自由曲面形状の3次元エッジプロファイル 計測に関する研究 (第1報)* —光リング画像によるエッジ自動検出—

李 瑞竣** 三好隆志*** 高谷裕浩*** 高橋 哲***

Study on 3-Dimensional Edge Profile Measurement for Free Form Surface (1st Report)

- Automatic Edge Detection by means of Optical Ring Images -

Seojoon LEE, Takashi MIYOSHI, Yasuhiro TAKAYA and Satoru TAKAHASHI

This paper describes development of an efficient measuring method of 3-dimensional edge profile with high accuracy for free form surface. A new method is proposed for measurement of 3-D edge profile by means of optical ring images. 3-D profile sensor based on optical ring images has more advantage than the others because it detects as not a light spot but a ring image of the reflected light from a target point. The changes of optical ring image intensity occur in the edge. The differences between the intensities of ring images in the ordinary plane and the edge are represented by cross correlation coefficient, which is used as measuring parameter to detect the 3-D edge profile of a master model. In automatic experiments, first the characteristic area which may include the edge is extracted by rough measurement, second the measuring path of the sensor adapted to the edge profile is decided in the characteristic area. Finally, the edge positions are detected by using the cross correlation coefficients obtained by fine measurement along the measuring path and the 3-D edge profiles are estimated.

Key words: 3-D edge profile, cross correlation coefficient, non-contact measurement, free form surface, edge detection

1. 緒 言

今日、工業製品には視覚的な意匠性のみならず、触覚的な人間工学の立場から設計された感性の高い意匠形状のものが数多くあり、製品の意匠設計に対応できる高度なCAD技術が要求されている。そのため、デザイナーの意図を柔軟に表現できる形状モデリング手法や形状データ処理技術に関する研究など、新しいCADシステムの開発が行われている¹⁾²⁾。しかし、意匠的特徴や微妙なハイライト曲線などを含む意匠設計形状を計算機で直接生成することは難しく、実際はマスタモデルを製作し、その形状認識や修正作業によって意匠設計モデルを構築しているのが現状である。

マスタモデルを用いるリバースエンジニアリング手法によって意匠設計³⁾を行う場合、モデルの高精度な計測と計測データに基づいたCADモデルの生成が必要である⁴⁾。しかし、複雑な複合自由曲面上に存在する形状急変部や特徴線の、いわゆるエッジの計測およびデータ処理は自動化が難しく、多くの場合手作業で行われており、これらを高い精度で自動計測できる技術の確立が重要な課題となってきた。特に、エッジプロファイルは曲面と曲面の分割、曲面の境界、あるいは他の部品が組み込まれる部分であり、曲面生成の過程のなかで重要な要素となるため、これをサポートする高精度な測定が要求される。このような背景から本研究は、高精度形状計測センサである光リング式変位センサ⁵⁾を用いて、エッジ、キャラクタライン等の形状特徴を考慮した高精度、高能率計測手法の開発を目的としている。本報では境界ラインを有するステップ型エッジ

モデルを対象とし、エッジ検出手法として光リング画像の強度分布変化を利用する相互相関法を提案した。まず、計算機シミュレーションと基礎実験により本手法の適用可能性について検討を行い、次にエッジプロファイル自動計測へ拡張し、実際の加工モデルを計測することによって本手法の有用性を確認したので報告する。

2. エッジ計測用光リング式変位センサ

本研究では非接触形状計測センサである光リング式変位センサを用いる。図1にセンサの原理および構成を示す。半導体レーザ（波長 670nm, パワー 10mW）から発振されたレーザ光は被測定面へ拡散反射し、反射光はレンズL₁、半径 a のリングスリット、レンズL₂を通り半径 r の光リング画像として回転拡散板上に結像される。この回転拡散によってスペckルノイズが除去された後レンズL₃によって拡大された半径 R の光リング画像が検出面の CCD エリアセンサ上で結像される。このとき光リング画像の半径 R は、次式で表される。

