

工作機械の動作経路測定システムの開発

牛尾 雅樹

目 次

第一章 緒 論

1. 1 本研究の背景と目的

1. 1. 1 本研究の背景

1. 1. 2 本研究の目的

1. 2 本論文の概要

謝 辞

第二章 動作経路測定に関する従来の研究と課題

2. 1 工作機械の機械精度測定

2. 1. 1 静的組付精度 (ISO 230-1)

2. 1. 2 静止位置決め精度 (ISO 230-2)

2. 1. 3 実加工試験片を用いた間接測定

2. 2 直接測定による同時2軸動作経路測定手法

2. 2. 1 円運動試験装置による測定 (ISO 230-4)

2. 2. 2 レーザ干渉測長システムによる測定 (ISO 230-6)

2. 2. 3 交差格子スケールによる測定

2. 3 同時5軸動作経路測定手法とその課題

2. 3. 1 実加工試験片を用いた間接測定 (NAS 979)

2. 3. 2 円運動試験を応用した測定 (ISO 230-4 拡張)

2. 4 動作経路測定手法に関する従来技術の総括

参考文献

第三章 動作経路測定システムの構成と測定原理

3. 1 システム開発コンセプト

3. 2 システム構成

3. 2. 1 システム構成及び各部詳細

3. 2. 2 誤差要因解析項目

3. 3 システムの測定原理

3. 4 システムの測定精度校正

4. 3. 1 計測軸の校正

4. 3. 2 計測軸相互の直角度校正

3. 5 本章の総括と結論

参考文献

第四章 測定経路設定概念及び解析要因の設定

- 4. 1 同時2軸動作経路 (ISO 230-4 拡張)
 - 4. 1. 1 円運動動作経路
 - 4. 1. 2 四角運動動作経路
 - 4. 1. 3 菱形運動動作経路
- 4. 2 同時3軸動作経路 (ISO 230-6 拡張)
- 4. 3 同時5軸動作経路 (ISO 230-4 拡張)
 - 4. 3. 1 円錐運動動作経路
 - 4. 3. 2 四角錐運動動作経路
 - 4. 3. 3 菱形錐運動動作経路
- 4. 4 本章の総括と結論

参考文献

第五章 測定システムの検証事例

- 5. 1 同時2軸動作経路
 - 5. 1. 1 円運動動作経路
 - 5. 1. 2 四角運動動作経路
 - 5. 1. 3 菱形運動動作経路
- 5. 2 ダイアゴナル運動動作経路
- 5. 3 同時5軸動作経路
 - 5. 3. 1 円錐運動動作経路
 - 5. 3. 2 四角錐運動動作経路
 - 5. 3. 3 菱形錐運動動作経路
- 5. 4 システム実用事例
 - 5. 4. 1 測定結果を用いたパラメータ補正
 - 5. 4. 2 指令値生成におけるリニアライゼーション処理
 - 5. 4. 3 指令値生成におけるポストプロセス誤差測定
- 5. 5 本章の総括と結論

参考文献

第六章 結 論

第一章 緒 論

1. 1 本研究の背景と目的

1. 1. 1 本研究の背景

近年の工業製品は製品寿命の短命化により，その生産設備は，頻繁な工程変更を余儀なくされ，工程の簡素化やそれに要する時間も短縮化が著しく行われている．製品の部品加工や金型製造に関して，除去加工は中心的な役割を果たしている．

除去加工には，切削・研削加工を行う工作機械が主に用いられ，加工対象の大きさや工程の違いによっても，要求される性能は異なる．

除去加工の高精度化・複雑化に対応するために，マザーマシンである工作機械は，多様な動作を高精度に行う必要性が生じる．

目的に応じ多様な形式が開発され，代表的なものとしては，平面切削に用いられる「フライス盤」，円筒切削に用いられる「旋盤」，歯車切削に用いられる「ホブ盤」などである．

1940年代では，これら工作機械の制御は人の手で行われてきたが，工作機械の動作精度向上と自動化を目的に，1952年に世界で初めて数値制御（Numerical Control）機能が搭載され，現在では，そのほとんどが数値制御工作機械（NC 工作機械）となっている．

また，工作機械の複合化も進み，上記のフライス加工やねじ切り加工，穴あけ加工等が同一の機械で行えるマシニングセンタ（MC）と呼ばれるものも開発され，広く普及している．

近年の製品の複雑化や高精度・短納期化が強く求められるという現状の中で，より高度な制御装置・手法が開発されてきた．

複合工作機械の一つに，同時5軸制御が可能な工作機械がある．

これは，従来まで直動3軸制御であったものに旋回・傾斜軸を2軸付加したもので，加工に対する自由度が高い反面，精度面では，3軸制御に比べ若干劣る．

昨今の要求に応えるためには，複雑な制御が可能である5軸工作機械を指令通りの動作をさせる必要がある．

自由度の高い動作に関して，動作精度を劣化させず，高精度加工を行う際には，機械精度を正確に測定し，誤差要因の特定及び数値化を行った上で，機械制御パラメータの設定を行う必要がある．

工作機械の精度測定は、ISO 230-1を始め、使用用途に応じ測定手法も多様化し、かつ、高度な技術を必要としている。

初期の精度測定は、工作機械を構成する、機械要素自体の工作精度や、要素相互の組み付け誤差を、定規等を比較基準とし、機械的な組付け誤差を直接測定し、得られた結果を用いて、再調整を行うことにより、精度向上を図っていた。

しかしながら、要求精度が精密化するにしたがって、ISO 230-2に規定される静止位置偏差の測定だけでは充分とは言えなくなった。

したがって、動作測定に着目した円運動試験法（ISO 230-4）により、円運動に限定された経路の直接測定から、特に制御パラメータの評価検討が加えられた。

動作精度の課題となっていた、象限切り替え時のロストモーション・反転スパイク等の低減に大きく寄与し、工作機械評価方法として、メーカーでの出荷検査や、日常的な精度把握に活用されている。

一方、5軸工作機械における自由度の高い動作経路については、NAS 979に規定される、同時5軸制御時の実切削試験片について、間接形状測定による、評価が一般的である。NAS 979は、1969年に制定され、航空機部品を対象とした工作機械に関する規格である。

この規格を忠実に実行し、検査結果を得るためには、諸条件を厳密に設定し、実切削試験片を得る必要がある。

昨今では、同時5軸制御時の動作精度についても、直接測定を目標に、種々の研究機関が装置・方法について研究開発を行っている。

代表的な例として、円運動試験装置を用い、NAS 979の規定に厳密に即した検査方法の提案が成されているが、その記述の中には、

「本規格に忠実に守ったNCプログラムにより加工を行うと、エンドミル先端は円錐を軸に対して斜めの平面で切断した断面軌道を描くため、楕円軌道となる。したがって、後述するボールバーによる円運動測定は不可能である…」

と、紹介されている。

しかしながら、規格の一般化を考慮すると、NAS 979の規定に厳密に即した、つまり同時5軸制御時の検査方法の確立が望まれる。

1. 1. 2 本研究の目的

本研究では，5軸工作機械の検査方法について，測定装置の開発試作及び検査方法の確立を目的とし，研究を展開することとした．

装置の開発目標は，同時5軸動作経路まで測定可能な装置の開発と，測定に用いる最適な動作経路の設定を行った．

この装置及び方法を用い，5軸工作機械の具体的な動作経路を測定し，得られた測定結果を基に，機械測定規格に則った誤差要因の特定及び定量化を行うことにより，従来では困難な実加工動作の高精度化を試みる．

本論文では，以下の内容を取り上げた．

1. 動作経路測定装置の開発

工作機械の任意動作経路の測定を目標に，測定装置の開発を行った．

測定装置の構成は，位置座標を検出する測定部と，検出した信号を数値データに変換し保存する収録部，及び数値データを解析する解析部である．

測定部の構造は，高分解能光学リニアスケールをエアスライドに取り付け，これを軸構成ユニット（以下測定軸）とした．2つの測定軸を直交させ，それぞれの軸端に精度安定軸として4本のセラミックスエアスライドで保持し，2次元測定平面を構成した．

測定部ベースを工作機械テーブルに固定し，その上部にボールベアリングを介して主軸に取り付け，同時2軸制御において，任意動作経路の直接測定を行う．

さらに，工具軸方向の計測軸と球面軸受を付加することにより，同時3軸以上の動作経路を，2次元測定平面では経路を，工具軸方向の計測軸では，位置ズレの測定が可能となる．

収録部は，それぞれの測定軸スケールから，独立して出力されるパルス信号を計数し時間的な同期を取り，XY及びTz軸座標数値に変換し，数値ファイルとして保存するカウンターボードを試作した．

収録タイミングを1s～100μsで任意に設定可能であり，CNCサイクリック周期に一致させ，連続的な動作経路測定を可能とした．

解析部はパソコンを用い，NC指令値を基準として，動作経路を表示すると共に，動作経路から，各誤差要因の特定及び定量化するプログラムを作成した．

2. 動作経路設定

測定に用いる動作経路は、一般化を考慮し、ISO・JISの規定を参考に設定した。最終的に、同時5軸制御時の動作経路について、測定装置上の3次元空間内で測定・表示を行い、誤差要因の特定を行う。

まず、最も広く用いられているISO 230-4を基礎に、任意動作経路の測定評価を行うことを目的で、直線動作経路設定の拡張を行った。

この手法で、円動作経路及び直線動作経路を、測定装置における2次元測定平面で表示・解析を行う。

つぎに、同時3軸制御についてはISO 230-6を基礎に、変位試験規定を動作経路試験に拡張し、5軸工作機械の基礎となる、同時3軸制御時の機械特性を、真直度を基準に評価する手法を定めた。

さらに、同時5軸制御時の動作経路の測定方法は、出荷時精度検査で一般的に広く用いられている、実切削試験片の間接形状測定を参考に、動作経路を設定する。

すなわち、2次元測定平面上では円・四角及び菱形形状を動作し、主軸には、常にテーブルとの相対的な角度傾斜を一定に与え、工具軸方向には変位しない動作経路を設定し、測定表示を行う。

測定結果を、2次元測定平面において輪郭測定し、動作経路から誤差要因の特定とその定量化を行う。また、工具軸方向では、輪郭の2次元測定平面からの変位量を示す。

結果的に、実切削試験片の間接形状測定の規定であるNAS 979に準じ、かつ動作の直接測定を可能とし、測定結果から誤差要因特定に至る手法の確立を目指す。

3. 測定システムの検証事例

設定した測定動作経路手法について、実際の3軸及び5軸工作機械を測定し、結果について比較検討を行う。

・同時2軸動作経路測定

2次元測定平面での動作経路の測定・表示する。

その結果を用い、誤差要因毎の定量化を行い、検査成績証との比較検討し、差異の有無を確認する。

動作経路の直接測定を行えることを示す。

- ・ 同時 5 軸動作経路測定

同時 2 軸動作経路に工具傾斜を与え，同時 5 軸動作経路を設定する．

この設定では，2 次元測定平面では円・四角等の形状を描き，工具軸方向には動作しない．これらの動作について，2 次元測定平面で指令値と測定結果との差異を表示する．

結果から，誤差要因毎の定量化の結果を導き出し，同時 5 軸動作の直接測定手法を提案し，検証実験例を示す．

- ・ 同時 5 軸動作経路におけるポストプロセス誤差測定

同時 5 軸動作経路の動作精度向上には，指令値も大きく寄与する．

旋回・傾斜軸を制御するため，想定した工具の動きから，機械に与える NC 指令値を生成する際に，ポストプロセス機能を用いる．

ポストプロセス機能は，極座標変換を用いるため，計算誤差を生じる．

この計算誤差について，測定結果から誤差の定量化を試みる．

さらに，実加工結果との比較検討により，直接測定の確からしさについて論ずる．

1. 2 本論文の概要

本論文では，工作機械の動作経路を直接測定する装置・手法について，検討し，5 軸工作機械における同時 5 軸動作の直接測定を目標とする．

従来の各種規格に準じた測定手法を基礎に，その拡張を述べ，実際の測定事例により，その妥当性を検証する構成を取る．

第 1 章は緒論であり，本研究の背景と目的，概要などについて述べる．

次に第 2 章から第 6 章の概要について，以下に示す．

全体構成を図 1-1 に示す．

第 2 章では，機械精度測定に関する従来の研究について総括する．

まず 2.1 節では，工作機械の精度測定として広く用いられている ISO 230-1～4 までの規格内容について，その検査に於ける適応範囲や必要性を述べ，かつ測定方法の整理を行う．

また，実加工試験片を用いた，間接測定について総括を行う．

2.2 節では，動作の直接測定による，同時 2 軸動作経路測定手法について，測定装置毎に総括し，適応範囲を述べる．

さらに，2.3節では同時5軸動作測定手法では，NAS979と円運動試験装置での試験方法とその適用範囲について総括する．

2.4節で，それぞれの装置から来る制約及び測定解析方法について，現状の総括と課題の抽出を行う．

第3章では，開発した動作経路装置について述べる．

3.1節ではシステム構成を説明し，3.2節では測定原理を述べる．

さらに3.3節で，測定の基礎となる精度校正方法及び結果を示し，本装置の測定精度を示し，3.4節では，装置の総括として，他の経路計測装置との比較を交え，装置の位置づけを述べる．

第4章では，測定経路の設定を述べる．

まず，ISO230-4を参考に，同時2軸制御において四角・菱形等の形状を動作させた場合に得られる動作経路から，真直度・相互直角度を導き，直線動作経路測定の必要性を述べる．

次に，同時5軸制御までの動作経路の設定を行い，測定結果の表示及び誤差要因の導出手法の説明を行う．

円運動試験法を，測定評価の基礎として一般化している規定に対し，概念的な拡張を加えることで，一般性を損なわず，有用な定量化を行う方法について，動作経路の次元数毎に順を追って具体化することとする．

第5章では，具体的に3軸及び5軸工作機械について測定事例を示し，検査成績証や，実際に実加工試験との比較を行う．

比較検討は誤差要因毎に定量化した値を用い，同時2軸制御では，機械運転状態の違いを示すと共に，誤差数値を用いたパラメータ修正による経路補正の効果を示す．

さらに，制御軸数に関する動作経路精度の違いを，5軸工作機械に同時2軸制御と同時5軸制御を行わせ，結果から示す機械精度の比較により，明らかにする．

また，NC指令値に関する考察も交え，動作経路設定及び解析手法について述べ，同時5軸制御に関する機械精度以外の誤差要因の存在を明らかにし，指令値算出における技術的な考察を加える．

第6章では，本研究で得られた結果を総括し，結論とする．

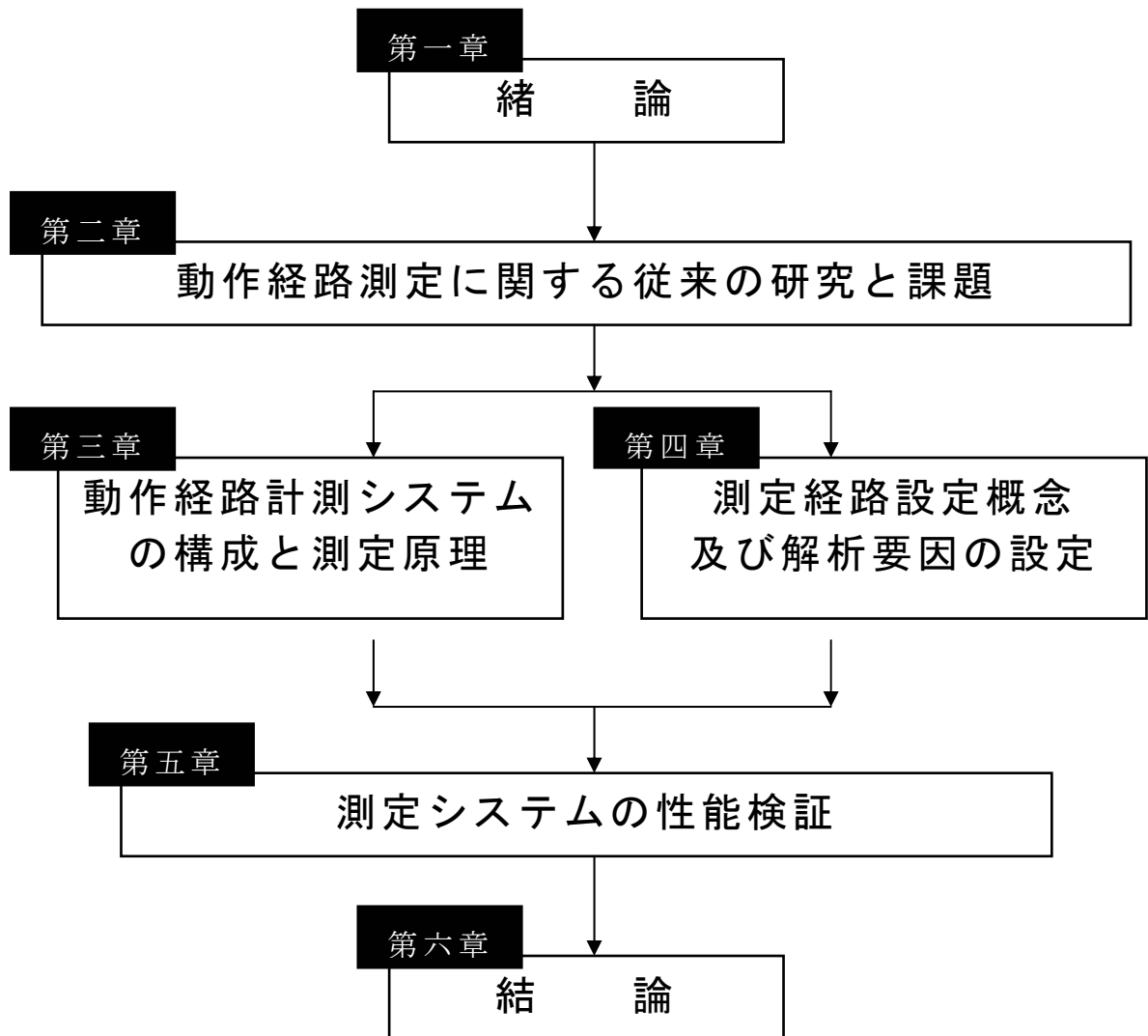


図 1 - 1 本論文の全体構成

謝 辞

本論文は、筆者が平成10年4月から平成16年3月までの研究成果に基づき、平成17年4月より現在まで、九州工業大学 情報工学部 情報創成工学専攻の博士後期課程での研究成果をまとめた結果であります。

筆者は、福岡県工業技術センター 機械電子研究所の研究員の立場でありながら、同課程において研究活動を行う機会を得ました。

この間、多くの諸先生、職場の上司、友人、知人、及び関係者各位から御指導、御助言を賜りました。

職場では生産技術課に属し、公務として県内産業の技術的支援を行っており、本研究は福岡県金型研究会での、技術的な課題を解決するための方策を考案した際に発案したものであります。

とりわけ、九州工業大学 情報工学部教授 鈴木 裕 博士からは、本研究の遂行ならびに研究に対する心構えや姿勢、研究の意義など、研究の基礎から本論文をまとめるに至るまで、極めて有意義な御指導、御鞭撻を賜りました。

特に、装置を一般化する手法として、私が休職派遣中も継続して、研究をお引き受け頂き、J I S への提案・審議についての応答を行って頂き、復職後、経緯及び応答内容の詳細な御説明を賜り、その後の研究展開について、的確な助言を頂きました。

一般化に際し、御指導頂きました、J I S 委員会主査 堤 正臣 博士（東京農工大 教授）及び佐藤 隆太 博士（東京農工大 助手）には、他研究機関である私共に快く研究協力を頂きました、ここに感謝申し上げます

初期装置試作を共同で行って頂きました、ポリテクカレッジ 八崎透先生、松尾 智士 先生に心からお礼を申し上げます。

装置商品化に御理解と御尽力頂きました、日本ファインテック(株) 平田 正治 社長、平田大輔 専務、山口由彦 課長、中村俊幸 課長に心からお礼を申し上げます。

また試作装置の検証試験に御協力頂きました、福岡県金型研究会の会員諸子に感謝申し上げます。

とりわけ会長である、坂本 正史 博士（西日本工業大学 学長）には本研究の意味合いを早期にお気付き頂き、開発初期より御助言・御指導を賜りました。

また本研究で開発した測定装置は，測定部の基礎構成として，流体軸受を用いており，私が，九州工業大学 工学部在籍時に，卒業研究として行わせて頂いた「静圧スラスト軸受の開発」で学びました基礎理論を使わせて頂いております．

中島 克洋 博士（元 九州工業大学 教授）高藤 和樹 先生（九州工業大学 機械実習工場長）には，工学の基礎的な考え方，研究の組立等をお教え頂きました．

最後に，本測定装置を共に発案し，商品化に至るまでの研究試作を行い公使共に御指導・御鞭撻頂き，また苦勞を共にいたしました，神谷 昌秀博士（福岡県庁 商工部 新産業プロジェクト室長）には，心からお礼を申し上げます．

第二章 動作経路測定に関する従来の研究と課題

工業製品の多様化・高精度化に伴い、その主要生産設備である工作機械に対する要求も、多様化・高精度化が求められつつある。

昨今では特に、高能率化・工程の短縮等も考慮に入れなくてはならなくなり、対応する工作機械は自由度が高く、高精度な動作が求められる。

工作機械の、精度測定に関する技術動向は、上記の要求に応えるため、検査項目の増大により、実加工動作に近い動作経路の測定が求められつつある。これらの要求に対して、生産現場での精度保証について、出荷検査だけでは、対応できなくなっているのが現状である。

I S O 2 3 0 - 1 ²⁻¹⁾ では、工作機械の組立精度について、直定規等を基準にダイヤルゲージ等により、比較測定を行う手法であり、工作機械の組立時における、精度確認の有効な手段である。

しかしながら動作経路について、すべてを保証できない。

そこで I S O 2 3 0 - 2 ²⁻²⁾ 及び 6 では、I S O 2 3 0 - 1 で高精度な組立を行われた工作機械に、位置決め動作を指令し、レーザ干渉測長器を基準とした位置決め誤差を測定し、制御パラメータを用いた補正により、高精度な位置決めを実現できた。

しかしながら、動作経路の観点から本手法を見ると、単軸毎の精度確認にすぎず、軸相互の関係における精度確認には、複雑な装置設定と手法を求められる。

さらに、具体的な工作精度に近い I S O 2 3 0 - 4 ²⁻³⁾ については、円運動動作経路について、D B B システム ²⁻⁴⁾ や交差格子スケール試験装置 ²⁻⁵⁾ 等を用い、2次元平面での円形状について測定する。

結果から誤差要因の解析及び定量化を行っている。装置の安定性と手法の簡易さから、動作経路測定の主流となっている。

また D B B システムを、同時 4・5 軸について特定な動作経路の測定から、誤差要因特定を試みる研究 ²⁻⁶⁾ ²⁻⁷⁾ ²⁻⁸⁾ ²⁻⁹⁾ もなされている。

しかしながら、直線動作経路についての解析 ²⁻¹⁰⁾ は、装置構造の制約上不可能であるといえる。

このように、機械精度測定手法の規格については、測定手法を知る上で、基本的かつ重要な項目であり、本章では、機械精度測定の代表的な手法として認知されている装置と手法について、整理を行った。

一方，同時 5 軸制御時の間接測定として従来から行われ，昨今の研究対象である，N A S 9 7 9 ²⁻¹¹) に関する規格内容を検討し，その課題について述べる．

2. 1 工作機械の機械精度測定

工作機械の構造は，工具から工作物までの一連の構成要素から成り立っている．構成要素には，固定要素と運動要素が存在する．

これらの構成要素同士に，相対運動を発生させることによって，工作機械の形状創成運動が成り立つ．

創成運動に関して，工作機械の幾何的誤差は，少なからず影響を及ぼす．

幾何的誤差は，案内軸上に存在する案内誤差と，案内軸相互に存在する組立誤差に分類される．

案内誤差とは，直線案内軸上に存在する位置決め誤差，真直度誤差，ヨーイング・ピッチング等の姿勢誤差，及び，回転案内軸上に存在する回転角誤差，アングュラ誤差，アキシヤル誤差，ラジアル誤差である．

一方，工作機械の組立時に生ずる組付精度は，構成要素の案内軸間に組立誤差を生じる．直交または，平行に構成されるべき案内軸を持つ，構成要素間に存在する構成誤差と，調整誤差に分けて考えることができる．

構成誤差とは，二つの構成要素が持つ案内間での，基準となる位置関係の不確かさを示す位置ずれや傾きのことであり，案内の運動によっては直接補正ができない場合がある．

また調整誤差も，構成誤差と同様であるが，この誤差は，構成要素の位置や姿勢に対する数値制御装置の指令値とのずれを意味する．

つまり，調整誤差は指令値の修正により補正することができる．

工作機械の精度測定手法は，機械の状態に応じて類別されている．

ここでは，I S Oでの類別を基本に説明を行う．

I S Oには，熱変形関連（2 3 0 - 2）や，騒音・振動関連（2 3 0 - 3）についても規定をされているが，本研究に関連性が薄いので，説明を割愛する．したがって下記の項目について，その測定手法詳細と機械精度導出までの説明を行う．

加えて，従来の生産現場での精度確認手法として，実加工試験片を用いた間接測定について，代表的な事例を説明する．

従来測定手法を総括し，従来手法に残された課題，解決に必要な装置・方法を抽出し，研究の方針を述べる．

工作機械には非常に多くの誤差要因が存在し，すべての工作機械に共通する誤差や，構造・制御の違いにより発生する誤差，実際に動作させる経路形状による誤差等，多種の誤差が複合して現れる．

そのため，すべての誤差要因を特定することは非常に困難である．

- ①工作機械自身に起因する誤差
- ②工作機械の運転時の誤差
- ③加工等の実作業動作時に発生する誤差
- ④工作機械の設置や環境による誤差

本研究では，①及び②の機械精度について規定される，誤差要因に関し説明を行う．

③は工具摩耗や工具変形，被切削物の設置状態や加工による変質等であり，工作機械自身に直接起因しない誤差である．

④は工作機械の設置状況や外乱，気温や湿度の環境要因等の環境誤差である．

現在上記②に当たる，動作軌跡の測定に関する規格は，円もしくは円弧軌跡でしか規定されていない．

また，円運動以外の形状では，実加工を伴った間接測定手法が存在するが，段取り替えによる誤差や実加工による時間，3次元測定器を始めとした高価な設備が必要である等の難点がある．

工作機械の発達に応じて，機械精度測定は高度化・多様化している．

個々の試験方法は細分化され，種々の規定がなされているが，すべてを行う必要はない．

ここでは，本研究で取り上げた規格内容を中心に，詳細を説明する．

2. 1. 1 静的組付精度 (ISO 230-1)

ISO 230-1は，主に機械の幾何誤差や制御系による誤差で，通常は工作機械の動作精度検査の前に測定が行われる．

なお，この試験は，無負荷状態又は仕上げ状態で運転している工作機械を，幾何学的試験によって試験する方法である．

主に「真直度」「平面度」「平行度・等距離度及び一致度」「直角度」「回転」の5つの特性に関して測定方法等の規定がある。

本節では、真直度、直角度について説明する。

1) 真直度

平面内での真直度とは、図2-1に示す、平面での任意線分のある指定長さにおいて、その線の総体方向に平行で、相対距離が許容差に等しい二本の直線間にその線上のすべての点が含まれる場合、その線はその指定長さに渡って真直であると見なされる。

この線又はそれを代表する線の総体方向は、真直度偏差をできるだけ小さくするように決めなければならない。

一般的な方法の一つとして、いくつかの点をプロットし、それを元に最小二乗法等を用いて直線を求める。

具体的には、測定基準に対する偏差を求めることで数値化できる。

図2-2には測定例として、真直度マスタを用いた比較測定を示す。

この比較測定は、真直度マスタを基準にし、工作機械動作軸を動作させた時の偏差を、テストインジケータにより読みとる。

なお、測定開始・終了点の偏差を0とし、動作中の変位を運動静止位置毎に測定する。

測定例に示すマスタ自体の真直度偏差は、 $0.1\ \mu\text{m}/100\text{mm}$ であり、電気マイクロメータの最小分解能は $0.1\ \mu\text{m}$ である。

また、図2-3には、レーザ干渉測長器を用いた手法を示す。

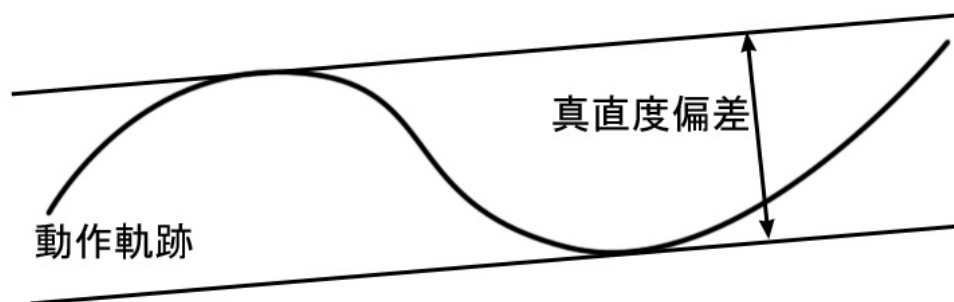


図2-1 真直度の概念

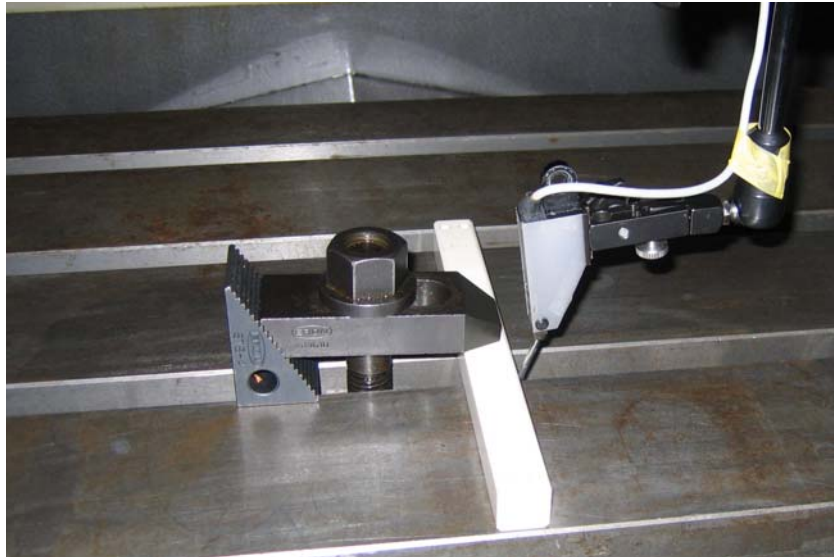


図 2 - 2 真直度マスタを用いた比較測定

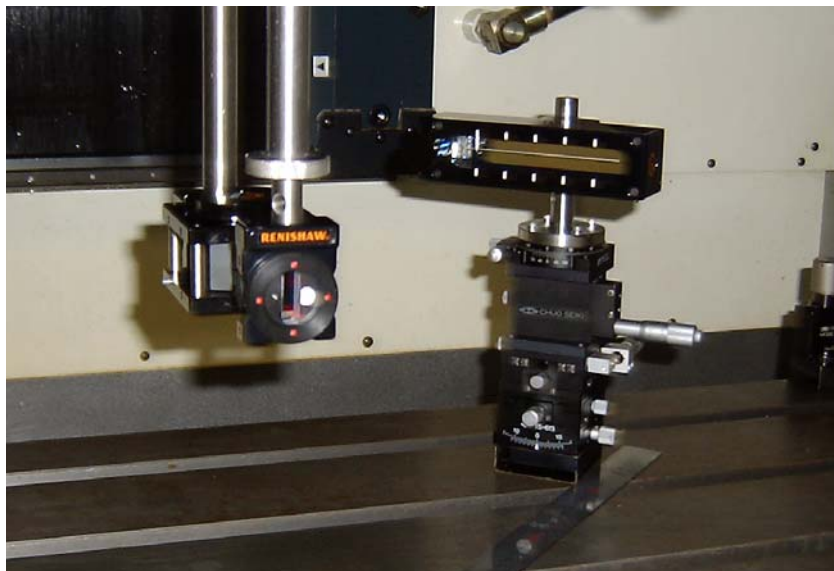


図 2 - 3 レーザ干渉測長システムを用いた比較測定

レーザ干渉測長システムに治具を用いることにより，真直度・角度偏差を測定することが可能である．

測定結果は，測長器に付属するソフトウェアで解析処理され，真直度等の結果を得ることができる．本研究で用いた，レーザ干渉測長システムの最小分解能は 50 nm である．

なお，機械メーカーが発行する精度検査成績表では，直角度が用いられている．

2) 直角度

直角度は「互いに直角でなければならない機械部分の直角からの狂いの大きさ」として、定義される。

また、運動の直角度は「運動部品の運動と、互いに直角でなければならない機械部分の面、線又は他の運動部品の運動との直角からの狂いの大きさ。」として定義される。

図 2-4 には、四直角マスタを用いた比較測定を示す。

この比較測定は、四直角マスタを基準にし、工作機械動作軸を動作させた時の偏差を、テストインジケータにより読みとる。

測定例に示すマスタ自体の角度偏差は、 $1\ \mu\text{m}$ 以内 / 150mm であり、電気マイクロメータの最小分解能は $0.1\ \mu\text{m}$ である。

機械メーカーが発行する精度検査成績表では、直角度が用いられている。

2. 1. 2 静止位置決め精度 (ISO 230-2)

前節で示した動作の真直度の内、動作方向における 1 つの位置偏差に関しては ISO 230-2 にて別途定義されている。図 2-5 に、レーザ干渉測測長システムを用いた X 軸単軸の試験について示す。

これは、数値制御される工作機械の個々の軸を直接測定することで、その機械の軸の位置決め及び繰返し性を試験及び評価する方法を定めたものである。



図 2-4 四直角マスタを用いた比較測定

ただし、複数軸の同時測定には対応しておらず、単軸測定のみとなっている。主な評価指標を以下に示す。

なお、下記の数式では一部省略しているが、指標によっては、目標位置へのアプローチが同一方向（正なら↑，負なら↓）に行われる場合と、両方向に行われる場合で区別をして評価を行う。

