

加工物輪郭基準による CNC 旋盤の幾何誤差測定*

浅尾晃通*¹, 水垣善夫*¹, 坂本正史*²

Geometric Error Measurement for CNC Lathe Based on Profile of Machined Workpiece

Teruyuki ASAO, Yoshio MIZUGAKI and Masafumi SAKAMOTO

This study proposes a measurement and improvement system for the consistency of machined diameter by a CNC lathe with referring the external shape of a machined workpiece. Under the assumption that the external shape of the workpiece is axial symmetrical, the axis of symmetry equivalent to the axial line between the spindle nose and the tailstock can be regarded as the compensatory reference for the straight line motion in turning. This axis in ZX plane can be represented as the successive change of center position of the both external profiles with use of a laser scan sensor traversing in the lathe. For the compensatory machining, the CL data is modified and applied by taking account of the magnitude of machining error from the compensatory reference. As the results of the compensatory machining, the accuracy of finishing has been highly improved as precise as the positioning accuracy of the lathe.

Key Words: Turning, Measurement, Accuracy, Machine Tool, CNC Lathe, External Profiles, Geometric Error, Laser Scan Sensor

1. 緒 言

近年切削加工においても、高速加工やサブミクロンあるいはナノメートルオーダの旋削が再現性良く行えるような超精密旋盤が市販されている。しかし、一般的に良く利用されている CNC 旋盤は 1 μm の最小分解能を持つものがほとんどである。このような CNC 旋盤による旋削加工でも、さまざまな加工誤差要因により数十 μm の加工誤差は免れない。さらに、超精密旋盤等を除いて最終仕上げには切削加工を行うことを想定していることが多く、ユーザがそれ以上の精度を求めているのも事実である。

高田らの研究⁽¹⁾によると、旋削加工誤差の最も大きなものは工具熱変位誤差、次いで工作機械の幾何誤差を挙げている。最終的に、工作物の直径方向の絶対寸法を保証し、機械加工における精度向上の要求を満たすためには、工作機械の幾何誤差もあらかじめ測定しておき補正の対象に含める必要がある。

図 1 に示すように、CNC 旋盤のみで旋削加工中の

誤差が補正でき、切削加工と同程度の加工精度が得られれば使用する工作機械の数を減らすことができるだけでなく、工程数・加工時間の短縮が可能になることを既に報告した⁽²⁾。これは、あらかじめ測定された加工誤差をデータベースとして用意しておき、これを基に加工誤差を補正するように NC 命令を修正し、その修正された NC 命令で加工する手法である。この手法は、加工誤差の主因を工具の熱膨張と考え、ZX 平面上で切込み方向の加工誤差を測定した。実際には、加工後工作物をチャックに固定したままの状態、刃物台に電気マイクロメータを取付け、加工時の工具軌

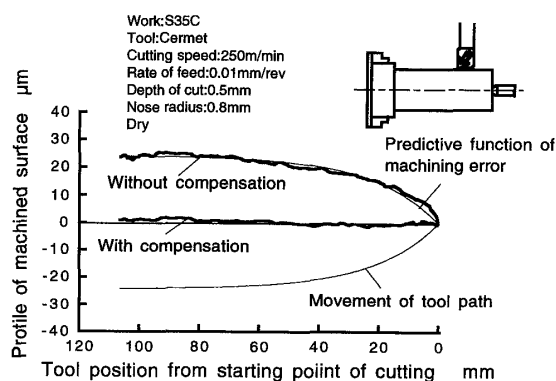


Fig. 1 Machining error and predictive function

* 原稿受付 1997年5月26日。

¹ 正員, 九州工業大学工学部(☎ 804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)。² 正員, 北九州工業高等専門学校(☎ 803-0985 北九州市小倉南区志井5-20-1)。

