

ウィンドシールドガラスの光学

棚 澤 信

ウィンドシールドガラスを介した自動車前面の視覚情報は、ドライバーが安全に運転を行う上で不可欠であり、その光学品質は強度に関する品質と並んで重要である。ウィンドシールドガラス（以下、ガラスと略す）の光学品質としては、透過率あるいは外観とよばれるきずなどもあるが、本稿においては屈折異常により生じる“透視ひずみ”に関して述べる。“透視ひずみ”とは、図1に示すような、ガラスを介することによって透視像がひずむ現象で、本来まっすぐであるものが曲がって見えるというような現象として人には認知される。この透視ひずみに関する品質は、ドライバーが外界の状況を正しく認識して安全な運転をするために必要であり、疲労感や不快感を防ぐためにも重要である。

透視ひずみは、光学現象により生じる品質項目であるとともに、その評価に関しても光学測定技術および画像処理技術の利用が不可欠である。1m²のオーダーの大きさを持ち、複雑な曲面形状をもつガラスに対して、透視ひずみの原因となりうる表面変形の大きさは直径が数十mm、高さが数 μm と非常に微小である。さらに、透視ひずみ自体も背景などの状況によって見えたり見えなかったりするという特徴を持ち、像の変形自体もわずかである。そのため、その測定あるいは評価技術に難しさがあり、さまざまな光学現象を利用した測定方法が試みられている。

また、一般に透視ひずみは人間の感覚が基準となる官能品質であり、視覚に合った品質の定量化のためには、視覚特性の研究手法の応用が有効だと考えられる。さらにさまざまな背景におけるひずみ感覚のメカニズムの解明など、視覚分野の研究対象としても興味深いものと思われる。

1. 透視ひずみの分類

1.1 現象による分類

対象との間にガラスを介することにより生じる光学現象を分類すると、図2のようになる。(1)は像の偏差を示しており、厚さが一定のガラスを透して物をみた場合でも、ガラスが傾いた状態であれば、像全体がずれた位置に見えるという現象であるが、一般に人が物を認識する上で問題は生じない。(2)はテーパー状に厚さが変化するガラスを透して物をみる場合であり、角度の偏差により、本来のものよりずれた方向に像が見える。また、厚さに応じて像の偏差量が増えるため、像に一方へ徐々に変化する伸び縮みが生じる。ただし数mmの厚さのガラスで、視覚上で問題になるほど極端に厚さに差が生じることはない。(3)は局所的な厚さの偏差をもつガラスを透して物をみた場合であり、像に局所的な伸び縮みが生じる。また(4)のように、一定の厚さのガラスであっても曲面である場合は、みる角度によっては厚さの偏差となり、同様の現象が生じる。また、曲率が急に変化するような場合も同様の現象となる。一般にガラスの透視ひずみとして問題になるのは、この(3)と(4)のケースがほとんどである。

1.2 発生要因と特徴による分類

透視ひずみは、製造の不具合に起因する図2(3)のような厚さの偏差、設計に起因する図2(4)のような曲率に分けることができる。ウィンドシールド用ガラスには、2枚のガラスを重ねた状態で熱を加えて曲げ、ガラス間にフィルムを挟んで圧着した“合わせガラス”が用いられる。合わせガラスの製造工程で発生する透視ひずみの主なものは、以下のとおりである。①素板とよばれる平板ガラスの製造工程で、溶解不良による屈折率異常、表面の変形あるいはうねりが生じると透視ひずみとなりうる。これは線状あるいは周期性をもつ透視ひずみとなる場合が多い。②

