

## エピ極線幾何学による 2 画像間の密な点対応の生成 Generating Dense Point Matches over Two Images Using Epilolar Geometry

菅谷 保之<sup>†</sup>      金澤 靖<sup>‡</sup>      金谷 健一<sup>†</sup>

Yasuyuki Sugaya<sup>†</sup>, Yasushi Kanazawa<sup>‡</sup>, Kenichi Kanatani<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 岡山大学大学院自然科学研究科      <sup>‡</sup> 豊橋技術科学大学知識情報工学系

<sup>†</sup>Department of Computer Science Okayama University,

<sup>‡</sup>Department of Knowledge-based Information Engineering Toyohashi University of Technology

E-mail: sugaya@suri.it.okayama-u.ac.jp

### Abstract

2 画像間に密な点対応を生成する方法を述べる。まず少数の初期対応から基礎行列を計算し、それを用いてエピ極線が水平にそろるように 2 画像を平行化し、一方の画像から抽出した特徴点に対してテンプレートを水平に走査する。しかし、このような 2 次元画像上の対応探索には限界がある。これを克服するために、本論文では得られる対応に対する「シーンの 3 次元形状の自然さ」まで考慮して誤対応を除去する。まず平行化の手順を述べ、大きさの異なる複数のテンプレートを用いる階層的探索や多数決原理、大域的整合性による疑わしい対応の除去、および仮の 3 次元復元に基づく誤対応の除去を導入する。最後に実画像例を示す。

### 1. まえがき

本論文では異なる視点から撮影した画像から 3 次元形状を復元する際の特徴点の対応づけを考える。

対応抽出の原理は、2 画像上に特徴点抽出フィルタ [12] によって独立に特徴点を抽出し、各点の近傍の類似度をテンプレートマッチング [9] で測り、類似のものを対応づけることである。そして、誤対応を排除するためにエピ極線拘束条件、射影変換、大域的整合性のような拘束条件を導入し、条件を満たさないものを排除する [11, 16]。

しかし、このように疑わしい対応を排除すると、最終的にごく少数の対応しか残らないことが多い。しかも、それが画像上の一部に集中することもある。

これを解決する代表的な方法は、得られた対応から基礎行列 [7] を計算し、第 1 画像上に新たな特徴点を定義し、計算した基礎行列が定義するエピ極線に沿って第 2 画像上の対応点を探索することである。これはステレオ画像の対応探索の原理であるが、そのエピ極線が水平であればテンプレートの走査が容易になることから、まずエピ極線が平行になるように画像を変換する方法が知られている。これは画像をあたかも平行移動したカメラから撮影したかのように変換するものであり、本論文ではこれを画像の平行化 (image rectification) と呼ぶ。

これを初めて提唱したのは Ayache ら [2, 3, 4] であり、カメラは校正済みと仮定された。一方、カメラが未校正のまま基礎行列のみから平行化する理論は Hartley [6] によって提唱され、その簡略化 [1] やパラメータの最適化 [8, 13]、三眼視への拡張 [15] が提案された。

本論文では射影変換に基づく新たな平行化の手順を提案する。これは原理的には従来の手法 [1, 6, 8, 13] と大差ないが、計算がより単純で、幾何学的解釈がより明確になる。

また本論文では大きさの異なる複数のテンプレートを用いる階層的探索、多数決原理を導入する。さらに、得られた対応から大域的整合性を考慮して疑わしい対応を除去する。

しかし、エピ極線拘束条件を満たし、かつその近傍が類似しているような特徴点間の誤対応を 2 次元画像上の探索のみで回避するのは困難である。「そのような誤対応はそのシーンの 3 次元形状を考慮すると不自然である」という、3 次元にまで踏み込んだ判定が不可欠である。しかし、3 次元形状を計算するには正しい対応づけが必要である。本論文では反復によって、復元した 3 次元形状をチェックしながら誤対応を検出する方法を示す。そして、実画像実験によって、2 次元画像上の処理では除去不可能な誤対応が除去されることを実証する。

### 2. 平行化の手順

本論文の平行化の手順を次に示す (図 1)。

#### 2.1 対応の入力

入力となる対応は自動対応づけ処理 [11, 16] で得られる対応から信頼性があると思われるものを選んでよいし、手動で与えてもよい。これは応用に依存して決めることとして、本システムでは単に与えられる入力とする。

