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*

山品 元** 奥村 進** 細江三弥*** 岡村健二郎†

Development of Non-Contact Monitoring Equipment for Detecting Tool Failures
by Optical Measurement Including Auto-Focusing Mechanism

Hajime Yamashina, Susumu Okumura, Kazuya Hosoe and Kenjiro Okamura

Noncontact monitoring equipment for detecting tool failures by optical measurement has been developed for applications to machining centers, turning centers, etc. The equipment consists of: (1) An auto-focusing device for an ITV camera to focus on the failed portions of a tool. (2) A four halogen lamp system for contrasting the failed portions against the normal region. (3) An image processing procedure for extracting failed portions from a composite tool image obtained by lighting the tool from three different axes. (4) An accurate calculating method of quantifying the failures.

Key words: tool failures, noncontact monitoring, optical measurement, image processing, auto-focusing mechanism

1. 緒 論

機械加工の自動化、高能率化が進むなかで、工具の予期せぬ欠損による不良製品の発生や加工機械の損傷、工具摩耗の進行にともなう製品の寸法精度や仕上げ面粗さの劣化などが問題となってきた。これらの問題を解決するためには、工具損傷モニタリング技術の開発が肝要である。この技術を実用化することで、自動化生産ラインの実働時間は向上し、ひいては無人化につなげることが可能となろう。

工具損傷の直接測定法としては機械方式、空気圧方式、電気方式、光学方式などが発表されている¹⁾が、いずれの方式も信頼性、測定精度、切削点への干渉、経済性などの観点から、多くの問題が残されている。一方、間接測定法として、切削抵抗あるいは切削動力の変化をみる力学方式、切削時の振動を測定する振動方式、騒音変化を測定する騒音方式、熱電対などにより切削温度変化を測定する温度方式、工具-工作物の接触抵抗変化などを測定する電気方式などが開発されている¹⁾。しかしながら、実際の現場では雑音が多く、また、弾性変形、熱変形などにともなう工具の刃先位置が移動するなどの理由により、この方法で工具の損

傷状態を精密測定するためには、解決すべき問題が多く残されている。最近、音方式の AE センサによる方法が積極的に研究されているが、AE 信号は工具破損の瞬間しか検出できないため観察が困難で、異常レベルの設定が定めにくいという欠点がある²⁾。直接測定法に分類される光方式の ITV カメラの利用と画像処理による方法は、人間の目による測定を機械の目に置き換えるので、連続的に変化する摩耗はいうまでもなく、突発的な欠損までも非接触で高精度に測定できる。また、雑音の多い現場においても安定した測定ができ、実際の現場での使用に適していると考えられる。

以上のような認識から、本研究では、マシニングセンタ (MC) やターニングセンタ (TC) のような多くの工具をかついだ工作機械に適用すべく、光計測による非接触工具損傷モニタリング装置を開発する。工具損傷の生じる位置へ ITV カメラの焦点を自動的に合わせ、計算機に入力した工具画像をオンラインで処理することにより、工具損傷を検知する。MC や TC では旋削工具、ドリル、フライス工具といった切れ刃形状がまったく異なるものが装着されているため、ITV カメラでそれらの工具の損傷を検知するには、それぞれの工具に適した照明方法と画像処理方法が必要である。本研究では、検知対象を旋削工具に限定する。旋削工具は、スローアウェイチップをシャンクに取り付けたものであるが、シャンク部分の損傷はないものと想定して、スローアウェイチップのみを考える。スローア

* 原稿受付 昭和 63 年 11 月 7 日. 6 th I C P E (昭和 62 年 11 月 12 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)

*** キヤノン (株) (川崎市高津区下野毛 770)

† 正会員 中部大学工学部 (春日井市松本町 1200)

Fig. 1 Outline of experimental apparatus

ウェイチップには種々の形状があるが、最も一般的な三角チップと四角チップのみを対象とする。スローアウェイチップは、すくい面、横逃げ面、前逃げ面、ノーズ、横切れ刃、前切れ刃の各部より構成されており、損傷の発生箇所も多岐にわたる。したがって、これらの箇所には発生する損傷を検知対象とする。ただし、本方法では、ある一つの切削作業を終え、工具を特定の位置に戻し、工具に付着した切りくず等を高圧の空気等で吹き飛ばした後で、工具損傷を検知するものとする。

