

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

超小型内視鏡部品製造のための知的ポスト処理システムによる高精度切削加工技術の開発

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 公益財団法人さいたま市産業創造財団

# 目 次

## 第 1 章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	5
1-3	成果概要	9
1-4	当該研究開発の連絡窓口	10

## 第 2 章 本論

2-1	長時間運転中の複合加工機熱変形の機上計測による取得・補正技術の開発	11
1)	研究開発内容と実施体制	11
2)	旋盤側センサ装着型相対計測手法の開発	12
3)	2次元レーザ距離計による相対位置/姿勢情報計測の検証	18
4)	長時間運転時の複合加工機熱変形量の計測実験	21
5)	並列演算による工作機械指令の補正値の反復導出法の開発	27
2-2	工具磨耗・偏芯量の機上計測による取得・補正技術の開発	30
1)	旋盤型複合加工機内部における工具顕微鏡を用いた機内撮影手法の開発	31
2)	大径工具(0.3mm 以上)を対象とした刃先形状 DB 生成手法の開発	34
3)	工具先端点指令値座標補正量の画像処理による導出	36
4)	検証実験の実施	41
3	研究成果のまとめ	47



## 第 1 章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### (1) 研究開発の背景

近年、手術・検査費用の軽減、簡素化の要求に伴い、開腹等の措置を必要とせず、また患者負担の軽い小径内視鏡の需要が高まりつつある。これらの施術に使用される内視鏡先端部は急速に小型化・多機能化が進んでおり、現在では直径 5.1mm のものが実用化されている。照明、措置用鉗子、洗浄等の機能の搭載と経鼻化による低侵襲性の両立に向けて、今後、多数の機能がより小径の内視鏡鏡頭部に統合されることが想定されている。

このような複雑形状部品を効率的に製造するためには、旋削加工とフライス加工を同一機内で実施できる複合加工機の使用が必須となる。一方、CCD やレンズを保持する光学部品としての要求を満たすためには、工具形状のばらつき・磨耗や機械構造の熱変形による長時間運転時の加工精度の悪化を考慮する必要があることが明らかとなっている。しかしながら、これらの問題の複合加工機に関する解決策は提案されておらず、未だ複合加工機を用いた加工は実用化されていないのが現状である。そこで、今後さらに小型化・多機能化が進展することが確実な小型内視鏡部品の効率的な量産技術を確立するためには、多数個部品の長時間加工に伴う精度悪化を考慮し、複合加工機への適用を指向した新しい切削加工向け高度化技術の開発が強く求められている。

#### (2) 研究開発の目的

これまで、内視鏡部品等の小型高精度部品の製造では、NC 旋盤による旋削と高い加工精度を持つ金型加工用マシニングセンタによるフライスに工程を分割し、後者で高精度な切削を実施しつつ、自動加工物供給装置(AWF)の導入によって効率化を図ろうとしてきた。これに対し本研究開発では、両者の工程を同一機内で実施でき、高効率な加工が可能な複合加工機での加工精度を向上させるセンサ統合型知的ポスト処理システムの開発を行った。そしてこれを内視鏡部品の製造工程に適用することにより、複合加工機の生産性を備え、内視鏡部品に求められる精度を満たすことの可能な高精度加工技術を実現することを目的とした。

#### (3) 研究開発の目標

具体的な高精度加工技術の内容としては、これまで CAM による工具経路生成から NC コントローラによる位置決めまでの過程の中で明示的に考慮されることのなかった機械構造の熱変形や工具刃先形状のばらつきの影響を機上に設置した測定機器によって取得し、工作機械・工具の状態変化に応じて工作機械の各駆動軸に与える指令値の修正をポスト処理ソフトウェアシステムの内部で行う手法の開発を行った。

平成 23 年度までの研究では、切削主軸に装着された基準工具と旋削主軸側に装着された 2 次元変位センサを用いて相対姿勢の変化を取得するためのセンサ配置、基準工具形状及び材質の検討を行った。また、長時間加工に伴う工具刃先磨耗及び工具偏芯の状態を 3

軸制御加工機内部で取得し、工具刃先形状データベースを作成する手法の開発を開始した。

最終年度である平成 24 年度は、それまで直径 0.3mm 以下の微小工具を対象として開発してきた具刃先摩耗及び工具偏芯の状態取得手法を内視鏡部品の製造に用いられる直径 2.0mm までの切削工具を計測可能となるよう拡張した。また、それまでに開発した機上計測手法を医療用光学部品の量産に使用される旋盤型複合加工機内部で適用するための機器の設置・計測手法を開発した。そして、3 軸加工機および複合加工機の双方に対応した工作機械指令値導出のアルゴリズムを開発し、量産に使用する実機上での経路補正の効果を実験によって検証した。

上記の研究課題の取り組みにあたり、設定した個別の開発目標および実施体制は以下のようになっている。

- ① 長時間運転中の複合加工機熱変形の機上計測による取得・補正技術の開発
  - ①-1 旋盤側センサ装着型計測手法の開発
  - ①-2 計測用切削主軸相対運動経路の検討・開発
  - ①-3 熱変形補正機能を有する 3 + 2 軸制御加工用知的ポスト処理システムの開発
- ② 工具磨耗・偏芯量の機上計測による取得・補正技術の開発
  - ②-1 工具磨耗・偏芯量計測用センサ装着位置の検討
  - ②-2 工具磨耗・偏芯量補正機能を有する知的ポスト処理システムの開発
  - ②-3 試験加工の実施

#### (4) 個別研究開発テーマの技術的目標値と実施体制

- ① 長時間運転中の複合加工機熱変形の機上計測による取得・補正技術の開発

位置決め精度の向上とともに、量産加工中の中途で複合加工機の熱変形の計測を高速に実施し、ポスト処理時に機械指令値に補正を適用する際に必要とされる処理時間の短縮を図る。

- ①-1 旋盤側センサ装着型計測手法の開発（株式会社金子製作所、国立大学法人埼玉大学、埼玉県産業技術総合センター）

旋盤側主軸に装着された計測装置と、ATC によって切削主軸に自動的に装着される基準工具との相対変位をレーザ距離計、CCD センサ等の非接触手段によって計測する機構を開発する。医療用小型複合旋盤において、NC プログラムによる自動運転の中途における熱変形量の推定を自動化出来るよう、センサの構造の検討および設計を行い、実機上での導出が可能かどうかを検討する。

- ①-2 計測用切削主軸相対運動経路の検討・開発（株式会社金子製作所、国立大学法人埼玉大学、埼玉県産業技術総合センター）

複数の工具姿勢を基準工具に与えた場合の旋盤側主軸に対する切削主軸上の基準工具の相対位置を非接触型のセンサで取得し、工具姿勢の変化が相対位置に与える影響から機械構造の熱変形量の推定を行う。その際、切削主軸・旋盤側主軸間に位置するコラム・ベッド等の各構造物の変形量を複数の工具姿勢における相対位置から導出することのできる工具姿勢の形態を検討する。

①-3 熱変形補正機能を有する3+2軸制御加工用知的ポスト処理システムの開発（株式会社金子製作所、国立大学法人埼玉大学、埼玉県産業技術総合センター）

①-2で得られた各機械構造物の熱変形量を参照して、熱変形の影響を反映し、位置決め誤差をキャンセルしたNCプログラムを生成する知的ポスト処理システムを開発する。工作機械の形状創成理論に基づき、各軸の指令値に対する位置決め位置のズレを考慮した指令値を高速に導出するシステムを開発する。具体的には指令値と機械構造の変形による座標のズレ量の推定を複数候補に対する並列演算の繰り返しによって多数行い、数値解法によって変形後の工具先端位置がCAM上での理想位置に近づく指令値の補正量を導出する。

②工具磨耗・偏芯量の机上計測による取得・補正技術の開発

位置決め精度の向上とともに、量産加工中の途中で生産に使用される各工具の計測を実施し、画像処理によって工具刃各部分の磨耗量・偏芯量の計測を短時間に行うシステムの構築を行う。また、最終的にはこれを①で開発した知的ポスト処理システムと統合し、加工精度に対する補正の効果を検証する。

②-1 工具磨耗・偏芯量計測用センサ装着位置の検討（株式会社金子製作所、国立大学法人埼玉大学、埼玉県産業技術総合センター）

内視鏡部品製造用の旋盤型複合加工機の内部への工具刃先形状計測装置の設置方法を検証し、長時間稼働中の工具の磨耗状態を自動的に計測する手法を開発する。

②-2 工具磨耗・偏芯量補正機能を有する知的ポスト処理システムの開発（株式会社金子製作所、国立大学法人埼玉大学）

②-1で設置されたセンサで得られた回転中の工具刃先形状から、工具刃各部分の磨耗量と偏心量を画像処理によって導出するシステムの開発を行う。これまでの研究で開発された直径0.3mmまでの工具に対応したシステムを拡張し、内視鏡部品の製造に用いられる直径2mm程度の工具に対しても刃先形状のデータベース作成を実現する。また、CAMソフトウェアによって生成された工具刃先経路と加工対象物の完成形状から経路上の各点に対応する切削点とその加工位置を創生する工具刃先位置を推定し、データベース上の工具刃先の後退量を参照して座標補正量を導出するシステムを開発する。

②-3 試験加工の実施（株式会社金子製作所、国立大学法人埼玉大学、埼玉県産業技

術総合センター)

円筒面および角柱面を有する基準形状に対して、長時間の切削を実施し、①-2および②-3で開発した工具経路の補正システムの効果について検証を行う。小径ボールエンドミル工具を対象とし、長距離の切削に対する摩耗の進展を調査し、長時間加工実施後の補正の有無による加工精度改善の効果を検証する。試験加工は、一般的な3軸制御マシニングセンタと、本研究で対象とする内視鏡部品の連続加工用旋盤型複合加工機の双方で実施し、手法の効果を総合的に検証する。

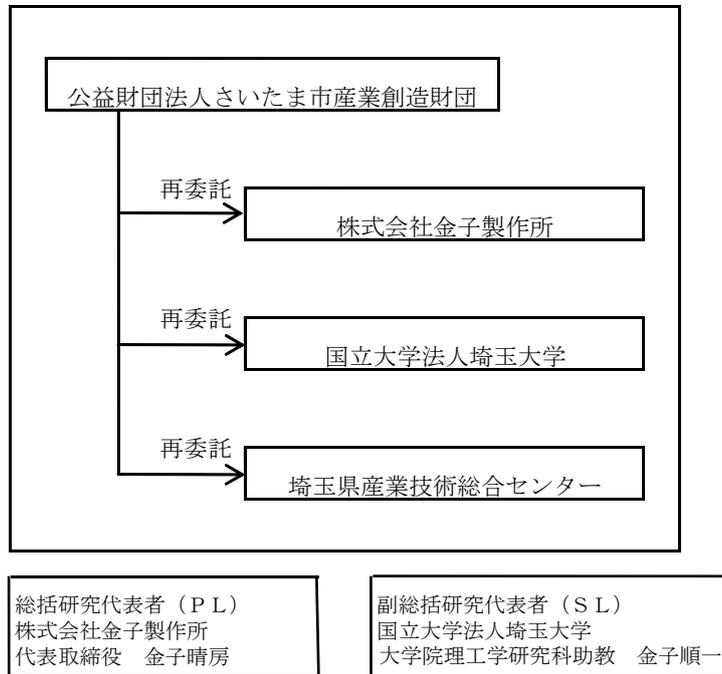
### ③プロジェクトの管理・運営（公益財団法人さいたま市産業創造財団）

- ・事業管理機関の公益財団法人さいたま市産業創造財団において、本プロジェクトの管理を行う。プロジェクトの研究経緯と成果について取りまとめ、成果報告書2部及び電子媒体（CD-ROM）一式を作成する。
- ・本研究の実用化に向けた到達の度合いを検証するとともに、事業化に向けての課題等について研究実施者と調整を行う。
- ・再委託先事業者が作成する証憑書類について、指導・確認を行う。
- ・研究開発推進委員会を委託契約期間内に3回程度開催する。

## 1-2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制

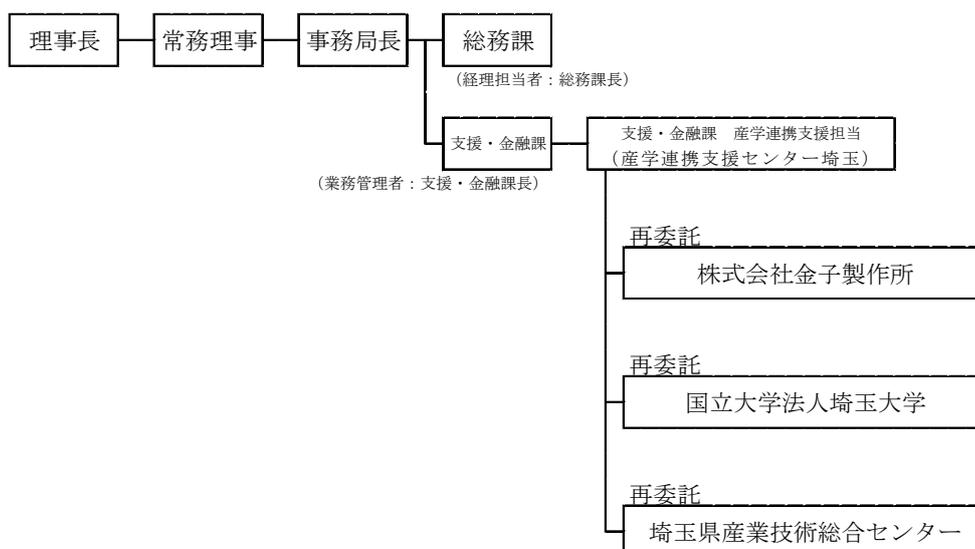
#### 1) 研究組織（全体）



#### 2) 管理体制

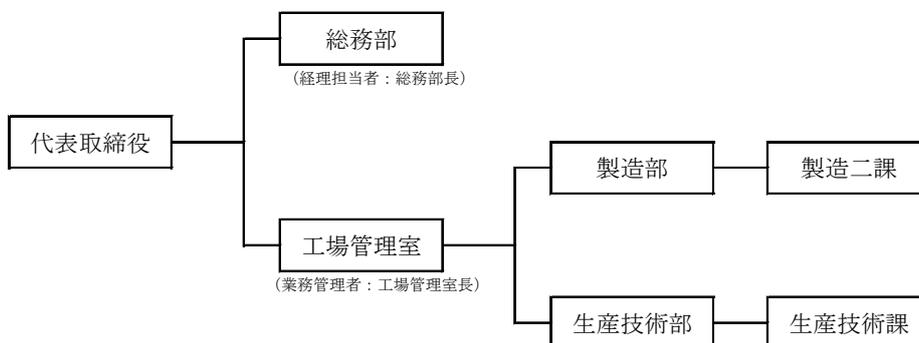
##### ①事業管理機関

##### 公益財団法人さいたま市産業創造財団

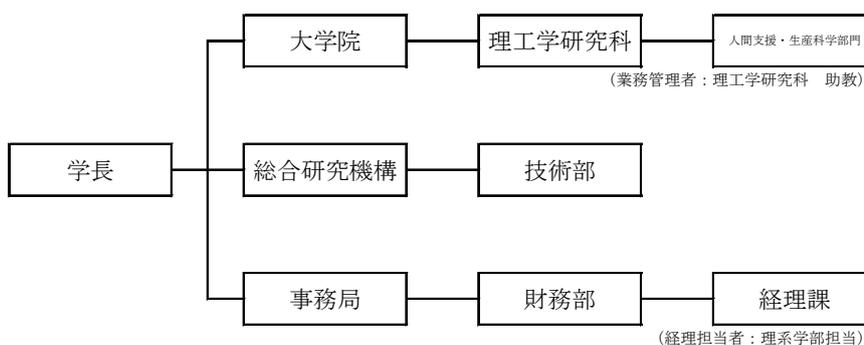


②再委託先

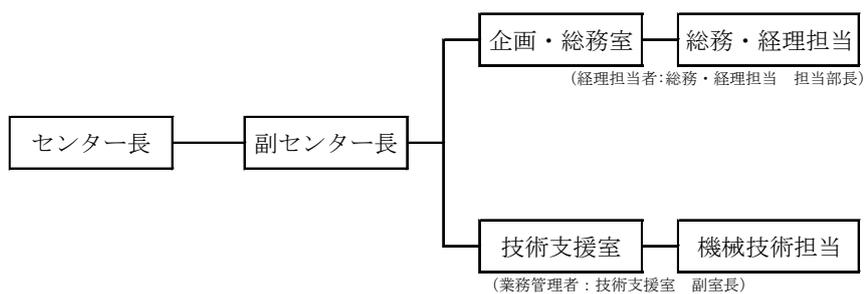
株式会社金子製作所



国立大学法人埼玉大学



埼玉県産業技術総合センター



(2) 研究員及びプロジェクト管理員（役職・実施内容別担当）

【総括研究代表者（PL）】（プロジェクト管理員）

氏名	所属・役職
金子 晴房	株式会社金子製作所 代表取締役

管理員及び研究員

【事業管理機関】公益財団法人さいたま市産業創造財団

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
桑原 和也	支援・金融課 主任	③
小沼 正幸	支援・金融課	③

【再委託先】

（研究員）

株式会社金子製作所

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
金子 晴房	代表取締役	①、②
長谷川 哲史	生産技術部 生産技術課 課長	①、②
牧 宙史	製造部 製造二課	①、②

国立大学法人埼玉大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
金子 順一	大学院理工学研究科 助教	①、②
山崎 次男	総合研究機構 技術部	①、②

埼玉県産業技術総合センター

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
南部 洋平	技術支援室 機械技術担当 主任	①、②
宇野 彰一	技術支援室 機械技術担当 専門研究員	①、②

