

## 任意のカメラ配置におけるステレオ視とステレオカメラ校正

蚊野 浩<sup>†</sup> 金出 武雄<sup>††</sup>

A Stereo Method with Arbitrary Positioned Cameras and Stereo Camera Calibration

Hiroshi KANO<sup>†</sup> and Takeo KANADE<sup>††</sup>

あらまし ステレオ視における重要な問題にステレオ画像対からの対応点探索とステレオカメラ校正がある。対応点探索はエピポーラ線と呼ばれる直線上を探索することにより実行されるが、カメラの視点を任意の位置・方向に置くことを許した場合、その幾何学的条件が複雑になる。本論文では対応点候補の抽出が、3次元空間に仮想的に配した一連の平面による基準カメラ画像から検査カメラ画像への射影変換を用いることで簡単に記述できることを示す。またこの性質を利用したステレオカメラの校正法として、シーン中に存在する二つの平面をステレオカメラに観察させ、一連の射影変換行列を内挿および外挿する方法を提案する。本ステレオカメラ校正法は特別な校正パターンを必要とせず、カメラパラメータを明示的に求める必要もないため非常に簡便である。しかも、ピンホールカメラモデルに基づく従来のステレオカメラ校正法に比較して精度が優れている。

キーワード ステレオ視, 射影変換, ステレオカメラ校正

## 1. ま え が き

ステレオ視は3次元のシーンを複数の視点から撮影した画像を用い、3角測量の原理によりシーン中の各点までの距離を測定する技術である。ステレオ視は非接触かつ受動的に距離計測が可能であるため、移動ロボットにおける3次元視覚センサや3次元シーンのモデリングにおける入力部として期待される技術である。しかし、ステレオ画像対における対応点問題の困難さと計算量の膨大さから実用化が遅れていた。ステレオ視のこの問題に対して、奥富・金出[1]は複数の基線長を利用したマルチベースラインステレオ法により、偽対応の可能性を減少させると共に測定精度を向上させることが可能であることを示した。更に金出・木村[2]はマルチベースラインステレオ理論をもとに専用ハードウェアであるビデオレートステレオマシンを開発し、実時間性を要求される応用に対してもステレオ視は実用性があることを示した。

ステレオ視における対応点探索は、基準カメラの各

観察点に対して検査カメラ画像中のエピポーラ線と呼ばれる直線上を探索することにより行う。最も単純なステレオカメラ配置である標準ステレオカメラモデル[3]の場合、カメラ画像の水平走査線がエピポーラ線に一致し、探索が容易になる。カメラ間に輻輳があるような一般のカメラ配置に対しても、カメラ画像を幾何補正することにより等価的に標準ステレオカメラモデルに変換することができる。輻輳カメラによるマルチベースライン法の場合、各ステレオペアごとに画像の幾何補正をほどこし、その結果得られる視差を用いることで距離情報を統合することができる[4]。しかし、任意のカメラ配置におけるマルチベースラインステレオ法にこのような方法を適用することは計算量が多くなり、また距離情報が統合される幾何学的条件を見通しよく表現することができない。

輻輳ステレオカメラ画像から標準ステレオカメラ画像に変換するためにはカメラの内部パラメータと外部パラメータが必要である。これらのカメラパラメータは3次元位置が既知の参照点とそのカメラ座標の対応から求めることができる[5], [6]。この方法は精密な校正パターンや正確な位置決め機構が必要であり、実現が容易でない。また、新しいステレオカメラ校正法としてステレオカメラ対のエピポーラ幾何条件だけを求める弱カメラ校正[7], [8]がある。この方法は特別な

<sup>†</sup> 三洋電機株式会社メカトロニクス研究所, 枚方市  
Mechatronics Research Center, Sanyo Electric Co., Ltd., Hirakata-shi, 573  
Japan

<sup>††</sup> カーネギーメロン大学コンピュータ科学科, 米國  
School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA  
15213, USA

校正パターンを用いることなくステレオカメラ校正が行えるという特徴があるが、マルチベースラインステレオ法に適用できるかどうかは不明である。

本論文では任意のカメラ配置を許したステレオ視において、エピポーラ線上から対応点候補を抽出することが3次元空間に仮想的に配した一連の平面による基準カメラ画像から検査カメラ画像への射影変換により実現されることを示す。また、これら一連の射影変換を簡便に導くステレオカメラ校正法として、シーン中に存在する二つの平面をステレオカメラに観察させるだけで可能な方法を提案する。これらの平面は特別な校正用パターンである必要がなく、十分な数の特徴点が画面全体に存在すればよい。

以下、2. ではステレオ視による距離計測技術を示す。3. で任意のカメラ配置におけるステレオ視の性質を明らかにする。4. では2平面を用いたステレオカメラの校正を示し、従来のカメラ校正法との比較を含んだ実験結果を5. に示す。

