

円錐曲線を用いた全方位視覚センサのキャリブレーション

間下以大[†] 岩井儀雄[†] 谷内田正彦[†]

本論文では、HyperOmni Vision¹⁾ のような、等方性ミラーと透視投影カメラからなる全方位視覚センサのキャリブレーション手法を提案する。全方位視覚センサのキャリブレーションは、カメラのキャリブレーション、ミラーの姿勢推定、これらの幾何学的関係を用いた光線追跡そしてミラーにおける光線の反射からなる。全方位視覚センサのキャリブレーションにおける主な問題はミラーの姿勢推定にあるが、これまで提案されている手法ではミラー姿勢の自由度が制限されているという問題点や、非線形最適化問題となっていて初期値によっては正しい推定が得られない場合があるという問題点があった。提案手法では、画像中にあるミラーの縁によってできる円錐曲線を用いた解析的計算により非線形最適化のような初期値問題がなく、6自由度のミラーの姿勢を推定できる。これは、円錐曲線を利用したカメラキャリブレーションの応用である。この手法では解が一意に決まらないが、無限遠にある直線を利用した評価によって候補の中から解を決定することができる。本論文では双曲面ミラーとピンホールカメラモデルからなる HyperOmni Vision のパラメータを用いて実験し、提案手法の精度と有効性について評価する。

Calibration of HyperOmni Vision Based on Conic Curve

TOMOHIRO MASHITA,[†] YOSHIO IWAI[†] and MASAHICO YACHIDA[†]

In this paper, we propose a calibration method for catadioptric camera systems consisting of a rotation symmetry mirror, like HyperOmni Vision, and an affine camera. The proposed method is based on conventional camera calibration and mirror posture estimation. The main problem with catadioptric camera calibration is mirror posture estimation because the degree of freedom of a mirror posture is limited or the accuracy of the estimated parameters is inadequate, owing to nonlinear optimization. Our method can estimate the six degrees of freedom of mirror posture and can be free from the volatility of nonlinear optimization. Our method uses a conic curve in an image, the borderline between mirror and non-mirror, and is an application of extrinsic parameter calibration based on conic fitting. The mirror posture estimated analytically is not unique, so we propose a selection method for finding the best one. Because of the conic-base analytical method, our method can avoid the initial value problem arising from nonlinear optimization. We conduct experiments on synthesized images to test the performance of our method, and discuss its accuracy.

1. はじめに

全方位視覚センサはセキュリティ、環境認識、関節物体認識、テレプレゼンス、ロボットナビゲーション等様々な状況で用いられている。これらの使用目的に応じて多くの種類の全方位視覚センサが提案されている。特に近年では、鏡をカメラの正面に配置した全方位視覚センサがよく用いられている。

鏡面反射を利用した全方位視覚センサはその利用目的に応じて単一視点 (single viewpoint)^{1),2)}, equi-resolution³⁾, equi-areal⁴⁾ といった様々な光学特性を持つように設計されている。この光学特性は主にカメ

ラモデルとミラー形状の組合せによって実現されており、そのほとんどが回転対称な凸面鏡を用いている。なかでもよく用いられているのが、Yamazawa ら¹⁾ によって提案された双曲面とピンホールカメラモデルからなる全方位視覚センサ HyperOmni Vision と、Nayar²⁾ によって提案された放物面ミラーと正射影カメラモデルからなる全方位視覚センサ (Paracatadioptric camera) である。これらの全方位視覚センサは、単一視点を持つことから、応用範囲が広く、よく用いられている。また、単一視点でない全方位視覚センサも提案されている^{3),4),9),10)}。

このような全方位視覚センサにおける共通した欠点は、ミラーとカメラの相対的な位置関係を正確に合わせる必要があるという点である。この位置関係がずれていると、意図された光学特性を得ることができない

[†] 大阪大学大学院基礎工学研究科
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

うえに、位置計測誤差や、提示用に変換したパノラマ画像や透視投影画像が歪むといった問題が発生する。この位置関係は、カメラの内部パラメータとも関係があり、正確にミラーを設置することは実際には難しい。また、ミラーの設置方法によっては位置合わせを行うこと自体が不可能な場合もある。

このミラーの設置不良という問題は、全方位視覚センサの利用目的によって扱いが変わる。計測を目的とした場合、画像中の各画素に対応する光線の位置と方向つまり、各画素の視点と視線方向が正確に求められている必要がある。この視点と視線方向を計算するにはミラーの位置を求めなければならない。つまり、カメラとミラーの相対的な位置関係が正確に得られている必要がある。一方、人に対する提示といった目的の場合、上述のような画像中の座標と視線および視点の対応は厳密に正確である必要性はないが、視点の位置や、視線の方向が人が不自然に感じない程度の誤差の範囲内に収まっている必要がある。もしくは、Swaminathan ら⁵⁾の手法等によって既知の光線から歪みの少ない画像を再構成する必要がある。この画像を再構成するには画素とその画素に入ってくる光線の幾何学的関係が明らかになっている必要があるが、この幾何学的関係を得るにはカメラとミラーの位置関係を推定する必要がある。これらのことから、その要求精度は異なるが、どちらの場合においてもカメラとミラーの相対的位置関係を推定することは重要である。

上述のことから全方位視覚センサのキャリブレーションは各画素に対応する光線を求める問題となる。そしてその光線はカメラキャリブレーションとミラーの姿勢推定、そしてこれらの結果を用いて行う光線追跡とミラーの反射計算によって求めることができる。カメラのキャリブレーションについては、Tsai らの手法⁶⁾をはじめとして、円錐曲線を用いた手法^{7),8)}等、多くの手法が提案されている。つまり、全方位視覚センサのキャリブレーションにおける問題はミラーの姿勢をどのように推定するかにある。

全方位視覚センサのキャリブレーションは様々な手法^{11)~17)}が提案されており、その多くは単一視点を仮定している。Kang¹¹⁾はセルフキャリブレーション手法を提案している。この手法では正射影カメラと放物面ミラーからなるカメラシステムを対象としている。Kang の手法でもミラーの縁を利用しているが、写っている形状が円であると仮定されている。この仮定ではミラーの姿勢の変化について考慮されておらず、完全なミラーの姿勢を推定することができないという問題点がある。Geyer ら¹⁴⁾の提案するカメラキャリブ

レーション手法は、内部パラメータの推定も行っている。この手法でも、正射影カメラと放物面ミラーからなるカメラシステムを想定している。これらのような正射影カメラと放物面ミラーからなる全方位視覚センサに対するキャリブレーション手法は、その単一視点という光学特性を優先させて、ミラーは回転していない、つまり、ミラーの回転軸とカメラの光軸が平行であると仮定している。そのため、この仮定が成立しない場合には正確にキャリブレーションを行うことができない。Micusik ら¹⁵⁾は2枚の画像間のエピポラ拘束を用いたキャリブレーション手法を提案している。Barreto ら¹⁶⁾は単一視点の全方位視覚センサに対するキャリブレーション手法を提案している。この手法では単一視点の位置と全方位画像中の絶対円錐を3つの直線から推定している。Ying ら¹⁷⁾もまた単一視点の全方位視覚センサに対するキャリブレーション手法を提案している。直線や球を幾何的な不変量として利用しているこれらの手法は、全方位視覚センサが単一視点である場合には有効であると思われるが、単一視点として設計されていない全方位視覚センサや、ミラーの設置不良がある全方位視覚センサは単一視点ではないので有効ではない。

単一視点でない全方位視覚センサや設置不良に対応したキャリブレーション手法も提案されている。Strelow ら¹²⁾の手法では、ミラーとカメラの位置関係について、回転と並進の両方をモデル化し、非線形最適化によってパラメータを推定している。この手法は、回転と並進の両方を推定できるという利点があるが、6自由度の非線形最適化であるため、初期値によっては正しい推定が得られない場合があるという問題点がある。

