任意形状回転工具の軸心運動挙動のオンマシン測定システムの開発* (測定原理と誤差要因の検討)

清水 伸二^{*1}, 原田 高志^{*2}, 伊藤 直紀^{*3}, 坂本 治久^{*4}

Development of On-Machine Measurement System for Axis Motion Behavior of Rotational Tools with Various Shapes (Consideration of Measurement Principle and Error Factors)

Shinji SHIMIZU^{*1}, Takashi HARADA, Naoki ITO and Haruhisa SAKAMOTO

^{*1}Sophia University
Kio-cho 7-1, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8554, Japan

Many researches on measurement and evaluation method of rotational accuracy of machine tools' spindles has been carried out, since it greatly affects machining accuracy. However, major factor influencing directly on the machining accuracy is behavior of rotational motion of the tool axis and then it can be said that the on-machine measurement and evaluation of the behavior is very important. In this study, therefore, the measurement principle and error factors are considered in design of the device for measuring the axis motion behavior of the rotational tool with various shapes. The results obtained here are as follows. (1) Measurement principle of behavior of the rotational axis motion of the tools with various shapes could be proposed. (2) The proposed principle is applicable to various types of rotary tool such as end mills and drills. (3) It is also applicable to the measurement of tool wear. (4) The allowable range of error factors in designing and making of the device was made clear.

Key Words: Axis Motion, Milling Tool, On-Machine Measurement, Three-Point Method

1. 緒 言

日々高まる工業製品に対する高精度化の要求を満たすには、それ以上の精度を持つ工作機械が必要不可欠であることは、周知の通りである。このためには、工作機械においては工具－工作物間の高精度な相対運動を達成する必要があり、テーブルや主軸などの運動要素には、高い運動精度が要求され、その高精度化が進められている。特に主軸の回転精度については、その測定・評価法について、多くの研究が行われてきている。例えば、主軸の回転精度⁽¹⁾⁽²⁾や転がり軸受の回転精度⁽³⁾を高精度に評価する手法についての研究が進められている。しかしながら、加工精度に影響を及ぼす因子としては、主軸回転精度に加え、ツールホルダの主軸への装着精度、そして、そのツールホルダへの工具の把持精度などが挙げられ、それらの高精度化が進められている。しかしながら、直接的に加工精度に影響を及ぼすのは、加工時の工具回転時の工具の軸心運動挙動である。このため、小径エンドミルを対象に回転振れからの加工面性状の推定⁽⁴⁾や、回転中の切れ刃のプロファイルの測定法⁽⁵⁾などの研究が進められている。しかしながら、工具の軸心の運動挙動の評価までには至っていない。また、これらは、実際に使われる工具を用いて、実際の使用回転数で評価することが重要であり、また、オンマシンで測定でき、各種の形状、サイズの工具に対応できることが必要と言える。

そこで、本研究では、任意形状回転工具の軸心運動挙動のオンマシン測定のための測定原理を提案し、その妥当性をシミュレーションにより検討する。さらにその測定・評価精度に及ぼす影響因子について検討し、測定装置の設計指針を明らかにする。

* 原稿受付 2013 年 5 月 20 日 改訂原稿受付 2013 年 9 月 3 日

^{*1} 正員, フェロー, 上智大学 (〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1)

^{*2} 上智大学大学院理工学研究科 (〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1)

^{*3} (株)オリエンタルランド (〒279-8511 千葉県浦安市舞浜 1-1)

^{*4} 正員, 上智大学

E-mail: s_simizu@sophia.ac.jp

2. 提案する測定法の基本原理と装置の基本構成

2・1 基本測定原理

図1は、従来の軸心運動挙動の測定原理を示している。図のように、回転に伴う基準工具の外周の変位を、3箇所非接触変位センサを用いて測定し、3点法⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾を適用することにより、基準工具の形状成分と軸心の誤差運動成分を分離し、回転軸心の運動挙動を求めている。この形状成分と運動誤差成分は、以下のように求める⁽⁷⁾。

得られたセンサ出力 S_a, S_b, S_c は、基準工具の形状成分と運動誤差成分と以下のような関係を持っている。

$$\left. \begin{aligned} S_a(\theta) &= R_a + r(\theta) - y(\theta) \\ S_b(\theta) &= R_b + r(\theta - \phi) - y(\theta) \cos \phi + x(\theta) \sin \phi \\ S_c(\theta) &= R_c + r(\theta - \tau) - y(\theta) \cos \tau - x(\theta) \sin \tau \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

ここで、 R_a, R_b, R_c は変位計と O 点間の距離、 $x(\theta), y(\theta)$ は運動誤差成分を表している。また、基準工具の形状 $r(\theta)$ は、以下のように表せる。

$$r(\theta) = r_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos k\theta + B_k \sin k\theta) \quad (2.2)$$

