

福岡県金型研究会とのF方式研究の取組み

— 工作機械精度計測システムの開発 —

北九州職業能力開発短期大学校 八 崎 透
松 尾 智 士
広 本 和 博

A Progress Report of Research for a Project F
—Development of Process Measuring System for NC Machine Tool—

Toru YATSUZAKI, Satoshi MATSUO, Kazuhiro HIROMOTO

要約 NC工作機械の2次元平面における動作経路を計測する装置を開発した。この装置は、マシニングセンタ等の工作機械において、XY方向に対し、2軸の位置を独立して検出できるため、任意の動作経路の計測や、その動作経路と指令経路を比較し、その精度評価をすることが可能である。本計測システムでは、従来、加工物を切削加工後、3次元測定機等で評価していたNC工作機械の精度評価をより高精度化できると共に、さらに自由度の高い精度評価手法が可能となると考えられる。

なお、本研究は事業団が勧めるF方式研究に適合するテーマであり、平成8年7月から開始されており、その経過を報告するものである。

I はじめに

雇用促進事業団（以下事業団という）による事業主団体方式新事業展開のため、北九州職業能力開発短期大学校（以下北九州短大という）は全国の団立短大に先駆け平成7年6月から新事業の試行を始めた。全職員の積極的な活動の結果、平成8年4月から、福岡県金型研究会（以下研究会という）に対し、オーダーメイドの能力開発セミナーを中心とした、人材高度化支援のための業務を展開している。また、研究会は平成8年度の人材高度化支援団体に認定されており、北九州短大と共同で能力開発セミナー以外にも、技術研究会・技術講習会を企画し、研究会の構成企業のレベルアップを図っている。

さらに、研究会は、研究開発も積極的に進めている。その中の一つとして、事業団が進めるF方式研究に適合するテーマである「工作機械の精度計測システムの開発」を北九州短大と共同で進めている。本研究は平

成8年度から開始され、人材育成及び、本研究の内容において一定の成果がでてきた。そこで、今回、本誌を利用してその内容を報告する。

II 福岡県金型研究会の概要

金型研究会は、金型技術について、会員相互の協力によって生産技術の向上と経営の合理化を図る事を目的とし、1985年に産官学による組織として発足した。本研究会は事務局を(株)北九州テクノセンター（産官学からなる第3セクター）に置き、企画事務を福岡県工業センターが担当しており、構成会員約7,000名からなる非常に基盤の確りした事業主団体である。図1に団体構成を示す。

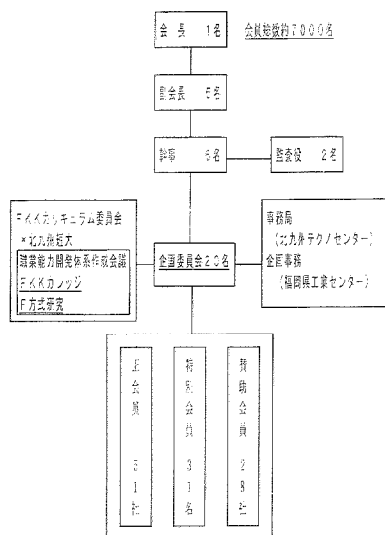


図1 福岡県金型研究会の構成図

Ⅲ 本研究の目的

精密金型製作においては、金型加工用工作機械の適切な加工精度管理が不可欠である。しかし、現状の工作機械の加工精度は、一般的に、最終的に加工した工作物を計測室の三次元測定機や真円度測定機で計測した結果から判断されている。この方法は、加工された工作物が、指定された公差に入っているか否かを、最終的に確認するには有効であるが、工作機械の精度管理には不十分である。また、納期短縮を至上命令とされている金型業界では、加工から加工精度計測までに時間がかかることは致命的である。このことから、加工前に工作機械の精度の確認ができれば、加工物の精度管理も容易になり、無駄な作り直しを避け納期短縮に大きく貢献できることになる。今回、共に本開発を行っている研究会の構成企業は、そのほとんどが従業員50名程度の中小企業であり、毎日納期に追われており、失敗のない加工を前提とした加工精度の管理システムを確立することが急務になっている。そこで、実際の加工を伴わずに現場で容易に工作機械の精度計測が可能となるシステムを開発することにした。

Ⅳ 本研究の概要

開発したシステムは、計測する工作機械のテーブルに設置する計測装置本体と、その位置データを収録・評価するデータ処理部から成る。(図2参照)

