

## 未校正 2 重反射画像からの 3 次元計測

藤原将展<sup>†1</sup> 清水雅夫<sup>†2</sup> 奥富正敏<sup>†2</sup>

本論文では、カメラとの位置関係が未校正である透明板に映る 2 重反射像を撮影した画像 1 枚から、距離計測を行う手法を提案する。透明板に映る 2 重反射像の重像間変位は、オブジェクトまでの距離、透明板のカメラに対する位置や姿勢に応じて変化する。したがって、透明板の位置や姿勢のパラメータが既知であり、重像間変位が計測できれば距離計測が可能となる。重像間変位は、注目点に対する対応点を表し、2 次元的な探索を行うことにより計測できる。提案手法では、対応点と拘束直線との距離の和をコスト関数として最小化することにより、距離計算に必要なパラメータを推定する。そして、推定したパラメータより得られる拘束直線上で対応点の再探索を行い、最後に距離計算を行う。本論文では、提案手法をシュミレーション実験や実画像実験に対し適用し、実際に距離計測が可能であることを示す。

### Range Estimation Using Uncalibrated Double Layered Image

MASANOBU FUJIWARA,<sup>†1</sup> MASAO SHIMIZU<sup>†2</sup>  
and MASATOSHI OKUTOMI<sup>†2</sup>

This paper proposes a range estimation method using a double layered image reflected by a transparent plate whose surface normals for camera is uncalibrated. The displacement in the layered image varies depending on the distance to the object; it also depends on the position and orientation of the plate for the camera. Therefore, the range is obtainable if the position and orientation are known. In this paper, the two surface normals of the plate are obtained by minimizing the sum of distances between corresponding point and the constraint line in a single double layered image. The constraint line determined by the estimated normals allows the one dimensional search of the corresponding point. The range estimation is then possible with these parameters using a single double layered image. Experimental results using both synthetic and real images demonstrate the proposed method.

### 1. はじめに

画像処理におけるコストは、使用するカメラ台数が多くなるほど大きくなる。このときのコストは、カメラやレンズだけでなく、画像のキャプチャや画像処理で必要となるメモリや計算量としても必要となる。そこで、これらのコストを抑えるために、1 台のカメラによってステレオ 3 次元計測を行う手法が、これまで数多く提案されてきた。

その手法は、大きく分けて 3 つの手法に分類することができる。ミラーやプリズムを利用し、視野を分割して複数視点から撮影した画像を 1 枚の画像に映し込む画像分割法<sup>(4)(6)</sup>。レンズ前面の光学部材を動かすことによりカメラの位置を等価的に移動させながら複数枚の画像を撮影する複数露出法<sup>(7)(3)</sup>。レンズ開口や符号化開口を利用し、異なる視点の光線を 1 枚の画像に撮影する複数露出法<sup>(1)(5)</sup>である。

複数露出法に分類される手法として、透明板の表面反射像と裏面反射像を利用する手法であるリフレクションステレオも提案されている<sup>(10)</sup>。

透明板に映る像は、表面での反射と裏面での反射により、視差をもつ 2 重反射像として観測される。リフレクションステレオは、透明板の表面反射光と裏面反射光との視差が、オブジェクトまでの距離に応じて変化するを利用したステレオ距離計測装置であり、1 台のカメラと透明板で、シンプルに構成できる。リフレクションステレオで距離計測を行うには、この視差とカメラの内部パラメータのほかに、透明板の厚さや位置、姿勢といった、ステレオビジョンにおける外部パラメータに相当するパラメータが適切にキャリブレーションされていることが必要であるため、この距離計測手法では、カメラと透明板を固定したものを 1 組として、キャリブレーションおよび撮影を行う。しかし、この手法では、窓ガラスや鏡に映っているような未校正の 2 重像からの距離計測には適用することができない。