ここで、 r_0 は、被測定物の平均半径である。

そこで、センサ出力から、式 (2.1) の関係を用いて、まず、形状成分 $r(\theta)$ を求める。次に、この形状成分を用いて、 x 方向及び y 方向の運動誤差成分である $x(\theta), y(\theta)$ を求めることができる。このように、センサ出力から、基準工具の形状成分と運動誤差成分を分離することができる。

Fig.1 Principle of measurement

しかしながら、図に示すように、変位センサが、半径方向を向いているため、図2に示すような彫りの深い各種形状を持つ回転工具に対しては、センサの測定可能範囲を超えてしまうことから、これを測定基準として、工具軸心の運動挙動を測定することは困難と言える。

Fig.2 Example of rotational tools

図3は、この問題点を解決するために本研究で提案する測定原理を示している。図(a)に示すように、本測定法では、3方向から平行光を測定対象である回転工具に照射する。この平行光を測定対象である工具により遮ることにより、3つのエッジ光が得られる。回転工具が誤差運動を伴って回転するとエッジ光の位置が変化し、工具に遮断されずに通過してくるエッジ光の光量も変化することになる。この変化量を測定して、工具の軸心運動の軌跡を求めようとするのが、本提案の基本的な考え方である。したがって、原理上は、上記のような彫の深い形状に限らず、任意形状、任意径の工具の軸心運動挙動の測定が可能である。

図(b)は、軸心の振れが無い状態で、工具を1回転した時に生じるエッジ光の光量変化より得られる工具の形状成分である。このように、測定値としては光軸に対して、直角方向の最大位置が測定されることとなり、工具の窪み部分の形状は忠実には測定できず、工具形状は窪み部がだれた形状として測定され、工具の外周形状とは異なるものとなる。ここでは、これを工具の仮想形状成分と呼ぶことにする。この仮想形状成分の測定が再現性良く行えれば、この3本のエッジ光を用いた3点法による測定により、工具の仮想形状成分と工具の軸心運動成分が正確に分離できることになる。

この測定結果の妥当性は、本測定法で求められた仮想形状成分と、真円度測定器上で振れの無い状態で、1本のエッジ光により測定した仮想形状成分とが同じになることより、確かめることができる。

Fig.3 Principle of proposed measurement system

2・2 装置の光学系の基本構成

図4は、以上の基本原理に基づき構成した測定装置の光学系を示している。平行光としては、レーザ光を用いることにする。平行光は、エッジ光となり通過するばかりではなく、工具面に当たり反射するため、その反射光が他の軸の測定値に影響をおよぼすことが予想される。そこで、各レーザの波長を異なるものにして、特定の波長以外の光を遮断するためにバンドパスフィルタ(BPF)を設置する。そして、エッジ光の光量変化はフォトダイオード(PD)を用いて出力電圧として検出する。この測定システムでは平行光の照射方向と工具の変位方向が 90° 異なるため、3本の平行光はそれぞれ軸から 90° 、 $\phi+90^\circ$ 、 $\tau-90^\circ$ の角度で配置している。

Fig. 4 Optical system of proposed device

3. シミュレーションによる測定原理の妥当性の検討

3・1 2枚刃エンドミルへの適用性

図5は、シミュレーションに用いた2枚刃エンドミルの形状を模した解析用モデルと与えた工具の誤差運動を示している。エンドミルモデルの形状は、1周512点で形成されており、その直径は2mmとした。

Fig.5 Two-flute end mill model and given error motion of tool axis

図6は、エンドミルが誤差運動を伴って1回転した際のシミュレーション解析用のセンサ出力Sa, Sb, Scを示している。センサ出力Saは、軸心の振れ成分を含んだ工具の各回転位置での工具形状データを、Y軸に垂直方向に

見て、Y方向の最大値を、Sb, Scも同様に、それぞれ ϕ , τ 方向に垂直方向に見て、 ϕ , τ 方向の最大値を求めて測定値とした。これら3つのセンサ出力を用いて3点法による解析を行い、エンドミルの仮想形状成分と主軸の誤差運動成分の分離を行った。図8は、その解析結果を示している。図8(a)は、解析によって求めたエンドミルモデルの仮想形状を、図8(b)は、与えた誤差運動と解析によって求めた誤差運動を示している。各回転位置における残差を用いて標準偏差を求めると、 $0.0067\mu\text{m}$ となった。以上の結果から、本測定原理は、2枚刃エンドミルを測定基準としても、精度良く測定が行えることがわかる。

