
影絵照明と多領域強度比法を用いた3D形状計測

3D shape measurement utilizing shadow-casting illumination and multi-region intensity ratio method

大沢 康宏* 秋山 省一 佐藤 新治 今野 良一
Yasuhiro OHSAWA Syoichi AKIYAMA Shinji SATO Ryoichi KONNO

要 旨

3D形状計測の精度向上と照射機構の簡単化を目的として、影絵照明と多領域強度比法を開発した。多領域強度比法では、照射領域を複数に分割した各部分領域毎に傾斜濃度パターンを同時に照射する。その結果、照射したパターンの単位照射角度当りの光強度変化が領域数倍だけ向上し、従来の強度比法と比較して測定距離の相対精度が改善される。多領域強度比法では、複数の領域に周期パターンを照射しているため領域判定に曖昧さが生じるが、この点を避けるため、従来の強度比法を併用し、取得した測定物の概略形状から領域判定した。影絵照明では、通常用いられる結像レンズを省き、100 μ m幅のスリットを通してパターンを形成したフィルムを影絵状に照明した。実験では、測定距離の相対精度が領域数に比例するという予想通りの結果が得られた。本方式は、簡便で低コストでありながら精度も確保した3D形状計測系を構成するのに適している。

ABSTRACT

In order to improve the relative precision of measured distance and simplify the projection mechanism for 3D measurement, multi-region intensity ratio method and shadow-casting illumination were developed. In the method the projection region is divided into multiple subregions and graded patterns are projected to each of subregions simultaneously. As a result, this method improves relative precision of measured distance compared to conventional intensity ratio method because it increases optical power change of its projection pattern for unit projection angle by the number of the subregions. To avoid ambiguity of the subregion identity by projecting cyclic patterns to multiple regions, conventional intensity ratio method was used to obtain approximate shape of the target object and each subregion was identified by the shape. Under the shadow-casting illumination conventional focusing lens was removed and patterned films are illuminated from the back of them through narrow 100 μ m width slit as a shadow. Experimental results shows the effect that relative precision of measured distance is in proportion to the number of regions, which is in accordance with theory. This method is useful for constructing simple, low-cost, high-precision 3D measurement system.

* 研究開発本部 中央研究所
Research and Development Center, Research and Development Group

1. まえがき

インターネットのブロードバンド化や、携帯電話に代表される無線通信の普及により、私たちの身の回りには大量の電子情報が日々送られている。そこで送られるコンテンツの代表といえるのが画像や音声、テキストであるが、電子商取引のサイトなどで商品の3次元画像を目にする機会も増えている。

これまでの光学式3次元形状測定方式¹⁾は、三角測量の原理を用いたステレオマッチング法やレーザ走査型の光切断法が主流である。三角測量の原理は、距離の分かった2点と、この2点から各々測定した測定物の角度が分かれば、2点と測定物の位置が確定するというものである。この2点を通る直線を基線、2点の間隔を基線長、一方を原点とした時、原点からもう一方の点を通る方向を基線方向という。

多視点像を用いたステレオマッチング法は、特別な照明を用いないため低コスト化に向いているが、対応点検出が難しい等の問題がある。光切断法は、スリット状の光を測定物体上に走査し、スリットの変形像をカメラで検知することで形状を測定する。カメラの画素数が測定精度を決めるので、高分解能のカメラを利用することで精度向上が望め、測定物体の反射率に依存しにくい利点もある。一方スリット光の走査が必要となり、順次走査のための光走査系が必要で、光学系の構成が複雑でコスト高になりやすい。

パターン照射法は、光切断法の順次走査の欠点を無くした方法で、パターン光を一括照射し、反射光像をカメラで撮像することで計測時間を短縮する方式の総称で、空間符号化法や縞格子投影法など複数の手法に分かれる。パターン光照射法では、形状データを一括取得できる利点があるが、そのために光切断法では問題にならなかった、パターン光のどの位置がどの照射角度に相当するかの判断が必要になる。

パターン光照射法を用いた3次元計測の手法の1つに強度比法²⁾がある。この方法は、照射光源を基点に測った照射角度に対して、異なる単調な光量勾配を持つ2種類のパターン光を測定物体上に投影し、その反射光量の比を取ることで、測定物体の反射率に依存せずに形状測定を行う。強度比法はパターン光照射法の一つなので、パターン光を一括照射する簡単な照射部と、反射光量を検知する撮像部で構成されており、また照射パターンが2枚と少ないため、測定装置の低コ