### (3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

#### 【事業管理機関】

公益財団法人さいたま市産業創造財団

(経理担当者) 総務課長 白瀧 敏夫

(業務管理者) 支援・金融課長 小池 陽一

#### 【再委託先】

株式会社金子製作所

(経理担当者) 総務部長 秋山 朋子

(業務管理者) 工場管理室長 松波 敏夫

国立大学法人埼玉大学

(経理担当者) 財務部 経理課 理系学部担当 中島 弘樹

(業務管理者) 大学院理工学研究科 助教 金子 順一

埼玉県産業技術総合センター

(経理担当者) 企画・総務室 総務・経理担当 担当部長 山岸 善行

(業務管理者) 技術支援室 副室長 戸枝 保

### (4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

#### 研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
金子 晴房	株式会社金子製作所 代表取締役	P L
長谷川 哲史	株式会社金子製作所 生産技術部 生産技術課 課長	委
牧 宙史	株式会社金子製作所 製造部 製造二課	委
金子 順一	国立大学法人埼玉大学大学院 理工学研究科 助教	S L
山崎 次男	国立大学法人埼玉大学 総合研究機構 技術部	
南部 洋平	埼玉県産業技術総合センター 技術支援室 機械技術担当 主任	
宇野 彰一	埼玉県産業技術総合センター 技術支援室 機械技術担当 専門研究員	
長谷川 透	株式会社長谷川機械製作所 代表取締役	アドバイザー
近藤 拓士	財団法人埼玉県中小企業振興公社 コーディネータ	
桑原 和也	公益財団法人さいたま市産業創造財団 支援・金融課 主任	
小沼 正幸	公益財団法人さいたま市産業創造財団 支援・金融課	

### 1-3 成果概要

平成24年度は、平成23年度までの結果を受けて、機械構造の熱変形を非接触かつ高速な計測が可能な2次元 CCD レーザ変位センサを使用して旋盤型複合加工機上で計測する手法の開発を行い、CAM ソフトウェアによって出力された工具刃先経路から、補正値を導出するための幾何形状処理システムの開発を行った。また、工具切れ刃のばらつきやチャック時の偏芯、長時間の運転による工具摩耗によって発生する切り込み誤差をソフトウェア的に補正する手法として、内視鏡部品加工に使用される直径 2.0mm までの工具に対応した工具刃先形状機上取得技術を開発し、これから工具刃先の摩耗進展に対応した指令値補正量導出システムの開発を行った。主な成果は以下のとおりとなっている。

#### 1-ア) 旋盤型複合加工機上での工作機械熱変形の計測を行うためのセンサ把持手法の開発

切削主軸に ATC によって装着された基準工具に対して、稜線位置を安定して推定するための複数の 2 次元変位センサの維持方法を検討した。ツールホルダと共通の把持機構を有する治具を開発し、ATC 用ロボットアームを用いて機内の計測位置にセンサを配置することで計測を実施する手法を開発した。

#### 1-イ) 並列演算による工作機械指令の補正値の反復導出システムの開発

直進軸の熱変形による変位方向を考慮した工作機械指令の補正値を、収束演算によって数値的に導出する手法を開発し、これをグラフィックスハードウェアとして知られる並列演算デバイス上で高速に実施する手法を開発した。一つの工具刃先位置に対して、直進軸の XYZ 軸方向に対してそれぞれ 100 個程度の補正値後の指令値を設定し、これを組み合わせた  $10^6$  組の補正値候補に対して変位後の機構が与える変位位置を形状創成理論に基づく値として導出するシステムを開発した。計算機実験では 3 万点程度の工具先端点経路に対する補正値の導出を 3.5 秒程度の時間内に実施することが可能となった。

#### 2-ア) CCD 工具顕微鏡の複合加工機内部での設置手法の開発

従来、3 軸制御工作機械向けに使用されてきた CCD 工具顕微鏡を複合加工機の切削主軸を計測可能な位置に設置し、加工中の任意のタイミングでのエンドミル工具の切れ刃輪郭形状のチャックへの取付時の偏芯や摩耗の機上計測を実現した。

#### 2-イ) 画像処理による工具刃先輪郭形状推定システムの大径切削工具への対応の実現

先の開発によって開発された、ねじれ角を有する工具切れ刃の輪郭形状を推定するアルゴリズムを拡張し、内視鏡部品製造に使用される直径 2.0mm までの工具の摩耗状態の取得を実現した。開発システムでは、工具刃先のすくい面方向の摩耗進展を約  $0.7\mu\text{m}$  の精度で取得し、工具毎のデータベースを生成することを実現

し、個々の工具のばらつきやチャック条件の違いによる偏芯を高速に取得することが可能であることが確認された。

2-ウ) 工具経路に対する切削点座標および工具刃先の切削関与位置の導出システムの開発

CAMによって生成された工具先端点座標経路に対して、加工対象物の完成形状の情報から、加工対象物上の切削点座標と、これを創成する工具刃先位置を導出するアルゴリズムを開発した。また、これに基づき、ソリッドCADカーネルを用いて切削点を導出するシステムを開発した。

2-エ) 工具刃先輪郭形状を参照した工具先端位置補正值導出システムの開発

工具切れ刃の輪郭形状を参照し、画像処理の手法を用いて工具先端点の座標への補正值を導出するアルゴリズムを開発した。従来の3軸制御加工マシニングセンタに加え、工具とワークとの相対姿勢が任意に変化する旋盤型複合加工機に対応した手法を実現した。提案手法では、工具刃先位置1点あたり45msec以内で補正值を再帰的に導出することを可能とした。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

〒338-0002 埼玉県さいたま市中央区下落合5丁目4番3号  
公益財団法人さいたま市産業創造財団 支援・金融課  
主任 桑原 和也

【総括研究代表者】

〒339-0072 埼玉県さいたま市岩槻区古ヶ場1丁目3番地13  
株式会社金子製作所  
代表取締役 金子 晴房

## 第2章 本論

### 2-1 長時間運転中の複合加工機熱変形の機上計測による取得・補正技術の開発

#### 1) 研究開発内容と実施体制

平成24年度の研究開発項目と実施体制を図2-1に示す。複合加工機の連続運転時に発生する機構の変形を高速かつ非接触な機上計測手段によって計測するための計測手法について、本年度は前年度に実施した3軸工作機上での手法を、旋盤型複合加工機上で実施するための各種検討を行い、機上で工作機械熱変形および工具先端摩耗を計測するための治具を開発し、試作した機構を用いた切削実験を行った。図2-1はこれらの研究項目の実施状態を示す。また、工具磨耗・偏芯量の機上計測による取得・補正技術の開発については、昨年度開発に成功した微小工具に加えて、直径2.0mmまでの工具に対応した新しい画像処理手法を開発し、これを元に複合加工機と3軸制御加工機のそれぞれの座標補正に対応した補正值導出手法の開発を行った。

以下ではこれらの進捗状況および開発内容について、それぞれ述べる。

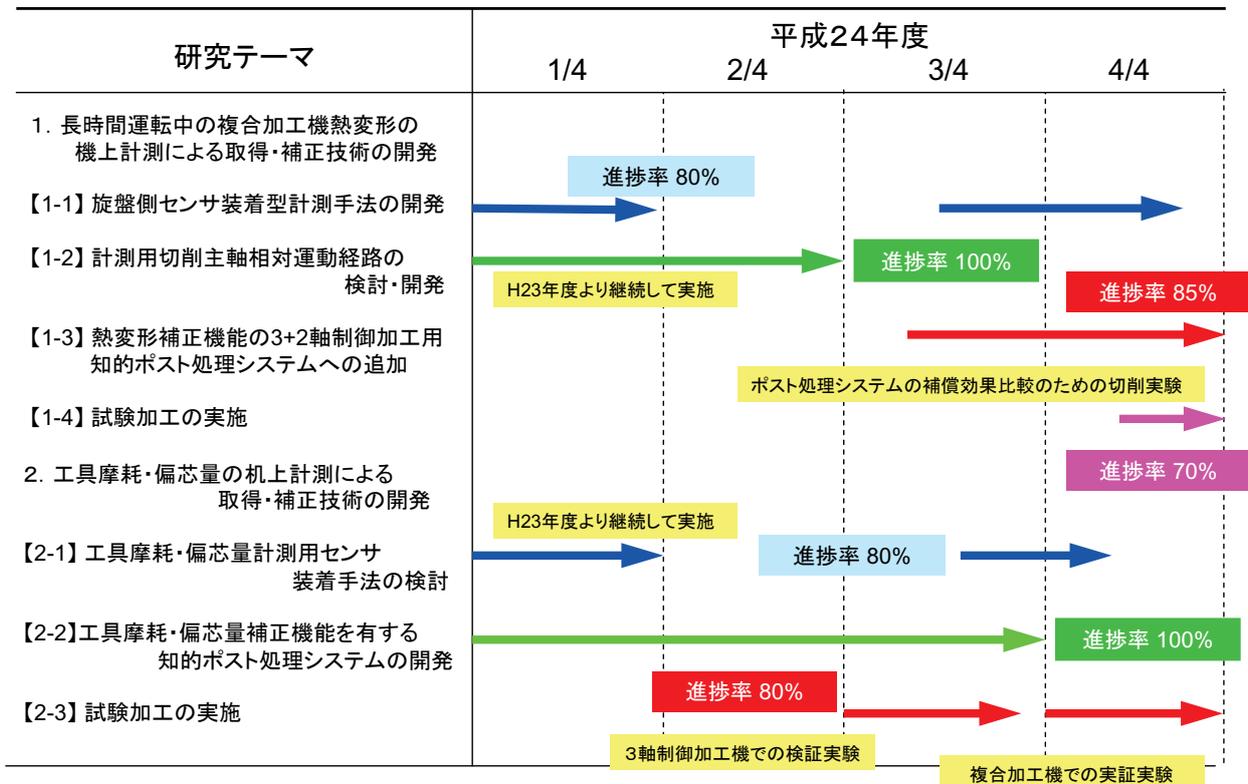


図2-1 平成24年度の研究実施状況（長時間運転中の複合加工機熱変形の機上計測による取得・補正技術の開発／工具磨耗・偏芯量の機上計測による取得・補正技術の開発）

## 2) 旋盤側センサ装着型相対計測手法の開発

本研究で誤差補正の対象とする複合加工機(長谷川機械製作所：KM250)の概要および仕様を図 2-2、図 2-3、図 2-4、図 2-5、表 2-1 に示す。本複合加工機は直径 10mm 以下のバー材から小型精密加工部品を創成することを目的とした構造を有しており、現在一般的に使用されている NC 旋盤の刃物台に切削主軸を搭載した複合加工機と軸構成が大きく異なることが特徴となる。

具体的な軸構成の相違点としては、一般的な旋盤ベースの複合加工機では、旋盤主軸側に C 軸を、切削主軸側に XYZB 軸を有するのに対し、本研究で対象とする複合加工機では図 2-3 に示すように旋削主軸側に YC 軸、切削主軸側に XZB 軸があり、XYZ の各直進軸が旋削、切削、両主軸において Y 軸と XZ 軸と別の機構として存在している。また、本工作機械が加工対象とする機械・光学部品は内視鏡頭端部であり、その規模がごく小さいことから各直進軸の稼動範囲も表 2-1 に示すようにそれぞれ±125mm、-50~200、250mm と非常に限定されており、ボールバー等の従来の工作機械軸構成取得機器を利用することは困難であった。

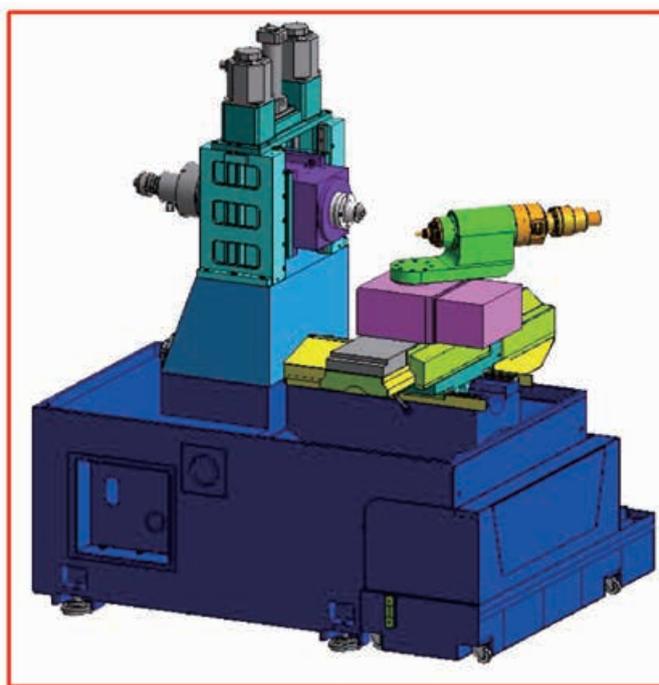


図 2-2 小型複合加工機（長谷川機械製作所：KM250）構造

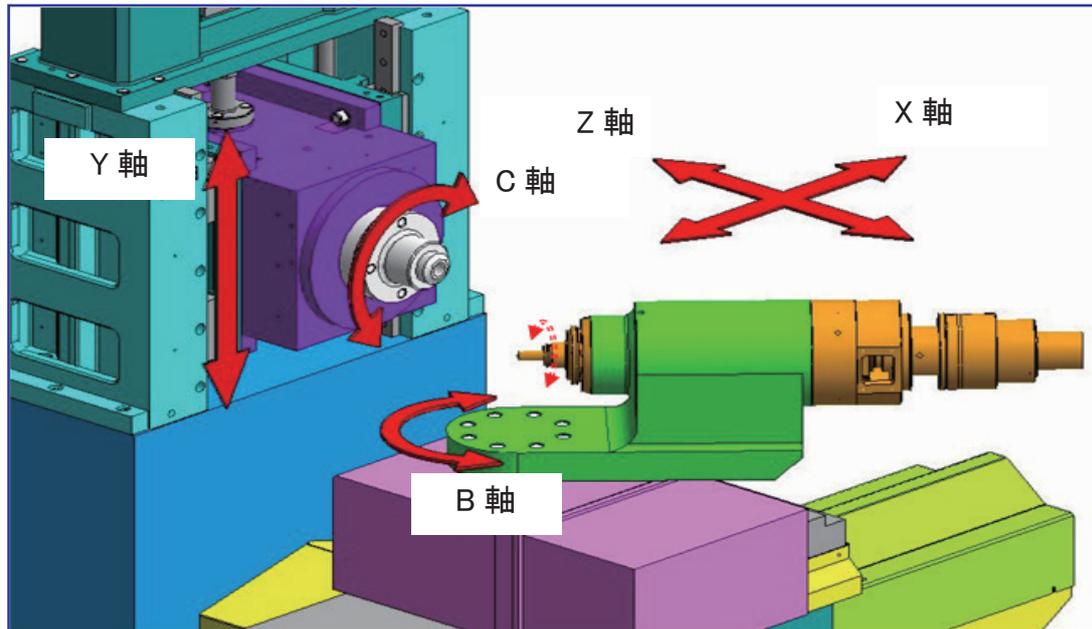


図 2-3 小型複合加工機（長谷川機械製作所：KM250）構造および軸構成

そこで、本研究では民生用の一般的な 2 次元 CCD レーザ変位計測センサを 2 台使用し、切削主軸側に ATC によって自動的に取り付けられる基準工具と、旋削主軸側に AWC によって挿入される研磨済みバー材の形状を機上で同時に計測し、センサに対するそれらの相対位置・姿勢から加工対象物に対する切削主軸の偏位を推定する手法の開発を行った。図 2-6 は開発手法の概要を示す。

開発手法では、2 次元 CCD レーザ変位計測センサ 2 台を、図 2-7 に示すセンサ把持治具に設置し、これを ATC の機能を担当する自動工具交換ロボットの機能を用いて図 2-8 に示すように Y 軸および XZ 軸の運動によって旋削対象および切削工具が運動する空間の近傍に配置する。Y 軸側の相対運動に伴う研磨済みバー材の稜線位置の座標変化と、XZ 軸側の旋削主軸に取り付けられた基準工具の位置情報を参照することにより、旋削軸と切削軸の相対的な姿勢変化を推定することが可能となる。



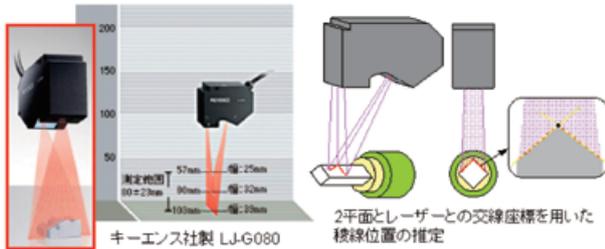


表 2-1 小型複合加工機（長谷川機械製作所：KM250）仕様

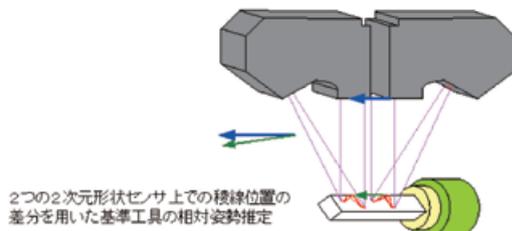
項目		仕様	単位	
主軸 (C軸)	コレット	シャブリン社製 B32		
	最大ワーク径	φ20	mm	
	最高回転数	1,000	min <sup>-1</sup>	
	最大割出速度	360,000	deg/min	
B軸	回転範囲	-15~105	deg	
	最大割出速度	9,000	deg/min	
ミーリング主軸 (第一刃物台)	端形状	HSK-A40		
	最高回転数	20,000	min <sup>-1</sup>	
旋削刃物台 (第二刃物台)	端形状	HSK-A40		
軸仕様	移動量	X	250	mm
		Y	250	mm
		Z	250	mm
	早送り速度	X	20	m/min
		Y	10	m/min
		Z	20	m/min
制御装置		FANUC Series31i-B		
同時制御軸数		5軸		
その他機能		全軸クローズドループ		
		ナノスムージング		
		AI輪郭制御Ⅱ		
		工具先端点制御		