プログラム上の目標位置を P_i ($i = 1 \sim m$)，可動部品が i 番目の目標位置に j 回目にアプローチするときの到達する実際の位置を P_{ij} ($i = 1 \sim m$ $j = 1 \sim n$) とする。

・ 位置の偏差

$$X_{ij} = P_{ij} - P_i \quad \text{式 2 - 1}$$

・ 位置の平均偏差 : 各目標位置での偏差の平均を表す

$$\overline{X_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad \text{式 2 - 2}$$

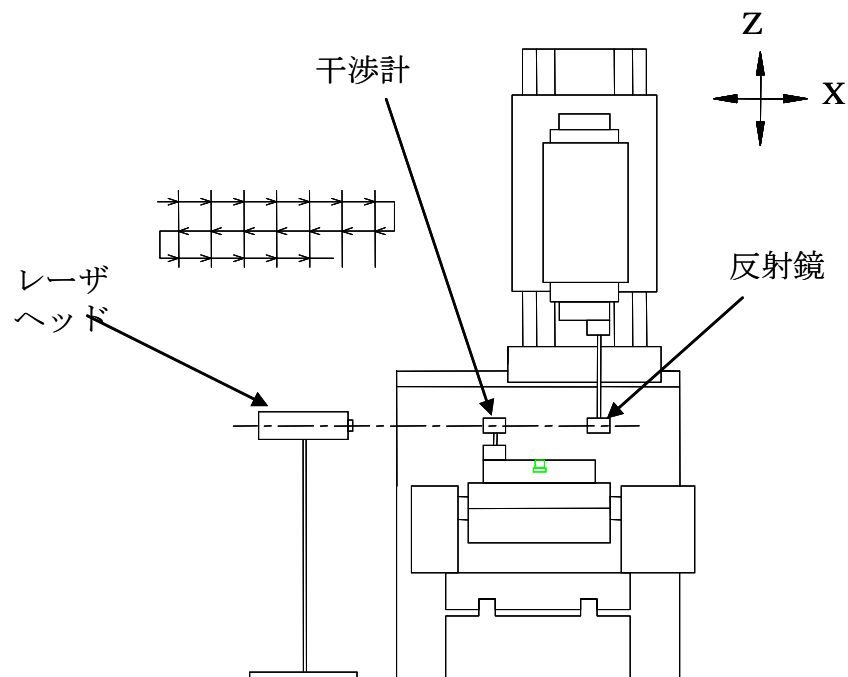


図 2 - 5 レーザ干渉測長システムを用いた静止位置決め精度測定

- ・ 軸の反転差：アプローチ方向の違いによる位置の平均偏差の差

$$B = \max[|\bar{X}_i \uparrow - \bar{X}_i \downarrow|] \quad \text{式 2 - 3}$$

- ・ ある位置における標準不確かさの推定量

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} \uparrow - X_{ij} \downarrow)^2} \quad \text{式 2 - 4}$$

- ・ 位置決めの繰返し性：両方向からのアプローチによる繰返し精度

$$R_i = \max[2S_i \uparrow + 2S_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad \text{式 2 - 5}$$

- ・ 位置決めの両方向精度：系統的偏差と標準不確かさの推定量からの値

$$A = \max[|\bar{X}_i \uparrow + 2S_i \uparrow; \bar{X}_i \downarrow + 2S_i \downarrow| - \min[|\bar{X}_i \uparrow - 2S_i \uparrow; \bar{X}_i \downarrow - 2S_i \downarrow|] \quad \text{式 2 - 6}$$

- ・ 軸の系統的位置偏差：位置の平均偏差最大幅

$$E \uparrow = \max[\bar{X}_i \uparrow] - \min[\bar{X}_i \uparrow] \quad \text{式 2 - 7}$$

軸両方向の位置平均偏差：両方向位置の偏差最大幅

$$M = \max[\bar{X}_i] - \min[\bar{X}_i] \quad \text{式 2 - 8}$$

これらの評価値をグラフにしたものを，図 2 - 6 に示す．

測定は，標準試験サイクルに則って実行される．

なお，この規格は試験及び評価方法の規定であり，具体的な評価値を規定したものではない．

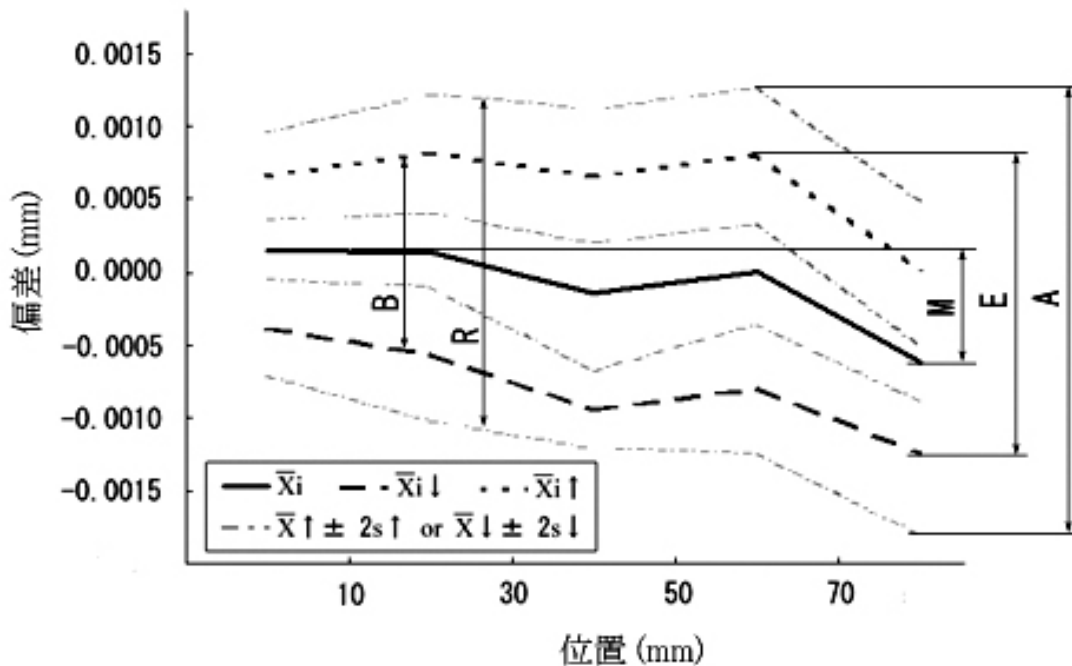


図 2 - 6 静止位置決め精度測定の評価値

2. 1. 3 加工試験片を用いた間接測定

加工試験片を用いた間接測定は，工作機械に所定の形状を設定した指令値を用い，加工を行わせ試験片を作成する．

得られた試験片の形状を，別途に用意した形状測定装置を用いて，その輪郭を 2 次元的に測定し，輪郭形状から機械誤差の特定や，運転条件ごとの機械精度の傾向を捉える．

本手法は，工作機械が動作可能な任意形状に関して，試験片を作成することが可能であり，工作機械の総合的な工作精度を比較的容易に知ることができる．

しかしながら，測定には別途に形状測定装置を用いる必要があり，さらに，間接測定であるため段取り替えによる誤差を含む．また，加工を行うために，工具形状誤差や切削条件からも影響を受けやすい．

上記の誤差要因を包含した測定値を得ることとなり，測定者は経験的にこれらの機械精度以外の要因を排除している．

1) 同時 2 軸制御時の試験片

図 2 - 7 に，切削試験片の例を示す．

一辺 300 mm の矩形形状及び，直径 250 mm の円形状であり，試験片

厚さ 20 mm を設定し，取り付けのために穴をあけてもよい．

2) 同時 5 軸制御時の試験片²⁻¹²⁾

図 2-8 に，NAS 979 の試験片を示す．底辺直径 254 mm の円錐形状であり，厚さ 63.5 mm で，円錐の半頂角 15° を設定し，テーブルに対し，さらに 15° 傾斜させた姿勢で取り付ける．

3) 規格の規定値について

精度規格から考察すると，現状用いられている NAS 979 の規定は 1969 年に制定されている．円錐台切削試験片に関する真円度は図 2-9 に示すように，評価で $50\ \mu\text{m}$ である．

昨今では DBB システムでの直接測定に方法を変更し，かつ，真円度の評価で $10\ \mu\text{m}$ と規格変更を行い，高精度化に対応する案があり，本研究でもその案に従い，装置・手法の開発を行う必要があると考える．

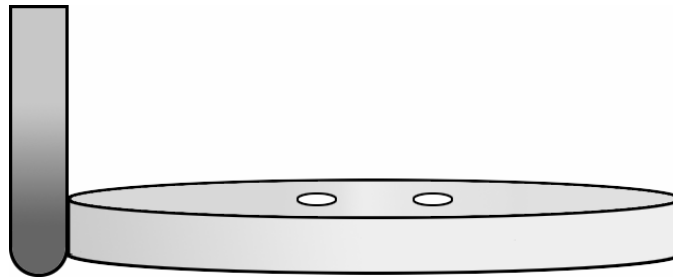


図 2-7 切削試験片（円形形状）

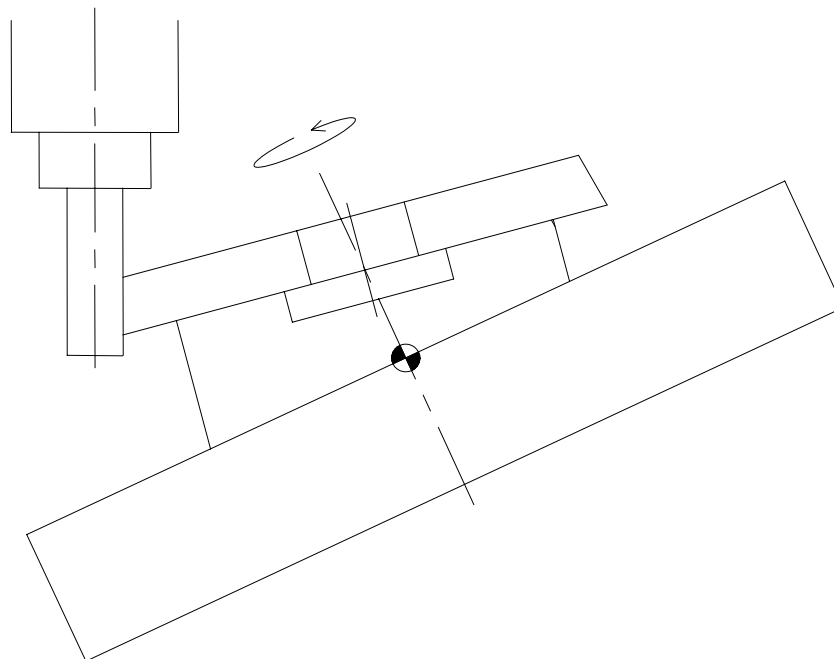


図 2-8 NAS 979 試験片

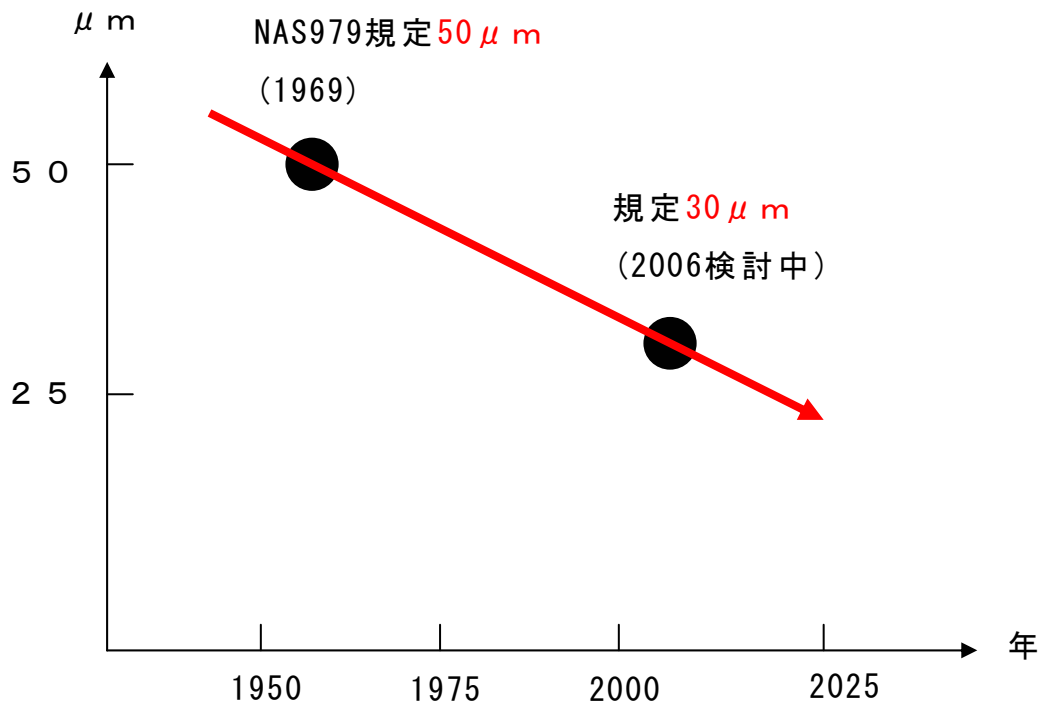


図 2 - 1 9 円錐台試験に要求される規定値(真円度)

2. 2 直接測定による同時 2 軸動作経路測定手法

直接測定とは，工作機械の構成要素である，工具を取り付ける主軸と，工作物を取り付けるテーブルとの相対運動を，その相対運動中に何らかの測定装置を用いて，測定するものである．

2. 2. 1 円運動試験装置による測定 (ISO 230-4)

工作機械を使用する際に，前述した静的精度のみの測定では，実際に加工を行う動作の挙動が把握できない．

そこで，実際の動作に対する精度測定を定めた規格に ISO 230-4 がある．これは一般的に円運動試験法と呼ばれるものであり，2つの直進運動軸を同時に制御して円運動させたときの精度試験方法及び評価方法を規定したものである．現在では，図 2-10 に示す DBB システムを用いた測定が一般的である．

以下に，円運動試験から得られる誤差要因について示す．

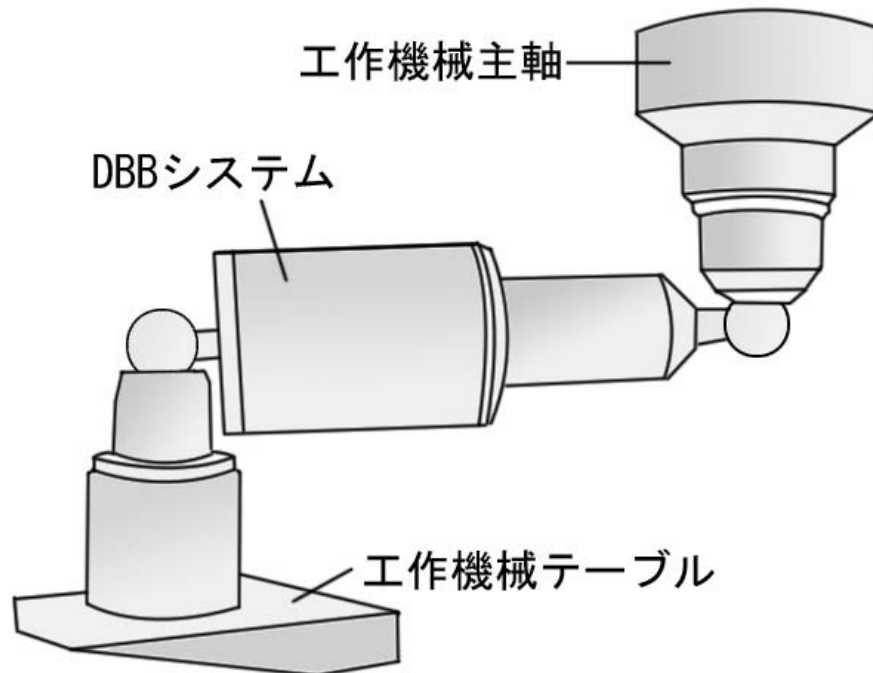


図 2-10 DBB システムの構造

1) 真円度 (図 2 - 1 1)

得られた実経路を最小領域円で挟んだときの，最大内接円と最小外接円との半径差，又は得られた実経路の最小二乗円を基準とし，その中心を同心として描いた，最大半径円と最小半径円との半径差をいう．

2) 半径偏差 (図 2 - 1 2)

設定経路と実経路との偏差を言う．設定経路の中心は，実経路が全円の場合は最小二乗円，そうでない場合は工作機械上に取り付けた，測定装置の心出しによる中心とする．

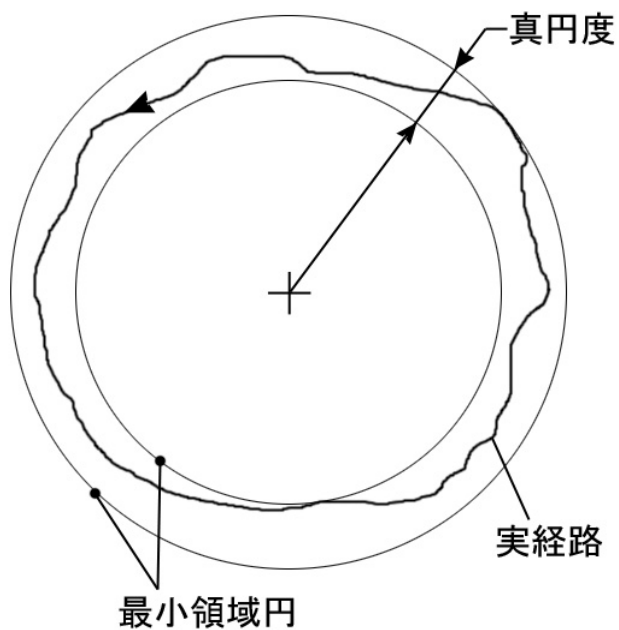


図 2 - 1 1 真円度の定義

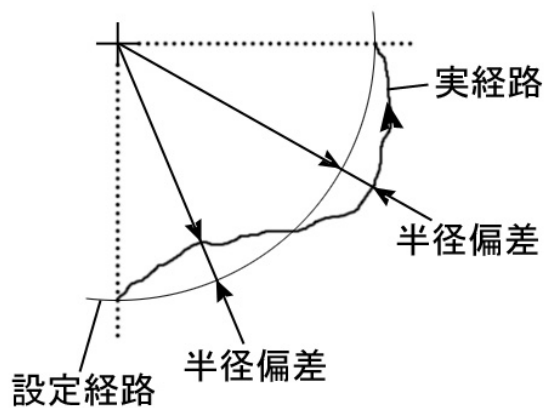


図 2 - 1 2 半径偏差の定義

2. 2. 2 レーザ干渉測長システムによる測定 (ISO 230-6)

本研究で参考にした ISO 230-6²⁻¹³⁾ は、数値制御軸の位置決め精度及び繰返し性の測定のうち、同時 2・3 軸の複数軸測定を定めた規格で、ダイヤゴナル変位試験と呼ばれる。

基本的には ISO 230-2 と同等の規格であり、評価指標もほぼ同一のものを用いており、これらを同時多軸に拡張したものである。

ISO 230-6 では、図 2-13 (a) に示す、平面ダイヤゴナルと定義される経路を用いた測定が同時 2 軸運動であり、図 2-13 (b) に示す立体ダイヤゴナル経路を用いた、測定が同時 3 軸制御となる。

これは、任意の直角柱状空間の対角を結ぶ軌跡を測定する物で、測定範囲内に 6 つの平面ダイヤゴナル、4 つの立体ダイヤゴナルが定義される。ダイヤゴナル変位試験は一般的にレーザ干渉測長器を用いて測定を行う。レーザ干渉測長システムを用いた測定では、レーザ光路と反射鏡を精密に設置する事が必要である。しかし、レーザの光源と、反射鏡の位置が水平でないダイヤゴナル経路は、レーザ及び反射鏡の角度あわせが非常に困難であり、図 2-14 に示す誤差が発生する。

また、光路上の位置決め誤差のみの測定となるので、測定結果を各軸成分に分解して、単軸毎の評価を行うことが困難である。

そこで、レーザ干渉測長器のメーカーである RENISHAW や Opt dyne は、図 2-15 に示すステップダイヤゴナル手法で測定を行っている。

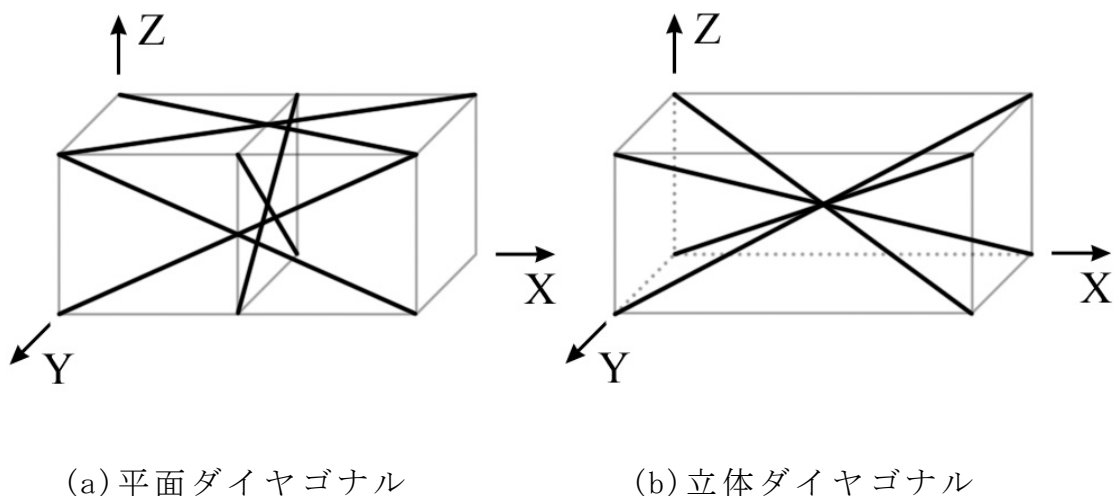


図 2-13 測定運動経路と座標系の関係

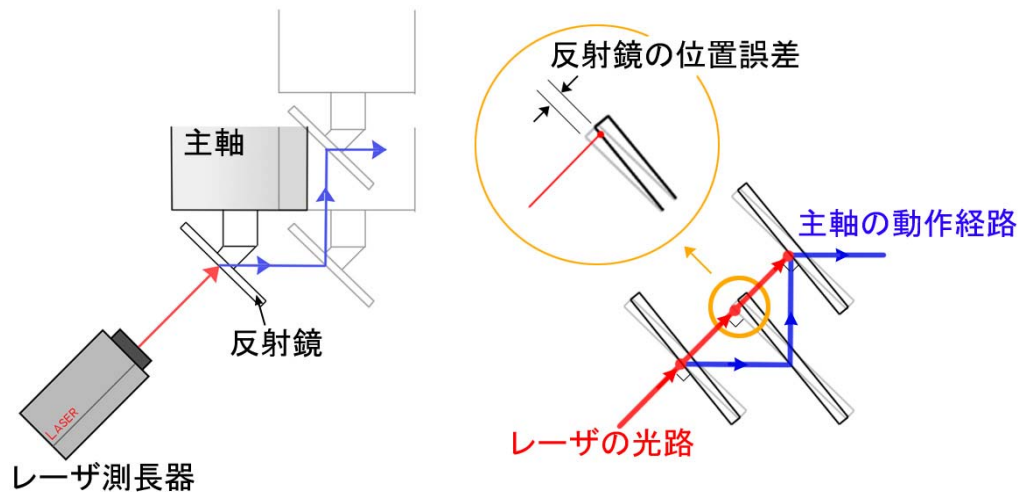
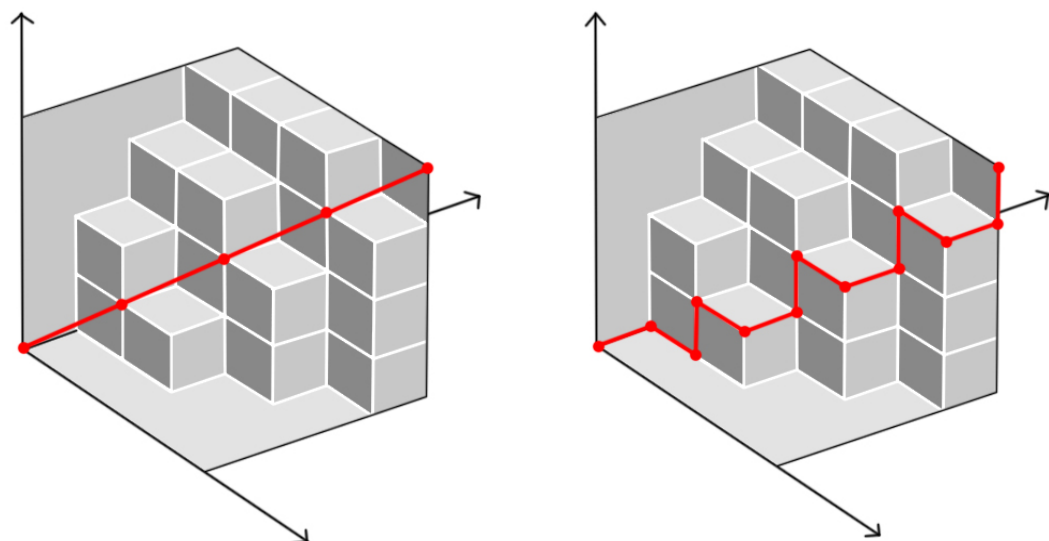


図 2 - 1 4 ステップダイヤゴナル変位試験による測定誤差



(a) 立体ダイヤゴナル

(b) ステップダイヤゴナル

図 2 - 1 5 測定運動経路設定の違い

これは、本来のダイヤゴナル軌跡を単軸で動作させ、それを階段状（ステップ）に測定する手法である．この手法は、レーザ及び反射鏡の複雑な位置決めが必要ない反面、本来の多軸測定とは動作が異なり、厳密なダイヤゴナル変位試験とはいえない．

I S O 2 3 0 - 2 に規定された指標が適用され、測定結果は、対象工作機械の精度傾向を指標として示す．

2. 2. 3 交差格子スケールによる測定

図 2-16 に示す交差格子スケールは，測定ヘッドには位相格子及び LED と受光素子を取り付けられ，LED から発せられた光は，位相格子を通過し，約 0.5 mm 離れてテーブル上に設置した交差格子プレートにより反射し，受光素子に入射する．

光の干渉に基づき，位相格子と交差格子の位相差を測定する．

測定ヘッドには，測定器を二セットで相互に直交する位置に，取り付けであるため，同時に 2 次元の変位を測定することができる．変位を連続的に測定することにより，任意運動の測定が可能である．測定分解能は，電気的な内挿補正²⁻¹⁴⁾により，ナノメートル単位を得ている．

したがって，2 次元ではあるが，円運動試験や各任意動作運動の測定が可能であり，D B B 装置では，装置の制約上から測定が困難な，直線運動コーナ部の過渡特性²⁻¹⁵⁾等について，種々の研究が展開されている．

しかしながら，同時 3 軸制御以上あるいは，旋回・傾斜軸が連動する場合，適切な運動測定を行うためには，相応のジグを必要とする．



図 2-16 交差格子スケール (HEIDENHAIN 製)

2. 3 同時 5 軸動作経路測定手法とその課題

同時 5 軸制御加工が可能な工作機械の増加に伴い，その動作精度の厳密な規格化が望まれている．

しかしながら現状では，直動軸や回転軸個別の評価，若しくは直動軸のみの同時 2 軸測定について I S O において規定されており，同時 4 軸・5 軸の動作経路の運動測定手法は規定に至っていない．

そのため，同時 5 軸制御工作機械の精度評価に関する研究は，国内外で多くの研究者が行っており，様々な手法が提案されている．

2. 3. 1 実加工試験片を用いた間接測定（N A S 9 7 9）

この方法は，実加工が可能な範囲で，きわめて自由の高い測定が可能である．しかしながら，工作機械の軸構成により，加工不可能な場合も存在し，厳密な同時 5 軸制御時の運動精度を測定する場合には，専用ジグを用いて，加工物をセットし，かつ，セットについての厳密な精度管理が要求される．測定には，実際の加工を行うために，加工誤差や段取り替えなどの外乱的誤差が含まれる．

2. 3. 2 円運動試験を応用した測定（I S O 2 3 0－4 拡張）

斎藤・宮川・堤は，5 軸工作機械の運動誤差モデルを用いて，D B B システムを利用した回転軸系の位置偏差，幾何偏差を推定する方法を提案している．

これは，同時 5 軸の工作機械において，図 2－17 に示す，同時 4 軸制御運動を考案し，5 軸制御工作機械に存在するそれらの偏差と測定結果の円弧形状との関係を明らかにするものである．

また，測定結果から位置偏差及び幾何偏差の偏差量が検出できることをシミュレーションによって確認している．

黎・垣野らは，5 軸工作機械の運動誤差モデルに基づいて，シミュレーション解析によって円運動測定を行う際の各誤差原因のセンシティブ方向を評価している．

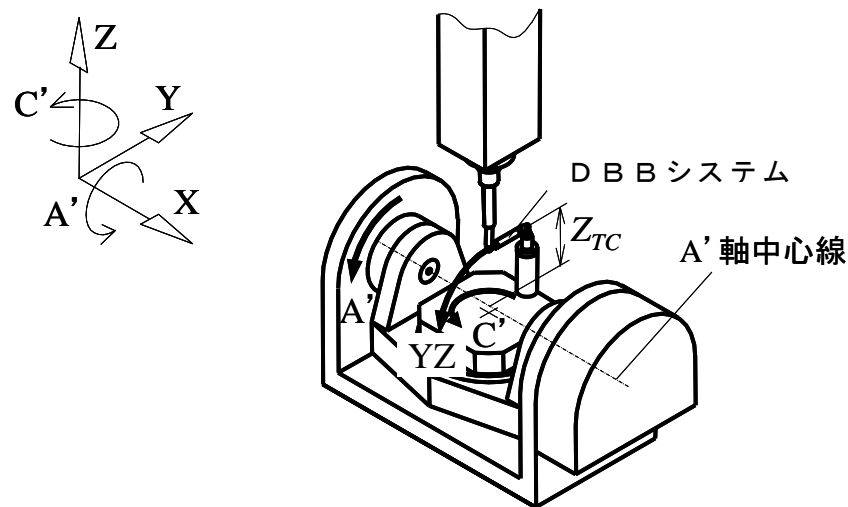
この結果を用いて，定めた円運動測定パターンと診断手順を用い，誤差原因診断を行う診断法を研究している．この中で，運動誤差原因としている直交軸群に対する回転軸系のアンギュラ誤差に着目し，これらの誤差の

センシティブ方向及び診断手順について検討している。

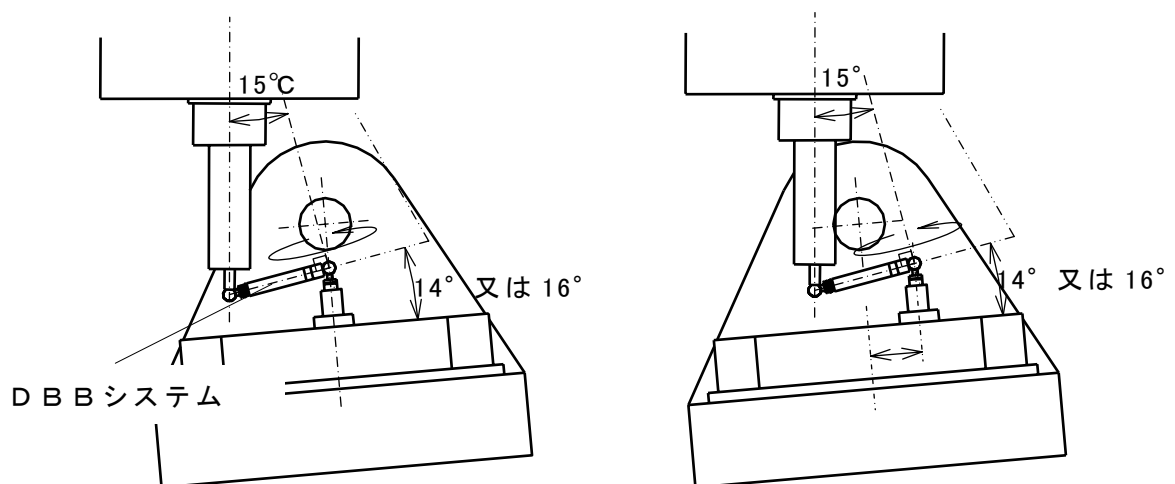
上記の手法は、5軸工作機械の精度調整を、個々の軸あるいは、比較的少数の同時制御状態について行う際には、有効な手法といえる。

しかしながら、誤差要因ごとの評価検討を加える際には、評価する者が5軸工作機械に関する熟達した知識・経験則を有し、複雑な計算手法を用いる必要があり、また、実際の運動経路測定は行われていない。

したがって、工作機械が常用されている現場での、精度確認や、管理について本手法を一般化するまでには至っていない。



(a) DBBシステムを用いた同時4軸測定例



(a) DBBシステムを用いた同時5軸測定例

図2-17 DBBシステムによる同時4・5軸運動経路測定

2. 4 動作経路測定手法に関する従来技術の総括

上記の手法を総括すると、考案された装置・手法は、同時 5 軸制御における運動精度の総合的な評価を、直接測定できる手法は存在していない。

かつ、工作機械が常用されている現場で容易に活用できる測定装置も存在していない。工作精度を向上させるためには、実際に加工を行う環境・装置・条件の元で、測定を行い、誤差要因の特定と、その数値化が分かり易く表示できる装置が必要であるといえる。

測定手法の観点から言えば、ISO 230-4 に規定される円運動試験法が一般化しているため、この手法を基礎とし直線運動を含め、複合的な運動精度評価手法を拡張する必要がある。