跡と同じ経路で動かす。そのときの電気マイクロメータの移動量をパーソナルコンピュータに取り込み、加工誤差を切削開始点からの相対値として測定している。この方式では、工作機械の幾何的誤差(静的誤差)を含まない加工誤差が測定されるため、加工誤差のデータベースの他に工作機械固有にデータベースを作成する必要がある。

フライス盤やマシニングセンタのような直交三軸形の工作機械の幾何的誤差を測定するには、垣野らのストレートエッジマスタ⁽³⁾や Bryan の測定法⁽⁴⁾、超精密旋盤では河野らのインプロセスでの加工面基準制御方式⁽⁵⁾等がある。旋削加工では特に直径方向の精度が要求されることが多く、これは工作機械の幾何誤差の中でも特にベッド滑り面の真直度に起因する。このような旋盤の幾何誤差測定には、複数の変位計を利用した方法⁽⁶⁾⁽⁷⁾が提案されており、この場合に生じる複数の変位計の零点調整誤差を補正する方法として自律的決定法⁽⁸⁾や反転法⁽⁹⁾が提案されている。しかし、これらは複数の変位計を使うため構造やデータ処理が複雑になるなどの問題がある。

本研究では、テストバーを使わず、簡単な装置・計算手法により、旋盤の幾何誤差を測定する方法を提案する。これは、旋盤で加工される工作物は回転軸に対して対称であることを利用した測定法で、測定対象の旋盤で加工された工作物の外形を対向する2方向から測定することで、刃物台を基準とした真直度・位置精度を求める方法である。

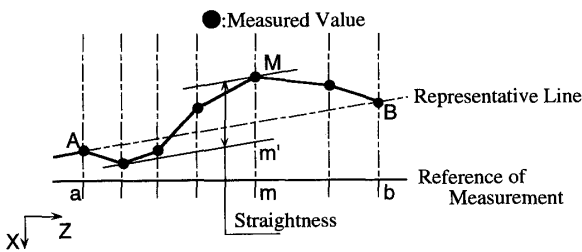


Fig. 2. Straightness of a lathe

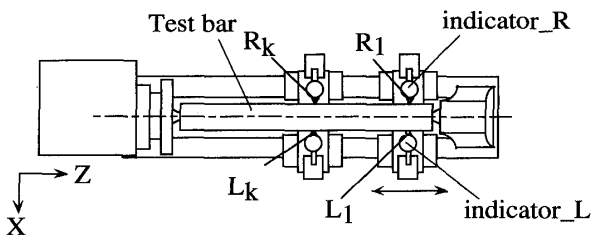


Fig. 3. A measuring method of straightness

2. 測定原理

旋削加工の場合、最も高い寸法精度が要求されるのは直径方向の寸法である。この精度に起因する工作機械の幾何誤差としては、ZX 平面(水平面)を対象にすると主軸・センタ間と刃物台の相対運動誤差である。これは、「ベッド滑り面の真直度」と「位置精度」として考えることができる。

JIS⁽¹⁰⁾では真直度を図2のように、測定基準上に設置された測定器により測定された値を基に、最小二乗法を用いて代表直線を求めこれに平行で測定値の最大値と最小値を通る二直線の間隔として定義している。ベッドの振りが 500 mm 未満の旋盤でのベッド滑り面の真直度測定法を図3に示す。テストバーを主軸・センタ間に取付け、刃物台(往復台)上に設置したインジケータをこれに当て、これを移動させたときのインジケータの読みの最大値を測定する⁽¹¹⁾。実際の測定ではテストバーの両端におけるインジケータの読みが一致するようにあらかじめ心押し台の位置を調整するか、図2に示すように測定されたすべての点から最小二乗法によって計算された代表直線と測定基準を一致または平行にする必要がある。

本研究では、テストバーの両端におけるインジケータの読みが一致するようにあらかじめ心押し台の位置が調整された旋盤において、同一刃物台上に対向して2個のインジケータを図3に示すように固定する。このとき、インジケータは工作物中心に(+)とし、indicator_Lの第1番めの測定値を L_1 とし k 番めの測定値を L_k 、これと反対側に固定された indicator_Rの第1番めの測定値を R_1 、 k 番めの測定値を R_k とすると、

$$L_k - L_1 = -(R_k - R_1) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{L_1 + R_1}{2} = \frac{L_k + R_k}{2} \dots\dots\dots (1)'$$