### 複数の2次元形状センサによる 基準工具の相対姿勢推定

- ① 高精度な相対位置計測が可能な  
基準工具を切削主軸/旋削主軸に装着

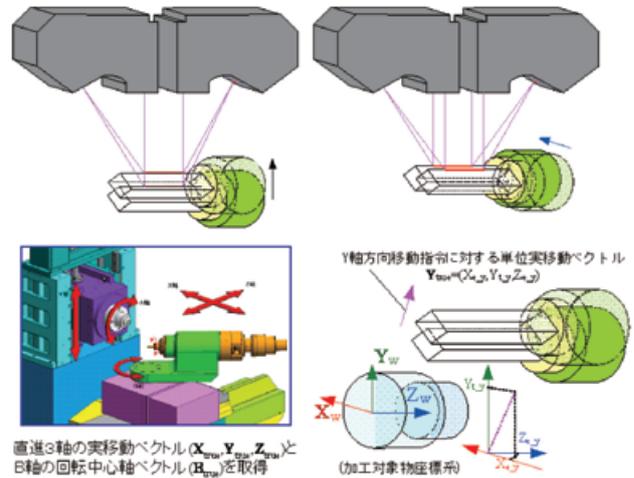


- ② 複数のセンサ出力結果を統合して  
センサ-基準工具間の位置/相対姿勢を推定



### 加工対象物中心軸に対する 工具刃先変位量の推定

- ③ センサに対する直進軸の相対運動の  
計測結果から、軸移動方向の傾きを推定



- ④ 旋削主軸(被加工物)に対する  
工具刃先相対位置決め誤差量の導出

図 2-6 2次元 CCD レーザ変位センサによる基準工具の相対位置・姿勢導出手順

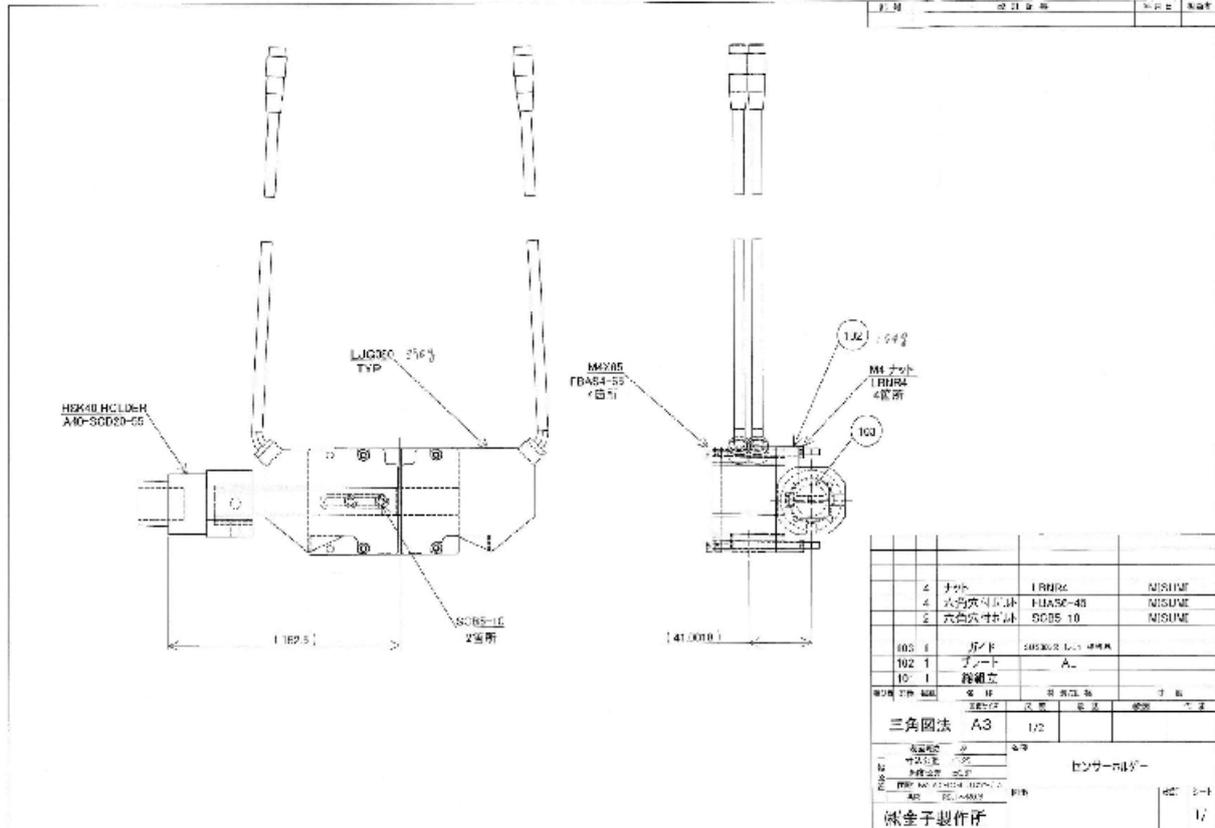


図 2-6 ATC による把持機構を有する 2次元 CCD レーザ変位センサ固定用治具

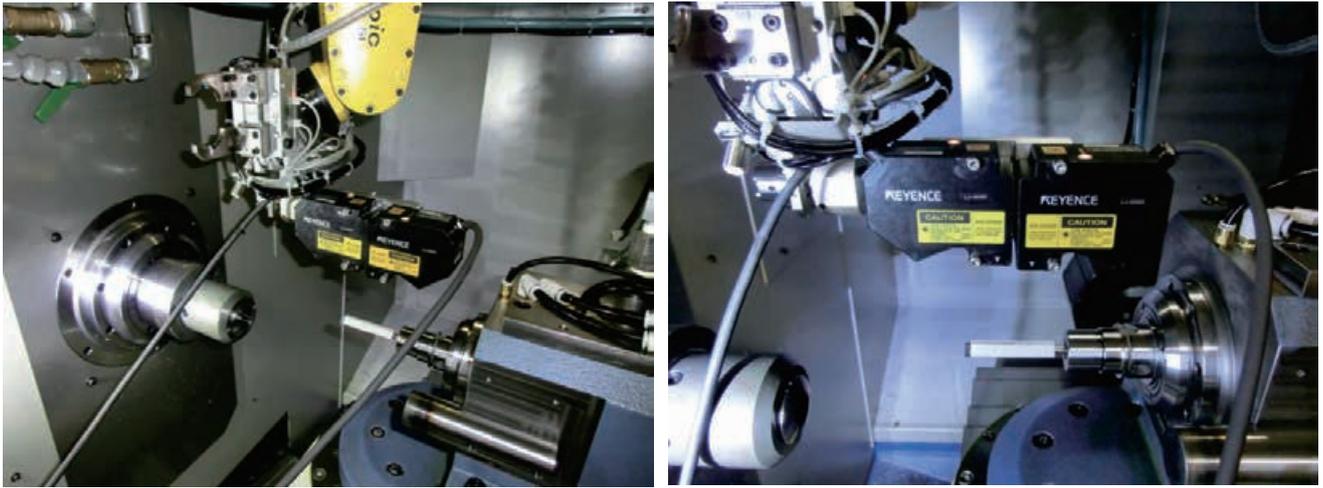


図 2-6 ATC（工具交換ロボット）による 2 次元 CCD レーザ変位センサの把持状態

本手法は図 2-6 に示すように、①から④の段階から構成されており、基準工具および研磨済みバー材の断面形状を測定し、XYZ の各直進軸に一定の移動指令を与えた場合の基準工具の各方向への移動量を計測することによってセンサに対する移動方向を特定し、指令方向と計測された移動方向のズレから機械構造の熱変形を推定する。検証実験では、B 軸角度が  $0^\circ$  および  $90^\circ$  の割り出し角を与えられた際に XY 軸方向の切削主軸の運動方向の計測を実施するための基準工具を使用し、移動量指令に対する XY 軸の運動方向成分の誤差推定を実施した。

### 3) 2次元レーザ距離計による相対位置/姿勢情報計測の検証

本手法において使用する 2 次元レーザ変位計では、レーザーと基準工具との交差面上の位置情報から、基準工具の稜線位置を特定し、これを図 2-7 に示すように複数回位置を替えて測定することによってセンサに対する基準工具の相対的な移動量および姿勢変化量を推定する。

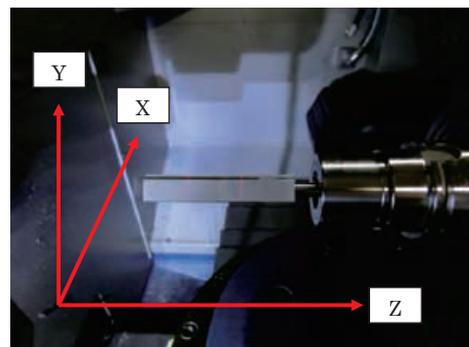
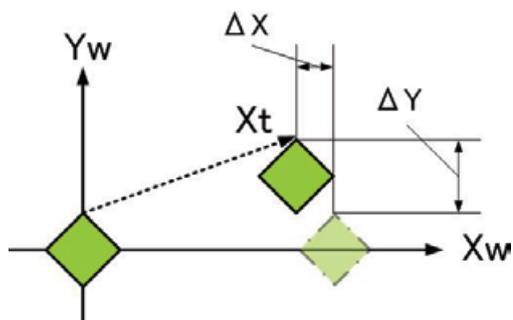


図 2-7 断面形状における稜線位置の比較による移動量の特定

実験では、昨年度の成果を元に複数の計測情報からロバストな座標推定が可能なジルコニア製の角柱形状基準工具（図 2-8、図 2-9）を使用し、3時間連続運転後の相対変位を $\Delta X$ 、および $\Delta Y$ のそれぞれの成分に対して推定した。稜線位置の推定では、図 2-10 に示すように角柱の断面を構成する各点のレーザーセンサからの距離を測定し、予め与えられたレーザーセンサ各部の広がりから、角柱の断面形状を構成する2つの辺の稜線上の座標データ $(x_i, y_i)$ を取得する。このとき、個々の座標データは、レーザーセンサ上のある位置から右側および左側でそれぞれ別の直線上に位置すると考えられるため、これらが別々の直線、

$$y=a_1x+b_1 \text{ および } y=a_2x+b_2$$

に属するように、最小二乗法に基づいて以下の2式が成立する解 $(a_1, b_1)$ および $(a_2, b_2)$ を求める。

$$a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

$$a \sum_{i=1}^n x_i + bn = \sum_{i=1}^n y_i$$

さらに、これら2つの直線の交点 $(x_c, y_c)$ を、2式を連立して以下のように解くことにより、角柱の稜線位置を推定することを可能としている。

$$x_c = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2}, y_c = \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1 - a_2}$$

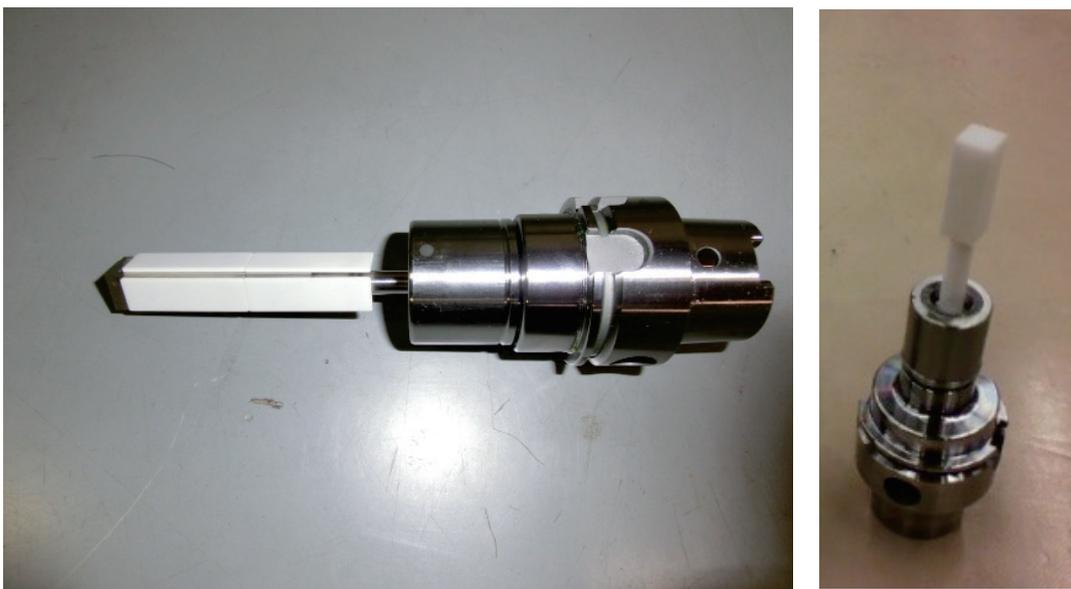


図 2-8、2-9 ジルコニア製角柱形状基準工具



#### 4) 長時間運転時の複合加工機熱変形量の計測実験

上記で開発した基準工具位置推定手法および基準工具を使用し、内視鏡部品製造用の旋盤型複合加工機上で、長時間の機械運転に伴う工作機械直進軸の熱変形を測定する実験を行った。実験では、まず、工作機械の主電源を投入した直後のコールドスタート直後に、B軸に $0^\circ$  および $90^\circ$  の角度を与えた場合のXZ方向への切削主軸移動命令と、それに伴う基準工具上の稜線位置のズレを測定した。次に、図 2-11 に示すようなXY平面上での往復経路を設定し、Y方向に10mmずつ、X方向に100mmの往復を繰り返すプログラムを3時間実行した。その後コールドスタート直後と同様にX軸方向およびZ軸方向に工具を移動させて基準工具の稜線位置を推定してコールドスタート直後との位置のずれを導出した。表 2-3 は稜線位置の計測時に使用したNCプログラムの例を示す。本プログラムでは、B軸を $0^\circ$  および $90^\circ$  にそれぞれ設定した上でL字基準工具の稜線部分が2つのレーザー2次元計測器の計測範囲に入るように主軸を移動させており、B軸の設定角度による切削主軸方向のズレを測定している。

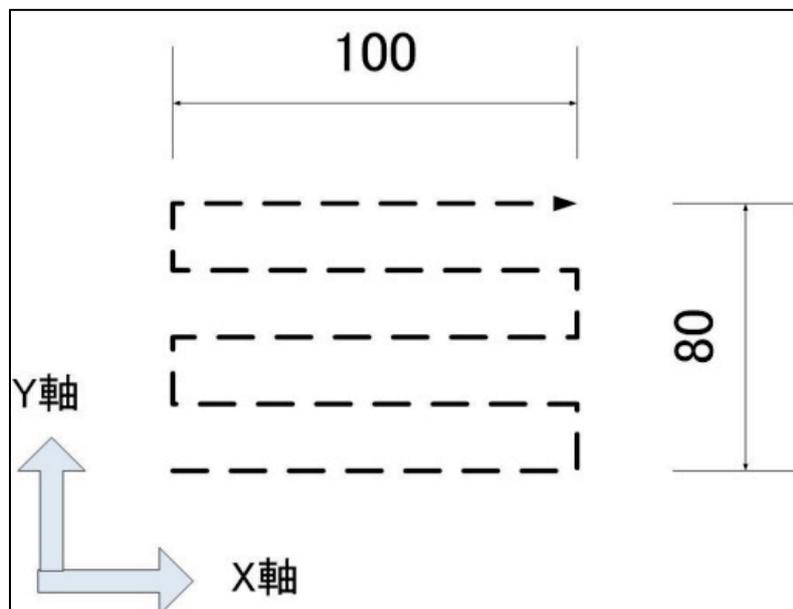


図 2-11 XY平面上での長時間運転プログラム経路（往復切削を想定）

表 2-2 工作機械熱変形推定用 NC プログラム例

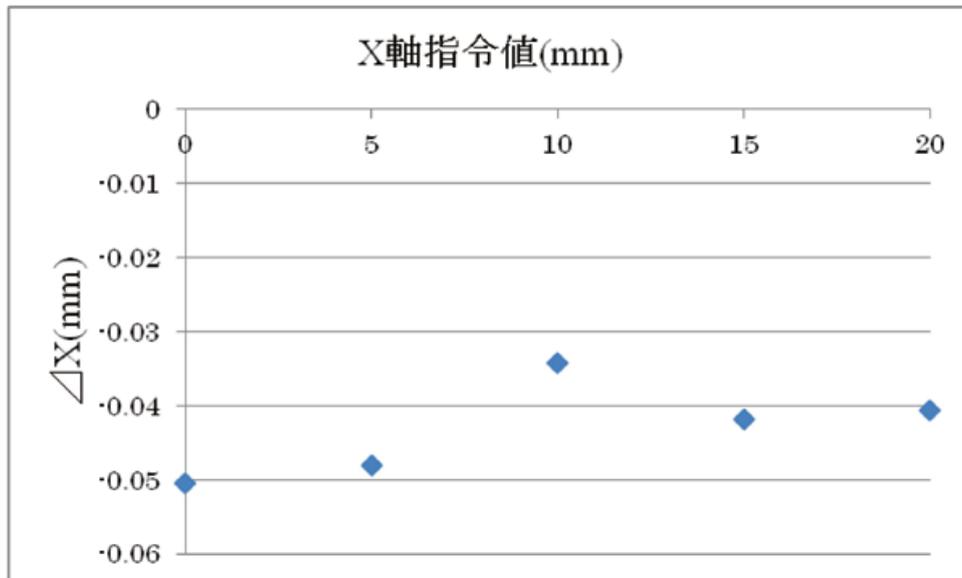
%	
O2007	/プログラム No
G91G0G28X0Y0Z0	
G91G28C0B0	
G92 X0.00 Y0.00 Z0.00	/基準位置の設定
M19	/ここでテストバーの位置決めをする
G90 G01 X-2.	
Z-74. F500	/X、Z 軸の移動方向を測定する
Z-78.	
Z-82.	
Z-86.	
Z-90.	
Z-94.	
X-6.	
X-10.	
X-14.	
X-18.	
X-22.	
Z0	
X-145.	
B-90.	/ここで軸を 90 度回転させる
G01 Z-135. F100	/軸を回転させてからの X、Z 軸の移動方向を測定する
Z-139.	
Z-143.	
Z-147.	
Z-151.	
Z-155.	
X-145.	
X-149.	
X-153.	
X-157.	
X-161.	
X-165.	
Z0	
G91	
G28Z0	
G28B0	
G28C0	
G28X0Y0	
M30	
%	/プログラム終了

実験によるセンサAおよびセンサBの計測結果から、X軸およびZ軸への移動指令値に対するX軸、Y軸の変位量を表したものを図2-12から図2-15に示す。 $\Delta X$ は、図2-7で示したように主軸の移動量として指令された値と、稜線位置の推定によって得られた実際の移動量との差分を表している。 $\Delta Y$ は、直交するX軸およびZ軸の熱変形による機構の相対的なねじれの成分を表しており、機械駆動開始前と、3時間後の駆動後の2回の計測結果の差分から導出している。

