論　文

未校正カメラによるオプティカルフローからの3次元復元とその信頼性評価

金谷　健一[†]　　太田　直哉[††]　　清水　慶行[†††]

3-D Reconstruction from Uncalibrated-Camera Optical Flow and Its Reliability Evaluation

Kenichi KANATANI[†], Naoya OHTA[††], and Yoshiyuki SHIMIZU[†††]

あらまし　焦点距離が未知のカメラで観測したオプティカルフローから統計的に最適な3次元復元を行うとともに，復元形状の信頼性を評価する．まずオプティカルフローからフロー基礎行列を最適に計算する．次にそれを焦点距離とその変化速度及び運動パラメータに分解する．そしてフローがエピ極線方程式を厳密に満たすように最適に補正する．最後に3次元位置を復元し，その共分散行列を評価する．更に，シミュレーション及び実画像実験によって本システムの性能を評価し，不定性を除去する正規化（ゲージ）が不確定性の記述に与える影響を考察する．

キーワード　オプティカルフロー，3次元復元，自己校正，信頼性評価，ゲージ変換

1. まえがき

動画像から3次元情報を抽出する伝統的な方法に2通りある．一つは画像間の対応点から基礎行列 [14], [17] を計算するものであり，他方は画像上の点の移動を瞬間速度場（オプティカルフロー）として解析するものである．本論文では後者の性能の実験的評価を行う．

オプティカルフローは通常「こう配拘束条件」を利用して画像の濃淡値から計算される [6], [12]．この計算は比較的容易であり，全画素にわたってフローが求まるが，微分を差分で近似したり滑らかさの拘束や正則化などの恣意的な条件を用いるため精度は高くない．領域分割等の精度を要求しない応用ではそれで十分であるが，高精度の3次元復元には特徴点数を限定し，個々の点の移動を精度良く計算することが必要である．本研究では特徴点の移動をテンプレートマッチングや時空間追跡法などで追跡することを想定する．もちろん精度を要求しなければこう配拘束条件から求めたフローにも適用できる．

オプティカルフローから3次元復元を行う研究は今日まで多数発表されているが [6], [11], [13]，カメラは校正済みと仮定していた．近年，未校正カメラによる画像系列からの自己校正法の研究が進み [14], [17]，これに対応して未校正カメラで観測したオプティカルフローから3次元復元する方法が Brooks ら [2] や Viéville ら [16] によって発表された．

本論文では Brooks ら [2] に基づいて3次元復元を行い，従来十分に考慮されなかった次の3点に焦点を当てる．

- Brooks ら [2] は単に3次元形状を復元したのみであるが，本論文では誤差のモデルを導入し，精度の理論限界を達成する統計的に最適な復元を行う．
- 単に形状を復元するだけでなく，その信頼性を評価し，復元形状がどの程度信頼できるかを知る．
- 不定性を除去する正規化（ゲージ）が不確定性の記述に与える影響を考察する．

校正済みカメラによるオプティカルフローからの最適な3次元復元は既に行われており [13]，未校正カメラでも同様にできるが，変数が増加して信頼性評価が

[†] 岡山大学工学部情報工学科，岡山市
Department of Information Technology, Okayama University, Okayama-shi, 700-8530 Japan
[††] 群馬大学工学部情報工学科，桐生市
Department of Computer Science, Gunma University, Kiryu-shi, 376-8515 Japan
[†††]（株）シャープ AV システム事業本部，矢板市
Audio-Visual Systems Group, Sharp, Ltd., Yaita-shi, 329-2193 Japan

複雑になる．本論文では復元計算は厳密に最適化しながら，その信頼性評価には現実的な第1近似を導入する．本システムは次のように各段階で計算とその信頼性評価とを対にした構成である．

（1） 画像上の複数の点（最低 8 点）でオプティカルフローを検出する．

（2） フローからフロー基礎行列を最適に計算し，その信頼性を評価する．

（3） フロー基礎行列を焦点距離とその変化速度及びカメラの運動パラメータに分解する．

（4） フローがエピ極線方程式を厳密に満たすように最適に補正し，補正値の信頼性評価を行う．

（5） 補正値から3次元位置を復元し，その信頼性評価を行う．

（6） フロー基礎行列の誤差を評価し，復元点の共分散行列を計算する．

このための要素技術は既にいろいろな形で発表されているが [5]~[7], [15]，本論文ではそれらの最も有効と思われる統合を試み，シミュレーション及び実画像実験を行ってその有効性を検証する．

2. エピ極線方程式とフロー基礎行列

シーンに相対的にカメラが並進速度 $\boldsymbol{v}$ で並進し，回転速度 $\boldsymbol{\omega}$（軸 $\boldsymbol{\omega}$ の周りの角速度 $\|\boldsymbol{\omega}\|$）で回転しているとし，$\{\boldsymbol{v}, \boldsymbol{\omega}\}$ を「運動パラメータ」と呼ぶ．画像面上に任意に座標系をとり，座標 (u, v) の点の移動速度（オプティカルフロー）を $(\dot{u}, \dot{v})$ とする．これらを次のベクトルで表す．

$$\boldsymbol{x} = \begin{pmatrix} u/f_0 \\ v/f_0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \dot{\boldsymbol{x}} = \begin{pmatrix} \dot{u}/f_0 \\ \dot{v}/f_0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{1}$$

ここに f_0 はカメラの焦点距離の適当な近似値である．画像に誤差がなければ次の「エピ極線方程式」が成立する [2], [7], [16]．

$$(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{W}\dot{\boldsymbol{x}}) + (\boldsymbol{x}, \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}) = 0 \tag{2}$$

