2 台の ITV カメラと画像処理による ドリル損耗の自動測定*

山 品 元** 奥 村 進** 熊 本 博 光**

Automated Measurement of Drill Wear and Chipping by Two ITV Cameras
and Image Processing Techniques

Hajime YAMASHINA, Susumu OKUMURA and Hiromitsu KUMAMOTO

An automated measurement method of drill wear and chipping is developed for applications to machining centers. Two ITV cameras are used. A global image via the first ITV camera is used to rotate the drill for a major cutting edge to be a central vertical line in each of three detailed images via the second camera. The second camera, in turn, focuses automatically towards a potentially affected small region of the drill, the three detailed images are inputted into a computer, and failed portions are extracted by image processing techniques. One or two dimensional quantities such as wear width, chipping width, and failed portion area are determined successfully together with three dimensional shapes as drill surface contours. Lighting directions are determined in such a way as a diffuse component dominates a specular reflection and the failed portions are more illuminated than normal portions.

Key words : drill wear and chipping, optical measurement, image processing, auto-focusing mechanism, three dimensional measurement

1. 緒 論

機械加工において工具の損耗は、機械の損傷、不良品の発生、寸法精度と仕上げ面粗さの劣化などを引き起こす。これらを防止するには、工具損耗モニタリング技術の開発が重要である。

著者らは既にスローアウェイチップに対して、ITV カメラと画像処理による工具損耗モニタリング装置を開発している¹⁾。本研究ではドリルの損耗を対象にする。折損を別にすれば、ドリルの損耗は摩耗と欠損(チッピングも含む)に分けられる。摩耗の直接測定法としては、ITV カメラによる方法、アイソトープによる方法、間接測定法としては、切削抵抗による方法、工具と工作物の相対位置計測による方法がある²⁾³⁾⁸⁾。欠損に対しては、切削抵抗、主軸モータ電流、振動、音、AE による間接測定法^{2)~7)}があるが、直接測定法はないようである。

ITV カメラによる従来⁸⁾の方法では、欠損は考えていない。また、測定量は外周コーナ摩耗幅だけである。画像処理手法を駆使し、照明法を工夫すれば、3次元形状をも含めたより高度な損耗検知が可能になるとと思われる。アイソトープ法は、工具の加工を必要とする。その他の方法は、間接測定であることおよび実際の現場では雑音が多いことのため、精密測定には適さない。

本研究では、マシニングセンタのような多くの工具をかついだ工作機械を想定し、ITV カメラと画像処理により、ドリル損耗の検知を行う。まず、1台目のITV カメラからの広域画像をもとに、ドリルの軸回転により、主切れ刃の方向を調整する。次に、損耗の生じうる位置へ2台目のカメラの焦点を自動的に合わせ、適切に照明された詳細画像をオンラインで計算機処理する。この方法は、人間の目を機械の目に置き換えるので、連続的に進行する摩耗だけでなく、突発的な欠損までも、非接触で高精度に測定できると期待される。チゼルエッジ、主切れ刃、外周コーナ、および外周コーナ近傍のマージンに発生した摩耗と欠損を対象にする。

ドリル損耗では従来、1次元または2次元量の測定が主であるが、損耗に関するより詳しい情報を得るために

* 原稿受付 平成2年3月19日。1989年度精密工学会春季大会学術講演会(平成元年3月23日)にて発表

** 正会員 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)

Fig. 1 Outline of experimental apparatus

は、損耗の立体形状をも対象とすることが望ましい。そこで、損耗量の測定を以下の二つに分けて研究する：

- (1) 損耗部分の摩耗幅、欠け幅、面積という1次元量と2次元量の測定、
- (2) 損耗部分の立体形状という3次元量の測定。

なお、ある単位的な切削作業を終え、ドリルを特定位置に戻し、付着した切りくず等を高圧空気で吹き飛ばした後に、損耗検知を開始するものとしている。

2. 実験装置

図1の実験装置を製作した。工具台の回転軸とドリル軸が一致するようにドリルを置く。工具台中心の垂直上方にカメラCA₁とリング状のハロゲン照明装置L₁₁を設置する。CA₁は固定焦点でドリル先端部をとらえる。