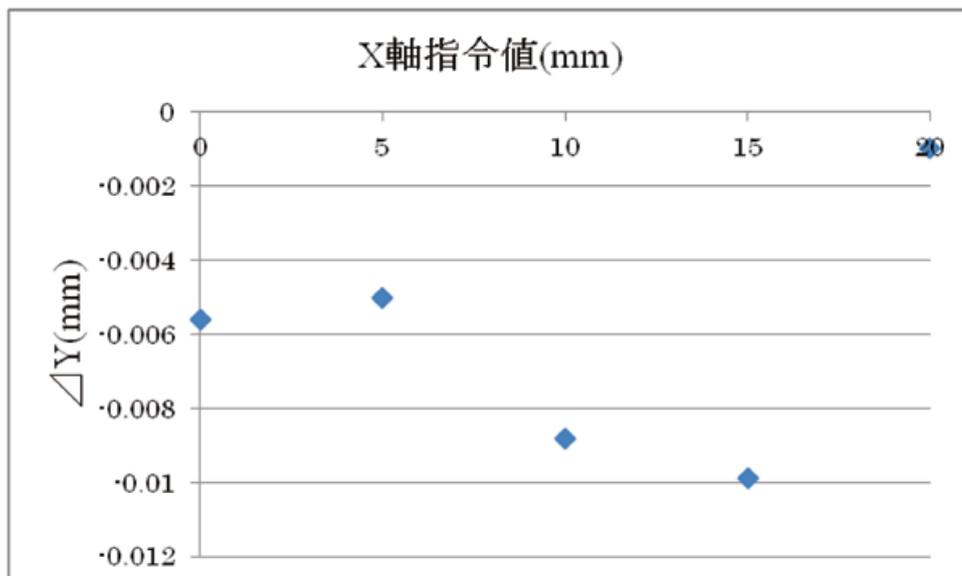
これらの工作機械の切削主軸側の変形の傾向を見ると、X軸方向への移動に対して、X軸成分の変位がいずれの位置でも $50\mu\text{m}$ 程度発生し、X軸の送り方向の位置決め誤差が指令値に依らずに発生していることがわかる。これはX軸の機構全体が長時間運転に伴って並行にずれる方向に移動したと考えられる。一方、X軸送りに対するY軸方向の変位では指令値に応じて変位が $0\sim 50\mu\text{m}$ の範囲で変化する傾向がみられ、こちらはX軸の水平度がその下にあるZ軸の熱変形によって悪化したことが原因であると考えられる。これらの傾向は、実際に内視鏡部品の加工に用いられる $\pm 20\text{mm}$ の移動範囲の中ではほぼ線形な傾向を有しており、線形な補正関数を設定することが可能であると考えられる。

一方、Z軸方向への移動に対する、X軸成分の変位では、 $10\text{mm}$ の位置以外では $20\mu\text{m}$ 程度の範囲内でゆるやかに変化する傾向が見られた。発生し、X軸の送り方向の位置決め誤差が指令値に依らずに発生していることがわかる。これはベッドに近いZ軸の機構の変形がその上に乗るX軸のものよりも小さくなるのが原因と考えられる。また、Z軸方向の移動指令に対するY軸方向の変位もほぼ同様の $20\mu\text{m}$ 内の範囲での変動が見られた。これらの傾向は、X軸方向の変位と同様に内視鏡部品の加工に用いられる $\pm 20\text{mm}$ の移動範囲の中ではほぼ線形な傾向を有しており、線形な補正関数を設定することが可能であると考えられる。

本評価では、ATCとなる産業用ロボットアームを用いてセンサを固定し、ツールホルダ上の2つのセンサの計測値から変位量を推定した。現状ではアーム上のセンサの信号線等の処理は手動で行なっており、今後の計測の完全な自動化ではこれらの処理が課題になると考えられる。

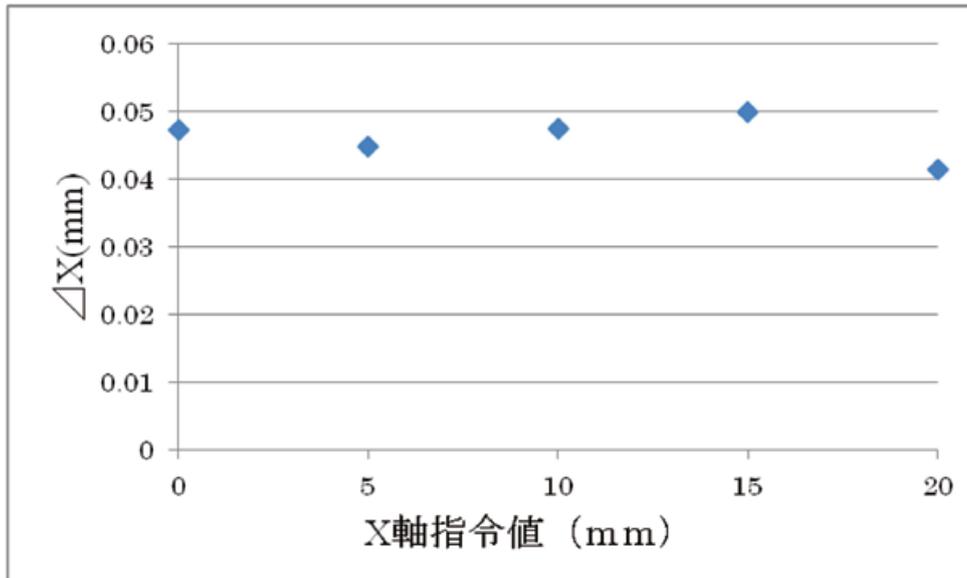


(a) 運転開始3時間後におけるX軸方向指令に対する $\Delta X$ の分布状態

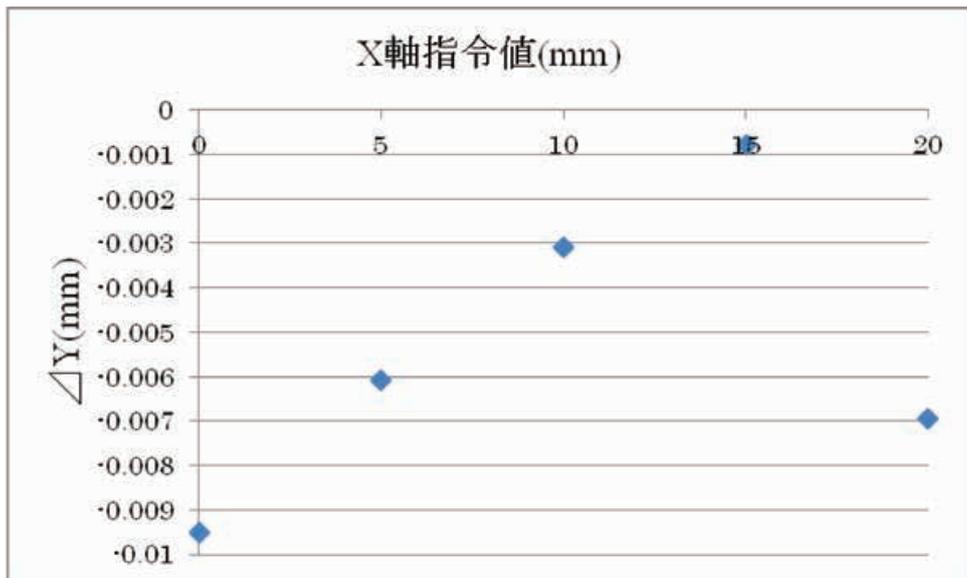


(a) 運転開始3時間後におけるX軸方向指令に対する $\Delta Y$ の分布状態

図 2-12 センサAにおけるX軸方向移動に伴う稜線位置の変化 ( $B=0^\circ$ )

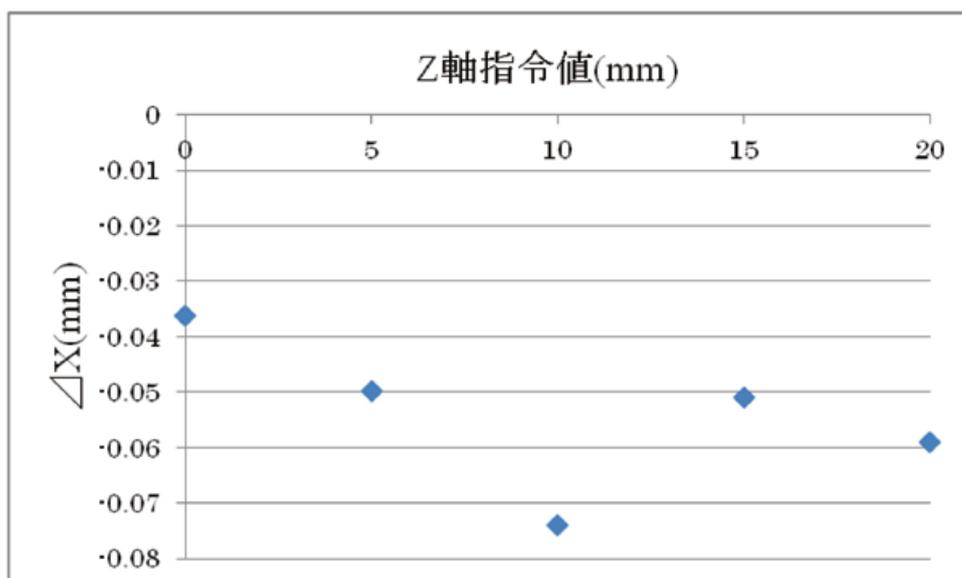


(a) 運転開始3時間後におけるX軸方向指令に対する $\Delta X$ の分布状態

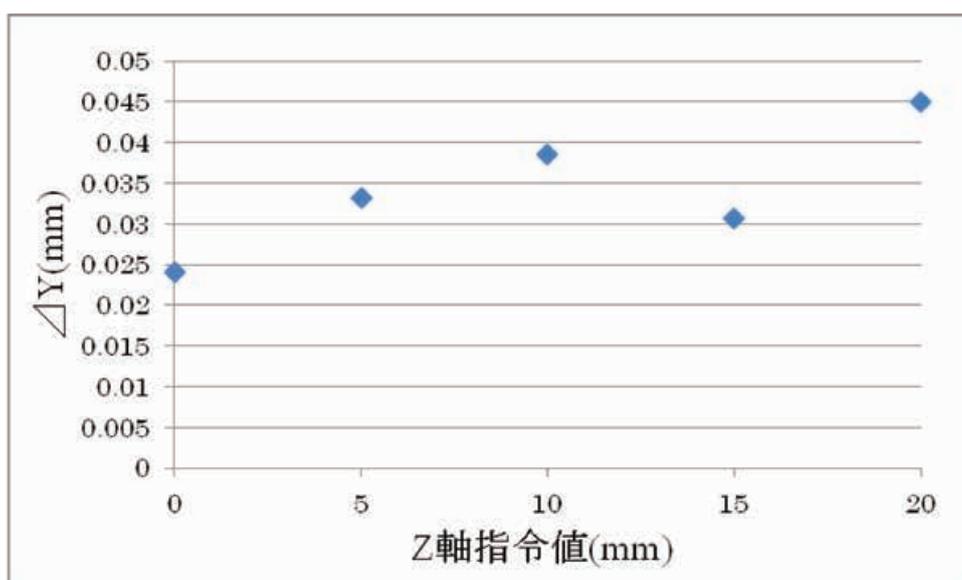


(a) 運転開始3時間後におけるX軸方向指令に対する $\Delta Y$ の分布状態

図 2-13 センサBにおけるX軸方向移動に伴う稜線位置の変化 ( $B=0^\circ$ )

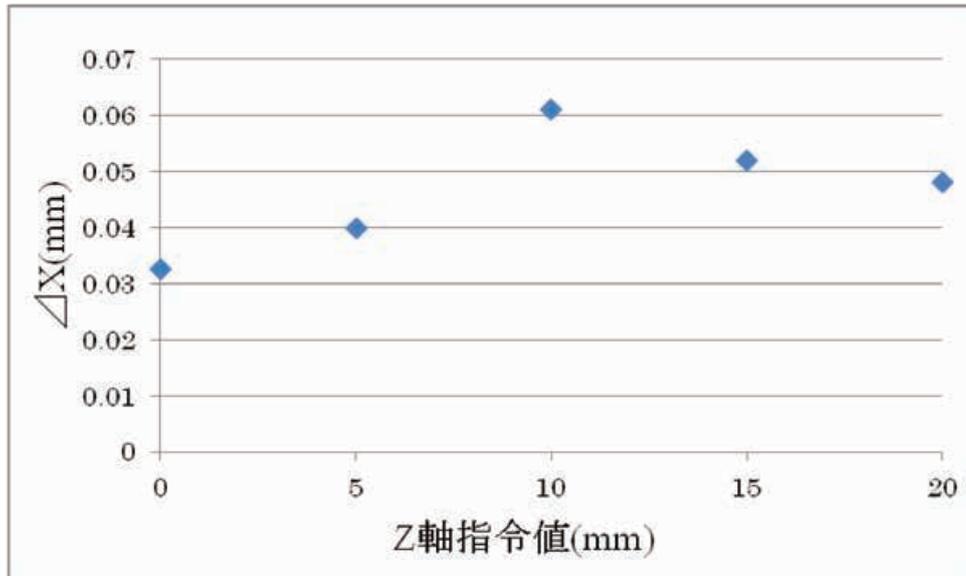


(a) 運転開始3時間後におけるZ軸方向指令に対する $\Delta X$ の分布状態

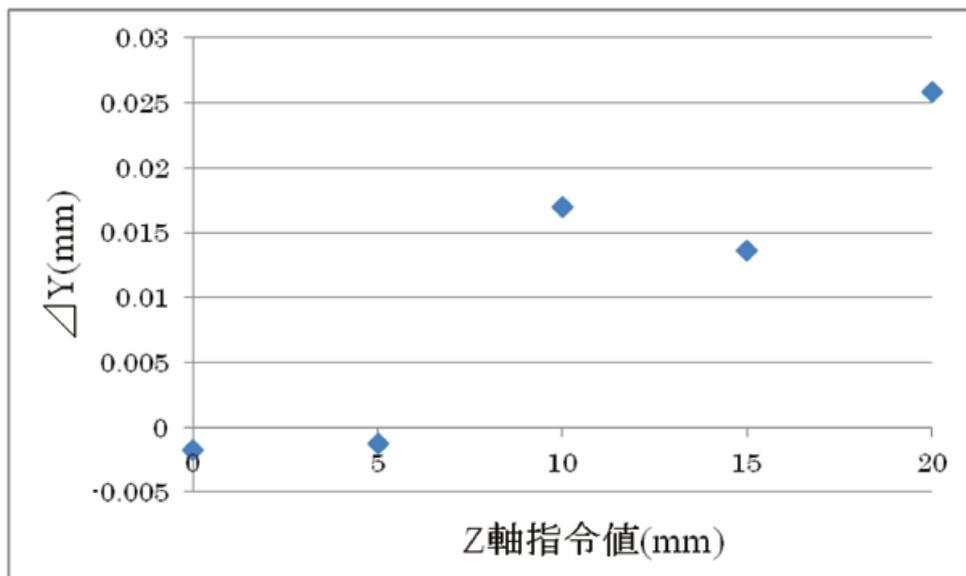


(a) 運転開始3時間後におけるZ軸方向指令に対する $\Delta Y$ の分布状態

図 2-14 センサAにおけるZ軸方向移動に伴う稜線位置の変化 ( $B=0^\circ$ )



(a) 運転開始3時間後におけるZ軸方向指令に対する $\Delta X$ の分布状態



(a) 運転開始3時間後におけるZ軸方向指令に対する $\Delta Y$ の分布状態

図 2-15 センサBにおけるZ軸方向移動に伴う稜線位置の変化 ( $B=0^\circ$ )

### 5) 並列演算による工作機械指令の補正值の反復導出法の開発

機内計測によって得られた変位量の推定値より、熱変形を補正する機械指令値を導出する際には、機械熱変形に伴う逆座標変換問題を解決する必要がある。そこで本開発では、

図 2-16 に示す軸構成を有する旋盤型機械を対象とした座標補正アルゴリズムを開発した。

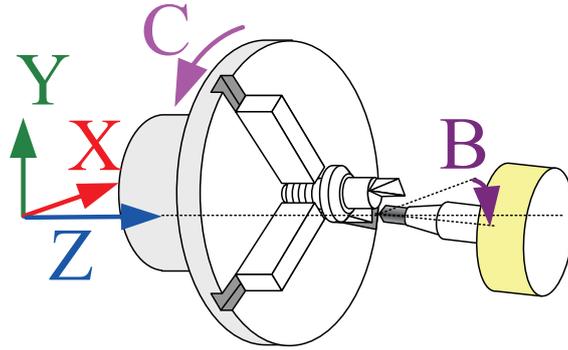


図 2-16 旋盤型複合加工機 機械座標系

開発手法では、直交軸である X Y Z 軸において、指令値に対する誤差が生じない理想状態の形状創成関数を式 2-1 としておく。

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = R_c(C) \cdot T(x_m, y_m, z_m) \cdot R_b(B) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

但し

$$T(x, y, z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_b(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_c(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

これに対して、開発するポスト処理では、まず X 軸および Z 軸方向に指令値を与えた場合の各軸の直交成分への誤差量を、それぞれ  $E_{zx}(z), E_{zy}(z), E_{xy}(x), E_{xz}(x)$  と定義する。これらの関数は先の計測によって得られたデータから、多次の近似関数として決定される。このとき、加工時の目的となる工具先端座標  $(x_w, y_w, z_w)$  を得る事のできる補正後の機械指令値  $(x'_m, y'_m, z'_m)$  を数値的に導出する。これらの関係を考慮した形状創成関数を式 2-2 に示す。

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = R_c(C) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y'_m \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & E_{zx}(z'_m) \\ 0 & 1 & 0 & E_{zy}(z'_m) \\ 0 & 0 & 1 & z'_m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x'_m \\ 0 & 1 & 0 & E_{xy}(x'_m) \\ 0 & 0 & 1 & E_{xz}(x'_m) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot R_b(B) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

