

光線追跡によるカメラキャリブレーション

Camera Calibration by Ray Tracing

青山 千秋*
Chiaki AOYAMA

要 旨

カメラに入射する光線を追跡する高精度なカメラキャリブレーション手法を開発した。この手法では、各画素ごとに点光源の像が画素の中心に写るように点光源の相対位置を変え、つぎに点光源までの相対距離を変えて同様に点光源の相対位置を変える。得られた二つの点光源までの相対位置から入射光線の3次元軌跡を推定する。これを複数のカメラについて同時におこなえば、カメラ間の位置関係も得られる。実際に、ステレオカメラについてキャリブレーションをおこない点光源の3次元位置推定により精度検証した。その結果、不規則なゆがみがあるシールド越しの画像のように従来は困難であった場合でも、シールドの無い場合と同等の精度を持つカメラキャリブレーション手法が実現できた。さらに、入射光線が1点で交わらない非ピンホール性も確認した。

ABSTRACT

A highly accurate method of camera calibration which works by tracing the light rays incident on the camera has been developed. In this method, the relative position of the point light source is adjusted to position the point light source image in the center of each pixel. Afterwards, the relative distance to the point light source is changed and the relative position of the point light source is adjusted again. A three-dimensional locus of the incident rays to the two point light sources obtained is then estimated from the relative positions. This procedure can be used to determine the relative positions of multiple cameras. The accuracy of the method was verified by calibrating a stereo camera and estimating the three-dimensional position of the point light source. The camera calibration method displayed identical accuracy for an image across an irregularly warped shield, which is conventionally a difficult condition for calibration, as when no shield was present. In addition, it was confirmed that there was deviation from the pinhole camera model (no crossing of incident rays).

1. はじめに

自律移動ロボットが変化する外部環境に応じた行動をとるためには、環境認識能力が必要であり、画像センサとしてロボットに搭載したカメラが利用されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。認識能力のうちでも、3次元相対位置の推定が正確であれば、障害物を回避して移動するだけでなく、物をつかむ様な環境との接触を伴う行動にも適用可能となる。

3次元空間の相対位置を画像から推定するためには、Fig. 1に示すような複数のカメラに映った画像の見え方の違いにもとづく立体視がよく利用される。

2台のカメラを使った立体視は、それぞれの画像で同一箇所が写っている画像上の位置からカメラへの入射光線がわかると、式(1)により対象までの3次元相対位置が計算できる。

たとえば、Fig. 1におけるヘッドライトの3次元相対位

置(P_x, P_y, P_z)を推定する場合の手順は次のようになる。最初に右画像のヘッドライトに対応する左画像のヘッドライト位置を探索する。次にそれぞれのヘッドライトの2次元画像位置(画素位置)に対応する入射光線のパラメータ(Fig. 2で示す $\gamma, \alpha_1, \alpha_2, x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$)を事前に測定しておいた値から導く。最後に式(1)に適用する。これでヘッドライトの相対位置が推定される。



Fig. 1 Stereo images

*和光基礎技術研究センター

$$\begin{aligned}
 P_x &= \frac{x_1 \tan \alpha_1 - y_1 - x_2 \tan \alpha_2 + y_2}{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2} \\
 P_y &= (P_x - x_1) \tan \alpha_1 + y_1 \\
 P_z &= (P_x - x_1) \tan \gamma + z_1
 \end{aligned} \quad (1)$$

つまり、立体視による相対位置推定は、二つの処理に分けられる。一つ目は、異なる位置で撮影した画像間で同じ箇所を写している画素位置を推定することで、言い換えると、対応関係を見つけることである。二つ目は、カメラに映った画像と実空間上の対応を知ることである。この2種類の対応を見つける手法は様々提案されている^{(5)・(10)}。

本稿では画像と実空間上の対応関係を見つけるためのカメラキャリブレーションと呼ばれる手法について述べる。キャリブレーションの精度を上げるために新たに開発したレンズに入射する光線の追跡による手法と、その検証結果を示す。

2. 従来手法と問題点

カメラに写った画像のある画素の濃淡値は、対象のある点を出た光線が空間を通過してカメラの撮像素子に届いたものである。逆に光線を撮像素子から追跡すると、濃淡値はカメラの基準となる位置からある方向に直線を延ばして衝突した領域の明るさとなる。たとえば Fig. 3 の様なピンホールカメラで、スクリーンに映ったロボットの像は、ロボットの各位置から出た光線が針穴を通過してスクリーンに到達

