

姿勢推定のための局所特徴量を用いた符号化マーカの提案

小堀 訓成[†] 出口 大輔^{††} 井手 一郎^{††} 村瀬 洋^{††}

[†] トヨタ自動車株式会社 パートナーロボット部

^{††} 名古屋大学大学院 情報科学研究科

E-mail: †kobo@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本稿で提案するマーカは、(i) 雑然とした環境でも“見つけやすい”，(ii) マーカの姿勢を算出可能，(iii) マーカの占有面積を小さくできるといった複数の有用な特徴を持つ。提案するマーカは、ランダムなドットパターンから構成され、ドットの検出に Spectral SIFT を利用する。ランダムドットから構成される三角形の面積比（アフィン不変量）を幾何特徴として使い、その三角形の面積比を Locally Likely Arrangement Hashing による高速な検索によってマーカを検出する。マーカ内に埋め込むデータは、ドットの大小を用いて符号化し、マーカの検出領域とデータ領域を共通にすることでマーカサイズを小さくする。先行研究であるランダムドットマーカとの比較を通して、提案するマーカが検出性能に優れていることを示す。

キーワード ランダムドットマーカ, Locally Likely Arrangement Hashing, Spectral SIFT

The Proposal of Encoding Marker using Local Feature for Posture Estimation

Norimasa KOBORI[†], Daisuke DEGUCHI^{††}, Ichiro IDE^{††}, and Hiroshi MURASE^{††}

[†] Partner Robot Division, Toyota Motor Corporation, 543, Kirigahora, Nishihiro-cho, Toyota, Aichi, 470-0309 Japan

^{††} Graduate School of Information Science, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8601 Japan

E-mail: †kobo@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

Abstract The proposed marker has the following three aspects, (i) the marker is easy-to-find under a cluttered background (ii) the marker is calculable for its posture (iii) the marker size can be small. The proposed marker is composed of a random dots pattern, and uses Spectral SIFT for a dots detection. Besides it uses an area ratio of triangles which are composed of dots as a geometry feature from a random dots pattern and retrieves the features speedily by Locally Likely Arrangement Hashing (LLAH) so that the correct marker is identified. Moreover a data is encoded to scale sizes of dots in the marker by using Spectral SIFT. We show the above by our experiments.

Key words Random Dot Markers, Locally Likely Arrangement Hashing, Spectral SIFT

1. ま え が き

作業対象に直接マーカを貼付することで物体の検出・認識と姿勢推定を行う手法が実用化されている。この際、作業対象が小さな物体や曲率を持った物体の場合は、取手が付いた箱にマーカを貼付し、箱の中に作業対象物体を入れる方法が採られる [1]。貼付したマーカと物体の把持操作箇所の位置関係を事前に記録しておくことで、ロボットは把持操作を行うことができる。現在用いられているマーカの多くは、被写体であるマーカとカメラの距離・位置関係のある程度限定することで実用に耐

え得る性能を得ている。そのため、マーカそのものが検出しやすい条件下でないと正しく動作しないという課題がある。

ロボットビジョンで多く使用される AR Toolkit マーカ [2] は、マーカの ID の識別だけでなくマーカの姿勢推定も可能である。しかし、雑然とした環境下では、四角形や菱形などの類似形状を誤検出してしまう課題がある。さらに、外形の枠が、少しでも影などで干渉されると検出できないという課題もある。

一方、姿勢推定が可能なマーカとして、ランダムドットマーカ [3] がこれまで提案されている。このマーカは、ランダムに配置したドットを用いて、特徴パターンを表現する。特徴量は、

ドットから構成される三角形の面積比（アフィン不変な量）であり、その検索には Locally Likely Arrangement Hashing（以降、LLAH）[4]を用いる。誤検出も少なく、一部のドットが隠れていても検出できるため、AR Toolkit マーカの課題を解決することができる。ランダムドットマーカは、ドットの検出にエッジ検出（輝度による2値化処理）を用いる。周囲にマーカ以外の物が存在しない環境ではマーカの検出はうまくいくが、雑然とした環境ではマーカ以外の箇所でも多くエッジが検出され、マーカを容易に検出することが出来ない課題がある。また、計算負荷が増加するという問題もある。

