CCD 画像による小径エンドミルの挙動監視システム*

—システムの性能特性—

河野良弘** 左 敦穂*** 里中 忍**** 吉満真一** 山下俊一**

Monitoring System for Behavior of Small-diameter End Mill by Use of CCD Image
- Performance Characteristics of Measuring System -

Yoshihiro KAWANO, Dunwen ZUO, Shinobu SATONAKA, Shinichi YOSHIMITU and Shunichi YAMASHITA

This paper proposes a measuring system with visualization based on the high-speed CCD camera for monitoring the behavior of the small-diameter end mill during high-speed milling, in which the characteristics of projection image of the end mills with small-diameter were investigated experimentally. The measurement of an elliptical bar used in stead of an end mill showed that the response delay of the measuring system was very important to affect the image shape, especially in the high speed rotation of the end mill. Also it can be seen that the fluctuation in the system delay disturbs the size and the contour of the end mill in the images, which is characterized by normal distribution. Therefore, the fluctuation is removed by average processing, and the contour or the center of the end mill can be measured precisely.

Further, in order to characterize the cutter behavior from image processing, trials were made on the deflection of the end mill against the static load. When ideas of the equivalent diameter and the length of the end mill are introduced in this analysis, it is shown that the cutter deflection can be related to the static force applied at a cutting edge. As a result, by means of the analysis of the static compliance in the axial direction, the geometrical moment of inertia of the cutting edge part can be sufficiently estimated. And discussion is carried out on the feasibility of the technique for the practical application in monitoring the small-diameter cutting behavior during the high-speed milling process.

Key words: CCD camera, small-diameter end mill, projection image, monitoring, visualization

1. 緒 言

金型、鋳型、自動車部品や航空製品に、高速度の機械加工が幅広く適用されている。従って実際の生産現場では、精密で微細な3次元の機械加工を実現するために、小径工具の活用が期待されている。しかしながら、一般的に小径工具の強度は低いため、機械加工中の破損が問題となっている。そしてこれが生産性を低下させ、加工コストを高める結果となっている。そこで工具破損を予測し、それを避けるために、加工中の工具挙動の監視技術と制御技術が重要な問題となっている。

工具摩耗や工具破損のモニタリングに関する多くの研究が報告されているが¹⁾²⁾、特に高速のマシニングにおける小径エンドミルの挙動監視に関する研究は少ない³⁾⁴⁾。これまで監視の方法として主軸モータの消費動力、切削抵抗および振動などが用いられているが、小径エンドミルを用いた切削ではそれらの信号が弱い場合、実用に供されていない。

筆者らはこれまで CCD カメラを用いた可視化の研究によって、高速切削中の小径エンドミルの工具破損は動的な投影画像によって破損前の予測が可能である特徴を見いだした⁵⁾。従って、切削条件、撮影条件および画像の特性間の関係を明らかにすることが重要である。

本稿では、切削中の小径エンドミルの投影画像の挙動を

測定し、切削抵抗の推定や破損の予知および工具摩耗による寿命判定を行う工具挙動監視システムを構築することを目的とする。このシステムは画像撮影システムと挙動計測システムから構成されている。画像撮影システムによる良質な画像は、基本的には高速回転中の小径エンドミルの投影画像をインプロセスに測定し、その特性を明らかにすることで得られた。また、挙動計測システムは切削中の小径エンドミルの工具挙動をインプロセスに可視化し、その画像の微少な変形挙動を画像から取り出す手法で明らかになった⁶⁾。

さらに、静的荷重による工具の撓みをこの工具挙動監視システムで測定して、工具切削部における断面2次元モーメントの推定が可能となった。これによって、撓み測定から抵抗値を推定することができる。

2. 画像撮影システムとシステム応答遅れの影響

2.1 画像撮影システムの原理

照明はバックライトの位置で、50mmの標準レンズに接写リングを装着した CCD カメラによって工具を撮影する。撮影した画像を画像処理装置に送り、工具の画像幅と工具中心の値を投影画像の2値化によって測定する。