の関係が成り立つ。式(1)'はテストバーの真円度、円筒度、振れがそれぞれ保証されているので⁽¹²⁾、その中心座標は常に両インジケータ先端位置の中心にあることを意味する。

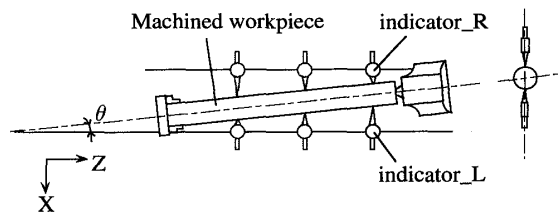


Fig. 4. Concept of a external shape measurement

ここで、図4に示すように心押し台等を調整していない通常状態の旋盤で、テストバーを測定対象の旋盤で加工した工作物に置き換える。この旋盤は、ZX平面上において代表直線と測定基準は θ だけ傾き、加工後の工作物は加工誤差により各部の直径は一定ではないとする。ここで、インジケータの刃物台に対する取付誤差は、最大5度の場合でも、その影響は0.14%以下なのでこの項は無視する。旋削加工において、工作物は回転軸に対して対称であると考え、測定対象である旋盤で加工された工作物はチャックとセンタ間に固定されているので、工作物の回転軸と代表直線が一致する。すると両インジケータの先端位置の中心は工作物の中心つまり代表直線となる。

図3の場合と同様に図4の indicator_L の第1番めの測定値を L_1 、 k 番めの読みを L_k 、indicator_R の読みをそれぞれ R_1 、 R_k とし、加工誤差を含んだ工作物

の第1番め、 k 番めの直径を D_1 、 D_k とすると、

$$L_1 + R_1 + D_1 = L_k + R_k + D_k \dots\dots\dots (2)$$

の関係が成り立つ。図1に示すような通常の旋削加工では、全体の加工誤差が10~15 μ m程度であり、 D_1 、 D_k の差は $\phi 10$ 、 $\phi 20$ の工作物で0.15%、0.075になりこの項を無視すると式(2)は式(1)と同様に、

$$\frac{L_1 + R_1}{2} = \frac{L_k + R_k}{2} \dots\dots\dots (2)'$$

の関係が成り立つ。工作物の中心座標はインジケータを固定した測定基準に対する代表直線の値となるので、二つのインジケータの各測定値の平均値が代表直線となる。

普通旋盤を用いて表1に示す加工条件で旋削加工を行った後、インジケータにより外形を測定した。測定には、直動式の電気マイクロメータを使用し、測定間隔は表面粗さの影響を受けないように切削送りの整数倍の間隔で行った。図5に旋盤Aでの測定結果とZX平面上での刃物台を基準にした工作物回転軸を計算した結果を示す。横軸は切削開始点からの距離を表し、縦軸は直径方向の値を表す。図5(a)の下側および図5(c)の上側が工作物の実体であり、加工が進行するに従って工作物の直径が減少する傾向にあることを示している。

図5(b)の計算結果から最小二乗法を用いて測定基準と代表直線の傾き θ を求めると、-6.8秒となり、この結果から真直度を計算すると2.5 μ mとなる。前述のJISでは、ベッド上の振りが500mm以下の普通旋盤において、その許容値が10 μ m以下と規定してお

Table 1 Cutting conditions

Workpiece	S35C
Tool	Cermet, (-6,-5,6,5,15,93,0.8)
Cutting speed	200m/min
Depth of cut	0.2mm,0.5mm
Rate of feed	0.2mm/rev
Machine tool	Engine Lathe (made in 1969) Max dia:350mm Max length:750mm
	Engine Lathe (made in 1978) Max dia:400mm Max length:850mm
	CNC Lathe (made in 1985) Max dia:350mm Max length:370mm