そこで、上述したランダムドットマーカの課題を解決する新しいマーカを提案する。具体的には、従来のランダムドットマーカを改良し、ドットの検出に Spectral SIFT [5] を利用する。さらに、マーカのドット候補の選別を“エッジ強度”と“スケールサイズ”に基づいて行い、的確にマーカのドットを選出する。これにより、LLAH の計算コストを抑え、1Hz 以上の速度でのマーカ検出を実現する。また、データの表現にはドットのスケールサイズを用いるため、検出パターンとデータパターンを同じ領域で表現することが可能である。そのため、マーカのサイズを小さくできるという特徴も併せ持つ。以降、2章に先行研究であるランダムドットマーカを、3章に提案するマーカを、4章に実験と結果を、5章にまとめを記す。

2. 先行研究：ランダムドットマーカ

先行研究であるランダムドットマーカについて説明する。ランダムドットマーカは、ランダムドットから構成される三角形の面積比（アフィン不変な量）を幾何特徴として用いる。そして、その三角形の面積比を LLAH [4] というハッシュに基づく方法で高速な検索を行い、マーカを検出する。オクルージョンが発生した状況でも、マーカを認識できる利点がある。

ドットの検出は、(A) エッジ処理、(B) 2値化処理、(C) 膨張/収縮処理、(D) ラベリング処理、の4つの処理を経て、ドット（特徴点）を検出する。その後、このドット（特徴点）を識別する。具体的には、注目点と周囲の点群との幾何学的な配置からどの特徴点かを同定する。手がかりは、同一平面上の4点 ABCD から以下の式で計算されるアフィン不変量を用いる。

$$\frac{P(A, C, D)}{P(A, B, C)} \quad (1)$$

ここで、 $P(A, B, C)$ は、頂点 A, B, C を持つ三角形の面積である。近傍点の配置から特徴点 p の特徴量を計算する場合、最も単純なものは p の近傍4点から計算されるアフィン不変量を特徴量とするものである。しかし、射影変換に歪みが発生した場合は近傍点に異なるものが得られることがある。そのため、近傍4点から計算されるアフィン不変量は安定ではない。この問題を解決するために、より広い範囲での局所領域を用いる。近傍 n 点から全ての m 点 ($m \leq n$) の組み合わせ $P_{m(0)}$, $P_{m(1)}$, \dots , $P_{m(nC_{m-1})}$ を調査する。 n 点のうち m 点の値が同じであれば、同じ m 点を計測できたことになる。このようにして LLAH は特徴量の安定性を確保している。この様子を Fig. 1(a) に示す。特徴量の表現は、 m 点 ($m > 4$) から全ての

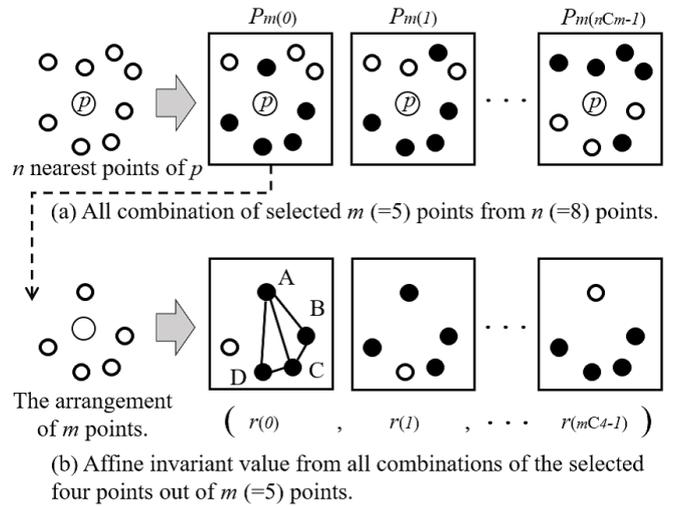


図 1: ランダムドットによる特徴量表現とその安定性
Fig. 1 Feature representation and its stability

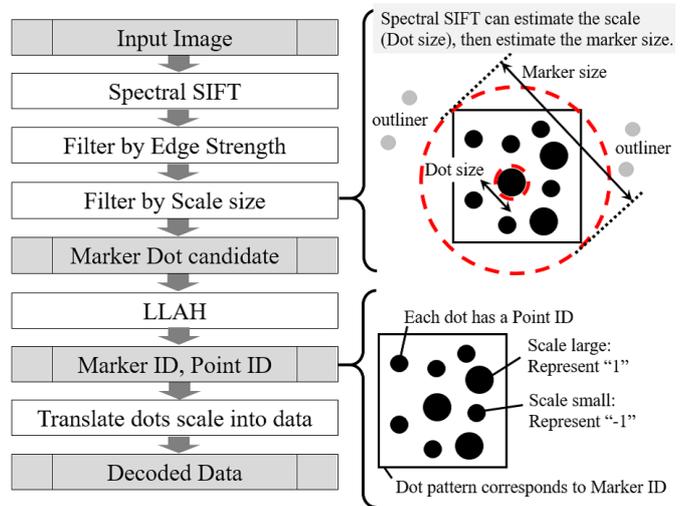


図 2: 提案するマーカの検出手順
Fig. 2 Detection procedure of proposed marker

4点の組み合わせを求め、そこから計算されるアフィン不変量を離散化した値の列 $(r(0), r(1), \dots, r(mC_{4-1}))$ で表現される。この様子を Fig. 1(b) に示す。