カメラCA₂は、これを乗せた雲台（水平面内、および鉛直面内で回転可能）の制御により、ドリル切れ刃とその近傍の画像をとらえる。CA₂は、撮影レンズ付きのオートフォーカス機構、マクロレンズ、およびCCDから成る。マクロレンズは、損耗検知を行うのに十分な大きさの画像を得るためのものであり、オートフォーカス機構とCCDの間に組み込まれている。点状の照明装置L₂₁, L₂₂, L₂₃は、チゼルエッジと主切れ刃の近傍を照らす。光源はハロゲンランプである。なお、外周コーナとその近傍のマージンに対しては、別の点状照明装置L₃₁, L₃₂, L₃₃を用いる。ドリルから反射した光を、CCD

でアナログ電気信号にし、さらにその信号をA/D変換（256階調、画像の大きさ256×256画素）した後、計算機に入力する。ドリル軸とチゼルエッジとの交点位置、CA₁とCA₂の撮像面の中心位置、CA₂の回転中心位置などは容易に計算できる。

3. カメラCA₂への詳細画像の入力

3.1 画像入力方向と損耗検知の解像度

損耗発生部位のすべてを1枚の画像で扱おうとすると、画像の入力対象範囲が大きくなり過ぎて、検知精度が劣化する。そこで、1本のドリルにつき、損耗検知部位を次の二つの部分に分けて扱う：

- (i) チゼルエッジと主切れ刃の組（2組）
- (ii) 外周コーナとその近傍のマージンの組（2組）

チゼルエッジと主切れ刃に対しては、図2(1)の斜線部を入力するが、一方の主切れ刃が画像内で鉛直になるようドリルを軸回転する。また、この主切れ刃の逃げ面側接平面とCA₂の視軸を直交させる。外周コーナとその近傍のマージンに対しては、図2(2)の斜線部を入力するが、この際にも主切れ刃が画像内で鉛直となるようドリルを軸回転する。また、外周コーナ近傍でのマージン側接平面とCA₂の視軸は直交させる。結局、1本のドリルにつき、総計4組の損耗検知部位があるので、4方向から画像を入力することになる。

チゼルエッジと主切れ刃に発生した損耗の解像度は、主切れ刃長さを l_m 、チゼルエッジ長さを l_c 、チゼル角

Fig. 2 Potentially affected target regions

を θ_c 、ドリル先端角を α_c 、入力画像でチゼルエッジと主切れ刃が占める縦方向画素数を N_v とすれば、次となる。

$$(l_m - l_c \cos \theta_c \sin(\alpha_c/2))/N_v \quad (1)$$

外周コーナとその近傍のマージンに発生した損耗の解像度は、マージン幅を t_m 、入力画像でマージン幅が占める横方向画素数を N_h とすれば、次となる。

$$t_m/N_h \quad (2)$$

3.2 主切れ刃方向の調整と視軸移動

マシニングセンタなどにおいては、ドリル先端位置は主切れ刃の方向を除いて既知である。図2の範囲を CA_2 で入力するに際して、ドリルを軸回転し、主切れ刃が画像内で鉛直になるようにする。このために、 L_{11} のみを点灯し、 CA_1 からの広域画像により軸回転量を調整する。これは、次の各段階からなる。

(i) ドリル溝部の抽出

図3に CA_1 からの入力画像の一例を示す。この種の入力画像を、点 (x, y) における濃淡値 $I_{11}(x, y)$ ($x, y = 1, 2, \dots, 512$)で表す。図において、ドリル部分 D に着目したとき、溝部の濃淡値は、それ以外の部分と比較して小さくなっている。そこで、2値画像 $I_{12}(x, y)$ を次で定義する。ここに、 Th はあるしきい値である。

$$I_{12}(x, y) \equiv \begin{cases} 1, & \text{if } \{(x, y) | I_{11}(x, y) \in D\} \text{ AND } I_{11}(x, y) \leq Th \\ 0, & \text{上記以外} \end{cases} \quad (3)$$

この結果、 $I_{12}(x, y) = 1$ となる点 (x, y) の集合として、2個の溝部が抽出でき、それらを D_i ($i = 1, 2$)とする。 D_i の外周輪郭 $\overline{D}_i$ を図4に示す。