$$R = \frac{df_2 f_3}{f_1(a - f_3)} z_1 \quad (1)$$

この式よりレンズL₁の焦点面を基準にし、被測定面までの変位 z₁ と CCD エリアセンサ上に結像される光リング画像の半径 R が線形関係にあることが分かり、半径 R を測定することで変位 z₁ が容易に求められる。半径 R は CCD エリアセンサ上に結像された光リング画像を円周 24 方向に走査し、半径方向に強度分布の最大輝度点を検索し、最小自乗法で回帰円を求める画像処理によって得られる。なお、センサの分解能は 4.7μm/pixels で、拡散反射面の場合測定範囲 300 ~ 800μm において傾斜角 75° まで ±4μm の精度で測定が可能である。図に示すように光リング式変位センサは光反射特性が異なっても被測定面からの

* 原稿受付 平成12年11月10日

** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科 (吹田市山田丘2-1)

*** 正 会 員 大阪大学大学院工学研究科

Fig.1 Structural drawing of optical ring image sensor

全方向の反射光を検出することができるため、粗さの高さや方向性、傷などの表面状態の影響を受け難く、高い信頼性をもって急斜面の曲面形状測定が可能となる。また光リング画像は被測定面の多くの情報を光リング円周上の強度分布の変化としてとらえているため、エッジ部における強度分布の変化を何らかの計測パラメータとして抽出できるなら、本センサは曲面形状計測センサのみならず、エッジ計測センサとして適用することができる。

3. エッジ検出原理

3.1 エッジ検出の考え方

エッジ部にレーザ光が照射されるとき得られる光リング画像は通常の拡散反射面から得られる画像とは異なり、光リング画像の中心座標移動、光リング幅及び強度分布の変化などが起こる。光リング画像の変化はエッジ形状によって異なるが、本研究で対象としているステップ型のエッジ部では光リング画像の半径は変化することなく、強度分布のみが変化する。その原因はレーザ光でエッジ部を走査するときレーザ光内に入るエッジ部の反射面積が減少し、光の一部だけが反射されるため、検出面(CCD エリアセンサ)での光リング画像の強度が弱くなるからである。以上の光リング画像変化を模式的に示したのが図2である。すなわちレーザ光が平面(a)からエッジ部へ近づき(b)、そしてエッジ部から遠ざかる(c)状況を光リング画像の強度変化として示したものであり、(a)→(b)→(c)と強度が徐々に弱くなっている(実験からも同様な結果が得られている)⁶⁾。このような光リング画像の変化を用いてエッジ位置検出を試みた。つまりエッジ領域に沿ってレーザ光を走査し、各位置における光リング画像の強度変化を用いて正確なエッジ位置を検出することである。そこで、エッジのない平面からの光リング画像とエッジからの光リング画像の円周方向強度分布をそれぞれ $f(x)$ 、 $g(x)$ とし、式(2)に示すようにそれらの相互相関係数 $\rho(\tau)$ をエッジ位置検出の計測パラメータとして定義した。

Fig.2 Changes of optical ring image in edge area

$$\rho(\tau) = \frac{\int f(x)g(x-\tau)dx}{\int f(x)^2dx} \quad (2)$$

この式から分かるように、レーザ光がエッジにかかっていない場合は、 $\tau=0$ のとき $g(x)=f(x)$ で $\rho(0)=1$ と最大値を示し、レーザ光がエッジを完全に通過すると τ と無関係に $g(x-\tau)=0$ で $\rho(\tau)=0$ となる。つまり、エッジ位置は $0 \leq \rho(\tau) \leq 1$ の範囲内にあり、 $\rho(\tau)$ からエッジ位置の検出が可能となる。

3.2 エッジ検出シミュレーション

レーザ光を走査するとき、エッジ位置によって相互相関係数は変化する。エッジ位置の検出パラメータとして提案した相互相関法の適用性を調べるために、計算機シミュレーションを行った。光リング式変位センサの測定原理に従い、被測定面からの反射光を追跡するレイトラシング手法を用いて光リング画像を求めた⁷⁾。すなわち、実際の光リング式変位センサと同