3. 提案：Spectral SIFT を用いたドット検出

SIFT は輝度の張り、または、窪みにそのキーポイントが出現する。[6] では、2重円のパターンを SIFT のキーポイント検出を利用し効率良く検出する手法を提案した。またパターンが斜めに配置されても、ある程度の範囲であれば検出することも示した。SIFT では、離散化されたスケール空間で DoG を作成し、その極値よりキーポイントを求める。離散化されたスケールでは、被写体サイズとスケールサイズによっては、ドットの検出ができない。一方、Spectral SIFT は、任意のスケールが扱える。これは、Scale Normalized LoG 空間に対してスペクトル分解を行い、固有値問題を積分方程式の問題に帰着させ、連続的な固有解を多項式で近似して求める。Spectral SIFT は、連続値のスケールを扱えるため、被写体サイズ（画

像上のドットの大きさ)に影響せずドットを検出できる。つまり、Spectral SIFT を用いることで、マーカをカメラから任意の距離に配置してもドットの検出が可能と考える。

しかし、Spectral SIFT を用いて検出した点は、マーカのドット以外にも多くの点を検出してしまう。そこで、以下の2つの処理を経て、候補点としての絞り込みを実施する。1つ目は、エッジの強度による判別フィルタ、2つ目はドットのスケール推定による判別フィルタである。全体の構成ステップを **Fig. 2** に示す。また提案するマーカを、Spectral Random Dots Markers と命名する。

3.1 エッジの強度による判別フィルタ

キーポイント周辺の勾配強度を用いて、マーカのドット候補を絞り込む。エッジ強度の高い点を候補として残し、それ以外の点は候補から外す。判別式は、 $|Det(\mathbf{H})| > 100$ (ここで、輝度の最大値は 255) に従う。判別式は、式 (2) に従う。

$$Det(\mathbf{H}) = D_{xx}D_{yy} - (D_{xy})^2 \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{H} は DoG 画像のヘッセ行列であり、式 (3) に従う。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.2 ドットのスケール推定による判別フィルタ

Spectral SIFT を用いることによりドットの大きさを推定することが出来る。提案するマーカにおいては、ドットの大きさを大小の2種類用意する。ドットの大きさとマーカサイズとの比は、事前に決まる設計値である。そこで、各ドット候補に対して、推定したドットのスケールサイズを元に、ドットが大きい方と仮定してマーカサイズ(マーカの直径)を推定する。そしてマーカサイズ内に存在し、範囲内のスケール値を持つドットの数に閾値 $T(=8)$ 以上あった場合は、条件を満たしたドットのみを候補として採用する。それ以外のドットは、outlinerとして除外する。

4. 実験と結果

画素数: 1280 × 720 である市販 USB カメラを用いて実験した。使用したマーカパターンを体積 2.5cm 四方で、ドット数は全 11 点、うちデータの表現は 8 点を使用した。残りの 3 点はコーナ点とした。またドットのサイズの大小に対して、各々に (1, -1) を割り当て、データ表現に用いた。

4.1 ドットの検出方法の比較実験

ドットの検出において、従来手法のランダムドットマーカで使用されているエッジ処理をベースにした手法と提案する Spectral SIFT を用いた方法を比較する。提案手法は、Spectral SIFT の後段処理として、フィルタリング処理を導入している。

Fig. 3, **Fig. 4** に結果を示す。**Fig. 3(b)** より、従来手法では、マーカのドット以外でエッジ点が多く検出されていることが分かる。一方、提案手法の Spectral SIFT では輝度の窪みのみを選出することにより、マーカのドットを捉えることが出来ることが分かる (**Fig. 4(b)**)。しかし、壁面に小さな凹凸があるため、多くの窪みに反応していることも確認できる。

