清水雅夫^{†1} 奥富正敏^{†1}

本論文では,透明板や両面ハーフミラー板の反射像や透過像を使った距離計測手法 (リフレクションステレオ)に対するキャリプレーション手法を提案する.透明板に入 射する光線は,透明板表面で反射光と透過光とに分かれ,さらにこの透過光は透明板 裏面で一部が反射して再び表面を透過する.このため,透明板に映る像は,対象まで の距離に応じた位置ずれのある2重像となる.同様に,透明板の両面にハーフミラー コーティングを施した両面ハーフミラー板を透過する光線は,2面のハーフミラー コーティングを施した両面ハーフミラー板を透過する光線は,2面のハーフミラー どちらも透過する光線と内部で反射する光線とに分かれる.このため,両面ハーフミ ラー板の透過像も,対象までの距離に応じた位置ずれのある2重像となる.このよう な1枚の2重像から対象までの距離を求めるためには,リフレクションステレオの外 部パラメータに相当する,透明板や両面ハーフミラー板の形状や表面位置,屈折率が 必要である.提案するキャリプレーション手法では,透明板や両面ハーフミラー板を, その両表面を局所的に平面と見なした非平行平面板で近似する.距離が既知の複数の 平面を撮影して,画像上の注目位置に対して2重像間変位を複数計測することで,リ フレクションステレオの外部パラメータを推定する.実画像実験を行い,より正確な 拘束が利用できることと,正確な距離計測ができることを確認した.

Calibration for Reflection Stereo

MASAO SHIMIZU $^{\dagger 1}$ and MASATOSHI OKUTOMI $^{\dagger 1}$

This paper proposes a practical calibration method for a single-camera range estimation using a single complex image with a planar transparent plate or a double-sided half-mirror plate, which are called reflection stereo. A range to an object is obtainable by finding the correspondence on a constraint line in the complex image, which consists of surface and rear-surface reflected image in the planar transparent plate, and also consists of transmitted and internal reflected image through the double-sided half-mirror plate. The range estimation needs the extrinsic parameters of the reflection stereo that include the shape and position of the plate and its refraction index. The proposed method assumes that the plate is non-parallel but planar for a local region around interest point in the complex image. The method estimates the extrinsic parameters from a set of displacements in the complex images. Experiments using real images demonstrate the effectiveness of the proposed calibration method with fine range estimation results.

1. はじめに

複数のカメラを使うステレオ距離計測は,受動的検出だけを利用した距離計測手法として 広く利用されている.同時に,1台のカメラによる距離計測手法も多く提案されてきた.1 台の固定カメラによる距離計測手法は,画像分割法^{3),6)},複数画像法^{2),10)},複数露出法^{4),11)} の3種類に分類できる¹⁵⁾.複数露出法に属する手法として,透明板の表面反射像と裏面反 射像を利用する手法¹⁵⁾や両面ハーフミラー板の透過像を利用する手法¹⁶⁾(それぞれ反射型 および透過型リフレクションステレオ)も提案されている.リフレクションステレオには, 可動機構や特殊な光学部材を必要としないという特徴がある.

透明板の反射像は,透明板表面での反射像(表面反射像 *I*_s と呼ぶ)と,表面を透過して 透明板裏面で反射して再び表面を透過する像(裏面反射像 *I*_r と呼ぶ)で構成される2重像 となる.

透明板の両面にハーフミラーコーティングを施した両面ハーフミラー板を透過する光線 は、入射光側ハーフミラーを透過した後に、射出光側ハーフミラーを透過する光線と反射 する光線とに分かれる.透過する光線(直接像 I_d と呼ぶ)はそのままカメラに到達するが、 反射した光線の一部は再び入射光側ハーフミラーで反射してから射出光側ハーフミラーを 透過してカメラに到達する(内部反射像 I_i と呼ぶ).このため、両面ハーフミラー板の透過 像も、位置ずれがある2重像となる.

この2重像間の位置ずれは,対象までの距離に応じて変化する.対象までの距離を求めるためには,リフレクションステレオの外部パラメータに相当する,透明板や両面ハーフミラー板の形状や表面位置,屈折率が必要である.

本論文では,リフレクションステレオにおけるキャリブレーション手法を提案する.提案 手法では,透明板や両面ハーフミラー板を,その両表面を局所的に平面と見なした非平行平 面板で近似する.距離が既知の複数の平面を撮影して,画像上の注目位置に対して2重像間 変位を複数計測することで,リフレクションステレオの外部パラメータを推定する.このよ

^{†1} 東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻 Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

うなキャリブレーションを行うと,計測した距離の絶対精度が向上するだけでなく,2重像 間変位を求めるときに利用する拘束が正確になるので、たとえば正対する平面までの距離を 計測したときのばらつきが小さくなる.

提案手法は,透明物体の形状*1や屈折率を推定する手法と考えることもできる,透明物体 の形状と屈折率を推定する手法には、透明物体の移動によって変化するオプティカルフロー を利用する手法⁹⁾,透明物体の背後の構造化照明から屈折した光線を追跡する手法⁷⁾などが あるが,どちらの手法も直接像だけを利用している.これに対して提案手法では,直接像と 内部反射像との間の像間変位を利用する.

シーン中に透明物体や反射物体があるときに、その物体表面形状(条件によっては表面) 形状と同時に屈折率)が推定できるための一般化条件⁵⁾も詳細に検討されている.この手 法では,物体表面形状は任意であるが物体表面で光線が100%透過または反射することを前 提に、参照点(透明物体背後の点)からカメラまで1本の光線だけを考慮している.また、 光線経路上の屈折または反射点の個数は、物体表面までの距離を推定するために利用する 複数の光線間で同一と仮定している、このため、反射回数が異なる直接像と内部反射像の2 つの経路を利用するリフレクションステレオの構成は,この一般化条件の中に含まれない.

