ガウス形レーザビームの平行走査による 透過光型エッジ位置検出法* (光学式エッジ位置検出の理論的解析と検出装置の試作)

山田 隆一^{*1}, 柳 和久^{*2}, 柳瀬 克則^{*3}

Optical Detecting Method of Edge Position with a Gaussian Laser Beam (Theoretical Analysis and a Fundamental Detecting Apparatus)

Ryuichi YAMADA, Kazuhisa YANAGI and Katsunori YANASE

This paper describes an optical detecting method of the edge position for measuring the profile and the dimensions of an object with a sharp edge. The measuring principle is based on the straightness of a laser beam and its diffraction properties at the edge of various shapes. The laser beam of Gaussian distribution is scanned parallel to the beam axis. When the laser beam is intercepted with a sharp edge at right angles, the transmitted beam power is reduced from the original total power according to the relative position of the edge to the beam axis. The detecting accuracy using a straight edge and a circular edge is analyzed and expressed by numerical solutions. A fundamental detecting apparatus for the edge position based on the measuring principle is presented and the basic performance of this apparatus is investigated. The results show that the detecting method proposed is appropriate for the noncontact detection of the edge position.

Key Words: Measurement, Optical Engineering, Laser Beam, Gaussian Distribution, Diffraction Theory, Edge Detection, Transmitted Light, Circular Edge

1. 緒 言

鋭利な物体エッジ部の位置を光を用いて非接触で検出する方法には、大別して反射光方式と透過光方式とがある。それらの測定原理は用いる光の特性と受光器の種類、および信号の処理法によってさらに細かく分類することができる。

ここで提案する光学式エッジ位置検出法は透過光方式に属するもので、図1に示すようにレーザビームの光軸と物体のエッジ前面が垂直をなす光学系において、そのレーザビームを平行に走査させエッジ位置を非接触で検出する、横方向の光触針法として類別されるものである。すなわち小径のレーザビームをエッジ面に垂直方向から押し当て、その透過ビームがある一定のパワー比でさえぎられる位置をエッジ先端と判定する。

ガウス形レーザビームの一部を半無限平面でさえぎったときの回折現象については、すでに20年ほど前に Pearson らによって報告されている⁽¹⁾。しかしこれ

は直線エッジによる回折像を理論的および実験的に解析したのみで、その結果を基にエッジ位置を検出する方法については、その後の研究報告例は見当たらない。著者らは透過光方式を用いた回転形切削工具の振れ回り誤差計測システムを開発したが⁽²⁾、そこでは工具切れ刃の検出原理について十分な光工学的考察を行っていない。

そこで本研究では、任意の曲率を有する物体エッジ部の輪郭形状測定システム開発の基礎として、回折に及ぼすビームパラメータの影響、および直線エッジと円弧エッジの検出原理と検出分解能を理論的に詳細に検討した。またエッジ位置検出装置を試作してその基本性能を調べ、本検出方法の妥当性を考察した。

図1 透過光方式によるエッジ位置検出原理

* 平成2年3月31日 第67期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成2年5月1日。

^{*1} 正員、長岡工業高等専門学校 (〒940 長岡市西片貝町888)。

^{*2} 正員、長岡技術科学大学 (〒940-21 長岡市上富岡町1603-1)。

^{*3} 長岡技術科学大学大学院。

2. 理論解析

2.1 ガウス形レーザビームのナイフエッジによる回折現象 図2に示すようにガウス形レーザビームの光軸と垂直に開口面と観測面を設け、振幅分布が最大値の $1/e$ となる半径 W (公称ビーム半径)で無次元化した座標系を考える。開口面にナイフエッジがあるものとし、エッジ先端を v 軸に平行に置いたときの観測面での照度分布を回折理論により求める⁽³⁾。この場合レーザビームは TEM_{00} モードとし、開口面がビームウェスト位置に一致しているものとする。したがって開口面での入力光はガウス分布となるので、

$$U_p(u, v) = A \cdot \exp\{-(u^2 + v^2)\} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 A は入力光の振幅係数である。