ミラーとカメラの関係からキャリブレーションを行う手法以外にも、画素と光線の間接関係を直接求める手法が提案されている。画素と光線の間接関係を直接求めるには1つの画素に対して空間中の点を2点以上観測する必要がある。Sturm ら¹⁸⁾はそのような問題をテンソルで表現している。この手法では、理論的には単一視点、非単一視点を問わずあらゆるカメラに適用可能であるが、各画素に対応した空間中の点をすべて観測することは難しく、実際には代表点から補間することになる。しかしながら、魚眼レンズのように歪みの大きい画像や、全方位画像の場合、広い空間を観測しなければならぬという点に、補間が難しいという問題があり、実際の応用は難しい。

本論文では、等方性（回転対称）ミラーと透視投影カメラからなる全方位視覚センサを対象としたキャリ

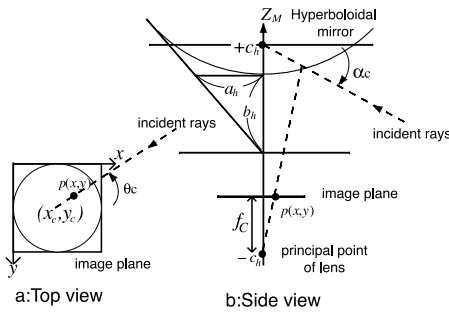


図 1 HyperOmni Vision の光学系
Fig. 1 Optics of HyperOmni Vision.

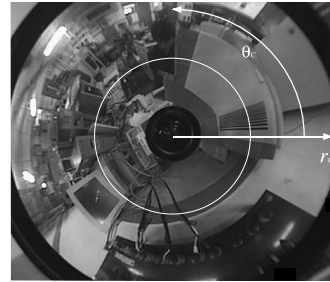


図 2 入力画像
Fig. 2 Input image.

レーション手法を提案する．全方位視覚センサのキャリブレーションにおける先行研究では，推定するミラー姿勢の自由度に制限があるという問題点や，非線形最適化問題であるため初期値によっては正しい推定が得られない場合があるという問題点があった．これに対し，提案手法はミラーの縁によってできる楕円を利用した幾何学的計算により 6 自由度の正確なミラーの姿勢を求めることができる．これは，円錐曲線を利用したカメラの外部パラメータ推定問題と同じであり，本手法では Wu ら⁷⁾ の提案する外部パラメータ推定手法を用いてミラーの姿勢推定を行っている．Wu らの手法によってミラーの姿勢推定を行うと解が 4 つ現れるが，提案手法ではその複数の解の中から正しい解を選択する手法についても述べる．実験は全方位視覚センサ HyperOmni Vision¹⁾ を対象として行った．ミラーの設置不良による誤差解析実験では，設置不良と光線の関係を明らかにする．シミュレーションによる姿勢推定実験では提案手法によって正しく姿勢推定が行われていることを確認する．評価実験では，合成画像と実画像を用い，設置不良の起きた全方位視覚センサによって撮影された画像に対して提案手法を用いてキャリブレーションを行い，画像変換と三次元復元によって提案手法が有効であることを示す．

2. 全方位視覚センサモデル

2.1 HyperOmni Vision

全方位視覚センサ HyperOmni Vision¹⁾ は図 1 に示すように，鉛直下向きの双曲面鏡と上向きカメラから構成される．双曲面鏡は

$$\frac{X_M^2 + Y_M^2}{a_h^2} - \frac{Z_M^2}{b_h^2} = -1 \quad (1)$$

$$c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$$

のように表され，2 つの焦点 $(0, 0, c_h)$ ， $(0, 0, -c_h)$ を持ち，カメラは双曲面の中心軸と同軸に主点が双曲面鏡のその一方の焦点 $(0, 0, -c_h)$ にくるよう配置されて

いる．このように配置することで，センサの周囲 360° を一度に撮像することができる．また，図 1 に示すように双曲面鏡のミラー焦点 $(0, 0, c_h)$ に向かって入ってくる光は，双曲面の特性によりミラーで反射された後，もう一方の焦点 $(0, 0, -c_h)$ に向かう．すなわち，画像上での任意の写像点 $p(x, y)$ と俯角 α_C ，方位角 θ_C (図 1) の関係は，

$$Y_M/X_M = -(y - y_c)/(x - x_c) \quad (2)$$

$$Z_M = \sqrt{X_M^2 + Y_M^2} \tan \alpha_C + c_h \quad (3)$$

$$\alpha_C = \tan^{-1} \frac{(b_h^2 + c_h^2) \sin \beta_C - 2b_h c_h}{(b_h^2 - c_h^2) \cos \beta_C} \quad (4)$$

$$\beta_C = \tan^{-1} \frac{f_C}{\sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}} \quad (5)$$

から一意に決まる．これらの式から，全方位入力画像 (図 2) を図 1 に示すようにミラー焦点を視点とした透視変換画像やパノラマ画像に容易に変換できるという特性を持つ．

しかし，この全方位視覚センサの単一視点という特性が成立するのは，ミラーとカメラの位置関係が理想的な場合だけである．ミラーの設置不良に対してこれまでは焦点距離 f_C や画像上の光軸の位置 x_c, y_c を試行錯誤しながら調整することで画像の歪みを抑えるというような方法がとられていた．しかし，ミラーの設置不良がある場合，図 1 に示す関係が成り立たないため式 (2) ~ (5) の式は正しくない．

2.2 ミラーの設置不良に対応した全方位視覚センサモデル

本節では，ミラーの設置不良に対応した全方位視覚センサモデルについて述べる．ミラーの設置不良に対応するため，本論文ではカメラモデルとミラーモデルを別々に考え，画像座標系，カメラ座標系，ミラー座標系の 3 つの座標系を用いた全方位視覚センサモデルを考える．このモデルではカメラに入る光線を各座標系へ変換しながら追跡することで画素と光線の対応を求めることができる．各座標系への変換は，画像座

標系とカメラ座標系の関係はカメラモデルで表され、カメラ座標系とミラー座標系の関係はミラーの姿勢によって表される。ミラー座標系ではミラーモデルによる光線の反射を計算することによって画素と光線の対応が得られる。以降では、ミラーの設置不良に対応した全方位視覚センサモデルで用いているカメラモデル、ミラーモデル、光線追跡について述べる。

2.3 カメラモデル

カメラモデルは透視投影カメラモデルとし、画像座標系の拡張ベクトル $\tilde{x} = (x, y, 1)^T$ とカメラ座標系 $O - X_C Y_C Z_C$ の関係は透視投影カメラモデルの内部パラメータ行列 K およびカメラ座標系 $O - X_C Y_C Z_C$ と画像座標系の関係は、次の式で表される。

$$\tilde{x} = sKX_C \quad (6)$$

$$K = \begin{bmatrix} f_C k_x & f_C k_s & x_{I0} \\ 0 & f_C k_y & y_{I0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 f_C は焦点距離、 k_x と k_y は x および y 方向のスケールファクタ、 k_s は切断係数、 (x_{I0}, y_{I0}) は画像中心の座標、 s はスケールファクタ、 X_C はカメラ座標系の座標である。カメラモデルは画像座標系とカメラ座標系の関係を表すことができればアフィンカメラモデルや平行投影カメラモデル等のカメラモデルでも問題ないが、3章で述べるミラーの姿勢推定を行う際に射影行列のランクが3である必要がある。

2.4 ミラーモデル

ミラーによる反射のモデルについて述べる。ミラー形状は双曲面とし、反射はミラー座標系 $O - X_M Y_M Z_M$ において考える。双曲面の式は、式(1)とする。ここで、双曲面ミラーは $(Z_M > 0)$ となる双曲面とする。ミラー座標系におけるカメラの主点を $F_M = (F_{MX}, F_{MY}, F_{MZ})^T$ とし、ミラー座標系におけるカメラからの視線の方向ベクトル $V_M = (V_{MX}, V_{MY}, V_{MZ})^T$ とすると、カメラからの視線は $F_M + k_M V_M$ で表され、双曲面ミラーにおけるカメラからの視線との交点 P_M は、

$$P_M = F_M + k_M V_M \quad (8)$$

で得られる。なお、 k_M は

$$k_M = \frac{-\beta_M \pm \sqrt{\beta_M^2 - \alpha_M \gamma_M}}{\alpha_M} \quad (9)$$

$$\alpha_M = \frac{V_{MX}^2 + V_{MY}^2}{a_h^2} - \frac{V_{MZ}^2}{b_h^2} \quad (10)$$

$$\beta_M = \frac{V_{MX} F_{MX} + V_{MY} F_{MY}}{a_h^2} - \frac{V_{MZ} F_{MZ}}{b_h^2} \quad (11)$$