旭硝子(株)中央研究所(〒221-8755 横浜市神奈川区羽沢町 1150)
E-mail: kurumi@agc.co.jp

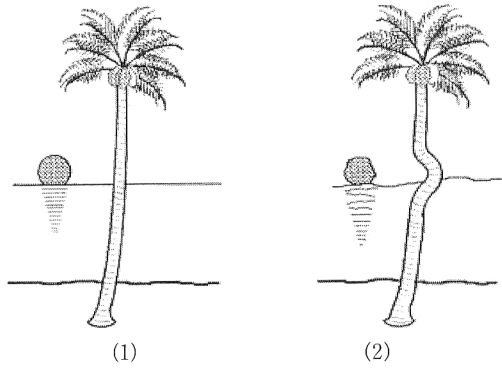


図1 透視ひずみによる現象。(1) 正常な風景像、(2) ひずんだ風景像。

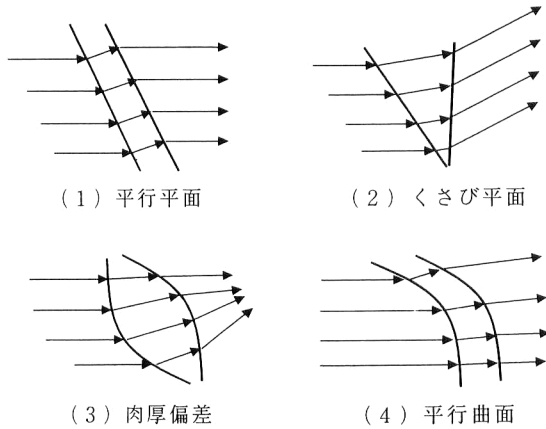


図2 透視ひずみの光学現象。

ガラスを曲げる工程で、熱の加え方に不具合があると、部分的に設計形状からの曲率や厚さのずれが生じ、局所的な領域に広がる透視ひずみとなりうる。③ ガラスを曲げる際に付着物があったり、何かガラス間に挟まったりするとガラスの表面形状に局所的な変形が起こり、点状の透視ひずみとなりうる。また、ガラス内部や表面の異物により、表面が変形して点状の透視ひずみとなる場合もある。

一方、先にも述べたとおり、ガラスの厚さが一樣でも曲率によって透視ひずみとなるので、ガラス形状の設計次第で曲率の一部が透視ひずみとなる恐れがある。この場合、比較的広い領域の透視ひずみとなる。また、取り付け角度とよばれる水平からのガラスの傾きが小さいほど、同一のガラスに対する透視ひずみが強く感じられるので、設計の因子である取り付け角度も透視ひずみに関する重要なファクターである。

透視ひずみを発生原因および特徴で分類すると、工程に起因する局所的な透視ひずみと、設計に起因する広い領域の透視ひずみに分類することができる。近年、自動車のデザインは多様化、複雑化してきており、それにつれて透視ひずみの品質を保つためのガラスの設計あるいは生産技術

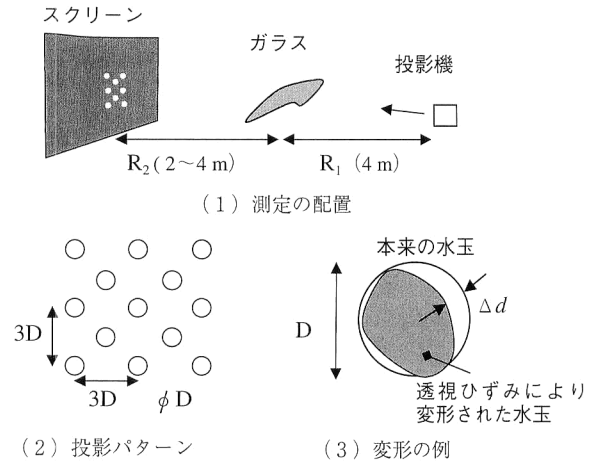


図3 JISによる透視ひずみの試験方法。

にも大きな負荷がかかってきている。さまざまな技術の進歩にもかかわらず、透視ひずみに関する課題は解消されていく方向にはない。

2. 透視ひずみに対する規格

透視ひずみに関する規格およびその試験方法に関しては、JIS (Japanese Industrial Standard) の規格に定められている^{1,2)}。これらは主に、ガラスの設計形状に起因する透視ひずみを対象としており、新たに設計された型式の試作品に対する評価などに適用されている。

JISによる試験方法では、図3に示すように実車の取り付け状態にしたガラスを透して、水玉パターンをスクリーンに投影し、投影された個々の水玉の円の最大変形量により透視ひずみを評価する。投影される円の大きさは、ガラス上で想定される円の直径4mmに対して、測定が容易なスクリーン上での直径D(単位はmm)として式(1)により規定されている。

$$D = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times 4 \quad (1)$$

ここでR₁は図3(1)に示す投影機からガラスまでの距離(m)、R₂はガラスからスクリーンまでの距離(m)を表しており、投影パターンは図3(2)に示すとおりである。図3(3)に例を示す水玉の円形からの最大変形量(mm)であるΔdを用いて、JISで定められた透視ひずみの強さΔα(単位は角度の分)を式(2)に示す。

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta d}{0.29 \times R_2} \quad (2)$$