4. 1 計測装置

計測装置は、図2に示されるように、NC工作機械

の動作軸と平行になるようにテーブル上に設置され、 $\phi 20$ 丸棒を介して、工作機械の主軸と連結されている。この丸棒を支持するブロックは、工作機械のX軸およびY軸とそれぞれ平行と成る装置内の直交2軸によって支持され、2次元平面内の任意動作が可能である。直交2軸には、それぞれリニアスケール(フタバ製、分解能: $0.1\mu\text{m}$)が取り付けられ、位置検出が行われる。

4. 2 データ処理部

リニアスケールによる位置データは、図3に示されるように、カウンタユニットを介して、ISAバスからPC-AT機に取り込まれる。取り込まれたデータはXYの絶対座標値、すなわち実際の動作軌跡として指令経路と比較され、その位置誤差および速度誤差がCRT上に任意倍率で表示される。また、CRT上の2点間距離を計測することが可能である。(写真1に全体の構成を示す。)

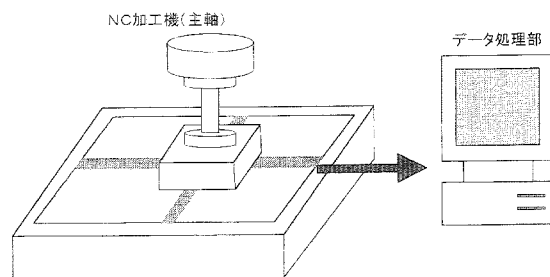


図2 計測器基本構成

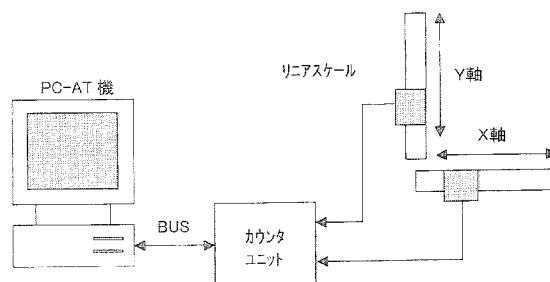


図3 データ処理部

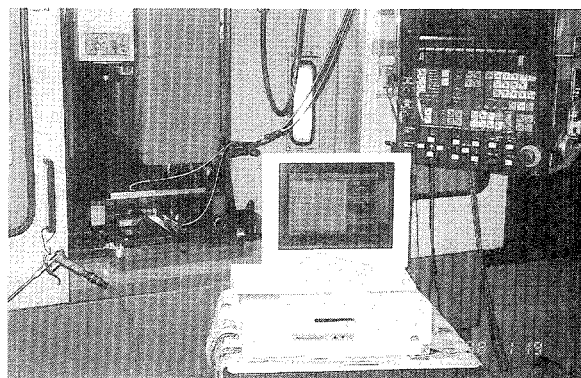


写真1 全体の構成

V 実験項目およびアルゴリズム

5. 1 実験項目

次に示す2項目について実験を行い、それぞれの動作経路について評価を行った。

(1) 円運動経路

(2) 直線運動経路

①高速動作の経路

②2軸間の直角度評価経路

なお、動作経路の評価は図4の経路をトレースさせた。

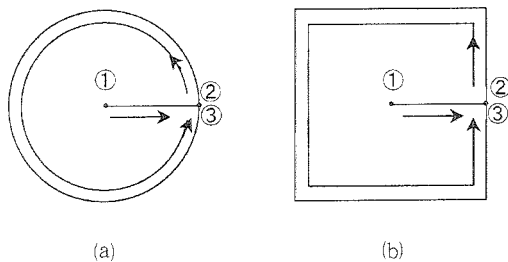


図4 動作経路

5. 2 NC機器と計測装置の同期

図4に示すようなNC機器の動作経路に従い計測を同期させる方法として、以下の方法がある。

(1) NC機器の制御装置から電氣的に同期信号を取り出す。(自動計測)

(2) NC機器の動作経路に合わせて計器を操作し、計測する。(手動計測)

* 本計測装置は、任意のNC工作機械に対して計測可能な汎用システムであることを目的とする。また、制御装置の入出力仕様が各工作機械メーカーで異なること、未公開のものが多いことから、本システムでは(2)の方法を採用した。

5. 2. 1 同期フロー

今回の計測におけるNC工作機械の動作経路は図4に示すような(a)円運動経路、(b)直線運動経路について行うが、その動作順序は円・直線のどちらも同じで、①原点→②開始点→③終点の順番(図4中、矢印参照)で移動する。これに同期して、計測器内カウンターユニットは①カウンタのリセット→②データの書き込み開始→③データの書き込み終了、を行わなければならない。

また、今回の計測で実際に必要な計測データは①～

③の処理の内、②～③までの経路データである。そこで、前項(2)の方式、つまりNC工作機械の動作経路に合わせ、計測器(カウンタ)を手動で同期させて計測を行なった。実際の同期はNC工作機械のオペレータ、計測器のオペレータ同士で合図をしながら同期をとる原始的な方法である。同期の手順はNC工作機械をシングルステップ動作させ、以下の手順で行った。

