

CCDカメラを用いた工具摩耗測定法の検討*

飯村 崇**、若槻正明**、和合 健**、
堀田昌宏**、多田三郎**

高硬度材料などの切削加工では工具への負担が非常に大きく、工具の監視が必要不可欠である。そこで、CCDカメラとパソコンを用いた工具摩耗監視システムについて検討を行った。その結果、フィルタ処理によるノイズ低減や二値化処理・サブピクセル処理を行うことにより、逃げ面の摩耗幅を定常摩耗部分で $\pm 10\mu\text{m}$ 、エッジ近傍で $\pm 20\mu\text{m}$ の精度で測定することが可能となり、工具摩耗判定を工作機械上で定量的に、行うことが可能となった。

キーワード：CCDカメラ、工具摩耗、逃げ面、二値化、サブピクセル

Estimation of Measuring Tool Wear with CCD Camera

IIMURA Takashi, WAKATUKI Masaaki, WAGO Takeshi,
HOTTA Masahiro and TADA Saburo

In machining hard metals etc., it is necessary to observe tool wear, because the load on tool is too big. So we studied about tool wear observation system using CCD camera and personal computer. As a result of this study, it is possible to measure the width of flank wear within an accuracy of about $\pm 10\mu\text{m}$ for normal tool wear and $\pm 20\mu\text{m}$ for edge of wear, by using filter, binarization and subpixel processes. And it becomes possible to estimate tool wear quantitatively on machine.

key words : CCD camera, tool wear, flank surface, binarization, subpixel processes

1 緒 言

高硬度難加工材の切削加工では、工具への負担が非常に大きく、作業の安定化と加工不良防止のために、作業環境下における工具の監視が必要不可欠である。そのため前報では、PSD素子を利用したレーザ変位計を用いて、旋盤用バイトチップの摩耗部分を自動で測定する方法について検討を行い¹⁾、その結果工具表面で反射されたレーザ光の明るさで、工具の逃げ面摩耗部分を判別することが可能であることを確認した。しかし、前報で用いたレーザ測定機はスポット測定を行う機械であり、摩耗を計測するには面上の走査が必要となり、オンマシンでの操作に限界があった。そこで、明るさのみを測定する場合、工具摩耗部を面でとらえ機械的走査の必要がない

CCDカメラを用いることを考え、CCDカメラとパソコンによる画像処理の組み合わせを用いて摩耗を測定する方法について検討を行った。

2 装置概要

図1に使用した装置の概要を示す。装置はCCDカメラ (Sony XC-57 画素数: 510H × 492V)、カメラの画像をパソコンに取り込むための画像処理ボード (住友金属 Personal Imageviser) 及び画像データを処理する画像処理用コンピュータ (NEC PC9801FA) から構成される。今回使用したCCDカメラとレンズの組み合わせでは、1画素が $0.013 \times 0.013(\text{mm})$ の寸法に相当する。また、摩耗部分を摩耗以外の部分 (正常部分) と差別化

* 高硬度難加工金属材料の高精度加工技術の開発 (東北ブロック広域共同研究)
計測評価システム及び加工条件のデータベース構築 (第2報)

** 電子機械部

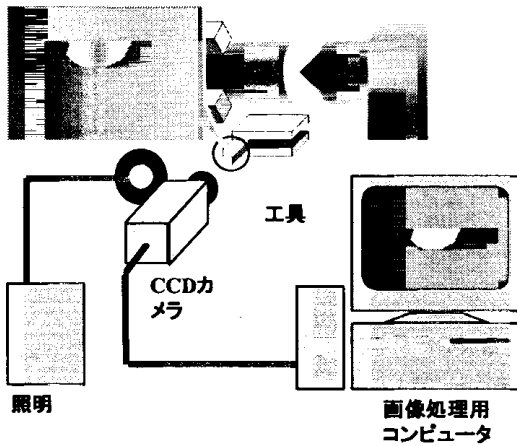


図1. 装置概要

しやすくするため、白色光源(住田光学ガラス LSM-160S)からの光を対象に照射した。被測定物は旋盤用バイトチップで、工具の諸元は(-6,-6,6,6,15,15,0.8)と(-6,-6,6,6,15,15,0.4)であり、SKD11を切削速度100m/min、切り込み1mm、送り0.1mm/revで1~5分間切削して摩耗部分を生成させた。また、チップ材種は超硬工具1種類・サーメット1種類・セラミックス2種類(東芝タンガロイ… TH10・NS520・LX11・LX21)計4種類を使用した。