なお、式(2)中の0.29は、それぞれの数値の単位を換算するための係数で、Δdをミリメートルからメートルへ直すための1/1000、ラジアンから度への180/π、度から分への60をかけ合わせた3.44の逆数である。JISでは、

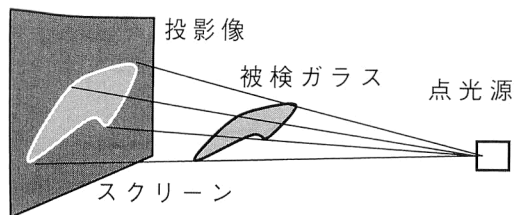


図4 ポイントライト法.

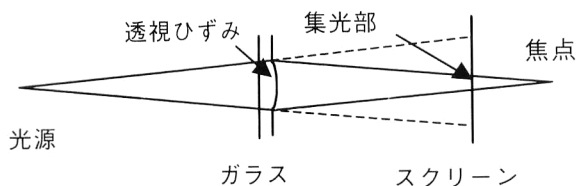


図5 ポイントライト法の光学.

被検ガラスを上下、左右に動かして、全面にわたってこの測定を行うことになっている。最大許容度の規格は、フロントガラスで2分、サイドガラスで6分となっている。

この方法は、設計起因の透視ひずみの評価が対象であり、4枚の製品ガラスを試験することになっている。また、ガラス上で水玉の間隔が18~24 mmであり、ある程度の領域をもつ設計起因の透視ひずみの評価には十分だが、領域が数十 mm である工程起因の透視ひずみに対しては広すぎるため適用が難しい。工程起因の透視ひずみに関しては特別な規格はなく、ユーザーの判断が基準となっている。

3. 透視ひずみの目視検査方法

工程起因の透視ひずみの品質管理は、目視による検査に依存している場合が多い。透視ひずみの目視検査は、限度見本とよばれるガラスサンプルと被検ガラスの透視ひずみを比較することによって行われる。遠景透視とよばれる方法は、被検ガラスおよび限度見本を透して遠くの風景を見比べる方法である。図4に示すポイントライト法は、ガラスの投影像をスクリーンに映し、投影像に発生する明暗を評価する方法である。図5にポイントライト法に関する光学系を示すが、投影像に生じる明暗はガラスの透視ひずみによる凸レンズ効果により一部の光が集光して明るくなる、あるいは凹レンズ効果で暗くなるために生じる。この方法は、直接の透視ひずみ像よりみやすいので、短時間で判断を求められる工程検査などに用いられる。図6は、平板ガラスの透視ひずみの検査などに用いられるゼブラ法である。一般に平板ガラスに生じる透視ひずみは、1つの方向に筋状に発生するので、筋の方向と平行にガラスの取り

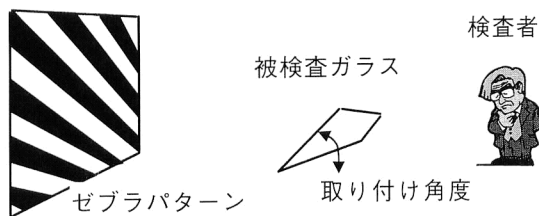


図6 ゼブラ法.

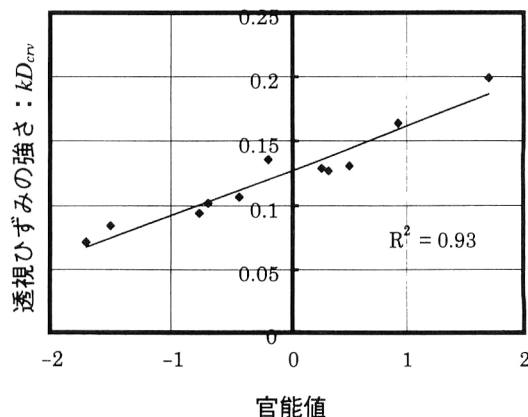


図7 点状の透視ひずみに関する物理量と官能値の関係.