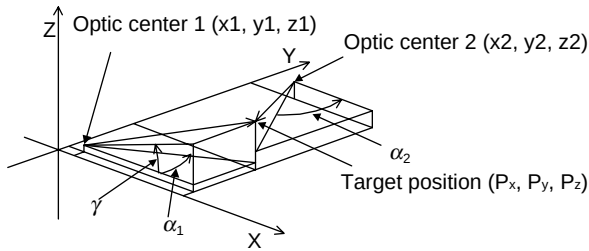


Fig. 2 Coordinate system

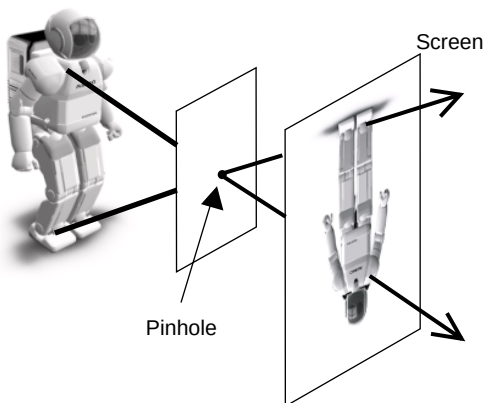


Fig. 3 Pinhole camera model

し、そこを照らした明るさに相当する。つまり各画素ごとに対応する3次元空間上の光源がある。

このスクリーン上の位置と3次元空間上を通過する光線の軌跡との関係を見つけることをカメラキャリブレーションと呼び、軌跡の推定がキャリブレーションの課題である。

実際のカメラではレンズを通した光が像を作っている。レンズを使うことで、通常スクリーン上の画像には直線が直線にならず曲線に写る画像ひずみという現象が発生する。画像処理によってはこのひずみを補正した画像が必要となる。その場合もスクリーン上の位置と光線の関係がわかっていればひずみの無い画像への変換が可能である。

従来のカメラキャリブレーション手法では、大きさや形状が既知のパターンを撮影し、特徴のある数十箇所の位置を画像から取り出し、その画像上の位置と実空間での位置関係に多項式をあてはめて全画素の関係を推定する。多項式計算結果に従ってひずみを補正した画像は、ピンホールカメラで得られた画像と同様の射影によって得られた画像になっていると仮定してきた。

また、ロボットで使用するカメラには耐候性やデザインを考慮してシールドを使わなければならない場合があり、シールドは Fig. 4 のような不規則で大きな画像ひずみを発生させる要因となる。このような場合に、多項式による関数近似でひずみ量を近似しただけでは、十分な画像ひずみ補正がおこなえず、十分な位置推定精度も得られない。

3. キャリブレーション原理・手法

本研究では、入射する光線の3次元軌跡を推定するために、光線の通過する空間上の2点が決定されれば、その2点間を結ぶ直線が入射光線の3次元軌跡となっていることを利用する。しかし、正確には、レンズに入射する光線は広がりのある光束となっているため、光線が通過する経路は線とはならない。ところがレンズの絞りを絞って光束が細くなった極限を考えると、光束は主光線と呼ばれる一本の直線となる。ここでは入射する光束は直線となっているものとして、主光線について考える。また、画像による3次元計測では Fig. 2 で示したように対象から出た光線のレンズまでの経路が重要で、レンズに入射してから内部をどのように通過して撮像素面に到達するかは影響しない。よってこのレンズに入射する前の主光線(入射前主光線)のみを扱う。

最初に、入射前主光線の3次元軌跡を推定する簡単な手

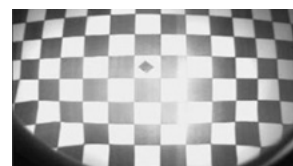


Fig. 4 Example of distorted image

法を考える。光線の軌跡を推定するには、点光源を軌跡上で移動させても画像上の光源位置が移動しないことを利用する。まず、カメラが水平に固定してあると仮定し、ある画素の中心に点光源が写るように、点光源を3次元空間のある位置に置く。次にその点光源を画像位置が変わらないようにしながら、遠くに移動させる。すると、最初の点光源の位置と、後の位置を結ぶ線が入射前主光線の軌跡となっている。この操作を全画面についておこなうことにより、全画面についての入射前主光線の軌跡が推定できる。

2次元平面で考えると Fig. 5 のようになる。

ただし、この手法を使って広い画角を持つカメラについて測定しようとする、点光源を移動させる空間が広大になりすぎるということが課題となる。

3.1. 計測原理

本研究では、点光源を移動させる代わりに、カメラを Fig. 6 に示す回転ステージに乗せ、画像上の所定の画素の中心に点光源が写るようにステージを回転させることで、相対的に点光源の3次元位置を変える方法をとった。Fig. 5 で示した方法では点光源を遠ざけながら上下に移動させたが、本手法ではカメラ側を回転させることで、相対的な上下動を発生させている。その結果、必要な空間は遠い位置の点光源とカメラを結ぶ間の狭い範囲だけで十分とすることができた。