1. NC工作機械オペレータはシングルステップ動作でNC工作機を①原点復帰させる。復帰した時点で待機し、計測器のオペレータに合図する。
2. 計測器オペレータは計測器カウンタをリセットし、NC工作機械オペレータに合図する。
3. NC工作機械オペレータはシングルステップ動作でNC工作機を②開始点に移動させる。開始点到着した時点で待機し、計測器オペレータに合図する。
4. 計測器オペレータは計測器のデータ書き込みを開始させると同時にNC工作機械オペレータに合図する。
5. NC工作機械オペレータは②～③までの経路を自動運転させ、NC工作機械が③終点に到着したと同時に計測器オペレータに合図する。
6. 計測器オペレータは計測器のデータ書き込みを終了させる。

以上が計測の手順である。なお、計測器側でのこの手順の同期フローを図5に示す。図中の同期ポイント①～③は①カウンタのリセット→②データの書き込み開始→③データの書き込み終了である。

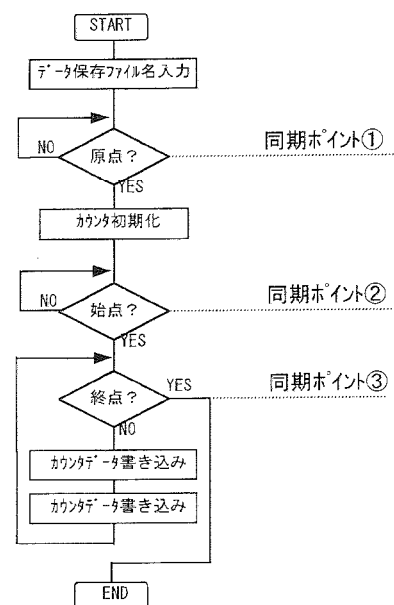


図5 同期フロー

5. 3 円運動誤差表示アルゴリズム

本計測装置には、NC工作機械の命令経路（理想経路）に対する実際の経路の誤差を、任意の倍率に応じて表示する機能を持たせた。ここでは、NC工作機械の円運動計測におけるこの機能についての説明をする。

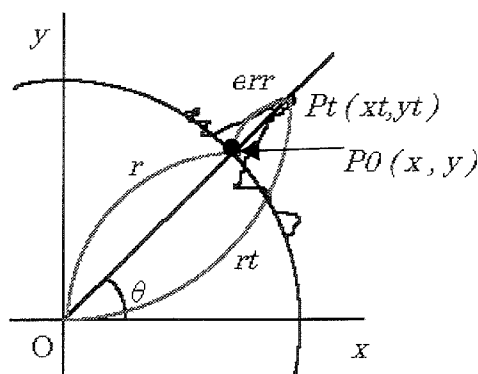


図6 円運動の理想軌道に対する実軌跡

NC工作機械が図4に示すような動作経路を移動する時、その挙動を図6に示されるように、あらかじめ設定された半径rからなる円軌道を今回の計測における理想的な経路と考える。ここで、計測装置に実際に取り込まれた任意のデータ座標 $Pt(xt, yt)$ とし、また原点とPtとの距離を理想半径rに対し、実際の半径rtとすると、

$$rt = \sqrt{xt^2 + yt^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$yt = rt \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$xt = rt \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり、原点OとPtを結ぶ延長と理想円軌道との交点を $P0(x, y)$ とすると、

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$y = r \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$x = r \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (6)$$

が成り立つ。ここでの θ は開始点(r, 0)からの移動角度である。

今回の計測装置においては、理想半径rと実際の半径rtとの誤差errは次式で示される。

$$err = rt - r \quad \dots\dots\dots (7)$$

これに任意倍率vをかけた倍率誤差をevとすると、

次式のようになる。

$$ev = v \cdot err \quad \dots\dots\dots (8)$$

このevを理想円軌道の座標P0から、P0→Pt方向に延長した座標を $Pv(xv, yv)$ とした時、この $Pv(xv, yv)$ を導く手順を円運動誤差表示アルゴリズムとした。

ここで、実際の計測座標から、移動角度 θ は式(2)、(3)より(9)式となる。

$$\theta = \tan^{-1}(yt/xt) \quad \dots\dots\dots (9)$$

また、式(1)、(7)、(8)から次のようになる。

$$ev = v \cdot (\sqrt{xt^2 + yt^2} - r) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、原点Oから $Pv(xv, yv)$ までの距離を表示半径rvとすると以下で示される。

$$\begin{aligned} rv &= ev + r \\ &= v \cdot (\sqrt{xt^2 + yt^2} - r) + r \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