スト化が容易である特徴をもつ。一方、縞格子投影法と比較して、パターン光として照射される光分布の単位照射角度あたりの光量変化が小さいため、強度比法の精度は1-2%にとどまっている²⁾³⁾。

また、パターン光照射法ではパターンを照射する照射部として結像系を用いることが多い。照射部に結像系を用いることで、総光量が確保でき、高精度のパターン投影ができるなどの利点がある。一方で、照射部の結像系に歪曲収差があると、測定物体の形状が分からないと一般には歪曲収差を補正できず、精度を向上させる際に問題になる。歪曲収差を減らした結像系を用いるとコスト高になりやすく、不要な結像系を除いた簡単な照射部⁴⁾が望ましい。

本報告では、照射部に構成が簡単な、影絵を投射する影絵照明を用い、強度比法の照射パターンを変更することで、照射部の簡便さを失わずに測定精度の改善を行う、多領域強度比法による測定精度向上について報告する。

2. 影絵照明を用いた多領域強度比法の原理

多領域強度比法は三角測量の原理に基づくパターン光照射法の一つである強度比法を改良したものである。多領域強度比法と区別するため、以下では従来の強度比法を単領域強度比法と呼ぶことにする。まず従来法である単領域強度比法について簡単にまとめ、次に多領域強度比法による測定距離精度の改善効果と、パターン照射に用いた影絵照明について説明する。

2-1 単領域強度比法

単領域強度比法では、基線方向に照射角度を符号化した2種類のパターン光を、同一の光源位置から照射し、基線長だけ離れた別の場所に設けたカメラで測定物体の反射光量の分布を一括検知する。オリジナルの強度比法²⁾では、この2種類のパターン光として、光量分布のない平坦なパターン光と、基線方向に単調に光量が増加するパターン光を用いる。図1に、光源、カメラ、測定物体の配置のZ軸断面を示す。座標の原点はカメラのCCDの中心におき、左右をX軸、紙面垂直手前方向をZ軸、上下の奥行き方向をY軸とする右手系を用

いた。光源から照射され測定物体で反射された光が、CCD上で検知された画素の座標を $(x_i, 0, z_i)$ 、測定物体の距離を (x_o, y_o, z_o) とする。ここで L は基線長、 f は結像レンズの焦点距離、 T は光源の光学中心の突き出し量、 θ は照射角度、 ϕ は観察角度である。本報告で用いた照射部の詳細は後述する。

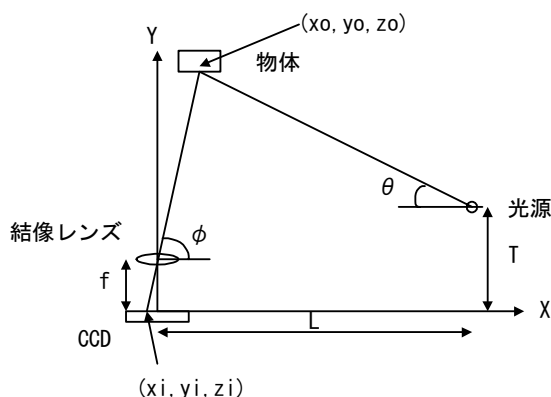


Fig.1 System configuration of 3D shape measurement by intensity ratio method. Light source, camera and target object are located in x-y plane.

(x_o, y_o, z_o) 座標は、 $L, T, f, x_i, \theta, \phi$ から次のように求められる。ここで不明なパラメータは照射角度 θ である。

$$\tan \phi = -f / x_i \quad (1)$$

$$y_o = \frac{L \tan \theta \tan \phi + f \tan \theta + T \tan \phi}{\tan \theta + \tan \phi} \quad (2)$$