ただし $(\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b})$ はベクトル $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ の内積である．$\boldsymbol{W}$ は反対称行列，$\boldsymbol{C}$ は対称行列であり，これらは2画像間のエピ極線方程式を定める「基礎行列」[14], [17] に相当するので，これらを「フロー基礎行列」と呼ぶ [7]．反対称行列 $\boldsymbol{W} = (W_{ij})$ から次のベクトルを定義する．

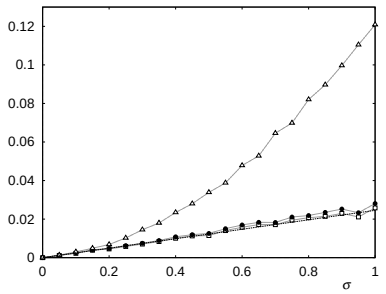


図 1 フロー基礎行列の平方平均2乗誤差．△：最小2乗法．●：くりこみ法．□：くりこみ法と最適補正．破線は理論的下界

Fig. 1 Root-mean-square error of flow fundamental matrix computation. △: least squares. ●: renormalization. □: renormalization and optimal correction. The dotted lines indicate the theoretical lower bound.

$$\boldsymbol{w} = \begin{pmatrix} W_{32} \\ W_{13} \\ W_{21} \end{pmatrix} \tag{3}$$

行列 $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{W}$ は次の「分解可能条件」を満たさなければならない [7]．

$$(\boldsymbol{w}, \boldsymbol{C}\boldsymbol{w}) = 0 \tag{4}$$

これは2画像の対応から定めた基礎行列は行列式が0であるという拘束 [14], [17] に対応する．校正済みカメラの場合はより強い分解可能条件が課される [6], [13]．

3. フロー基礎行列の計算

Brooks ら [2] や Viéville ら [16] はフロー基礎行列 $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{W}$ を単純な最小2乗法で求めているが，解に偏差が生じて精度が低下する [6]．そこで我々は画像の誤差の統計的モデルを導入し，フローにエピ極線方程式 (2) を最適に当てはめてフロー基礎行列を最適に計算するアルゴリズムを発表した [15]．これは「くりこみ法」[6] と呼ぶ手法で行列 $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{W}$ を計算すると同時に分解可能条件 (4) を満すように最適補正を施すものであり，その C++ プログラムを公開した(注1)．

図1は文献 [15] のシミュレーション例で計算したフロー基礎行列の平方平均2乗誤差（分散に当たる）である．横軸は各特徴点に加えた乱数誤差の標準偏差であり，毎回独立に 100 回の試行した．△は Brooks ら [2] や Viéville ら [16] が行った単純な最小2乗法 [2], [16]，

(注1): http://www.ail.cs.gunma-u.ac.jp/Labo/research.html

(a) (b)

図 2 (a) 道路シーン動画像から計算したオプティカルフロー (b) 推定したエピ極点とその信頼性評価

Fig. 2 (a) Optical flow computed from road scene images. (b) The estimated epipole and its uncertainty evaluation.

● はくりこみ法，□ はそれに最適補正を施したものである．破線は理論的下界であり，フロー基礎行列を計算する過程で自動的に推定できる [15]．図から解がほぼ下界に達することがわかる．

この下界を用いて諸量の信頼性が評価できる．図 2(a) は文献 [12] の方法で実画像から検出したオプティカルフローである．フローの共分散行列もフロー検出の過程で画像の濃淡値から計算できる [12]．これから最適にフロー基礎行列を計算し，推定したエピ極点（進行方向に対応する点）を中心として各方向の標準偏差を表す楕円を図示したのが図 2(b) である．

我々の方法ではフロー基礎行列の最適な推定値 $\hat{\boldsymbol{C}}$, $\hat{\boldsymbol{W}}$ だけでなく，その「標準偏位」$\boldsymbol{C}^{(+)}$, $\boldsymbol{W}^{(+)}$ 及び $\boldsymbol{C}^{(-)}$, $\boldsymbol{W}^{(-)}$ も計算される．これらはパラメータ空間で $\hat{\boldsymbol{C}}$, $\hat{\boldsymbol{W}}$ の誤差が最も生じやすい両方向に標準偏差だけずれた値を示すものであり，精度の理論限界に対応する．$\boldsymbol{C}^{(+)}$ と $\boldsymbol{C}^{(-)}$ の有効数字が例えば 3 けたで一致すれば，解 $\hat{\boldsymbol{C}}$ にほぼ有効数字 3 けたの精度があると保証される [6], [15]．また，これを用いて 3 次元復元の精度が予想できる（ 9 ．参照）．

4. フローの最適補正

特徴点の位置 $\boldsymbol{x}$ とフロー $\dot{\boldsymbol{x}}$ の精度の定性的性質を表す（定数倍を除いて定まる）「正規化共分散行列」を $V_0[\boldsymbol{x}]$, $V_0[\dot{\boldsymbol{x}}]$ とする．特徴点を画像処理によって抽出する場合は，これらを画像の濃淡値から計算することもできる [10]．

式 (1) 中の $(\dot{u}, \dot{v})$ を 2 画像間の対応する点間の変位で，(u, v) をその中点で置き換え，各点の誤差は独立で標準偏差は方向によらないと仮定すると，$\dot{\boldsymbol{x}}$, $\boldsymbol{x}$ の共分散行列は定数倍を除いて次のように書ける．

$$V_0[\dot{\boldsymbol{x}}] = 2\mathrm{diag}(1,1,0), \quad V_0[\boldsymbol{x}] = \frac{1}{2}\mathrm{diag}(1,1,0) \tag{5}$$

ただし $\mathrm{diag}(\cdots)$ は対角要素が $\cdots$ の対角行列を表す．特徴点の精度について特別の性質がない場合はこれをデフォルト値とする．