透明物体の形状計測のために,透明物体を反射・透過する光線の偏光を利用する手法⁸⁾も 提案されている、この手法では、透明物体表面での反射と透過を考慮して偏光状態と光線の 追跡を行い、観測した偏光状態と計算した偏光状態が等しくなるように表面形状を推定す る.これに対して提案するリフレクションステレオのキャリブレーションでは,複数の既知 の距離にある平面を2重像として撮影し,撮影した2重像間の位置ずれが光線追跡によっ て計算した2 重像間の位置ずれと一致するように,透明板や両面ハーフミラー板の形状な どを推定する、

偏光を利用した,透明物体(ガラス板)の透過光と反射光の分離手法¹²⁾も提案されてい る.この手法では,観測した偏光状態に基づいて画像を分離するが,偏光状態は透明物体の 姿勢(ガラス板の傾斜角度)に依存するため,この姿勢を推定するために分離した画像間の 相互情報量を用いる、ガラス板の内部反射も考慮しているが、直接像と内部反射像との間の 位置ずれは無視している.これに対してリフレクションステレオでは,この位置ずれを積極 的に利用している.

本論文は,以下のように構成する.2章では,両面が平面で完全平行な透明板や両面ハー

*1 局所的に平面で近似できるような板状で,かつほぼ平行板と仮定している.

フミラー板で構成するリフレクションステレオによる距離計測原理を説明する.3章では, うねりのある透明板や両面ハーフミラー板を局所的に平面で近似し、光線追跡法を使った距 離算出方法を述べる.4章では,外部パラメータのキャリブレーション方法を述べる.また, 距離計測に必要なパラメータの表現方法を示す、5章では、実画像を使ったキャリブレーショ ン実験を行い、提案手法の有効性を示す。

2. リフレクションステレオの原理

本章では,両面が平面で平行な透明板や両面ハーフミラー板を使って,既提案のリフレク ションステレオ^{15),16)}の原理を簡単に説明する.透明板や両面ハーフミラー板の反射像や透 過像が2重像になること,2重像間変位が対象の距離によって変化すること,2重像間変位 には拘束があることを述べる.

なお,本章では視線に沿った対象までの距離を考える.反射型の場合には透明板表面で視 線が反射するが,反射した視線に沿った対象までの距離を考える.透過型の場合には,視線 が両面ハーフミラー板で屈折するため、光学中心から両面ハーフミラー板までの視線の方向 に沿った対象までの距離を考える.

2.1 反射型リフレクションステレオ

図1 に示すように,透明板の反射像を利用した構成を反射型と呼ぶ,同図において,表面 反射像 I_s と裏面反射像 I_r との間の角度視差 θ_s は,空気に対する透明板の相対屈折率 n と 厚さ d,表面反射像の入射角 θ_i ,および透明板から対象までの距離 D_o によって変化する. 対象とレンズ光学中心,および透明板の法線ベクトルを通る平面(入射面)上での光線を考 えることで、像間の角度視差と対象までの距離の基本的な関係を説明する、この平面は透明 板の法線ベクトルを含むので,対象から来る光線の反射や屈折は,この平面上で記述するこ



とができる.

対象からの光線が透明板上で反射する位置を原点とする座標系 (ξ, v) を設定する. 対象位置を $(-D_o \sin \theta_i, D_o \cos \theta_i)$, 光学中心位置を $(D_c \sin \theta_i, D_c \cos \theta_i)$ とする. 表面反射と裏面 反射の経路を ξ 軸に投影すると長さが等しくなることから,次式を得る.

$$D_o + D_c = \frac{d\sin\left(2\left(\theta_i - \theta_s\right)\right)}{\sin\theta_s \sqrt{n^2 - \sin^2\left(\theta_i - \theta_s\right)}} \tag{1}$$

2 重像を撮影した画像上で 2 重像間の対応位置を計測すれば角度視差 θ_s を求めることができ,画像上の位置に対応して視線に沿った対象までの距離 $D_o + D_c$ を得ることができる. 2 重像は,ある拘束直線上を変位するために,エピポーラ拘束を利用するステレオビジョンと同様に,1次元の探索を行えばよい.また,視線に沿った対象までの距離 $D_o + D_c$ が無限大のときには $\theta_s = 0$ となり,表面反射像 I_s と裏面反射像 I_r は完全に一致する.

2.2 透過型リフレクションステレオ

図2に示すように,両面ハーフミラー板の透過像を利用した構成を透過型と呼ぶ.同図において,直接像 *I*_d と第1次内部反射像 *I*_{i1} との間の角度視差 θ_s は,反射型と同様に,両面ハーフミラー板の相対屈折率 n と厚さ d,直接像の入射角度 θ_i,および両面ハーフミラー 板から対象までの距離 *D*_oによって変化する.反射型と同様に,入射面上での光線を考える ことで,角度視差と対象までの距離の基本的な関係を説明する.直接像の射出位置を原点



Fig. 2 Basic geometry of the transmission-type configuration.

とする座標系 (ξ, v) を設定し,光学中心の位置を $(D_c \sin \theta_i, D_c \cos \theta_i)$ とする.視線方向に 沿った対象までの距離 $D_o + D_i + D_c$ は,直接像と第1次内部反射像の経路を ξ 軸に投影 すると長さが等しくなることから,次式で表すことができる.

$$D_{o} + D_{i} + D_{c} = d \left(\cos \theta_{i} + \frac{\sin^{2} \theta_{i}}{\sqrt{n^{2} - \sin^{2} \theta_{i}}} \right) + \frac{3 \sin(\theta_{i} - \theta_{s})}{\sqrt{n^{2} - \sin^{2}(\theta_{i} - \theta_{s})}} - \frac{\sin \theta_{i}}{\sqrt{n^{2} - \sin^{2} \theta_{i}}} \frac{1}{\sqrt{n^{2} - \sin^{2} \theta_{i}}} \frac{1}{\cos(\theta_{i} - \theta_{s})}$$
(2)

2.3 対象までの距離

2 重像間変位から対象までの距離を求めるためには,レンズ焦点距離 f/δ のほかに,ステレオビジョンにおける外部パラメータに相当する次のようなパラメータが必要である.ただし,既存手法で推定したカメラ内部パラメータを使って,撮影した画像からレンズ歪曲収差と画像中心位置は補正されているとする.