$$x_o = x_i \cdot (1 - y_o / f) \quad (3)$$

$$z_o = z_i \cdot (1 - y_o / f) \quad (4)$$

単領域強度比法では照射角度 θ を、光源から照射した2種類のパターン光の光量の比から求める。

図2に、強度比法での照射形態を示す。照射角度 θ に対して、分布関数 $G_1(\theta), G_2(\theta)$ を持つ光パターンを照射する。原則として、Z方向には光量分布がない方が望ましい。光源光量 S と物体の反射率 σ を用いて、放射角 θ に放射された方向の物体面の面積素片での反射を考えると、2つのパターンにより反射される受光量 P_1, P_2 は、各々次式で表される。

$$P_1 = K \cdot \sigma \cdot S \cdot G_1(\theta) \quad (5)$$

$$P_2 = K \cdot \sigma \cdot S \cdot G_2(\theta) \quad (6)$$

ここで K は光源と受光器、物体の幾何学的配置に依存する量だが、 G_1, G_2 を変えても配置は変わらないので、ここでは定数と考えてよい。

P_1 と P_2 の比である強度比 R を取ると、

$$R = P_1 / P_2 = G_1(\theta) / G_2(\theta) = G(\theta) \quad (7)$$

$$\theta = G^{-1}(R) \quad (8)$$

となる。 θ だけに依存する G_1 と G_2 の比の強度比分布関数 $G(\theta)$ が θ に対して一価なら、強度比 R を求めることで $G(\theta)$ の逆関数、すなわち照射角度分布関数 $G^{-1}(R)$ から照射角度 θ が決まり、式(2)から奥行き距離 y_o が求められる。

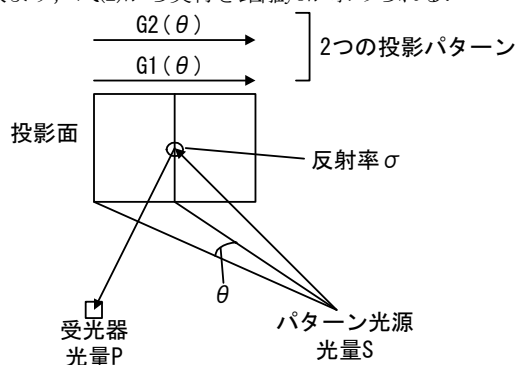


Fig.2 Projection scheme for intensity ratio method.

パターンの分布関数 G_1, G_2 には θ に対しては一意性しか必要でなく、ランダムに光量が変わっても構わないが、通常は θ に対して単調連続かつ光強度が線形に近く変化するパターンが用いられている。すなわち、次のような関数形である。

$$G_1(\theta) = a \cdot \theta + b \quad (9)$$

$$G_2(\theta) = c \cdot \theta + d \quad (10)$$

単領域強度比法で実際に照射したパターンを図3に示す。照射角度に対して光量が増加するパターン(a)と減少するパターン(b)からなる。

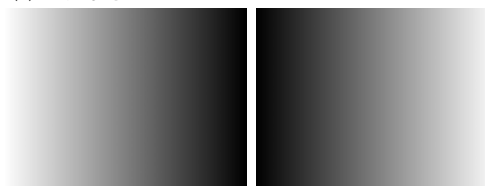


Fig.3 Projected patterns for a single-region intensity ratio method. (a) A graded pattern whose light power increases along projection angle. (b) A graded pattern whose light power decreases along projection angle.

照射角度分布関数 $G^{-1}(R)$ を求めるためには、パターンの分布関数 G_1 と G_2 をあらかじめ与えおくか、距離のわかった基準平面に実際にパターンを照射し、得られた反射光の強度比分布から、式(2)を用いて強度比 R と照射角度 θ の対応関係を求めておく。パターンに対する厳密さが不要なので、本報告

では後者の方法を用いた。

強度比の分解能 ΔR と対応する照射角度の分解能 $\Delta \theta$ は、カメラの光量分解能を ε とすると、次のように光量分解能 ε と単位強度比当りの照射角度変化 dG^{-1}/dR に比例する。

$$\Delta R \approx 2\varepsilon / P \quad (11)$$

$$P = P1^2 / (P1 + P2) \quad (12)$$

$$\Delta \theta \approx \frac{dG^{-1}}{dR} \Delta R \approx 2\varepsilon \frac{dG^{-1}}{dR} / P \quad (13)$$