機械の長時間稼働に伴う発熱がステージの局所に生じた場合、各誤差推定関数  $E$  は 2 次以上の複雑な式によって近似され、逆関数を導出して解を得ることは困難になると考えられる。そこで、本研究での開発手法では、補正後の機械指令値の候補を理想値との微小差分との組み合わせから多数生成し、全ての候補に対して総当りの座標変換を行なって最も目標値と近い位置に工具先端座標を得ることが可能な補正值を選択する数値解法を開発した。

開発システムでは、CAM システムに付属のポスト処理システムによって導出された変位を考慮しない指令値  $(x_m, y_m, z_m)$  に対し、一定距離  $(2 \sim 0.5 \mu m)$  ごとに補正值を各軸に与えた補正後の指令値候補群を生成し、これら全てに対して式 2-2 を用いて座標変換を行った。座標変換にはグラフィックハードウェア(GPGPU)として知られる並列演算デバイスを導入し、各軸に対して 100 個程度の指令値候補を組み合わせた総数  $10^6$  個の指令値候補に対する座標変換を工具先端点位置 1 箇所あたり数 msec 以内を実施することを可能としている。これらの候補から得られる座標変換の計算結果と、目標とする工具先端点位置  $(x_w, y_w, z_w)$  との距離が最小となる組み合わせを選択し、これを工具経路の全域にわたって順次実施する。

## 2-2 工具摩耗・偏芯量の機上計測による取得・補正技術の開発

本研究で対象とする工具経路補正について、その概要を説明する。本補正法では、加工誤差の原因となる工具刃先形状の理想値からのずれ（工具取り付け時のチャックとの中心位置のずれによる偏芯、長時間運転に伴う工具刃先摩耗による形状変化：図 2-17）を機上で計測し、NC プログラム中の工具通過軌跡と加工対象物の完成形状を比較し、これをもとに、図 2-18 に示すように切れ刃と加工対象面との間に生じると推定される誤差を補正する方向に経路を事前に修正する。工具ごとの偏芯や摩耗による切れ刃形状のばらつきを逐次機械内部で計測し、補正することによって工作機械の位置決め精度を忠実に転写した加工面形状の実現が期待される。

本研究課題の実施過程は、以下の 4 つの段階から構成される。

- A) 工具刃先形状の加工機内部における撮影機材、撮影条件の検討
- B) 撮影データの画像処理による工具偏芯量および工具刃先各部分の摩耗量推定
- C) 切削加工時の工具経路各位置における工具切れ刃と加工対象面との接触位置の推定
- D) 工具偏芯量、摩耗量分布と工具切れ刃接触位置を用いた工具経路の高速な修正

24年度の研究では、先年までのA)およびB)の開発結果を元に、旋盤型複合加工機上で内視鏡部品を加工する工程に対応するための技術開発を行った。具体的には旋盤型機械への装着方法の見当と、直径 2.0mm 程度までの大径工具への対応、および経路修正のためのソフトウェアシステムの開発となる。以降では、開発した手法の概要とソフトウェアシステムの内容について説明する。

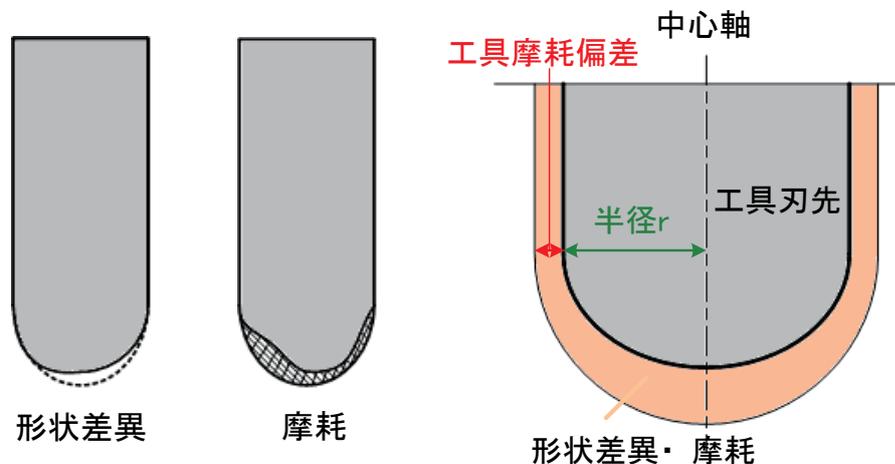


図 2-17 工具刃先形状のばらつきおよび摩耗による形状の差異

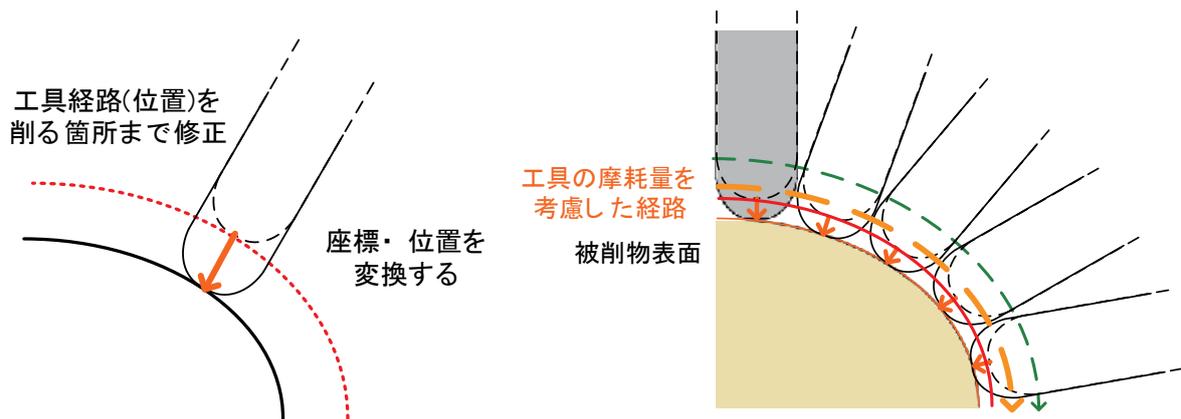


図 2-18 工具刃先形状情報に基づく工具経路修正の概念

### 1) 旋盤型複合加工機内部における工具顕微鏡を用いた機内撮影手法の開発

本研究では、コレットチャックに取り付けられた切削工具に対して、その偏心量および摩耗量を工具ごとに短時間に取得し、工具経路生成に反映させ。そのため、工具刃先形状は工作機械の主軸に取り付けられた状態で行い、コレット形状やエンドミル-コレット間の固定状態に起因する偏心等を考慮可能とする。

図 2-19 は本研究で使用した切削加工機内設置型工具顕微鏡（大昭和精機製 DynaVision）を示す。DynaVision は高速度シャッターを有する CCD カメラと同期して工具表面の照射が可能な LED を有しており、機内において主軸に取り付けられて回転中の工具を撮影することが可能となっている。本研究では、昨年度までに、図 2-20 に示す焦点位置において回転中の工具外形を背後からの LED 照明を用いて多数撮影し、これらの画像情報を図 2-21 のように合成し、ここから輪郭情報を抽出することで工具切れ刃の外形を推定するシステムを開発した。



図 2-19 機内設置型工具顕微鏡(大昭和精機製 DynaVision)

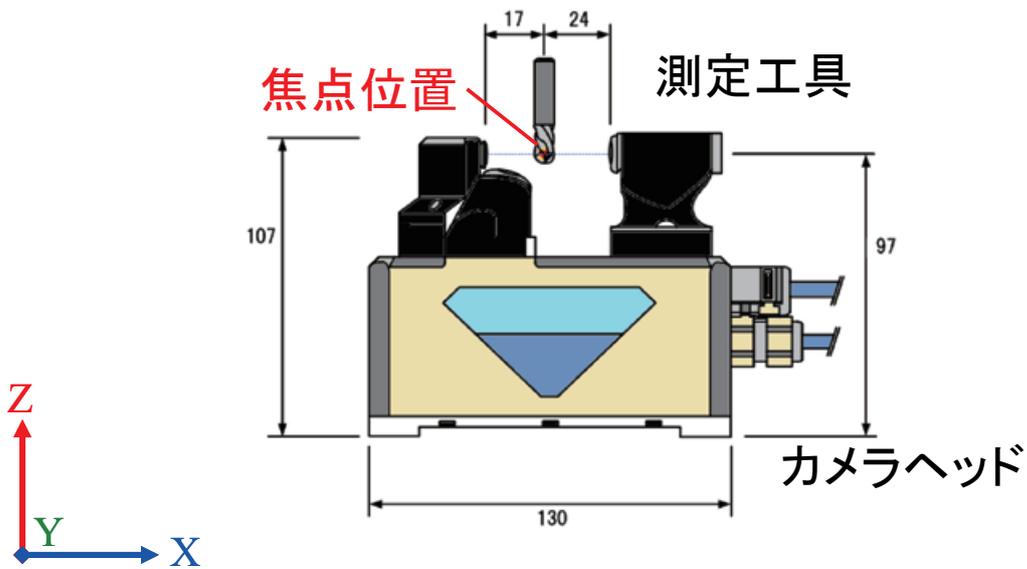


図 2-20 DynaVision 構成および CCD カメラ焦点位置

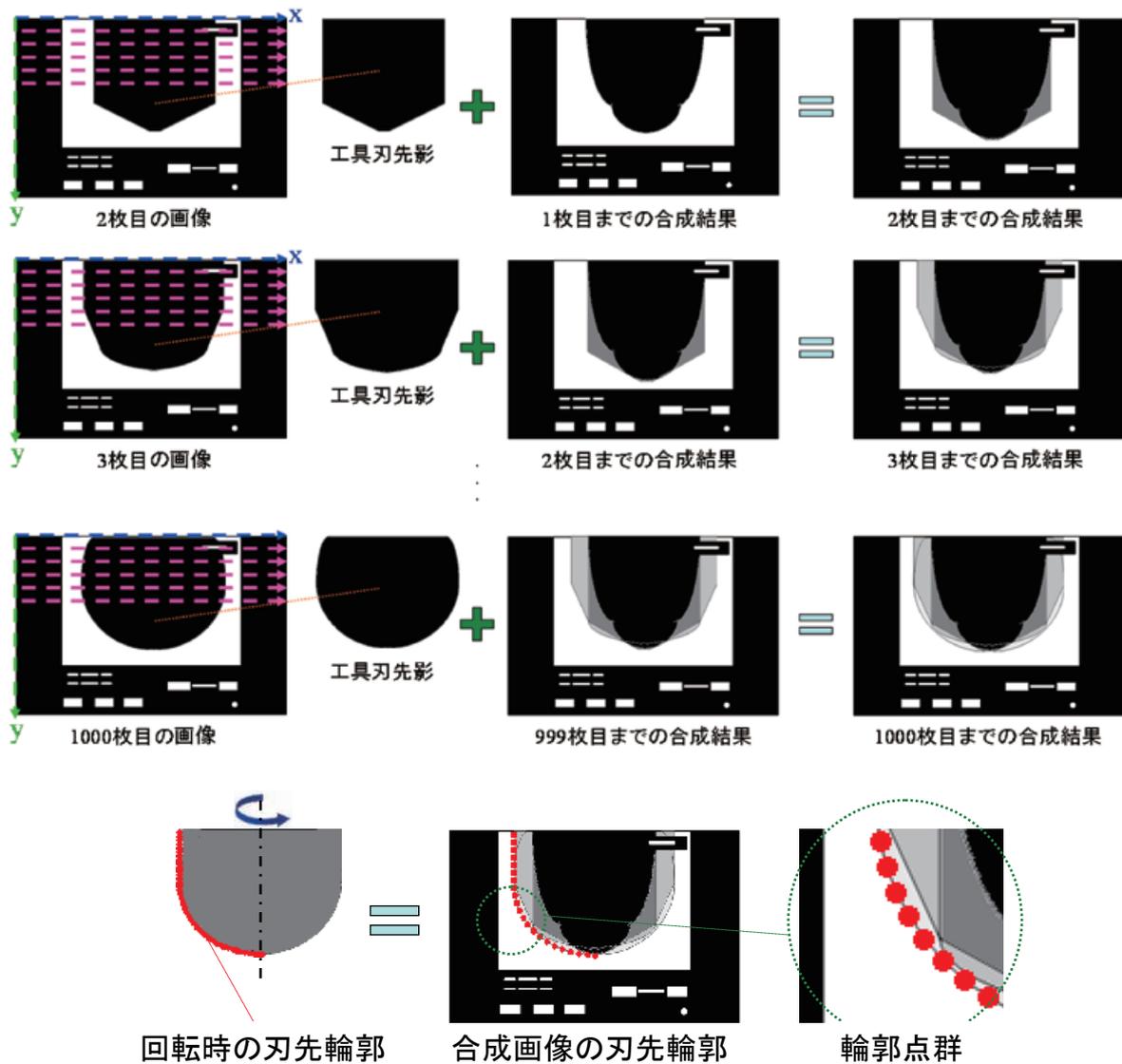


図 2-21 回転工具の多数撮影画像の合成による工具刃先輪郭情報の抽出



図 2-22 3軸制御マシニングセンタ(FANUC Robodrill)内の DynaVision 設置例

DynaVision は、機械内部に設置することによりホルダに装着された工具の刃先形状および偏芯・摩耗の状態を高速に撮影する事ができる反面、工具軸方向が垂直方向と一致する縦型マシニングセンタに対応した取り付け方法を前提としており、旋盤型工作機械での撮影実施例がないという問題があった。

図 2-22 は一般的な 3 軸制御加工機械である FANUC 社のロボドリルに DynaVision を取り付けた例を示す。撮影に際しては、テーブル上に取り付けられたカメラに対して、各直進軸の位置決め機構を用いて工具を移動させ、焦点範囲内に工具の外周部分を収める必要が生じる。

そこで本研究では、図 2-23 に示すようにセンサを固定する治具を制作し、センサ部分を旋盤主軸側の構造材上で脱着可能とした。そして、工作機械の XZ 軸の運動によって旋盤の切削主軸高さと CCD カメラの焦点位置を合致させることが可能となるよう調整を実施した。本研究で開発した機構では、センサ本体は切削工具、および 1) で述べた 2 次元変位センサと同一のツーリングクランプによって保持されており、ATC を兼用するロボットによって脱着が可能となるよう接先が行われている。また、切削時に工具および切削主軸が干渉しない位置に固定し、計測時以外はカバーで保護を行うことによって連続加工中の任意のタイミングで工具の摩耗状態を自動的に取得することが可能となっている。



ヘッド

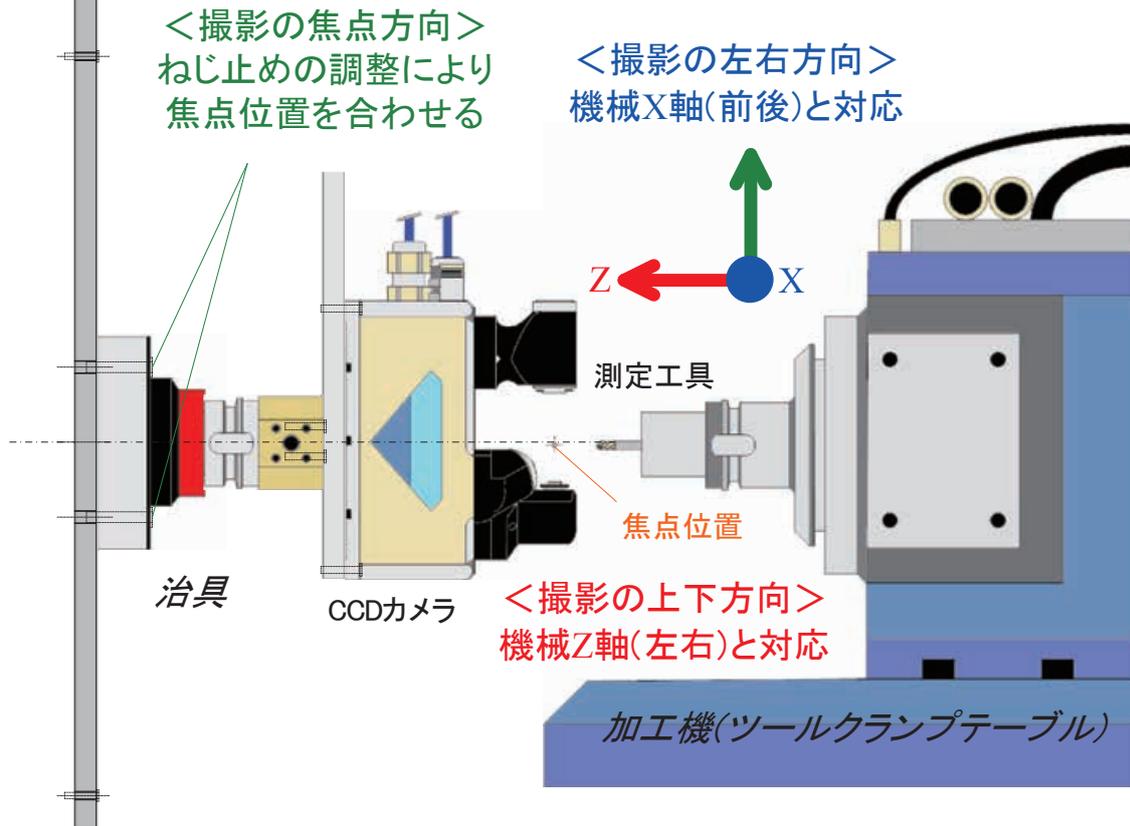


図 2-23 旋盤型複合加工機内部への DynaVision 設置方法

## 2) 大径工具(0.3mm 以上)を対象とした刃先形状 DB 生成手法の開発

前年度までの開発では、工具切れ刃の外縁を撮影画像より検出し、回転させながら撮影することによって画像処理後に形状を推定する基本システムを開発した。本システムは、直径 0.3mm までの工具を対象とし、回転中の工具画像を約 1000 枚撮影してこれらの輪郭情報を抽出することで  $0.7\mu\text{m}$  の精度で工具刃先の状態をデータベース化することが可能となっていた。