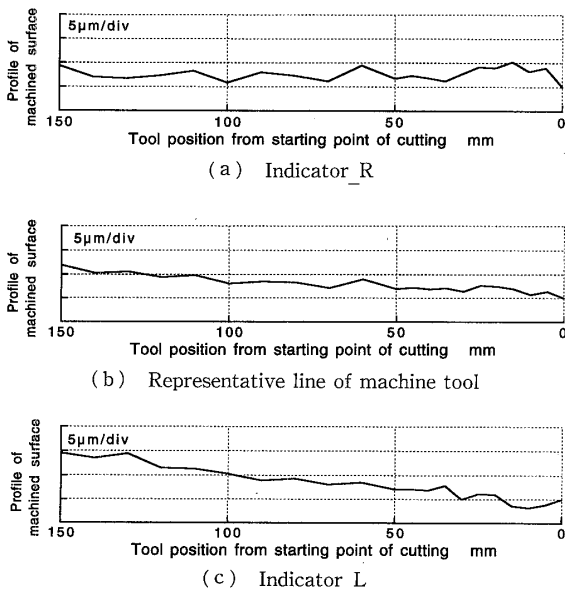


Fig. 5 Profile of machined surface (in the case of Lathe_A)

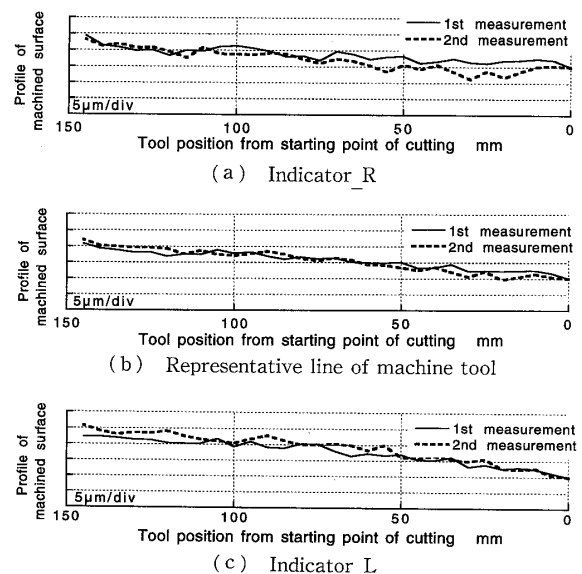


Fig. 6 Profile of machined surface (in the case of Lathe_B)

り、これらの旋盤はその規格を満たしている。

また、本測定法が加工条件の影響を受けないことを確認するために、旋盤 B では加工条件を変えて加工・測定を行った。切込みを 0.2, 0.5 mm とし、各インジケータの測定値とそれから計算した幾何誤差を図 6, 7 に示す。測定は同一工作物の場所を変えて(最初の測定点から 90 度回転させ)それぞれ 2 回測定した。図 6(c), 図 7(c) を比較すると、切込みの大きい図 7(c) の加工誤差が大きく現れているが、加工条件や測定場所を変えても測定値はほぼ同じ値をとっていることがわかる。これらの結果を基に旋盤 B の θ と真直度を計算したものを表 2 に示す。計算結果には多少のばらつきがあるが、これらは両インジケータを工作物の中心軸上に固定できなかったことに起因する。また、正確に固定できたとしてもチャック・心押し台間は ZX 平面のみならず、XY 平面にも傾いていることや刃物台を移動させるのに、測定者が送りハンドルを操作するため、測定間隔を正確に設定することができないこともあげられる。

Table 2 Experimental results

		θ (sec)	Straightness(μ m)
Depth of cut = 0.2mm	1st	-12.2	2.5
	2nd	-16.3	2.7
Depth of cut = 0.5mm	1st	-10.7	4.0
	2nd	-15.7	3.5