3 測定方法の検討および結果

3-1 照明及びカメラのセッティング

今回の測定は、摩耗部分と正常部分からの反射光の明るさを、測定角度や照明のセッティングにより差別化できることを利用している。差別化できる要因としては、次の2点が考えられる。

- (1) 工具逃げ角により、工具の摩耗部分は正常部分に対し一定の角度を持つ。
- (2) 正常部分は表面が平滑で、特定方向にのみ光を反射するのにに対し、摩耗部分は切削方向に沿って面が荒れるため、広い角度に光が散乱する。

そこで、摩耗部分と正常部分の表面状態(表面粗さ・面のなす角度)を図2のX方向・Y方向について3次元表面解析顕微鏡を用いて測定し、それをもとに工具に対するライトとカメラの最適な設定位置を決定した。

Y方向について、摩耗部分は正常部分に対し工具の取り付け角度(逃げ角)に起因する5~6°の角度を持つ。またX方向について、摩耗部分の表面は、正常部分より表面粗さが大きく、

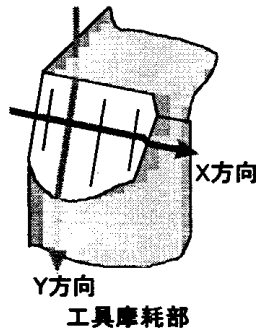


図2. 工具摩耗部

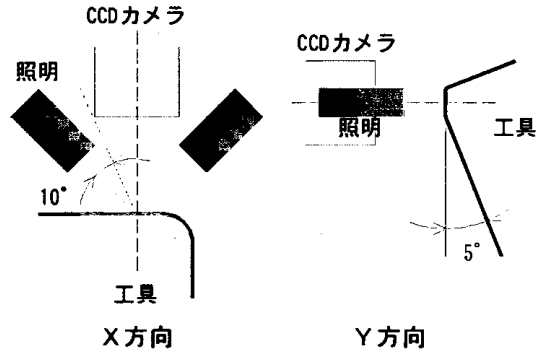


図3. カメラと照明のセッティング

照明を傾けても光を反射する。ただし、表面の粗さ成分がなす角度の割合を、表面粗さ計から出力されるプロファイル曲線から求めると、表面の95%が0~10°程度の角度であることがわかった。

以上のことから、照明とカメラは工具に対し図3の様にX方向に10°、Y方向に5°傾けたセッティングとした。また、照明は角度の条件が合っていることと、セッティングを簡便化できることから、リングライトを使用することとした。(ただし、Y方向の光成分を限定する必要があるため、図4の様に1mmのスリットを開けたカバーを取り付けた。)

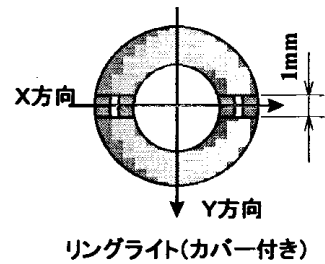


図4. リングライト

3-2 取込画像に対する前処理

CCDカメラにより取り込んだ画像は、多くのノイズを含んでおり、取り込んだ画像をそのまま利用すると、後の処理手順が増し、さらには結果が不安定になる可能性がある。そこで、以下に示す前処理についてノイズ低減効果を確認し、工具表面の観察を短時間でを行うために有効なノイズ処理法を検討した。