図1は撮影原理を示している。図1の(b)に示されているように反射テープが工具のホルダに貼られている。工具の回転中、レーザセンサがその反射テープを検出したら、CCD カメラのシャッターを開くためのトリガ信号を発生させる。これにより回転するエンドミルのある円周方向における撮影位置で、エンドミルの投影画像が得られることになる。そこで、トリガ信号

* 原稿受付 平成16年8月11日

** 正 会 員 鹿児島高専(鹿児島県始良郡隼人町真孝1460-1)

*** 南京航空航天大学機電学院(中国南京市御道街29号)

**** 正 会 員 熊本大学工学部(熊本市黒髪2-39-1)

Fig. 1 Principle of photoing experiment

Fig. 2 Timing chart of signals in the vision system

のタイミングが PLC (Programmable Logic Controller) によって制御されると、目標とした撮影位置でエンドミルの画像が得られる。ここで用いた画像の画素数は 640×480 である。この画像撮影システムは、高い性能を持つデジタル寸法測定器 (精度 $\pm 0.15 \mu\text{m}$) でキャリブレーションを行った結果、1画素 (pixel) は $4.54 \mu\text{m}$ に相当することが分かった。

2.2 システム応答遅れの影響

CCD カメラのシャッタを開けるタイミングは、実際の撮影位置を決定し、直接画像の形に影響を及ぼすことになるため、高速回転するエンドミル撮影の重要な要因の一つである。撮影システム内の各信号発生において、システムの応答の遅れが存在するため、カメラのシャッタを開けるタイミングを正確に決定することは難しい。図 2 は撮影システムにおける信号のタイミングチャートを示す。レーザビームが反射テープによって反射され、レーザビーム検出のタイミングから CCD カメラのシャッタが閉じるタイミングまでのトータル時間は t_t で示される。ここで、 t_p はレーザビーム検出のタイミングからトリガー信号発生までの間の時間 (s) である。もし PLC が用いられたら、 t_p はレーザセンサーの遅れや、PLC の遅れおよび遅延時間を含むことになる。 t_c はトリガー信号発生のタイミングから CCD カメラのシャッタを開けるまでの間の時間 (s)、すなわちカメラの応答遅れの時間を意味する。 t_s はカメラのシャッタ速度 (s) を示している。従って図 1 の (b) に示されるように $t_p + t_c$ の応答遅れの時間にエンドミルは α° 回転し、 t_s のシャッタが開いている時間に更に β° 回転することになる。ここで、 $\alpha + \beta$ の値は主軸回転速度を n rpm とすると、次式で計算することができる。

$$\alpha + \beta = 6n(t_p + t_c + t_s) \quad (1)$$

3. 撮影条件の影響

3.1 照度の影響

バックライトの照度を大きくしていくと、強い光が工具の両端から回り込み、画像の両端が白っぽくなる。そこで 2 値化することによって画像の両端が削り取られ、画像幅が小さくなると推測できる。しかし、照度を小さくしすぎると画像全体のコントラストが悪化し、自動 2 値化ができなくなり正確に画像幅を測ることが不可能になる。

Fig. 3 Effect of light illumination intensity

Fig. 4 Effect of shutter speed

図 3 は $\phi 1\text{mm}$ のボールエンドミルを $n=20000\text{rpm}$ 、 $t_s=1/10000\text{s}$ の撮影条件下で、照度を変化させながら画像幅を測定したものである。パラメータ z は切削先端を $z=0$ として柄部方向への軸位置の値である。いずれも照度の増加とともに直線的に画像幅が減少する傾向にある。円周方向の撮影角度で画像幅は変化するため、撮影角度は不明であるが、画像の二値化が可能な照度であれば、照度は小さい方が実際の寸法に近い値が得られることとなる。

