逆光線追跡による柱状透明物体の 表面形状と屈折率の同時計測法*

大 谷 幸 三** 馬 場 充***

Surface Shape and Refractive Index Measurement for Transparent Objects
by Inverse Ray Tracing Technique

Kozo OHTANI and Mitsuru BABA

Many practical tasks in industry require simultaneous determination of the surface shape and refractive index of a transparent object; for instance, these two sets of data can be used to inspect car panels, including glass ones, and to select and sort plastic bottles. Contact-type sensors have been widely used in conventional methods to obtain the surface shape of a transparent object. However, the measurement accuracy of contact-type sensors is susceptible to the influence of various factors. In addition, this method cannot be applied to soft or breakable objects. There are few non-contact methods available for measuring the surface shape of a transparent object. On the other hand, there are many methods available for measuring the refractive index of a transparent object, but these methods completely differ from methods of taking a surface shape measurement. To our knowledge, no method that can measure both the surface shape and refractive index of a transparent object has been presented. Therefore, our purpose was to develop an approach that could simultaneously measure both the surface shape and refractive index of a transparent object.

Key words: transparent object, surface shape, refractive index, inverse ray tracing

1. 緒 言

ガラスやアクリルなど透明物体の表面形状と光学的特性（屈折率や透過率）を計測するニーズは、製品検査やCGのレンダリングデータ取得など、多岐に渡る。

透明物体の形状計測法は、接触式と非接触式に大別できる。接触式は、測定ポイントへ移動させたプローブを測定対象に接触させ、プローブの位置情報から表面形状を得る。そのため、測定対象の光学的特性に依存しない測定が可能である。しかし、測定対象にプローブが接触するため、材質や形状によっては傷をつけてしまう可能性がある。また、プローブの機械的移動に要する時間のため、測定時間が長くなる傾向がある。一方、非接触式は、主に光学的センサを利用し、測定対象に触れずに表面形状を得る方法である。これまでに提案されている手法としては、偏光を利用する手法^{1)~4)}、液体中に透明物体を沈めトモグラフィや線光源で計測する手法^{5)~6)}、透明物体による背景パターンの歪みを利用する手法^{7)~9)}などがあり、いずれも透明物体の光透過性を積極的に利用している。しかし、光透過性を利用した形状計測法は対象の素材や形状に強く依存しており、形状抽出の精度や適用できる形状に制約がある。さらに、透明物体の形状と光学的特性を同時に計測するには至っていない。

一方、透明物体であっても、完全透明でない限り一部は表面で鏡面反射する。この鏡面反射成分を利用すれば、鏡面物体と同様の手法で表面形状を計測できる¹⁰⁾。ただし、反射光のみを利用した測定法では、計測対象の表面形状は得られるものの、屈折率を計測することはできない。反射光に加えて、いったん透過した光が裏面で反射する光を検出することができれば、表面と裏面

の形状が同時に得られる利点があるが、この場合の屈折率は既知でなければならない¹¹⁾。

そこで本研究では、光入射ベクトル検出センサ¹²⁾と、それを用いた幾何光学解析に基づく逆光線追跡法により、透明物体の表面形状と屈折率を計測する手法を提案する。本手法は、透明物体の反射性と透過性を利用し、屈折率が未知の透明物体の表裏面形状と屈折率を同時に求めることに特徴がある。ただし、光入射ベクトル検出センサは、センサに対して水平方向の光入射角度しか検出できないため、表面形状については水平方向の形状変化に限定される。したがって、本研究では断面形状に変化のない柱状透明物体を対象とする。本論文では、提案手法の基本原則を述べ、基礎実験として行ったアクリル平板とアクリル半円筒の表面形状と屈折率の計測結果に基づいて本手法の有効性を述べる。

