

立体キャリブレーションパターンを用いた 影による近接光源位置推定

村上 亮介^{†1,a)} 山藤 浩明^{†1,b)} 鮫島 正樹^{†1,c)} 菅野 裕介^{†1,d)} 松下 康之^{†1,e)}

概要: 照度差ステレオ法による物体表面の法線の高精度な推定には光源のキャリブレーションが重要である。既存の光源位置キャリブレーション手法の多くは複数の参照物体を用いて光源位置を推定するが、複数の参照物体を用いる手法では物体間の位置較正が必要になる。そこで本研究では、光源の三次元位置推定を容易に行う立体キャリブレーションパターンを提案する。提案する立体キャリブレーションパターンはマーカー付きの平面に立方体が接合した形状であり、平面の上に立体構造があることによって、参照物体と光源を同時にキャリブレーションすることができる。立体キャリブレーションパターンの平面部分にマーカーを記すことで姿勢の推定を可能とし、任意の姿勢で複数の観測を得ることで、光源位置の推定を行うことができる。評価実験では、キャリブレーションする環境のスケールに合わせた立体キャリブレーションパターンを製作し、二つの環境で光源位置を推定することで精度の評価を行い、提案手法の有効性を確認した。

RYOSUKE MURAKAMI^{†1,a)} HIROAKI SANTO^{†1,b)} MASAKI SAMEJIMA^{†1,c)} YUSUKE SUGANO^{†1,d)}
YASUYUKI MATSUSHITA^{†1,e)}

1. はじめに

物体の三次元形状の復元はコンピュータビジョンにおける主要なトピックの一つである。物体の三次元形状を復元する手法の一つに照度差ステレオ法 [1] が挙げられる。照度差ステレオ法とは、異なる光源下で撮影された複数枚の画像を用いて物体表面の法線を推定する手法である。照度差ステレオ法では、陰影の情報を用いてピクセルごとに法線を推定するため、空間的に密な推定が可能である。

照度差ステレオ法において、光源位置をキャリブレーションすることは、高精度な推定を行う上で重要である。既存のキャリブレーション手法の多くは、遠方光源を仮定した上で光源方向のみを推定する。しかし、実環境では物理的な距離があり無限遠の光源というものは存在せず、ある有限の距離から光が物体に照射される。その際、光源と物体の距離に対して物体が大きいと、物体上の位置によ

て光の入射方向が異なることになり、正確に物体表面の法線を推定することができない。したがって、表面法線の推定精度を上げるために、物体上の位置による光の入射方向の違いを考慮する必要があり、光源の三次元位置をキャリブレーションする必要がある。

既存の研究では球の陰影情報を用いて光源を推定する手法がある [2][3][4][5]。これらの手法ではそれぞれ球の表面上の点における輝度が光源の位置、強さ、表面の材質等によって変化することに着目し、光源を推定している。しかしながら、現実の物体の見えはランバートモデルに従わないという点や、球上のハイライト領域が広がりを持つことで光源方向を正確に決定付けるのが難しいという課題がある。また、物体の影を利用して光源を推定する手法がある [6][7]。これらの影を利用する手法では影のある部分とその影を作るキャリブレーション物体の部分と適切に対応付ける必要がある。さらにどの手法においても、二つ以上のキャリブレーション物体を用いる場合には物体間のキャリブレーションを行う必要がある。