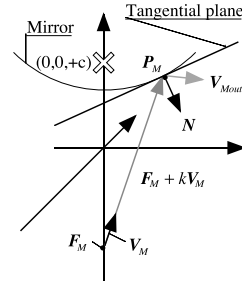


図3 ミラー座標系における反射

Fig. 3 Reflection in mirror coordinate system.

$$\gamma_M = \frac{F_{MX}^2 + F_{MY}^2}{a_h^2} - \frac{F_{MZ}^2}{b_h^2} + 1 \quad (12)$$

として得られる。ここで、交点 P_M における双曲面ミラーの法線ベクトル N_M を考える。図3に法線ベクトル N_M 、カメラからの視線 V_M 、カメラの主点 F_M 、方向ベクトル V_{Mout} 、交点 P_M の幾何学的関係を示す。ミラーの姿勢によっては、 P_M は2つ得られる場合があるが、次式の条件を満たす方を用いる。

$$(N_M, V_M) < 0 \quad (13)$$

ここで、 (\cdot) はベクトルの内積である。

ミラーによって反射されたベクトルを求めるには、まず、交点 P_M における接平面の法線ベクトル N_M を求める必要がある。式(1)から、双曲面

$$f(X_M, Y_M) = Z_M = \sqrt{b_h^2 \left(\frac{X_M^2 + Y_M^2}{a_h^2} + 1 \right)} \quad (Z_M > 0) \quad (14)$$

とし、その X_M, Y_M に関する偏微分が

$$f_{X_M} = \frac{b_h X_M}{a_h \sqrt{X_M^2 + Y_M^2 + a_h^2}} \quad (15)$$

$$f_{Y_M} = \frac{b_h Y_M}{a_h \sqrt{X_M^2 + Y_M^2 + a_h^2}} \quad (16)$$

となる。そして、交点 P_M における接平面の法線ベクトル N_M は、

$$N_M = (f_{X_M}(P_M), f_{Y_M}(P_M), -1) \quad (17)$$

となり、双曲面ミラーによって反射された視線は、

$$V_{Mout} = V_M - 2N_M(N_M, V_M) \quad (18)$$

となる。ここで、 V_M は入射してくるカメラからの視線であり、 V_{Mout} は反射された視線である。

2.5 光線追跡

光線追跡は図4に示すような画像座標系、カメラ座標系、ミラー座標系の3つの座標系を用いる。そして、カメラからの視線 V_C を座標変換することで追跡する。カメラからの視線 V_C は、ミラーの姿勢をも

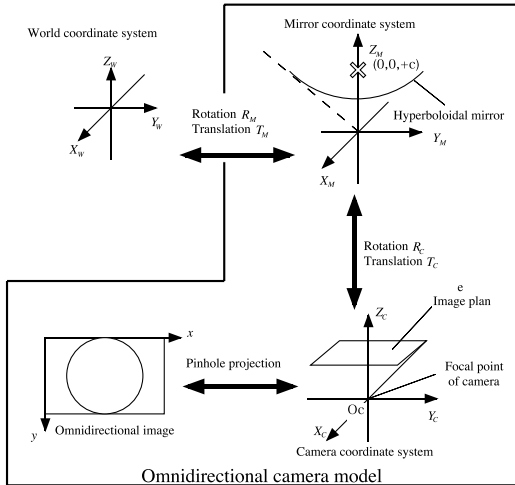


図 4 各座標系の関係

Fig. 4 Coordinate systems.

とした座標変換 R_C, T_C によって、次式によりミラー座標系に写される。

$$V_M = R_C V_C \quad (19)$$

$$F_M = R_C F_C + T_C \quad (20)$$

そして、2.4 節で説明したように、ミラーで反射されて、視点 P_M と、視線 V_{Mout} を得ることができる。世界座標系での視点 P_w と、視線 V_{Wout} で考えるには、

$$V_{Wout} = R_W V_{Mout} \quad (21)$$

$$P_W = R_W P_M + T_W \quad (22)$$

とすればよい。

3. ミラーの姿勢推定

ミラーの設置不良に対応した全方位視覚センサモデルにおいて最も重要であるミラーとカメラの位置関係を求める提案手法について述べる。本手法では、ミラーの姿勢推定に、画像中のミラーの縁つまりミラーが写っている部分とそうでない部分の境界線（図 5）によってできる楕円を利用する。この楕円を利用したミラーの姿勢推定では解が 4 つ得られるため、その解の中から正しい解を選択する手法についても述べる。

3.1 楕円を利用したミラーの姿勢推定

楕円を用いたミラー姿勢推定的前提条件は、カメラ内部行列 K のランクが 3 でそのパラメータが既知、つまり校正済みであることと、画像中のミラーの縁による楕円が検出可能で全方位視覚センサの半径 r が既知であることの 2 点である。これらの条件から、カメラモデルを 2.3 節で述べた透視投影カメラモデルとする。

ミラーの縁は画像中で楕円となり、その式は、

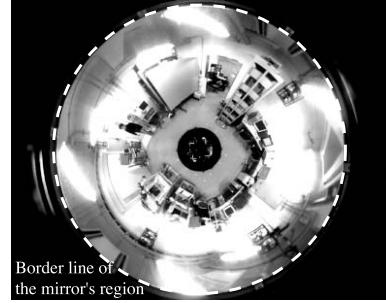


図 5 全方位画像中のミラーの縁（破線）

Fig. 5 Omnidirectional image and the borderline between mirror and non-mirror.

$$ax^2 + by^2 + 2fx + 2gy + 2hxy + c = 0 \quad (23)$$

となる。ここで、 (x, y) は画像中の座標である。式 (23) を 2 次形式で表現すると、

$$\tilde{x}^T Q_I \tilde{x} = 0 \quad (24)$$

となる。ここで、 Q_I は

$$Q_I = \begin{bmatrix} a & h & f \\ h & b & g \\ f & g & c \end{bmatrix} \quad (25)$$

である。式 (6) を式 (24) に代入すると、

$$s^2 X_C^T K^T Q_I K X_C = 0 \quad (26)$$

となる。ここで、

$$Q_e = K^T Q_I K \quad (27)$$

とする。そして、 Q_e を固有値分解することによって、

$$Q_e = V \Lambda V^T \quad (28)$$

となる。

ここで、 $Z = z_0$ 平面上にある半径 r 、中心 (x_0, y_0) の円を考える。Wu らの手法⁷⁾ によると、この円の二次形式は、

$$Q_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{-x_0}{z_0} \\ 0 & 1 & \frac{-y_0}{z_0} \\ \frac{-x_0}{z_0} & \frac{-y_0}{z_0} & \frac{x_0^2 + y_0^2 - r^2}{z_0^2} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$X^T Q_C X = 0 \quad (30)$$

となる。そして、 Z 軸が円錐曲線の中心を通る座標系（図 6 $O_E - X_E Y_E Z_E$ ）から、円錐を $Z = z_0$ で切断したときに円となる座標系、つまりミラー座標系（図 6 $O_M - X_M Y_M Z_M$ ）、への回転を考える。この回転を回転行列 U を用いて表すと

$$U^T Q_E U = k Q_C \quad (31)$$

となる。そして、式 (31) と式 (29) から、Wu らの手法を用いて解くと、 U が求まる。 U, V と各座標系の関係を図 6 に示す。

最後に、 U と r を式 (31) に代入すると、ミラー座標系におけるミラーの縁によってできる円の中心座標

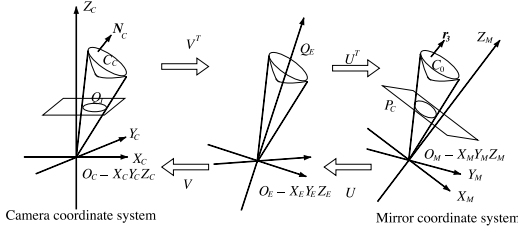


図 6 回転行列 U, V と座標系

Fig. 6 Relationships among coordinate systems and matrices.