2. 開発装置の概要

ITVカメラの焦点を工具損傷の生じる位置に合わせ、計算機に入力した工具画像から工具損傷を検知するために、まず、工具台に乗せた複数の工具から、損傷検知の対象となる工具(被検工具)を選択する。次に、被検工具のノーズ先端位置に、ITVカメラの視軸を向ける。最後に、被検工具の損傷検知を行う。これらを実現するために、図1(a),(b)の装置を開発した。

回転工具台の中心の垂直上方にITVカメラCA₁とリング状の照明装置L₁₁を、工具台の中心の斜め上方に点光源とみなせる照明装置L₁₂を設置する。CA₁は焦点固定で、工具台と複数の工具画像をとらえる(画像入力範囲 約 170 × 170 mm)。L₁₁とL₁₂は工具と工具台を照らす。

工具台上には工具を

(1) 工具どうしが重なり合わない。

(2) L₁₂で照明したとき、工具の影がほかの工具にあたらず、かつ工具台上からはみださない。

という条件を満たすように設置してある。ここで、工

具台上に乗せた工具の数は n である。

工具損傷の生じる任意の位置に、ITVカメラの視軸を向けて焦点を合わせるためには、カメラの位置と方向の複雑な制御装置を必要とする。しかし、ある

限定した場所だけで、被検工具の損傷検知をする場合には、カメラの支持点に対して直交する2軸回りの回転制御だけで済む。そこで、図2に示すような、水平面内の回転および水平面と直交した平面内の回転ができる雲台を開発した。

工具台の斜め上方にITVカメラCA₂、照明装置L₂₁, L₂₂, L₂₃, L₂₄を設置する。CA₂は、これに乗せた雲台を制御することにより、被検工具のノーズ先端部分とその近傍の画像をとらえる(画像入力範囲 約 7.5 × 7.5 mm)。CA₂は、オートフォーカス機構、マクロレンズ、CCDから成っている。マクロレンズは、損傷検知を行うに十分な大きさの画像を得るためのものである。L₂₁, L₂₂, L₂₃, L₂₄は、工具のノーズ先端部分とその近傍を照らす。

像を拡大する場合、焦点深度が浅くなるという問題が生じるが、CCDの画像1枚あたりの入力時間が一定であることより、CA₂の撮影レンズの絞りを絞ることで、この問題は解決できる。しかし、こうするとレンズに入る光量が少なくなるため、画像が暗くなり、損傷部分をはっきりととらえることが困難となる。そのた

Fig. 2 Mechanism of pan-tilt head

め、大きな輝度が照明用光源として第一に要求される。本研究では、光源として工業的に簡便に利用できる蛍光灯、白熱灯、He-Ne レーザ、ハロゲンランプ³⁾の4種類を考えた。これらの比較実験を(1)輝度、(2)多岐にわたる損傷を捉えられるかどうかの観点から行った結果、ハロゲンランプが優れていることがわかり、これを照明用光源として選択した。

照明装置で照明された工具または工具台から反射した光を、CCD でアナログの電気信号にし、さらにその信号をA/D変換(256階調、画像の大きさ512×512画素)して、離散数値データとして計算機に入力する。この入力画像を処理することで、被検工具の損傷検知を行う。

以上のような実験装置の下で、図1のように工具台表面が x_0y_0 平面内にあるように x_0, y_0, z_0 座標系 Σ_0 をとる。この座標系 Σ_0 の下で、工具台表面の中心位置、 CA_1 と CA_2 の撮像面の中心位置、 CA_2 の回転中心位置、および L_{11}, L_{12} の中心位置と光軸の方向は既知である。

3. 被検工具の選択とITVカメラ CA_2 の視軸移動

L_{11} のみを点灯して CA_1 で撮影した工具の影を含まない画像を T_1, L_{12} のみを点灯して CA_1 で撮影した工具の影を含んだ画像を T_2 とする。これら2種類の画像を利用して、被検工具の選択とノーズ先端位置の認識を行う。これらは、次の各段階からなる。