- 透明板や両面ハーフミラー板の法線ベクトル n_m
- 光学中心から透明板や両面ハーフミラー板までの光軸に沿った距離 Dco
- 透明板や両面ハーフミラー板の板厚 d
- 透明板や両面ハーフミラー板の相対屈折率 n

これら 5 個のパラメータを使えば,次のように 2 重像間変位から対象までの距離を求めることができる.

図 3 に示すように,レンズ光学中心を原点とするカメラ座標系を設定する.両面ハーフ ミラー板の法線ベクトルを $\mathbf{n}_m = [n_1, n_2, 1]^\top$, CCD の画素間隔を単位とするレンズ焦点距 離(原点と画像面との距離)を f/δ とする.画像面上の点 $A(\mathbf{a}) = [a_1, a_2, f/\delta]^\top$ に対応す る 2 重像の位置を,単位方向ベクトル $\mathbf{e}(\mathbf{a}) = \frac{\mathbf{c} - \mathbf{a}}{\|\mathbf{c} - \mathbf{a}\|}$ の拘束直線上で探索した結果,点 Aからの変位 $\mathbf{s} = \mathbf{e}(\mathbf{a})\Delta$ の位置に見つかったとする.ただし, $\mathbf{c} = (f/\delta)\mathbf{n}_m$ は,拘束直線 の交点位置を表す.また, Δ は点 Aから拘束直線に沿った距離[画素]を表す.このとき, 図 1 と図 2 における 2 重像間の角度視差 θ_s は,次のように求めることができる.

$$\theta_s = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{a} \cdot (\mathbf{a} + \mathbf{s})}{\|\mathbf{a}\| \|\mathbf{a} + \mathbf{s}\|} \right) \tag{3}$$

点 A に対する透明板や両面ハーフミラー板への入射角度 θ_i (図 1 と図 2 を参照)は,次



図3 拘束平面と拘束直線 Fig.3 Constraint line on the image plane.

のように求めることができる.

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{n}_m}{\|\mathbf{a}\| \|\mathbf{n}_m\|} \right) \tag{4}$$

式 (3) と式 (4) を式 (1) や式 (2) に用いることで,2 重像間変位から対象までの距離を求 めることができる.

2 重像は,位置ずれのあるほぼ同じ画像(信号)が重なったものと考えることができる. このような信号の自己相関関数は,原点における極大のほかに,信号間の位置ずれに対応 した位置でも極大を持つ.したがって,撮影した画像にエッジや特徴点がなくても何らかの パターンがあれば,自己相関関数の2次極大位置からこの位置ずれを求めることができる. また,透過型の場合には2 重像間で明るさが異なるため,2次極大位置付近の特徴なども利 用して変位を検出する¹⁷⁾.

3. うねりのある透明板や両面ハーフミラー板

透明板や両面ハーフミラー板(以後,まとめて「反射板」と呼ぶことにする)として利用 する透明アクリル板やガラス板の表面には「うねり」が存在する.つまり,反射板表面は平 面ではなく,両表面は平行でもない.

本章では,まず,反射板の分割平面モデルを示す.分割平面モデルでは,画像上の注目点 付近で,反射板を非平行度を持つ平面板で近似する.次に,非平行度を持つ反射板を使った リフレクションステレオにおける,光線追跡法を用いた対象までの距離算出方法を示す.つ まり,ある注目点について,反射板の外部パラメータが分かっていて,2重像間の位置ずれ



が計測できれば,対象までの距離をこれらの関数として求めることができることを示す. 3.1 分割平面モデル

図4 に示すように,画像上の注目点 a 付近に対応する反射板を,非平行度を持つ平面板 で近似する.すなわち,ある注目点に対応する2重像を形成するために必要な反射板上の領 域は,その注目点と同じ外部パラメータで表現できると仮定する.この外部パラメータに は,2.3 節で示した外部パラメータと比較して,次のように反射板の両表面に対してそれぞ れ法線ベクトルがある.

- 反射板の両表面に対する法線ベクトル n_R と n_S
- 光学中心から反射板までの光軸に沿った距離 Dco
- 反射板の板厚 d
- 反射板の相対屈折率 n

これら 7 個の外部パラメータは,注目点 a に応じて異なる値 $\mathbf{b}(\mathbf{a}) = \{\mathbf{n}_R(\mathbf{a}), \mathbf{n}_S(\mathbf{a}), Dco(\mathbf{a}), d(\mathbf{a}), n(\mathbf{a})\}$ を持つ.

注目点付近で反射板を平面板で近似することは,うねりを持つ反射板表面形状を 1 次近 似することに相当する.実験に使用した透過型装置構成 (5.1 節で述べる)では,画像全体 を反射板に投影したときに約 45 × 40 [mm] である.画像サイズが 640 × 480 [画素],注目 領域サイズが 20 × 20 [画素],2 重像間変位が 10 [画素] のとき,2 重像を形成するために必 要な領域は約 1.4×2.5 [mm] である.市販の透明アクリル板やガラス板でも,このような 小さな面積に対してならば,表面形状を 1 次近似できると考えられる.

3.2 光線追跡法

非平行度を持つ反射板を使うときには,2章で示したような解析的な距離計算は困難になる.そこで,光線追跡法を利用して,注目点に対応する視線と,2重像上で注目点に対応す る位置に対応する視線をそれぞれ求め,この2直線の交点位置までの距離を対象までの距離



Fig. 5 A ray and a normal vector of the plate.

とする.本節では,次節で述べる距離算出の準備として,光線追跡法の計算方法を述べる. 光線追跡法¹³⁾では,次の3種類の計算要素を使うことで,光学中心に向かってくる光線 がたどってきた経路を追跡できる.

