工	54
3.4. 直進軸を用いた補正	61
3.5. 結 言	65

第 4 章 エンドミル加工における工具アプローチ痕の 評価とその補正	68
4.1. 諸 言	68
4.2. 工具アプローチ痕	70
4.2.1. アプローチ半径と工具アプローチ痕の関係	70
4.2.2. 切込み量と加工痕の深さの関係	74
4.2.3. 工具抜け部とアプローチ部の加工面形状	76
4.3. 工具アプローチ痕の補正	81
4.4. 結 言	85
第 5 章 結 論	87
5.1. 研究成果のまとめ	87
5.2. 今後の研究課題	90
付 録	92
付録A 変位センサの仕様	92
付録B 測定器	96
付録C ボールバーシステムを用いた回転軸運動方向反転時の 動的挙動の評価	102
C.1. 諸 言	102
C.2. 評価方法	102
C.2.1. 測定対象	102
C.2.2. 実験方法	103
C.3. シミュレーションモデル	106
C.3.1. 送り駆動系モデル	106
C.3.2. 送り軸の案内面および軸受の摩擦モデル	106
C.4. 実験結果およびシミュレーション結果	107
C.4.1. 直進軸の動的精度による影響	107
C.4.2. ワーク設置位置と摩擦の影響	111
C.5. 結 言	113
図表一覧	115
業績一覧	119
謝 辞	121

第1章 緒論

第1章

緒論

1.1. 研究の背景

1.1.1. 製造業を取り巻く環境

近年の製造業を取り巻く環境をみると、為替変動やエネルギーコストに伴う世界経済の不透明さ、国際的な情勢不安、反グローバリズム政権の誕生、IoTや人工知能などの新技術の潮流といった様々な変化による影響が生じている。こうした状況の中、今後、製造業に求められる課題として、製造拠点の再編、ものづくり人材の不足、消費者ニーズの変化などが上げられ、現場はそれに対する対応を迫られている。ここでは、まずこれら製造業に求められている各課題を分析し、そこから工作機械分野に課せられる技術的課題について検討する。

日本を含めた各国が進めている国内産業の育成推進や世界経済の動向に伴い、これまで中国に偏っていた製造拠点の再編に大きな変化が生まれている。とくに、雇用の確保、技術流出対策、現地生産といった要望に伴い、製造拠点のグローバル化が進められている。経済産業省がまとめた「2017年版ものづくり白書」¹⁾によると、国内製造業における海外工場を有する834社のうち、2016年に製品や部材を国内生産に戻した会社は11.8%あり、2014年の13.3%、2015年の12.0%に続き10%以上を維持している。そして、その内訳として中国・香港からの回帰が66.0%となり最多となっている。また、独立行政法人日本貿易振興機構(JETRO)が製造業を含む全産業を対象に行った「2016年度日本企業の海外事業展開に関するアンケート調査」²⁾によると、これまで中国へ偏っていた生産機能の移管割合が、ベトナムをはじめとするASEAN諸国を筆頭に、日本、アメリカやEU諸国の各地へ分散してきていることが報告されている。

各報告書が示しているこれらの傾向は、製造メーカー各社が、人件費の安価な地域への製造移管や国内回帰、各国の現地生産への要望といった複数の要素を加味して、生産地を選んでいることが影響しているとみられている。これは、各社が国内外の事業計画においてグローバルな視点から最適な生産地を柔軟に選択しようとしており、それが調査結果に表れたものとみられている。また、この傾向にはリーマンショック以降の日本経済を含む世界経済の緩やかな拡大基調³⁾が背景にあり、「今後（3年程度）の海外進出方針と国内事業展開方針のアンケート調査結果」²⁾にも表れている。これによると、国内事業展開方針で「拡大を図る」企業の割合が54.7%と、比較可能な2011年度以降で最大となっているのに対し、海外進出方針で「拡大を図る」と答えた企業の割合も60.2%と4年ぶりに6割

第1章 緒 論

を超えている。

こうした世界経済の動向を背景に、製造拠点のグローバル化が進められるなか、ものづくり人材不足は、国内だけにとどまらず海外の生産現場においても重要な問題となっている。具体的な課題としては、日本、アメリカ、EU諸国といった先進諸国におけるものづくり人材の人口減少⁴⁾、人件費の高騰による商品価格の押し上げに対するリードタイム短縮等のコスト削減への取り組み、人件費が安価な新興国では人材の確保や人材育成、また他社への人材流出や技術流出も挙げられる。このことについて「2015年版ものづくり白書」⁵⁾によると、企業の製品／サービスを生産・提供するにあたり重要な役割を果たすものづくり人材がいると答えた企業は89.7%となっており、製造業においてもものづくり人材が重要な役割を果たしてきたことが分かる。また、その中でもとくに「高精度の加工・組立ができる熟練技能者」、「生産現場の監督ができるリーダー的技能者」に対して強い要望が出ている。そうした中、厚生労働省がまとめた「平成28年版厚生労働白書」⁶⁾によると、日本国内の製造業において働き手を示す生産年齢人口（生産活動の中心となる15歳以上65歳未満の人口）は1990年以降減少の一途をたどっており、製造メーカ各社は対策を迫られている。これに対し、人材不足対策において最も重視している取組として、約5割の企業が「定年延長によるベテラン人材の活用」を挙げている。また、女性活躍の職場環境整備や、外国人材の受け入れによる対応といった、熟練技能者以外の人材の活用にも力を入れようとしている。さらに、生産性向上を目標に、作業者の多能工化に取り組んでいる企業もみられる。しかし、今後力を入れたい対策では「ITの活用」が21.7%、「ロボットの導入」が19.2%で計4割を超えており、人材確保以外の対応策にも力を入れてきている⁷⁾。

こうした人材の確保の問題に対し人材不足解消への取り組みとして、自動化・単純化・低スキル化・仕組み化の対策も模索されている。例えば、仕組み化として、IoTなどを活用した熟練技術のマニュアル化・データベース化が進められ、現場力の向上に寄与している⁸⁾。このように、熟練技術をデジタル技術と融合させることで、今まで職人の勘に頼ってきた生産を再現性高くシステム的に実現する取り組みが進められている。こうしたことから、高度技術者、熟練技能者といったものづくり人材の不足などへの対応として、人手不足を補う新技術への投資が国内外で増加してきている⁹⁾。

このような、ものづくり人材不足の対策に腐心している各製造メーカに対し、近年、消費者ニーズの変化が新たな課題を突き付けている。この課題は、IT化やデジタル化の進展により商品リリースまでのリードタイムが短縮される中、製品のライフサイクルの短縮化という形で表れている。そしてこの要因に、技術革新のスピードの加速や類似品の台頭による技術のコモディティ化（陳腐化）が挙

第1章 緒 論

げられている⁸⁾。そうした中、先進国市場における消費者ニーズは高付加価値商品へ移ってきており、これまで大量生産から多品種少量生産への移行が進んでいた市場動向は、さらにこの特徴が進んだ「マスカスタマイゼーション」へ進んでゆくと考えられている。マスカスタマイゼーションとは、消費者の要望に合わせたカスタマイズ製品を大量生産品と同等の効率やコストで生産することである。また、この消費者ニーズの動向はいずれ新興国にも広がり、今後のグローバル競争の流れになるであろうと予想される。しかし、これまでの商品開発・生産・販売方法ではこの要望に応えられなくなると考えられることから、各製造メーカーはオリジナルデザインの導入やブランド戦略などによる差別化、知的財産の権利保護強化を推し進めることにより、製品ライフサイクルの最適化を模索している⁸⁾。

1.1.2. 工作機械に対する課題

上記のように、消費者ニーズの変化や製品ライフサイクルの短縮といった市場動向の変化に対し、それに応える現状の生産現場には、ものづくり人材の不足や製造拠点のグローバル化、価格競争など様々な課題が山積しており、変革が求められている。このような、ものづくり人材の不足といった問題を抱えている状態で、消費者の要望を満たすためのカスタマイズ製品を大量生産品と同等の効率やコストで市場へ供給するには、機械加工分野を含めた製造業が「柔軟な生産システム」の構築に取り組む必要があると考えられている⁵⁾。

この柔軟な生産システムの構築に必要な要素として、以下2つの取り組みが挙げられる。

- (i) IT等を活用した生産設備の効率的な運用と、これを実現するため工程集約に効果を示し高い汎用性を持つ工作機械の導入
- (ii) 工作機械の高精度化による人の手作業の軽減（削減、簡単化）

この柔軟な生産システムを実現するため、現在「Industrie 4.0」が注目を集めている。このIndustrie 4.0は、ドイツ政府が今後のグローバル競争に勝ち抜くため、2006年から進めてきた「高度技術戦略」の一環として、2011年に打ち出した製造業分野における高度成長戦略である。Industrie 4.0については様々な見解が示されているが、その目的を一言でいうならマスカスタマイゼーションへの対応であると考えられる。ドイツ政府に提出された提案書である「Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0」¹⁰⁾によると、このマスカスタマイゼーションを実現するためのキーワードとして「スマートファクトリ」を掲げており、ドイツ政府はこの考えに基づいた第4次産業革命を目指している。このスマートファクトリとは、自律的に動作するインテリジェントな生産システムを実現するため、生産リソースやサービスの利用

第1章 緒 論

範囲を一つの工場や企業の枠にとどめず、さらに広い範囲でIoT (Internet of Things) によって“つなげる”ことで、固定的な生産ラインの概念を持たず、動的に構成されるセル生産方式のことである。例えば、製品が各段階の製造作業を受ける際、必要な作業工程を提供できる生産リソース（機械や作業者を含む）を自律的に選択し移動する、動的に工程の構成が行われるインテリジェントな生産システムが想定されている。

これまでもこうした市場からの要望に応えるため、工作機械を含む生産システムに対する改革は様々な形で行われてきた。例えば、数値制御工作機械（NC工作機械）や設計支援システムであるCAD/CAM/CAEの普及、多品種少量生産を実現するためのセル生産方式の導入が挙げられる。これら新技術の導入には、高額な先行投資や高度な技術力の学習が要求されるが、そのコスト以上の効果を製造現場へもたらすことにより急速に普及してきた。

Industrie 4.0が目指すITを活用した生産設備の効率的な運用の実現には、工程集約に効果を示し高い汎用性を持つ工作機械の導入が求められており、その代表的な例として5軸制御マシニングセンタや複合加工機が挙げられる。JIS B0105¹¹⁾によると、5軸制御マシニングセンタとは「直交3軸および旋回2軸をもち、同時に5軸を制御できるマシニングセンタ」とされており、この多軸化により、複雑形状の加工や作業者の作業工数を削減する工程集約を可能にしている。ここで言う複雑形状の加工とは、人工関節などの医療関係や航空機部品といったオーバーハングなどの形状を有する付加価値の高い製品の加工であり、これらの生産工程において工具と工作物の相対位置と姿勢を連続的に制御可能な5軸制御マシニングセンタが活躍している。また、この5軸制御マシニングセンタはワークの段取り時間の短縮や工程集約といった汎用的な観点からも効果が見直され、これまで3軸加工機で行われていた一般的な機械部品や金型の加工においても注目されている。しかし、5軸制御マシニングセンタを含む多軸制御工作機械は送り軸の位置や姿勢といった幾何誤差や、各送り軸の動的精度の影響が累積することから、3軸加工機と比べ運動精度が劣る傾向があり、5軸制御マシニングセンタの普及の障害となっている。

この5軸制御マシニングセンタの普及と、ものづくり人材の不足の解決には、共通した課題として加工精度の向上が挙げられる。そして、この加工精度の向上が、工数削減に効果を上げる代表的な工作物として金型がある。金型は工作機械により製造される製品の中でもマザーツールと呼ばれ、加工面の面品位がとくに重要視される加工物である。それは金型の加工面の面性状が、最終製品の表面へ転写され消費者の目に付く表層部になることから、製品の概観の優劣、品質や性能あるいは生産性をも左右すると言われるためであり、作業者が磨き等の仕上げ作業を施すことが一般的となっている。ここで面品位とは、面の均一性や美しさ

第1章 緒 論

のことであり、工作物の寸法精度や形状精度とは異なり、設計者が意図しない不均一な傷や模様が発生頻度やその大きさの程度のことを指し示している。

近年、この金型によって製造されるプラスチック製品において、美しい仕上がりを求める成型品が工業品や自動車、携帯電話などで多く見られるようになってきている。例えば、鏡のように滑らかで美しい面を有する製品や、ヘアライン加工やシボ加工といった表面処理を付与することにより、高級感を持った質感や肌触り、傷が付きにくくさせるといった付加価値を有する製品に対し、市場における要望が増加してきている。しかし、このような付加価値を有する表面処理を持たせた商品を製作するには、製品表面に見合った金型が必要であり、鏡のように滑らかで美しい製品表面を得るには、金型の表面も鏡のように磨き上げる必要がある。またシボ加工には金型表面に対し、エッチングによる化学処理やサンドブラスト、鏡面仕上げにしない研磨処理などの表面処理が必要とされる¹²⁾。これら表面処理を行う技能は、その多くの工程が人の手作業で行われており、高い技術レベルを必要とする作業となっている。こうした高い技術力を有する技術者は国内外において不足しており、このような付加価値を有する商品への消費者ニーズは、ものづくり人材確保の問題に拍車をかけている。また、これら人材の件費の高騰から価格を抑えられずグローバル市場において競争力の低下も招いている。

これら磨きやシボ加工といった専門技能が必要な表面処理技術に対し、最近では工作機械の精度向上により、エンドミル加工時に設計時の3Dデータから直接仕上げ面へ加飾処理を施す技術の研究開発が行われている^{13)~15)}。しかし、これまでも工作機械の精度向上に対する様々な研究、新機能の開発がなされているが、それでも加工面品位といった加工結果に影響する、設計者が意図しない加工中に発生する誤差（以後、加工誤差と略記）を除去しきれない状況は数多く発生しており、現在でも磨き等の後工程作業が必要とされる原因となっている。ここで、プラスチック金型にある鏡のような面品位を要求される場合に、これら磨き工程をなくすためには、表面粗さで $R_{max}0.3\mu m$ 以下の精度が要求される場合が多いことが報告されていることから¹⁶⁾、なめらかな加工面における加工誤差による傷に対しても、これに準じた精度が要求される。また、これら高い面品位を実現するために、工作機械の高精度化が必要とされる要因に母性原理がある。この母性原理とは「加工物の精度は、それを加工した工作機械の精度を超えられない」という原理であり、機械の運動精度が加工面に転写特性を有していることを示している。これは、工作機械が直接加工した加工物に影響するだけでなく、プラスチック成型品といった金型によって生産される製品の品質にも、影響を及ぼすことが分かっている。このように、工作機械により加工された加工面の面品位が改善できれば、その後の磨き作業が軽減され生産効率の向上につながることから、金型の面品位の向上は工作機械の最も重要な課題の一つとなっている。

第1章 緒 論

また、金型と異なり直接仕上げ面へ加飾処理を施す例として挙げられるのが、スマートフォンの「iPhone」で有名なアップル社の製品で多く採用されている「ユニボディ」である。ユニボディとは、アルミニウム板などの無垢の素材から直接削り出す方法で作成された筐体のことであり、「Unibody（一つの筐体）」という名前の通り、筐体が一つの部品のみで構成されている。一般的にパソコンや携帯電話といった電化製品の筐体は、複数の部品をネジや溶接などで接合させて製作されているのに対し、ユニボディはネジなどの接合のための部品が発生しないため、一般的な複数部品で構成された筐体と比較して非常に軽量な上、継ぎ目のない一つの部品で構成されているため「たわみ」を発生させるような外力に対する高い強度を実現している。また、パソコンや携帯電話などの電化製品の筐体の多くが、プラスチック部品を主にした外観であるのに対し、一体型の金属部品で作成された製品は、シンプルで高級感のある洗練されたデザインや触った質感などの付加価値を生み出している。しかし、この筐体の加工において工程毎に加工機が分かれている場合、多くの工作機械が必要となってしまうことから、工程集約に貢献する5軸制御マシニングセンタや複合加工機の普及が進められている。また、これら商品の人に触れる表面を加工機により直接加工することから、この加工面には高い面品位が要求されることになる。

このように、効率的で汎用性を有する柔軟な生産システムの実現と、ものづくり人材の不足を補う技術要素として、5軸制御マシニングセンタの加工精度の向上が重要視されており、今後もこれに関連する技術の研究・開発は重要な課題となっている。

1.1.3. 加工精度向上への取組み

上記で述べた、5軸制御マシニングセンタの精度と加工面品位に大きな影響を及ぼす加工誤差の要因は複数挙げられるが、ここでは大別して「送り駆動系の運動特性に起因した加工誤差」と「送り駆動系の運動特性以外に起因した加工誤差」の2つに分ける。

工作機械によって生成される加工面は、送り駆動系の運動特性から多くの影響を受けており、これまで送り駆動系の高速度・高精度化のために多くの研究がなされてきた^{17)~26)}。そして、これら送り駆動系の運動特性に起因した加工誤差の代表的な例として、象限突起が挙げられる。この象限突起は、直進軸の運動精度を測定する方法として挙げられる円運動試験において、各軸の運動方向が反転する象限切り替え時に、突起状の工具軌跡の誤差として生じることが知られている²⁷⁾。この象限突起は、加工面に筋状の模様となって現れるため、金型といった滑らかな面を必要とする加工においては大きな問題となっており、この象限突起の補正に関して多くの研究開発が行われている^{28)~30)}。例えば、長島らは、象限突起量

第1章 緒 論

の理論解析とそれに基づく補正方法を提案し、佐藤らは、送り駆動系の運動方向反転時の摩擦力の非線形特性を考慮した象限突起生成モデルを提案した。そしてこの研究結果から、送り軸の運動方向反転時には送り駆動系の運動特性に起因した加工誤差が発生し易いことが分かっている。これは5軸制御マシニングセンタの回転軸においても同様であり、同時5軸加工の際の回転軸の運動方向反転時にも発生する。しかし、回転軸による加工誤差は、加工点から回転中心までの距離に回転軸による角度誤差を乗じたものとなり、直進軸の動的精度と比べても加工面に対しさらに大きな悪影響を及ぼす。

この問題に対し、5軸制御マシニングセンタの幾何誤差や運動特性を評価する方法として、回転軸と直進軸の同期運動によるボールバーやR-testを用いた測定方法、円すい台加工による評価方法といった数多くの方法^{31)~36)}が提案されており、その一部は既にISO規格³⁷⁾として規格化されている。しかし、これら方法にもまだいくつかの課題が残っている。例えば、Weikertらは、R-testを用いた評価方法を提案したが、その方法は直進軸の運動を基準として回転軸の動的精度を評価する方法であり、加工面品位に悪影響を及ぼす回転軸の運動方向反転時の挙動を評価しようとしても、回転軸の運動方向反転に伴い直進軸の運動方向も反転してしまうことから、回転軸の運動方向反転時の挙動のみを評価することはできなかった。またHongらは、円すい台加工による加工結果と幾何誤差の関係性について検討したが、円すい台加工では同時5軸制御運動が行われ、5軸制御工作機械の運動精度を総合的に評価することにはむいていないが、回転軸運動方向反転に伴う動的精度を円すい台加工結果から評価することは困難である。

上記では、回転軸の運動方向反転時に発生する加工誤差を送り駆動系の運動に起因する誤差に分類しているが、さらに細かく分類すると、回転軸運動方向反転時の送り方向の運動精度に起因した加工誤差に分類される。しかし、5軸制御加工においては、回転軸の送り方向以外の運動精度も注目されており、動作時の回転中心軸の傾きや変位、加工点までの距離といった複数の要因が、回転軸に起因する加工誤差に影響していることが分かっている。そしてこの動的精度は、その送り軸自体の送り方向の運動精度を向上させても改善できないことから、機械的精度向上か誤差発生方向に動作可能な送り軸によってのみ補正可能となる。これらのことから、回転軸に起因する誤差をさらに正確に補正するためにも、それらを分類して評価する方法はこれまでも提案されている^{38)~41)}。例えば、斎藤らはボールバーを用いた直進軸と回転軸による同期動作実験の結果から誤差要素の分類を行い、茨木らはR-testを用いて直進軸と回転軸による同期動作における各幾何誤差の影響を明らかにした。しかし、回転軸の運動方向反転動作に伴う軸方向に発生する変位（以後、軸方向変位と略記）に着目し、その補正方法までを詳しく検討した研究例は見当たらない。

第1章 緒 論

上記の送り駆動系の運動特性以外に，加工誤差を生み出す要因として，主軸精度，熱変位，CLデータの精度，切削力による工具変形などが挙げられる．今回，その中でもこれまでに明確な解決方法が提示されていない，金型といった滑らかな加工面の生成中に工具が加工面へアプローチする箇所で発生する，切削力による工具変形に起因した凹形状の加工誤差について取り上げる．この凹形状の加工誤差（以後，工具アプローチ痕と略記）は凸形状のそれと異なり，金型加工の磨き作業の際に，加工誤差の周辺が滑らかになるように広く磨かなければならず，作業工数の増大や全体形状の崩れに繋がっている．これに対し，従来からの対処方法として，円弧補間を用いたアプローチや加工面の接線方向からのアプローチにより，工具アプローチ痕を軽減する工夫がなされているが，それでも除去しきれない状況は数多く発生しており，現在でも磨き等の後工程作業が必要とされている．この工具アプローチ痕が低減できれば，その後の磨き作業が軽減され生産効率の向上につながる．これまでも，エンドミルを用いた加工における切削力と加工面との関係について，多くの報告がなされ^{42)~44)}，藤井らはボールエンドミルを用いた加工において切削力に起因した工具変形による加工誤差について検討し，白瀬らはエンドミルを用いた加工において切削力による加工誤差の要因分析を行った．しかし，その多くが切削力に対する工具変形に関するものである．この工具アプローチ痕に注目した数少ない報告として，岩部らによるものがあり，その中で，真円形状の外周円輪郭加工時の工具退避部に発生する凹形状の加工誤差は，実切入量の変化による切削抵抗の変化に伴う工具変形の影響が関係していることが報告されている⁴⁵⁾．

1.2. 研究の目的

本研究では，数値制御工作機械により生成される加工面に発生する，送り駆動系の動的精度や切削力による工具変形等を原因とした面品位に悪影響を及ぼす加工誤差の評価方法を提案するとともに，その評価結果から各誤差要因の加工面への転写特性を明らかにし，この転写特性に基づいた加工面の面品位向上技術を提案することを目的とする．

本研究では，以下に示すことについて取り組んだ．

1. 5軸制御マシニングセンタにおける，回転軸運動方向反転時の送り方向の運動精度に起因した加工誤差について，その評価方法を提案するとともに評価結果から運動精度と加工誤差の関係を明らかにし，それを削減する補正方法までを提案する．

第1章 緒 論

2. 5軸制御マシニングセンタにおける，回転軸運動方向反転時の軸方向変位に起因した加工誤差について，その評価方法を提案するとともに評価結果からその挙動と加工誤差の関係を明らかにし，それを削減する補正方法までを提案する．
3. 工作機械の送り駆動系の運動特性に起因しない加工誤差の内，工具を加工面から一旦離れた後に同一箇所へアプローチする際に発生する工具アプローチ痕について，その評価方法を提案するとともに評価結果から工具アプローチ痕の原因となるメカニズムを明らかにし，それを削減する補正方法までを提案する．

これらの結果をもとに，数値制御工作機械の高精度化に寄与する技術を提供することで，工程集約等による作業工数の削減を実現し，ものづくり人材不足の解消と柔軟な生産システムの構築に貢献するものと考えられる．

1.3. 本論文の構成

本論文は全5章から構成されており，各章の概要を示す．

第1章では，製造業を取り巻く現在の環境と問題点について概説するとともに，この問題に対し工作機械が取り組むべき技術課題として，高精度化が選ばれる理由について述べた．また，これまでの5軸制御マシニングセンタを含む工作機械の高精度化の取り組みについてまとめることで，本研究の新規性および目的について述べた．

第2章では，回転軸運動方向反転時の送り方向の運動精度の調査結果と，検討した補正方法の効果を述べる．はじめに，直進軸による影響を受けずに回転軸運動方向反転時の送り方向の挙動を評価するための測定方法を提案するとともに，そのための測定装置を開発し実際に調査を行った結果について述べる．次に，この調査した運動特性が加工面へどのような影響を及ぼすのか評価するための加工試験を提案するとともに，実際に加工実験を行った結果と上記測定結果を比較した結果についても述べる．さらにこれらの調査結果から，回転軸運動方向反転時の送り方向の運動精度に起因した加工誤差を補正する方法を提案し，実験によりその有効性を検証している．

第3章では，回転軸の運動方向反転動作に伴う軸方向変位の調査結果と，検討した補正方法の効果を述べる．はじめに，回転軸の運動方向反転動作に伴う軸方向変位の挙動を評価するための測定方法を提案し，実際に調査した結果について述べる．次に，この軸方向変位が加工面にどのような影響を及ぼすのか評価するための加工試験を提案するとともに，実際の加工実験による調査結果と上記測

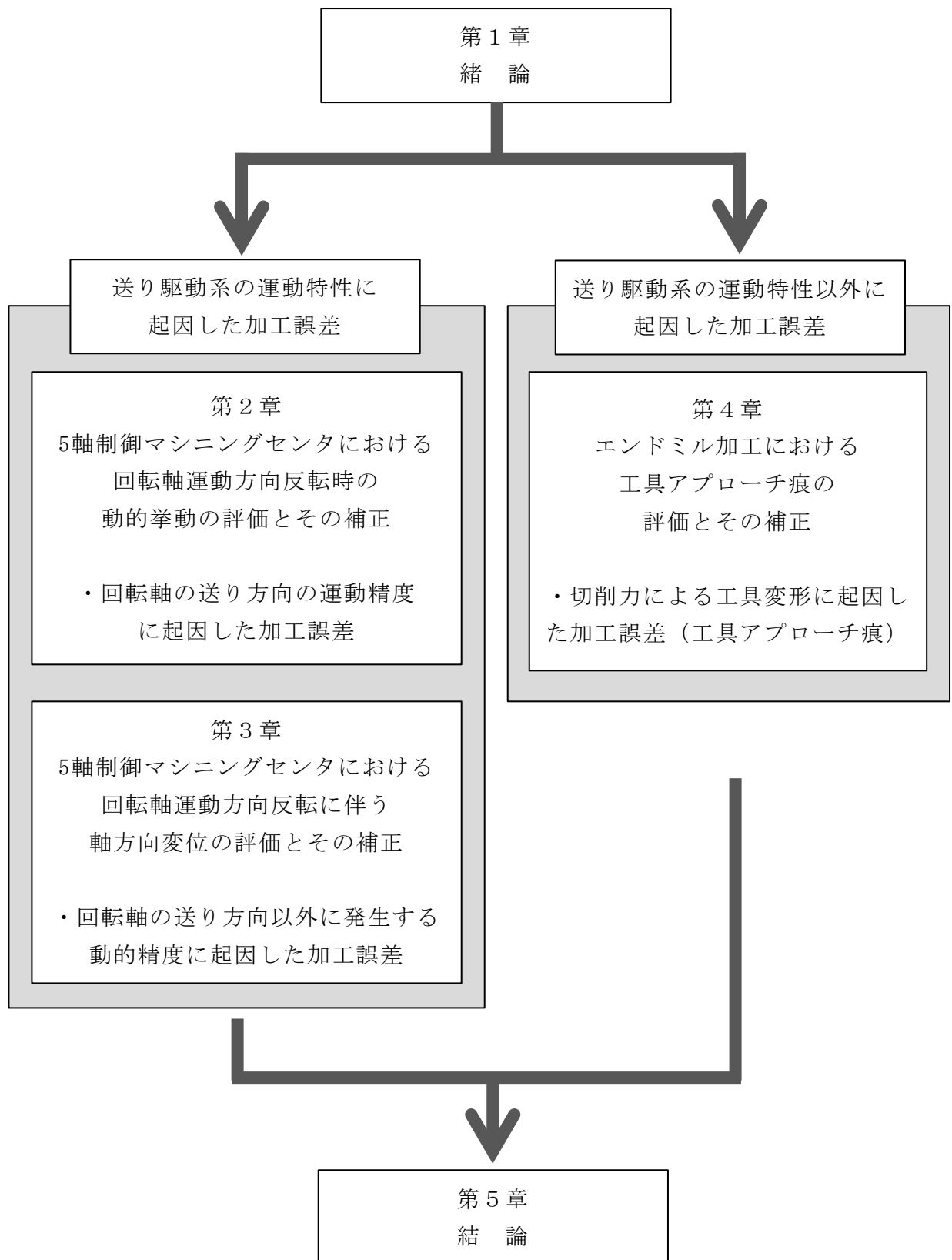
第1章 緒 論

定結果との比較結果についても述べる。さらにこれらの結果から、加工精度を向上させるため、軸方向変位の測定結果に基づいて直進軸によるこの加工誤差の補正方法についても検討し、実験によりその有効性を検証している。

第4章では、工具アプローチ痕の発生メカニズムの調査結果と、検討した補正方法の効果を述べる。はじめに、ボールエンドミルによる加工において、工具アプローチ痕を形成するのに関係する、退避動作、アプローチ動作の関係等について詳しい調査を行った結果について述べる。次に、効果的な補正に必要な退避動作に対するアプローチ動作の円弧中心位置を算出する方法を提案するとともに、提案した方法により工具アプローチ痕が、効果的に削減できることを加工実験により検証している。

第5章では、本研究を通して得られた成果をまとめ、今後の課題と展望について述べる。

第1章 緒論



第1章 緒 論

参考文献

- 1) 経済産業省: 2017年版ものづくり白書, (2017).
- 2) 独立行政法人 日本貿易振興機構(JETRO): 2016 年度日本企業の海外事業展開に関するアンケート調査, (2017).
- 3) みずほ総合研究所: 2016・17・18年度 内外経済見通し～世界経済は拡大基調へ、米国政策や欧州政治が波乱要因～, (2017).
- 4) 経済産業省: 製造業を巡る現状と政策課題, (2017).
- 5) 経済産業省: 2015年版ものづくり白書, (2015).
- 6) 厚生労働省: 平成28年版厚生労働白書 –人口高齢化を乗り越える社会モデルを考える–, (2016).
- 7) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省: 平成28年度 ものづくり基盤技術の振興施策(概要), (2017).
- 8) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省: 平成27年度 ものづくり基盤技術の振興施策(概要), (2016).
- 9) 内閣府: 平成28年度 年次経済財政報告, (2016).
- 10) H. Kagermann, W. Wolfgang, J. Helbi: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, (2013).
- 11) JIS B0105, 工作機械-名称に関する用語 (2012).
- 12) 株式会社モールドテック, シボ加工: <http://mold-tech.jp/>.
- 13) 趙曉明, 是田規之, 堤正臣: 5軸制御ボールエンドミル加工における表面粗さ生成機構, 精密工学会誌, Vol.64, No.12 (1998) pp.1826-1830.
- 14) 齋藤明德, 趙曉明, 堤正臣: ボールエンドミル加工における仕上げ面凹凸模様の制御方法, 精密工学会誌, Vol.66, No.3 (2000) pp.419-423.
- 15) 齋藤明德, 趙曉明, 堤正臣: ボールエンドミル加工における曲面上への凹凸模様の形成方法, 精密工学会誌, Vol.66, No.12 (2000) pp.1963-1967.
- 16) 幸田盛堂: 最近の金型仕上げ加工技術(1), 機械の研究, Vol.40, No.10 (1988) pp.1076-1080.
- 17) D. A. Haessig, B. Friedland: On the Modeling and Simulation of Friction, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.113, No.3 (1991) pp.354-362.
- 18) 二見茂, 古谷彰浩: AC リニアモータと転がり案内を用いたナノメータ位置決め(第2報) –転がり案内のトライボロジー–, 精密工学会誌, Vol.57, No.10 (1991) pp.1808-1813.

第1章 緒 論

- 19) 堤正臣, 大友誠司, 岡崎裕一, 酒井浩二, 山崎和雄, 葛東方: 摩擦を考慮した CNC 工作機械の送り駆動機構の数学モデル, 精密工学会誌, Vol.61, No.10 (1995) pp.1458-1462.
- 20) 垣野義昭, 松原厚, 茨城創一, 中川秀夫, 竹下虎男, 丸山寿一: NC 工作機械における送り駆動系のトータルチューニングに関する研究 (第4報) : 多軸チューニング, 精密工学会誌, Vol.63, No.3 (1997) pp.368-372.
- 21) 鶴田和寛, 村上輝夫, 二見茂: 転がり案内における速度反転時の非線形摩擦挙動, 精密工学会誌(C編), Vol.69, No.12 (2003) pp.1759-1763.
- 22) 佐藤隆太, 堤正臣: AC サーボモータと直動転がり案内を用いた送り駆動系の数学モデル, 精密工学会誌, Vol.71, No.5 (2005) pp.633-638.
- 23) 二見茂, 園田哲平: リニアモータおよびボールねじ駆動系が発生する駆動力過渡応答の計測と静特性との比較, 精密工学会誌, Vol.72, No.11 (2006) pp.1386-1390.
- 24) 佐藤隆太, 堤正臣, 今木大輔: 直動転がり案内における摩擦特性の実験的挙動解析, 日本機械学会論文集(C編), Vol.73, No.734 (2007) pp.2811-2819.
- 25) 田中淑晴, 大岩孝彰, 大塚二郎, 増田郁郎: 精密位置決め制御のためのリニアボールガイドの摩擦モデルに関する研究(第3報) -非線形摩擦モデルを用いた制御による位置決め精度向上-: 精密工学会誌, Vol.74, No.11 (2008) pp.1171-1175.
- 26) 樋口拓郎, 真鍋佳樹, 佐藤隆太, 堤正臣: NC 工作機械の運動精度向上に関する研究 -トルク変化に対応する自律形象限突起補償器の開発-, 精密工学会誌, Vol.76, No.5 (2010) pp.535-540.
- 27) 垣野義昭, 井原之敏, 篠原章翁: DBB 法によるNC 工作機械の精度評価法, リアライズ社, (1990).
- 28) 長島一男, 勝木雅英, 河上邦治: NC工作機械の象限切替え突起量の理論解析と入力適応系による補正, 日本機械学会論文集(C編), Vol.66, No.648 (2000) pp.2877-2883.
- 29) 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.
- 30) 佐藤隆太, 寺島義道, 堤正臣: 微小変位領域の摩擦特性を考慮した象限突起補償器, 精密工学会誌, Vol.74, No.6 (2008) pp.622-626.

第1章 緒論

- 31) NAS979 Uniform Cutting Tests - NAS series, Metal Cutting Equipment Specifications, (1969).
- 32) S. Weikert and W. Knapp: R-test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools, Annals of the CIRP, Vol.53, No.1 (2004) pp.429-432.
- 33) C. Hong, S. Ibaraki and A. Matsubara: Influence of Position-dependent Geometric Errors of Rotary Axes on a Machining Test of the Cone Frustum by Five-axis Machine Tools, Precision Engineering, Vol.35, No.1 (2011) pp.1-11.
- 34) 太田祐輔, 茨木創一, 5軸制御工作機械の旋回軸が反転する際の動的誤差の評価, 日本機械学会 2011 年度年次大会.
- 35) R. Sato and M. Tsutsumi: Motion Control Techniques for Synchronous Motions of Translational and Rotary Axes, Proceedings of the 5th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Vol.1 (2012) pp.265-270.
- 36) M. Yamaji, N. Hamabata and Y. Ihara: Design of Motion Accuracy Measurement Device with Three Displacement Sensors for Machine Tool and Comparison of Its Setting Method, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, Vol.8, No.4 (2014) No.14-00094.
- 37) ISO/DIS10791-6:2014 Machine Tools—Test conditions ns for machining centers—Part6: Accuracy of speeds and interpolations, (2014).
- 38) 齋藤明徳, 堤正臣, 牛久健太郎: 5軸制御マシニングセンタのキャリブレーション方法に関する研究(第2報) —同時3軸 制御運動を用いた位置偏差および角度偏差の推定—, 精密工学会誌, Vol.69, No.2 (2003) pp.268-273.
- 39) 茨木創一, 垣野義昭, 赤井孝行, 高山直士, 山路伊和夫, 小川圭二: ボールバー測定を用いた5軸制御加工機の運動誤差原因の診断 —誤差成分の分類と改良型ボールバー装置(DBB5)の開発—, 精密工学会誌, Vol.76, No.3 (2010) pp.333-337.
- 40) S. Ibaraki, C. Oyama and H. Otsubo: Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by R-test, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.51 (2011) pp. 190-200.

第1章 緒論

- 41) 西尾健太郎, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 同時5軸制御による円すい台加工面の解析, 日本機械学会論文集(C編), Vol.79, No.808 (2013) pp.4613-4623.
- 42) 藤井義也, 岩部洋育: ボールエンドミルによる切削力曲線と加工精度との関係, 精密機械, Vol.48, No.5 (1982) pp.649-654.
- 43) 白瀬敬一, 稲村豊四郎, 安井武司: エンドミル加工における加工誤差の要因分析と定量化, 精密工学会誌, Vol.52, No.4 (1986) pp.705-712.
- 44) H. Iwabe, K. Shimizu and M. Sasaki: Analysis of Cutting Mechanism by Ball End Mill Using 3D-CAD (Chip Area by Inclined Surface Machining and Cutting Performance Based on Evaluation Value), JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, Vol.49, No.1 (2006) pp.28-34.
- 45) 岩部洋育, 竹本和博, 今井純一: エンドミルによる高速加工に関する研究(輪郭加工による加工精度と誤差要因), 日本機械学会論文集(C編), Vol.63, No.612 (1997) pp.2878-2885.