フロー基礎行列 $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{W}$ を最適に計算しても $\dot{\boldsymbol{x}}$, $\boldsymbol{x}$ は誤差のために必ずしも厳密にはエピ極線方程式 (2) を満たさない．そこで $\dot{\boldsymbol{x}}$, $\boldsymbol{x}$ が式 (2) を厳密に満たすように最適に補正する．これは次のように行う [6]．

$$\begin{aligned} \hat{\dot{\boldsymbol{x}}} &= \dot{\boldsymbol{x}} + \frac{E(\dot{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{x})}{V(\dot{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{x})} V_0[\dot{\boldsymbol{x}}]\boldsymbol{W}\boldsymbol{x} \\ \hat{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{x} - \frac{E(\dot{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{x})}{V(\dot{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{x})} V_0[\boldsymbol{x}](\boldsymbol{W}\dot{\boldsymbol{x}} + 2\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}) \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} E(\dot{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{x}) &= (\boldsymbol{x}, \boldsymbol{W}\dot{\boldsymbol{x}}) + (\boldsymbol{x}, \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}) \\ V(\dot{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{x}) &= (\boldsymbol{W}\boldsymbol{x}, V_0[\dot{\boldsymbol{x}}]\boldsymbol{W}\boldsymbol{x}) \\ &\quad + (\boldsymbol{W}\dot{\boldsymbol{x}} + 2\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}, V_0[\boldsymbol{x}](\boldsymbol{W}\dot{\boldsymbol{x}} + 2\boldsymbol{C}\boldsymbol{x})) \end{aligned} \tag{7}$$

式 (6) を $E(\hat{\dot{\boldsymbol{x}}}, \hat{\boldsymbol{x}}) = 0$ が十分満たされるまで $\dot{\boldsymbol{x}} \leftarrow \hat{\dot{\boldsymbol{x}}}$, $\boldsymbol{x} \leftarrow \hat{\boldsymbol{x}}$ と反復する．これはニュートン法と同じ 2 次収束をし，実際には 1 回の反復でも十分である．

補正値 $\hat{\dot{\boldsymbol{x}}}$, $\hat{\boldsymbol{x}}$ はエピ極線方程式を満たすので，それらの（正規化）共分散行列も自由度が拘束され，ランクが低下する．そこで次の（正規化）「事後共分散行列」に置き換える [6]．

$$\begin{aligned} V_0[\hat{\dot{\boldsymbol{x}}}] &= V_0[\dot{\boldsymbol{x}}] - \frac{(V_0[\dot{\boldsymbol{x}}]\boldsymbol{W}\boldsymbol{x})(V_0[\dot{\boldsymbol{x}}]\boldsymbol{W}\boldsymbol{x})^\top}{V(\dot{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{x})} \\ V_0[\hat{\boldsymbol{x}}] &= V_0[\boldsymbol{x}] \\ &\quad - \frac{V_0[\boldsymbol{x}](\boldsymbol{W}\dot{\boldsymbol{x}} + 2\boldsymbol{C}\boldsymbol{x})(V_0[\boldsymbol{x}](\boldsymbol{W}\dot{\boldsymbol{x}} + 2\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}))^\top}{V(\dot{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{x})} \end{aligned} \tag{8}$$

特徴点の位置 $\boldsymbol{x}$ の誤差とフロー $\dot{\boldsymbol{x}}$ の誤差とは独立とみなしているが，補正値 $\hat{\boldsymbol{x}}$, $\hat{\dot{\boldsymbol{x}}}$ はもはや独立ではない．それらの（正規化）「相関行列」は次のようになる [6]．

$$V_0[\hat{\boldsymbol{x}}, \hat{\dot{\boldsymbol{x}}}] = \frac{V_0[\boldsymbol{x}](\boldsymbol{W}\dot{\boldsymbol{x}} + 2\boldsymbol{C}\boldsymbol{x})(V_0[\dot{\boldsymbol{x}}]\boldsymbol{W}\boldsymbol{x})^\top}{V(\dot{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{x})} \tag{9}$$

この最適補正は通常はサブ画素の大きさであるが，遠方の点の 3 次元位置の精度に大きな影響を与える．また，これによって復元形状の信頼性評価が可能になる（ 8 ．参照）．

5. フロー基礎行列の分解

フロー基礎行列 $\boldsymbol{C}, \boldsymbol{W}$ には定数倍の不定性があり，分解可能条件 (4) を満す．$\boldsymbol{C}$ は対称行列，$\boldsymbol{W}$ は反対称行列であるから，$\boldsymbol{C}, \boldsymbol{W}$ には 7 自由度ある．$\boldsymbol{C}, \boldsymbol{W}$ の定数倍の不定性から並進速度 $\boldsymbol{v}$ の絶対値が不定となり，運動パラメータ $\{\boldsymbol{v}, \boldsymbol{\omega}\}$ は 5 自由度をもつ．したがって，カメラの運動が任意であれば最大 2 個のカメラパラメータしか計算できない．

その 2 パラメータとして現実的な選択は焦点距離 f 及びその変化速度 $\dot{f}$ であろう．その他のカメラに固有パラメータはあらかじめ校正しておくことができる．また今日のカメラでは標準値，すなわち光軸点（光軸の通過点）がフレームの中心にあり，アスペクト比（画素の縦横比）が 1，ひずみ角（画素の行と列のなす角）が 90° と仮定してもほとんど問題と思われる．しかし焦点距離（ズーム）は撮影のたびに変化することが多い．

焦点距離以外が標準値のとき，Brooks ら [2] は行列 $\boldsymbol{C}, \boldsymbol{W}$ から焦点距離 f とその変化速度 $\dot{f}$ 及び運動パラメータ $\{\boldsymbol{v}, \boldsymbol{\omega}\}$ を計算する複雑な代数的手順を示したが，複素数を用いれば回転群の表現論 [3], [4] により次のように単純な計算で求まる [7]．

