Vol.2013-MBL-68 No.15
Vol.2013-ITS-55 No.15
Vol.2013-DCC-5 No.15
2013/11/15

特徴点の高速対応付けによるスレオカメラの自動校正

高博[†1]　胡　振程[†1]　Jan Duchacek[†2]　Thomas Feraud[†3] and Roland Chapuis[†3]

ステレオカメラは，3 次元距離データを得る最も一般的な手段である．しかし，ステレオカメラによる距離計算にはカメラ内部と外部パラメータを計算して複雑な校正プロセスが必要となる．本論文では，自然なシーンにおける画像から取得した特徴点の対応付けによるセルフキャリブレーションアルゴリズムについて検討し，左右画像特徴点の高速対応づけ方法を提案する．

Feature matching and self-calibration strategy for stereo-camera

Bo Gao [†1]，Zhencheng Hu [†1]，Jan Duchacek[†2]，　Thomas Feraud[†3] and Roland Chapuis[†3]

Abstract—This paper will describe strategy for matching of feature points acquired from natural scene images, which is the first step towards full self-calibration for stereo camera. The feature matching strategy is based on block segmentation and use Harris features with BRIEF descriptor. Test results based on real scene have verified our approach.

Keyword：Stereo-camera, Self-calibration, Corner detectors，feature descriptors and matching

1. はじめに

ステレオカメラには距離測定専用のセンサーと比べて安価で，画像情報を利用して奥行き以外の情報も得られるという利点がある．それゆえ，ステレオかめらは 3 次元距離データを得る最も一般的な手段であり，将来はロボットや自動車などの産業に幅広く応用されると期待されている．ステレオカメラによる距離計算にはカメラ内部と外部パラメータを正確に計算して複雑な校正プロセスが必要とし，事前に既知なテストパターンを撮影してカメラを校正することが一般である．しかし，予め校正されたステレオカメラのパラメータは経年劣化や外部衝撃などによって変化してしまうこともあり，その場合は再度テストパターンなどを撮影し，校正を直さなければいけないため，産業が期待する長期間のメンテナンスフリーに応じかねる．従って，特定なテストパターンを使わず，自然なシーンにおける観測データから現在のカメラパラメータを自律的に算出できる，いわゆる自律校正機能が，メンテナンスフリーなテストには不可欠なものであると考えられている．

本研究はメンテナンスフリーなステレオカメラを構築する研究基盤を確立するために，ステレオカメラのパラメータの変化に注目して,特定なテストパターンを利用せず,任意の自然シーンを対象とする連続ステレオ画像の利用によって，ステレオカメラのパラメータの変化を自律的に校正するアルゴリズムについて検討し，その第一歩として，特徴点をブロックごとに検索し BRIEF 記述子による高速対応付け手法を開発しステレオカメラの外部パラメータの変化を自律的に校正する手法を提案する．

以下では，２章はステレオビジョンの概要と校正手法の紹介をし，３章では特徴点の高速対応付け方法が記述される．また，４章は実験結果を説明し検討を行う．５章はまとめとする．

2.　ステレオビジョンと校正

ステレオビジョンというのは，カメラを使ったレンジ（距離）センサーの一種で，左右カメラによる射影位置のずれ（視差）から，カメラと対象表面までの距離データ（距離画像）を計算するものである．

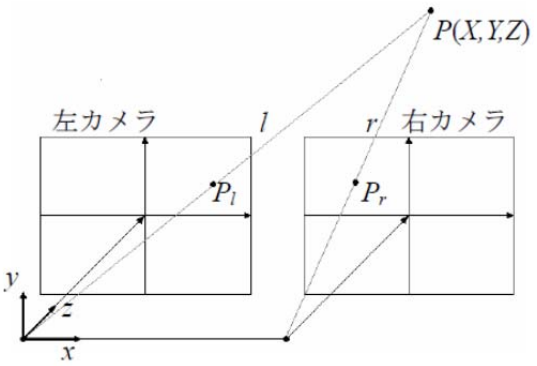


図 1 ステレオカメラの原理

図 1 には計測原理を示す．左のカメラ画像を基準画像とさ

†1 熊本大学自然科学研究科
The Graduate School of Science and Engineering, Kumamoto University, Japan.
†2 チェコ
Department of Automation and Computer Science in Metallurgy, VSB-TUO, Czech Republic
†3 フランス
Institue Pascal, Clemont Ferrand, France