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

第2章

5軸制御マシニングセンタにおける

回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

2.1. 諸言

機械部品や金型の加工において、複雑な形状の加工が可能な5軸制御マシニングセンタによる同時5軸制御加工が用いられている。一般的な5軸制御マシニングセンタは直進軸3軸と回転軸2軸を有し、工具と工作物の相対位置と相対姿勢の制御を可能にしている。しかし、送り軸の位置や姿勢といった幾何誤差や、各送り軸の動的精度の影響が累積することから、3軸加工機と比べ運動精度が劣る傾向があり、5軸制御マシニングセンタの普及の障害となっている。とくに回転軸による加工誤差は、加工点から回転中心までの距離に回転軸による角度誤差を乗じたものとなり、直進軸の動的精度と比べても加工面に対して悪影響を及ぼす。

この問題に対し、5軸制御マシニングセンタの幾何誤差や運動特性を評価する方法として、図2.1に示すボールバーやR-testを用いた測定方法や、円すい台加工による評価方法といった数多くの方法^{1)~6)}が提案されており、その一部はISO規格⁷⁾として規格化されている。また、R-testは、IBS Precision 社⁸⁾により既に市販されており、5軸制御マシニングセンタを含む多軸制御工作機械の運動特性評価装置として普及しつつある。さらに、Hongら³⁾は、円すい台加工による加工結果と幾何誤差の関係性についての検討を行っている。しかし、回転軸運動方向反転に伴う動的精度のみを抽出し、それが加工面とどのような関係を有しているのか詳しく調査した報告は見当たらない。太田ら⁴⁾は、R-testを用いて回転軸が反転する際の動的精度を測定したが、その方法は回転軸への指令動作に対し直進軸を追従させる同期運動を用いており、回転軸の運動方向反転に伴い直進軸の運動方向も反転してしまうことから、回転軸の運動方向反転時の挙動のみを評価することはできなかった。

送り駆動系の運動方向反転時における動的精度は、複数の送り軸の同期運動においては工具軌跡の急峻な変化の原因となっており、象限突起と呼ばれる突起状の工具軌跡の誤差を生させることが知られている⁹⁾。この送り駆動系の運動方向反転時における工具軌跡上に表れる誤差（以後、軌跡誤差と略記）を要因とする加工誤差は、金型といった滑らかな面を必要とする加工においては大きな問題と

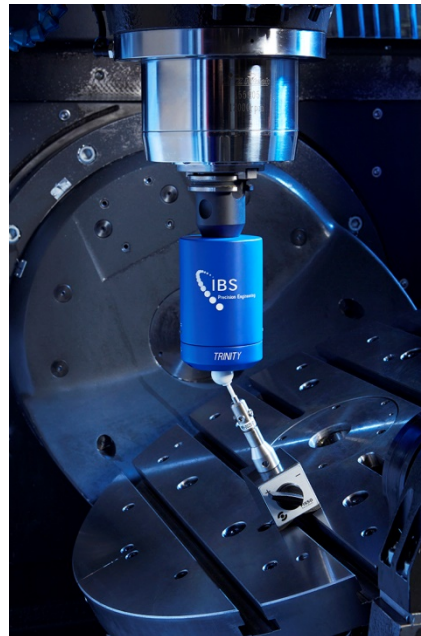
第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

なっており、これに関して多くの研究開発が行われている^{10)~15)}。例えば、佐藤ら¹⁵⁾は、送り駆動系の運動方向反転時の摩擦力の非線形特性を考慮した象限突起生成モデルを提案した。この動的精度は、同時5軸加工における直進軸と回転軸の同期運動においても同様であり、直進軸に比べ加工面へ大きな影響を及ぼし易い回転軸の運動方向反転時にも発生する。

そこで本研究では、直進軸による影響を受けずに回転軸の運動方向反転時の挙動を評価するための測定方法、およびそのための測定装置を開発するとともに、測定方法と同じ同期運動による加工方法を提案する。提案した測定方法および加工方法により、回転軸の運動特性、とくに加工面品位に悪影響を及ぼす運動方向反転時の挙動について評価した。さらに、回転軸の運動方向反転時に生じる動的精度による影響を補正して工作精度を向上するための方法を提案し、実験によりその有効性を検証した結果について述べる。



(a) Ball bar system
(Renishow_QC20-W)



(b) R-test (IBS_TRINITY)

Fig. 2.1 Measurement system

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

2.2. 運動精度測定方法

2.2.1. 測定対象

本研究では，回転軸の運動方向反転時の挙動を評価するための測定方法と加工方法とを提案し，その有効性を検証するために，**図2.2**に示す5軸制御マシニングセンタ（株式会社エグロ製¹⁶⁾ E-32V）を用いて測定実験と加工試験とを行った．この5制御マシニングセンタは，主軸をX，Y，Z軸方向へ移動させる3つの直進軸と，テーブルをX軸回りに傾斜させるA軸，およびA軸ユニットの上にテーブルをZ軸回りに回転させるC軸を有する．送り軸の諸元を**表2.1**に示す．

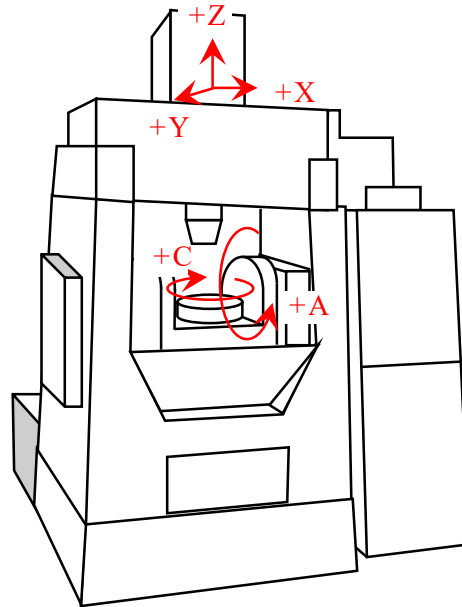


Fig. 2.2 Configuration of the five-axis controlled machining center (EGURO_E-32V)

Table 2.1 Axis specification of the five-axis controlled machining center

Axis	Max-feedrate	Stroke	Drive device
X	4000 mm/min	-25.0 - +275.0 mm	Ball screw
Y	4000 mm/min	-17.5 - +180.0 mm	Ball screw
Z	4000 mm/min	-220.0 - +12.5 mm	Ball screw
A	4000 deg/min	-95.0 - 0.0 deg	Worm gear
C	4000 deg/min	0.0 - +360.0 deg	Worm gear

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

2.2.2. 測定装置

本研究では、5軸制御マシニングセンタの運動精度測定方法として、これまで数多くの研究が報告されているR-testと同様の方法である、3つの変位センサと基準球とを用いた方法を採用した。これは、回転軸が動作する際に測定対象である球と測定装置との相対位置を直進軸によって維持する運動を用い、そのときの変位を測定することで運動精度を評価する方法である。

本研究では、運動方向反転時の挙動について評価するための専用の測定装置を開発した。まず、測定対象として回転軸を動作させた際に測定対象と測定装置の姿勢が変化してもその相対位置を高精度に測定できるように、直径19 mm、真球度1 μm 以下の校正基準球（レニショー株式会社製¹⁷⁾）を採用した。次に、本測定装置に用いる変位センサの選定を行った。これまでに、各種変位センサを用いた測定装置の実用化^{8,18)} や、様々なタイプのレーザ変位センサを評価した研究が報告されている。茨木ら¹⁹⁾は、これまで実用的な場面で一般に使われる様々なレーザ式変位センサと接触式変位センサに対し評価試験を行った。しかし、渦電流式といった異なる方式の比較がされていないことから、本研究では以下に示す3種類の変位センサに対し比較実験を行うことで、本測定装置に用いる変位センサを選定した。

本測定装置に用いる変位センサには、測定対象である球の表面までの距離を直接測定可能で、高加速度で発生する運動方向反転時の動的精度を連続的に捉えることができ、さらに測定対象である球の曲率の影響を受けないことが求められる。また、変位センサの測定精度は、一般的なマシニングセンタの最小指令単位である1 μm 以下とした。これらの条件を考慮した上で、使用した5軸制御マシニングセンタの大きさに合わせて、小型で比較的安価であることも考慮した結果、株式会社キーエンス製²⁰⁾のレーザ式変位センサ(IL-S025)、接触式変位センサ(GT2-H12K)、渦電流式変位センサ(EX-305)の3種類の変位センサを候補に挙げ、それぞれに対し比較実験を行った。3つの変位センサの仕様を表2.2に示す（詳細は付録Aに記す）。

Table 2.2 Specification of the displacement sensors

Model	IL-S025	GT2-H12K	EX-305
Type	CMOS Laser	Digital Contact	Eddy Current
Measuring range mm	20~30	0~12	0~1
Accuracy μm	1.0	1.0	0.4
Response frequency Hz	3.03×10^3	10.0	18×10^3

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

非接触式変位センサの各測定方式による曲面に対する測定精度を評価するため、レーザ式変位センサと渦電流式変位センサに対し、直径20 mmの円柱の表面までの距離を測定する実験を行った。これは、**図2.3**に示すように、円柱中心位置を基準に測定箇所を円周方向へ直線移動させ、傾きの異なる箇所の測定結果を比較する評価方法である。この測定結果を**図2.4**に示す。この結果から、測定方向に対し測定面が傾く円柱の外側において、渦電流式変位センサの測定結果が測定対象に用いた円柱の形状と比べ大きく異なることが判明した。これに対し、レーザ式変位センサでは、渦電流式変位センサで測定結果が悪化した円柱の外側においても、比較的高精度な結果が得られた（円柱中心から ± 0.2 mmの測定範囲に対し範囲測定結果と測定対象との差は最大1 μm ）。渦電流式変位センサを用いた場合に測定対象である円柱との差がここまで大きくなったことの原因として、円柱の中心から離れた傾斜した面を測定する場合、測定面に発生した渦電流による磁束が傾斜することや、レーザ式変位センサに比べ原理上**図2.5**に示すように測定範囲が広いことから、測定結果が傾斜した測定範囲全体の平均値となることが考えられる。

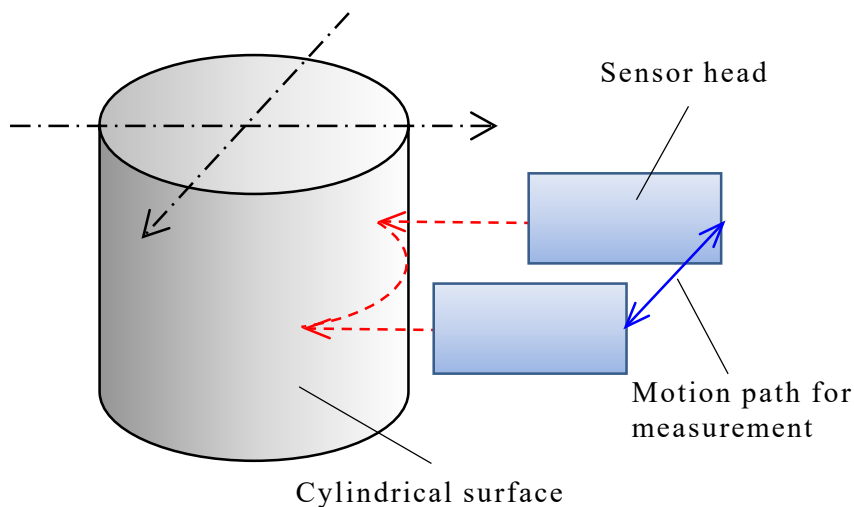


Fig. 2.3 Measurement method for comparison of sensors

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

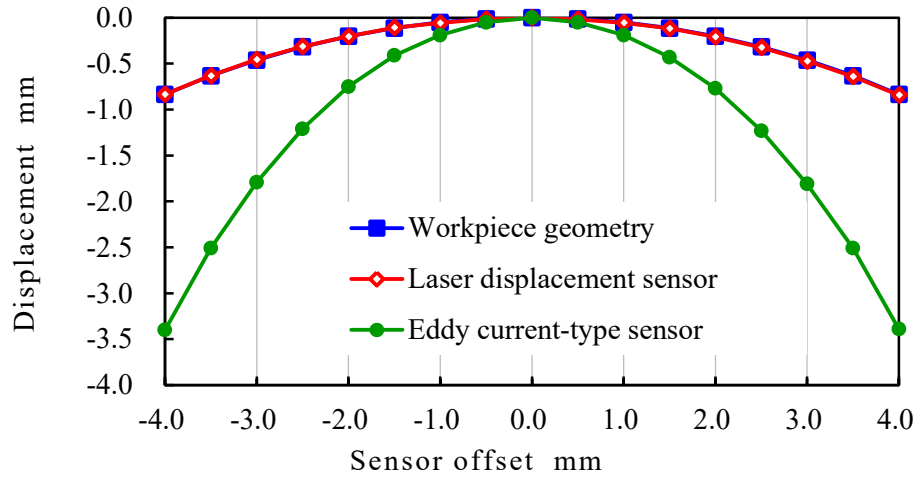


Fig. 2.4 Comparison of curved surface measurement results for different sensor types

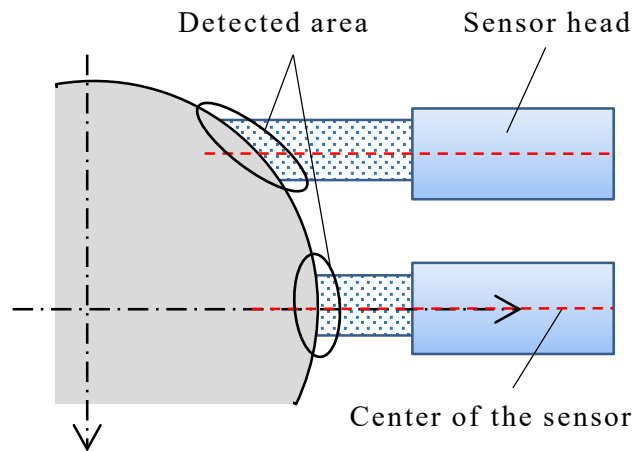


Fig. 2.5 Influence of surface geometry on measurement results for eddy current-type displacement sensor

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

非接触式センサと接触式センサの動特性を比較するため、レーザ式変位センサと接触式変位センサの周波数特性を測定した。測定方法は、**図2.6**に示すように回転中心を偏心させた円柱を回転させ、円柱表面までの距離の変位を測定することとした。測定結果を**図2.7**に示す。この結果から、今回の実験で用いた接触式変位センサでは、周波数が10Hz以降大きくなるにつれ振幅比（出力振幅／入力振幅）が大きくなることが分かった。これは、入力が高周波の場合、接触式変位センサでは縮む際に慣性による行き過ぎが発生し、円柱表面から接触子が離れる現象が発生していると考えられる。

これらの実験結果から、本研究で開発する測定装置に用いる変位センサには、株式会社キーエンス製のレーザ式変位センサIL-S025を採用した。

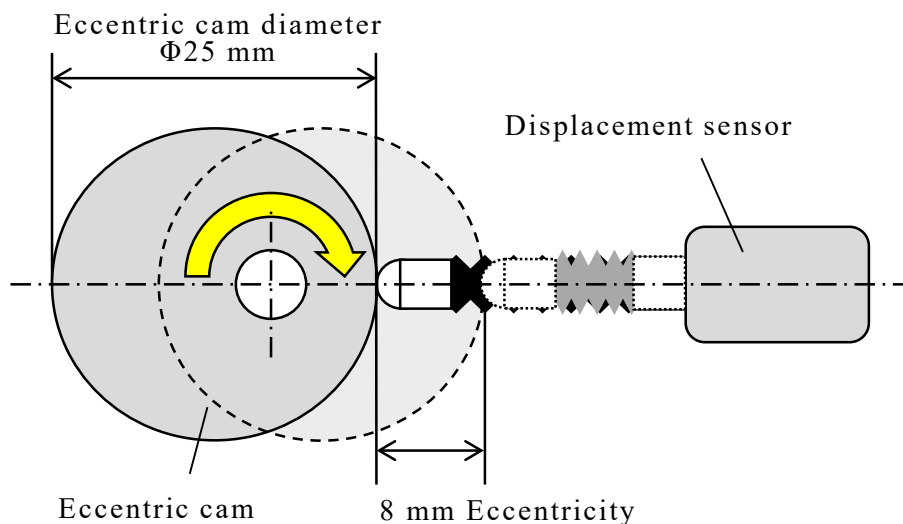


Fig. 2.6 Influence of surface geometry to the measure results

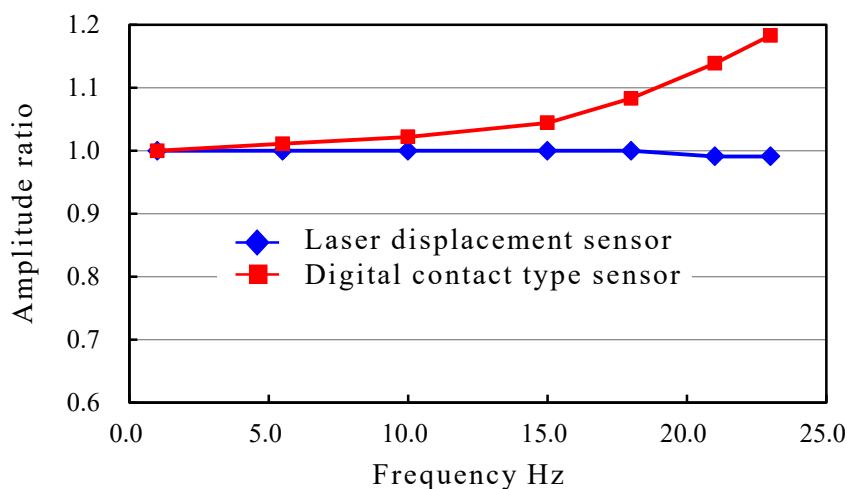
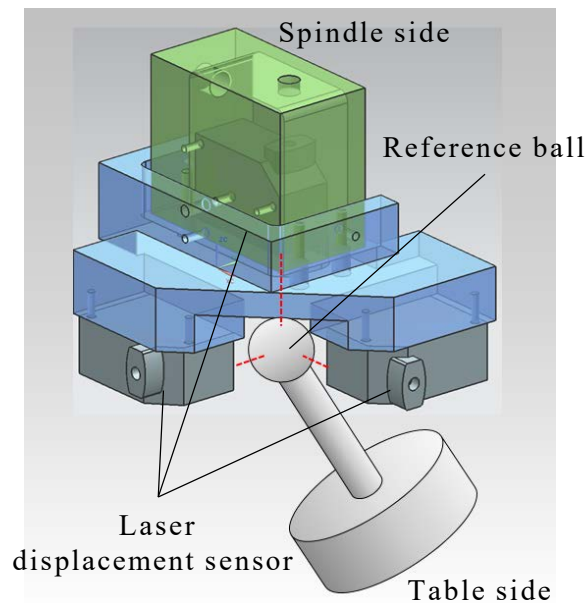


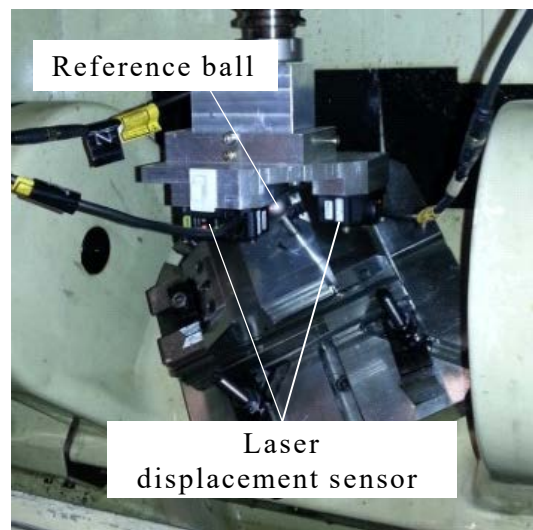
Fig. 2.7 Comparison of frequency responses

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

開発した測定装置および5軸制御マシニングセンタへの設置状況を図2.8に示す（詳細は付録Bに記す）。測定装置は、テーブル回転時のケーブルの干渉を避けるため、変位センサを主轴側、測定対象である球をテーブル側に配置する構成とした。また、変位センサはそれぞれX、Y、Z軸と平行に固定する設計とした。ここで、採用したレーザ式変位計では鏡面を測定するのが困難であることから、測定対象である基準球の表面に、皮膜の厚さ $1\mu\text{m}$ 以下の無電解ニッケルメッキを施した。回転軸の運動方向反転時の動的精度は、開発した測定装置による測定結果、球の取付け位置、回転軸の角度から後述する計算式により求める。



(a) CAD- model



(b) Prototype

Fig. 2.8 Developed measurement system

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

2.2.3. 測定方法および測定結果

測定には、回転軸の移動指令に対し直進軸を同期させるよう作成したNCプログラムを用いるが、一般的な動作では回転軸の反転に伴い直進軸も反転するため、回転軸の運動方向反転時の動的精度のみを捉えることは困難となる。これまでも、例えば円すい台加工では、回転軸の運動方向反転時の挙動を評価できることがわかっている。また、テーブル側に回転軸をもつ5軸制御マシニングセンタで円すい台の加工を行う場合、工作物をテーブル上のどの位置に設置するかにより機械の各軸の運動が変化することも知られている^{10,21)}。例えば、加藤ら²²⁾は、ボールバーを用いて円すい台加工を模写した測定動作による評価方法を提案した際に、回転軸と直進軸の運動方向反転位置が別々の箇所が発生するような送り運動を用いている。しかし、回転軸の運動方向反転に伴う動的精度の影響が最大となる回転軸の接線方向に発生する変位に注目し、それが実験結果に現れるよう評価する方法を検討した例は見当たらなかった。そこで本研究では、2つの回転軸の運動を組み合わせることで、測定対象である回転軸の運動方向反転時の動的精度のみを評価するための運動と、測定装置の3つの変位センサによる測定結果から回転軸の動的精度を算出するための方法を提案する。本研究では、2つの回転軸（A、C軸）のうち、ストロークに制限があるため反転が起こりやすく、回転中心と加工点とを近づけることが難しい傾斜軸（今回用いた5軸制御マシニングセンタではA軸）を測定対象とした。

A軸を回転させると、基準球と変位センサとの相対位置を一定に保つためには、直進軸であるY軸およびZ軸を動かす必要があり、その3軸のみで同期運動を行うと、A軸の反転と同時に直進軸の運動方向も反転する。そこで、**図2.9**のようにC軸を一方向へ回転させながらA軸を反転させることで、機械座標系のYZ平面におけるC軸による速度ベクトルとA軸による速度ベクトルの合成速度ベクトルを反転動作前後で一つの象限内に収まるようにすることにより（**図2.9**ではYZ平面の第3象限）、A軸の運動方向反転時にY、Z軸が反転しないようにした。

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

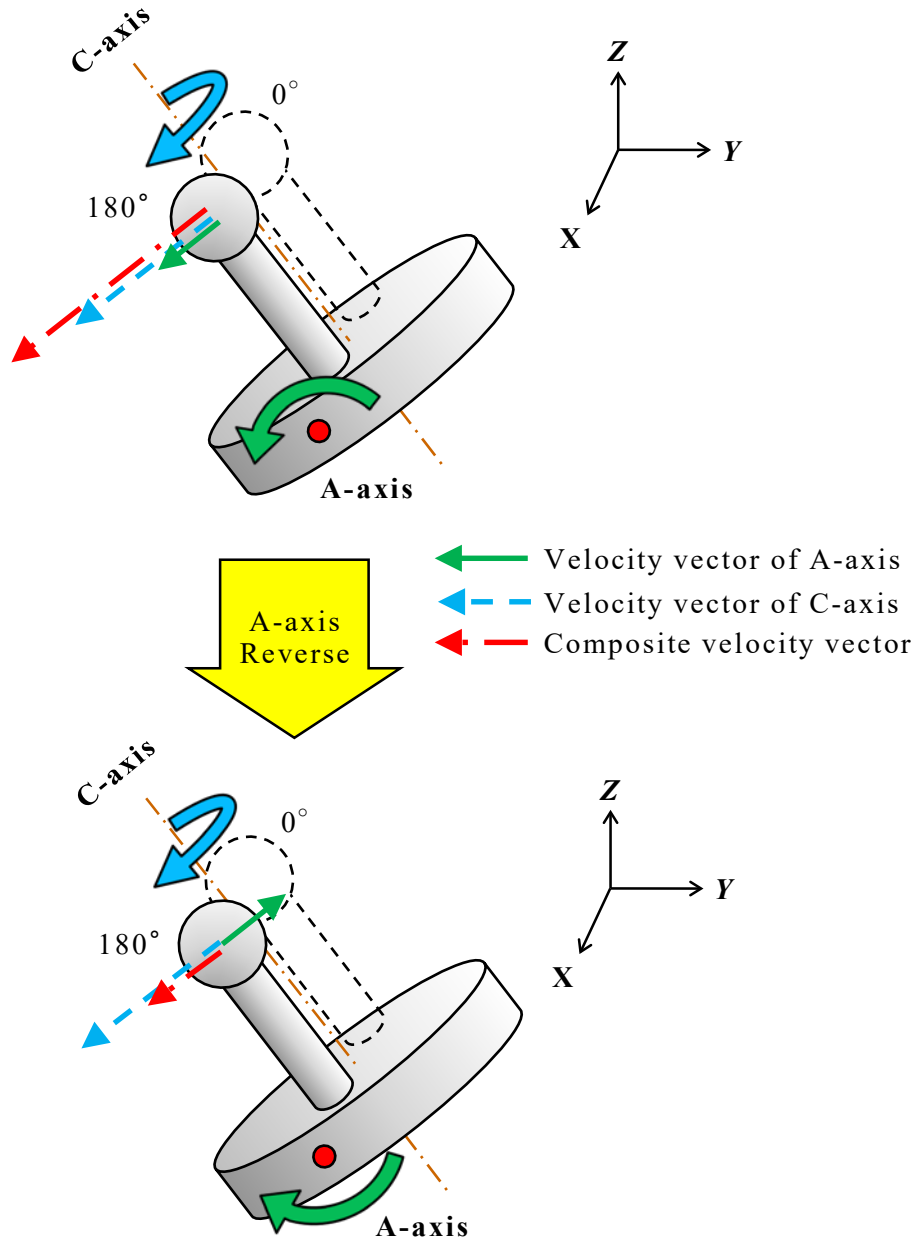


Fig. 2.9 Schematic of measurement movement at C-axis rotational angle of 180°

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

図2.10は、表2.3に示すA軸を -27° から -63° へ往復動作中にC軸を+方向に -90° から $+270^\circ$ まで動かす測定におけるX, Y, Z, A軸の移動指令である。このとき、測定対象である基準球のテーブル上の設置位置を、YZ平面内において基準球の中心とC軸回転中心とが一致するように設置することで（図2.9はC軸 180° の場合）、YZ平面内におけるC軸の速度ベクトルは最大となる。また、本研究で用いた5軸制御マシニングセンタでは設計上のA軸中心とC軸中心とが直交しているため、C軸が 0° および 180° のときにA軸を反転させることにより、YZ平面内におけるC軸の速度ベクトルをA軸の反転動作による速度ベクトルの変化より大きくすることで、図2.10に示すように、A軸の反転動作とY軸およびZ軸の反転動作とを分離できる。このとき、A軸とともにX軸の運動方向も反転するが、X軸方向に発生する誤差はA軸回転中心線と平行でありA軸の接線方向の測定結果へは影響を及ぼさない。また、X軸の運動方向反転によるY, Z軸方向の誤差が本実験動作では発生しないことは、A軸指令を除いた動作にて確認された。A軸運動方向反転時の測定結果を図2.11に示す。

Table 2.3 Measurement motion of C, A-axis

Axis	Motion °						
C	-90.0	+	0.0	+	180.0	+	270.0
A	-45.0	+	-27.0 (Reverse)	-	-63.0 (Reverse)	+	-45.0

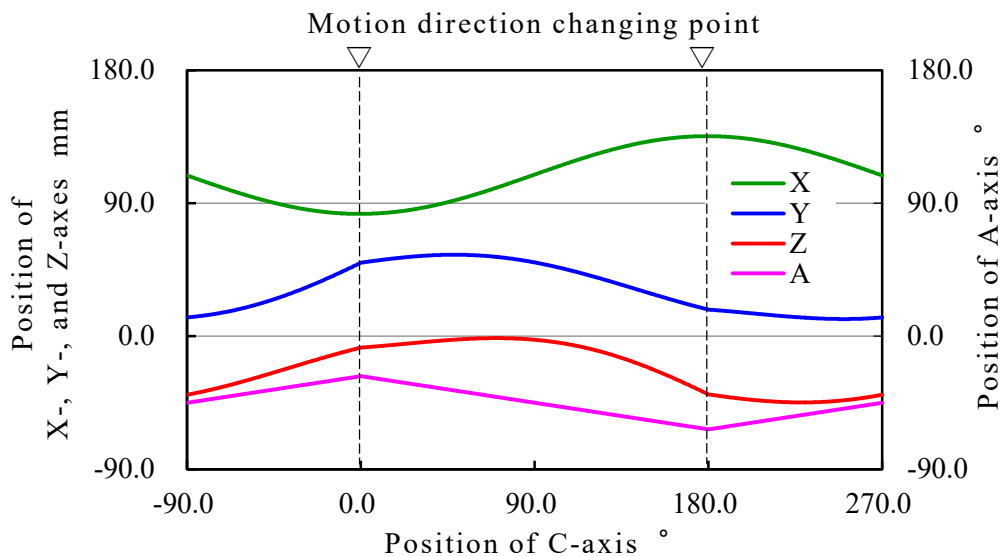


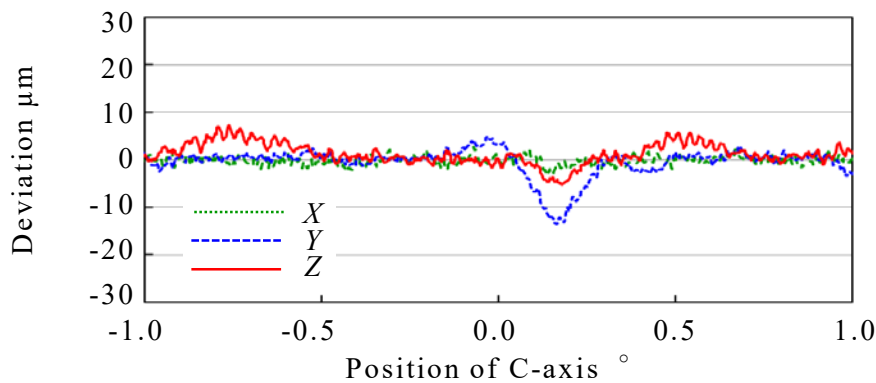
Fig. 2.10 Measurement motion of each axis

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

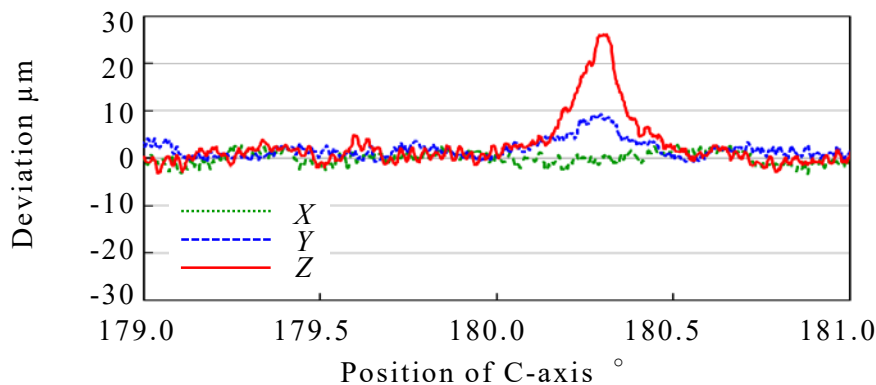
図2.11に示す3方向の測定結果から，A軸の運動方向反転時の動的精度を求めらる．A軸の運動方向反転に伴う動的精度の影響が最大となる方向は，A軸回転の接線方向となる．このとき，YZ平面内において基準球の中心とC軸の回転中心は一致するように設置されており，C軸中心とA軸中心も直交していることから，図2.12のA軸座標系におけるZ'軸と基準球の中心は一致する．また，A軸回転の接線方向は，図2.12のA軸座標系におけるY'軸方向となる．このことから，機械座標系上で測定された3方向の測定データ $[X, Y, Z]^T$ およびA軸の回転角度 θ_A から，A軸座標系上における動的精度は式(2.1)により計算でき，よって，Y'軸方向の成分は式(2.2)により表される．

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_A & \sin \theta_A \\ 0 & -\sin \theta_A & \cos \theta_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$Y' = Y \cos \theta_A + Z \sin \theta_A \quad (2.2)$$



(a) $\theta_A = -27.0^\circ$



(b) $\theta_A = -63.0^\circ$

Fig. 2.11 Comparison of measured motion errors

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

図2.11の測定結果から式(2.2)を用いて求めた，A軸の運動方向反転時の動的精度の接線方向成分を図2.13に示す．ここで，図中の符号は，実加工試験における加工面を基準として凸形状となる方向を正とし，加工面に食い込む側の誤差を負として表示している．

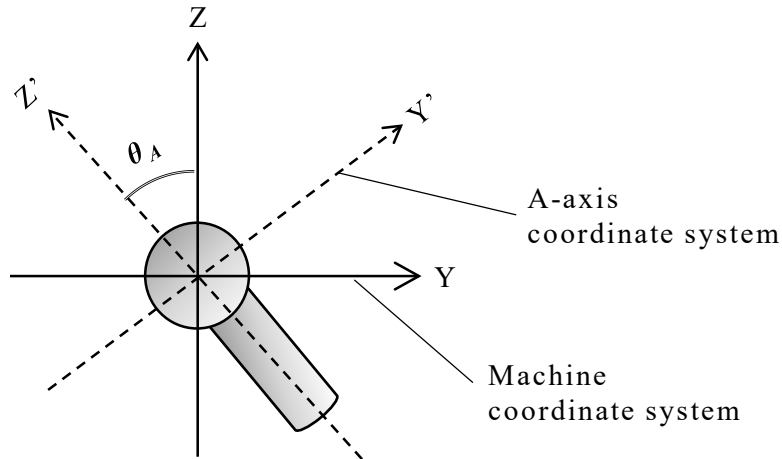


Fig. 2.12 Coordinate transformation between machine and A-axis coordinate systems

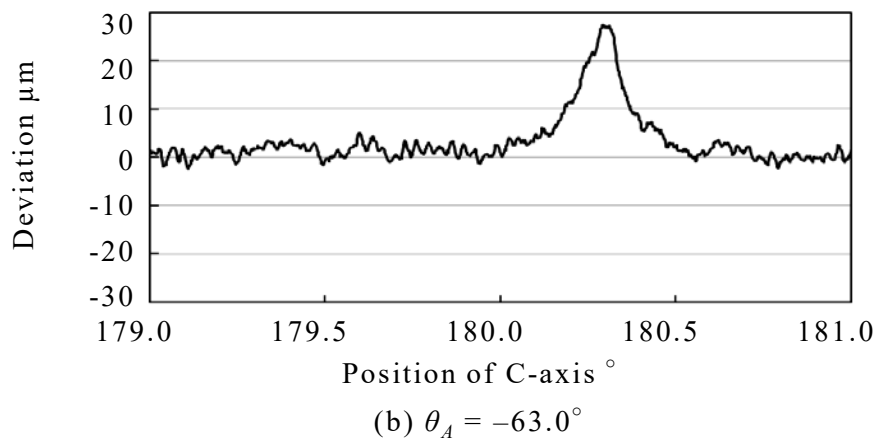
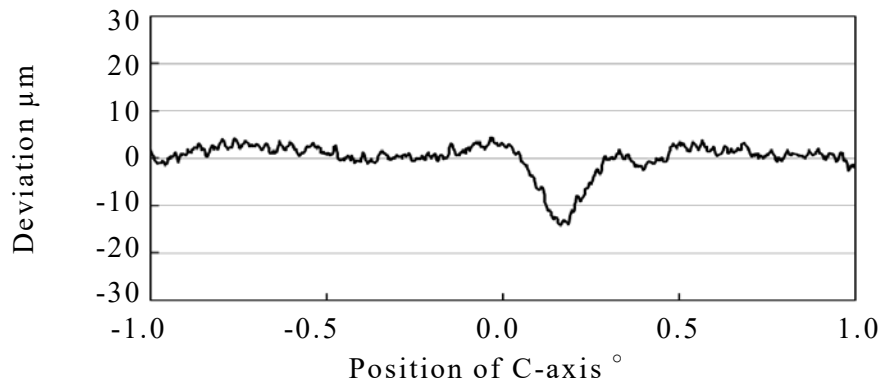


Fig. 2.13 Measured motion errors along A-axis tangential direction

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

2.2.4. 加工試験

提案した測定方法により測定されたA軸の運動方向反転時の動的精度が、加工面へどのような影響を及ぼすか、測定時の運動と同じ運動によって円柱を加工することで検証する。

提案した測定方法では、テーブル上に設置された基準球の中心と主軸側に設置した測定装置の相対位置を維持するように直進軸と回転軸を同期運動させるのに対し、同じ同期運動による円柱加工を実現するため、**図2.14**に示すように、実加工試験のための工具経路は工作物中心の移動経路から工作物の半径と工具半径の合計分だけオフセットさせる。

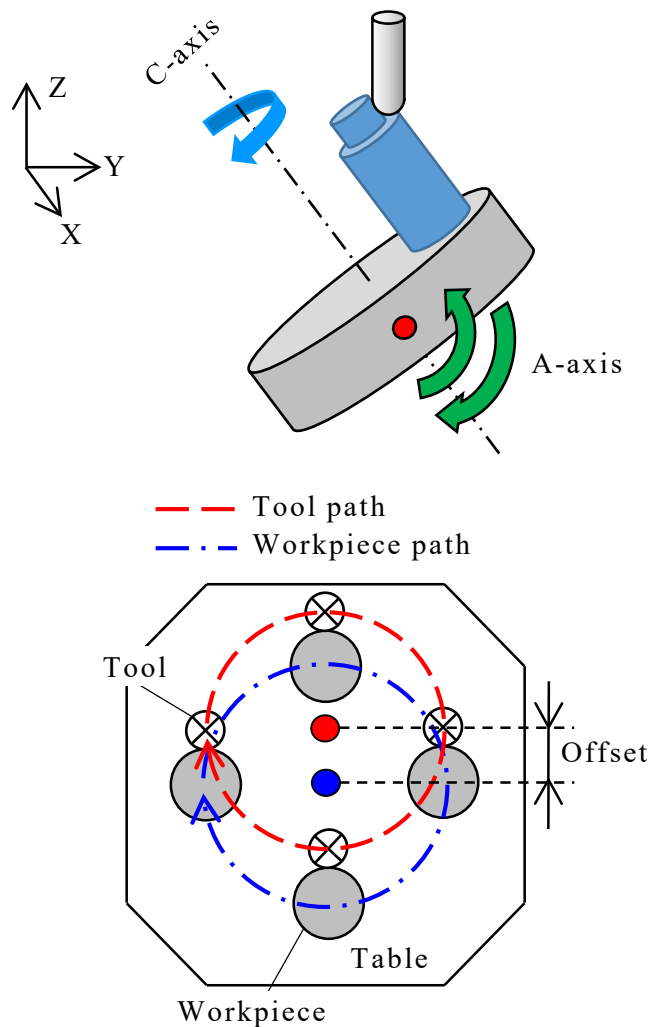


Fig. 2.14 Cylindrical machining motion

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

このような工具経路による円柱加工を実現するため、表2.4および図2.15に示す加工条件を用いて、工作物上部から下部に向かうヘリカル加工を行った。このとき、工作物の形状に加工条件による影響が現れないようにするため、理論カスプ高さが1 μm 以下となるように加工条件を選定し、工具は直径16 mm の2枚刃ボールエンドミル、ピックフィード量を0.25 mm、加工する円柱の直径を20 mm とした。また、回転軸の動的精度による影響は回転中心位置から加工点までの距離により変化することから、A軸の回転中心位置から加工点までの距離が測定時の基準球の中心位置までの距離と同じになるようにした。

以上の方法により加工した円柱を真円度測定機（株ミットヨ製 RA-114）で測定した結果を図2.16に示す。A軸 -27.0° における測定結果である図2.13(a)によると、軌跡誤差の大きさが $-14 \mu\text{m}$ であったのに対し、加工結果に現れた凹形の溝状の加工誤差（以後、凹形状の加工誤差と略記）は $-12 \mu\text{m}$ （図2.16(b)）となりほぼ一致している。一方、A軸 -63.0° では、図2.16(b)の測定結果には $+28 \mu\text{m}$ の軌跡誤差が確認できるにも関わらず、加工結果（図2.16(a)）にはそのような加工誤差を確認することはできなかった。

Table 2.4 Experimental condition for machining

Tool	Type	Ball-end mill
	Number of flutes	2
	Diameter	16 mm
Workpiece	Material	AL5056-H34
	Form	Column
	Diameter	25 mm
Machining	Cut depth	2.5 mm
	Cross feed	0.25 mm
	Spindle speed	5000 rpm