$C_0 = [x_0, y_0, z_0]$ が求まる．そして，ミラー座標系からカメラ座標系への回転行列 R は

$$R = VU \quad (32)$$

となる．カメラ座標系におけるミラーの位置 C_C は $C_C = RC_0$ として得られる． R は回転行列なので，3つの直交基底ベクトル r_1, r_2, r_3 を用いて

$$R = [r_1 \ r_2 \ r_3] \quad (33)$$

のように表される，この r_3 がミラーの縁によってできる円を含む平面の法線ベクトルとなる．

3.2 解の選択

3.1 節で述べたように Wu^T の手法を用いて姿勢推定を行うと，付録 A の式 (56), (57), (58) における l, m の偶数，奇数の組合せによって得られる解が変わり，解が最大で 4 つ得られる．うち 2 つはカメラの裏側に位置するため容易に取捨選択が可能であるが，残りの 2 つはカメラの前側に位置している．本節では前面に位置する 2 つの解の中から正しい解を選ぶ手法について述べる．

解の選択では無限遠にある直線を写像した画素の光線を利用して解を評価し，正しい姿勢を表す解を選択する．評価には空間中の直線を写像した画素から追跡した光線によって平面がなされるという性質を利用する．

一般的な単一視点カメラの場合，主点 P と空間中の直線 L によって平面がなされる．空間中の直線 L を写像した画素 I_i に対応する光線上の点は主点 P と光線の方向ベクトル V_i によって $P + k_i V_i$ ($i = 0, 1, \dots$) として表され，ある k_i において，空間中の直線上にある．このとき平面の法線ベクトル N と光線の関係は，平面と原点の距離を S とし，

$$(P + k_i V_i, N) = S \quad (34)$$

となり，

$$(P, N) = S \quad (35)$$

と

$$(V, N) = 0 \quad (36)$$

を満たす．

設置不良のある全方位視覚センサの場合，単一視点でないため，

$$(P_i + k_i V_{Mout_i}, N_p) = S \quad (37)$$

という関係は成り立たないが，直線の位置が視点から無限遠にある場合， $k = \infty$ と見なすことができ，

$$(V_{Mout_i}, N) = 0 \quad (38)$$

という関係は成り立つ．この関係を解の選択に利用する．ミラーの位置と姿勢となる解が正しい場合，式 (38) を満たすが，正しくない場合，光線は異なった方向へ反射されるので，式 (38) を満たすとは限らない．設置不良と直線の位置関係によっては，正しくない解であっても式 (38) を満たす場合があるが，この場合については，本論文 4.4 節において実験および考察を行う．

3.1 節で得られる 4 つのミラー位置・姿勢のうち，カメラの前面に位置するものを p_i ($i = 1, 2$) とする．空間中の直線を L_η ($\eta = 1, \dots, N_\eta$) とし，これを写像した画素の集合を $I(L_\eta)$ とする．本手法では十分に遠い直線 L_η を写像した画素に対応する $V_{Mout}(p_i, I_\eta)$ ， $I_\eta \in I(L_\eta)$ について，

$$\sum_{I_\eta \in I(L_\eta)} (V_{Mout_i}(p_i, I_\eta), N(p_i, L_\eta))^2 \quad (39)$$

を最小とするような $N(p_i, L_\eta)$ を求めることで，各解に対する評価を行う．

$$A(p_i, L_\eta) = \begin{bmatrix} V_{Mout}(p_i, I_1)^T \\ \vdots \\ V_{Mout}(p_i, I_\eta)^T \\ \vdots \\ V_{Mout}(p_i, I_{N_\eta})^T \end{bmatrix} \quad (40)$$

$I_1, \dots, I_\eta, \dots, I_{N_\eta} \in I(L_\eta)$

として， $A(p_i, L_\eta)^T A(p_i, L_\eta)$ を固有値分解する．このとき得られる固有値 $\lambda_1(p_i, L_\eta)$ ， $\lambda_2(p_i, L_\eta)$ ， $\lambda_3(p_i, L_\eta)$ について， $\lambda_1(p_i, L_\eta) > \lambda_2(p_i, L_\eta) > \lambda_3(p_i, L_\eta)$ とすると， $N(p_i, L_\eta)$ は最小固有値 $\lambda_3(p_i, L_\eta)$ に対応する固有ベクトルにあたる．この最小固有値 $\lambda_3(p_i, L_\eta)$ を評価値とし，

$$p_s = \arg \min_{p_i \in \{p_1, p_2\}} \left[\sum_{\eta} \lambda_3(p_i, L_\eta) \right] \quad (41)$$

となる姿勢 p_s が正しい姿勢となる．

4. 実験

ミラーの設置不良による誤差解析実験，提案手法による姿勢推定精度に関する実験，および提案手法の評価実験を行った．実験では，双曲面ミラーのパラ

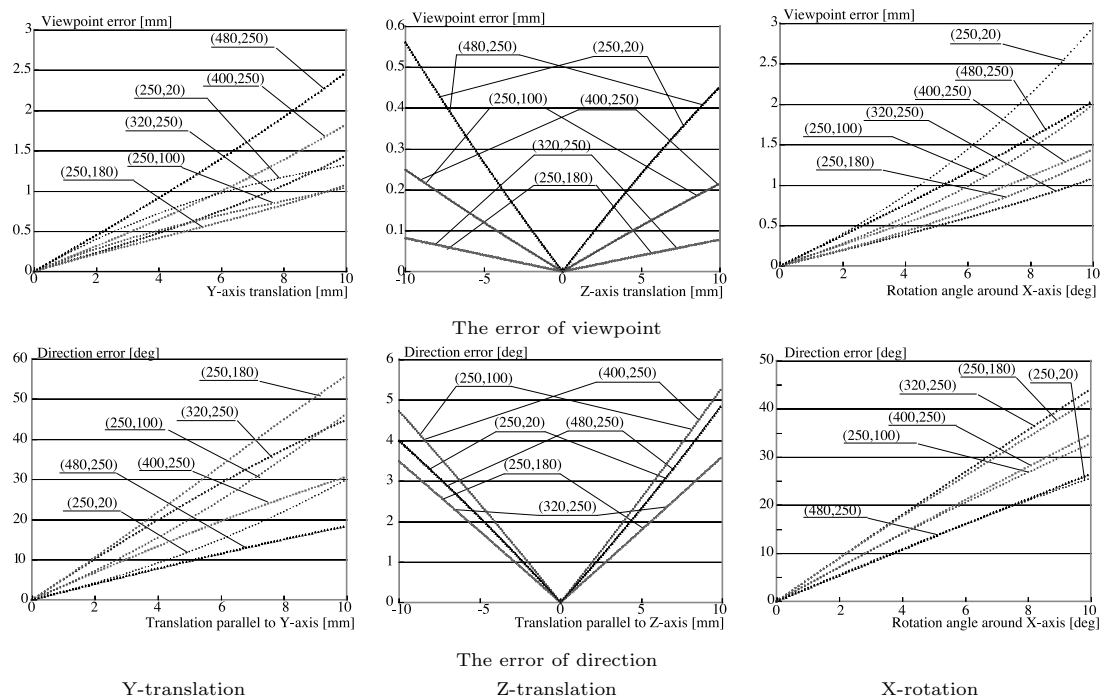


図 8 設置不良の変化と各誤差の関係

Fig. 8 Relation between the misalignment and the error variations.