一方、観測面に作られる回折像の振幅分布は、フレネル・キルヒホッフの式より、

$$U_o(\eta, \xi) = \frac{1}{j(\lambda/W)} \iint_s U_p(u, v) \frac{e^{jk(r/W)}}{r/W} dudv \quad \cdots \cdots (2)$$

$$k = 2\pi/(\lambda/W)$$

$$r/W = \sqrt{\xi^2 + (u - \eta)^2 + (v - \xi)^2}$$

ここで、 λ は波長を、 S は開口面の透過面積を示す。

u, v 座標に対してナイフエッジが相対的に移動するものと考え、その位置を $u = a/W$ と置く。このとき現実のビーム径は有限であるため、式(2)の積分範囲を中心から半径 $W_0/W = C$ までで打ち切ることとする。すなわち、式(2)は次のように書き換えられる。

$$U_o(\eta, \xi) = \frac{A}{j(\lambda/W)} \int_{a/W}^C \int_{-\sqrt{C^2 - u^2}}^{\sqrt{C^2 - u^2}} [\exp\{-(u^2 + v^2)\} \times \frac{\cos(kr/W)}{r/W} + j \cdot \exp\{-(u^2 + v^2)\} \times \frac{\sin(kr/W)}{r/W}] dv du \quad \cdots \cdots (3)$$

観測面で検出される照度分布 $I(\eta, \xi)$ は次式で与えられる。

$$I(\eta, \xi) = |U_o(\eta, \xi)|^2 \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで図2の観測面上に半径 R の光検出器を置き、ビーム径 W で無次元化すれば、受光される光パワー It は次式で求められる。

$$It = \int_{-R/W}^{R/W} \int_{-\sqrt{(R/W)^2 - \xi^2}}^{\sqrt{(R/W)^2 - \xi^2}} U_o(\eta, \xi) d\eta d\xi \quad \cdots \cdots (5)$$

なお光検出器の位置と形状は任意に選ぶことができ、それによって式(5)の積分範囲を変更すればよい。

図3にいろいろなビームパラメータを変化させた場合の η 軸上の照度分布の計算結果を示す。縦軸はエッジのないときの最大照度で無次元化してある。(a)はエッジ位置 a/W の影響を、(b)は開口面と観測面間の距離 Z/W の影響を、(c)は波長 λ/W の影響をそれぞれ調べたものである。

(a)図より、エッジがビームの縁近くにある場合、照度分布の変化が相対的に大きいこと、またエッジによってビームの一部がさえぎられても相対照度が1を超える場合があることなどがわかる。(b)図からは距離 Z/W が小さいほど回折像の変化が相対的に大きくなることわかる。また(c)図では、 λ/W が増大するにつれて回折パターンの変動は小さくなるものの、パターン幅は逆に広がる傾向にある。これらの図から、エッジによる回折現象はビームパラメータに大きく影響されることが理解できる。

エッジの移動方向と垂直をなす ξ 軸上の照度分布を図4に示す。ここではエッジ位置に関係なく $\xi = 0$ を中心としたきれいなガウス分布が得られる。ただしビームさえぎり量が大きくなるに従って照度は全体的に低下していく。

2.2 エッジ位置の検出分解能 エッジの位置を高精度に検出するためには、図3のような回折パターンの変動を高感度に検出する必要があり、ビーム径 W および光検出器の位置 Z と半径 R の最適な組合

図2 レーザビームの回折現象を計算するための座標系と変数

せ条件を求めなければならない。しかしながらこれらの変数は相互に複雑な作用をするため、式(5)の変動が最大となる条件を解析的に求めることは困難である。ここでは各変数の現実的なディメンジョンの範囲で受光パワー I_t を数値計算し、それらの影響を検討する。

図5はエッジの位置と光検出器の受光パワーの関係を表したもので、縦軸はエッジがないときの総受光パワー I_0 で無次元化してある。(a)は R/W を変化させた場合、(b)は Z/W を変化させた場合のものである。ビームさえぎり量が大きくなるに従って受光パワーは

両図のように低下していくが、曲線が急傾斜であるほどエッジ位置の検出能力が高いことを示す。計算結果より、 R/W を小さくしたほうがエッジ位置の検出分解能が高いことがわかる。しかし Z/W は検出分解能にほとんど影響を及ぼさないようである。