(i) 画像 T_1, T_2 の変換

画像 T_1 において、工具台は工具より明るく輝いている。つまり、工具台の濃淡値と工具の濃淡値には、明確な濃淡値の差がある。したがって、あるしきい値を設定することによって、 T_1 を2値画像にした後、白黒反転した画像にすることで、工具画像が抽出できる。この抽出した画像では、工具の部分が濃淡値1をとる。ここで、抽出した画像を T_3 、抽出した工具をそれぞれ $TL_i (1 \leq i \leq n)$ とする。

画像 T_2 においても、工具台は工具とその影より明るく輝いている。したがって、 T_1 から T_3 に変換した操作と同様の操作を T_2 に行うことにより、 T_2 から工具とその影を抽出できる。ここで、抽出した画像を T_4 とする。

(ii) 被検工具の選択

画像 T_3 において、工具 TL_i の外周輪郭上の任意の1点から、反時計回りに外周輪郭上を走査する。このとき、外周輪郭の曲率の極小値を与える点を順番に $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m$ とし、そのときの極小値をそれぞれ $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_m$ とする。三角チップ、四角チップのノーズと P_i, R_i は、次のようになる。

(1) 片面にノーズが3箇所ある三角チップの場合：

$$m = 3, R_i = R_1 \quad (i = 2, 3).$$

(2) 片面にノーズが4箇所ある四角チップの場合：

$$m = 4, R_i = R_1 \quad (i = 2, 3, 4).$$

(3) 片面にノーズが2箇所(P_1, P_3 とする)ある四角チップの場合：

$$m = 4, R_i = R_{i+2} \quad (i = 1, 2),$$

$$R_4 \neq R_1, R_j \neq R_{j+1} \quad (j = 1, 2),$$

$$\overline{P_1 P_3} > \overline{P_2 P_4}.$$

Fig. 3 Image processing area

これらの関係を用いて、画像 T_3 における工具 TL_i のノーズ先端位置の認識を行い、次いでその x_0, y_0 座標の算出を行う。ここで、 x_0y_0 平面に垂直に下ろした TL_i のノーズ先端位置を $P_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, 0)$ ((1)の場合 $j = 1, 2, 3$; (2)の場合 $j = 1, 2, 3, 4$; (3)の場合 $j = 1, 3$)、 CA_2 の撮像面の中心を S とする。このとき、

$$\min_i \min_j \overline{P_{ij} S}$$

を与える工具を被検工具とした。

(iii) 被検工具のノーズ先端位置の z_0 座標の算出

被検工具のノーズ先端位置を点 $P(p_1, q_1, r_1)$ とする。ここで、 p_1, q_1 は(ii)で与えられた。 L_{12} の中心を $L(p_2, q_2, r_2)$ としたとき、画像 T_4 を利用して、点 P から $L\vec{P}$ 方向に伸びた影の長さを、座標系 Σ_0 での長さで算出する。この長さを d_1 とすれば、被検工具のノーズ先端位置の z_0 座標 r_1 は、

$$r_1 = \frac{d_1 r_2}{d_1 + \sqrt{(p_2 - p_1)^2 + (q_2 - q_1)^2}}$$

で与えられる。

(iv) ITVカメラ CA_2 の視軸移動

雲台の制御装置に、被検工具のノーズ先端位置情報(p_1, q_1, r_1)を送ることにより、雲台を自動的に回転移動させて、 CA_2 の視軸をノーズ先端部分へ向け、このあとオートフォーカス機構を動かして、この部分に CA_2 の焦点を合わせる。

なお実際には、 T_1, T_2 とも処理範囲を図3の斜線部分に限定して、計算時間の短縮化を図った。

4. 被検工具の損傷検知

4.1 画像入力方法

工具全体を均一的に照明する方法では、工具の正常部分と損傷部分との十分なコントラストを得るのが困難である。そこで、スローアウェイチップの形状を考えて、まず、照明装置 L_{21} ですくい面へ照明して画像入力する(入力画像 I_1)、次いで、照明装置 L_{22} でノーズへ照明して画像入力する(入力画像 I_2)、最後に、照明装置 L_{23} と L_{24} で前横両逃げ面へ同時照明して入力する(入力画像 I_3)、という3段階の照明により、各箇所での正常部分と損傷部分とのコントラストを大きくした。この照明法によって、広範囲にわたる損傷でも測