## 2.2 基礎行列の計算

少数の対応からでも高精度に基礎行列を求める必要があるため、統計的に最適な手法であるくりこみ法<sup>1</sup>[14]を用いる。本論文ではフレームの中心を原点  $(0, 0)$  とし、上方を  $x$  軸、右方を  $y$  軸、 $z$  軸を奥行き方向にとる座標系を考え、画像からある距離  $f_0$  (単位は画素) だけ離れた位置に視点があるとして基礎行列を計算する。

## 2.3 エピ極点の計算

計算した基礎行列を  $F$  とするとき、 $F^T$ 、 $F$  の固有値  $0$  の単位固有ベクトルをそれぞれ  $e, e'$  とする。ベクトル  $e, e'$  の始点を視点に置いたとき、これらの指す画像上の位置をエピ極点と呼ぶ。

## 2.4 画像の回転

ベクトル  $e = (e_1, e_2, e_3)^T$  から第 1 画像上のエピ極点  $(x_e, y_e)$  が  $e_3 \neq 0$  のとき次のように定まる。

$$x_e = f_0 \frac{e_1}{e_3}, \quad y_e = f_0 \frac{e_2}{e_3} \quad (1)$$

これが  $y$  軸上に載るように画像を原点の周りに次のように回転する。これによって各点  $(x, y)$  が次の点  $(\tilde{x}, \tilde{y})$  に写像される。

$$\tilde{x} = x \cos \theta - y \sin \theta, \quad \tilde{y} = x \sin \theta + y \cos \theta \quad (2)$$

ただし、 $\theta$  は原点と  $(x_e, y_e)$  を結ぶ線分から  $y$  軸までの角度である。これによりエピ極点が  $(0, e)$  に移る。ただし、次のように置いた。

$$e = x_e \sin \theta + y_e \cos \theta \quad (3)$$

## 2.5 エピ極線の平行化

よく知られているように、すべてのエピ極線はその画像のエピ極点を通る。したがって、エピ極点を無限遠に写像する射影変換を施せば、すべてのエピ極線が平行になる。そこで次の射影変換によってエピ極点  $(0, e)$  を無限遠点  $(0, \pm\infty)$  に写像する。

$$\hat{x} = \frac{\tilde{x}}{1 - \tilde{y}/e}, \quad \hat{y} = \frac{\tilde{y}}{1 - \tilde{y}/e} \quad (4)$$

## 2.6 高さの調節

以上の変換によって各画像上のエピ極線は水平になるので、対応するエピ極線の高さが同じになるように、次の射影変換によって第 2 画像を上下に伸縮する。

$$\bar{x}' = \frac{a\hat{x}' + b}{c\hat{x}' + 1}, \quad \bar{y}' = \frac{a\hat{y}'}{c\hat{x}' + 1} \quad (5)$$

係数  $a, b, c$  は平行化した第 1 画像の特徴点と式 (5) によって変換した特徴点の高さがなるべくそろうように最小二乗法によって計算する。

<sup>1</sup>以下にプログラムを公開している。  
<http://www.img.tutkie.tut.ac.jp/programs/>

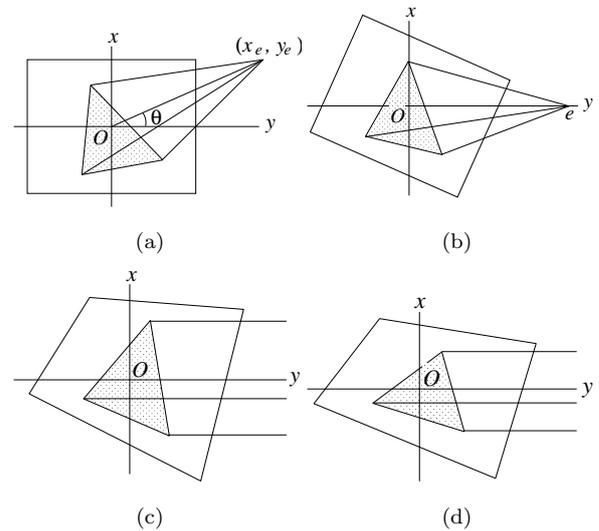


図 1 画像の回転 (a)→(b)、エピ極線の平行化 (b)→(c)、エピ極線の高さの調節 (c)→(d)。

Hartley [6] の方法で定まる射影変換は一意的ではなく、3 自由度が残る。従来方法では不定の 3 自由度を定めるために、個々の特徴点位置を用いた種々の最適化を施している。上記の方法はその不定の 3 自由度を