2. 提案手法の計測原理

2.1 透明物体の反射・透過特性

透明物体にスポット光を照射した場合、物体の境界面で光の一部は正反射し、残りはスネルの法則に従って透過する¹³⁾。このとき、反射率を a とすると透過率 b は $b = 1 - a$ で表すことができる。透明物体の場合、反射率に比べて透過率が非常に大きいという性質がある。透明物体の反射、透過パターンを図1(a)に示す。光強度1の光が透明平板に入射した場合、物体表面において強度 a の光が鏡面反射する。残りの強度 b の光は透過し、物体の裏面で強度 ab の光だけ鏡面反射し、強度 b^2 の光が透過する。以後、透明物体内部で反射と透過を繰り返しながら減衰していく。たとえば、反射率 $a = 0.05$ とすると、一次反射光の強度は $a = 0.05$ 、二次反射光の強度は $ab^2 = 0.0451$ とほぼ同じであるが、三次反射光の強度は $a^3b^2 = 0.00113$ となり、一桁小さくなっていくことがわかる。同様に、透過光の場合では一次透過光と二次透過光の強度差が極端に大きくなる。図1(b)は、実際にアクリル平板にレーザ

* 原稿受付 平成 26 年 7 月 4 日

掲載決定 平成 26 年 10 月 30 日

** 正 会 員 広島工業大学（広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1）

*** 茨城大学（茨城県日立市中成沢町 4-12-1）

(b) Light path in an acrylic plate
Fig.1 Optical properties of a transparent object

光を入射した様子を上から見た図であり、表面と裏面から合計2本の反射光が視覚的に確認できる。本研究では、このように透明物体から2本の反射光と1本の透過光が利用できることを前提条件とする。

2.2 基本構成と計測原理

提案手法の基本構成を図2(a)に示す。スポット光を投影するレーザ光源(Projector)と、反射光と透過光を観測する2台の光入射ベクトル検出センサ(Sensor 1, 2)から成る。光入射ベクトル検出センサは、図2(b)に示すように、2台のリニアセンサ(Sensor A, B)を階段状に配置し、各センサで検出した光入射位置 x_1 , x_2 と、センサ間距離 k から光入射ベクトルを求める¹²⁾。このような構成のため、センサへの入射光は垂直方向へスリット状に広げる必要があり、検出可能な光入射ベクトルはセンサに対して水平方向に限定される。したがって、現時点では3次元の複雑な形状をもつ透明物体には適用できない。

逆光線追跡法による表面形状と屈折率の計測方法について、Step 1~Step 7に分けて説明する。なお、パラメータは以下のように定義する。括弧内は方向ベクトルの向きを表す。

n : 測定物体の屈折率

P_1, P_2, P'_2 : 表面の反射位置ベクトル

Q_1, Q'_1 : 裏面の反射位置ベクトル

S_1, S_2 : sensor2の受光位置ベクトル

L_1, l_1 : projector 投光位置, 方向ベクトル ($l_1 = \overrightarrow{L_1 P_1}$)

L_2, l_2 : sensor1の受光位置, 方向ベクトル ($l_2 = \overrightarrow{P_1 L_2}$)

L_3, l_3 : sensor1の受光位置, 方向ベクトル ($l_3 = \overrightarrow{P_2 L_3}$)

L'_3, P'_3 : projector 投光位置, 方向ベクトル ($l'_3 = \overrightarrow{L'_3 P'_2}$)

L_4, l_4 : sensor1の受光位置, 方向ベクトル ($l_4 = \overrightarrow{P'_2 L_4}$)

e_0 : P_1 における法線ベクトル

e_1, e'_1 : Q_1 における法線ベクトル

e_2 : P_2 における法線ベクトル

u_1, u_2, u'_2 : 屈折光の方向ベクトル

$$(u_1 = \overrightarrow{P_1 Q_1}, u_2 = \overrightarrow{Q_1 P_2}, u'_2 = \overrightarrow{P'_2 Q'_1})$$