よって、円運動誤差表示アルゴリズムは、

$$yv = rv \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$xv = rv \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。

5. 4 直線運動の誤差表示アルゴリズム

直線運動経路の評価において、その誤差を任意の倍率で表示する方法として直線運動誤差表示アルゴリズムを用いる。

基本的なアルゴリズムを円運動の場合と同じアルゴリズムで、式(11)、(12)、(13)で表される。しかし、円運動では、その理想経路が、原点Oと経路上の任意座標の距離が原点を中心とした半径rが一定であったのに対し、直線運動では原点Oを中心として場合、経路上の任意座標までの距離が一定ではない。そこで、原点から任意座標までの距離を変化する半径r'として考え、直線運動誤差表示アルゴリズムとして導く。

図7に示されるように計測装置にあらかじめ設定された任意半径（半径×2；四角形の一辺）をa、実際の経路座標を $Pt'(xt', yt')$ とした時、原点OとPt'を

結ぶ直線と理想直線経路の交点を $P0'(x', y')$ とする。
 まず、区間 $0 \leq \theta < \pi/4$ の場合、理想直線経路上の座標 $P0'$ の x' 座標は a で一定であり $P0'(a, y')$ となる。この時、原点と座標 $P0'$ の距離は半径 r' であり、

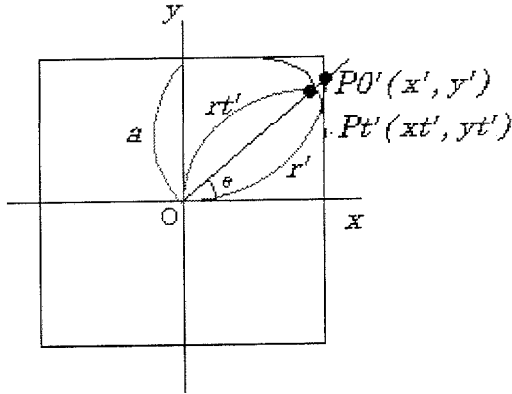


図7 直線運動の理想軌道に対する実軌跡

$$r' = \sqrt{a^2 + y'^2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、

$$a = x' = r' \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$y' = r' \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (16)$$

から、

$$y' = a \cdot \tan \theta \quad \dots\dots\dots (17)$$

よって、

$$r' = \sqrt{a^2 + (a \cdot \tan \theta)^2} \quad \dots\dots (18)$$

この時、

$$\theta = \tan^{-1}(y'/x') \quad \dots\dots\dots (19)$$

次に、区間 $\pi/4 \leq \theta < \pi/2$ の場合について考えると、今後は理想曲線経路上の座標 $P0'$ の y' 座標が a で一定となり、その時の座標は $P0'(x', a)$ となる。これより、

$$r' = \sqrt{x'^2 + a^2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、

$$x' = r' \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$a = y' = r' \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (22)$$

から、

$$x' = a / \tan \theta \quad \dots\dots\dots (23)$$

よって、

$$r' = \sqrt{(a / \tan \theta)^2 + a^2} \quad \dots\dots (24)$$

となる。同様の考え方で展開していくと、

条件1：

$-\pi/4 \leq \theta < \pi/4$ 、 $-3\pi/4 \leq \theta < 3\pi/4$ の場合、式(18)が成り立ち、

条件2：

$\pi/4 \leq \theta < 3\pi/4$ 、 $-3\pi/4 \leq \theta < -\pi/4$ の場合、式(24)が成り立つ。

円運動アルゴリズムの時と同様に直線誤差表示アルゴリズムを考えると、理想半径 r' と実際の半径 r_t' との誤差に任意の倍率 v をかけた倍率誤差を ev' とし、この ev' を理想円軌道上の座標 $P0'$ から、座標 $P0' \rightarrow Pt'$ 方向に延長した座標を $Pv'(xv, yv)$ とし、原点 O から $Pv(xv, yv)$ までの距離を表示半径 rv とすると、その時のアルゴリズムは式(11)、(12)、(13)と同様に考えて、

$$\begin{aligned} rv' &= ev' + r' \\ &= v \cdot (\sqrt{x_t'^2 + y_t'^2} - r') + r' \quad \dots\dots (25) \end{aligned}$$

$$yv' = rv' \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$xv' = rv' \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (27)$$

