

# 検出しやすくボケにロバストな符号化マーカの提案

小堀 訓成<sup>†</sup> 出口 大輔<sup>†</sup> 高橋 友和<sup>‡</sup> 井手 一郎<sup>†</sup> 村瀬 洋<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 名古屋大学大学院情報科学研究科 〒464-8602 名古屋市千種区不老町

<sup>‡</sup> 岐阜聖徳学園大学経済情報学部 〒500-8288 岐阜市中鶉 1-38

E-mail: <sup>†</sup> {kobo, ddeguchi, ide, murase}@is.nagoya-u.ac.jp, <sup>‡</sup> ttakahashi@gifu.shotoku.ac.jp

**あらまし** 本報告では、自由なマーカ配置の実現と遠方でボケたマーカの認識精度向上を目的とし、QR コードに代わる新たなマーカを提案する。提案手法では、マーカまでの距離や位置に依存しないマーカ検出を実現するために、SIFT のスケールスペース処理を利用する。そして、色頻度情報を用いてマーカの特徴量を表現し、拡散符号と独立成分分析を用いた符号化を行なう。これにより、遠方で低解像度なマーカに対してもロバストに認識することを可能にする。提案マーカの有効性を実験により評価した結果、復号成功率が 13% 向上した。

**キーワード** マーカ, カラーコード, SIFT, 低解像度, 独立成分分析, 拡散符号

## A Proposal of Encoding Marker which is Robust against Blur and easy to Detect

Norimasa KOBORI<sup>†</sup> Daisuke DEGUCHI<sup>†</sup> Tomokazu TAKAHASHI<sup>‡</sup>

Ichiro IDE<sup>†</sup> and Hiroshi MURASE<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

<sup>‡</sup> Faculty of Economics and Information, Gifu Shotoku Gakuen University, 1-38 Nakauzura, Gifu

E-mail: <sup>†</sup> {kobo, ddeguchi, ide, murase}@is.nagoya-u.ac.jp, <sup>‡</sup> ttakahashi@gifu.shotoku.ac.jp

**Abstract** We proposed a new encoding Marker which can have flexibility to marker's placement and distance. Our method can detect the marker by using the SIFT-Localization method without dependence on their parameters. Marker's feature is represented by frequency information of color encoded by using ICA and Spread code. In consequence, the proposal method shows a characteristic of robustness against blur. Experimental results showed that the proposed method could boost 13% success rate of decoding.

**Keywords** Marker, color code, SIFT, low resolution, ICA, spread code

### 1. はじめに

近年、Baxter(Rethink Robotics 社[1])やNEXTAGE(川田工業[2])に代表される人間型ロボットが工場等で広く利用されるようになってきている。このようなロボットが汎用的な作業を行うためには、作業対象への距離や配置の自由度が求められる。一般物体認識のアプローチ[3]を対象の認識に利用する研究も存在するが、実用面での課題は多い。一方、対象に付けたマーカを認識することで対象の配置や距離、姿勢を認識する手法が実用的である。以降、従来のマーカ認識の技術について簡単に紹介する。

QR コード[4]は、現在最も普及しているマーカの一つであり、工場での検査工程や広告配信等で広く利用されている。QR コードは、目印である隅 3 点のコーナーパターンを検出するために、カメラとマーカの距離が近く、比較的正面から撮影する必要がある。つまり、QR コードとカメラの距離が離れている場合はマーカ

の検出そのものが難しい。これまでに、符号化開口[5]や超解像[6]を利用して検出性能を改善する試みもなされているが、1cm 四方のマーカを 1~3m の距離から検出するのは困難である。

一方、色情報を用いることにより、マーカの配置や距離の問題を解決する、カラーコード(カメレオンコード[7]、カラービット[8]、カラーOCM[9])が提案されている。これらの手法では、マーカは色の付いたパターンの集合として表現され、パターンの色や隣り合った色の変化で特徴(ビット)表現を行っている。色情報さえ取得出来れば良く、マーカが歪む場合や距離が遠い場合でもマーカ認識が可能である。実際にカメレオンコードは図書館での本の管理にも使われている。しかし、背景に同様の色が存在する場合は検出が難しい。さらに、マーカを構成するパターン 1 つ 1 つでビットを表現するため、マーカのサイズが小さくなるにつれ解像度ボケによる色情報の損失が発生する。取得