（1） 行列 $\boldsymbol{C} = (C_{ij})$ から次の量を計算する．

$$A = C_{11} + C_{22}, \quad \tilde{B} = (C_{11} - C_{22}) + 2iC_{12}$$
$$\tilde{C} = 2(C_{13} + iC_{23}), \quad D = C_{33} \tag{10}$$

（2） 行列 $\boldsymbol{W}$ から式 (3) のベクトル $\boldsymbol{w} = (w_i)$ を計算する．

（3） 次のように複素数 $\tilde{w}, \tilde{\omega}$ を計算する．

$$\tilde{w} = w_1 + iw_2, \quad \tilde{\omega}' = \frac{\tilde{B}}{\tilde{w}} \tag{11}$$

（4） 次のように ω_1', ω_2' を計算する．

$$\omega_1' = \Re[\tilde{\omega}'], \quad \omega_2' = \Im[\tilde{\omega}'] \tag{12}$$

（5） 次のように ω_3, f' を計算する．

$$\omega_3 = -\frac{A + (\tilde{w}, \tilde{\omega}')}{2w_3}, \quad f' = \sqrt{-\frac{D}{(\tilde{w}, \tilde{\omega}')}} \tag{13}$$

（6） 次のように複素数 $\tilde{\phi}$ を計算する．

$$\tilde{\phi} = \frac{\tilde{C} - f'^2 w_3 \tilde{\omega}'}{\tilde{w}} \tag{14}$$

（7） 次のように ω_3，$\dot{f}'$ を計算する．

$$\omega_3 = \Re[\tilde{\phi}], \quad \dot{f}' = -f'\Im[\tilde{\phi}] \tag{15}$$

（8） 次のように ω_1, ω_2 を計算する．

$$\omega_1 = f'\omega_1', \quad \omega_2 = f'\omega_2' \tag{16}$$

（9） 次のように焦点距離 f とその変化速度 $\dot{f}$ を計算する．

$$f = f'f_0, \quad \dot{f} = \dot{f}'f_0 \tag{17}$$

（10） 次のように並進速度 $\boldsymbol{v}$ を計算する．

$$\boldsymbol{v} = N\left[\begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ (f/f_0)w_3 \end{pmatrix}\right] \tag{18}$$

ただし i は虚数単位であり，チルドのついた量は複素数である．$\Re[\cdot]$, $\Im[\cdot]$ は複素数の実部，虚部を表す．また複素数 $z = x + iy$, $z' = x' + iy'$ の "内積" を $(z, z') = xx' + yy'$ と定義した．$N[\cdot]$ は単位ベクトルへの正規化を表す（$N[\boldsymbol{a}] = \boldsymbol{a}/\|\boldsymbol{a}\|$）．$\omega_3$ が式 (13) の第 1 式と式 (15) の第 1 式と 2 通りに計算されるが，これは分解可能条件 (4) のためである．この事実はエラーチェックに利用できる（分解可能条件 (4) が満たされていないと両者は一致しない）．解は光軸がねじれの位置に移動するようなカメラ運動であれば一意に定まる [7]．

6. 焦点距離の変換

焦点距離 f とその変化速度 $\dot{f}$ を用いて $\hat{\hat{\boldsymbol{x}}}$, $\hat{\boldsymbol{x}}$ を次のように変換する．

$$\hat{\hat{\boldsymbol{x}}} \leftarrow \frac{f_0}{f}\left(\hat{\hat{\boldsymbol{x}}} - \frac{\dot{f}}{f}\boldsymbol{P}\hat{\boldsymbol{x}}\right), \quad \hat{\boldsymbol{x}} \leftarrow \mathrm{diag}\left(\frac{f_0}{f}, \frac{f_0}{f}, 1\right)\hat{\boldsymbol{x}} \tag{19}$$

ただし $\boldsymbol{P} = \mathrm{diag}(1, 1, 0)$ と置いた．第 2 式は式 (1) の焦点距離の近似値 f_0 を真値 f に取り換えるものである．第 1 式は更にズーム変化で生じた見かけのフローを差し引いて真のフローに変換するものである．この結果 $\hat{\boldsymbol{x}}$, $\hat{\hat{\boldsymbol{x}}}$ はそれぞれカメラのレンズ中心から見たその点の視線方向とその変化速度と解釈できる．これらの（正規化事後）共分散行列と（正規化）相関行列も次のように変換される．

$$V_0[\hat{\hat{\boldsymbol{x}}}] \leftarrow \frac{f_0^2}{f^2}\left(V_0[\hat{\hat{\boldsymbol{x}}}] - \frac{2\dot{f}}{f}S[V_0[\hat{\boldsymbol{x}}, \hat{\hat{\boldsymbol{x}}}]] + \frac{\dot{f}^2}{f^2}V_0[\hat{\boldsymbol{x}}]\right)$$

$$V_0[\hat{\boldsymbol{x}}, \hat{\dot{\boldsymbol{x}}}] \leftarrow \frac{f_0^2}{f^2}\left(V_0[\hat{\boldsymbol{x}}, \hat{\dot{\boldsymbol{x}}}] - \frac{\dot{f}}{f}V_0[\hat{\boldsymbol{x}}]\right)$$
$$V_0[\hat{\boldsymbol{x}}] \leftarrow \frac{f_0^2}{f^2}V_0[\hat{\boldsymbol{x}}] \qquad (20)$$

ただし $S[\,\cdot\,]$ は対称化を表す ($S[\boldsymbol{A}] = (\boldsymbol{A} + \boldsymbol{A}^\top)/2$) .