2次元平面で考えると Fig. 7 になる。距離の異なる光源が同じ画素の中心に写るようにカメラを回転させる。

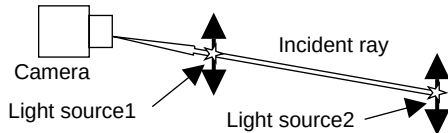


Fig. 5 Simple ray tracing

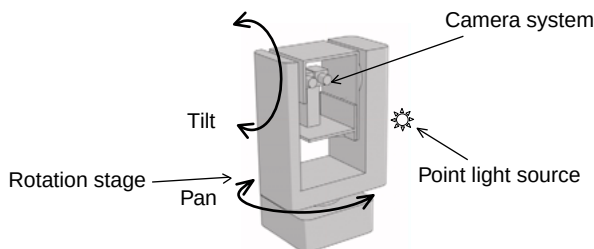


Fig. 6 Relative positions of camera, rotation stage, and point light source

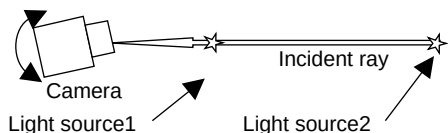


Fig. 7 Ray tracing by new method

実際の計測では、光源が遠ざかっていく途中の連続した位置は光線が直進する場合は不要であり、最初と最後の位置だけあればよい。そのため、画素ごとに距離を変えるのではなく、点光源を固定して必要な画素についてまとめて相対位置を出してから、点光源の位置を変えて同様の測定を繰り返す方法をとった。

はじめに1回ごとの測定方法について述べる。

まず、カメラが Fig. 6 に示す2軸回転ステージの適当な位置に乗っているとすると、さらにカメラを、 $-\theta_{\text{tilt}}$, $-\theta_{\text{pan}}$ だけ回転させて見える光源の方向は、逆にカメラを固定したとすると、原点を中心として光源を θ_{pan} , θ_{tilt} 回転させて見える方向に相当する (Fig. 8)。

このときの光源の位置(x_1 , y_1 , z_1)は回転前の光源の位置(0_{x1} , 0_{y1} , 0_{z1})に対して以下の関係となる。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{\text{tilt}} \cos \theta_{\text{pan}} & -\cos \theta_{\text{tilt}} \sin \theta_{\text{pan}} & \sin \theta_{\text{tilt}} \\ \sin \theta_{\text{pan}} & \cos \theta_{\text{pan}} & 0 \\ -\sin \theta_{\text{tilt}} \cos \theta_{\text{pan}} & \sin \theta_{\text{tilt}} \sin \theta_{\text{pan}} & \cos \theta_{\text{tilt}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0_{x1} \\ 0_{y1} \\ 0_{z1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

この位置推定を所定の画素について繰り返しおこなう。

つぎに光源の位置をカメラまでの距離が変わる位置(0_{x2} , 0_{y2} , 0_{z2})に変えて、画素の中心に光源が写るように回転ステージの向きを調整していく。

Fig. 9 の様に光源位置がそれぞれ(x_1 , y_1 , z_1), (x_2 , y_2 , z_2)

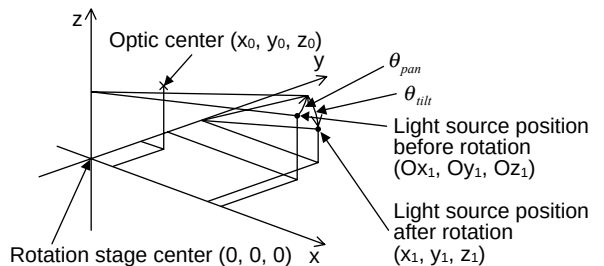
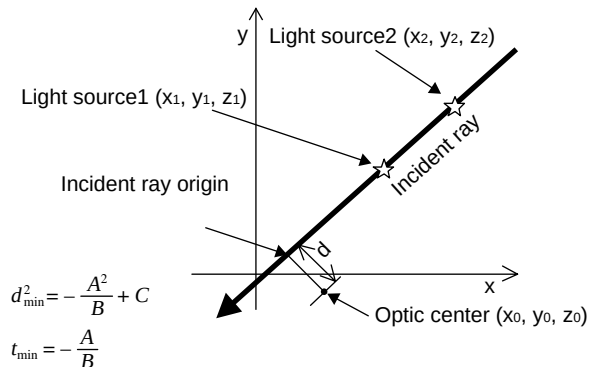


Fig. 8 Relation of positions before and after rotation of camera center and light source



$$d_{\min}^2 = -\frac{A^2}{B} + C$$

$$t_{\min} = -\frac{A}{B}$$

$$A = (x_2 - x_1)(x_1 - x_0) + (y_2 - y_1)(y_1 - y_0) + (z_2 - z_1)(z_1 - z_0)$$

$$B = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$$

$$C = (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2$$

Fig. 9 Relation between incident light and light source

の場合、この二つの位置を結ぶ直線が入射前主光線と一致し、その入射前主光線は式(3)で示される。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = t \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