Fig.6 Sensor output

Fig.7 Analytical results for two-flute end mill model

3・2 4枚刃エンドミルへの適用性

図8は、4枚刃エンドミルモデルに対して検討を行った結果である。エンドミルモデルの形状は、1周512点で形成されており、その直径は2mmとした。図8(a)は、解析によって求めたエンドミルの仮想形状を、図8(b)は、与えた誤差運動と解析によって求めた誤差運動を示している。各回転位置における残差を用いて標準偏差を求めると、 $0.0071\mu\text{m}$ となった。以上の結果から、本測定原理は4枚刃エンドミルを測定基準としても、精度良く測定が行えることがわかる。

Fig.8 Analytical results for two-flute end mill model

3・3 ドリルへの適用性

図9は、ドリル形状モデルに対して検討を行った結果である。ドリルモデルの形状は、1周512点で形成されており、その直径は2mmとした。図9(a)は、解析によって求めたドリルの仮想形状を、図9(b)は、実際の誤差運動と解析によって求めた誤差運動を示している。各回転位置における残差を用いて標準偏差を求めると、 $0.0071\mu\text{m}$ となった。以上の結果から、本測定原理はドリルを測定基準としても、精度良く測定が行えることがわかった。

Fig.9 Analytical result for drill model

3・4 工具摩耗測定への適用性

図10は、工具切れ刃摩耗への適用性の検討のための摩耗工具モデルの作成法を示している。摩耗は、同図(a)のように切れ刃先端部に、同図(b)に示すように、外周部より、1, 2, 3, 5, $10\mu\text{m}$ と工具の軸心を中心として、同心円状に与えた。このような摩耗状態の工具形状を用いて、本測定原理を適用し、仮想工具形状を求めた結果が図11である。図が示すように、形状は、上述の原理に従うため、同図(a)に示すように、工具形状はだれた形状となっているが、切れ刃先端の摩耗部は、明確に捉えられていることがわかる。この与えた摩耗量と解析により求められた外周の刃先の後退量を図示すると同図(b)のようになり、与えた摩耗量が、刃先の後退量として正確に捉えられていることがわかる。従って、本測定原理は、工具摩耗の検出にも適用可能と言える。

(a) Applicability of tool wear

(b) Given tool wear

Fig.10 Shape of tool cutting edge

(a) Form of worn tool

(b) Estimated recession of worn tool cutting edge

Fig.11 Simulation result

4. 各種誤差要因に対する検討

4・1 光源の照射角度禁止領域（測定点の禁止領域）の検討

3点法では、変位センサの配置角度によって解析精度が変化したり、主軸形状と誤差運動を分離できない周波数が発生したりといった問題がある。これらの問題を最小限にするための、センサ配置角度を決定するために下記の f_k が大きい条件を選ぶ必要がある⁽⁹⁾。

$$f_k = \left\{ (1 + a \cos k\phi + b \cos k\tau)^2 + (a \sin k\phi - b \sin k\tau)^2 \right\}^{1/2} \quad (4. 1)$$

$$\left. \begin{array}{l} a \sin \phi - b \sin \tau = 0 \\ 1 + a \cos \phi + b \cos \tau = 0 \end{array} \right\} \quad (4. 2)$$

さらに、1, a, b の大小関係から a, b の取りうる範囲を考慮する必要がある。

これらの条件を満たさない配置角度は照射角度の禁止領域と呼ばれており、この領域に配置しないように、禁止領域から遠い位置に配置角度を設定する必要がある。これらのことを考慮に入れ、なおかつ禁止領域から遠い点として、本研究では設計角度を $\phi=120^\circ$, $\tau=136^\circ$ とした。

4・2 サンプルング点数の影響

表1は、サンプルング点数の影響を各種工具に対して検討した結果を示している。ここで示している誤差は、各回転位置における工具形状の解析誤差の最大値としている。測定システムの分解能を $1\mu\text{m}$ に設定すると、 $0.1\mu\text{m}$ 程度の解析誤差が要求されることになり、少なくとも512点のサンプルング点数が必要であることがわかる。

Table1 Maximum error

mm

Sampling point	End mill with two-flute	End mill with four-flute	Drill
256	0.0134	0.0142	0.0964
512	0.0068	0.0073	0.0120
2048	0.0003	0.0002	0.0009

なお、回転数はこのサンプルング点数とデータロガーのサンプルング周波数に影響される。例えば、サンプルング点数 512 点、サンプルング周波数 10MHz とすると、約 $19,000\text{min}^{-1}$ まで測定可能である。

4・3 光源照射角度の影響

ここでは、光源の照射角度から決まる変位測定角度位置 ϕ と τ が上述の設計角度とどの程度異なっても問題が無いかを検討する。4.2 節の結果に基づき、サンプルング点数を 512 点として、先の 4.1 節で設定した設計角度を基準に、設定角度位置をランダムに変え、その際の回転運動挙動の解析誤差を評価した。その結果を表 2 に示す。表より、上記禁止区域内であれば、どの角度でも同様の解析誤差となっていることがわかる。