一方、内視鏡部品の製造では、直径 10mm 以下の製品を製造する際に最大で 2.0mm 程度までのエンドミルを荒加工等で使用する場合があります、これらへの対応が必須となっている。そこで本年度の研究では、複数位置での撮影結果をさらに合成し、工具切れ刃の外部形状をステッチすることで大径工具の刃先形状 DB を生成する手法の開発を行った。

図 2-24 に開発した手法での工具撮影を示す、カメラに対して H 方向及び W 方向に工具を一部運動させ、それぞれの位置で順次撮影を行う。図 2-23 で示したようにカメラの WH 方向は旋盤型複合加工機の XZ 軸にそれぞれ対応し、カメラの焦点位置を保ったまま異なる輪郭位置を撮影することが可能となっている。開発手法では W 方向に  $100\mu\text{m}$ 、H 方向に  $70\mu\text{m}$  ずつ重複する領域が存在するよう撮影を行うことで撮影結果から得られた工具刃先形状の連結を容易にしている。図 2-25 は開発システムによって撮影したスクエアエンドミルの刃先軌跡情報の生成例を示す。直径 1.0mm の工具刃先形状の取得を 3 回の工具軌跡情報から合成して行い、工具各部の摩耗状態の推定を実現した。

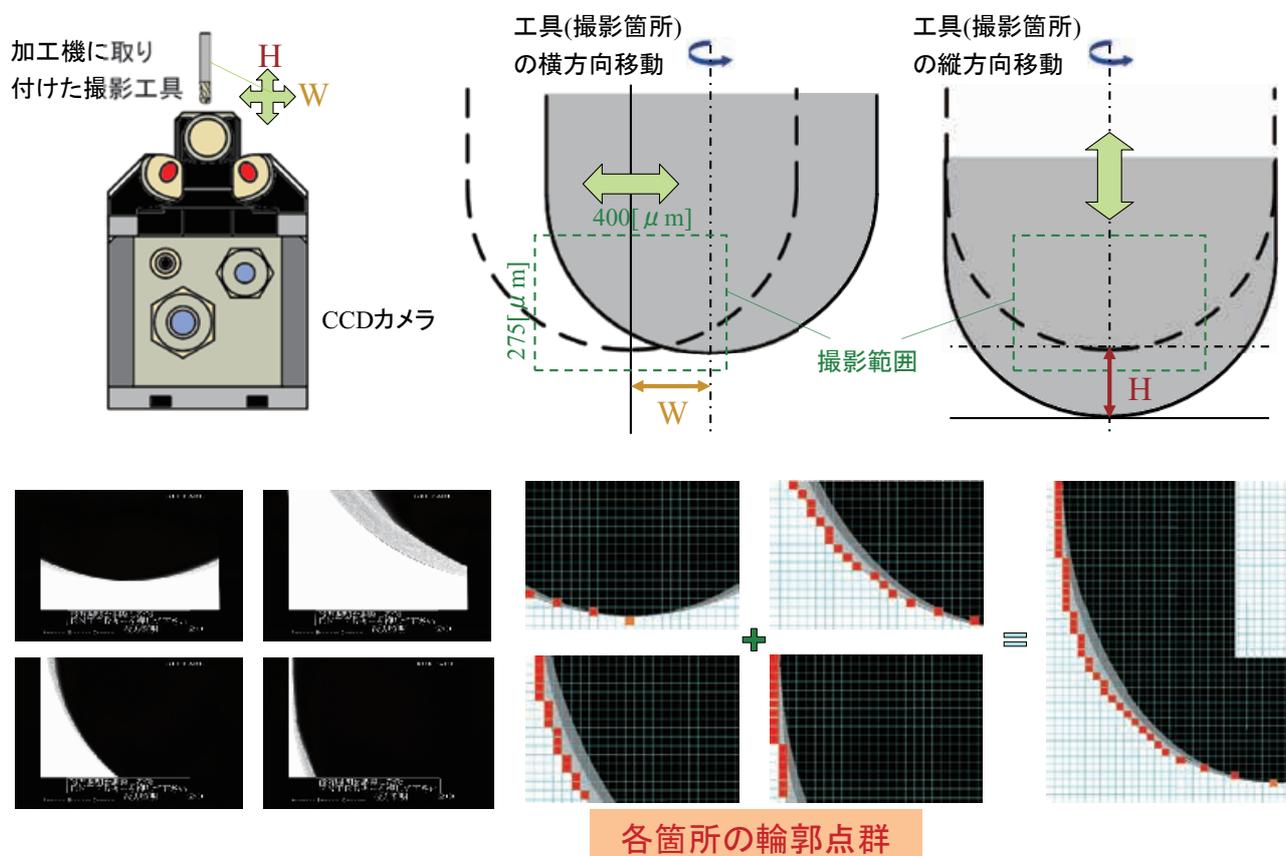


図 2-24 工具移動による複数枚画像撮影を用いた大径工具刃先形状取得

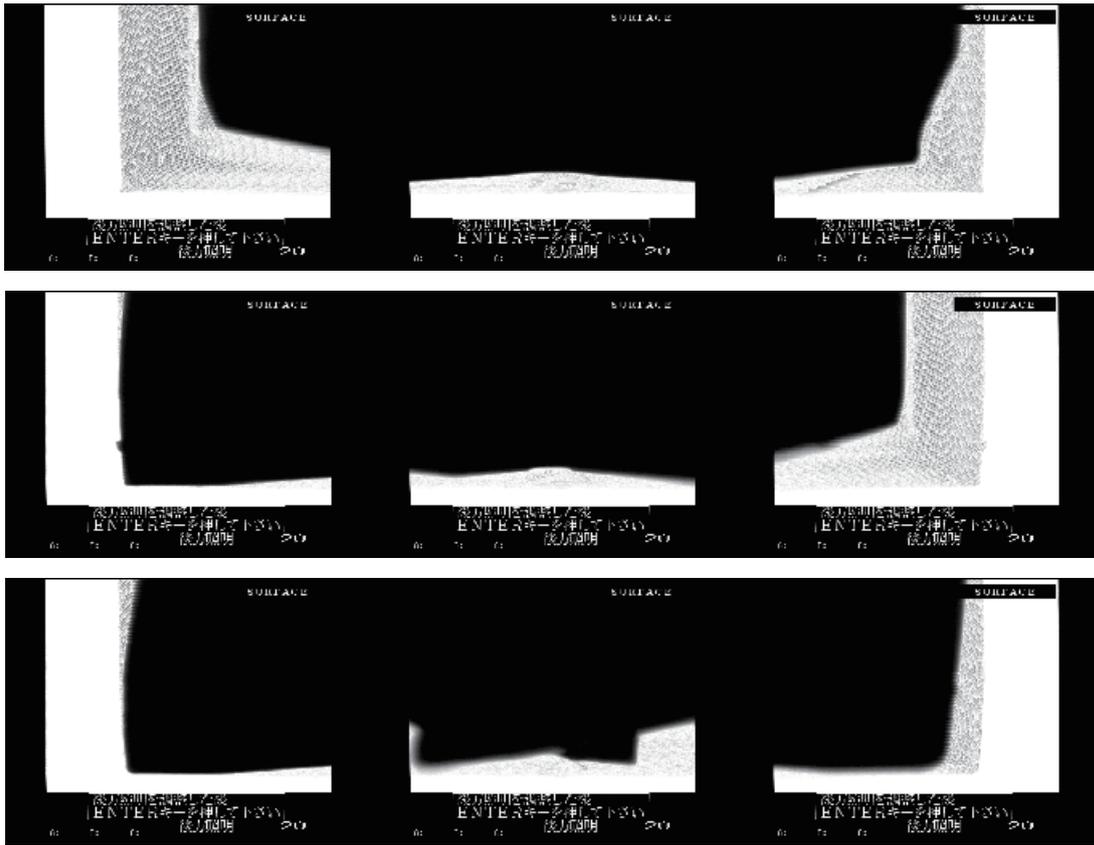


図 2-25  $\phi 1.0\text{mm}$  スクエアエンドミル 工具刃先通過軌跡撮影／合成結果  
(撮影時工具回転数  $5[\text{min}^{-1}]$ )

### 3) 工具先端点指令値座標補正量の画像処理による導出

開発手法では、加工途中の工具刃先形状は、先に述べた画像処理による導出手順によって微細な間隔(工具軸方向に約  $0.71\ \mu\text{m}$ ) ごとに分割された折れ線状の座標の連なりとして得られる。これに対して、工具先端点の指令座標に対して補正を加え、工具経路を変更する際には摩耗後の工具切れ刃が目的とする切削点を通り、かつその周囲の工具切れ刃が加工面を必要以上に削り込まないように配慮する必要がある。そこで本研究では、特に曲線状の切れ刃を有するボールエンドミルやブルノーズエンドミルを対象に、画像処理と繰り返し近傍探索によって平行移動によって削りこみの生じない補正量を導出するアルゴリズムを開発した。

開発手法の概要を図 2-26 に示す。本手法は加工対象物の法線方向が変化する 3 軸加工機械を対象としたものと、工具姿勢が鉛直な法線方向を有する加工対象面に対して変化する旋盤型加工機械を対象としたものの 2 種類から構成される。

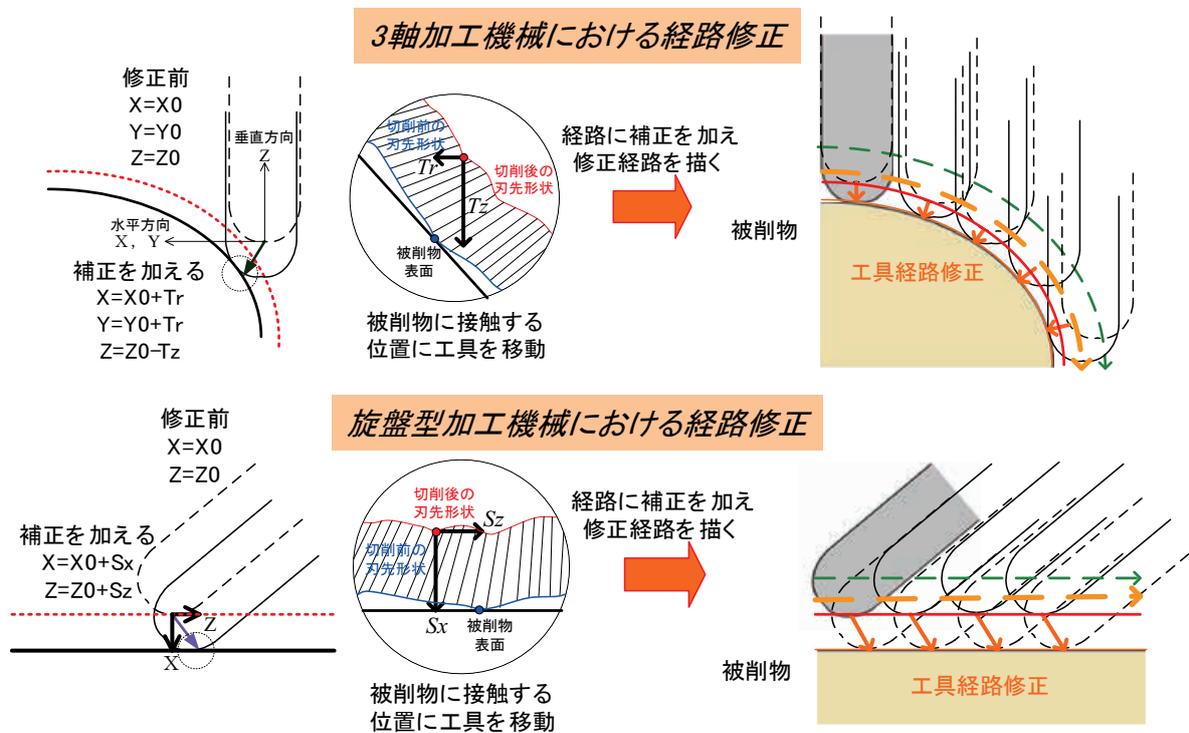


図 2-26 工具刃先通過位置の平行移動による工具経路修正

これらの工具刃先位置について、加工に関与する切れ刃の摩耗量によって生じる削り残しを検出し、工具進行方向に対して鉛直な面内での平行移動によって工具経路を修正する。

本手法の実現のためには、 $\alpha$ . CL プログラムを構成する工具先端位置の各点における加工対象面上の切削点座標と法線方向の導出、 $\beta$ . 計測によって得られた工具刃先形状を参照した平行移動量の導出、という 2 つの処理が必要となる。

そこで本研究では、 $\alpha$  の工具先端位置と加工対象面上での切削点座標の導出手段として切削点位置・法線情報導出用幾何形状処理システムの開発を行った。これは、NURBS カーネルを有するサーフェース CAD カーネルを使用し、曲面形状の認識と CAM によって生成された CL プログラムのデータ解析を実施するものである。工具先端点座標に対して、近傍に存在する完

成面形状を探索し、摩耗等のない理想状態の工具刃形状の元で工具が切削を行い、加工面を創生する点の位置と、その点における加工面の法線ベクトルを導出する。図 2-27 は本システムを用いて等高線加工の工具経路に対する解析を行った例を示しており、赤色に示す加工面の法線ベクトルが、角柱形状を構成する平面、円筒面上に導出されていることがわかる。

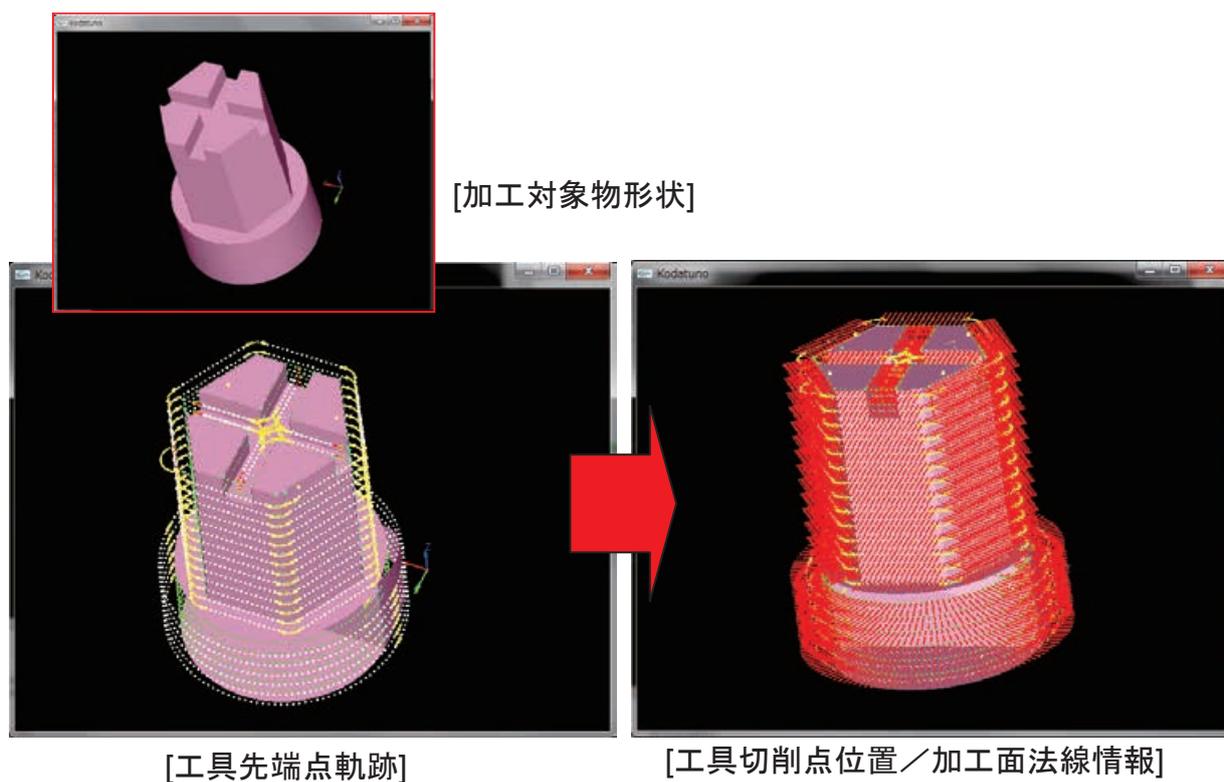


図 2-27 工具切削点位置／加工面法線情報の導出システムの実行例

$\beta$  の工具の平行移動量の導出では、摩耗等のない幾何的に誤差を有しない工具刃先形状が CAM による工具経路生成時に設定されていたと仮定し、これと摩耗が生じた切削後の形状との間で平行移動を行って補正值の導出を行う。平行移動は工具の進行方向に対して鉛直な面内で実施し、この移動量を CL のプログラムを構成する工具先端点の指令座標に逐次加えることによって座標の補正を実現している。

図 2-28 は、それぞれ 3 軸制御加工機械において傾斜面の切削を行う際の補正值導出の詳細を表しており、図 2-29 は工具中心軸が工作機械の座標軸に対して変化する旋盤型複合加工機械における補正量の導出手法を示している。いずれの手法においても、切削面側の切削点の近傍が