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

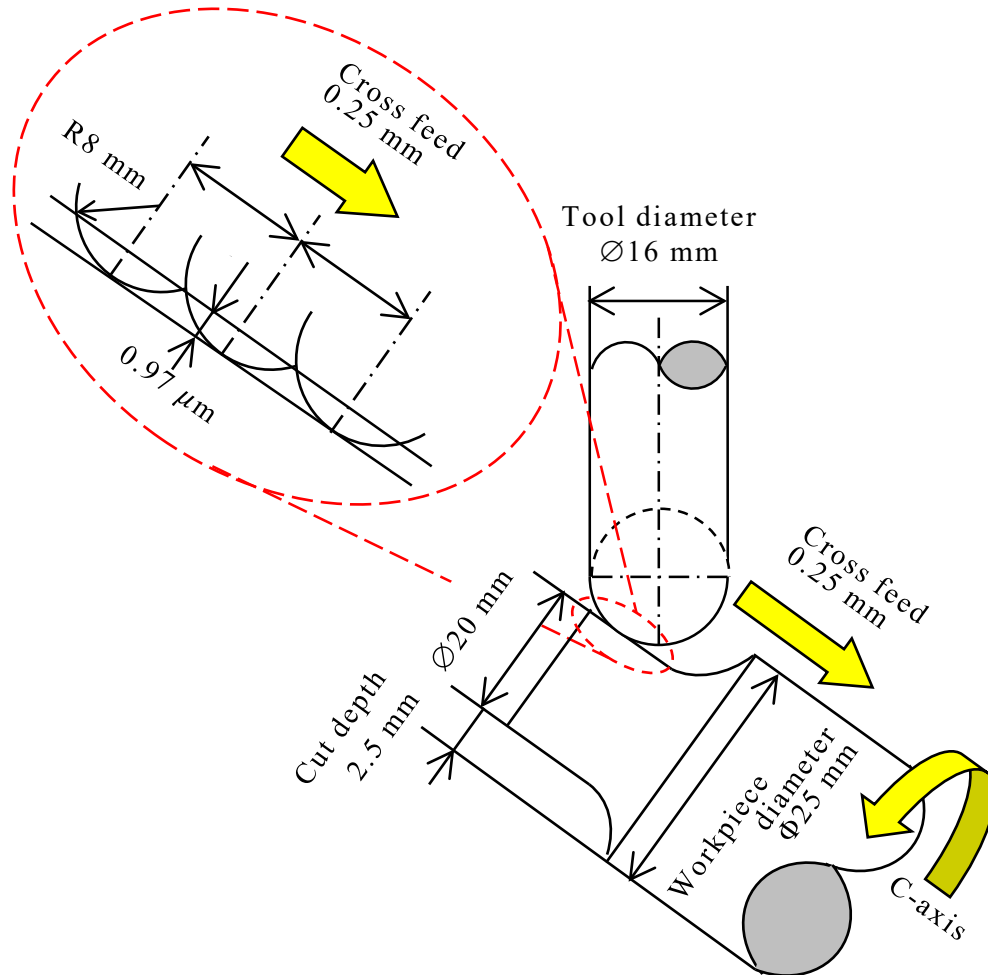
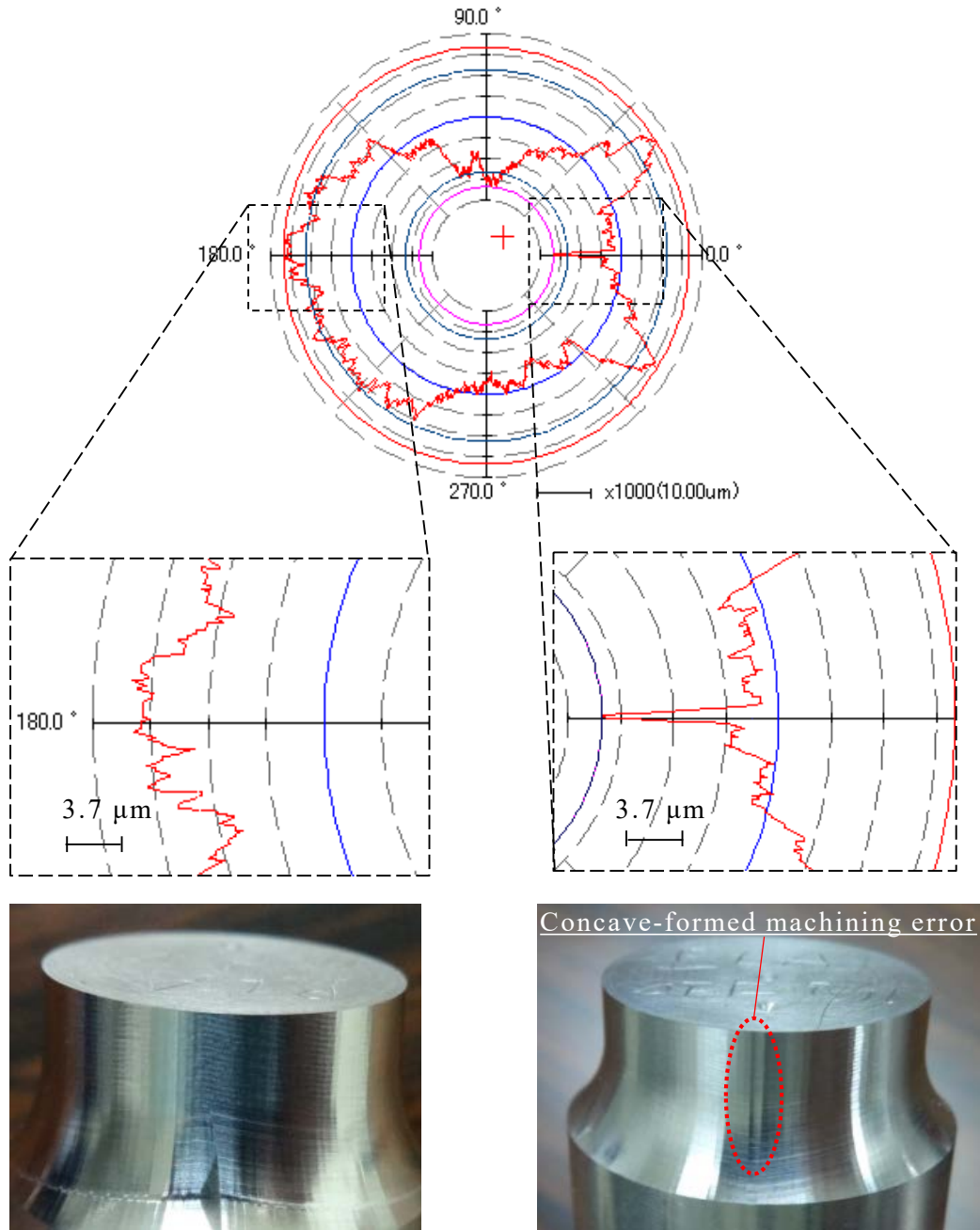


Fig. 2.15 Cylindrical machining condition

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける
回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正



(a) $\theta_A = -63.0^\circ$
(rotational angle of C-axis: 180.0°)

(b) $\theta_A = -27.0^\circ$
(rotational angle of C-axis: 0.0°)

Fig. 2.16 Machined workpiece

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

2.3. 軌跡誤差と加工結果の関係

加工面に対して凸形状に現れる軌跡誤差が加工結果に現れなかったことの原因を明らかにするため、軌跡誤差の特性と加工結果との関係について検討した。

運動方向反転時の軌跡誤差を図2.17に示すような①②③④⑤を通る経路と仮定した場合、②～④の軌跡誤差の高さ H に比べ、加工面に現れる凸形状の加工誤差の高さ l は、④の位置で工具に削られることで小さくなると考えられる。この加工誤差の高さ l は、工具軌跡の高さ H より小さい場合、幅 W と工具半径 R から式(2.3)により求められる。

$$l = \begin{cases} R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2} & (W \leq L) \\ R + H - \sqrt{\left(\frac{2RH}{W}\right)^2 + R^2} & (W > L) \end{cases} \quad (2.3)$$

$$L = \sqrt{2H(H^2 + 4R^2)^{1/2} - 2H^2}$$

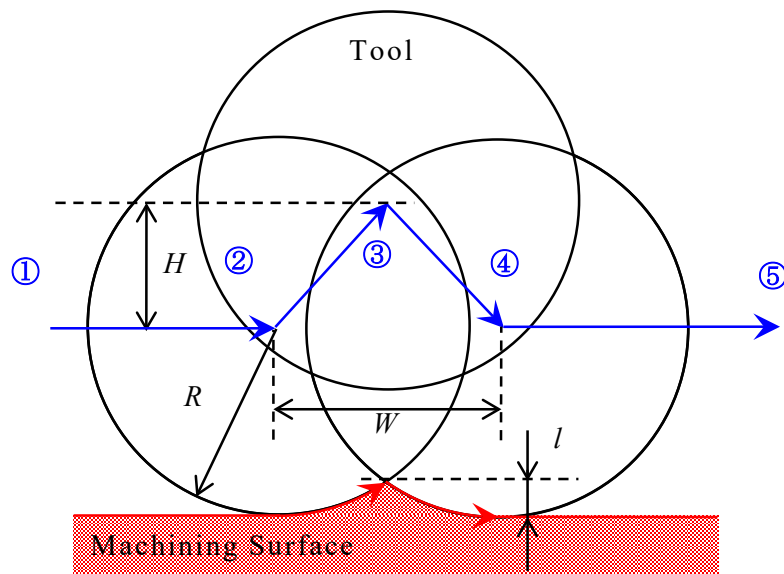


Fig. 2.17 Tool trajectory with a convex motion error

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

このことを実験的に検証するため、**図2.18**に示すように模擬的な軌跡誤差を故意に設けた加工試験を、軌跡誤差の高さ H 、幅 W 、工具半径 R を変化させて行い（ H ：0.25～1.0 mm， W ：0.5～6.0 mm[0.5 mm毎]， R ：1.0, 4.0, 7.0 mm），加工誤差の高さ l を表面粗さ計により測定した．その測定結果と**式(2.3)**による計算結果とを，**図2.19**，**図2.20**に示す．**図**によると，**式(2.3)**による計算結果と実験結果はよく一致していることがわかる．

この凸形状に生じる軌跡誤差の特性が、円柱加工面において測定結果と加工結果に違いが生じたことの原因である．**図2.13(a)**に示すA軸反転時に生じる軌跡誤差の測定結果によると、軌跡誤差の高さは28 μm 、幅は0.157 mmであり、加工に使用した工具半径（8.0 mm）から**式(2.3)**により加工面に表れる加工誤差の大きさを計算すると、約0.4 μm となる．よって、本研究で示した測定結果に現れた軌跡誤差は、加工結果に影響を及ぼさないといえる．

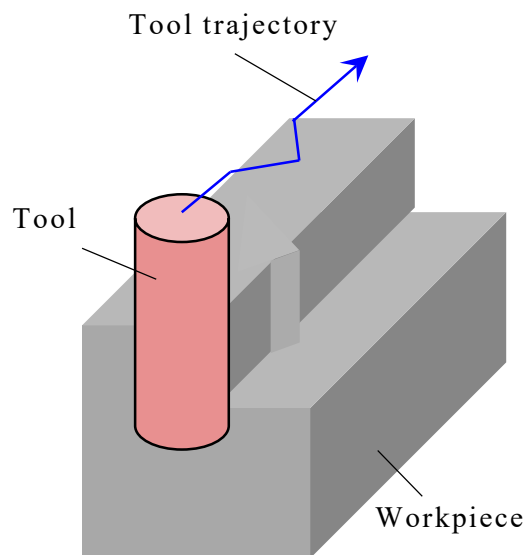
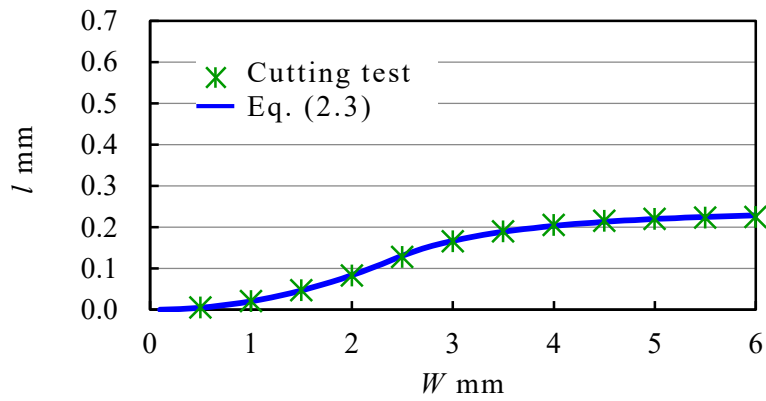
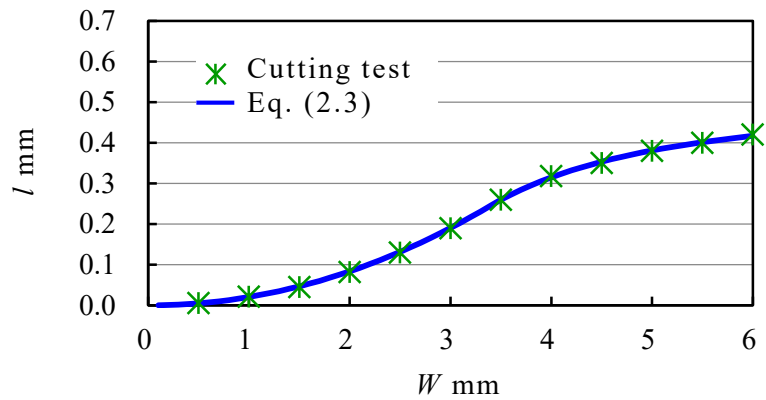


Fig. 2.18 Cutting test for convex error

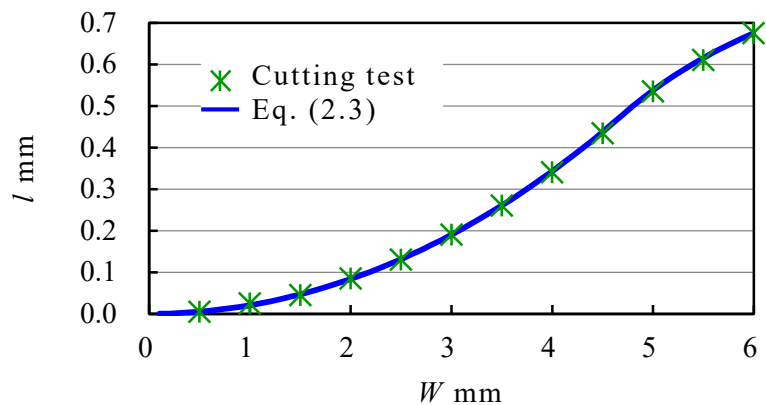
第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正



(a) $H = 0.25$ mm, $R = 6.0$ mm



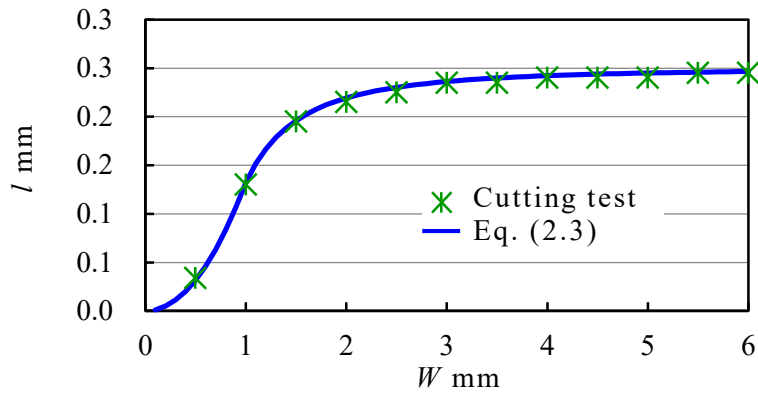
(b) $H = 0.50$ mm, $R = 6.0$ mm



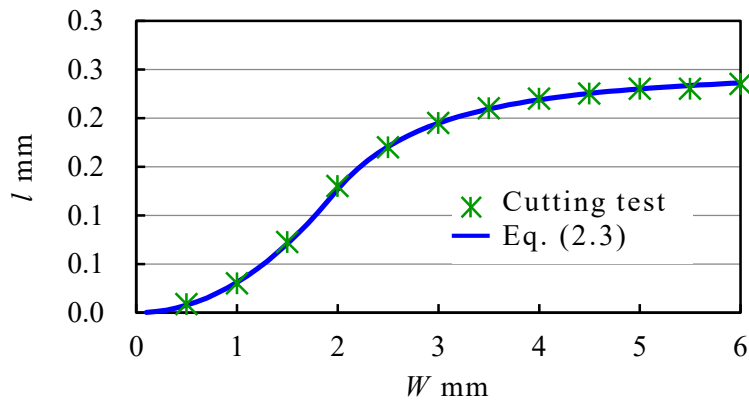
(c) $H = 1.00$ mm, $R = 6.0$ mm

Fig. 2.19 Relationships between width of motion error W and height of machining error l with various tool radius R

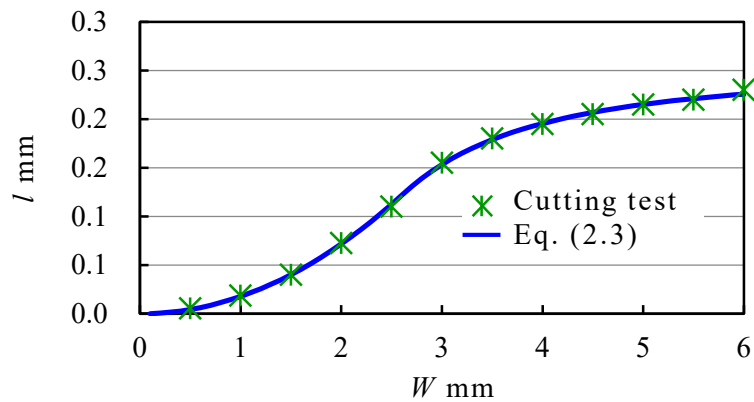
第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正



(a) $H = 0.25$ mm, $R = 1.0$ mm



(b) $H = 0.25$ mm, $R = 4.0$ mm



(c) $H = 0.25$ mm, $R = 7.0$ mm

Fig. 2.20 Relationships between width of motion error W and height of machining error l with various height of motion error H

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

2.4. 軌跡誤差の特性を活用した補正

これまで、送り軸の運動方向反転動作を含む動的精度が加工面に及ぼす影響を軽減することを目的として多くの方法^{10)~15)}が提案されているが、いずれも動的精度の影響そのものを小さくすることによって加工精度を改善する方法であり、その多くは送り軸系の数学モデルなどに基づく制御技術を用いている。しかし、テーブルや主軸に設置する工作物や工具ホルダの質量、重心位置の変化などに対し、制御モデルの再同定作業や、経年変化により実機と設定パラメータの適合性に差異が生じた場合にメンテナンス作業等が必要となる。そこで本研究では、これまでに得られた回転軸の運動方向反転により生じる軌跡誤差と加工面との間の関係に基づき、より簡便な方法で加工精度を向上できるか、実験的に検証した。

本研究により、回転軸の運動方向反転時に加工面に対して凸形状となる軌跡誤差は工具径との関係により加工面には転写されにくい特性を持っていることが確認されている。このことから、凹形状の軌跡誤差が発生する運動方向反転箇所において、工具軌跡を加工面に対し凸形状になるようにNCプログラム指令を変更することで、加工面への影響を軽減することが可能か確認した。

円柱加工面に発生した凹形状の軌跡誤差は、直進軸に対してA軸の反転動作が遅れることで発生していると考えられることから、A軸の反転直後の動作指令を本来の移動量よりも大きくすることにより、加工面に対して凸形状の軌跡誤差を発生させることとした。具体的には、A軸の反転位置である $(A, C) = (-27.0^\circ, 0.0^\circ)$ の次の指令位置が $(-27.04^\circ, 0.20^\circ)$ であるのに対し、移動量を 0.03° 大きく指令し $(-27.07^\circ, 0.20^\circ)$ へ変更した。

この移動量の変更（以後、補正と略記）を 0.03° としたのには、以下二つの理由が挙げられる。一つ目は、加工点に於いて凹形状の軌跡誤差を凸形状へ変更するのに十分な補正を、指令動作へ加える必要がある。これには、A軸への補正が加工点における軌跡の変化としてどの程度現れるのか求め、これがA軸 -27.0° の反転時に加工点で発生している $-14\ \mu\text{m}$ の凹形状の軌跡誤差を、凸形状の軌跡誤差へ変更するのに十分な大きさを有しているか確認しなければならない。そこで、補正量 0.03° に回転中心から加工点までの距離 $70\ \text{mm}$ を乗じることで、加工点におけるA軸の動作指令が直進軸に比べ約 $37\ \mu\text{m}$ 先行することがわかり、そこから凹形状の軌跡誤差 $-14\ \mu\text{m}$ を差し引くことで、 $23\ \mu\text{m}$ 程度の凸形状の軌跡誤差が発生すると予測することができる。

二つ目の理由には、このA軸の移動量を大きくしすぎると、反転動作後に一旦停止や再度の反転等を引き起こしてしまうことが挙げられる。すなわち、変更したブロックのさらに次のブロックにおけるA, C軸の指令位置が $(-27.08^\circ, 0.40^\circ)$ であり補正量を 0.03° 以上にすると、このブロックの指令位置を追い越す移動量

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

となり、一旦停止や再度の反転が起こる。

補正後の運動軌跡を今回提案した測定方法により確認した結果を図2.21に示す。図から、加工面に対して高さ約20 μm の凸形状の軌跡誤差を確認でき、予想された補正量（約23 μm ）を満たす補正動作がA軸の指令動作により可能であることが分かる。この軌跡誤差（高さ H ：20 μm 、幅 W ：0.126 mm）と工具径16 mmから、式(2.3)により加工面に発生する凸形状の加工誤差の高さは約0.3 μm となる。求められたこの結果が、実際に加工結果と一致するか提案した加工実験を行った。実加工試験の結果を図2.22に示す。図からわかるように、図2.16(b)で確認された加工面に生じた凹形状の加工誤差はなくなり、補正により生じさせた凸形状の軌跡誤差も加工面に表れていないことが確認できる。ここで、補正後の加工結果である図2.22は補正前の図2.16に比べ形状全体が変化しているが、そのことの原因を明らかにするには至っていない。

以上の結果から、加工面に対して凸形状となる軌跡誤差を故意に生じさせることで、本研究により明らかとなった、凸形状の軌跡誤差、工具径と加工面との関係により加工精度を改善できることがわかる。

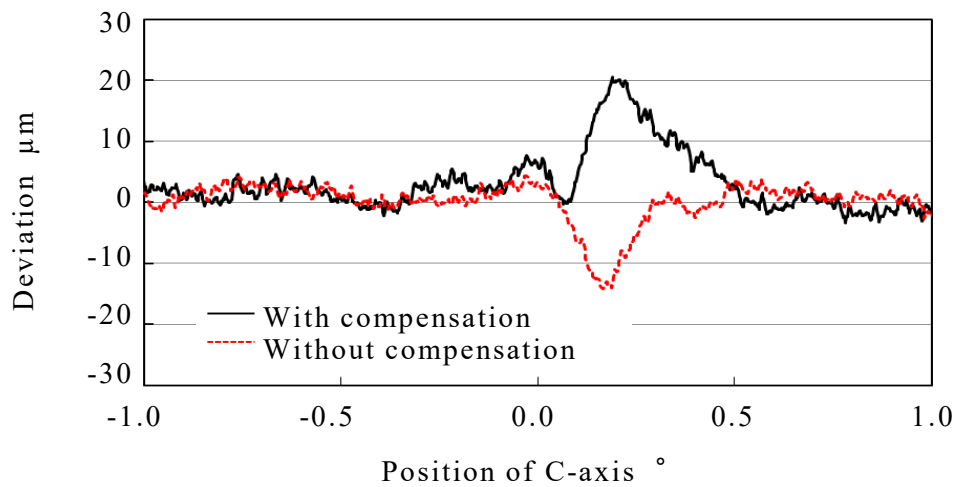


Fig. 2.21 A measurement result of the compensated motion errors at $\theta_A = -27.0^\circ$

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける
回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

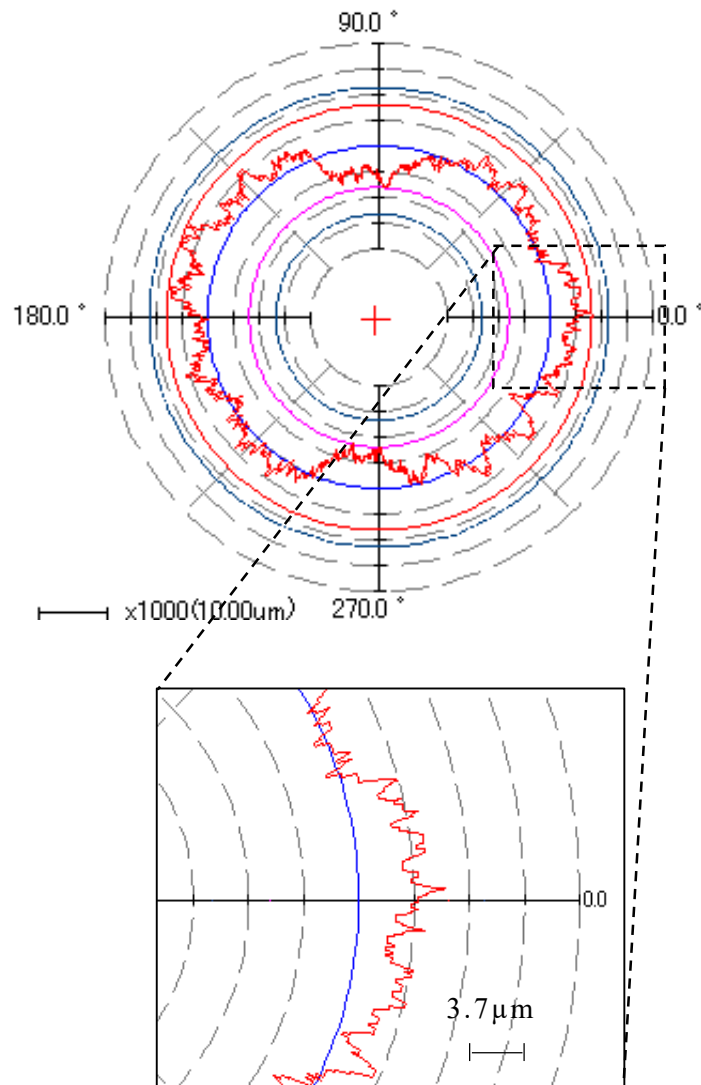


Fig. 2.22 Cylindrical machining with compensation at $\theta_A = -27.0^\circ$

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

2.5. 結 言

本研究では、回転軸の運動方向反転時の挙動を評価するための測定方法および加工試験方法を提案し、その有効性を検証するために、3つのレーザ変位計と基準球とからなる測定装置を開発して実際に測定実験を行うとともに、実加工試験を行って加工結果と測定結果の違いについて考察した。さらに、その結果に基づいた補正方法を提案し、その有効性を実加工試験により検証した。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

- (1) 2つの回転軸を組み合わせて動作させることで、回転軸の運動方向反転時の挙動を直進軸のそれと分けて測定できる。
- (2) 提案した測定方法と同じ運動でボールエンドミル加工を行うと、回転軸の運動方向反転時の挙動が加工面に転写され、加工結果から回転軸の運動方向反転時の挙動を評価できる。
- (3) 測定結果と同様の運動で加工を行うと、回転軸の接線方向の動的精度と加工面との位置関係により測定結果とは異なる形状が得られる。
- (4) 加工面に対して凸形状となる軌跡誤差は、工具径との関係により加工面には転写されにくい。
- (5) 凸形状の軌跡誤差がもつ上記特性を用いることで、軌跡誤差が加工面に及ぼす影響を軽減することが可能である。

実際の同時5軸加工における加工面不良に関しても、本研究で判明した要因が大きく関与していると考えられる。本研究で提案した方法により、運動方向反転時における送り駆動系の運動特性による加工誤差の軽減が期待されるが、これに必要な補正量を求めるには、工具経路、工具径、工具と被削材の位置関係、被削材の形状といった、様々な情報を必要としており、現在NC装置に引き渡されている情報だけでこれを求めることができない。このことから今後、NC装置とCADやCAMといった周辺機器との情報共有についても、継続した調査と研究を進める予定である。

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

参考文献

- 1)NAS979 Uniform Cutting Tests - NAS series, Metal Cutting Equipment Specifications, (1969).
- 2)S. Weikert and W. Knapp: R-test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools, Annals of the CIRP, Vol.53, No.1 (2004) pp.429-432.
- 3)C. Hong, S. Ibaraki and A. Matsubara: Influence of Position-dependent Geometric Errors of Rotary Axes on a Machining Test of the Cone Frustum by Five-axis Machine Tools, Precision Engineering, Vol.35, No.1 (2011) pp.1-11.
- 4)太田祐輔, 茨木創一, 5軸制御工作機械の旋回軸が反転する際の動的誤差の評価, 日本機械学会 2011 年度年次大会.
- 5)R. Sato and M. Tsutsumi: Motion Control Techniques for Synchronous Motions of Translational and Rotary Axes, Proceedings of the 5th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Vol.1 (2012) pp.265-270.
- 6)M. Yamaji, N. Hamabata and Y. Ihara: Design of Motion Accuracy Measurement Device with Three Displacement Sensors for Machine Tool and Comparison of Its Setting Method, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, Vol.8, No.4 (2014) No.14-00094.
- 7)ISO/DIS10791-6:2014 Machine Tools—Test conditions for machining centers—Part6: Accuracy of speeds and interpolations, (2014).
- 8)IBS Precision Engineering: <http://www.ibspe.com>.
- 9)垣野義昭, 井原之敏, 篠原章翁: DBB 法によるNC 工作機械の精度評価法, リアライズ社, (1990).
- 10) 長島一男, 勝木雅英, 河上邦治: NC工作機械の象限切替え突起量の理論解析と入力適応系による補正, 日本機械学会論文集(C編), Vol.66, No.648 (2000) pp.2877-2883.
- 11) 杉江弘, 岩崎隆至, 中川秀夫, 幸田盛堂: 工作機械における漸増型ロスモーションのモデル化と補償, システム制御情報学会論文誌, Vol.14, No.3 (2001) pp.117-123.

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

- 12) 佐藤隆太, 横堀祐也, 堤正臣: 5軸制御マシニングセンタにおける直進軸と回転軸の動的同期精度, 精密工学会, Vol.72, No.1 (2006) pp.73-78.
- 13) 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.
- 14) 佐藤隆太, 井出裕, 堤正臣: 多軸同期制御精度向上のための送り駆動系の制御系設計方法, 日本機械学会論文集(C編), Vol.73, No.727 (2007) pp.693-700.
- 15) 佐藤隆太, 寺島義道, 堤正臣: 微小変位領域の摩擦特性を考慮した象限突起補償器, 精密工学会誌, Vol.74, No.6 (2008) pp.622-626.
- 16) 株式会社エグロ: <http://www.eguro.co.jp/>.
- 17) レニショー株式会社: <http://www.renishaw.jp/>.
- 18) Fidia S.P.A: <http://www.fidia.it>.
- 19) C. Hong and S. Ibaraki: Non-contact R-test with Laser Displacement Sensors for Error Calibration of Five-axis Machine Tools, Precision Engineering, Vol.37, No.1 (2013), pp.159-171.
- 20) 株式会社キーエンス: <https://www.keyence.co.jp/>.
- 21) 加藤教之, 堤正臣, 土橋祐, 弓座大輔, 崔成日, 井原之敏: 同時5軸制御による円すい台仕上げ加工試験用NCデータの解析, 日本機械学会論文集(C編), Vol.77, No.780 (2011) pp.3149-3160.
- 22) 加藤教之, 堤正臣, 土橋祐, 佐藤隆太, 弓座大輔, 崔成日, 井原之敏: 円すい台加工を模擬した5軸制御マシニングセンタの3次元円弧補間運動軌跡の解析, 日本機械学会論文集(C編), Vol.78, No.787 (2012) pp.964-975.

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

第3章

5軸制御マシニングセンタにおける

回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

3.1. 諸言

前章では、主に5軸制御マシニングセンタの運動方向反転動作に伴う運動方向の運動精度に起因する加工誤差について論じたが、これ以外にも、回転軸には、例えば回転軸中心の傾きや位置の変位といった誤差が存在する。そして、これらの誤差による影響は、直進軸または回転軸単体での運動精度を向上するだけでは改善できず、一般的な改善方法としては、組立て精度を向上させる方法が挙げられる。しかし、回転軸ユニットの組立て精度を厳密に調整することは容易ではなく、この精度を高めるためには、加工、擦り合わせ、組み付け、計測といった組立作業を必要精度に収まるまで繰り返し作業せねばならず、製造コスト増大や最終製品の精度に影響を及ぼしている。

これらのことから、5軸制御マシニングセンタの加工精度を向上させるために、各誤差要素を分類して評価する方法やその評価結果を用いた補正方法がこれまでに数多く提案されている^{1)~7)}。例えば、坂本ら¹⁾は、ボールバーを用いた直進軸と回転軸による同期動作の測定結果から組立て精度の影響を明らかにしている。茨木ら⁴⁾は、凸型形状の加工実験の結果より機械の誤差要因を評価する方法を提案している。また評価方法以外にも、回転軸の幾何誤差に対し、誤差発生方向に動作可能な送り軸によって補正を行う方法が提案されており⁷⁾、既にこの機能を実装したCNC装置も開発されている。この機能では、回転軸の幾何誤差を空間精度として内蔵し、これらのデータと各軸の指令位置、工具先端位置までの距離から補正データを算出し、直進軸により補正を行っている。しかし、これらは各送り軸間に存在する静的な幾何誤差を対象とした測定および補正方法であり、運動方向反転時に生じるような動的精度に対するものではない。

回転軸の運動特性に着目した研究例^{8)~18)}として、佐藤ら¹⁰⁾は、直進軸と回転軸の同期精度が加工精度へ及ぼす影響と、同期精度の向上するための方法を提案している。また、西尾ら¹⁶⁾は、円すい台加工による回転軸の運動方向反転時の挙動の評価方法について検討している。しかし、回転軸の運動方向反転動作に伴う軸方向変位に着目し、その補正方法までを検討した研究例は見当たらなかった。

本章では、この回転軸の運動方向反転に伴う軸方向変位に着目し、その挙動を評価するための測定方法と、軸方向変位が加工面にどのような影響を及ぼすのか

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

評価するための加工試験を提案する。さらに、加工精度を向上させるため、回転軸の軸方向変位の測定結果に基づいて、直進軸を用いてこれら加工誤差を補正する方法についても検討し、実験によりその有効性を検証したので報告する。

3.2 節では、測定対象である A 軸の運動方向反転時の回転軸中心方向への変位を評価する方法として、テーブル上に測定対象、主軸側に渦電流式変位計を設置し、A 軸を往復動作させた際に発生する変位を測定する方法を提案するとともに、その実験結果について述べる。3.3 節では、3.2 節で測定した A 軸の軸方向変位が加工面へどのような影響を及ぼすか調査する方法として、A 軸の往復動作中に直進軸またはもう一方の回転軸である C 軸を同期運動させる加工実験方法を提案するとともに、その実験結果について述べる。3.4 節では 3.2 節の測定結果をもとに、回転軸中心方向へ動作可能な X 軸による補正方法を検討し、さらに提案した方法により加工誤差を削減できることを、3.3 節で提案した加工実験方法により確認した結果について述べる。

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

3.2. 軸方向変位の測定方法

3.2.1. 測定対象

第2章と同じ、株式会社エグロ製 E-32V を用いて測定実験と加工実験を行った。また、2つの回転軸のうち傾斜軸である A 軸を測定対象にすることとした。これは第2章と同様に、A 軸はストローク制限により必然的に運動方向の反転が生じやすいためである。本研究で用いる 5 軸制御マシニングセンタの A 軸は、**図 3.1** に示すようにウォームギヤ駆動であり、ウォームホイールは可動範囲である 90°の範囲のみが歯切りされたものとなっている。ウォームギヤでは、ウォームとウォームホイールの歯面間の摩擦により A 軸の軸方向力が生じ、軸方向変位が生じると考えられる。

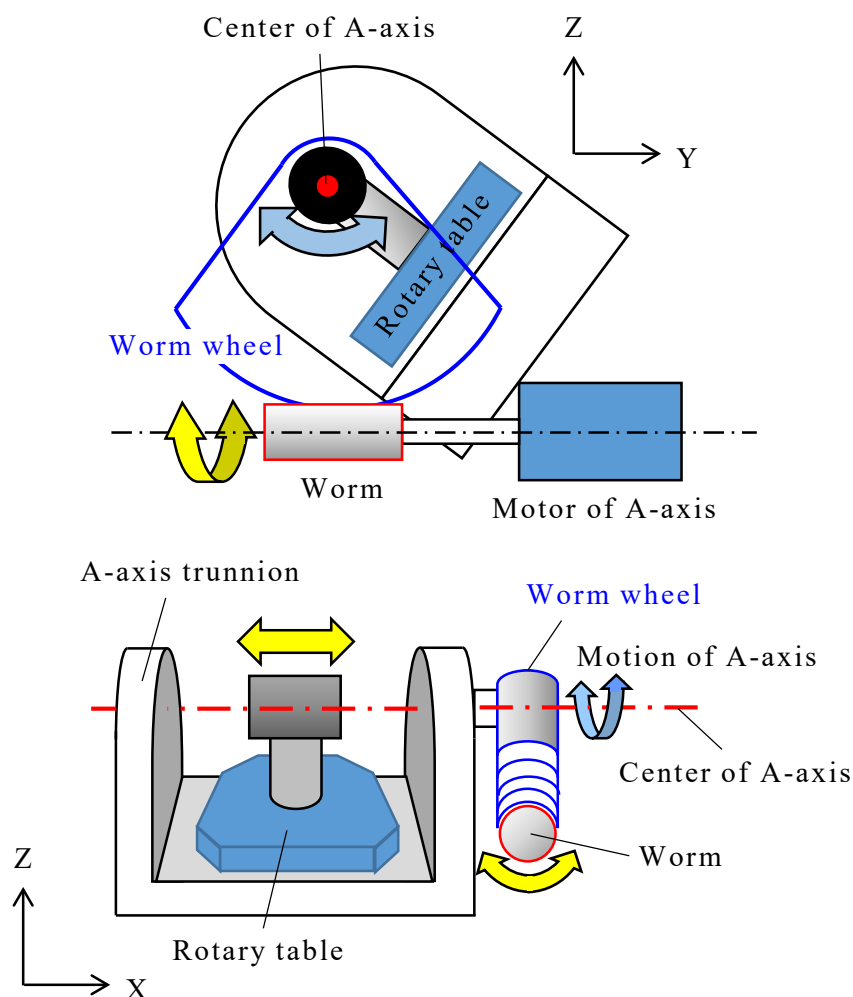


Fig. 3.1 Worm gear drive of A-axis

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

3.2.2. 測定方法

本研究では、A軸の運動方向反転に伴う軸方向変位の測定方法として、A軸単軸での往復動作を行わせ、そのときの主軸-テーブル間の相対変位を、主軸に取り付けた変位センサで測定する方法を提案する。測定動作はA軸のみによる往復運動とし、 $-30^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 、 $-15^{\circ} \sim -45^{\circ}$ 、 $-45^{\circ} \sim -75^{\circ}$ 、および $-60^{\circ} \sim -90^{\circ}$ の4通りの動作範囲で、A軸の送り速度を $200^{\circ}/\text{min}$ の等速運動として行う。往復運動 $-30^{\circ} \sim 0^{\circ}$ の場合のA軸動作を図3.2に示す。回転軸を動作させた際に運動の半径方向や接線方向の変位が生じた場合にもその影響を受けずに軸方向変位を測定できるよう、直径 20 mm 、測定面の表面粗さ $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の金属製の円柱端面を測定対象とした。

変位センサには、測定対象である円柱の表面までの距離を直接測定可能で、運動方向反転時の動的精度を捉えることができ、さらに数マイクロメートルと予想される回転軸の軸方向変位を測定するために必要な精度を有していることが要求される。また上記条件に加え、使用した5軸制御マシニングセンタに設置可能な小形サイズで、比較的安価であることも考慮した結果、変位センサには株式会社キーエンス製の渦電流式変位センサ (EX-008) を採用することとした。

図3.3に示すように、A軸回転中心線方向であるX軸方向の変位を測定するように測定対象と変位センサを設置する。テーブル回転時に発生するケーブルの干渉を避け、またA軸の運動時の振動が変位センサに影響を及ぼすことを避けるため、変位センサを主軸側、円柱の測定対象をテーブル側に配置した。その際、測定対象の中心とA軸の回転中心線を一致させ、端面がA軸の回転中心線と直角になるようにテーブル上に設置した。また変位センサも、その中心とA軸の回転中心線とが概ね一致するように設置した。

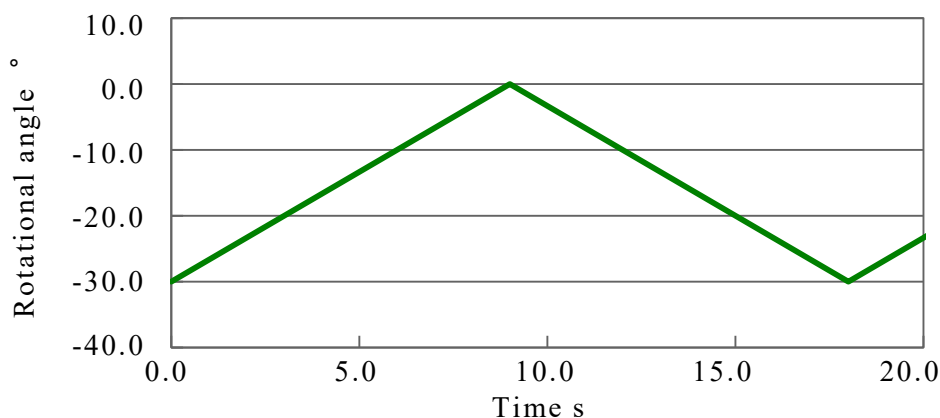


Fig. 3.2 A-axis motion in measurement test ($-30.0^{\circ} \Leftrightarrow 0.0^{\circ}$)