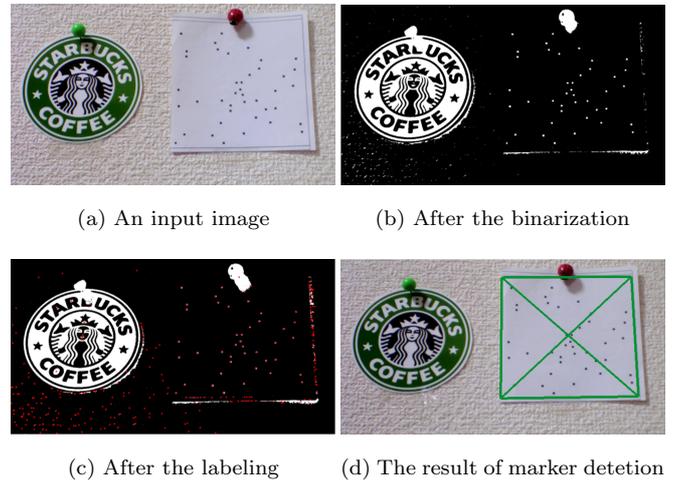


図 3: ランダムドットマーカによるドットの検出

Fig. 3 Dots detection by Random Dots Markers

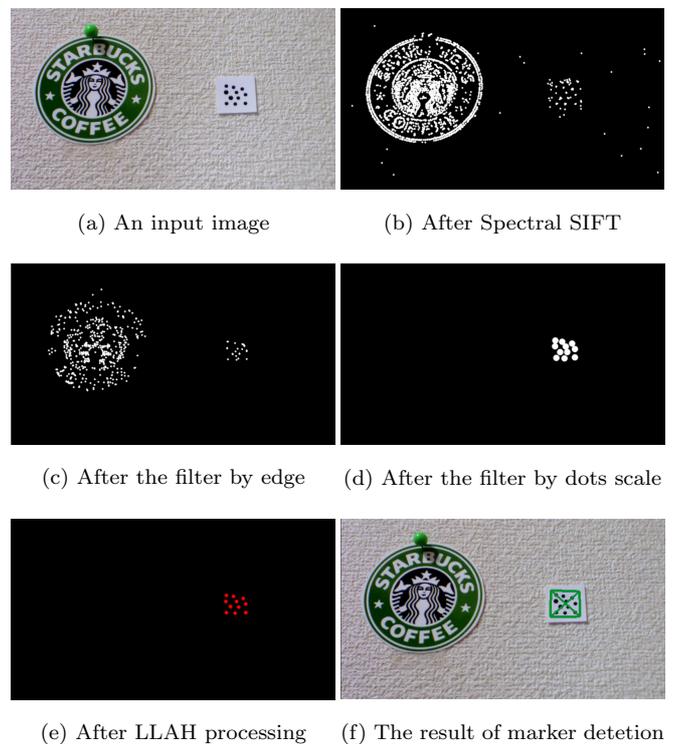


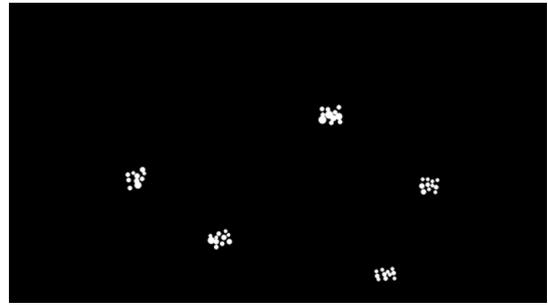
図 4: スペクトラルランダムドットマーカによるドットの検出

Fig. 4 Dots detection by Spectral Random Dots Markers

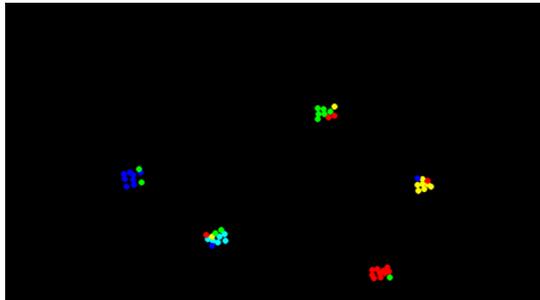
また他のテクスチャにも反応していることが分かる。これを、エッジの強度による判別フィルタで選別したのが、**Fig. 4(c)** である。多くの細かい窪みに反応したキーポイントが除去出来ていることが分かる。さらに、**Fig. 4(d)** では、ドットのスケール推定による判別フィルタを用いて、マーカのドット以外の点を排除し、所望のマーカのドットのみを得る。ここで重要なことは、LLAH への入力として極力マーカのドットだけに絞り、計算負荷を抑えることが大切である。今回の実験では、Core i5 の環境下において 1Hz 以上の動作が可能であった。また仮に、ノイズになるドットが残った場合でも、後段の LLAH によって、ある程度の範囲は除去できる。これは、**Fig. 3(d)** からも確認できる。