段階的に、同時 2 軸から同時 5 軸制御までの測定経路設定を行い、規定を基礎とした追記を行う必要があると考えられる。

また、測定装置については、同時 5 軸制御の任意運動までを測定できる装置構造を新たに考案する必要がある、厳密な装置校正を ISO 230-2 に基づいて行った後に、設定した評価手法の検証を行う必要があると考える。

なお、機械誤差要因の特定と定量化について以下の経路を想定する。

まず、金型等の加工に良く用いられる図 2-18 等高線加工すなわちテーブルに平行な測定平面に関するものである。つまり、基礎となる測定平面を、測定装置に設けた 2 次元測定平面に規定したものである。

次に、図 2-19 に示す 3 次元面沿い加工に用いられる、テーブルに対し角度を持った平面に対しそれぞれ設定を行う。これは、純粋に 3 次元空間座標によるものを測定し、機械精度を知る。

さらに、図 2-20 に示すように、2 次元測定平面を傾斜させて同時 5 軸動作経路を測定し、実加工に近い動作経路を 2 次元測定平面での動作経路と、測定平面との変位を工具軸方向で測定する必要がある。

また、同時 5 軸制御を用いた等高線加工を想定することにより、実加工に近い動作経路を測定する必要があると考えられる。

この測定については、2 次元測定平面において、同時 2 軸経路と同様の運動経路を設定することにより、制御軸数の違いを明確化でき、その定量化に大きく寄与できると考える。

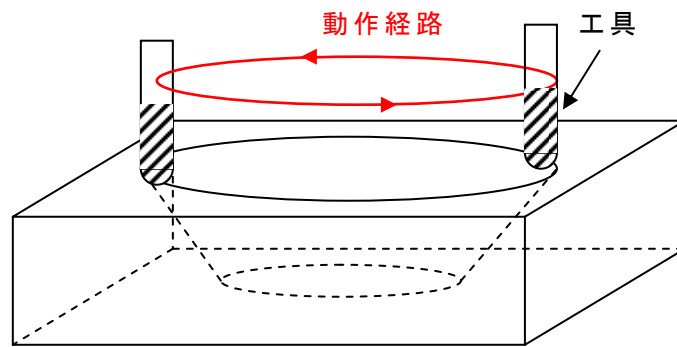


図 2 - 1 8 等高線加工

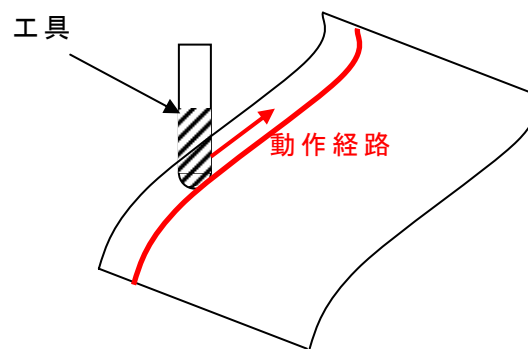


図 2 - 1 9 3次元面沿い加工

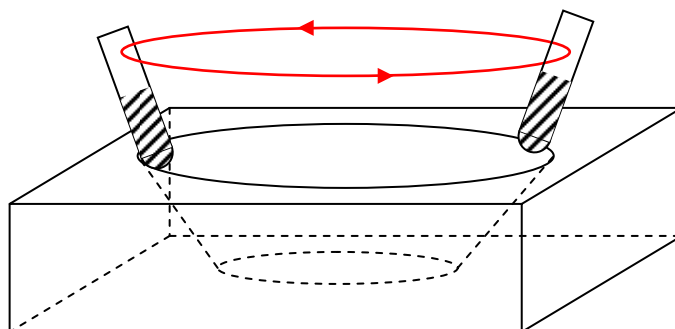
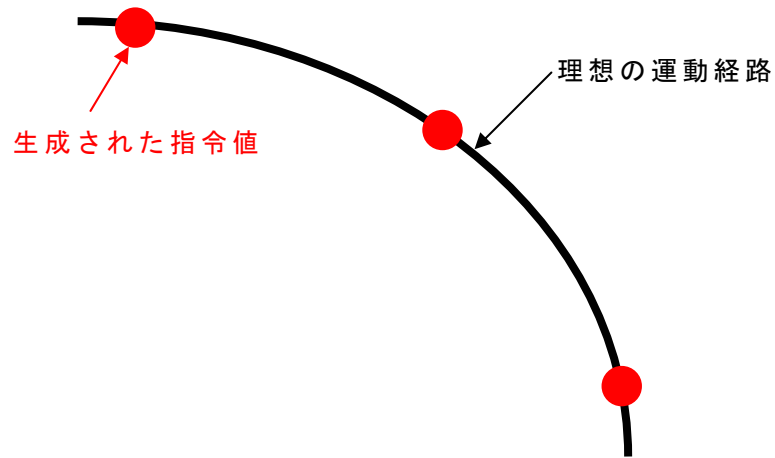
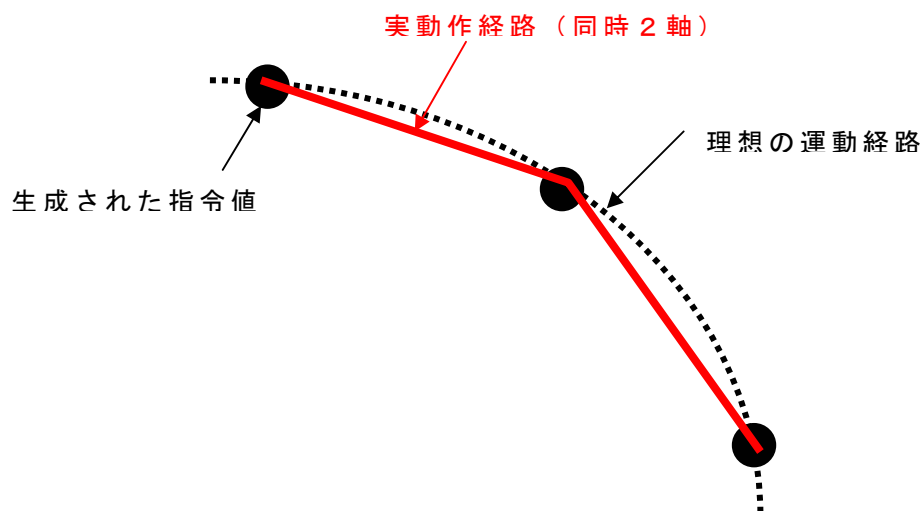


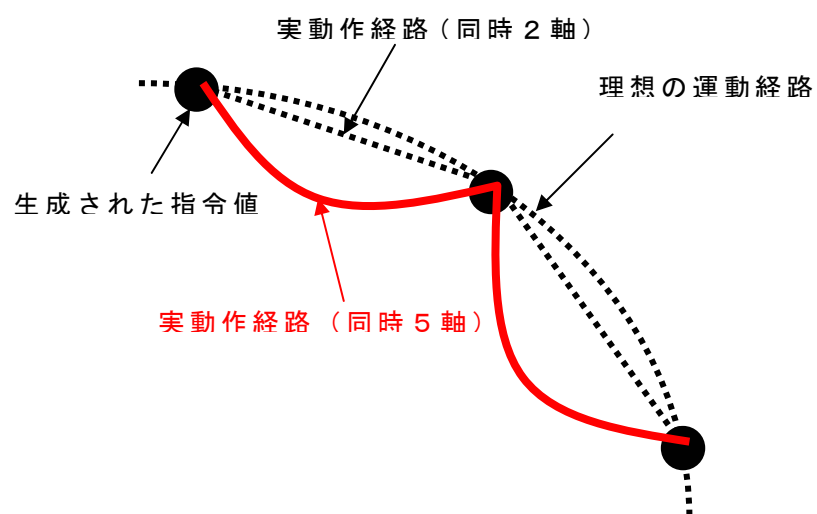
図 2 - 2 0 等高線加工 (工具傾斜)



(a) 理想の運動経路と指令値の関係



(b) 理想の運動経路と実動作経路 (同時 2 軸) の関係



(b) 理想の運動経路と実動作経路 (同時 5 軸) の関係

任意運動経路全般の評価を行うためには、円動作だけでなく、直線運動についても評価を行う必要がある。図 2-21 には、設定経路と実経路の違いについて説明する。

(a) が理想の運動経路であり、誤差は発生しない。

(a) を基準として、指令値を生成する場合、任意の間隔の点列を生成し、その点列間を、円運動・直線運動に近似させる。

一般的に、点列間は直線運動により補間される、したがって、形状は多角形近似となり、(b) に示す近似誤差を発生する。

さらに、その近似経路を 5 軸工作機械で直線動作させる場合、旋回・傾斜軸を用いて動作ることにより発生する、ポストプロセス処理誤差を含むこととなる。

特に、旋回・傾斜軸に関しては、回転運動による近似を行うため、動作経路の存在する位置と旋回・傾斜軸の中心との位置関係により、処理誤差は一定したものとはならない。

段階的に発生する指令値誤差と機械誤差を測定することにより、動作経路の総合的な評価を行う必要があると考える。

5 軸工作機械の利点である、段取り替えを行わずに任意形状を加工する際には、実動作経路の測定から得られた知見を活用し、機械精度を高精度に保持しながら、的確な指令値を与える必要がある。

したがって、条件を満たすために、同時 5 軸直線動作経路までを測定できる装置の開発と、測定経路手法の設定により、効率の良い測定を目指す必要が有ると考える。

参考文献

- 2- 1) ISO230-1 Test code for machine tools (1996)
- 2- 2) ISO230-2 Test code for machine tools (1997)
- 2- 3) ISO230-4 Test code for machine tools (1996)
- 2- 4) 垣野義昭, 井原之敏, 清水敬一, 中川秀夫, 竹下虎男, NC 工作機械の運動精度に関する研究(第 8 報), 精密工学会誌, 61, 3(1995)
- 2- 5) 垣野義昭, 井原之敏, 林書 鼎, 羽山定治, 河上邦治, 濱村実, 交差格子スケールを用いた超精密 NC 工作機械の運動精度の測定と加工精度の改善, 精密工学会誌, 62, 11(1996)
- 2- 6) 坂本重彦, 稲崎一郎, 5 軸マシニングセンタにおける組立誤差同定法, 日本機械学会論文集(C 編), 60, 575(1994-7)
- 2- 7) 坂本重彦, 稲崎一郎, 五軸マシニングセンタの組立誤差が加工精度に及ぼす影響, 日本機械学会論文集(C 編), 62, 594(1996-2)
- 2- 8) 坂本重彦, 稲崎一郎, 塚本颯彦, 市来崎哲雄, ボールバーによる五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), 62, 594(1996-2)
- 2- 9) 佐藤隆太, 横堀祐也, 堤正臣, 5 軸マシニングセンタにおける直進軸と旋回軸の動的同期精度, 精密工学会誌, 72, 1(2006)
- 2-10) 堤正臣, 運動精度評価システムの動向, 機械の研究, 50, 1(1998)
- 2-11) NAS979, Uniform cutting test—NAS series, metal cutting Specifications (1969)

- 2-12) 井原之敏, 田中和也, 多軸工作機械での円錐台加工試験に対応した
ボールバー測定法, 精密工学会誌, 71, 12 (2005)
- 2-13) ISO230-6 Test code for machine tools (1997)
- 2-14) 茨木創一, 後藤渉, 松原厚, 越智玉樹, 濱村実, 交差格子スケールの
自己校正法, 精密工学会誌, 72, 8 (2006)
- 2-15) 藤田純, 羽山定治, 濱村実, 斯波和広, 垣野義昭, 松原厚, N C 工作
機械補間運動時の過渡応答誤差, 精密工学会誌, 66, 3 (2000)

第三章 動作経路測定システムの構成と測定原理

3. 1 システム開発コンセプト

本測定システムは、第二章で課題とした等高線加工や3次元面沿い加工をイメージした図3-1に示す測定可能領域を持ち、動作経路を直接測定できる機構を有し、表3-1の測定精度で測定結果を表示できることを目標とする。

また、表示した測定結果を用い、機械誤差の誤差要因特定と定量化を行える解析プログラムを有し、加工現場での測定を想定するため、ハンドリングも考慮し、一人作業を可能とする装置重量を満たす。

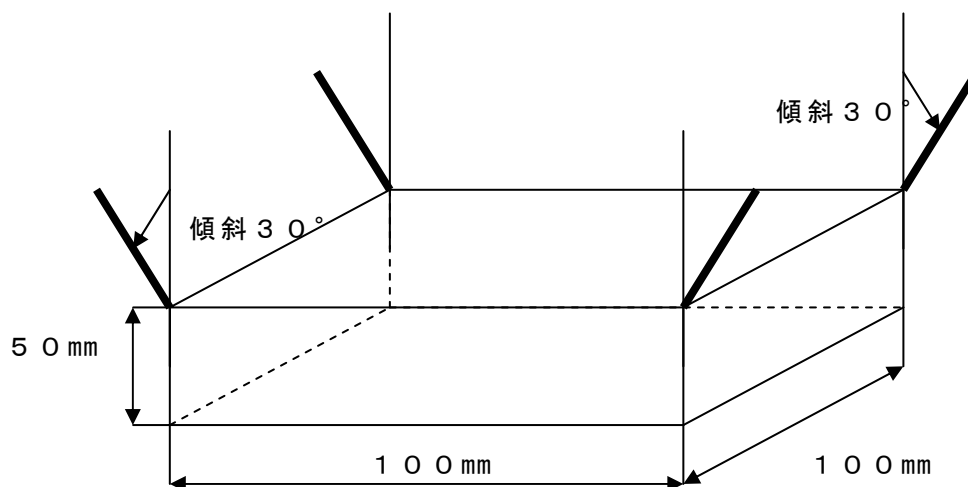


図3-1 目標とする測定可能範囲

表3-1 目標とする仕様諸元

	仕 様
測定分解能	0.1 μm (スケール性能に依存する)
測定範囲	(X, Y, Z, A, B)=(100mm, 100mm, 50mm, 30°, 30°)
追従可能速度	8 m/min (スケール性能に依存する)
測定周期	1 S ~ 300 μS (無段階可変)
使用環境	ISO230-4 の検査環境に準ずる(室温 23℃, 湿度 50%)
装置重量	測定部・収録解析部 各 10Kg 以内
測定精度	2次元測定平面にて, 1 μm 以内

3. 2 システム構成

3. 2. 1 システム構成及び各部詳細

試作した測定システム³⁻¹⁾測定部の写真を図3-2に示す.

システムは, 工作機械のテーブルに設置する計測部と, 計測データ収録部及び解析部により構成される.

図3-3に装置構成を示す. 計測部はベースを, 工作機械テーブルに固定し, その上部にボールベアリングを介して, 主軸に取り付けている.

また, 同時5軸運動経路測定³⁻²⁾を行う際には, ワーク座標系Z方向の位置検出とテーブル傾斜に対応するための球面軸受を付加し, これを介してシステムと工作機械の主軸を接続する. 球面軸受を用いることにより, Z軸方向から全方向に最大 30° の傾斜が可能である.

測定部の構造は, 高分解能光学リニアスケールを, エアスライドに取付け, これを軸構成ユニット(以下測定軸)とした.

2つの測定軸を直交させ, それぞれの軸端に精度安定軸として4本のセラミックスエアスライドで保持し, 2次元計測平面を構成した. なお, 試作装置の測定可能範囲をXY共に100mm, Zを50mmとした.

収録部は, それぞれの計測軸スケールから独立して出力されるパルス信号を計数し, 時間的な同期を取り, XY軸座標数値に変換し, 数値ファイルとして保存するカウンターボードを試作した.

収録タイミングを1s~100 μ sで任意に設定でき, NC指令タイミングに一致させることを可能とした.

解析部はパソコンを用い, NC指令座標を基準として動作軌跡を表示すると共に, 動作軌跡から, 各誤差要因での量を数値化するプログラムをLabVIEW(National Instruments社製)上で作成した.

本研究で使用した測定システムは, システム内にワーク座標系平面を設定し, 設定平面内に測定原点を設け, 複雑な同時5軸制御動作経路をワーク座標系平面では動作経路を示し, かつ, その平面との位置誤差で表示することができる.

表示した作経路に関して, 同時2軸動作経路で設定した, 誤差要因毎の数値化を行うことにより, 容易に制御軸数と経路精度の比較を行える.

3. 1. 2 誤差要因解析項目

本研究では、以下の項目について解析を行った。

計測結果について、工作機械の経路精度に関する誤差要因の解析および定量を行う。基準には指令値を用い、計測結果との差異を解析するために、計測結果の指標³⁻³⁾を求めた。

指令値を (X_i, Y_i) とし、計測結果を (X_j, Y_j) とする。

1) 円動作経路

円動作経路の計測結果 (X_j, Y_j) を極座標変換し (r_j, θ_j) とし、この点列について誤差評価を行うこととした。例えば直径80mmの円弧補間では、 $r_i = 40\text{ mm}$ で、 $0 < \theta_i < 360^\circ$ の範囲となる。

同様に (X_j, Y_j) について変換を行い、比較することにより、誤差要因毎の定量化を行う。

$$ri = \sqrt{Xi^2 + Yi^2} \quad \text{式 3 - 1}$$

$$\theta i = \tan\left(\frac{Xi}{Yi}\right) \quad \text{式 3 - 2}$$

誤差要因は、真円度・半径減少量・バックラッシ量・反転スパイク量である。真円度Cについては、次式で求めた。

$$C = |r_{\max} - r_{\min}| \quad \text{式 3 - 3}$$

次に、半径減少量は、象限切り替えでの反転スパイク箇所を除外し、半径平均値を算出し、指令値での半径との差異を示す。

$$\Delta rk = ri - \frac{\sum_j rj}{j} \quad \text{式 3 - 4}$$

$$\Delta r = \frac{\sum_{k=1}^4 \Delta rk}{4} \quad \text{式 3 - 5}$$

ただし，象限切り替えの除外区間については，実験により，座標軸を中心に， $\theta = \pm 3^\circ$ と設定した．第一象限から第四象限までの Δr_k を平均し，全軌跡での半径減少量 Δr を算出した．

一方バックラッシ量 B_j は，象限毎に求めた Δr_k の差異を算出した．

例えば，第一象限と第四象限の境を B_x とすると，その値は次式で示すことができる．

$$B_x = |\Delta r_1 - \Delta r_4| \quad \text{式 3 - 6}$$

また，反転スパイク R については，象限毎の最大 Δr_m から Δr_k を引いた絶対値を算出することにより求めた．例えば，第一象限と第二象限の切り替わりを R_y とすると，次式で示すことができる．

$$R_y = |\Delta r_{1m} - \Delta r_1| \quad \text{式 3 - 7}$$

2) 直線動作経路

直線動作経路では，各一辺の計測結果より，真直度および直角度を求めた．各辺の指令値を (X_{k_i}, Y_{k_i}) とし，得た計測結果を (X_{k_j}, Y_{k_j}) とする．

例えば，第一辺の真直度 S_1 は，最大値と最小値から，次式で示すことができる．

$$S_1 = |X_{1j\max} - X_{1j\min}| \quad \text{式 3 - 8}$$

また，辺毎の計測結果について，最小二乗法による直線近似を行い，その傾きを用いて正方形の内角を求め，直角度を算出した．

$$Y_{1j} = a_1 X_{1j} + b_1 \quad \text{式 3 - 9}$$

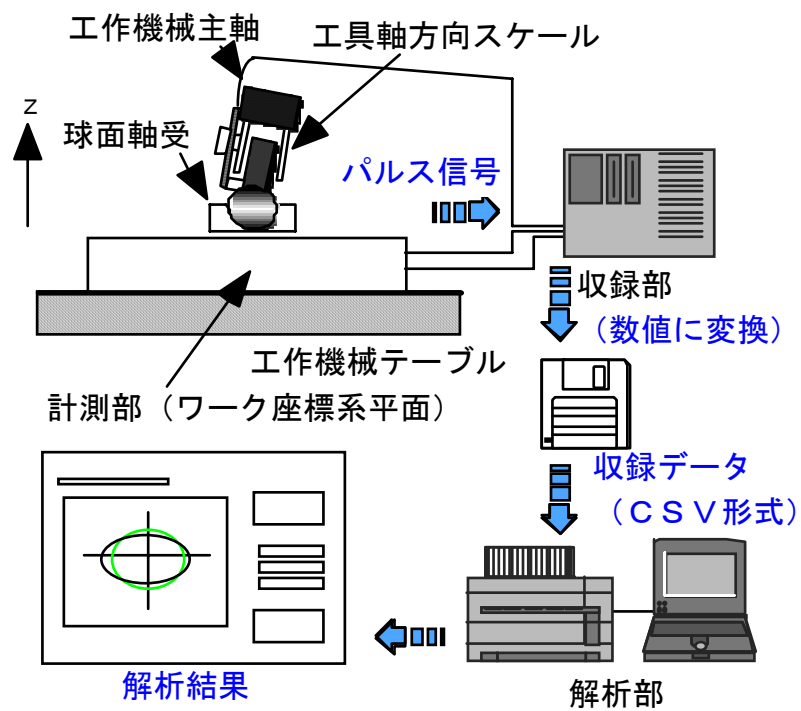


図 3 - 2 システムブロックダイアグラム

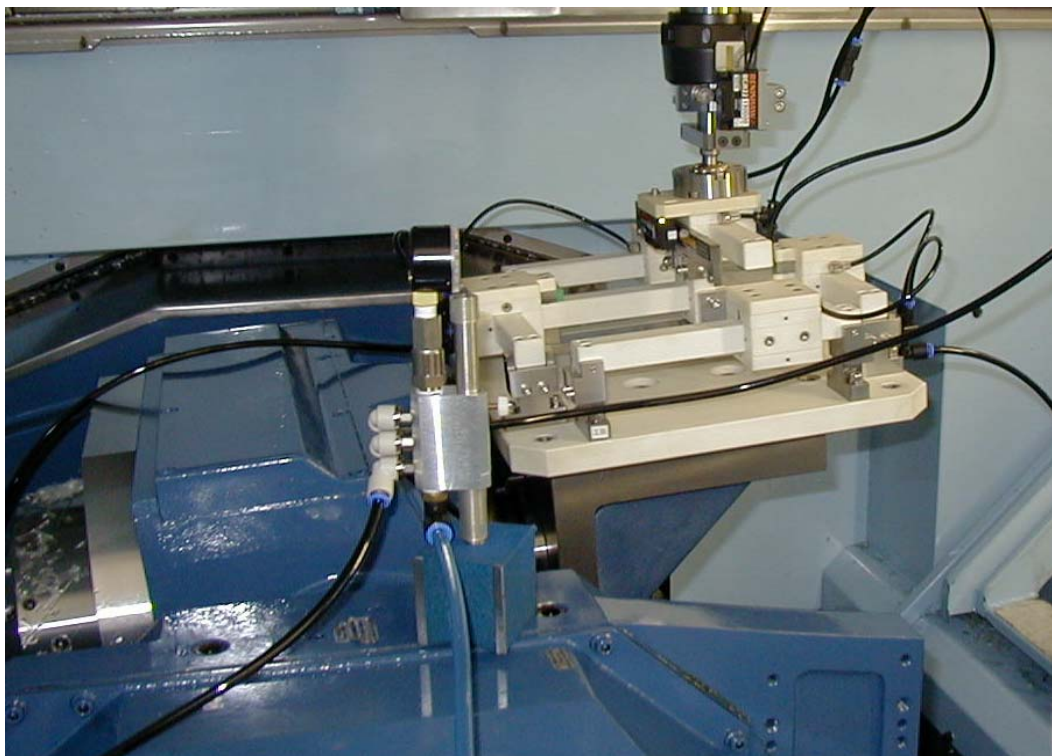


図 3 - 3 測定システム (同時 5 軸 測定部)

3. 3 システムの測定原理

システムは，シリアルガイド機構^{3-4) 3-5) 3-6) 3-7) 3-8)}を採用した測定部を特徴としている．

すなわち，動作経路に対し，正確に追従でき，加減速時に発生する慣性に対して，構造的な剛性を有する必要がある．

そこで，鋼材に比較して約4倍の比剛性を有する一般構造用アルミナセラミックスを用いている．シリアルガイド機構は，2つの直動案内面と測定スケールを構成すれば理論上その位置座標を測定することが可能である．

しかしながらシステムでは，動作経路測定時に2次元測定平面での，平面を基準に測定を行うため，さらに4本の精度安定軸を設けた．

上記の構造を安定的に用い，工作機械主軸とテーブルの間を相対的かつ連続して座標位置の測定値を，3次的に収録することが可能となる．

3. 4 システムの測定精度校正

測定システムは図3-4で示した構造上，エアスライドの軸受隙間である $1\mu\text{m}$ 以上の組立誤差がある場合には作動しない．そのため，動作可能な場合，すなわち組立誤差が $1\mu\text{m}$ 以内で保証されているといえる．

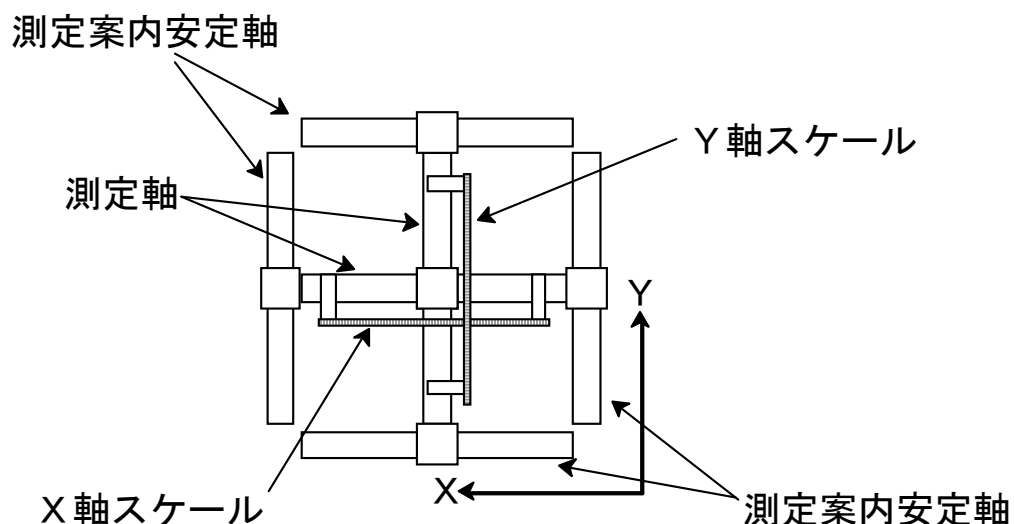


図 3 - 4 測定部構造（上面）

加えて、レーザ干渉測長器を用いて精度校正³⁻⁸⁾を行うことにより、測定精度を保証している。校正装置³⁻¹⁾は、セラミックスエアスライドにレーザ干渉測長システムを組み付け、駆動装置にはリニアモータを用いている。図3-5に校正装置概略と図3-6にその写真を示す。校正は2段階で実施する。

まず、エアスライドにスケールを取り付けた構造（以下、測定軸）について、ISO 230-2³⁻⁹⁾に規定のある、位置決め精度測定に準じた各軸の精度校正³⁻¹⁰⁾を行う。

次に、校正した測定軸を直交して組み付ける際に、校正装置を用いて直交軸の調整を行う。この直交の調整は、システムの測定部を形成する際に、軸単体の精度に加え、測定精度を大きく左右する。

したがって、本装置は、各軸がエアで浮遊した、つまり、測定を行う状態での、組立精度検定を行う必要がある。各軸の完全固定を行うと測定システムが動作しなくなり、校正を行うことができない。

3. 4. 1 測定軸の校正

1) 2次元測定平面の測定軸

各測定軸とレーザ干渉測長システムを、校正装置に平行に取り付け、位置決め動作を行い同時測定した結果を比較した。

なお、校正に用いたレーザ干渉測長システムの分解能は、 $0.05\ \mu\text{m}$ である。(ML10 レニショー社製)

測定部の動作範囲は各軸100mmであり、その範囲内を5mm間隔で往復運動をさせ、動作静止中の座標を測定し、レーザ干渉測長システムと測定軸の座標差異を示した結果を、XY計測軸を例として、図3-7に示す。

比較結果から差異は、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下であることが確認³⁻¹⁾できた。

2) 工具方向測定軸

同時3軸以上における動作経路の測定は、工具方向測定軸を用いる。立体ダイヤゴナル動作経路については、3次元的な動作経路を測定するため、工具方向計測軸にも、2次元測定平面の測定軸と同様な構造を用いた。

また、円錐・四角錐・菱形錐動作経路については、2次元測定平面との位置ズレを測定するのみであるため、ボールリテーナ構造を用いた。

3. 4. 2 測定軸相互の直角度校正

1) 2次元測定平面の測定軸

図3-8は、3次元測定器上で、本システムの測定部を組立た状態の結果である。校正装置との比較では、XY軸の直角度誤差が 1° となっている。

そこで、この結果を基に測定軸の相互直交部の再組み付けを行い、再度測定評価を行い、最終的には図3-9のように、直角度誤差は 0.005° となった。図3-10には、移動距離に対する直角度誤差の関係を示す。

なお図3-11は、同構造をボールリニアガイドで製作した試作装置について、直交部の測定評価を行ったものである。エアスライドの結果と比較すると、明らかに真直度に起因する測定値誤差があることが分かる。

本測定システムは、測定精度 $1\mu\text{m}$ を目標としており、ボールリニアガイド構造で実現するためには、部材をセラミックス化するか、軸受部にプリロード及びリテーナ構造の採用が望まれる。前者については、転がり接触を行う軸受部での接触時に発生する揺動が測定値に影響を与え、かつ、接触による摩耗が著しく不安定な構造となる。

後者については、プリロード及びリテーナ構造が、動作追従時に無視できない抵抗となり、やはり測定値に影響を与える。

すなわち、動作経路測定を行う際に、シリアルガイド機構を採用する場合は、測定装置自体の幾何誤差の正確な同定と補正が必要不可欠である。

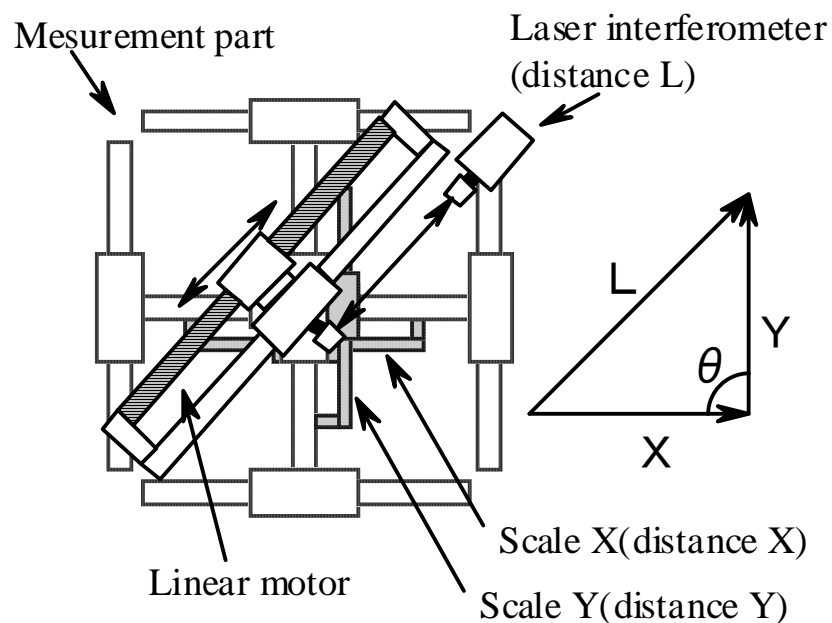


図3-5 校正装置概略図



図 3 - 6 精度校正装置（校正の状態）

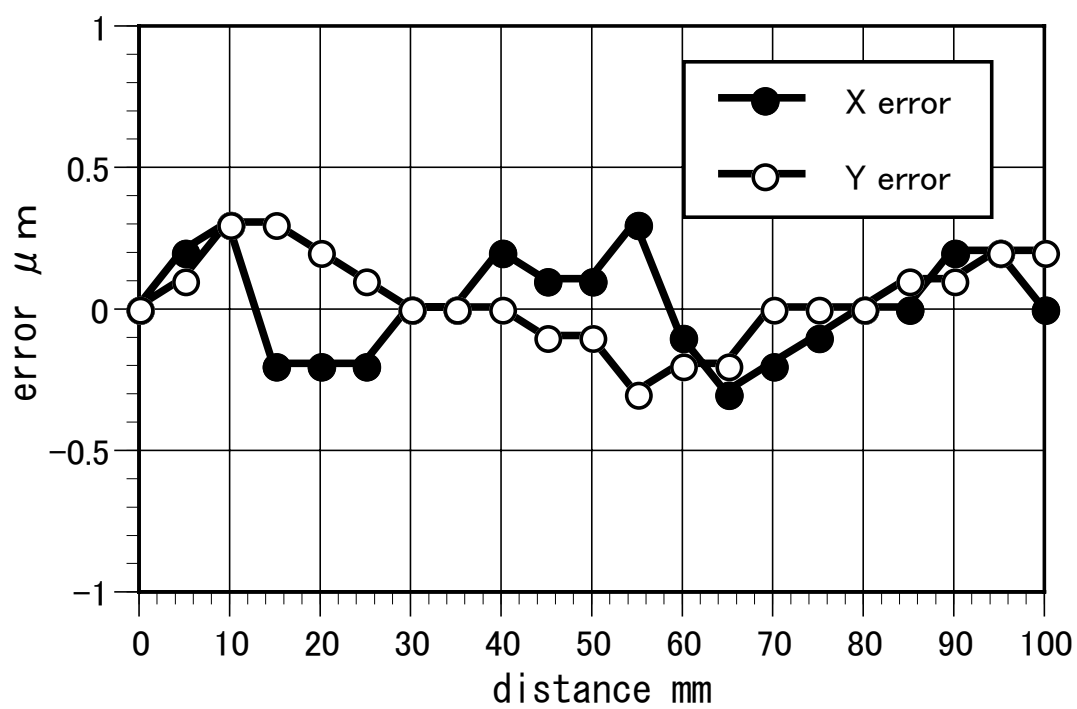


図 3 - 7 単軸の位置決め精度測定

2) 工具方向 (Z) 測定軸

立体ダイアゴナル動作経路³⁻¹¹⁾については、3次元的な動作経路を測定するため、工具方向計測軸も2次元測定平面と同様に直角度補正を行った。また、円錐・四角錐・菱形錐動作経路²⁾については、2次元測定平面に対して、動作中には任意の角度変化を有する。したがって、測定装置内に角
度基準
け
ない。