7. 奥行の計算

ベクトル $\boldsymbol{x}$ に対応するシーン中の特徴点の位置 $\boldsymbol{r}$ は次のように表される .

$$\boldsymbol{r} = Z\boldsymbol{x} \qquad (21)$$

ここに Z はカメラ座標系の原点 (レンズの中心) から光軸に平行に測った奥行きであり , 次のように計算される [6], [13] .

$$Z = -\frac{(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{x}}\boldsymbol{v})}{(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{x}}(\dot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{x}))} \qquad (22)$$

ただし次のように置いた ($\boldsymbol{I}$ は単位行列 , $\boldsymbol{k} = (0, 0, 1)^\top$) .

$$\boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{I} - \boldsymbol{x}\boldsymbol{k}^\top, \qquad \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{x}}^\top\boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{x}} \qquad (23)$$

ここで符号の選択を行う . フロー基礎行列 $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{W}$ は定数倍を除いて定まるため符号が不定であり , したがって並進速度 $\boldsymbol{v}$ の符号も不定である . これはシーンがカメラの前方にあっても後方にあっても数学的には同じ透視変換の式となることに起因する . そこで各点 $\hat{\boldsymbol{x}}_\alpha$, $\alpha = 1, ..., N$ の奥行 $\hat{Z}_\alpha$ を計算し ,

$$\sum_{\alpha=1}^{N} \mathrm{sgn}[\hat{Z}_\alpha] < 0 \qquad (24)$$

であれば各 $\hat{Z}_\alpha$ 及び $\boldsymbol{v}$ の符号を変える . ただし $\mathrm{sgn}[\,\cdot\,]$ は符号関数であり , $x > 0$, $x = 0$, $x < 0$ に応じて 1, 0, -1 をとる . 符号関数を用いるのは , 単に $\sum_{\alpha=1}^{N} \hat{Z}_\alpha$ を計算すると遠方の点の奥行が誤差のために $-\infty$ に近い値になることがあり , 正しい解が選ばれない可能性があるためである [6] .

8. 3 次元復元の信頼性評価 1

奥行 Z の推定値 $\hat{Z}$ から 3 次元位置 $\hat{\boldsymbol{r}}$ が式 (21) で定まる . その正規化共分散行列は次のように書ける [6], [13] .

$$V_0[\hat{\boldsymbol{r}}] = \hat{Z}^2V_0[\hat{\boldsymbol{x}}] + 2\hat{Z}S[V_0[\hat{Z}, \hat{\boldsymbol{x}}]\hat{\boldsymbol{x}}^\top] + V_0[\hat{Z}]\hat{\boldsymbol{x}}\hat{\boldsymbol{x}}^\top \qquad (25)$$

$\hat{\boldsymbol{x}}$ の (正規化事後) 共分散行列 $V_0[\hat{\boldsymbol{x}}]$ は式 (20) の第 1 式で与えられる . $\hat{Z}$ の正規化分散 $V_0[\hat{Z}]$ と $\hat{Z}$, $\hat{\boldsymbol{x}}$ の正規化相関ベクトル $V_0[\hat{Z}, \hat{\boldsymbol{x}}]$ は式 (22) より次のようになる [6], [13] .

$$V_0[\hat{Z}] = \frac{\hat{Z}^4}{(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{S}_{\hat{\boldsymbol{x}}}\boldsymbol{v})}\mathrm{tr}\left(V_0[\hat{\dot{\boldsymbol{x}}}] + 2S[\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}}(\boldsymbol{\omega} \times V_0[\hat{\boldsymbol{x}}, \hat{\dot{\boldsymbol{x}}}])] - aV_0[\hat{\boldsymbol{x}}, \hat{\dot{\boldsymbol{x}}}] + \boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}}(\boldsymbol{\omega} \times V_0[\hat{\boldsymbol{x}}] \times \boldsymbol{\omega})\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}}^\top - 2aS[\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}}(\boldsymbol{\omega} \times V_0[\hat{\boldsymbol{x}}])] + a^2V_0[\hat{\boldsymbol{x}}]\right) \qquad (26)$$

$$V_0[\hat{Z}, \hat{\boldsymbol{x}}] = \frac{\hat{Z}^2}{(\boldsymbol{v}, \boldsymbol{S}_{\hat{\boldsymbol{x}}}\boldsymbol{v})}\left(V_0[\hat{\boldsymbol{x}}, \hat{\dot{\boldsymbol{x}}}]\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}}\boldsymbol{v} - V_0[\hat{\boldsymbol{x}}](\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{S}_{\hat{\boldsymbol{x}}}\boldsymbol{v} + a\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{x}}}\boldsymbol{v})\right) \qquad (27)$$

tr はトレースであり , 次のように置いた .

$$a = \frac{(\boldsymbol{k}, \boldsymbol{v})}{\hat{Z}} + |\boldsymbol{k}, \boldsymbol{\omega}, \hat{\boldsymbol{x}}| \qquad (28)$$

$|\boldsymbol{k}, \boldsymbol{\omega}, \hat{\boldsymbol{x}}|$ は $\boldsymbol{k}$, $\boldsymbol{\omega}$, $\hat{\boldsymbol{x}}$ のスカラ 3 重積である .

9. 3 次元復元の信頼性評価 2

前章までの解析ではフロー基礎行列 $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{W}$ を正しいと仮定し , 式 (6) のフローの最適補正を行い , $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{W}$ の分解によって得られた f, $\dot{f}$ によって式 (19) の変換を行い , $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{W}$ から計算した運動パラメータ $\{\boldsymbol{v}, \boldsymbol{\omega}\}$ を用いて式 (22) から奥行きを計算した . そして各点 $\hat{\boldsymbol{x}}$ 及びそのフロー $\hat{\dot{\boldsymbol{x}}}$ に含まれる誤差の復元位置 $\hat{\boldsymbol{r}}$ に及ぼす影響を評価したのが式 (25) の正規化共分散行列 $V_0[\hat{\boldsymbol{r}}]$ である .