ここで本研究では、参照物体位置のキャリブレーションを自動化できる立体キャリブレーションパターンを考案した。そして立体キャリブレーションパターンとその影を用

^{†1} 現在、大阪大学大学院情報科学研究科
Presently with Osaka University

a) murakami.ryosuke@ist.osaka-u.ac.jp

b) santo.hiroaki@ist.osaka-u.ac.jp

c) samejima@ist.osaka-u.ac.jp

d) sugano@ist.osaka-u.ac.jp

e) yasumat@ist.osaka-u.ac.jp

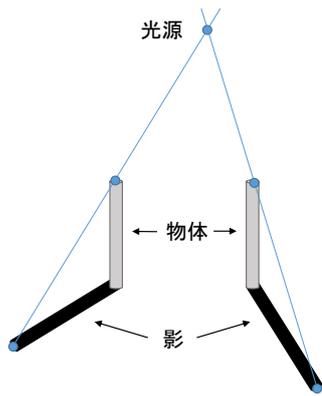


図 1 頂点と影と光源の幾何的關係．物体の頂点とその影を結んだ直線の上に光源が存在する．したがって 2 本以上の直線から光源位置が決定する．

いて光源の三次元位置を推定する．提案手法では，複数の位置で立体キャリブレーションパターンとその影の頂点を検出し，光の直進性からその二点を結ぶ延長線上に光源が存在することを利用し，光源位置を推定する．提案手法の利点として，1) 光源の三次元位置を推定することで物体表面の点ごとに光源方向を計算可能な点，2) 提案する立体キャリブレーションパターンを用いることにより自動で影を検出できる点，3) 一つの参照物体のみを用いるので，事前に物体間のキャリブレーションを行う必要がない点，4) 立体キャリブレーションパターンを簡単に製作できる点が挙げられる．評価実験では，シミュレーションによる検証と，実際に実体顕微鏡に光源を固定した装置，カメラの周囲に光源を配置した装置を用いた二つの環境で推定精度の検証を行う．

2. 提案手法

提案手法では，キャリブレーション用に設計した物体を複数の姿勢で撮影し，物体の位置とキャストシャドウの情報から光源位置を推定する．提案手法は大きく姿勢の推定，キャストシャドウの頂点検出，光源位置の推定の三つの処理からなる．まず，姿勢の推定ではカメラに対する立体キャリブレーションパターンの姿勢を推定する．次にキャストシャドウの頂点検出では，立方体の影を検出し多角形に近似し，立方体の頂点と影の多角形の頂点を対応付ける．最後に検出したキャストシャドウの情報を用いて光源位置の推定を行う．まず，1枚の画像からキャストシャドウの頂点と立方体の頂点の幾何的關係から光源方向に向かう直線を求め，物体の姿勢を変えて撮影したすべての撮影画像に対して同様のアルゴリズムを適用し光源に向かう直線を複数求める．これらの直線から尤もらしい交点すなわち光源位置を求める．以降の節でそれぞれの手順について説明する．

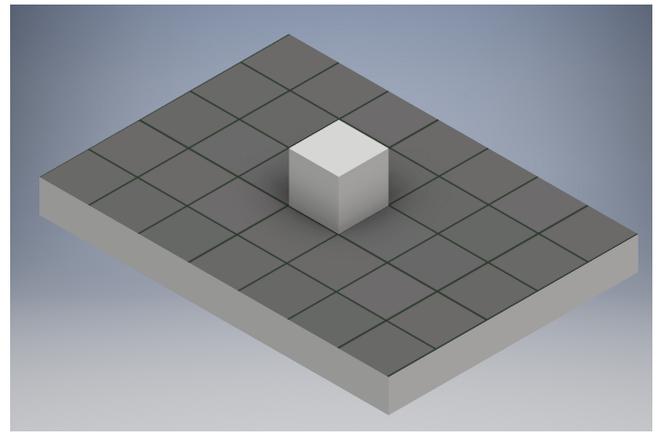


図 2 考案した立体キャリブレーションパターンのイメージ．平面の部分にキャリブレーションパターンとしてマーカーを表すことで，撮影画像から立体キャリブレーションパターンの姿勢の推定を行うことができる．

2.1 立体キャリブレーションパターン

提案手法ではキャリブレーションのために，平面板に立方体が接合した形のオブジェクトを考案した．平面の部分にキャリブレーションパターンとしてマーカーを表すことで，あらかじめ得たカメラの内部パラメータと撮影画像から立体キャリブレーションパターンの姿勢の推定を行うことができる．Cao らは鉛直な棒状物体を用いて光源位置を推定している [6]．しかしながら棒状の物体は太さがあり，棒の先端とキャストシャドウの先端を正確に対応付けるのが難しいという課題がある．そこで，キャストシャドウと物体の対応の精度を上げるため，キャストシャドウを作る部分に立方体を選んだ．立方体の作るキャストシャドウからは辺が観測されるため，一点を検出する場合に比べて精度良く検出可能である．したがってキャストシャドウの辺と辺の交点をキャストシャドウの頂点とすることで精度よく立方体の頂点と対応づけられる．

2.2 立体キャリブレーションパターンの姿勢の推定

立体キャリブレーションパターンの姿勢の推定では，あらかじめ得たカメラの内部パラメータの情報と，平面に表されたマーカーを利用し外部パラメータを推定する．カメラで現実世界の物体を撮影した際，世界座標と画像座標の対応は