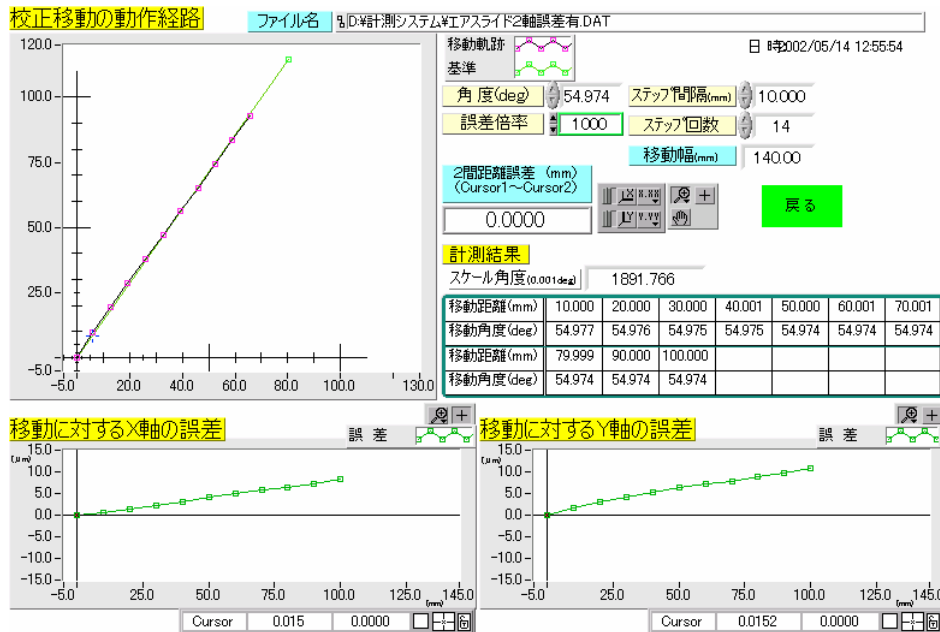


図 3 - 8 2次元測定平面の測定軸直角度誤差 (3次元)

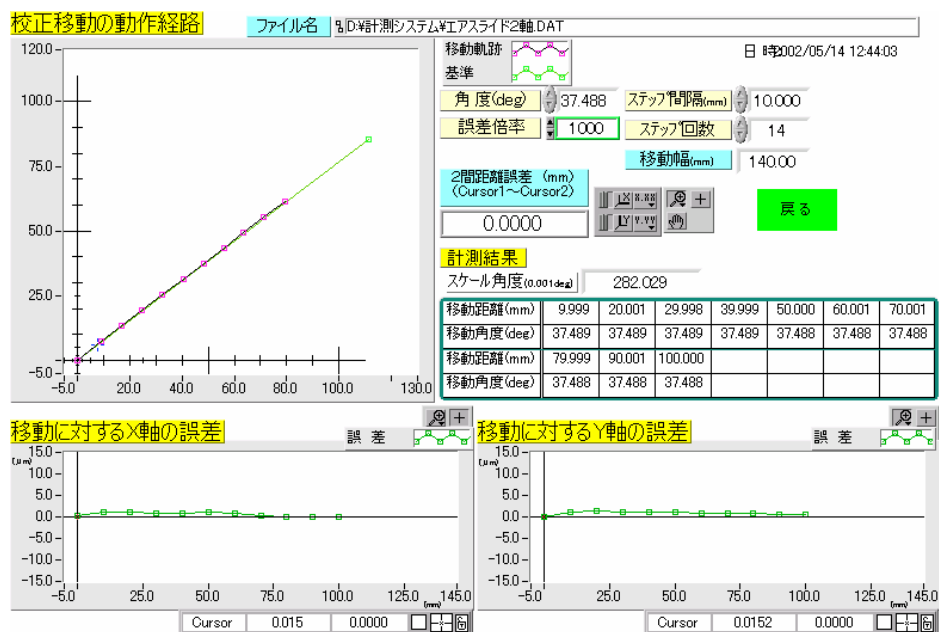


図 3 - 9 2次元測定平面での相互測定軸直交誤差 (校正装置)

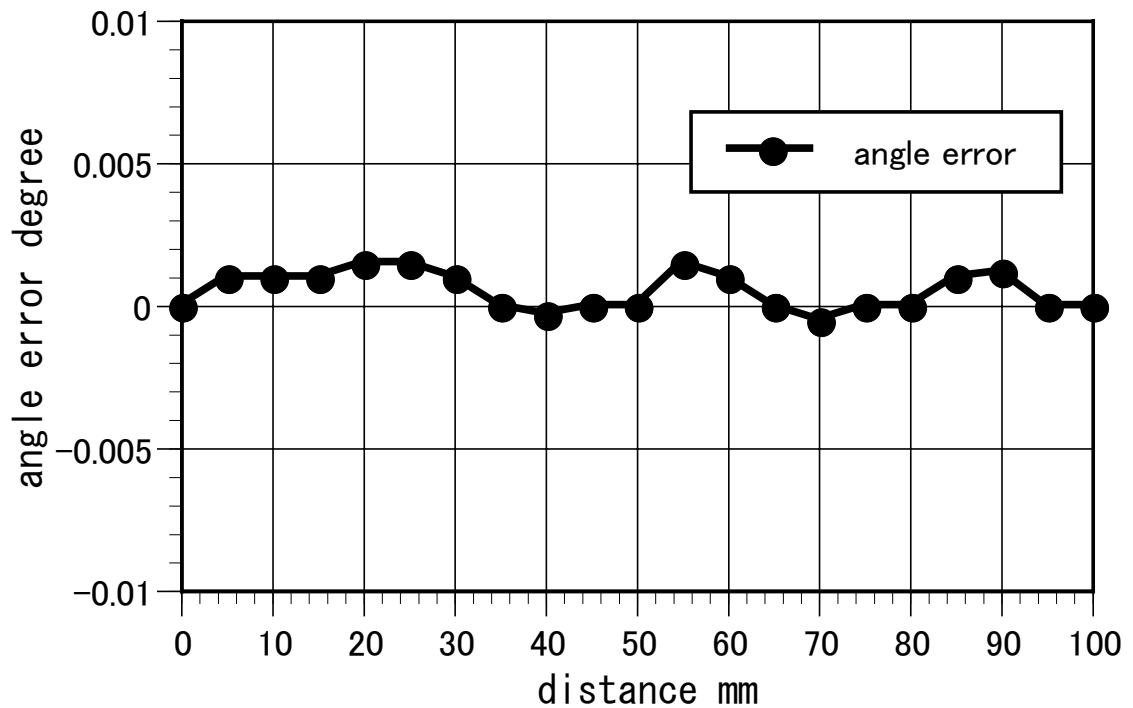


図 3 - 1 0 2次元測定平面の軸相互直角度（最終調整後）

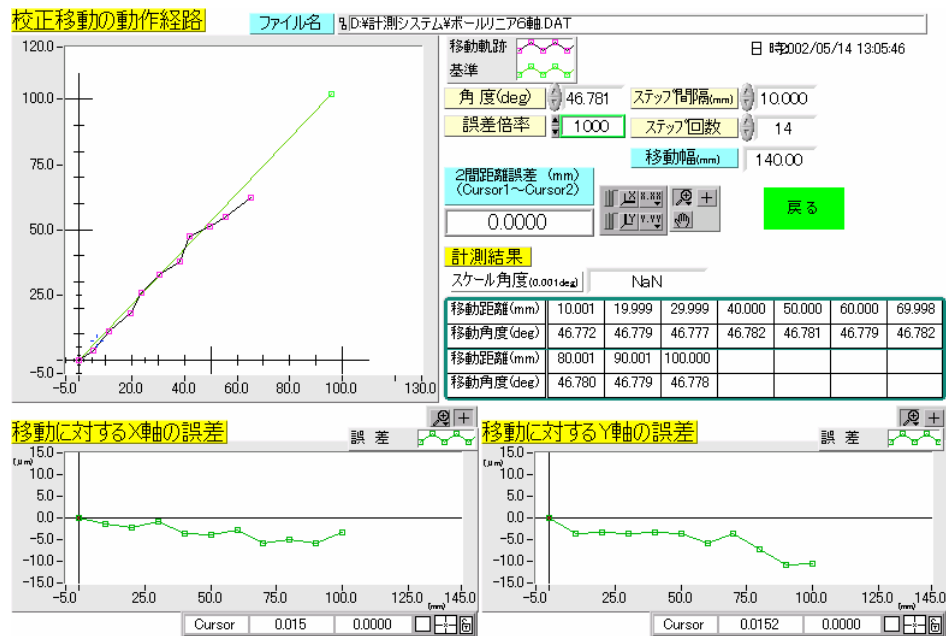


図 3 - 1 1 2次元相互測定軸相互直角誤差（ボールリニアガイド）

3. 5 本章の総括と結論

本章では，5軸工作機械における，任意な同時5軸動作経路の計測までが可能となる測定装置について，設計試作を行った．

まず，3軸工作機械の任意動作経路を，直接計測できる測定装置は存在しなかったため，動作を検出するためのリニアスケールと，それらを高精度に組立保持する案内部品を用いた「測定部」及び，得られたデータを収録し，誤差要因毎の数値化を行う「収録解析部」で構成されたシステムを発案した．2次元測定平面測定軸の動作可能範囲を測定可能範囲とする平面を設定した．なお，測定部の試作は4段階に及ぶ．

まず基本装置として，ボールリニアガイドを用いて，動作経路測定装置を初期試作した．その構造での測定精度は， $5\mu\text{m}$ であった．

次に，構造を踏襲し，各部材をセラミックス化し，軸受には動作抵抗の低減を目的に，エアスライド機構を採用した．

さらに，同時3軸に用いる工具方向計測軸を付加し，空間における動作経路測定を可能とした．

また，同時5軸動作経路に対応するため，工具方向計測軸と2次元測定平面測定軸の間に球面軸受を挿入し，旋回・傾斜軸の動作に追従できる測定部を完成させた．

一方，測定結果は，収録した連続座標データから，測定原点を基準とした動作経路をグラフに描画し，同グラフ上で指令値との差異を視覚的に示し，差異のみに倍率を架け，視覚的に明らかにした．

誤差要因の特定及び定量化については，2次元測定平面での真円度・真直度等共通項目で定量化することにより，制御軸数の違いまでを比較検討できるように，解析プログラムを構築した．

参考文献

- 3- 1) 牛尾雅樹, 牛島英史, 神谷昌秀, 榎原弘之, 鈴木裕, NC 工作機械の動作経路計測システムの開発, 精密工学会誌, 71, 8 (2005)
- 3- 2) 牛尾雅樹, 蔵前法文, 神谷昌秀, 榎原弘之, 是澤宏之, 鈴木裕, ISO 230-4 を基礎とした 5 軸 NC 工作機械の動作経路計測, 精密工学会誌, 72, 7 (2006)
- 3- 3) ISO230-4 Test code for machine tools (1996)
- 3- 4) 内海敬三, 円弧運動精度測定技術, 機械の研究, 50, 1 (1998)
- 3- 5) 丘華, 大岡正典, リンク機構を用いる NC 工作機械の運動精度測定法 (第 1 報 測定装置及び測定実験), 日本機械学会論文集 (C 編), 62, 593 (1996-1)
- 3- 6) 丘華, 高田正昭, リンク機構を用いる NC 工作機械の運動精度測定法 (第 2 報 測定装置における誤差の同定法), 日本機械学会論文集 (C 編), 63, 614 (1997-10)
- 3- 7) 丘華, 竹下義人, 高田正昭, リンク機構を用いる NC 工作機械の運動精度測定法 (第 3 報 小径円運動とコーナ部を含む直線運動の精度測定), 日本機械学会論文集 (C 編), 64, 628 (1998-12)
- 3- 8) 姜明錫, 長谷川聡, 三井公之, リンク機構による NC 工作機械の円運動の測定方法 (測定原理および実験結果), 日本機械学会論文集 (C 編), 62, 602 (1996-10)
- 3- 9) ISO230-2 Test code for machine tools (1997)
- 3-10) 茨木創一, 後藤渉, 松原厚, 越智玉樹, 濱村実, 交差格子スケールの自己校正法, 精密工学会誌, 72, 8 (2006)
- 3-11) ISO230-6 Test code for machine tools (1997)

第四章 測定経路設定概念及び解析要因の設定

加工に用いられる動作経路は、加工対象とする形状により種々の設定が行われる。

測定経路は一般化を考慮し、国際規格を参考にした。

すなわち、等高線加工を想定し、工作物ワーク座標系を主に測定し、運動測定結果を用いて機械誤差要因の特定とその数値化を行う、図 4-1 に示す ISO 230-4⁴⁻¹⁾ を基礎とした測定手法の拡張を試み、同時 5 軸動作経路までの測定手法を設定する。

さらに、図 4-2 に示す ISO 230-6⁴⁻²⁾ に規定される平面・立体ダイヤゴナル変位試験を参考に、直進軸について、同時 3 軸動作経路の運動精度を測定する手法と、従来法との比較を試み、直線経路における運動の真直度・直角度等の数値化を目指す。

円運動試験法との併用により、図 4-3 に示す、5 軸工作機械の同時 5 軸制御における、総合的な運動精度測定⁴⁻³⁾を目指す。

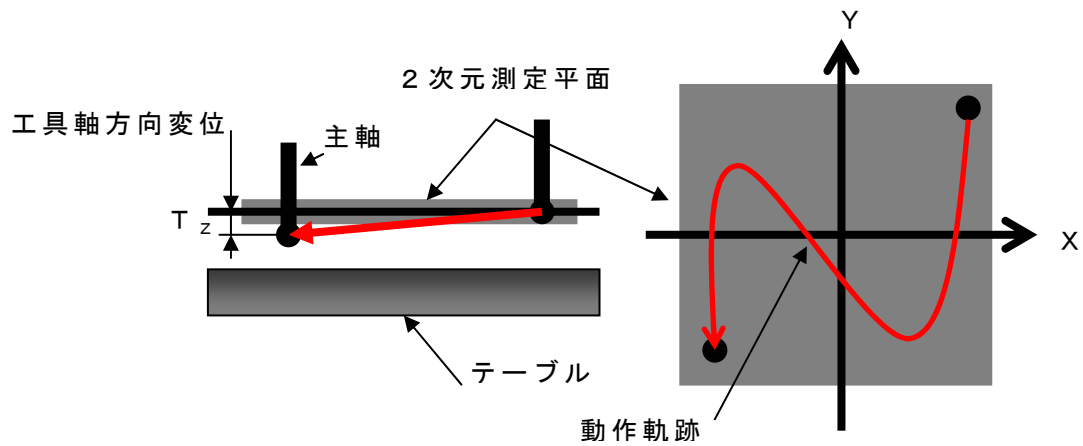


図 4 - 1 I S O 2 3 0 - 4 を基礎とした測定手法

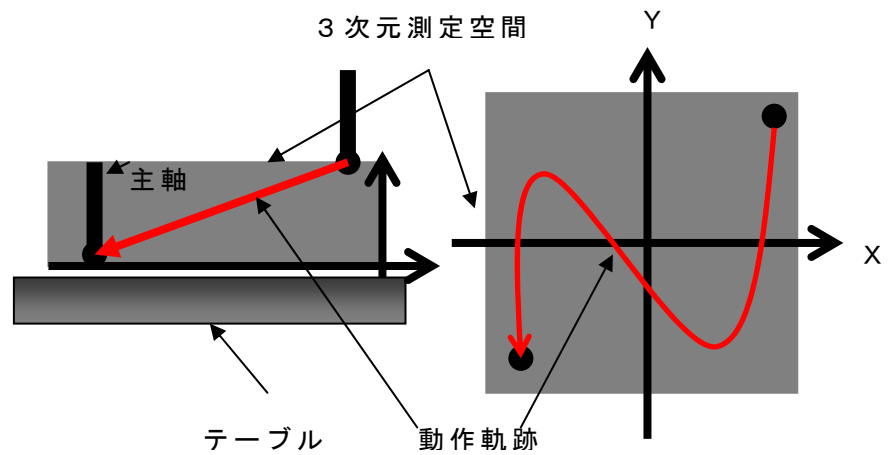


図 4 - 2 I S O 2 3 0 - 6 を基礎とした測定手法

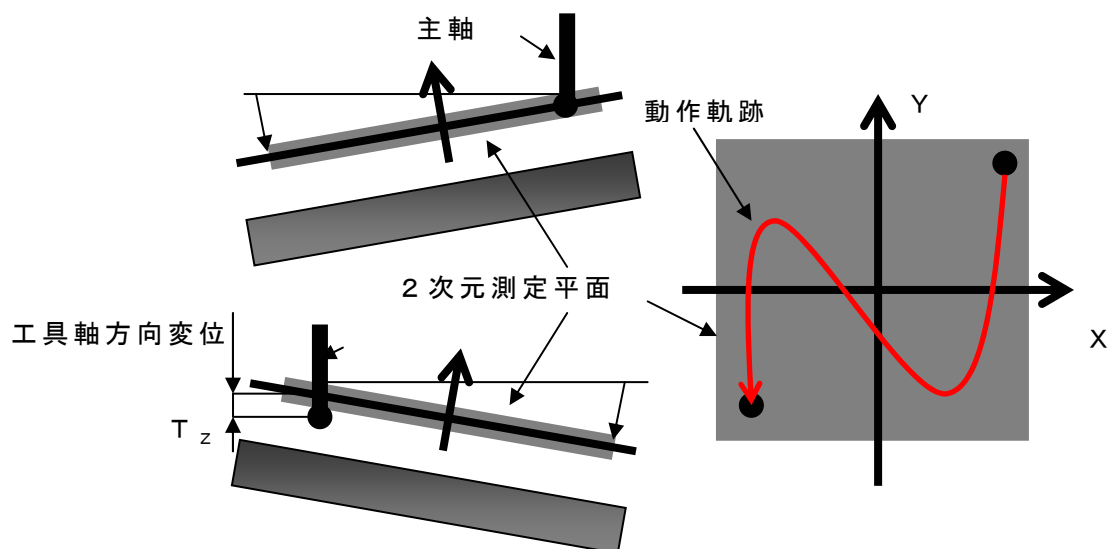


図 4 - 3 I S O 2 3 0 - 4 を基礎とした測定手法（同時 5 軸）

4. 1 同時2軸動作経路（ISO 230-4 拡張）

4. 1. 1 円運動動作経路

まず XY・YZ・ZX 平面（以下 3 平面）において、円運動試験法と同等の測定表示を行った上で、開発する測定装置の妥当性を検証することとする。

したがって、3 平面での同時 2 軸動作を検証するため、各平面において、同時 2 軸円運動を行わせ、測定結果の表示を行う。

なお、測定原点は、運動の重心点について、NC 指令値と、測定結果から得られる統計的に得られた数値との比較により、運動の総体的なズレをみることで、測定装置の設置誤差を確認するものである。

具体的に比較する誤差要因については、真円度・半径減少量・反転スパイク量・バックラッシュ量に設定した。図 4-4 に、円運動動作経路を示す。

4. 1. 2 四角運動動作経路

図 4-5 には、四角運動動作経路⁴⁻⁴⁾を示す。

円運動と同様に、図形形状の重心点を測定原点とした。

四角運動は、2つの直進軸に対して、双方平行に直線運動する辺を持ち単軸ごとの真直度・スケール誤差を知る目的で設定した。また、軸相互の直角度についても、交差する測定動作経路に統計的な処理を加えることにより、数値化することができる。

加えて各頂角部での、動作経路と NC 指令値との比較により、過渡特性を運転条件に応じて比較検討することもできる。

設定した動作経路は、通常では出荷検査で行われる、加工物による間接測定と同様である。しかしながら、直接測定により、工作機械の運動特性を正確にとらえる。

4. 1. 3 菱形運動動作経路

図 4-6 で示す菱形運動⁴⁻⁴⁾では、工作機械は常に同時 2 軸制御により運動する。したがって、同時 2 軸制御での動作経路となり、円運動と同様な状態となる。四角運動では、単軸ごとの誤差要因の特定となる。

誤差要因の特定は、同時 2 軸制御時の、運動の真直度・直角度に加え、各頂角部で、動作経路と NC 指令値との比較により、過渡特性を運転条件に応じて比較検討することもできる。

なお、各頂角部は象限切り替えに当たる位置であるため、過渡特性は、反転スパイク量やバックラッシュ量を含むこととなる。

4. 2 同時3軸動作経路（ISO 230-6 拡張）

参考とするISO 230-6は、工作機械の精度傾向を、数値の指標で示す手法である。具体的には、測定空間内で、平面ダイアゴナル及び立体ダイアゴナル変位試験を行い、統計的处理により位置の偏差等の具体的な数値を示す。本研究では、変位試験をそのまま動作経路試験に置き換え、運動の測定を行い、運動の真直度・直角度を導く。

ここで、平面ダイアゴナル動作経路試験⁴⁻⁵⁾は、4. 1. 3で説明した菱形動作経路の一辺となるため、あまり意味をなさない。

一方、立体ダイアゴナル試験は、同時3軸制御の動作経路として動作経路測定ができ、総合的な軸相互の組み付け精度が、動作経路精度に与える影響を確認できる。

したがって、本手法は5軸工作機械のベースとなる、3軸工作機械の機械性能を把握した上で、旋回・傾斜軸が機構に付加された場合、機械性能が、どのように変化するかを判断する基準と考え、同時5軸動作経路への発展を考慮し、動作経路設定を行った。

図4-7には、立体ダイアゴナル試験⁴⁻⁶⁾について示す。

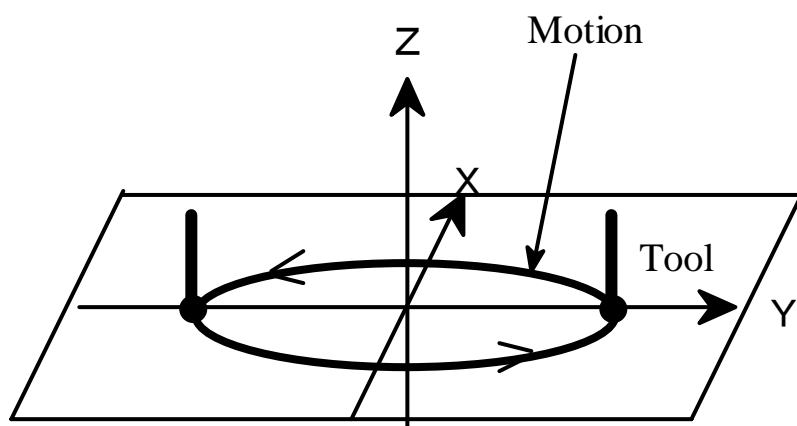


図 4 - 1 円動作経路

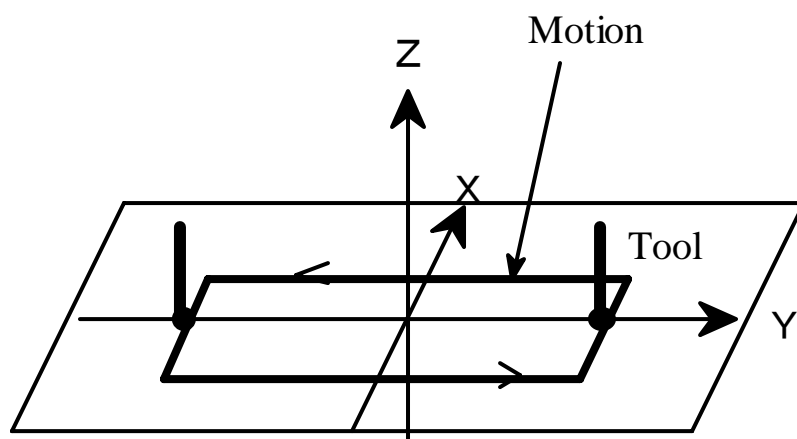


図 4 - 2 四角動作経路

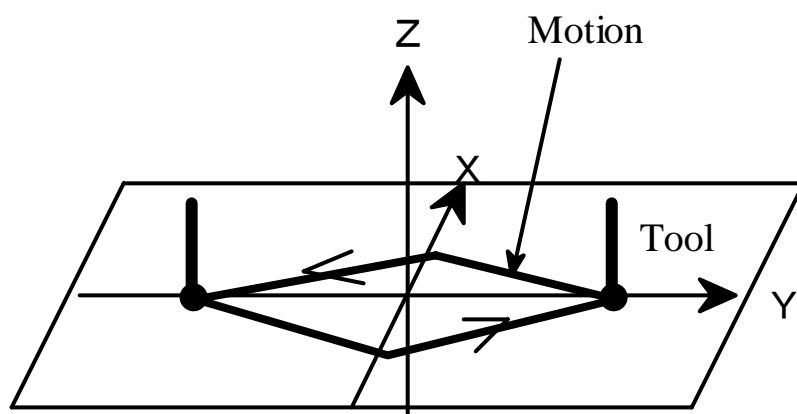


図 4 - 3 菱形動作経路

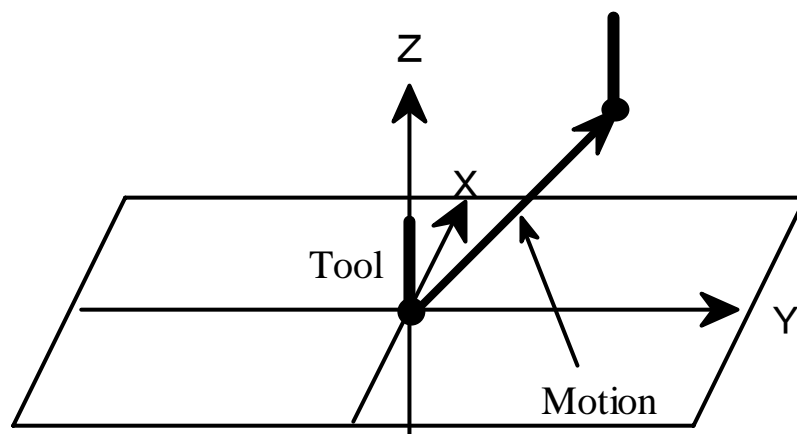


図 4 - 4 立体ダイアゴナル動作経路

4. 3 同時 5 軸動作経路（ISO 230-4 拡張）

前節までは、3 軸及び 5 軸工作機械の動作経路測定について、共通使用できる測定動作経路の設定を行った。

本節では、主に同時 5 軸動作経路⁴⁻³⁾に関する設定について説明する。

共通設定として、本節で設定した動作経路は、形状を 2 次元測定平面で評価し、工具先端を想定した、軸先端中心の挙動を調べる。

なお設定の基礎として、円運動試験法（ISO 230-4）と同等に、動作経路の設定を行った。いずれも測定原点を重心とし、ワーク座標系平面を 360° 動作することとした。

なお、同時 5 軸加工については、機械精度に加え、指令値についても併せて評価を行う必要がある。

同時 5 軸動作経路は、旋回・傾斜テーブルを有する工作機械又は、主軸頭旋回形工作機械に指令値を与える場合、想定する経路から指令値を導出する際に、ポストプロセス処理⁴⁻⁷⁾を行う必要があり、算出について、計算誤差を有することが一般的に知られている。

したがって、本研究では、特に真円度・真直度に関して、指令値と測定値に比較検討を加え、指令値自体の、計算誤差を特定及び数値化する手法も考察する。経路重心で測定装置の原点を設定し、測定開始点までを動作させ、測定終了点までの動作経路を測定し、測定原点へ戻る動作を一連として、測定することとした。

なお、動作方向は、時計回り・反時計回りとあるが、本研究では指定のない限り、反時計回りの測定結果を表示する。

4. 3. 1 円錐運動動作経路

図 4-8 に、設定した円錐運動動作経路⁴⁻³⁾について示す。

本動作経路は、円運動試験法の円運動に工具傾斜を付加し、同時 5 軸動作経路の測定を目指したものである。

本測定手法では、等高線加工を想定した、2 次元測定平面での誤差要因の特定を主に行った。

誤差要因は、真円度などの同時 2 軸円動作を測定する場合と同様に設定し、制御軸数の違いを検証する。

4. 3. 2 四角錐運動動作経路

図 4-9 に、設定した角錐運動動作経路⁴⁻³⁾について示す。

本動作経路は、円運動試験法の円運動を正方形運動に置換し、さらに、工具傾斜を付加し、同時 5 軸動作経路の測定を目指したものである。

この動作経路は、動作中には一定した同時 5 軸動作を行わず、各角部において、急峻な同時 5 軸動作となる。

この動作経路では、辺については真直度・位置決め、相互軸については直角度・各角部過渡現象を知ることができる。

4. 3. 3 菱形錐運動動作経路

図 4-10 に、設定した菱形錐運動動作経路⁴⁻³⁾について示す。

本動作経路は、円運動試験法の円運動を菱形運動に置換し、さらに、工具傾斜を付加し、同時 5 軸動作経路の測定を目指したものである。

四角錐動作と比較すると、工具傾斜については動作全般に緩やかに変化しており、円動作に近い状態となる。

なお、本動作は動作経路上で、常時同時 5 軸動作となる。

この動作経路では、主に辺の真直度について解析評価を行い、指令値に関する、ポストプロセス処理等の影響を見る。

また、角部では旋回・傾斜軸が各々何れかが、主な動きを行うようになり、かつ、象限切り替えの部位に当たるため、同時 5 軸制御時の旋回・傾斜軸を含めた過渡特性を示すことができる。

4. 4 本章の総括と結論

ここでは、ISO 230-4 及び 6 を基礎とした、測定動作経路の設定を行った。

設定した経路は円と直線を基準とし、同時 2 軸・3 軸及び同時 5 軸制御状態での動作経路を総合的に測定評価し、真直度・直角度等の誤差要因の特定とその定量化を目的とした。

なお、比較基準は指令値とし、比較検討を行う。

定量化した数値を比較検討することにより、従来では困難であった、直線動作経路や同時 3 軸以上の動作経路に関する、誤差要因の特定と定量化が行え、制御軸数増加に関する動作経路の精度傾向を数値で示せる。

表 4-1 には、測定装置と測定経路対応表を示す。

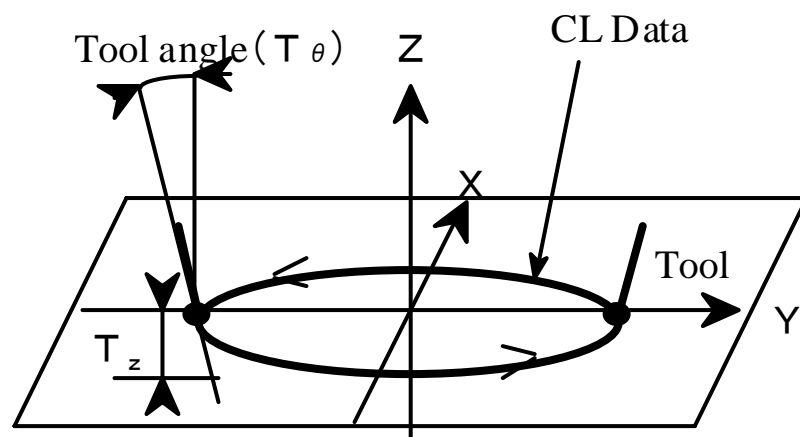


図 4 - 5 円錐運動動作経路

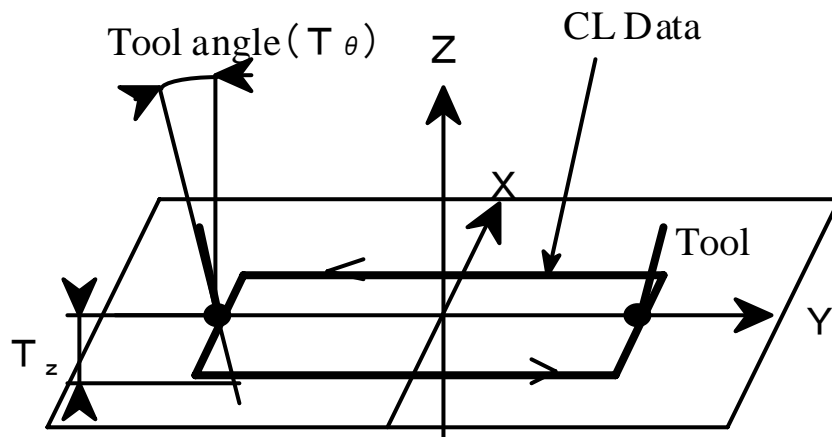


図 3 - 6 四角錐運動動作経路

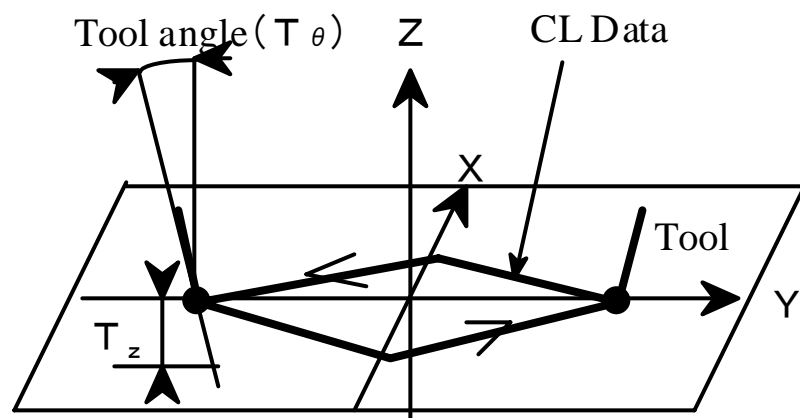


図 4 - 7 菱形錐運動動作経路

表 4 - 1 測定装置と測定経路対応表

	比較測定	開発装置	D B B	交差格子	間接測定
組立精度	◎	○	×	○	△
単 軸	◎	○	×	○	△
2 軸円	×	○	◎	○	△
2 軸四角	×	○	×	○	△
2 軸菱形	×	○	×	○	△
3 軸直線	×	●	×	×	△
5 軸円	×	○	○	×	△
5 軸四角	×	●	×	×	△
5 軸菱形	×	●	×	×	△