(1) 光線と平面との交点: 図 5 に示すように, 点 $P(\mathbf{p})$ を通る方向ベクトル v の向きの直線と, 点 $M(\mathbf{m})$ を含む単位法線ベクトル $\hat{\mathbf{n}}$ の平面との交点 $Q(\mathbf{q})$ は, 次のように表すことができる.

$$\mathbf{q}(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{m}, \hat{\mathbf{n}}) = \mathbf{p} + \mathbf{v} \frac{(\mathbf{m} - \mathbf{p}) \cdot \hat{\mathbf{n}}}{\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{n}}}$$
(5)

(2) 平面での正反射ベクトル: 単位法線ベクトル n の面に入射した方向ベクトル v の 正反射方向ベクトル r は,次のように表すことができる.

 $\mathbf{r}(\mathbf{v}, \hat{\mathbf{n}}) = \mathbf{v} - 2\hat{\mathbf{n}} \|\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{n}}\|$ (6)

(3) 平面での屈折ベクトル: 単位法線ベクトル n の面に入射した方向ベクトル v に対する,相対屈折率 n の物質内部への屈折方向ベクトル t は,次のように表すことができる.

$$\mathbf{t}(\mathbf{v}, \hat{\mathbf{n}}, n) = k_f \left(\frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{n}}\|} - \hat{\mathbf{n}} \right) + \hat{\mathbf{n}}$$

$$k_f = \frac{1}{\sqrt{n^2 \left\| \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{n}}\|} \right\|^2 - \left\| \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{n}}\|} - \hat{\mathbf{n}} \right\|^2}}$$
(7)

k_f < 1 のときには,空気からガラスに入射して屈折するような状況を表している.

3.3 対象までの距離

注目点に対する外部パラメータ b(a) が得られていて 2 重像間変位が求まれば,光線追跡 法を使って次のように対象までの距離を求めることができる.

3.3.1 反射型の場合

図 6(a)に示すように,画像面上の位置 a に表面反射像として撮影された対象は, t_S を





媒介変数とする次の直線 L_S 上に存在する.

$$\mathbf{L}_{S}(t_{S}) = \mathbf{q}_{S} + \mathbf{v}_{S}t_{S}$$

$$\mathbf{q}_{S} = \mathbf{q}(\mathbf{o}, \mathbf{a}, \mathbf{m}_{S}, \mathbf{\hat{n}}_{S})$$

$$\mathbf{v}_{S} = \mathbf{r}(\mathbf{a}, \mathbf{\hat{n}}_{S})$$
(8)

ただし, $M_S(\mathbf{m}_S) \ge \hat{\mathbf{n}}_S \mathbf{i}$, それぞれ透明板表面上の点の位置と表面の単位法線ベクトル, $O(\mathbf{o})$ は原点である.この \mathbf{m}_S は,反射板の外部パラメータ $\mathbf{b}(\mathbf{a})$ に含まれる $Dco(\mathbf{a})$ を使っ て $\mathbf{m}_S = [0, 0, Dco(\mathbf{a})]^{\top}$ と表せる.

同じ対象が,図6(b)に示すように,位置aに対して変dsに検出できたとき,この裏面 反射像として撮影された対象は, t_R を媒介変数とする次の直線 L_R 上に存在する.

$$\mathbf{L}_{R}(t_{R}) = \mathbf{q}_{R} + \mathbf{v}_{R}t_{R}$$

$$\mathbf{q}_{R} = \mathbf{q}(\mathbf{q}_{1}, \mathbf{v}_{1}, \mathbf{m}_{S}, \hat{\mathbf{n}}_{S})$$

$$\mathbf{v}_{R} = \mathbf{t}(\mathbf{v}_{1}, -\hat{\mathbf{n}}_{S}, 1/n)$$

$$\mathbf{q}_{1} = \mathbf{q}(\mathbf{q}_{0}, \mathbf{v}_{0}, \mathbf{m}_{R}, \hat{\mathbf{n}}_{R})$$

$$\mathbf{v}_{1} = \mathbf{r}(\mathbf{v}_{0}, \hat{\mathbf{n}}_{R})$$

$$\mathbf{q}_{0} = \mathbf{q}(\mathbf{o}, \mathbf{a} + \mathbf{s}, \mathbf{m}_{S}, \hat{\mathbf{n}}_{S})$$

$$\mathbf{v}_{0} = \mathbf{t}(\mathbf{a} + \mathbf{s}, \hat{\mathbf{n}}_{S}, n)$$
(9)

ただし, $M_e(\mathbf{m}_R)$ と $\hat{\mathbf{n}}_R$ は, それぞれ透明板裏面上の点の位置と裏面の単位法線ベクトルである. この \mathbf{m}_R は, 反射板の外部パラメータ $\mathbf{b}(\mathbf{a})$ に含まれる $d(\mathbf{a})$ を使って $\mathbf{m}_R = \mathbf{m}_S + \hat{\mathbf{n}}_S d(\mathbf{a})$ と表せる.

直線 \mathbf{L}_S と直線 \mathbf{L}_R との交点位置 (実際には,次式のように2直線までの距離の2乗和 が最小になる位置)が対象の位置 $P_O(\hat{\mathbf{p}}_O)$ である.

$$\hat{\mathbf{p}}_{O} = \frac{1}{2} \left[(\mathbf{q}_{S} + \mathbf{v}_{S} t_{S}) + (\mathbf{q}_{R} + \mathbf{v}_{R} t_{R}) \right]$$

$$\begin{bmatrix} t_{S} \\ t_{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{S} \cdot \mathbf{v}_{S} & -\mathbf{q}_{S} \cdot \mathbf{v}_{R} \\ \mathbf{q}_{R} \cdot \mathbf{v}_{S} & -\mathbf{q}_{R} \cdot \mathbf{v}_{R} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{S} \cdot \mathbf{q}_{R} - \|\mathbf{q}_{S}\|^{2} \\ \|\mathbf{q}_{R}\|^{2} - \mathbf{q}_{S} \cdot \mathbf{q}_{R} \end{bmatrix}$$
(10)