今回、以上述べた手法で入射光線を測定した結果、これらの光線がピンホールカメラモデルのピンホール位置の様に一点では交差しない非ピンホール性を確認したので、ピンホールに相当する光学中心を新たに定義する必要が生じた。本研究では、全ての入射光線との距離 d の自乗和が最小になる点を光学中心と定義する。入射前主光線について、光学中心との距離 d が最小になる点を入射前主光線基点として定義し、光線はここから光源に延びているものとする。

この様に定義することによって、入射前主光線は基点位置(Fig. 2における x, y, z)と方向(Fig. 2における α, γ)に分けて考えられる。この定義で、すべての基点位置が同一の場合はピンホールカメラモデルに一致する。

3.2. 各画素ごとの光源の相対的回転方法

ここでは画素毎に光源を画素の中心に写るようにする方法について述べる。

Fig. 10のフローに示すように各画素毎に回転ステージを回転させる。取り込んだ画像には点光源以外が写っていない状態、つまり、黒い画像に白い点が写った状態にする。その点はある画素を中心とした広がりを持つのでそのピーク位置を推定する。そのピーク位置が所定の画素について定数 ε 以下の誤差で一致したら、そのときの回転台の回転角を記録し次の画素の処理に移る。ずれがある場合はその量に応じた角度値に変換し、ステージを回転させる。

ピーク位置の推定は上下、左右各方向について隣の画素の強度からおこなっている。所定の画素についての測定がすべて終わったら、点光源の位置を変えて同じことを繰り返す。距離を変えて測定した後に3.1項で述べた方法に従って入射前主光線のパラメータを計算し、これをカメラキャ

リブレーションデータとする。複数のカメラが組み込まれている場合はカメラ間の相対関係も同時に決定される。

4. 入射前主光線の測定結果

4.1. 測定条件

カメラにはソニー(株)のXC-EI30(1/3型 CCD 768 × 494 画素)を、レンズには(株)テスコムジャパンのTL-4M(4 mm F2.0)を使用した。この組み合わせで水平画角は約 60 度となっている。フレームグラバには、画素に同期して 8 bit の A/D 変換をおこなうものを新たに開発して使用した。2 台のカメラの前には 2 重の樹脂製シールドがあり、カメラ間距離は約 79 mm であった。

回転ステージの回転中心を原点として、 x 座標が 800 mm と 1600 mm になるように点光源の位置を変えた。方位推定精度は ± 0.05 画素以下になるようにした。

4.2. 入射前主光線

入射前主光線のうち画面中央の 1 ライン分を $X-Y$ 平面に投影したものを Fig. 11 に示す。図右側から入射した光線が、広がりを持っており、完全には一点に集束していない様子がわかる。光源位置の推定誤差から生じる広がりとは約 0.3 mm であり、入射光線は約 0.8 mm の広がりで見えていることから、非ピンホール性がわかる。ただし、Fig. 11 における直線が入射前の主光線を延長したものであり、レンズを透過した現実の光線は、複雑に屈折してレンズ内を通過している。また、図中のレンズの断面図は模式図であり、実際のレンズの形状を示しているわけではない。

このレンズでは外側から入射する光線ほど入射前主光線基点位置が後ろになる傾向が見られた。さらに超広角レンズ(ペンタックス(株) TS2V114E)では Fig. 12 で示す様により大きな広がりを見せた。