(ii) ドリルの回転

輪郭 $\overline{D}_i$ において、主切れ刃とそれ以外の部分は、それぞれ直線と曲線とから成る。外周輪郭点にハフ変換⁹⁾を行い、各 $\overline{D}_i$ に対して1本の直線 L_i ($i = 1, 2$)を抽出する； L_i は主切れ刃に一致すると考えてよく、これを基にドリル軸回転量を決定する。

Fig. 3 Image example by light L_{11}

Fig. 4 External contours of drill flute

(iii) CA_2 の視軸移動

雲台を自動的に回転移動させ、 CA_2 の視軸を主切れ刃の逃げ面側接平面と直交させる。続いてオートフォーカス機構により、 CA_2 の焦点を合わせる。

4. 損耗の測定方法

4.1 1ならびに2次元量の測定と照明方向

4.1.1 損耗部分の幅、長さ、面積の測定

カメラ CA_2 で撮影した画像を $I_{21}(x, y)$ とする。画像 $I_{21}(x, y)$ は、正常部分 D_n 、損耗部分 D_f 、およびドリル以外の部分 D_e から成っている。ここで、 D_n における濃淡値の最大値を I_n 、 D_f における濃淡値の最小値を I_f 、 D_e における濃淡値の最大値を I_e とする。 D_e では光を反射しないので

$$I_n \geq I_e \quad (4)$$

である。そこで照明方向を

$$I_f > I_n \quad (5)$$

となるように決定する。2値画像 $I_{22}(x, y)$ を

$$I_{22}(x, y) \equiv \begin{cases} 1, & \text{if } I_{21}(x, y) \geq I_f \\ 0, & \text{上記以外} \end{cases} \quad (6)$$

と定義することにより、 $I_{22}(x, y) = 1$ となる点 (x, y) の集合として損耗部分 D_f を抽出できる。この D_f に対して、1次元量として損耗部分の幅と長さ、2次元量として損耗部分の面積を算出する。

4.1.2 ドリル表面の反射特性モデル

式(5)を満たす照明方向を考察するに先立ち、光源の強さとドリルからの反射光の強さとの関係を明らかにする。ドリル表面の反射特性として、Phongのモデル¹⁰⁾を採用する。このモデルによれば、ドリル表面の散乱反射から鏡面反射までを一般的に表現でき、図5のようにドリル表面上の任意の点を A とすれば、この点 A の輝度 I_a は次式となる。

$$I_a = \{(R_a(1 - d_a) \cos i_a + d_a) + W(i_a) \cos^n e_a\} I_s \quad (7)$$

Fig. 5 Definitions of angles i_p, e_p, g_p and h_p

ここに、各記号は次で定義されている。

R_a : 点 A におけるドリル表面の反射係数
($0 \leq R_a \leq 1$)

d_a : 周囲の散乱反射係数 ($0 \leq d_a \leq 1$)

i_a : 点 A での法線と入射光線とのなす角度

$W(i_a)$: 鏡面反射と散乱反射との比率を表す係数
($0 \leq W(i_a) \leq 1$)

n : 鏡面反射のための指数

e_a : 反射光と視線のなす角

I_s : 光源の輝度

点 A の輝度は、周囲の明るさの影響を受けず、 $W(i_a)$ は i_a によらず一定値 W_a とすれば、式 (7) は

$$I_a = I_s R_a \cos i_a + I_s W_a \cos^n e_a \quad (8)$$

となる。右辺第 1 項はドリル表面の散乱反射、第 2 項は鏡面反射によるものである。

図 5 において、 g_a を点 A での法線と視線のなす角、 h_a を入射光線と視線のなす角とすれば、

$$\cos e_a = 2 \cos i_a \cos g_a - \cos h_a \quad (9)$$

であるので、式 (8) は次となる。

$$I_a = \{R_a \cos i_a + W_a(2 \cos i_a \cos g_a - \cos h_a)^n\} I_s \quad (10)$$

