円錐鏡を用いたベアリング内周欠陥の検出†

西 松 豊 典*・興 水 大 和**・鳥 羽 栄 治*

Detection of Defects on Inner Peripheral Surface of Bearing Using Cone Mirror

Toyonori NISHIMATSU*, Hiroyasu KOSHIMIZU** and Eiji TOBA*

It is investigated and discussed how the defects on the inner peripheral surface of bearing should be imaged and detected by the computer image processing technique with CCD camera and the experimental cone mirror. The binarization was done about the digital image by means of a simple thresholding operation and the defects on the inner peripheral surface could be detected clearly. From the result of single regression analysis between the sensory value about the defect's grade by inspectors and the measured defect's area was examined, there was a good agreement between the values calculated by this regression equation and the sensory value by inspectors.

Key Words: bearing's defect, computer image processing, cone mirror, sensory value, single regression analysis

1. はじめに

ベアリング製造工場の重要な工程である検査工程においては、検査員がベアリング製品の欠陥を検出し判定する場合、高度に訓練された検査員の視覚機能に依存しているため、個人差による判定のばらつき、判定基準の曖昧さ、疲労による検査精度の低下などが生じる。

特に、ベアリング外輪および内輪の内周上に存在する欠陥を検出する場合、ベアリング内周へ CCD カメラのヘッド部分が直接入らず、内周部分の直接撮像が不可能となるので、人間の視覚機能のほうが通常の視覚センサよりも優位に立っていると考えられる。

そこで、本研究ではベアリング内周を一度に撮像できる円錐鏡を試作し、円錐鏡および CCD カメラを用いてベアリング内周の欠陥を鮮明に撮像できる画像入力方法(照明形状、照明の背景、照明の種類、照度)を検討することにより、ベアリング内周の欠陥検出を試み、さらに欠陥の有無を判定する手法について考察¹⁾を加えた。

2. 試料および実験方法

本研究では、ベアリング外輪(外径72 mm, 内径60 mm, 高さ17 mm)の内周に欠陥形状が単純な円(直径: 0.5,

2.0 mm, 深さ: 0.5 mm), 正方形(縦×横: 1×1 mm, 深さ: 0.15, 0.35 mm), 長方形(縦×横: 1×5 mm, 深さ: 0.1, 0.3, 0.5 mm)の欠陥があるものを試料とした。

Fig. 1 は、ベアリング内周の欠陥を検出する試作システムの概要を示す。CCD モノクロ・カメラ(1), 円錐鏡(2), 照明装置(3), 画像処理装置(4; PIAS III, (株)ピラス製), コンピュータ(8), 処理画像表示モニタ(9), プリンター(10, 11)および背景・試料台(13)から構成されている。

Fig. 1 Schematic arrangement of experimental defect detection system

(1) CCD camera, (2) Cone mirror, (3) lighting apparatus, (4) image analyzer, (5) video input unit, (6) digital image memory, (7) video output unit, (8) personal computer, (9) RGB monitor for image indication, (10) printer for measured value indication, (11) printer for image indication, (12) sample, (13) stage

† 日本非破壊検査協会第8回産業における画像センシング技術シンポジウムで発表(1993・6)

* 信州大学繊維学部 上田市常田3-15-1

** 中京大学情報科学部 豊田市貝津町床立101

* Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University, Ueda

** School of Computer and Cognitive Sciences, Chukyo University, Toyota

(Received March 17, 1994)

ベアリング内周の欠陥を検出する場合、Fig. 1 に示すように CCD カメラの前面に据え付けられた円錐鏡を経由してベアリングの内周部分が撮像される。なお、検出システムにおいて背景・試料台、円錐鏡およびカメラは外乱光の影響を除去するために、暗箱の中へ収納した。

このようにして CCD カメラで撮像されたベアリングの内周に関するアナログ画像は、画像処理装置内の A/D 変換ボード上でデジタル画像に変換され、各画素位置 (x, y) ごとに、その輝度値 L (輝度レベルは 256 階調に分割) が計測される。そして、それらの計測値 $L(x, y)$ がデジタル画像メモリに記録され、画像情報解析が行われたのち、ベアリングの欠陥形状情報が処理画像表示用のモニタに表示される。

3. 実験結果および考察

ベアリング内周を一度に撮像するために、円錐形のコーンレンズの表面にアルミ蒸着することにより表面が鏡面の円錐鏡 (頂角 90° 、直径 40 mm、高さ 20 mm) を試作した。円錐鏡の斜面で反射した照明光はベアリング内周を均一照射したのち、円錐鏡経由で CCD カメラを通してベアリング全内周の状況が一度に撮像される。

Fig. 2 は、円錐鏡を通して CCD カメラで撮像されたベアリング内周画像である。

CCD カメラおよび円錐鏡を用いてベアリング内周画像を鮮明に撮像するために、ベアリング内周画像の入力方法について検討を行った。検討項目は、照明形状 (リング形状/棒状)、照明の種類 (単波長域蛍光体/3 波長域蛍光体)、照度 (3500, 5000, 7000 lx)、試料の背景 (黒色背景/銀色背景)、カメラ絞り (4.0, 5.6, 8.0) である。なお、蛍光体は光強度の揺らぎを小さくするために高周波 (24 kHz) の蛍光灯を用いた。

照明形状については、棒状蛍光灯より、ベアリング内周全体に均一な照明が可能で、ベアリング形状に類似したリング形状の蛍光灯 (リング外径; 80 mm、蛍光灯の前に拡散板無し) を採用した。また、照明の種類は G 波長