○：測定可，◎：測定良，●：唯一直接測定

△：間接測定，×：測定不可

参考文献

- 4- 1) ISO230-4 Test code for machine tools (1996)

- 4- 2) ISO230-6 Test code for machine tools (1997)

- 4- 3) 牛尾雅樹, 蔵前法文, 神谷昌秀, 榎原弘之, 是澤宏之, 鈴木裕, ISO 230-4 を基礎とした 5 軸 NC 工作機械の動作経路計測, 精密工学会誌, 72, 7 (2006)

- 4- 4) 牛尾雅樹, 牛島英史, 神谷昌秀, 榎原弘之, 鈴木裕, NC 工作機械の動作経路計測システムの開発, 精密工学会誌, 71, 8 (2005)

- 4- 5) 牛島英史, 鈴木裕, 榎原弘之, 是澤宏之, 同時 5 軸工作機械における X Y Z 軸空間内の切削経路の精度計測, 精密工学会大分地方講演会 (2003)

- 4- 6) 牛島英史, 鈴木裕, 牛尾雅樹, 同時 5 軸 NC 工作機械の動的精度計測に関する研究 - ダイアゴナル変位試験を応用した動的精度計測 -, 精密工学会春季大会 (2004)

- 4- 7) 長坂学, 竹内芳美, 形状創成関数に基づく 5 軸制御加工用一般化ポストプロセサの研究, 精密工学会誌, 62, 11 (1996)

第五章 測定システム・手法の検証

ここでは、開発した測定システムを活用した測定事例について、各動作経路での測定結果を表示し、得られる誤差要因について示す。

5. 1 対象工作機械

本研究では、図 5 - 1 に示す 5 軸工作機械を測定評価した。

本工作機械は、テーブル旋回形工作機械⁵⁻¹⁾に分類され、X Y Z の直動軸に A の旋回軸及び B の傾斜軸の 5 軸で構成されている。

なお、旋回軸と傾斜軸は駆動機構が異なっており、旋回軸はダイレクトドライブであり、傾斜軸はウォームギヤ駆動である。

直動軸の最小指令単位は $1 \mu\text{m}$ であり、旋回・傾斜軸の最小指令単位は 0.001° である。

本実験では、特異点を回避する目的で、傾斜軸を 90° にあらかじめ傾斜させ、送り速度 1 m/min を中心に計測⁵⁻²⁾を行った。

軸構成を、図 5 - 2 に示す。



図 5 - 1 対象工作機械 MAM 7 2 - 3 V S (株松浦機械製作所 製)

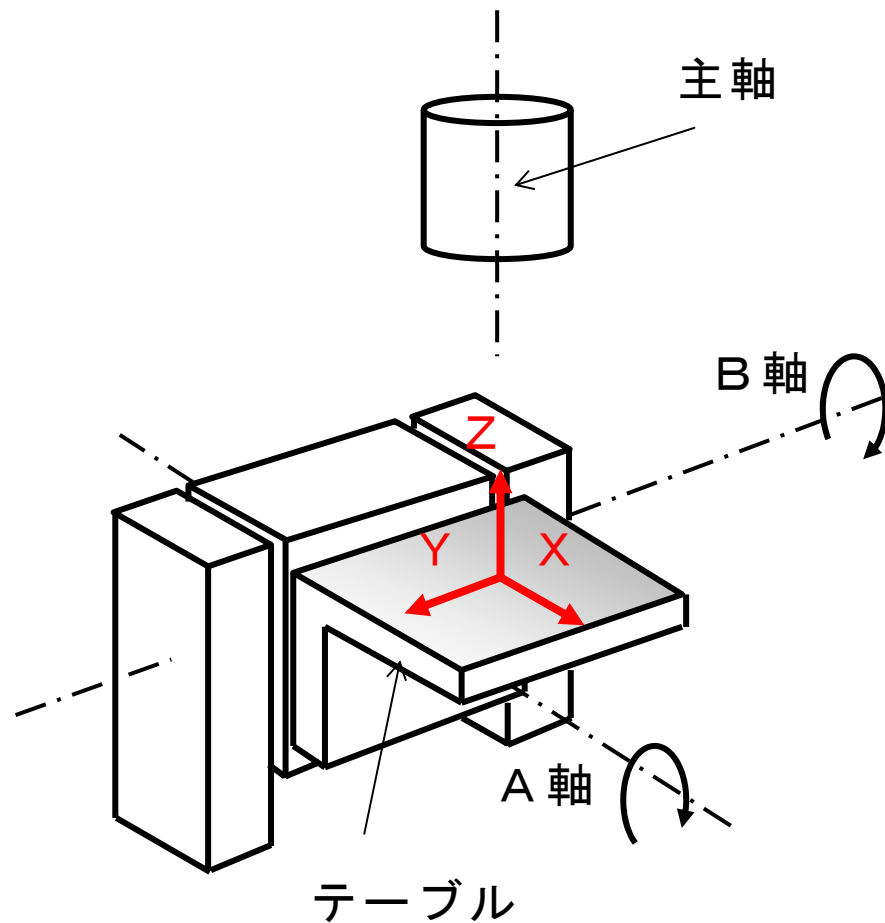


図 5 - 2 対象工作機械の軸構成

5. 2 同時 2 軸動作経路

同時 2 軸制御での動作経路は，旋回・傾斜軸を動作しないようにロックし，測定・表示した．各動作経路での測定結果及び，各誤差要因での定量結果について示し，工作機械メーカーが発行した検査成績表⁵⁻³⁾との比較を中心に，その妥当性を検証する．

5. 1. 1 円運動動作経路

工作機械の出荷検査時に広く用いられている，ISO 230-4⁵⁻⁴⁾に規定された円運動動作経路を計測し，図 5-3 に測定結果を表示した．

結果から，真円度・半径減少量・バックラッシ量を算出し，D B B システムでの計測結果⁵⁻⁵⁾と，比較検討を行うこととした．

出荷検査では送り速度を数種設定し，これに関する評価を行っている．

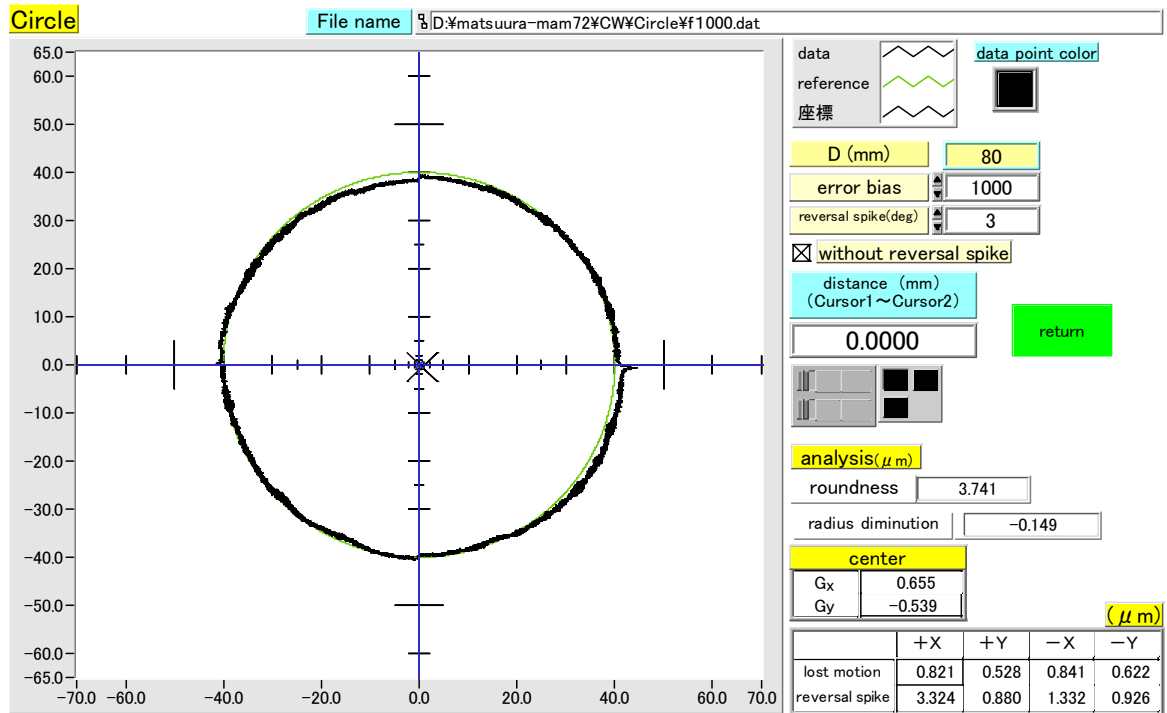


図 5 - 3 円運動試験結果（同時 2 軸制御）

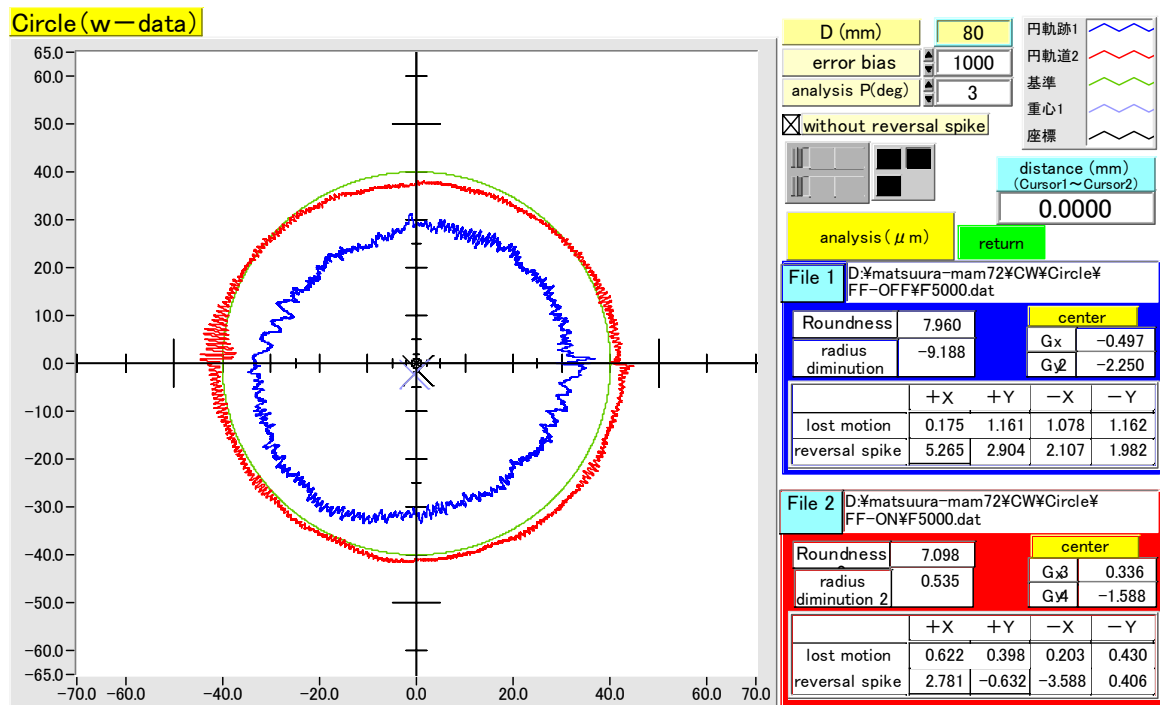


図 5 - 4 輪郭制御の効果（送り速度 5 m / m i n）

図 5 - 3 には，送り速度 1 m / m i n での測定結果について示す．

真円度を比較した場合，出荷検査記録での D B B システムの測定結果は 3 . 2 μ m であった．一方，開発した測定システムでの計測結果は 3 . 7 μ m である．なお，誤差要因の定量化は，反転スパイク量やバックラッシ量でも行っている，その値は，双方とも顕著な差異は見られなかった．

したがって，本システムでの測定結果と，D B B システムとは同等の測定精度を有することが分かる．表 5 - 1 に，測定結果の比較を示す．

表 5 - 1 円運動動作経路における測定結果比較

誤差要因 (μ m)	D B B システム	動作測定システム
真円度	3 . 2	3 . 7
半径偏差	0 . 0	0 . 5

図 5 - 4 には，先読み加減速制御の効果について計測を行った結果を示す．送り速度を 5 m / m i n に設定し，測定を行った．

なお，赤で表示した結果が輪郭制御を行ったものであり，青で表示した結果が行っていないものである．結果の比較では，制御の違いが半径偏差に減少が顕著に表れ，制御の有無により，その減少量の違いは 9 μ m であった．

表 5 - 2 測定結果における先読み加減速制御の効果

誤差要因 (μ m)	制御 O N	制御 O F F
真円度	7 . 1	7 . 9
半径偏差	0 . 5	- 9 . 5

このように，主に真円度を基準として，測定装置及び計測手法の比較を行い，D B B との差異がないことを確認した．

精度確認を行った装置を用いて，制御の違いを比較検討したところ，想定される半径偏差について，偏差量の数値化が行えた．

5. 1. 2 四角運動動作経路

2次元測定平面において、一辺 80mm の正方形を動作させる四角運動動作経路は、各辺において、単軸動作となり、工作機械の機構的な要因による単軸の真直度や軸相互の直角度⁵⁻⁶⁾を測定できる。

図 5-5 に測定結果を表示し、結果から数値化した、単軸の真直度や軸相互の直角度について、出荷検査で行われた、切削試験による検査数値との比較を行うこととした。

測定結果から、単軸の真直度や軸相互の直角度を算出した結果と、切削試験片による間接測定の結果を、表 5-3 に示す。

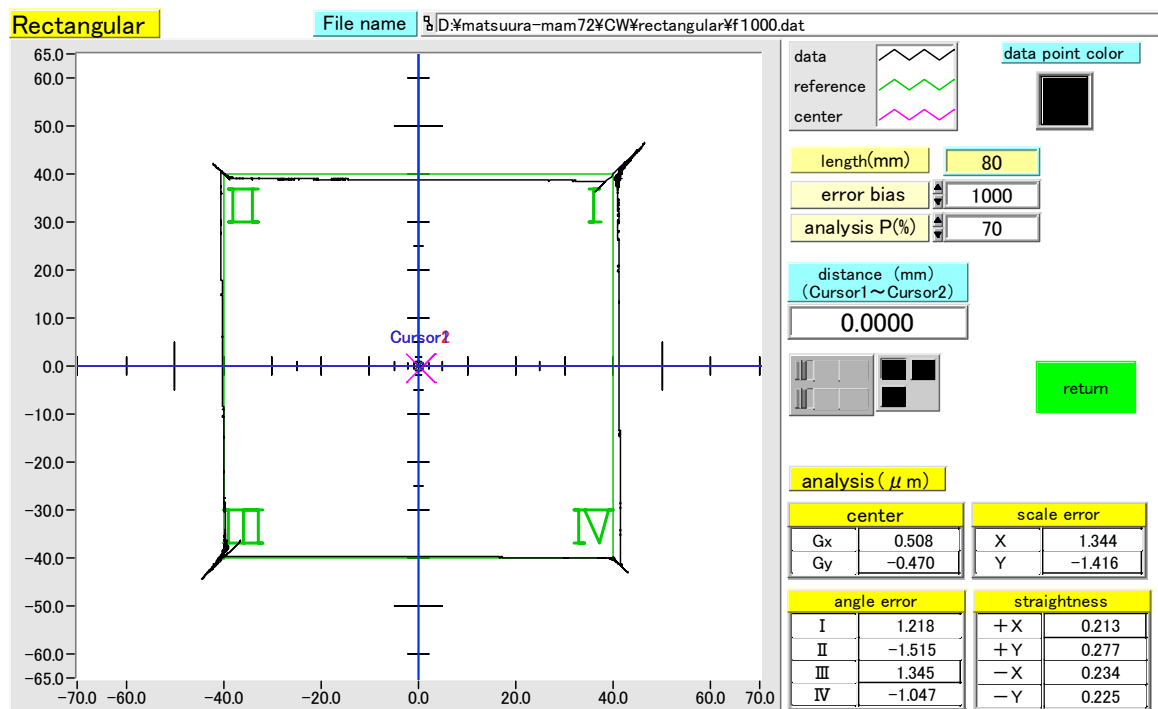


図 5-5 四角運動動作経路の測定結果

表 5-3 四角運動動作経路における測定結果比較

誤差要因 (μm)	切削試験片	測定システム
単軸真直度	2.0	0.2
単軸相互直角度	4.0	1.5

その結果，各軸真直度および軸相互の直角度についても若干の誤差が見られた．

差異原因としては，計測システムからはそれ自体の計測誤差，切削試験片からは，切削加工に起因する誤差や，形状計測誤差を含み，差異が生じたと考える．

しかしながら，本システムは，工作機械の軌跡を直接測定していることから，設定した計測範囲に於いては，有用な計測結果であると考ええる．

図 5－6 には，四角運動動作経路における，先読み加減速の効果について測定結果を示す．結果は，第一象限でのコーナ部を拡大して表示する．

先読み加減速制御を用いると，コーナ部の過渡現象^{5－7)}^{5－8)}における内回り量を低減できる．

制御の有無による，内回り量の計測が可能であり，その量の差異は 8 5 μm であった．

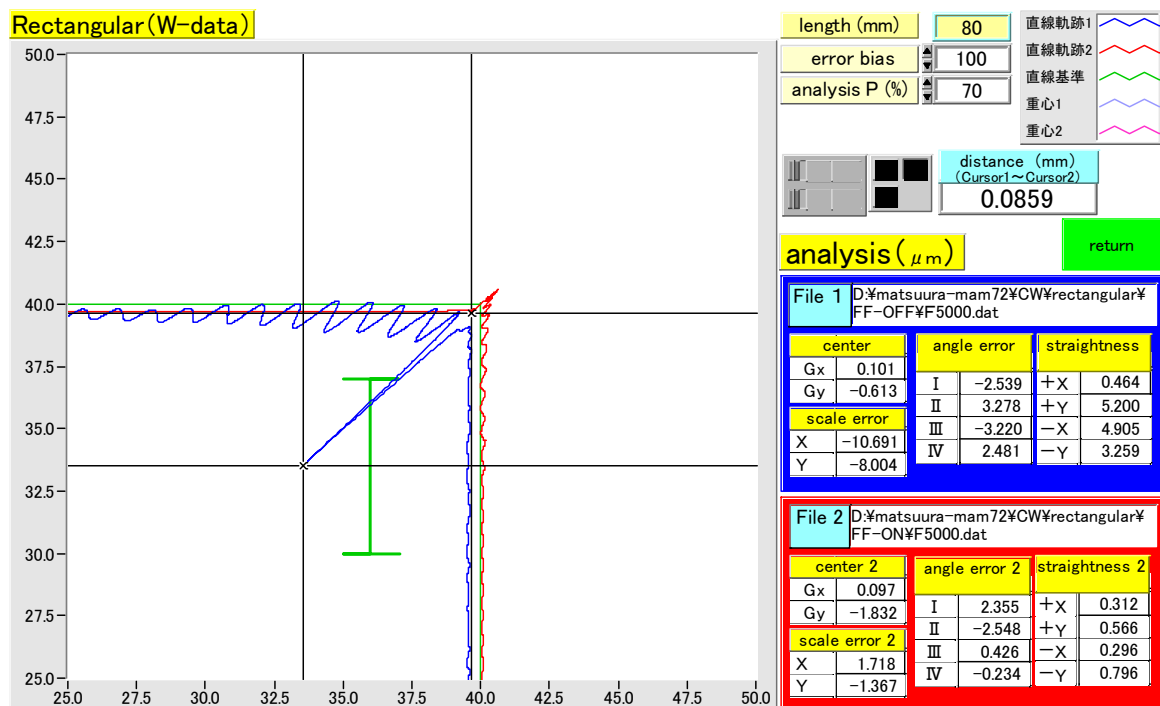


図 5－6 先読み加減速制御の効果（送り速度 5 m／min）

5. 1. 3 菱形運動動作経路

2次元測定平面において、対角 80mm の正方形を動作させる菱形運動動作経路は、各辺において、同時2軸動作となり、工作機械の制御系の要因による真直度や軸相互の直角度²⁾を測定できる。

図5-6に測定結果を表示し、結果から数値化した、単軸の真直度や軸相互の直角度について、出荷検査で行われた、切削試験による検査数値との比較を行うこととした。

測定結果から、単軸の真直度や軸相互の直角度を算出した結果と、切削試験片による間接測定の結果を、表5-4に示す。

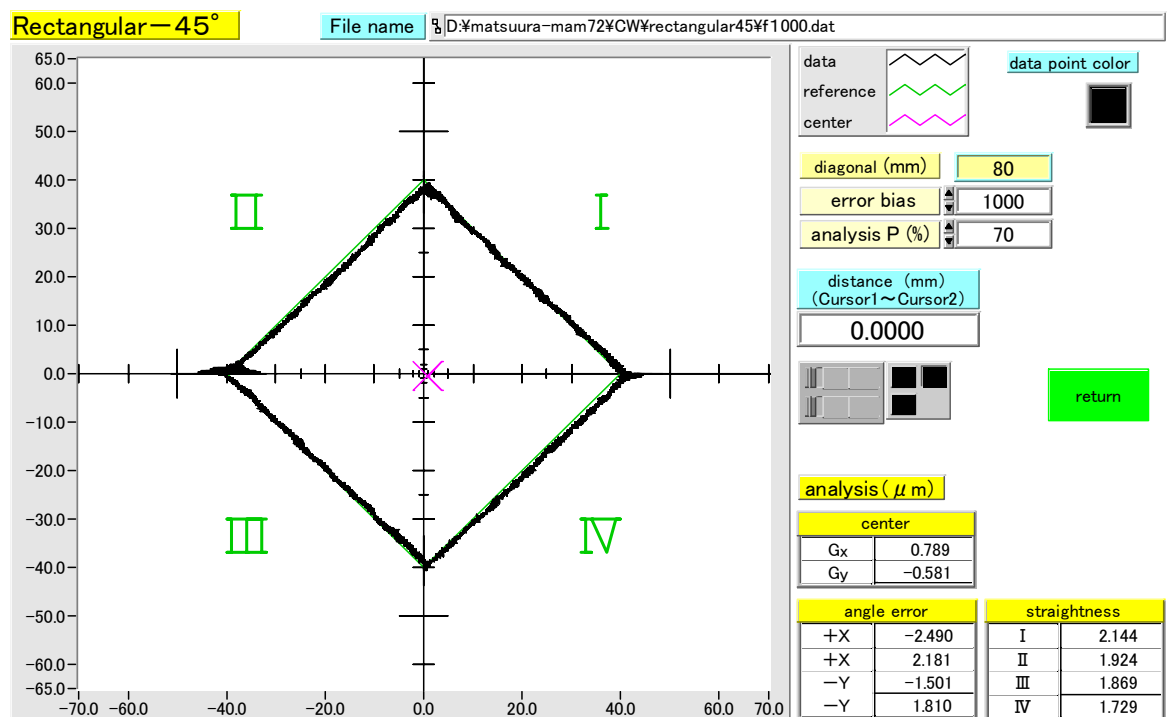


図5-6 菱形運動動作経路の測定結果

表5-2 測定結果における先読み加減速制御の効果

誤差要因 (μm)	切削試験片	測定システム
2軸真直度	2.0	1.9
2軸相互直角度	5.0	2.1

5. 2 ダイアゴナル運動動作経路

本研究では、同時5軸動作時の動的精度の比較として、同時3軸動作時の動的精度計測を行った。

この計測では、ISO 230-6⁵⁻⁹⁾で定義される立体ダイアゴナルと同様の直角柱状の空間を計測空間とし、空間の対角を結ぶ軌跡の動作精度を計測する。

評価には、経路の真直度及び角度偏差を用いた。

真直度の算出において、真直度の定義中にある代表線は、計測値を最小二乗法により近似して求めた。

角度偏差は、真直度を求める際に算出する近似曲線のスロープ（傾き）を設定角度と比較し、その差を評価値とした。

計測空間は、XYが30mmで、Zが2次元測定平面に対して20°の角度を持つ範囲とした。

工作機械の送り速度は0.5m/minと0.2m/minで、各軸＋方向に向かう経路と一方向に向かう経路を設定⁵⁻¹⁰⁾した。

結果の表示例を図5-7に、計測結果を図5-8・表5-3に示す。

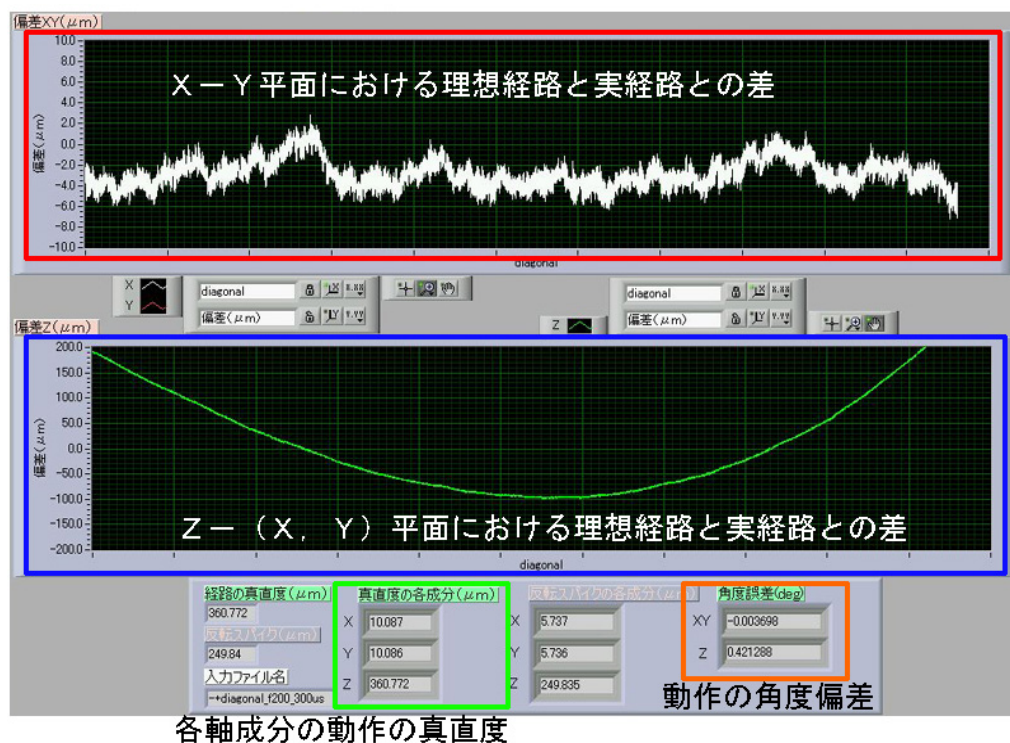


図5-7 計測結果の表示例

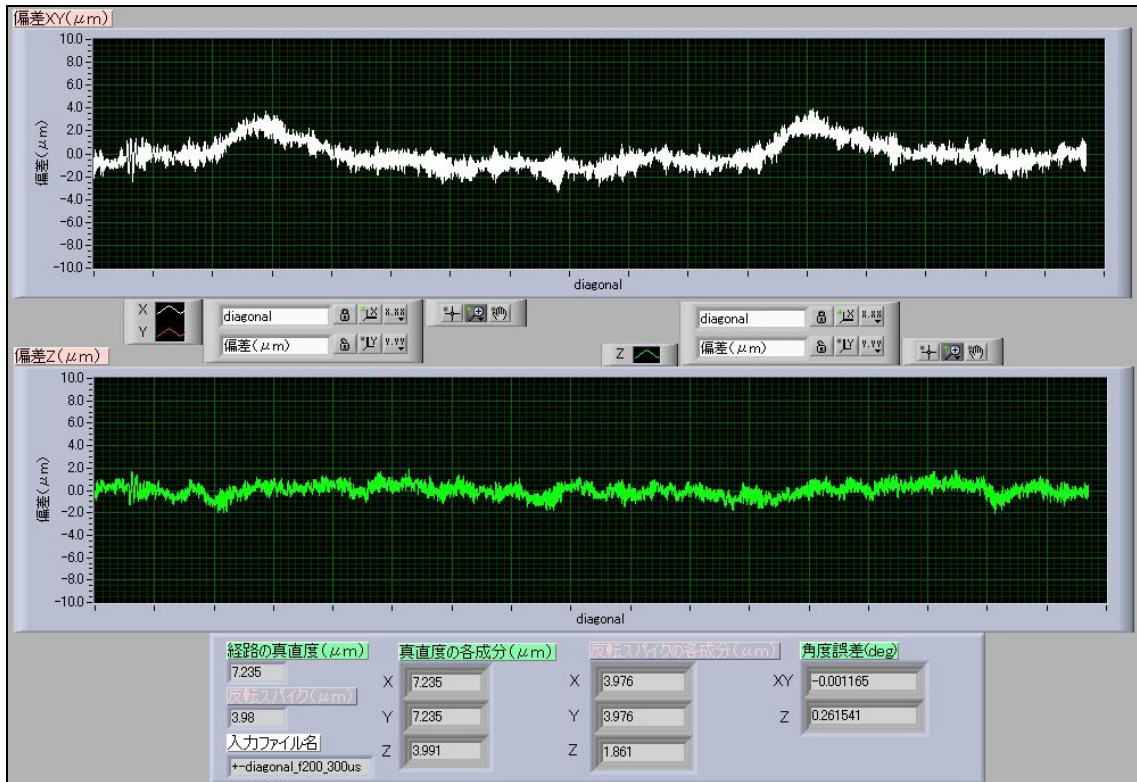


図 5 - 8 (a) 立体ダイヤゴナル (+to- 0.2 mm/min)

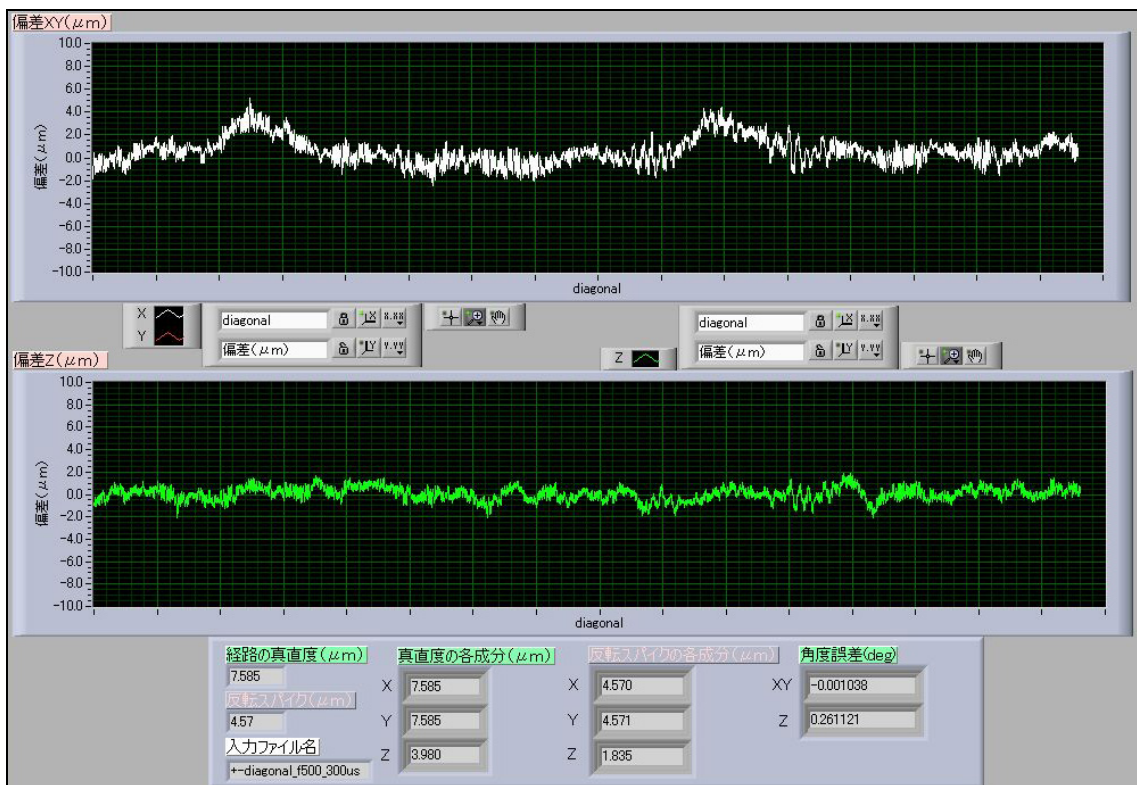


図 5 - 8 (b) 立体ダイヤゴナル (+to- 0.5 mm/min)