付け角度を変えながら観察し、ゼブラとよばれる斜めのストライプの像が限度見本と同程度の乱れになった取り付け角度により評価する。また、近年はCG (computer graphics) の技術が発達してきており、光学シミュレーションにより作成した透視ひずみ像を目視で評価するようなことも行われつつある。

4. 透視ひずみに対する官能量の定量化

透視ひずみは視覚を基準とした品質なので、視覚に合った定量化が必要であり、そのためには被験者による官能実験が不可欠である。研究例としては、透視ひずみに対する被験者実験によりガラスの部位ごとの重要度を評価した研究がある³⁾。また、視覚による基準サンプルを作るために、点状の透視ひずみのサンプルに対する被験者実験により求めた知覚確率から、Z値を算出して定量化する研究が行われている⁴⁾。この研究では、表面形状の凸状変形の半径を σ 、高さを H 、取り付け角度を θ とし、曲率を模した式(3)による透視ひずみの強さ D_{crv} を提案している。

$$D_{crv} = H / (\sigma \cdot \sin \theta)^2 \quad (3)$$

サンプルの表面に施した凸状の変形の高さと取り付け角度により透視ひずみの強さを制御して被験者実験が行われ、図7に示すように、この物理量による透視ひずみの強さ D_{crv} と人による評価値(Z値)の高い相関が確認されている。

透視ひずみと視覚の関係に関しては、ガラスの物理量と

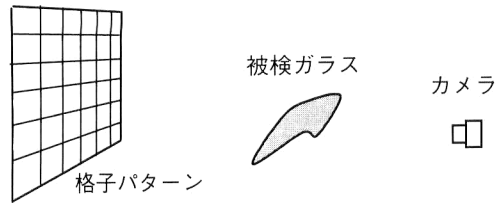


図8 グリッド法。

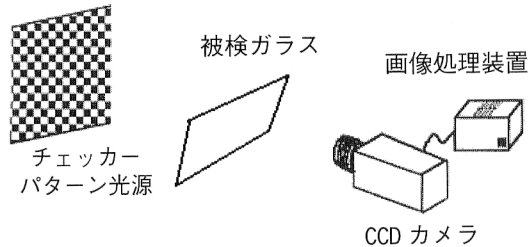


図9 チェッカーパターン (CP) 法。

視覚の関係、ガラスの条件を固定した風景の時空間周波数と感じ方の関係の検討⁹⁾などについての研究が行われてきているが、どのような視覚メカニズムによって透視ひずみが知覚され、どのような特性になるのかという点での研究がなされておらず、今後の研究成果が期待される。

5. 画像処理による透視ひずみの測定

5.1 透視像の座標測定を利用した手法

座標測定による透視ひずみの測定は、広い領域をもつ透視ひずみを対象としており、JISの試験方法と同じ考え方に基いているので、ある程度の互換が可能である。透視ひずみの評価をJISに比べて短時間でを行うために、図8に示すように、被検ガラスを透して格子パターンをカメラで撮像し、何もない状態での格子像と比較するという評価が行われてきた。その自動化として、透視像上の格子の座標を画像処理で測定し、座標のずれをもとに透視ひずみを評価する装置が開発されている⁵⁾。さらに、座標のずれ量をもとにして、どのようなパラメーターで評価を行うのがよいかを研究した例もある⁶⁾。一般的に、これらの手法による座標測定に必要な精度を満たすためには、大きなガラスに対する高解像の画像が必要となるなど、装置の仕様厳しくなり、評価時間が長くなる傾向がある。

5.2 透視像の明暗変化を利用した手法

座標測定に頼らない、透視ひずみの評価方法は、一般的にJISでは定めていない、工程起因の局所的な透視ひずみを対象としている。そのため座標測定による手法とは異なり、いわゆる工程検査としての役割として、数秒のオーダーでの測定、評価が目標となる。以下、これに関する2つの手法について述べる。

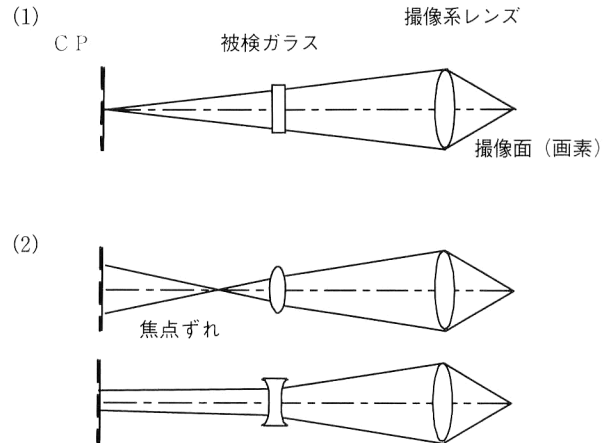
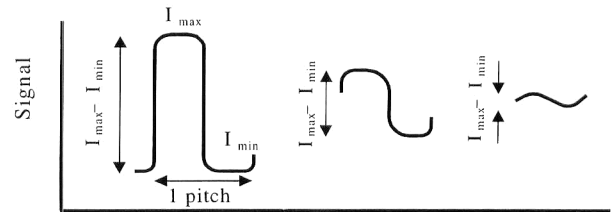


