画像処理によるヘアライン仕上面の欠陥検出方法*

樋口 静一^{*1}, 新野 将行^{*2}, 本橋 康之^{*2}Detection of Scratches on the Hairline Finished Surfaces
Using Image Processing MethodShizuich HIGUCHI^{*3}, Masayuki NIINO and Yasuyuki MOTOHASHI^{*3} Chiba University, Faculty of Engineering,
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522 Japan

It is useful to systemize the visual inspecting processes carried by skilled workers for finished surfaces. For that purpose, the hairline finished surfaces were inspected based on the extracted features of them. For the first step of estimating the hairline finished surfaces, the scratch which had been left on the hairline pattern owing to inadequate finishing was first detected. Two-dimensional discrete Fourier transform was applied for estimating the hairline images obtained by the CCD camera. As a result, it was found that there appears characterized spatial frequency distribution in the spacing frequency area, when there was a scratch in the hairline. Moreover, the position and size of scratch in the hairline image were recognized. By applying this method in various cases, the effectiveness of this method was confirmed.

Key Words: Hairline Finishing, Scratch, Image Processing Method, Two-Dimensional Discrete Fourier Transform

1. 緒 論

ヘアライン仕上げは、金属表面に連続した細かい筋模様を付す加工方法で、工業製品の外観部の加飾や、機能上の効果を得ることを目的として広く用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。例えば、冷間圧延後のステンレス鋼板では、圧延方向と平行にヘアライン仕上げを行い商品価値を向上している。ヘアライン仕上面の総合的な評価は、その条痕の幾何学的形状、連続性、規則性、および傷の有無など多くの要素に影響されるため、定量的評価が難しく、多くの場合、熟練者の目視により感覚的、主観的に行われており、自動化が望まれている。

本研究では、ヘアライン仕上面を客観的・定量的に評価できるシステムの開発の第一段階として、ヘアライン仕上面に前工程の研削痕が残っている場合や、取り扱い上の不注意などで付けられた傷を、表面の欠陥として CCD カメラ画像中から検出する方法を検討した。

現在まで、表面検査法の一環として各種の欠陥検出

方法⁽³⁾⁽⁴⁾が提案されているが、ヘアライン仕上面に関する報告はほとんどなく、画像処理を適用した例もない。この欠陥検出における問題点は、傷で代表される欠陥をヘアライン条痕と分離し認識することの難しさにある。例えば、レーザ光を照射し、欠陥に起因する回折パターンの特徴を検出する方法⁽⁵⁾が提案されているが、この光回折法をヘアライン仕上面に適用すると、検査面全面でヘアライン条痕による回折パターンが発生するため欠陥を分離・認識することが難しくなる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。また、回折パターンを検知する検出器との関係により、欠陥の大きさや検査対象面が平坦であることや、設置された検査面の傾き⁽⁸⁾などの制限もある。

そこで、本研究ではヘアライン仕上面の傷を検出するための基本的な検査システムの構築を試みた。まず CCD カメラで撮影したヘアライン仕上面画像について二次元離散フーリエ変換を行い、パワーの集中度合いから傷の検出が可能であり、適用した画像処理方法が有効であることを確認した。次に、パワースペクトル空間の原点を中心とする扇形領域を順次決定し、各領域内に含まれるパワーの変動の大きさから、傷の有無とその方向を判定する方法を提案した。判定に当たっては、扇形領域の角度とパワーの関係を三次式で近似する方法を採用した。さらに、傷の位置・形状を

* 原稿受付 2000 年 3 月 21 日。

*¹ 正員、千葉大学工学部(☎ 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)。*² 千葉大学大学院。

E-mail: higuchi@meneth.tm.chiba-u.ac.jp

特定する方法として、傷が存在するヘアラインの画像を二値化し、ヘアライン条痕の平均間隔と傷の方向から2種類のオペレータを決定し、それらを使用した近傍処理と膨張処理を繰り返し適用する方法を検討した。その結果、ヘアライン条痕と傷の分離が可能になり、検査対象部分内に傷を表示できることを明らかにできた。また、本方法を実際の製品検査に適用した結果、各種の傷や複数の傷が存在する場合にも適用できることが判明し、その有効性を確認した。