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

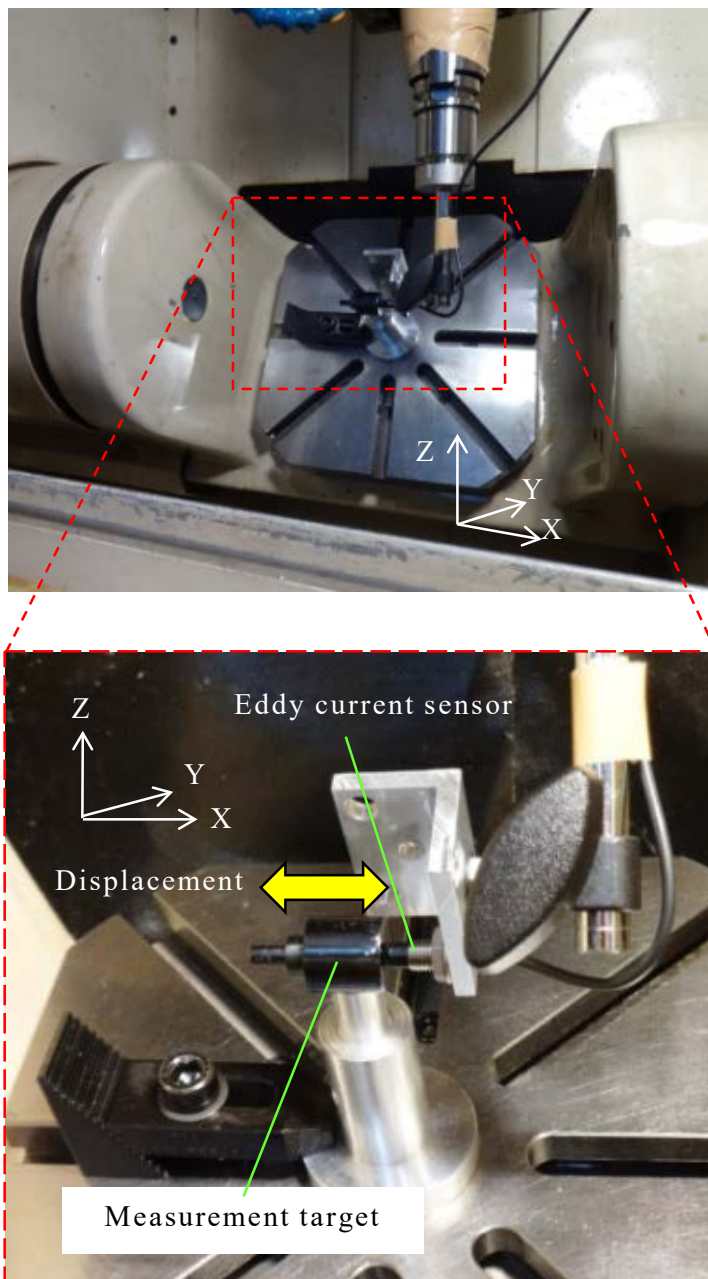


Fig. 3.3 Measurement system for axial displacement

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

3.2.3. 測定結果

軸方向変位の測定結果を図 3.4 に示す。図 3.4 によると、いずれの動作範囲における結果においても、方向反転時に 4~9 μm の軸方向変位がみられる。この変位は、A 軸が+方向から-方向へ反転する場合は-方向、-方向から+方向へ反転する場合は+方向に発生しており、反転位置や反転前の変位の方向には影響されずに反転方向のみによって変位の方向が決まっている。

また、図 3.4 のいずれの動作範囲における測定結果においても、反転動作後の一方向送り中に軸方向変位が徐々に変化し続けている。これが変位センサのドリフトに起因ものかを確認するため、A 軸回転の 6°ごとに 5 秒間の一時停止指令を挿入し、停止中の変位を確認した結果、停止中に軸方向変位の変化は発生しなかったほか、ダイヤルインジケータによる測定も行った結果同様の変位が測定されたため、測定結果にみられる変位の変化は A 軸の回転に起因するものと考えられる。

この軸方向変位の変化の特性を調査するため、移動量を変更して測定を行った結果を図 3.5 に示す。図 3.5 によると、同一箇所における反転動作と同一方向への動作における軸方向変位の変化は、移動量の変化の影響を受けないことがわかった。さらに、送り速度を 200°/min, 1000°/min, 2000°/min と変化させて軸方向変位を確認したが、いずれの送り速度においてもほぼ同じ挙動となることがわかった。

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

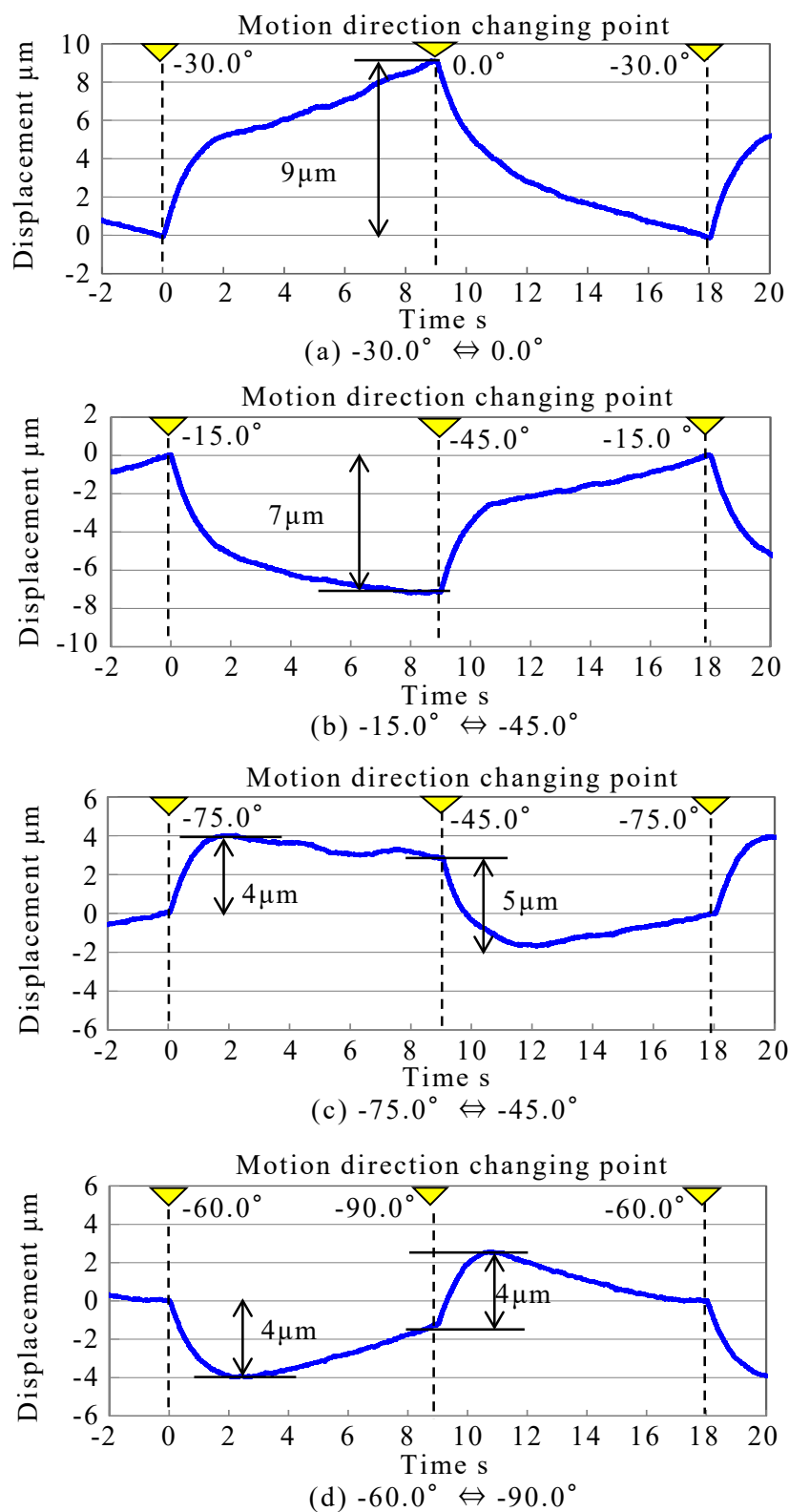


Fig. 3.4 Measurement results of axial displacement

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

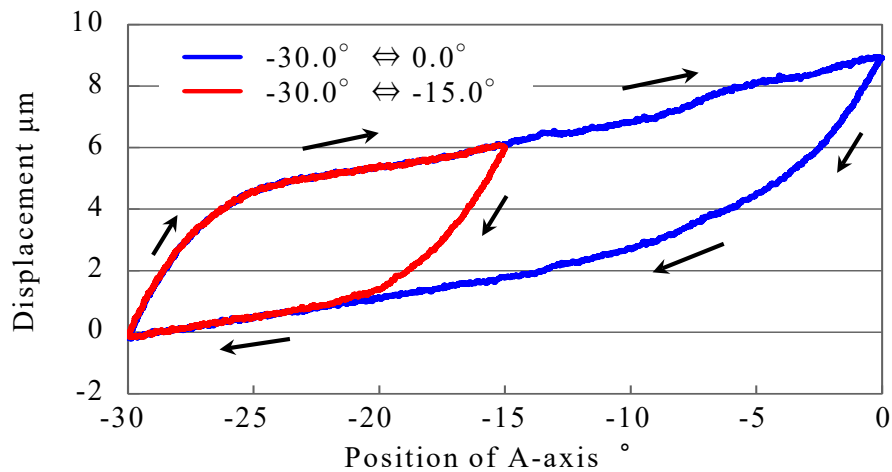


Fig. 3.5 Measurement results of each A-axis motion ranges
(A-axis : $-30.0^{\circ} \Leftrightarrow 0.0^{\circ}$, $-30.0^{\circ} \Leftrightarrow -15.0^{\circ}$)

3.3. 実加工試験

第2章で示したように、加工面と工具経路の関係について加工面の幾何形状と工具経路は必ずしも一致するわけではなく、加工面に対して凸状の軌跡誤差によって生成される加工誤差の高さは、工具径との関係により工具経路に比べ非常に小さくなる特性を有していることがわかっている。そこで、A軸の運動方向反転時に生じる軸方向変位が加工面にどのような影響を及ぼすかを評価するため、A軸の往復動作を伴う加工試験を行う。A軸のみの往復動作では往路と復路の加工面が重なってしまい、評価可能な加工面を得ることができないため、何れかの軸との同期運動による加工が必要となる。そこで本研究では、A軸と直進軸または残りの回転軸であるC軸との同期運動による加工を行った。また、加工面形状の測定において、表面粗さ計や真円度測定装置といった一般的に普及している測定装置を用いることを可能にするため、平面や円柱形状といった加工面を生成するための加工方法を検討した。

3.3.1. 直進軸との同期運動による平面加工

A軸の反転動作を伴う平面加工を行い、表面粗さ計を用いてその加工面を評価するため、A軸とその中心線と直角に交差する直進軸（Y軸）を用いた同期運動により、スクエアエンドミルの外周を用いて平面加工を行う方法を提案する。これは、図3.6に模式的に示すように、A軸を往復運動させる間に、スクエアエンドミル先端がA軸中心を通過するように直進軸を動かすことで可能となる。しかし、直進1軸による運動を行うと加工面がS字状になり、表面粗さ計で測定したときに工具の異なる位置で加工した加工面を跨ぎながら測定することになる

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

ため、工具の半径精度が測定結果に影響を及ぼしてしまう。そこで、**図 3.7**に示すように直進 2 軸 (Y, Z 軸) の同期運動により曲線補間運動を行うことで工作物上での工具の運動軌跡が直線になるようにした。このときの各軸の運動を**図 3.8**に示す。

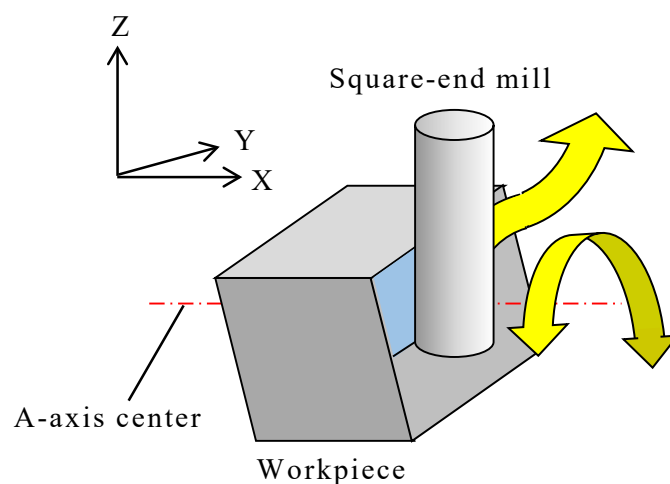


Fig. 3.6 Flat surface machining test

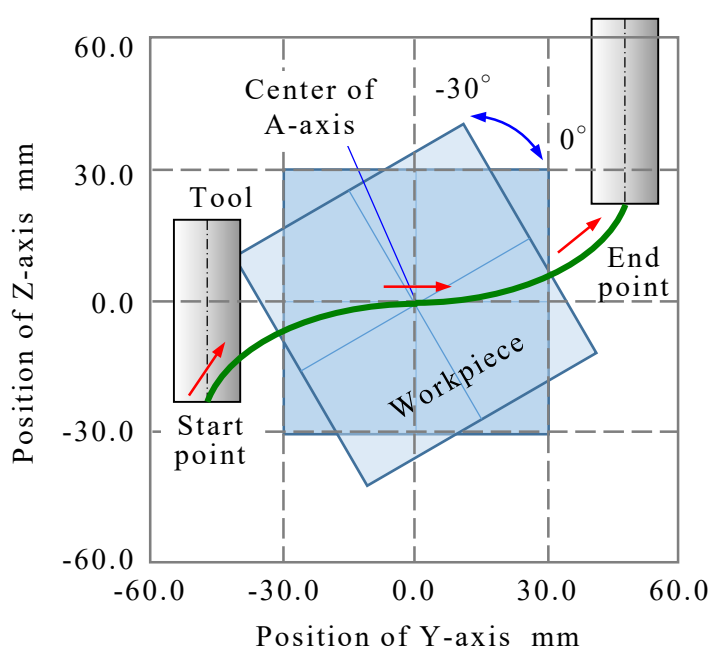


Fig. 3.7 Y-, Z-axis motion trajectory of A-, Y-, Z-axis simultaneous motion ($-30.0 \Rightarrow 0.0 \Rightarrow -30.0^\circ$)

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

提案した方法により加工した平面を表面粗さ測定機（榊ミツトヨ製 SV-2100）で測定した結果と、前節で測定した軸方向変位の測定結果を図 3.9 に、加工試験を行ったときの加工条件を表 3.1 に示す。このとき、図 3.9 では A 軸の運動方向反転後の測定結果と加工結果を比較するため、反転前のそれぞれの結果を図の横軸と一致するように表示させ、反転後 10°までの動作を比較している。図 3.9 によると、A 軸の運動方向反転位置を変えると反転時に生じる軸方向変位の大きさが異なることがわかる。これは、アンバランス質量が何らかの影響を及ぼしていると考えられるが、原因を明らかにするには至っていない。しかし全ての結果において、軸方向変位の測定結果と加工結果とが細かい変動を除く段差状の誤差の傾向において一致しており、提案した加工方法では、A 軸の運動方向反転時に生じる軸方向変位が加工面に転写されていることがわかる。

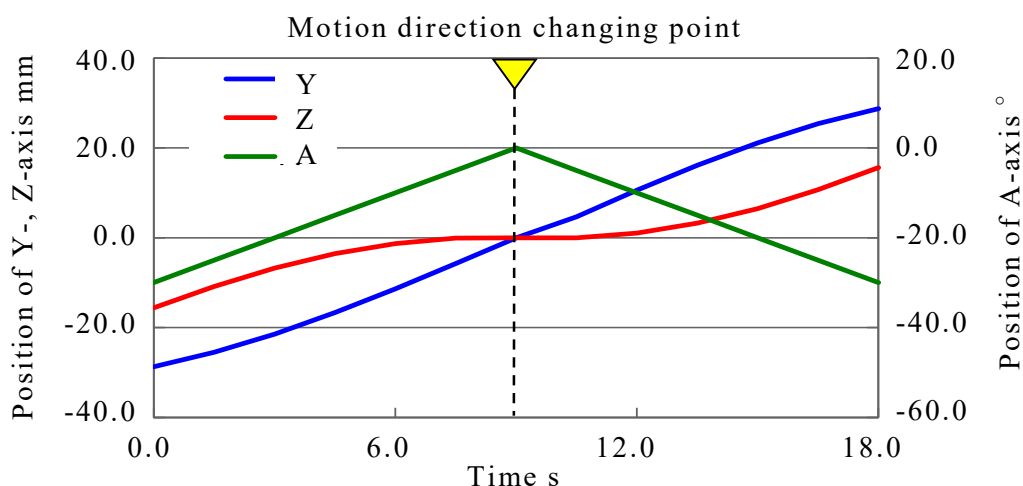


Fig. 3.8 Y-, Z-, A-axis motion of flat surface machining test
(A-axis : $-30.0 \Rightarrow 0.0 \Rightarrow -30.0^\circ$)

Table 3.1 Cutting condition for flat machining

Tool	Type	Square-end mill
	Number of flutes	2
	Diameter	16 mm
Workpiece	Material	AL6063-T5
	Form	Cuboid
	Size of surface	30 × 30 mm
Machining condition	Feed rate of A-axis	200°/min
	Depth of cut	0.2 mm
	Spindle speed	10000 rpm

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

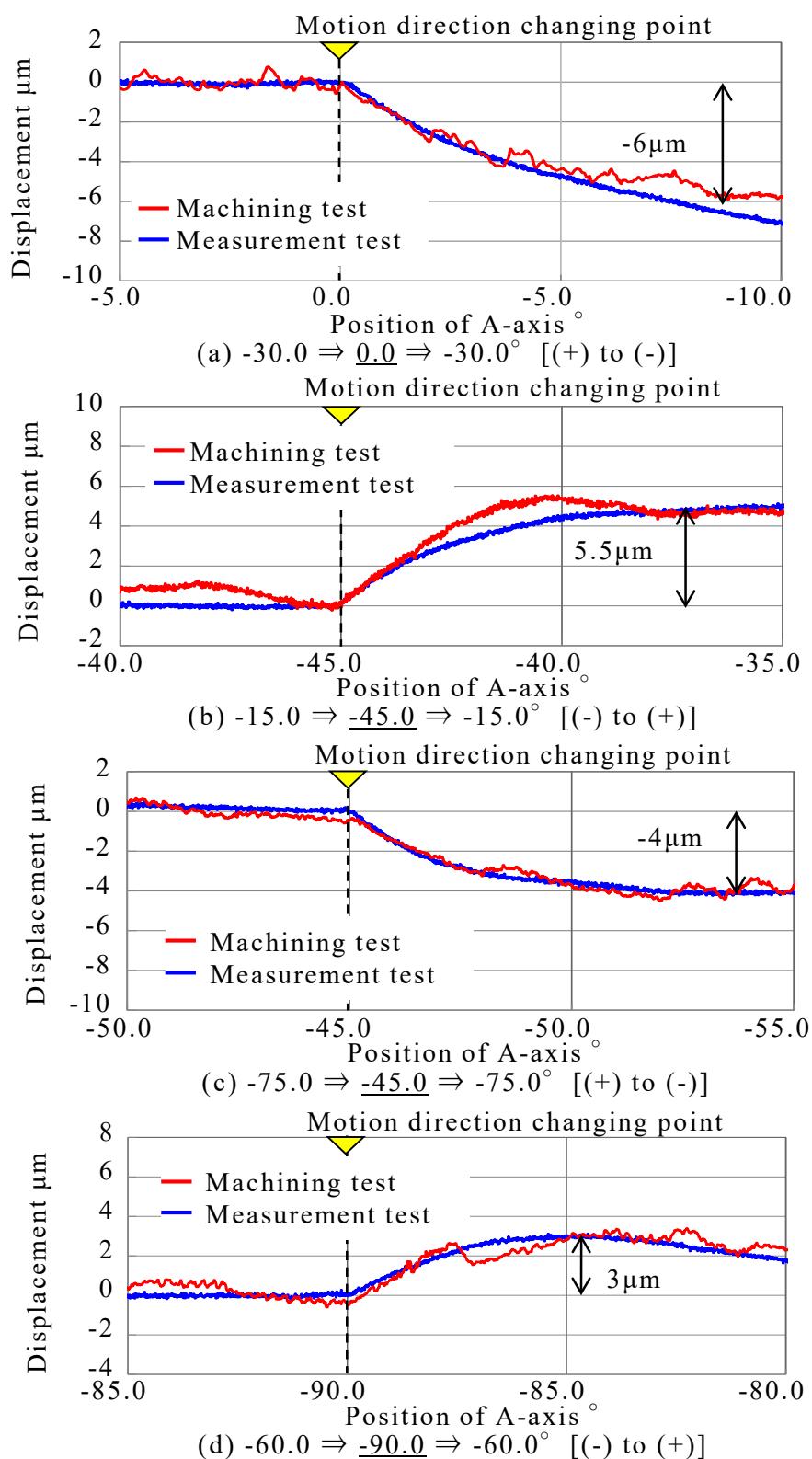


Fig. 3.9 Comparison of machined surface of flat surface machining test

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

3.3.2. 回転軸との同期運動による円柱加工

測定対象である A 軸と、もう一つの回転軸である C 軸による同期運動を用いた円柱加工を行う。図 3.10 に示すように、C 軸中心に加工対象である円柱状のワークを設置し、A 軸の回転中心線上にボールエンドミル先端球の中心がくるように位置決めする。そして、図 3.11 に示すように、A 軸を往復動作させる間に C 軸を一回転させワーク外周を加工すると、A 軸の軸方向変位が加工面に転写されることになる。加工後の円柱の形状は真円度測定機により測定が可能である。ここでの加工条件を表 3.2 に示す。

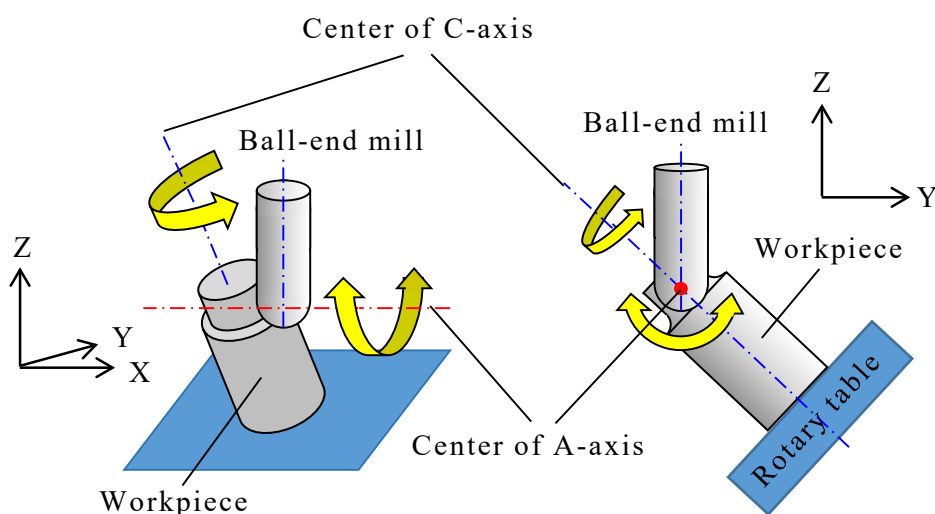


Fig. 3.10 Circular machining test

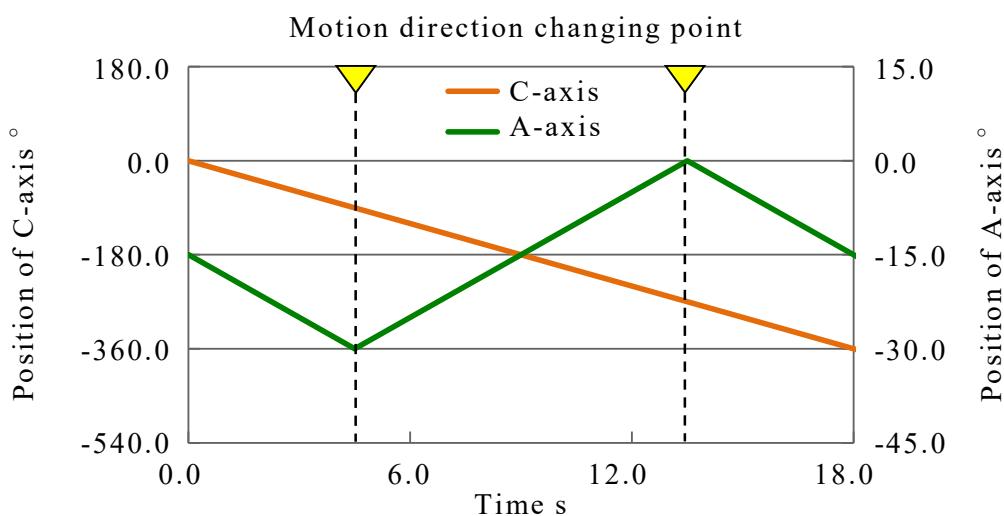


Fig. 3.11 A-, C-axis motion of circular machining test
(A-axis : $0.0^{\circ} \Leftrightarrow -30.0^{\circ}$)

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

加工した円柱を真円度測定機（株式会社ミツトヨ製 RA-114）で測定した結果を図 3.12 に、変位センサによる A 軸の軸方向変位の測定結果を図 3.13 に示す。この際、図 3.12 に示す加工開始位置は、A 軸反転動作時の加工結果に影響しないよう、2 箇所反転動作の間とした。また、図 3.13 に示す変位センサによる測定結果は、図 3.4 に示した測定結果を図 3.12 の円柱の加工結果と比較しやすいように、加工結果と同様に最小二乗法により求められた基準円との偏差を極座標表示したものである。測定結果の極座標表示方法に関する詳細は本節の最後で説明する。図 3.12 によると、A 軸の運動方向反転時において、一方向から+方向送りへの反転箇所では 3~5 μm の段差状の軌跡誤差が発生し、これは+方向から一方向送りへのつぎの方向反転まで続いている。さらに、図 3.13 の軸方向変位の測定結果を極座標表示した結果においても同様の軌跡誤差が発生しており、このことから、A 軸の軸方向変位が加工面に転写されていることがわかる。

以上のことから、ウォームギヤ駆動の回転軸の運動方向反転時には軸方向変位が生じる場合があり、その軸方向変位は加工結果に影響を及ぼしているといえる。また、本研究で提案した評価対象の回転軸とほかの直進軸または回転軸の同期運動による加工方法により、回転軸の軸方向変位による影響を的確に評価できるといえる。

Table 3.2 Cutting condition for circular machining

Tool	Type	Ball-end mill
	Number of flutes	2
	Diameter	12 mm
Workpiece	Material	AL5056-H34
	Form	Cylinder
	Diameter	25 mm
Machining condition	Feed rate of A-axis	200°/min
	Depth of cut	0.2 mm
	Spindle speed	10000 rpm

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

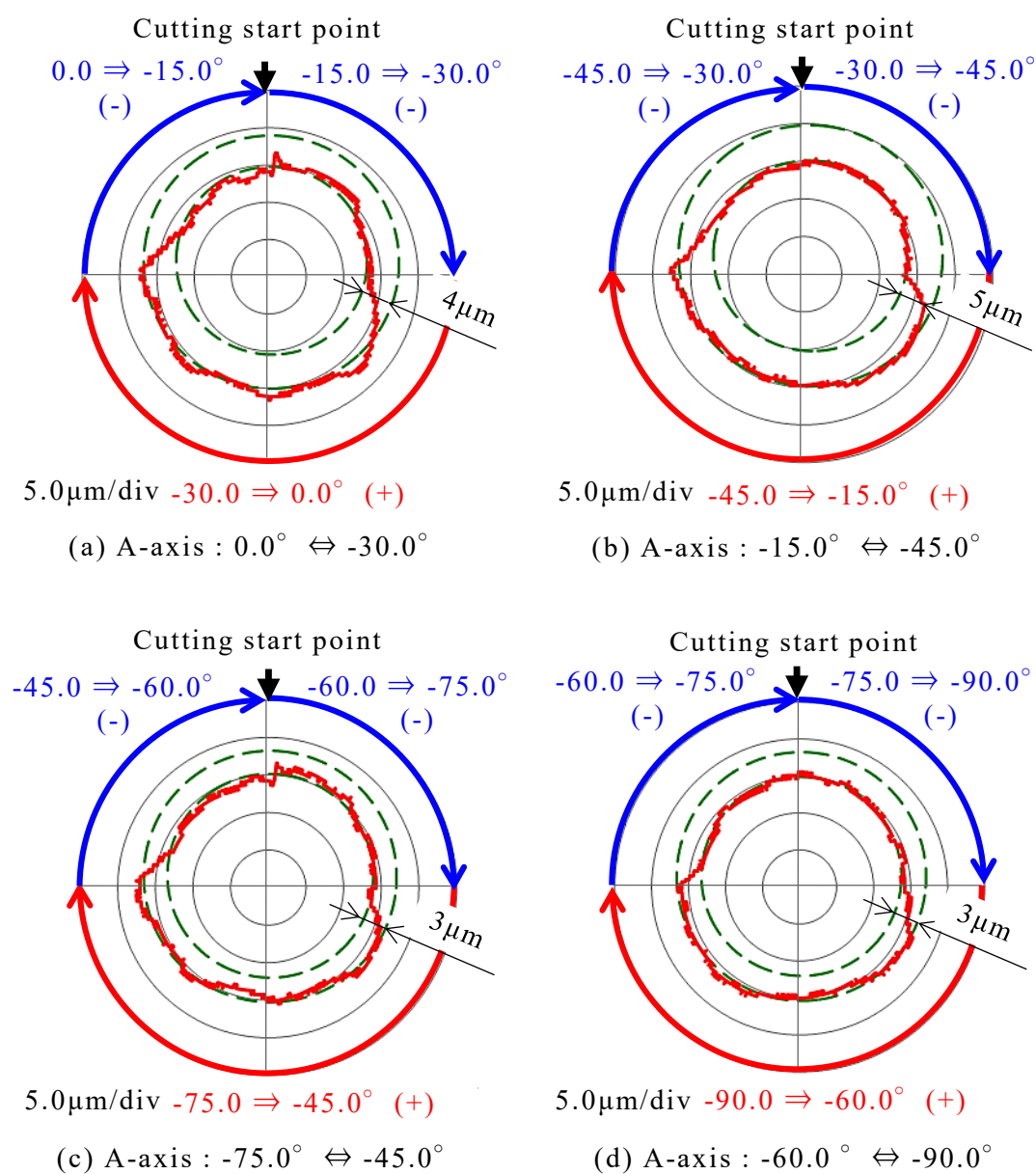


Fig. 3.12 Comparison of machined results by circular machining test without compensation

第 3 章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

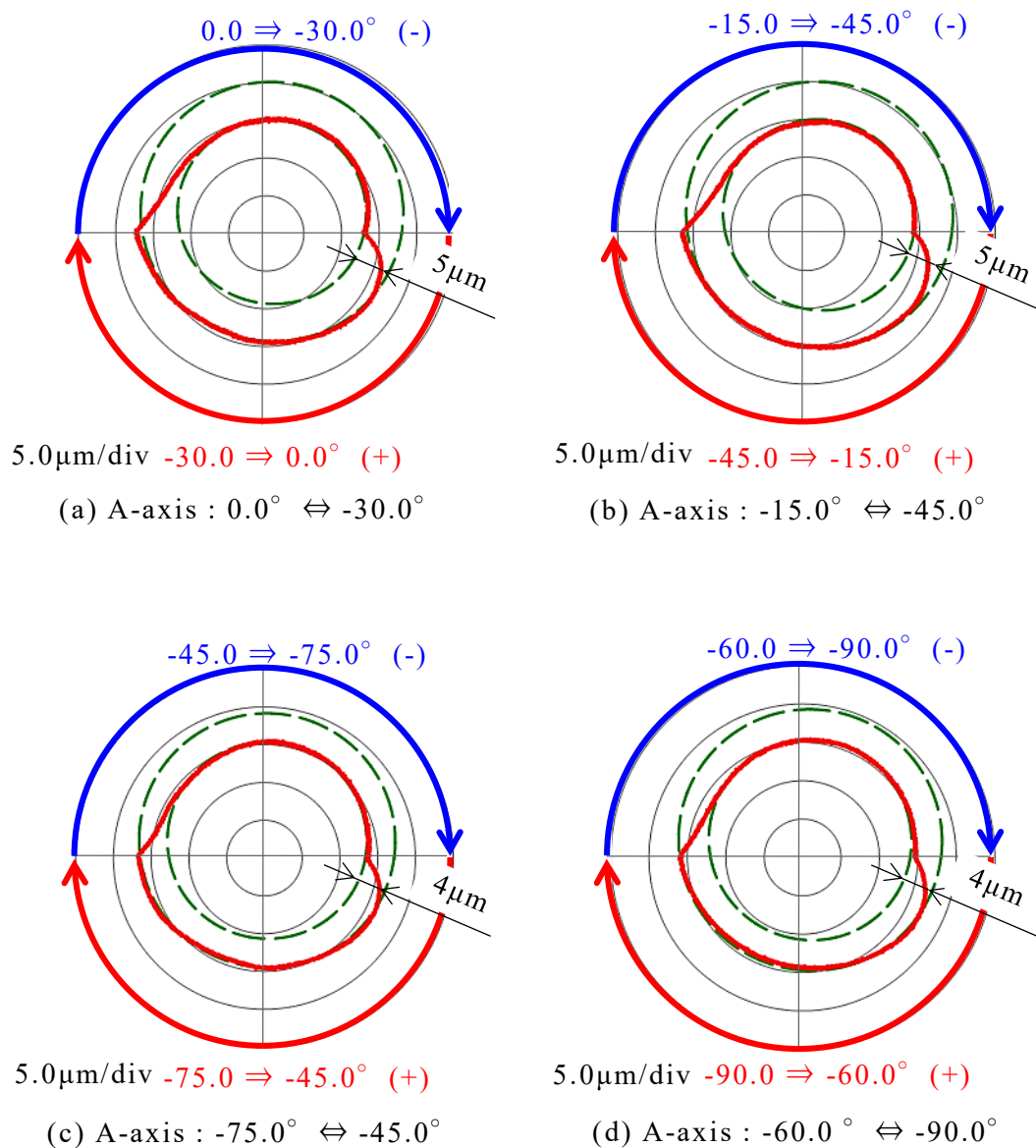


Fig. 3.13 Comparison of measured displacement without compensation by polar plot

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

ここでは、上記の測定結果の極座標表示方法について説明するとともに、**図 3.4** の測定結果が A 軸の動作範囲ごとに大きく異なる結果となっているのに比べ、**図 3.13** のように極座標表示すると **図 3.4** ほど大きな違いが観られない点について、測定結果の極座標表示方法の説明を通して解説する。

本実験で行った極座標表示の処理方法について、A 軸を $-30^\circ \sim 0^\circ$ 往復運動させた際の測定結果である **図 3.4(a)** を例に説明する。はじめに、加工した円柱の測定結果の表示方法(LSC 最小二乗中心法)と同様に、**図 3.14(a)** に示すように、この測定結果に対し最小二乗法により三角関数により表された式(3.1)を用いて近似する。そして、その近似式と測定結果との差分を求める。

$$y = A \cos(\theta_c + \alpha) + Y_c \quad (3.1)$$

y : 回転軸の軸方向変位であり **図 3.14(a),(b)** における縦軸座標

θ_c : C 軸動作であり **図 3.14(a),(b)** における横軸座標

Y_c : 近似式の縦軸方向の偏差

α : 近似式の横軸方向の位相差

A : 近似式の振幅

上記の処理を施した測定結果に対し、A 軸の+送りと-送りの軸方向変位の違いを判別しやすくするため、各反転動作における急峻な変化が終了した部分から次の反転開始までの範囲を、+送り側 C 軸: $45^\circ \sim 180^\circ$ 、-送り側 C 軸: $225^\circ \sim 360^\circ$ に区切り、それぞれに対し上記と同様の最小二乗法による近似による結果が **図 3.14(b)** となる。この際、各範囲の近似式は、位相が同じになるようにした。そして、これら処理を施した結果に対し、 θ_c を偏角として極座標表示したものが **図 3.14(c)** となる。

その他の A 軸動作範囲の測定結果である **図 3.4(b)~(d)** に対し、上記の処理を施した結果を **図 3.15** に示す。これから分かるように、いずれの動作範囲の測定結果も近似曲線との差分処理をして描画することでよく似た波形となることから、極座標表示した結果でも類似の波形が得られる。この極座標表示した測定結果と比較するため、**図 3.12** の円柱加工結果も同様の処理を施した上で表示している。

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

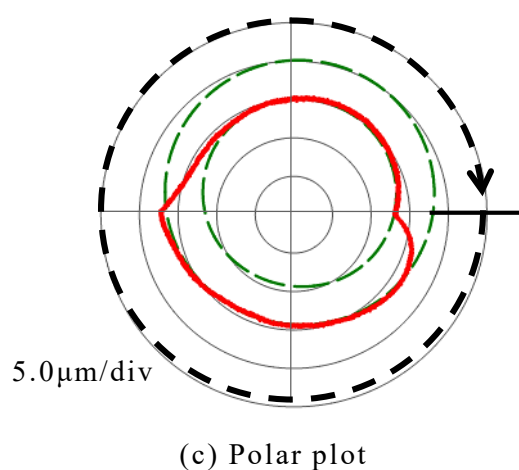
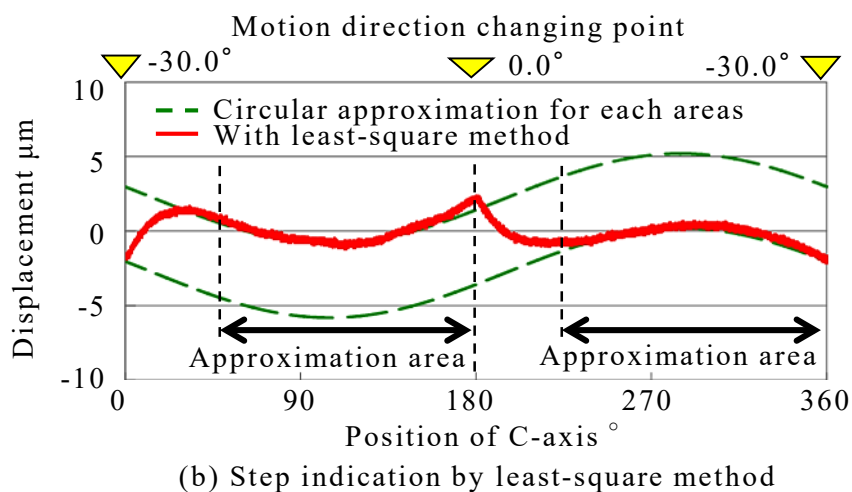
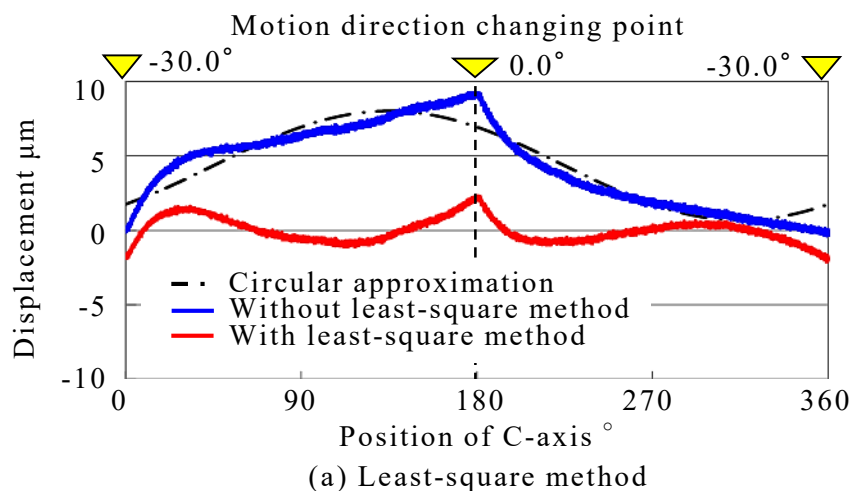


Fig. 3.14 Drawing method for measurement results
(A-axis : $0.0^\circ \Leftrightarrow -30.0^\circ$)