Fig.3 Curves of the cross correlation coefficient obtained by computer simulation (Relationship between theoretical value ρ and shift τ)

Fig.4 Simulation results using optical ring images in edge area

様に、レーザ光がエッジ上を走査するエッジ検出モデルを設定し、エッジ部に照射されるビーム径 $100\mu\text{m}$ のレーザ光をエッジ先端に対して 10% 刻みの $10\mu\text{m}$ ずつ移動し、各エッジ位置 S における相関係数を求めた。平面から得られる光リング画像の強度分布 $f(x)$ を基準強度分布とおき、これに対しエッジ部からの強度分布 $g(x)$ を 0 から 512pixels までシフトさせ、得られた相関値 $\rho(\tau)$ を図3に示す。 τ の増加にしたがって相関値は単調に減少し、 100pixels 付近で両画像の相関がなくなり、その後 200pixels 付近まで増加して再び減少していく。またエッジ部に対するレーザ光の移動距離 S が大きくなるにしたがって、相関値 $\rho(\tau)$ の値は全体的に小さくなっていく。

そこで τ を 0 に固定し、両画像が完全に一致したときの $\rho(0)$ の値 ρ_0 を各エッジ位置 S に対してプロットすると図4に示すような単調減少の曲線となる。図からレーザ光の 50% がエッジ部に照射されているとき、つまりレーザ光の光軸とエッジ先端が一致しているときに 0.5 の相関値を取っている。また相関曲線の差分をとると、エッジ先端と推定できる位置で最大となっている。このことから相関係数 ρ_0 とその差分 $\Delta\rho_0$ を用いて高精度なエッジ位置の検出が可能となる。

4. 基礎検証実験

4.1 相互相関係数のデータ処理

エッジ計測に用いる測定モデルはシミュレーションモデルと比べ、表面粗さが存在しエッジ先端の丸みあるいはバリが発生しており、計測パラメータとして前章で提案した相関係数 ρ_0 と $\Delta\rho_0$ をそのまま用いると計測のときに誤差が生じる可能性がある。そこで、相互相関係数 ρ_0 のデータ処理を行い、より実際の測定に適したエッジ計測パラメータとして用いることを検討した。シミュレーションより得られる光リング画像は円周方向の強度分布が均一であり、相互相関係数の計算に一方方向強度分布のみを用いても結果に影響はない。しかし、実際の測定から得られる光リング画像は円周方向の強度分布が均一でないため強度分布の平均値を用いる必要がある。そこでエッジがない平面からの光リング画像を円周方向に 15°

Fig.5 Procedure of data processing

ごとに 24 等分し、強度分布の平均値 $f(x)$ を求める。エッジから得られる光リング画像からも同様に強度分布の平均値 $g(x)$ を求め、相互相関を計算する。

図5はこのようにして光リング画像の平均強度分布から計算した ρ_a に基づいて、エッジ位置を検出するデータ処理手順を示したものである。図5(a)に平均強度分布から計算した ρ_a の例を示す。次に、相互相関係数の最大差分値を取る位置をエッジ位置として推定できることはシミュレーションより分かっているが、エッジに対するレーザ光の走査角度は必ずしもエッジと垂直ではないため、(b)のように最大差分値にばらつきがあるとエッジ位置の検出が困難になる。そこで、エッジ位置検出の信頼性を高めるために、得られた差分値 $\Delta\rho_a$ の 7 点平均 ($\Delta\rho_t$) を求め、差分値の平滑化を行う(c)。最後に、 $\Delta\rho_t$ の加重平均 G を次式から求め、エッジ位置を S_g とした。

$$S_g = \sum_{i=1}^n S_i \Delta\rho_{ti} / \sum_{i=1}^n \Delta\rho_{ti} \quad (3)$$