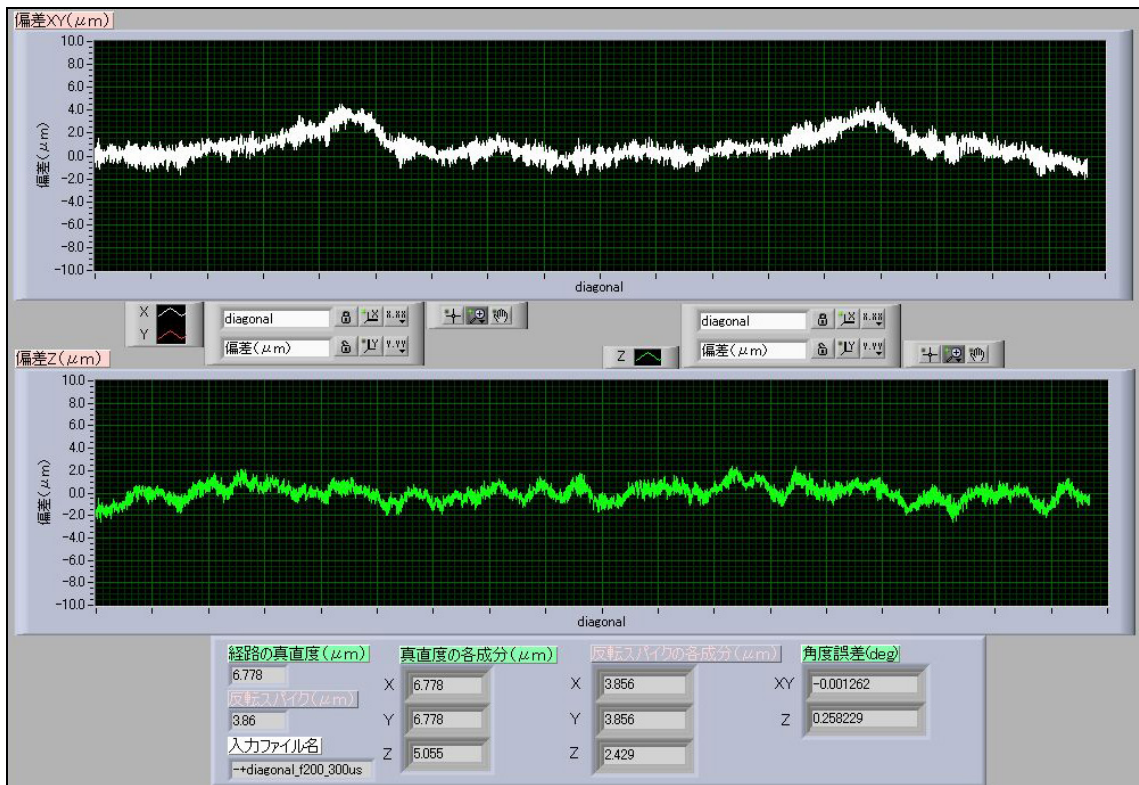


図 5 - 8 (c) 立体ダイヤゴナル (- to + 0.2 m / m i n)

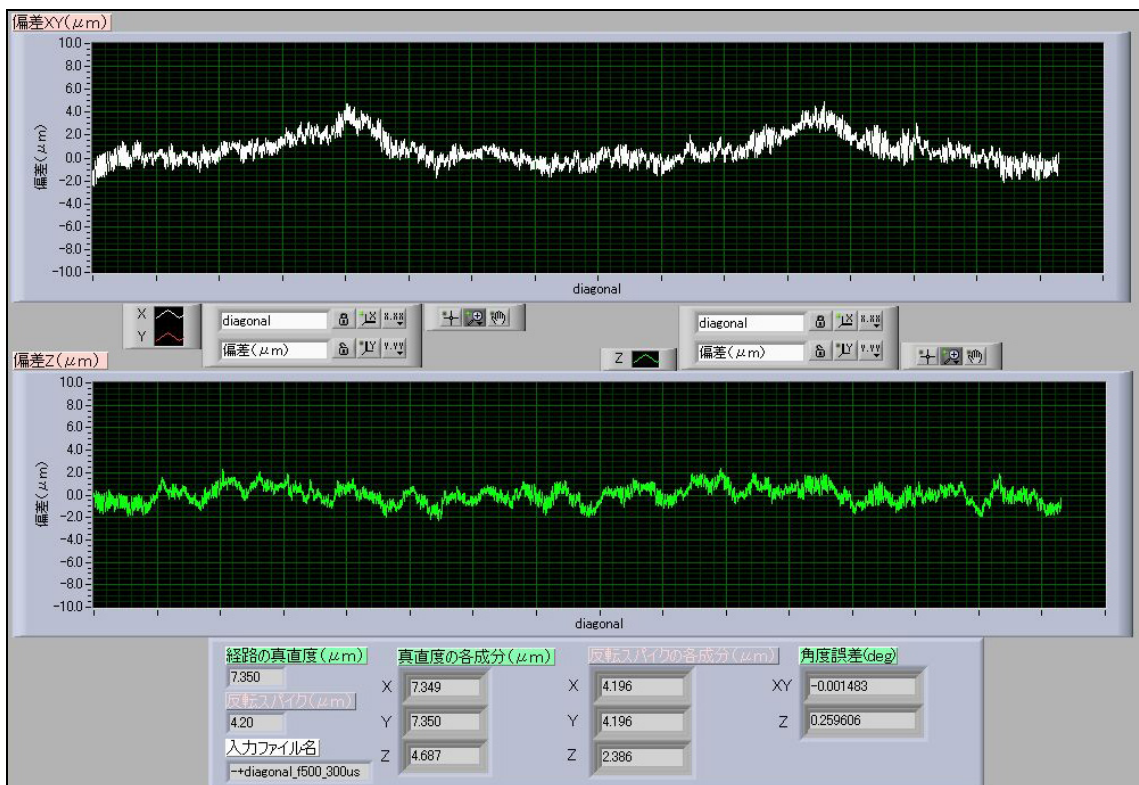


図 5 - 8 (d) 立体ダイヤゴナル (- to + 0.5 m / m i n)

表 5 - 3 立体ダイアゴナル経路試験結果

(μm)

		速度	X	Y	Z
真直度(μm)	-to+	F200	6.778	6.778	5.055
		F500	7.349	7.350	4.687
	+to-	F200	7.235	7.235	3.991
		F500	7.585	7.585	3.980
角度偏差($^{\circ}$)	-to+	F200	-0.00126		0.25822
		F500	-0.00148		0.25961
	+to-	F200	-0.00117		0.26154
		F500	-0.00104		0.26112

同時 3 軸制御時の立体ダイアゴナル動作経路に対し、静的精度と動的精度の比較を行った。

位置決め精度について、両方向位置の平均偏差は、X 軸 2.9 μm 、Y 軸 4.2 μm 、Z 軸 4.5 μm となった。

不確かさの推定量を含めた位置決め両方向精度は、X 軸 5.0 μm 、Y 軸 6.6 μm 、Z 軸 4.8 μm となった。

動作経路精度について、真直度は X 軸 6.8 μm 、Y 軸 6.8 μm 、Z 軸 5.0 μm となった。

角度偏差は X Y 平面で -0.001° 、Z 軸で 0.260° となった。

なお、動作方向や動作速度による違いはいずれも $\pm 1 \mu\text{m}$ 内に収まっており、条件による計測結果の違いは無かったと言える。

不確かさを含めた位置決め精度は動的精度に比べ、各軸とも $1 \mu\text{m}$ 以下であり、明確な差が出たとは言えない。

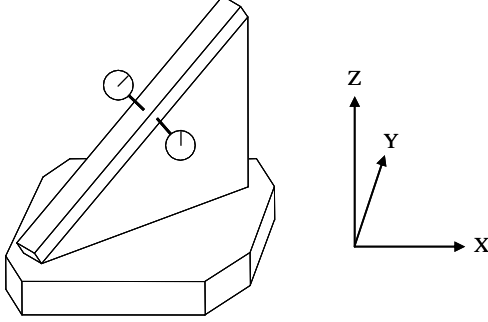
しかし、ここで用いた標準不確かさの推定量は、測定値の統計的処理における不確定量を含めた値となる。

そこで、実際の測定値として、両方向位置の平均偏差と動的精度を比較すると、各軸とも、2～3 μm の差が出ている。これにより、実際に動作をさせた際に、位置決め精度以上の誤差が現れることが分かる。

また、動的精度計測のみの結果では、X Y 平面 2 カ所に、約 4 μm の特徴的な誤差が現れているのが分かる。

なお、ここで説明した結果は、補間精度測定項目として、比較測定装置による手法を、JIS 規定に提案した。表 5 - 4 に素案⁵⁻¹¹⁾を示す。

表 5 - 4 J I S 規定素案（同時 3 軸制御による直線補間運動精度）

<p>検査事項及び条件</p>	<p>K7</p>
<p>X, Y, Z 軸の同時 3 軸制御による直進運動軸の直線補間によって描かれる経路の精度測定長さは, 100 mm 以上 300 mm 以下とする。</p>	
<p>測定方法図</p> 	
<p>許容値 受渡当事者間の協定による。</p> <p>補間経路の真直度 100mm について..... mm</p>	
<p>測定値</p> <p>測定長さmm</p> <p>直線補間経路に直角な方向の真直度 mm, mm</p> <p>Y Z 平面における真直度..... mm,</p> <p>Z X 平面における真直度..... mm,</p>	
<p>測定器</p> <p>直定規及び変位計, 又はレーザ干渉測長器</p>	
<p>測定方法及び JIS B6191 の参照箇条</p> <p>直定規は, 直線補間経路に平行に定置する。</p> <p>変位計は, 主軸が固定できる場合には, 主軸に取り付け, 主軸が固定できない場合には, 主軸頭に取り付ける。変位計の測定子は, 直定規の二つの使用面に垂直に当てる。</p> <p>送り速度は, 250 mm/min とし, 直線補間経路に沿って運動させて測定^(a)し, 測定長さを超えたところで運動の向きを変えて再び測定する。</p> <p>補間開始点を測定原点とし, 補間経路に対して一定の間隔^(b)で, 変位計の読みを記録する。それぞれの向きにおける読みの最大差を測定値とする。</p> <hr/> <p>注 (a)できれば, 補間経路について連続的に測定値を記録することが望ましい。</p> <p>注 (b)測定は, 測定経路に沿って, 少なくとも 5 箇所の位置で行う。</p>	

5. 3 同時 5 軸動作経路

本研究では，出荷時に切削加工による精度検査で，一般的に広く用いられている，円，四角及び菱形形状を参考にした．

すなわち，2次元測定平面上では円，四角及び菱形を動作する形状に，常に一定角度の傾斜を与え，工具軸方向には変位しない経路を設定した．

ここでは，同時5軸制御と同時2軸制御の比較を，各動作経路において行う．

測定結果の表示は，2次元測定平面については同時2軸動作経路で使
用した表示と同一であり，新たに，工具軸方向の位置偏差を表示している．

5. 3. 1 円錐台運動動作経路

図5－9では，円錐台運動動作経路の測定結果⁵⁻²⁾について表示する．

まず(a)は工具傾斜角 0° つまり，同時2軸動作経路での結果を表示している．次に(b)は，工具傾斜角 5° の円錐台動作経路での結果を表示している．さらに(c)では，工具傾斜角 5° の円錐台動作経路について，先読み加減速制御を行わない場合の結果を表示している．

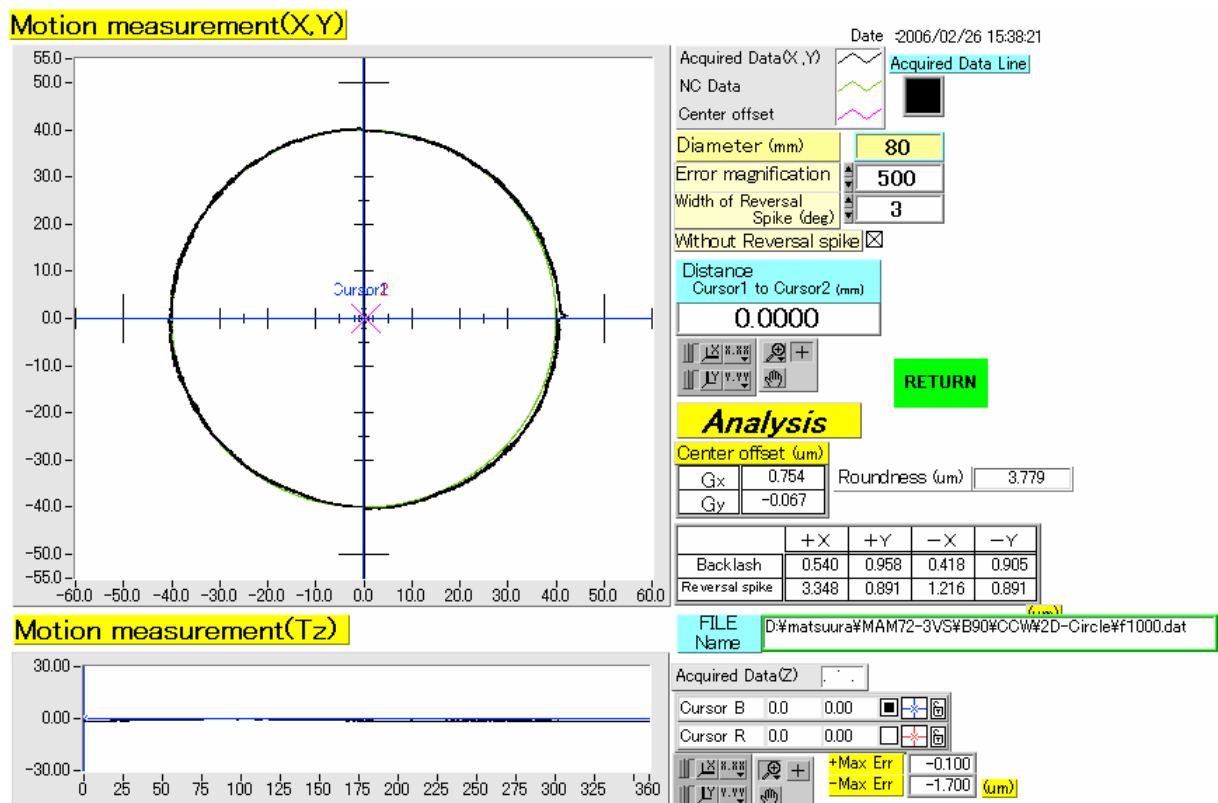


図5－9 (a) 円錐台運動動作経路 (工具傾斜角 0°)

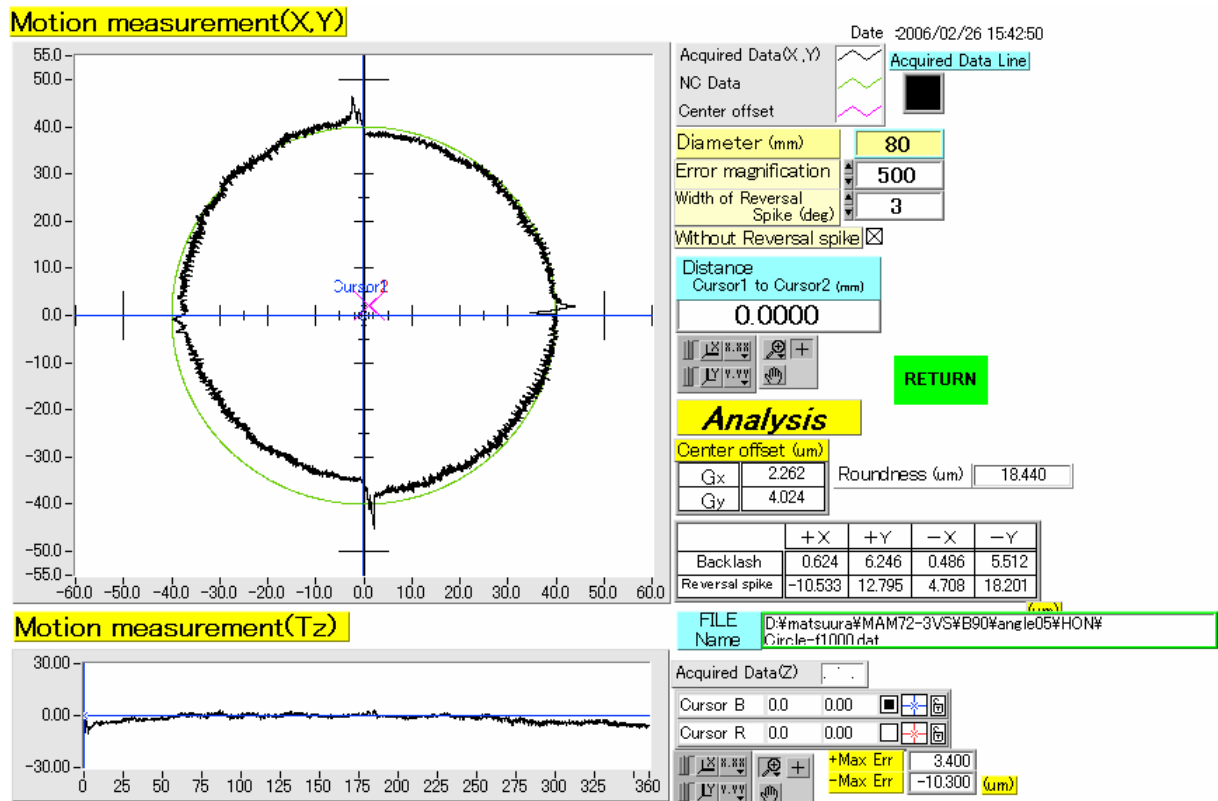


図 5 - 9 (b) 円錐台運動動作経路 (工具傾斜角 5°)

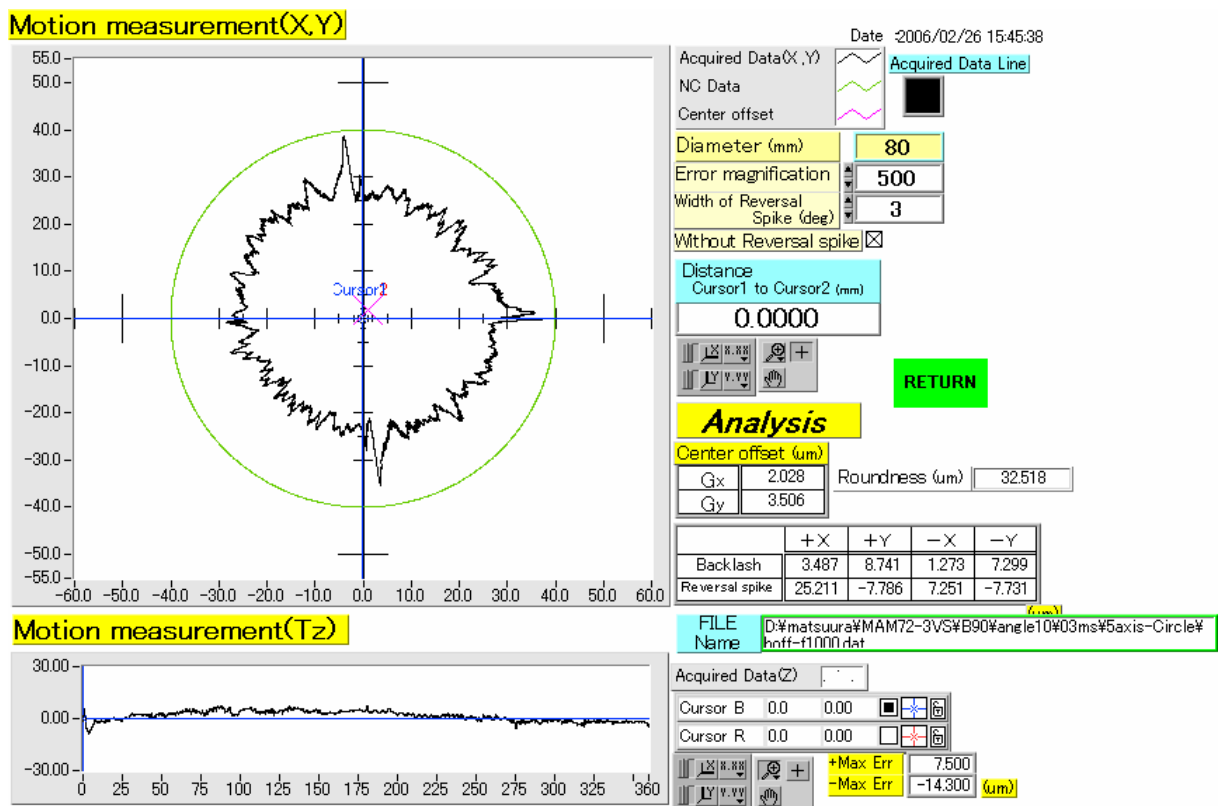


図 5 - 9 (c) 円錐台運動動作経路 (工具傾斜角 5° 先読み O F F)

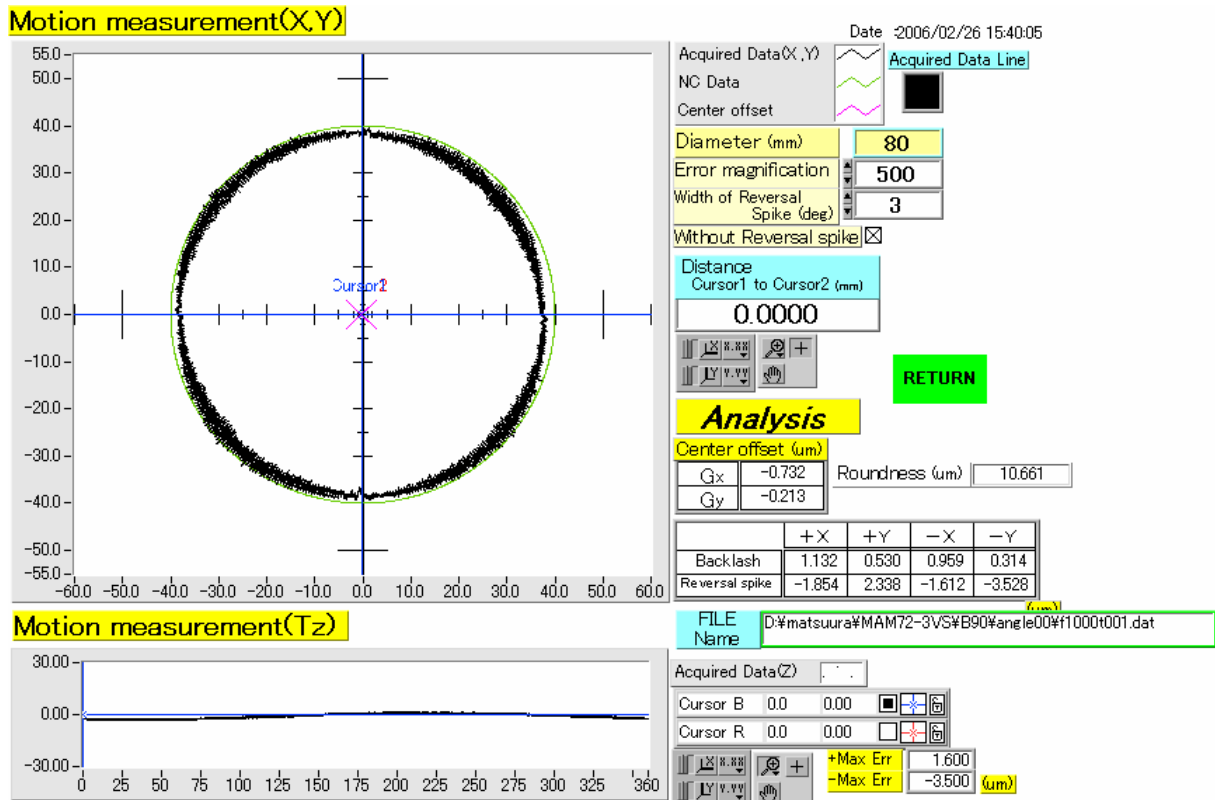


図 5 - 9 (d) 円錐台運動動作経路 (工具傾斜角 0 ° 単線分)

図 5 - 9 (d) に示す測定結果は、図 5 - 9 (a) について、ポストプロセス許容誤差 1 μm での単線分指令値を生成し、これを用いて機械動作を行った場合である。

テーブル旋回型 5 軸工作機械に、同時 5 軸制御動作させる場合、必ずこの処理が必要となるが、機械精度ではないので、次節にまとめる。

測定結果について真円度を基準に比較を行うと、円動作では 3.7 μm であった結果が、単線分動作を行わせるだけで、10.7 μm まで精度を劣化する。

指令値の違いにより明確な差異が測定できたことから、ポストプロセス処理に関して、最適値の探索や許容値設定に関する指針を、構築する必要があることが分かった。

同時 5 軸制御時では図 5 - 9 (b) に示すように、真円度は 18.4 μm となり、先読み加減速を用いない場合は、32.5 μm となる。

以上から、同時 5 軸円運動に関して、測定システムを用いた計測事例を示し、結果に関する考察を行った。

2次元測定平面での、動作経路評価を基本にしたことにより、軸数の異なる動作経路においても、同一の誤差要因での比較検討を可能にした。

このことから、開発した測定装置及び設定した動作経路は、一般的に広く用いられる、円運動試験法をベースに、定められた誤差要因で定量化した値により、機械の総合的な動作精度を運転状況毎に明確化できることが分かる。

5. 3. 2 角錐台運動動作経路

角錐台運動は同時5軸動作経路であるが、特にコーナ部について、急峻な工具傾斜の変化が必要であり、その際には、旋回・傾斜軸の応答性が求められる。一方、辺の部分では、直動軸を中心にした動作となる。

したがって行程において、直動軸と旋回・傾斜軸が、一定した動作となっていない。

図5-10に工具傾斜外側+10°で、送り速度1m/minでの測定結果²⁾を示す。

各辺の真直度は1μm程度であり、同時2軸制御時と比較しても、制御

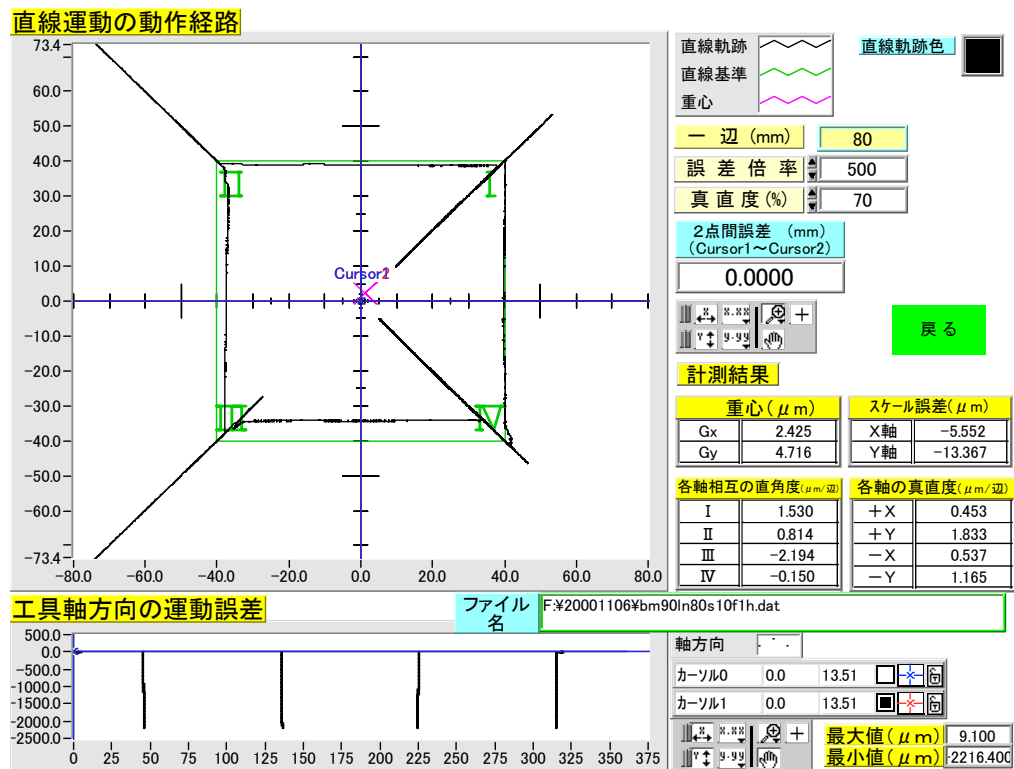


図5-10 角錐台運動動作経路（工具傾斜角10°）

軸数の増加による精度劣化は認められなかった。

しかしながら，コーナ部の過渡特性については，精度劣化が2次元測定平面と工具軸方向変位に顕著に現れている。

これは，旋回・傾斜軸が主として動作している箇所である。

同時2軸制御では，コーナ部内回り量 $4.1 \mu\text{m}$ ・軸方向変位 $1.7 \mu\text{m}$ であるのに対し，角錐台動作では，コーナ部内回り量 $121.4 \mu\text{m}$ ・軸方向変位 $2218.4 \mu\text{m}$ である。

この差異は，旋回・傾斜軸の同期精度に関係するものと考えられる。

したがって次節に，指令値生成時に，リニアライゼーション処理を施し指令動作をより密に指令する命令を与え，その効果を確認する。

5. 3. 3 菱錐台運動動作経路

菱錐台動作は，測定原点を中心に，直動軸を基準に各辺を 45° 回転させた動作である。

この動作は，行程中は常に同時5軸制御となり，辺上で工具傾斜が徐変する。また，コーナ部では，旋回軸か傾斜軸が単独に正逆転し，それぞれのコーナ部で，反転差を測定することができる。

この動作経路では，同時5軸直線運動における誤差要因で，本研究では真直度について定量化した結果を用い，動作状態を検討する。

図5-11には，制御の違いによる測定結果⁵⁻²⁾を示す。

(a) は，工具傾斜 0° で単線分指令を行い，動作経路を測定・表示したものである。結果から，真直度を算出すると，直線動作では $1 \mu\text{m}$ であったが，単線分指令により $4 \mu\text{m}$ となった。

円運動での計測結果と同様に，単線分指令による，精度劣化が確認できた。したがって次項に，円運動と同様に説明を行う。

(b) は，傾斜 10° での測定結果である。真直度 $7 \mu\text{m}$ であり，軸数の増加による精度劣化が認められた。

(c) は，先読み加減速制御を行わない場合の結果を表示している。

特に，コーナ部での過渡現象について，内回り現象が確認でき，その量は，制御を行う場合は $40 \mu\text{m}$ であったものが，制御を行わない場合 $80 \mu\text{m}$ となった。

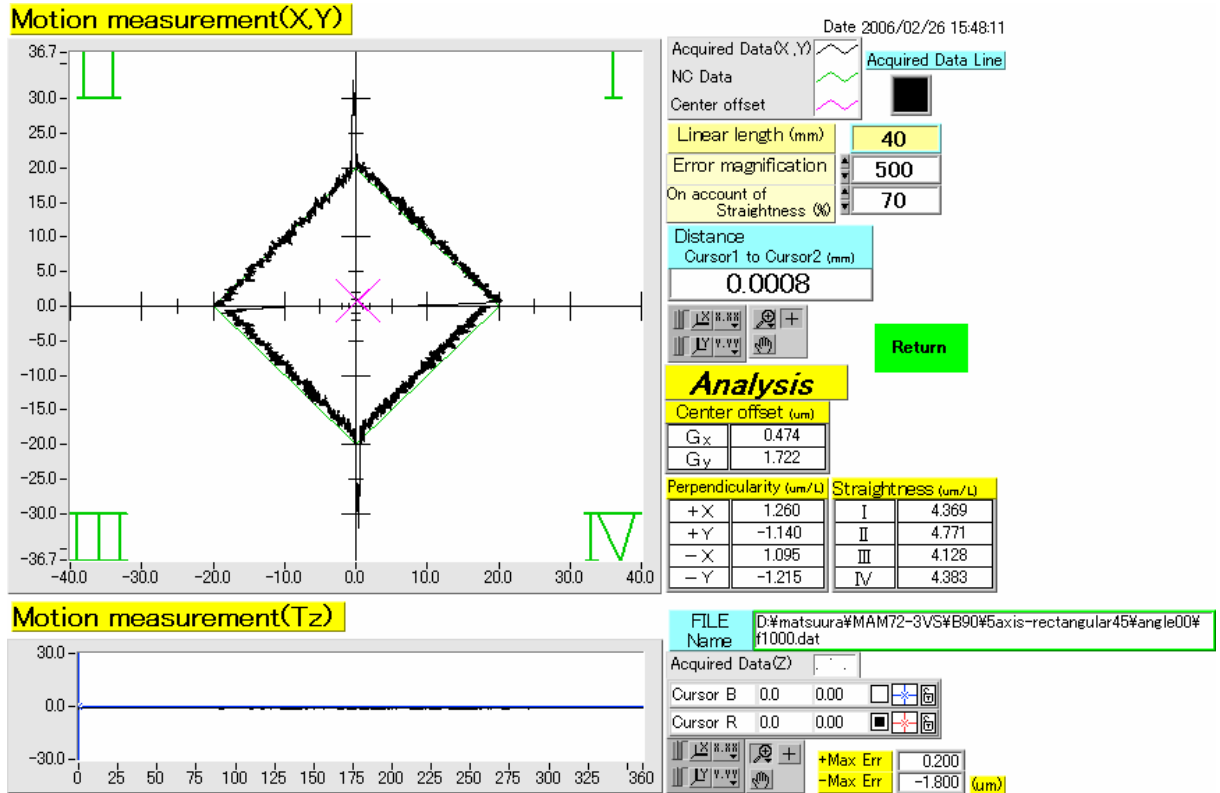


図 5 - 1 1 (a) 菱錐台運動動作経路 (工具傾斜角 0° 単線分)