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

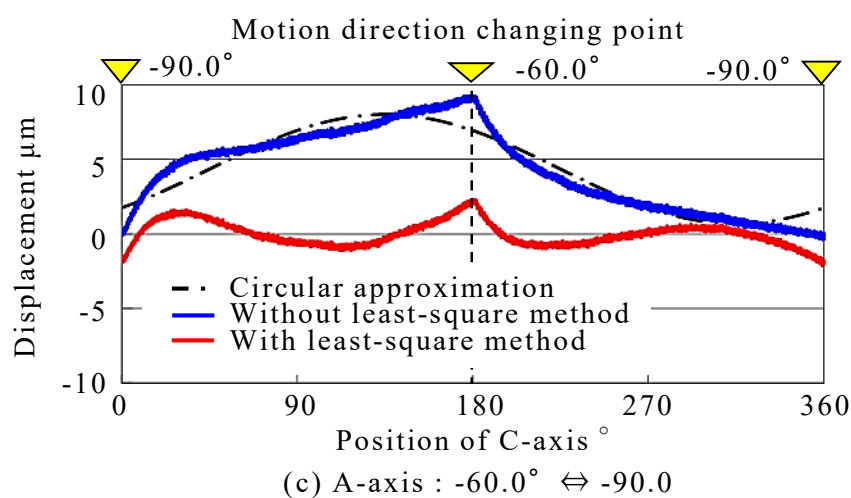
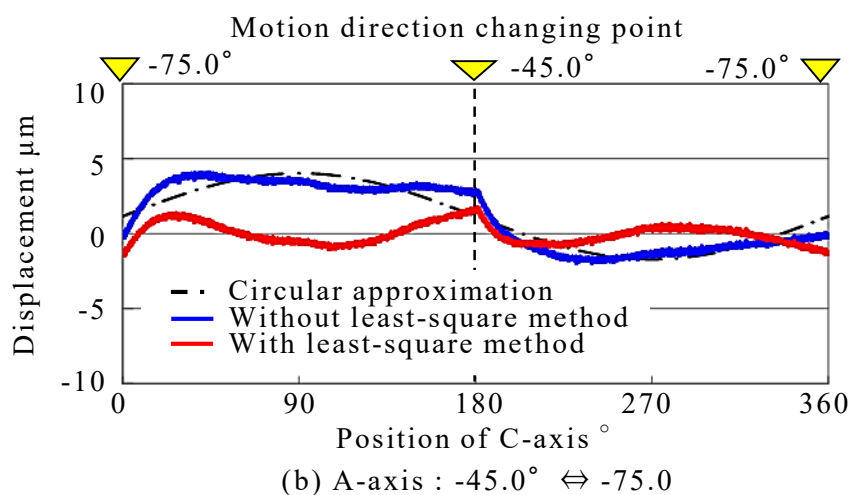
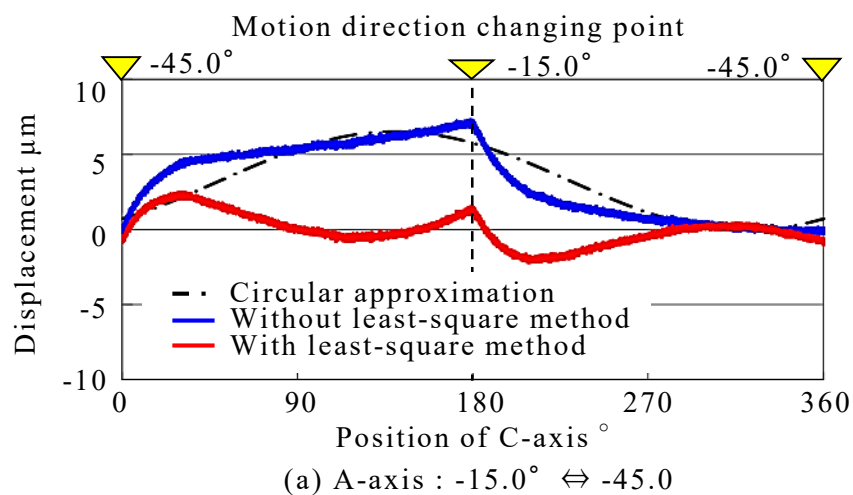


Fig. 3.15 Measurement results with least-square method

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

3.4. 直進軸を用いた補正

これまで、送り軸の運動方向反転動作を含む動的精度が加工面に及ぼす影響を軽減することを目的として多くの方法^{10,11,19)}が提案されている。例えば、杉江ら¹⁹⁾は、慣性モデルを用いて漸増型ロストモーションを表現し、そのモデルを用いた補正方法を提案している。しかし、いずれも該当軸の動的精度そのものを改善することによって加工精度を向上させる方法であり、その多くは送り軸系の数学モデル等に基づく制御技術を用いている。しかし、今回確認されたA軸の軸方向に発生する変位は、当然のことながらA軸自身の動作により補正することは不可能である。そこでA軸の中心軸に平行な直進軸であるX軸を用いる補正方法を提案し、前節で提案した評価方法によりその有効性を確認した。

補正は、NCプログラムにX軸方向の補正指令を加える方法で行った。図3.16にA軸の動作範囲が $-30^{\circ} \sim 0^{\circ}$ の際の、測定結果と補正データを示す。ここで、図に示すように測定結果において特徴的な変曲点を抽出し、その間をいくつかの一次式により近似した。そして、これらの式から一定のA軸角度ごと（ここでは 5° ）に補正データを求め、NCプログラム内にX軸方向の移動指令として加えるものとした。この補正データの間隔（A軸角度）は、図3.5、図3.9および図3.16の測定結果において特徴的な変化が起こる間隔は 5° 程度であること、また2ブロックで指令していたA軸の往復動作指令に対して補正指令を挿入するためにブロックを分割する際に、ブロックが細かくなりすぎて実際の動作速度に影響を及ぼさないようにするため、今回はA軸動作指令が 5° ごとに補正指令を

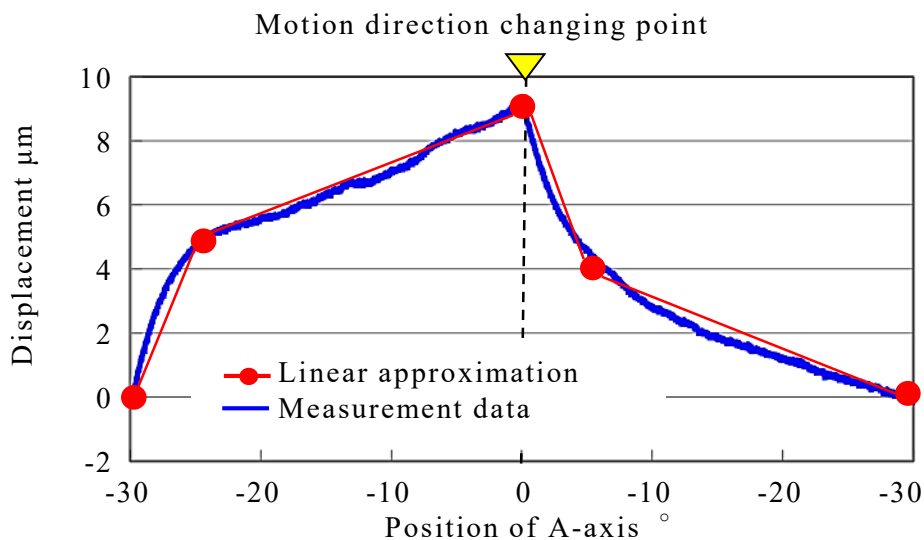


Fig. 3.16 Compensation data by linear approximation
(A-axis $-30.0 \Rightarrow 0.0 \Rightarrow -30.0^{\circ}$)

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

設定した。他の動作範囲の補正指令も、図 3.16 と同様に動作範囲ごとに作成し実験を行った。ここで、NC プログラム内の補正指令は切削送りで行われていることから、補正指令ブロックの間も直線補間される。

提案した平面加工と円柱加工について補正を行った場合の結果を図 3.17 と図 3.18 にそれぞれ示す。図 3.17 の平面加工の結果によると、全ての結果において加工面に生じていた段差状の誤差が小さくなっており、最大で 6 μm 発生していた段差が 2 μm 程度にまで改善されている。また、図 3.18 の円柱加工結果によると、いずれの条件においても A 軸の方向反転により発生していた 3~5 μm の段差状の加工誤差が観察されなくなっており、本研究で提案した回転軸に平行な方向の直進軸による補正が有効であることがわかる。

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

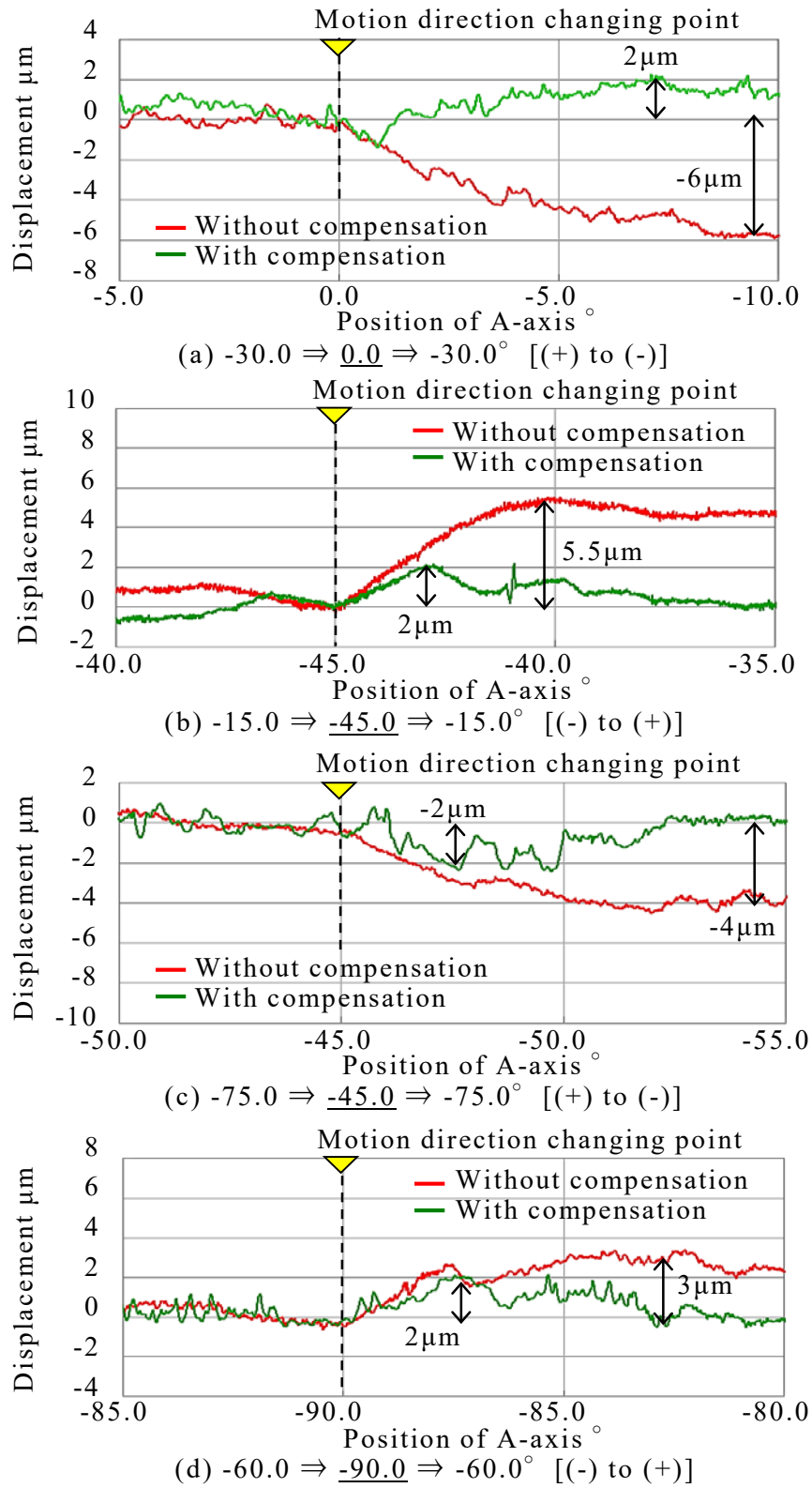


Fig. 3.17 Results of flat surface machining with compensation

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

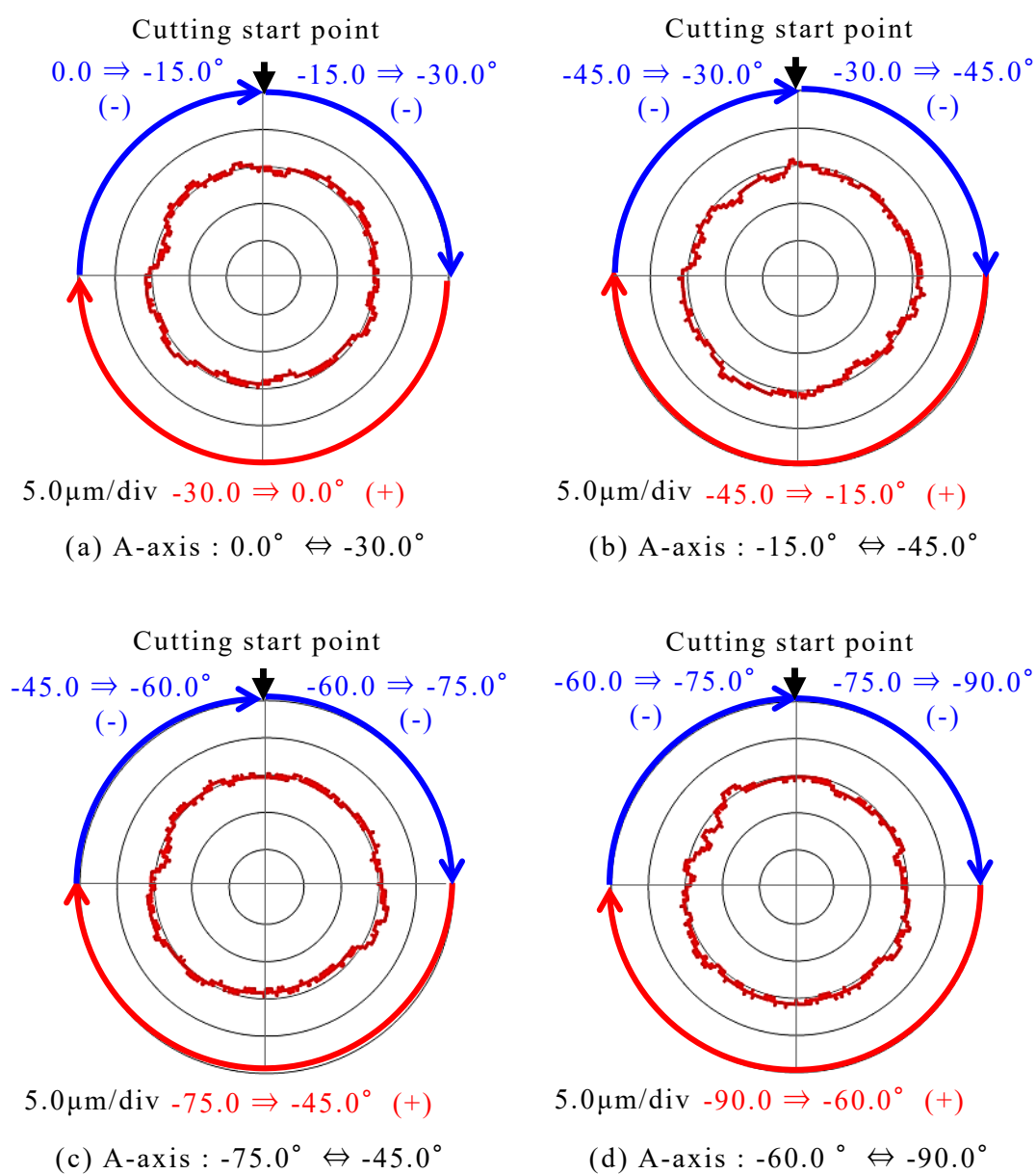


Fig. 3.18 Results of circular machining with compensation

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

3.5. 結 言

本研究では、回転軸の運動方向反転動作に伴う軸方向変位に着目し、その挙動を評価するための測定方法と、軸方向変位が加工面にどのような影響を及ぼすのか評価するための加工試験を提案し、実際の5軸制御マシニングセンタの傾斜軸に適用して測定と加工試験とを行った。さらに、加工精度を向上させるための一つの方法として、軸方向変位の測定結果に基づいて直進軸の運動を補正することで軸方向変位による影響を補正する方法についても検討し、実験によりその有効性を検証した。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

- (1) ウォームギヤ駆動の回転軸では、回転軸の運動方向反転時には軸方向変位が生じる場合があり、その軸方向変位は加工結果に影響を及ぼしている。
- (2) 評価対象の回転軸とほかの直進軸または回転軸の同期運動による加工方法により、回転軸の軸方向変位による影響を的確に評価できる。
- (3) 回転軸の軸方向変位による影響は、回転軸と平行な軸を用いて補正が可能であり、補正により加工精度を向上できる。

実際の5軸制御加工においても、回転軸の運動方向反転時に生じる軸方向変位は発生し、加工結果に影響を及ぼしていると考えられる。本研究で提案した評価方法と補正方法により、5軸制御加工精度を向上できると期待される。A軸のうえにのったC軸についても運動方向の反転による軸方向の変位が生じていると考えられ、その場合にはA軸の回転角度によりC軸回転中心の向きが変化するため、複数の直進軸による補正が必要になる。今後、そのような場合についての補正方法も検討するほか、軸方向以外の変位についても、測定方法と補正方法を検討する予定である。

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

参考文献

- 1) 坂本重彦, 稲崎一郎, 塚本顕彦, 市来崎哲雄: ボールバーによる5軸マシニングセンタの組立誤差同定法, 日本機械学会論文集(C編), Vol.63, No.605 (1997) pp.262-267.
- 2) 齋藤明德, 堤正臣, 牛久健太郎: 5軸制御マシニングセンタのキャリブレーション方法に関する研究(第2報) - 同時3軸制御運動を用いた位置偏差および角度偏差の推定 -, 精密工学会誌, Vol.69, No.2 (2003) pp.268-273.
- 3) 松下哲也, 沖 忠洋, 松原 厚: テーブルチルト型 5軸制御工作機械によるテーパコーン加工精度, 精密工学会誌, Vol.74, No.6 (2008) pp.632-636.
- 4) S. Ibaraki, M. Sawada, A. Matsubara and T. Matsushita: Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools: Precision Engineering, Vol.34 (2010) pp. 387-398.
- 5) C. Hong, S. Ibaraki and A. Matsubara: Influence of Position-dependent Geometric Errors of Rotary Axes on a Machining Test of the Cone Frustum by Five-axis Machine Tools, Precision Engineering, Vol.35, No.1 (2011) pp.1-11.
- 6) 山本通, 長谷部孝男, 堤正臣: 微細溝切削による 5軸制御マシニングセンタの工作精度試験方法の開発, 精密工学会誌, Vol.77, No.4 (2011) pp.405-410.
- 7) 牧野フライス, 森 規雄, 笠原 忠, 西口 直浩: エラーマップ作成方法及び装置並びにエラーマップ作成機能を有した数値制御工作機械, 公開特許公報, P2012-104153 (2012).
- 8) NAS979 Uniform Cutting Tests - NAS series, Metal Cutting Equipment Specifications, (1969).
- 9) S. Weikert and W. Knapp: R-test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools, Annals of the CIRP, Vol.53, No.1 (2004) pp.429-432.
- 10) 佐藤隆太, 横堀祐也, 堤正臣: 5軸制御マシニングセンタにおける直進軸と回転軸の動的同期精度, 精密工学会, Vol.72, No.1 (2006) pp.73-78.
- 11) 佐藤隆太, 井出裕, 堤正臣: 多軸同期制御精度向上のための送り駆動系の制御系設計方法, 日本機械学会論文集(C編), Vol.73, No.727 (2007) pp.693-700.

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける 回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

- 12) 茨木創一, 垣野義昭, 赤井孝行, 高山直士, 山路伊和夫, 小川圭二: ボールバー測定を用いた5軸制御加工機の運動誤差原因の診断 – 誤差成分の分類と改良型ボールバー装置(DBB5)の開発 –, 精密工学会誌, Vol.76, No.3 (2010) pp.333-337.
- 13) S. Ibaraki, C. Oyama and H. Otsubo: Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by R-test, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.51 (2011) pp. 190-200.
- 14) 太田祐輔, 茨木創一, 5軸制御工作機械の旋回軸が反転する際の動的誤差の評価, 日本機械学会 2011 年度年次大会.
- 15) R. Sato and M. Tsutsumi: Motion Control Techniques for Synchronous Motions of Translational and Rotary Axes, Proceedings of the 5th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Vol.1 (2012) pp.265-270.
- 16) 西尾健太郎, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 同時 5軸制御による円すい台加工面の解析, 日本機械学会論文集(C編), Vol.79, No.808 (2013) pp.4613-4623.
- 17) M. Yamaji, N. Hamabata and Y. Ihara: Design of Motion Accuracy Measurement Device with Three Displacement Sensors for Machine Tool and Comparison of Its Setting Method, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, Vol.8, No.4 (2014) No.14-00094.
- 18) ISO/DIS10791-6:2014 Machine Tools—Test conditions for machining centers—Part6: Accuracy of speeds and interpolations, (2014).
- 19) 杉江弘, 岩崎隆至, 中川秀夫, 幸田盛堂: 工作機械における漸増型ロストモーションのモデル化と補償, システム制御情報学会論文誌, Vol.14, No.3 (2001) pp.117-123.

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

第4章

エンドミル加工における

工具アプローチ痕の評価とその補正

4.1. 諸 言

前章までは、主に送り駆動系の運動特性に起因する加工誤差について論じたが、実際には、送り駆動系の動的精度以外にも、主軸精度、熱変位、CL データの精度、切削力による工具変形等を要因とする加工誤差が存在する。本章では、その中でも、これまでに十分に研究されてこなかった切削力による工具変形によって発生する工具アプローチ痕に着目する。

工具アプローチ痕が局所的な凹形状の加工痕として金型加工のように滑らかな加工面を要求される製品に発生した場合、これを除去する作業は凸形状のそれとは異なり、加工痕の周辺が滑らかになるように広くかつ加工痕の深さ以上に磨かなければならず、全体形状の崩れや作業工数の増大を引き起こすこととなっている。この工具アプローチ痕が低減できれば、その後の磨き作業が軽減され生産効率の向上につながる。この工具アプローチ痕に対してのこれまでの対処方法としては、円弧補間を用いたアプローチや加工面の接線方向からのアプローチにより工具アプローチ痕を軽減する工夫が現場では一般的になされているが、それでも加工痕を除去しきれない状況は数多く発生しており、現在でも磨き等の後工程作業が必要とされているのが現状である。

エンドミルを用いた加工における切削力と加工面との関係については多くの報告がなされている^{1)~6)}。例えば、藤井ら^{1,2)}はボールエンドミルを用いた加工において切削力に起因した工具変形による加工誤差について検討し、白瀬ら³⁾はエンドミルを用いた加工において切削力による加工誤差の要因分析を行った。しかし、これらの報告はその多くが切削力に対する工具変形に関するもので、加工面全体の加工誤差や面性状に着目したものであり、工具アプローチ痕に着目した研究例は少ない。

工具アプローチ痕に着目した研究例として、2次元加工や等高線加工を想定し、加工面へ円弧補間によるアプローチや加工面の接線方向からのアプローチをさせ周回軌跡を加工した後に、アプローチ部で工具を退避させた場合に発生する工具アプローチ痕について検討したものがあ。岩部らによると、真円形状の外周円輪郭加工時の工具退避部に発生する凹形状の加工痕が、実切入り量の変化による切削抵抗の変化に伴う工具変形の影響が関係していると報告されている⁷⁾。ま

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

た、鈴木らは、円筒内面加工時の円弧動作による工具退避部にも、凹形状の加工痕が発生することが報告しており、さらにこれを軽減する方法として、もとはアプローチ動作の終点と同じ位置である工具退避動作の始点を、加工面に沿って加工開始側に移動させることで、工具変形の回復と共に工具を加工面から退避させる方法も提案している⁸⁾。

本章では、工具が加工面へアプローチする状況の中でも、コアやキャビティ形状金型等の起伏のある3次元形状の加工や5軸の割り出し加工といった、面のつなぎ合わせを有する加工の際に発生することがある、工具を加工面から一旦離れた後に同一箇所へアプローチする場合の加工面に発生する工具アプローチ痕に着目し、これを軽減させることを目的とする。4.2節では、45°に傾斜した平面に対するボールエンドミルによる面沿い加工中に工具退避とアプローチを行い、その際に発生する工具アプローチ痕の形状と、退避動作、アプローチ動作との関係について調査した結果について述べる。4.3節では4.2節の調査結果をもとに、効果的な補正に必要な工具の退避動作に対するアプローチ動作の円弧中心位置のオフセット量を算出する方法について説明し、さらに提案した方法により工具アプローチ痕を効果的に削減できることを、実験的に確認した結果について述べる。

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

4.2. 工具アプローチ痕

4.2.1. アプローチ半径と工具アプローチ痕の関係

本研究では、ボールエンドミル加工における工具アプローチ痕を評価方法するため、図 4.1 に示すような工具軸と加工面のなす角 θ を 45° に傾斜した加工面に対する等高線加工を一方向送りで実施し、その加工結果を表面粗さ計で測定する。その際、測定する加工面の法線方向である図 4.1 に示す X' 方向からスタイラスを押し当てて測定することで、加工面の法線方向の変位を評価した。

図 4.1 に示すように、加工中の送り方向は $+Y$ 軸方向とし、途中で工具が一旦加工面より離れる退避動作（以後、抜け動作）ともとの位置に戻るアプローチ動作とを行う。抜け動作とアプローチ動作には X, Y 軸による円弧補間運動を用い、それぞれの円弧半径（以後、アプローチ半径）は同じとし、 $5, 20, 35, 50$ mm の 4 通りで実験を行った。また、抜け動作とアプローチ動作以外の加工中では、 Y 軸以外は動作しない単軸加工とした。その他の加工条件は表 4.1 に示す。

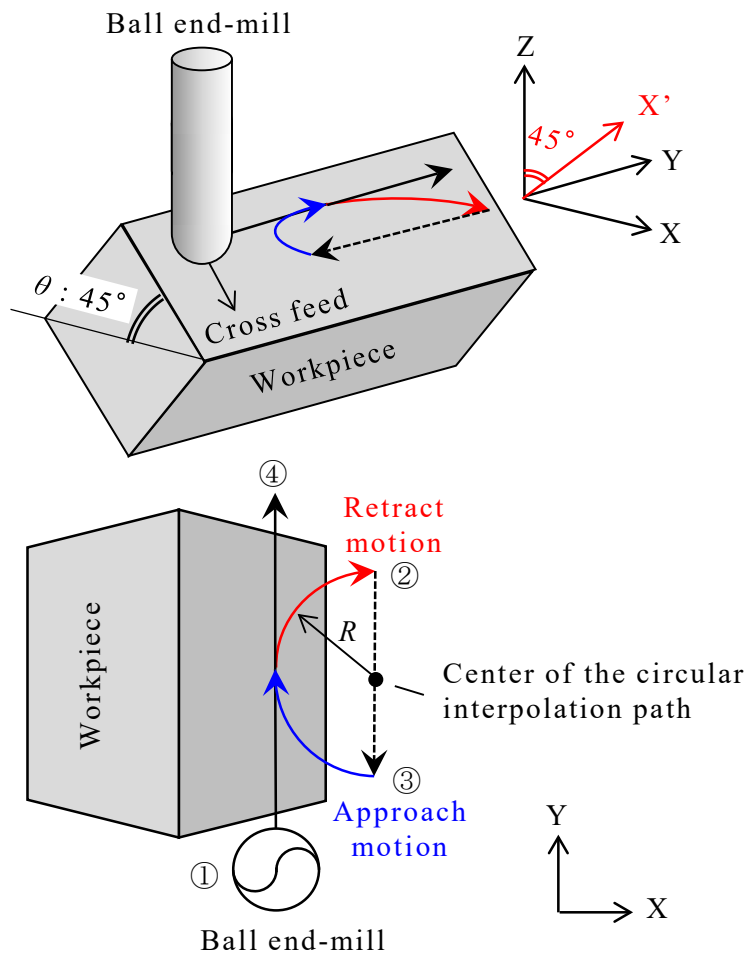


Fig. 4.1 Cutting test to investigate tool approach mark

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

各アプローチ半径における加工面の，表面粗さ測定機（榊ミツトヨ製 SV-2100）で測定した結果を図 4.2 に示す．図によると，いずれのアプローチ半径においても，深さ 2.2~2.4 μm の凹形状の工具アプローチ痕が確認された．また，アプローチ半径の違いによる加工痕への影響についてみると，半径が小さくなるにつれより急峻な加工痕が発生するが，加工痕の深さへの有意な影響はないことがわかる．

これまでの報告^{7,8)}において，工具アプローチ痕の原因として切削力による工具変形が挙げられており，図 4.3 の模式的に示すような現象が発生していると考えられる．まず，図 4.3(a)に示すように加工開始から抜け動作までの加工面に工具変形に起因した削り残しが発生した後，図 4.3(b)に示すようにアプローチ動作を行うことで，工具が抜け動作と同じ箇所を通る際にこの削り残しは除去される．そして，工具が抜け部分に到達すると再び切込み量の増大による工具変形が発生し，削り残しを有する加工面が生成される．

このとき，切削力による工具変形によって発生する削り残し部分が，アプローチ動作時にすべて除去されると仮定すると，工具アプローチ痕の深さは工具変形量と同じであるといえる．これにより，図 4.2(d)中の偏差ゼロの部分は約 2.2 μm を削り残した状態であり，偏差が約-2.2 μm になっている部分が本来目標とされる加工面となる．

Table 4.1 Cutting condition

Tool	Type	Ball end-mill
	Number of flutes	2
	Diameter	6 mm
	Tool length	20 mm
	Material	Cemented carbide
	Coating	Uncoted
Workpiece	Material	AL6063-T5
	Form	Cuboid
Machining condition	Feed rate	100 mm/min
	Depth of cut	0.5 mm
	Spindle speed	10000 rpm
	Up-cut/Down-cut milling	Up-cut milling

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

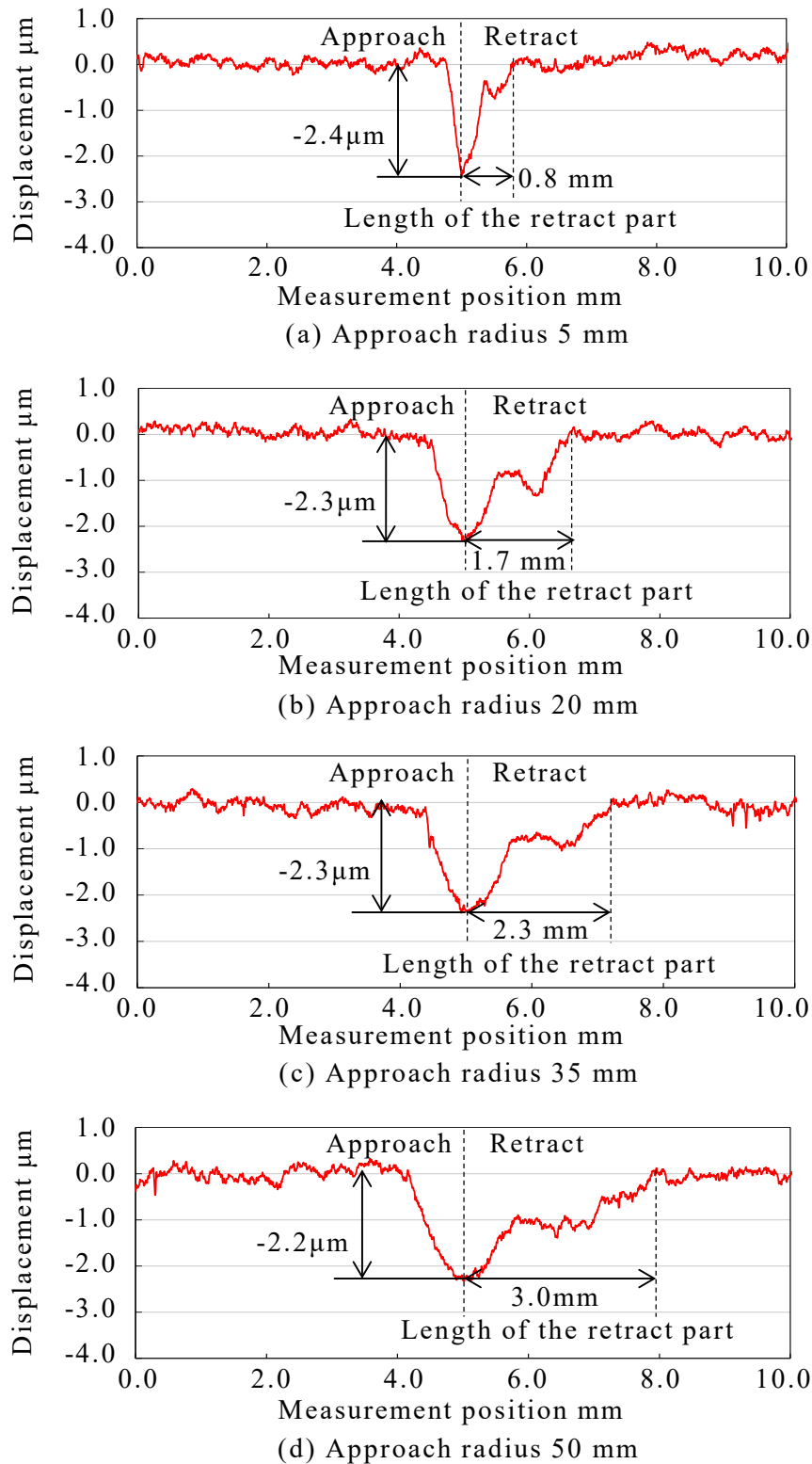


Fig. 4.2 Results of cutting tests

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

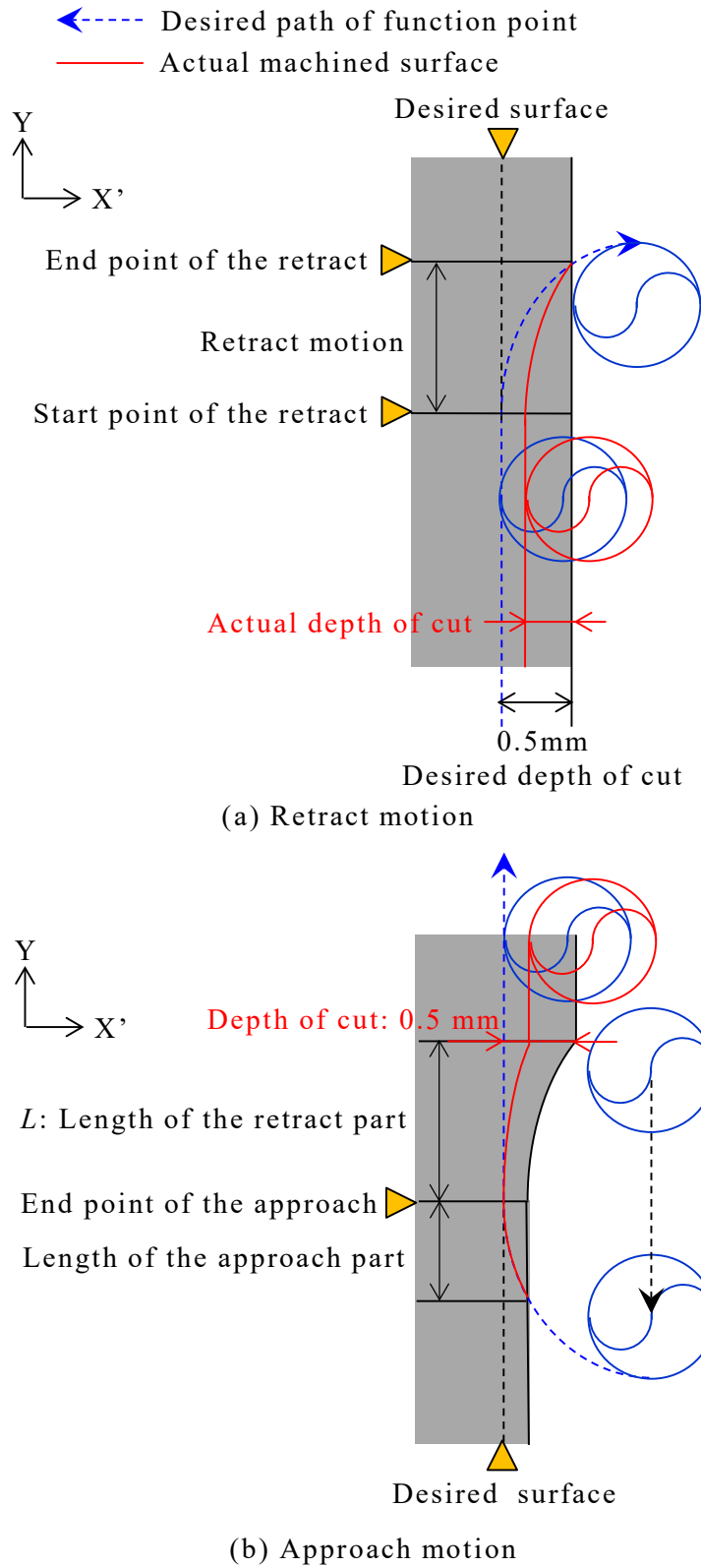


Fig. 4.3 Generation of tool approach mark (Depth of cut : 0.5mm)

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

4.2.2. 切込み量と加工痕の深さの関係

工具アプローチ痕の補正方法の開発のために、工具半径方向の切込み量と加工痕の深さとの関係を調べる。図 4.4 に示すように、工具抜け側とアプローチ側の円弧中心位置を 5 mm 手前にオフセットし、工具半径方向の切込み量を 0.02 mm から 1.00 mm まで変化させながら加工実験を行うことにより、各切込み量における工具変形による加工痕の深さとの関係を調査した。この時のアプローチ半径は 50 mm とした。

加工結果を図 4.5 に示す。また図 4.5(c)には、切込み量が 0.5 mm の場合における、図 4.2(d)に示されたオフセットなしの加工結果を重ねて示す。図によると、アプローチ動作の終点である測定位置 5 mm 付近で約 $-2.2 \mu\text{m}$ の偏差が発生し、抜け動作が始まる 10 mm 付近まで続いており、この偏差が各切込み量における工具変形による加工痕の深さを示している。また本実験の加工条件では、アプローチ半径の中心をオフセットさせない状態でも、アプローチ動作中に各切込み量における工具変形に達していることが分かる。

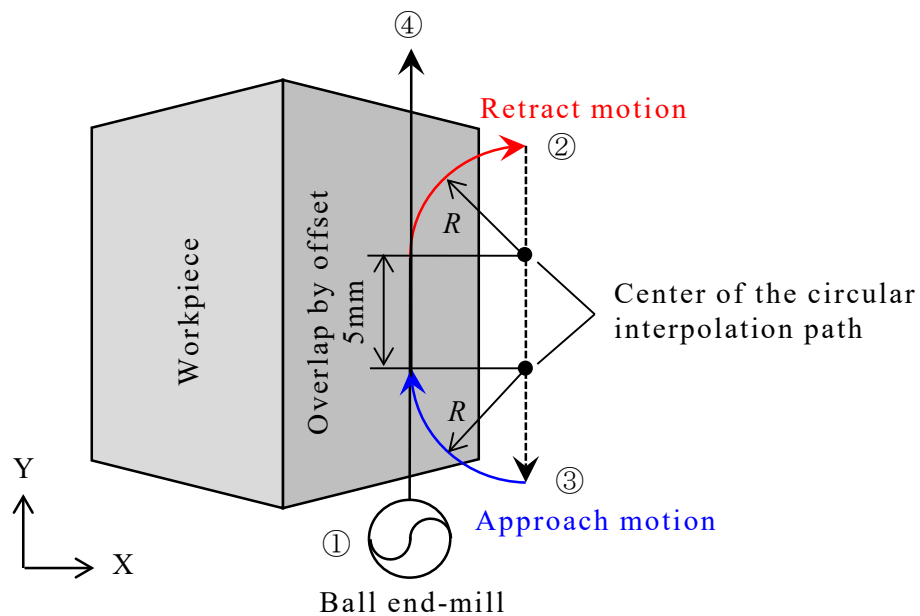


Fig. 4.4 Cutting test with -5mm offset of approach and retract motions

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

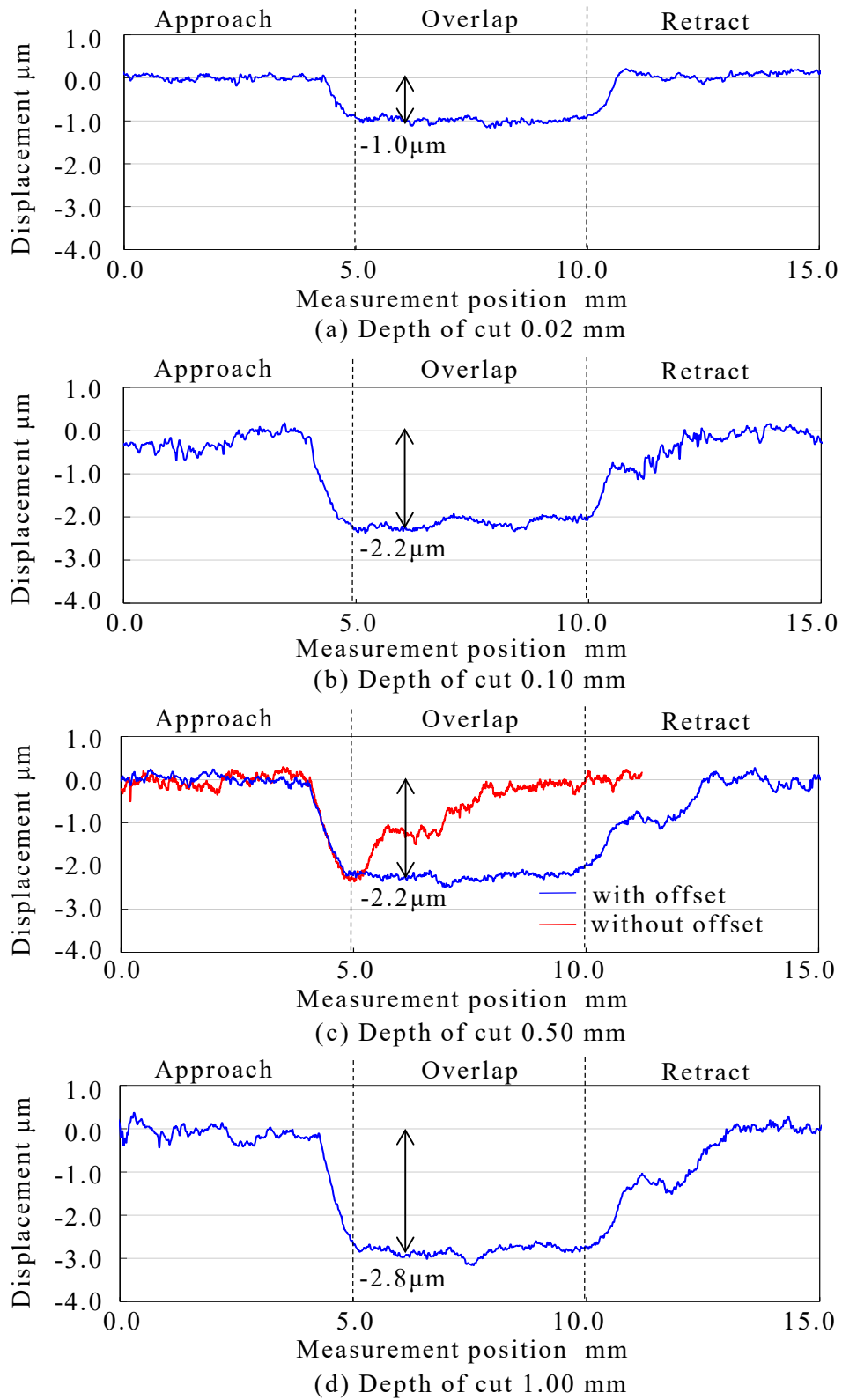


Fig. 4.5 Results of cutting tests with -5mm offset of approach and retract motion at each depth of cut