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.15
Vol.2013-ITS-55 No.15
Vol.2013-DCC-5 No.15
2013/11/15

れ，この画面上の点 Pl に対応する右のカメラ画像（参照画像）の点 Pr 求める．直線 l と直線 r は点 p で交わるため，p の 3 次元座標(X，Y，Z)は Pl(xl，yl)と Pr(xr，yr)から求まる．P が手前にあるほど Pl と点 Pr の位置の差（視差）は大きく，奥にあるほど視差は小さい．

ステレオカメラのパラメータとしては，左右カメラの内部パラメータ（例えば，光学中心座標 cx, cy，焦点距離 f，セルサイズ sx，sy，レンズ歪み係数 K1~K5 など）とカメラ間の外部パラメータ（二つカメラ座標系間の回転および並進ベクトル）が挙げられる．ステレオカメラによる距離計算にはこれらのカメラ内部と外部パラメータを正確に計算して複雑な校正プロセスが必要とし，事前に既知なテストパターンを撮影してカメラを校正することが一般である．

しかし，予め校正されたステレオカメラのパラメータは経年劣化や温度変化，外部衝撃などによって変化してしまうこともあり，計測精度が落ちる場合は再度テストパターンなどを撮影し，校正を直さなければいけないため，産業が期待する長期間のメンテナンスフリーに応じかねる．そのため，特定なテストパターンを使わず，自然なシーンにおける観測データから現在のカメラパラメータを自律的に算出できる，いわゆる自律校正機能が，メンテナンスフリーなステレオカメラシステムの構築には不可欠なものであると考えられている．

3. 提案手法

ステレオカメラの自動校正技術に関してこれまで様々な方法が提案されていた．文献[1]では２枚または３枚のステレオカメラ画像を使ってレンズ歪みパラメータを自動的に算出する．また，Zhang らは[2]幾何寸法が未知である校正パターンを使用して，ステレオカメラのすべてのパラメータを推定する手法を提案した．この手法では，左右カメラレンズの歪み係数を一様とし，離散的な特徴点の対応付けを求めた．

ステレオカメラの自律校正処理は一般的に二つの手順を分けられる．ステップ 1，ステレオカメラの左右画像から特徴量（コーナー点，線分または小領域など）を抽出して，対応付け処理を行う．ステップ 2，上記特徴の位置情報を利用して最小二乗法やカルマンフィルターなどで内部と外部パラメータを同定する．本研究では，そのステップ１に着目し，ステレオカメラの画像から特徴点を検出し，高速対応づけ方法を提案する．

3．1 特徴点の選択

画像処理によく利用された特徴がコーナーである．エッジ，曲線，シェイプなどの特徴点を利用する場合も数多く存在する．コーナーの処理速度がより速いため，今回はコーナーをステレオ画像の特徴として利用する．コーナー検出に関するアルゴリズムが多数存在する．一般的な検出方法は Harris[3]，Shi-Tomasi[4]と FAST[5]などがある．そのうち，Harris 検出法コーナーのパラメータと出力が良好な制御性を提供するため，本研究は Harris 法を利用する．

特徴点の高速対応付けを行うため，本研究では，グリッドサーチ方法を提案する．図２に示すように，左右カメラから撮られた画像をそれぞれ 8 x 8 のブロック（グリッド）に分け，各ブロックに最大 Harris 評価値を持つ特徴点のみを検出する．また，閾値より低い評価値の特徴点を削除する．そのため，左右画像からそれぞれ最大 64 個の特徴点を検出できる．