観察角度 ϕ はカメラ正面を0とする。光源の突き出し量 $T=0$ の場合を考えると、以下のように、奥行き距離 y_0 の分解能 Δy_0 は光量分解能 ε に比例する。

$$\Delta y_0 = \frac{L}{\cos(2\theta)} \Delta \theta \quad (14)$$

$$\Delta y_0 \approx \frac{2\varepsilon \cdot L}{P \cdot \cos(2\theta)} \frac{dG^{-1}}{dR} \quad (15)$$

図4は、光源からの照射角度 θ に対して強度比 R を取った模式図である。カメラの光量分解能 ε のため、検知できる強度比に限界が生じる。この限界は式(11)のように光量に依存するので一定ではないが、同一光量条件の場合は強度比の分解能 ΔR は同じ値になる。この強度比分解能 ΔR に対する照射角度分解能 $\Delta \theta$ は、図中に示すように、強度比と照射角度の対応曲線を介して対応づけられる。

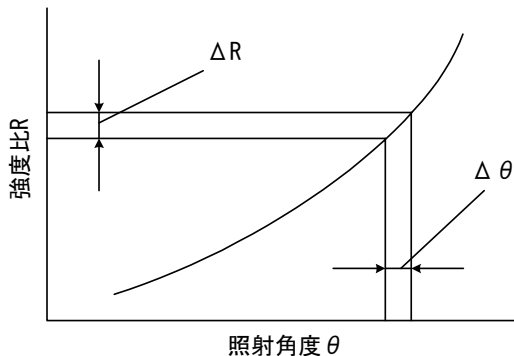


Fig.4 Intensity ratio versus projection angle for a single-region intensity ratio method.

カメラのCCDの画素数が多ければ測定距離精度 Δy_0 が向上するが、CCDなどの2次元アレイ型の光量検知素子は、画素数が増えて素子サイズが小さくなるとS/Nが劣化するため、光量分解能 ε と画素数はトレードオフの関係がある。単領域強度比法の距離精度は両者に依存するが、特に光量分解能 ε が精度を制限している。従来の強度比法で測定精度が上がらなかったのは、主にこれが原因である。

2-2 多領域強度比法

多領域強度比法では測定領域全体を基線方向に複数の領域に分割し、各部分領域ごとに個別に強度比法のパターンを投影する。図5に多領域強度比法で用いた照射パターンを示す。各領域ごとに図3のパターンが繰り返されており、(a)照射角度方向に対して光量が増加するパターンと、(b)減少するパターンを用いている。



Fig.5 Projected patterns for the multi-region intensity ratio method. (a) A graded pattern whose light power for each region increases along projection angle. (b) A graded pattern whose light power for each region decreases along projection angle.

この照射パターンを用いて得られる強度比と照射角度の関係の模式図を図6に示す。図4と同様に、強度比の分解能 ΔR と照射角度の分解能 $\Delta \theta$ を図中に示した。領域数だけパターンが繰り返されているため、照射角度 θ に対して強度比分布関数 $G(\theta)$ の変化率が増加し、理想的には領域数倍大きくなる。

実測の強度比に対して、照射角度 θ に対する強度比 R の微分 $dR/d\theta$ を、強度比 R に対して対数でプロットしたのが図7である。 $dR/d\theta$ は領域数におおむね比例している。

単領域法と同様に、パターンに対する厳密さが不要になるよう、距離のわかった基準平面に実際にパターンを照射し、得られた反射光の強度比分布から式(2)を用いて強度比 R と照射角度 θ の対応関係を求めておく。多領域化することで、領域数だけ対応関係が得られることになる。

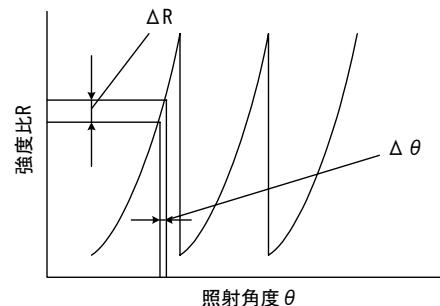


Fig.6 Intensity ratio versus projection angle for the multi-region intensity ratio method.

