

論文

多視点画像からの3次元情報抽出と誤差分布推定法

高橋 章[†] 石井 郁夫[†] 牧野 秀夫^{††} 中静 真^{††}

3D Structure from Multiple Images and an Estimation Method of Error Distribution

Akira TAKAHASHI[†], Ikuo ISHII[†], Hideo MAKINO^{††}, and Makoto NAKASHIZUKA^{††}

あらまし 一様な軌跡上を任意運動する計測系から多数の画像を撮影し、3次元情報と誤差分布を精度良く、高速に抽出する方法を述べる。最初の2枚の画像より簡単な対応付けで初期座標を定め、その後の画像情報により補正を行い3次元座標を高精度に抽出する。本手法では画像を蓄積したり、計測する空間をあらかじめ定義する必要がなく、計測中の任意の時点で最新の3次元情報を利用できる。誤対応は避けられないが、計測された画像数を計数することで存在の確かさを定量化し、識別を可能にした。誤差分布については、等誤差面を回転だ円面と仮定し、画像面上の特徴点の誤差分布、ふくそう角、画像数よりパラメータを推定する。誤差分布の推定により、最大誤差方向や空間分解能の推定が可能になる。シミュレーションと、回転台を用いた実画像で確認した結果、5枚の画像を用いた場合、ステレオ法に比べ60%の空間分解能の改善を確認した。

キーワード ステレオ画像処理, 多視点, 計測信頼性, 誤差推定, 空間分解能

1. まえがき

計測系または物体を運動させながら多数の画像を撮影し、3次元構造を抽出するさまざまな手法が提案されている[1]~[5]。このうち、ポーティング法や逆投影法は、あらかじめ空間を微小なボクセルに分割しておき、視点から画像面上の特徴点を通る逆投影直線と交差するボクセルに投票を行う。これらの方法は運動軌跡が任意であり、画像間の対応付けが不要という利点をもつ[2]~[4]。しかし既に指摘済みの問題点[4]のほかにも、計測空間をあらかじめ定義するために、カメラの運動量に制限があること、計測精度はボクセルサイズに依存するが、ボクセルサイズはハードウェアのメモリ量との兼ね合いで定めなければならないこと、計算負荷が大きいこと、全画像の撮影後でなければ3次元情報が抽出できないことなどの問題がある。また、物体の周囲をカメラが公転するような計測において、

不可視であるはずのボクセルへの投票を避ける手段が明らかでない。カルマンフィルタを用いる方法[5]は、特徴点ごとの奥行き値を求める方法と、画像の全画素について奥行き値を求める方法があるが、いずれもフレーム間の移動量に関する拘束があること、2画像のステレオ対応と同等の精度しか得られないこと、不確定性は奥行き方向の信頼区間しか示せないことなどの問題がある。

一方、ステレオ法などの三角測量に基づく計測では、誤差に異方向性があり、等誤差面がだ円面となることが指摘されており[6]、多数のステレオ対から得られた計測結果を統合して高精度化を図る方法が提案されている[7]。この方法では、2次元でだ円の中心の最ゆう推定を提案しているが、3次元ではだ円面の中心推定問題となり、単純な拡張は困難である。また、計測データの対応付けは他の手段で与える必要がある。

そこで本論文では、有限の計測レンジをもち、一様な軌跡上を任意運動する計測系から得られる画像列より、対応付けを利用して3次元情報を抽出する方法を提案する。はじめに2画像の対応付けより3次元座標を求める。以降の画像では、その投影点の有無を調べてサンプリングを行い、最小2乗推定により座標を補

[†] 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市
Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Niigata-shi, 950-21 Japan

^{††} 新潟大学工学部情報工学科, 新潟市
Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-21 Japan

正して高精度化を図る。この方法の特徴は画像の蓄積や、計測空間の定義の必要がないので、計測系の運動軌跡やハードウェアへの制約が軽減されること、計測の途中でも最新の3次元情報を出力可能であること、対応付けの確かさを定量化し、誤対応点の識別が可能であることなどである。

更に、計測精度を評価するために等誤差面が回転だ円面で表されると考え、画像上の特徴点の誤差分布、ふくそう角、計測された画像数などからパラメータを推定する方法を示す。これにより最大誤差方向や、最大誤差の大きさと空間分解能を信頼度を含めて示したり、オクルージョンにより一時的に不可視となった点の統合や、要求される計測精度を満たす計測系の運動軌跡の計画などへ利用することが可能となる。

2. 3次元計測法

2.1 2画像での対応

図1のように座標系を定め、点やベクトルの表記にワールド座標系では $[\]$ 、カメラ座標系では $(\)$ を用いて

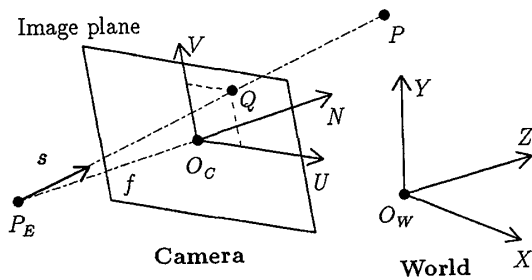


図1 カメラモデル
Fig.1 Camera model.