2. 実験装置

本研究で使用した実験装置の概要を図1に示す。CCDカメラで撮影されたヘアライン仕上げ面の画像はパーソナルコンピュータに取込まれる。ステッピングモータで駆動されるX-Yテーブル上に試料を置き、パーソナルコンピュータでX-Y方向の位置をコントロールすることにより、ヘアライン仕上げ面の所定の場所を撮影できる。照明はハロゲン光源を使用し、光ファイバにより導かれた光を試料全周方向から照射した。CCDカメラの映像信号をビデオ入出力ユニットを介してパーソナルコンピュータに取り込み、各種の画像処理を行った。画像処理に当たっては、撮影されたヘアライン仕上げ面の約 2.8×2.8 mmの範囲を 512×512 画素分として切り出した。そのため、画素間距離は約 $5.5 \mu\text{m}$ になる。

3. ヘアライン仕上げ面の欠陥検出と特定

SUS 304の3層浅鍋の内側に付与されたヘアライン仕上げ面の画像の例が図2である。図2においてヘアラインの加工方向は上から下であり、図2(a)は連続した細かい条痕がほぼ規則的に付与されているので、良好なヘアライン仕上げ面といえる。これに対し、図2(b)はヘアライン自体については図2(a)に比べ大きな違いはないが、その条痕に対し約 45° の方向に傷状のラインが検出されている。これはヘアライン加工

Fig. 1 Schematic view of experimental setup

が十分行われず前工程の研削痕が残された結果によるもので、ヘアライン仕上げ面としては不良となる。本研究ではヘアライン仕上げ面を対象とした検査システムのまず第一歩として、ヘアライン仕上げ面上に残された前工程の研削痕、あるいは製品の取扱い上の不注意などで生じた傷の検出方法を検討した。

3・1 ヘアライン仕上げ面の欠陥検出方法 図2に示されたヘアライン画像では、良好なヘアライン仕上げ面ほど条痕が図中の縦方向に規則正しく整列する傾向を示す。このため、同図に示すようにX, Y軸を定めると、良好な場合ほどX軸方向の濃淡の繰返しが規則的になる。さらに、図2(b)の傷が存在するとみなされるヘアライン画像では、良好な場合に比べ不規則な濃淡の変化が現れる。そこで、ヘアライン画像を二

(a) Standard surface

(b) Sub-standard surface due to scratches

Fig. 2 Samples of hairline finished surfaces

次元の濃淡情報と考え、その空間的な広がり、すなわち空間周波数を二次元離散的フーリエ変換(2D-DFT)により調べた。

図3は図2の画像に対し2D-DFTを行った結果 $G(m, n)$ である。これは、図4に示すように画像の中心を空間周波数が零の点とし、 X 軸および Y 軸方向の空間周波数をおおの m, n として、それぞれに対応するパワー $G(m, n)$ を画像の濃淡で示している。図2のヘアラインによる X 軸方向の濃淡の変化のため、図3(a), (b)では中央の水平な軸(m 軸)方向が他より黒くなり、パワーが強く現れている。さらに、図3(b)では、 m 軸に対し約 140° の方向にもパワーが強く現れている。これは前述のように、ヘアライン上の傷の存在がパワーに影響を及ぼした結果である。なお、図3において中央の垂直な軸(n 軸)は白く示されている。これは照明の影響を軽減することを目的として、各画像の横方向の画素一行ごとに濃度の平均値を零、標準偏差を一定として濃度分布を正規化した結果による。この前処理の方法は、検討の余地があると思われるが、ここでは n 軸が明確になることなどを考慮して採用した。以上のようにヘアライン仕上面では、ヘアラインおよび傷の方向に対し垂直にパワーの値が強く現れることが明らかであり、ヘアライン仕上面の傷が画像処理により検出可能といえる。そこで図4中に示しているように、2D-DFT で得られた結果 $G(m, n)$ に関し、その中心 $G(0, 0)$ を原点として、極座標形式の $G(r, \phi)$ で表し、式(1)で示される $q(\theta)$ を求めた。

$$q(\theta) = \int_{\theta-\Delta}^{\theta+\Delta} \int_{r_1}^{r_2} G(r, \phi) r dr d\phi \dots\dots\dots (1)$$