なお、上式の積分区間 i と n はエッジ領域内で誤差変動が小さい、相関値 ρ_a の値が 0.25 から 0.75 に相当する区間に設定した。

4.2 矩形溝モデルによる検証実験

提案したエッジ計測手法の有用性を調べるために 1mm 幅の溝をNC加工した矩形溝モデルを用い、レーザ走査方向に対してエッジの傾き角 θ を変化させて検証実験を行った(図6)。なお、金属エッジモデルの表面を拡散反射面にするため、溝には白色塗料をスプレーで薄く塗布している。図6(a)は $\theta=0^\circ$ すなわちレーザ走査方向がエッジ溝に対して垂直の場合の、走査距

Fig.6 Experimental results for groove model

離 S に対する ρ_a と $\Delta\rho_a$ の変化を示したものである。 ρ_a は最初 1 前後の値を示しているが、レーザ光がエッジ近傍になると徐々に減少しエッジから離れたところで 0 になる。さらに、レーザ光が他方のエッジに近づくとき ρ_a は再び徐々に増え、平面上ではほぼ 1 の値になっている。また、 ρ_a の差分値である $\Delta\rho_a$ はエッジ先端近傍で明確なピーク値を示している。これらの実験結果は図 4 のシミュレーション結果とよく一致している。この $\Delta\rho_a$ から図 5 に示したデータ処理を行い、両エッジ座標の幅を計算すると、 $W_{e0} = 1.048 \text{ mm}$ となり、3次元座標測定機により求めた公称値 $W_{n0} = 1.028 \text{ mm}$ と高々 $20 \mu\text{m}$ の違いでよく一致している。次に (b) はエッジ傾き角 $\theta = 45^\circ$ の場合であり、 $\theta = 0^\circ$ の実験結果とよく似ている。すなわちエッジ近傍で ρ_a は急激に 1 から 0 (あるいは 0 から 1) へと変化しており、また $\Delta\rho_a$ も明確なピーク値

Fig.7 Errors of measurement

を示している。また実験から得られた溝幅 $W_{e0} = 1.477 \text{ mm}$ と公称値 $W_{n45} = 1.454 \text{ mm}$ の違いは $26 \mu\text{m}$ である。(c) は $\theta = 75^\circ$ と大きな場合であり、 ρ_a , $\Delta\rho_a$ ともに小さな変動が見られる。しかし、エッジ近傍では ρ_a は 1 から 0 (あるいは 0 から 1) へと変化し、 $\Delta\rho_a$ もピーク値を持っている。溝幅の実験値 $W_{e75} = 4.033 \text{ mm}$ と公称値 $W_{n75} = 3.972 \text{ mm}$ の違いは $61 \mu\text{m}$ と $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$ と比較して 3 倍程度大きくなっている。

図 7 はレーザ走査方向に対しエッジの傾き角 θ を 0° から 75° まで変化させ、正方向と逆方向に測定した実験値と公称値の差を誤差として示したものである。エッジの傾きが大きくなるにしたがい、測定誤差も大きくなる傾向があるが、 $\theta = 60^\circ$ までは $\theta = 0^\circ$ の垂直の場合の $20 \mu\text{m}$ とあまり変わらず、 $30 \mu\text{m}$ 以内の誤差でエッジ検出が可能である。 $\theta = 75^\circ$ になると誤差が $60 \mu\text{m}$ と増加しているが、この理由としてはレーザ光がエッジ部を通過する走査距離が垂直の場合の 4 倍近く長くなるため、相関係数 ρ_a の変化が緩やかとなり、明確なピーク値を持つ $\Delta\rho_a$ が得られ難くなることが考えられる。以上のことから本計測手法はレーザ走査方向に対して $\theta = 60^\circ$ まで傾いたエッジであっても測定が容易な垂直 ($\theta = 0^\circ$) の場合と同等なエッジ検出が可能である。また、公称値は 3 次元座標測定機による溝の内側測定値であり、エッジ部と $10 \mu\text{m}$ 程度の測定誤差を考えると、本測定法は傾き 60° のエッジまで $20 \mu\text{m}$ 程度の精度で検出が可能と思われる。

5. エッジプロファイル自動計測

5.1 自動計測システム

Fig.8 Construction of automated 3-D edge profile measuring system using NC machined tool