区別する。カメラは焦点距離 f 、視点 $P_E = (0, 0, -f)$ 、画像面が UV 平面である理想的なピンホールカメラとする。空間中の点 $P = (U_P, V_P, N_P)$ の投影点 $Q = (U_Q, V_Q, 0)$ は、透視変換によって定まる：

$$(U_Q, V_Q) = \frac{f}{N_P + f}(U_P, V_P) \quad (1)$$

共線条件により P の存在範囲は直線 $P_E Q$ 上に限定できる。以下では直線 $P_E Q$ を視線と呼ぶ。

図2のように異なる視点 P_{E1}, P_{E2} から得られる2枚の画像について、空間中の点 P の投影点を Q_1, Q_2 とする。画像1より、 P は視線 $P_{E1} Q_1$ 上に存在する。すると Q_2 の存在範囲は、 P_{E2} と視線 $P_{E1} Q_1$ より定まる平面と画像面2との交線 $Q_L Q_R$ となる。しかしこの交線は画像面を横断する長い線分であるため、線分上に多数の対応候補が存在することが考えられ、一般的なステレオ法と同様に対応問題が生ずる。

対応問題ではさまざまな軽減法が提案されているが[8],[9]、ここではカメラの計測レンジを有限と考え、画像1から定まる P の存在範囲を線分 $P_F P_B$ に限定し、 Q_2 の探索範囲を比較的短い線分 $Q'_L Q'_R$ に限定する。

この場合でも複数の対応候補が存在する場合は考えられるが、本手法ではすべての対応を許し、以降の処理で対応の信頼性を調べて真の対応点を識別する。

2.2 多画像からの計測

理論上は2枚の画像で対応付けが得られれば、3次元座標は一意に求まる。しかし実際にはノイズなどにより、視線が1点で交わらず交点不定となったり、誤差が含まれる場合が生ずる。そこで多画像からの視線

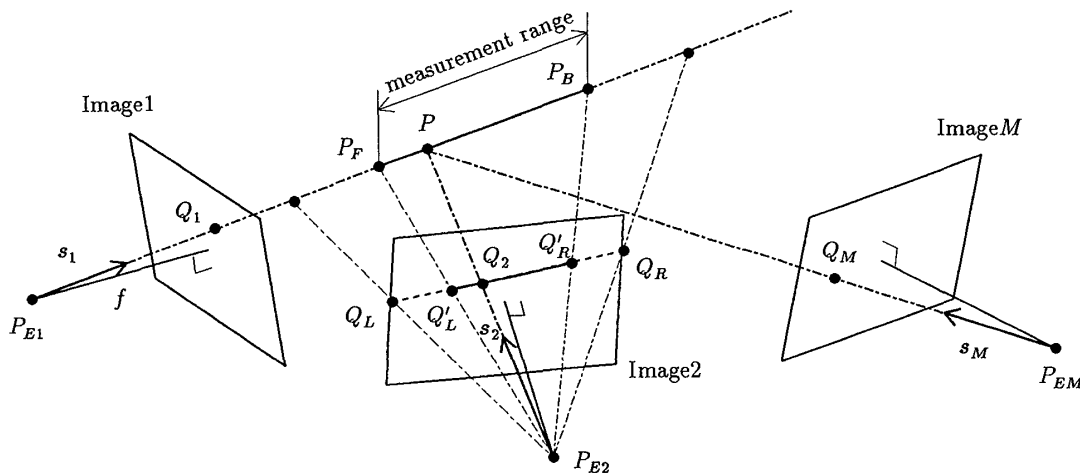


図2 計測の原理
Fig.2 Principle of measurement.

群より交点推定を行うことで高精度化を図る。

点 P が異なる視点 $P_{Ei} = [X_i, Y_i, Z_i], i = 1 \sim M$ から得られた M 枚の画像で観測された場合を考え、 M 本の視線群の交点 $\hat{P} = [\hat{X}_P, \hat{Y}_P, \hat{Z}_P]$ を最小2乗推定する。

視線 i の方向を表す単位ベクトル (視線ベクトル) を $\mathbf{s}_i = [s_{Xi}, s_{Yi}, s_{Zi}]$ とすると、各視線と \hat{P} との距離を最小にする条件として連立方程式：

$$\mathbf{A}(\hat{X}_P \ \hat{Y}_P \ \hat{Z}_P)^T = \mathbf{B} \quad (2)$$

が得られる。ここで $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ は 3×3 の対称な係数行列、 $\mathbf{B} = [b_i]$ は3次元ベクトルで、

$$\begin{aligned} a_{11} &= \sum w_i - \sum w_i s_{Xi}^2, & a_{12} &= -\sum w_i s_{Xi} s_{Yi}, \\ a_{22} &= \sum w_i - \sum w_i s_{Yi}^2, & a_{23} &= -\sum w_i s_{Yi} s_{Zi}, \\ a_{33} &= \sum w_i - \sum w_i s_{Zi}^2, & a_{13} &= -\sum w_i s_{Xi} s_{Zi}, \\ b_1 &= \sum w_i X_i - \sum w_i s_{Xi}^2 X_i \\ &\quad - \sum w_i s_{Xi} s_{Yi} Y_i - \sum w_i s_{Xi} s_{Zi} Z_i, \\ b_2 &= \sum w_i Y_i - \sum w_i s_{Xi} s_{Yi} X_i \\ &\quad - \sum w_i s_{Yi}^2 Y_i - \sum w_i s_{Yi} s_{Zi} Z_i, \\ b_3 &= \sum w_i Z_i - \sum w_i s_{Xi} s_{Zi} X_i \\ &\quad - \sum w_i s_{Yi} s_{Zi} Y_i - \sum w_i s_{Zi}^2 Z_i, \end{aligned}$$