これは、パワースペクトル空間の原点を中心として、 $r=r_1, r_2$ (一定)、 $\phi=\theta \pm \Delta$ で形成される扇形領域内に含まれるパワーの和を求めるものである⁽⁹⁾。 θ を徐々に増加させて $q(\theta)$ の変化を調べれば、規則的なヘアラインの中に別の方向性をもつ要素が加わった場合には、その方向が示されることが予測される。後述の図5で明らかになるが、実際に、 $\Delta=0.5^\circ$ 、 $r_1=40$ 画素(空間周波数： 14.3 mm^{-1})、 $r_2=200$ 画素(空間周波数： 71.4 mm^{-1})とし、 θ を 0° から 180° まで 0.5° ごとに変化させた計算を図3(b)の画像に適用すると、ヘアラインの方向に対応する角度の $q(\theta)$ が最大になり、傷の方向に対応する $q(\theta)$ は大きく変化する結果を示した。

本研究で採用している一般的な測定方法では、工作物が検査工程に搬入され、CCD カメラの撮影のために設置された場合、その位置は必ずしも一定にはなら

(a) Standard surface

(b) Sub-standard surface

Fig. 3 2D-DFT images

Fig. 4 Fan-shaped filter

Fig. 5 Calculated results of $q''(\theta)$, $Q(\theta)$ and $P(\theta)$

ない。また、各種の工作物を対象とした場合、ヘアラインが形成されている方向が同一とは限らない。そこで対象画像中のヘアラインの方向を図4の n 軸方向に平行にするため、式(2)で示すように $q(\theta)$ が最大になるヘアラインの方向 $\theta = \theta_m$ を $\theta = 0$ ($\theta = \theta - \theta_m$) とする変換を行い $q''(\theta)$ とした。これにより、対象とする画像間のヘアラインの方向の違いを補正できる。さらに、式(3)に示すように $q(\theta)$ の最大値 $q(\theta_m)$ で正規化し、これを $q''(\theta)$ とした。以上より、ヘアラインの方向の違いを補正するとともに正規化により $q''(0^\circ)$ および $q''(180^\circ)$ が最大値1になる。

$$q''(\theta) = q(\theta) \dots\dots\dots (2)$$

$$q''(\theta) = \frac{q'(\theta)}{q(\theta_m)} \dots\dots\dots (3)$$

図3(b)の画像について $q''(\theta)$ を求め、 $\theta = 10^\circ \sim 170^\circ$ を拡大して示した結果が図5である。なお、計算に使用した Δ , r_1 , r_2 の値は前述のとおりである。 $q''(\theta)$ は下に凸な曲線形状を示し、傷の方向に対応した $\theta = 140^\circ$ 付近にピークが現れている。このピークの相対的な大きさを評価するため、式(4)に示すように $q''(\theta)$ に関する3次の近似式 $Q(\theta)$ の係数 a , b , c , d を最小二乗法で決定するとともに、式(5)により $q''(\theta)$ と $Q(\theta)$ との差 $P(\theta)$ を計算した。図5には、これらの計算結果も併記している。

$$Q(\theta) = a\theta^3 + b\theta^2 + c\theta + d \dots\dots\dots (4)$$

$$P(\theta) = q''(\theta) - Q(\theta) \dots\dots\dots (5)$$

図5から明らかなように、 $Q(\theta)$ は $q''(\theta)$ の平均的な形状を示し、 $P(\theta)$ は $q''(\theta)$ の変動の大きさに対応していることがわかる。この例では、 $\theta = 143^\circ$ すなわちヘアラインに対して 143° の方向で $P(\theta)$ は最大値0.126を示した。この値は実験的に求めたしきい値 $p_{th} = 0.080$ より大きいので、傷が存在すると判断した。 p_{th} の値については第4章で述べる。以上のように、

提案した方法はヘアラインという方向性を持った仕上面を対象としていながら、設置された工作物のヘアラインの角度とは無関係に傷の検出ができる。また、傷、ヘアラインおよび、その相互間の角度が容易に判定できるので、その性質を利用すれば、3・2節に述べるように傷の特定も可能である。