図5(a)で R/W が小さいとき、エッジ位置 $a/W = -2/3 \sim -1/3$ 付近で相対受光パワーが1を超える傾向が現れる。これは図3(a)に示したように、 $a/W = -2/3$ と $-1/3$ のときの最大照度がエッジのないときよりも大きくなり、かつその最大照度位置は原点(η 、

(a) a/W の影響

図4 ξ 軸上の照度分布

(b) Z/W の影響

(a) R/W の影響

(c) λ/W の影響

(b) Z/W の影響

図3 η 軸上の照度分布

図5 エッジ位置と受光パワーの関係

$\xi)=(0,0)$ よりわずかにシフトするだけであるため、 W に対して R が小さいときには、大きな照度の部分だけを受光することになるからである。

図6は、図5(a)において総受光パワーの50%の位置からエッジをわずかに移動させた場合の、受光パワーの変動の状態を計算したものである。図よりエッジの相対移動量と受光パワーはほぼ直線的な関係にあることがわかる。このことより、本エッジ検出法の測定分解能と測定精度は、受光パワーの検出能力に直接依存するものと考えられる。

2.3 円弧状エッジの位置検出 エッジの輪郭が円弧となる場合、同じ受光パワーにおけるエッジ先端の位置は直線エッジに比べて変化するものと考えられる。それをモデル化したものが図7である。半径 W の投射ビームを直線エッジ EAF または曲率半径 ρ の円弧状エッジ CBD でさえぎるものとする。円弧エッジにおける光の回折を理論的に解析することは現状では困難であるので、観測面での受光パワーが等しい場合は開口面での透過光断面積が等しいという仮定に基づいて、直線エッジと円弧エッジの位置の差 δ を算出した。計算条件は、(1)レーザービームの径 W 、(2)投射ビームと透過光の断面積比 γ 、(3)円弧の曲率半径 ρ

図6 エッジ位置が相対受光パワーの50%の位置から微小変化したときの受光パワーの変動

図7 円弧エッジのモデル

であるが、実用的見地から ρ は W よりも十分大きな値をとるものとする。

図8は曲率 $1/\rho$ と位置の差 δ の関係を3種類のビーム径 W と2種類の断面積比 γ について計算した結果を示したものである。図より、円弧の曲率が小さいほど、ビーム径が小さいほど、そして断面積比が小さいほど検出位置の差は小さくなるのがわかる。これら三条件のうちではビーム径の影響が最も大きいようである。したがってここで提案したエッジ位置の検出分解能よりも、 δ の値が小さくなるような曲率の輪郭形状をもつものであれば、その寸法測定に本エッジ検出法をそのまま適用しても差支えないものと考えられる。

3. 基礎実験

3.1 エッジ位置検出装置 図9に試作したエッジ位置検出装置の概略的構成を示す。公称直径 $2W=1.3\text{ mm}$ 、波長 $\lambda=632.8\text{ nm}$ の出力安定化 He-Ne レーザを光源に用い、ビームを平行に走査させた。光検出器にはシリコンフォトダイオード(感度波長範囲

図8 内弧エッジの曲率と検出位置の差との関係

図9 エッジ位置検出装置の構成

430~1060 nm, 有効受光面積 1.3 mm²)を用いた。透過ビームパワーはこのフォトダイオードにより光電変換され、アンプを経て電圧計に出力される。エッジは X-Y ステージに取付け、光軸に垂直な方向の任意の位置でビームをさえぎることができる。その際のエッジ位置はリニアスケールで読取る。光源と光検出器間の距離は約 350 mm で、その範囲内でエッジと光検出器間の距離 Z を自由に設定できるが、今回の実験では計算条件に近づけるために $Z=280$ mm とした。また光検出器の半径はその前面にピンホールを密着させることによって変化させた。

3.2 基礎実験結果 図 10 はレーザビームをナイフエッジでさえぎったときの回折像を、 $Z/W=430$ ($Z=280$ mm) の位置で CCD イメージセンサによって捕えたものである。ただし、 a/W は原点が不明確なため図 2 の a/W とは多少異なっている。縦軸は光電変換された後の値である。この図を図 3(a) の計算結果と比較すると、回折像が変動すること、またエッジがビームの縁よりもやや内側に入り込んだときのほうが照