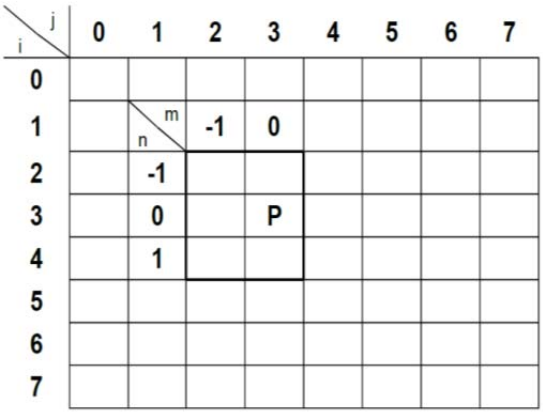


図 2　特徴点の検索のため 8*8 グリッドサーチ座標領域

3．2 特徴量の記述

コーナー検出と同じく，特徴量の記述子も多様に存在する．よく使う方法としては SIFT[6]と SURF[7]である．本研究では，BRIEF[8]という新たな手法を利用すること．この記述子の重要な利点は，それが直接にバイナリ記述子を利用できることである．

BRIEF という記述子のは，2 つの方法に基づいて提案されたものである．1 つは Census transform[12]という方法である．この方法は，明度変化にロバストな記述子である．この記述子はパラメトリックがなく，与えられた画素の周囲のいくつの領域には，注目されるピクセルの近傍にある画素明度値との比較と事前に定義された方法で構成し，バイナリの値を結果として生成される．このビット列の値はマッチングに直接に利用できる．もう 1 つの方法は Ojala et al.[13]によって開発したもので，Locally Binary Patterns (LBP)と呼ばれる．この方法は注目される点の近傍に固定半径の円として扱われるセンサスのようなビット列を構築する．しかし，LBP は通常に小数表現にビット文字列を表現し，ヒストグラムを構成する．これらのヒストグラム値を連結し，安定した記述子が見出される．

これらの方法の利点を生かして，BRIEF 記述子ではバイナリ記述，そして，Hamming 距離のみを計算することにす

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.15
Vol.2013-ITS-55 No.15
Vol.2013-DCC-5 No.15
2013/11/15

る．そのため，大幅に処理速度を向上できる．

本研究では，128 ビットの記述子を使用し，対象特徴点の 16*16 近傍画素をランダムに 128 ペアを選択して明度の比較結果からビット値を 1 と 0 に決める．

3．3 特徴のマッチング

特徴マッチングの速度を向上するために，ステレオカメラの拘束条件を活用する必要がある．まず左右順序拘束である．左画像の特徴点は右画像に存在する対応点は，その特徴点の左側に存在することである．例えば，左の画像に存在している特徴点の座標(x，y)は[9，6]である．前に述べた制約により，右画像での特徴点は x-軸の<0，9>の間に存在するはずである．また，平行光軸ステレオカメラにおいて，y-軸の変化が小さいため，今回の場合は，±1 ブロックの検索範囲とする．図２には対応付け範囲の例を示す．

マッチング処理のアルゴリズムが次に示す．

A. 左の画像に特徴点 P(i，j)を検出する．i と j は x の水平及び垂直グリッドインデックスである．
B. マッチングされた特徴点 P'(m, n)が右の画像に存在している．m = i-1 and i, n = j-1, j, j+1 と定義した．図 2 ように示す．
C. 注目された特徴点の周囲の検索領域が拡大できる．
D. カメラの間の間隔が離れて x-軸に左右の特徴点間の間隔が特徴点の投影領域サイズより大きい. 投影領域のエッジの近くの点に対して y-軸座標領域の間隔が重要な制約条件である．従って，最初の領域でマッチングの検索を省略することができる．この際，左の画像から右の画像まで検索マッチングをする．また，右からの場合に最後の列から検索マッチングをする．