3.3.2 透過型の場合

図 7 (a) に示すように,画像面上の位置 a の直接像に対応する対象は, t_D を媒介変数と する次の直線 L_D 上に存在する.

$$\mathbf{L}_{D}(t_{D}) = \mathbf{q}_{D} + \mathbf{v}_{D}t_{D}$$

$$\mathbf{q}_{D} = \mathbf{q}(\mathbf{q}(\mathbf{o}, \mathbf{a}, \mathbf{m}_{e}, \mathbf{\hat{n}}_{e}), \mathbf{t}(\mathbf{a}, \mathbf{\hat{n}}_{e}, n), \mathbf{m}_{i}, \mathbf{\hat{n}}_{i})$$

$$\mathbf{v}_{D} = \mathbf{t}(\mathbf{t}(\mathbf{a}, \mathbf{\hat{n}}_{e}, n), \mathbf{\hat{n}}_{i}, 1/n)$$
(11)

ただし, $M_i(\mathbf{m}_e)$ と $M_e(\mathbf{m}_i)$ は両面ハーフミラー板の射出光側と入射光側の表面上の点の 位置, $\hat{\mathbf{n}}_e$ と $\hat{\mathbf{n}}_i$ は両面ハーフミラー板の射出光側と入射光側の表面の単位法線ベクトルであ る.この \mathbf{m}_e と \mathbf{m}_i は,それぞれ $\mathbf{m}_e = [0, 0, Dco(\mathbf{a})]^{\top}$, $\mathbf{m}_i = \mathbf{m}_e + \hat{\mathbf{n}}_e d(\mathbf{a})$ と表せる.

この直接像に対応する内部反射像が,図7(b)に示すように,位置 a に対する変位 s に検出できたとき,この内部反射像に対応する対象は, t_{I1} を媒介変数とする次の直線 L_{I1} 上に存在する.

$$\hat{\mathbf{p}}_{O} = \frac{1}{2} \left[(\mathbf{q}_{D} + \mathbf{v}_{D}t_{D}) + (\mathbf{q}_{I1} + \mathbf{v}_{I1}t_{I1}) \right]$$

$$\begin{bmatrix} t_{D} \\ t_{I1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{D} \cdot \mathbf{v}_{D} & -\mathbf{q}_{D} \cdot \mathbf{v}_{I1} \\ \mathbf{q}_{I1} \cdot \mathbf{v}_{D} & -\mathbf{q}_{I1} \cdot \mathbf{v}_{I1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{D} \cdot \mathbf{q}_{I1} - \|\mathbf{q}_{D}\|^{2} \\ \|\mathbf{q}_{I1}\|^{2} - \mathbf{q}_{D} \cdot \mathbf{q}_{I1} \end{bmatrix}$$
(13)





それぞれの型の場合において,式 (10) と式 (13) はカメラ座標系での対象の 3 次元座標 を表している.反射型の場合にはこの Y 座標 $\hat{\mathbf{p}}_{Oy}$ を,透過型の場合にはこの Z 座標 $\hat{\mathbf{p}}_{Oz}$ を,それぞれ対象までの距離とする.

3.4 リフレクションステレオの拘束

前節の式 (9) と式 (12) における変位 s は , 2.3 節の図 3 に示した拘束とは異なり,反射 板が非平行であるために, s = s*(a) + e*(a) Δ の拘束がある.ただし, s*(a) は位置 a に おける対象までの距離が無限のときの変位, e*(a) は拘束直線の単位方向ベクトルを表す. また, Δ は位置 a + s*(a) から拘束直線に沿った距離 [画素] を表す.この s*(a) と, e*(a) は, 次のように外部パラメータから求める.

透過型の場合には,ある注目点について,外部パラメータ b(a) と 2 重像間変位 s から, 対象までの距離 \hat{p}_{Oz} (a,s|b(a))を求めることができる.逆に,距離 p_{Oz} に対する 2 重像間 変位 s は,1 パラメータ最適化問題として求めることができる.距離 p_{Oz} を次第に大きく して,それに対する 2 重像間変位 s の変化が十分小さくなったときの変位を,無限遠距離に 対応する 2 重像間変位 s*(a)とする.また,複数の距離に対応する 2 重像間変位から,拘 束直線の単位方向ベクトル e*(a)を求める.反射型の場合には,対象までの距離として対象 の 3 次元座標の Y 座標を用いる.

外部パラメータは,次章で説明するキャリブレーション手法で求める.

4. キャリブレーション

4.1 外部パラメータ推定方法

外部パラメータを推定するために,平面までの既知の距離と,この平面をリフレクション ステレオで観測したときの2重像における像間変位を利用する.平面までの距離 D は,反 射型の構成ではレンズ光学中心から平面までのY 軸に沿った距離,透過型の構成では Z 軸

に沿った距離となる.ここでは,透過型の構成で説明する.

画像上のある注目点位置 a について,平面までの距離 D_z とそれに対応する 2 重像間変 位 s が M 組求まれば,一般的なカメラキャリプレーション手法¹⁴⁾ と同様に,次のように 外部パラメータを推定できる.

$$\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{a}) = \underset{\mathbf{b}(\mathbf{a})}{\arg\min} E(\mathbf{a})$$

$$E(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^{M} \|D_{zi} - \hat{\mathbf{p}}_{Oz} (\mathbf{a}, \mathbf{s}_i | \mathbf{b}(\mathbf{a}))\|^2 + \alpha \|\tilde{\mathbf{b}} - \mathbf{b}(\mathbf{a})\|^2$$
(14)

目的関数 $E(\mathbf{a})$ の第 2 項は,推定する外部パラメータがその設計値 $\tilde{\mathbf{b}}$ から遠く外れない ようにするための安定化項である.重み係数 α は,できるだけ小さな値に実験的に決定す る^{*1}.この非線形目的関数の最小化には,外部パラメータの設計値を初期値として共役勾配 法を利用した.