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{R} | \mathbf{t}] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

で表される．ただし u, v は画像上の座標， s はスケールを決定するパラメータ， \mathbf{K} は $\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \alpha & 0 & c_x \\ 0 & \beta & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ で表されるカメラの内部パラメータ行列であり， α, β はそれ

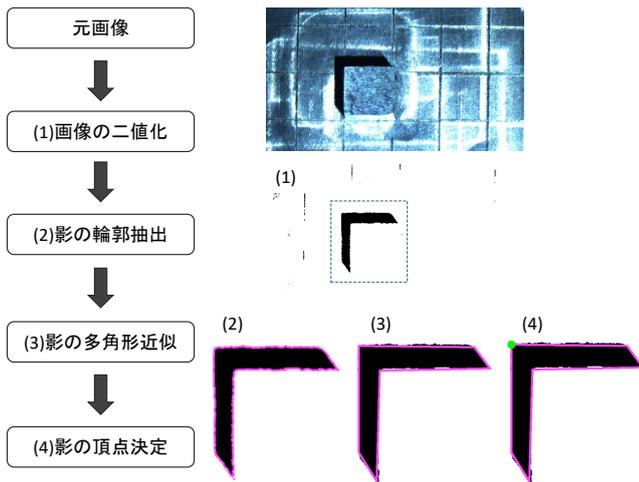


図 3 キャストシャドウの頂点検出の流れ

それぞれ x 方向, y 方向の焦点距離, c_x, c_y は光軸中心, \mathbf{R} は

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

で表されるカメラの回転を表す回転行列, \mathbf{t} は $\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$ で表されるカメラの平行移動を表すベクトル, $[\mathbf{R} | \mathbf{t}]$ は $[\mathbf{R} | \mathbf{t}] = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{pmatrix}$ で表されるカメラの姿勢を示す外部パラメータ行列である. X, Y, Z は立体キャリブレーションパターン上の座標である. 立体キャリブレーションパターンの平面部分を $Z = 0$, その左上の隅を原点 ($X = 0, Y = 0$) とし x 軸の正方向を右側, y 軸の正方向を下側にとる. $Z = 0$ とすると式 (1) は

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{K} [\mathbf{R}_1 \ \mathbf{R}_2 \ \mathbf{t}] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

となる. ここで, $\mathbf{H} = \mathbf{K} [\mathbf{R}_1 \ \mathbf{R}_2 \ \mathbf{t}]$ と表す. この \mathbf{H} はホモグラフィ行列と呼ばれ, 3×3 の行列である. 四点以上の立体キャリブレーションパターンの座標と画像上の座標の対応から \mathbf{H} を求める. 内部パラメータ行列 \mathbf{K} を既知とすると, カメラの外部パラメータ行列 \mathbf{R}, \mathbf{t} を決定できる. 立体キャリブレーションパターンを基準とした座標に, カメラの外部パラメータ行列 $[\mathbf{R} | \mathbf{t}]$ を左からかけることでカメラを基準とした座標に射影することができる. つまり, カメラに対する立体キャリブレーションパターンの平面部分の姿勢を推定できる.

2.3 キャストシャドウの頂点検出

ここでは, 立方体の頂点に対応するキャストシャドウの頂点を検出するアルゴリズムを説明する. その概要を図 3 に示す.

- (1) 撮影した画像に対して二値化処理を行い, キャストシャドウとそうでない部分に分離する. 閾値に関しては適当な値を手動で設定している.
 - (2) 二値化した画像に対して輪郭の抽出を行う. 輪郭抽出とは二値画像に対して, 連続する同一の輝度の画像領域の輪郭線を抽出する処理のことである. ここでは Suzuki[8] のアルゴリズムを適用する.
 - (3) 抽出した輪郭線を多角形近似する. 多角形近似とは得られた輪郭線を指定した許容誤差の範囲で多角形に近似する処理である. ここでは Douglas-Peucker アルゴリズム [9] を用いる. Douglas-Peucker アルゴリズムは, 複数の点を結んだ折れ線をより少ない点を結んだ折れ線に近似するアルゴリズムである. 始点と終点を結ぶ直線から, 近似精度以上の距離を持つすべての点を探索し, その中で最も大きい点を折れ線に追加する. この処理を反復し, 近似精度以上の距離を持つ点がなくなった時点で終了する. このようにしてキャストシャドウの多角形が得られる.
 - (4) 得られた多角形型のキャストシャドウから, 立方体の上部の四つの頂点のうち, 光源から一番遠い頂点に対応する点を決定する.
- 以上の処理でキャストシャドウの点と立方体の頂点から光源方向に向かうベクトルを計算する.