Fig. 2 Measurement of bearing's inner peripheral surface by cone mirror

域 ($\lambda=545$ nm) 蛍光体を用いたほうが入力した画像の輝度ムラが比較的少なくなることがわかった。

背景について検討した結果、銀色背景 (N 8.9) の輝度はベアリング内周の輝度と近似しているため、内周像と背景とを明確化できる黒色 (N 2.8~3.0) 背景を用いた。

つぎに、リング状 G 波長域高周波蛍光灯照明を用いて、黒色背景上のベアリング内周について 3 種類の照度およびカメラの絞りを組み合わせて撮像したベアリング内周画像を比較した結果、照度は 7000 lx、絞りについては 4.0 を用いたほうが明確に撮像できた。

そこで、50 個の正常ベアリングの内周入力画像について背景部分を除外したベアリングだけの輝度分布を測定した結果の代表例を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 に示されるように、正常ベアリング内周画像の各輝度ヒストグラムの輝度分布範囲は 187~249 である。なお、これらの輝度ヒストグラムについて正規分布の判定を行った結果、輝度ヒストグラムは正規分布を形成していた。

ベアリング内周上に存在する欠陥を検出するために、正規分布している輝度ヒストグラムにおいて輝度レベル ($\mu - 3\sigma$) より低輝度部分を欠陥と仮定すると、2 値化のしきい値レベル値は 187 であった。ただし、 μ は平均値、 σ は標準偏差である。

そして、このしきい値を用いて種々の内周欠陥ベアリングについて 2 値化を行った結果の一部を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 より、ベアリング内周上の欠陥 (検出可能な最小欠陥の大きさ; 直径 0.5 mm の円) は明確に検出できることがわかる。そして、Fig. 4 に示す 2 値化画像について反転処理を行い、検出されたおのおのの欠陥について、その面積 (x) を計測する。しかし、この計測値は欠陥の面積を表わしているだけで、コンピュータではこの面積値から欠陥の状態を判定することはできない。

Fig. 3 Gray level histogram of normal bearing image. X axis shows the gray level and Y axis shows the pixel number

Fig. 4 Defects of bearings detected by the experimental system. Defect's shape is a circle (diameter=0.5 mm)

Fig. 5 Sensory values of bearings' defects evaluated by inspectors. Defects' shape and size (Wide×Height×Depth or Diameter×Depth) are as follows;
 (1) rectangle (1×5×0.3 mm), (2) square (1×1×0.15 mm), (3) circle (0.5×0.5 mm), (4) rectangle (1×5×0.1 mm), (5) no defect, (6) circle (2.0×0.5 mm), (7) rectangle (1×5×0.5 mm), (8) no defect, (9) square (1×1×0.35 mm)

そこで、画像計測に用いた欠陥ベアリング 7 種類と正常ベアリング 2 種類について検査員が官能検査を行った。官能検査方法は、ベアリングの内周上に欠陥が(なし、かすかにある、少しある、やや大きい、大きい)の 5 段階で評価を行った。検査員はベアリング検査経験年数 5 年以上の専門検査員で、男性 1 名、女性 2 名の計 3 名である。また、欠陥の判定時の部屋の照度は 400 lx である。

そして、全検査員が判定した結果について、欠陥がなし→0 点、かすかにある→1 点、少しある→2 点、やや大きい→3 点、大きい→4 点と点数を与え、各サンプルについて判定者が評価した結果を平均化した。その結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、検査員は欠陥の 1 辺が 1 mm 以上あれば、欠陥が大きいと判定している。

官能検査より得た平均判定値(y)と画像計測より求めた欠陥の面積(x)との関係について回帰分析を行った結果、両者の関係は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} y &= \log_{10} x + a \quad (x > 0) \\ y &= 0 \quad (x = 0) \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 6 Relation between evaluated values by inspectors and calculated values by eq.(1)

ただし、 $a=4.0$ である。

つぎに、(1)式の妥当性を確認するために 9 種類の欠陥ベアリング(正常品 2 個を含む)を新たに作製し、3 名の検査員に同様の官能検査を実施した。また、9 種類のベアリングについて同様の手法で画像計測し、その面積値を(1)式に代入し判定値を予測した。その予測判定値と検査員が実際に評価した判定値との関係を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 に示すように、予測判定値と実測判定値間にはよい一致がみられ、(1)式の妥当性が確認された。

4. おわりに

- (1) ベアリング全内周を一度に撮像できる円錐鏡を試作し、円錐鏡の斜面で照明光を反射させたのち CCD カメラを通して黒色背景・高周波リング状 G 波長域蛍光体(照度 7000 lx)の反射光下で撮影すれば、ベアリング全内周の画面が鮮明に撮影可能となった。
- (2) 撮像されたベアリング内周画像において正常部分と欠陥を明確化するために、輝度分布が正規分布している部分以外を欠陥と仮定して 2 値化のしきい値レベルを設定した結果、欠陥が 0.5 mm の測定精度で検出可能であることがわかった。
- (3) 検出したベアリング内周の欠陥面積(x)と官能検査で得た判定値(y)より求めた回帰式に、新たに 9 種類のベアリングについて画像計測した欠陥面積を代入して予測した判定値と検査員が実際に評価した判定値間にはよい一致がみられた。

参 考 文 献

- 1) 西松, 鳥羽, 興水: 円錐鏡によるベアリング内周欠陥の検査, 第 8 回産業における画像センシング技術シンポジウム講演論文集, 125/128(1993)