3・2 傷の位置・形状の特定方法 二次元離散的フーリエ変換およびそれに続く処理の結果、傷が存在すると判定された場合については、傷の位置・形状の特定を行った。すなわち、傷の状況を調べることで、その程度が把握でき最終的な製品としての可否や階級付けが可能になると考えられ、また加工工程を改善するためには、どのような不良品が発生しているかを知る必要がある。

傷の位置・形状を特定するに当たっては、二値化したヘアライン画像からヘアラインの筋を除去し、ヘアラインと方向が異なる傷だけを残す処理を行った。具体的には、二次元離散的フーリエ変換により求めたヘアラインに対する傷の角度 θ_s と、一次元フーリエ変換で計算したヘアライン相互の平均間隔 t_0 から図6に示す2種類のオペレータ A, B を決定し、各オペレータによる近傍処理、および膨張処理を繰り返し適用した。すなわち、A を用いる近傍処理、B を用いる近傍処理、および膨張処理の順に、各処理を1回ずつ行うプロセスを繰返した。オペレータ A, B において近傍処理の対象となる画素間の距離 t は、図6中に示した関係からわかるように、 $t = t_0 / \{2 \cos(\theta_s - 90^\circ)\}$ である。

オペレータ A を使用する近傍処理は、ヘアラインを除去し、斜め方向に連なる傷の画素を優先的に残すための処理である。つまり、傷が存在する場合、画素が連続することを考えて、図6(a)の三つの画素の値が総て1(黒)のときだけ出力画素の値を1(黒)とし、傷の画素を認識した。三つの画素のうち、いずれかが白ならば出力画素は白になり傷は存在しないとみなされる。すなわち、オペレータの両端の画素がヘアラインの平均間隔に対応するように設定しているので、両端の画素がヘアラインに一致した場合、傷がない状態では中央の画素は白になる可能性が高く、ヘアラインの画素が除去される。

また、オペレータ B を使用する近傍処理はヘアラインによって途切れている傷を結合するための処理である。つまり、図6(b)の2点の近傍が黒のとき、中央の画素の値を1(黒)として入力画素に付け加える処理である。さらに A による近傍処理を実施することにより、傷の成分が細くなるので、8隣接の画素も含め

(a) Operator A

(b) Operator B

Fig. 6 Neighborhood operators

て連結成分の境界点を1画素ずつ増加する膨張処理を行った。また、ヘアライン相互の平均間隔 t_0 は、ヘアラインの方向に対し垂直な方向について一次元フーリエ変換を行い、パワーが最大となる画素間距離を t_0 とした。この結果は、目視によりヘアライン画像から得た平均間隔 t_0 とほぼ一致することが確認された。

図2(b)のヘアライン画像に対し図7に示すように二値化後、2種類のオペレータを使用した近傍処理、および膨張処理を行った結果が図8である。二値化のしきい値は、濃度階調の中間(127)で濃度は零とした。この場合、 $\theta_s=143^\circ$ 、ヘアラインの平均間隔 $t_0=10$ 画素(約 $55\mu\text{m}$)から、 $t=8$ 画素と計算された。図8(a)から、オペレータ A を使用する近傍処理でヘアラインがかなり除去されるとともに、傷が検出されていることがわかる。さらに、図8(b)のオペレータ B

Fig. 7 Binary image of sub-standard surface

(a) After neighborhood operation (operator A)

(b) After neighborhood operation (operator B)

(c) After expansion operation

Fig. 8 Scratch detecting processes

による近傍処理では傷の部分が連結されており、図8(c)の膨張処理で傷が明確にされている。この1回の処理結果では傷の方向と同一方向の画素が強調される傾向があるが、一連の処理を繰返し適用することにより、さらにヘアラインが消失し傷の形状だけが明確にされる。図9は一連の処理を繰返した場合の画像の推移であり、処理回数を i とすれば、 $i=3$ 程度で完全に傷がヘアラインと分離されていることがわかる。処理回数 i は同様な例より経験的に、 $i=3$ または $i=4$

Fig.9 Effects of the number of repetition of scratch detecting processes

と判断したが、さらに多くのヘアラインおよび傷の状態により最適な回数が決定できると考える。このように2種類のオペレータを使用した近傍処理と膨張処理を繰返し適用する方法により、ヘアライン条痕と傷の分離が可能になり、検査対象部分内に傷だけを表示できることが明らかになった。