本論文では、透明板とカメラの位置関係の事前のキャリブレーションを行わずに、2 重反射像画像 1 枚から距離計測を行う手法を提案する。これにより、2 台以上のカメラを用いるよりもコスト的に優位である単眼ステレオが、非常に容易に実現される。2 重反射像において、表面反射光と裏面反射光の視差は、画像中の注目領域内に十分なテクスチャが存在すれば、拘束を用いなくても探索が可能である<sup>(12)</sup>。本論文では、2 次元的な探索により得られ

<sup>†1</sup> 東京工業大学工学部制御システム工学科

Department of Control and Systems Engineering Tokyo Institute of technology

<sup>†2</sup> 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

た対応点マップと、拘束直線の性質より、距離計測に必要なパラメータを推定する。また、推定されたパラメータより得られる拘束を用いて、1次元的な対応点の再探索を行うことにより、対応点マップを改善する。最後に、推定されたパラメータと、再探索された対応点マップを用いて距離計算を行う。

本論文の構成は以下の通りである。まず第2章では、2重反射像の性質と、距離計測原理について述べる。また、距離計測に必要なパラメータについても説明し、本論文で推定対象とするパラメータと、推定対象としないパラメータについて述べる。次に第3章で、距離計測に必要なパラメータの推定手法について述べる。第4章では、これまで述べた手法について、実験を通してその有効性を確かめる。最後に、第5章で本論文のまとめを行い、残った課題を考察する。

## 2. 2重反射像からの距離計測

### 2.1 2重反射像の観測

1台のカメラにより、透明板に映る像を撮影することを考える。オブジェクトから透明板へ向かう光線は、透明板表面での反射光（表面反射光  $I_s$  と呼ぶ）と、表面を通過する透過光とに分かれる。この透過光は透明板の裏面に到達し、裏面で一部が反射し、再び表面を透過する（裏面反射光  $I_r$  と呼ぶ）。これらの光線により、透明板に映る像は、位置ずれを持つ2重反射像として観測される。2重反射像を観測する基本的な構成を図1に、2重反射像の例を図2に示す。なお、透明板の裏面での2回以上の反射を考えると、3重像以上の反射像も考えられるが、その強度は非常に小さいため、本論文では2重反射像のみを扱うことにする。

### 2.2 非平行平面における距離計測と計算に必要なパラメータ

市販の亚克力板やガラス板などの透明板は、表面と裏面が平行のように見えるが、厳密には平行ではなく、非平行度が存在する。本論文では透明板を、平面で構成されるが表面と裏面の間に非平行度があるものと仮定する。

非平行度が存在する場合、レイトレーシング法を用いることにより、距離計算を行うことができる<sup>11)8)</sup>。この距離計算を行うためには次のようなパラメータが必要である。ただし、カメラの内部パラメータであるレンズ焦点距離  $f/\delta$  は、キャリブレーションにより求められているとする<sup>9)</sup>。

- 透明板の屈折率  $n$
- 透明板の表面の法線ベクトル  $\mathbf{n}_S$

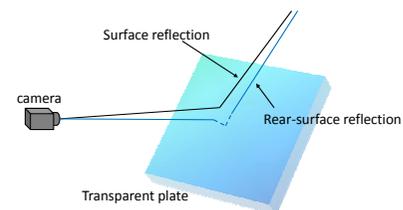


図1 基本的な構成  
Fig.1 Basis components



図2 2重反射像の例  
Fig.2 Image example

- 透明板の裏面の法線ベクトル  $\mathbf{n}_R$
- カメラ光軸と透明板の表面の交点位置  $\mathbf{m}_S$
- 透明板の板厚  $d$

透明板の屈折率は、ガラスや亚克力などでは定数値 1.49 とみなすことができる。

透明板の表面の法線ベクトル  $\mathbf{n}_S$ 、および透明板の裏面の法線ベクトル  $\mathbf{n}_R$  は、距離計算に大きく影響するため、推定が必要である。