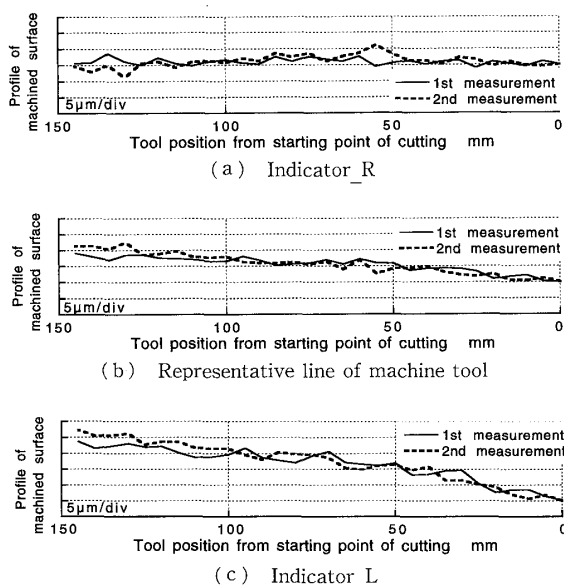


Fig. 7 Profile of machined surface (in the case of Lathe_B)

3. レーザ寸法測定器による真直度の測定

上記の実験により工作物外形を工具・反工具側から測定することで、旋盤の測定基準と真直度を測定できることが確認された。しかし、実際には二つのインジケータを測定ごとに工作物中心軸上の測定基準に対して直角に固定したり測定開始点である工作物端部に正確に設定するのは困難である。これは、代表直線と測定基準は ZX 平面のみに傾いているのではなく XY 平面を含んだ三次元空間上で傾いているためである。そこで、このような問題を解決するために、レーザ寸法測定器を用いて非接触測定を行った。レーザ寸法測定器の受光部に写る像は、測定対象物の投影面であるため、接触式の電気マクロメータなどのインジケータに比べ測定物断面の直径を正確に測定することが可能である。

レーザ寸法測定器による外形測定では、図 8 に示すように旋盤の刃物台に固定する。この装置により測定される Edge1, Edge2 は、Edge0(刃物台: 0 点)を基準にした相対値として出力される。加工された工作物の k 番めの Edge1, Edge2 の座標をそれぞれ $X1_k, X2_k$ とし直径を D_k とすると、

$$X2_k = X1_k + D_k \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{X2_k - X1_k}{2} = \frac{D_k}{2} \dots\dots\dots (3)'$$

が成り立つ。加工された工作物の中心座標は代表直線となるので、測定された $X1_k, X2_k$ の平均値が代表直線となる。

この測定法は、二つのインジケータを使った測定法に比べ次のような特徴がある。

- (1) レーザ寸法測定器のレーザ発信部と受信部を直線上に一度設定しておけば、測定器ごと取り外しが可能なため、測定器の取付誤差を最小限にでき、再現性のある測定が可能である。

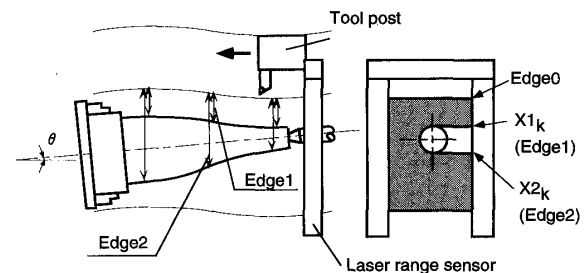


Fig. 8 Measurement of machined workpiece by use of laser range sensor

(2) 球状の先端を持つ接触式の測定子では、工作物の長手方向の測定開始点にこれを正確に持って行くことは困難である。非接触測定用のレーザ寸法測定器では測定対象物の手前から測定を開始することで測定開始点のエッジ検出が容易である。

(3) 工作物を回転させて測定することができるので、1箇所での測定値の平均を取れば工作物の真円度が保証されていなくても、測定基準と代表直線との傾き θ と真直度を計算することができる。さらに、表面粗さの影響を受けない。