(a) Coordinate system

(b) Incident ray direction sensor

Fig.2 Basic construction of the proposed method

v_1, v_2 : 透過光の方向ベクトル ($v_1 = \overrightarrow{Q_1 S_1}, v_2 = \overrightarrow{Q'_1 S_2}$)

【Step 1】 まず、図2(a)に示すように、位置ベクトル L_1 から物体に対して方向ベクトル l_1 でレーザ光を投光する。次に、物体表面 P_1 からの反射光を Sensor 1 で受光する。このとき、Sensor 1 への入射位置 L_2 と入射ベクトル l_2 を検出する。逆光線追跡法より物体表面 P_1 の3次元座標と法線ベクトル e_0 を以下の式より求める¹⁴⁾。

$$P_1 = L_1 + \frac{l_{2z}(L_{2x} - L_{1x}) - l_{2x}(L_{2z} - L_{1z})}{l_{1x}l_{2z} - l_{1z}l_{2x}} l_1 \quad (1)$$

$$e_0 = \frac{l_1 + l_2}{|l_1 + l_2|} \quad (2)$$

【Step 2】 図3に示すように、 L_1 から投光された光線は P_1 で屈折して u_1 となり、さらに Q_1 で屈折して v_1 となる。このとき、透過光を Sensor 2 で受光し、入射位置 S_1 と入射ベクトル v_1 を検出する。このとき以下の式が成り立つ。

$$u_1 = \frac{1}{n} l_1 - e_0 \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} \{1 - (e_0 \cdot l_1)^2\}} - \frac{1}{n} e_0 (e_0 \cdot l_1) \quad (3)$$

$$v_1 = n u_1 - e_1 \sqrt{1 - n^2 \{1 - (e_1 \cdot u_1)^2\}} - n e_1 (e_1 \cdot u_1) \quad (4)$$

ここで、屈折率 n , u_1 , e_1 は未知数である。

Fig.3 Step 2

Fig.5 Step 4

Fig.4 Step 3

【Step 3】 図4に示すように、物体の裏面 Q_1 で反射した光は、表面 P_2 で屈折して出射する。この裏面からの反射光を Sensor 1 で受光し、入射位置 L_3 と入射ベクトル l_3 を検出する。このとき以下の式が成り立つ。

$$u_2 = u_1 - 2e_1(u_1 \cdot e_1) \quad (5)$$

また、表面 P_2 は、裏面 Q_1 を始点とする光線ベクトル u_2 と、 L_3 を始点とする光線ベクトル l_3 との交点として、以下の式で表すことができる。

$$P_2 = L_3 + \frac{u_{2z}(Q_{1x} - L_{3x}) - u_{2x}(Q_{1z} - L_{3z})}{l_{3x}u_{2z} - l_{3z}u_{2x}} l_3 \quad (6)$$

【Step 4】 Step 3 で Sensor 1 によって検出した裏面からの反射光に基づき、図5に示すように、位置 L_3' ($=L_3$) から方向ベクトル l_3' ($=-l_3$) で物体表面にレーザを再投光する。この光

$$P'_2 = L'_3 + \frac{l_{4z}(L_{4x} - L'_{3x}) - l_{4x}(L_{4z} - L'_{3z})}{l'_{3x}l_{4z} - l'_{3z}l_{4x}} l'_3 \quad (7)$$

$$e_2 = \frac{l'_3 + l_4}{|l'_3 + l_4|} \quad (8)$$

線は、裏面からの反射光が通過した物体表面 P_2' ($=P_2$) へ照射されることになる。 P_2' からの反射光を Sensor 1 で受光し、入射位置 L_4 と入射ベクトル l_4 を検出する。このとき以下の式が成り立つ。