次章で述べるとおり、本論文では拘束直線を利用して、これらのパラメータの推定を行う。このとき、カメラ光軸と透明板の表面の交点位置である  $\mathbf{m}_S$  や、透明板の板厚である  $d$  は、拘束直線にほとんど影響を与えないため、提案手法では推定を行うことは難しい。距離計算に対して、カメラ光軸と透明板の表面の交点位置  $\mathbf{m}_S$  の誤差は定数和として影響し、透明板の板厚  $d$  は定数倍として影響する。しかし、カメラから透明板までの距離はオブジェクトまでの距離に比べて小さいので、この誤差は無視できる。また、透明板の板厚が完全に未知である場合、オブジェクトまでの距離の絶対値はわからず、スケールの不定性が残る。

本論文では、透明板の表面の法線ベクトル  $\mathbf{n}_S$ 、透明板の裏面の法線ベクトル  $\mathbf{n}_R$  だけを推定対象とする。4章の実験では、カメラ光軸と透明板の表面の交点位置  $\mathbf{m}_S$ 、透明板の板厚  $d$  については、設計値を用いた。

## 3. パラメータ推定と距離計算

### 3.1 提案手法のながれ

提案手法のながれは以下になる。

- (1) 正規化自己相関による対応点探索。

2重反射像上で、注目点に対する対応点の探索を行うとき、既存手法では正規化自己相関などを用いる<sup>13)</sup>。このとき、探索領域内に十分なテクスチャがあれば、拘束を利用しなくても対応点の探索が可能である<sup>12)</sup>。ここでは、既存手法と同様の方法で、正規化自己相関を用いて、2次元的な探索を行う。これにより、初期の対応点マップが得られる。また、この対応点マップを、以降のパラメータ推定に利用する。

- (2) 拘束直線簡略化モデルでの初期値推定。  
(3) の非平行平面モデルでのパラメータ推定における初期値を求めるために(1)で得られた対応点マップと、拘束直線を簡略化したモデルを利用して、パラメータ推定を行う。
- (3) 非平行平面モデルでのパラメータ推定。  
(2) で推定されたパラメータを初期値とし、非平行平面モデルにおけるパラメータ推定を行う。ここでは(1)で得られた対応点マップと、非平行平面モデルにおける拘束直線を用いる。非平行平面モデルにおける拘束直線は、パラメータに応じて変化するので(1)で得られた対応点マップとの距離の和が最小となるように、勾配法を用いて最適化を行い、パラメータを推定する。
- (4) 拘束直線上での対応点の再探索。  
(3) でのパラメータ推定を行うことにより、同時に非平行平面における拘束直線が得られるので、この拘束直線を用いて対応点の再探索を行う。拘束直線上で対応点の探索を行うことにより(1)の2次元的な対応点探索を、1次元的な探索に限定することができる。
- (5) レイトレーシング法を用いた距離計算。  
最後に(3)で推定されたパラメータと(4)で再探索された対応点マップをもとに、2.2節のレイトレーシング法を用いて距離計算を行う。

また、以下3.2節で(3)について、3.3節で(2)について詳細に述べる。

### 3.2 非平行平面モデルにおける拘束直線を利用したパラメータ推定

ここでは前節(3)の非平行平面モデルでのパラメータ推定について述べる。前節(1)の対応点探索により対応点マップは既に得られているものとする。

拘束直線を利用してパラメータ推定を行うが、非平行平面に映る2重反射像における拘束を数式で書き表すことは現実ではない。しかし、レイトレーシング法<sup>8)</sup>を利用すれば、非平行平面モデルにおける、注目点に対する拘束を、数値的に求めることができる。オブジェクトの3次元位置および透明板のパラメータやカメラパラメータを定めると、レイトレーシング