と定める。但し \sum は $i = 1 \sim M$ の総和、 w_i は視線 i の重みである。 \mathbf{A} は対称なので LDL^T 分解可能であり、解は簡単に求まる：

$$\hat{P} = \frac{1}{\begin{matrix} k_3 a_{13} + k_4 a_{23} + k_5 a_{33} \\ (k_1 b_1 + k_2 b_2 + k_3 b_3, \quad k_2 b_1 + k_6 b_2 + k_4 b_3, \\ k_3 b_1 + k_4 b_2 + k_5 b_3) \end{matrix}} \quad (3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} k_1 &= a_{22} a_{33} - a_{23}^2, & k_2 &= a_{13} a_{23} - a_{12} a_{33}, \\ k_3 &= a_{12} a_{23} - a_{13} a_{22}, & k_4 &= a_{12} a_{13} - a_{11} a_{23}, \\ k_5 &= a_{11} a_{22} - a_{12}^2, & k_6 &= a_{11} a_{33} - a_{13}^2. \end{aligned}$$

従って \hat{P} を算出するには \mathbf{A} , \mathbf{B} の各要素を求めるための19個のパラメータを画像ごとにサンプリングすればよい。画像や投影点の情報の蓄積や、計測空間の定義は不要なので、ハードウェアへの制約が少ない。座標計算は簡単なので、画像ごとに \hat{P} を更新し、利用することが可能である。

画像数 M は \hat{P} に対応する投影点が観測された回数を表すので、 \hat{P} の存在の確かさを表す指標であると言える。以下では M を持続時間と呼ぶ。

2.3 計測アルゴリズム

上記の手法で画像ごとに計測の更新を行うためには、a) 既に対応付けが得られている既対応点、b) 手前の画像で新たに出現した候補点、c) 現在の画像上の特徴点の三つを扱う必要がある。また、カメラが物体の周囲を公転するような場合には、視野内に入る不可視の既対応点へのサンプリングを避ける必要がある。そこで、次のようなアルゴリズムを考案した。

a) については、手前の画像で可視であり、現在の計測レンジ内の点について現在の画像への投影点を求め、近傍の特徴点の有無を調べる。対応する特徴点が得られれば可視と判定し、サンプリングパラメータを更新する。b) については、対応探索を行い、対応する特徴点が得られた点は、持続時間2の可視の既対応点として新規登録する。c) については、既対応点と候補点に対応しなかった点を次の画像での候補点とする。

計測の最後で次節で述べる誤差分布の推定を行う。その際、オクルージョンにより一時的に不可視となったために異なる既対応点として計測されたサンプリングパラメータを、等誤差面の交差判定により統合する。持続時間がしきい値以下の点は、誤対応点または計測精度が不十分な点として破棄する。

このアルゴリズムの利点として次の3点が挙げられる：1) 既対応点の処理と、候補点の対応付けは並列処理可能で、判定も容易なので処理の高速化が期待できる。2) 不可視な既対応点は統合判定まで使用しないので、外部記憶装置へ転送することで、メモリ量の少ないシステムでも利用できる。3) 画像ごとに3次元情報を更新できるので、手前の画像までの情報を現在地の計測に利用できる。

なお、時空間画像で特徴点の連続性が保たれる場合 [2] と同等の条件が成立する場合には、a), b) の処理を、手前の画像での特徴点の座標に隣接する特徴点の有無を調べる操作に簡単化できるので、更に高速な処理を行うことができる。

3. 誤差分布の推定

最小2乗法による推定の誤差として一般に用いられている RMS 誤差は、視線群の接近の度合を表すが、誤差分布を示すことはできない。三角測量では誤差分布が非等方性となり、等誤差面がだ円面となることか

ら [6], [7], 本章では画像面上の誤差分布を空間へ投影し, その交差領域として誤差分布を推定することを考える. 誤差分布は推定された交点 \hat{P} を中心とし, 長軸方向が全視線ベクトルの平均ベクトル (平均視線ベクトル) と平行な回転だ円面で表されることを仮定する. 平均視線ベクトルは, 3次元計測において三つのサンプリングパラメータを追加すれば得られる.

3.1 短軸の基準長の推定

だ円面の短軸の基準長について考える. 視線ベクトルの誤差は, 画像面上の特徴抽出の誤差だけに起因し, 特徴抽出の誤差は正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従う場合, 視点から距離 r だけ離れた点 P を通り画像面に平行な平面上へ投影される P の誤差は $N(0, (r\sigma/f)^2)$ に従う.

M 通りの距離 $r_i, i = 1 \sim M$ だけ離れた視点 P_{Ei} から P を観測するとき, ふくそう角を無視して画像面に平行な平面が一つだけ存在するとみなすと, 平面上での P の位置について, 合成される誤差の平均値は,

$$N\left(0, \frac{\sigma^2}{f^2 M^2} \sum_{i=1}^M r_i^2\right)$$

に従う. このことより, 短軸の基準長 $2\sigma_a$ を特徴抽出の誤差分布の標準偏差を用いて, 次式のように定める:

$$\sigma_a = \frac{\sigma}{fM} \left(\sum_{i=1}^M r_i^2\right)^{1/2} \quad (4)$$

画像上の特徴抽出の誤差は, 計測系を固定して連続して特徴抽出を行うことで得られる統計値から推定可能であり, 既対応点の仮の3次元座標は常に参照可能であることから, 3次元計測において一つのサンプリングパラメータを追加すれば短軸の基準長が得られる.