2 重像間変位 s は,撮影する対象に十分な密度の適切なテクスチャがあれば,拘束をまったく利用せずに,正規化自己相関関数の 2 次極大位置として計測できる.この変位 s は 2 自由度なので,7 個の外部パラメータを推定するためには, $M \ge 4$ 組の観測が必要である.

4.2 外部パラメータの表現

市販のアクリル板やガラス板は平行平面板として設計されているため,注目点位置が変化しても,リフレクションステレオの外部パラメータの変化は微小で,また位置の変化に対して連続と考えられる.このような連続的な変化を考慮すると,画像上の特定の位置に対して推定した外部パラメータをそのまま保持するのは効率が低い.そこで,次のように画像位置 $\mathbf{u} = (u, v)$ に対する 2 次元 3 次関数で近似する^{*2}.

 $\mathbf{\bar{b}}(\mathbf{u}) = \Phi_1 + \Phi_2 u + \Phi_3 v + \Phi_4 uv + \Phi_5 u^2 + \Phi_6 v^2 + \Phi_7 u^2 v + \Phi_8 uv^2 + \Phi_9 u^3 + \Phi_{10} v^3$ (15)

ただし, Φ_j (j = 1, 2, ..., 10) は7個の外部パラメータに対応した7要素の係数ベクトルである.これらの係数ベクトルは,多数の画像上位置 \mathbf{a}_l に対して推定した外部パラメータ $\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{a}_l)$ を使って,次のように重み付き最小二乗法で求める.

$$\Phi_{j} = \underset{\Phi_{j}}{\operatorname{arg\,min}} \sum_{l} \frac{1}{\min E(\mathbf{a}_{l})} \left\| \bar{\mathbf{b}}(\mathbf{a}_{l}) - \hat{\mathbf{b}}(\mathbf{a}_{l}) \right\|^{2}$$
(16)

式 (14) で外部パラメータを推定したときの残差 min*E*(a) の逆数を重みとすることで,残 差の大きな位置のキャリブレーション結果の影響を小さくする.

なお,無限遠距離に対応する2重像間変位と拘束直線の単位方向ベクトルは,推定した外部パラメータを使って3.4節で述べた方法であらかじめ計算しておく.計算結果は同様に, 画像位置に対する2次元3次関数で近似し,距離計算では近似関数の係数ベクトルを利用 する.

4.3 従来のキャリブレーション方法との比較

従来のキャリブレーション方法¹⁵⁾ では,画像上の位置に対して不変な7個の外部パラメータを利用していた.画像中央部分から反射板の両表面の法線ベクトルの差 $\mathbf{n}_R - \mathbf{n}_S$ (反射型の場合:透過型の場合には $\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_e$)を推定し,両表面の法線ベクトルの平均,およびDco, d,n は,設計値をそのまま利用していた.

無限遠距離に対応する2重像間変位は,画像中央部分から求めて反射板の両表面の法線 ベクトルの差を得るためにも利用した.拘束直線は画像面上の1点(ただし画像の外部)で 交差すると近似して,この交点位置を画像から求めていた.

これに対して提案するキャリプレーション方法では,画像上位置によって変化する外部パ ラメータを推定し,推定した外部パラメータから拘束を得ている.このため,距離推定精度 が向上するだけでなく,より正確な拘束を利用できるために2重像間変位の誤検出が減少す ることが期待できる.

5. 実験結果

従来のキャリブレーション方法に対して,提案するキャリブレーション方法の有効性を検討した.5.1から5.3節では透過型の装置構成を使い,5.4節では反射型の装置構成を使った.

5.1 透過型の装置構成

図 8 に示すように,両面ハーフミラー板をカメラ光軸に対して 45 [度] に固定して筐体に取 り付けた.ハーフミラーの反射率は,両表面ともに 75%である.カメラには,PointGray 社製 Flea(グレースケール VGA)を利用した.両面ハーフミラー板の設計値は, $D_{co} = 66.2$ [mm], d = 12.0 [mm],n = 1.49である.両面ハーフミラー板は,画像上で右上の厚みが約0.26 [mm] 大きくなるような細工をした.カメラを筐体に組み込む前に,公開されているキャリプレー ションツール¹⁾を利用してカメラ内部パラメータを求めた.CCD 画素間隔で測ったレンズ

^{*1} 外部バラメータの各要素は互いに影響しあっているため,ほとんどの場合,安定化項と適切な初期値を与えないと安定に収束しない.

^{*2} フーリエ級数展開することも考えられるが,たとえば反射板全体の厚さに関して,厚みを0次で,全体の非平行 度を1次でという表現は直感的で分かりやすい.実際には2次までの近似でほぼ表現でき,3次の係数はかなり 小さい.また,このような近似を行ったときの式(16)の残差は十分に小さいことを確認している.



図 8 透過型リフレクションステレオ装置構成 Fig. 8 Configuration of the experimental system.

焦点距離は $f/\delta = 1255.7$ である.同時に求まる歪曲収差パラメータを使って,画像から歪曲歪みを取り除いた.

5.2 キャリブレーション

図9 に示すように,撮影装置を平行移動ステージに取り付けて 50 [mm] 間隔で移動しな がら,レンズ光軸と直交する平面を撮影した.この平面には,正規化自己相関関数の2次極 大位置を検出しやすいように,十分な密度のランダムテクスチャを貼り付けた.図10 に, 正規化自己相関関数の例を示す.2次極大は原点を対称として2個現れるが,内部反射像の 変位方向は簡単な予備実験で知ることができるため,この中の一方の変位を2重像間変位 として利用した.

画像全体に対して 24×18(=432)カ所に 35×35[画素]の注目領域を設定し,2 重像間 変位を求めた.注目領域の数(432カ所)は,式(15)の 10 個のパラメータを重み付き最小 二乗法で求めるのに十分な数である.注目領域のサイズは,大きいほど安定に自己相関関 数の 2 次極大を検出できる.しかし,直接像に対して内部反射像はわずかに変形している ため,極端に大きな注目領域サイズはかえって 2 次極大値を小さくする.以上を考慮のう えで,注目領域サイズを実験的に決定した.テクスチャが偶然に少ないなどの原因で,設定 したすべての注目領域に対して 2 重像間変位が求まるとは限らない.このため,求まった 2 重像間変位の方向と大きさを周囲と比較し,誤りと判断された 2 重像間変位は使用せず,離 散的な位置で求まった 2 重像間変位を式(15)と同様に 2 次元 3 次関数で近似し,2 重像間 変位誤検出の影響を低減させた.