3.2 シャッタスピードの影響

図 4 は直径 2mm のエンドミルを $n=10000\text{rpm}$ で回転中、シャッタ速度が撮影画像に及ぼす影響を示している。与えられた条件に対して、シャッタ速度が $1/200\text{s}$ 、 $1/2000\text{s}$ 、 $1/20000\text{s}$ と早くなるにつれて、 β はそれぞれ 300° 、 30° 、 3° の値となる。3つの条件下でシャッタが開く位置は同じであるが、 β の値が大きい図 4 (a) と (b) はカメラぶれを起こし、画像幅の測定としては不適切である。一般的に β は 6° 以下の値が限界であり、その時高い品質の画像が得られる。

4. 楕円棒によるシステムの応答特性と分布特性

4.1 楕円棒の投影画像

画像撮影システムの応答遅れ特性と画像幅の安定性を調べるために、エンドミルの代わりに幾何学的に解析が容易な楕円棒の画像幅を測定した。位相により画像幅が変化する楕円棒を工具の代わりに用いることで、撮影位置の正確な位相が把握できる。また、外部 PLC を接続し、ラダープログラムでトリガ信号を制御することにより、 $1\mu\text{s}$ 単位で遅延されたトリガ信号を発生させることや、信号のパルス幅および信号間の時間測定が可能になった。

図 5 の座標系 XOY において、 θ 角度の方向から楕円の投影による理論幅 w_0 は、座標系 xOy における $(\delta_0 + \theta)$ 方向からの投影幅と同様である。つまり、 w_0 は座標系 xOy における $(\delta_0 + \theta)$ 方向における 2 本の接線間の距離である。従って投影画像幅 w_0 は $2a=1.5\text{mm}$ と $2b=2.5\text{mm}$ であるから次式で示される。

Fig. 5 Theoretical projection Image width of ellipse bar

$$w_0 = 0.5\sqrt{9 + 16\sin^2(\delta_0 + \alpha + \beta + \theta_w)} \quad (2)$$

但し、 θ_w は一周期 $0 \leq \theta_w \leq \pi$ の相対的撮影角度である。そこで、 δ_0 と $\alpha + \beta$ が求められると楕円棒装着位置と応答特性の推定が可能となる。

また、式(2)より次式が導かれる。

$$\delta_0 + \alpha + \beta + \theta_w = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{w_0^2 - 2.25}}{2} \right) \quad (3)$$

式(3)より楕円棒の画像幅が分かれば、撮影位置が求められることになる。

4.2 装着位置と応答特性の推定

図6は撮影角度を変化させたときの平均工具画像幅の変化を示す。システムの応答遅れやシャッタ速度による回転角が生じるため、工具装着位置の推定は困難である。そこで、システムの応答遅れによる影響を無くするために、工具の回転速度をできるだけ遅くする必要がある。またシャッタ速度の影響を少なくするためには、シャッタ速度を早くする必要がある。そこで、撮影条件 $n=15\text{rpm}$ と $t_s=1/20000\text{s}$ でトリガ信号を $50000\mu\text{s}$ (位相にして 4.5°) ずつ遅延させた条件で、それぞれ画像幅を100回繰り返し測定した。この条件の場合、式(1)より $\alpha + \beta$ の値は0に近い値となり、システムの応答遅れやシャッタ速度による影響を無視することができる。そこで、図中の実線で示されている基準楕円幅と、○印で示されている測定画像幅(平均値)との位相差は δ_0 の値と見なすことができる。最小二乗法により式(2)で測定画像幅のデータを近似すると、楕円棒装着位置は $\delta_0 = 30.182^\circ$ と推定された。

次に撮影条件 $n=5000\text{rpm}$ と $t_s=1/20000\text{s}$ で、トリガ信号を $150\mu\text{s}$ (位相にして 4.5°) ずつ遅延させた条件で、それぞれ画像幅を100回繰り返し測定した。主軸の実回転周期の平均値は $11981.43(\mu\text{s}/\text{rev})$ であるので、回転速度に直すと 5007.75rpm となる。それ故、 $150\mu\text{s}$ の遅延時間で、主軸が約 4.507° 回転することになる。上述の条件で 4.507° ずつ相対角度 θ_w を変えたときの測定画像幅(平均値)を図6に●印でプロットし、重ね合わせた。基準楕円の画像幅と測定画像幅との位相差が $\delta_0 + \alpha + \beta$ の値となるので、式(2)より最小二乗法により測定画像幅のデータを近似すると次式となる。

$$w_0 = 0.5\sqrt{9 + 16\sin^2(\delta_0 + \alpha + \beta + \theta_w)} = 0.5\sqrt{9 + 16\sin^2(38.080^\circ + \theta_w)} \quad (4)$$