さらに、物体表面 P_2' で屈折した光線ベクトルを u_2' 、裏面で屈折した光線ベクトルを v_2 とする。このとき、以下の式が成り立つ。なお、 v_2 は Sensor 2 で検出できる。

$$u'_2 = \frac{1}{n} l'_3 - e_2 \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} \{1 - (e_2 \cdot l'_3)^2\}} - \frac{1}{n} e_2 (e_2 \cdot l'_3) \quad (9)$$

$$v_2 = n u'_2 - e'_1 \sqrt{1 - n^2 \{1 - (e'_1 \cdot u'_2)^2\}} - n e'_1 (e'_1 \cdot u'_2) \quad (10)$$

【Step 5】 Step 2 および Step 4 で導出した式 (3) , (4) および式 (9) , (10) をそれぞれ、以下のように x , y , z 成分に分解する。

$$u_{1x} = \frac{1}{n} l_{1x} - e_{0x} \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} \{1 - (e_0 \cdot l_1)^2\}} - \frac{1}{n} e_{0x} (e_0 \cdot l_1)$$

$$u_{1y} = \frac{1}{n} l_{1y} - e_{0y} \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} \{1 - (e_0 \cdot l_1)^2\}} - \frac{1}{n} e_{0y} (e_0 \cdot l_1)$$

$$u_{1z} = \frac{1}{n} l_{1z} - e_{0z} \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} \{1 - (e_0 \cdot l_1)^2\}} - \frac{1}{n} e_{0z} (e_0 \cdot l_1)$$

$$v_{1x} = n u_{1x} - e_{1x} \sqrt{1 - n^2 \{1 - (e_1 \cdot u_1)^2\}} - n e_{1x} (e_1 \cdot u_1)$$

$$v_{1y} = n u_{1y} - e_{1y} \sqrt{1 - n^2 \{1 - (e_1 \cdot u_1)^2\}} - n e_{1y} (e_1 \cdot u_1)$$

3. 試作システムによる実験

3.1 試作システムの構成

提案手法に基づいて試作システムを作成した。図7にその構成(図(a))と外観写真(図(b))を示す。試作システムは主に2台の半導体レーザー(波長635nm, 出力5mW), 3台の光入射ベクトル検出センサ(各センサは東芝製リニア CCD TCD1305P を階段状に5mm 離して設置, 画素ピッチ8x64μm) および水平移動・回転ステージ(シグマ光機製, 水平移動分解能0.06μm, 回転分解能0.05度)から成る。レーザー光源とセンサの位置決めには, 水平移動ステージと回転ステージを用いた。なお, 反射側に設置する光入射ベクトル検出センサは, 図7(c)に示すようにレーザー光源と同一回転ステージ上に設置し, 180度回転させることにより同じ位置で受光と投光を入れ替えることができる。センサデータのサンプリングとステージの位置・姿勢はコンピュータで同期して制御する。

(a) System configuration

(b) Photo of the measuring components

(c) Photo of a sensor and laser source unit

Fig.7 Prototype system

$$v_{1z} = nu_{1z} - e_{1z} \sqrt{1 - n^2 \{1 - (e_1 \cdot u_1)^2\}} - ne_{1z} (e_1 \cdot u_1)$$

$$u'_{2x} = \frac{1}{n} l'_{3x} - e_{2x} \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} \{1 - (e_2 \cdot l'_3)^2\}} - \frac{1}{n} e_{2x} (e_2 \cdot l'_3)$$

$$u'_{2y} = \frac{1}{n} l'_{3y} - e_{2y} \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} \{1 - (e_2 \cdot l'_3)^2\}} - \frac{1}{n} e_{2y} (e_2 \cdot l'_3)$$

$$u'_{2z} = \frac{1}{n} l'_{3z} - e_{2z} \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} \{1 - (e_2 \cdot l'_3)^2\}} - \frac{1}{n} e_{2z} (e_2 \cdot l'_3)$$

$$v_{2x} = nu'_{2x} - e'_{1x} \sqrt{1 - n^2 \{1 - (e'_1 \cdot u'_2)^2\}} - ne'_{1x} (e'_1 \cdot u'_2)$$

$$v_{2y} = nu'_{2y} - e'_{1y} \sqrt{1 - n^2 \{1 - (e'_1 \cdot u'_2)^2\}} - ne'_{1y} (e'_1 \cdot u'_2)$$

$$v_{2z} = nu'_{2z} - e'_{1z} \sqrt{1 - n^2 \{1 - (e'_1 \cdot u'_2)^2\}} - ne'_{1z} (e'_1 \cdot u'_2)$$