3-2-1 重ね合わせ処理法

同一画像を複数回取り込んで、各画素毎に明るさの平均値を取ることで、画像を取り込む際にランダムに発生するノイズを低減する処理。

3-2-2 平滑化処理法

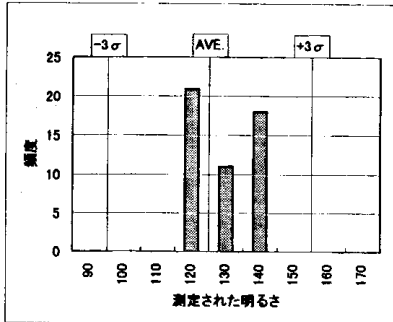
取り込んだ画像の各画素について、周辺画素(今回は3x3画素)を参照して、ノイズを低減させる処理。測定時間短縮のため、比較的単純なメジアンフィルタと単純平均化フィルタの2種類について検討を行った。

- (1) メジアンフィルタ処理…周辺画素(3x3)の明るさの中央値(メジアン)を求める。
- (2) 単純平均化フィルタ処理…周辺画素(3x3)の明るさの単純平均を求める。

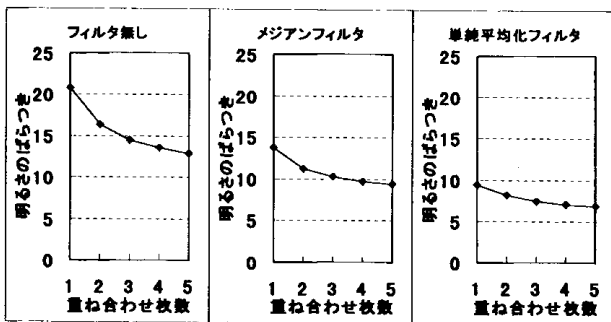
3-2-3 前処理効果の確認

上述の処理について効果を確認するため、測定値 (CCD カメラがデータを取り込む際に分割した 256 階調の明るさ) の分布 (図 5,A) が偶然誤差によるもので正規分布に近似できると仮定して、その 3σ を明るさのばらつきと定義し、ノイズの影響を表すための指標とする。そして同一の画像を複数回取込み、各画素毎に明るさを測定し、重ね合わせ処理及び平滑化処理を行った際、この値がどのように変化するか比較を行った。結果を図 5,B に示す。

- (1) 重ね合わせ処理… 2 枚重ねたときの低減効果は大きく、それ以上重ねた場合も効果が確認された。5 枚の画像を重ね合わせることで、画像の明るさばらつきを $2/3$ に低減することができる。
- (2) 平滑化処理… メジアンフィルタ処理はなにもない場合に比べばらつきを $2/3$ 程度に減少させることが可能である。単純平均化フィルタ処理については、ばらつきが $1/2$ 程度まで減少し、大きなノイズ低減効果が得られるが、処理した画像と元の画像を比較した場合、エッジのぼけが大きく、今回の様な形状測定には適さないと考えられる。(ノイズの低減効果が高いため、再度エッジの先鋭化処理等を行えば有効であると考えられるが、処理手順が増すため今回は使用を見合わせる。)



A. 明るさ測定値の分布



B. 明るさのばらつき

図 5. 前処理の効果

そこで、メジアンフィルタ処理を行った画像を、5 枚重ね合わせることとした。これにより、各画素における明るさのばらつきを、なにも処理をしない場合の $1/2$

まで抑えることが可能となる。

3-3 二値化処理を用いた測定方法

摩耗の大きさを取り込んだ画像から測定するためには、まず摩耗部を特定し、その後で摩耗部に対し何らかの計算を行う必要がある。今回は摩耗部分と正常部分との明るさの違いを利用するというので、先ず明るさに関する画像処理の一般的な方法である、二値化処理を使用した。二値化処理とは、図 6 の様に明るい対象物 (摩耗部分) と暗い背景 (正常部分) 及びその中間の明るさ (境界部分) が入り交じった取込画像に対しある適切なしきい値を設け、各画素を”明るい点”と”暗い点”の 2 つのパターンに分類した二値画像 (白黒画像) を得るための処理である。得られた二値画像には、図形の大きさや形状など特徴的情報を取り出し易いという利点がある。しかし、しきい値の取り方次第で情報が大きく変化するという欠点があり、二値化処理を行う場合、しきい値決定は特に慎重に行う必要がある。