となる。また、 r は条件1、2によって左右される。

5. 5 速度表示アルゴリズム

NC工作機械からの速度指令に対する、実際の出力速度を評価する。

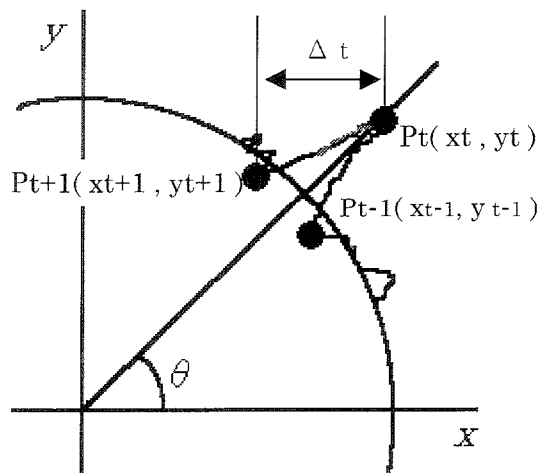


図8 速度評価点

基本的な計算方法は計測装置カウンタからサンプリング時間 Δt 毎に読み込まれた実際の時系列データ $\dots, P_{t-1}(x_{t-1}, y_{t-1}), P_t(x_t, y_t), P_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}), \dots$ (図8参照) に対する、単位時間ごとの微小移動距離 $\dots, |P_{t-1}P_t|, |P_tP_{t+1}|, \dots$ を求め、サンプル時間で割ることで時系列毎の速度データ $\dots, f_{t-1}, f_t, f_{t+1}, \dots$ を求める。速度アルゴリズムを以下に示す。

$$f_t = \frac{|P_{t-1}P_t|}{\Delta t}$$

$$= \frac{\sqrt{(x_t - x_{t-1})^2 + (y_t - y_{t-1})^2}}{\Delta t} \quad \dots(28)$$

VI 計測および評価

6. 1 円運動の経路計測

送り速度 2 m/min で半径 50 mm の円運動（円弧補間指令）を行わせ、計測した動作経路の誤差倍率を $\times 1$ 倍、 $\times 1000$ 倍で表示した結果をそれぞれ図9、図10に示す。

この結果、倍率： $\times 1$ と、倍率： $\times 1000$ の表示を対比することにより、X軸およびY軸のバックラッシュとスティックモーションを計測できることが分かる。

図10の部分拡大表示を図11に示す。ここで、理想経路に対する、誤差（スパイク）が約 $10 \mu\text{m}$ あることがわかる。

6. 2 直線運動の経路計測

6. 2. 1 通常の直線運動（補正制御なし）

送り速度 3 m/min で一辺 100 mm の正方形の直線運動（各頂点間の直線補間指令）を行わせ、その誤差表示倍率： $\times 50$ 倍のときの結果を図12に示す。

一般的に知られているように、経路が急変する頂点部での誤差が大きく、この場合 0.931 mm であることが分かる。この頂点近傍での動作経路を倍率： $\times 1$ で表示した結果を図13に示す。

6. 2. 2 補正制御付き直線運動

近年の工作機械では、経路誤差を補正する制御方法が数々用いられている。その1つの補正制御を加えた場合の動作経路を図14に示す。動作条件は前述と同様であるが、この制御時は図13と比べると、その誤差が $15.2 \mu\text{m}$ に減少できたことを確認できた。このことから高速制御を用いることにより、その効果が視覚的になり、定量的に計測できることが分かる。なお、制御方法はGI制御であった。