3.2 2画像の場合の長短比

だ円面の短軸と長軸の比 (長短比) を求めるため, 始めに図3のように2画像の場合を2次元で考える. \hat{P} は二つの視点 P_{E1}, P_{E2} から等距離 r の位置にあり, 両視点からの視線はふくそう角 2ψ をなす. 視線ベクトル s_1, s_2 にそれぞれ $\pm\delta$ の偏差があるとき, 真の交点 P の存在範囲は, 四角形 $P_1P_2P_3P_4$ で規定される. この四角形の対角線の比を持続時間2の場合の長短比 R' として求める. 図よりそれぞれの対角線は,

$$d_1 + d_2 = \frac{2r \sin \psi \tan \delta (1 + \tan^2 \psi)}{\tan^2 \psi - \tan^2 \delta} \quad (5)$$

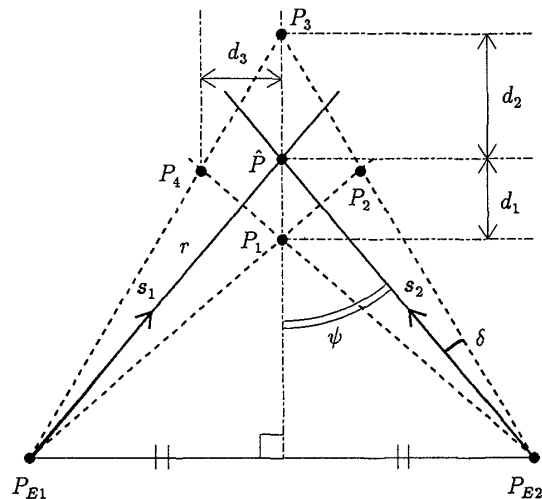


図3 長短比算出のモデル

Fig. 3 Model of slenderness ratio estimation.

$$d_3 \approx \frac{r \sin \psi (1 + \tan \psi \tan \delta)}{1 + \tan \psi \tan \delta} - \frac{r \cos \psi (\tan \psi - \tan \delta)}{1 + \tan \psi \tan \delta} \quad (6)$$

と表せる. δ が十分小さいとき, $\tan \delta \approx \delta$ と近似し, δ^2, δ^3 の微小項を無視すると,

$$R' = \frac{d_1 + d_2}{2d_3} \approx \frac{1}{\tan \psi} \quad (7)$$

3.3 多画像の場合の長短比

持続時間 $M > 2$ についてはシミュレーションをもとに長短比のモデル式を求めた. カメラの計測レンジは視点 P_{Ei} と点 P 間の距離に比べて小さく, P_{E1} から P_{EM} までの計測系の運動軌跡が, 点 P を中心とする球面上にあるとみなせるものとする (図2参照). また, 計測系の速度は一定で, 点 P から見て回転角 $\Delta\psi$ ごとに計測を行うものとする. 各視線ベクトルの方向に正規分布に従う誤差を加えて P に対する推定値 \hat{P} の誤差の3次元的な分布を計測し, これを主成分分析する. 長短比は第1, 第2主成分それぞれのベクトル方向の標準偏差 σ_1, σ_2 より $R = \sigma_1/\sigma_2$ と表される. さまざまな M に対し $\Delta\psi = 1 \sim 5^\circ$ について, それぞれ 10^4 回の反復を行って得られた長短比 R と, 観測開始時と終了時の2視点について式 (7) より定まる長短比 R' の関係を図4に示す. 以下では 2ψ を最大ふくそう角と呼ぶ. また, 持続時間 M に対する長短比の比 R/R' を求めた結果を図5に示す.

図4, 5を見ると, 真の長短比 R と R' の比は $M \leq 4$ については持続時間に依存し, $M \geq 5$ については最大ふくそう角に依存することがわかる. $M \geq 5$ につ

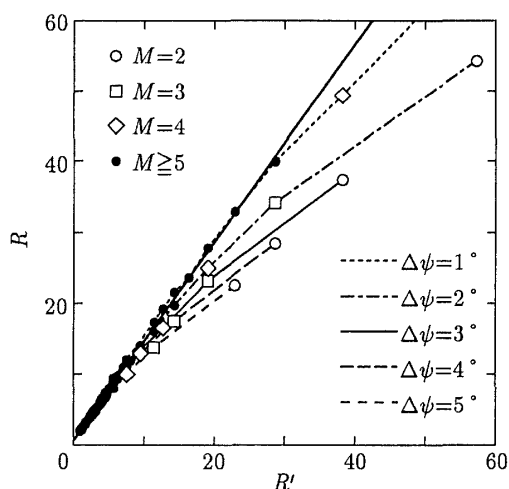


図4 1/ tan ψ に対する長短比
Fig. 4 1/ tan ψ vs. slenderness ratios.

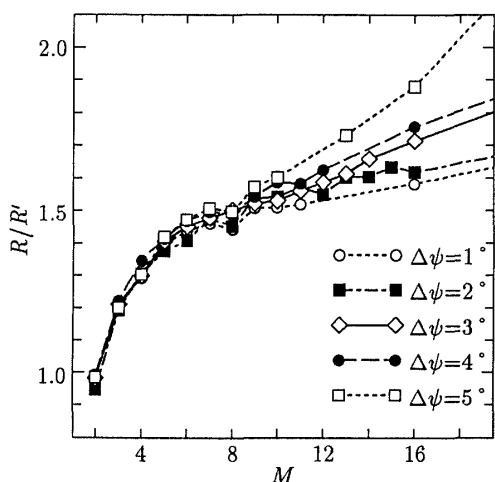


図5 持続時間に対する R/R'
Fig. 5 Duration vs. R/R'.