度は大きくなることなど定性的にはよく一致している。しかし変動量が小さく、最大照度となるエッジ位置が異なるなど、定量的にはやや不一致がみられる。この原因として、CCD センサの光電変換特性が必ずしも直線関係にないこと、エッジ位置 a/W が計算条件と正確には一致していないこと、ビームを平行に走査させるための特別な措置をしていないので、エッジ面がビームウェスト位置に一致していないことなどが考えられる。このように実験条件と計算条件を厳密に合わせることができなかったため、やや定量的不一致が生じたが、定性的にはよく一致していることから、回折現象についての本解析手法は妥当なものであると考えられる。

図 11 はエッジ位置と光検出器の受光パワーの関係を実験により確認したものである。縦軸はエッジがないときの出力で無次元化してある。これを図 5(a)の数値計算結果と比較すると、エッジ位置による受光パワーの変化傾向および光検出器の半径と曲線の傾きの関係はほとんど同じである。したがって受光パワーについての本解析手法も妥当なものといえる。

エッジ位置検出の繰返し精度を確かめるために、光検出器の出力電圧が一定となるときのエッジ位置を、電圧を変えて各 10 回測定した。結果を図 12 に示す。横軸は測定番号、縦軸は測定値の単純平均値との偏差である。偏差はいずれの電圧でもほぼ $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内に収まった。エッジ位置をできるだけ高精度に検出するには物足りない値であるが、これはビーム出力の不安定性に原因があるものと思われる。

4. 結 論

鋭利なエッジを有する物体の輪郭形状と寸法を非接触で測定するために、ガウス形レーザビームを平行に走査する透過光型エッジ位置検出法を考案し、その測

図 10 直線エッジによるレーザビームの回折像

図 11 エッジ位置と受光パワーの関係(実験値)

図 12 エッジ位置検出の繰返し精度

定原理を紹介した。本測定法のエッジ位置検出性能を数値計算により解析し、次のような結果を得た。

(1) エッジがビームの縁近くにあると、観測面での照度分布の変化が、他の位置にある場合より相対的に大きくなる。またエッジがビームの縁にあるときよりもやや内側に入り込んだときのほうが最大照度が大きくなる。

(2) エッジと観測面間の距離が小さいほど回折像の変動が相対的に大きくなる。

(3) ビーム径に対する波長の比率が増大するにつれて回折パターンの変動が小さくなっていくが、パターン幅は逆に広がる傾向を示す。

(4) 本エッジ検出法の測定分解能と測定精度は、受光パワーの検出能力に直接依存するものと考えられ、ビーム径に対する光検出器径の比率を小さくするほどエッジ位置の検出分解能は高くなる。しかし光検出器の位置は検出分解能にほとんど影響を及ぼさない。

(5) エッジの輪郭が円弧の場合、円弧の曲率が小さいほど、またビーム径が小さいほど、さらには投射ビームに対する透過光の断面積比が小さいほど、直線

エッジとの検出位置の差は小さくなる。

またエッジ位置検出装置を試作し、基礎実験を行って基本的性能を調べた結果、次のことがわかった。

(6) 実際に得られた回折像および受光パワーは数値計算結果とよく一致していた。

(7) 試作したエッジ位置検出装置はほぼ $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内の測定再現性をもっている。

以上のことから、ここで提案した検出法が妥当なものであることが確認できた。今後、実用に際しての問題点や測定精度の向上について、十分な実験解析を行いながら検討を加えていく予定である。

文 献

- (1) Pearson, J. E. McGill, T. C., ほか2名, Diffraction of Gaussian Laser Beams by a Semi-Infinite Plane, *J. Opt. Soc. Am.*, **59**-11(1969), 1440.
- (2) Yanagi, K. and Setaka, M., An Optical Measurement System of Cutter Runout in Revolving Cutting Tools for a Machining Center, *Proc. 6th Int. Conf. on Prod. Eng. Osaka*, (1987), 442.
- (3) Klein, M. V. and Furtak, T. E., *OPTICS*, (1986), 407, Wiley & Sons (New York).