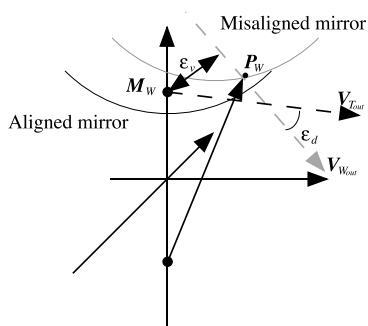


図 7 視点の誤差 ϵ_v と視線の誤差 ϵ_d

Fig. 7 The viewpoint error, ϵ_v and the direction error, ϵ_d .

メータとして TOM-02-0013 HyperOmni Vision (末陰産業) のパラメータを用い、合成画像のサイズは 500×500 pixel とした。実画像による実験では、上述ミラーとカメラ VX-2000 (SONY) からなる全方位視覚センサによって撮影した全方位画像を用いた。実画像による実験では、手で抽出した楕円画像に対して付録 B の手法によって楕円のパラメータを求めた。

4.1 全方位視覚センサの誤差解析

提示目的で全方位視覚センサを用いる場合の目安として、カメラとミラーの位置関係がずれた場合の誤差を解析した。実験は各軸に沿ってカメラの位置を動かし、真値を理想的な位置関係にある撮像系の視点と視

線として、その視線と視点の誤差をシミュレーション実験で調べた。実験では、視点の誤差 ϵ_v と、視線の誤差 ϵ_d という 2 つの誤差を求めている。 ϵ_v と ϵ_d は

$$\epsilon_v = \|M_W - P_W + V_{W_{out}}((-P_W, V_{W_{out}}) + (M_W, V_{W_{out}}))\| \tag{42}$$

$$\epsilon_d = \left| \cos^{-1} \left(\frac{|V_{T_{out}}| |V_{W_{out}}|}{(V_{T_{out}}, V_{W_{out}})} \right) \right| \tag{43}$$

として計算される。視点の誤差は図 7 に示すように、真値となるミラー焦点の位置と位置ずれが起きた場合の各視点と視線からなる直線との距離を視点の誤差とした。視線の誤差は、真値となる視線方向と位置ずれが起きた場合の視線方向の角度の差の絶対値を誤差とした。

設置不良の大きさと誤差の変化の関係についての実験結果を図 8 に示す。実験は、ミラーの位置を Z 軸方向、Y 軸方向に平行移動させた場合と、X 軸で回転させた場合について行っている。この実験では、平行移動に関しては 0.1 mm ずつ、回転については 0.1 度ずつ変化させてその誤差を計算した。観測点として、図 9 に示す 6 点を用いた。これらの結果から視点の誤差は画像の外側が大きく、視線の誤差は、画像中心の方が大きいことが分かる。Z 軸方向の移動による誤

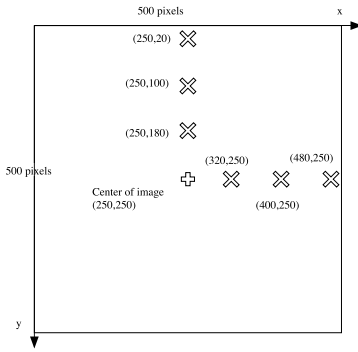


図 9 観測点
Fig. 9 The observation points.

差は比較的小さいことからミラーを設置する際にはカメラの光軸をミラーの回転軸と一致させることが重要であるといえる。全体的に視点の誤差が小さいことから、厳密には正確とはいえないが、単一視点と見なして透視投影のような単一視点画像に変換することが可能といえる。この画像変換に関しては、4.6 節で詳しく述べる。

提案手法ではミラーの姿勢を決定するために、カメラから遠い位置にある直線 L を用いている。カメラから空間中の直線までの距離を D とし、全方位画像の 1pixel の視野角のうち最小のものを θ_{min} とする。視点の誤差が 1pixel 以内の場合、すなわち

$$\varepsilon_v < D \tan \theta_{min} \quad (44)$$

となる解の選択に直線 L を用いることができると考えられる。1 pixel の最小視野角を 0.1 度程度とすると、視点の誤差が数 mm と小さいことから直線 L と全方位視覚センサの距離は数 m 程度でも解の選択に利用できると考えられる。

また、全方位カメラは一般的なカメラとは異なり、誤差の分布が一般でない。そこで、画像全体における誤差の分布について調べた。ミラーの位置を Z 軸方向、Y 軸方向に平行移動させた場合と、X 軸で回転させた場合についての画像上の誤差の分布を図 10 に示す。この図では黒くなるほど誤差が大きくなっている。この図から、視点の誤差は画像の外側から広がり、視線の誤差は、画像中心から広がっていることが分かる。

4.2 ミラーの姿勢推定実験

提案手法の推定精度について合成画像による実験を行った。実験では、任意の姿勢におけるミラーの縁の部分のみを写像した楕円画像を作成し、作成した楕円画像に対して式 (23) の a, b, c, f, g, h を推定した結果を用いた (付録 B 参照)。

ミラーの姿勢推定の結果を表 1 と図 11 に示す。こ

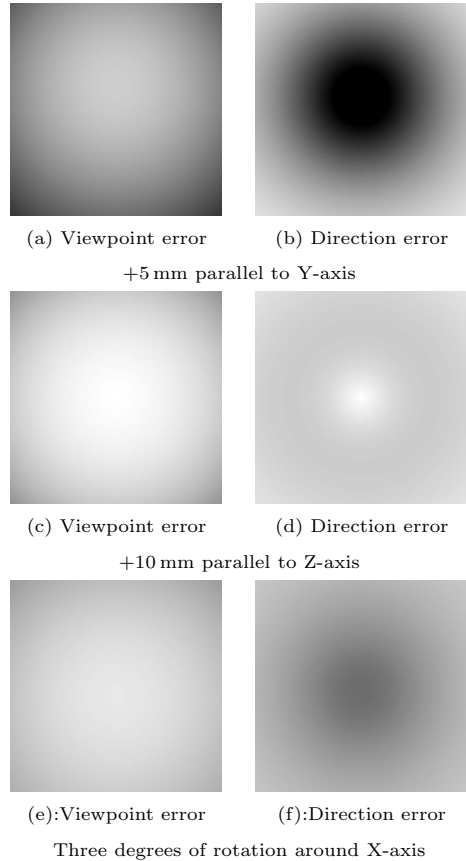


図 10 画像中の誤差の分布
Fig. 10 Distributions of errors

の実験では、平行移動の真値はミラーの縁によってできる円の中心 (図 6 C_C) とし、回転の真値はミラーの縁によってできる円を含む平面の法線ベクトル (図 6 N_C) とした。平行移動の誤差は平行移動の真値と推定したミラーの中心 C_C とのユークリッド距離とし、回転の誤差は真値と推定した r_3 との角度とした。表 1 から様々なミラーの設置不良に対してミラーの姿勢が推定できていることが分かる。図 11 はミラーの位置を Y 軸に沿って -10 mm から +10 mm まで変化させて、その姿勢を推定した結果である。図 11 の横軸は設置不良の度合いであり、図 11 (a) の縦軸はミラー位置の推定誤差、図 11 (b) の縦軸はミラーの向きの推定誤差である。この結果から、カメラの前面にある 2 つの解のうち 1 つが正しく推定している解であることが分かる。

4.3 楕円推定精度の影響

楕円推定の精度がミラーの姿勢推定に及ぼす影響について実験を行った。実験は式 (23) を

表 1 姿勢推定の精度

Table 1 Accuracy of mirror posture estimation.