図10 チェッカーパターン法の光学系。(1) 透視ひずみがない場合、(2) 透視ひずみがある場合。



(a) 透視ひずみ無し (b) ひずみ小 (c) ひずみ大
図11 チェッカーパターン法の信号。

1つめは、図4のポイントライト法の応用である。この手法は、光学的に透視ひずみを明暗に変換しているため計算負荷が少なく、短時間の評価が可能である。この手法による評価機が、平板ガラスの欠点の検出と統計的な品質管理を目標として開発されている⁷⁾。図5に示すこの光学系では、透視ひずみが強いほど投影像のその部分は明るくなるが、透視ひずみが想定より強く、焦点位置がスクリーンよりも手前になると、逆に暗くなってしまおうという現象が生じる。この手法では、ダイナミックレンジを超えると、値が飽和するのではなく、逆に小さくなっていくという問題がある。スクリーンの位置などの諸々の条件で決まる評価のダイナミックレンジを、対象とする透視ひずみの強さの範囲に合わせて調整する必要があるなど、注意が必要である。

2つめに別の明暗信号による透視ひずみの評価手法として、図9に示すチェッカーパターン (以下、CPと記す) 法がある⁸⁾。この手法は、撮像系の焦点位置を光源であるCP面に合わせ、透視ひずみのレンズ効果による焦点位置のずれを利用して評価する。光学系を図10に示すが、被検ガラスに凸あるいは凹レンズの効果をもつ透視ひずみがあると撮像系の焦点ずれにより、その部分のCP像にぼけが生じる。図11に信号例を示すが、透視ひずみがない場

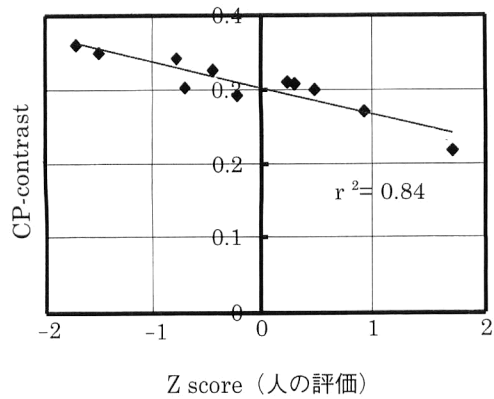


図12 チェッカーパターン法と人による評価の関係。

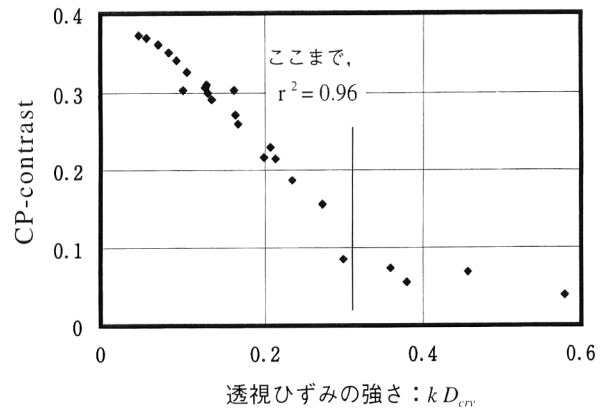


図13 チェッカーパターン法と物理量の関係。

合は明暗のはっきりしたCP像が得られ、明暗のコントラストは高いが、強い透視ひずみほど焦点ずれが大きくなることによりCP像がぼけて、明暗がはっきりしなくなりコントラストが低くなる。CPの1ピッチ内のコントラストである式(4)により、透視ひずみを評価している。

$$\text{CP-contrast} = \frac{I_{\text{max.}} - I_{\text{min.}}}{I_{\text{max.}} + I_{\text{min.}}} \quad (4)$$