Table2 Result of analysis

 μm

Form of end mill Setting angle	End mill with two-flute	End mill with four-flute	Drill
$(\phi, \tau)=(119.53^\circ, 134.29^\circ)$	0.0064	0.0071	0.0012
$(\phi, \tau)=(120.23^\circ, 134.29^\circ)$	0.0064	0.0071	0.0012
$(\phi, \tau)=(120.23^\circ, 135.70^\circ)$	0.0064	0.0071	0.0012
$(\phi, \tau)=(121.64^\circ, 137.11^\circ)$	0.0064	0.0071	0.0012
$(\phi, \tau)=(127.26^\circ, 156.09^\circ)$	0.0064	0.0071	0.0012

4・4 組立後の光源の設置誤差の影響

図 12 は、従来の 3 点法で問題となる、光源の設置誤差要因を示している。本提案のようにエッジ光を用いる方法では、同図(a)の設置誤差は光源の位置を測定感度が維持される範囲に平行移動させれば解決できるため、問題ないと言える。同図(b)の場合には、図のように τ に組立誤差が発生すると、それに応じて測定位置が変化することになるので、解析精度に影響を及ぼす。そこで、ここでは、その影響について検討する。

表 3 は、その検討結果を示している。サンプリング点数を 2048 点にして、 τ の設置誤差のために測定位置が 1 点ずつずれたとした時の誤差運動解析の解析誤差を示している。ここで、解析誤差は、この 1 点ずれることによる光源 B の設置角度誤差をそのずれ量に対して示してある。この結果から、誤差を $1\mu\text{m}$ 程度に抑えるには位置ずれによる角度誤差を 0.1758° 以下に抑えなければならないと言える。この誤差は、加工により実現できる精度内であるが、これに加えて、組立誤差と合わせてこの値を越えないような構造に設計する必要がある。

(a)Parallel deviation of optical axis

(b)Angle deviation of optical axis

Fig.12 Setting errors of laser sources

Table3 Influence of difference of measuring position

Error	Difference of position				
	0	1	2	3	4
Angle error °	0	0.1758	0.3516	0.5273	0.7031
Average error μm	0.0030	1.0858	1.9128	2.3857	3.4365
Maximum error μm	0.0050	1.5359	2.7053	3.3741	4.8602

5. 結 論

任意形状の工具軸心の運動挙動のオンマシン測定可能な装置の開発を目指し、その測定原理と測定にあたっての誤差要因について検討し、以下のような結論を得た。

- (1)任意形状の回転工具の軸心運動挙動の測定原理の提案できた。
- (2)エンドミル、ドリルなどの各種回転工具に適用可能である。
- (3)工具摩耗の測定にも適用可能である。
- (4)装置の製作にあたっての誤差要因とその許容範囲を明らかにできた。

文 献

- (1) 三井公之, “精度診断技術の研究(3 点式主軸回転精度測定法の開発)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.48, No.425(1982), pp.115-122.
- (2) 山田隆一, 柳和久, リチウイ, “高精度小径スピンドルの回転振れベクトルとチャッキング誤差成分の光学式分離評価”, 精密工学会誌, Vol.64, No.12 (1998), pp.1785-1790.
- (3) 野口昭治, 古田彰人, 田島崇男, 安積三郎, 中村晋哉, “JIS 規定の転がり軸受回転精度測定法における測定条件の検討”, 日本機械学会論文集, Vol.72, No.720 (2006), pp.2662-2667.
- (4) 根深鉄平, 田中秀岳, 柳和久, “小径エンドミルの回転振れ軌跡と切れ刃プロファイルに基づく加工面性状の推定(第 1 報)”, 精密工学会誌, Vol.75, No.5 (2009), pp.645-649.
- (5) 三好隆志, 高谷裕浩, 原田孝, 砂金総一郎, “小径工具切れ刃プロファイルの光回折オンマシン計測に関する研究(第 1 報, 光回折ゲージ法の提案とその検証実験)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.720 (2004), pp.3556-3563.
- (6) 三井公之, “3 点法主軸回転精度測定装置とその応用”, Vol.35, No.5(1983), pp.593-600.
- (7) 佐瀬浩史, 藤巻研吾, 三井公之, “3 点法におけるパラメータ算出法および変位計の設置角度の推定に関する新手法”, 精密工学会誌, Vol.74, No.6(2008), pp.593-597.
- (8) 高偉, 佐藤栄二郎, 大沼考真, 清野慧, “角度 3 点法による真円度と回転誤差測定に関する研究”, 精密工学会誌, Vol.68, No.9 (2002), pp.1195-1199.
- (9) 青木保雄, 大園成夫, “3 点法真円度測定法の一展開”, 精密機械, Vol.32, No.12(1966), pp.27-326.