## 2. ステレオ視による3次元シーンの計測

### 2.1 計測原理

図1に基準カメラ、検査カメラと呼ぶ2台のカメラを用いて3次元シーンを観察する状態を示す。3次元シーン中の点Pが基準カメラによって $m_b$ に観察され、検査カメラによって $m_i$ に観察されたことがわかれば、両カメラのレンズ中心とそれぞれの観察点を結ぶ直線の交点として、点Pの3次元位置を求めることができる。しかし、基準カメラと検査カメラの2枚の画像のみから、基準カメラの観察点 $m_b$ に対応する検査カメラの観察点が $m_i$ であることを判断するのはそれほど容易な問題ではない。これをステレオ視における対応点問題と呼ぶ。

図1のステレオカメラの配置関係から、両カメラのレンズ中心と二つの観察点 $m_b, m_i$ は同一平面上に存在することがわかる。すなわち、 $m_i$ は両カメラのレンズ中心と基準カメラの観察点 $m_b$ で決まる平面と検査カメラの画像面が交わる直線上に存在する。この直線はエピポーラ線と呼ばれ、ステレオ画像対における対応点探索がエピポーラ線上に拘束されることをエピポーラ拘束条件と呼ぶ。基準カメラと検査カメラの幾何学的な配置が既知あれば、基準カメラの各観察点ごとに検査カメラの画像面上のエピポーラ線求め、そのエピポーラ線上で対応点探索を行うことにより、対応点探索のための計算量を削減することができる。

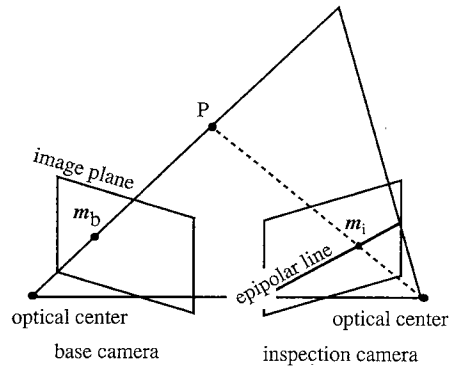


図1 ステレオ視による3次元シーンの計測  
Fig.1 Measurement of three dimensional scene by stereo vision.

一般には、内部パラメータが等しい2台のカメラをお互いの光軸が平行でかつ画像面が同一平面上に存在するように配置する場合が多い。このようなカメラ配置により、画像をラスタ走査する場合の走査線とエピポーラ線を一致させることができ、更に計算量を削減することが可能である。このように配置されたステレオカメラを標準ステレオカメラモデルと呼ぶ。

### 2.2 カメラパラメータ

ステレオ視による3次元シーンの計測から絶対的な距離を得るためにはカメラパラメータを知る必要がある。カメラパラメータは個々のカメラに固有の特性である内部パラメータと、3次元空間におけるカメラの位置を指定する外部パラメータに分類される。

本論文ではカメラをレンズひずみのないピンホールカメラでモデル化する。ピンホールカメラの内部パラメータを焦点距離 $f$ 、水平方向画素サイズ $s_x$ 、垂直方向画素サイズ $s_y$ 、画像中心 $(x_0, y_0)$ で表現する。焦点距離、水平画素サイズ、垂直画素サイズがすべて1、画像中心 $(0,0)$ のカメラを正規化カメラとしたとき、内部パラメータを、図2および式(1)で表されるように、正規化カメラ座標をカメラ座標に変換する行列として定義することができる。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{s_x} & 0 & x_0 \\ 0 & \frac{f}{s_y} & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = N \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式(1)において $\alpha_x = f/s_x$ 、 $\alpha_y = f/s_y$ と置き換えることにより内部パラメータを未知数4の行列として表現できる。

一方、外部パラメータは3次元ワールド座標系からカメラ中心座標系への回転および並進で記述される。

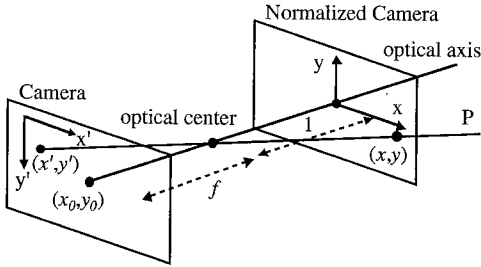


図2 内部パラメータ  
Fig.2 Intrinsic parameters.

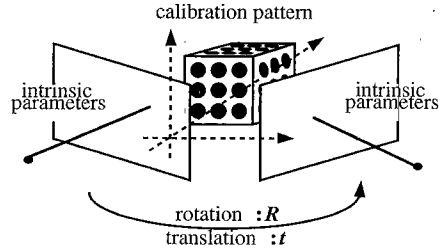


図3 強ステレオカメラ校正  
Fig.3 Strong stereo camera calibration.