1. 第 1 画像の原点は不変、
2. 第 2 画像の原点の水平位置は不変、
3. 両画像の原点の近傍でアスペクト (縦横比) と直交関係が保たれる

ように定めたことに等しい。従来方法では最適化の意味が明確でなく、変換画像がどのようなものかは変換してみないとわからないのに対して、本論文の方法では最適化計算が不要であるだけでなく、変換画像の性格が明確であり、かつ妥当であると考えられる。

## 3. テンプレートマッチング

### 3.1 多重スケールテンプレートマッチング

新たな対応を生成するには、まず Harris 作用素<sup>2</sup>[5, 12] で第 1 原画像上に指定した個数の特徴点を発生させ、その各々に対して変換後の第 2 画像上の同じ高さの水平線に沿ってテンプレートマッチングで対応点を探索する。

このときテンプレートのサイズが問題となる。両画像で見え方が大域的にほぼ同じ領域ではテンプレートが大きいほうがロバストであるが、そうでなければテンプレートを小さくする必要がある。しかし、どちらかは事前には不明である。

そこで、本システムでは  $33 \times 33, 17 \times 17, 9 \times 9, 5 \times 5, 3 \times 3$  の 5 種類のテンプレートを用いる。対応を定める方法として、本システムは次の二通りを考える。

階層的探索  $s = 16$  から出発して、 $(2s+1) \times (2s+1)$  テンプレートが最もよくマッチする位置を定め、次

<sup>2</sup>以下にプログラムを公開している。  
<http://www.img.tutkie.tut.ac.jp/programs/>

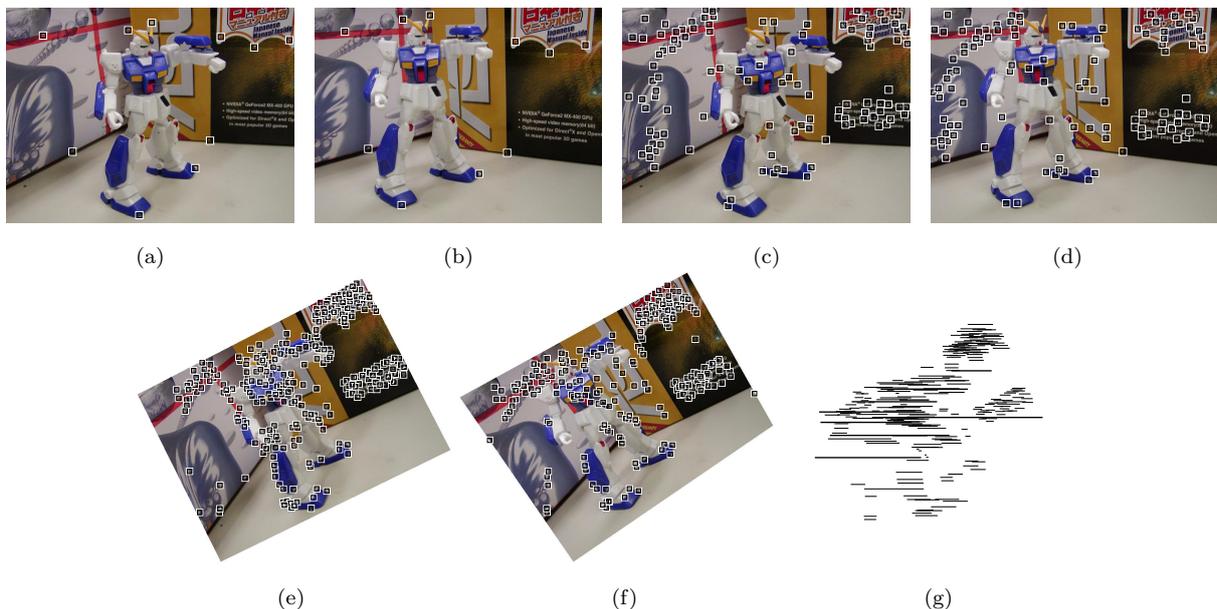


図2 (a), (b) 入力画像と入力した対応点 . (c), (d) 自動対応づけで得られる対応点 . (e), (f) 第1画像上から検出した特徴点を平行化した画像上で探索した結果 . (g) その対応のオプティカルフロー . 太線は大域的整合性によって除去されたフロー .

にその内部を  $(s+1) \times (s+1)$  テンプレートで探索する . これが最小となる位置が大きいテンプレートの中心から  $s$  以上であれば「対応点なし」と判定する . そうでなければ  $s$  を半分にし,  $s = 1$  となるまで同様の探索を行う .