また，左右順序の拘束条件を利用して，図３のように一部のグリッドを対応付けの対象領域から取り除ける．

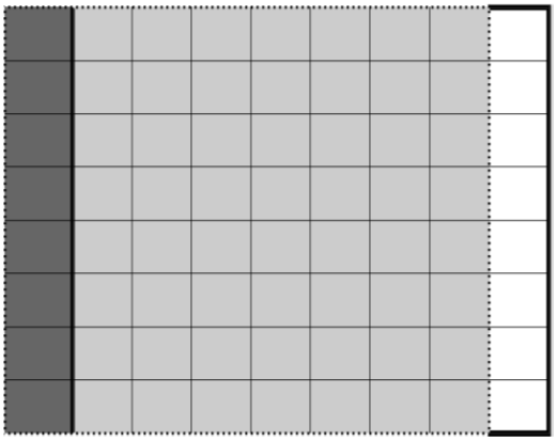


図 3 カメラビューの重複例，薄いグレーの領域が共通のデータ，濃いグレーが省略できる左の画像の部分，白い部分が省略できる右の画像の部分

目標の領域における左の点と右のテスト点の最小間隔を検索する時にいつか検索点に当たるにもかかわらずハミング距離で左の特徴記述子と右の特徴記述子の間隔を計算しながら目標の領域に左の特徴点と右のテスト点の間の最小値が見つかる．最小値というのは 2 つの点(記述子)との差というような意味である．最小値が見つかったら，十分である場合はマッチングポイントのインデックスが格納されている．その他，最小のハミング距離が 10 以下の 128 位記述子は弱いマッチングとして取り除される．(図 4)



図 4　最初のスキャンの結果

そして，このマッチング処理をしたにもかかわらず，誤検出がまだあるので，次の手順では間違って検出された結果を除外する．先ず，右から左へのチェックにおいて，最初のスキャンで左の画像でマッチング点を検索する．左の画像特徴点がオリジナルとして右の点とマッチしてみた．それから，左右検索された点を左の画像から右の画像まで線でつないで，マックする．(図 5)



図 5　誤検出を削除した結果

一部の誤検出を削除するため，同じ方法で 2 回目のスキャンでは反対の方向から検索する必要がある．2 回目のスキャンにはすべての 64 コ右の特徴点を検索する必要がない．左の特徴点にマッチするようにマックされた点の中に検索することが結構である．もし，左から右への特徴点が右から左への特徴点と同じである場合，2 回目のスキャンをした後チェックする必要がある．いくつかの特徴点とインデックス同じではない場合は，このような点が誤検出として削除する．

次，y-軸の類似性を基準として使用する．今までのいくつかのマッチング点は同じの偏差値と y－軸の偏差を持っている点しか取らない．同じ y-軸差の点と最大のグループ

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.15
Vol.2013-ITS-55 No.15
Vol.2013-DCC-5 No.15
2013/11/15

を結果として取られて，他のグループに割り当てられる点を削除する．j－軸の差が最大のグループに属する偏差値を避けるため，y-軸の最大値から最小値までの正規化をすることが必要になる．最小の値を 0 にし，最大の値を 1 にするということが基準にされる．正規化された y-軸の差の中値計算して，偏差が出る．これは平方差ではない．中値からすべての偏差値を計算して定義された閾値より小さいマッチを全部保つ．