いて、R' に対する長短比を直線に回帰した結果、図4の太実線のようになり、次式が得られた：

$$R = \frac{1.4006}{\tan \psi} + 0.6389 \quad (8)$$

RMS 誤差は0.3237であった。M = 2, 3, 4 の場合の R/R' の平均値はそれぞれ、0.978, 1.206, 1.309であった。式(8)は、2ψ ≥ 151° で1未満となるが、誤差分布を表すだ円面は球に収束することを考慮し、2ψ ≥ 151° では R = 1 と規定する。ここで得られた長短比と式(4)の短軸の基準長を用いて、長軸の基準長 2σ_b を次式より定める。

$$\sigma_b = R\sigma_a \quad (9)$$

長短比を求めるには、各既対応点について、計測開始

時の視線ベクトルを記憶しておき、最大ふくそう角が 151° 未満である間は計測ごとに最新の視線ベクトルを記憶すればよい。

3.4 誤差分布モデル

以上より誤差分布を示す回転だ円面は、

$$\frac{X'^2}{\sigma_a^2} + \frac{Y'^2}{\sigma_a^2} + \frac{Z'^2}{\sigma_b^2} = \kappa^2 \quad (10)$$

と表される。ここで P' = [X', Y', Z'] は P̂ を原点とし、Z' 軸がだ円面の長軸方向と一致するような座標系の各軸方向の座標成分とし、κ はだ円面の縮尺とする。

X', Y' が N(0, σ_a²), Z' が N(0, σ_b²) に従い、互いに独立であるとする、P' は3次元確率変数となり、その密度関数は次式で表される。

$$F(P') = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{X'^2+Y'^2}{\sigma_a^2} + \frac{Z'^2}{\sigma_b^2}\right)\right]}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_a^2 \sigma_b} \quad (11)$$

κ = 1, 2, 3 で規定されるだ円面内部に真値が含まれる確率を求めると、それぞれ 25%, 78%, 97.8% となる。だ円面の(囲む部分の)体積は次式となる：

$$V_\kappa = \frac{4}{3}\pi\kappa^3\sigma_a^2\sigma_b \quad (12)$$

V₃ は信頼度 97.8% の空間分解能を表すと言える。

結局、一つの既対応点について誤差分布を推定するためには、3次元計測において四つのサンプリングパラメータを追加し、二つの視線ベクトルを記憶しておけばよい。等誤差面を推定することにより最大誤差方向、誤差分布の非等方性、空間分解能とその信頼度を表すことができる。等誤差面の非等方性を表す長短比は最大ふくそう角によって定まり、等誤差面の大きさは画像面上の特徴抽出の誤差分布によって定まる。このように、空間座標と信頼度をもつ誤差分布で表現することによって、点や線がある広がりをもつという物理的な制限に見合う計測結果が得られる。これにより、必要な精度を得るための計測系の設計やカメラの運動軌跡の計画、計測結果をより高次の認識処理に用いる際の評価の定量化が可能になる。

4. 実験と検討

4.1 シミュレーション

多画像で計測する効果や、誤差分布のモデルの妥当性の検証を行うために、コンピュータ上で計測のシミュレーションを行った。次節で述べる実画像を用いた計測環境を考慮して、シミュレーションのパラメー

タは以下のように定めた：

- 画像面は 512×400 画素，焦点距離は $f = 1820$ 画素とする。画角はおよそ 16×13 度となる。 $2/3''$ CCD カメラでは焦点距離 31mm に相当する。

- 視点とカメラ座標系原点の初期座標をそれぞれ $P_{E1} = [0, 0, -1790]$, $O_{C1} = [6.356, 136.463, -24.862]$, V 軸方向単位ベクトルの初期値を $[-0.0680, 0.9949, 0.0746]$ とする。計測レンジはワールド座標系原点を中心とする半径 200 の範囲とする。これは、被写体までの距離の約 20% に相当する。カメラは Y 軸回りに $\Delta\theta$ ずつ回転し、視点は常に XZ 平面上を移動する。

- 画像上の特徴抽出の誤差は $N(0, 1)$ に係数 $K_N = 0.1$ を掛けた分布に従うものとする。また、特徴抽出精度は $p = 1/10$ 画素とする。それ以外のカメラキャリブレーション等に伴うノイズは考慮しない。

点 $P = [-120\sqrt{2}, 100, -120\sqrt{2}]$ について、 $\Delta\theta = 5^\circ$, $M = 2, 5, 10, 19$ とした場合の誤差分布を 10^3 回の反復より求め、 XZ 平面に投影した結果を図6に示す。図中の長い線分とそれに直交する成分はそれぞれ、誤差分布の第1, 第2主成分ベクトル方向への誤差の標準偏差の2倍の長さを表す。

持続時間の増加に従い誤差分布は密、かつ等方的になる。 $M = 2$ で分布が分断されているのは、 p による打ち切り誤差による。誤差分布の第1主成分ベクトルと、平均視線ベクトルのなす角は1度未満であり、だ円面の長軸を平均視線ベクトルとする妥当性が確認できた。

次に $\Delta\theta = 5^\circ$ について画像数 M に対するだ円面の短軸方向の誤差の標準偏差を求めた結果を図7に示す。実線は式(4)による値で、相対誤差は10%未満であった。 $\Delta\theta$ や p を小さくすると相対誤差は小さくなる。