キャリブレーション平面までの距離は,約400 [mm]から約1000 [mm]まで,50 [mm]



図 9 キャリブレーションに利用した平行移動ステージ Fig.9 Setup of the calibration target.



図 10 2 重像に対する正規化自己相関関数の例 Fig. 10 Example of the autocorrelation function of the complex image.

ごとに大きくした.撮影装置を取り付けた平行移動ステージによって,キャリプレーション平面に対する距離の変化(50 [mm])は正確に制御できる.しかし,筐体に組み込んだ撮影レンズの光学中心位置を正確に知ることは困難なので,キャリプレーション平面に対する絶対距離を正確に知ることはできない.そこで,式(14)における平面までの距離 $D_{zi} \in D_{zi} = 400 + 50i + D_e [mm] (i = 0, 1, ..., 12) とおき, 3 通りの絶対距離の誤差 <math>D_e = 0, \pm 25 [mm]$ を仮定してそれぞれ外部パラメータ $\hat{\mathbf{b}}_{D_e}(\mathbf{a})$ を推定し,それぞれの推定での残差の総和 $E_d(D_e)$ を求めた.



Fig. 11 Estimated plate thickness and refraction index w.r.t. the image positions.

$$E_d(D_e) = \sum_l \sum_{i=0}^{12} \left\| (400 + 50i + D_e) - \hat{\mathbf{p}}_{Oz} \left(\mathbf{a}_l, \mathbf{s}_{i,l} | \hat{\mathbf{b}}_{D_e}(\mathbf{a}_l) \right) \right\|^2$$
(17)

このようにして求めた残差の総和 $E_d(-25)$, $E_d(0)$, $E_d(25)$ を 2 次関数にあてはめ, $E_d(D_e)$ を最小にする絶対距離の誤差 \hat{D}_e を次のように推定した.

$$\hat{D}_e = \frac{25}{2} \times \frac{E_d(-25) - E_d(25)}{E_d(-25) - 2E_d(0) + E_d(25)}$$
(18)

今回行った実験では, $\hat{D}_e = 14.4662 \, [\text{mm}]$ となった.この \hat{D}_e を使って, 外部パラメータ を再推定した.

図 11 に,両面ハーフミラー板の板厚分布と屈折率分布を示す.グラフ中の黒丸は画像 上の位置に対して推定したパラメータを,メッシュは式(15)による近似を示す.水平位置 -160[画素]付近で,推定したパラメータと近似の差が大きいのは,この付近で式(14)の残 差が大きく,式(16)の重み付き最小二乗法に対する影響が小さかったためである.式(14) の残差は,2 重像間変位推定における誤差によるものと考えられる.同図(a)の板厚分布に



図 12 平面までの距離計測結果の平均と標準調差と距離マック Fig. 12 Range estimation results for the calibration plane at known distances.

注目すると,右上部分の板厚が約0.25 [mm] 大きくなっており,意図的に変形した形状が正確に推定できている.

5.3 キャリブレーション平面までの距離計測

推定した外部パラメータを使って,キャリブレーションに利用した平面までの距離を再計 測した.

図 12 (a) と (b) に, 平面までの真の距離に対する計測結果の平均(印)と標準偏差(バー で示す)を, 同図 (c) と (d) に距離 700 [mm] に対する距離マップを示す.従来手法(同図 (a) と (c))では, 距離に応じた偏差があり, 標準偏差も大きい.これは, 拘束が不正確なた めに2重像間変位の誤検出が多いためである.これに対して,提案手法(同図 (b) と (d)) では, 偏差がなく, しかも標準偏差が小さくなっている.

5.4 反射型の装置構成によるキャリブレーションと形状計測

この実験では,反射型の構成で,表面に反射率50%のハーフミラー,裏面に反射率100%の ミラーを用いた反射板を利用した.コーティングのない透明板を利用するのに対して,反 射像が明るくなる特徴がある.反射板はカメラ光軸に対して45[度]に固定し,設計値は $D_{co} = 26.2 \text{ [mm]}, d = 12.0 \text{ [mm]}, n = 1.49$ である.使用したカメラと内部パラメータは,



Fig. 13 Estimated plate thickness and refraction index w.r.t. the image positions.

5.1 節と同じである.

図 13 に,キャリブレーションによって推定した反射板の板厚分布と屈折率分布を示す. 図 11 (a)の板厚分布と比較すると,変形がなく平坦である.図 11 と同様に,推定したパラ メータと近似の差が大きい部分がある.この部分は式 (14)の残差が大きく,式 (16)の重み 付き最小二乗法における重みが小さかったため,差が大きくなった.

図 14 (a) と (b) に, 平面までの真の距離に対する計測結果の平均(印)と標準偏差(バー で示す)を,同図 (c) と (d) に距離 700 [mm] に対する距離マップを示す.従来手法(同図 (a) と (c))では,図 12 と同様に,距離に応じた偏差があり,標準偏差も大きいが,提案手 法(同図 (b) と (d))では,偏差がなく,しかも標準偏差が小さくなっている.

図 15 に,形状計測結果を示す.同図 (a) は計測に用いたオブジェクト,同図 (b) は撮影 した 2 重像*¹である.同図 (c) と (d) に距離マップを,同図 (e) と (f) に鳥瞰図を示す.

*1 反射型の構成では,カメラが撮影する画像は上下反転する.この2 重像は,撮影装置全体を上下逆に三脚に取り 付けて撮影したものである.



図 14 平面までの距離計測結果の平均と標準偏差と距離マップ Fig. 14 Range estimation results for the calibration plane at known distances.