Ground truth						Error	
Translation [mm]			Rotation			Translation [mm]	Rotation [deg]
X	Y	Z	X	Y	Z		
0	0	-0.5	0	0	1	0.0701	0.464
0	0	3.5	0	0	1	0.120	0.828
-4.5	0	0	0	0	1	0.108	0.800
-2	0	0	0	0	1	0.0775	0.554
0	0	5	0	0	1	0.0745	0.519
-4.38	2.19	-0.115	-0.0419	0.0209	0.999	0.0506	0.333
0	3.65	-0.0637	0	0.0349	0.999	0.0654	0.428

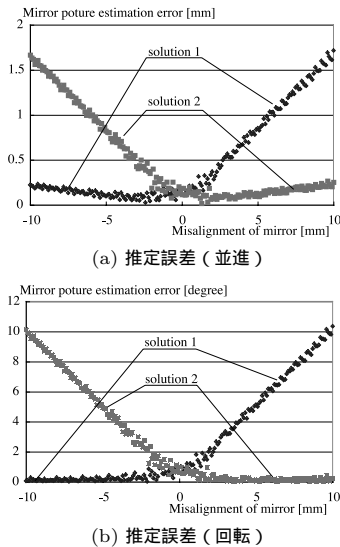


図 11 設置不良と推定誤差

Fig. 11 Relation between misalignment and estimation error.

$$\frac{\{(x - x_e) \cos \theta_e - (y - y_e) \sin \theta\}^2}{\alpha_e^2} + \frac{\{(x - x_c) \sin \theta_e - (y - y_c) \cos \theta\}^2}{\beta_e^2} = 1 \quad (45)$$

と変形して、パラメータを変化させることで楕円推定誤差を与えた。変化させるパラメータは、離心率の変化として α_e を変化させ、楕円の位置の変化として y_e を変化させた。実験結果を図 12 に示す。

実験結果から α_e の変化が姿勢推定の精度に大きく影響していることが分かる。特にミラーの回転に対して影響が大きいことが分かる。 y_e の変化については多少の影響はあるものの α_e ほどではないことが分かる。このことから、提案手法によって全方位視覚センサのキャリブレーションを行うためには、ミラーの外縁が写像された楕円の推定を正確に行う必要があるといえる。特に、楕円の形状については正確に求めなくてはならないといえる。

4.4 解の選択と直線の関係

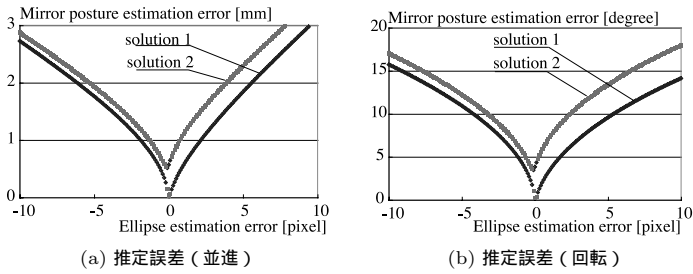
提案手法では解の選択に空間中の直線と光線との関係を用いているが、ミラーのずれ位置によっては正しくない解であっても空間中の直線を通る場合が考えられる。本節では解の選択において用いる直線の位置と評価値の関係を調べた実験について述べる。

Wu らの手法によって得られる 4 つの解のうち、2 つはカメラの裏面に位置し、残りの 2 つがカメラの前面に位置する。実験ではこのカメラの前面に位置する 2 つの解 p_1, p_2 の評価値となる固有値について調べた。実験で得られた 2 つの解の固有値の差とミラーの位置の関係を図 13 に示す。実験は合成画像で行った。 X_c 軸にそってミラーを動かす、空間中の直線 L_1 から L_8 (図 14) について 2 つの解の固有値 $\lambda_3(p_1, L_\eta)$, $\lambda_3(p_2, L_\eta)$ を求めた。これは X_c 軸に沿って不良に設置された状態を意味する。図 13 の縦軸は 2 つの固有値の差 $\lambda_3(p_1, L_\eta) - \lambda_3(p_2, L_\eta)$ であり、横軸は X_c 軸方向へのミラーの移動量である。

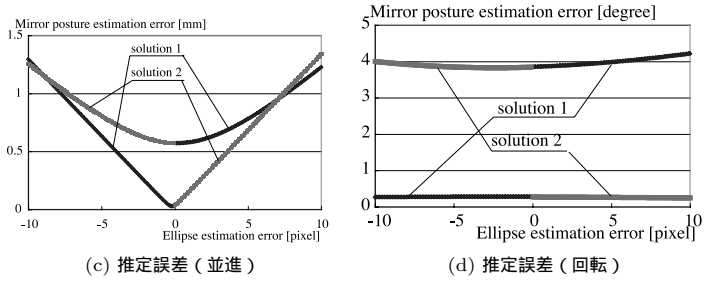
図 13 の結果から、ミラーの移動方向にある直線 (L_3 と L_7) の場合、固有値の差が少ないことが分かる。実画像で実験を行う場合、直線検出や楕円検出の誤差が考えられるので、ミラーの移動方向と同じ方向にある直線だけを用いて解の選択を行うと間違った解を選択するおそれがある。これを避けるために、直線は複数用い、その平均によって解を選択するなどし、また 1 方向に偏ることなく直線を用いる必要があるといえる。

4.5 ミラー姿勢推定精度の評価

提案手法のように設置不良によって非単一視点となった全方位視覚センサのキャリブレーション手法に Strelow¹²⁾ らの手法がある。本節では Strelow らと同様に実験を行い、その精度を比較する。Strelow¹²⁾ らは推定したミラーの姿勢を用いてミラーの頂点を写像し、その誤差によって姿勢推定の精度を評価している。Strelow らによると、誤差は 4.7 pixel から 6.0 pixel であった。Strelow らと同様に実画像を用いてミラーの姿勢推定精度を評価したところ、提案手法による誤



α_e を変化させた場合



y_e を変化させた場合

図 12 楕円推定誤差が姿勢推定に与える影響

Fig. 12 Effect of ellipse estimation error on mirror posture estimation.

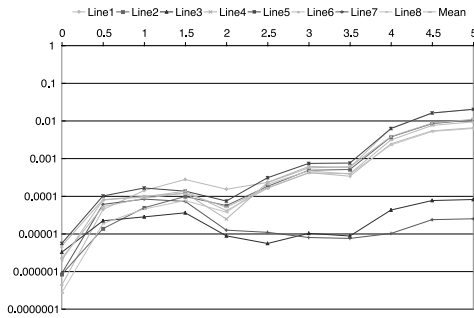


図 13 解の選択における設置不良と直線の関係

Fig. 13 Relation between the lines and misalignment.

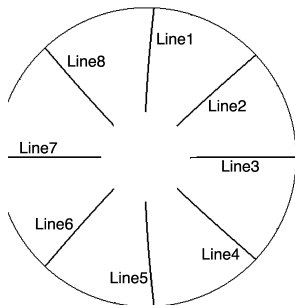


図 14 図 13 で用いた直線 (X_c 方向へ 5 mm 移動)

Fig. 14 Lines for Fig. 13 (The misalignment is 5 mm parallel to X_c).

は正しい推定を得られない場合があるという問題点を回避しつつ良い推定精度を得ることが可能であるといえる。

4.6 画像変換による評価

本節では提案手法の効果を変換画像によって比較する。ミラーの設置不良にもかかわらず、理想的な位置にミラーがあるとして全方位画像から透視投影画像やパノラマ画像へ変換すると、画像に歪みや傾きが生じる。全方位視覚センサのミラーに設置不良がある場合、HyperOmni Vision の単一視点という特性は失われるので厳密には透視投影へ変換することはできないが、単一視点でないことによる影響が最も少ない点を視点とすることで透視投影画像やパノラマ画像といった単一視点画像へ変換できる。

単一視点画像の投影中心は、4.1 節の実験結果から視点の誤差が数 mm と少ないので各光線からの距離の二乗和が最も小さくなる点を投影中心とする。投影中心は次のようにして求めた。ある空間中の点 F から提案手法によって得られる各画素 $p(x, y)$ と対応する視点 $P_{(x,y)}$ と視線 $V_{(x,y)}$ へのベクトル $E_{(x,y)}$ は、

$$E_{(x,y)} = F - P_{(x,y)} - \frac{V_{(x,y)}(F - P_{(x,y)}, V_{(x,y)})}{(V_{(x,y)}, V_{(x,y)})} \quad (46)$$