これらの連立方程式は, u_1, e_1, u'_2, e'_1, n が未知であるため, このままでは一意に解を求めることはできない。そこで, 屈折率 n の値を仮定して連立方程式を解き, 同時に裏面 Q_1 を以下の式で求める。

$$Q_1 = S_1 + \frac{u_{1z}(S_{1x} - P_{1x}) - u_{1x}(S_{1z} - P_{1z})}{u_{1x}v_{1z} - u_{1z}v_{1x}} v_1 \quad (11)$$

次に, 仮定した屈折率 n が正しいかどうかを判定する。前述したように, 表面 P_2 に対して式(6)および式(7)に示す2通りの光線追跡式を立てることができる。したがって, 仮定した屈折率が正しければ式(12)が成立する。そこで, 屈折率の値を順次更新し, 式(12)を満たす最適な屈折率を解とする。

$$P_2 = P'_2 \quad (12)$$

【Step6】 屈折率 n は導出済みであるので, 図6に示すようにレーザーの投光ベクトル l_1 を走査し, 式(1), (2)より P_1 と e_0 を求める。さらに, 式(3)で求めた u_1 と Sensor 2 で検出した S_1, v_1 を用いて, 式(11)より Q_1 を求める。この走査を繰り返して, 透明物体の表面と裏面の形状を計測する。

Fig.6 Step 6

3.2 柱状透明物体の計測

実験では、基本原理を確認することを目的とし、測定対象には市販の亚克力平板(厚み20mm)と亚克力半円筒(内径50mm, 外径60mm)を用い、それらの表面形状と屈折率を計測した。精密に加工された形状ではないため、実際の断面形状を直線もしくは円と仮定し、統計的に誤差を評価する。図8にそれぞれの外観写真とともに形状計測結果と屈折率の計測結果を示す。いずれの計測対象も、ステージの移動範囲と光入射ベクトル検出センサの受光範囲の制約から光源を0.05度ステップで水平方向に走査し、5mm程度の範囲を計測している。したがって、照射点は水平方向において等間隔とはならない。形状計測結果は、上側の計測データが裏面、下側が表面を表している。なお、屈折率は、 n を0.0001刻みで1.3~1.8まで変化させたとき、式(12)に基づき以下の目的関数 f が最小となる値を解とした。

$$f = \sqrt{(P_{2x} - P'_{2x})^2 + (P_{2z} - P'_{2z})^2} \quad (13)$$

計測結果を評価するため、計測データから最小二乗法を用いて真値を推定し、真値からの標準偏差を求めた。計測点数は、亚克力平板が33点、半円筒が42点である。また、屈折率については各計測点において検出したため、その平均値と標準偏差を求めた。それらの結果を表1にまとめる。

表に示すように、表面形状の計測精度は0.1mm~0.8mm程度となり、レーザの直線性を利用した手法としては妥当な結果が得られた¹⁵⁾。後述する誤差要因を排除すれば、0.01mm程度の精度は期待できる。したがって、本手法は数10mmから数100mm程度の計測範囲を0.01mm程度の分解能で計測する外観検査などへの応用が期待できる。