従来手法(同図(c)と(e))では、特に背景の形状が計測できていない.また、オブジェクトまでの距離の真値は不明だが、提案手法(同図(d)と(f))とは距離が異なっている.これに対して提案手法では、背景の形状も計測でき、背景までの距離(約1000[mm])と計測したオブジェクトまでの最短距離(約750[mm])との差から、真値(約25[cm])に近いオブジェクトの高さが計測できている.

6. ま と め

本論文では,リフレクションステレオの外部パラメータのキャリプレーション手法を提案 した.透明板や両面ハーフミラー板の形状などの外部パラメータを推定するために,複数の 既知の距離にある平面を2重像として撮影して利用した.提案したキャリプレーション手法 では,透明板や両面ハーフミラー板を非平行だが局所的に平面で近似した.推定する外部パ ラメータは,透明板や両面ハーフミラー板の表面形状や法線ベクトル,屈折率を表してい る.推定した外部パラメータを画像位置に対する2次元3次関数で表現したため,透明板 や両面ハーフミラー板の形状を3次曲面で表すことができた.実画像を使って実際にキャリ プレーションを行い,提案手法の有効性を確認した.



Fig. 15 Object shape measurement results with conventional and proposed calibration methods.

今後の課題として,多重反射像を使った多重像間変位の高精度推定,任意形状の透明板や 両面ハーフミラー板への対応,テクスチャの復元などがあげられる.

謝辞 本研究の一部は,科研費(19300057)の助成を受けて行われたものです.ここに, 感謝の意を表します.

参考文献

- 1) Bouguet, J.-Y.: Camera Calibration Toolbox for Matlab (Feb. 2007). http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html
- Gao, C. and Ahuja, N.: A Refractive Camera for Acquiring Stereo and Superresolution Images, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, New York City, New York, pp.2316–2323 (June 2006).

- 3) Gluckman, J.M. and Nayar, S.K.: Catadioptric Stereo using Planar Mirrors, *International Journal on Computer Vision*, Vol.44, No.1, pp.65–79 (2001).
- Hiura, S. and Matsuyama, T.: Depth Measurement by the Multi-Focus Camera, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.953–959 (June 1998).
- 5) Kutulakos, K.N. and Steger, E.: A Theory of Refractive and Specular 3D Shape by Light-Path Triangulation, *Proc. International Conference on Computer Vision*, Beijing, China, Vol.2, pp.1448–1455 (2005).
- 6) Lee, D.-H. and Kweon, I.-S.: A Novel Stereo Camera System by a Biprism, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.16, No.5, pp.528–541 (2000).
- Manabe, Y., Tsujita, M. and Chihara, K.: Measurement of Shape and Refractive Index of Transparent Object, *Proc. International Conference on Pattern Recogni*tion, Cambridge, UK, Vol.2, pp.23–26 (2004).
- Miyazaki, D., Ikeuchi, K.: Shape Estimation of Transparent Objects by Using Inverse Polarization Ray Tracing, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.29, No.11, pp.2018–2030 (2007).
- 9) Murase, H.: Surface Shape Reconstruction of a Nonrigid Transport Object using Refraction and Motion, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.10, pp.1045–1052 (1992).
- Nishimoto, Y. and Shirai, Y.: A Feature-Based Stereo Model using Small Disparities, Proc. IEEE International Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence, Seiken Symposium, Tokyo, pp.192–196 (Feb. 1987).
- Pachidis, T.P. and Lygouras, J.N.: Pseudo-Stereo Vision System: A Detailed Study, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.42, No.2, pp.135–167 (2005).
- 12) Schechner, Y.Y., Shamir, J. and Kiryati, N.: Polarization and statistical analysis of scenes containing a semireflector, *Journal of Optical Society of America*, A, Vol.17, No.2, pp.276–284 (2000).
- Whitted, T.: An Improved Illumination Model for Shaded Display, Comm. ACM, Vol.23, No.6, pp.343–349 (1980).
- 14) Zhang, Z.: Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations, *Proc. International Conference on Computer Vision*, Kerkyra, Greece, Vol.1, pp.666–673 (1999).
- 15) 清水雅夫, 奥富正敏: 透明板に映る2重像を用いた1台のカメラによる距離計測手法, 情報処理学会論文誌:コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.47, No.SIG10 (CVIM15), pp.131-142 (2006).
- 16) 清水雅夫, 奥富正敏:両面ハーフミラー板透過画像を用いた1台のカメラによる距離計 測,第9回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2006)講演論文集,仙台, pp.788-793 (July 2006).
- 17) 清水雅夫, 奥富正敏: 透過型リフレクションステレオ 両面ハーフミラー板透過像

を使った単眼距離計測,第13回画像センシングシンポジウム(SSII2007)講演論文集, 横浜, pp.IN1-10-1-8 (June 2007).

> (平成 19 年 9 月 21 日受付) (平成 20 年 3 月 10 日採録)

(担当編集委員 向川 康博)



清水 雅夫(正会員)

1982年東京工業大学工学部制御工学科卒業.1984年同大学大学院理工 学研究科制御工学専攻修士課程修了.同年キヤノン(株)入社.1989年 (株)応用計測研究所入社.2003年東京工業大学大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻社会人博士課程修了.2003年同大学院理工学研究科機械 制御システム専攻助手(2007年より助教).コンピュータビジョン,画像

計測,画像処理の研究に従事.博士(工学).計測自動制御学会,電子情報通信学会,映像 情報メディア学会,IEEE,SPIE 各会員.



奥富正敏(正会員)

1981年東京大学工学部計数工学科卒業.1983年東京工業大学大学院理工 学研究科制御工学専攻修士課程修了.同年キヤノン(株)入社.1987~1990 年カーネギーメロン大学コンピュータサイエンス学科客員研究員.1994年 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻助教授.2002年同 大学院理工学研究科機械制御システム専攻教授.コンピュータビジョン,

画像処理,画像計測に関する研究に従事.博士(工学).計測自動制御学会,電子情報通信 学会,画像電子学会,IEEE 各会員.