多数決原理 各々のテンプレートが最もよくマッチする水平位置をソートして  $y_1 \leq \dots \leq y_5$  とする . 区間  $[y_1, y_3]$ ,  $[y_2, y_4]$ ,  $[y_3, y_5]$  の中の最も狭い区間の幅が4画素以下なら, その区間に入る3個の値の平均を対応位置とし, そうでないときは「対応点なし」と判定する .

多くの実画像実験を行っても, どちらかがよいとは断定できなかったため, 本システムではオプションによってどちらも選択できるようにしている .

### 3.2 サブ画素補正

もともとの特徴点は画素単位でしか指定されないのので, 推定したエッジ極線は厳密ではない . さらに水平方向にも画素単位でしか探索しないので, 対応の精度が限定される . そこで, 上記の手順で定めた対応点の周りにテンプレートをサブ画素単位で移動してより詳細な探索を行う .

### 3.3 大域的整合性

上述の対応づけには誤対応が含まれることがある . 変換後の両フレームを重ねて, 対応点間を線分で結んだ“オプティカルフロー”を表示すると, 少数の際だって長い線分が含まれることがある . そのような対応は3次元シーンとして不自然であるから除去する .

本システムでは, 画像を平行化に用いた初期対応のフ

ローの長さの平均  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  を計算し, フローの長さが平均  $\mu$  から標準偏差  $\sigma$  の2倍の区間  $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$  になければ誤対応の可能性があると判定して排除している .

### 4. 3次元情報による誤対応除去

以上の処理によって高精度な対応が得られるが, それでも誤対応が入り込むことがある . そのような誤対応は

1. エッジ極線拘束条件を正しく満たし,
2. かつ その近傍の見え方が同じ,

というものである . これは例えば物体境界上のT型交点のように, 物理的には異なる点であるのに画像上では同じに見えるもので, 2次元画像処理のみによって除去することは原理的に不可能である .

しかし, 3次元情報を利用すればこれが検出できる . 得られた対応から3次元復元を行なうと, 対応位置の誤りは奥行き方向に大きな変動を生じ, 負の奥行き(カメラの背後の位置)が計算されることがある . 正の奥行きであっても, 特徴点を頂点とするシーンの多面体表示を行なうと, 誤った特徴点が刺(とげ)状の突起として現れる . そこで, 金谷・三島の方法 [10] を用いて仮の3次元復元を行ない, 負の奥行きや著しい刺を生じる特徴点を誤対応として除去する .

### 5. 実画像例

図2(a), (b) は2枚の入力画像であり, 図2(c) は両画像から独立にHarris作用素によって300個の特徴点を抽出し, 金澤・金谷の方法<sup>3</sup> [11] で自動的対応づけを行

<sup>3</sup>以下にプログラムを公開している .  
<http://www.img.tutkie.tut.ac.jp/programs/>

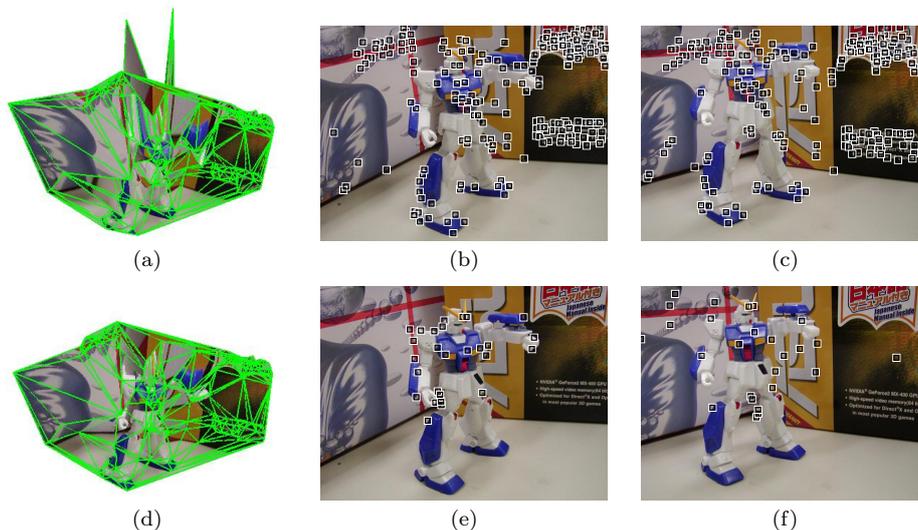


図3 (a) 図2のテンプレートマッチングで得られた対応から復元した仮の3次元復元形状。(b), (c) 3次元形状を考慮して最終的に得られる対応点。(d) その3次元復元形状。(e), (f) 除去された対応点。