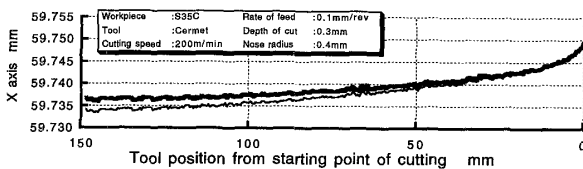
(4) 加工物の直径を絶対値として測定できる。

4. 測定結果

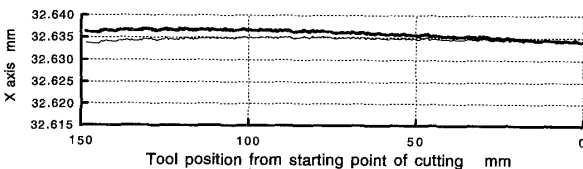
レーザ寸法測定器を使った測定では、自動測定⁽³⁾を

Table 3 Cutting conditions

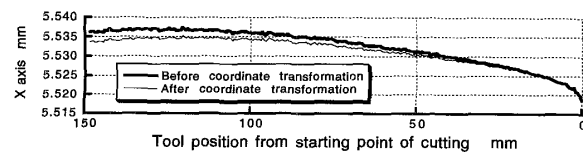
Workpiece	S35C
Tool	Cermet, (-6,-5,6,5,15,93,0.4)
Cutting speed	200m/min
Experiment No.	1
	Rate of feed 0.1mm/rev
	Depth of cut 0.3mm
	2
	Rate of feed 0.1mm/rev
	Depth of cut 0.5mm
	3
	Rate of feed 0.2mm/rev
4	
Rate of feed 0.2mm/rev	
Depth of cut 0.5mm	



(a) The coordinates of the Edge2



(b) The coordinates of the center of machined workpiece



(c) The coordinates of the Edge1

Fig. 9 Measured geometric error of CNC lathe by use of laser scan measurement machine

行うために旋盤 C (CNC 旋盤) を使用する。旋削加工後、工作物をチャックに固定したまま工具を測定器に交換し加工状態と同じ回転数 (1 100 rpm) で外形測定を行った。図 9 に測定結果を示すが、図中の縦軸は Edge0 を基準としたときの値とその平均値である。普通旋盤の場合と同様に加工するに従って工作物径が減少する傾向を示している。また、図中には、代表直線と測定基準から刃物台を基準としたときの工作物中心の傾きを求め、代表直線と測定基準を一致させたものも示す。

インジケータを用いた普通旋盤での実験と同様に、この測定法が加工条件の影響を受けないことを確認するために表 3 の加工条件で同様の測定を行ったものを図 10 に示す。加工中に切りくずの影響を受けないように、毎加工後に測定器は取り外さなければならないため工作物の中心座標は測定開始からの相対値とした。今回の実験では、各測定値の差は 2 μm 程度あり、測定値から計算した表 4 の幾何誤差と同程度になったが、これは測定器の取付ジグの精度を上げたり、ATC 方式を取入れ人的要素を排除することで解決可能である。しかし、この幾何誤差は直線的ではなく曲線的に変化しており、単に心押し台を調整するだけでは解決できず、NC 旋盤の機能を利用した NC 命令修正方式か刃先微小駆動装置が必要になる。これにより、最小分解能が 1 μm の CNC 旋盤での補正で必要な加工誤差モデルの精度から考えるとそれと同程度であり、本測定法の有効性が確認できた。

5. 結 言

旋削加工誤差の高精度化を目指し、旋盤の幾何誤差

Table 4 Experimental results

	θ (sec)	Straightness(μm)
Exp.1	-3.6	1.84
Exp.2	-4.9	2.44
Exp.3	-3.2	2.00
Exp.4	-1.9	1.50