点 A での入射光線、反射光線、法線、視線の単位ベクトルを図 5 に示すように s_a, r_a, n_a, v_a とすれば、

$$I_a = [R_a(n_a, s_a) + W_a\{2(n_a, s_a)(n_a, v_a) - (s_a, v_a)\}^n] I_s \quad (11)$$

と書ける。ここに、 (a, b) は a と b の内積を表す。

4.1.3 主切れ刃の照明方向

一例として、主切れ刃に発生した損耗に対し、その照明方向を考える。チゼルエッジ、外周コーナとその近傍のマーヅンについても同様に考察できる。1) 光源からの光は均一な平行光線である、2) カメラ CA₂ に入射する光は光源からの直接光のみである、3) カメラ CA₂ は

Fig. 6 Definitions of direction vectors

ドリルから十分離れている、と仮定する。観測される像はドリルの正射影となる。

図 6 において、一方の主切れ刃の逃げ面側接平面を考え、これのある右手座標系の XY 平面とする。カメラ CA₂ の視線は Z 軸に一致する。主切れ刃逃げ面側近傍の正常な任意の点を P とし、主切れ刃に発生した損耗部分の任意の点を Q とする。視線ベクトル v_p, v_q 、および点 P での法線ベクトル n_p は Z 軸方向であると考えてよい：

$$v_p = v_q = n_p = (0, 0, 1) \quad (12)$$

いま、点 Q での法線ベクトル n_q は、点 P での法線ベクトル n_p を Y 軸回りに α_q 、Z 軸回りに β_q だけ回転させた状態にあるとする。入射光線の単位ベクトル $s_p = s_q$ は、Z 軸方向の単位ベクトルを Y 軸回りに γ 、Z 軸回りに δ だけ回転させた状態にあるとする。このとき次の関係を得る：

$$n_q = (\sin \alpha_q \cos \beta_q, \sin \alpha_q \sin \beta_q, \cos \alpha_q) \quad (13)$$

$$s_p = s_q = (\sin \gamma \cos \delta, \sin \gamma \sin \delta, \cos \gamma) \quad (14)$$

$$r_p = (n_p, s_p) n_p - s_p \quad (15)$$

$$r_q = (n_q, s_q) n_q - s_q \quad (16)$$

$$0 \leq \alpha_q \leq \frac{\pi}{2}, -\pi \leq \beta_q \leq \pi, 0 \leq \gamma \leq \frac{\pi}{2}, -\pi \leq \delta \leq \pi \quad (17)$$

損耗部分 D_f の濃淡値が最小値 I_f となる点を Q^* とし、この点における角度 α_q, β_q をそれぞれ α_q^*, β_q^* と記す。これらの角度は予備実験から決定できる。

さて、式 (8) において

$$R_a \cos i_a \gg W_a \cos^n e_a \quad (18)$$

なる角度 i_a から照明すれば、式 (11) は次のように簡略化でき、散乱反射成分が支配的となる。なお、角度 i_a の範囲は予備計算と予備実験とからわかる：

$$I_a = I_s R_a (n_a, s_a) \quad (19)$$

このとき、式 (5) は次のようになる。

$$\cos(\beta_q^* - \delta) \tan \gamma > \tan \frac{\alpha_q^*}{2} \quad (20)$$

予備計算により、式 (20) を満たす (γ, δ) から照明すれば、正常部分より損耗部分を明るくできる。

4.2 立体形状の測定と照明方向

立体形状の測定法¹¹⁾には、3 角測量による両眼立体視、規則的パターンを対象物に投影した場合の変形によるパターン投影法¹²⁾、ホログラフィ干渉法¹³⁾、対象物の濃淡情報より 3 次元の傾きを求めるフォトメトリックステレオ法¹⁴⁾等が提案されている。両眼立体視法は、2 枚の画像の対応点を求めるのに多くの計算時間を要する。パターン投影法は、パターンの投影されていない箇所の測定は困難である。ホログラフィ干渉法は、複雑な光学系を必要とする。

式 (19) を基礎とするフォトメトリックステレオ法では、リフレクタンスマップ¹⁴⁾の作成と反射係数 R_a の一様性 $R_a \equiv R$ が必要となる。次に提案する方法によれば、これらの要件が満たされなくても、立体形状が測定できる：式 (19) は、右辺の諸量から I_a を与える式であるが、逆に点 A の輝度 I_a 、光源の輝度 I_s 、入射光線ベクトル s_p から、点 A の反射係数 R_a 、点 A の法線ベクトル n_p を決定できればよい。