Fig.9 Flow chart of edge profile measurements

図8にエッジプロファイル計測システムの構成を示す。本計測システムはNC工作機械、NC装置(FUNUC15-M)、3D形状計測コントローラ、P/Cなどから構成されている。光リング式変位センサはNC工作機械の主軸に取り付けられる。P/Cに測定範囲、測定間隔、センサ位置などをあらかじめ入力し、その設定条件に基づいて、RS-232Cを介してNC側に信号を送りセンサの移動・制御を行う。また光リング式変位センサによって検出される光リング画像は画像処理ボードを介してP/Cに送られ、メモリーに格納されデータ処理される。

5.2 自動計測手法

相互相関係数を用いるエッジ検出手法によってエッジの x, y 座標が得られる。しかし、3次元エッジモデルの計測にはエッジ中心の x, y 座標値とともに z 方向変位も計測しなければならない。そこで本エッジ検出手法を3次元モデルに拡張するために、粗計測と細計測の2段階計測によるエッジモデル計測を行う。図9にエッジプロファイル自動計測の流れ図を示す。まず、粗計測ではエッジ領域内で光リング画像の最大輝度点(I_{max})の数の急激な減少を利用して、エッジが含まれている領域を見つける。このときの測定間隔はビーム径の5~10倍(0.5~1.0mm)くらいとする。大まかなエッジ領域が決まったら次にエッジの中心位置を検出する細計測に入る。測定間隔をレーザービーム径の1/10、つまり10 μ mとし、細計測用測定経路にしたがい測定を行う。

細計測用測定経路は図10に示すように測定点から非測定点の方向に、あるいはその逆の方向にセンサを走査し、必ずエッジを横切り、移動経路を元に戻らないように走査する。細計測ではあらかじめセーブしておいた光リング画像(R_{ref})の強度分布が測定点ごとに呼び出され現在の測定点での光リング画像(R_{tmp})の強度分布と比較され、相互相関係数 ρ_a が求められる。一つの計測区間の測定が終わったら全相関値の差分($\Delta\rho_a$)を求め、7点平均の平滑を行い差分値をなめらかにした後($\Delta\rho_p$)、加重平均を求め、その点の座標(S_g)をエッジ位置として保存する。同様な手順ですべてのエッジ領域に対して繰り返し測定が行われ、エッジの座標を検出する。

5.3 測定結果及び考察

図11は金属平面上に直径20mmの円形穴をドリル加工した後白色塗布したモデルに対して、本エッジ計測手法を用いて測定

Fig.10 Decision of sensor paths

(a) By optical ring image sensor (b) By 3-D coordinate measuring machine

Fig.11 Edge profile obtained by (a) optical ring image sensor and (b) 3-D coordinate measuring machine

した結果を示している。図11(a)は光リング式変位センサによる本計測手法の結果であり、(b)は比較実験として3次元座標測定機を用いた測定結果である。測定されたエッジ座標に最小自乗法を用いて回帰円の半径を求めるとそれぞれ10.176mm、10.118mmとなり、約60 μ mの差が出ている。これは前章の検証実験で言及したように、光リング式変位センサではモデル面上部(円形穴のエッジ部)を測定しているが、3次元座標測定機では円形穴の内部を測定しており、また測定点数が異なることを考慮すれば妥当な値であると思われる。なお、両回帰円の標準偏差は19 μ m、11 μ mとなっている。

次に3次元エッジプロファイル計測へ拡張するためにNC加工した曲率半径60mmの凹と凸の曲面に直径7mmと10mmの円形穴をドリル加工したケミカルウッドモデルを製作した。図12(a)に本計測に用いられた凹モデルを示す。一例として直径10mmの円形穴のエッジに対して粗計測では測定間隔0.5mm、細計測で10 μ mと設定し、自動計測を行った結果を図に示す。(b)は粗計測の測定データとエッジ座標を3次元ワイヤフレーム表示したものであり、(c)、(d)は測定結果を $x-y$ 平面、 $x-z$ 平面にプロットしたものである。(c)の結果から最小自乗法によって回