また、 $\Delta\theta = 1, 5^\circ$ の場合にだ円面内部に真の座標 P が含まれる確率を 10^4 回の反復より求めた結果と式(11)による理論値を図8に示す。 a は $M = 5$, b は $M = 10$ の場合の結果を表す。理論値と計測値の差は5%未満であった。計測値は p を細かくすると理論値に近づき、 p を K_N に比べ大きくすると全体的に低下する。このような場合や、カメラパラメータなどの誤差要因が含まれる場合には、短軸長をRMS誤差で代用することもできる。RMS誤差は図7のように M に従い単調増加するので等誤差面を表すことはできないが、今回のシミュレーションでは $M \geq 7$ について、短軸長を 2RMS としただ円面内部に95%以上の確率

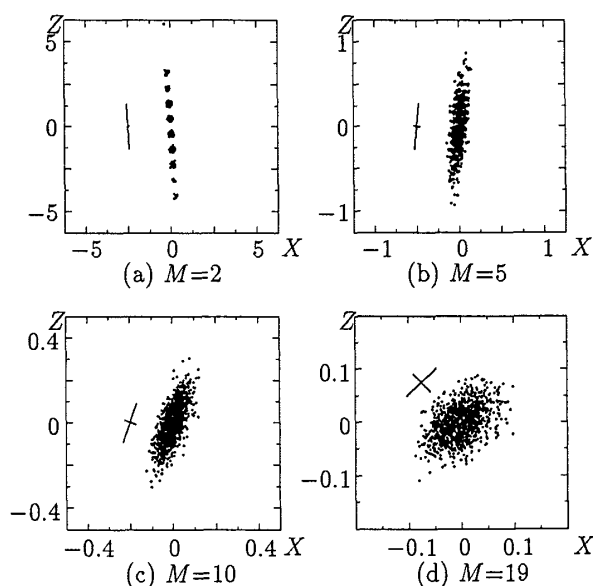


図6 誤差分布
Fig. 6 Error distributions.

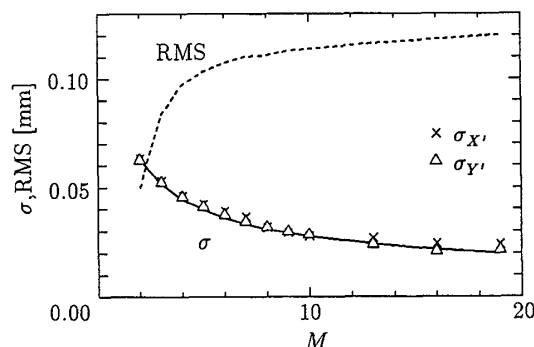


図7 短軸長とRMS誤差
Fig. 7 Minor axis and RMS errors.

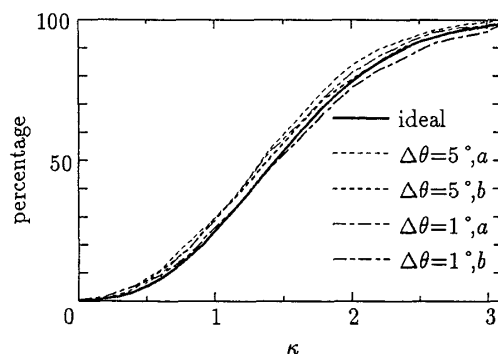


図8 だ円面内部の誤差分布
Fig. 8 Probability distribution in spheroid.

で真値が含まれるという結果が得られた。

なお、サンプリングにおける重み付けとして、i) すべて均等、ii) 視点からの距離 r に反比例、iii) r^2 に反比例の三つを比較したところ、ii) が最も良好で

あった。

焦点距離を1/2や2倍にした場合や、点の座標を変えた場合でも同様の結果が得られることを確認した。だ円面の大きさは画像上の誤差の標準偏差を反映するので、視点と計測点との距離に応じて大きくなるが、だ円面内の確率分布は図8と同様であった。

4.2 実画像の計測

計測系や物体の移動における誤差の要因の数を抑えるために、1台の固定したカメラ (SONY DXC-151 + Cannon J6×11-1.4-II) を用い、回転台上の物体の計測を行う。ランダムノイズ軽減のため、映像信号はパーソナルコンピュータ上で時間平均処理する [10]。また、カメラキャリブレーションを簡単に行うために、回転台上面が画像上で直線に見えるようにカメラを配置する。すると、視点は常に XZ 平面上を移動し、カメラパラメータは1枚の画像から求めることができる [11]~[13]。

ワールド座標系は、回転台上面の回転中心を原点 O_w 、回転軸を Y 軸とする。カメラの計測レンジは Y 軸を中心とする円柱面内部と定める。今回の設定では、視点と O_w 間は約200cm、計測レンジの半径は20cmとした。回転台を $\Delta\theta$ だけ回転させる操作は、カメラ座標系を Y 軸回りに $\Delta\theta$ だけ逆方向に回転させる操作に相当する。

計測開始時のカメラパラメータを表1に示す。 (U_0, V_0) は画像フレームの中心座標で、 A_R はアスペクト比である。また、 T はワールド座標系からカメラ座標系への同次座標表現で表した変換行列である。

計測対象としたのは平面上の14点からなる格子点で、直径4.0mmの黒円を縦横40mm間隔で図9のように並べたもので、XYプロッタ (Roland DXY-1300) で作成した。この平面を回転台上の異なる位置に設置し、4回の計測を行った。等誤差だ円面の推定では、計測系を固定し、時間平均処理を行わずに連続して20回の格子点の投影座標の計測を行って得られた標準偏差である0.1画素を画像上の特徴抽出の誤差の標準偏差とした。なお、格子点の座標は輝度を重み付けした重心座標として求めた。

$\Delta\theta = 5^\circ, M = 2\sim 5$ として各格子点の座標の計測を行い、格子間隔の標準偏差と各格子点を直線に回帰した場合のRMS誤差を求めた。この結果と、計測開始の画像と計測終了の画像の2画像から同様の計測を行った結果との比較を図10に示す。2画像の計測精度はステレオ法やカルマンフィルタによる方法の

表1 カメラパラメータと座標変換行列

Table 1 Camera parameters and transformation matrix.