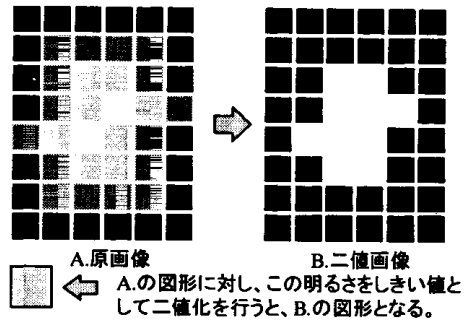


図 6. 二値化処理

3-3-1 しきい値決定

画像信号を二値化するためのしきい値の決定法として様々な方法が考えられているが、今回検討したのは固定しきい値法・モード法・2ウィンドウ法の 3 つである。

- (1) 固定しきい値法… 事前の調査により対象物と背景の明るさを求め、それらを明確に区別できる値をしきい値として決定しておく方法。測定環境の変化や、測定物の材種によって大きな影響を受ける可能性がある。
- (2) モード法… 取込画像の各明るさが画像中に何画素存在するか調べ、それをグラフ化したヒストグラムを求める。このときグラフの中で一番窪んでいる部分をしきい値と定める方法。コントラストの弱い画像に対しては、しきい値を確定することが難しい。
- (3) 2ウィンドウ法²⁾… 工具摩耗測定のために沢井らが開発した方法で、図 7 の様に大きさの異なる 2 つのウィンドウを用意し、それぞれの画像について明るさの分布を調べ、モード法と同様にヒストグラムを作成する。調べた結果を比較する際、2 つのウィンドウにおいて摩耗部分は大きさが変化しないため、摩耗部分に

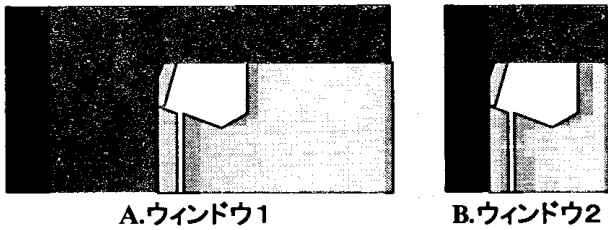
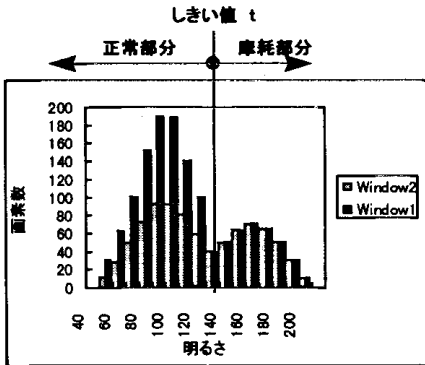
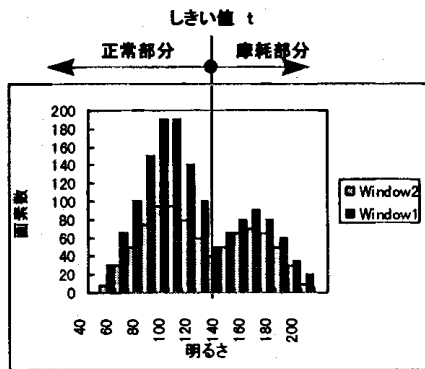