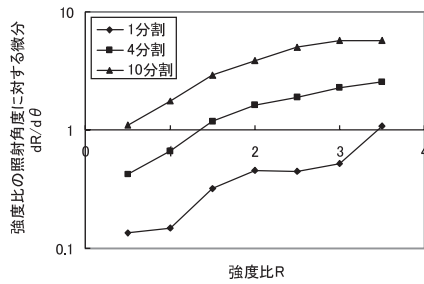


Fig.7 Derivatives of intensity ratio distribution function versus intensity ratio for multi-region intensity ratio method.

パターン光の反射光量の測定から強度比分布が一括して求められるので、領域ごとに強度比から照射角度が決まり、式(2)から奥行き距離が求まる点は、単領域強度比法と同様である。

図7から分かるように、パターンを多領域化すると、照射光量のダイナミックレンジが同じでも、単領域強度比法に比べて、各部分領域ごとの単位照射角度当りの強度比変化 $dR/d\theta$ を領域数倍だけ大きくできる。それにともない、 dG^{-1}/dR は領域数分の1に小さくなるため、おおむね測定距離精度 Δy_0 に領域数倍の改善が期待できる。

一方、パターン光の分布関数が多価になることで、照射角度 θ と強度比 R の関係を表す関数 $G(\theta)$ が θ に対して多価になり、パターン光を観測時に求められる強度比 R から照射角度 θ が一意に求まらなくなる。この点は、何らかの繰り返しパターンを照射するパターン光照射法一般の問題である。本報告では、単領域強度比法で測定物体の概形を求めておき、得られた強度比分布のどこがどの領域に対応するかという領域判定の曖昧さを除去している。

測定精度を改善するために鋸歯状のパターン光を用いるアイデアはCarrhillらの論文²⁾でも示唆されているが、実際に検討されていないので精度改善の効果が明確ではなかった。本報告でも鋸歯状の照射パターンを用いたが、Carrhillらと異なり、図5のように基線方向に光量が減少するパターンと増加するパターンを用いることで、 $dR/d\theta$ の変化範囲ができるだけ大きくなるようにした。

2-3 形状評価系と影絵照明

影絵照明を含む形状評価系の模式図を図8に示す。ファイバライト光源の射出光をシリンドリカルレンズで $100\mu\text{m} \times 40\text{mm}$ のスリットに集光する。この射出光を用いて濃度分布

フィルタを照射し、測定領域にパターンを照射した。

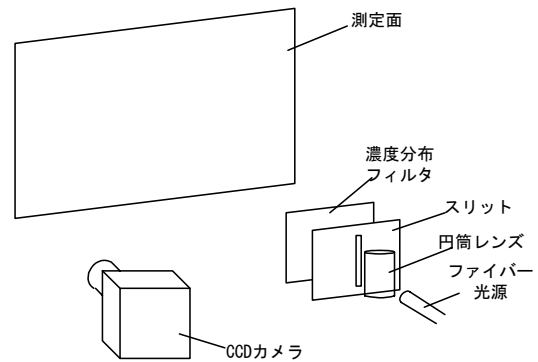


Fig.8 Schematic diagram of the shadow-casting illumination.

スリット位置が光源の光学中心となる。スリット幅が狭いため、基線平行方向に対して十分点光源とみなせる。単純にフィルタの影絵を投影しているだけであるが、基線平行方向へのパターンエッジのぼけは約0.5度と少ない。

パターン光を生成するために、4枚の濃度分布フィルタを用いた。2枚が単領域強度比法用、もう2枚が多領域強度比法用である。パターンの切り替えは、濃度分布フィルタを交換することで行った。フィルタサイズは40mm角、濃度分布フィルタとスリットの距離は100mmである。このフィルタの裏面からスリットを通した光で測定物体にパターンを照射し、撮像部のCCDカメラで反射光量を検知した。用いた白黒カメラのAD変換は10ビット、 640×480 画素、取り込み積算回数は32回、カメラのレンズの焦点距離は8mmである。ズームに合わせて、得られた画像から焦点距離を補正した。CCDカメラのガンマ特性はほぼ2次曲線で近似できた。

濃度分布フィルタは、光透過率が2%から82%までほぼ直線的に変化する原板を作成し、これを写真用フィルムに転写して用いた。フィルムの感光特性のため写真フィルムに転写した場合は、光量分布の直線性は得られなかったが、既に述べた通り、基準平面における実測の光量分布から強度比と照射角度の対応関係を得ているので問題にはならない。