ステレオカメラシステムにおいて1台のカメラを基準カメラ, それ以外のカメラを検査カメラと呼ぶことにする. 基準カメラのレンズ中心を原点とす3次元座標系をワールド座標系にとり, 光軸方向をZ軸, 画素の水平方向をX軸, 垂直方向をY軸としたとき, ワールド座標系から検査カメラ中心の座標系への運動パラメータである回転行列 $R$ および並進ベクトル $t$ が検査カメラの外部パラメータである.

このように一対のステレオカメラのカメラパラメータはそれぞれのカメラの内部パラメータと, カメラ対の相対的な位置関係である外部パラメータにより記述される.

### 2.3 ステレオカメラ校正

ステレオカメラシステムの幾何学的な配置を正確に求めることをステレオカメラ校正と呼ぶ. 一般にステレオカメラ校正は, 2.2で述べた内部パラメータおよび外部パラメータなどを求めることであり, 観察されたステレオ画像対から絶対的な3次元位置を求めることを可能にする. 一方新しいステレオカメラ校正法として, 3次元シーンの相対的な位置関係のみを計測可能とするステレオカメラ校正法[7], [8], [12]が知られている. これらの2者を区別するために, 前者を強ステレオカメラ校正, 後者を弱ステレオカメラ校正と呼ぶ. 本論文で提案するステレオカメラ校正法は両者の中間的な方法であるので, 両者について簡単に説明する.

強ステレオカメラ校正法はさまざまな方法が知られているが, レンズひずみを扱わない場合は次のように行うことができる(図3を参照). (1) 3次元空間における位置が既知の多数の参照点と, そのカメラ画像における対応関係から, 3次元ワールド座標を2次元カメラ座標に変換する $3 \times 4$ の行列 $P$ を最小2乗近似により求める. (2) 行列 $P$ をカメラの内部パラメータ行列 $N$

と外部パラメータである回転行列 $R$ , 並進ベクトル $t$ に分解する. (3) 各カメラごとに得られる外部パラメータからステレオカメラ対の相対的な回転および並進を求める. この方法を実行するためには正確な位置に参照点が印刷された校正パターンや参照点を正確に位置決めするための機構が必要である.

弱ステレオカメラ校正は通常の3次元シーンを観察したステレオ画像対を用いる. 強校正と異なり, 観察されたシーンに関する先験的な知識は必要ない. 必要な処理はステレオ画像対から対応点を抽出することだけである. もちろんこの段階ではエピポーラ拘束条件は使えないので, 画面全体を探索することで対応点集合を取得する. 得られた対応点集合が3次元空間において一般の位置にあれば, 基準カメラの各画像点に対して検査カメラのエピポーラ線を写像する関数を求めることができ, これをステレオカメラシステムの幾何学的な配置とする. 弱校正されたステレオシステムは相対的な距離を計測できるだけであるが, 校正手順が非常に簡単であることから, それほど正確な計測を必要としない自律走行車への応用が試みられている[12].

ステレオカメラの校正は各カメラの内部パラメータと外部パラメータが未知の状態から, ステレオカメラシステムの幾何学的な配置を決定する問題である. これに対して, カメラの内部パラメータが既知の場合は問題が若干異なる. この場合, 上で述べた弱校正のようにステレオ画像対から対応点集合を得ることができれば, カメラ間の移動を示す外部パラメータを求めることが可能である.

## 3. 任意のカメラ配置におけるステレオ視

### 3.1 平面のステレオカメラへの投影

3次元空間に置かれた平面を1対のステレオカメラで観察したとき, 対応点のカメラ座標値は射影変換に

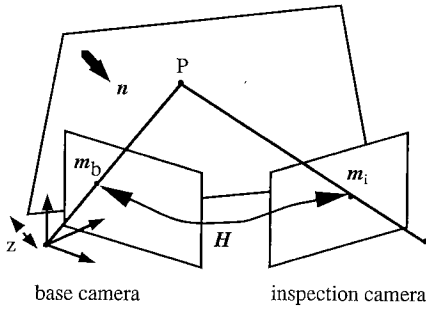


図4 平面のステレオカメラへの射影  
Fig.4 Projection of plane to stereo cameras.

よりお互いに変換できる[9]. すなわち, 図4のように3次元空間に置かれた平面上の点Pが基準カメラにおいて $m_b$ に観察され, 検査カメラにおいて $m_i$ に観察されるとき,  $m_b$ から $m_i$ への変換を $3 \times 3$ の射影変換行列を $H$ として

$$m_i = H \cdot m_b \tag{2}$$

と記述することができる. ここで,  $m_b$ および $m_i$ は射影座標で表されており, 等号は射影的な意味で成立する. 式(2)を通常の等号の意味で記述すると式(3)となる. ここで $h_{ij}$ は射影変換行列の要素,  $m_b = (x_b, y_b, 1)^T$ ,  $m_i = (x_i, y_i, 1)^T$  ( $T$ は転置ベクトルを表す). 式(3)から射影変換行列はスケール因子に自由度が残り, 9変数であるが8自由度であることがわかる.