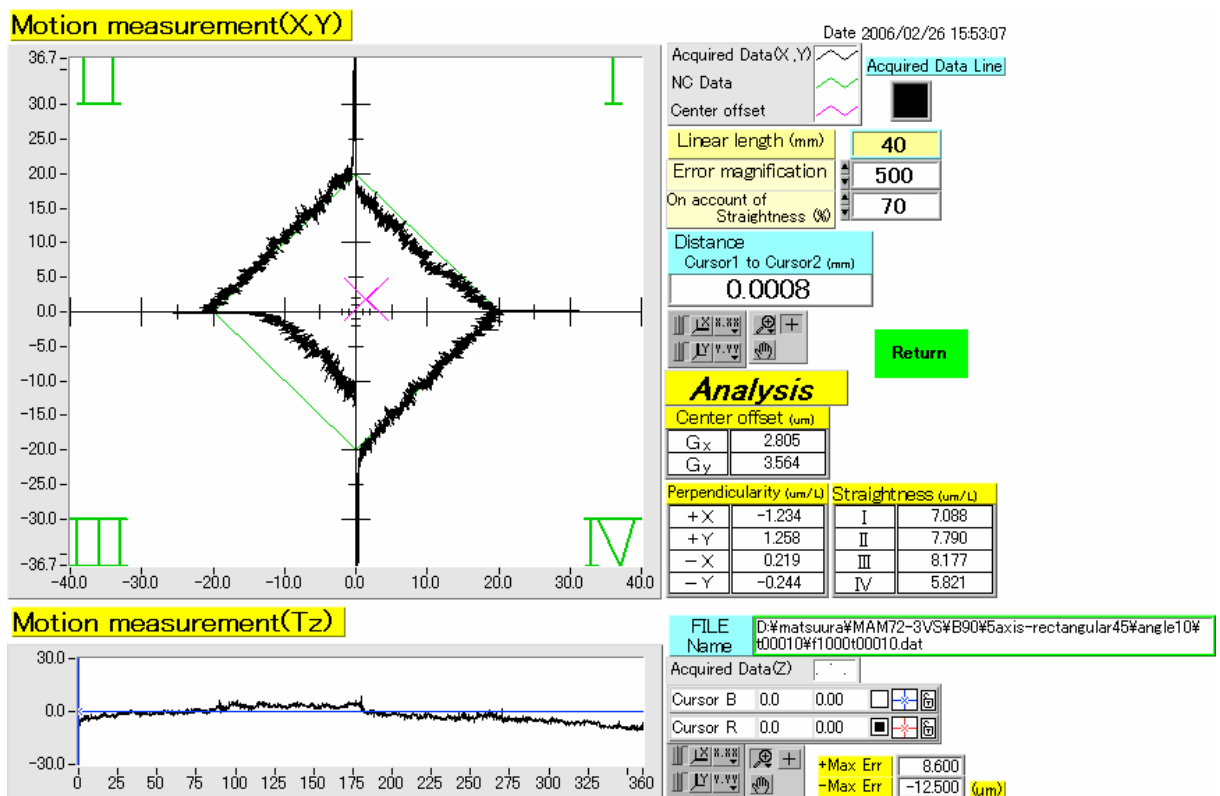


図 5 - 1 1 (b) 菱錐台運動動作経路 (工具傾斜角 10°)

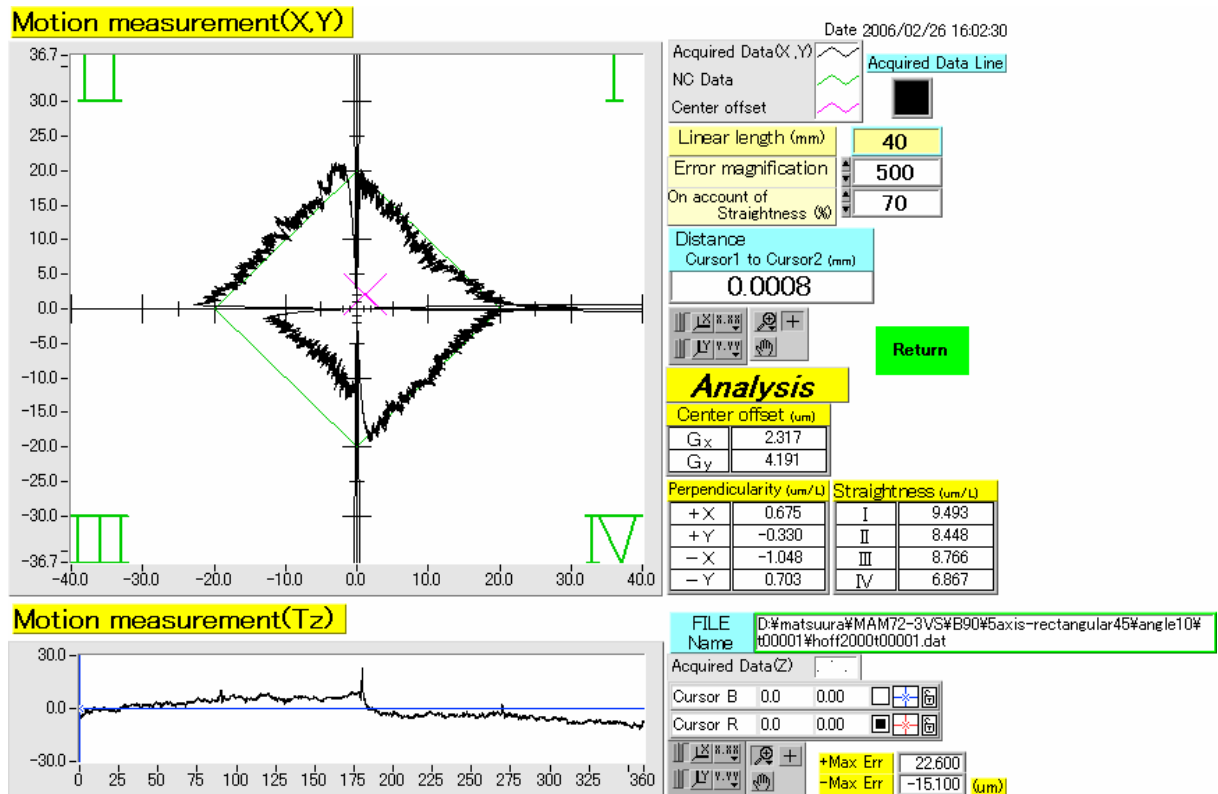


図 5 - 1 1 (c) 菱錐台運動動作経路 (先読み加減速 O F F)

5. 4 システム実用事例

本研究で試作した計測装置を用い，工作機械精度の調整を行った．

なお，精度調整は主に N C 装置の補正パラメータについて考察した．

ユーザーで変更可能な，バックラッシュ補正を始め，ユーザーでは変更できない，ゲイン調整等も含む．ここでは，バックラッシュ補正を説明する．

また，同時 5 軸制御での動作は，工具経路データから，ポストプロセス処理により，指令値を生成する．

その際，処理方法の違いにより，動作精度に影響を与える．

ここでは直接測定により，ポストプロセスにおける処理方法の違いを明らかにする．

5. 4. 1 測定結果を用いたパラメータ補正⁵⁻¹²⁾

機械使用者側が，補正できる N C 制御装置のパラメータはバックラッシュ補正のみである．その他のパラメータを再入力するには，専用の書き込み

装置や、メーカー側の書き込みロック解除等が必要であり、概して再調整はできない。

バックラッシュ補正の一例として、円運動試験の結果を示す。

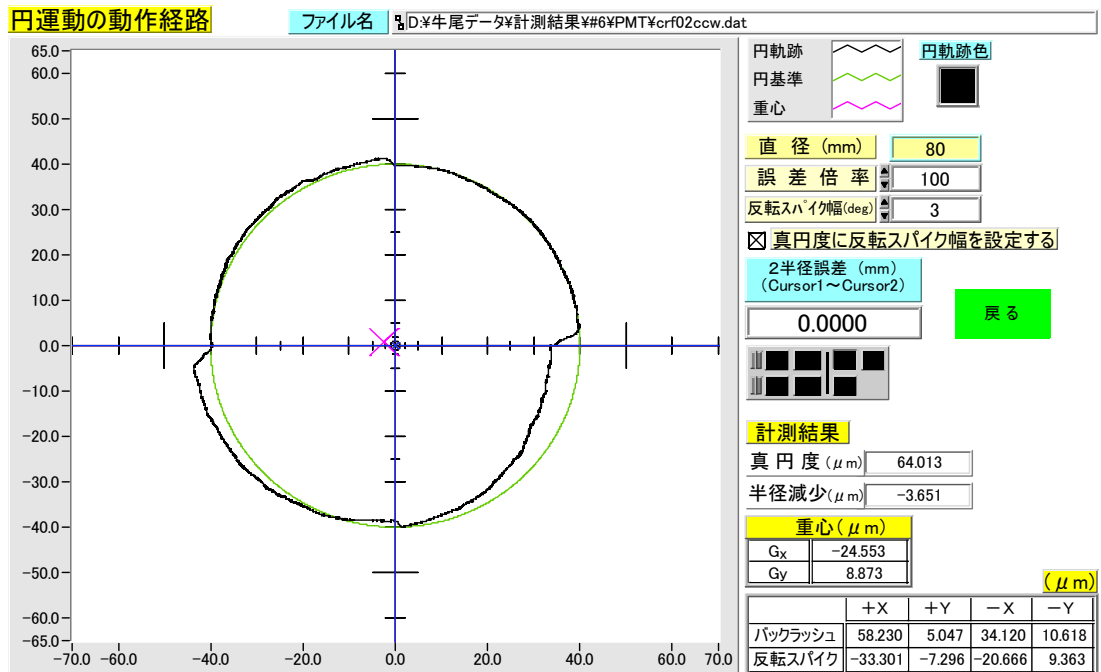


図 5 - 1 2 (a) 円運動試験の結果 (パラメータ調整前)

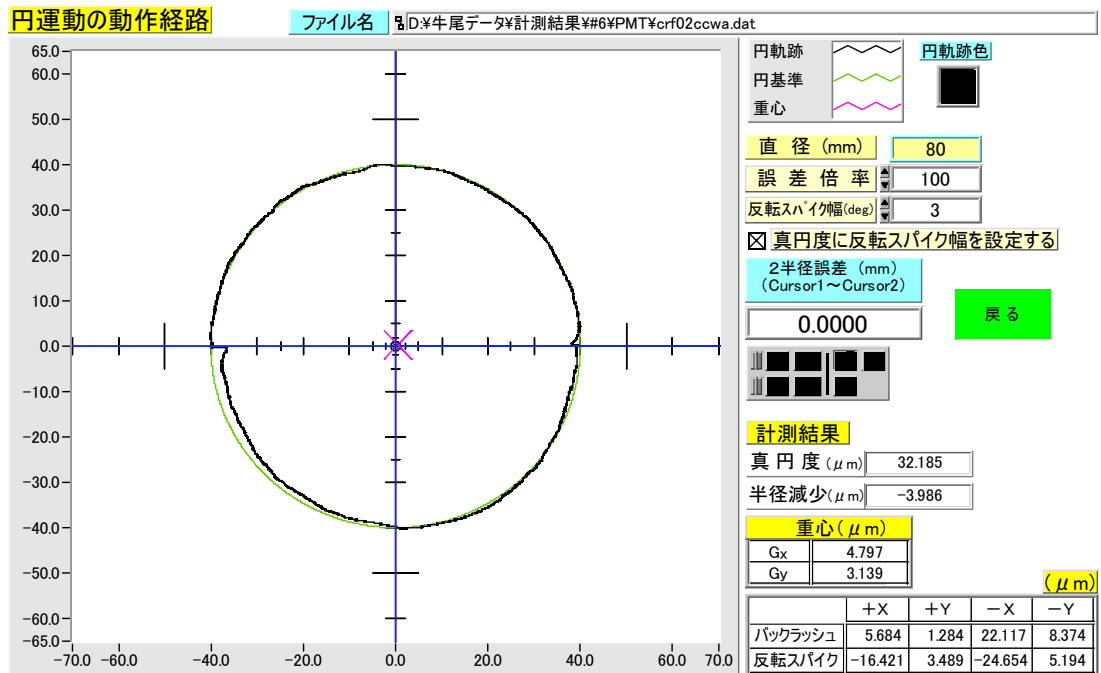


図 5 - 1 2 (b) 円運動試験の結果 (パラメータ調整後)

上記の測定対象機械は、実際の企業加工現場で、粗加工行程に20年程度用いたもので、その間ほとんど再調整は行っていない。

円運動試験での、バックラッシュ量は+Xで $58\mu\text{m}$ 及び+Yで $5\mu\text{m}$ であった。NC装置のパラメータ補正量は、Xで $6\mu\text{m}$ 及びYで $2\mu\text{m}$ の補正量が入力しており、増分を割り出し、Xを $52\mu\text{m}$ 及びYを $3\mu\text{m}$ で補正の再設定を行った。パラメータ再設定を行い、再び測定した結果、+Xで $5\mu\text{m}$ 及び+Yで $1\mu\text{m}$ であり、補正の効果が確認できる。

しかしながら、真円度での比較では、補正前が $54\mu\text{m}$ に対し、補正後は $32\mu\text{m}$ と、補正を完全には行えていない。

これは、バックラッシュ補正の限界と、他の誤差要因を示すものである。

具体的な解決方法としては、ボールネジ送り系のガタや、構造上の組み付け偏差について詳細に調べ、構造上の改善が望まれる。

このように、NC装置の設定変更による精度向上には限界があり、総合的な精度確認をし、原因の追及を行った上で、具体的な対策を講じる必要があると考える。

5. 4. 2 指令値生成におけるリニアライゼーション処理⁵⁻²⁾

この節では、機械精度以外の要因として、挙げられる指令値に関して、考察する。指令値に用いるNCデータは、工具経路から算術的に求められる。特に、旋回・傾斜軸を要する5軸工作機械で、同時4軸以上の運動を行う場合、ポストプロセス処理が必要となる。

この処理は、同時5軸制御であるため、通常の直交3軸制御に加え、旋回・傾斜軸を同期する、したがって、ワーク座標系の軸方向が絶えず変化し、機械座標系と一致しない。

そのため、指令値を作成する際に、まず工具位置座標と、その位置での工具姿勢ベクトルで表した工具経路を作成し、ポストプロセッサを用い、角度変換や座標変換等の数値処理を経て生成を行う。

設定した動作経路の理想軌跡は曲線であるが、変換後の指令値は、点列データであり、動作経路は直線近似となる。

そこで、変換の際にポストプロセッサ内で、図5-13に示すリニアライゼーション処理の、誤差最大幅を設定し変換を行う。

特に内回りを起こすコーナ部については、生成点列を密にした。

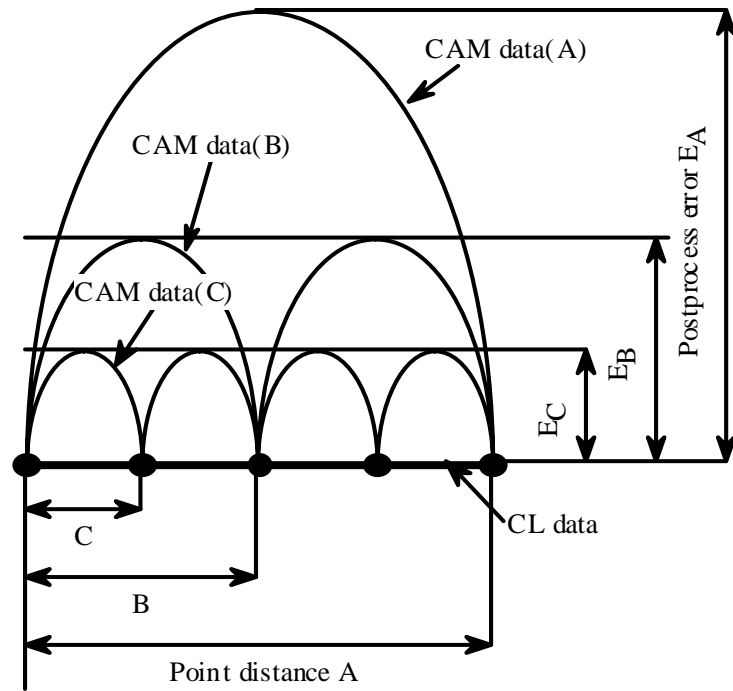
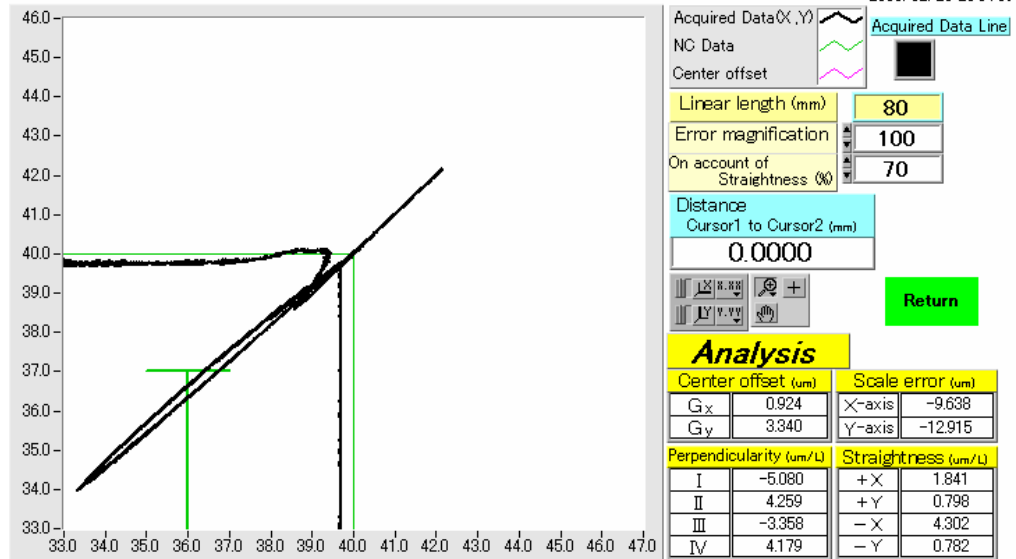


図 5 - 1 3 リニアライゼーション処理と生成点列の関係

Motion error(I corner part)



Motion measurement(Tz)

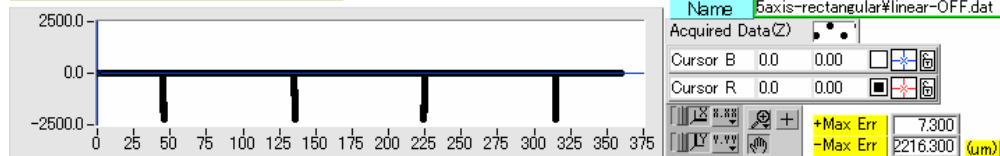


図 5 - 1 4 リニアライゼーション処理 (O F F)

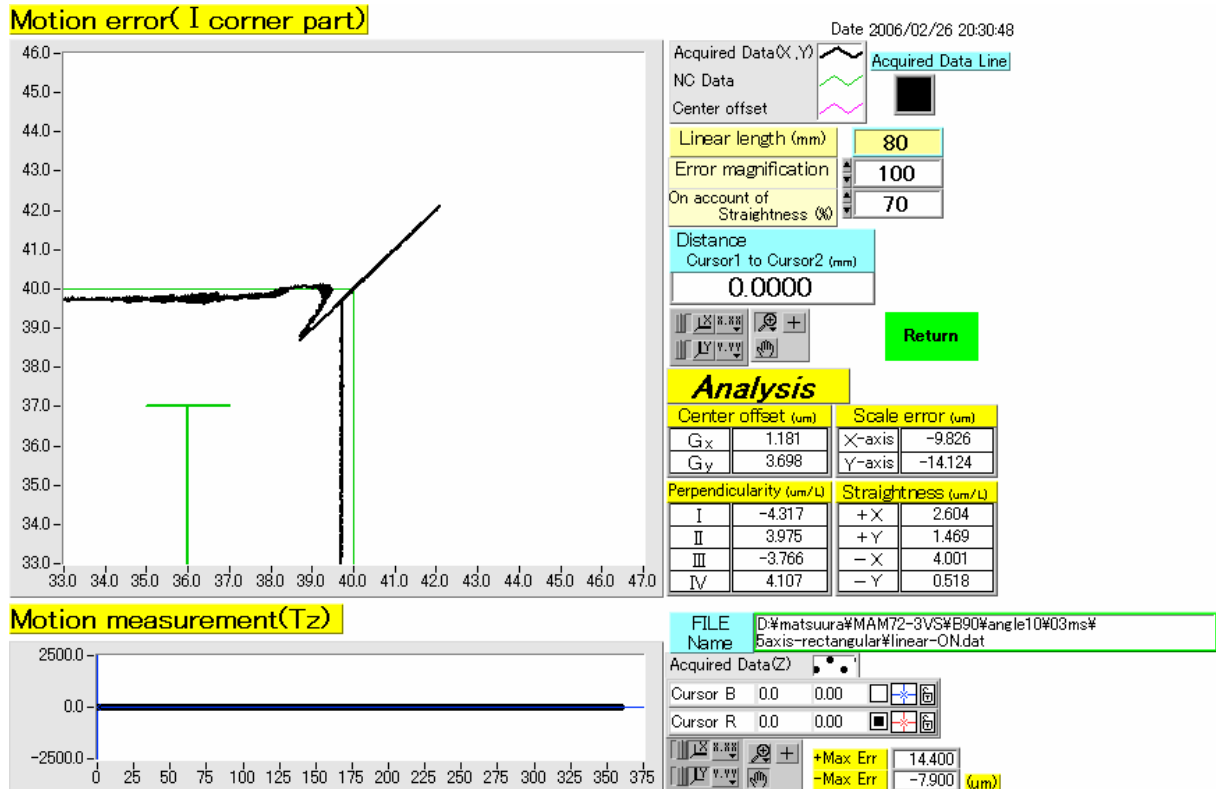


図 5 - 1 5 リニアライゼーション処理 (ON)

生成点列を密にすることにより，コーナ部の工具姿勢が急変する際に起こる，運動誤差を低減する効果をねらった．

図 5 - 1 4 には，処理無での測定結果を表示し，図 5 - 1 5 には，処理有の場合を表示する．特にコーナ部を拡大して表示すると，コーナ部の運動が内回りになっていることが分かる．

具体的に内回り量を 2 次元測定平面内で定量化すると，処理無で 1 2 2 . 1 μm，処理有で 4 9 . 4 μm であり，工具軸方向の誤差は，処理無で 2 2 1 6 . 7 μm，処理有で 1 4 . 4 μm であった．

5. 4. 3 指令値生成におけるポストプロセス誤差測定⁵⁻¹³⁾

5 軸工作機械に同時 5 軸動作を行わせる場合，工具経路座標値をそのまま指令値とすることができず，座標値と対象とする工作機械の軸構成及び軸間距離から，ポストプロセス処理を用いて，指令値を生成する必要がある．一般的にデカルト座標系から極座標系またはその逆を行う．

同時 5 軸制御では，通常の直交 3 軸制御の場合と違い，回転運動が存在するため，ワーク座標系の軸方向が絶えず変化し，機械座標系と一致しない．そのため，指令値を作成する際に，まず工具位置座標と，その位置での工具姿勢ベクトルで表した工具経路を作成し，ポストプロセッサを用いて工具経路を指令値へ変換した．

ポストプロセッサは，角度変換や座標変換等の内部処理を経て，指令値の生成を行うが，旋回・傾斜軸があるためにワーク座標系が絶えず変化をし，直線軌跡を動作させる際も円弧軌跡を指令する必要がある．

このように，計算誤差を含む指令値を設定するため，生成する際には，この許容値を設定する必要がある．

許容値は，生成する指令値の生成点列数に反比例する．

つまり図 5-16 に示すように，理想指令直線 ab の間に， c_n の指令点を生成する，この生成された点の間を実際の経路が結ぶが，旋回・傾斜

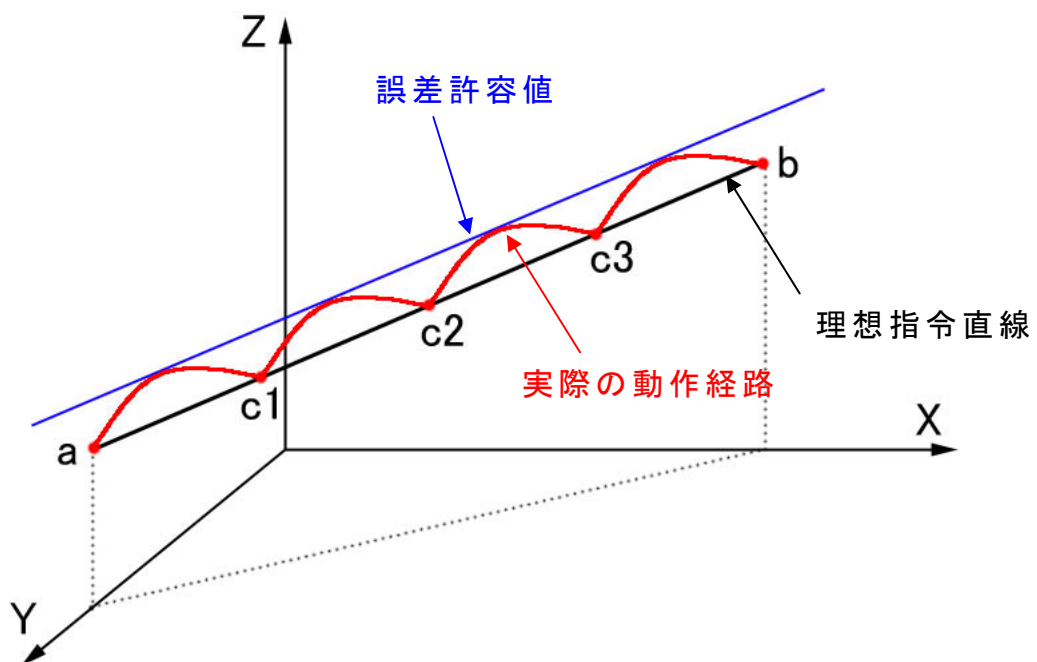


図 5-16 指令直線に対する誤差許容値

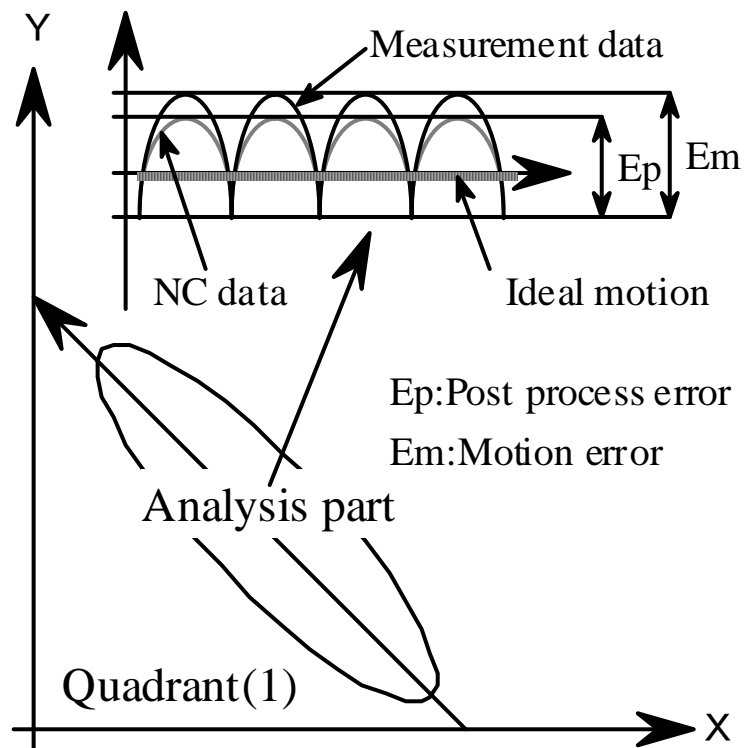


図 5 - 1 7 真直度によるポストプロセス誤差計測

軸の動作を含む動作を行うため、曲線誤差を含む。

したがって、この曲線誤差を低減させるためには、生成点列を密にして動作をさせる。

本節では、誤差最大幅を数種類設定して点列を生成し、計測経路に発生する誤差を計測する。

1) 菱形錐運動動作経路による検討

例えば図 5 - 1 7 に示すように、経路の真直度での比較を行う。ここでは第 I 象限での真直度に着目し、生成した指令値による動作経路を、測定システムで測定し、指令値生成の計算誤差との比較検討を行った。

図 5 - 1 8 に、菱形錐動作の測定結果について示す。

理論許容値の設定について、(a)が $1 \mu\text{m}$ 、(b)が $10 \mu\text{m}$ 、(c)が $100 \mu\text{m}$ さらに (d)が $1000 \mu\text{m}$ の結果である。

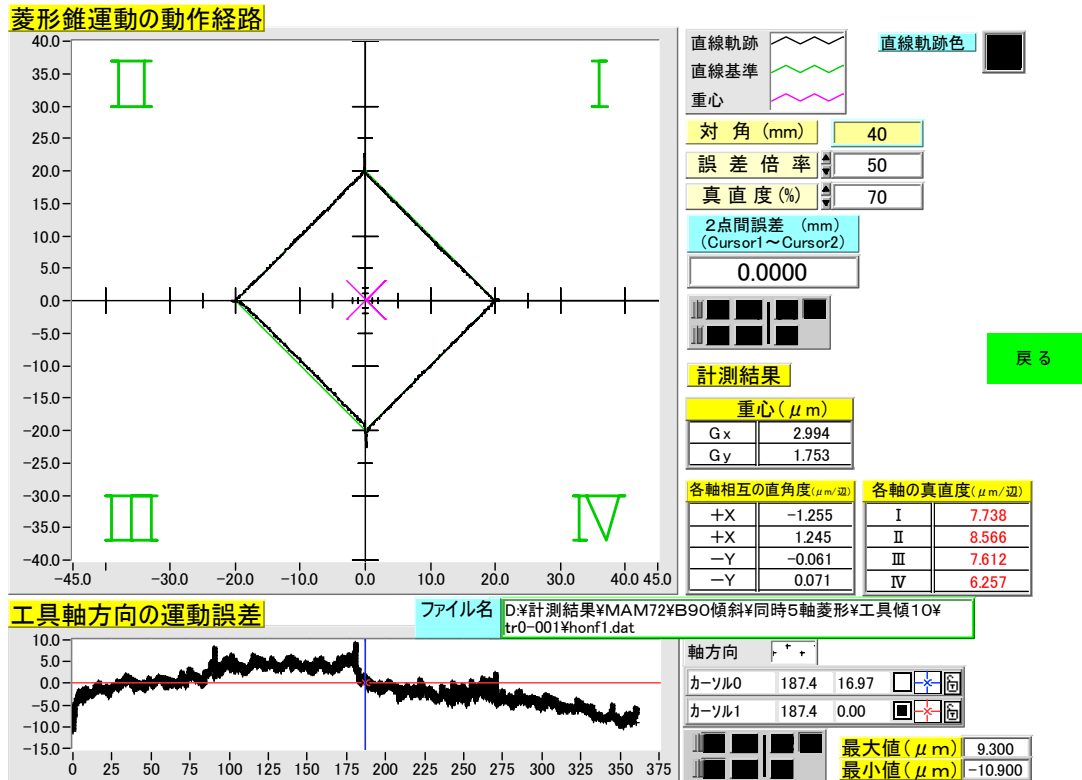


図 5 - 1 8 (a) 菱錐台動作経路 (許容誤差 $1 \mu\text{m}$)

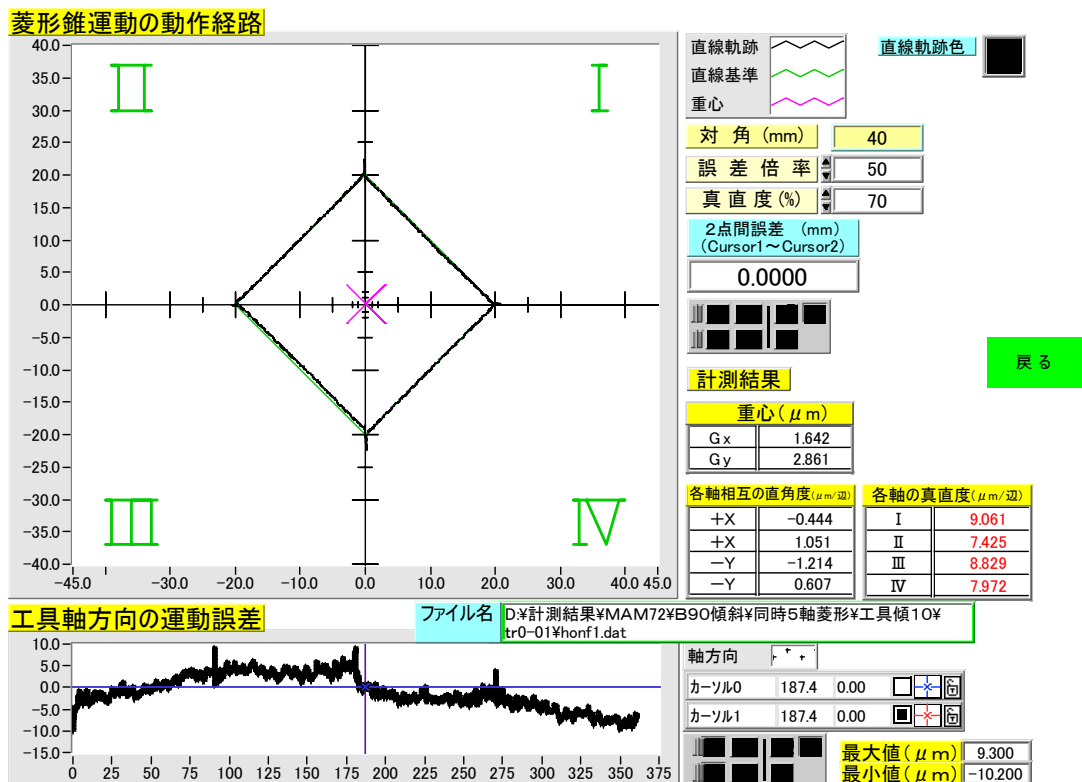


図 5 - 1 8 (b) 菱錐台動作経路 (許容誤差 $10 \mu\text{m}$)