“正規化” というのは誤差の絶対量 ϵ (ノイズレベル) を 1 とするという意味であり , ϵ の推定値 $\hat{\epsilon}$ は $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{W}$ をくりこみ法で計算する過程から自動的に計算される [15] . したがって絶対的な共分散行列 $V[\hat{\boldsymbol{r}}]$ は $\hat{\epsilon}^2V_0[\hat{\boldsymbol{r}}]$ となる .

しかし , フロー基礎行列 $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{W}$ も誤差のあるデータから計算した以上誤差が含まれている . 実際 , その精度を共分散テンソルによって評価できる [15] . しかし , それから f, $\dot{f}$, $\{\boldsymbol{v}, \boldsymbol{\omega}\}$ の誤差とそれらの相関を厳密に解析すると非常に複雑になる . そこで次のようにする .

3 . に述べたようにくりこみ法のよるフロー基礎行列の計算から自動的にその標準偏位 $\boldsymbol{C}^{(\pm)}$, $\boldsymbol{W}^{(\pm)}$ が計算される . これから対応する $f^{(\pm)}$, $\dot{f}^{(\pm)}$, $\{\boldsymbol{v}^{(\pm)}, \boldsymbol{\omega}^{(\pm)}\}$ を計算し , 復元した 3 次元位置を $\boldsymbol{r}^{(\pm)}$ とする . そしてフロー基礎行列の誤差の影響を 2 点 $\boldsymbol{r}^{(+)}$, $\boldsymbol{r}^{(-)}$

を結ぶ線分で近似する．推定値 $\hat{\boldsymbol{r}}$ は第 1 近似ではこれらの中点にあるから $(\boldsymbol{r}^{(+)}-\hat{\boldsymbol{r}})(\boldsymbol{r}^{(+)}-\hat{\boldsymbol{r}})^{\top}$ が共分散行列とみなせる．したがって $\boldsymbol{r}^{(+)}$ のみ計算すればよい．

式 (25) は各点 $\boldsymbol{x}$ とフロー $\hat{\boldsymbol{x}}$ の誤差がその点の復元位置 $\hat{\boldsymbol{r}}$ に及ぼす影響を記述するものであり，その関係は直接的である．しかしフロー基礎行列 $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{W}$ はすべての点のフローから計算するので，個々の点の誤差との相関は小さいと期待される．そこで最終的な 3 次元復元の共分散行列を，第 1 近似として一つの要因のみに誤差を考慮した項の和として次のように評価する．

$$V[\hat{\boldsymbol{r}}] = \hat{\epsilon}^2 V_0[\hat{\boldsymbol{r}}] + (\boldsymbol{r}^{(+)}-\hat{\boldsymbol{r}})(\boldsymbol{r}^{(+)}-\hat{\boldsymbol{r}})^{\top} \qquad (29)$$

省略された項は両者の積またはそれ以上のオーダの微小量となる．誤差の分布を正規分布で近似すると，復元した点 $\hat{\boldsymbol{r}}$ を中心とし各方向に標準偏差以下の点は次の楕円体の内部（「標準領域」）となる [6]．

$$(\boldsymbol{r}-\hat{\boldsymbol{r}}, V[\hat{\boldsymbol{r}}]^{-1}(\boldsymbol{r}-\hat{\boldsymbol{r}})) = 1 \qquad (30)$$

このような評価が実際の解の不確定性を近似していることは種々の幾何学的当てはめ問題においてシミュレーションにより確認されている [6]．

10. シミュレーション実験

図 3 は格子状の環境モデルのシミュレーション画像である（512×512 画素）．各格子点の x, y 座標に期待値 0，標準偏差 0.5 （画素）の正規乱数を独立に加え，対応する頂点の変位をそれらの中点におけるフローとみなし，式 (5) のデフォルト誤差モデルを用いて 3 次元復元を行った．

図 4(a) は復元した形状（実線）に真の形状（点線）を $\|\boldsymbol{v}\| = 1$ となるスケールで重ね，斜め上から眺めたものである．図 4(b) は復元点を中心とし，式 (30) の標準領域を 3 倍して表示したものである．これらが非常に細長いのは誤差が奥行方向に大きいことを意味する．またカメラから遠い点ほど誤差が大きい．図 4(a) と比較すると，真の位置とのずれを近似的に表している．

ただし確率分布としての共分散行列の意味からはやや過小評価のようである．誤差を変えて何回か実験を行ってもこの程度のずれは常に生じる．これは瞬間運動を差分で近似したこと，高次の項を省略したこと，及びフロー基礎行列の分散を標準偏位で代表させたためと思われる．一般に厳密な誤差評価は困難な問題であるが，大まかな傾向や分散の大小比較にはこのような評価で十分役に立つであろう．

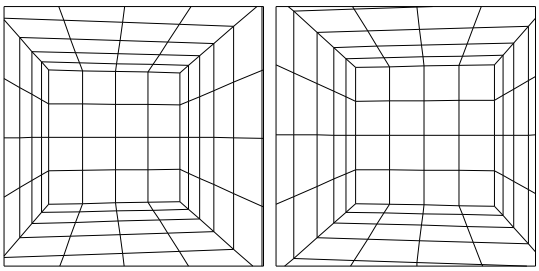
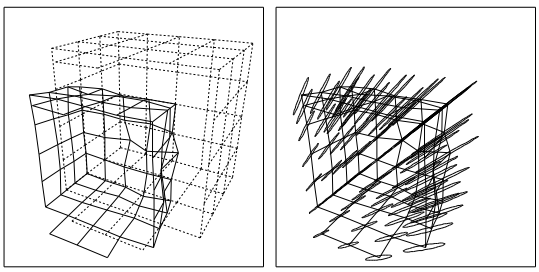


図 3 3 次元シーンのシミュレーション画像
Fig. 3 Simulated images of a 3-D scene.