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{h_{11} \cdot x_b + h_{12} \cdot y_b + h_{13}}{h_{31} \cdot x_b + h_{32} \cdot y_b + h_{33}} \\ y_i &= \frac{h_{21} \cdot x_b + h_{22} \cdot y_b + h_{23}}{h_{31} \cdot x_b + h_{32} \cdot y_b + h_{33}} \end{aligned} \tag{3}$$

射影変換行列 $H$ は平面の方程式, カメラの内部パラメータおよび外部パラメータを暗黙的に含んだ行列である. 一方, これらのパラメータが既知の場合, 式(2)を式(4)のように記述することができる[10].

$$m_i = N_i \cdot \left( R + \frac{t \cdot n^T}{z} \right) \cdot N_b^{-1} \cdot m_b \tag{4}$$

すなわち

$$H = N_i \cdot \left( R + \frac{t \cdot n^T}{z} \right) \cdot N_b^{-1} \tag{5}$$

ここで,  $N_b, N_i$ は基準カメラおよび検査カメラの内部パラメータ,  $R$ および $t$ は検査カメラの外部パラメータ,

$n$ は平面の単位法線ベクトル,  $z$ は基準カメラから平面までの距離である.

### 3.2 任意カメラ配置でのステレオ視

内部パラメータが $N_b$ の基準カメラに対して, 内部パラメータが $N_i$ の検査カメラを回転行列 $R$ および並進ベクトル $t$ だけ移動させて配置したステレオカメラシステムを考える. 基準カメラにおける観察点 $m_b$ の対応点を検査カメラのエピポーラ線上から検出し, この2点で決まる3次元空間中の点を求めることがステレオ視による3次元計測であるが, このアルゴリズムを平面のステレオカメラへの投影に関する射影変換を用いることで次のように記述することができる(図5を参照).

- (1) 基準カメラのレンズ中心から奥行き ( $Z$ 軸値) において $z_i$ および $z_n$ で挟まれる領域を計測の範囲とし, この間を奥行きの逆数に比例した $n$ 個の段階で計測するものとする.
- (2) 基準カメラにより観察される点 $m_b$ の奥行きを $z_i$ と仮定する.
- (3) 基準カメラの画像面に平行で基準カメラからの距離が $z_i$ の平面による射影変換行列を式(5)を用いて求める. この射影変換行列に $m_b$ を演算することで対応点候補 $m_{ii}$ を抽出する.
- (4)  $m_b$ と $m_{ii}$ のマッチング度 $s_i$ を評価する. マッチング度としては $m_b$ と $m_{ii}$ の周囲に同じ大きさの小領域を設定し, その小領域間の正規化相互相関値などを用いることができる.
- (5) (2)から(4)の手順を距離 $z_2, z_3, \dots, z_n$ について繰り返す.
- (6) 各距離において得られるマッチング度 $s_i (i=1 \sim n)$ の中で, マッチング度が最も高い対応点候補を推定される対応点とし,  $z_i$ を推定される奥行きとする.

以上.

標準ステレオカメラモデルにおいては,  $z_i$ から $z_n$ までの範囲を奥行きの逆数に比例した間隔で計測することで, 検査カメラ画像から抽出される対応点候補が画像面において均等間隔に並ぶ. 対応点候補を画像面において均等間隔で抽出するのが, 対応点候補の抽出位置として最適であると考えられる. 本論文で対象にするステレオ視は異なるカメラからの画像がそれほど変化しないことを仮定しており, ステレオカメラの配置が標準ステレオカメラモデルから大きくはずれない. よって, 奥行きの逆数に比例した段階で計測することにより, ほぼ最適な対応点候補の抽出が行われると期待される.

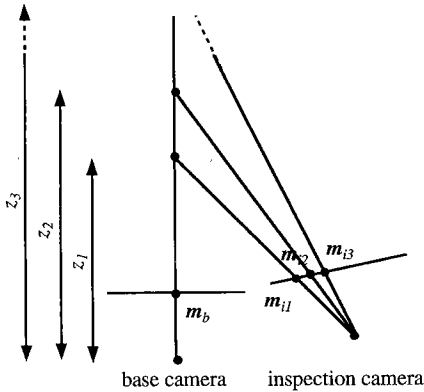


図5 対応点の探索  
Fig.5 Search of corresponding point.