様々なシーンでいくつかのテストをしてから，非正規化されたスロープ間隔値の 5%を閾値として定義する．最初のフィルタリングをしてから，まだ誤検出が 30%までカウントアップ．最初のフィルタリングは，y-軸の差に焦点を当てる．二番のフィルタリングが x-軸の差に焦点を当てる．この手順が重要である．最初のフィルタリングに対して x－軸を用いて非常に不安定であり，信頼性も低い．x-軸のフィルタリングは y-軸にフィルタリングした後残ったマッチのみ適用する．先ず，x-軸の差の平均値を計算して，計算された平均値から偏差値を計算する．次に，平方差は使用されていない．最後に，偏差の平均値を計算し，偏差値が偏差平均値の 50%以下のマッチのみ保持される．誤検出のマッチを削除するために第二のフィルタリングを使う．第二のフィルタリングでテストしたシーンが図 5 のような画像がもらえた．様々なシーンにこの方法で特徴マッチングして誤検出が無くなった．従って，出力が自動校正アルゴリズムで使用されることができる．もちろん，この手法には欠点がある．最初または最後の列の制約を確立したので，検索したマッチング点が最大 56 までが可能である．しかし，通常にマッチングされた点の順番が 0 から 10 までの間に，非常に小さい．この欠点は一般的な例には存在している．今回提案された方法は出力が選択された校正方法に十分なマッチングの点数を提供することが保証できないので，単一の画像対の校正に勧めない．しかし，今研究の自動校正アルゴリズムに対して，これは欠点ではない．アルゴリズムは単一の画像対を処理できないが，ステレオカメラのライブフィードからのシーケンスイメージペアまで処理できる．画像対を有する配列の長さは固定長や適応長及び両方の組み合わせとして決定される．7 画像対また 50 点に到達するうちの 1 つの条件を満たせば，画像シーケンスが記録される．各画像が独立に処理されて，すべてのマッチングされた点が一緒に結合され，カメラパラメータの計算及び再計算のため，使用される．なぜかというと，シーケンスの総長を判定して使用するため，シーケンスから各画像対は直ちにとりこみした後に処理される．現在，一つの画像対の処理時間が約 1 秒ほどである．この時間遅延はできるだけ多数の特徴点をキャプチャするという利点を与えられる．移動している車に配置されているステレオカメラの場合，1 秒ほどの時間差に異なるシーンがステレオカメラに記録される．この点の差異は校正したアルゴリズムの精度を高める．

4. 実験と検討

今回の実験で，特別なテストパターンを使用する(図 6)．このパターンに 8 つのユニークな角点があるため，高める安定性を特徴マッチングに与えられる．



図 6　テストパターン

今度の実験方法は 3 つの異なる種類のシーンでテストした．最初は室内の場合である．2 つ目は自然の場所 (湖，木など)で，最後は町のシーンである．車の中に置かれ，ステレオカメラで撮影されるのは最も近いシーンである．最良好の結果を得るには町のシーンである．町のシーンには強く，顕著な特徴コーナーと多数のエッジがあるので，注目のコーナー特徴点の近傍の各ピクセルとの間に強いコントラストを提供する．このコントラストが BRIEF 記述子で処理する結果を改善でき，マッチング点の数量も増加できる．室内でのシーンは大量のポイントを提供するが，マッチングが見つかられない場合もある(いくつかの画像にはゼロのマッチング点を生成する)．この手法については，最悪のシーンは自然環境で取り込みシーンである．特徴点がかなり弱く，注目される点の近傍の点も大体同じである．

パラメータは Matlab で実現従来の手法からの結果を利用して，手動で比較して，適切な結果が推定される．これは最初の一歩である．入力を使用し，各カメラのペアリングポイントと内部パラメータと Matlab でコードを再構成することを検証手法として利用することにした．このところに歪み係数を加えた．パラメータのコントロールのため，ペアポイントの中スロープという計算する関数を作成した．校正のために理想的な状態でパラメータを使用して勾配はゼロピクセルである．今回の方法でいくつかの比較した後の結果は初期状態に応じて，良い結果も悪い結果もでることを示した．初期状態では唯一の違いは平行移動の初期推定のベクトルである．左右カメラの間隔が 100 ミリメートルであるので，平行移動のベクトルの論理初期推定は $T = [100,\ 0,\ 0]^T$ である．この推定では正確に向きの結果を与え，ゼロに向きの勾配を改善できるが，改善の効果があまり大きくない．