Fig. 4 Examples of three types images

定でき、一方向だけから照明する方法に比べて、損傷検知の信頼性が向上できる。図4に損傷工具の入力画像の一例を示す。

4.2 損傷部分の抽出

入力した3画像を画像処理し、損傷の外周輪郭部分だけを抽出する。

4.2.1 画像処理方法

図5に画像処理方法を示す。まず、前処理を行うことで、入力画像から切れ刃と損傷部分を抽出する。次に、抽出した画像から、損傷部分のみを抽出するため、しきい値を設定する。最後に、このしきい値を基準として、損傷部分の外周輪郭のみを取り出す。

4.2.2 前処理

図6に前処理方法を示す。まず、(a)に示すように入力画像を濃淡のはっきりした画像にするためコントラストを増大させ、次いで、入力画像に含まれているランダムノイズの抑制のために平滑化³⁾を行う。

オペレータ³⁾の各要素値を変化させた7種類の平滑化法で比較実験を行い、これらの中で最もノイズ抑制に効果があった方法を選択した。

工具の損傷部分と正常部分との境界は、濃淡の差として現れている。したがって、濃淡の差があるところだけを強調すれば、損傷部分を抽出できる。そこで、平滑化してランダムノイズを抑えた画像に微分処理³⁾を行い、濃淡の差があるところだけを強調する。1次微分としてSobelオペレータ³⁾など14種類の方法、2次微分として2種類のラプラシアン³⁾、合計16種類の微分処理法で比較実験を行い、これらの中で最も濃淡の差が強調できた方法を選択した。

微分処理を行った画像に対して濃度のしきい値を定め、しきい値よりも濃度値が小さくない画素を濃度1に変換し、濃度値が小さい画素を濃度0に変換する。こ

Fig. 5 Image processing procedure

Fig. 6 Preprocessing procedure

Fig. 7 Scanning of pre-processed image

Fig. 8 Definitions of r_{1i} , r_{2i} and r_{3i}

うして得られた画像の濃度1の部分の中に、切れ刃と損傷部分が含まれている。以上の処理を処理Aとする。

図6(b)に示すように、画像 I_1, I_2, I_3 に対してそれぞれ処理Aを行って、3枚の画像の論理和を求めて1枚の画像にする。最後に、この画像から損傷部分の外周輪郭を取り出す。

4.2.3 しきい値の設定

4.2.2で得た画像に対して、図7のような座標系を設定する。図の黒い部分は、これまでの処理によって抽出された切れ刃と損傷部分で、その濃度は1で、それ以外のところの濃度は0である。ここでは、典型例として、切れ刃に沿って発生する損傷について述べる。

いま、点 $(i, 0)$ から y_1 軸方向に走査したとき、最初に点 (i, j) で濃度1の画素に出会い、点 (i, k) で濃度1の画素が終わった。また、点 $(i, 511)$ から y_1 軸の逆方向に走査したとき、最初に点 (i, l) で濃度1の

Fig. 9 Examples of two histograms with and without damage

画素に出会い、点 (i, m) で濃度 1 の画素が終わったとする。

このとき、図 8 に示すように

$$r_{1i} \equiv l - j + 1^*, \quad r_{2i} \equiv \begin{cases} l - m + 1 & (j \neq m) \\ 0 & (j = m), \end{cases}$$

$$r_{3i} \equiv k - j + 1, \quad \delta(r_{2i}) \equiv \begin{cases} 1 & (r_{2i} \neq 0) \\ 0 & (r_{2i} = 0) \end{cases}$$

($0 \leq i \leq 511$)