即ち、 $\delta_0 + \alpha + \beta = 38.080^\circ$ となる。そこで、 $\delta_0 = 30.182^\circ$ であるので、 $\alpha + \beta = 7.898^\circ$ と $n=5007.75\text{rpm}$ を式(1)に代入すると全システムの応答遅れは次式となる。

Fig. 6 Mean image width in the different picturing direction

Fig. 7 Distribution of image width

Table 1 Distribution of image width and picturing direction

Picturing condition	n=10000rpm t _s =1/10000s		n=20000rpm t _s =1/20000s	
	Without PLC	With PLC	Without PLC	With PLC
Mean mm	1.8878	1.9614	2.0715	2.2055
Standard deviation μm	13.67	17.84	23.74	29.33
Picturing direction	34.968	39.187	45.587	53.942

$$t_c + t_p + t_s = 263 \times 10^{-6} \text{ s} \quad (5)$$

ここで、 $t_s=50\mu\text{s}$ であるので、この画像撮影システムにおけるシステム応答遅れ(t_p+t_c)は $213\mu\text{s}$ となる。

4.3 画像幅の分布特性

主軸回転速度やシステムの応答遅れなどの変動のため、画像幅の測定値にはバラツキが生じることになる。外部 PLC を用いる場合と用いない場合について、画像幅の測定値の分布特性を把握する必要がある。そこで、主軸回転速度とシャッタ速度を変えて、画像計測システムにおけるレーザセンサからのトリガ信号を、外部 PLC を用いる場合と用いない場合の二つの方法で、画像幅を測定した。外部 PLC には遅延時間を設定していない。

図7は画像幅を1000回測定した分布図である。画像幅の変動は、図中の実線で示されているようにほぼ正規分布で示されている。シャッタ速度はそれぞれの回転速度で β を 6° とする撮影条件となっている。表1は画像幅の分布特性と撮影された角度を示す。外部 PLC を用いた場合の標準偏差は、用いない場合のそれより、どの主軸回転速度においても大きくなる。また、撮影角度は平均画像幅をもとに式(3)で算出できるため、それぞれの撮影角度は表1のようになる。外部 PLC を用いない場合と用いた場合の撮影角度の差は、 $n=10000\text{rpm}$ の場合 4.219° 、 $n=20000\text{rpm}$ の場合 8.355° となる。これをそれぞれ応答遅れ時間として算出すると、 10000rpm

Fig. 8 Distribution of image width in the different picturing direction

Fig. 9 Accumulative mean image width measured

の場合 $70.3 \mu s$ 、 20000rpm の場合 $69.6 \mu s$ となる。二つの結果から外部 PLC を接続することにより、約 $70 \mu s$ の遅れが発生していることが分かる。このことより、レーザセンサーの応答遅れとカメラの応答遅れを加えた値は $143 \mu s$ と推測できる。

4.4 撮影角度による画像幅分布

主軸回転速度が大きくなるにつれて画像幅の分布が広くなることが分かったため、システムの変動時間を評価する必要がある。 $t_s=1/20000 \text{s}$ で各主軸回転速度において、トリガ信号を位相にして 4.5° ずつ遅延させた条件で、それぞれ同一撮影位置における画像幅を 100 回繰り返し測定した。

図 8 は $n=20000 \text{rpm}$ における画像幅の変動の分布を示している。主軸回転速度が増加するにつれてその変動の値は増加するため、画像幅の変動は大きくなる。この条件における変動の位相差 $\Delta \theta$ の値を求めると、約 7.2° である。この変動の位相差を時間で表すと約 $60 \mu s$ となる。このことにより、システム変動の時間は $\pm 30 \mu s$ と推定できる。