2.4 光源位置の推定

得られた複数の光源方向ベクトルから光源位置を推定する. すべての光源方向ベクトルは延長すると理想的にはある 1 点で交わるが, 現実には測定誤差などによってねじれの関係にある. したがって, 各直線が最も接近する尤もらしい交点を最小二乗法で求める.

三次元空間上の直線を

$$\mathbf{l}_i(t_i) = t_i \mathbf{d}_i + \mathbf{b}_i \quad (3)$$

とする. ただし, \mathbf{l}_i は光源方向の直線上の点, t_i は立方体の頂点が落とすキャストシャドウと光源までの距離, \mathbf{d}_i はキャストシャドウから光源に向かう単位方向ベクトル, \mathbf{b}_i は頂点が落とすキャストシャドウの三次元位置である. 添え字の i は n 枚の撮影画像中のインデックスを表す. すべての直線の尤もらしい交点すなわち推定する光源の座標を $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)^T$ とすると, 二乗誤差 $f_i(t_i, \mathbf{p})$ は

$$f_i(t_i, \mathbf{p}) = \|\mathbf{l}_i(t_i) - \mathbf{p}\|_2^2 \quad (4)$$

と表される. すべての直線の二乗誤差の和を F として,

$$F = \sum_{i=0}^{n-1} f_i(t_i, \mathbf{p}) \quad (5)$$

を最小化する物体と影の距離を表す係数 t_i と尤もらしい交点の座標 \mathbf{p} を求める. 式 (5) を物体と影の距離 t_i で偏微

分し、右辺を 0 とおくと、

$$t_i + \mathbf{d}_i^T (\mathbf{b}_i - \mathbf{p}) = 0 \quad (6)$$

という式 (6) が得られる。次に、式 (5) を尤もらしい交点の位置ベクトル \mathbf{p} で偏微分し、右辺を 0 とおくと、

$$-\sum_{i=0}^{n-1} (t_i \mathbf{d}_i + \mathbf{b}_i) + n\mathbf{p} = \mathbf{0} \quad (7)$$

という式 (7) が得られる。式 (7) において右辺はゼロベクトルである。

式 (6), (7) から合計 $n + 3$ 本の方程式が得られる。 $n + 3$ 本の方程式から、物体と影の距離を表す係数 t_i と尤もらしい交点すなわち光源の位置 \mathbf{p} を求める。

3. 評価実験

提案手法の有効性を示すために評価実験を行った。まず、シミュレーションによる検証について述べたのち、実環境で行った実験結果について述べる。実環境として実体顕微鏡を用いた装置とカメラの周りに光源を取り付けた実スケールの装置で実験を行った。顕微鏡環境は XY テーブルから立体キャリブレーションパターンの位置と姿勢が決定できる環境、カメラの周りに光源を取り付けた実スケールの装置は立体キャリブレーションパターンの位置と姿勢の推定を画像から行う必要がある環境としている。また、実験ではカメラの位置を固定し、立体キャリブレーションパターンを動かすことで様々な位置でキャストシャドウを取得した。評価には推定した光源の位置と実際の光源の位置のユークリッド距離を用いる。以下にその実験結果を示す。

3.1 シミュレーション

実環境による実験を行う前に、ノイズのない理想的なシミュレーション環境において手法の検証を行った。まず、3D CAD ソフトウェアを用いて立体キャリブレーションパターンと同じ形状の 3D データを作成した。作成した 3D データに対し、三次元コンピュータグラフィックスソフトウェア Blender^{*1} を用いてシミュレーションを行った。図 4 にシミュレーションで得られる画像例を示す。

一つの点光源のみによって照らされている立体キャリブレーションパターンをカメラに映る範囲内で長方形を描くように動かし、各地点で撮影することで 120 枚のレンダリング画像を得た。上の操作を顕微鏡環境における実験と同じ高さで四方に均等に分散するような位置にある四つの光源に対し行い、それぞれの光源に対するレンダリング画像を得た。こうして取得したデータをシミュレーションデータとし、3 章で示した方法で光源位置推定を行ったところ、表 1 に示す結果が得られた。ノイズのない理想的なシミュ