一定の法線を有する平面であると仮定し、この平面と接する摩耗後の工具切れ刃の近傍点を探索することで平行移動量を決定している。

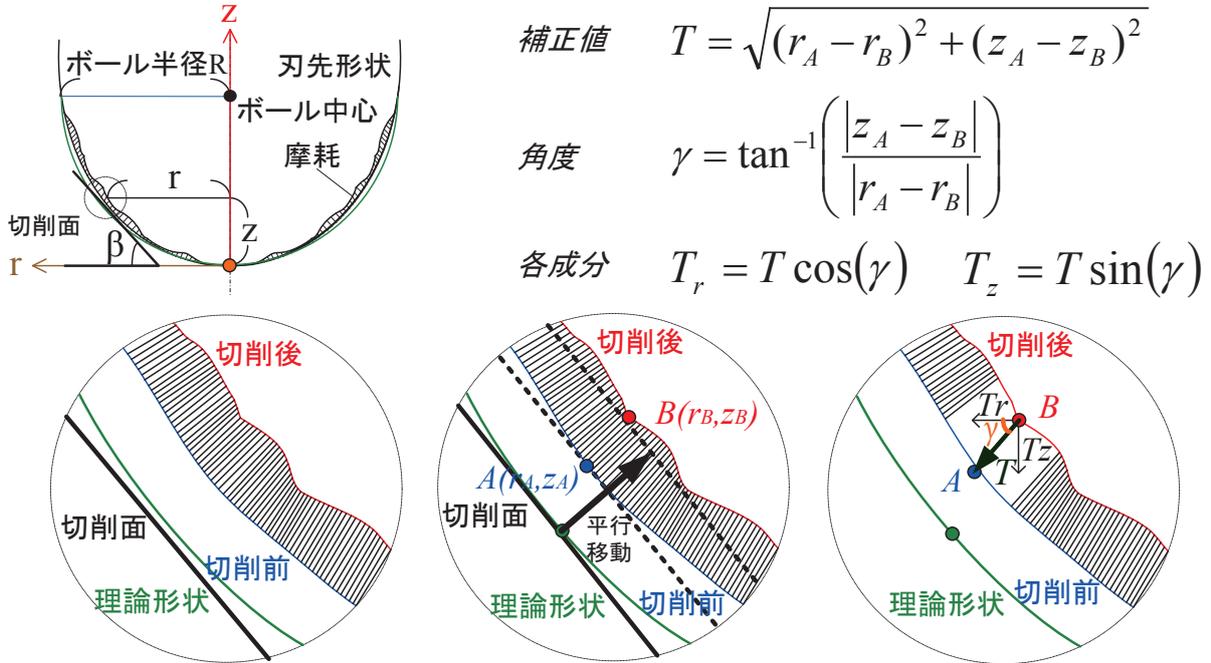


図 2-28 3軸制御加工機による傾斜面切削を対象とした補正值導出の計算式

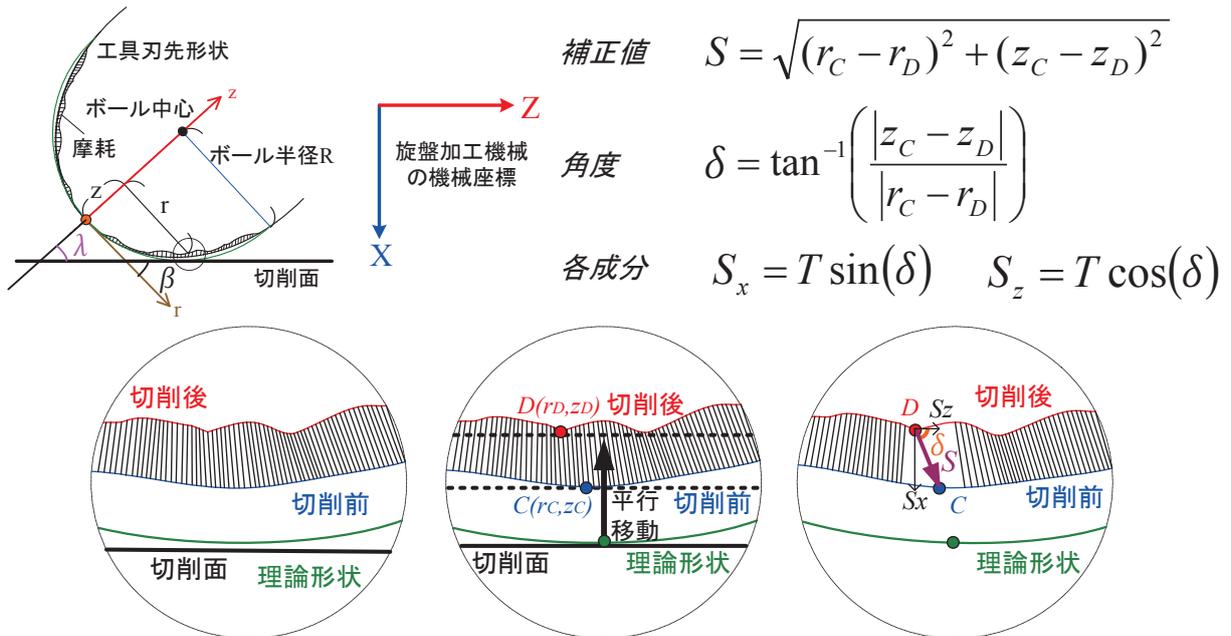


図 2-29 旋盤型複合加工機による平面切削を対象とした補正值導出の計算式

平行移動量の画像処理による決定アルゴリズムを図 2-30 に示す、本アルゴリズムでは、機上計測によって得られた画素データを処理し、摩耗した工具刃先情報に摩耗を生じていない場合の理論的な工具形状を描画して加工対象面との相対姿勢に応じて画像を回転させる。そして、摩耗後の切れ刃と加工面との接触点の導出を回転処理後の画素情報の操作に代替することによって高速な最近傍点の導出を実現している。

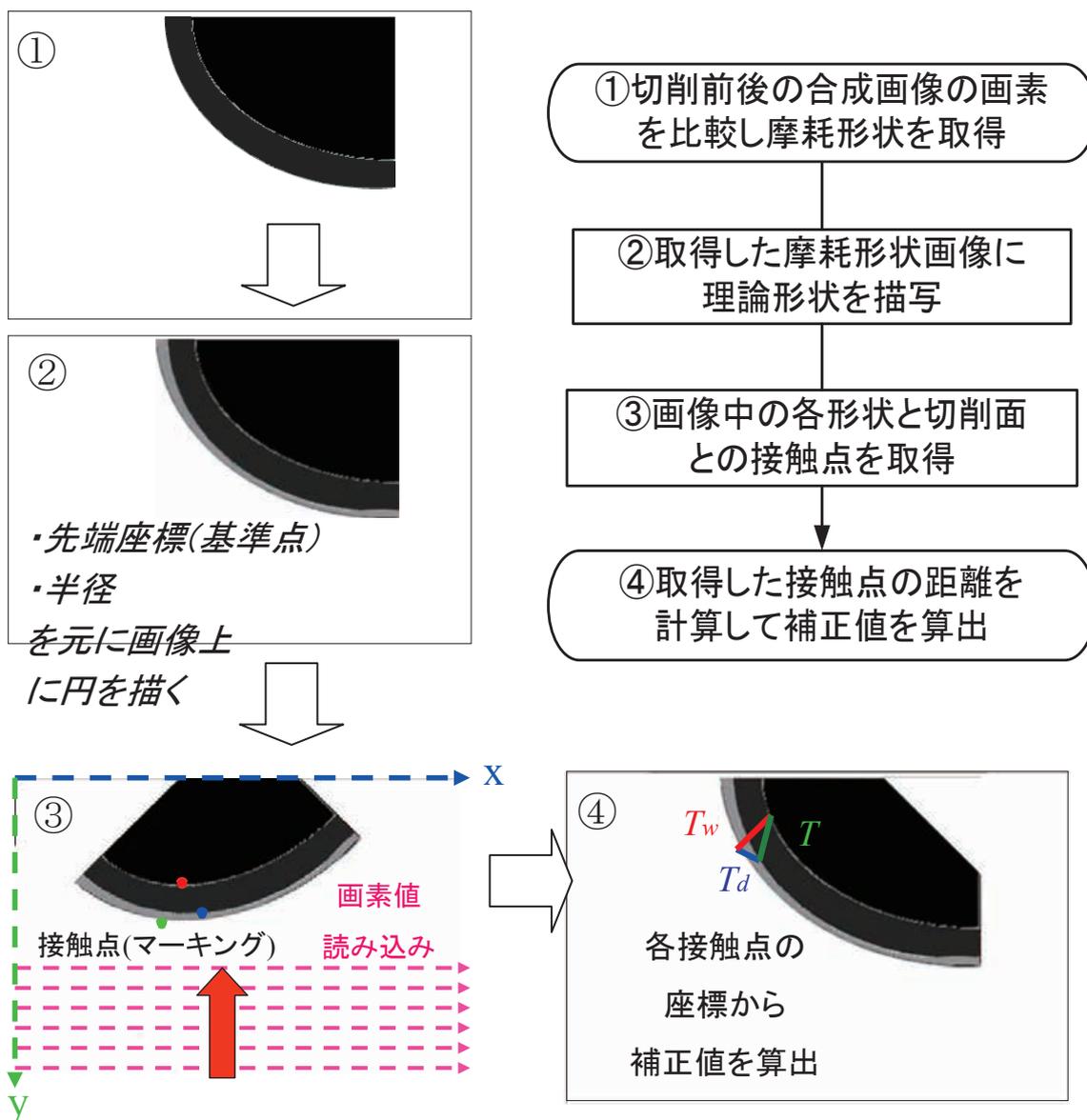


図 2-30 画像処理による工具先端点座標補正值の導出手順

#### 4) 検証実験の実施

これまでに開発を行った工作機械熱変形の補正システム、および工具摩耗／偏芯による加工誤差の補正システムの効果を検証するため、旋盤型複合加工機を用いた切削実験を行った。

実験では、まず表 2-3 の条件で図 2-31 に示す丸棒材をそれぞれ B 軸の回転角を変更して 37.2mm 分切削し、45°、60°、75° のそれぞれの部分を個別に摩耗させる。次に工具座標の補正効果を検証するため、図 2-32 に示すように同一の材料の異なる部分に溝形状を切削し、この外径を図 2-33 の接触式プローブで計測して加工開始直後と、1 試行後、2 試行後の摩耗量を比較する。この際、溝形状の切削直前に工具刃先形状を計測し、工具先端点への指令値を補正を有効にした場合と補正を行わない場合の二種類の溝形状をそれぞれ切削することで補正の効果を直接比較する。

表 2-3 実験条件

工具	2枚刃ボール エンドミル ショート刃
材質	コバルトハイス HS-Co
直径	1 mm
全長	50 mm
刃長	1 mm
ねじれ角	30°
主軸回転数	8000 rpm
送り速度	10 mm/min
切り込み 深さ	0.1 mm
被削物	アルミ部材 A2017
切削方法	アップ&ダウンカット 乾式

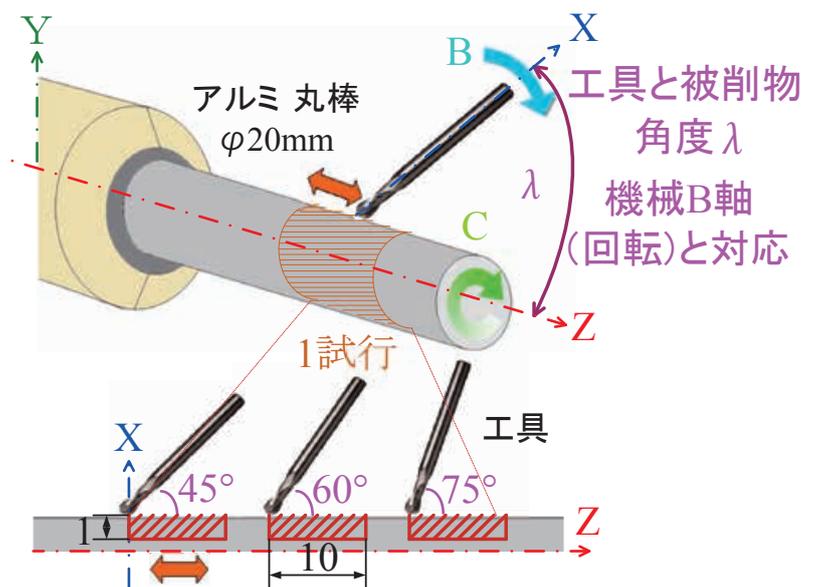


図 2-31 摩耗進展のための丸棒材料切削経路

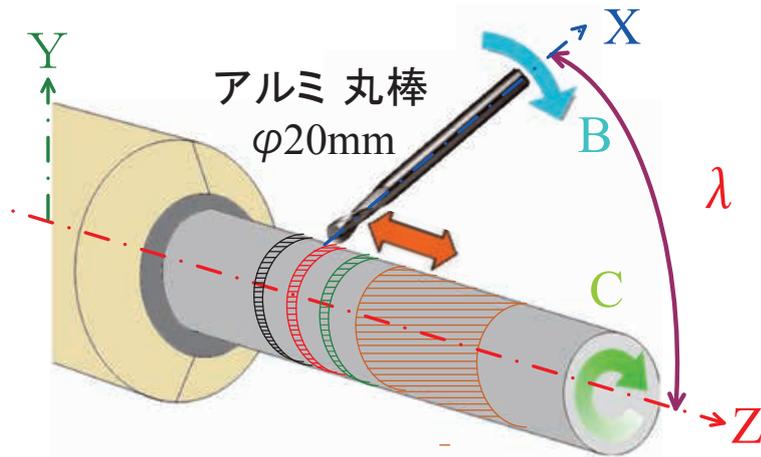


図 2-32 工具摩耗状態評価／座標補正効果比較のための溝形状切削経路

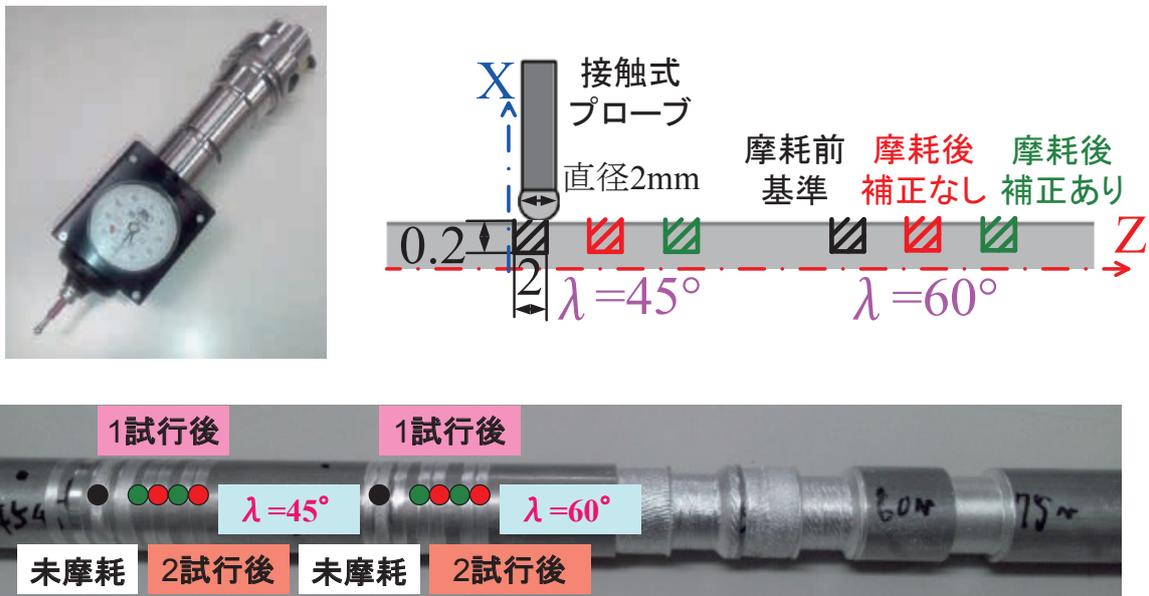
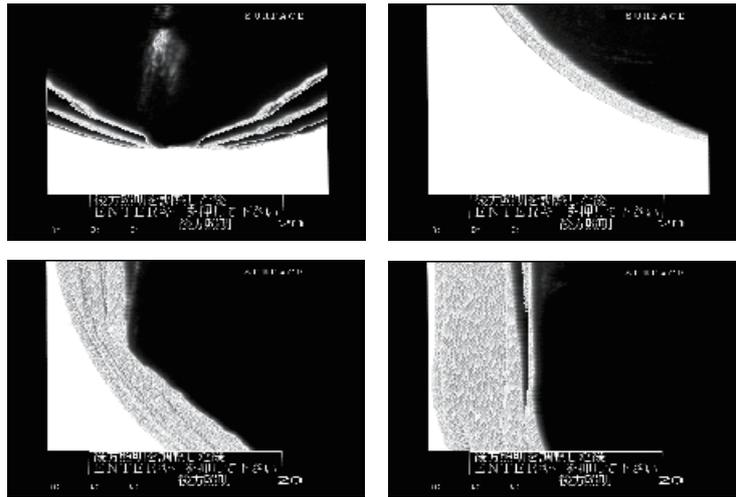
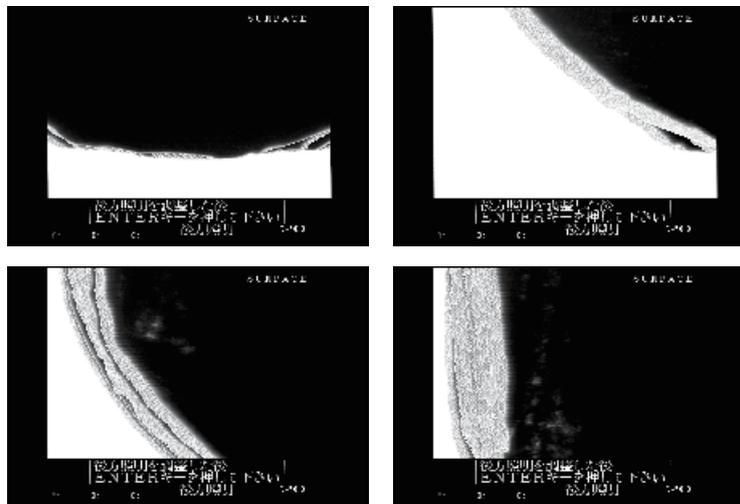


図 2-33 接触式ダイヤルプローブを用いた溝形状深さ計測

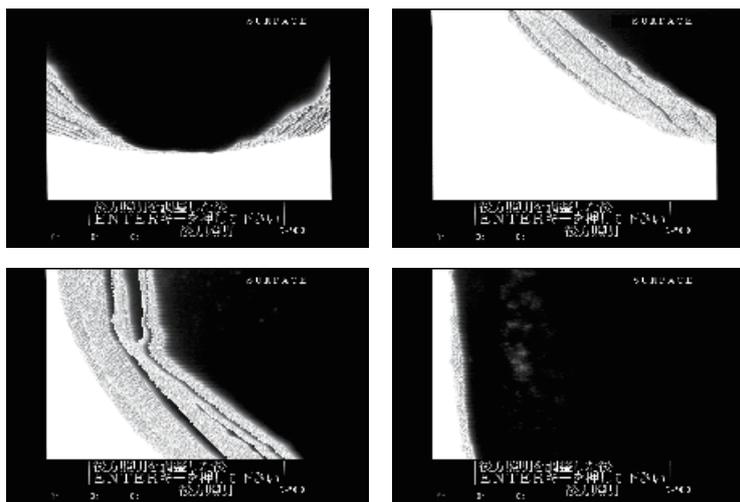
図 2-34 はそれぞれ、実験開始前と実験開始後 1 工程目終了後、2 工程目終了後のそれぞれの時点で撮影された合成画像を示す。本実験では直径 1.0mm のボールエンドミルを使用しているため、工具は 4 つの領域に分割して撮影を行い、これらを後に結合して全体の画像を取得している。図 2-35 は実験開始前の工具状態を撮影した画像を結合し、工具全体の輪郭の状態を示した例となる。