射影変換行列は計測する奥行き段階に応じて $n$ 個必要であるが、カメラパラメータおよび平面の方程式を用いて、あらかじめ計算することが可能である。一つの対応点候補の座標を計算するために $3 \times 3$ 行列と3要素のベクトルの積、および2回の割り算が必要である。このような任意のカメラ配置を許したステレオ視による3次元計測は計算量が膨大であると思われるが、現在のワークステーションの処理能力であればソフトウェアによる実現でも $512 \times 480$ の全画素に対する計算を10秒程度で実現可能である。ハードウェアによる実現では $200 \times 200$ の画像に対して毎秒30枚のビデオレートが達成されている[11]。

## 4. 2平面を用いたステレオカメラ校正

### 4.1 弱ステレオカメラ校正の必要性

一般にステレオカメラの校正には、既知の位置に参照点が印刷された校正パターンや参照点を正確に位置決めするための機構が必要である。これらを用いたステレオカメラの強校正はかなり時間のかかる手続きである。一方、自律ロボットのような応用では、用途に合わせてビデオカメラのレンズやカメラマウントを頻繁に変更する必要がある。また、障害物回避のように、障害物に関する正確な位置情報は必要でなく、障害物間の相対的な位置関係が計測できれば十分という用途も多い。このような分野では、カメラから測定点までの距離が1.0mであるというような絶対的な計測をあきらめ相対的な計測で満足する代わりに、ステレオカメラの校正をできる限り簡単に行いたいという要望がある。

本論文では3次元シーン中に存在する二つの平面をステレオカメラシステムが観察することにより、この二つの平面からの相対的な位置としてシーン中の各点の3次元位置の計測を可能にする方法を提案する。

### 4.2 平面による射影変換の推定

平面によるステレオ画像対の射影変換行列は8自由度をもつ。画像対における一つの対応点から二つの式を得ることができ、平面上の4点に関してステレオ画像対における座標がわかれば、解析的にその平面に対する射影変換行列を決定できる。射影変換行列の推定はくりこみ法[13]を用いることで最適に推定することも可能であるが、本論文では平面上の多数の点に関する対応関係から、最小2乗法により近似解を求めた。行列の自由度は8であるから、係数の和を1にするなどの条件をつけて解く。

### 4.3 2平面による射影変換の合成

前参照平面および後参照平面と呼ぶ二つの平面の法線ベクトルと基準カメラからの距離をそれぞれ $(n_1, z_1)$ 、 $(n_2, z_2)$ とする。このとき式(5)を用いて両平面による射影変換行列 $H_1$ 、 $H_2$ は式(6)となる。

$$\begin{aligned} H_1 &= N_i \cdot \left( R + \frac{t \cdot n_1^T}{z_1} \right) \cdot N_b^{-1} \\ H_2 &= N_i \cdot \left( R + \frac{t \cdot n_2^T}{z_2} \right) \cdot N_b^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで $H_1 - H_2$ を計算すると、この差行列の階数が1であることを容易に確かめることができる。

平面上の点のステレオ画像対における対応関係から最小2乗近似により射影変換行列を求める場合、得られる行列は式(6)で決まる行列の定数倍である。すなわち、観察される対応点の集合から推定される射影変換行列はスケール因子に自由度が残る。式(6)において、カメラの内部パラメータなど個々の行列があらかじめわかっている場合を除いて、この定数を知ることはできない。しかし、二つの参照平面に対する射影変換行列の一方を定数倍することにより、差行列の階数を1にできる。観測におけるノイズやレンズひずみの影響から差行列の階数を完全に1にできる場合は少なく、一般にはできるだけ階数を1に近くなるようにする。その方法として差行列を特異値分解したときの、第1特異値と第2特異値の比が最大になるように、繰返し法による非線形最小2乗法で定数を決定すればよい。

このように射影変換行列のスケール因子を調節することにより、観察される対応点の集合から推定される

二つの行列の1次結合は、式(6)による二つの射影変換行列の1次結合と同じ変換を表す。式(6)を $\alpha:1-\alpha$ の比で合成すると式(7)を得る。

$$\begin{aligned} &\alpha \cdot H_1 + (1-\alpha) \cdot H_2 \\ &= N_i \cdot \left( R + t \cdot \left( \alpha \frac{n_1^T}{z_1} + (1-\alpha) \cdot \frac{n_2^T}{z_2} \right) \right) \cdot N_b^{-1} \\ &= N_i \cdot \left( R + t \cdot \frac{n_0^T}{z_0} \right) \cdot N_b^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $n_0, z_0$ は2平面の中間的な位置に存在する仮想平面の単位法線ベクトルおよび基準カメラからの距離である。 $n_0, z_0$ を求める式は若干複雑になるが、2平面の方程式および結合比率 $\alpha$ から決定することができる。例えば2平面が平行な場合には、この仮想平面は第1平面と第2平面を距離の逆数において $\alpha:1-\alpha$ の比で内挿した平面である。式(7)そのものはこのような仮想平面に対応した射影変換行列を表す。基準カメラの観測点 $m_b$ にこの射影変換行列を演算することにより、観察している点がこの平面上にあると仮定したときの検査カメラにおける対応点候補を抽出することができる。