*1 <https://www.blender.org/>, version 2.77



図 4 シミュレーションで得られる画像例

表 1 シミュレーション環境における実験結果。コンピュータ上で設定した四つの光源の位置を推定した。画像左上に映る地点を三次元世界の原点とし、右方向を X 軸の正、下方向を Y 軸の正、画像に対して手前側を Z 軸の正方向としている。

光源番号	軸	真値 (mm)	推定値 (mm)	距離誤差 (mm)
1	X	60.0	57.349	3.260
	Y	-40.0	-38.102	
	Z	109.0	103.144	
2	X	60.0	57.009	4.002
	Y	30.0	27.340	
	Z	109.0	102.310	
3	X	-30.0	-25.481	5.516
	Y	40.0	36.837	
	Z	109.0	98.865	
4	X	-40.0	-34.047	6.757
	Y	-20.0	-16.804	
	Z	109.0	98.087	

レーション環境では精度良く光源の位置が推定された。理想的な環境においても誤差が生じる原因は、影の座標がピクセル単位の整数値に量子化されていることである。真の光源から立方体部分に当たる光によって板部分に落ちる影の座標を計算すると、推定に用いた座標との差は 1 ピクセル未満であった。

3.2 顕微鏡を用いた装置による実環境実験

実際に立体キャリブレーションパターンを実体顕微鏡を用いて撮影した。この実験においてステージとカメラは平行であり、レンズ歪みはないという仮定のもとで実験を行った。実験の撮影環境を図 5, 6 に示す。実体顕微鏡で撮影した画像を用いて実体顕微鏡のレンズの周囲に円状取り付けられた 16 個の LED 光源の位置を推定した。また、図 5 に示す XY テーブルは高精度に制御可能なトランスレーションステージであり、このステージ上に立体キャリブレーションパターンを置く。実験においてはこれらの装置を暗幕で囲い、外から光が入らない環境で撮影を行った。

ここで用いた立体キャリブレーションパターンを図 7 に示す。短辺 15mm、長辺 21mm、高さ 3mm の板の中心に、

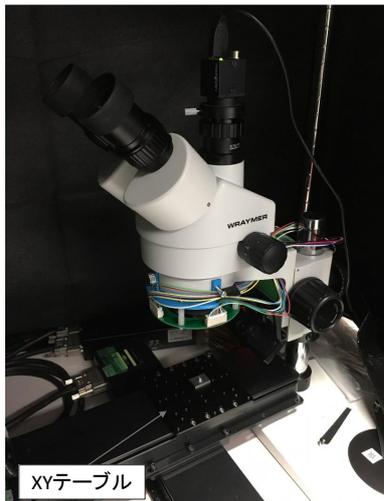


図 5 撮影環境。実体顕微鏡に 16 個の LED を取り付けた装置を用いている。XY テーブルは高精度なトランスレーションステージである。このステージ上に立体キャリブレーションパターンを置く。そしてこれらの装置を暗幕で囲い、外から光が入らない状態にして撮影を行った。

