透視ひずみの定量評価技術の開発*

棚澤 信** 尊田嘉之*** 嶋崎 剛*** 下菌裕明***

Development of an Optical Distortion Measuring Technique

Makoto KURUMISAWA, Yoshiyuki SONDA, Takeshi SHIMAZAKI and Hiroaki SHIMOZONO

This paper proposes a new method of measuring and evaluation for optical distortions of glasses or transparent objects. An optical distortion is evaluated by measured contrast of checkered pattern image viewed through the object. Naturally it makes contrast down caused by focal shift. In this paper, some artificial samples of transparent plastics are used. They have various shape characters of surfaces that will be causes of distorted images. The contrast values of checkered pattern images viewed through these samples are measured with various installation angles by image processing technique. Strong correlation between the contrast and the shape character of surface is shown.

Key words: glass inspection, image processing, optical distortion, shape from focus

1. はじめに

ガラス等の板状の透明物体の品質において、その透視像のひずみ（以下、透視ひずみ）の強さは重要な項目である。さらに近年の自動車やビルのデザインの曲面化の傾向により、その品質要求はますます厳しくなっている。これに対して現状の評価は人による目視検査に頼っており、遠くの景色がひずむ度合い、あるいはポイントライト像の明暗パターンの強さを官能評価するという方法が主流である¹⁾。また、格子パターンの透視像の二次元的な変形量の測定による光学ひずみを定量評価する試み、およびその自動測定化が行われている^{2)~4)}。しかしこの方法は、格子の変形量が微小であるため、かなり精密な格子の座標測定が必要となり高解像度の画像が必要となる。このため、例えば製造工程における全数検査のように、悪い環境下で短時間に広範囲の評価を必要とするニーズに対しては、現在のところあまり実用的ではない。そこで本研究では、ロバストで簡易的に透視ひずみを評価する方法の開発を目指している⁵⁾⁶⁾。

一般の撮像系において、ある対象物に焦点を合わせると、それより遠いものあるいは近いものは焦点ずれによりその像がぼける現象が知られている。この現象を利用して、対象物のエッジ部分の輝度変化より焦点ずれを予測し、そこまでの距離を測定する研究⁷⁾、対象物あるいは照射したパターンのぼけの度合いより対象の形状を測定する研究が行われている⁸⁾⁹⁾。

一方、本研究の対象である透視ひずみは、透明物体が何らかのレンズ効果を起こし、対象物の像がひずむ現象であると考えられる。このレンズ効果を仮定すると、透視ひずみが生じる部分では、撮像系の焦点ずれによる画像のぼけが観測されること

が予想され、ぼけ量による評価が可能であることが期待される。本論文の目的は、以下の3点とする。

- (1) チェッカパターン（以下 CP と略す）の透視像のコントラストの低下量を用いる新たな透視ひずみの定量評価方法（以下 CP 法）と、そのためのアルゴリズムを提案し、その原理を確認する。
- (2) 透視ひずみを引き起こすような表面形状の板状透明体サンプルを用意し、それぞれのサンプルの表面の変形の程度と提案した方法によるコントラストを実測し、両者の関係を明らかにする。
- (3) 透視ひずみの強さ（それを決める因子である表面形状と取付角度）とコントラストの関係を明らかにする。

Fig.1 An example of optical distorted image

2. 透視ひずみ

一般に透視ひずみとは、ガラス等の透明物体を通して見ることにより生じる透視像の変形を指す。具体的には図1のようにガラスを通して対象を見ると、真っ直ぐであるものが曲がって

* 原稿受付 平成9年2月26日

** 正会員 旭硝子㈱中央研究所（横浜市神奈川区羽沢町1150）

*** 旭硝子㈱中央研究所

Fig.2 Configuration of the new method

(b) The case of work with optical distortion

Fig.3 The geometric optics model of relation between the effect of optical distortion and focal shift

Fig.4 Model signals by optical distortion

見えるという現象となる。透視ひずみの原因は局所的な屈折異常であり、物体表面の形状に起因するものと物体内部の屈折率の不均一に起因するものに分けることができる。表面形状に起因するものに関しては、変形が大きいあるいは透明物体の基準面に対する視線の入射角が大きい（浅い角度から見る）ほど、透視ひずみは強く感じられることが知られている。透視ひずみの発生パターンとしては、点状、線状、面状のものなどがあるが、本研究においては、自動車のフロントガラス製造工程などで欠点に起因して生じる点状の透視ひずみについて検討する。

3. 測定原理と評価方法

3.1 測定の原理

図2に本手法における構成を示す。カメラの光学系の焦点は、被検物のない状態でCP面に合わせ、透視ひずみの評価対象であるガラス等の透明物体を透過させCCDカメラでCPを撮像する。被検物に透視ひずみがない場合は、CPに焦点があった像が得られるが、透視ひずみがある場合はそのレンズ効果により、図3のようにその部分は焦点ずれ（CCDカメラの1画素に該当