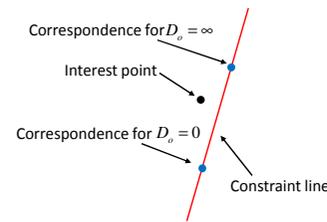


図3 拘束直線  
Fig. 3 Constraint line

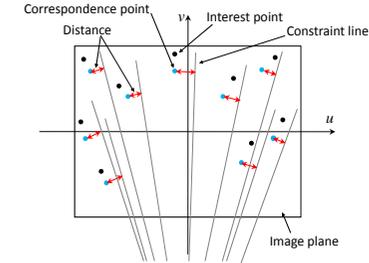


図4 拘束直線と対応点との距離  
Fig. 4 Distance between constraint line and corresponding point

法を用いることにより、そのオブジェクトの2重反射像がカメラにより撮影されたときの、画像上位置を計算することができる。よって、画像上である注目点  $a$  を定めることにより、それに対する対応点  $a'$  を計算することができる。非平行平面モデルにおける変位拘束は直線になることが知られているので<sup>12)</sup>、画像中の注目点に対する対応点を、オブジェクトまでの距離  $D_o$  を変化させて2点計算し、その2点を通る直線を求めることにより、拘束を数値的に求めることができる。本論文では、図3のように、オブジェクトが透明板に接触するまで近距離に存在するとき ( $D_o = 0$ ) と、無限遠方に存在するとき ( $D_o = \infty$ ) の2点について対応点位置を計算し、拘束直線を求める。

上記の方法により得られた拘束直線は、距離計測に必要なパラメータに応じて変化する直線である。対応点マップが正しく求められているものとする、真値に近いパラメータを使って算出された拘束直線と、対応点との距離は小さくなるはずである。逆に、真値から外れたパラメータを使って求められた拘束直線と、対応点との距離は大きくなるはずである。よってパラメータ推定は図4のように、画像全体における、拘束直線と対応点マップとの距離の和をコスト関数として、勾配法などを用いて最小化すればよい。本論文では、コスト関数の最小化にガウス・ニュートン法を用いて、パラメータ推定を行った。

しかし、このコスト関数にはローカルミニマムが多く、初期値が真値から離れていると、推定がうまくいかないという問題がある。そこで、次節で初期値推定について述べる。

### 3.3 簡略化モデルによる初期値推定

本節では、非平行平面モデルでのパラメータ推定の初期値を求めるための、簡略化モデルにおけるパラメータ推定について説明する。

簡略化モデルでは、まず、平行平面透明板に映る2重反射像における次の拘束直線の式を

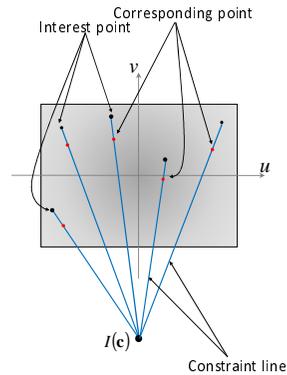


図 5 平行平面透明板における拘束直線

Fig. 5 Constraint line of parallel plane model

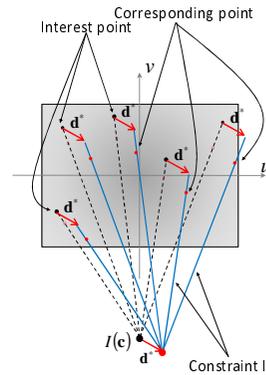


図 6 簡略化モデルにおける拘束直線

Fig. 6 Constraint line of simple model

利用する<sup>10)</sup>。

$$(v - c_v)(a_u - c_u) = (u - c_u)(a_v - c_v) \quad (1)$$

ただし、透明板の法線ベクトルを  $\mathbf{n}_m = (\cos \psi \cos \theta, \cos \psi \sin \phi, \sin \psi)^T$ ，CCD の画素間隔を単位とするレンズ焦点距離を  $f/\delta$  としたとき、注目点を  $(a_u, a_v)$ ，拘束直線群が交わる位置を  $(\cot \psi \cos \phi \frac{f}{\delta}, \cot \psi \sin \phi \frac{f}{\delta}) = (c_u, c_v)$  とする。式 (1) は、画像上注目点  $(a_u, a_v)$  と  $(c_u, c_v)$  を通る直線を表している。また、平行平面透明板では、オブジェクトまでの距離が無限のとき、表面反射光と裏面反射光は一致し、注目点と対応点が重なるため、画像上での重像間変位はゼロになる。