図7. 2ウィンドウ法説明



A. 2ウィンドウ法(沢井)



B. 2ウィンドウ法(今回の提案)

図8. 2ウィンドウ法しきい値決定

相当する明るさは画素数の分布に変化がないはずである。そのことを利用して、図8,Aの様にしきい値を決定することができる。

(1)については、環境の変化により変動が大きく、汎用性に乏しいため、(2)については、工具表面の明るさの分布が複雑で、その変化があまりはっきりしておらず、自動でしきい値を判断するのは非常に困難であるため、使用を見合わせた。以上のことから今回は、(3)の2ウィンドウ法を採用することとした。ただし、実際の作業環境においては、工具に付着した切り粉が、摩耗部分と同程度の明るさで光を反射したり、表面の切削油の影響を受けたりするため、単純に変化のない部分を摩耗部分と判断することはできない(変化のない部分はほとんど存在しない)。そのため今回の測定に際しては変更を加えた。ウィンドウ1と2の明るさの分布を比較し(図8,B)、その比率がある一定値以下の部分を摩耗部分と判断する。比率については、測定に使用した工具に対し、

二値化前の画像と二値画像を比較して、もっとも差異の少ないと考えられる画像が得られた値(分布比率:1.5)を採用した。

3-3-2 孤立点除去処理

次に二値画像に対し、細かいノイズを排除するために孤立点除去処理を行う。これは周囲4点の明るさがすべて等しい場合、中央の画素も周囲の画素と同じ明るさ(明るいまたは暗い)にする処理であり、これにより、大きさが1画素しかない小さなノイズを消去して、以後の処理の負担を低減することができる。

3-3-3 ラベリング処理

図9の様に二値画像の連結成分毎に異なるラベル(番号)をつけて行くことをラベリングという。ラベリングは連結成分の大きさ、面積などの属性を解析するために有効な処理であると考えられている。ラベリングを行う際の連結関係には、周囲の8画素をすべて隣接画素と見なす、8-連結を用いた。ラベリング処理の後、区別した連結成分のうちで、最大のものを摩耗部分と判定し、それ以外は消去する。この処理により、摩耗以外の明るい部分(例えば切り粉など)を排除して摩耗幅のみを求めることが可能である。

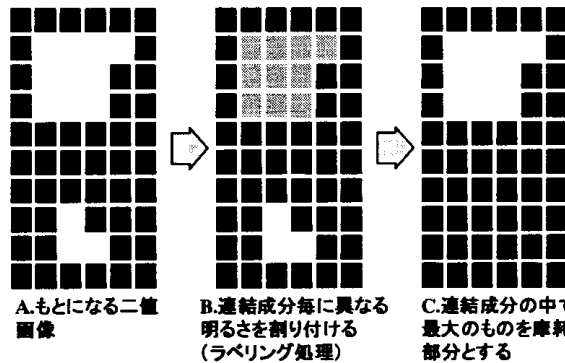


図9. ラベリング処理

3-3-4 穴埋め処理

3-3-3で得られた画像に対し、摩耗幅のカウントを行い易くするため、連結成分の間に空いているスペースを穴埋めする。

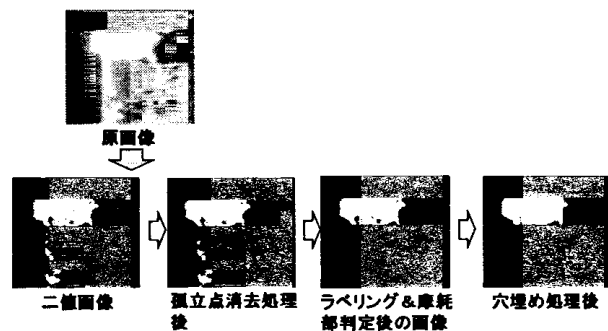


図10. 二値化処理の様子

3-3-5 摩耗幅のカウント

上記の処理で特定した摩耗部分に対し摩耗幅のカウントを行う。摩耗部上端の画素位置と下端の画素位置を参照し、その間の画素数を摩耗幅とする。ここで、1画素の大きさは 0.013×0.013 (mm) であるから、カウントした摩耗幅に対しその値を乗ずることで、摩耗幅を数値として算出できる。

3-4 サブピクセル処理を用いた測定方法

3-3で説明した二値化法では測定値が1画素の大きさ (0.013mm) 以下の測定は不可能であるため、測定値が大きくばらつく。そこで、サブピクセル手法と呼ばれる方法について検討を行った。