3. 段差平面板を用いた距離精度評価

図9に、600mm位置に、白色平面板で作成した20mmの段差を再構成した距離画像を示す。右方向がX軸、上下方向がZ軸に対応する。図の濃淡バーで示したのが段差の基準面を0mmとしたY方向の距離である。基線長は100mmとした。既

に述べたように、単領域のパターンであらかじめ概形を求め、各画素位置ごとに領域を判別する。この領域情報を元に、10領域のパターンを用いて、各領域毎の詳細形状を求めた。

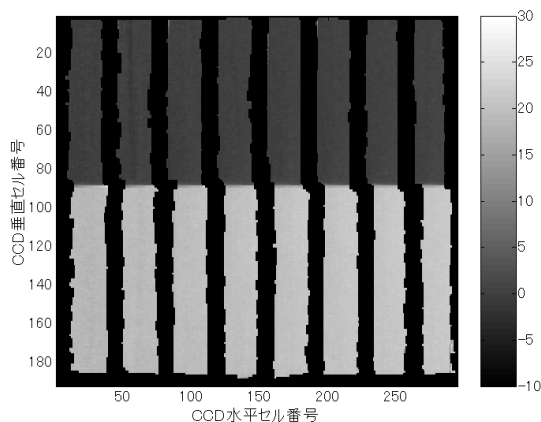


Fig.9 Reconstructed distance image of 20mm height step by the multi-region intensity ratio method.

図9の背景に対して帯状に明るい部分が、形状の測定されている部分である。領域の境界に生じるパターンのぼけの影響を除くため、エッジ周辺のデータを捨てており、そのため帯状の測定結果となっている。図9の上側が段差の基準面であり距離が0mm、下側の白い部分は段差面で20mmとして測定されている。10領域の条件では、基線方向の領域幅15mmに対して、測定できた幅が約8mmなので、測定できていない部分の割合は約50%である。この割合を増やすと、誤差の大きな角状の形状欠陥が増える。領域境界に集中する欠陥の原因は、強度比から照射角度を得る際の、補間の元になる実測データの光量ノイズや、パターンを照射するフィルムの位置ずれなどにより生じる。パターンぼけの幅は領域数によらないので、領域数を減らせば、相対的に測定できない部分の割合は減るが、領域数低減により照射角度に対する強度比の変化も減少するので、同時に測定精度も下がる。

単領域強度比法に相当する1領域パターンでは、相対精度（カメラから測定物体までの測定距離に対する奥行き誤差の比。三角測量の原理により、カメラ、照明、測定物の配置が相似なら、測定距離によらず一定になる。）は1%以上だったが、4領域では0.5%、10領域では0.2 ~ 0.4%の相対誤差が得られ、当初の予想通り、領域数が増すにつれて精度が向上することを確認できた。距離精度が領域数だけに依存するならば、領域数倍距離精度が改善されるはずだが、実際は領域数倍ほどは改善されていない。

単領域強度比法を併用した事前の領域判定については問題なく行うことができた。領域数が多くなれば単領域強度比法の精度限界で領域判定に誤りが生じるが、その場合は、領域の幅が単領域強度比法の距離精度以上離れるように領域数に制限を加えれば良い。

4. 考察

影絵照明を用いた多領域強度比法の問題点と対策について検討を行う。

4-1 多領域化による照射角度分解能の向上

今回の評価では撮像部の歪曲収差補正を行っていないが、既に述べた通り、CCDの行毎に照射角度分布関数Jの校正を行なっているので、撮像部の歪曲収差に対する簡単な対策を施したと言える。今回得られた測定精度は、縞格子投影法と同程度の精度が得られているが、光切断法に比べるとまだ低い。今のところ、形状誤差に対して評価系のどの誤差がどの程度寄与しているか完全に分離できていないが、評価系の位置合わせ誤差と歪曲収差が主に精度を規定していると予想している。

4-2 領域境界での測定不能部分

周期パターンを投影する縞格子投影法と異なり、多領域強度比法では、領域の分割幅を調整することで、測定範囲内の測定精度を変えることができる。そのため液晶パネルなどの動的なパターン照射機構と組み合わせることで、測定物体に適応した形状測定も可能となる。