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

切込み量を 0.02 mm から 1.00 mm まで変更した場合の、加工痕の深さを図 4.6 に示す。図 4.6 から分かるように、切込み量が 0.02 mm から 0.10 mm までの間に加工痕の深さは増加し、その後切込み量が 0.10 mm から 0.60 mm までの間は、ほとんど変化しない。これは工具の偏心や刃先丸みなどが影響していると考えられた、このことの原因を明らかにするには至っておらず、今後の課題となっている。

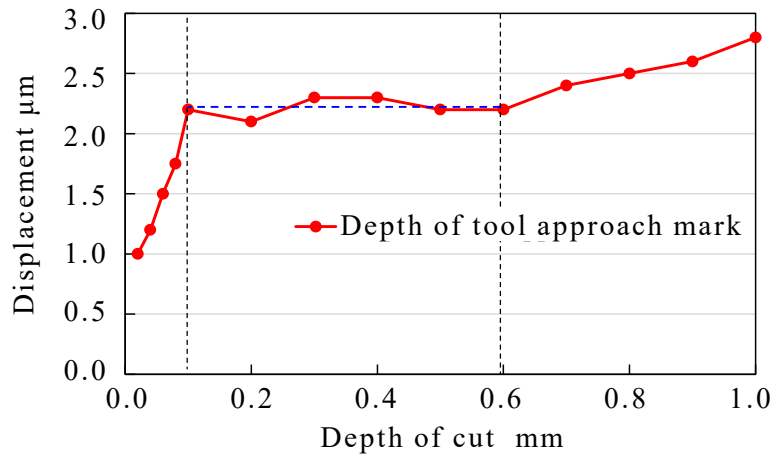


Fig. 4.6 Depth of tool approach mark by depth of cut

4.2.3. 工具抜け部とアプローチ部の加工面形状

工具アプローチ痕に関し、図 4.2 の左破線部の左側にあるアプローチ部分の距離と、左破線部から右破線部までの工具抜け部の距離が、いずれのアプローチ半径の加工結果においても異なることが確認された。この現象は、図 4.3(b) に示すようにアプローチ部の加工面形状は、切込み量がはじめの加工における工具変形による削り残しであり、非常に小さい状態で形成されるのに対し、抜け部の加工面形状は、切込み量が相対的に大きい状態での工具変形によって形成されていることが原因である。この考察によると、図 4.3(b) に示すアプローチ痕の抜け部の距離 L は、図 4.3(a) に示す抜け動作で形成された部分のアプローチ加工時における、アプローチ動作の終点から工具変形が復元するまでの距離であることから、アプローチ部の距離に比べ長くなる。このアプローチ痕の抜け部の距離 L は、工具半径 r 、アプローチ半径 R 、工具軸と加工面のなす角 $\theta(45^\circ)$ と工具半径方向の切込み量 d から、式(4.1)によって計算できる。ここで、工具変形に伴う圆弧半径の変化と、工具の変形に伴う工具と工作物が接触する機能点⁹⁾の変化は、その影響が小さいことから無視している。式(4.1)の導出方法と機能点の変化に関する詳細は本節の最後で説明する。

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

$$L = (r + R) \sin \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{r + R \cos \theta - Rd}{r + R \cos \theta} \right) \right\} - \sqrt{2rRd - Rd^2} \quad (Rd < 2r) \quad (4.1)$$

アプローチ半径を 50 mm, 切込み量を 0.5 mm とした場合, 抜け部の距離は式(4.1)から 6.9 mm となる. しかし, 実際の加工結果である図 4.2(d)における抜け部の距離は約 3 mm であり, 式(4.1)による計算結果と異なっている. この現象は, 図 4.6 の結果と関係している. すなわち, 切込み量が 0.10 mm から 0.60 mm の間では, 工具変形量がほとんど変化しておらず, よって, 図 4.7 に模式的に示すように, 切込み量が 0.1 mm まで増加する間に工具変形が 2.3 μm まで拡大するものの, その後は切込み量が 0.5 mm まで増加しても工具変形は変化していないためと考えられる. そこで図 4.7 に示すように, 抜け部の加工におけるアプローチ動作の終点位置から切込み量が 0.1 mm へ増加するまでの抜け部の距離を式(4.1)により計算した結果 3.1 mm となり, これは図 4.2(d)の加工結果と概ね一致した. なお, 図 4.2 に示すその他のアプローチ半径 5, 20, 35mm による加工結果の場合でも, その抜け部の距離が, 式(4.1)の計算結果と概ね一致することが確認されている.

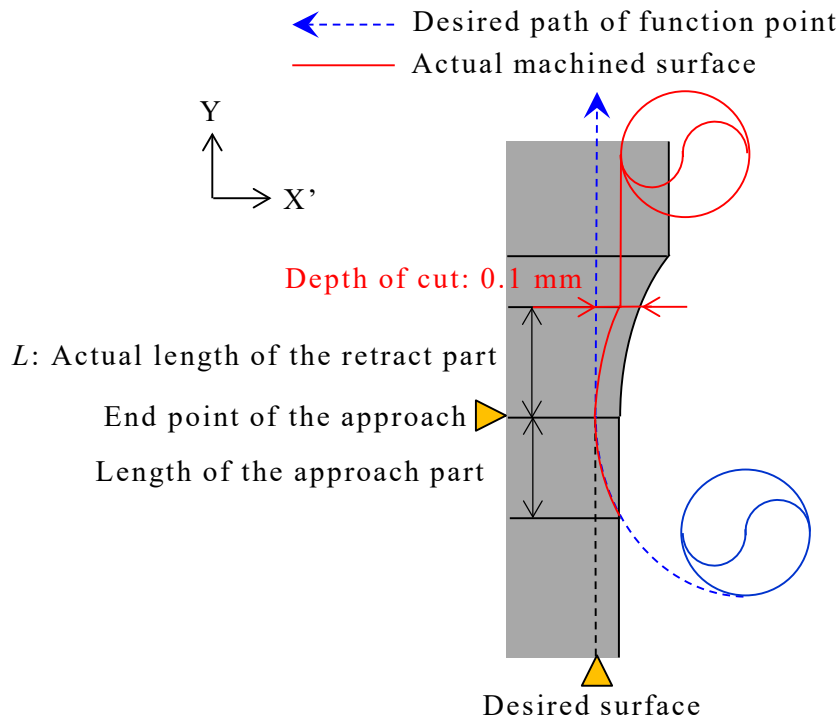


Fig. 4.7 Generation of actual tool approach mark

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

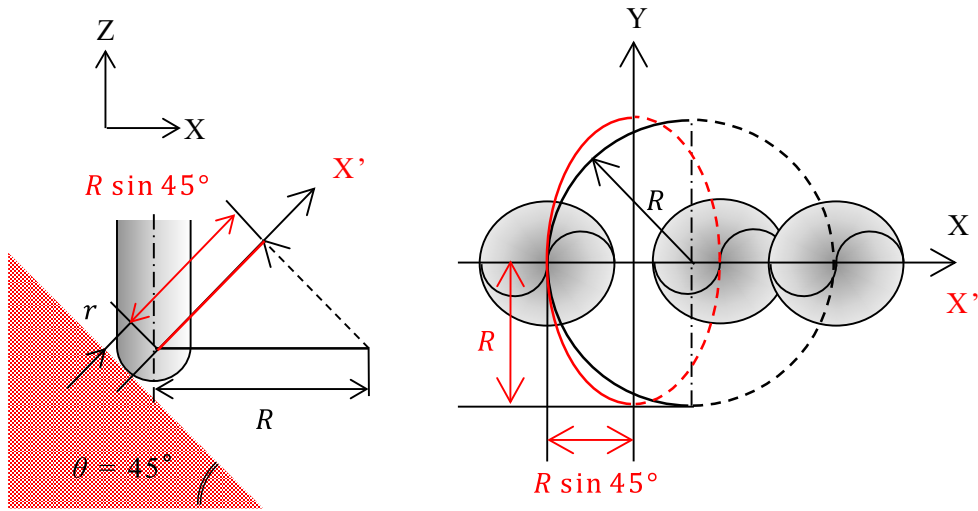


Fig. 4.8 Oval path on perpendicular plane to machined surface

式(4.1)は、アプローチ動作の終点から工具変形が加工中断前の状態に戻るまでの Y 軸方向の距離である、図 4.7 に示されるアプローチ痕の抜け部の距離 L を計算する式として以下のように求められる。

本研究における工具抜け動作と工具アプローチ動作に用いている XY 平面上の円弧補間による工具経路は、図 4.8 に示すように加工面の垂直面である X'Y 平面へ投影した楕円経路であることが分かる。そこで、アプローチ痕の抜け部の距離 L を求めるに際し、まず、図 4.8 に示す楕円経路から求めた式(4.2)より、図 4.9 に示す工具抜け動作により形成された加工面の Y 軸方向の距離を算出可能な式を作成する。

$$\frac{X'^2}{A^2} + \frac{Y^2}{B^2} = 1 \quad (4.2)$$

楕円経路の短径： $A = r + R \sin \theta$

楕円経路の長径： $B = r + R$

ここで、式(4.2)の楕円経路の短径 A と長径 B は、図 4.8 から分かるように実際の加工面を生成する機能点の経路となることから、図 4.8 に示す工具中心の楕円経路の短径 $R \sin \theta$ と長径 R に工具径 r を足したものとなる。

上式より楕円経路の Y 軸方向の距離を算出する式(4.3)が求まる。

$$Y = B \sin \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{X'}{A} \right) \right\} \quad (4.3)$$

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

さらに、加工中断前の切込み量が d である場合、図 4.9 の(b)の位置以降の抜け動作によりに形成される加工面の、 X' 軸方向の距離は $X' = r + R \sin \theta - d$ であることから、これらを式(4.3)へ代入することにより式(4.4)が求まる。

$$Y = (r + R) \sin \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{r + R \sin \theta - d}{r + R \sin \theta} \right) \right\} \quad (4.4)$$

次に、図 4.10 に示すアプローチ痕の抜け部の距離 L を算出する式を求める。図 4.10 の工具アプローチ動作の終点(b)以降を加工する際、工具変形量が加工中断前の状態にまで復元する切込み量 d ($Y = L$)まで達した際の工具中心位置は、図 4.9 の(b)から(c)の工具抜け動作により形成された加工面の Y 軸方向の距離から $\sqrt{2rd - d^2}$ 手前の位置 (図 4.10 の(c)) となることから、式(4.4)からこれを差し引くことで式(4.1)が求まる。

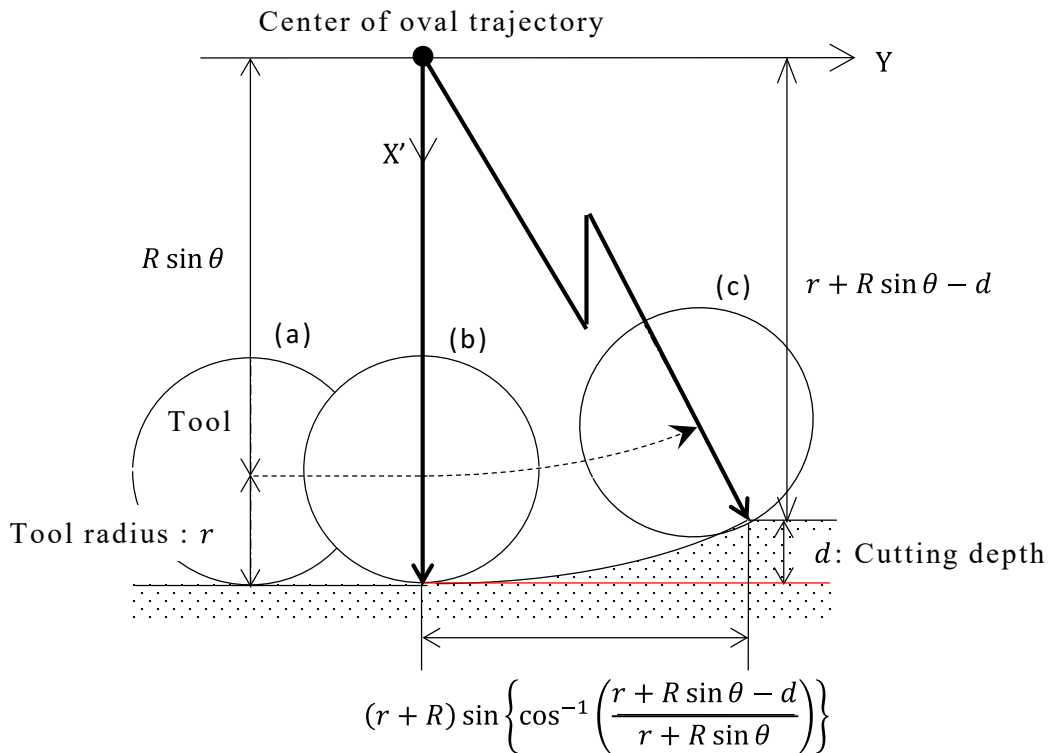


Fig. 4.9 Machined surface generated by retract motion

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

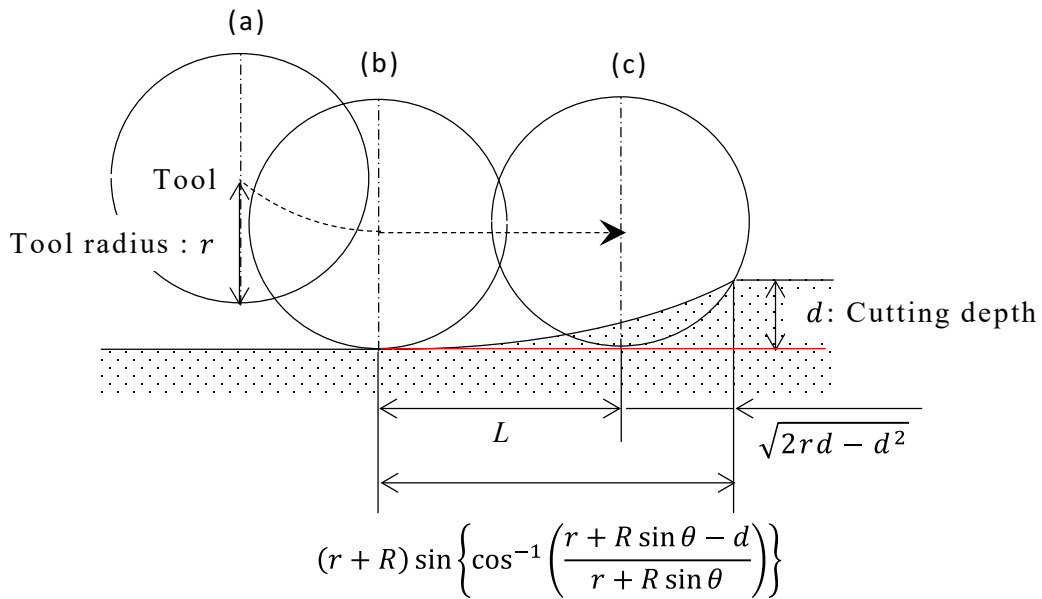


Fig. 4.10 Machined surface generated by restart of machining

工具の変形に伴う機能点の位置の変化を無視しても差し支えないことを、**図4.11**を用いて説明する。図中の(a)から(b)へ工具が移動するまでの間に、切込み量の増加によって工具は約2.3 μm加工面から離れる方向へ変形する。この際、**図4.11**に示すように機能点は、送り運動の方向に垂直な基準面上の●印の位置から×印の位置へ移動し、その後、工具変形が復元したところで●印の位置へ戻る。この際、切込み量に対する工具変形量が比例関係であるとした場合、**式(4.1)**で求められるLと**図4.11**内の本来の距離の差は、今回の実験条件下では10 μm以下となり、Lと比べて非常に小さいため、本研究ではこれを無視することとした。

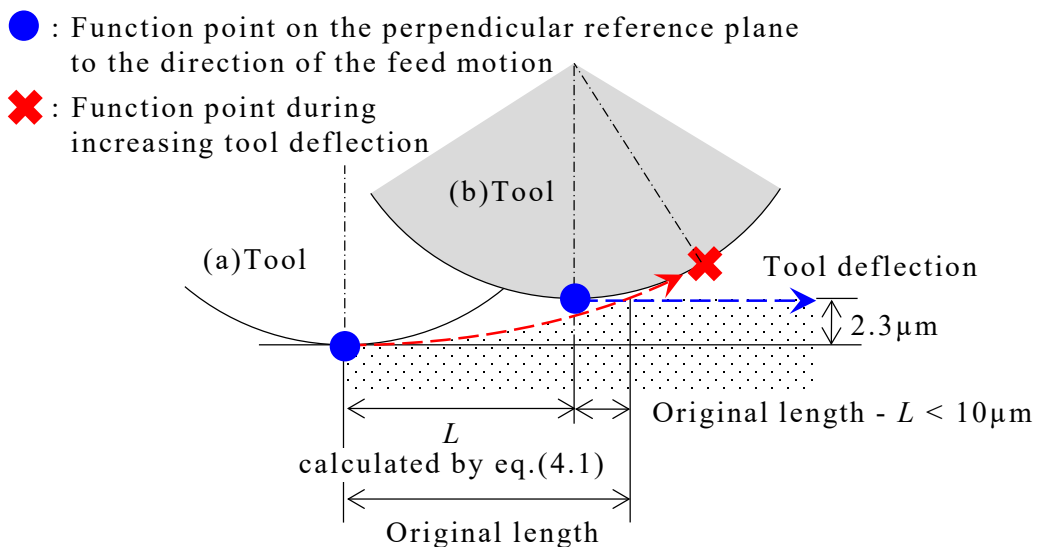


Fig. 4.11 Function point during increasing tool deflection

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

4.3. 工具アプローチ痕の補正

これまでの研究により，エンドミル加工による加工痕は切削力による工具変形に起因していることが分かっているが，本研究の対象である数 μm レベルで発生する工具アプローチ痕を，位置指令の最小設定単位が $1 \mu\text{m}$ である一般的な工作機械で正確に補正することは困難である。

これまでに，円筒内面加工の工具退避時に発生する凹形状の工具アプローチ痕の原因が，切削抵抗の減少に伴う工具変形の回復によることが分かっている。そして，アプローチ動作の終点に対する工具退避動作の開始位置を，加工面に沿って加工開始側に移動させ工具変形の回復と共に工具を加工面から退避させることで，凹形状の工具アプローチ痕を軽減する方法が提案されている⁸⁾。本書では第2章で，加工面と工具経路の関係について加工面の幾何形状と工具経路は必ずしも一致するわけではなく，加工面に対して凸状の軌跡誤差によって生成される加工誤差の高さは，工具径との関係により工具経路に比べ非常に小さくなる特性を有していることを述べている。さらに，この凸形状の工具経路の特性を用いることにより，凹形状の軌跡誤差が加工面に及ぼす影響を軽減することが可能であることも報告している。

そこで本研究では，**図 4.12** に示すように，工具抜け動作に対するアプローチ動作の円弧中心位置をオフセットすることにより，凹形状に発生する工具アプローチ痕に対し，意図的に凸形状の工具経路を発生させることで，凹形状の誤差を相殺する方法を採用し，その補正に必要なオフセット量を計算式より算出する方法を提案する。また，実際の加工実験によりその有効性を確認する。

ここで，前節でも示したように，傾斜した加工面上における抜け動作とアプローチ動作による工具経路は，**図 4.1** と **図 4.8** に示す加工面に対して垂直な $X'Y$ 平面上では， XY 平面内の円運動による工具経路を投影した楕円軌跡となる。これらのことから，**図 4.12** に示す凸形状の補正の工具経路に必要なオフセット量 W は，工具軸と加工面のなす角 $\theta(45^\circ)$ ，凸形状の工具経路の高さ l ，工具半径 r とアプローチ半径 R からなる**式(4.5)**により計算できる。ここで，工具変形に伴う円弧補間の半径の変化は無視している。

$$W = 2(R + r) \sqrt{1 - \left(1 - \frac{l}{r + R \sin \theta}\right)^2} \quad (0 < l < 2(r + R \sin \theta)) \quad (4.5)$$

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

例えば、工具半径を 3 mm，アプローチ半径を 50 mm とした場合，**図 4.12** 中における工具経路の凸形状部の高さ l を $2.0 \mu\text{m}$ から $3.0 \mu\text{m}$ に変更するのに必要なオフセット量 W の変化量は，**式(4.5)**から 0.243 mm となる．これは一般的な工作機械の最小設定単位が $1 \mu\text{m}$ だとすると，その約 200 倍である．この事実は，アプローチ円弧中心のオフセットによる凸形状の高さは，工作機械の最小設定単位の数百分の一の分解能で制御することが可能となることを示している．

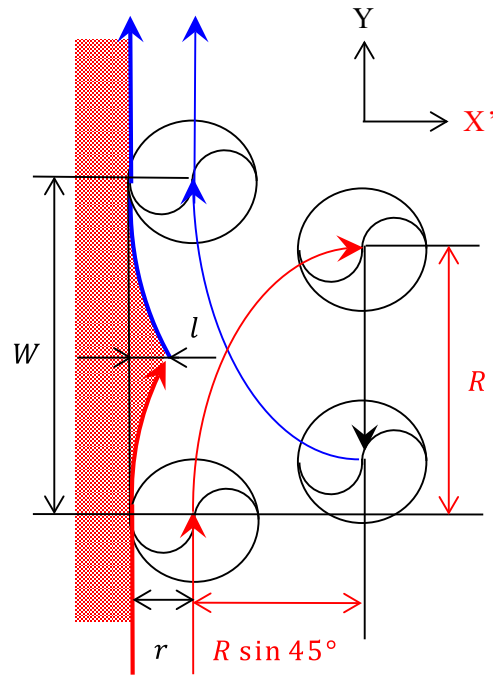


Fig. 4.12 Compensation tool paths by offsetting

ここで，**式(4.5)**からもわかるように，本補正方法では，前節で求めた抜け部とアプローチ部の加工痕の加工面形状の違いによる影響を考慮していない．これは，本補正を適用した場合にも**図 4.7**に示したものと同一現象が生じるため，補正前後でその影響が相殺されるためである．また，本実験における補正対象とするアプローチ痕の深さは $2 \mu\text{m}$ 程度であり，これを補正するのに必要な凸形状の補正の高さも同程度であることから，これによる切込み量の違いの影響も考慮しなくてよい．各アプローチ半径において， $2.3 \mu\text{m}$ を補正するために必要なオフセット量を**式(4.5)**から求めた結果を**表 4.2**に示す．表からわかるように，アプローチ半径が大きいほどアプローチ円弧中心のオフセット量は大きくなる．

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

Table 4.2 Calculated offsets

Approach radius mm	R5	R20	R35	R50
Calculated value mm	0.42	0.75	0.98	1.16

このオフセット量を用いた実加工試験を行うことにより，提案したオフセット量算出方法の有効性を確認した．その結果を図 4.13 に示す．図 4.13 によると，全てのアプローチ半径による結果において，提案する補正を適用することでアプローチ痕の大きさが大幅に小さくなっていることがわかる．最も補正が有効に作用した図 4.13(d)のアプローチ半径 50 mm における加工結果によると，提案した補正方法により深さ 2.2 μm の工具アプローチ痕が深さ 0.6 μm 程度にまで改善されることが確認できる．また，他のアプローチ半径においても，約 2.3 μm の加工痕を 1.0 μm 以下にまで改善できることが確認された．

なお，図 4.2 中の全ての結果において，補正を行わない場合の抜け動作中に二つ目の凹形状の変化が観察され，このことは図 4.3 および図 4.7 からは説明できない．この二山目の変化が，図 4.13 中の結果において，補正を行った場合にもアプローチ痕を完全になくすことができない原因であると考えられる．この二山目の変化の原因としては，工具変形量の動的な変動などが考えられるが原因を明らかにするには至っておらず，今後，この変化の原因を明らかにすることで，工具のアプローチおよび抜け動作に伴う加工痕を完全になくすことができる方法を開発できると考えられる．

以上の結果から，半径方向切り込み量と加工痕の深さとの関係を事前に調査しておけば，提案したアプローチ円弧中心をオフセットさせることによる補正方法について，その補正に必要なオフセット量を適切に求めることができ，アプローチ痕を大幅に小さくできるといえる．

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

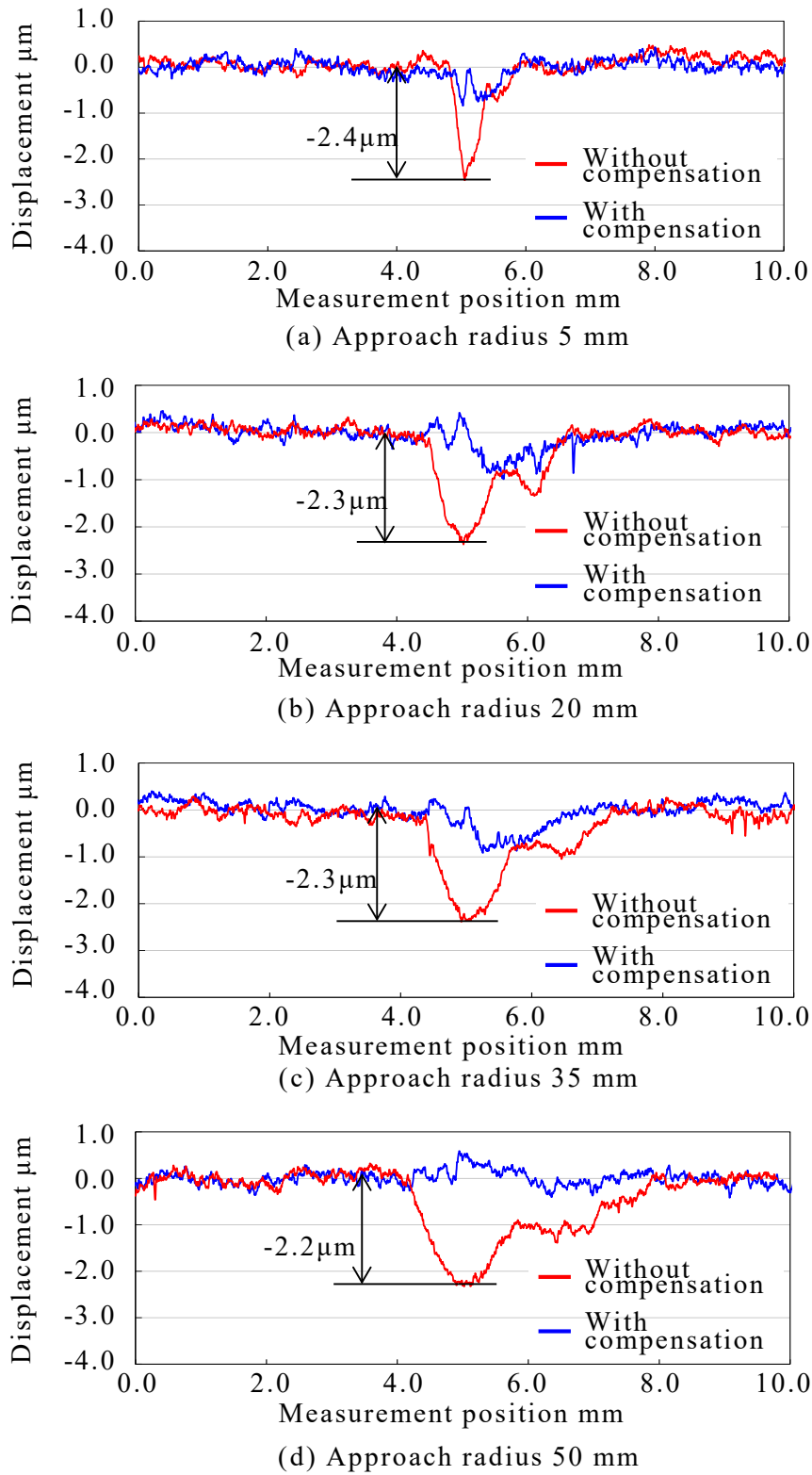


Fig. 4.13 Results of cutting tests with compensation

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

4.4. 結 言

本章では，工具が加工面へアプローチする状況の中でも，加工の中断により工具を加工面から一旦離れた後に同一箇所へアプローチした場合の加工面に着目し，工具経路と加工面に生じる工具アプローチ痕との関係を調査した．さらに，凹形状に発生する工具アプローチ痕を低減する方法として，工具抜け動作に対するアプローチ動作の円弧中心位置をオフセットさせることにより，意図的に凸形状の工具経路を発生させることで凹形状の誤差を相殺する方法を採用し，その補正に必要なオフセット量を計算式より算出する方法を提案し，実験によりその有効性を検証した．その結果，以下に示すことが明らかとなった．

- (1) アプローチ半径の違いによる加工痕への影響は，アプローチ半径が小さくなるにつれより急峻な加工痕が発生するが，加工痕の深さへの影響はない．
- (2) 工具抜け部とアプローチ部の加工面形状の差は，工具半径方向の切込み量の変化率の違いによって生じる工具変形量と，工具半径方向の切込み量の関係によって決まる．
- (3) 工具抜け動作に対するアプローチ動作の円弧中心位置を，オフセットさせることでアプローチ痕を補正でき，提案した方法によってオフセット量を計算できる．

実際のボールエンドミルを用いた加工においても，工具アプローチ痕が発生することで，加工面品位に悪影響を及ぼしていると考えられる．本研究で提案した方法により，補正に必要なオフセット量を求めることができ，工具アプローチ痕の軽減が期待されるが，工具アプローチ痕を完全になくすには至っていない．工具アプローチ痕の発生には，工具の種類や突出し量，被削材の種類や形状といった，様々な条件が影響することが考えられることから，今後も継続した調査と補正方法の検討を進める予定である．

第4章 エンドミル加工における 工具アプローチ痕の評価とその補正

参考文献

- 1) 藤井義也, 岩部洋育, 鈴木雅晴: 切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度の関係(第1報,加工誤差生成機構),精密機械, Vol.43, No.511 (1977) pp.807-813.
- 2) 藤井義也, 岩部洋育: ボールエンドミルによる切削力曲線と加工精度との関係, 精密機械, Vol.48, No.5 (1982) pp.649-654.
- 3) 白瀬敬一, 稲村豊四郎, 安井武司: エンドミル加工における加工誤差の要因分析と定量化, 精密工学会誌, Vol.52, No.4 (1986) pp.705-712.
- 4) 中川 平三郎, 広垣 俊樹, 中山 真依子, 大塚 裕俊, 垣野 義昭, 山路 伊和夫: 5軸制御マシニングセンタによる多刃エンドミル加工面の高精度化ー軸方向切削幅制御による側面切削時の切削抵抗一定化ー, 精密工学会誌, Vol.69, No.3 (2003) pp.385-389.
- 5) 茨木創一, 坂平昌浩, 新家秀規, 松原厚, 垣野義昭: エンドミル加工における切削抵抗の推定法ー主軸モータ電流とサーボモータ電流による切削力ベクトルの幾何学的合成による推定法ー, 精密工学会誌, Vol.70, No.8 (2004) pp.1091-1095.
- 6) H. Iwabe, K. Shimizu and M. Sasaki: Analysis of Cutting Mechanism by Ball End Mill Using 3D-CAD (Chip Area by Inclined Surface Machining and Cutting Performance Based on Evaluation Value), JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, Vol.49, No.1 (2006) pp.28-34.
- 7) 岩部 洋育, 竹本 和博, 今井 純一: エンドミルによる高速加工に関する研究(輪郭加工による加工精度と誤差要因), 日本機械学会論文集(C編), Vol.63, No.612 (1997) pp.2878-2885.
- 8) 鈴木 康彦, 松原 厚, 垣野 義昭: 加工パスの最適化による真円精度向上に関する研究, 精密工学会誌, Vol.70, No.11 (2004) pp.1397-1401.
- 9) JIS B 6190-1, 工作精度試験方法通則ー第1部: 幾何精度試験 (2016).

第5章 結 論

第5章

結 論

本研究では、数値制御工作機械による加工の高度化技術の開発を通じて作業工数の削減を実現し、ものづくり人材不足の解消と市場ニーズに対応可能な柔軟な生産システムの構築に貢献することを目的に、数値制御工作機械により生成される加工面に発生する加工誤差の評価方法を提案するとともに、その評価結果から各誤差要素の加工面への転写特性を明らかにし、その転写特性に基づいた加工面の面品位向上技術の検討を行った。本研究により得られた結論と今後の研究課題を以下に整理する。

5.1. 研究成果のまとめ

まず第2章では、回転軸の運動方向反転時の挙動を評価するための測定方法および加工試験方法を提案し、その有効性を検証するために、3つのレーザ変位計と基準球とからなる測定装置を開発して実際に測定実験を行うとともに、実加工試験を行って加工結果と測定結果の違いについて考察した。さらに、その結果に基づいた補正方法を提案し、その有効性を実加工試験により検証した。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

- (1) 2つの回転軸を組み合わせて動作させることで、回転軸の運動方向反転時の挙動を直進軸の挙動と分けて測定できる。
- (2) 提案した測定方法と同じ運動でボールエンドミル加工を行うと、回転軸の運動方向反転時の挙動が加工面に転写され、加工結果から回転軸の運動方向反転時の挙動を評価できる。
- (3) 測定結果と同様の運動で加工を行うと、回転軸の接線方向の動的精度と加工面との位置関係により測定結果とは異なる形状が得られる。
- (4) 加工面に対して凸形状となる軌跡誤差は、工具径との関係により加工面には転写されにくい。
- (5) 凸形状の軌跡誤差がもつ上記特性を用いることで、軌跡誤差が加工面に及ぼす影響を軽減することが可能である。

実際の同時5軸加工における加工面不良に関しても、本研究で判明した要因が大きく関与していると考えられる。本研究で提案した方法により、運動方向反転

第5章 結 論

時における送り駆動系の運動特性による加工誤差の軽減が期待されるが、実際の加工結果にはさらに、工具経路、工具径、工具と被削材の位置関係、被削材の形状といった様々な要素が影響することから、今後もこれら複数の要素との関係を調査する必要がある。

第3章では、回転軸の運動方向反転動作に伴う軸方向変位に着目し、その挙動を評価するための測定方法と、軸方向変位が加工面にどのような影響を及ぼすのか評価するための加工試験を提案し、実際の5軸制御マシニングセンタの傾斜軸に適用して測定と加工試験とを行った。さらに、加工精度を向上させるための一つの方法として、軸方向変位の測定結果に基づいて直進軸の運動を補正することで軸方向変位による影響を補正する方法についても検討し、実験によりその有効性を検証した。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

- (1) ウォームギヤ駆動の回転軸では、回転軸の運動方向反転時には軸方向変位が生じる場合があり、その軸方向変位は加工結果に影響を及ぼしている。
- (2) 評価対象の回転軸とほかの直進軸または回転軸の同期運動による加工方法により、回転軸の軸方向変位による影響を的確に評価できる。
- (3) 回転軸の軸方向変位による影響は、回転軸と平行な軸を用いて補正が可能であり、補正により加工精度を向上できる。

実際の5軸制御加工においても、回転軸の運動方向反転時に生じる軸方向変位は発生し、加工結果に影響を及ぼしていると考えられる。本研究で提案した評価方法と補正方法により、5軸制御加工精度を向上できると期待される。A軸のうえにのったC軸についても運動方向の反転による軸方向の変位が生じていると考えられ対応が必要となるが、その場合にはA軸の回転角度によりC軸回転中心の向きが変化するため、複数の直進軸による補正が必要になることから、今後さらなる補正方法の検討が必要となる。

第4章では、工具が加工面へアプローチする状況の中でも、加工の中断により工具を加工面から一旦離れた後に同一箇所へアプローチした場合の加工面に着目し、工具経路と加工面に生じる工具アプローチ痕との関係を調査した。さらに、凹形状に発生する工具アプローチ痕を低減する方法として、工具抜け動作に対するアプローチ動作の円弧中心位置をオフセットさせることにより、意図的に凸形状の工具経路を発生させることで凹形状の誤差を相殺する方法を採用し、その補正に必要なオフセット量を計算式より算出する方法を提案し、実験によりその有効性を検証した。その結果、以下に示すことが明らかとなった。

第5章 結 論

- (1) アプローチ半径の違いによる加工痕への影響は、アプローチ半径が小さくなるにつれより急峻な加工痕が発生するが、加工痕の深さへの影響はない。
- (2) 工具抜け部とアプローチ部の加工面形状の差は、工具半径方向の切込み量の変化率の違いによって生じる工具変形量と工具半径方向の切込み量との関係によって決まる。
- (3) 工具抜け動作に対するアプローチ動作の円弧中心位置を、オフセットさせることでアプローチ痕を補正でき、提案した方法によってオフセット量を計算できる。

実際のボールエンドミルを用いた加工においても、工具アプローチ痕が発生することで、加工面品位に悪影響を及ぼしていると考えられる。本研究で提案した方法により、補正に必要なオフセット量を求めることができ、工具アプローチ痕の軽減が期待されるが、工具アプローチ痕を完全になくすには至っていない。工具アプローチ痕の発生には、工具の種類や突出し量、被削材の種類や形状といった、様々な条件が影響することが考えられることから、今後も継続した調査が必要である。

本研究では、数値制御工作機械における加工誤差を発生させる要因を、送り駆動系の運動特性に起因した加工誤差と送り駆動系の運動特性以外に起因した加工誤差、さらに送り駆動系の運動特性に起因した加工誤差を、送り方向の運動精度に起因した加工誤差と送り方向以外の運動精度に起因した加工誤差に分類し、その動的精度の測定方法や加工面への影響を調査する加工実験方法を含む評価方法を提案した。そして、これにより明らかとなったそれぞれの関係性から、加工誤差を削減する方法を示した。とくに、本研究では運動精度に起因した加工誤差のうち加工面に大きな影響を及ぼす、回転軸の運動方向反転動作に伴う動的精度に着目した。また、原因となる送り駆動軸系の精度向上による改善だけでなく、他の送り駆動系を用いてこれら加工誤差を削減することが可能であることも実験結果により示された。