一方、屈折率の計測結果は、平均値で1.531と1.534となった。計測対象の屈折率を標準となる計測器で計測する術がないため厳密な評価はできないが、一般に公表されている亚克力樹脂の屈折率は1.49~1.53程度である。ただし、屈折率には波長依存性があるため、本実験で使用したレーザ光の波長635nmに対する計測結果としては、標準値と比較してやや高い値と思われる。この平均値に対し、標準偏差の大きさは小数第3位程度となっているため、光学系のミスアライメント(ゼロ点ずれ)が大きく影響しているものと考えられる。また、図8(b), (d)より、サンプル番号が大きくなるにしたがって屈折率の値がわずかではあるが高くなっている。これについては2台の光入射ベクトルセンサが完全には平行に配置できていなかったことが要因として考えられる。したがって、表面形状の計測と同様に、屈折率の計測精度を向上させるためには、後述する誤差要因を排除するためのキャリブレーションが必要となる。

3.3 考察と課題

本手法の将来的な目標は、数10mmから数100mm四方程度の大きさをもつ亚克力やガラスといった透明加工物の3次元形状を空間分解能0.01mm程度で測定可能とすることである。さらに、屈折率については小数第4位程度の精度があればレンズ等の検査への応用も期待できる。計測誤差の主な要因としては、光入射ベクトル検出センサの位置および角度検出誤差、2章のstep4におけるレーザの再投光に起因する誤差、光学系のミスアライメントなどが挙げられる。

まず、光入射ベクトル検出センサについては、予備実験において位置検出誤差0.03mm、角度検出誤差0.04度を確認している。今、真の投光・入射角度を45°、物体とセンサ間距離を50mmと想定し、光入射ベクトル検出センサの検出誤差が形状計測精度に

与える影響を見積る。すると、 x 方向へは最大約0.05mm、 z 方向へは最大約0.1mmの形状計測誤差が生じる。光入射ベクトル検出センサでは、光強度分布のピークを入射位置とみなして検出しているため、精度向上のためには反射・透過光の光強度分布に依存しないロバストな光位置検出が必要となる。

(a) Surface shape of the acrylic plate

(b) Refractive index of the acrylic plate

(c) Surface shape of the acrylic cylinder

(d) Refractive index of the acrylic cylinder

Fig.8 Surface shape and refractive index measurement results

Table1 Summary of the experimental results

Object	Surface shape (Standard dev.)	Refractive index (Standard dev./Ave.)
Plate	Front 0.12mm	0.0049/1.531
	Rear 0.14mm	
Half Cylinder	Front 0.41mm	0.0058/1.534
	Rear 0.78mm

Fig.9 Measurement error caused by the sensor and laser units

次に、step 4におけるレーザの再投光について、まず、実験では回転ステージの角度分解能がセンサの角度検出精度を0.01度下回っているため、物理的に $l_3=P_3$ を実現できない場合がある。ただし、水平方向の位置 L_3 については、ステージの移動分解能がセンサの光位置検出精度を上回っているため、このような状況は生じない。したがって、再投光の角度誤差が0.01度程度は存在するものとする。さらに、試作システムでは図9に示すように、レーザと光入射ベクトル検出センサを同一ステージ上に設置している。回転ステージの中心は、光入射ベクトル検出センサのゼロ点に合わせてある。このように配置すると、光入射ベクトル検出センサで検出した入射位置 L_3 と入射ベクトル l_3 を基に移動・回転ステージを駆動し、同じ入射位置 L_3 と入射角度 P_3 でレーザを投光できる。ただし、この際に回転中心の位置ずれやレーザの取り付け誤差等により、必ずしも $L_3=L'_3$ 、 $l_3=P_3$ とはならない。精度向上のためには、この駆動系を校正する必要がある。

最後に、光学系のアライメントについては、精度向上の重要な要素となる。試作システムでは、図7に示したように、光入射ベクトル検出センサの中心位置を原点として、2台のレーザ光源と3台の光入射ベクトル検出センサに対して、それぞれの位置と方向を制御する必要がある。本実験では、提案手法の原理確認を優先し校正は今後の課題とするが、たとえば文献15のように、既定の位置に配置した平板等を測定して得られる入射位置と入射ベクトルの実験値と、光線追跡法によって得られるそれらの理論値の

