輪 郭 測 定 器 の 試 作*

和 田 尚** 平 林 次 夫**

Trial Design of Profile Measuring Instrument

Hisashi WADA, Tsugio HIRABAYASHI

This paper describes the profile measuring instrument that we designed. The characteristics of laser beam with high luminance and good coherency are utilized to this instrument. Profile measurement of the large parts such as turbine blades, toothed wheels, knobs etc. have been reported previously. Therefore, the purpose of this paper is to point out that the profile of small parts are measured by remodeling single lens into optical microscope. In case of measuring the profile of large parts, the precise profile was obtained with simple adjustment. But in this method with microscope system the sizes and forms of profiles are not always obtained precisely so that those experiments were done to investigate the condition that precise profiles can be obtained. As the result of the experiments, it was found that the fine profile can be measured easily only with error by the optical aberrations if the optical axis is coincident with the axis of mechanical rotation perfectly.

1. ま え が き

機械加工技術の発展は、機械の高精密化、高速化そして小形化を可能にし、産業界に多大な貢献をしているが、機械要素・部品の形状もますます複雑化し、小形化する傾向にある。それに伴って現場においては精密な加工が行なわれ、精度の高い輪郭形状の測定が要求されてきている。

三次元物体の輪郭形状測定の方法および装置にはすでに製品化されたものもある¹⁾。回転反射鏡を回転走査させる一種の光切断法による測定法の研究²⁾、またレーザ光をプローブとした焦点合せ法による被測定点の三次元座標位置の測定³⁾なども研究されているが、前2者はいずれも測定対象が大きく、構造的に複雑であり小形機械要素の輪郭を得る本研究の目的とは本質的に異なる。また第3番目の焦点合せ法は断面形状を数量化した後、輪郭曲線を得るもので、輪郭線を直接に撮るものとは全く異なる。したがって構造が複雑化して実用面で問題があると思われる。

本試作器では、カメラ・集光レンズ・被測定物を同一軸上におき、カメラ（フィルム面）と被測定物を回転することのみにより簡便に三次元物体の任意の輪郭形状の記録・測定ができるものである。光学的触針には特にレーザ光線が有効であり指向性が良く、レンズによってき

わめて細いビームにすることができることを利用した。

比較的大きい被測定物、たとえばタービン翼、歯車、ベアリングなどを対象とした輪郭測定器についてはすでに試作、報告した^{4),5)}。しかし測定器として実用性を高めるためには小物体の顕微鏡的な測定もできることが要求されるので、前試作器における集光レンズを顕微鏡におきかえたものについて報告する。

集光レンズを顕微鏡におきかえて拡大し測定しようとする本実験では、カメラと被測定物を回転させるために回転軸と顕微鏡光軸がずれることによって得られる輪郭線の形状測定精度に影響を与えることが予測されたのでこれを確かめるための実験を行ない、その結果に基づいて考察し、輪郭線を正しく撮影するための方法について述べる⁶⁾。

2. 原 理

機械要素・部品などの機械加工面に横から細い光のビームをあてれば、真上からでも散乱光の一部をとらえることができるから、この被測定物の上に集光レンズ（本報では顕微鏡）を置けば、ビームが当たった点の像をカメラフィルム面に結ばせることができる。そこで被測定物とカメラを同速度、同方向に1回転させてやれば、フィルム面の光点が連続的にその面上に輪郭を描かせ記録させることができる。

その様子を図1に示し具体的に説明する。

右側の光源から発せられたレーザ光線は、ピンホールと顕微鏡対物レンズの組合せによる平行光線装置を通過してきわめて細いビームとなって被測定物に投射され

* 原稿受付 昭和48年3月3日。昭和47年度精機学会春季大会学術講演会（昭和47年4月7日）にて発表。

** 正 会 員 東京都立大学工学部（東京都世田谷区深沢 2-1-1）

図1 原理図

る。その反射光線はあらゆる方向に乱反射されているので、散乱光線の一部を顕微鏡対物レンズで集光し、その像をさらに顕微鏡接眼レンズを通し観測する。

カメラは顕微鏡のすぐ上にカメラ回転歯車により保持されていて、その光点（被測定物にビームが当たっている点）をフィルムに結像し記録する。ここで、被測定物とカメラを同速度・同方向にちょうど1回転させれば、フィルム面上の光点が被測定物の全周にわたっての輪郭線をその面上に描く。