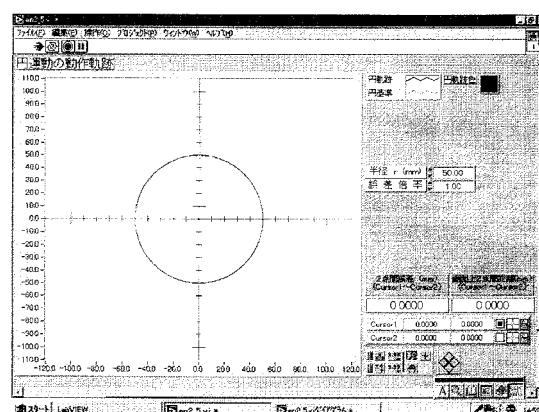


図9 円運動の動作経路誤差（誤差倍率： $\times 1$ ）

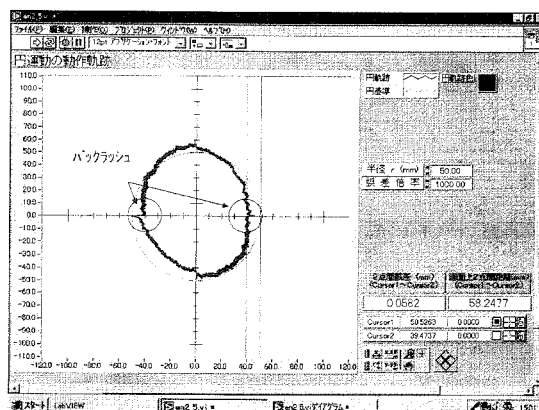


図10 円運動の動作経路誤差（誤差倍率： $\times 1000$ ）

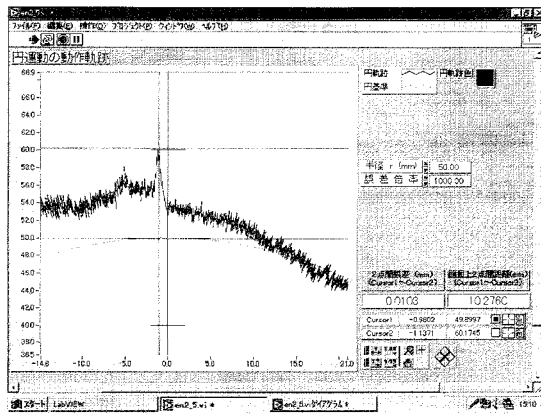


図11 スパイク部での動作経路誤差（誤差倍率：×1000）

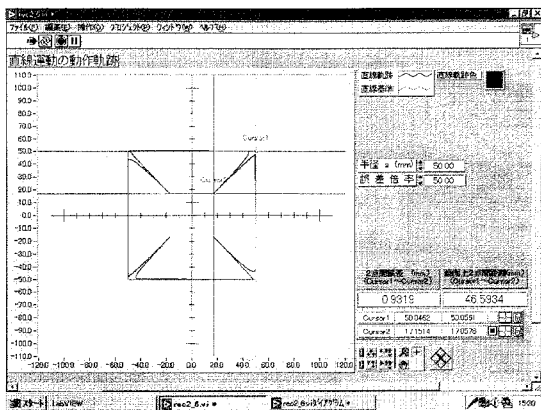


図12 直線運動の動作経路誤差（誤差倍率：×50）

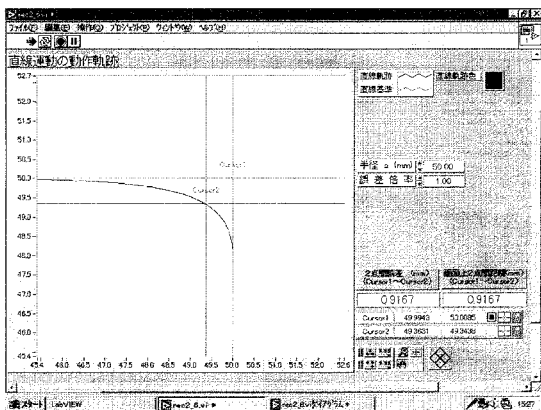


図13 直線運動の動作経路誤差（誤差倍率：×1）

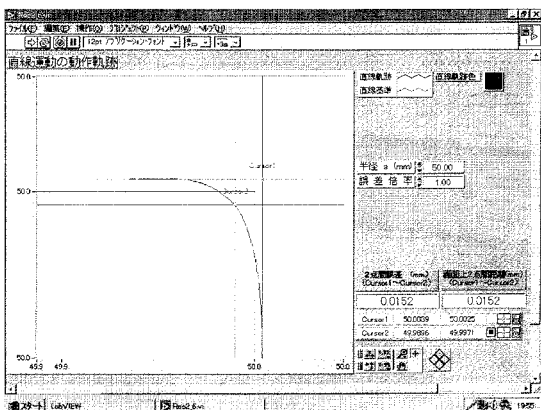


図14 補正制御時の頂点近傍での動作（×1）

6. 3 速度評価

6. 3. 1 通常直線運動（補正制御なし）

6.2 項で行った直線運動の速度評価を以下に示す。送り速度 1 m/minの結果を図15に、送り速度 3 m/minの結果を図16に示す。なお、カウンタのサンプリング時間は 182.32 μ sであった。

図中のスパイク部が正方形の4頂点部の誤差であり、前項と同様に頂点部での速度差が大きいことが分かる。また、送り速度 1 m/minと 3 m/minのスパイク幅の比較から、高速になるに従い、工作機械の速度誤差が増すことがわかる。このことから、高速になるに従い頂点近傍での速度変化が大きいことがわかる。

6. 3. 2 補正制御付き直線運動

つぎに補正制御がある場合について、送り速度 3 m/minの結果を図17に示す。補正制御がある場合、頂点付近では、速度 0 に近い低速での動作をしていることがわかる。