各章で得られた結果より、これら複数の加工誤差要因を持つ工作機械の高精度化を機械的改善方法だけではなく、制御面から改善できることを示すことで、工作機械の高精度化に新たな進展をもたらすととともに、さらには生産システムにおける生産性の向上・工数削減に貢献できると考えられる。しかし、本研究で提案した補正方法の補正量を求めるには、その多くが工具経路、工具径、工具と被削材の位置関係、被削材の形状といった様々な要素が存在しており、いまだ他の要素との関係性の調査が完了していないことから、さらなる調査が必要である。

第5章 結 論

5.2. 今後の研究課題

今後の研究課題として、以下のものがあげられる。

- (1) 第 2 章で提案した方法により、送り駆動系の送り方向の運動精度である、回転軸運動方向反転時の送り方向変位に起因した加工誤差の軽減が期待されるが、この加工結果には、工具経路、工具形状、工具と被削材の位置関係、被削材の形状といった様々な要素が影響することから、今後これら複数の要素と加工結果の関係を調査するとともに、効果的な補正方法の検討を進める。
- (2) 第 3 章では、送り駆動系の送り方向以外の運動精度である、回転軸の運動方向反転に伴う軸方向変位に起因した加工誤差の軽減方法を提案したが、回転軸中心の軸方向以外への位置や傾きといった各方向への動的誤差も加工面に大きな影響を及ぼすことから、それら各要素と加工面との関係についても調査するとともに、効果的な補正方法の検討を進める。
- (3) 第 2 章および第 3 章で、回転軸の運動方向反転時の運動精度に起因した加工誤差の軽減方法を提案したが、運動方向反転時以外でも回転軸の運動精度は加工面に大きな影響を及ぼしており、回転軸自体の運動精度向上だけでは改善が困難な状況が存在することから（例えば、一般的 NC 工作機械の最小指令単位である 0.001° の角度誤差が発生した場合、回転中心から 300mm 離れた場所では、約 $5\mu\text{m}$ の誤差が発生する。）、直進軸を用いた補正技術についてさらに検討を進める。
- (4) 第 4 章で提案した方法により、工具アプローチ痕に対し、補正に必要なオフセット量を求めることができ、工具アプローチ痕の軽減が期待されるが、今回調査した工具アプローチ痕の発生状況は、抜け動作後に同一箇所へのアプローチといった状況に限られている。今後は、等高線加工といった工具の抜けとアプローチの順番が異なる加工や、フィードフォワード時に発生する加工痕への適用等を検討する。また、工具の種類や突出し量、被削材の種類や形状といった様々な条件と工具アプローチ痕との関係を調査するとともに、効果的な補正方法の検討を進める。
- (5) 本研究で提案した方法により、送り駆動系の送り方向の運動精度に起因した加工誤差、送り駆動系の送り方向以外の運動精度に起因した加工誤差、送り駆動系の運動特性以外に起因した加工誤差の軽減が期待されるが、いずれの条件に対してもこれに必要な補正量を求めるには、工具経路、工具

第5章 結 論

径，工具と被削材の位置関係，被削材の形状といった，様々な情報を必要としており，現在 NC 装置に引き渡されている情報だけでこれを求めることができない．このことから今後，NC 装置と CAD や CAM といった，周辺機器との情報共有についても調査と研究を進める．

以上の課題を解決することにより，数値制御工作機械による加工精度をさらに向上させることで磨き作業といった後工程等の工数削減を実現し，ものづくり人材不足の改善に貢献することが期待される．また，これら加工精度の向上により高い汎用性を有する 5 軸制御マシニングセンタの普及が進むことで，市場ニーズに対応可能な柔軟な生産システムの実現が期待される．

付 録

付録 A

変位センサの仕様

第2章および第3章で使用した変位センサの仕様を示す。表 A.1 は渦電流式変位センサ：EX-305(アンプユニット：EX-201)，表 A.2 は接触式変位センサ：GT2-H12K，表 A.3 はレーザー式変位センサ：IL-S025，表 A.4 は渦電流式変位センサ：EX-008(アンプユニット：EX-501)の仕様である¹⁾。

Table A.1 Specification of EX-305(Amplifier unit: EX-201)

EX-305(Amplifier unit: EX-201)		
Shape		φ5.4 Cylindrical
Measuring range		0~1mm
Analog output	Output voltage	
	Output current	
	Resolution	
	Linearity	
	Response frequency	HIGH
	LOW	
Disconnection alarm output (N.C.)		NPN: 100mA(40V)max., Residual voltage: 1V max. (N.C.)
Temperature characteristics		0.03% of F.S./°C
Rating	Power supply voltage	
	Current consumption	
Environmental resistance	Enclosure rating	
	Ambiente temperature	
	Relative humidity	
	Vibration resistance	
Weight	Sensor head	Approx. 45g(ixcluding cable)



付 録

Table A.2 Specification of GT2-H12K

GT2-H12K		
Measuring range		12mm
Resolution		0.1μm
Indicated accuracy		1.0μm
Measuring force	Downward mounting	1.0N
	Side mounting	0.9N
	Upward mounting	0.8N
Mechanical response		10Hz
Operation indicator light		2-color LED (red, green)
Environmental resistance	Enclosure rating	IP67
	Ambiente temperature	-10~+60°C(No freezing)
	Relative humidity	35~85% RH(No condensation)
	Vibration resistance	10~55Hz, Double amplitude 1.5mm, 2 hours in each of X,Y,Z
Material	Main body	Main body cast: Zinc die-casting, Indicator: Polyarylate, Dust boot: NBR
	Dust boot	NBR
	Contact	TYPE304 Stainless steal, Super-tough tungsten alloy
Weight	Sensor head	Approx. 95g(excluding cable)



付 録

Table A.3 Specification of IL-S025

IL-S025		
Mounting distance	25mm	
Measuring range	20~30mm	
Amplifier type	Red semiconductor laser: wavelength 655nm (visible light)	
	Laser class	Class 2 Laser Product (FDA(CDRH)Part1040.10, IEC 60825-1)
	Output	560 μ W
Spot diameter (at the reference distance)	Approx. 25 \times 1200 μ m	
Linerrity	\pm 0.075% of F.S. (When used under 20~25mm)	
	\pm 0.1% of F.S. (When used under 20~30mm)	
Repeatability	1 μ m	
Sampling rate	0.33/1/2/5 ms (Variable to 4 levels)	
Operating indicators	Laser emission warning indicator: Green, Analog range indicator: Orange Reference distance indicator: Red/Green	
Temperature characteristic	0.03% of F.S./ $^{\circ}$ C	
Environmental resistance	Enclosure rating	IP67
	Ambiente light	Incandescent lamp: 10000 lx
	Ambiente temperature	-10~+50 $^{\circ}$ C(No condensation and freezing)
	Relative humidity	35~85% RH(No condensation)
	Vibration resistance	10~55Hz, Double amplitude 1.5mm, 2 hours in each of X,Y,Z
	Pollution degree	3
Material	Housing material: PBT, Metal: SUS304, Packing: NBR, Lens cover: Glass, Cable: PVC	
Weight	Approx. 60g	



付 録

Table A.4 Specification of EX-008(Amplifier unit: EX-501)

EX-008(Amplifier unit: EX-501)		
Shape		M8, Theaded, Non-shielded
Measuring range		0~1mm
Analog output	Output voltage	0~5V (Output impedance 1000Ω)
	Impedance	100Ω
	Output current	4~20mA (Applicable load 0-350Ω)
	Resolution	0.03% of F.S. (RESPONSE =3,4)
	Linearity	±0.3% of F.S. (RESPONSE =2,3,4)
	Response time	0.1ms(RESPONSE=1), 1ms(RESPONSE=2), 10ms(RESPONSE=3), 100ms(RESPONSE=4)
Disconnection alarm output (N.C.)		NPN: 100mA(40V)max., Residual voltage: 1V max.
Temperature characteristics		0.03% of F.S./°C
Rating	Power supply voltage	12~24 VDC ±10%
	Current consumption	220mA max.
Environmental resistance	Enclosure rating	IP67
	Ambiente temperature	-10~+105°C(No freezing)
	Relative humidity	35~85% RH(No condensation)
	Vibration resistance	10~55Hz, Double amplitude 1.5mm, 2 hours in each of X,Y,Z
Weight	Sensor head	Approx. 50g



付録 B

測定器

第 2 章で作成した，レーザ変位計を用いた測定器を図 B.1からB.6に示す．

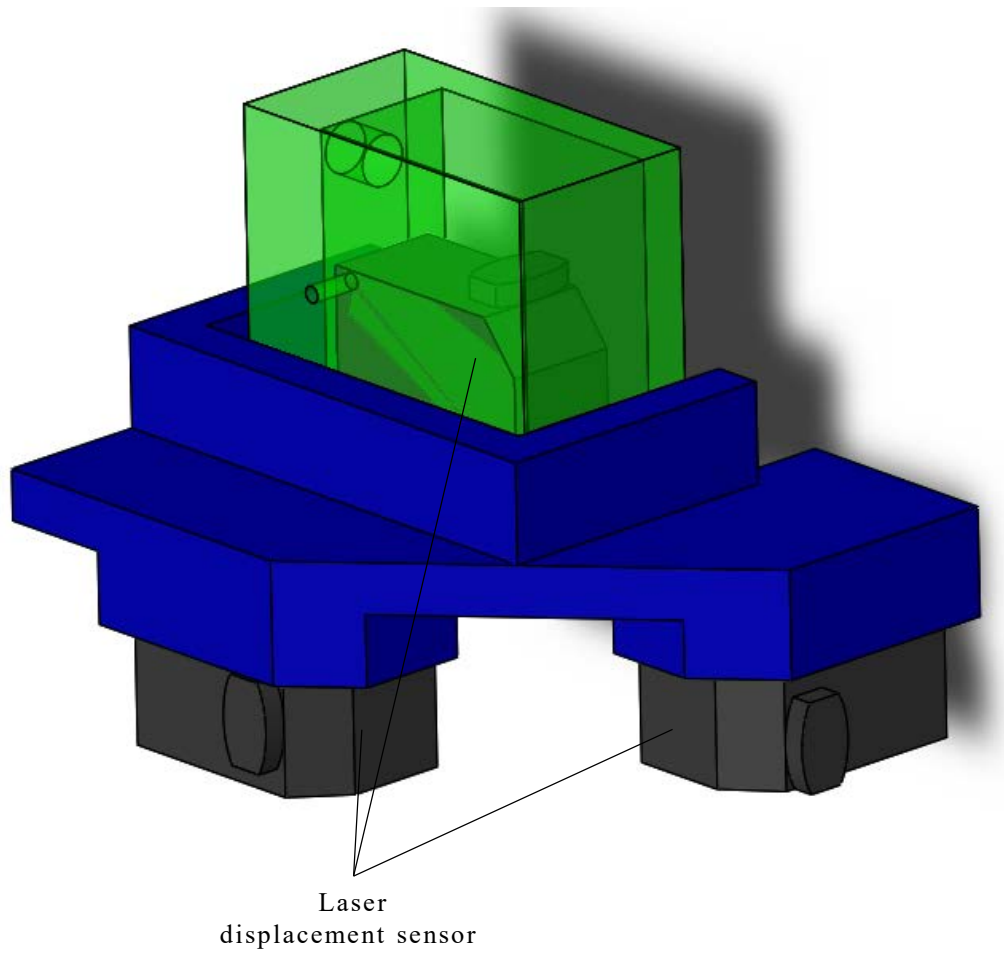


Fig. B.1 CAD-model of developed measurement system

付 録

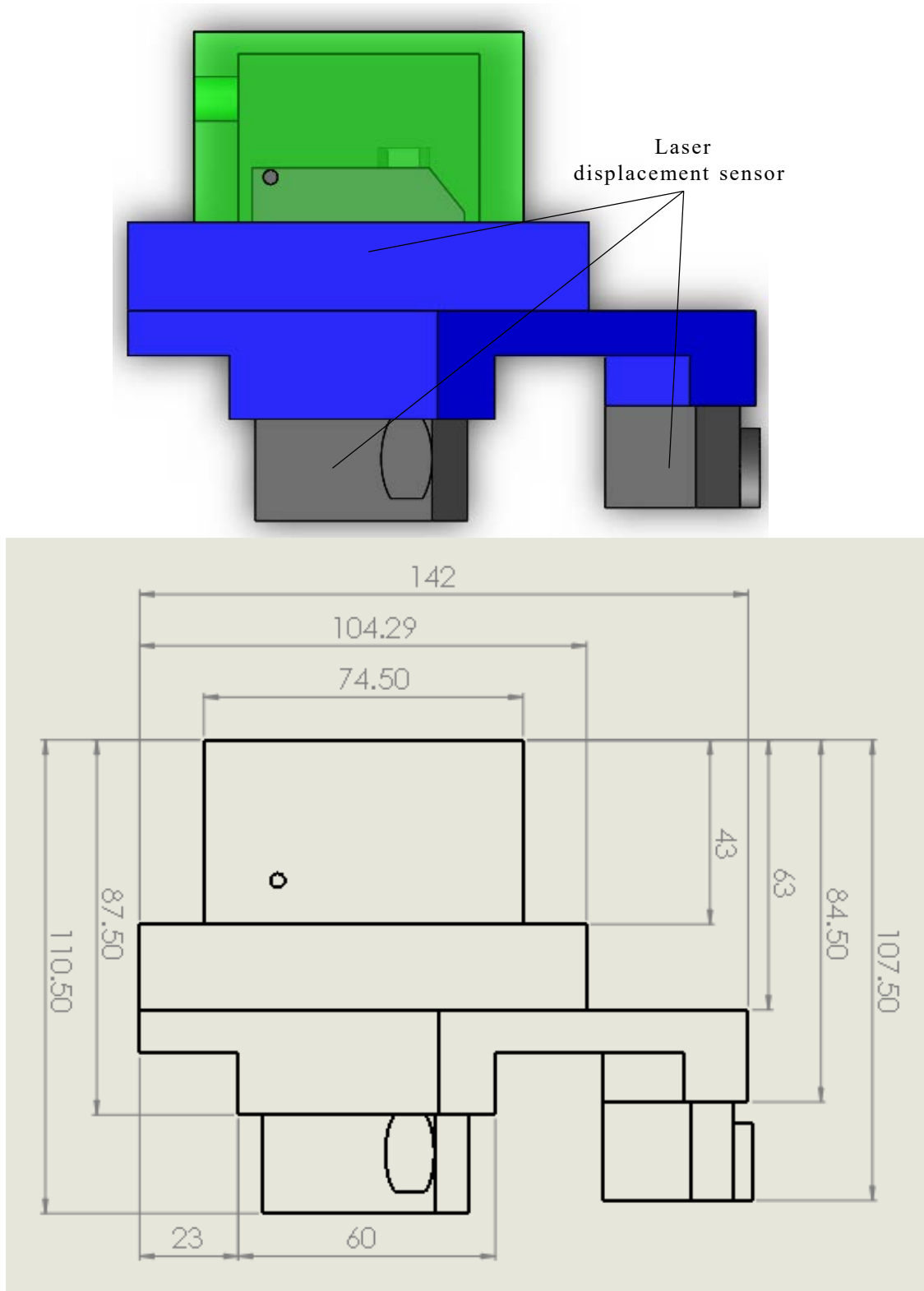


Fig. B.2 Front view

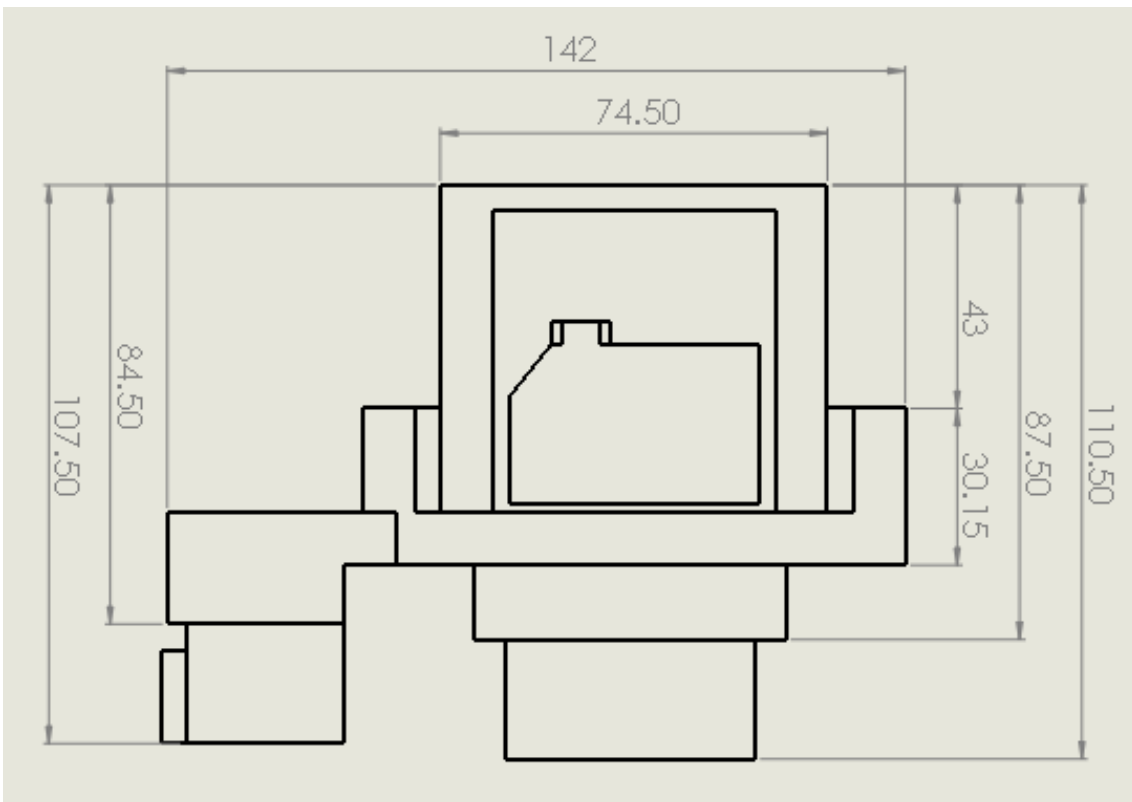
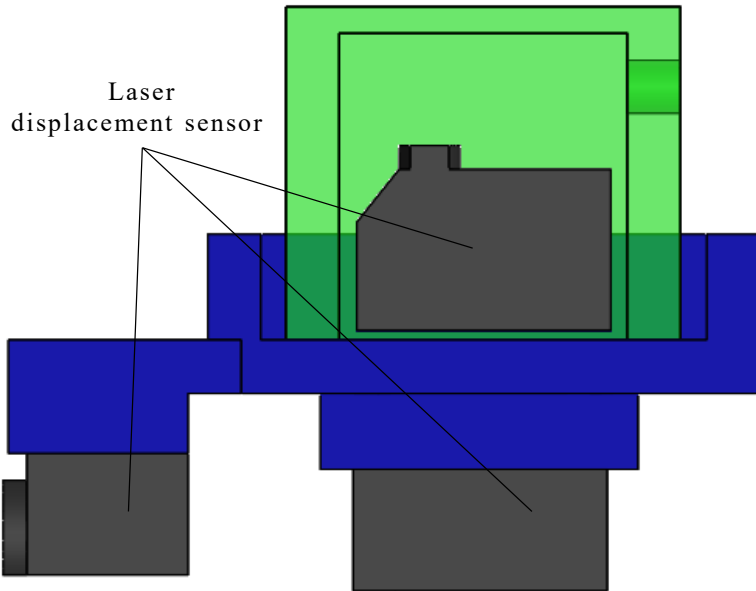


Fig. B.3 Rear view

付 録

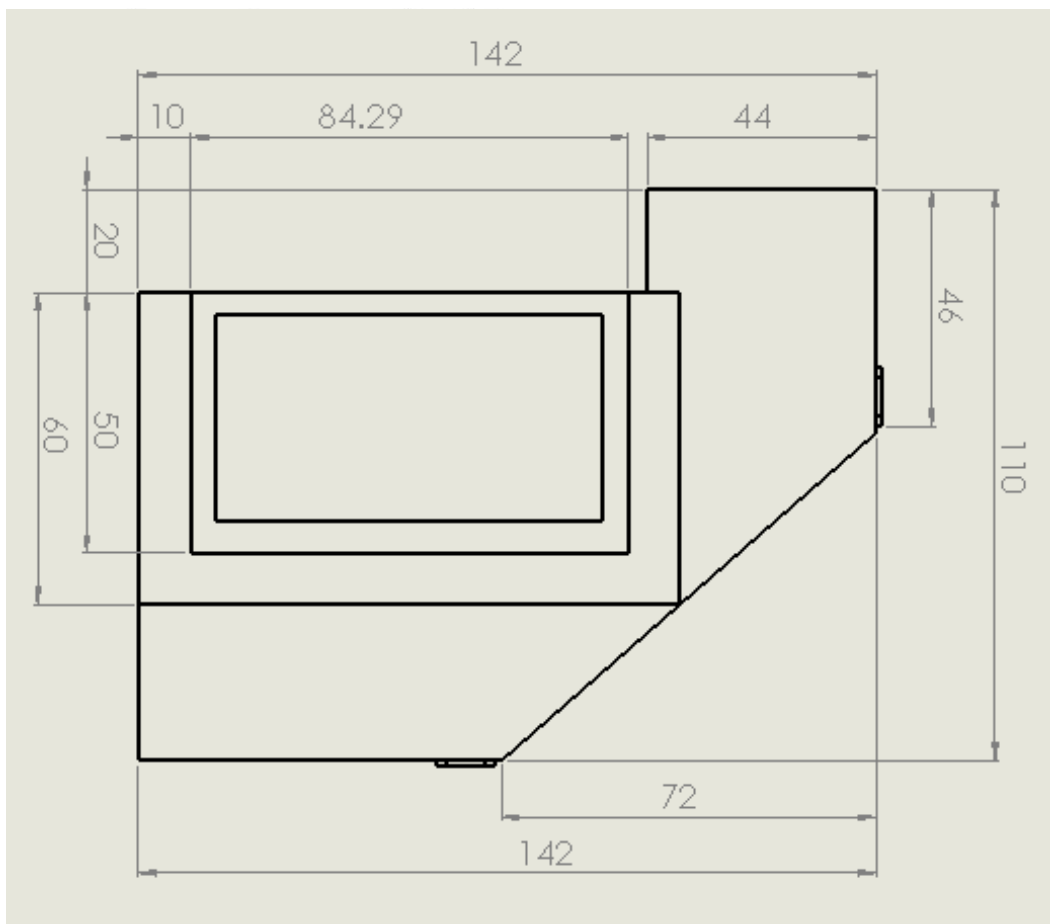
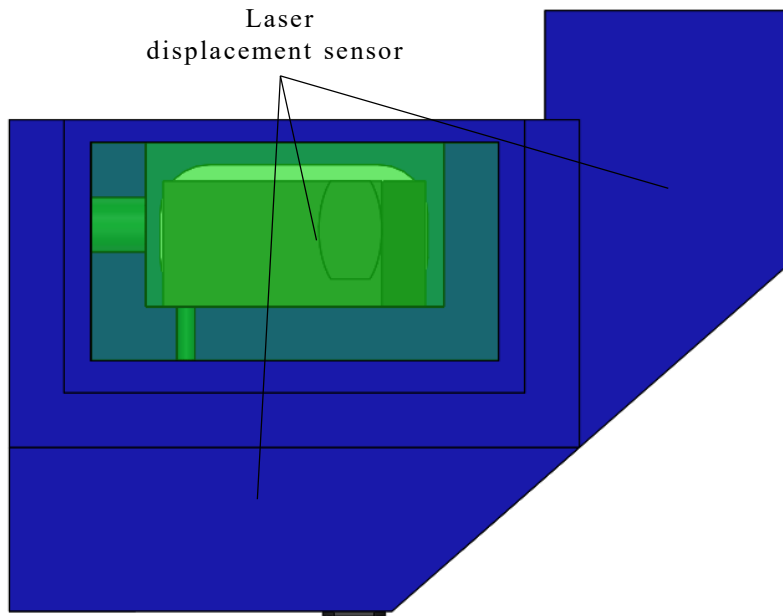


Fig. B.4 Top view

付 録

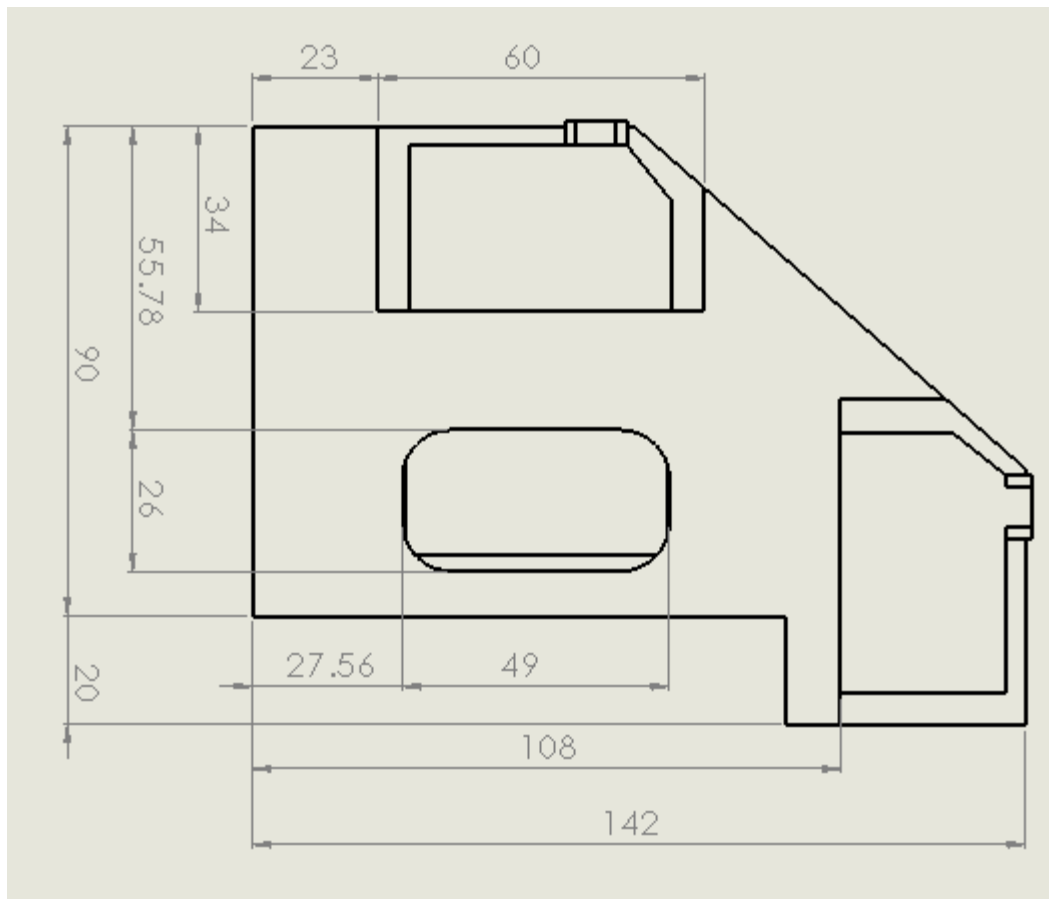
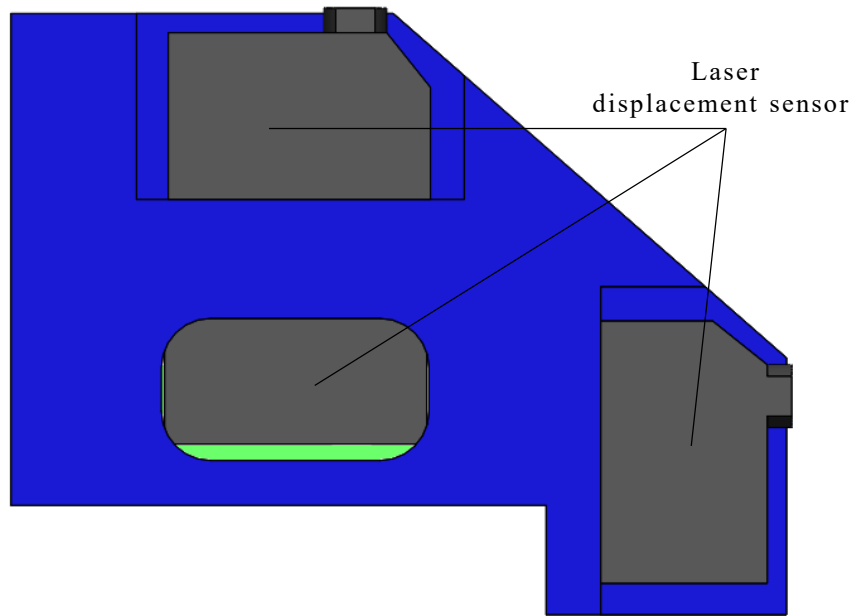


Fig. B.5 Bottom view

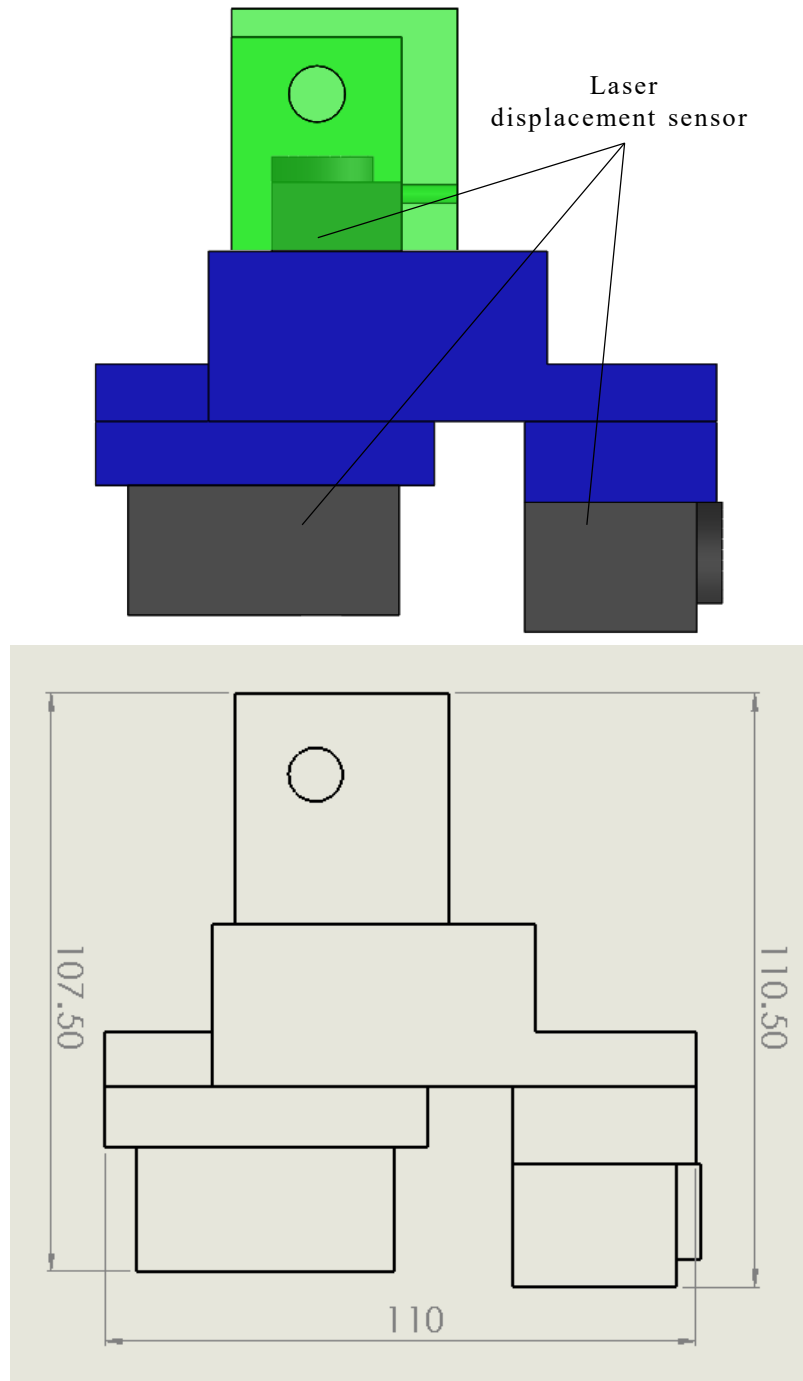


Fig. B.6 Side view

付録 C

ボールバーシステムを用いた

回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価

C.1. 諸 言

ここでは、第2章と同様に回転軸の運動方向反転時の動的挙動を評価することを目的とし、第2章とは別の測定方法および加工試験方法を提案する。

第2章では、直進軸による影響を受けずに回転軸の運動方向反転時の動的挙動を評価するため、基準球とレーザ変位計とを用いた測定器と、同時5軸動作を用いた送り運動による測定方法および加工試験を提案した。ここでは、ボールバーシステムと1つの回転軸と2つの直進軸による同時3軸制御運動をボールバーを用いて測定する方法と同様の運動による加工試験方法を提案する。さらに、回転軸の摩擦トルクを考慮したシミュレーションを行い、測定結果および加工結果と比較することで、摩擦トルクの影響を調査した。

C.2. 評価方法

C.2.1. 測定対象

本実験では、提案する測定方法と加工方法の有効性を検証するため、**図 C.1** に示す 5 軸制御マシニングセンタ NMV1500DCG (DMG 森精機株式会社製¹⁾) を用いて測定実験と実加工試験とを行った。この 5 軸制御マシニングセンタは、主軸を X・Y・Z 軸方向へ移動させる 3 つの直進軸と、テーブルを Y 軸回りに傾斜させる B 軸とテーブルを Z 軸回りに回転させる C 軸とを有する。

また、第2章と異なる測定対象として、2つの回転軸のうち傾斜軸である B 軸ではなく、テーブルを回転させる C 軸を測定対象とした。さらに、補正機能を使用しない状態での回転軸の運動方向反転時の動的精度を捉えるため、バックラッシュ補正と摩擦補正機能を無効にして実験を行った。

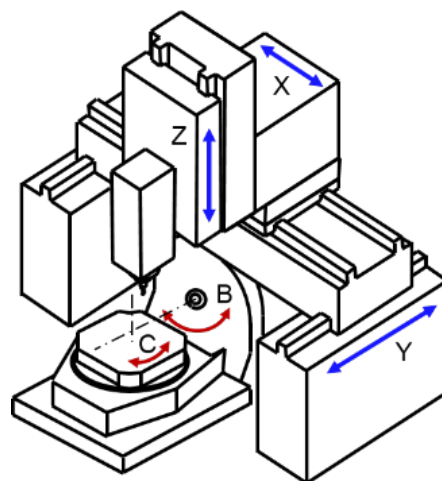


Fig. C.1 Construction of a 5-axis controlled machining center (NMV1500DCG)

C.2.2. 実験方法

本研究で提案される測定方法および加工試験方法は、回転軸と直進軸の同期運動で行われる。この同期運動による工具軌跡は、テーブル座標系において円弧補間となるように定めた。図 C.2 に示すように、このテーブル座標系はテーブルの回転と共に回転し、C 軸の中心に座標原点を定めている。さらに、実験結果を示すためにワーク座標系を定めた。このワーク座標系(${}^W X$, ${}^W Y$)は、図 C.2 に示すように、テーブル座標系(X , Y)の中心位置をワーク中心に移動させることで定めており、テーブルの回転によりワークと共に回転・移動する。図 C.2, C.3 に測定実験と実加工試験の工具軌跡を示し、図 C.4 に実際の実験時のセットアップの様子を示す。

この実験において、加工結果の評価を一般的に普及している測定装置を用いることを可能にするため、テーブル座標系上における工具軌跡を C 軸と X 軸、Y 軸を用いた円弧補間とすることで加工結果を円形状になるようにし、真円度測定装置を用いた加工評価を可能にした。また測定手法には、加工動作と同様の測定動作を採用し、測定器にはボールバーシステム QC20-W (レニショー株式会社製²⁾)を用いた。このボールバーシステムは、2つの鋼球と鋼球間の距離を測定する変位センサを内蔵した可変長のバー、および鋼球を支持する磁気ソケットとから構成される。それぞれの球を主軸側とテーブル側に設置し、測定動作中の2つの球の相対距離の変位を測定する。

これらの経路は、いずれも X 軸、Y 軸および C 軸を用いた同時 3 軸制御運動であり、図 C.5 に示すように、機械座標系において C 軸の回転方向が反転する際に X 軸と Y 軸が反転しないように、かつテーブル座標系において運動軌跡が反時計回りの円弧補間運動(180°で C 軸が反転)となるように経路を設計した。また、加工および測定の際に、図 C.2 におけるテーブル回転中心と被削材中心との距離 r を 25 mm および 50 mm に設定することで、回転中心からの距離に比例して大きくなる回転軸の動的精度による影響を調査した。加工および測定時の X 軸、Y 軸の変位および C 軸の角度変位を図 C.6 に示す。 $r = 25$ mm, 50 mm いずれの半径においても、C 軸の回転方向が反転する 9 秒付近では、X 軸および Y 軸の運動方向が反転していないことがわかる。表 C.1 に加工条件を示す。一刃あたりの送りが一定となるように、送り速度に応じて主軸回転数を設定している。

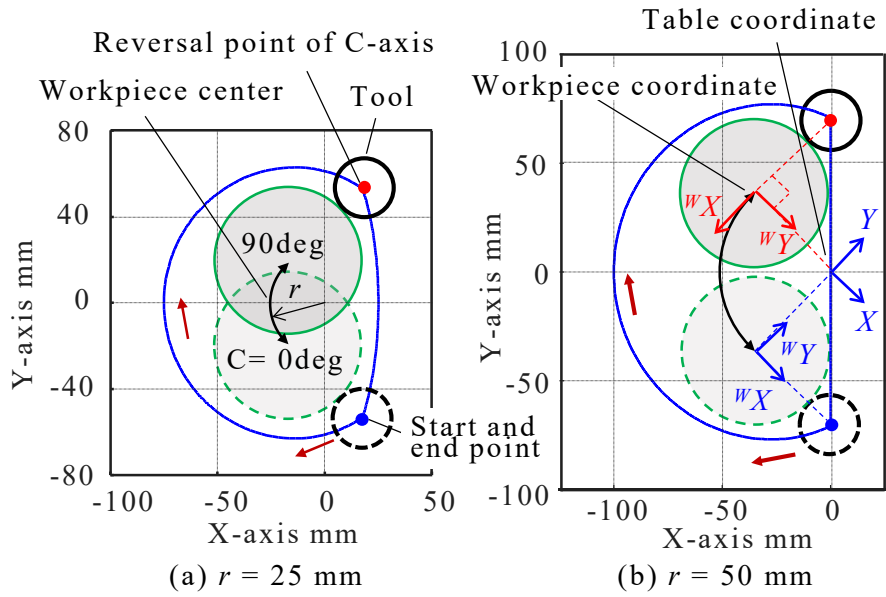


Fig. C.2 Proposed cutting motion

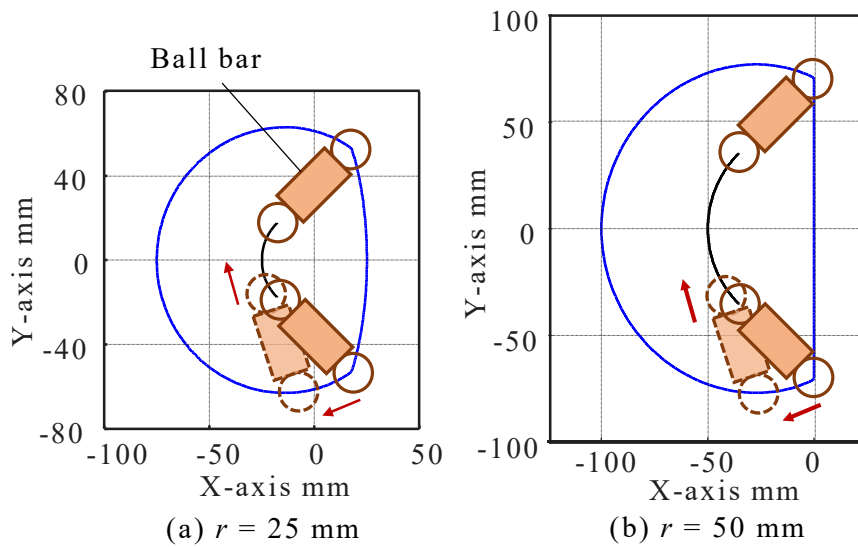


Fig. C.3 Proposed measurement motion

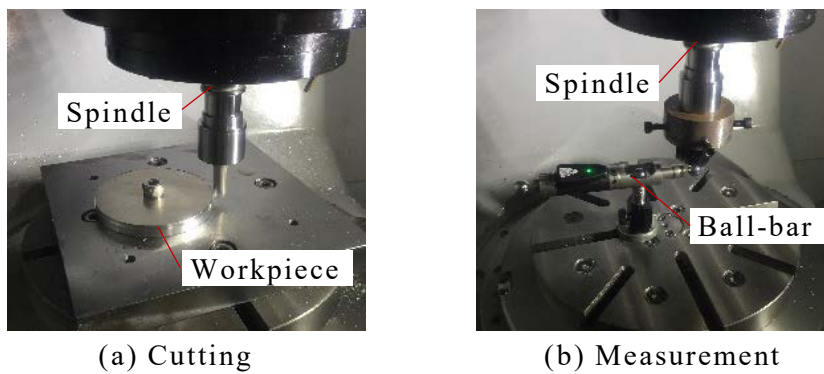


Fig. C.4 Experimental set-up

-----> : Motion direction of the translational axes

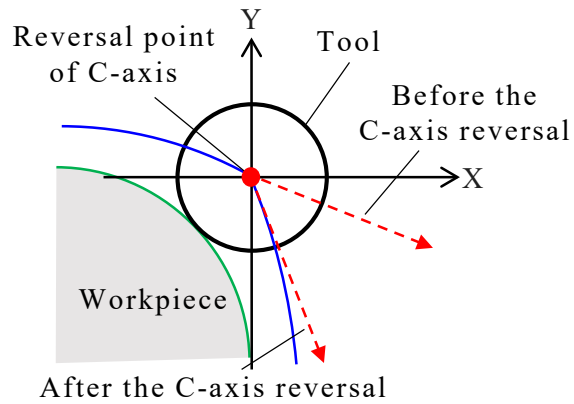


Fig. C.5 Motion direction of the translational axes before and after the C-axis reversal