Fig.5 Flowchart of image processing to calculate contrast

する領域が広がり白と黒にまたがる現象）を起こしCPの像がぼけるという現象が起こる。この現象は点状の透視ひずみに対して顕著であるが、筋状の透視ひずみもシリンドリカルレンズとして、やはり同様の現象が起こりうる。これをCPの1ピッチの輝度の断面について考えると、透視ひずみがない場合はCP面に焦点が合っているため図4(a)のようにCPの白色部の値（ I_{max} ）、黒色部の値（ I_{min} ）の差は大きくなるが、透視ひずみが強くなるにしたがって焦点ずれの効果による像のぼけが大きくなり、図4(b), (c)のように I_{max} と I_{min} の差は小さくなる。ただし被測定物の透過率差や光源面のむらなどにより全体光量が比例的に変化すれば、この I_{max} と I_{min} の差も変化してしまう。そこで本手法では、1ピッチごとの I_{max} と I_{min} の差を、両者の和で割ることにより補償した以下の式(1)で定義するコントラスト C という指標を用いて透視ひずみの強さを評価する。

$$C = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) \quad (1)$$

原理的には、強い透視ひずみであるほど焦点ずれが大きくなるので、この式によりコントラストの値はより小さくなる。

3.2 現象のモデル化

焦点ずれの原因となる透視ひずみを焦点距離 f' のレンズと仮定すると、CP面上における錯乱円の径は次式のようになる。

$$d = \left| \frac{f \cdot l_1^2}{F \cdot f' \cdot (l_1 + l_2)} \right| \quad (2)$$

ここで、 d はCP面上の錯乱円の径、 f はカメラの光学系の焦点距離、 F は絞りを表し、位置関係のパラメータは図3(a)に示す。透視ひずみのレンズへの近似誤差、画素の光軸中心とCPの位相の関係の影響を無視すれば、近似的にはコントラストはこの d とCPのピッチの関係で決まると考えられる。

3.3 測定のアルゴリズム

コントラストの算出方法について述べる。処理のフロー図を図5に、CPの1ピッチにおける処理画像のモデルを図6に示す。

Fig.6 Example models of image processing about one pitch of checkered pattern

Fig.7 Examples of the checkered pattern images with optical distortion

各ピッチの白色部分の値を求めるため、CPの1ピッチに相当する大きさの最大値算出フィルタを原画像に作用させる。これによりそれぞれの画素の値を、その画素の近傍1ピッチ相当の最大値、つまり白色部分の値とする最大値画像を算出する。同様に黒色部分の値に相当する最小値画像を算出し、両画像の演算によりコントラストを求めている。

図7はこのアルゴリズムで求めた実際の透視ひずみの写真と処理過程の画像の一例を示している。画像の中心に透視ひずみがあり、(a)の原画像でもわずかに異状が認められぼやけている。3.1節での説明の通り、焦点ずれにより(b)の最大値画像の透視ひずみ部分は輝度が低く、(c)の最小値画像の透視ひずみ部分は輝度が高くなっている。結果として(d)のコントラスト画像の透視ひずみ部分は低い値となっており、理論通りの現象が観測されている。なお、図中の同心円状のコントラストの低下は成形時に生じた切削の痕、放射状のコントラストの低下はCPのパターンとCCDカメラの画素により生じるモアレの影響と考えられる。また(a)~(c)の画像に見られる光源のむらによる右下の比例的な輝度の低下の影響には、コントラスト画像では見られない。

4. コントラストの測定

4.1 実験サンプル

透視ひずみのサンプルとして、150×150×10 mmの板状アク

Fig.8 Measured surface shape of the samples

Fig.9 Installation angle

リル樹脂の表面形状を切削加工したものを用いる。表面形状は、生産工程で発生した不良の形状の分析結果をもとにモデル化し、同じ大きさで高さの異なる同心円状の山型とした。設計式は板の面内中心を $x = y = 0$ とし、肉厚方向の変形を z とすると以下の通りである。

$$z = H \exp \{ -(x^2 + y^2) / \sigma^2 \} \quad (3)$$

高さ H を 5, 10, 15, 20 μm と変えることにより、透視ひずみの強さの異なる4枚のサンプルを用意した。また変形の半径 σ は 17mm で各サンプル一定である。これらの値も形状分析結果を参考にしている。各サンプルの山のピークを通る1断面の形状を接触式測定機で測定した結果を図8の(1)~(4)に示す。これらの結果より各サンプルの凸部の高さを求める。なお変形の大きい順に Sample 1~4 とする。