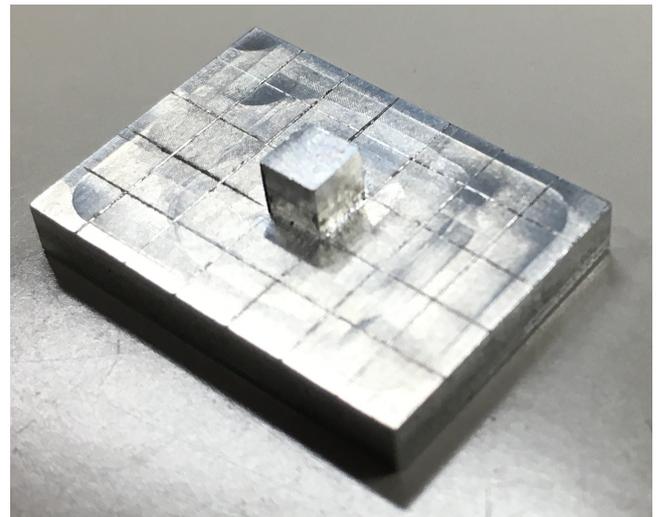


図 7 製作した立体キャリブレーションパターン

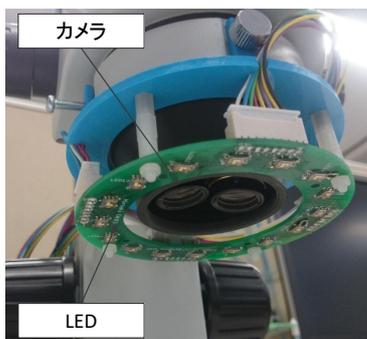


図 6 光源とレンズ。レンズの周囲に円状に 16 個の LED の光源が取り付けられている。

表 2 16 光源の距離誤差の平均値と最大値

平均距離誤差 (mm)	20.0
最大距離誤差 (mm)	57.4

1 辺 3mm の立方体が接合した形の金属オブジェクトであり、板の部分には 3mm 間隔のグリッドが罫書されている。この罫書を利用して立体キャリブレーションパターンの立方体部分の位置を決定した。

立体キャリブレーションパターンを顕微鏡のステージに乗せ、カメラの視野を端から端まで走査するように立体キャリブレーションパターンを動かして撮影し、144 枚の画像を得た。撮影によって得られた画像に対し、輪郭検出、頂点検出を行った画像例を図 8 に示す。このとき、立体キャリブレーションパターンの位置として XY テーブルの移動量から得られる値を用いている。

評価実験の結果、表 2 に示す結果が得られた。ここで用いた真値について、X 軸、Y 軸方向は光源を取り付けた実体顕微鏡の設計図から決定し、Z 軸方向はステージと光源の高さを実測した。シミュレーションにおける結果と比べ

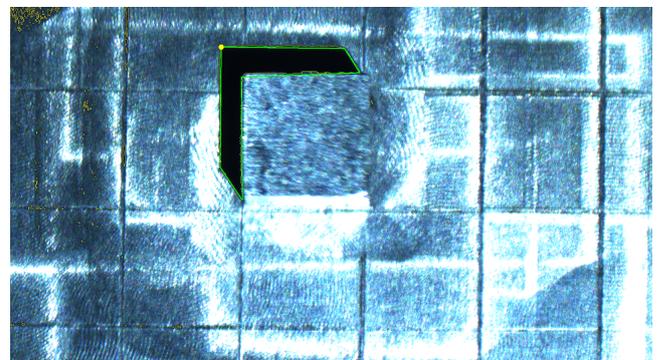


図 8 輪郭検出と頂点検出した画像例。緑の線は多角形近似した影を表し、黄色の点は決定した影の頂点を表している。

て平均距離誤差が大きくなっている。原因としては影の検出誤差や多角形近似の精度が考えられる。具体的には、シミュレーションで得られる画像は影とそうでない部分に明確な境界があるが、実環境ではその境界が不鮮明であり二値化における影領域の決定に誤差が生じる。さらに二値化画像において影の部分を拡大すると、立方体の辺による影が直線ではなく鋸歯状になっている。この影を多角形近似することにより誤差が生じたと考えられる。

3.3 カメラの周りに光源を取り付けた実スケールの装置による実環境実験

ここではカメラの周りに光源を取り付けた実スケールの装置による実環境実験の結果と考察を記す。撮影環境のスケールに合わせるため、一つ目の実験とは別に製作した立体キャリブレーションパターンを利用した。カメラの周りに光源を取り付けた実スケールの装置の撮影環境を図 9 に示す。カメラと同じ平面上に取り付けられた光源を光らせ、立体キャリブレーションパターンとその影を用いて光源の位置を推定する。撮影は装置を暗幕で囲い外から光が入らない状態にして行った。次にカメラの周りに光源を取り付

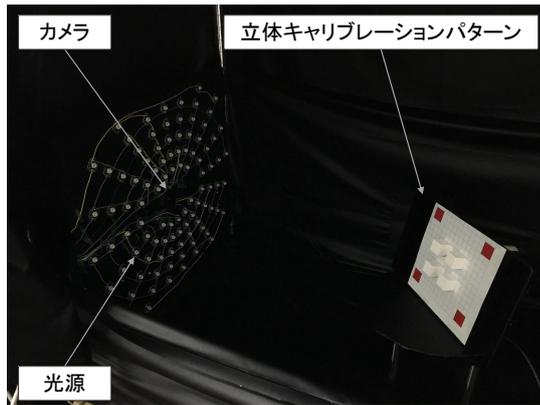


図 9 撮影環境. カメラと同じ平面上に光源が取り付けられている.