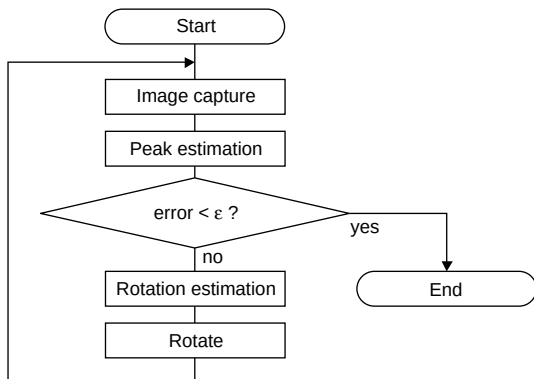


Fig. 10 Direction estimation processing flow

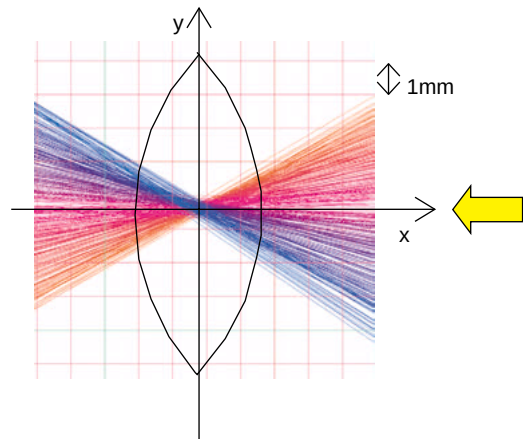


Fig. 11 Incident ray

4.3. 3次元位置計算による精度比較

キャリブレーション精度を従来手法と比較検証するために、ステレオカメラ系を構成してキャリブレーションし、点光源を所定の位置に移動させ、光源の3次元推定位置と光源を移動させた位置を比較することで精度検証した。比較は次にあげる3種類のキャリブレーションデータとシールドの有無に分けておこなった。

実測値： 非ピンホール性まで考慮した本手法による実測値データ

近似値1： 実測値から基点位置の変化を取り除き光学中心と一致させてピンホールカメラモデルで近似したデータ

近似値2： 実測値を5次までの多項式で近似したデータ

また、点光源の位置推定は次のようにおこなった。左右の画像それぞれから点光源の2次元画像上の位置を1画素以下の精度で推定する。その画像位置に対応する Fig. 2 で示すパラメータをキャリブレーションデータより得る。そのパラメータを式(1)に適用して、3次元位置とする。

点光源は、Zを0に固定して、X方向に0.8から1.6mまで0.01m間隔で、Y方向には-0.4から0.4mまで0.01m間隔で移動させた。

立体視による距離推定手法では、X方向の誤差が距離の自乗に、Y、Z方向は距離に比例しておおよそ増加する。そのため、誤差を距離の自乗と距離で正規化して評価した。たとえば、2mの位置でX方向の測定誤差が12mmの場合、 $12/(2^2)=3$ を正規化誤差とした。次元はX方向が m^{-1} 、Y、Z方向が無次元となる。

シールドが無い場合の測定範囲における正規化誤差(2 σ)をまとめたのがTable 1である。本手法によるキャリブレーションデータを使った実測値を使うことで、近似値2によるキャリブレーションデータを使った測定結果に対して50%、近似値1に対して20%、X方向の誤差を減少させることができた。

点光源の2次元画像上での位置推定精度に ± 0.5 画素の誤差があるとした場合に、3次元推定値で発生する理論上

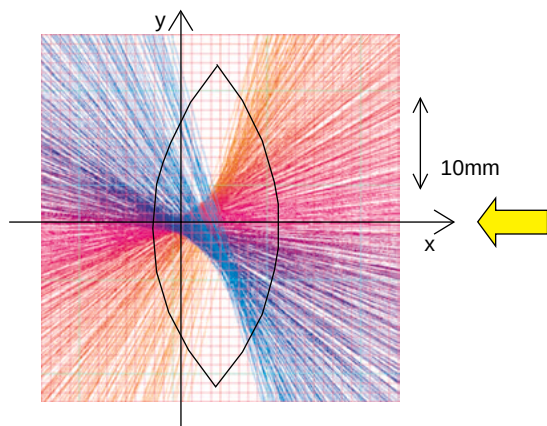


Fig. 12 Ray incident on wide angle lens

Table 1 Difference in error with no shield

	Measured data	Approximation data	
		Pinhole camera	Polynomial
X	± 4.2	± 5.2	± 8.5
Y	± 0.23	± 0.34	± 0.79
Z	± 0.22	± 0.24	± 0.90

Table 2 Difference in error with shield

	Measured data	Approximation data	
		Pinhole camera	Polynomial
X	± 4.6	± 5.4	± 18.5
Y	± 0.30	± 0.49	± 1.28
Z	± 0.72	± 0.71	± 2.80

の誤差はX、Y、Z方向についてそれぞれ8.7、0.75、1.80である。実測値の誤差はその半分になっていることから、2次元画像上での1画素以下の画素推定が有効に働いていることがわかる。Zについて実測値と近似値1で誤差に大きな違いが見られないのは、基点位置のオフセット分だけが誤差になるからである。

Table 2はひずみのあるシールドをつけた場合である。表から、実測値を使うことで、近似値2による測定結果に対して75%、近似値1に対して15%、X方向の誤差を減少させていることがわかる。実測値の誤差はシールドの無い場合より増加しているが、それでもシールドが無い場合の近似値1の誤差より小さい。

本手法によりシールドの有無にかかわらずほぼ同じ精度でキャリブレーションが達成されていることがわかる。さらに、シールドがあっても、シールドが無い場合のピンホールカメラモデルより精度が高い。また、不規則なひずみがある場合は多項式近似に対する精度向上が著しい。