別のテストは逆の符号の平行移動ベクトルの初期推定を使用された．これは最初のような論理的なテストである．だが，校正ベクトルが $T \sim [-94.05,\ 0.42\ 0.52]^T$ と設定した際，これは従来の Matlab で校正の結果に近い．この推測は勾配を大幅に改善して，結果も Matlab からもらった結果より良好である．しかし，修正された点が非常に微妙な

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.15
Vol.2013-ITS-55 No.15
Vol.2013-DCC-5 No.15
2013/11/15

位置にある．いくつかのテストをした後，修正された点の座標が原点をミラーリングされる．

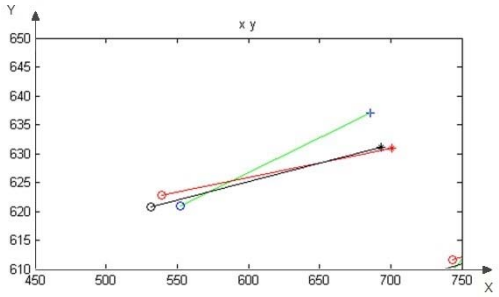


図 8.　(a) T = [100，　0，　0]^T

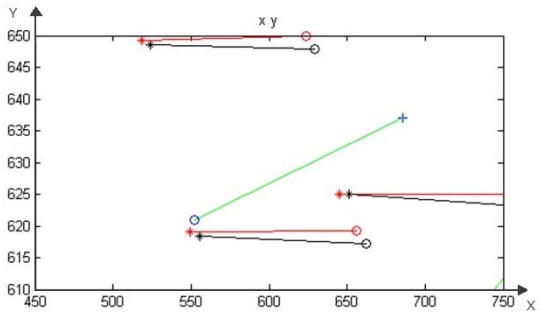


図 8.　(b) T = [-100，　0，　0]^T

図 8 は初期推定の比較結果である．赤い線が今回の結果である．黒い線が Matlab でもらった結果である．緑の線が原状の点で，サイン初期状態において結果が推測された結果より良かったといえる．毎回の実行にミラーの影響があるとテストした．そして，ミラーの影響が一定であったので，正確やエラー(スロープ)を保ちながら，校正した後に校正された点を再計算して適切な点の位置が取れる．変更推測で修正されたペアの推測の比較は図 9 ように示す．

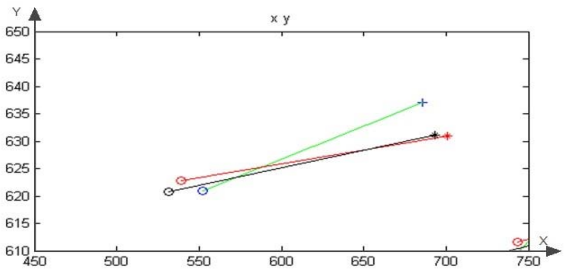


図 9.　(a) T = [100，　0，　0]^T

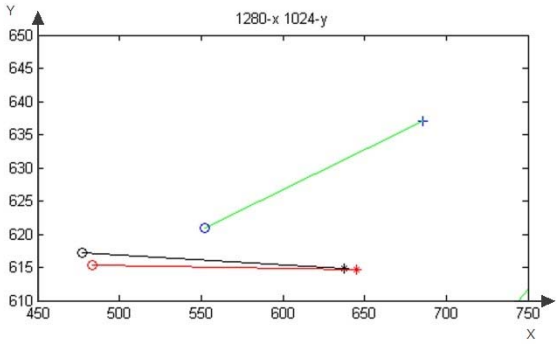


図 9.　(b) T = [-100，　0，　0]^T

最後に自動校正アルゴリズムの結果は以下である．(図 10)