$\alpha$ を1から0の範囲で等間隔に $n$ 個発生させ、 $n$ 個の射影変換行列を得る。この $n$ 個の射影変換行列を基準カメラの観測点 $m_b$ に順次演算することにより、前参照平面と後参照平面を測定範囲として、 $m_b$ に対する対応点候補を検査カメラ画像のエピポーラ線上から抽出することが可能である。0以下および1以上の $\alpha$ を用いることで、計測範囲の外挿を行うことも可能である。

本ステレオカメラ校正法はカメラパラメータを明示的に求めている。校正のために必要なデータは、前参照平面と後参照平面に存在する多数の点についてステレオ画像対での対応関係だけである。よってこれらの平面は特別な校正用パターンである必要はなく、通常の3次元シーンに存在する平面をそのまま用いることが可能である。ステレオカメラシステムに観察させる2平面の法線ベクトルやカメラからの距離は不必要であるし、2平面が平行である必要もない。結果として計測される3次元位置は2平面からの相対的な位置である。

## 5. 実 験

### 5.1 実験条件

3台のビデオカメラを図6のように配置したステレオカメラヘッドを用いる。水平に配置したカメラ間の基線長は約130mm、上部のカメラは水平カメラに対して45度の角度、約91.9mmの基線長で配置されている。本実験では上部カメラを基準カメラ、下部の2台のカメラを検査カメラとする。上部カメラはカメラマウント基板に直接ネジ止めされている。下部の2台のカメラは光軸方向の回転および輻輳角が微調整できるようになっており、3台のカメラの光軸が約3m先でおおむね交差するように調整した。ビデオカメラはSONY製XC-75、レンズはゴズミカレンズC814（焦点距離8mm）を用いた。ビデオカメラで撮影された画像は512×480画素の画像にデジタル化されワークステーションで処理される。

### 5.2 従来法との精度の比較

本手法と従来法の精度を比較するために、校正板と校正板を移動させるステージを用い、強ステレオカメラ校正を行った。校正板は白板上に黒い36個のマークを所定の位置に描いたものである。校正板画像からしきい値処理によりマーク部分を抜き出し、その重心を参照点とした。校正板をカメラの正面約1mの位置から250mm間隔で3箇所配置し、全部で108個の参照点を抽出した。3箇所に配置された校正板による平面をそれぞれ前平面、中平面、後平面と呼ぶことにする。

文献[10]に記述された方法により各カメラの内部パラメータ、外部パラメータを求める。前平面、中平面、後平面の法線ベクトルと基準カメラまでの距離も同時に求まる。式(5)にステレオ対をなすカメラの内部パラメータ行列、カメラ間の回転行列および並進ベクト



図6 ステレオカメラヘッド  
Fig.6 Stereo camera head.

ル、各平面の法線ベクトルと基準カメラとの距離を代入することで各平面による射影変換行列を従来法により求めることができる。一方、各平面の参照点に関するステレオ画像対の関係から最小2乗近似により射影変換行列を直接推定する。

基準カメラで観察される参照点の座標値に、この2種類の射影変換行列を演算することで検査カメラで観察される参照点の座標値を推定することができる。この推定値と実際に観察された座標値との誤差を表1に示す。

表1から、本手法は平面の位置によらず平均誤差0.27画素程度であり、従来法に比較して優れていることがわかる。全く同じ校正用データを用いているにもかかわらずこのような差が現れる理由は、本手法が各平面ごとに誤差を最小化するのに対し、従来法は全体として誤差を最小化するからである。従来法では参照点が画像の中心部に集まる後平面に対しては平均0.63画素の誤差となっているが、参照点が画像の周辺部に広がり、条件が悪くなる前平面に対して平均1.14画素の誤差がある。周辺部ではレンズひずみによる影響が大きく、レンズひずみを考慮したカメラ校正が必要と思われる。

### 5.3 2平面を用いた自動カメラ校正

次に、平面上の特徴点をステレオ画像対で自動的に対応させ射影変換行列を求める実験について述べる。本実験では参照平面として市販のホワイトボードを用い、ホワイトボード上に特に意味のない文字列、線画を描いた。ホワイトボードをカメラに対して約2mの距離に置いた状態を前参照平面、約3mに置いた状態を後参照平面とする。基準カメラから見た前参照平面を図7に示す。

基準カメラと検査カメラで構成されるステレオ対について参照平面による射影変換を以下の五つのステップで推定する。(1)基準カメラ画像から十分な数の特徴点を抽出する。(2)検査カメラ画像から各特徴点の対応