この評価値は図12に示すように、人の評価とも高い相関があることが確認されている。また、図13は同一のサンプルに対する、CP-contrastの評価値と、式(3)による透視ひずみの強さの物理量による評価値の比較である。図中の縦線より左側の測定のダイナミックレンジ内では、両者の間に $r^2=0.96$ という高い相関があり、この測定方法により局所的な曲率が計測できていることが確認されている。また、ダイナミックレンジを超えた範囲でも値が飽和し、大きな逆転現象は生じていないことも確認されている⁴⁾。

この方法は、CPの1ピッチに相当する大きさの最大値フィルター、最小値フィルターをかけた画像を作り、両画像の差画像、和画像を算出し、それらの商画像を算出するという非常に簡易な画像処理手法で実現可能で、短時間の評価が可能である。近年は、画像処理の高速化が急激に進んでおり、負荷の大きい画像計算である階調画像のパターンマッチングもリアルタイムに近い時間で処理が可能となってきている。それを受けて、同様の光学系で透視ひずみによる像の変形も併せて評価できる、パターンマッチングの計算手法を用いた評価も検討されている。

5.3 モアレを利用した手法

透視ひずみによる像の変形を、光学処理であるモアレを用いて評価する研究が行われている⁹⁾。この原理を図14に示す。細かいストライプ光源のパターンの像は、モアレ用レンズによりモアレ用格子に結像される。間に挟まれて

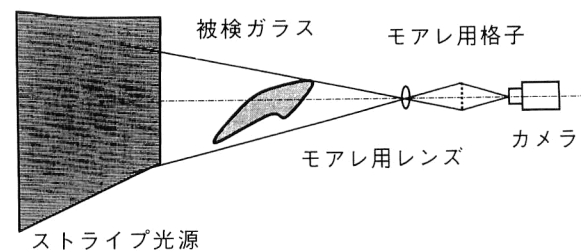


図14 モアレを利用した透視ひずみの測定方法。

いるガラスに透視ひずみがあると、ストライプ像が変形し、モアレ用格子との間に生じるモアレ縞が変形する。このモアレ縞を撮像して解析することにより、ストライプ像の変形を逆算し、透視ひずみを評価するという手法である。この手法は、透視ひずみによる像の微小な変形をモアレ縞として光学的に拡大しているため、装置の仕様に比べて高感度を実現できると期待される。また、設計起因と工程起因の透視ひずみを同時に短時間で測定できる可能性がある。

以上述べてきたように、ウィンドシールドガラスの、視覚を基準とする光学品質である透視ひずみに関して、光学関連の研究の応用がさまざまな面で進んできている。これらの研究のさらなる進歩により、適正な品質管理あるいは設計へのフィードバックが進めば、ウィンドシールドガラスの品質や生産性の向上につながるとともに、透視ひずみの品質が制約となっていた設計の自由度が増し、より理想的な自動車の設計が可能となる。

文 献

- 1) 日本工業標準調査会：JIS R3211 自動車用安全ガラス（日本規格協会，1998）p. 8.
- 2) 日本工業標準調査会：JIS R3212 自動車用安全ガラス試験方法（日本規格協会，1998）pp. 15-17.
- 3) 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 Technol. Rev., **43** (1993) 12-19.
- 4) 榑澤 信, 尊田嘉之, 嶋崎 剛, 下菌裕明: “透視ひずみの定量評価技術の開発 (第2報)—人間感覚と測定値の関係—”, 精密工学会誌, **65** (1999) 1046-1050.
 - 5) S. Seto, Y. Nakashita, K. Uemura, T. Kurita and M. Makiguchi: “A new automatic optical distortion measuring system for automotive windshields,” *’94 SAE Int. Congress & Exposition Paper* (Detroit, 1994) pp. 59-64.
 - 6) 千葉直樹, 奥田泰生, 安富文夫, 河田 宏, 塚本一義: “限度見本による官能検査の特徴量特定”, 電気学会論文誌, **D-116** (1996) 743-748.
 - 7) W. Bongardt and H. J. Benninghoff: “Measurement of optical quality of automotive glass and detection of optical defects by “Ombroligne”,” *Glass Processing Days Conf.* (1997) pp. 378-384.
 - 8) 榑澤 信, 尊田嘉之, 嶋崎 剛, 下菌裕明: “透視ひずみの定量評価技術の開発”, 精密工学会誌, **63** (1997) 1754-1758.
 - 9) A. S. Render and G. K. Bhat: “New optical distortion measuring method using digital image analysis of projection-moiré patterns,” *Trans. J. Passenger Cars*, **106** (1997) 369-373.

(2001年1月5日受理)