(a) 切削実験開始前状態



(b) 1 試行切削終了時状態



(c) 2 試行切削終了時状態

図 2-34 工具顕微鏡の撮影画像の合成例

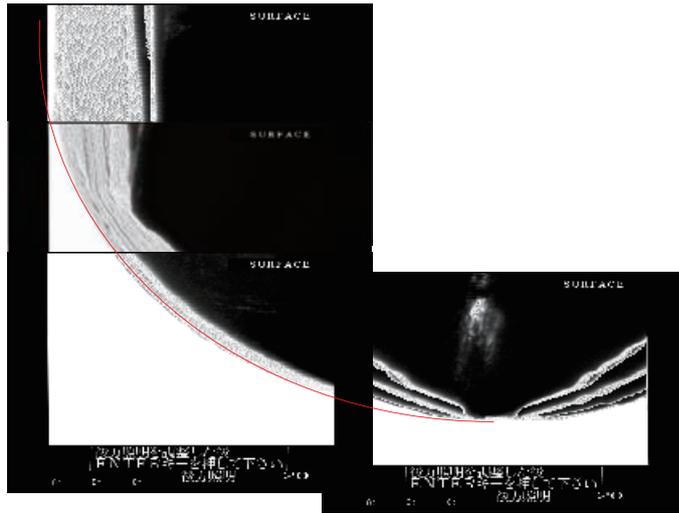


図 2-35 各画像の相対位置

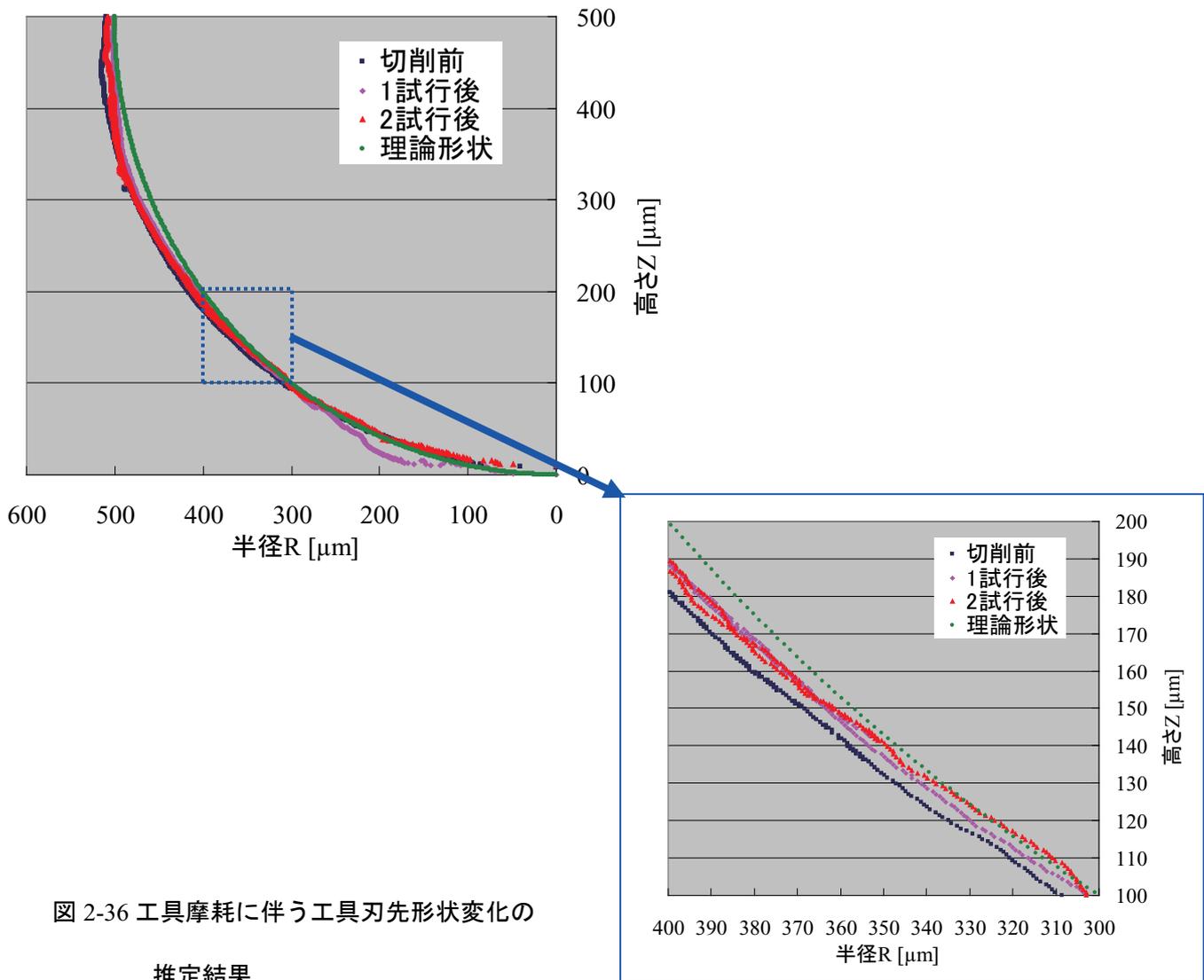


図 2-36 工具摩耗に伴う工具刃先形状変化の  
推定結果

図 2-36 は、導出した画像から工具刃先の形状変化を画像処理によって推定した結果を、工具全体と、一部のそれぞれについて示している。工具理論形状に対して、実験開始前の新品工具の状態でも既に  $10\mu\text{m}$  程度の誤差が存在しており、これはホルダに工具を取り付けた際の芯ぶれによるものであると考えることができる。これに対して試行を経ると工具切れ刃各部の径の大きさは徐々に減少しており、こちらは工具摩耗による影響であると考えられる。

図 2-37 および図 2-38 は、それぞれ 1 試行目の終了時と、2 試行目の終了時のそれぞれの状態で溝形状を加工した際の工具形状の変化と、偏差の発生状態を工具と加工対象物の相対角度ごとに比較した結果を示す。また、図 2-39 は、これらを試行回数と偏差の拡大との関係で整理した結果を示す。補正を行わない場合、いずれの結果においても切削の進展に伴って加工誤差が拡大する傾向にあり、また  $45^\circ$  の位置では工具の芯ぶれに伴う誤差が初期の状態から  $4\mu\text{m}$  以上発生していることがわかる。これに対し、開発手法を適用した加工ではそれぞれの誤差の発生を未適用の場合と比較して半分以下に抑制することが可能となっており、工具が寿命に達し、破損が生じるまでの間で  $2\mu\text{m}$  以下に加工誤差を抑制することが実現できていることが確認された。

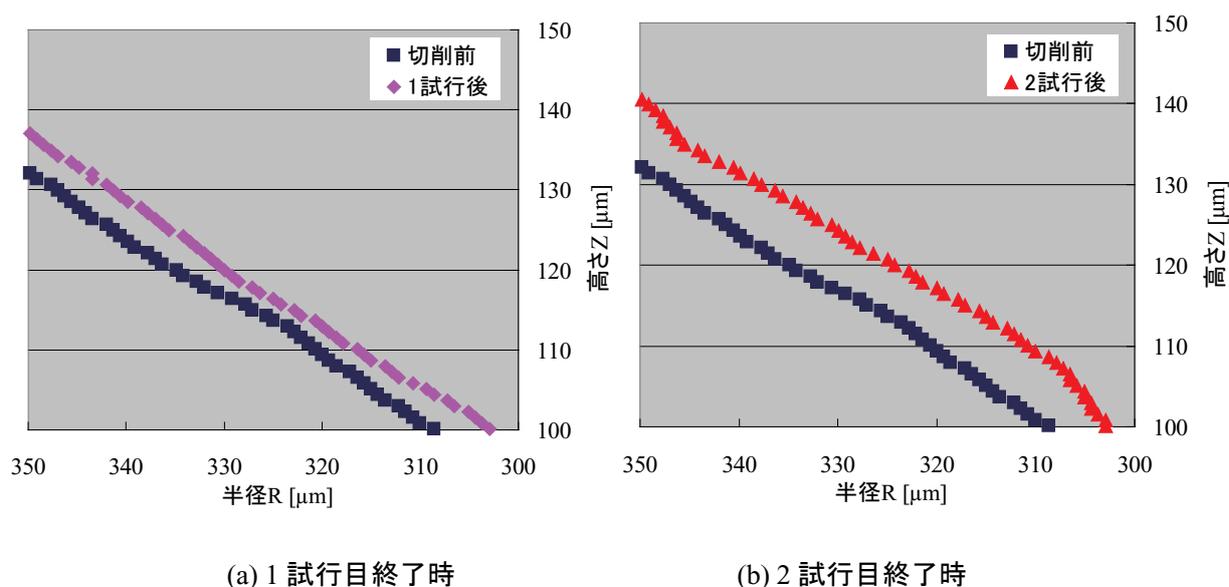


図 2-37 切削試行終了時の工具形状の変化

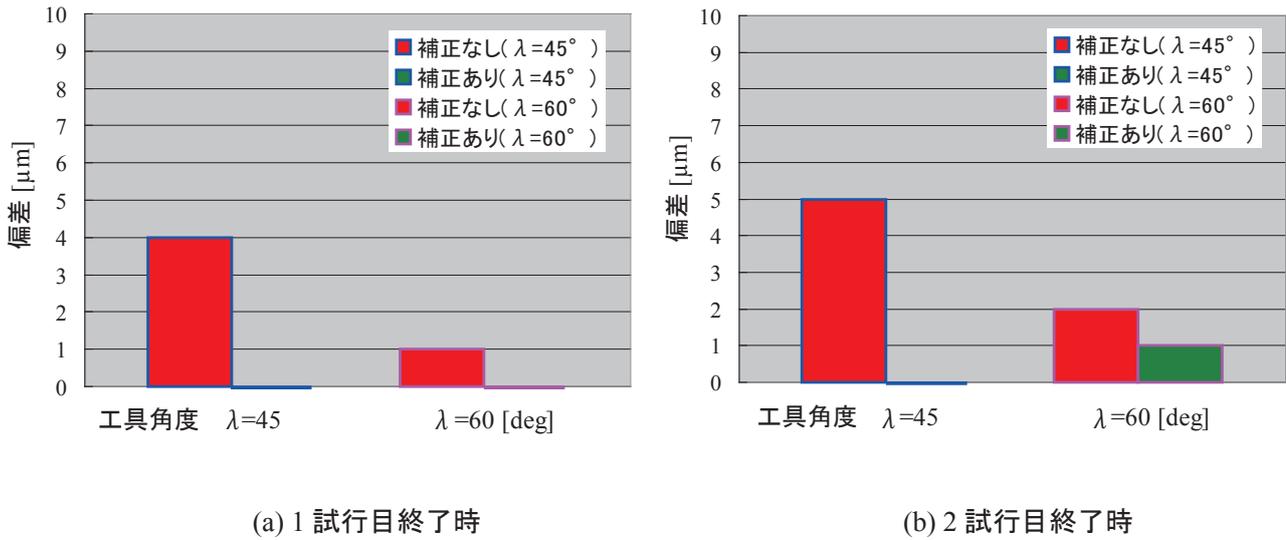


図 2-38 切削試行終了後の溝切削における加工誤差の比較結果

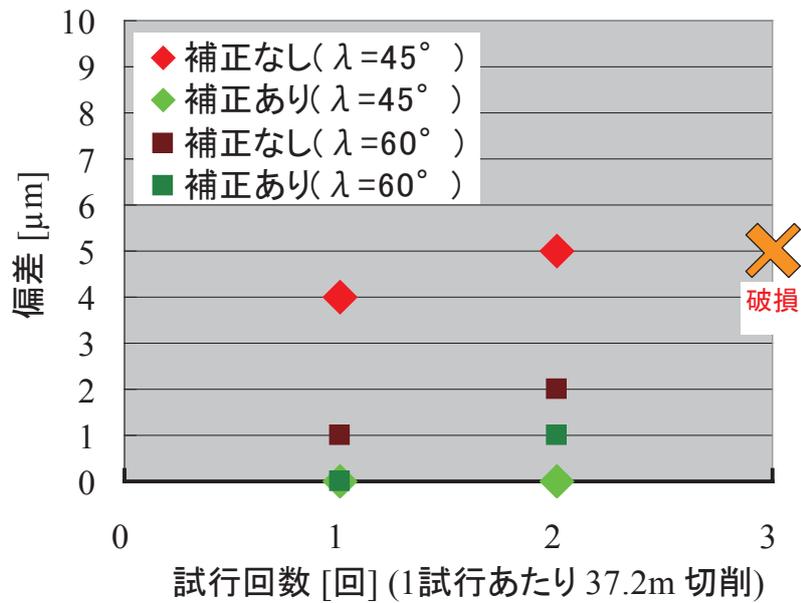


図 2-38 加工誤差に対する補正効果の関係

### 3 研究成果のまとめ

医療用小型光学部品の生産では、直径 10mm 以下の素材から旋削加工とフライス加工を用いて製品形状を創成することが求められている。これらの切削加工においては工程の集約と効率化が必須とされているが、一般的な複合加工機では長時間運転による熱変形や工具摩耗といった問題に対して十分な加工精度が維持できるとは言いがたい状態にある。また、従来から使用されてきた加工精度補正技術は、そのほとんどがより大型の多軸マシニングセンタ等に向けて開発されており、バー材から繰り返し長時間運転によって多数の製品を創成する部品加工等への適用が難しい問題があった。そこで本研究では、超小型複合加工機を用いた複雑高精度高付加価値部品の量産を対象として、加工誤差の発生原因となる工作機械熱変形および工具刃先摩耗の影響を机上計測によって逐次補正し、ソフトウェア的な高精度化を実施する技術の開発を行った。

平成 24 年度は、平成 23 年度までの結果を受けて、機械構造の熱変形を非接触かつ高速な計測が可能な 2 次元 CCD レーザ変位センサを使用して旋盤型複合加工機上で計測する手法の開発を行い、CAM ソフトウェアによって出力された工具刃先経路から、補正値を導出するための幾何形状処理システムの開発を行った。また、工具切れ刃のばらつきやチャック時の偏芯、長時間の運転による工具摩耗によって発生する切り込み誤差をソフトウェア的に補正する手法として、内視鏡部品加工に使用される直径 2.0mm までの工具に対応した工具刃先形状机上取得手法を開発し、内視鏡部品製造条件に対応した指令値補正量導出システムの開発を行い、補正の効果を検証する実験を行った。主な成果は以下のとおりとなっている。

1ーア) 旋盤型複合加工機上で工作機械熱変形の計測を行うためのセンサ把持手法の開発  
切削主軸に ATC によって装着された基準工具に対して、稜線位置を安定して推定するための複数の 2 次元変位センサの維持方法を検討した。ツールホルダと共通の把持機構を有する治具を開発し、ATC 用ロボットアームを用いて機内の計測位置にセンサを配置することで計測を実施する手法を開発した。

1ーイ) 並列演算による工作機械指令の補正値の反復導出システムの開発

直進軸の熱変形による変位方向を考慮した工作機械指令の補正値を、収束演算によって数値的に導出する手法を開発し、これをグラフィックスハードウェアとして知られる並列演算デバイス上で高速に実施する手法を開発した。一つの工具刃先位置に対して、直進軸の XYZ 軸方向に対してそれぞれ 100 個程度の補正値後の指令値を設定し、これを組み合わせた  $10^6$  組の補正値候補に対して変位後の機構が与える変位位置を形状創成理論に基づく値として導出するシステムを開発した。計算機実験では 3 万点程度の工具先端点経路に対する補正値の導出を 3.5 秒程度の時間内に実施することが可能となった。

2-ア) CCD 工具顕微鏡の複合加工機内部での設置手法の開発

従来、3軸制御工作機械向けに使用されてきた CCD 工具顕微鏡を複合加工機の切削主軸を計測可能な位置に設置し、加工中の任意のタイミングでのエンドミル工具の切れ刃輪郭形状のチャックへの取付時の偏芯や摩耗の機上計測を実現した。

2-イ) 画像処理による工具刃先輪郭形状推定システムの大径切削工具への対応の実現

先の開発によって開発された、ねじれ角を有する工具切れ刃の輪郭形状を推定するアルゴリズムを拡張し、内視鏡部品製造に使用される直径 2.0mm までの工具の摩耗状態の取得を実現した。開発システムでは、工具刃先のすくい面方向の摩耗進展を約  $0.7\mu\text{m}$  の精度で取得し、工具毎のデータベースを生成することを実現し、個々の工具のばらつきやチャック条件の違いによる偏芯を高速に取得することが可能であることが確認された。

2-ウ) 工具経路に対する切削点座標および工具刃先の切削関与位置の導出システムの開発

CAM によって生成された工具先端点座標経路に対して、加工対象物の完成形状の情報から、加工対象物上の切削点座標と、これを創成する工具刃先位置を導出するアルゴリズムを開発した。また、これに基づき、ソリッド CAD カーネルを用いて切削点を導出するシステムを開発した。

2-エ) 工具刃先輪郭形状を参照した工具先端位置補正值導出システムの開発

工具切れ刃の輪郭形状を参照し、画像処理の手法を用いて工具先端点の座標への補正值を導出するアルゴリズムを開発した。従来の 3 軸制御加工マシニングセンタに加え、工具とワークとの相対姿勢が任意に変化する旋盤型複合加工機に対応した手法を実現した。提案手法では、工具刃先位置 1 点あたり 45msec 以内で補正值を再帰的に導出することを可能とした。

「この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。」

**リサイクル適性** (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。