図 6 において、ドリル表面の式を $Z = f(X, Y)$ とし、この表面上の点を A とするとき、 n_a が Z 軸に垂直でなければ、

$$\begin{aligned} n_a &= \left(-\frac{\partial f(X, Y)}{\partial X}, -\frac{\partial f(X, Y)}{\partial Y}, 1 \right) \\ &\equiv (-p_a, -q_a, 1) \end{aligned} \quad (21)$$

となる。点 A における s_a を $(-p_s, -q_s, 1)$ とすれば式 (19) は、次のように書ける。

$$I_a = \frac{I_s R_a (p_a p_s + q_a q_s + 1)}{\sqrt{p_s^2 + q_s^2 + 1} \sqrt{p_a^2 + q_a^2 + 1}} \quad (22)$$

式 (22) で、未知数は p_a, q_a, R_a の 3 個であるから、これらに関する三つの独立な式を得るためには、3 方向からドリルを照明すればよい。3 方向の光源の輝度と位置ベクトル、および点 A の輝度をそれぞれ $I_{si}, (-p_{si}, -q_{si}, 1), I_{ai} (i = 1, 2, 3)$ とすれば、

$$I_{ai} = \frac{I_{si} R_a (p_a p_{si} + q_a q_{si} + 1)}{\sqrt{p_{si}^2 + q_{si}^2 + 1} \sqrt{p_a^2 + q_a^2 + 1}} \quad (23)$$

となり、連立させることにより

$$\begin{aligned} p_a &= \frac{b_{ij} c_{ik} - b_{ik} c_{ij}}{a_{ij} b_{ik} - a_{ik} b_{ij}} \\ q_a &= \frac{a_{ij} c_{ik} - a_{ik} c_{ij}}{a_{ij} b_{ik} - a_{ik} b_{ij}} \end{aligned} \quad (24)$$

$$i, j, k = 1, 2, 3 \quad (i \neq j \neq k \neq i) \quad (25)$$

(i) Case of detecting chisel edge and major cutting edge failures (ii) Case of detecting outer corner and margin failures

Fig. 7 Arrangement of ITV camera CA₂ and lighting devices

を得、損耗の立体形状が測定できる。ここに、

$$\begin{aligned} a_{ij} &= I_{ai} I_{sj} d_i p_{sj} - I_{aj} I_{si} d_j p_{si} \\ b_{ij} &= I_{ai} I_{sj} d_i q_{sj} - I_{aj} I_{si} d_j q_{si} \\ c_{ij} &= I_{ai} I_{sj} d_i - I_{aj} I_{si} d_j \end{aligned} \quad (26)$$

$$a_{ij} b_{ik} - a_{ik} b_{ij} \neq 0 \quad (27)$$

であり、 $d_i > 0$ は次で定義されている。

$$d_i^2 = p_{si}^2 + q_{si}^2 + 1 \quad (28)$$

なお、式 (27) を満足させるためには、

$$q_{si} = t p_{si} \quad (i = 1, 2, 3, t: \text{実数定数}) \quad (29)$$

とならないように、3 方向から照明すればよい。

5. 実験結果

ITV カメラ CA₂ と光源の配置を図 7 に示す。ここで、予備計算と実験により式 (20) と (27) を満たすように配置を定めた。光源 L₂₁ と L₃₁ は 3 次元量のみならず、1 次元と 2 次元量の測定にも用いる。光源 L₂₂, L₂₃, L₃₂, L₃₃ は 3 次元量測定専用のものである。これらの光源を順番にオン・オフし、それぞれ 3 枚の画像を入力する。図 8 に入力画像の一例を示す。同図 (i) は図 2(1) の部分を、(ii) は図 2(2) の部分を撮影したものである。光源 L₃₂ と L₃₃ を点灯した場合の画像については割愛する。(i) の画像の大きさは 9.8 × 9.8 mm (38.5 μm/画素)、(ii) の画像の大きさは 5.7 × 5.7 mm (22.2 μm/画素) である。ドリル径は 15 mm である。図 9 に入力画像 I₁ と I₄ から抽出した損耗部分を示す。部分 (a) によりチゼルエッジから主切れ刃にかけての損耗、部分 (b) により主切れ刃部分の損耗が抽出されている。図 9(ii) はマージン部の損耗である。入力画像 I₁, I₂, I₃ から、図 9(i) の部分 (b) に対応する箇所に対して、3 次元形状を構成した。一例を図 10 に示す。1 目盛は 81.4 μm である。3 次元形状の計算時間