差は 3.86 pixel であった。このことから、提案手法は解法が非線形最適化問題となっていて初期値によって

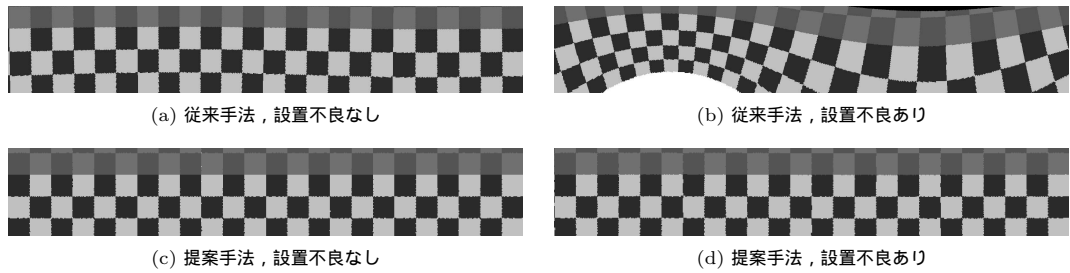
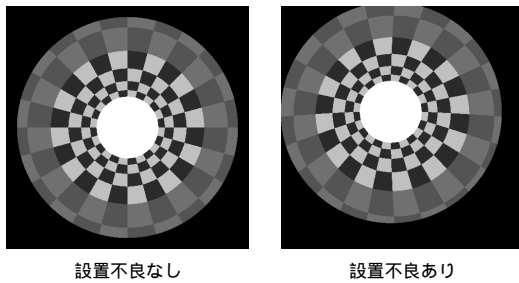


図 16 パノラマ変換画像

Fig. 16 Comparison of panorama images.

図 15 全方位入力画像
Fig. 15 Input image.

となる．上述の投影中心は $\sum_{(x,y)} (E_{(x,y)}, E_{(x,y)})$ を最小にする F である．この F は、 $\nabla \sum_{(x,y)} (E_{(x,y)}, E_{(x,y)}) = 0$ となる点とすることで求められる．

このようにして得られた F を視点として、画像変換を行った．画像変換は、視点 F から F を投影中心とした投影面の各画素 $p'(u, v)$ へのベクトル $V_{(u,v)}$ から、 $\frac{V_{(x,y)} \cdot V_{(u,v)}}{|V_{(x,y)}| |V_{(u,v)}|}$ が最大となる $p(x, y)$ の画素値を $p'(u, v)$ の画素値とすることで行った．

合成画像による実験で提案手法の有効性を示す．実験に用いた画像は、設置不良なしと設置不良あり（図 15）の 2 つである．それぞれの元画像に対して 2.1 節で述べた数式を用いて画像を変換する従来手法によるパノラマ画像と、提案手法によるキャリブレーションの結果を用いてパノラマ画像に変換した結果を図 16 に示す．従来手法では設置不良がない場合は問題なく変換できているが、設置不良がある場合は明らかに歪んでいることが見てとれる．提案手法を用いた場合、設置不良があっても設置不良がない場合とほぼ同様の画像に変換できていることが分かる．このことから、提案手法は有効であるといえる．

全方位実画像（図 17(a)）から提案手法によるキャリブレーション結果を用いて透視投影画像へ変換した画像を図 17(d) に示す．実画像での実験では、手で楕

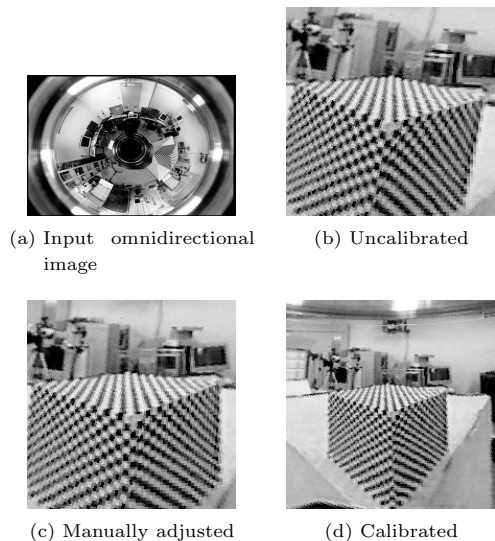


図 17 全方位画像とその透視投影変換画像

Fig. 17 Omnidirectional image and the transformed perspective view.

円を抽出したのち、楕円のパラメータを推定した（付録 B 参照）．キャリブレーションを行わずに、式 (2)、(5) を用いて透視投影画像等へ変換を行う場合、中心の位置（図 1 (x_e, y_e) ）と焦点距離（図 1 f_c ）を調整することでミラーの設置不良による画像の歪みを補正されていた．キャリブレーション結果を用いずに透視投影画像へ変換した画像を図 17(b) と (c) に示す．図 17(c) の方が、比較的歪みや傾きが少ないように f_c と (x_e, y_e) が調整されているといえる．しかし、このような調整を行うには、パラメータ調整の試行錯誤が必要であるうえ、正確に調整することが難しい．

実験結果から、キャリブレーション結果を用いずに透視投影変換した画像では傾きや歪みが生じているが、キャリブレーション後ではほぼなくなっている．このことから、提案手法は有効であるといえる．また、提案手法が上述のようなパラメータ調整の試行錯誤を行

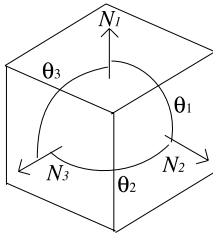


図 18 立方体と法線ベクトル
Fig.18 Cube and normal vector.

表 2 各法線ベクトル間の角度
Table 2 Angles between each normal vector.

	θ_1 [deg]	θ_2 [deg]	θ_3 [deg]
Uncalibrated	58.4	88.1	126.9
Manually adjusted	81.4	79.3	134.8
Calibrated	84.9	89.9	82.9

わなくて済むという利点もある。

4.7 3D 復元による評価

3次元復元によって提案手法の有効性を示す。実験では図 17 (b), (c), (d) の画像を用いて画像中の立方体 (一辺 10 cm) の各平面の姿勢を求め、各法線ベクトル間の角度によって評価を行った。正確に復元できていれば各法線ベクトル間の角度は 90 度になる。各法線ベクトルを図 18 に示すようにとり、評価値となる各法線ベクトル間の角度を図 18 の $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ とした。各平面の 3次元復元から得られた各法線ベクトル間の角度を表 2 に示す。3次元復元には Abidi ら¹⁹⁾ の手法を用いた。実験結果から、どの角度についても提案手法が最も推定精度が良いことが分かる。この結果から、提案手法が実際の設置不良に対して有効であるといえる。

5. おわりに

本論文では、等方性ミラーと透視投影カメラからなる全方位視覚センサのキャリブレーション手法を提案した。提案手法は全方位画像上に映るミラーの縁を利用してミラーの姿勢推定を行うことでキャリブレーションを行っている。ミラーの姿勢推定は円錐曲線を用いたカメラの外部パラメータ推定の応用であり、6自由度のミラーの姿勢を正確に求めることができる。本手法では Wu ら⁷⁾ の手法を用いた。Wu らの手法は複数の解が得られるが、提案手法では十分に遠い直線を利用して正しい解を選択する方法について提案した。さらに、本論文ではミラーの設置不良について誤差解析実験を行い、ミラーの設置不良と光線の変化について調べ、視点の誤差が少ないことから透視投影等の単一視点へ変換することが可能であること示した。