4. 傷の検出における実用上の検討

3章では、ヘアライン仕上面に前工程の研削痕が残されている場合に関し、その検出と位置・形状の特定方法を述べた。そこで、さらに取扱い上の不注意などで付けられた一般的な傷の検出方法について検討を行った。すなわち、前工程の研削痕に限らず各種の傷が存在するヘアライン仕上面の画像について、提案した方法を適用し、その有効性と実用上の検討を行った。

表1は良好なヘアライン仕上面および傷が存在する場合について、2D-FFTおよび $q''(\theta)$, $Q(\theta)$, $P(\theta)$ を計算し、 $P(\theta)$ の最大値 $P(\theta_s)$ を調べた代表例である。良好な場合には $P(\theta_s)$ は0.05程度の値を示しているが、傷が存在するヘアライン仕上面では $P(\theta_s)=0.1$ 前後の値を示すことがわかる。このため傷の有無を判定するしきい値 p_{th} は、0.080が適当と考える。このしきい値は、前述の前工程の研削痕が残っている場合の判定にも適合するので、この点から考慮しても妥当な値といえる。

Table 1 Comparison of the maximum values of $P(\theta_s)$ of standard surfaces and sub-standard surfaces

No	sub-standard surfaces(with scratches)	standard surfaces (without scratches)
1	0.196	0.052
2	0.124	0.055
3	0.085	0.052
4	0.108	0.054
5	0.265	0.050
6	0.150	0.061

本研究で提案した欠陥検出の方法は、傷の大きさや形状によって2D-DFTの値に差を生じ、検出精度に影響を及ぼすと考えられる。これについては、検出対象とした傷の形状が幾何学的に規則性を示すものではなく、ヘアラインの状態が場所により微妙に変化し、さらに傷の形状を的確に表現しにくい検出精度を定量的に判断するのは難しい。しかし、本研究で検出した傷を実測すると、対象としたヘアライン仕上面($R_y=7\sim 10\ \mu\text{m}$, ヘアラインの平均間隔 $t_0=30\sim 60\ \mu\text{m}$ 程度, ヘアラインの長さ:約1mm以上)において、傷の長さは約900 μm 以上, 幅は約50 $\sim 120\ \mu\text{m}$, 深さは約7 $\sim 13\ \mu\text{m}$ 程度であった。したがって、この程度の傷については、本方法において $p_{th}=0.080$ とすることにより十分検出可能と考える。この扇形領域内のパワーの値0.080は、ヘアラインの振幅を1.0とする場合、その0.28程度の振幅に相当するといえる。

さらに、前述の例では前工程の1本の研削痕がヘアライン画像内に存在していたが、実際には傷が複数ある場合も考えられる。この場合には、おのおのの傷について1本の場合と同様に画像処理を行い、最終的に検出された各傷どうしの論理和を求めることによりヘアライン上の欠陥検出が可能になる。

図10はヘアライン仕上面上に二つの傷が存在する場合の例であり、この画像を2D-DFTすると、図11に示すように2本の傷の方向に対応した角度にパワーが強く現れる。そこで傷が一つの場合と同様に、 $q''(\theta)$, $Q(\theta)$, $P(\theta)$ を求めた結果が図12である。図12から明らかなように、 $P(\theta)$ の二つのピーク値 $P(\theta_{s1})=0.322$ および $P(\theta_{s2})=0.113$ は $p_{th}=0.080$ を越えているため、傷が二つ存在すると判断する。ここで、各傷に相当する角度 θ は $\theta_{s1}=103^\circ$, $\theta_{s2}=48^\circ$ であるので、この二つの θ_{s1} , θ_{s2} に応じたオペレータを2組用意し、それらを用いた近傍処理と膨張処理を別々に繰返し、得られた二つの画像について画素間の論理和を求めた。図13(a)は $\theta_{s1}=103^\circ$, 図13(b)

Fig. 10 Sub-standard hairline finished surface with 2 scratches

Fig. 11 2D-DFT image of sub-standard hairline finished surface with 2 scratches

Fig. 12 Calculated results of $q''(\theta)$, $Q(\theta)$ and $P(\theta)$ in the case of 2 scratch surface