回転駆動は小形モータを用いて駆動軸を回転させ、二組の全く同じ歯車をまわして、カメラと被測定物を相対的静止の状態になるようにしてある。

水銀灯などの光源では輝度が低すぎて、細く明るい平行光線は得にくい。レーザー光線を使うことにより輝度が高くしかも細い平行光線が容易に得られる。

3. 光 学 系

原理に基づいて作図した光学系光路図を図2に示し説明する。

図2(b)は二次元座標系による光路図で被測定物、顕微鏡、カメラの配置を示している。被測定物に投射された光は対物レンズで実像を結び、接眼レンズによる虚像をカメラレンズによってフィルム面上に結像している様子を示す。

図2(a)は回転軸と顕微鏡光軸のずれを考察するために、レーザー光線の入射方向をX軸とし、それと直角方向をY軸にとり、そのXY面に垂直な方向、すなわち回転

図2 光 路 図

軸をZ軸とするような三次元座標系で表わした光路図である。結像の方法は(a),(b)図ともに同じで、この光学系で得られる被測定物の輪郭線はそれぞれの図で上に示す大きさとなる(ただし、被測定物は円柱とする)。ここで、Fo: 対物レンズ前側焦点、Fo': 対物レンズ後側焦点、Fe: 接眼レンズ前側焦点。

図3 顕微鏡および微動装置

4. 試作「輪郭測定器」

以上のような原理に基づいて、集光レンズを顕微鏡光学系におきかえた試作器の本体に組込まれた顕微鏡の部分の写真を図3に示す。

顕微鏡は3本中の1本の支柱から腕を出し、回転軸付近に光軸が垂直になるよう保持されている。

被測定物は試料台の上にセットされ、平行光線装置を通過した細いレーザー光線が投射される。顕微鏡光軸の微

最小目盛: Y 方向 20 μm , X 方向 10 μm

図4 顕微鏡取付方法・微動方法

被測定物: 1 ϕ 円柱顕微鏡倍率: 対物レンズ M6, 接眼レンズ, P10 $\times$,
カメラレンズ: 1: 1.4, $f=50\text{mm}$

図5 測定結果 (1)一円柱の場合

動にはマイクロメータヘッドを用いた。

小形モータの回転を特殊無すべりベルトにより駆動軸を回転させ、二組の全く同じ歯車によってカメラと被測定物をまわす(図1参照)。その回転速度は1回転あたり10秒から3分まで自由に变速できるようになっている。被測定物表面の反射状態および大きさによって速度を変えなければならないが、通常の場合は1回転あたり1分くらいの速度で撮影ができる。

5. 輪郭の大小関係と相似性

5.1 実験および結果

図2に示した光学系のような状態(回転軸と光軸が完全に一致している)であれば問題はなく正確な輪郭線が得られるが、カメラおよび被測定物の回転軸と顕微鏡光軸がずれると、得られる輪郭の形状に変化が起こる。

このことを実験により確かめる。

図4は本体に組込まれた顕微鏡の光軸を微動させる装置の図面である。

X軸方向の微動はマイクロメータヘッドにより、またY軸方向の微動はそれと同じ方式で移動するねじによって顕微鏡光軸を微動させる。

顕微鏡の取付方法の都合上(図4参照)Y軸方向は直線的に動く。しかしX軸方向の動きは支柱を中心とする円弧の一部になるが移動量と回転半径とから、その円弧の曲率は無視できうる量であるから、X、Y両軸方向とも直線的に移動するものとする。また最小目盛はX軸方向で10 μm 、Y軸方向では20 μm である。なお、マイクロメータヘッドでは副尺を用いれば1 μm まで読みとれる。