なったものである(第1画像上に得られた特徴点とそのオプティカルフローを示す)。これによって109点の対応が得られたが、背景の平坦な部分に局在する傾向がある。

図2(d), (e)は図2(a), (b)に記入した10個の特徴点を手動で入力し、それによって平行化した画像である。図2(d)は、第1原画像上にHarris作用素によって300個の特徴点を抽出し、それを写像した位置を記入している。そして、3.1節に述べた多重テンプレートマッチング(階層的探索)によって図2(e)の画像上を走査し、得られた225点の対応位置を図2(e)中に記入している。この対応のオプティカルフローが図2(f)である。11本の太線は3.3節の大域的整合性によって誤対応と判定された対応である。

図3(a)はこの結果から得られた対応から仮の3次元復元形状である。これから負の奥行きや刺を除去して16点を除去し(この場合は負の奥行きは生じていない)、最終的に得られた対応を図3(b), (c)に示す。合計198個の対応が新たに得られた。図2(c)の自動対応づけに比較して得られる対応数が多く、孤立した物体部分からもかなり対応が得られている。図3(d)はその3次元復元形状である。図3(e), (f)はテンプレートマッチングによる対応から最終的に除去された対応である。正しい対応であるにもかかわらず除去されるものもある。これをどう解決するかが今後の課題である。

## 6. まとめ

本論文では、2画像上に密な点対応を生成するシステムを作成し<sup>4</sup>、その手順を示した。

本論文の平行化法は従来のHartley[6]の方法に基づくものとは異なり、最適化計算が不要であり、変換画像

の性格が明確かつ妥当であると考えられる。

本論文では、エピ極線拘束条件を満たして近傍が似ている誤対応を除去するために、3次元形状まで考慮した誤対応除去法を示した。そして、実画像例によってその有効性を確認した。

## 参考文献

- [1] K. A. Al-Shalfan, J. G. B. Haigh and S. S. Ipson, Direct algorithm for rectifying pairs of uncalibrated images, *Electronics Lett.*, **36-5** (2000-3), 419-420.
- [2] N. Ayache, *Artificial Vision for Mobile Robots: Stereo Vision and Multisensory Perception*, MIT Press, Cambridge, MA, U.S.A., 1991.
- [3] N. Ayache and C. Hansen, Rectification of images for binocular and trinocular stereo vision, *Proc. 9th Int. Conf. Pattern Recog.*, November 1988, Rome, Italy, pp. 11-16.
- [4] N. Ayache and F. Lustman, Trinocular stereo vision for robotics, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **13-1** (1991-1), 73-85.
- [5] C. Harris and M. Stephens, A combined corner and edge detector, *Proc. 4th Alvey Vision Conf.*, Manchester, U.K., August 1988, pp. 147-151.
- [6] R. Hartley, Theory and practice of projective rectification, *Int. J. Comput. Vision*, **35-2** (1999), 115-127.
- [7] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2000.
- [8] F. Isgrò and E. Trucco, Projective rectification without epipolar geometry, *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recog.*, June 1999, Fort Collins, CO, U.S.A., Vol. 1, pp. 94-99.
- [9] 金谷健一, 金澤靖, テンプレートマッチングによる対応探索の自動しきい値設定法, 電子情報通信学会論文誌 A, **J86-A-12** (2003-12), 1502-1509.
- [10] 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, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, **42-SIG 6** (2001-6), 1-8.
- [11] 金澤靖, 金谷健一, 大域的な整合性を保証するロバストな画像の対応づけ, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, **44-SIG 17** (2003-12), 70-77.
- [12] 金澤靖, 金谷健一, コンピュータビジョンのための画像の特徴点抽出, 電子情報通信学会誌, **87-12** (2004-12), 1043-1048.
- [13] C. Loop and Z. Zhang, Computing rectifying homographies for stereo vision, *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recog.*, June 1999, Fort Collins, CO, U.S.A., Vol. 1, pp. 125-131.
- [14] 三島等, 金谷健一, 基礎行列の最適計算とその信頼性評価, 情報処理学会研究報告, **99-CVIM-118-10** (1999-9), 67-74.
- [15] C. Sun, Uncalibrated three-view image rectification, *Image Vision Comput.*, **21-3** (2003-3), 259-269.
- [16] 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, *Artif. Intell.*, **78** (1995), 87-119.

<sup>4</sup>作成したプログラムソースの一部を下記に公開している。  
<http://www.suri.it.okayama-u.ac.jp/>