5. エンドミルの画像計測

5.1 画像幅の平均値

画像の測定にはシステムの遅れなどが起因して画像値に変動があるが、平均値をとることによって、信頼性の高いデータが得られることが分かった。そこで、静止したねじれ角 30° のエンドミルを $t_s=1/20000 \text{s}$ の撮影条件で、画像幅を 1000 回測定した。図 9 はデータ数とそのデータまでの平均画像幅の関係を示している。この画像計測システムの繰り返し精度は約 $\pm 4.54 \mu m$ (1 pixel) であるが、測定回数を増やしその平均をとることにより、 $\pm 1 \mu m$ 以内の精度を維持することができる。100 個以上のデータから平均をとることにより、 $\pm 0.5 \mu m$ 以下の精度に保つことが可能である。これは統計学上の標本平均の分布から明らかである。

これらの結果を基に、直径 1mm のエンドミルを撮影条件 $n=$

Fig. 10 Projection image of squared end mill (2 flutes)

Fig. 11 Mean image width of relative picturing direction at different axial position

Fig. 12 Deviation of center in the different picturing direction

200rpm 、 $t_s=1/4000 \text{s}$ で、PLC の遅延時間の設定によって 6° ずつ撮影角度を増分させながら、切刃先端からの軸位置 z をパラメータとして、画像幅をそれぞれ 100 回繰り返し測定した。

図 10 は撮影角度による投影画像である。各撮影角度におけるエンドミル工具の特徴あるシルエットが見られる。図 11 は撮影角度における画像幅の関係を示す。使用したエンドミルは 2 刃のため、軸位置にかかわらず半円周の周期で、正確に画像幅は変化している。刃先先端からの軸位置 z の違いによっても規則性のある精度の高い画像幅が得られている。

CCD 画像はシステムの応答遅れなどによる分布特性のため、エンドミル工具の切削状態の監視と制御にはほとんど用いられない。しかしこれらの基準データをもとに切削中の工具のねじれによって生じる画像幅の変化を検出できれば、ねじれによる工具挙動の監視に役立つものと考えられる。

5.2 画像中心の平均値の変動

画像の中心位置の測定には、投影画像の左右の画素座標の値の中央値が求められる。そのため画像値に変動があるが、平均値をとることによって、信頼性の高いデータが得られる。そこで、PLC の遅延時間の設定によって 9° ずつ撮影角度を増分させ

Fig. 13 geometrical model of end mill

ながら、切刃先端から軸方向に $z=2\text{mm}$ の箇所における画像幅の中心位置を 100 回繰り返し測定した。図 12 は各撮影位置における画像幅の中心値の平均を実線で示したものである。各撮影位置における中心値の変動は黒塗りの●印で示している。他の撮影条件でも同様な形状の傾向を示しており、再現性の高いデータが得られている。また撮影角度と軸方向の工具位置を同一とすれば、精度の高い工具中心位置が得られることが判断される。図 12 の平均画像中心の変動は工具自体の加工精度や取り付け精度などによるものと考えられる。

6. 小径エンドミルの撓み解析と抵抗予測

6.1 撓み曲線の解析

切削中の小径エンドミルの特徴は、切削力が小さいことと変形しやすいことである。従来の方法では工具挙動を容易に監視できない。そこで、エンドミルの変形状態から切削抵抗を推定する手法が有効である。切削中の工具中心の値を精度よく求めることによって、工具の撓みから切削抵抗を正確に算出できる。従って静的な荷重における撓みの関係から、刃先からの軸位置 z におけるコンプライアンスの値を求め、理論的な撓み曲線の解析を行った。この解析によって切刃部の断面二次モーメントを推定する手段が可能となった。

図 13 は使用したエンドミルの幾何学的な形状モデルである。このモデルの左端を固定端と考えた片持ち梁として、理論的な撓み曲線の解析を進めていくこととする。図中の E_1, I_1 と E_2, I_2 は、切刃部と柄部におけるそれぞれの縦弾性係数と断面二次モーメントを示す。また l_c は相当切刃部の長さ、 L は工具ホルダからの突出量である。切刃先端から軸方向に任意の位置 z におけるコンプライアンス δ/F の値は次式で示される。