菱形錐運動の動作経路

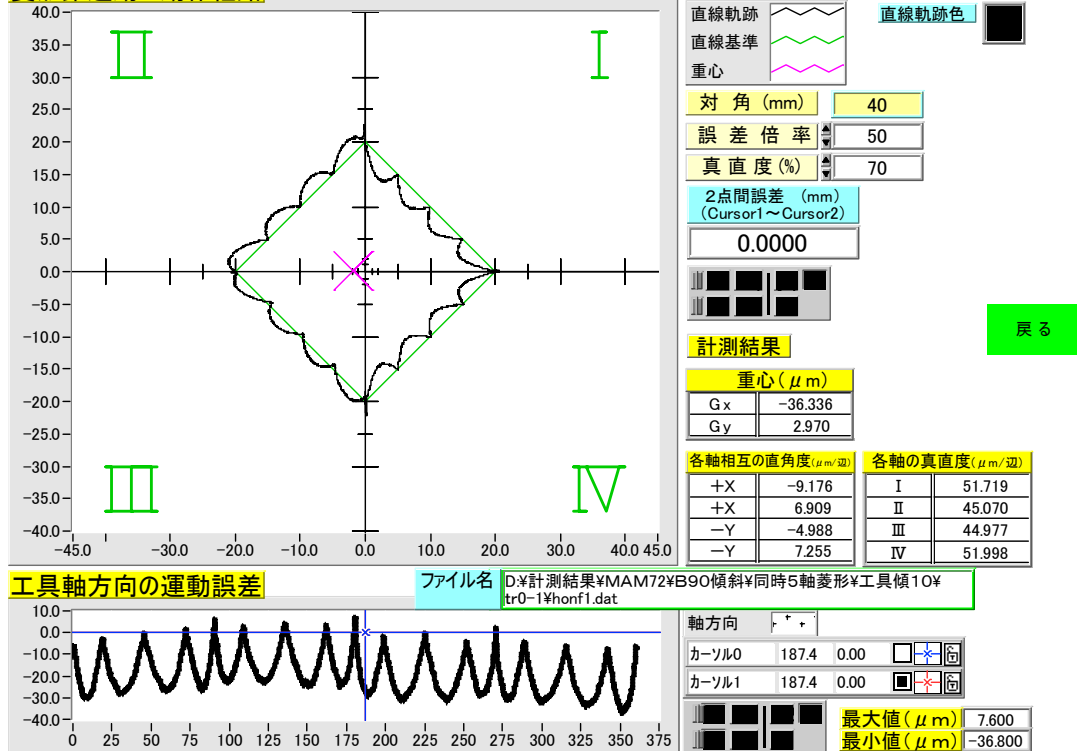


図 5 - 1 8 (c) 菱錐台動作経路 (許容誤差 1 0 0 μm)

菱形錐運動の動作経路

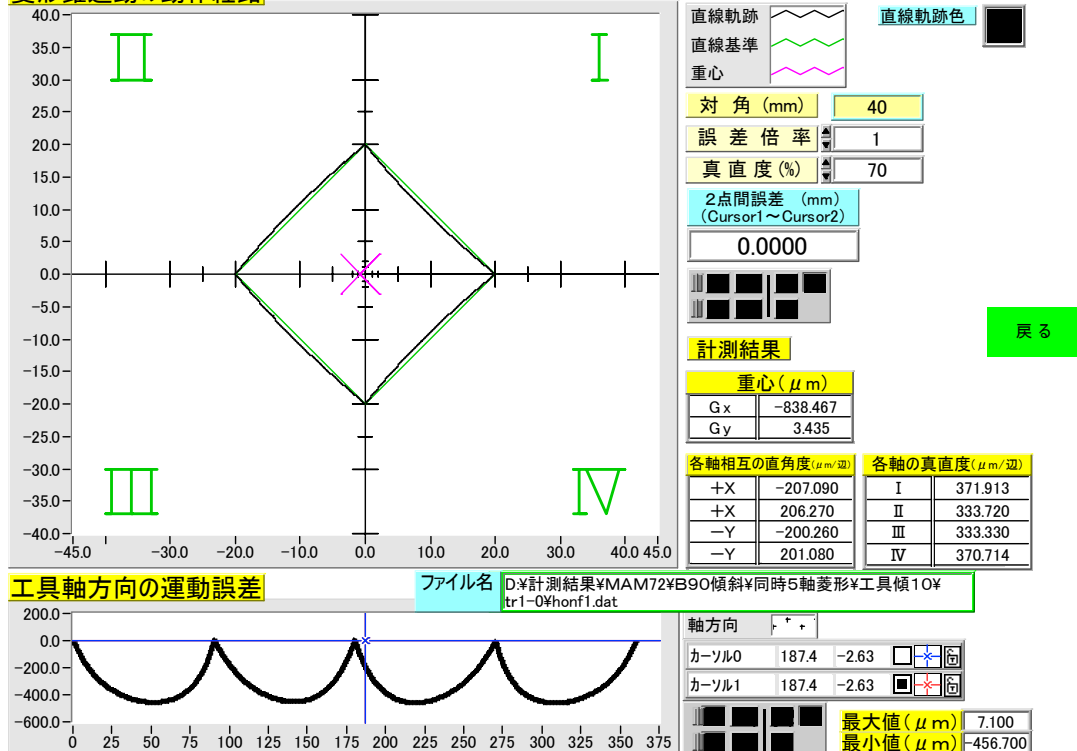


図 5 - 1 8 (d) 菱錐台動作経路 (許容誤差 1 0 0 0 μm)

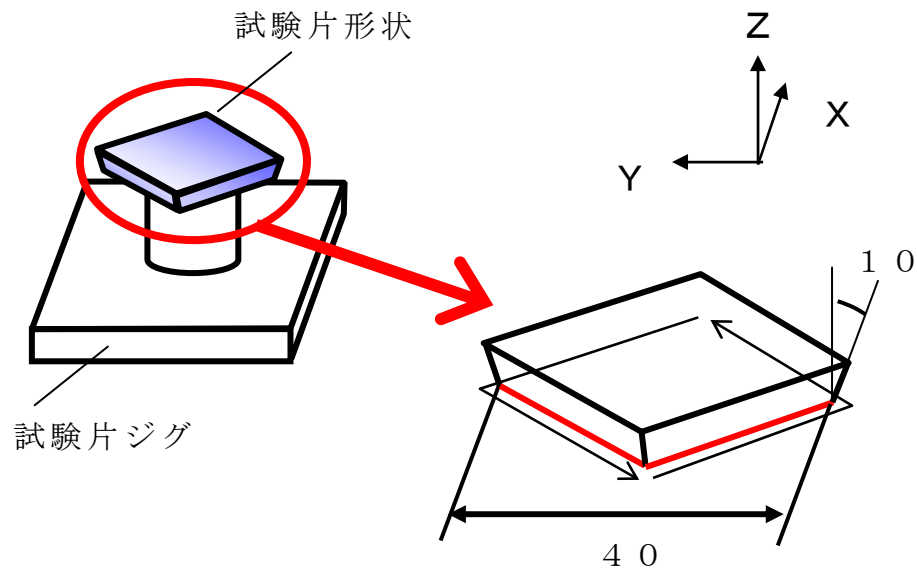


図 5 - 1 9 切削試験片形状

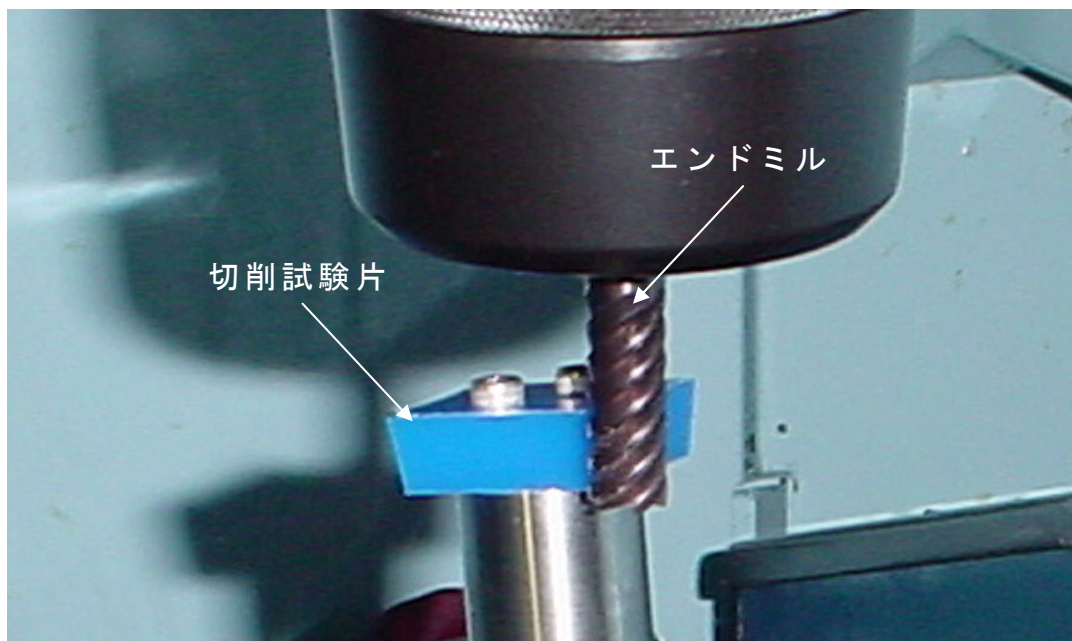


図 5 - 2 0 5 軸工作機械による切削試験

表 5 - 5 切削試験条件

使用工具	10φ 6枚刃フラットエンドミル
一刃あたりの送り量	0.01 (mm)
主軸回転数	1900 (rpm)
送り速度	114 (mm/min)

測定結果から，設定値が動作に大きく影響を与えていることが分かり，2次元測定平面に加え，工具軸方向にも軌跡の揺動が測定できた．

測定結果と試験片測定との比較を行い，許容値の最適設定について考察した．図5－19に示す試験片形状は，動作と同一とし，表5－5に示す切削条件とし，工具摩耗の影響を低減するために，材質をマシナブルワックスとした．図5－20には，切削試験の状態を示す．

図5－21には，解析による真直度と，切削試験片の輪郭測定結果との比較を示す．結果を比較すると，解析による真直度と，切削試験片の輪郭測定結果は顕著な差異は認められず，同時5軸状態の動作軌跡を精度良く計測が行えることが分かる．

また，理論許容値との比較を行った場合では， $10\text{ }\mu\text{m}$ 付近まで，双方とも一致していることが分かる．

また許容値設定を検討すると， $10\text{ }\mu\text{m}$ 付近を境に，機械精度が追従しておらず，指令点列を密に生成しても，加工精度の向上が見込めないことが分かる．

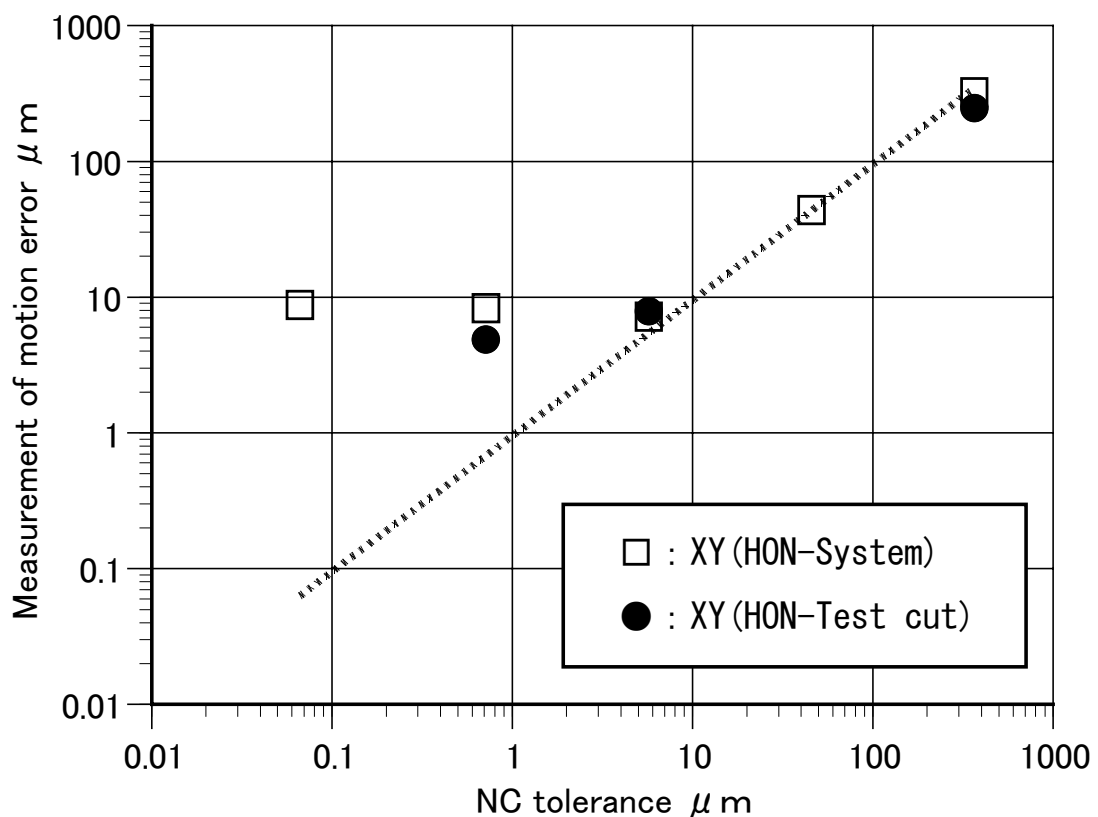


図5－21 理論許容値との比較（装置測定値，形状測定値）

2) 円錐運動動作経路

一方、円錐運動動作経路で同様な比較検討を行う。

円錐運動での比較は、測定で得られた動作経路に関して、真円度での比較を行う。図5-22には測定データを示す。

理論許容値の設定について、(a)が $1\text{ }\mu\text{m}$ 、(b)が $10\text{ }\mu\text{m}$ 、(c)が $500\text{ }\mu\text{m}$ の結果である。

測定結果の比較では、図5-23に示すように、理論許容値が大きくなるにしたがって、測定結果より算出する真円度は値が大きくなる傾向にあるが、相関性は見られない。

また工具軸方向については、理論許容値の変化に対し、測定結果ではその差異を見いだすことはできなかった。

このように、真円度から許容値の検討を加えるには、他の精度劣化要因が含まれ、傾向を示すことは可能であるが、真直度からの検討と比較すると、測定精度の面から課題を残すと考える。

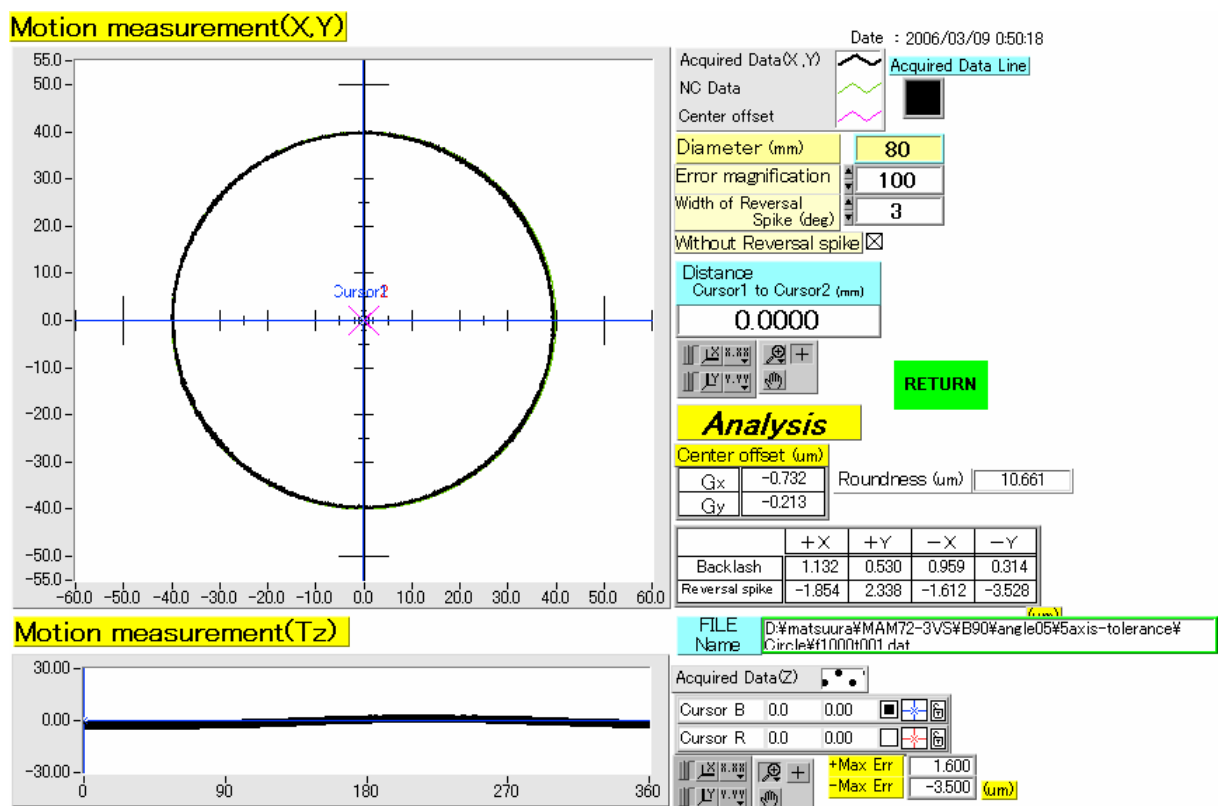


図5-22 (a) 円錐動作経路 (許容誤差 $1\text{ }\mu\text{m}$)

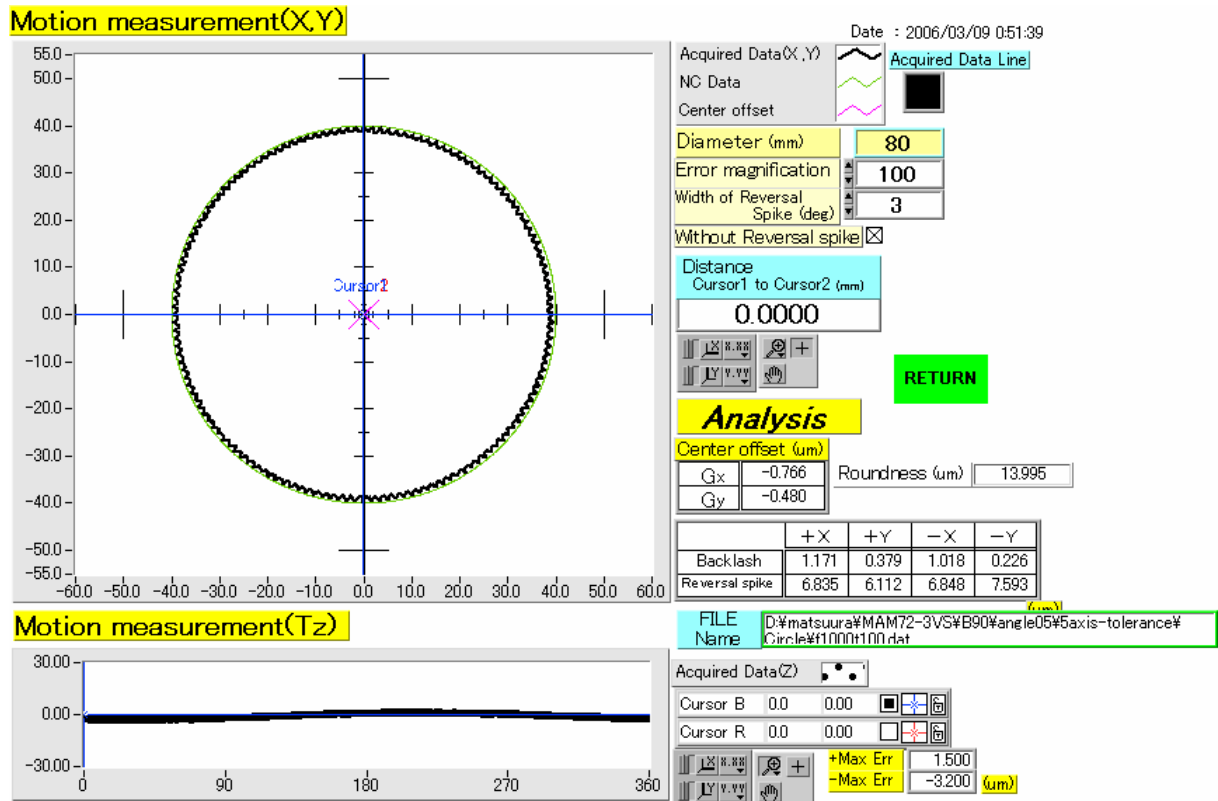


図 5 - 2 2 (b) 円錐動作経路 (許容誤差 1 0 0 μ m)

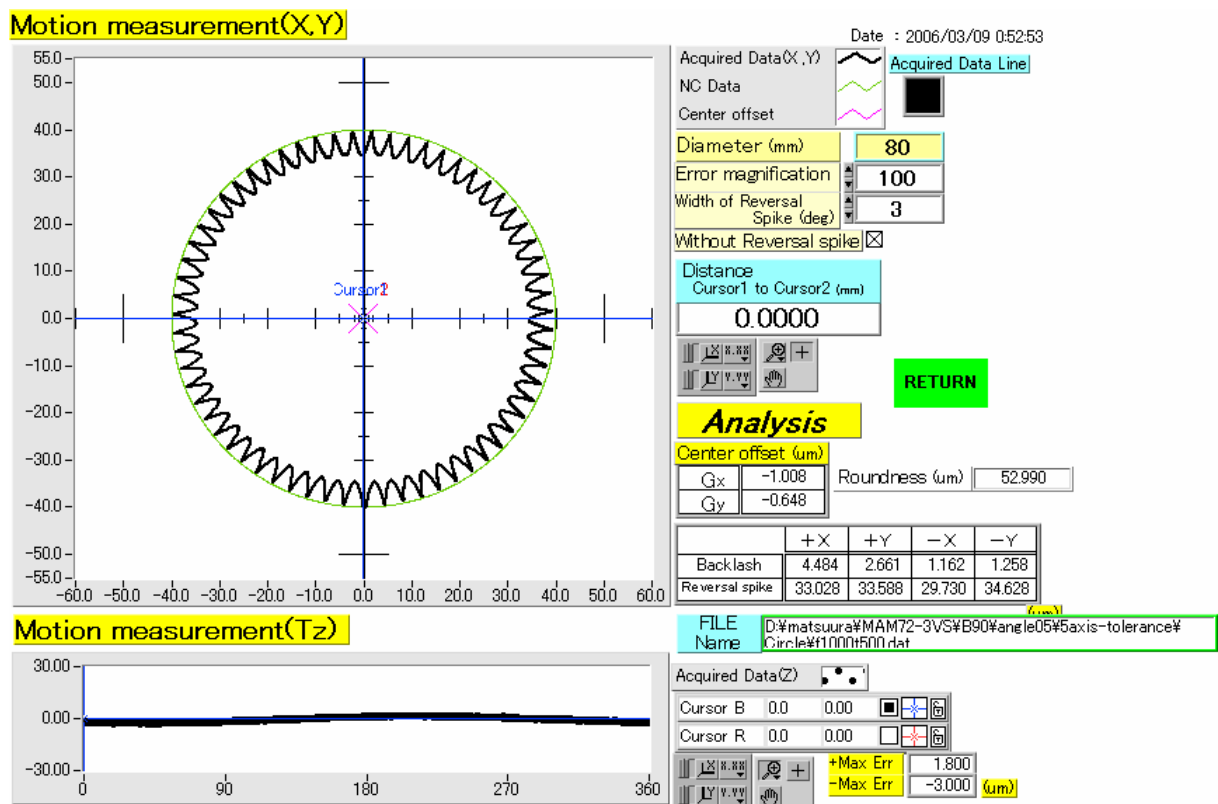


図 5 - 2 2 (c) 円錐動作経路 (許容誤差 5 0 0 μ m)

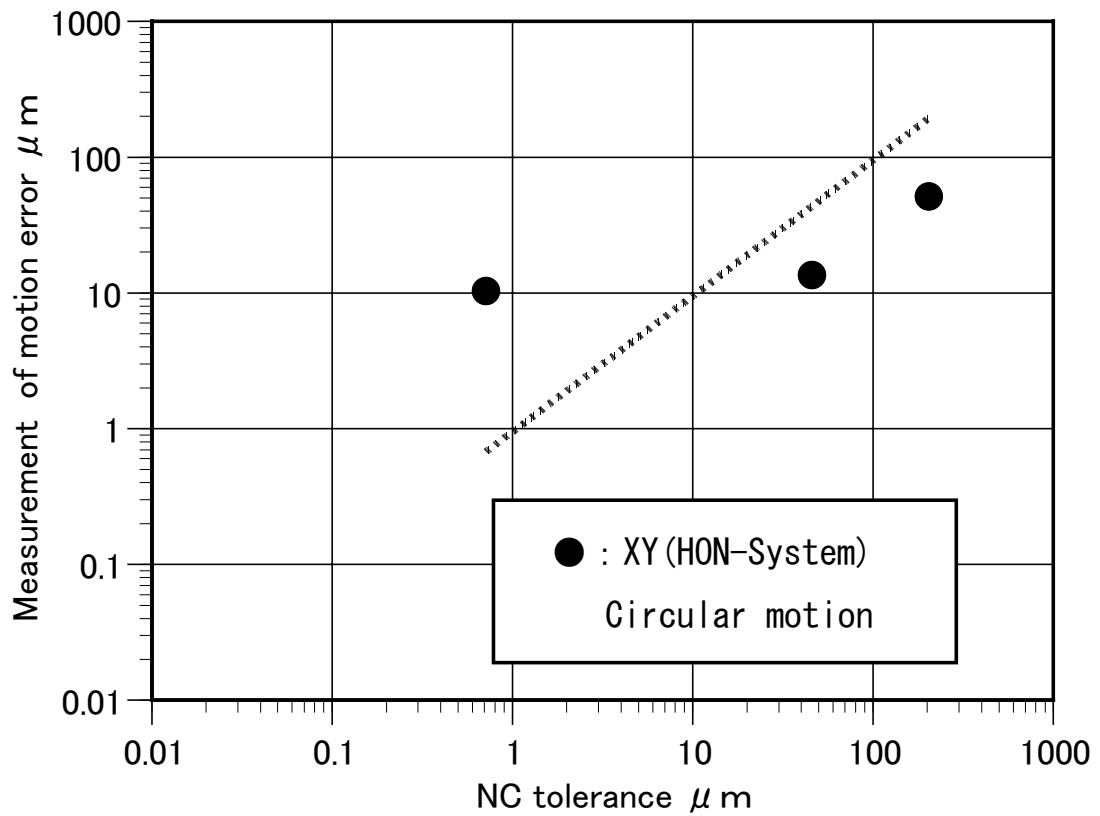


図 5 - 2 3 真円度から検討した許容値

表 5 - 6 許容値の比較 (μm)

設定許容値	理論許容値	直接測定	間接測定	円運動
0.1	0.07	9.00	5.52	—
1	0.69	8.56	5.02	10.66
10	5.58	7.42	8.13	—
100	44.69	45.07	46.83	13.99
500	199.14	—	—	52.99
1000	357.25	333.72	254.58	—

本節では，動作経路の違いによる，ポストプロセス処理の誤差計測を通

じて、指令値を生成する際に発生する計算誤差を、直接測定による結果から、直線動作では真直度を、円動作では真円度を評価する誤差要因とし、理論許容値とのを行った。

表 5－6 に示す比較結果によると、直接計測による許容値の算出では、直線動作によるものが、理論許容値とほぼ一致しており、切削試験片の間接測定による結果と比較しても、差異は認められなかった。

切削試験片での間接測定と一致したことから、菱錐運動経路による直接計測は、許容値設定に関して有効な手段だと考える。

また、理論誤差設定値 $10\ \mu\text{m}$ 付近では、工作機械の不感帯にあると考えられる。

したがって、本測定システムを用い、菱錐運動経路を測定することにより、設定すべきポストプロセス誤差許容値を推定でき、円錐運動経路を測定して得る推定値よりも、加工精度に反映できることが分かる。

5. 5 本章の総括と結論

本章では、実際の工作機械における測定事例により、その有効性を示した。示した事例を大別すると、同時2軸動作経路、ダイアゴナル運動動作経路、同時5軸動作経路の設定により、それぞれの動作経路の測定結果を表示でき、経路毎に誤差要因の設定を行った上で、その定量化までを行うことができた。

特に、測定表示と誤差要因の定量化について、同時2軸動作経路と同時5軸動作経路では、測定システムの結果表示を、2次元測定平面に統一したことで、総合的な機械精度を制御軸数を選ばず比較検討が行えることが分かる。

このことは、3軸工作機械に、旋回・傾斜軸が機構的に追加された構造には特に有効であると考ええる。

加えてダイアゴナル運動動作経路は、精度傾向を示す指標を示すことに有効であり、3軸及び5軸工作機械において、共通の測定方法であると言える。この測定により、工作機械の軸相互の精度傾向を明確化できると考え、さらに、5軸工作機械に適用する際には、旋回・傾斜軸の測定を考慮した動作経路を追加することにより、明確化されると思われる。

したがって本研究では、同時5軸制御までの運動経路を測定できたと、結論付けることができたと考ええる。

この装置・運動経路を用い、ユーザーで唯一変更可能な制御パラメータである、バックラッシュ誤差補正について、測定結果から補正を行い、パラメータ書き換えによる効果とその限界を明らかにした。

しかしながら、ユーザーでの精度補正には限界があるため、測定結果を有効活用し、メーカーと共に精度補正を行っていただきたいことを追記する。

さらに、同時5軸制御の指令値生成に必要なポストプロセス処理に着目し、処理上にある理論誤差許容値について考察を加えた。

その最適値の導出に関して、精度向上処理の一つであるリニアライゼーション処理について考察し、その効果を直接測定により明らかにした。

最後に、指令値の生成時に設定する許容値を、菱形錐運動動作経路の測定結果から、真直度による評価を実施し、設定値の適正化と機械の不感帯についての考察を行い、有効な設定手法を示した。

参考文献

- 5- 1) ASME B5.54-1992, Methods for Performance Evaluation of
Computer Numerically Controlled Machining Centers

- 5- 2) 牛尾雅樹, 蔵前法文, 神谷昌秀, 榎原弘之, 是澤宏之, 鈴木裕, ISO
230-4 を基礎とした 5 軸 N C 工作機械の動作経路計測, 精密工学会
誌, 72, 7 (2006)

- 5- 3) 品質保証部, 数値制御マシニングセンタ 精度検査成績書
(MAM72-3VS 990713672), (株)松浦機械製作所, (1999)

- 5- 4) ISO230-4 Test code for machine tools (1996)

- 5- 5) 坂本重彦, 稲崎一郎, 五軸マシニングセンタの組立精度評価法,
日本機械学会論文集 (C 編), 63, 605 (1997-1)

- 5- 6) ISO230-1 Test code for machine tools (1996)

- 5- 7) 丘華, 竹下義人, 高田正昭, リンク機構を用いる N C 工作機械の
運動精度測定法 (第 3 報 小径円運動とコーナ部を含む直線運動
の精度測定), 日本機械学会論文集 (C 編), 64, 628 (1998-12)

- 5- 8) 中尾陽一, 五嶋裕之, 山下千明, パラレルメカニズムを用いたマ
シニングセンタの運動経路測定法 (第 1 報 測定法と測定実験),
日本機械学会論文集 (C 編), 68, 676 (2002-12)

- 5- 9) ISO230-6 Test code for machine tools (1997)

- 5-10) 牛島英史, 鈴木裕, 榎原弘之, 是澤宏之, 牛尾雅樹, 神谷昌秀,
藤田康宏, 5 軸 N C 工作機械の動的精度計測に関する研究—ダイアゴナル
変位試験による直線計測—, 精密工学会春季大会 (2003)

- 5-11) 多軸工作機械WG, J I S 編集委員会報告書, (社) 日本工作機械工業会, (2005)
- 5-12) 福岡県金型研究会 技術研究会, 第52回技術研究会「NC工作機械の精度評価」, 福岡県金型研究会 (2001)

第六章 結 論

本研究では，5 軸工作機械の検査方法について，測定装置の開発試作及び検査方法の確立を目的とし，研究を展開した．

装置の開発目標は，同時 5 軸動作経路まで測定可能な装置の開発と，測定に用いる最適な動作経路の設定を行った．

この装置及び方法を用い，5 軸工作機械の具体的な動作経路を測定し，得られた測定結果を基に，機械測定規格に則った誤差要因の特定及び定量化を行うことにより，従来では困難な実加工動作の高精度化を試みた．

本論文では，以下の結論を得た．

I 制御軸数に依らず，任意動作経路を測定できる装置を開発した．

なお，開発は 3 段階で装置試作を行った．

同時 2 軸の任意動作経路測定装置の試作を行った．

1) 2 次元測定平面で，任意動作経路を測定表示できる装置を開発した．

2) 測定結果を表示し，結果から機械誤差要因の特定及び定量化を国際規格に準じた手法で行えることを示した．

つぎに，同時 3 軸の任意動作経路計測装置の試作を行った．

3) 空間内の動作経路を，3 次元的に測定できる装置を開発した．

4) 測定結果を平面毎に表示し，表示平面内で工作機械の精度傾向を国際規格に準じた手法で行えることを示した．

さらに球面軸受を用い，同時 5 軸任意動作経路の測定装置の試作を行った．

5) 2次元測定平面での測定表示に加え，工具軸における変位測定を可能とした．

6) 軸数に依らず任意動作経路を測定でき，軸数を越えて2次元測定平面における，同一誤差要因での比較検討を可能とした．

II 国際規格に基づき，その設定経路の拡張を考案した．

7) ISO 230-4を基礎にして，四角・菱形運動動作経路を設定し，同時2軸直線運動経路の評価を可能にした．

8) ISO 230-6を参考に，立体ダイアゴナル経路試験を考案し，同時3軸直線運動経路の評価を可能にした．

9) ISO 230-4を基礎にして，円錐・四角錐・菱形錐運動動作経路を設定し，同時5軸運動経路の評価を可能にした．

III I 及び II の結果を用い，測定を行い装置・方法の検証を行った．

10) 同時5軸運動経路までの測定表示と，誤差要因の特定及び定量化を行えることを実証した．

11) 軸数を越えて，2次元測定平面における，同一誤差要因での比較検討を実証した．

12) 同時5軸動作に必要な，ポストプロセス処理に関し，指令値生成時に必要となる許容値の設定に関し，最適化する方法を考案した．

工作機械での同時5軸動作経路までの測定を，装置開発と共に，動作経路設定を考案し，工作機械の総合的な精度測定方法を設定した．

上記の結果を用いることにより，効率よく誤差要因の特定と定量化を行うことを可能とし，最適な指令値の設定手法までを確立できた．