次にその実験結果を示す。

5.1.1 輪郭の大きさへの影響

輪郭の大きさへの影響を確かめるためには被測定物として1 ϕ の円柱を用いた。ここで使用した顕微鏡の倍率は60倍でカメラレンズは50mmの標準レンズである。

図5において、座標軸上の各点(・)は回転軸(試料の中心)に対する顕微鏡光軸の位置を示す。回転軸と光軸が一致したとき、すなわち正常な状態において得られた結果は図中右上のわくにかこまれた輪郭線で、これが被測定物1 ϕ 円柱の正確な輪郭線を表わしている。

顕微鏡光軸がX軸に沿って光源側(−)にずれるに従って得られる輪郭線は小さくなり、その反対側(+)にずれるほど大きくなっている。

また、Y軸方向には2箇所について示したが、どちら側にずれても正確な輪郭よりも大きくなっており、そのずれ量が大きいほど得られる輪郭も大きくなることがわかる。

5.1.2 輪郭の相似性

回転軸と顕微鏡光軸のずれによる輪郭線の大きさの変化については円柱を用いて確かめたが、形状の相似性については被測定物として正六角柱を用いて前と同様の実験をした。その結果を図6に示す。相似性を検討するにはX軸方向のずれのみで十分であるから、この軸方向のみについて示した。

この結果から、回転軸と顕微鏡光軸がずれることにより、輪郭線の大きさが変化することは円柱のときと同じであるが、同時に漸次相似性も失われていくのがわかる。

図6 測定結果(2)一六角柱の場合

5.2 幾何学的考察

この試作器を使用して輪郭線の記録・測定を行なうのであるが、正確な輪郭線を得るために、この装置について次の二つの仮定をおいて以下の幾何学的解析を行なう。

・正確な輪郭線を得るための装置に関する仮定(図1参照)

- (1) 試料台上面とカメラのフィルム面が回転しているときも常に平行を保っている。

- (2) 回転軸と一致している顕微鏡光軸は試料台面とフィルム面との間で常に直交している。

この二つの仮定のもとに顕微鏡光軸と回転軸が全く一致していれば問題はなく、正確な輪郭線が得られるが、回転軸と光軸にずれがあると得られる輪郭線に変化が起る。

5.2.1 輪郭の大きさへの影響

X 軸方向の微小ずれ量を Δx ,

Y 軸方向の微小ずれ量を Δy とし

て、回転軸に対する顕微鏡光軸の位置をずらしたときの輪郭線の大きさへの影響を図解する。

図7にはその代表的な光路図を示す(図5と同じ状態の光路図を作図したが、煩雑になるので一部を省略し代表的なものにとどめた)。

X 軸方向に関しては回転軸に対して光源側に負、反対側に正とする。この図における被測定物断面は円形である。光軸と回転軸とが完全に一致していれば顕微鏡で拡大された正確な輪郭線、図7(1)が得られるが、 X 軸方

- (1) 回転軸と顕微鏡光軸が一致している場合(正常) $D = 2Mr$ (1)
 (2) X 軸上に Δx ずれた場合 $D' = 2M(r + \Delta x)$ (2)
 (3) Y 軸上に Δy ずれた場合 $D'' = 2M\sqrt{r^2 + \Delta y^2}$ (3)
 (4) X 軸方向に Δx , Y 軸方向に Δy ずれた場合(一般的) $D''' = 2M\sqrt{(r + \Delta x)^2 + \Delta y^2}$ (4)

r : 被測定物半径, M : 総合倍率, D, D', D'', D''' : 得られる輪郭線の直径

図7 顕微鏡光軸の位置の変化による輪郭線への影響

向に Δx ずれると輪郭線は大きくなり, 図 7 (2), また Y 軸方向に Δy ずれた場合, 図 7 (3) となる. さらに両方の軸にそってそれぞれ微量ずれたとき, すなわち $(\Delta x, \Delta y)$ の位置にあるときの一般的なずれ方については, 図 7 (4) に示す. これは両軸方向の影響を受けたときであって, このように光軸と回転軸がずれることによって得られる輪郭線の大きさに影響が出るのが作図からもわかる. ここで特に注目すべきことは顕微鏡光軸が回転軸からずれていても, フィルム面上の物体像の大きさはどれも等しくなっていることである. それにもかかわらず得られる輪郭線の大きさに変化が起こるのは, 機械的固定回転軸に対して顕微鏡光軸のずれによってフィルム面に結像する光点の位置が動くからである.