これを図で表すと図 5 のようになる。しかし、非平行平面モデルにおいては、オブジェクトまでの距離が無限のときでも注目点と対応点は重ならず、画像上の位置によって異なる重像間変位  $\mathbf{d}^* = (d_u^*, d_v^*)$  を生じる。また拘束直線の傾きも、平行平面透明板における拘束直線とは異なるため、厳密には拘束直線は 1 点で交わらない。非平行平面でのパラメータ推定の初期値を求めるために、次のような性質を持つ拘束直線の簡略化モデルを考える。

- 無限遠方のオブジェクトに対する像間変位は画像位置によらず一定とする
- 拘束直線の傾きは平行平面透明板における拘束直線と等しい、すなわち拘束直線は平行平面透明板における拘束直線を平行移動したものとする

図 6 に簡略化モデルを示す。簡略化モデルにおいて、ある注目点  $(a_u, a_v)$  に対する拘束直線を、画像座標系  $(u, v)$  で表すと次のようになる。ただし、無限遠方のオブジェクトに対

する像間変位を  $\mathbf{d}^* = (d_u^*, d_v^*)$  とする。

$$(u - (a_u + d_u^*))(a_v - c_v) = (v - (a_v + d_v^*))(a_u - c_u) \quad (2)$$

この直線は、式 (1) を  $(d_u^*, d_v^*)$  だけ平行移動したものとなっている。

3.2 節と同様に、この直線と、得られている対応点マップとの点と直線の距離の和をコスト関数とし、それを最小化することにより、未知パラメータ  $(c_u, c_v)$ ， $(d_u^*, d_v^*)$  を推定することができる。なお、最小化にはガウス・ニュートン法を用いた。この推定の結果、 $(c_u, c_v) = (\cot \psi \cos \phi \frac{f}{\delta}, \cot \psi \sin \phi \frac{f}{\delta})$  の関係から、法線ベクトルを推定することができる。

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{c_v}{c_u} \right) \quad (3)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{1}{c_u} \frac{f}{\delta} \cos \left( \tan^{-1} \left( \frac{c_v}{c_u} \right) \right) \right) \quad (4)$$

簡略化モデルは厳密に非平行平面モデルでの拘束直線を表しているわけではない。しかし、非平行度は一般に非常に小さな角度であるため、式 (2) は非平行平面モデルにおける拘束直線を近似的に表しているといえる。なお、このコスト関数最小化は大域的に収束し、初期値問題などを考える必要がない。

ここで推定されたパラメータを、透明板表面、裏面の法線ベクトルの推定における初期値とする。

## 4. 実験結果

### 4.1 シミュレーション実験

本節では、提案手法をシミュレーション実験に適用した結果を示す。なお、推定するパラメータは、表面の法線ベクトル  $\mathbf{n}_S(\psi, \phi)$  および裏面の法線ベクトル  $\mathbf{n}_R(\psi + \psi_p, \phi + \phi_p)$  のそれぞれに対するパラメータ  $(\psi, \phi, \psi_p, \phi_p)$  の 4 パラメータである。2 重反射像間の変位を表す対応点マップは、あるオブジェクトを仮定し、レイトレーシング法により人工的に作成する。簡略化モデルによる初期値推定、非平行平面モデルでのパラメータ推定では、画像座標上で等間隔に配置された 24 点を利用し、反復回数の上限を 15 回として推定を行う。なお、内部パラメータや、推定対象としない外部パラメータに関しては真値を用いる。