画像サイズにおけるマーカの面積占有率は小さいものの、マーカに対して焦点距離を合わせる必要がある。そのため、多くのマーカが様々な距離に配置されるような場合には、マーカサイズを一律に小さくすることが難しい。

上述の問題の解決を目的とし、本研究は (1)配置 (向き・スケール) に依存しないマーカ検出、(2)解像度ボケに対するロバスト性、の 2 点に焦点を当てる。(1)については、(a) Scale-Invariant Feature Transform [10] (以降、SIFT と略記) のキーポイント検出によるマーカ検出を利用し、SIFT に最適なマーカ形状 (円構造化) を用いることでマーカ検出の性能向上を図る。そして、(b)色の頻度情報による符号情報 (以降、コードと呼ぶ) 表現を行うことで、配置やスケールに依存せず、マーカの場所を容易に特定できる仕組みを実現する。一方、(2)に関しては、(c)マーカ全体で 1bit を表現する Decode/Encode 方法、(d)直交拡散符号を用いたコード生成/復号器、(e) Independent Component Analysis [11] (以降 ICA) を用いたボケ画像の学習、を行う。これらは、撮影されるマーカが低解像度となった場合の対策である。以降、2. で提案手法を詳細に説明し、3. で上記の(1)と(2)の効果を検証する。そして、4. でまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 提案手法

### 2.1. マーカ構造とマーカ検出ロジック

SIFT は回転、並進、スケール変化 (拡大・縮小) に対してロバストな手法として広く知られている。SIFT におけるキーポイント検出にはスケールスペース処理が用いられており、画像中のエッジに囲まれた輝度の窪みに強く反応する。この特徴から、マーカを円構造化することで SIFT のキーポイント検出がマーカの位置検出に利用可能であり、SIFT の特徴である回転・並進・拡大・縮小に対するロバスト性も同時に得られる。さらに、SIFT から得られるスケール情報からマーカの大きさの推定も可能である。このような考えに基づき、提案手法は RGB の G 成分で 2 重円構造を作成し、RB 成分でコードを表現する。マーカの位置検出は G 成分に対して行う。SIFT によるマーカ検出の様子を Fig.1(左)に示す。 $\sigma k^4$  と  $\sigma k^9$  のスケールで円構造のキーポイントを正しく検出できている。ここで、 $\sigma=1.2$ ,  $k=2^{1/3}$  とした。異なるスケールに誤ってキーポイントが検出される可能性もあるが、コード値の検証を行えばそれらを除去することは容易である。

### 2.2. 色の頻度情報によるコード情報表現

マーカの配置 (向きやスケール) に依存しないコード情報表現のために、マーカを層状の円構造とし、各層における色の出現頻度の割合をコード表現に用いる。

これにより、マーカの配置、拡大・縮小に対してもコード情報は不変になる。Fig.1(右)に層状構造を利用したコード情報の例を示す。図に示されるように、外側から内側にかけてエリア 1~4 の領域を設定する。ここで、G 成分はマーカの位置検出で使用するため、RB 成分を用いて各エリアを 5 クラスで表現する。ただし、エリア 4 のみ 4 クラスとする。検出の閾値として、 $R_h=120$ ,  $B_h=117$ ,  $R_L=B_L=50$  を用いる。

Class-R : R 成分が閾値  $R_h$  以上, B 成分が閾値  $B_h$  未満  
 Class-B : R 成分が閾値  $R_h$  未満, B 成分が閾値  $B_h$  以上  
 Class-R/B : R 成分が閾値  $R_h$  以上, B 成分が閾値  $B_h$  以上  
 Class-N : R 成分が閾値  $R_L$  未満, B 成分が閾値  $B_L$  未満  
 Class-I : 上記以外

これにより、コードは 16 次元の数値情報を表現できる。例えば、エリア 2 は R, B, R/B, N, I の色に対応する画素数により 5~9 次元を表現する。ここで、Class-I はエリア間の画素数の相違を吸収するためのものである。また、16 次元の数値は中間コード表現である。