(a) An input image



(b) After Spectral SIFT and the denoising filtering process



(c) After LLAH processing



(d) The result of the identifications of markers and their decode

図 6: 様々な配置でのマーカ検出の例

Fig. 6 Marker's decode by various placements

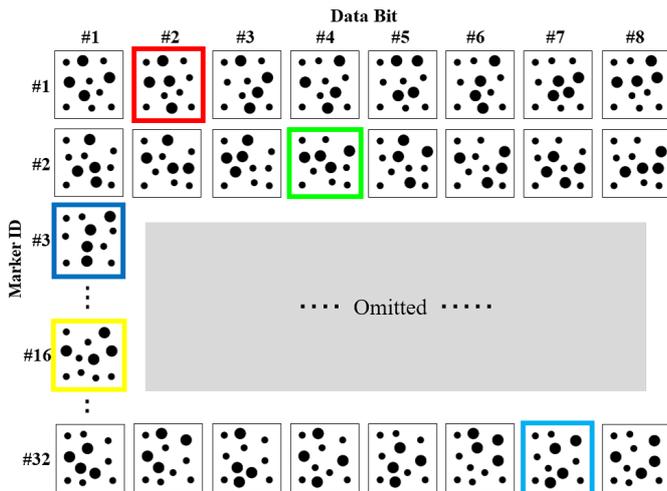


図 5: スペクトラルランダムドット マーカによる 1 バイト表現

Fig. 5 1 byte representation by Spectral Random Dots Markers

4.2 様々なマーカ配置におけるロバストなデータデコード

データデコードの結果を Fig. 6 に示す。5つのマーカを用いて性能を評価した。各々のマーカはカメラから 70cm 前方に様々な向きで配置した。Fig. 6(d) はデコードに成功した結果を示している。マーカが様々な向きで配置された場合でも、正しくマーカの姿勢を推定することが可能であった。Fig. 6(b) は、LLAH に入力する点群である。先に実験で示したように背景からのノイズが全く含まれないことが確認できる。これにより、Spectral SIFT によるドット検出やフィルタリング処理が効果あることが分かる。更に、Fig. 6(c) は LLAH の結果、点の同定した結果である。点の色がマーカ ID と対応しており、

いくつかの点は誤検出がある。しかし、RANSAC を行うことで誤検出のドットについては除去され、正しい姿勢とマーカ ID を求めることが可能であった。このことから、LLAH において、数点の誤認識があってもロバストであることが分かる。また、正しくデコード可能であったことから、ドットスケールを用いたデータ表現の有用性も確認した。

5. まとめ

提案するマーカは、Spectral SIFT のキーポイント検出から得たドットの幾何学的な並び方で、LLAH よりマーカを判別する。ドットの選別においては、“エッジ強度による判別フィルタ”と“ドットのスケール推定による判別フィルタ”を用いることで、効率的にドットを選別し、計算負荷を抑えることができることを確認した。また Spectral SIFT を活用することで、任意の距離・配置においても、マーカを見つけられることを示した。更に、データ表現では、ドットのスケールサイズの大小で表現することで、検出パターンとデータパターンを同じにすることができることを示したこれにより、同じデータ量を表現するにあたって、マーカサイズを小さくすることが可能と考えている。

文 献

- [1] 齋藤史倫, 橋本国松, 池田幸一, 山本貴史, 畠中規, 飯島浩: “生活支援ロボット HSR の試作と実証評価”, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3C2-2 (2012-9)
- [2] H. Kato and M. Billinghurst: “Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system”, Proc. 2nd IEEE/ACM Int. Workshop on Augmented Reality, pp.85-94 (1999-10)
- [3] H. Uchiyama, and H. Saito: “Random dot markers”, Proc. IEEE Virtual Reality 2011 Conf., pp.35-38 (2011-3)

- [4] T. Nakai, K. Kise and M. Iwamura: “Use of affine invariants in locally likely arrangement hashing for camera-based document image retrieval, ” 7th International Workshop DAS, Lecture Notes in Computer Science, Vol.3872, pp.541–552, (2006)
- [5] 上瀧剛, 内村圭一: “スペクトル理論のパターンマッチングへの応用とその性能評価”, 電子情報通信学会論文誌 (D), Vol.J96 (D), No.8, pp.1664–1674 (2013-8)
- [6] 小堀訓成, 出口大輔, 井手一郎, 村瀬洋: “作業用ロボットのための符号化マーカの提案 ～多様な配置やボケ環境下でも検出し易い符号化マーカ～”, 電気学会論文誌, vol.136-C, no.9 (2016-9)