平面のオブジェクトを仮定し、シミュレーション実験を行った結果を図 7 に示す。ここでは、平面の傾きがそれぞれ  $0^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $65^\circ$  のオブジェクトを仮定している。図 7 を見ると、オブジェクトの傾きが小さいとき、つまりオブジェクトまでの距離が 1 枚の画像中であまり変化しないようなとき、パラメータ推定結果の誤差が大きくなるのがわかる。

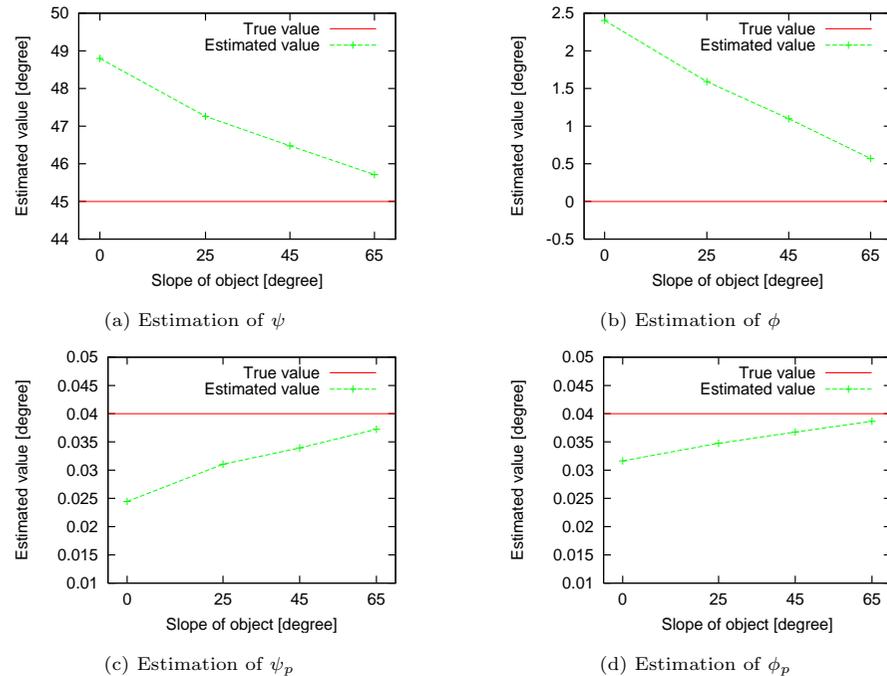


図 7 パラメータ推定結果  
Fig. 7 Parameter estimation

#### 4.2 実画像実験

まず、図 8 のように、カメラの前に透明板を固定した装置で撮影を行った。カメラには、PointGray 社製 DragonFly (グレースケール VGA, 30fps, IEEE1394 接続) を利用した。透明板にはアクリル板を使用し、板厚  $d$  は設計値の  $10\text{mm}$ 、カメラからアクリル板までの距離  $D_c$  は  $20\text{mm}$  とした。カメラの内部パラメータは、公開されているキャリブレーションツール<sup>2)</sup> を利用して求めた。求めたパラメータは、CCD 画素間隔で測ったレンズ焦点距離  $f/\delta = 837.9969$  と画像中心  $(10.835546, -10.51815)$  である。また、キャリブレーション時に得られる歪曲収差パラメータを用いて、画像から歪曲収差を取り除いた。対応点探索については正規化自己相関を用いた<sup>12)</sup>。未知パラメータ数は 4 なので推定には対応点が 4 組