Fig. 8 Examples of the three types of images corresponding to three lights

Fig. 9 Final images and extracted failures

Fig. 10 Three dimensional shape represented as contours

は約 20(ms/画素)(使用計算機: TOSPIX-II)であり, サンプル点がそれぞれ 854 画素の入力画像 I_1, I_2, I_3 に対しては, 総計約 17s であった.

6. 結 論

マシニングセンタのような多くの工具をかついだ加工機械に適用することを想定し, ITV カメラと画像処理によるドリル摩耗と欠損の測定法を開発した. これによって得た結果は, 以下のようにまとめられる.

- (1) 2 台の ITV カメラを用いた. 一方のカメラからの広域画像をもとに, ドリル軸回転量を決定し, 主切れ刃の方向を調節した. 続いて, 損耗の生じる部分へ他方のカメラの視軸と焦点を自動的に合わせ, これからの詳細画像をもとに損耗を検知した.

- (2) 損耗部分の摩耗幅, 欠け幅, 面積という 1 次元量と 2 次元量の測定と, 損耗部分の立体形状という 3 次元量の測定法を開発した.
- (3) 鏡面反射に比べて散乱反射成分が支配的となるような, また損耗部分が正常部分よりも明るくなるような角度条件を導出し, 予備計算による照明方向の決定に用い, 実験での有効性を確認した.

参 考 文 献

- 1) 山品 元ほか: オートフォーカス機構を組み込んだ光計測による非接触工具損傷モニタリング装置の開発, 精密工学会誌, **55**, 8(1989)1403.
- 2) 白石昌武: FMS のためのインプロセス基礎技術—計測監視制御—, 理工企画 (1986)92-94.
- 3) 岩田一明: 切削工具のインプロセス測定, 日本機械学会誌, **82**, 10(1979)1120.
- 4) S.Takata *et al.*: A Sound Monitoring System for Fault Detection of Machine and Machining States, Ann. CIRP, **35**, 1, (1986)289.
- 5) 大宮 毅ほか: アコーティックエミッションによるドリル折損のインプロセス検出, 日本機械学会論文集 (C 編), **51**, 12(1985)3322.
- 6) 櫻村幸辰: ドリル損耗検出に関する研究 (第 1 報)—監視システムの開発—, 精密機械, **50**, 6(1984)939.
- 7) T.Moriwaki: Application of Acoustic Emission Measurement to sensing of Wear and Breakage of Cutting Tool, Bull. Japan Soc. Prec. Engg., **17**, 3, (1983)156.
- 8) 菅野 健ほか: ITV 利用によるドリル刃先摩耗の自動測定 (外周コーナ摩耗幅の測定精度), 日本機械学会論文集 (第 3 部), **44**, 9(1978)3260.
- 9) A.Rosenfeld and A.C.Kak: Digital Picture Processing, Vol.2, Academic Press, Orlando, (1982)121-126.
- 10) B.T.Phong: Illumination for Computer Generated Pictures, Commun. ACM, **18**, 6, (1975)311.
- 11) 杉原厚吉: 立体視, 日本ロボット学会誌, **1**, 4(1983)271.
- 12) 吉沢 徹, 鈴木賢策: 格子パターン投影による三次元形状の自動測定, 精密工学会誌, **53**, 3(1987)422.
- 13) 吉川和男ほか: ホログラフィ干渉法における空間周波数変調を利用した微小変形測定法, 精密工学会誌, **53**, 3(1987)390.
- 14) R.J.Woodham: Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images, Opt. Engg., **19**, 1, (1980)139.