点候補を抽出する。(3)対応点候補から明らかな偽対応点を除去する。(4)抽出された特徴点の対応関係から非線形最小2乗法により射影変換行列を推定する。(5)推定された行列を用いて特徴点の対応関係を検証し、誤差があるしきい値より大きいものを対応点候補から除去する。(6)、(5)のステップで除去されるものがなければ終了、あれば(4)以下を繰り返す。

基準カメラ画像から特徴点を抽出するために、各点を含む小領域とコーナ形状のテンプレート(90度ごとのコーナを想定して4種類を用意)との正規化相互相関値を計算し、その絶対値があるしきい値より大きいものを特徴点の候補点とする。ついで参照平面の画像を $10 \times 10$ の領域に分割し、各領域において正規化相互相関値が最大の点をその領域における代表特徴点とする。このようにして、基準カメラ画像から平面全体に分布する最大100個の特徴点を得ることができる。

検査カメラ画像における対応点は、基準カメラ画像の特徴点を含む小領域との正規化相互相関値が最も高くなる点としてその候補点を選択する。このとき、相関値の最大値近傍における分布から候補点の座標をサブピクセル精度で補間する。これだけでは偽対応が多くなるため、カメラ配置がおおむね既知であるという条件から探索の範囲をある程度制限し、また対応点間の平均的な位置関係から大きくずれるものを除去することにより、おおむね正しい対応点の集合を得る。これを対応点候補集合とする。

対応点の座標値を変換する射影変換行列を対応点候補集合から非線形最小2乗法により推定する。対応点候補集合に偽対応点が含まれる場合、そのような偽対応点は推定された射影変換を用いて変換したときの誤差が非常に大きくなる。誤差があるしきい値よりも大きい点を対応点候補集合から除去し、再度射影変換の

表1 平面による射影変換の誤差  
Table1 Error of projective transformation by planes.

	本手法の誤差		従来法の誤差	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
前平面	0.27	0.16	1.14	0.84
中平面	0.28	0.14	0.83	0.48
後平面	0.26	0.13	0.63	0.38

(単位は画素)

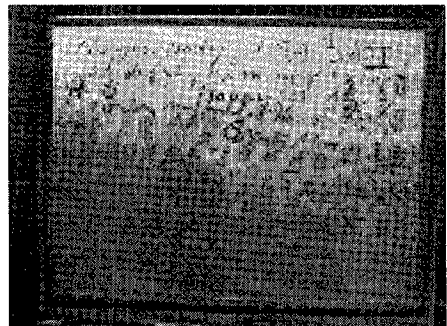


図7 基準カメラから見た前参照平面  
Fig.7 Front reference plane viewed from base camera.

表2 自動校正の誤差  
Table2 Error of automatic calibration.

	平均	標準偏差
前参照平面	0.25	0.18
後参照平面	0.18	0.16

(単位は画素)

推定を行う。この処理を閾値より大きい誤差をもつものがなくなるまで繰り返すことにより正しい射影変換行列を求める。

一つのステレオペアと前参照平面、後参照平面に関してそれぞれ射影変換行列が求まる。一方の行列を適当に定数倍することで、差行列の階数ができるだけ1に近づくようにする。これを、差行列の第1特異値と第2特異値の比が最大になるように定数を決定する問題として、繰返し法による非線形最小2乗法で解くことができる。このようにして得られる二つの行列の一例を式(8)に示す。これらの差行列を特異値分解した第1特異値と第2特異値の比は約7,000倍であり、階数1の行列とみなすことができる。

$$H_1 = \begin{pmatrix} 1.02124 & 0.01458 & -6.10816 \\ -0.01575 & 1.00923 & -12.97954 \\ 0.00003 & -0.00001 & 1.00000 \end{pmatrix}$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} 1.01803 & 0.01661 & -16.35945 \\ -0.01462 & 1.00942 & -2.21340 \\ 0.00002 & -0.00001 & 1.00057 \end{pmatrix} \quad (8)$$

本実験における校正法の精度を表2に示す。表2は表1と同様に検査カメラにおける推定された対応点の座標値と観察された座標値の誤差である。平均誤差がほぼ0.2画素前後になっており、表1の結果とほぼ同じ精度が得られている。

本ステレオカメラ校正により得られる奥行き画像を図8(b)に示す。これは図8(a)の入力画像に対して距離計測したものであり、距離の逆数に比例した値を濃淡値表示した。この結果を得るために、前参照平面と後参照平面による射影変換行列を内挿および外挿した30個の射影変換行列を用いて対応点の探索を行い、更に二つのステレオペアから得られる距離情報をマルチベースライン法により統合した。



図8(a) 入力画像の一例  
Fig.8(a) Example of input image.