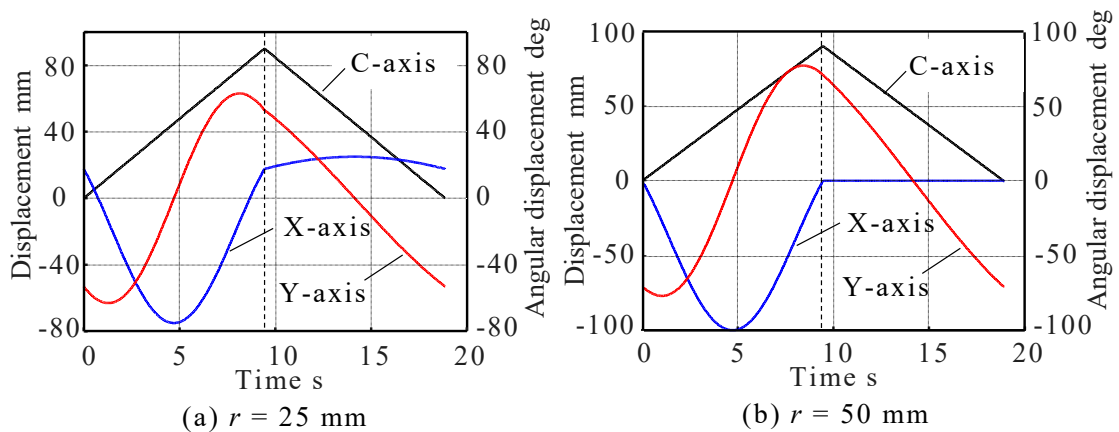


Fig. C.6 Displacement of each axis

Table C.1 Cutting condition

Tool shape	$\phi 12$ square-end mill
Number of flute	2
Workpiece	Aluminum (A5052P)
Feed rate F	1000, 2000, 3000 mm/min
Spindle speed	12000, 24000, 36000 rpm
Feed per flutes	42 $\mu\text{m}/\text{tooth}$
Axial depth of cut	3 mm
Radial depth of cut	0.2 mm
Radius r	25, 50 mm

C.3. シミュレーションモデル

C.3.1. 送り駆動系モデル

NC 工作機械の送り軸は、送り駆動系によって駆動される。本研究では、各軸の動的な挙動が同期運動に及ぼす影響について調査するため、直進軸と回転軸の送り駆動系を 1 慣性系とみなした数学モデルを用いて運動軌跡のシミュレーションを行った³⁾。シミュレーションに用いた C 軸駆動系のブロック線図を図 C.7 に示す。ここで、 K_{pp} はポジションループゲイン、 K_{vp} は速度ループゲイン [$\text{kgm}^2 \cdot \text{rad/s}$]、 T_i は速度ループゲインの積分時間 [s]、 J は慣性モーメント [kgm^2]、 c は粘性減衰係数 [Nms/rad]、 f は摩擦トルク [Nm] である。シミュレーションにより得られる結果は機械座標系上の変位および各変位であるため、これをテーブル座標系に変換して測定結果と比較できるようにする。本研究で行った加工および測定は X 軸、Y 軸、C 軸を動作させる同時 3 軸運動であるため、テーブル座標系における運動軌跡 ${}^T\mathbf{X}_T$ は、機械座標系における運動軌跡 ${}^M\mathbf{X}_T$ および C 軸角度変位 C_{out} を用いて式(C-1)により表される。

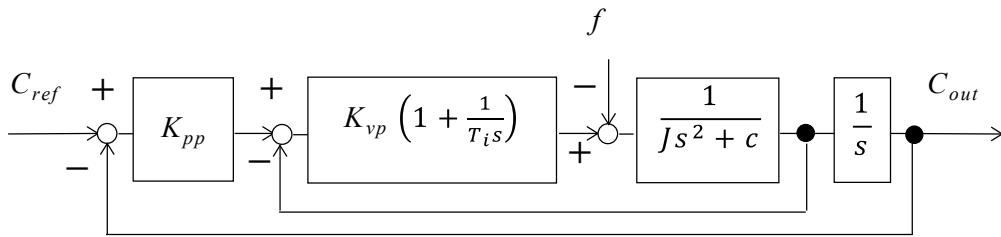


Fig. C.7 Block diagram of C-axis

$${}^T\mathbf{X}_T = \begin{bmatrix} \cos C_{out} & -\sin C_{out} & 0 \\ \sin C_{out} & \cos C_{out} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^M\mathbf{X}_T \quad (\text{C-1})$$

C.3.2. 送り軸の案内面および軸受の摩擦モデル

送り軸の同期運動による輪郭加工の精度が、送り軸の案内面および軸受の摩擦によって影響されることが知られている。また、各送り軸の運動方向反転時に、摩擦トルクが特徴的な挙動を示すことも知られている^{4,5)}。

C 軸運動方向反転中の送り軸の案内面および軸受の摩擦特性を調査するため、正弦波往復運動を行った際のテーブル角度変位とモータトルクを測定した⁶⁾。このテーブル角度変位と摩擦トルクの関係について、その測定結果とシミュレーション結果を図 C.8 に示す。図に示すように、微小角変位領域においては摩擦が非線形なばね特性を有する。本研究では、摩擦トルクの非線

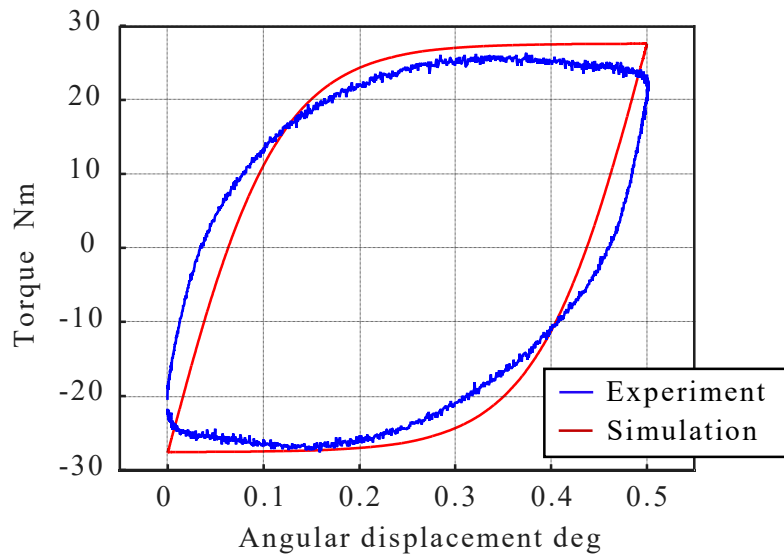


Fig. C.8 Relationship between angular displacement and friction torque of C-axis

形ばね特性をモデル化するため，式(C-2)により表された摩擦モデルを採用した^{4,5)}。

$$f = f_c(2 \tanh(a \cdot |x'|) - 1) \operatorname{sgn}(dx'/dt) \quad (\text{C-2})$$

式中の f_c はクーロン摩擦トルク[Nm]， x' は運動方向反転位置からのテーブル回転角度[rad]そして， a は運動方向反転後の摩擦トルクの立ち上がりを決めるの定数[1/rad]である。

C.4. 実験結果およびシミュレーション結果

C.4.1. 直進軸の動的精度による影響

加工試験により得られた被削材の真円度測定結果を図 C.9 に，ボールバーによる測定結果を図 C.10 に，そのシミュレーション結果を図 C.11 にそれぞれ示す。測定結果は半径方向誤差を拡大して表示している。いずれの結果においても， 180° 付近で運動軌跡に段差状の誤差が生じており，送り速度 F が大きいほどその誤差が大きくなっている。これは，図 C.2 に示す C 軸反転位置より左側の円運動部分において，直進軸の内回りが生じた影響によるものと考えられる。

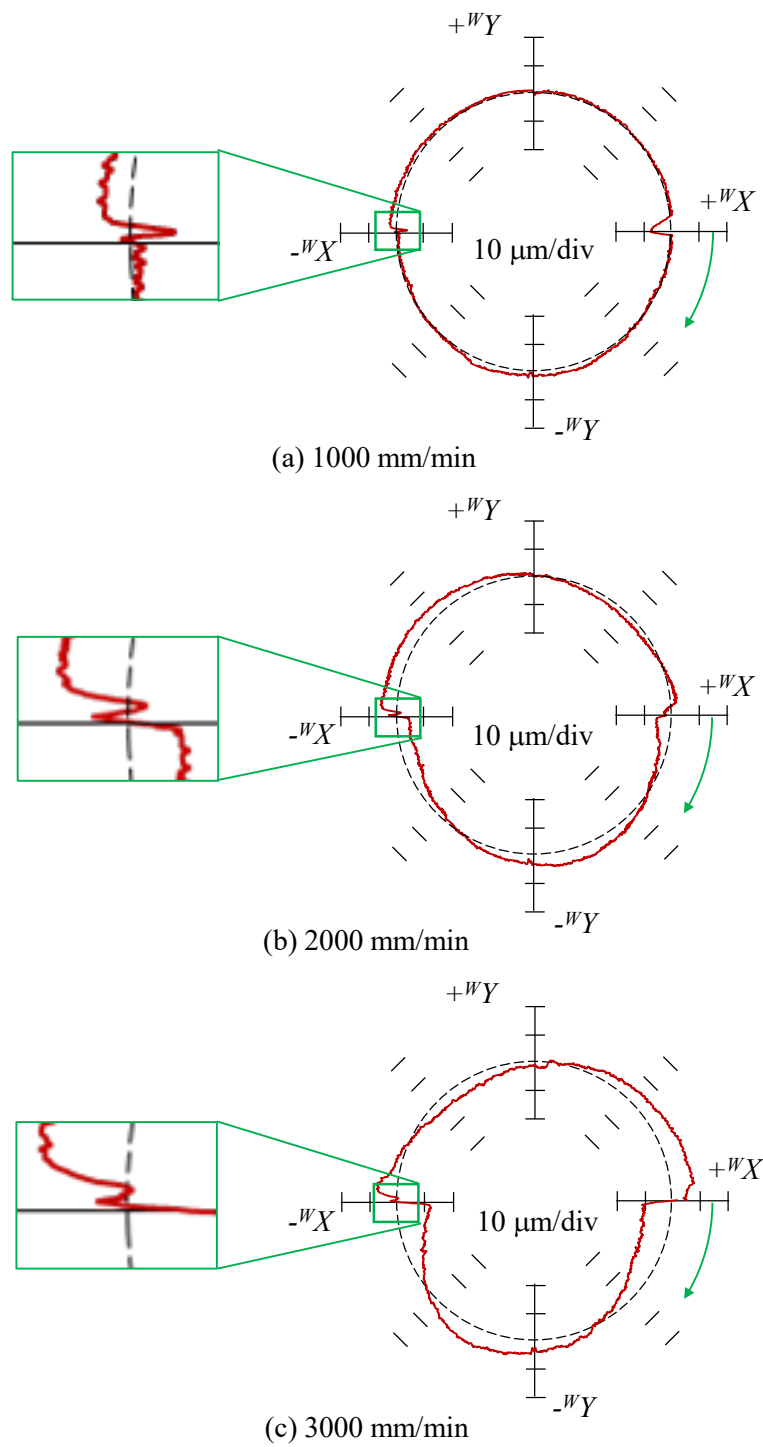


Fig. C.9 Simulation of circular trajectories ($r = 25$ mm)

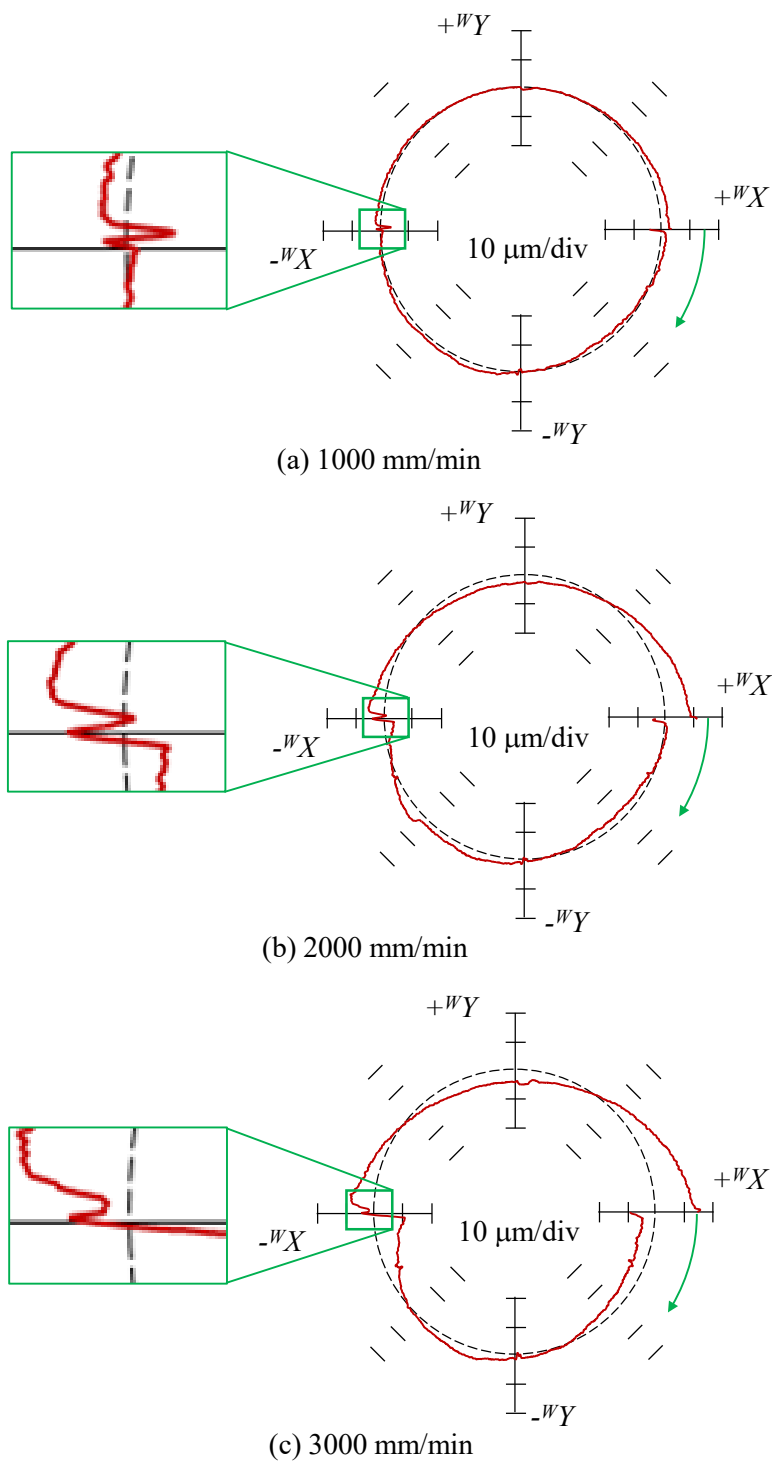
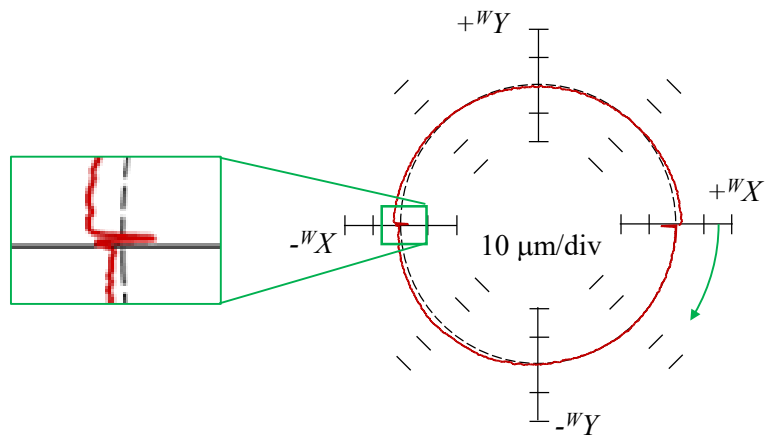
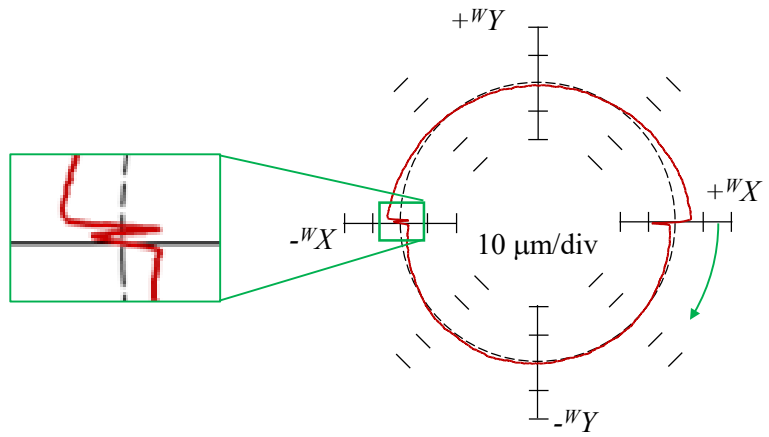


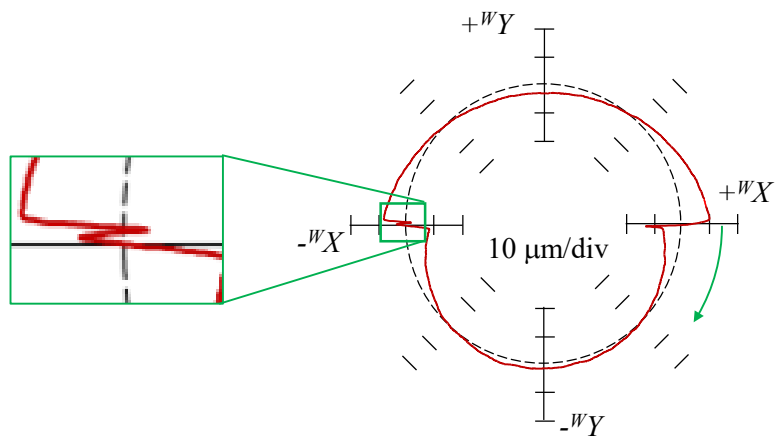
Fig. C.10 Measurement test of circular trajectories ($r = 25$ mm)



(a) 1000 mm/min



(b) 2000 mm/min



(c) 3000 mm/min

Fig. C.11 Cutting test of circular trajectories ($r = 25$ mm)

C.4.2. ワーク設置位置と摩擦の影響

ワークの設置位置 r を 25 mm および 50 mm とした場合の運動軌跡を図 C.12 に示す. 図によると, C 軸の回転方向が反転する 180° 付近で負方向の突起状の誤差が生じている. また, C 軸回転中心からの距離 r に比例してその突起状の誤差が大きくなっており, この誤差は C 軸の動的精度により生じたものであるといえる.

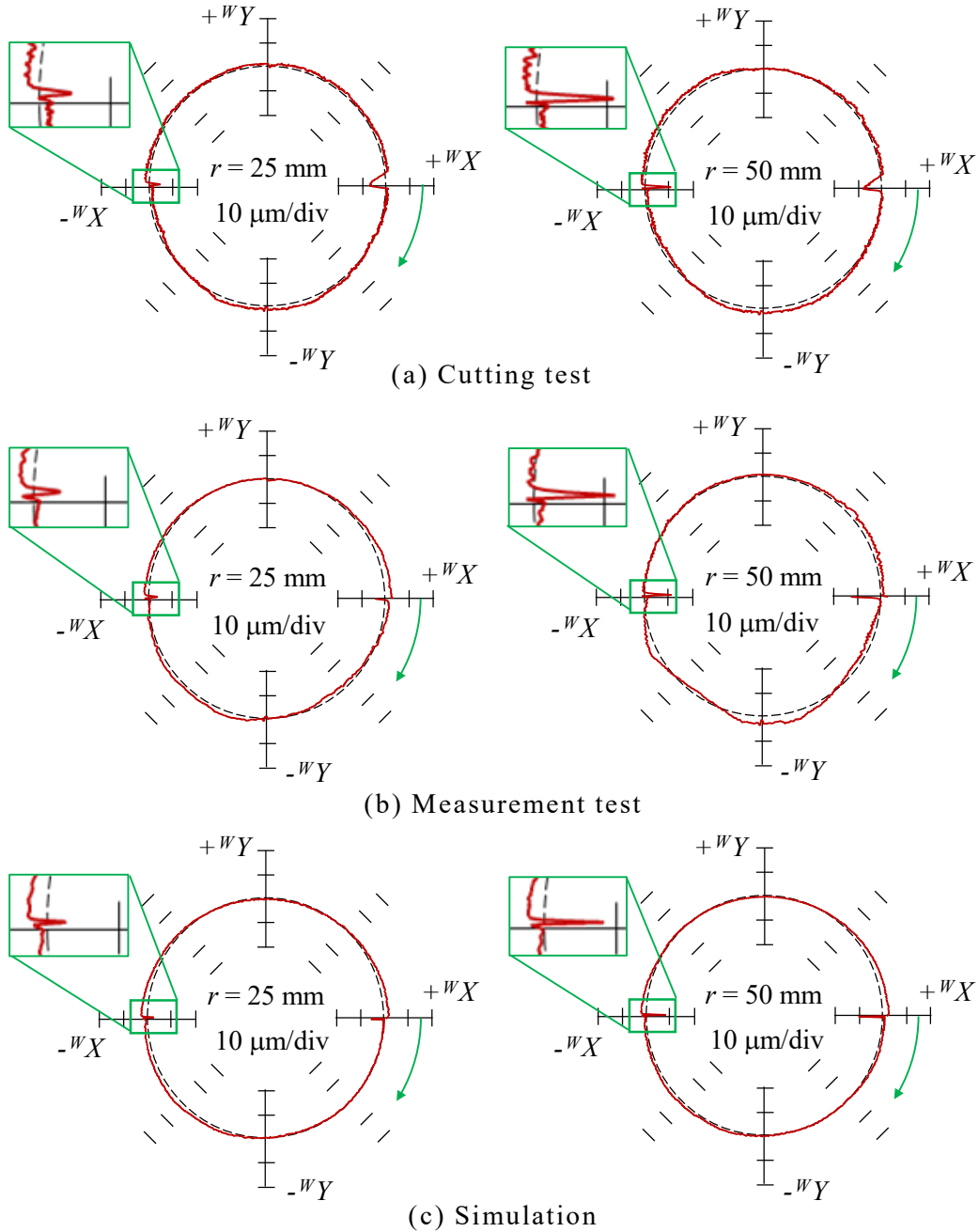
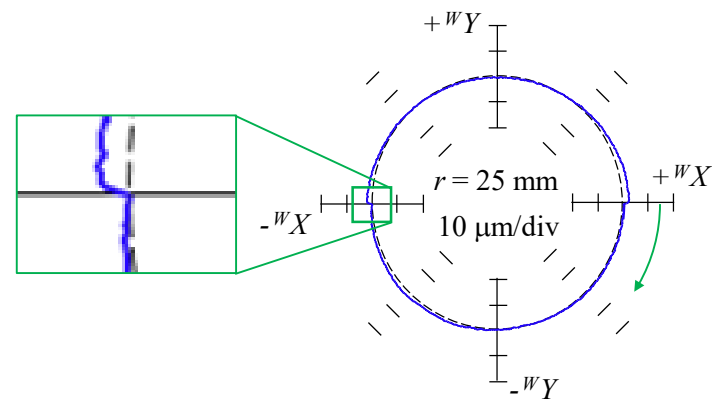


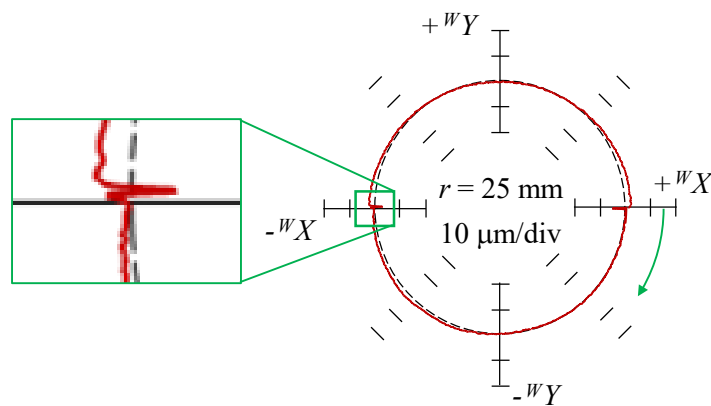
Fig. C.12 Influence of workpiece setting
($r = 25, 50$ mm, $F = 1000$ mm/min)

付 録

C 軸の摩擦トルクを考慮しない場合のシミュレーション結果を図 C.12(a) に、摩擦トルクを考慮した場合の結果を図 C.12(b)に示す。摩擦トルクを考慮しない場合の結果では 180° 付近に負方向の誤差が確認できない。よって、この誤差は C 軸の摩擦トルクにより生じたものである。このように、提案する測定方法により直進軸の半径減少および回転方向反転時における回転軸の挙動を評価することができ、また反転時の動的精度をシミュレーションにより的確に予測することができる。



(a) Without friction



(b) With friction

Fig. C.13 Influence of friction torque
($F = 1000$ mm/min, $r = 25$ mm, simulation)

C.5 結 言

本研究では，回転軸の運動方向反転時の挙動を評価するためのボールバーを用いた測定方法および同じ運動による加工試験方法を提案し，その有効性を検証するため，実際に測定実験を行うとともに実加工試験を行った．さらに，摩擦トルクを考慮したシミュレーションを実施し，実験結果と比較することにより，回転軸の摩擦トルクの影響を調査した．その結果，以下に示すことが明らかとなった．

- (1) 提案した測定方法により，直進軸の半径減少および回転軸の回転方向反転時の挙動を評価できる．
- (2) C 軸の回転方向が反転する際には，C 軸摩擦トルクの影響により運動軌跡に負方向の突起状の誤差が生じる．
- (3) 回転方向反転時の挙動を，提案したシミュレーション方法によりの確に予測することができる．

第 2 章で提案した回転軸の運動方向反転時の挙動の評価方法と同様に，ここで提案した評価方法により 5 軸制御加工精度の評価を可能にするとともに，今後はこの測定データを基にした補正データ作成による同時 5 軸加工の高精度化が期待できる．

付 録

参考文献

- 1)DMG森精機株式会社: <https://www.dmgmori.co.jp/>.
- 2)レニショー株式会社: <http://www.renishaw.jp/>.
- 3)R. Sato and M. Tsutsumi: Dynamic synchronous accuracy of translational and rotary axes, *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, Vol.4, No.3-4 (2011) pp. 201-219.
- 4)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.
- 5)佐藤隆太, 寺島義道, 堤正臣: 微小変位領域の摩擦特性を考慮した象限突起補償器, *精密工学会誌*, Vol.74, No.6 (2008) pp.622-626.
- 6)R. Sato, K. Nishio, K. Shirase, G. Campatelli and A. Scippa: Influence of Motion Error of Translational and Rotary Axes onto Machined Surface Generated by Simultaneous Five-axis Motion, *Proceedings of the 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting*, (2014) pp.269-274.

図表一覧

図表一覧

第2章 5軸制御マシニングセンタにおける回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正

Fig. 2.1 Measurement system

Fig. 2.2 Configuration of the five-axis controlled machining center
(EGURO_E-32V)

Fig. 2.3 Measurement method for comparison of sensors

Fig. 2.4 Comparison of curved surface measurement results for different
sensor types

Fig. 2.5 Influence of surface geometry on measurement results for eddy
current-type displacement sensor

Fig. 2.6 Influence of surface geometry to the measure results

Fig. 2.7 Comparison of frequency responses

Fig. 2.8 Developed measurement system

Fig. 2.9 Schematic of measurement movement at C-axis rotational angle of
 180°

Fig. 2.10 Measurement motion of each axis

Fig. 2.11 Comparison of measured motion errors

Fig. 2.12 Coordinate transformation between machine and A-axis coordinate
systems

Fig. 2.13 Measured motion errors along A-axis tangential direction

Fig. 2.14 Cylindrical machining motion

Fig. 2.15 Cylindrical machining condition

Fig. 2.16 Machined workpiece

Fig. 2.17 Tool trajectory with a convex motion error

Fig. 2.18 Cutting test for convex error

Fig. 2.19 Relationships between width of motion error W and height of
machining error l with various tool radius R

Fig. 2.20 Relationships between width of motion error W and height of
machining error l with various height of motion error H

Fig. 2.21 A measurement result of the compensated motion errors at
 $\theta_A = -27.0^\circ$

Fig. 2.22 Cylindrical machining with compensation at $\theta_A = -27.0^\circ$

図表一覧

Table 2.1 Axis specification of the five-axis controlled machining center

Table 2.2 Specification of the displacement sensors

Table 2.3 Measurement motion of C, A-axis

Table 2.4 Experimental condition for machining

第3章 5軸制御マシニングセンタにおける回転軸運動方向反転に伴う軸方向変位の評価とその補正

Fig. 3.1 Worm gear drive of A-axis

Fig. 3.2 A-axis motion in measurement test ($-30.0^\circ \Leftrightarrow 0.0^\circ$)

Fig. 3.3 Measurement system for axial displacement

Fig. 3.4 Measurement results of axial displacement

Fig. 3.5 Measurement results of each A-axis motion ranges

(A-axis : $-30.0^\circ \Leftrightarrow 0.0^\circ$, $-30.0^\circ \Leftrightarrow -15.0^\circ$)

Fig. 3.6 Flat surface machining test

Fig. 3.7 Y-, Z-axis motion trajectory of A-, Y-, Z-axis simultaneous motion

($-30.0 \Rightarrow \underline{0.0} \Rightarrow -30.0^\circ$)

Fig. 3.8 Y-, Z-, A-axis motion of flat surface machining test

(A-axis : $-30.0 \Rightarrow \underline{0.0} \Rightarrow -30.0^\circ$)

Fig. 3.9 Comparison of machined surface of flat surface machining test

Fig. 3.10 Circular machining test

Fig. 3.11 A-, C-axis motion of circular machining test

(A-axis : $0.0^\circ \Leftrightarrow -30.0^\circ$)

Fig. 3.12 Comparison of machined results by circular machining test without compensation

Fig. 3.13 Comparison of measured displacement without compensation by polar plot

Fig. 3.14 Drawing method for measurement results

(A-axis : $0.0^\circ \Leftrightarrow -30.0^\circ$)

Fig. 3.15 Measurement results with least-square method

Fig. 3.16 Compensation data by linear approximation

(A-axis $-30.0 \Rightarrow 0.0 \Rightarrow -30.0^\circ$)

Fig. 3.17 Results of flat surface machining with compensation

Fig. 3.18 Results of circular machining with compensation

Table 3.1 Cutting condition for flat machining

Table 3.2 Cutting condition for circular machining

図表一覧

第4章 エンドミル加工における工具アプローチ痕の評価とその補正

Fig. 4.1 Cutting test to investigate tool approach mark

Fig. 4.2 Results of cutting tests

Fig. 4.3 Generation of tool approach mark (Depth of cut : 0.5mm)

Fig. 4.4 Cutting test with -5mm offset of approach and retract motions

Fig. 4.5 Results of cutting tests with -5mm offset of approach and retract motion at each depth of cut

Fig. 4.6 Depth of tool approach mark by depth of cut

Fig. 4.7 Generation of actual tool approach mark

Fig. 4.8 Oval path on perpendicular plane to machined surface

Fig. 4.9 Machined surface generated by retract motion

Fig. 4.10 Machined surface generated by restart of machining

Fig. 4.11 Function point during increasing tool deflection

Fig. 4.12 Compensation tool paths by offsetting

Fig. 4.13 Results of cutting tests with compensation

Table 4.1 Cutting condition

Table 4.2 Calculated offsets

付録A 変位センサの仕様

Table A.1 Specification of EX-305(Amplifier unit: EX-201)

Table A.2 Specification of GT2-H12K

Table A.3 Specification of IL-S025

Table A.4 Specification of EX-008(Amplifier unit: EX-501)

付録B 測定器

Fig. B.1 CAD-model of developed measurement system

Fig. B.2 Front view

Fig. B.3 Rear view

Fig. B.4 Top view

Fig. B.5 Bottom view

Fig. B.6 Side view

付録C ボールバーシステムを用いた回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価

Fig. C.1 Construction of a 5-axis controlled machining center
(NMV1500DCG)

Fig. C.2 Proposed cutting motion

Fig. C.3 Proposed measurement motion

図表一覧

Fig. C.4 Experimental set-up

Fig. C.5 Motion direction of the translational axes before and after the C-axis reversal

Fig. C.6 Displacement of each axis

Fig. C.7 Block diagram of C-axis

Fig. C.8 Relationship between angular displacement and friction torque of C-axis

Fig. C.9 Simulation of circular trajectories ($r = 25$ mm)

Fig. C.10 Measurement test of circular trajectories ($r = 25$ mm)

Fig. C.11 Cutting test of circular trajectories ($r = 25$ mm)

Fig. C.12 Influence of workpiece setting ($r = 25, 50$ mm, $F = 1000$ mm/min)

Fig. C.13 Influence of friction torque
($F = 1000$ mm/min, $r = 25$ mm, simulation)

Table C.1 Cutting condition

業績一覧

投稿論文

- 1) T. Nishiguchi, R. Sato and K. Shirase: Evaluation of dynamic behavior of rotary axis in five-axis machining center (Behavior around motion direction changes), Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.10, No.5 (2016).
- 2) 西口直浩, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 5軸制御マシニングセンタにおける回転軸運動方向反転時の動的挙動の評価とその補正, 精密工学会誌, Vol.82, No.10 (2016) pp.913-918.
- 3) T. Nishiguchi, S. Hasegawa, R. Sato and K. Shirase: Evaluation Method for Behavior of Rotary Axis around Motion Direction Changing, International Journal of Automation Technology, Vol.11, No.2 (2017) pp.171-178.
- 4) 西口直浩, 佐藤隆太, 白瀬敬一: 5軸制御マシニングセンタにおける回転軸の運動方向反転に伴う軸方向変位の評価, 精密工学会誌, Vol.83, No.9 (2017) pp.893-898.
- 5) 西口直浩, 佐藤隆太, 白瀬敬一: エンドミル加工における工具アプローチ痕の評価とその補正, 精密工学会誌, Vol. 84, No.1 (2018) pp.110-114.

国際学会発表

- 1) T. Nishiguchi, R. Sato and K. Shirase: Evaluation of dynamic behavior of rotary axis in 5-axis machining center -Behavior around motion direction changes-, Proceedings of the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21 2015), Kyoto, (2015)
- 2) S. Hasegawa, T. Nishiguchi, R. Sato and K. Shirase: Synchronous motion of translational and rotary axes to evaluate the behavior of rotary axis, Proceedings of the 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA2016), Ohio, (2016)
- 3) T. Nishiguchi, R. Sato and K. Shirase: Tool Approach Mark Elimination Method for Ball End-milling Operation, Proceedings of the 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21 2017), Hiroshima, (2017)

業績一覧

学会発表，成果発表

- 1) 西口直浩，藤本真作，逢坂一正：書道ロボット開発に関する一実験，日本機械学会中国四国支部第34期総会・講演会，(1996).
- 2) 西口直浩，森規雄，川名啓：傾斜面への加工をタッチプローブを用いて簡単に実現する機能，型技術者会議2008，(2008).
- 3) 西口直浩：同時5軸加工に於ける回転軸の象限突起が加工面へ及ぼす影響，日本機械学会第10回 生産加工・工作機械部門講演会，(2014).
- 4) 西口直浩，長谷川正悟，佐藤隆太，白瀬敬一：回転軸運動方向反転時における軸方向変位の評価，2016年度精密工学会春季大会，(2016).
- 5) 長谷川正悟，西口直浩，佐藤隆太，白瀬敬一：5軸制御マシニングセンタ回転軸の運動方向反転挙動の評価，2016年度精密工学会春季大会，(2016).
- 6) 西口直浩：5軸制御マシニングセンタにおける回転軸の運動特性評価方法および補正方法の開発，平成28年度長野県工業技術総合センター／長野県工科短期大学校 研究・成果発表会，(2016).
- 7) 西口直浩，山田慎吾，佐藤隆太，白瀬敬一：エンドミル加工における工具アプローチ痕の低減，2017年度精密工学会春季大会，(2017).

特許

- 1) 森規雄，上野裕司，西口直浩：NC工作機械の制御方法及び制御装置（商品名：らくらくファイブ），特願2005-305579，2005年11月04日公開.
- 2) 森規雄，笠原忠，西口直浩：数値制御工作機械及び数値制御装置〈エラーマップ作成方法及び装置並びにエラーマップ作成機能を有した数値制御工作機械〉（商品名：VAC制御〈現名称VP制御〉），特許第5030653号<WO2009057229 A1>，2012年07月06日登録.
- 3) 森規雄，西口直浩，長屋昌史，葛西恒二：パラメータ設定方法及びパラメータ設定装置（商品名：イナーシャ適応制御），特許第5334932号，2013年08月09日登録.

紀要

- 1) 西口直浩：5軸加工機の運動精度測定方法に関する研究～回転軸の象限突起の測定～，長野県工科短期大学校紀要，第17号，(2014) pp.29-33.
- 2) 西口直浩，栗山勇氣：回転軸の運動方向反転時に伴う軸方向変位の評価，長野県工科短期大学校紀要，第20号，(2017) pp.9-15.

謝 辞

謝 辞

本論文の執筆にあたり，3年間所属させていただきご多忙の中ご懇篤なるご指導，ご鞭撻を賜りました神戸大学大学院 工学研究科 コンピュータ統合生産工学研究室 白瀬敬一教授，佐藤隆太准教授に深く感謝致します。特に，3年にわたり指導教員としてご指導いただきました佐藤先生には，研究に関するご指導はもちろんのこと，今後の教員としての姿勢といった様々なことについてもご指南いただきまして，大変感謝致しております。また，ご多忙中にもかかわらず，本論文の審査をお引き受け頂き有益なご教示，ご助言を賜りました神戸大学大学院工学研究科 田浦俊春教授，向井敏司教授に心より厚くお礼申し上げます。さらに研究会では，西田勇助教に多くのご助言を頂き，大変有難うございました。そして，修士課程を通して本研究をともに進めていただきました，元神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻（現 ヤンマー株式会社所属）の長谷川正悟氏に感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり，所属する長野県工科短期大学の岡本正行校長をはじめとする皆様には多大な援助を頂きました。とくに，進学に際しお世話になりました藤井恒夫元校長，中村正幸副校長，目黒秀明元副校長，手塚佳夫元学科長には，ご指導を頂くと共に学位取得の機会を与えて頂きましたことに深く感謝申し上げます。また，卒業研究を通して本研究をともに進めていただきました長野県工科短期大学卒業生の小宮山敦史氏，村瀬健斗氏，岩崎大地氏，市川修平氏，小澤知貴氏，高柳翼氏，栗山勇氣氏，山田慎吾氏に感謝の意を表します。

最後に，社会人学生としての私を陰ながら支えてくれた家族に心から感謝致します。

2018年1月 西口 直浩

神戸大学博士論文

「加工面への誤差の転写特性に基づく面品位向上技術に関する研究」全 121 頁

提出日 2018年1月16日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ **Kernel** にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 西口 直浩

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。