(a) $\theta_{s1}=103^\circ$

(b) $\theta_{s2}=48^\circ$

Fig. 13 Results of scratch detecting processes at $\theta_{s1}=103^\circ$ and $\theta_{s2}=48^\circ$

Fig. 14 Final results of scratch detecting processes in the case of 2 scratch surface

は $\theta_{s2}=48^\circ$ の場合について傷を検出した結果である。さらに、それらの論理和を求めたのが図 14 である。この結果から、複数の傷が存在しても、一つの場合と同様におおのの傷について別々に処理することにより、ヘアライン仕上面全体の欠陥検出が可能になることが明らかである。

以上のように、本方法はヘアラインの方向に対し角度をもつ各種の条痕を傷とみなし、それらを有効に認識できることがわかった。しかし、検出方法の性質上、傷とヘアラインの方向が一致した場合には傷として検出されない。ヘアライン仕上面の評価にとっては、むしろこれは好都合といえる。元来、ヘアライン仕上げは一定の方向に研削痕を付与する加工方法であり、もし前工程の研削痕が最終のヘアラインと同一方向に残されているとすれば、ヘアライン自体の品質として評価されるべきであり、実際にもそのように扱われている。その場合、前工程の研削痕や傷の程度によって、ヘアライン仕上げ面の品質に及ぼす影響が異なること

になる。ヘアライン自体の評価は、画像の濃度値の連続性や一様性などを統計的に調べるテクスチャ解析などの適用により可能になると考える。

5. 結 論

ヘアライン仕上げ面を客観的・定量的に検査するシステムを開発するための第一段階として、前工程の研削痕や取り扱い上の不注意などで生じた傷を検出する画像処理方法について検討を行った。得られたおもな結果は以下のとおりである。

(1) ヘアライン仕上げ面の画像を二次元離散的フーリエ変換した結果に対して扇形フィルタを使用し、ヘアライン仕上面に残留する前工程の研削痕や各種の傷の有無および、その方向を判定する方法を提案した。判定に当たっては、扇形フィルタに含まれるパワーの変動の大きさから決定し、それを計算するための具体的方法を検討するとともに、その有効性を確認した。

(2) 傷の方向とヘアライン条痕の平均的な間隔に対応した2種類のオペレータを用いる近傍処理と膨張処理を繰返し適用することにより、傷とヘアライン条痕を分離できることを確認し、傷の位置・形状を特定することが可能になった。

(3) ヘアライン仕上げ面上の傷を検出し、その位置・形状を特定するための実際的な検討結果より、傷の有無を判定するためのしきい値、傷が複数存在する場合の処理方法などを明らかにした。

最後に、本研究を進めるにあたり、有益なご助言をいただいた(有)ミヤギ代表取締役 宮城健次氏に深く感謝する。

文 献

- (1) 宮城健次, ステンレス表面修飾とヘアライン仕上げ, 研磨布紙加工, **30-1** (1998), 29-41.
- (2) 研磨布紙加工技術研究会, 実務のための新しい研磨技術, (1992), 41-43, オーム社.
- (3) 三井公之, 最近の表面欠陥検査法, 機械の研究, **40-3** (1988), 362-368.
- (4) 河野嗣男, 表面欠陥検査の展望, 精密工学会誌, **53-8** (1987), 1141-1143.
- (5) 米田康司・新井明男・西本善郎・中井康秀, 磁気ディスクサブストレート表面欠陥検査装置の開発, 精密工学会誌, **56-3** (1990), 479-484.
- (6) 小野明, エレクトロニクス産業関連の欠陥検査, 精密工学会誌, **53-8** (1987), 1158-1160.
- (7) 岡田三郎・今出政明・宮内秀和・住本哲宏・山本秀樹, 傷種識別機能を有する複合型傷検査システム, 電気学会論文誌, **115-C**, 3 (1995), 452-459.
- (8) 望月政彦・小松忠紀, VHD ディスク欠陥検査装置, 昭和60年度精機学会春季大会学術講演会論文集, (1985), 673-674.
- (9) 長尾真, パターン情報処理, (1983), 60-63, コロナ社.