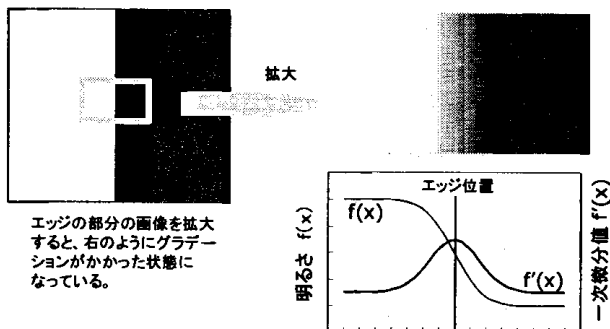


図11. サブピクセル処理

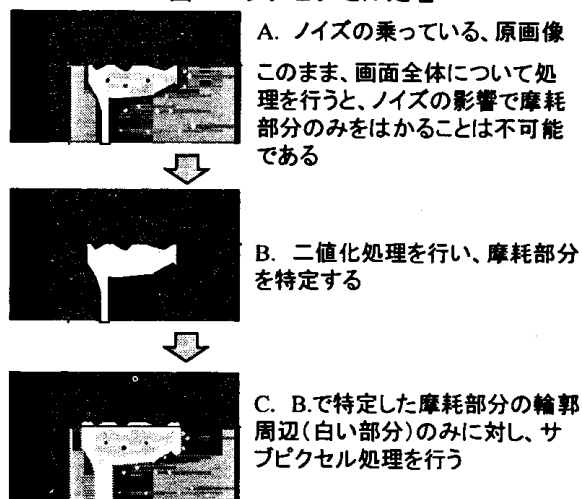


図12. サブピクセル処理のための摩耗部特定法

サブピクセル手法とは、図11の様な CCD カメラにより取り込んだエッジ画像に対し、エッジの位置計測の精度を画素 (ピクセル) の大きさ以下のレベルまで向上させる (サブピクセル化する) ための手法で、各画素の明るさやその1次微分値・2次微分値を用いて、計算によりエッジの位置を求める。本研究では、単純な四則演算のみで済み、計算量が少ない1次微分を用いた重心法を採用した。また、今回サブピクセル処理を行うに当たり、切り粉などのノイズとエッジ部分を区別し測定するために、二値化処理のところで説明したラベリング処理までの手順を行い、摩耗部分を特定した後、サブピクセル手法でエッジを正確に求めるという方法を採用した。

(図12参照)

3-4-1 1次微分を用いた重心法

エッジを横切る経路にある画素の明るさを調べると、図11のグラフ $f(x)$ の様なデータが得られる。これについて1次微分 $f'(x)$ すなわち明るさが変化する割合を採ると、エッジの前後で上昇・下降が起こる。エッジの位置が1次微分の重み中心にあるとすれば、その荷重平均を計算することにより求められる。すなわち座標 x にある画素の1次微分を $f'(x)$ とすると、重心によるエッジ位置 x_0 は

$$x_0 = \frac{\sum x f'(x)}{\sum f'(x)} \quad (1)$$

となる。 \sum は本来、エッジを構成するすべての画素について計算するものであるが、本論文では1次微分が最大の画素と、その前後1画素ずつの合計3画素 (3点重心法) および前後2画素ずつの5画素 (5点重心法) についてのみ計算を行った。

3-5 測定結果

表1は二値化処理とサブピクセル処理による測定結果と工具顕微鏡の測定結果を比較したものである。ここで、測定ばらつきとは、摩耗幅の測定を複数回行い、その測定値の分布が正規分布であると仮定し近似した際の 3σ の値を示している。二値化法は $0 \sim 21\mu\text{m}$ とばらつき