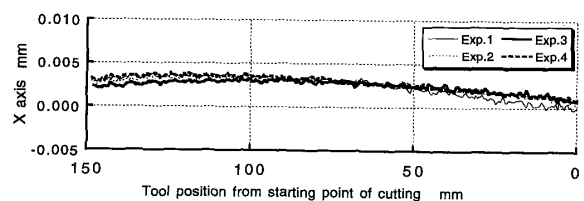


Fig. 10 Geometric error of CNC lathe

を補正するために、工作物の外形を測定することで旋盤の真直度を測定する方法を提案した。数種類の旋盤にこれを接触式の電気マイクロメータと非接触のレーザ寸法測定器で適用した結果以下の結論が得られた。

(1) 旋削加工において、工作物を旋盤から取り外すことなく、外形測定することで、マスターを使用せずに旋盤の刃物台を基準とした「ベッド滑り面の真直度」、「位置精度」の測定が可能となった。

(2) 外形測定を非接触のレーザ寸法測定器で行うことによって、加工時と同様に工作物を回転させて測定することができる。これにより、真円度が保証されなくても旋盤の幾何誤差が工作物の回転軸として測定できる。

(3) 測定ごとの差は $\pm 1 \mu\text{m}$ であり、最小分解能が $1 \mu\text{m}$ の CNC 旋盤の駆動を利用した補正加工に利用可能である。

今後は、この測定法を XY 平面に適用し旋盤の幾何誤差を三次元的に評価するとともに、そのデータを用いて旋削加工時の補正を絶対値で補正したい。

本研究を遂行するにあたり、実験装置製作にご協力いただいた九州工業大学機械工作工場の皆様、ならびに切削実験を担当した與倉康文氏に謝意を表す。

文 献

- (1) 高田祥三・小尾 誠・佐田登志夫, 旋削加工における加

- 工誤差の解析, 精密機械, 40-8 (1975), 678-684.
- (2) 浅尾晃通・坂本正史・水垣善夫, NC 命令補正方式による高精度旋削加工—簡易加工誤差予測曲線とそのデータベースの利用—, 精密工学会誌, 57-7 (1991), 1241-1246.
- (3) 垣野義昭・谷口博之・安井 誠・上杉憲一, 工作機械の直線運動誤差の測定法に関する研究, 精密機械, 48-2 (1982), 239-244.
- (4) Bryan, J. B., A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Part 1, *Principle and Applications Prec. Engg.*, 4-2 (1982), 61-69.
- (5) 河野嗣男・面田 学・岡崎祐一・小沢則光・三井公之, インプロセス計測加工精度補償の研究(第1報)—加工面基準制御加工法の原理と基礎実験—, 精密工学会誌, 54-8 (1988), 1463-1468.
- (6) 戸沢幸一・佐藤壽芳・大堀真敬・駒崎正洋, 工作機械の真直度と加工精度の関連に関する研究, 機論, 47-419, C (1981), 909-917.
- (7) 清野 慧・奥山栄樹・住田正臣, 平面のうねり形状の測定に関する研究(第2報)—形状測定とデジタルフィルター—, 精密工学会誌, 54-3 (1988), 513-518.
- (8) 高 偉・清野 慧・奥山栄樹, ソフトウェアデータムによる形状の絶対測定, 精密工学会誌, 60-4 (1994), 554-558.
- (9) 山口城治, 改良逐次3点法による直線運動精度の計測, 精密工学会誌, 59-5 (1993), 773-778.
- (10) JIS B 6191, 工作機械—静的精度試験方法及び工作精度試験方法通則, (1993).
- (11) JIS B 6202, 旋盤の試験及び検査方法, (1986).
- (12) JIS B 7545, テストバー, (1982).
- (13) 竹内芳美・坂本正史・浅尾晃通・井村公二, パーソナルコンピュータによる NC 旋盤の DNC 化(第3報)—旋削加工誤差の自動計測とその評価—, 精密工学会誌, 53-6 (1987), 902.