(a) (b)

図 4 (a) 復元した形状（実線）と真の形状（破線）．(b) 格子点の標準領域
Fig. 4 (a) Reconstructed shape (solid lines) and the true shape (broken lines). (b) The standard regions of the grid points.

図 5 室内シーンの実画像
Fig. 5 Real images of an indoor scene.

11. 実画像実験

図 5 の室内シーンの実画像（512×768 画素）から手で図中に示した特徴点を選んで対応づけ，その画像座標値の変位をそれらの中点におけるフローとみなし，式 (5) のデフォルト誤差モデルを用いて 3 次元復元を行った（焦点距離以外のカメラパラメータは標準値）．図 6 は復元した特徴点を横から眺めたもののステレオグラムである．各復元点を中心に式 (30) の標準領域を表示し，シーン中の一部はワイヤフレーム表示した．

これを見ると物体の形状が奥行方向に非常に不確定

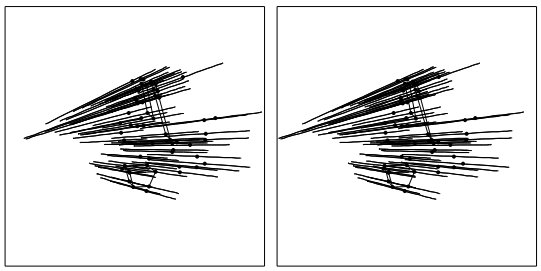
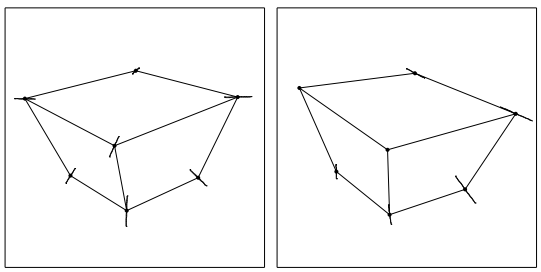


図 6　復元した形状とその標準領域 (ステレオグラム)
Fig. 6　Reconstructed points and their standard regions (stereogram).



(a)　(b)

図 7　頂点の標準領域 . (a) 重心と平均寸法の正規化 , (b)3 点の正規化
Fig. 7　Standard regions of the vertices. (a) Normalization of the centroid and the size. (b) Normalization of the three vertices.

に見える . しかし , これはカメラの並進速度の不確定さが原因で , 形状自体はそれほど不確定ではない . これを見るためにシーン中の多面体物体を取り出し , その重心を原点とし , 各頂点までの距離の平方平均 2 乗が 1 となるスケールで表示したのが図 7(a) である . 図 6 に比べて標準領域が極めて小さい . 図 7(b) は 3 頂点を選び , 一つを原点に , もう一つが $(1,0,0)$ に , 残りが XY 面上に来るような座標系をとったものである . 定義により原点と $(1,0,0)$ とした点には不確定性がなく , それらには標準領域が存在しない .

このように復元形状は同一でも , どのような正規化 (「ゲージ」) を用いるかによってその信頼性評価が変化する . これを体系的に記述する「ゲージ理論」[9] によると , 不確定性の記述は正規化に依存して絶対的な意味はもたず , 絶対的な意味をもつのは正規化の変化 (「ゲージ変換」) に不変な量 (「ゲージ不変量」) の不確定性である . 代表的なゲージ不変量は長さの比と角度である .

表 1 に図 7 の 3 次元復元から計算した物体の上部手前の 2 辺の長さの比とそれらのなす角を示す . そして ,

表 1　辺の長さの比となす角度の信頼性
Table 1　Reliability of the ratio of edge lengths and the angle.

	計算値	実測値	理論的標準偏差
比	1.02	1.00	0.08
角度 (deg)	95.1	90.0	17.0

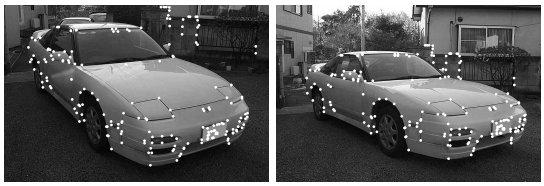


図 8　屋外の乗用車の実画像
Fig. 8　Real images of a car.

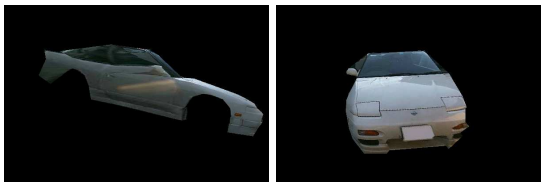


図 9　復元した乗用車の 3 次元形状
Fig. 9　3-D reconstruction of the car.

物指しで測った実測値及び式 (29) から予測した理論的標準偏差を示す . 3 次元復元の信頼性評価ではこのようなゲージ不変量に関する不確定性の記述のみが意味をもつ . 表 1 の理論的標準偏差の値は実測値からのずれを過大評価しているが , これも図 4 と同様に , 瞬間運動を差分で近似したこと , 高次の項を省略したこと , 及びフロー基礎行列の分散を標準偏位で代表させたためと思われる . それ以外に 3 次元復元した点と実測した点とにくい違いがあることも考えられる。厳密な誤差評価は困難な問題であるが , 大まかな傾向やを知るにはこのような評価で十分役に立つであろう .