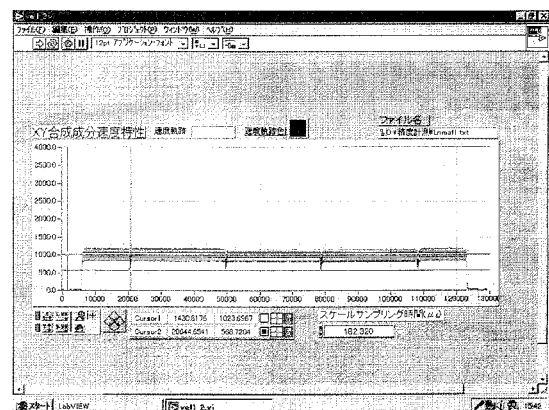


図15 速度誤差表示（送り速度1m/min）

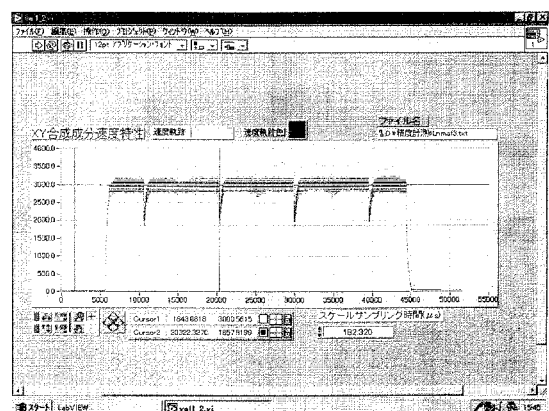


図16 速度誤差表示（送り速度3m/min）

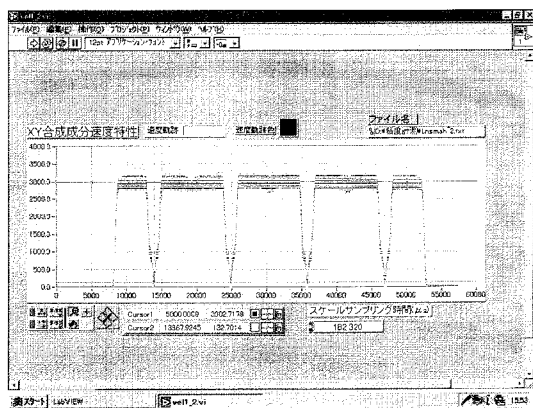


図17 補正制御あり速度誤差表示（送り速度3m/min）

6. 4 二軸間の直角度評価

6. 4. 1 直角度について

図18に示す従来の円運動試験法を用いた計測装置では、その算出処理として、

- ①計測経路から中心点を算出
(円の中心位置がオフセットする)
 - ②円周上の一点で算出
(算出精度が低い)
 - ③傾斜角から直角度を算出
(実用的な精度が得られない)
- という手順で処理がなされていた。