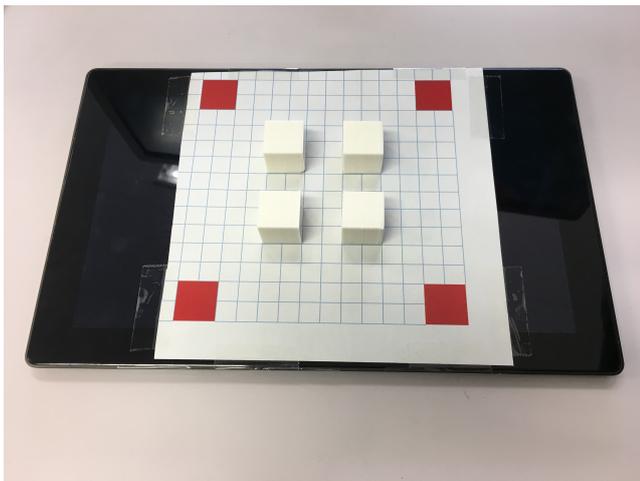


図 10 カメラの周りに光源を取り付けた実スケールの装置での実験で使用した立体キャリブレーションパターン. 曲がらない平面上にマーカーを印刷した紙を貼り付けその上に 3D プリンターで作成した立方体オブジェクトを取り付けてある.

けた装置で使用した立体キャリブレーションパターンを図 10 に示す. 曲がらない平面上にマーカーを印刷した紙を貼り付けその上に 3D プリンターで作成した 1 辺 20mm の立方体オブジェクトを取り付けた. 事前にチェッカーボードを用いてカメラキャリブレーションを行い, カメラの内部パラメータを求めた. 次に立体キャリブレーションパターンをカメラの視野の中を動かしながら 6 箇所撮影し, 6 枚の画像を得た. 得た画像に対して事前のカメラキャリブレーションで得た値をもとに画像のレンズ歪みを補正してから影の頂点の決定を行った.

評価実験の結果, 表 3 に示す結果が得られた. ここで用いた真値は実測したものである. 光源によって多少のバラつきは見られるが精度よく推定できている. 誤差の原因としては影の頂点決定, 姿勢の推定精度などが考えられる. 顕微鏡を用いた装置における実験と同様に影とそうでない部分の境界が不鮮明なため, 二値化における影領域の決定に誤差が生じる. 姿勢の推定精度に関して, この実験では赤いマーカーの 4 点をもとに姿勢を決定したが, マーカーの工夫等でより多くの点を利用することで精度良く姿勢を

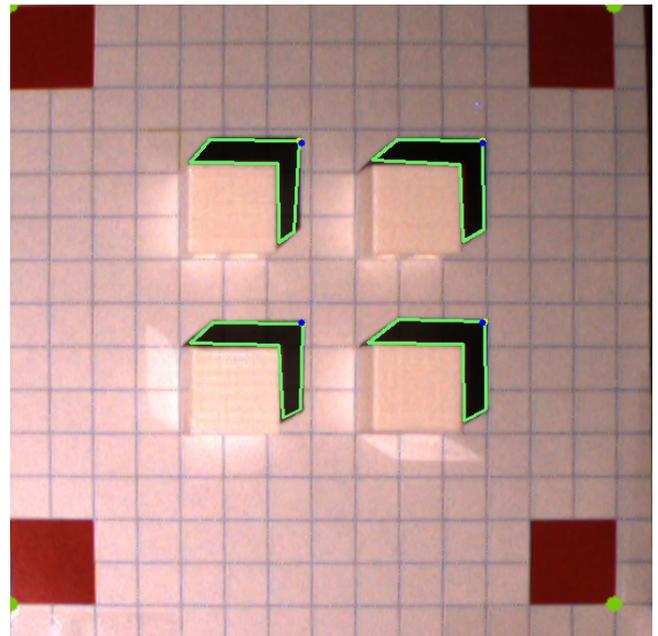


図 11 緑の線は検出した影の輪郭, 黄の点は得られた画像から決定した立方体の頂点の影, 青の点は真の光源から落とされる立方体の頂点の影を表す. 観測された影の位置と真の光源から落とされる影の位置の差は数ピクセル未満である.