また透視ひずみは、板状の透明物体が水平に近く置かれるほど強く感じられる傾向があり、図9に示すような透明物体の基準面と水平面のなす角度で定義される取付角度により、1枚のサンプルにおいても透視ひずみの強さのコントロールは可能である。取付角度が小さいほど透視ひずみは強くなるという関係になる。

Table 1 The experimental condition

Item	Sign	Value
Distance between C.P. and sample	l_1	1500 mm
Distance between sample and camera	l_2	1500 mm
Pitch of checkered pattern	p	6 mm

Fig.10 Result of the experiment for defocus model

4.2 実験方法

本実験においては、①モデルの実証、②透視ひずみの強さとコントラストの関係を明確化するため以下の2種の実験を行う。

- ① 各サンプルをカメラの絞りを変えて測定。式(2)の感度の検証のため、1~3の各サンプルに対し、取付角度を25°に固定して絞りをF2~5.6と変えて測定を行う。
- ② 各サンプルを取付角度を変えて測定。透視ひずみの強さとパターンを変えるため、4つのサンプルに対し、取付角度を20°から5°おきに45°まで変化させて測定を行う。

①に関しては、式(2)の中で解像度等の他の感度要因と独立なパラメータである絞り(F値)を変えている。また②については絞りをF2で固定し、形状と取付角度の組合せにより透視ひずみの強さとパターンを変えている。

測定時の条件については表1にまとめる。CCDカメラのレンズの焦点距離はf28のものを用いておりカメラ1画素の大きさは、サンプル面で0.6mm、CP面で1.2mm程度に相当する。画像処理のメモリは512×480のものを用いているので、1回の測定可能な範囲はおおよそ300mm角となる。また、各測定におけるコントラストの値は、ひずみ部分の最小値とする。

4.3 モデルの検証

①の実験結果より、式(2)の妥当性について述べる。式(2)において変えているパラメータはF値だけなので、錯乱円dは1/Fに係数をかけたものとなる。絞りを変えた場合の実験値を図10に示す。グラフの横軸は1/Fを、縦軸はコントラストを表している。実験結果はモデル式のdとコントラストが比例関係にあることを示している。測定点数は少ないが、各々の結果のモデル式との相関は r^2 で(r はこれ以降相関係数を示す)サンプル1は0.99、2は0.91、3は0.97と高い値を示しており、モデルの妥当性が確認された。

4.4 コントラストと形状の比較

4種類のサンプルの各取付角度におけるコントラストの測定結果を図11に示す。この図において、横軸は透視ひずみの強さを表す取付角度、縦軸はコントラストである。図中で右側ほど透視ひずみは強くなるが、グラフは右下がりとなっており、透視ひずみが強くなるとコントラストは低下するという関係

Fig.11 Measured contrast of the samples

Fig.12 Relation between contrast and surface shape

が確認できる。各値は3回の測定の平均値を示しており、測定値の再現性は、3回の測定の標準偏差で0.0038である。コントラストが0.1以下の領域については、透視ひずみが強すぎてコントラストの低下が飽和状態となっている。また、取付角度が50°以上の範囲では、透視ひずみが弱くコントラストの低下は見られず、測定値は求まらなかった。絞り等を変えることにより測定のダイナミックレンジを変えることは可能だが、今回の条件における測定限界は、各サンプルの取付角度45°程度の強さの透視ひずみである。

コントラストの低下が透視ひずみによるレンズ効果であるとする、レンズの曲率が焦点距離を決めるように、サンプルの表面形状の凸部を代表する曲率(以下、変形の程度)に応じてコントラストが低下すると予想される。式(3)中の凸部の高さ H 、大きさ σ に対し、変形の程度を近似するパラメータとして H/σ を仮定する。各サンプルの表面形状は、同じ大きさで高さの異なる山型の凸部をもつので σ は一定となり、変形の程度はサンプルの中心の高さ H のみに依存する。本実験に用いたサンプルに関しては、同一角度におけるコントラストとサンプルの高さは相関を持つことが予想される。

図12に各サンプルのピークの高さの実測値と、取付角度30°におけるコントラストの関係を示す。サンプル数は少ないが、両者の間には $r^2=0.9994$ と高い相関が見られる。30°においては、各サンプルのコントラストの測定がダイナミックレンジ内におさまる、最も高い相関が得られており、今回の条件で今回のレベルのサンプルを測定する上では最適な角度であるといえる。他の角度では、ひずみが強すぎてあるいは弱すぎてダイナミックレンジを外れてしまうサンプルがあったため、相関は30°の場合より低く、取付角度20~45°の平均の相関は $r^2=0.93$ となる。

今回の条件で今回の対象に対して、コントラストのデータの

Fig.13 Relation between contrast and parameter of surface shape by installation angle

みから被検体の表面形状を復元するのは困難と思われる。ただし、サンプルの表面形状とコントラストの測定結果に相関が見られたように、どちらの被検物の変形の程度が大きいかというような、ある程度の形状の予測は可能と考えられる。