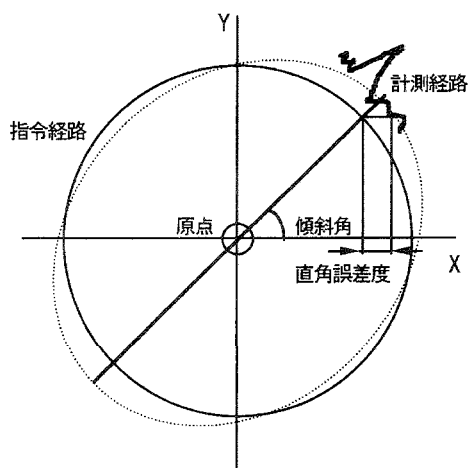


図18 従来の円運動試験法

今回のシステムでは、リニアスケールをXY方向に直交させて使用しているため、そのXY座標を解析することで直角度を知ることができる。

JISではNC機器のXY軸の直角度としてダイヤルゲージによる測定法をもちいて300mmの移動距離に対して、0.015mmの誤差範囲が目安とされている。

6. 4. 2 測定結果

原点から次の指令座標に直線補間を行った結果を図19に示す。

指令座標 : $X = 50.000 \text{ mm}$ $Y = 50.000 \text{ mm}$

表示から、

実際座標 : $X = 49.993 \text{ mm}$ $Y = 49.996 \text{ mm}$

と測定された。つまり、

誤差 : 0.007 mm $Y = 0.004 \text{ mm}$

となることが分かる。

測定では50 mmの移動に対しての評価を行っているが、前項のJIS規格における直角基準と比較するために、測定結果を300mmの移動距離に換算すると、直角度は、

直角度 : $X = 0.042 \text{ mm}$ $Y = 0.024 \text{ mm}$ となる。

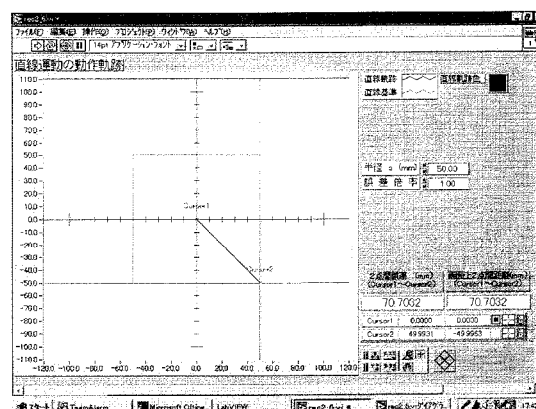


図19 2軸の直角度計測

VII 本システムの総括

直交するリニアスケールを用いて、NC工作機械の動作経路を計測するシステムを開発し、その評価実験を行った結果、つぎの結論を得た。

- (1) 2次元平面内で、任意の動作経路の絶対座標を計測することができる。
- (2) NC指令経路を基準に、実際の動作経路の精度評価技術として、自由度の高い評価を行うことが可能になる。
- (3) 今回のNC機器と計測装置の同期は、手動でタイミングを取っており、今後改善する必要がある。

また、今回開発したシステムと従来技術の性能比較を図20に示す。

	従 来 技 術				本 研 究	
	実 切 削 法		D B B 法		本システム	
	精度	速度	精度	速度	精度	速度
円弧補間	△	×	○	△	○	○
直線補間	△	×	×	×	○	○
NURBUS補間	△	×	×	×	○	○
備 考	精度が悪い	解析不可	実形状でない	評価不可	高精度・高速度 に 対 応 可	

図20 性能比較

VIII 本F研究を通しての人材育成

冒頭に述べたように、研究会傘下企業の従業員の人材育成の一部としてF K K カレッジ（FKK：福岡県金型研究会）と命名された能力開発セミナーを展開している。しかし、能力開発セミナーでは断片的な技術指導しかできず、現在技術者に求められている計画から評価までの一貫した技術指導ができない。そこで、現在行っているF方式研究へ研究会傘下企業の若手従業員に参加してもらい本研究を若手従業員の勉強の場にしたいと考えている。具体的には、研究会の主催する技術研究会の場で本研究の内容を開示し、本研究に興味のある若手を我々のグループの中に招いている。

また、本研究の最終目標である傘下企業へのNC工作機械診断活動を平成10年2月から開始した。

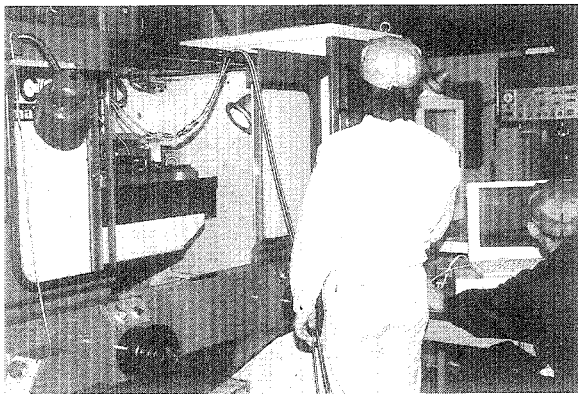


写真2 NC工作機械診断活動
(株式会社高城精機)

IX おわりに

本研究を通して色々な方とお付き合いさせて頂いた。人材育成と言いつつ、逆に教わることの方が多く、我々にとって大変貴重な経験となった。そのお返しとして、本研究の中身を充実させ、人材育成・NC工作機械診断活動等に邁進して行きたいと考えている。

最後に、本研究においてご指導頂きました(株)九州池上金型社長 池上氏、(株)高城精機社長 尾上氏、福岡工業センター生産システム研究室の神谷氏、牛尾氏、職業能力開発大学校生産機械工学科和田先生に深く感謝いたします。

[参考文献]

- (1) 垣野義昭、他3名：高速輪郭加工の精度向上に関する研究（第2報）－運動精度と加工精度との対応－、1997年度精密工学会春季大会学術講演論文集、D19.
- (2) H笠山晴久：高速・高精度加工をめざした曲線補間CAM、型技術、第11巻、第8号、(1996)、p.102.
- (3) 佐藤清志：レーザー計測システムと工作機械の性能評価への応用、ツールエンジニアリング、第38巻、第6号、(1997)、p.30.
- (4) 垣野義昭、DBB法による金型加工用工作機械の精度チェック、型技術、第11巻11号、(1996)、p.22.
- (5) 神谷昌秀、他3名：CNC工作機械の経路計測システムの開発、1997年精密工学会九州支部飯塚講演会講演論文集、43.
- (6) 平成7年度福岡県金型研究会ハンドブック
- (7) 八崎透：事業主団体方式への取り組み－福岡県金型研究会の場合－
技能と技術、Vol.32、3/1997