図 8 撮影装置  
Fig. 8 Set up



図 9 撮影シーン  
Fig. 9 Scene of to be taken 2

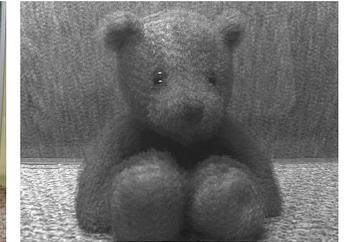


図 10 撮影された 2 重像画像  
Fig. 10 Double reflected image 2

表 1 パラメータ推定結果  
Table 1 Parameter estimation

	$\psi$	$\phi$	$\psi_p$	$\phi_p$	MSE
Designed value	45	0			
Simple model	49.1142	0.29387			5.17644
Non-parallel model	48.9505	0.21828	0.115013	-0.022245	0.236753

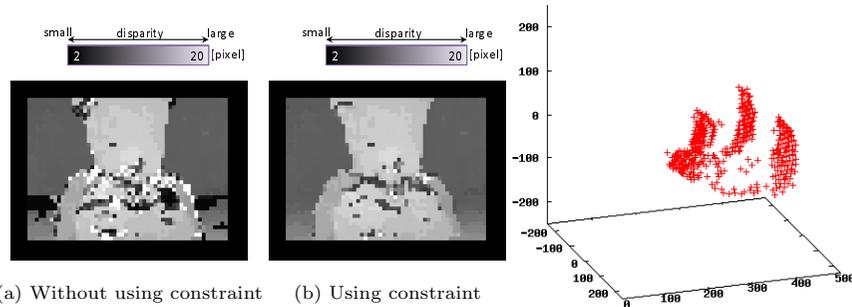
以上必要であるが、本実験では、対応点の見つかった 8 点を用いた。

図 9 のシーンを撮影した、図 10 の 2 重反射画像に対し、パラメータ推定を行った結果を設計値とともに表 1 に示す。

次に、3.1 節 (4) の拘束直線上での対応点の再探索の結果と、3.1 節 (1) の拘束を特に用いない 2 次元的な探索の結果を比較するために、図 11 に示すように、それぞれの視差マップで比較する。

2 重反射画像における視差マップは、直接的に距離を表してはいないが、基本的にオブジェクトまでの距離が長いほど視差が小さくなり、短いほど視差が大きくなるという性質をもつ。そのため、オブジェクトまでの距離が滑らかに変化する部分では、視差マップも滑らかに変化する。エッジ部分やテクスチャレス部分などでは、拘束を用いない探索では対応点探索がうまくいかず、図 11 (a) の視差マップは、これらの部分でばらついた結果となっている。それに対し、図 11 (b) の視差マップでは、エッジ部分やテクスチャが比較的少ない部分などにおいても、視差マップは比較的滑らかな結果が得られており、拘束を用いることにより、対応点マップが改善されたことがわかる。

次に、推定されたパラメータ、および再探索された対応点マップを用いて距離計算を行っ



(a) Without using constraint (b) Using constraint

図 11 視差マップの比較  
Fig. 11 Comparison of disparity map

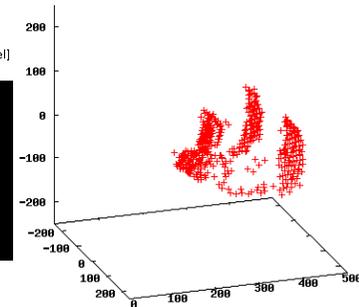


図 12 距離計算結果  
Fig. 12 Range estimation

た結果を図 12 に示す．この結果は，図 9 とほぼ同じ角度から見たプロットとなっているが，エッジ部分などでも対応が得られているため，前景部分のぬいぐるみの形状がよく表れており，背景の平面との距離の違いがわかる．

ここまでは，カメラの前に透明板を取り付けた，特別な状況で撮影を行った．次に，特別な装置を使用せず，一般的に存在する透明板に映る 2 重反射像を撮影した画像から距離計測を行った結果を示す．

図 13 のように，ガラス戸に映る 2 重反射像を撮影した．撮影された 2 重反射画像を図 14 に示す．また，提案手法を適用し距離計測を行った結果を図 15 に示す．この結果も，図 13 の実験状況とほぼ同じ角度で見たプロットとなっているが，前景と背景の距離の違いが表れていることがわかる．