一方、今の鋸歯状の照射パターンでは、照射パターンのぼけにより領域境界での形状測定を事実上行えない問題があり、本報告でも、10領域では領域周期に対して約50%しか測定できていない。この点は縞格子投影法などに対して劣っているが、照射パターンをずらして2回照射するか、あるいはパターンそのものを変更し、領域毎に強度変化の方向を逆転させ、強度比に不連続を生じない周期パターンを用いることで解決できるはずである。

4-3 スリットを用いた影絵方式の光利用効率

本報告では、パターンの照射機構に、基線方向にだけ点

光源とみなせるスリットを用いた影絵方式を用い、照射機構の単純化を図っている。このため基線方向に対するぼけは小さくできるが、同時に狭いスリットを用いることで、光源光量の利用効率が悪い。照射部を小型・低コスト化すると、用いる光源の光量にもおのずと制限が生じるので、効率向上のために、フラッシュ管などの高輝度の線状光源の採用と、スリットへの光結合効率を最適化したレンズ系の設計が必要である。

4-4 照射パターン数の低減

本報告の多領域強度比法では、単領域強度比法による概形測定と組み合わせることで、あらかじめ領域判定の曖昧さを無くしているが、そのために照射パターン数が4枚となっている。理想的には照射パターン数は1枚が望ましい。

一般にパターン光照射法では、パターンに何らかの照射角度を検知するための光量信号を乗せ、撮像部で形状を再現するのであるが、この時常に問題になるのが、測定物体の反射率と背景光である。また周期的パターンを照射する場合は、周期の次数（多領域強度比法では領域番号に相当）をいかに求めるかも問題になる。

次数情報を除くと、求めるべき情報は、照射角度情報、反射率、背景光の3種類なので、各画素ごとにこれらの情報を得られるように最低でも3種類の異なるパターンを照射する必要がある。また次数を判別するには、さらにもう1枚パターンを照射する必要があるため、周期パターンを用いたパターン光照射法では4枚のパターンが必要である。

次数判別は、照射角度情報、反射率、背景光と異なり、空間周波数が低い特徴がある。フーリエ変換法はこの特徴を利用しているが、多領域強度比法では、縞格子投影法のようなパターンの厳密な周期性を必要としないため、3パターンのうち2パターンに一意性を持たせれば、次数の情報も同時に得ることができる。この時3パターンをRGBの3原色に割り当て、カラーカメラで一括撮影すれば、照射パターン数を1枚にしなが、領域の曖昧さを解消して形状計測を行えることになる。

5. むすび

影絵照明を用いた多領域強度比法を用いた形状測定

精度について報告した。

- (1) 多領域強度比法と単領域強度比法を併用することで、失敗の無い領域判定を行うことができた。
- (2) 領域内のばらつきは、相対精度0.5% (4領域)、0.2 ~ 0.4%(10領域)が得られ、領域数を増やすことで従来の強度比法に比べて精度向上をはかれた。
- (3) A影絵照明という非常に簡単な照明系でも、結像レンズを用いた通常の照明と同等な測定精度を得られることを確認した。

今後は、照射パターンをRGBに割り当てた多色照明によるパターンの一括照射と、影絵照射部の小型化、精度を律速する要因追求を行うことで、さらなる測定精度の改善を行う予定である。

本報告の影絵照明を用いた多領域強度比法では、照射部の簡便さを失わずに測定精度の改善を行えるので、製造コストと測定形状精度のバランスのとれた3次元形状測定装置を提供できるのではないかと考えている。

参考文献

- 1) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂, (1990).
- 2) B. Carrhill and R. Hummel: Experiments with the Intensity Ratio Depth Sensor, *Comput. Vision, Graphics & Image Process.*, 32 (1985) pp.337-358.
- 3) T. Miyasaka, Y. Matsui, H. Satou, and K. Araki: 濃度傾斜光投影法を用いたリアルタイム三次元計測装置の開発, 第7回画像センシングシンポジウム講演論文集 (2001) pp.251-254.
- 4) 正後 寿成, 長谷川 一英, 天野 敏之, 佐藤 幸男: ストロボレンジファインダの試作, 第7回画像センシングシンポジウム講演論文集 (2001) pp.255 - 260.