5.2.2 輪郭線の相似性

測定結果 (2) (図 6 参照) から, 正常な位置より X 軸 (+) 側に顕微鏡光軸がずれるに従い辺の直線がふくらみ, (-) 側にずれるとへこみ, 共に相似性が失われることがわかる.

これは, 被測定物が円柱の場合には光点の位置は回転していても動かないが, その他の断面の場合には, 被測定物が回転するにつれ常に光点の位置が X 軸方向に沿って移動する. その動きが顕微鏡光軸のずれにより拡大または縮小され, (+) 側にずれたとき凸形となり, (-) 側にずれると凹形となって記録される. そしてそのずれ量が大きいほどその影響は大きく現われてくる.

しかし, 回転軸と顕微鏡光軸が一致していれば被測定物断面がどんな形をしていても, 得られる輪郭線はその断面を正確に表わすことはいうまでもない.

5.2.3 幾何学的図解

ずれ量 $\Delta x, \Delta y$ が輪郭形状に与える影響の度合を幾何学的に図解する. 図 7 の上の図はカメラレンズを通った場合のカメラファインダ視野内 (フィルム面) での関係を示す.

総合倍率を M とし, 得られる輪郭の直径を D とする. 被測定物を半径 r の円柱とすれば, 式 (1) は回転軸と顕微鏡光軸が一致している正確な輪郭線が得られる正常な場合の直径 D である. しかし回転軸に対して顕微鏡光軸がそれぞれ Δx ずれたとき式 (2), Δy ずれたとき式 (3) および $\Delta x, \Delta y$ ずれたとき式 (4) で, それぞれの関係図を示してある.

このように顕微鏡光軸がずれることによりフィルム面での物体像の位置が変わるので, 光点の位置が動くことによって得られる輪郭線の大きさは変わってくる.

特に式 (4) は一般的なずれの場合であって, この式と前の結果 (図 5 参照) から, 得られる輪郭線の大きさに

図 8 観測例 (1) 不規則断面模型

図 9 観測例 (2) 時計歯車

与える影響の度合は Y 軸方向のずれ Δy よりも X 軸方向のずれ Δx のほうが大きい. それは式 (4) において Δy は 2 次の項のみであるのに, Δx は 1 次の項を含んでいることから明らかである.

6. 観 測 例

以上のことを考慮にいれて, 顕微鏡光軸と回転軸とを一致させたとき, すなわち正確な結果が得られるような状態にあるときの観測例を次に示す.

1) 不規則断面模型 (図 8)

円柱や六角柱だけではなく不規則な断面形をもつ模型の任意断面の輪郭線である. 下にスケールを示し, 顕微鏡倍率は 42 倍である.

2) 時計歯車 (図 9)

目ざまし時計に使われている小さな歯車の輪郭線で表面には乱反射しやすくするための酸化マグネシウムをアルコールで溶いた白化塗料²⁾をうすく塗布してある.