## 5. おわりに

本論文では，拘束の無い状況で探索された対応点マップと，距離計測に必要なパラメータに応じて変化する拘束直線との距離の和をコスト関数にし，それをガウス・ニュートン法により最小化することにより，2 重反射像画像 1 枚から距離計測を行う方法を提案した．また，得られたパラメータにより導かれる拘束直線を用いて対応点の再探索を行うことにより，距離計測結果を改善した．注目領域に十分なテクスチャが存在すれば，自己相関などにより対応点の探索が可能であるが，テクスチャの比較的少ない領域では探索がうまくいかない．提案手法では，対応の得られた点を用いたパラメータ推定により，拘束直線が導かれ，テクスチャの比較的少ない領域やエッジを含む領域でも対応点探索が可能となる．また，提



図 13 実験状況  
Fig. 13 Experiment condition

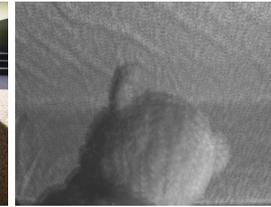


図 14 2 重反射画像  
Fig. 14 Double reflected image

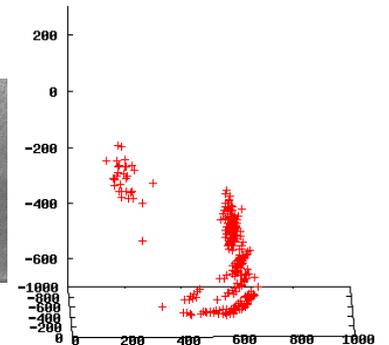


図 15 距離計算結果  
Fig. 15 Range estimation

案手法をシミュレーション実験，および実画像実験に適用し，パラメータ推定が可能であることを確認し，距離計測結果を示した．今後の課題としては，法線ベクトル以外のパラメータの推定や推定結果の改善などがあげられる．

## 参考文献

- 1) E.H.Adelson and J.Y.A.Wang. Single lens stereo with a plenoptic camera. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp. 99–106, 1992.
- 2) J.-Y.Bouguet. Camera calibration toolbox for matlab. [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/), October 2004.
- 3) C.Gao and N.Ahuja. A refractive camera for acquiring stereo and super-resolution images. *Proc. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.2, pp. 2316–2323, 2006.
- 4) J.Gluckman and S.K.Nayar. Catadioptric stereo using planar mirrors. *International Journal of Computer Vision*, Vol.44, No.1, pp. 65–79, 2001.
- 5) S.Hiura and T.Matsuyama. Depth measurement by the multi-focus camera. *Proc. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 953–959, 1998.
- 6) D.H.Lee and I.S.Kweon. A novel stereo camera system by a biprism. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.16, No.5, pp. 528–541, 2000.
- 7) Y.Nishimoto and Y.Shirai. A feature-based stereo model using small disparities. *Proc. on IEEE International Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence, Seiken Symposium*, pp. 192–196, 1987.

- 8) T.Whitted. An improved illumination model for shaded display. *Communications of the ACM*, Vol.23, No.6, pp. 343-349, June 1980.
- 9) Z.Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligenece*, Vol.22, No.11, pp. 1330-1334, 2000.
- 10) 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 CVIM 論文誌, Vol.47, SIG10 (CVIM15), pp. 131-142, 2006.
- 11) 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, pp. 788-793, 2006.
- 12) 清水雅夫, 奥富正敏. 両面ハーフミラー板の形状推定によるリフレクションステレオのキャリブレーション. 第10回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007) 講演論文集, pp. 249-254, 2007.
- 13) 奥富正敏, 清水雅夫, 姜偉. リフレクションステレオの2重像に対する対応位置探索法. 第14回画像センシングシンポジウム (SSH2008) 講演論文集, pp. IN3-01-1-8, 2008.