$0 \leq z \leq l_c$ の時

$$\frac{\delta}{F} = \frac{1}{6E_1I_1} z^3 - \left(\frac{l_c^3}{2E_1I_1} + \frac{L^2 - l_c^2}{2E_2I_2} \right) z + \left(\frac{l_c^3}{3E_1I_1} + \frac{L^3 - l_c^3}{3E_2I_2} \right) \quad (5)$$

そこで、係数を次のようにおく。

$$\begin{cases} a = \frac{1}{6E_1I_1} \\ b = -\left(\frac{l_c^2}{2E_1I_1} + \frac{L^2 - l_c^2}{2E_2I_2} \right) \\ c = \left(\frac{l_c^3}{3E_1I_1} + \frac{L^3 - l_c^3}{3E_2I_2} \right) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $E_1=E_2=E$ とすると、式(6)の b と c の二つの式を連立方程式として l_c と I_1 を求めると次式でそれぞれ表される。

$$\therefore l_c = \frac{3Ec - \frac{L^3}{I_2}}{-2Eb - \frac{L^2}{I_2}} \quad (7)$$

Fig. 14 Deflection against static load

Fig. 15 Static compliances in the axial direction

$$\therefore I_1 = \frac{I_2 l_c^2}{-2EbI_2 - L^2 + l_c^2} \quad (8)$$

式(7)と(8)が断面二次モーメントを推定する際に反復の式として用いられる。

6.2 静的荷重による工具撓みと抵抗予測

工具中心の値が高い精度で得られることから、小径工具の工具挙動を把握するために、工具の撓みを測定することは有効な手段の一つである。図 14 は切刃先端から軸方向の位置 z をパラメータとして、静的荷重と工具の撓みの関係を示す。この撓みはエンドミル静止状態、 $t_s=1/20000\text{s}$ の撮影条件で 100 回測定した平均の値である。撓みは理論曲線で示されるように、荷重に比例している。他の直径についても同様な関係である。

図 15 は工具直径をパラメータとして、刃先からの軸位置 z とコンプライアンスの関係を示す。式(5)で示されるように三次曲線の関係となっている。エンドミルの各直径における断面二次モーメントの推定によって、式(5)のコンプライアンスの式を用いて、工具中心の撓みから抵抗値が算出できる。

撓みの理論解析の式を使って、最小二乗法などによってエンドミルの各直径におけるコンプライアンスの式を求めるアルゴリズムを図 16 に示す。ここでは相当直径比 ξ を導入して切刃部の断面二次モーメント I_1' を求め、最小二乗法によって b と c の値を算出する。さらに式(7)と(8)より相当切刃部の長さ l_c と断面二次モーメント I_1 を求め、 $I_1 - I_1'$ の値が収束条件以下に収束するまで ξ の値を変更する。ここで、 $E=580\text{GPa}$ 、 $I_2=3.976\text{mm}^4$ 、 $L=20\text{mm}$ の値が代入されている。

収束条件 $I_1 - I_1' \leq 0.0001$ を満たした際のコンプライアンスの式を表 2 に、また相当直径比や断面二次モーメントの推定値を表 3 に示す。直径 1.0mm、1.6mm、2.0mm のエンドミル切刃部の断面二次モーメントは、それぞれ 0.0253、0.1688、0.3256 mm^4 と推定された。また、式(7)から求められた相当切刃部の長さの計算

Fig. 16 Flow chart for presumption of geometrical moment of inertia

Table 2 Expressions of static compliance

Diameter mm	Expressions of static compliance in the axial direction μ m/N
1.0	$\frac{\delta}{F} = 1.121 \times 10^{-2} z^3 - 2.856z + 17.86$
1.6	$\frac{\delta}{F} = 1.703 \times 10^{-3} z^3 - 1.086z + 10.68$
2.0	$\frac{\delta}{F} = 8.822 \times 10^{-4} z^3 - 0.836z + 9.924$