偏差を基に、何らかの最適化手法によって校正する手法も有効であると考えられる。

4. 結 言

透明物体を対象とした従来の非接触型形状計測法は計測対象の素材や形状に強く依存しており、汎用的な方法とはいえない。さらに、透明物体の光学的特性と形状の同時計測を行うには至っていなかった。そこで本研究では、光学的特性と形状の同時計測を目的として、逆光線追跡法による透明物体の表面形状と屈折率の同時計測法を提案した。提案手法の特徴は、まず、光入射ベクトル検出センサを用いて透明物体からの反射光と透過光の光路を一意に決定する。そして、逆光線追跡法を用いて、形状と屈折率が未知の条件で成立する計測手順を考案した点にある。試作システムによるアクリル平板とアクリル半円筒の計測実験では、表面形状を標準偏差0.8mm、屈折率を標準偏差0.006の精度で同時に計測できることを確認し、本手法の有効性を示した。

今後の課題として、光学系のキャリブレーション等による測定精度の向上と、光入射ベクトル検出センサを2次元化し、複雑な形状をもつ透明物体の計測を可能にすることが挙げられる。

参 考 文 献

- 1) K. Koshikawa, Y. Shirai : A model-based recognition of glossy objects using their polarimetric properties, *Advanced Robotics*, **2**, 2 (1997) 137.
- 2) 斉藤めぐみ, 佐藤洋一, 池内克史, 栢木寛 : ハイライトの偏光解析に基づく透明物体の表面形状測定, *信学論*, **J82-D-II**, 9 (1999) 1383.
- 3) S. Rahmann, N. Canterakis : Reconstruction of specular surface using polarization imaging, *IEEE CVPR* (2001) 149.
- 4) 宮崎大輔, 池内克史 : 偏光レイトレーシング法による透明物体の表面形状の推定手法” *信学論*, **J88-D-II**, 8 (2005) 1432.
- 5) B. Trifonov, D. Bradley, W. Heidrich : Tomographic reconstruction of transparent objects, *Eurographics Symposium on Rendering* (2006).
- 6) M. B. Hullin, M. Fuchs, I. Ihrke, H. P. Seidel, H. P. A. Lensch : Fluorescent immersion range scanning, *ACM Trans. Graph.*, **27**, 3 (2008) 87.
- 7) 辻田美紀, 眞鍋佳嗣, 千原國宏 : 背景パターンの変化を利用した透明物体の形状と屈折率の計測, 第46回自動制御連合講演会講演論文集, **FA2-08-4** (2003) 771.
- 8) Q. Shan, S. Agarwal, B. Curless : Refractive Height Fields from Single and Multiple Images, *CVPR* (2012).
- 9) 西村真衣, 延原章平, 松山隆司 : 既知背景の屈折像を用いた透明多面体の3次元形状復元, *情報処理学会研究報告 CVIM*, **187**, 12 (2013) 1.
- 10) K. N. Kutulakos, E. Steger : A Theory of Refractive and Specular 3D Shape by Light-Path triangulation, *IEEE ICCV* (2005).
- 11) D. Narita, M. Baba : Measurement of 3-D Shape and Refractive Index of a Transparent Object Using Laser Rangefinder, *IEEE IMTC* (2005) 2247.
- 12) 大谷幸三, 馬場充, 小西忠孝 : スポット光の入射位置と入射角度の1次元同時検出センサの提案, *計測自動制御学会論文集*, **37**, 9 (2001) 799.
- 13) E. Hecht : *Optics*, Addison-Wesley, Reading MA, 3rd edition (1998).
- 14) 大谷幸三, 馬場充 : 鏡面反射特性を有する物体に対応した逆光線追跡による3次元形状計測法, *精密工学会誌*, **78**, 10 (2012) 880.
- 15) K. Ohtani, L. Li and M. Baba : Laser rangefinder calibration based on genetic algorithm, *SICE Annual Conference* (2012) 1234.