Parameter	mean	sdv.
f	1821.762	9.079
U_0	210.411	9.350
V_0	155.029	15.893
A_R	0.9975	0.0116

$$T = \begin{pmatrix} 0.9989 & -0.0388 & 0.0254 & 36.91 \\ 0.0402 & 0.9975 & -0.0586 & -86.07 \\ -0.0230 & 0.0595 & 0.9980 & -355.47 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

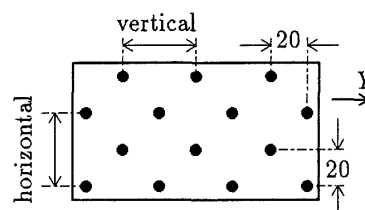


図9 計測対象 (単位: mm)

Fig. 9 An object of measurements (unit: mm).

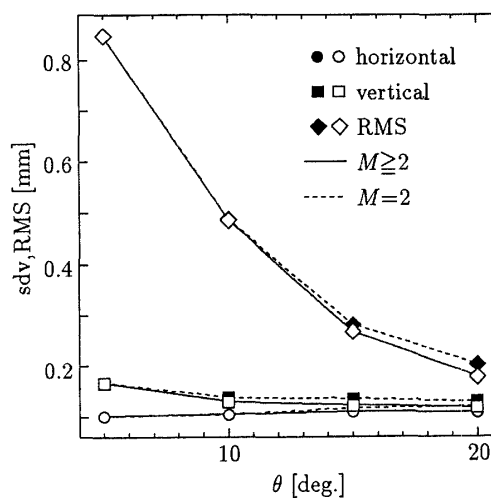


図10 計測結果

Fig. 10 Result of measurements.

計測精度に相当する [5]。但し2画像の場合には、正しい対応付けを与えて計算を行った。候補点の対応付けや、既対応点のサンプリングでは半径2画素をしきい値とした。最大ふくそう角20°の場合、 $M = 2$ より $M = 5$ の方が格子間隔、RMS誤差のいずれも10%程度精度が向上している。ふくそう角の増加に従い水平方向の格子間隔の標準偏差が増加しているのは、回転台の回転角の誤差 (最大0.1°) やカメラキャリブレーションの誤差によるものと思われる。4回の計測のいずれにおいても各計測点より最小2乗推定した平

面 (RMS \approx 0.3mm) と, 各計測点の $\kappa = 3$ のだ円面が交差していることを確認した。

次に最大ふくそう角 20° について $\kappa = 3$ のだ円面のパラメータの平均値から持続時間が増える効果を検討する。短軸は $M = 2$ では 0.207mm, $M = 5$ では 0.131mm と約 36% 縮小している。一方, 長軸はそれぞれ 1.14mm, 1.12mm とわずかな縮小にとどまっている。しかし, 空間分解能を表すだ円面の体積はそれぞれ 0.204mm³, 0.080mm³ と 60% もの改善が見られる。最大誤差, 空間分解能は回転角を増やすに従い減少し, 最大ふくそう角 45° , $M = 10$ の場合の $\kappa = 3$ の短軸, 長軸長はそれぞれ 0.097mm, 0.436mm, 体積は 0.017mm³ となる。

ここで, カルマンフィルタによる方法の空間分解能を考える。現在の画像の視線軸方向の奥行き信頼区間だけが与えられるので, 空間的には視点から画像上の画素または誤差分布の大きさを投影したすい体を, 画像に平行な面で切断した, 高さが奥行き値の信頼区間のすい台となる。視線方向と長軸方向が一致する理想的な場合, 高さは $M = 2$ の最大誤差方向の長さとなるので角すい台は $M = 2$ のだ円体を内包する。

$\Delta\theta = 5^\circ$ の場合には誤対応は生じなかったが, 10° の計測では 38% の誤対応が生じた。しかし誤対応点の持続時間はすべて 2 であり, 容易に識別可能であった。

パーソナルコンピュータ (80386/387, 20MHz) による計算時間は, 候補点の対応探索が 4.2ms/point, 既対応点のサンプリングが 3.9ms/point であった。

5. むすび

有限の計測レンジをもつ計測系, または物体の任意運動によって得られる画像列より, 対応付けを利用して 3次元計測を行う方法を示した。計測アルゴリズムは簡単であり, 画像の蓄積や計測する空間をあらかじめ定義する必要がないため, 計測系の運動やハードウェアへの制約が少ない。更に, 画像入力ごとに 3次元情報を更新可能であるので, 自律移動型ロボットへ適用し, 手前の位置までに計測した 3次元情報を利用して現在地の計測を行うような応用が期待できる。対応付けでは誤対応が避けられないが, 投影点の持続時間の計数により, 誤対応点や, オクルージョンなどにより計測精度が期待できない点の識別が可能であり, 2画像のステレオ対応ほど大きな問題とならない。計測法はステレオ法の拡張であり, 誤対応を減らすためにステレオ法で用いられる多くの手法を利用可能である。