提案手法の評価実験では、実画像と合成画像を用いた実験で画像変換と三次元復元を行い、提案手法の有効性を確認した。

謝辞 本研究の一部は独立行政法人情報通信研究機構「民間基盤技術研究促進制度」の援助、財団法人栢森情報科学振興財団の平成 16 年度研究助成を受けた。

参考文献

- 1) Yamazawa, K., Yagi, Y. and Yachida, M.: Omnidirectional imaging with hyperboloidal projection, *IROS*, Vol.2, pp.1029–1034 (1993).
- 2) Nayar, S.K.: Catadioptric omnidirectional camera, *Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.482–488 (1997).
- 3) Gaspar, J., Decco, C., Okamoto Jr., J. and Santos-Victor, J.: Constant resolution omnidirectional cameras, *3rd Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.27–34 (2002).
- 4) Hicks, R. and Perline, R.: Equi-areal catadioptric sensors, *3rd Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.13–18 (2002).
- 5) Swamiinathan, R., Grossberg, M.D. and Nayer, S.K.: A perspective on distortions, *Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.2, pp.594–601 (2003).
- 6) Lenz, R. and Tsai, R.: Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3-d machine vision metrology, *PAMI*, Vol.10, No.5, pp.713–720 (1988).
- 7) Wu, H., Chen Q. and Wada, T.: Homography from conic intersection: Camera calibration based on arbitrary circular patterns, *IPSP SIG Technical Report CVIM*, 139, SIG139(CVIM) (2003).
- 8) Yang, C., Sun, F. and Hu, Z.: Planar conic based camera calibration, *Proc. IEEE International Conference on Pattern Recognition*, Vol.1, pp.555–558 (2000).
- 9) Srinivasan, M.V.: A new class of mirrors for wide angle imaging, *Omnivis 2003: Workshop on Omnidirectional Vision and Camera Networks* (2003).
- 10) Yagi, Y. and Yachida, M.: Real-time generation of environmental map and obstacle avoidance using omnidirectional image sensor with conic mirror, *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.160–165 (1991).
- 11) Kang, S.B.: Catadioptric self-calibration, *Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.1, pp.201–207 (2000).
- 12) Strelow, D., Mishler, J., Koes, D. and Singh, S.: Precise omnidirectional camera calibration,

Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, Vol.1, pp.689-694 (2001).

- 13) Aliaga, D.G.: Accurate catadioptric calibration for real-time pose estimation of room-size environments, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.1:127-134 (2001).
- 14) Geyer, C. and Daniilidis, K.: Paracatadioptric camera calibration, *PAMI*, Vol.24, No.5, pp.687-695 (2002).
- 15) Micusik, B. and Pajdla, T.: Para-catadioptric camera auto-calibration from epipolar geometry, *Proc. Asian Conference on Computer Vision*, Vol.2, pp.748-753 (2004).
- 16) Barreto, J.P. and Araujo, H.: Geometric Properties of Central Catadioptric Line Images, *Proc. European Conference on Computer Vision*, Vol.4, pp.237-251 (2002).
- 17) Ying, X. and Hu, Z.: Catadioptric Camera Calibration Using Geometric Invariants, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.1351-1358 (2003).
- 18) Sturm, P. and Ramalingam, S.: A generic concept for camera calibration, *ECCV*, Vol.2, pp.1-13 (2004).
- 19) Abidi, M.A. and Chandra, T.: A new efficient and direct solution for pose estimation using quadangular targets: Algorithm and evaluation, *PAMI*, Vol.17, No.5, pp.534-538 (1995).

付 録 A

W_u ら⁷⁾の手法による回転行列 U の導出について述べる。

Q_e は $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ という3つの固有値を持つ。これらの固有値は、次の条件を満たすものとする。

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 < 0 \quad (47)$$

$$\lambda_1 \lambda_2 > 0 \quad |\lambda_1| > |\lambda_2| \quad (48)$$

ここで、 v_1, v_2, v_3 は、各固有値に対応する固有ベクトルである。これらの固有値と固有ベクトルによって Q_e は、式(28)のように分解される。ここで、 V は、

$$V = [v_1, v_2, v_3] \quad (49)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (50)$$

である。そして、

$$\frac{1}{\alpha^2} = -\frac{\lambda_1}{\lambda_3} \quad (51)$$

$$\frac{1}{\beta^2} = -\frac{\lambda_2}{\lambda_3} \quad (52)$$

のように α, β を定義すると、 Q_E は

$$Q_E = -\frac{1}{\lambda_3} \Lambda = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\beta^2} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (53)$$

となる。

U は回転行列なので、3つの直交基底ベクトル u_1, u_2, u_3 で $U = [u_1, u_2, u_3]$ のように表すことができる。各直交基底ベクトルは $u_i = [u_{ix}, u_{iy}, u_{iz}]^T$; ($i = 1, 2, 3$) であり、

$$U^T U = I \quad (54)$$

という条件を満たす。また、式(31)から、

$$\frac{1 + \alpha^2}{\alpha^2} u_{1x}^2 + \frac{1 + \beta^2}{\beta^2} u_{1y}^2 - \frac{1 + \alpha^2}{\alpha^2} u_{2x}^2 - \frac{1 + \beta^2}{\beta^2} u_{2y}^2 = 0 \quad (55)$$

が得られる。式(55)と(54)から、

$$u_1 = \begin{bmatrix} \delta \cos \theta \\ \sin \theta \\ (-1)^{l-m} \sqrt{1 - \delta^2} \cos \theta \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$u_2 = \begin{bmatrix} (-1)^m \delta \sin \theta \\ -(-1)^m \cos \theta \\ (-1)^l \sqrt{1 - \delta^2} \sin \theta \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$u_3 = \begin{bmatrix} (-1)^l \sqrt{1 - \delta^2} \\ 0 \\ -(-1)^m \delta \end{bmatrix} \quad (58)$$

が得られる。ここで、 δ は、

$$\delta = \sqrt{\frac{1 + 1/\beta^2}{1 + 1/\alpha^2}} \quad (59)$$

であり、 θ は任意の実数であり、 l と m は、任意の整数である。以上のようにして回転行列 U を求めることができる。

付 録 B

画像中の楕円パラメータ推定について述べる。画像中で楕円をなす画素を $I(x_k, y_k)$ ($k = 1 \dots N$) とすると、

$$AB = C \quad (60)$$

$$A = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & 2x_1 & 2y_1 & 2x_1 y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N^2 & y_N^2 & 2x_N & 2y_N & 2x_N y_N \end{bmatrix} \quad (61)$$

$$B = [a \quad b \quad f \quad g \quad h]^T \quad (62)$$

$$C = \underbrace{[-c, \dots, -c]^T}_N \quad (63)$$

として表される。ここで、 $c = 1$ とすると、

$$B = [A^T A]^{-1} A^T C \quad (64)$$

として楕円のパラメータが求められる．

(平成 17 年 5 月 11 日受付)

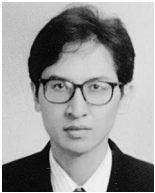
(平成 17 年 11 月 18 日採録)

(担当編集委員 井宮 淳)



間下 以大

平成 13 年大阪大学基礎工学部システム工学科卒業．平成 15 年同大学大学院基礎工学研究科修士課程修了．現在，同大学院博士課程在学中．コンピュータビジョン，パターン認識に興味を持つ．日本ロボット学会，電子情報通信学会，ヒューマンインタフェース学会各学生会員．



岩井 儀雄（正会員）

平成 4 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業．平成 6 年同大学大学院基礎工学研究科修士課程修了．平成 9 年同大学院基礎工学研究科博士課程修了．同年同大学院基礎工学研究科助手．平成 15 年同大学院基礎工学研究科助教授．平成 16 年 5 月～17 年 3 月英国ケンブリッジ大学客員研究員．コンピュータビジョン，パターン認識に関する研究に従事．博士（工学）．IEEE，電子情報通信学会，日本ロボット学会各会員．



谷内田正彦（正会員）

昭和 46 年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了．同年同大学基礎工学部制御工学科助手．同助教授を経て同学部情報工学科教授，平成 6 年同学部システム工学科教授．現在，同大学大学院基礎工学研究科教授．昭和 42～43 年デンマーク原子力研究所留学．昭和 47～48 年米イリノイ大学にて Research Associate．昭和 55～56 年西独ハンブルグ大学 Research Fellow．昭和 57 年米ミネソタ大学 CDC Professor．ロボット学会，人工知能学会等会員．著書『ロボットビジョン』（昭晃堂，大川出版賞受賞），『コンピュータビジョン』（丸善，編著）等．コンピュータビジョン，画像処理，人工知能，移動ロボット等の研究を行っている．工学博士．