Fig.12 Plotted edge profile data of NC machined concave model

帰円を求めると半径4.999mmで、標準偏差12 μ mの結果が得られた。図13(a)に表す凸モデルに対しても上と同様に測定を行い、その結果を同じく(b),(c),(d)に示している。最小自乗法による帰円は4.987mmとなり、標準偏差は27 μ mとなっている。以上のように凹凸曲面上の円形穴の帰円半径はドリル加工の半径(5mm)と凹曲面で1 μ m、凸曲面で13 μ mしか変わらず、また帰円の標準偏差も12 μ m、27 μ mと小さな値を示していることから、本計測手法は自由曲面の3次元エッジプロファイル計測に適用できると考えられる。

6. 結 論

3次元自由曲面上に存在するエッジを高精度に検出するために、光リング式変位センサを用いた3次元エッジプロファイル計測法を提案し、次のような結果が得られた。

- (1) 光リング式変位センサより得られる光リング画像の強度分布の変化をエッジ検出に用いる相互相関法を提案し、計算機シミュレーションによって、エッジ計測パラメータとしての有用性を明らかにした。
- (2) 矩形溝を用いた相互相関法の検証実験から、レーザ走査方向に対してエッジ傾き角が60°までは、傾き角0°の垂直エッジと同様に約20 μ mの精度でエッジ位置検出が可能である。
- (3) 自由曲面上の3次元エッジプロファイルの計測手法として、まず粗計測よりエッジ領域を見つけ出し、そのエッジ領域に対してセンサの測定経路を自動生成した後、エッジ位置を細計測する高精度で効率的な2段階自動計測手法を提案した。

Fig.13 Plotted edge profile data of NC machined convex model

- (4) 2段階自動計測手法によって、凹凸曲面上に円形の加工穴を持つエッジモデルに対して自動測定を行い、円形穴の帰円半径と標準偏差の算出から $\pm 20\mu$ m程度の精度でエッジプロファイル計測が可能であることが分かる。

今後は現在の内部エッジモデルからモデルの輪郭等外部エッジモデルまで本計測手法を拡張し、さらに計測されたエッジプロファイルデータに基づくB-spline閉曲線のあてはめによる計算機モデルの生成について検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 東 正毅, 毛利 仁, 齊藤 剛: 縮閉線に基づく曲率変化の滑らかな曲線, 曲面の生成(第1報) - 縮閉線の決定と有理Bézier曲線による表現 -, 精密工学会誌, **59**, 11 (1993) 1891.
- 2) 鈴木宏正, 山本貴史, 金井 崇, 木村文彦: 面上線による自由曲面形状の操作 - 面上点列による操作 -, 精密工学会誌, **62**, 1 (1996) 75.
- 3) T. Varady, R. R. Martin and J. Cox: Reverse Engineering of Geometric Models - An Introduction, Computer Aided Design, **29**, 4 (1997) 255.
- 4) 後藤孝行, 高谷裕浩, 三好隆志: 高密度測定点データに基づく自由曲面生成法に関する研究(第1報) - 境界高密度計測法と特徴領域抽出法の提案 -, 精密工学会誌, **64**, 1 (1998) 84.
- 5) 三好隆志, 高谷裕浩, 滝澤 暢, 福沢亮太: 三次元自由曲面の非接触形状測定センサの開発研究(第3報) - 光リング式3-D形状計測センサ -, 精密工学会誌, **61**, 2 (1995) 258.
- 6) S. Lee, T. Miyoshi, Y. Takaya, S. Takahashi and K. Shirai: Study of 3-Dimensional Edge Profile Measurement for Free Form Surface by Optical Ring Image Sensor, Proc. int. Conf. Computer-Aided Production Engineering, (1998) 367.
- 7) 三好隆志, 青木 洋, 斎藤 勝政: 三次元自由曲面の非接触形状測定センサの開発研究(第1報) - 光リング式センサの解析 -, 精密工学会誌, **58**, 11 (1992) 1886.