表1. 最大摩耗幅測定結果 (単位 mm)

| 工具の種類 | 工具顕微鏡 | 二値化 | | | | サブピクセル(3点重心) | | | サブピクセル(5点重心) | | |
|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------------|--------|-------|--------------|--------|-------|
| | | 測定値 | 差 | ばらつき | 測定値 | 差 | ばらつき | 測定値 | 差 | ばらつき | |
| LX11 | 1 | 0.050 | 0.039 | -0.011 | 0.000 | 0.052 | 0.002 | 0.006 | 0.089 | 0.039 | 0.067 |
| | 2 | 0.102 | 0.104 | 0.002 | 0.000 | 0.111 | 0.009 | 0.000 | 0.111 | 0.009 | 0.003 |
| | 3 | 0.072 | 0.088 | 0.017 | 0.016 | 0.084 | 0.013 | 0.004 | 0.086 | 0.014 | 0.006 |
| | 4 | 0.086 | 0.091 | 0.005 | 0.000 | 0.087 | 0.001 | 0.001 | 0.087 | 0.001 | 0.001 |
| LX21 | 1 | 0.030 | 0.039 | 0.009 | 0.000 | 0.044 | 0.014 | 0.002 | | | |
| | 2 | 0.037 | 0.052 | 0.015 | 0.000 | 0.047 | 0.010 | 0.000 | | | |
| | 3 | 0.054 | 0.065 | 0.011 | 0.000 | 0.070 | 0.016 | 0.003 | | | |
| | 4 | 0.034 | 0.040 | 0.006 | 0.012 | 0.044 | 0.010 | 0.001 | | | |
| NS520 | 1 | 0.175 | 0.169 | -0.006 | 0.000 | 0.165 | -0.010 | 0.002 | 0.175 | -0.008 | 0.004 |
| | 2 | 0.145 | 0.146 | 0.000 | 0.016 | 0.143 | -0.002 | 0.011 | 0.145 | -0.004 | 0.008 |
| | 3 | 0.178 | 0.178 | 0.000 | 0.019 | 0.178 | 0.000 | 0.006 | 0.178 | 0.000 | 0.002 |
| TH10 | 1 | 0.151 | 0.163 | 0.012 | 0.021 | 0.154 | 0.003 | 0.001 | 0.155 | 0.004 | 0.001 |
| | 2 | 0.189 | 0.195 | 0.006 | 0.000 | 0.197 | 0.008 | 0.001 | 0.197 | 0.008 | 0.001 |
| | 3 | 0.294 | 0.299 | 0.005 | 0.000 | 0.304 | 0.010 | 0.001 | 0.304 | 0.010 | 0.001 |
| | 4 | 0.367 | 0.386 | 0.019 | 0.019 | 0.380 | 0.013 | 0.001 | 0.382 | 0.015 | 0.001 |

※ LX21 については、摩耗幅が小さく5点重心法では満足な測定ができなかった (異常な数値となる)