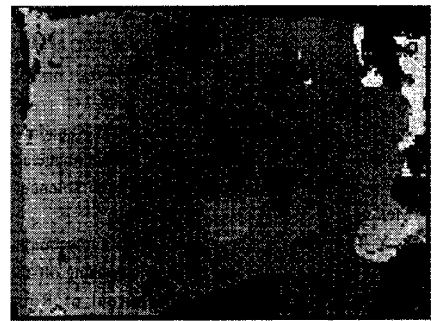


図8(b) 計測された奥行き画像の一例  
Fig.8(b) Example of estimated depth map.

## 6. むすび

本論文では任意のカメラ配置を許したステレオ視において、エピポーラ線上の対応点候補の抽出が3次元空間に仮想的に配した一連の平面による基準カメラ画像から検査カメラ画像への射影変換を用いることで簡単に記述できることを示した。また、平面とステレオカメラのこの関係を利用した簡便なステレオカメラ校正法を示した。

従来、ステレオ視による3次元計測は膨大な計算時間が必要な処理であると思われていたが、本論文のように任意のカメラ配置を許し、しかも複数のステレオ対を利用したアルゴリズムにおいても、十分に高速に計算することが可能である。ハードウェアによる実現ではビデオレートでの計測も実現されている。今後はステレオ視による計測結果を用いた実空間のモデリングなどの研究を進める予定である。

謝辞 本研究の多くは、カーネギーメロン大学におけるビデオレートステレオマシンの開発においてなさ



れたものであり、本ステレオマシンの共同開発者である防衛庁の木村茂氏、(株)サイヴァースの川村英二氏、富士電機(株)の吉田收志氏、(株)アジア航測の織田和夫氏に感謝致します。また本発表の機会を与えて下さった、三洋電機(株)メカトロニクス研究所大隅正人所长、鈴木龍司部長、西條淳夫室長ならびに関係諸氏に感謝致します。

### 文 献

- [1] 奥富正敏, 金出武雄, "複数の基線長を利用したステレオマッチング," 信学論 (D-II), vol.J75-D-II, no.8, pp.1317-1327, Aug. 1992.
- [2] 金出武雄, 木村茂, "ビデオレート・ステレオマシン," 日本ロボット学会誌, vol.13, no.3, pp.322-326, 1995.
- [3] 富田文明, 高橋裕信, "ステレオ画像の境界線表現に基づく対応," 信学論 (D), vol.J71-D, no.6, pp.1074-1082, June 1988.
- [4] S. B. Kang, J. Webb, L. Zitnick, and T. Kanade, "An active multibaseline stereo system with real-time image acquisition," CMU-CS-94-167, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Sept. 1994.
- [5] R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the shelf TV cameras and lenses," IEEE Journal of Robotics and Automation, vol.RA-3, no.4, pp.323-344, Aug. 1987.
- [6] J. Weng, P. Cohen, M. Herniou, "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation," IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell. vol.14, no.10, pp.965-980, Oct. 1992.
- [7] O. Faugeras, "What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig?," In Computer Vision - ECCV'92, LNCS-series, vol. 588, Springer-Verlag, pp.563-578, 1992.
- [8] Z. Zhang, R. Deriche, O. Faugeras, and Q. T. Luong, "A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry," INRIA technical report, no. 2273, May 1994.
- [9] 金谷健一, "画像理解—3次元認識の数理," 森北出版, pp.82-84, 1990.
- [10] O. Faugeras, "Three-Dimensional computer vision, a geometric viewpoint," The MIT press, pp.207-208, 1993.
- [11] T. Kanade, H. Kano, S. Kimura, A. Yoshida, and K. Oda, "Development of a video-rate stereo machine," Proc. 1995 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, pp.95-100, Aug. 1995.
- [12] L. Robert, M. Buffa, and M. Hebert, "Weakly-Calibrated Stereo Perception for Rover Navigation," Proc. fifth international conference on computer vision, pp.46-51, June 1995.
- [13] K. Kanatani and S. Takeda, "3D-motion analysis of a planar surface by renormalization," IEICE Trans. Inf. & Syst., vol. E78-D, no.8, Aug. 1995.

(平成8年4月4日受付)



蚊野 浩 (正員)

開発に従事。情報処理学会, 日本ロボット学会各会員。

昭59京大・工・大学院修士課程情報工学専攻了。同年三洋電機(株)入社。平5~7カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員。現在, 三洋電機(株)メカトロニクス研究所主任研究員。カラーハードコピー装置, カラー画像処理, コンピュータビジョンの研究



金出 武雄 (正員)

昭48京大・工・大学院博士課程了。同年同大学情報工学科助手。昭51同助教授。昭55カーネギーメロン大学計算機科学科高等研究員。昭60同教授。現在, 同U.A. and Helen Whitaker 教授, 同大ロボテックス研究所所長。工博。計算機視覚, ロボットの腕, 自律走行車, VLSIセンサに関する研究に従事。IEEE Fellow, AAAI Fellow.