3) 1.5 ϕ ハンドリーマ (図 10)

ハンドリーマを取付ジグにより垂直に保持し, そのある一断面の輪郭線である. 表面には前と同じ白化塗料を塗布した. このように切断しなければ得られにくい輪郭

図10 観測例(3)—1.5φハンドリーマ

もこの試作測定器によって、その形状を見ることができる。

7. 考 察

1) 輪郭線

輪郭線の太さは被測定物に投射する平行光線の太さにも影響されるが被測定面の凹凸にも関係があり、どんなところでも一様な太さにするわけにはゆかない。また微視的に面がどの方向に向いているかによっても変わってくる。そのために一つの画面に数本の等高線を入れるにはそれらが満足されるときにできる。また輪郭線の形状の正確な位置は線幅の中央をとればよい(幅をもつ線において、その線幅の中央が被測定物の真の輪郭を表わす²⁾)ということとは変わりはない。

2) 回転の方式

被測定物およびカメラを回転させず、光源を回転させるようにすれば軸のずれによる影響はなくなることは当然であり、最初に光源を回転させる方式を考えたが、光源と平行光線装置を組合わせるとかなり大きいものとなり、それらを被測定面に対して1回転させるには相当大的な装置を必要とするであろうし、水平面内で精度良く回転させることは困難である。またカメラや顕微鏡を支える支柱などにより輪郭線に不連続な点が数箇所できるなどの弊害があるので、この方式を採用せず、カメラと被測定面を回転する本方式を用いた。

3) 試料台の支持方法による回転ふれ

カメラ台歯車および試料台歯車はラジアルベアリングとスラストベアリングで保持し、その回転はきわめて滑らかになっている。

試作した測定器では製作上および組立時の不手際から多少のふれは考えられるが、本報では「仮定その1」を考慮に入れたうえでの結果である。

4) 顕微鏡光軸の「たおれ」などによる影響

実際に「たおれ」などの影響も十分考えられるが、「仮定その2」のように垂直であるものとして実験した。

5) 光軸合せ

マイクロメータヘッドとそれと同じ方式で微動するねじにより顕微鏡を X, Y 両方から目盛を追いながら顕微鏡視野内で中心を求めた。また、数種類の結果からずれているか否かを判断することができる。

6) 試作目的

第1段階として、今までの投影器などでは測定することができなかった試料の任意位置の断面の輪郭を細い線状で得ることが目的であり、第2段階として当然得られた輪郭線から実際にスケールを用いて定量測定したり、あらかじめ用意された母型図と比較したりしてその試料の形状を正確に知ろうとするものであった。それらについて比較の大きな物体から顕微鏡的測定にいたるまで測定対象を広げることができ、十分目的を果たし、実用に供されるものとする。

8. ま と め

以上のような原理と方法によって、小物体の顕微鏡的輪郭測定器を試作し、主として顕微鏡光軸のずれについて実験し、さらにいくつかの試料について実際に測定した。

その結果、

- (1) 顕微鏡光軸と回転軸が微量 Δ ずれると、得られる輪郭線の大きさと相似性に変化が起こるが、式(4)より与える影響の度合は X 軸方向のずれのほうが大きいから、より慎重に取扱わねばならない。
- (2) 測定精度はずれ量 Δ によって大きく左右されるので、 Δ をゼロに近付けることにより精度を向上させることができる。
- (3) 顕微鏡光軸と回転軸が一致していれば、被測定物の全周にわたっての輪郭線が顕微鏡(レンズ系)によって拡大された機械的正確な結果を得ることができる。したがって測定装置についての二つの仮定が保証されていれば機械的な測定精度は光軸のずれ量 $\Delta x, \Delta y$ に依存するので、理想的な装置であれば Δ 量をゼロに近付けることにより精度を上げることができるから、2軸の一致の度合が直接機械的の精度といえよう。
- (4) 本試作測定器での寸法精度は、実際の測定の場合、たとえば図6のような正六角柱の試料について真上から撮った顕微鏡写真と、同じ試料について本法による輪郭線との重ね合せの一致をみることはきわめて容易であるので、 $\Delta=0$ の場合を見いだすことは可

能である。

一例として, $r=1\text{ mm}$, $M=60$ において, $\Delta x=0.1\text{ mm}$, $\Delta y=0.1\text{ mm}$, すなわち直径 2 mm の円柱で両方の軸に沿って光軸が $100\text{ }\mu\text{m}$ ずつずれていたとすれば, $D''=132.54\text{ mm}$ となり, 正常な状態では $D=120\text{ mm}$ であるからその誤差は 10.45% となる。