また、今回の測定結果ではX方向の誤差の減少は15-20%程度であったが、明るい広角レンズのように口径が大きく前後の対象性が低い複雑な構成を持つレンズでは、Fig. 12に示したように非ピンホール性が大きいので、この差はさらに拡大するものと考えられる。

Fig. 13 - Fig. 15 にシールドが無い場合のx方向についての正規化誤差を3次元グラフで示す。Fig. 13 は実測値、Fig. 14 は近似値1、Fig. 15 は近似値2の場合である。y軸とx軸を示す矢印のx軸上に右カメラの中心がある。

ピンホールカメラモデルによる誤差が近距離で実測値に対して増加している。これは非ピンホール性による基点位置変動が、ステレオカメラ系で左右のカメラへの入射光線の角度が大きくなる近距離で大きくなるからである。

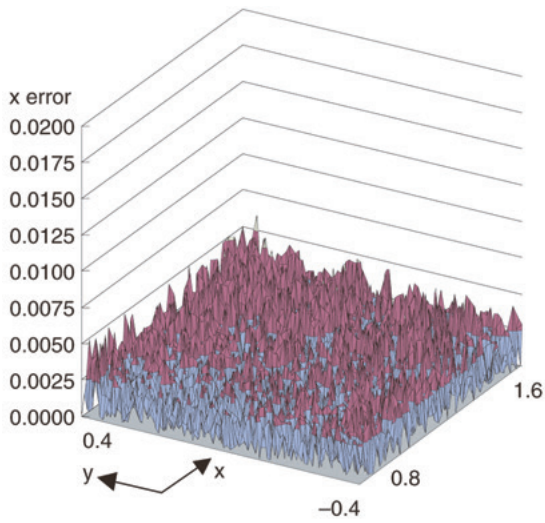


Fig. 13 Measured data with no shield

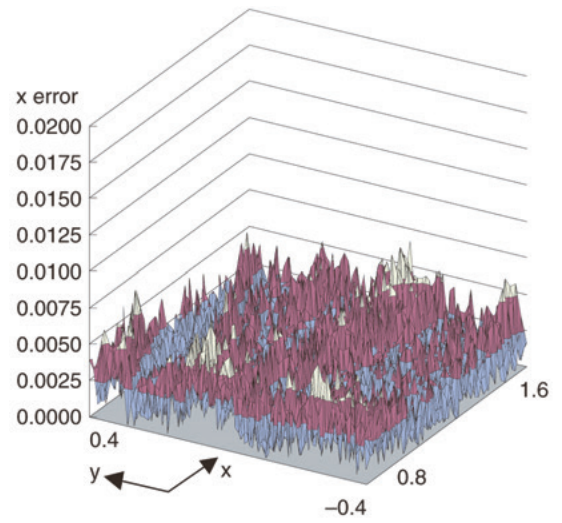


Fig. 16 Measured data with shield

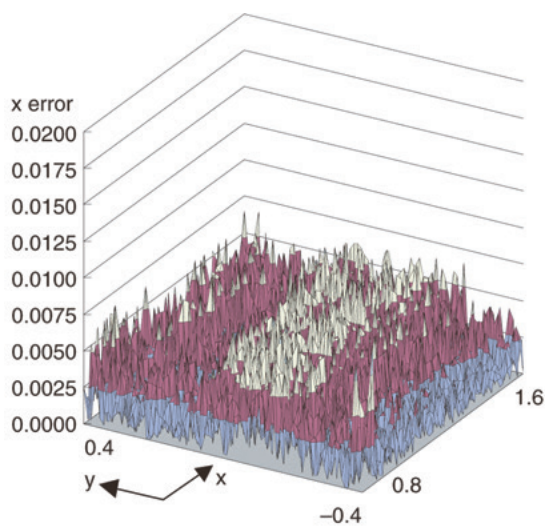