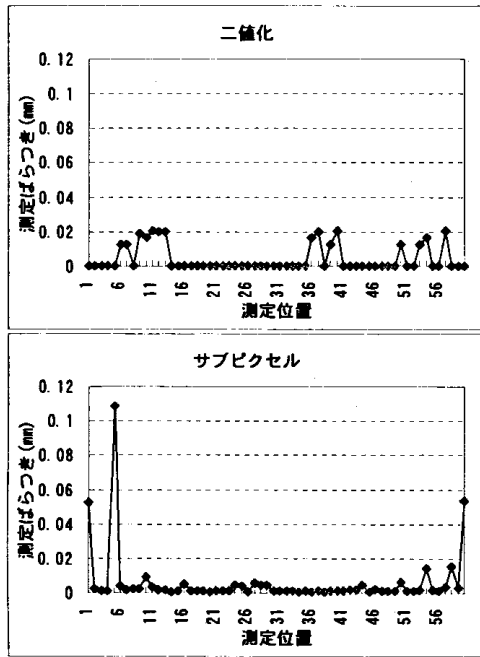


図13. 測定位置とばらつきの相関

ある場合と無い場合の差が大きい。それに対し、1次微分の3点重心法の場合は、常にばらつきが存在するものの、ばらつき量は平均で $3\mu\text{m}$ 、最大でも $11\mu\text{m}$ と二値化より小さい値であった。また5点重心法の場合、参照点が多いため測定ばらつきの低減が期待されたが、結果は測定対象の摩耗幅が大きい場合で3点重心法と同程度、摩耗幅が狭いところでは逆に非常に大きなばらつきが発生し、満足に測定できないことがわかった。大きなばらつきについては、計算に必要なエッジ領域が5画素であるのに対し、摩耗幅が2~3画素程度しかない場合、十分な情報が得られないのが原因であるためと考えられ、処理方法によりキャンセルは可能であると思われる。しかし、摩耗幅が大きい場合でも5点重心法の3点重心法に対する優位性はほとんど見られないため、今回の装置と対象物の組み合わせでは、3点重心法が適している。

(今後、カメラ倍率を上げエッジをさらに拡大して観測できる様にした場合には、5点重心法など参照点を増やすことで精度の向上が期待できると考えられる。)

また、図13は摩耗の測定位置と測定値のばらつきの関係を、二値化処理及びサブピクセル処理(3点重心)について示したグラフである。二値化処理では摩耗のエッジ部分から中心部分(定常摩耗部分)までコンスタントに $20\mu\text{m}$ 程度のばらつきを持つ。それに対し、サブピクセル処理(3点重心)では中心部分(定常摩耗部分)で $5\mu\text{m}$ 程度、エッジ部分で数十 μm のばらつきが発生する可能性があることがわかった。この理由として、エッジ部分の摩耗状況が定常摩耗部分に比べ複雑で、計算を行う際にフィルタ処理等により取りきれないノイズの

影響を受けることが考えられる。以上のことから、定常摩耗部分に対してはサブピクセル処理(3点重心)を、エッジ部分については、若干ばらつきが大きくなってしまいが、ノイズの影響をキャンセルしやすい二値化処理を用いて測定を行うのが良いと考えられる。

4 結 言

4-1 カメラと照明のセッティング

逃げ面摩耗部を差別化しやすくするため、カメラと照明のセッティング方法を検討した。逃げ面摩耗部分の表面状態を解析した結果、工具の水平方向(X方向)には 10° の角度をつけて、垂直方向(Y方向)については摩耗部を正面から監視する様に工具を傾けて(今回は 5°)配置することで工具摩耗をとらえやすくなる。

4-2 前処理

精度向上と計算の簡略化のために有効な前処理方法を検討した。その結果、メジアンフィルタ処理を行い、その画像を5回重ね合わせるという方法で、画像の明るさのばらつきを $1/2$ 程度まで減少させることができる。

4-3 二値化処理とサブピクセル処理

摩耗幅をカウントする方法として二値化処理とサブピクセル処理を検討した。

- (1) 二値化処理は摩耗部のどの部分に対しても $\pm 20\mu\text{m}$ 程度のばらつきが発生する可能性を持つ。
- (2) サブピクセル処理では定常摩耗部分に対して最大でも $\pm 10\mu\text{m}$ 程度、逆にエッジ近傍や摩耗幅が小さい部分に対しては数十 μm のばらつきが発生する。

以上のことから、定常摩耗部分に対してはサブピクセル処理、エッジ近傍や摩耗幅が小さい場合には二値化処理を行うこととした。この方法により、逃げ面の摩耗幅を加工機械に取り付けたままで定量的に判定することができる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、ご指導・ご助言いただいた岩手大学工学部機械工学科 井山俊郎教授、水野雅裕助教授、岩手県工業技術センター企画情報部 南幅留男部長に感謝いたします。

文 献

- 1) 飯村 崇ほか：レーザ変位計を用いた工具摩耗測定法の検討、岩手県工業技術センター研究報告 第4号 (1997) pp. 19-24
- 2) 沢井信重ほか：画像処理による工具摩耗の自動測定、精密工学会誌, 61, 3, (1995) 368-371