Table 3 Presumption of geometrical moment of inertia

Diameter mm	Geometrical moment of inertia I_1 mm ⁴	Equivalent diameter ratio ξ	Equivalent length of tool diameter l_c mm	Length of tool diameter l_m mm
1.0	0.0253	0.850	9.049	About 10
1.6	0.1688	0.851	14.294	About 15
2.0	0.3256	0.803	17.555	About 17

値は、刃先先端から切刃部と柄部の境界までの長さ l_m に、ほぼ等しい値となっている。このことからエンドミル切刃部の断面二次モーメントの推定は、ほぼ正しい値を示していると思われる。相当直径比は直径 1.0 と 1.6mm の場合約 0.85、直径 2.0mm の場合約 0.80 の値を示している。直径が小さいほど強度上フルーツ部よりランド部の割合が大きくなっているものと思われる。

図 17 は実際の荷重と工具中心の撓みから推定された抵抗値の関係を示す。実線は実際の荷重と推定された力の一致する値を示している。各工具径とも実際の荷重と推定された力は、ほぼ等しい値を示している。各工具のコンプライアンスの式を用いて撓みの測定から抵抗値を推定できることになる。

Fig. 17 Presumption of force by means of deflection

7. 結 言

工具挙動監視システムを構築し、そのシステムの特徴を明らかにすると共に、高速回転中の小径エンドミルの工具挙動をインプロセスに可視化し、その画像の計測方法や性能などを実験的に検討し、次のような結果が得られた。

- (1) 画像の2値化という観点から、光源の照度は、ある上限と下限を持ち、その範囲内でなければ画像の認識は不可能であるが、なるべく下限の方が実際の寸法に近くなる。
- (2) 工具の画像を正確に撮影するためには主軸回転速度に応じてシャッタ速度を選択しなければならない。一般的に、両者の積が小さいほど正確な画像が得られる。
- (3) 装着位置が推定されたことから、画像計測システムの応答遅れの平均値は約 213 μs であることが推定された。
- (4) 外部 PLC を接続することによりシステム応答遅れは接続しない場合と比べ約 70 μs の差がある。
- (5) 回転速度が大きくなるにつれて、システムの応答遅れなどのために画像幅の変動は大きくなるが、その分布は正規分布である。また、画像計測システムの測定変動は約 ±30 μs と推定される。
- (6) 工具画像幅や中心値は、測定を繰り返しその平均値によって、信頼性の高い測定データが得られる。
- (7) 撓みの理論解析の結果、切刃部の断面二次モーメントの値が推定できた。工具挙動を監視するために、工具中心の撓みを測定することは有効な手段の一つである。

参 考 文 献

- 1) SRINIVASA P P, RAMAKRISHNA R P K: Acoustic Emission Analysis for Tool Wear Monitoring in Face Milling. Inter J of Production Research, **40**, 5 (2002) 1081.
- 2) LEE B Y, LIU H S, TANG Y S: Monitoring of Tool Fracture in End Milling Using Induction Motor Current. Journal of Materials Processing Technology, **70**, 3 (1997) 279.
- 3) TANSEL I, TRUJILLO M, NEDBOUYAN A. et al: Micro-End-Milling-III. Wear Estimation and Tool Breakage Detection Using Acoustic Emission Signals. Inter J of Machine Tools & Manufacture, **38**, 12 (1998) 1449.
- 4) TANSEL I N, BAO W Y, MAHENDRAKAR N, et al: Tool Wear Monitoring in Micro-End- milling Operations by Using Genetic Algorithms, Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks, **9**, (1999) 1107.
- 5) KAWANO Y, MINAMI A, YOSHIMITSU S, et al: Behavior Monitoring of Small-Diameter Milling-Cutter during High-Speed Milling, Key Engineering Materials, **259-260**, (2004) 165.
- 6) 河野良弘, 左敦穂, 小倉拓, 山下俊一, 引地力男, 吉満真一: 回転工具の実撮影位置に関する研究, 精密工学会大分地方講演会講演論文集, (2003) 11.