とする。

まず、 r_{1i} の値を利用して、4.2.2 で抽出した画像から損傷部分のみを抽出するために必要なしきい値 Th を設定する。 $r_{2i}, r_{3i}, \delta(r_{2i})$ は、あとで損傷部分の外周輪郭を抽出する目的に用いる。

r_{1i} の値のヒストグラムを考えた場合、工具に損傷がないと、 r_{1i} の値は正常切れ刃によるピーク点の一つ現われる。損傷があると、 r_{1i} の値は正常切れ刃によるピーク点よりも大きいところで、損傷による影響で別のピーク点が見れる。工具に損傷がある場合とない場合について、 r_{1i} の値のヒストグラム例を図 9(a),(b) に示す。これらの図において、損傷部分がない場合には、(a) のように r_{1i} の値が正常切れ刃によるピーク点の近傍に現われるが、損傷がある場合には、(b) のように正常切れ刃によるピーク点以外のところにもピーク点が見れる。(a) のような場合、 r_{1i} の値の最大値をしきい値 Th とし、(b) のような場合、ヒストグラムの二つのピーク間の谷底となる r_{1i} の値をしきい値 Th とする。

4.2.4 損傷部分の外周輪郭の抽出

$\delta(r_{2i}) = 0$ となる部分は、 $r_{3i} < Th$ ならば損傷部分とし、2 点 $(i, j + [Th/2])$, $(i, k - [Th/2])$ ($[]$ はガウス記号) を損傷の外周輪郭点として抽出する。 $r_{3i} \geq Th$ ならばその部分を切れ刃と判断する。

* 画素は自然数をとるため、 $r_{1i} \equiv l - j$ とすれば $l = j$ のとき $r_{1i} = 0$ となる。この不都合を避けるために便宜上 “+1” をつけている。

Fig. 10 Resultant image extracted failure part

Fig. 11 Relation between visual line and tool face

$\delta(r_{2i}) = 1$ となる部分は、 r_{3i} の値にかかわらず損傷部分とし、2 点 $(i, l - [\min(r_{2i}/2, Th/2)])$, $(i, j + [\min(r_{3i}/2, Th/2)])$ を損傷の外周輪郭点として抽出する。

図 4 に示した損傷工具の画像 3 枚に、図 6(b) で示した処理 A を行い、この結果得られた 3 枚の画像の論理和を求めて 1 枚の画像にし、さらに本節の方法を適用した結果を図 10 に示す。損傷の外周輪郭のみが取り出されているのがわかる。

5. 正常工具との比較による損傷量の計算

損傷部分を抽出した画像に正常工具の切れ刃画像を重ね合わせ、この重ね合わせた正常工具の切れ刃画像と損傷部分とを比較することで、工具の損傷量を求める。

ITV カメラ CA_2 で入力した工具画像において、 CA_2 の視軸と工具のすくい面とのなす角を図 11 に示すように α とする。このとき正常工具の切れ刃画像は、前切れ刃・横切れ刃は直線、ノーズは楕円の一部として表わすことができる。すなわち、工具の刃先角を ε 、ノーズ半径を r_c 、ノーズ半径長さを b_c 、画像入力した工具画像の 1 画素あたりの長さを g とすれば、図 12 のように

前切れ刃：

$$y_1 = -k(x_1 - a + gb_c/2) + b \quad (x_1 \leq a - gb_c/2) \quad (1)$$

横切れ刃：

$$y_1 = k(x_1 - a - gb_c/2) + b \quad (x_1 \geq a + gb_c/2) \quad (2)$$

$$\text{ノーズ: } \frac{(x_1 - a)^2}{(gr_c)^2} + \frac{(y_1 - c)^2}{(gr_c \sin \alpha)^2} = 1 \quad (3)$$

$$(|x_1 - a| \leq gb_c/2, \quad c - gr_c \sin \alpha \leq y_1 \leq b)$$

ここに、

$$k = \cot(\varepsilon/2) \cdot \sin \alpha, \quad b_c = 2 \cos(\varepsilon/2)$$

a, b : パラメータ

$$c = b - (gr_c \sin \alpha) \sqrt{1 - (b_c/2r_c)^2}$$

として表される。

パラメータ a, b は切れ刃の式をそれぞれ x_1 軸方向に

Fig. 12 Observed cutting edge

Fig. 13 Logically summed image of three images: (1) image of cutting edge of normal tool, (2) image extracted failure part, (3) one of inputted images

a , y_1 軸方向に b 平行移動した量を表しており, この a, b の値を適切に設定することにより, 損傷部分を抽出した工具画像に, 正常工具の切れ刃画像を重ね合わせることができる。