4.5 コントラストと透視ひずみの強さの比較

人が感じる透視ひずみの強さが凸部形状のどのパラメータに依存するものかは不明であるが、それを近似しうる重要なパラメータとして前節で述べた変形の程度が考えられる。本研究ではサンプルごとの凸部の高さ、取付角度の2通りの手段で透視ひずみの強さを測定を行っている。本実験で用いたサンプルに関して凸部の高さにより変形の程度が変わるのは容易に理解できる。また取付角度により透視ひずみの強さが変わるのは、それにより凸部の見かけの高さ及び大きさが変わるためと考えられる。ある取付角度 θ における見かけの大きさは $\sigma \cdot \sin \theta$ となり、見かけの高さは $H / \sin \theta$ となるので、見かけの変形の程度を表すパラメータは $H / \sigma \cdot \sin^2 \theta$ となる。図13は、横軸を見かけの変形の程度を表すパラメータ、縦軸をコントラストとし、各サンプルの各取付角度における測定値をプロットしたものである。横軸0.006以上のコントラスト低下が飽和したデータを除くと、両者の間には $r^2=0.96$ という高い相関が見られる。これにより点状の透視ひずみに関しては、変形の程度という形状パラメータを介して、その強さをコントラストにより予測できると考えられる。ただし本来の意味での透視ひずみの強さに関しては、人間の官能評価とこれらとの関係を明らかにする必要がある。

5. おわりに

本研究では、透視ひずみに関する光学現象についてのモデル化、点状のひずみ欠点をモデル化したサンプルを用いた実測により、以下の3点を明らかにした。

- (1) チェッカパターンの透視像のコントラストの低下量を測定する新たな透視ひずみの定量評価の方法とそのための

画像処理のアルゴリズムを考案した。さらに焦点ずれによるコントラスト低下のモデル化を行い、実証（実験結果とモデルの相関 $r^2>0.9$ ）することによりその測定原理を確認した。

- (2) 透視ひずみを引き起こすような表面形状の板状透明体サンプルについて、それぞれの表面形状及び提案した方法によるコントラストを実測した。表面形状の変形の程度の代表値（凸部の高さ）とコントラストの高い相関（ $r^2=0.93$ ）を確認し、変形の程度のような簡単な表面形状の予測に関してコントラスト測定が有用であることを明らかにした。
- (3) 表面形状と板状透明体の取付角度により、透視ひずみの強さを変えてそれぞれのコントラストを実測した。その結果より、透視ひずみの強さを表すと考えられるパラメータとコントラストとの間に高い相関（ $r^2=0.96$ ）があることを確認し、コントラストの測定により透視ひずみの強さを予測できる可能性が高いことを明らかにした。

本研究においては、透視ひずみの評価に関して、その強さが形状のパラメータとの関係により議論してきた。透視ひずみの品質を考えた場合、その形状とは無関係に人間が気付くかどうかの評価の基準となるべきである。今後は人間の透視ひずみに対する感覚の定量化を含め、評価パラメータが人間の官能と合う合わないかの評価が課題である。

参考文献

- 1) 作花澄夫(編)：ガラスの事典，朝倉書店，(1985) 326.
- 2) 牧口 実，木村賢治，藤原英二：ウィンドシールドガラス透視歪の品質解析－視覚特性に基づく評価指標の確立とその応用－，TOYOTA Tech. Rev.,43,(1993) 12.
- 3) S.Seto, Y.Nakashita, K.Uemura, T.Kurita and M.Makiguchi: A New Automatic Optical Distortion Measuring System for Automotive Windshields, '94 SAE Congress & Exposition paper,(1994) 59.
- 4) 千葉直樹，奥田泰生，安富文夫，松浦英文，河田 宏，富田 洋：限度見本に依存した官能検査の良否判定のモデル化，第6回「外観検査の自動化」ワークショップ講演論文集，(1994) 93.
- 5) 棚澤 信，尊田嘉之，大木直之，鈴木俊彦，下園裕明：透視歪の定量評価技術の開発，1995年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1995) 249.
- 6) 棚澤 信，尊田嘉之，嶋崎 剛，下園裕明：透視歪の定量評価技術の開発（第2報）－異なる表面形状より生じる透視歪の測定－，1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1996) 265.
- 7) A. P. Pentland: A New Sense for Depth of Field, IEEE TPAMI, 9,4,(1987) 523.
- 8) 石原満宏，佐々木博美：合焦点法による高速三次元形状計測，精密工学会誌，63,(1997) 124.
- 9) 野口 稔，中川泰夫，S.K.Nayar: Shape from Focus法の投影パターンの最適化，第7回「外観検査の自動化」ワークショップ講演論文集，(1995) 66.