Fig. 14 Pinhole camera model with no shield

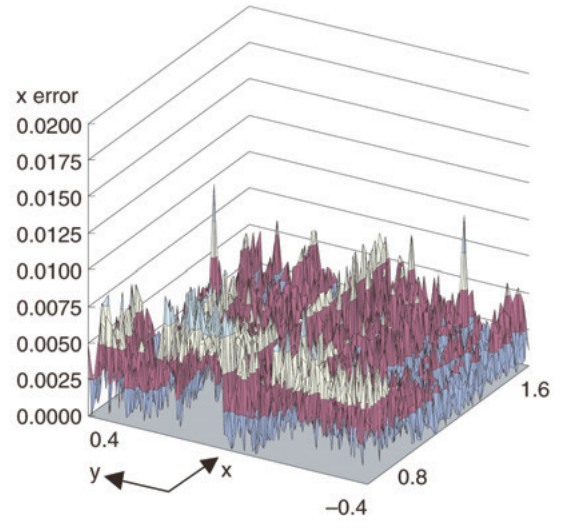


Fig. 17 Pinhole camera model with shield

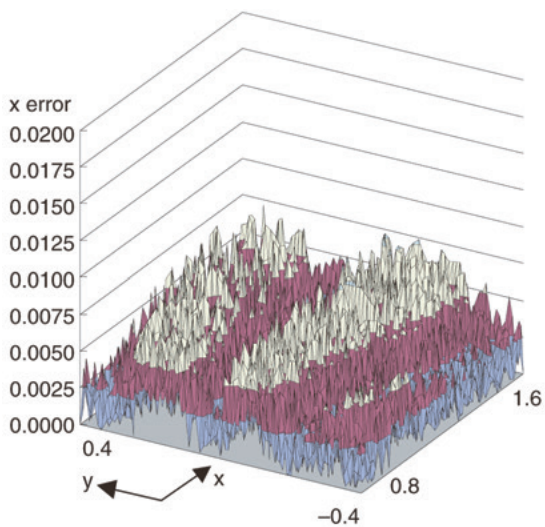


Fig. 15 Polynomial approximation with no shield

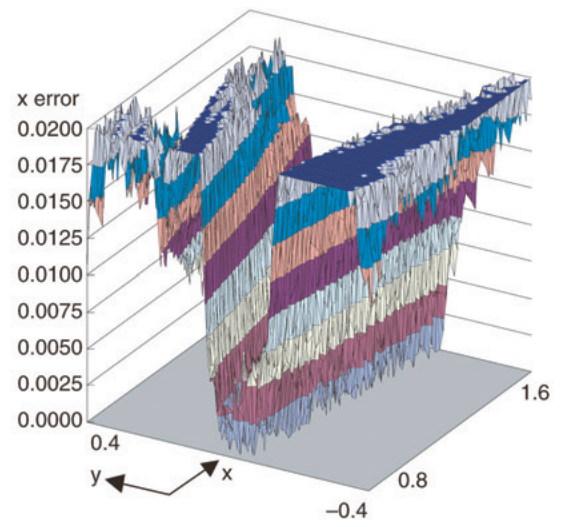


Fig. 18 Polynomial approximation with shield

Fig. 16 - Fig. 18 にシールドがある場合の誤差を示す。

Fig. 16 は実測値, Fig. 17 は近似値1, Fig. 18 は近似値2の場合である。

Fig. 16 と Fig. 17 を比べると近似値1の誤差の発生がここでも近距離で大きい。Fig. 18 から、近似値2では測定領域全域でのひずみを十分補正できていないことがわかる。

そして、このステレオカメラシステムを利用したシールドのある2脚2腕型の自律移動ロボットで、制御を含めたロボットシステムとして約1 cm 以下の精度が必要とされる把持動作に成功した。