パラメータ a, b は, 4.2.4 で損傷部分を抽出した際に, 前切れ刃・横切れ刃の方程式をそれぞれ,

$$y_1 = \gamma_1 x_1 + \delta_1 \quad (4)$$

$$y_1 = \gamma_2 x_1 + \delta_2 \quad (5)$$

として求めておき, (1) と (4), (2) と (5) が一致することより,

$$a = -(\delta_2 - \delta_1)/2k, \quad b = (\delta_2 + \delta_1)/2 + kgb_e/2$$

として算出する。損傷部分を抽出した画像に (1) から (3) の方程式で表わされる正常工具の切れ刃画像を重ね合わせ, この重ね合わせた正常工具の切れ刃画像を基準にして, 摩耗幅などの損傷量を計算する。

図 10 の画像に対して, 上述の方法で正常工具の切れ刃画像を重ね合わせ, さらに図 4(b) の画像を重ね合わせたものを図 13 に示す。

6. 開発装置の運用結果

開発した装置の運用実験を次のように行った。10 個の損傷したスローアウェイチップを工具台にのせ, そのうちの一つの工具に対して, ITV カメラ CA₂ を工具損傷の生じる位置へ自動的に焦点を合わせた。3 枚の工具画像を入力し, 損傷検知を行った後, 工具台を回転させた。次の工具に対しても同様なことを繰り返した。

た。その結果, ITV カメラ CA₂ の自動焦点合わせおよび損傷検知はすべての工具に対して成功した。

本装置で検知できる損傷の最小の大きさは, 長さでは約 0.05mm, 面積では約 0.06mm² である。これだけの大きさの損傷が検知できれば損傷検知としては十分であると考えらる。

損傷検知に必要な 3 枚の工具画像を, ITV カメラ CA₂ で入力する時間は約 1/10 s, 総処理時間は一つの工具に対して約 2 min (使用計算機: TOSPIX-II) であった。つまり, 損傷検知のために工具がある特定の場所に戻り, ITV カメラ CA₂ が工具画像を入力した後, 約 2 min 後に結果が出力される。約 2 min の処理時間は, 本装置専用のハードウェアを作製することで, 短縮できるものと思われる。したがって, 本装置は, MC や TC のような多くの工具をかついだ加工機械にも十分対処できるものと考えられる。

7. 結 論

MC や TC のような多くの工具をかついだ加工機械に適用できる工具損傷モニタリング装置を想定した, 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) 開発した装置は, 2 台の ITV カメラを用いた。この装置においては, 一方の ITV カメラで損傷知の対象となる工具を選択し, この選択した工具の損傷の生じる部分に他方の ITV カメラの焦点を自動的に合わせる。
- (2) 多岐にわたるスローアウェイチップの損傷を検知するために, (a) すくい面への照明, (b) ノーズへの照明, (c) 前横両逃げ面への同時照明, という 3 段階の照明法を考案した。これによって, 工具の正常部分と損傷部分とのコントラストを明確につけることができた。
- (3) 撮影した 3 画像から, 損傷部分のみを抽出する画像処理方法を確立した。
- (4) 正常工具と比較することで, 正確かつ自動的に損傷の程度を定量化する方法を与えた。

なお, 本研究は昭和 60, 61, 62 年度科学研究費補助金 (試験研究 (2)) の助成を受けて行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 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) 68-89.
- 2) 藤井義也: FA (ファクトリ・オートメーション) および FMS (フレキシブル生産システム) の信頼性, 精密工学会総合生産システム専門委員会フレキシブル生産システムにおける信頼性設計小委員会 (1987) 22.
- 3) A. Browne & L. Norton-Wayne: Vision and Information Processing for Automation, Plenum Press, (1986) 196-215, 325-328.