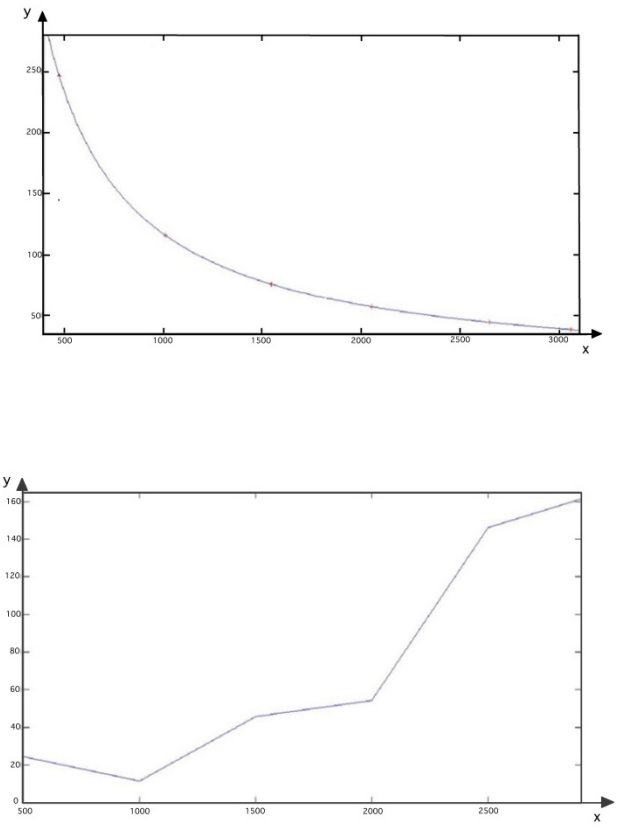


図 10.　アルゴリズムの校正結果

5.　結論

本研究では，自然なシーンにおける画像から取得した特徴点の対応付けによるセルフキャリブレーションアルゴリズムについて検討し，左右画像特徴点の高速対応づけ方法を提案した．今後の目標としては今回の方法を改善し，全処理速度を上げる．また，自然のシーンでの処理結果を改善することも努力したいと思う．

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.15
Vol.2013-ITS-55 No.15
Vol.2013-DCC-5 No.15
2013/11/15

参考文献

1) G.P. Stein, “Lens distortion calibration using point correspondences”, in IEEE Conference on CVPR, pp. 602-609, 1997
2) Z. Zhang, “On the epipolar geometry between two images with lens distortion”, in proceedings of Int. Conf. Pattern Recognition (ICPR), Vol. 1, pp. 407-411, 1996
3) C. Harris and M.J. Stephens. “A combined corner and edge detector”. In Alvey Vision Conference, pages 147–152, 1988
4) J. Shi and C. Tomasi ."Good Features to Track,". 9th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Springer, June 1994.
5) E. Rosten, R. Porter and T. Drummond “Faster and better: A machine learning approach to corner detection”, October 2008, Available:
http://lanl．arxiv．org/pdf/0810．2434．pdf
6) D. G. Lowe "Object recognition from local scale-invariant features". Proceedings of the International Conference on Computer Vision 2, pp.1150–1157, 1999
7) H．Bay，A．Ess，T．Tuytelaars，L．Van Gool "SURF: Speeded Up Robust Features", Computer Vision and Image Understanding (CVIU), Vol.110, No. 3, pp. 346-359, 2008
8) M. Calonder, V. Lepetit, M. Ozuysal, T. Trzcinski, C. Strecha, and P. Fua ”BRIEF: Computing a Local Binary Descriptor Very Fast”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2012
9) Zhengyou Zhang : Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations
10) 金田 憲明, 成田 十一, 「ステレオビジョン画像処理技術の実用化研究」
11) 富田 文明,「ステレオカメラのセルフキャリブレション」, 情報処理(1995)
12) R. Hartley. In defence of the 8-point algorithm. In Proc. 5th International Conference on Computer Vision, pages 1064–1070, Boston, MA, June 1995.
13) T. Ojala, M. Pietikäinen, and D. Harwood, “A Comparative Study of Texture Measures With Classification Based on Feature Distributions,” Journal of Machine Learning Research, vol. 29, pp. 51–59, 1996.

ⓒ 2013 Information Processing Society of Japan