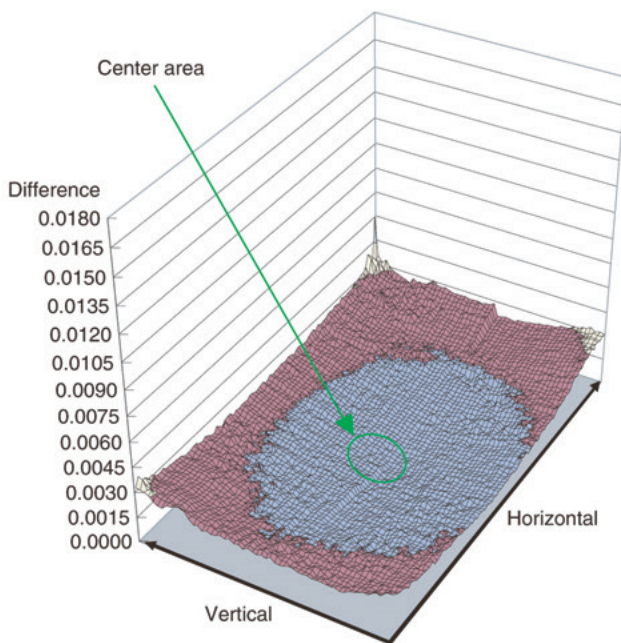


Fig. 19 Error for polynomial approximation with no shield

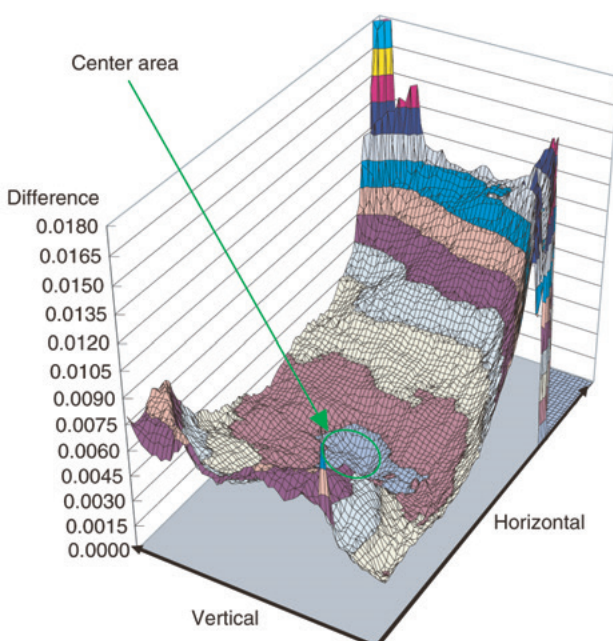


Fig. 20 Error for polynomial approximation with shield

4.4. シールドによる不規則なひずみ

画像ひずみの不規則性を見るため、従来よく使われている5次の多項式でひずみ量を近似した場合と今回の測定値を比較し、Fig. 19, Fig. 20に示す。画面の左下がグラフにおける下に対応する。Fig. 2に示す角度 α , γ について測定値と近似値の $\tan$ をとった $\tan\alpha$, $\tan\gamma$ の差の自乗和の平方根を誤差として高さ軸で示している。約0.0015が一画素の誤差で、1mでの距離誤差に換算するとx方向で約9mmに相当する。

シールドが無い場合の近似誤差をFig. 19に示す。誤差の発生が規則的であることがわかる。この誤差は、渦巻状に発生しているずれを原因とするので、画像のひずみ中心から放射状に画像を伸縮させる多項式による補正だけでは消すことができない。

シールドがある場合の誤差をFig. 20に示す。グラフのうねりからシールドにより非常に複雑なひずみが発生していることがわかる。一画素以下の誤差の範囲は画面中央の緑色の円の周囲にある紫色の範囲に限られる。周辺で誤差が0になっている領域は、キャリブレーションをおこなっていない領域である。この領域では点光源の像がピークを複数持つほどぼやけるためピーク位置を推定できず、光線の軌跡を推定することができなかったためである。

5. まとめ

カメラに入射する光線を追跡することによる、非ピンホール性まで考慮したカメラキャリブレーション手法と、その測定結果を利用したステレオカメラシステムによる精度を示した。

本研究により以下のことが確認された。

- (1) 不規則な画像ひずみがある場合でも精度良くカメラキャリブレーションが実施できる。
- (2) 入射光線が集束せず光学中心の周囲に広がっている。

本手法でカメラキャリブレーションをおこなったステレオカメラシステムにより、従来以上に精度の良い3次元相対位置推定結果が得られ、ロボットによる把持動作が可能となった。

参考文献

- (1) Sakagami, S., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N., Fujimura, K.: The intelligent ASIMO: system overview and integration, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS), Vol.3, p.2 478-2 483(2002)
- (2) 檜垣信男, 横山太郎, 藤村希久雄: 行動理解のためのジェスチャ認識アルゴリズムと新型「ASIMO」への適用, HONDA R&D Technical Review, Vol.15 No.1 p.95-

- 102(2003)
- (3) Goldberg, S., Maimone, M., Matthies, L.: Stereo Vision and Rover Navigation Software for Planetary Exploration, 2002 IEEE Aerospace conference Proceedings, Vol.5, p.2 025-2 036(2002)
 - (4) Sabe, K., Fukuchi, M., Gutmann, J., Ohashi, T., Kawamoto, K., Yoshigahara, T. : Obstacle Avoidance and Path Planning for Humanoid Robots using Stereo Vision, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), Vol.1 p.592-597(2004)
 - (5) Faugeras, O., Hotz, B., Mathieu, H., Vieville, T., Zhang, Z., Fua, P., Theron, E., Moll, L., Berry, G., Vuillemin, J., Bertin, P., Proy, C.: Real time correlation-based stereo: algorithm, implementations and applications, INRIA Research Report 2168(1994)
 - (6) Kanade, T., Okutomi, M.: A stereo matching algorithm with an adaptive window, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.16, No.9, p.920-932(1994)
 - (7) Zhang, Z., Deriche, R., Faugeras, O., Luong, Q.: A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Images Through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry, Artificial Intelligence Journal, Vol.78, p.87-119 (1996)
 - (8) TSAI, R.: A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-theShelf TV Cameras and Lenses, IEEE J. Robotics and Automation, Vol.3, No.4, p.323-344(1987)
 - (9) Shih, S.: Accuracy analysis on the estimation of camera parameters for active vision systems, Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition p.930-5 Vol.1(1996)
 - (10) Shih, S.: Kinematic calibration of a binocular head using stereo vision with the complete and parametrically continuous model, Proceedings of the SPIE - The International Society for optical Engineering Vol.1825 p.643-57(1992)

■著 者■



青山千秋