推定することができると思われる. また, 実際の撮影画像と真の光源位置から出た光によって立体キャリブレーションパターンの立方体部分から落とされる影を図 11 に示す. 実際に撮影された画像を立体キャリブレーションパターンを正面から見た画像になるようワーピングしてある. 緑の線は検出した影の輪郭, 黄の点は得られた画像から決定した立方体の頂点の影, 青の点は真の光源から落とされる立方体の頂点の影を表す. 観測された影の位置と真の光源から落とされる影の位置の差は数ピクセル程度である. 立体キャリブレーションパターン上の四つの立方体の位置関係が, 今回の環境で推定する光源までの距離に対して小さかったため, 真の位置にある光源によってできる影と推定された位置にある光源によってできる影の位置の差に対して誤差が大きくなったと考えられる.

表 3 カメラの周りに光源を取り付けた実スケールの装置における実験結果. 三つの光源の位置を推定した. カメラのレンズ部分を三次元世界の原点とし, 右方向を X 軸の正, 下方向を Y 軸の正, カメラに映る方向を Z 軸の正方向としている.

光源番号	軸	真値 (mm)	推定値 (mm)	距離誤差 (mm)
1	X	-170	-178.6	10.2
	Y	95	100.1	
	Z	0	-2.2	
2	X	-160	-173.3	39.8
	Y	-125	-130.8	
	Z	0	37.1	
3	X	110	113.6	21.3
	Y	-140	-149.9	
	Z	0	-18.5	

4. 結論

照度差ステレオ法において、既存のキャリブレーション手法の多くは、遠方光源を仮定した上で光源方向のみを推定する。しかし、光源と物体の距離に対して物体が大きいと、物体上の位置によって光の入射方向が異なることになり、正確に物体表面の法線を推定することができない。したがって、表面法線の推定精度を上げるために、物体上の位置による光の入射方向の違いを考慮する必要がある。そこで本研究では参照物体位置のキャリブレーションを自動化できる立体キャリブレーションパターンを考案した。さらに立体キャリブレーションパターンとそれによってできるキャストシャドウを用いて幾何的な関係から光源の位置推定を行った。

評価実験では、シミュレーションによる検証と実際に実体顕微鏡に光源を固定した装置による検証を行った。シミュレーションによる検証ではノイズのない理想的な環境において高い精度で光源位置を推定可能なことを示した。一方で実環境における検証ではシミュレーションと比較して誤差が大きくなった。この原因としては影とそうでない部分の境界が不鮮明であるという問題による影の検出誤差やキャリブレーションオブジェクトの精度が考えられる。実画像では影とそうでない部分の境界が不明瞭なため、正確な影の位置を決定することが難しい。また、利用したキャリブレーションオブジェクトの位置や大きさの誤差も光源位置推定には大きく影響を与えていると考えられる。

今後の課題として、実環境において光源位置を高精度に推定するために、影の検出をより正確に行うことやキャリブレーションオブジェクトの位置や大きさを精度良く定める必要があると考えられる。

参考文献

- [1] Woodham, R. J.: Photometric method for determining surface orientation from multiple images, *Optical engineering*, Vol. 19, No. 1 (1980).
- [2] Zhang, Y. and Yang, Y.-H.: Multiple illuminant direction detection with application to image synthesis, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, Vol. 23, No. 8, pp. 915–920 (2001).
- [3] Powell, M. W., Sarkar, S. and Goldgof, D.: A simple strategy for calibrating the geometry of light sources, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, Vol. 23, No. 9, pp. 1022–1027 (2001).
- [4] Takai, T., Maki, A., Niinuma, K. and Matsuyama, T.: Difference sphere: an approach to near light source estimation, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 113, No. 9, pp. 966–978 (2009).
- [5] Aoto, T., Taketomi, T., Sato, T., Mukaigawa, Y. and Yokoya, N.: Position estimation of near point light sources using a clear hollow sphere, *Proceedings of IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pp. 3721–3724 (2012).

- [6] Cao, X. and Shah, M.: Camera calibration and light source estimation from images with shadows, *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Vol. 2, pp. 918–923 (2005).
- [7] 高井勇志, 牧淳人, 松山隆司: スケルトンキューブを用いた光環境推定, 画像の認識・理解シンポジウム, pp. 241–246 (2004).
- [8] Suzuki, S.: Topological structural analysis of digitized binary images by border following, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 30, No. 1, pp. 32–46 (1985).
- [9] Douglas, D. H. and Peucker, T. K.: Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature, *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, Vol. 10, No. 2, pp. 112–122 (1973).