図 8 の乗用車の実画像 (512×768 画素) から手で図中に示した特徴点を選んで対応づけ , その画像座標値に式 (5) のデフォト誤差モデルを用いて 3 次元復元を行った (焦点距離以外のカメラパラメータは標準値) . 図 9(a), (b) は復元した特徴点からワイヤフレームモデルを作り , テクスチャマッピングを施したものである . カメラから遠い部分はあまり正確とはいえないが , カメラに近い部分はほぼ正しく表示されている .

12.　む　す　び

本論文では焦点距離が未知のカメラによって観測したオプティカルフローから統計的に最適な 3 次元復元

を行うとともに，復元形状の信頼性を第1近似により評価した．そして，シミュレーション及び実画像実験によって本システムの性能を評価し，不定性を除去する正規化（ゲージ）の不確定性の記述に与える影響を考察した．

同一データで比較すると，本論文の結果は基礎行列による方法 [8] に比べてやや精度が劣り，Baumela ら [1] も同様な結論を得ている．このため3次元復元のみが目的なら基礎行列による方法がより適切であろう．しかし，オプティカルフローによる領域分割や移動物体識別の過程で補助的に3次元情報を用いる場合には本論文のシステムが有効であると思われる．

謝辞　協力頂いたオーストラリア Adelaide 大学の M.J. Brooks 教授，W. Chojnacki 博士，A. van den Hengal 博士に感謝する．またスペイン Madrid 工科大学の L. Baumela 博士，英国 Oxford 大学の L. de Agapito 博士，理化学研究所の向井利春博士との有益な討論を感謝する．本研究の一部は文部省科学研究費基盤研究C (2) (No. 13680432) によった．

文　献

[1] L. Baumela, L. de Agapito, P. Bustos and I. Reid, "Motion estimation using the differential epipolar equation," Proc. 15th Int. Conf. Patt. Recogn., Barcelona, Spain, vol.3, pp.848–851, Sept. 2000.

[2] M. J. Brooks, W. Chojnacki and L. Baumera, "Determining the egomotion of an uncalibrated camera from instantaneous optical flow," J. Opt. Soc. Am., ser.A, vol.14, no.10, pp.2670–2677, 1997.

[3] 金谷健一, "3 次元復元のための座標回転不変量の構成," 信学論 (D), vol.J70-D, no.5, 937–945, May 1987.

[4] K. Kanatani, "Group-Theoretical Methods in Image Understanding," Springer, Berlin, 1990.

[5] K. Kanatani, Geometric Computation for Machine Vision, Oxford University Press, Oxford (1993).

[6] K. Kanatani, Statistical Optimization for Geometric Computation: Theory and Practice, Elsevier, Amsterdam, 1996.

[7] 金谷健一, M. J. Brooks, "フロー基礎行列の分解: 自己校正法の群論的方法," 情処学研報, 2000-CVIM-120-8, pp.57–64, Jan. 2000.

[8] 金谷健一, 三島　等, "未校正カメラによる2画像からの3次元復元とその信頼性評価," 情処学論: CVIM, vol.42, no.SIG 6(CVIM 2), pp.1–8, June 2001.

[9] K. Kanatani and D. D. Morris, "Gauges and gauge transformations for uncertainty description of geometric structure with indeterminacy," IEEE Trans.Inf. Theory, Vol.47, no.5, July 2001, pp.2017–2028.

[10] 金澤　靖, 金谷健一, "画像の特徴点に共分散行列は本当に必要か？," 情処学研報, 2001-CVIM-126-1, pp.1–8, Mar. 2001.

[11] 向井利春, 大西　昇, "オプティカルフロー画像からの線形計算による3次元運動パラメータと構造の復元," 計測自動制御学論, vol.34, no.5, pp.438–444, 1998.

[12] N. Ohta, "Image movement detection with reliability indices," IEICE Trans., vol.E74, no.10, pp.3379–3388, Oct. 1991.

[13] N. Ohta and K. Kanatani, "Optimal structure-from-motion algorithm for optical flow," IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E78-D, no.12, pp.1559–1566, Dec. 1995.

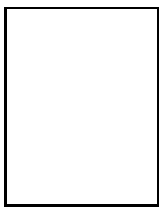
[14] 佐藤　淳, コンピュータビジョン—視覚の幾何学—, コロナ社, 1999.

[15] 清水慶行, 金谷健一, "オプティカルフロー基礎行列の最適計算とその信頼性評価," 情処学研報, 99-CVIM-118-11, pp.75–82, Sept. 1999.

[16] T. Viéville and O. D. Faugeras, "The first order expansion of motion equations in the uncalibrated case," Comput. Vision Image Understand., vol.64, no.1, pp.128–146, 1996.

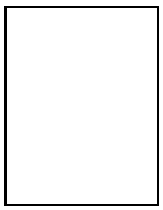
[17] 徐　剛, 辻三郎, 3次元ビジョン, 共立出版, 1998.

（平成12年9月25日受付，13年1月23日再受付）



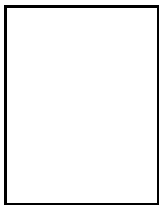
金谷　健一　（正員）

1972 東大・工・計数（数理工学）卒．1979 同大大学院博士課程了．工博．群馬大学工学部情報工学科教授を経て，現在，岡山大学工学部情報工学科教授．米国 Maryland 大学，デンマーク Copenhagen 大学，英国 Oxford 大学，フランス INRIA 客員研究員歴任．



太田　直哉　（正員）

1983 東京農工大・工・応物卒．1985 東工大大学院修士課程了．博（工）．1987（株）日本電気入社．現在，群馬大学工学部情報工学科助教授．米国 MIT メディアラボ，オーストラリア Adelaide 大学客員研究員歴任．



清水　慶行

1998 年群馬大・工・情報卒．2000 同大学院修士課程了．同年（株）シャープ入社．現在液晶モバイルシステムの開発に従事．