また, 計測点の信頼性に関して, 各視点の画像上の誤差分布を空間へ投影したときの交差領域を回転だ円面で表し, 等誤差面を規定する方法を示した。だ円面のパラメータは, 画像上の誤差, 持続時間, 最大ふくそう角, 平均視線ベクトルから簡単に表現できる。長短比は持続時間と最大ふくそう角, 軸の長さは画像上の誤差の標準偏差より定まる。空間分解能を示すだ円面の体積は, 視点から遠いほど大きくなる。これは遠くのものほど大きさや位置の認識が甘いという人間の感覚に一致している。これらのパラメータより最大誤差方向を示したり, 計測点の空間分解能, 最大誤差などを信頼度をもたせて示すことができる。要求される精度を満たすための計測の計画や, 後段のより高次な認識処理の定量的評価に利用可能である。

結果はシミュレーションと実画像の計測で確認した。5枚の画像を用いた計測では, 2画像からの計測に比べ空間分解能で 60% の改善が得られるという結果を得た。また, 画像面上の点の誤差分布を反映する回転だ円面により, 等誤差面が表現できることを確認した。また, 計測レンジが被写体までの距離の 20% 程度の場合に, 画像面上の特徴点の誤差分布を反映する回転だ円面により, 等誤差面が表現できることを確認した。

特徴点のない滑らかな曲面部の計測法の検討, カメラ軌跡が複雑な場合の誤差推定の検討, 自律移動型ロボットへの応用などが今後の課題である。

文 献

- [1] 山本正信, “連続ステレオ画像からの 3 次元情報の抽出,” 信学論 (D), vol.J69-D, no.11, pp.1631-1638, Nov. 1986.
- [2] 浜野輝夫, 安野貴之, 石井健一郎, “空間への Voting による 3 次元環境情報抽出手法,” 信学論 (D-II), vol.J75-D-II, no.2, pp.342-350, Feb. 1992.
- [3] 浜野輝夫, 安野貴之, 石井健一郎, “すい体型視線を用いた空間への Voting による 3 次元環境情報抽出手法,” 信学論 (D-II), vol.J76-D-II, no.1, pp.50-58, Jan.1993.
- [4] 川戸慎二郎, “2 回逆投影法による複数画像からの 3 次元情報の抽出,” 情処研報, vol.92, no.73, pp.43-50, Sept. 1992.
- [5] L. Matthies, R. Szeliski, and T. Kanade, “Incremental estimation of dense depth maps from image sequences,” IEEE Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.366-374, 1988.
- [6] S. D. Blostein and T. S. Huang, “Error analysis in stereo determination of 3-D point positions,” IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.PAMI-9, no.6, pp.752-765, Nov.1987.
- [7] 成瀬 央, 立田光廣, 野引 敦, 井手敦志, “誤差の異方性を考慮した最尤推定法によるステレオ画像計測精度

- 向上,” 信学論 (D-II), vol.J75-D-II, no.8, pp.1307-1316, Aug.1992.
- [8] 来海雅俊, 谷内田正彦, “3 眼視によるセグメント間の対応付けと 3 次元情報の獲得,” 信学技報, PRU88-87, 1988.
- [9] 鈴木 薫, 谷内田正彦, “移動視における対応付けと 3 次元情報の獲得,” 信学技報, PRU88-88, 1988.
- [10] 相良道弘, 野村由司彦, 成瀬 央, 井手敦志, “デジタル画像のノイズ低減法,” 信学論 (D-II), vol.J72-D-II, no.11, pp.1973-1976, Nov.1989.
- [11] R. K. Renz and R. Y. Tsai, “Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3-D machine vision metrology,” IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.10, no.5, pp.713-720, Sept. 1988.
- [12] W. I. Grosky and L. A. Tamburino, “A unified approach to the linear camera calibration problem,” IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.12, no.7, pp.663-671, July 1990.
- [13] 高橋 章, 石井郁夫, 牧野秀夫, “単一カメラによる回転物体の形状計測とカメラキャリブレーション,” 信学技報, PRU92-55, 1992.

(平成7年1月5日受付, 5月8日再受付)



中静 真 (正員)

昭63新潟大・工・電子卒, 平2同大大学院修士課程了, 平5同大大学院自然科学研究科博士課程了, 平5より新潟大・工・情報・助手, 現在に至る。デジタル信号処理, 特に時間・周波数解析と時間・スケール解析に関する研究に従事。工博 (工学), IEEE 会員。



高橋 章 (正員)

平3新潟大・工・情報卒, 平5同大大学院修士課程了, 同年同大大学院自然科学研究科博士課程進学, 3次元情報計測に関する研究を行っている。



石井 郁夫 (正員)

昭38新潟大・工・電気卒, 同大助手, 助教授, 教授を経て現在同大大学院自然科学研究科・教授, この間, 電子回路, 画像・図形処理等の研究に従事, 現在, 人工現実感, 立体視, 画像・図形処理装置などの研究を行っている, 工博 (東工大), 情報処理学会, 日本

ME学会会員。



牧野 秀夫 (正員)

昭51新潟大・工・電子卒, 昭53同大大学院修士課程了, 同大・情報・助手, 助教授を経て平7同教授, 現在に至る, 平1より1年間カナダ・トロント大にて生体信号処理の研究に従事, 最近, 植込み型医用機器, 人工現実感, 画像処理などの研究を行っている。

工博, 日本ME学会, IEEE, 電気学会会員。