一般には

$$\left\{ \frac{(r+\Delta x)^2 + \Delta y^2}{r^2} - 1 \right\} \times 100 \quad (\%)$$

次に線の太さによる精度, すなわち読取精度は, 試料の反射の状態と回転速度によって線幅の太さは変わってくるが, 最良の状態 $\Delta=0$ であっても読取りによる誤差が考えられる。今回の実験で得られた結果について考えると, フィルム面上でのその線幅は $0.2\text{ mm} \sim 0.3\text{ mm}$ であったので, 線幅の中心位置の決定により輪郭線は決まるので ($1/10$ の読取精度として) 約 $0.02\text{ mm} \sim 0.03\text{ mm}$ の誤差が考えられる。

途中での「装置における二つの仮定」は現在の加工技術と組立技術から十分満足させることが可能であり, また回転軸と光軸の一致も十字線や案内を用いて一つ一ついいねいに合わせていけばないうから, 大物体の測定のみならず小物体の顕微鏡的輪郭測定ができ, その実用性はきわめて広範囲になった。

参 考 文 献

- 1) たとえば東京光学「断面投影機」。
- 2) 常包辛吾, 土井康弘, 福井郁生: レーザ光切断による形状測定, 昭和43年度 精機学会 春季大会学術講演会前刷 (1968) 319 など。
- 3) 安東 滋, 土井 誠: レーザによる無接触微細計測, 機械設計, 11, 2 (1967) 82。
- 4) 和田 尙, 平林次夫: 輪郭測定器の試作, 昭和46年度 精機学会春季大会学術講演会前刷 (1971) 344。
- 5) 和田 尙, 平林次夫: 新しい輪郭測定器の開発と応用, 画像技術, 2, 9 (1971) 52。
- 6) 和田 尙, 平林次夫: 輪郭測定器の試作 (第2報), 昭和47年度 精機学会春季大会学術講演会前刷 (1972) 240。

情 報

(1211 ページより続く)

質, 供給の安定性, 消費者保護などに関する企業の行動にどう影響を与えていくかを明らかにし, 多角化, 専門化などの方向を明らかにする必要がある。また対外的には経済の国際化の中で垂直分業, 水平分業の両方の観点から考えてわが国が生産を引受けるべき分野は何か, 輸出, 輸入をどう位置づけるかなど産業機械の国際分業の方向とわが国の生産体制との関係を明らかにしなければならない。

電子・電機 電子機器, 電子部品=技術的波及効果の大きい産業用電子機器, 電子部品材料の分野をいかに振興していくかが大きな課題となっている。また部品材料産業内における在来型部品メーカー群と先端部品メーカー群への2極化傾向をどう評価するか海外立地への指向が強まる中で国際分業問題をどう考えるかが重要な問題である。

家電製品=国民生活に直結する製品であり, 安全, 表示, 広告, 粗大ごみ, 公害など産業としては対応をせま

られている問題を多く抱えているが, さらに使いすて時代から省資源時代へという社会全体の方向転換にいかに対応していくべきか大きな課題となってくる。また世界的な視野で日本の家電産業の位置づけを行ない, 今後の輸出秩序対策の基本方向を確立するとともに, 海外投資, 海外立地のあり方を明らかにする必要がある。

素形材(主として鋳物) 1万3570社, 26万6000人を擁しているが, 多品種少量生産型であること, 労働集約型であることなどを反映して中小企業比率は企業数ベースで約93%であり, 企業体質はきわめてぜい弱である。また加工技術の性格上, ばいじん, 粉じん, 有害ガス, 騒音振動など多くの公害発生要因をかかえており, 工場内にあっては作業環境を悪化させ, 工場外にあっては公害問題をひき起こしている。さらに労働力不足の深刻化, 機械化, 合理化の遅れ, 自主技術開発能力の遅れなど機械産業の中でも最も多くの問題を抱えている。

(敏部 敏夫)