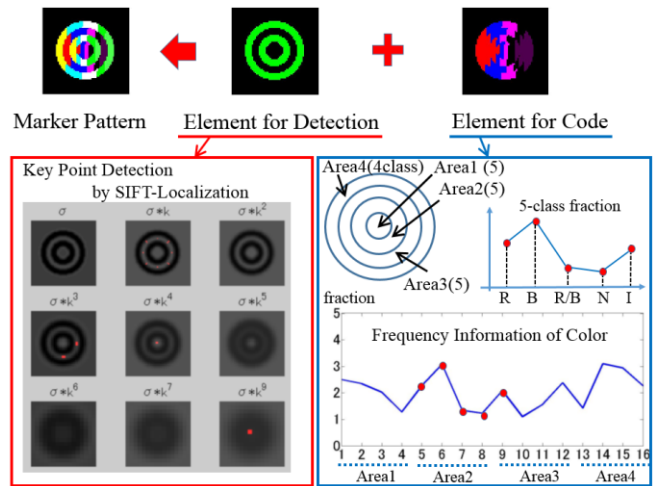


Fig. 1 Structure of Marker and Representation of Code Information

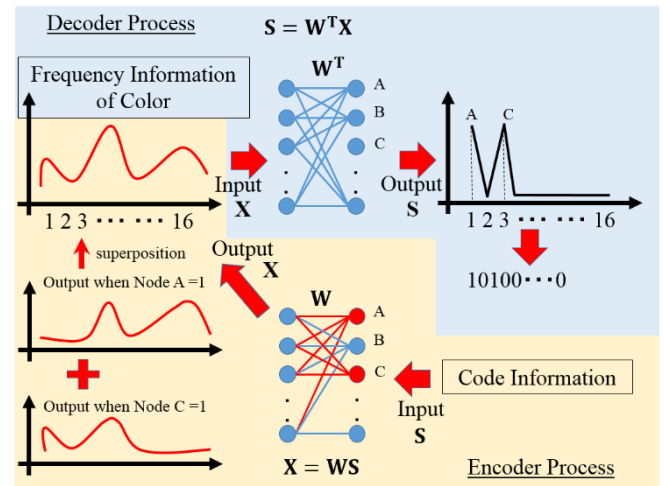


Fig. 2 Decode and Encode Process

### 2.3. Decode/Encode 方法

Fig.2 にデコード, エンコードの手順を示す. 前節の色の頻度情報を  $n$  ( $n=16$ ) 次元データ  $\mathbf{X}$ , 復号行列  $\mathbf{W}^T$  とすると, デコードは次式により算出される.

$$\mathbf{S} = \mathbf{W}^T \mathbf{X} \quad (1)$$

ここで,  $S_i$  (出力  $\mathbf{S}$  の  $i$  次元目の値) が閾値以上であれば,  $i$  番目の bit を 1, それ以外は  $i$  番目の bit を 0, とする. これにより 16 bit のコード情報を表現する.

一方, エンコードは,

$$\mathbf{X} = \mathbf{W} \mathbf{S} \quad (2)$$

により計算される. ここで,  $\mathbf{S}$  には 0/1 のコード情報を入力し,  $\mathbf{W}$  は  $\mathbf{W}^T$  を転置した生成行列である. 16 次元の各 bit の色頻度情報を  $\mathbf{X}_i$  とすると, 式(2)はそれらの和の形で書きなおす事が可能であり,

$$\mathbf{X} = \sum_i^n \mathbf{X}_i = \sum_i^n \mathbf{W}_i S_i \quad (3)$$

として最終的なマーカの色頻度情報が表現される.

既存のマーカの多くは各 1bit を表現するための領域を個別に設けているが, 提案手法は全領域を用いて 1bit を表現することで低解像度の問題に対処する.

### 2.4. 直交拡散符号を用いたコード生成/復号器

前節の生成行列  $\mathbf{W}$ , 復号行列  $\mathbf{W}^T$  の計算方法を述べる.  $\mathbf{W}$  と  $\mathbf{W}^T$  は転置の関係であり, どちらか片方のみ求めれば良い. 色の頻度情報  $\mathbf{X}_i$  は自己相関が高く, 相互相関が低いことが好ましい. 拡散符号の M 系列[12]はこの性質を有しており, M 系列そのものを  $\mathbf{W}$  にすることでノイズ耐性を得る.

また符号間距離を最大化するため, 直交 M 系列  $\mathbf{P}$  で  $\mathbf{W}$  を表現する. M 系列は 4 次の原始多項式 ( $a^4+a+1$ ) を使用し,  $2^4-1$  個の  $\{1, -1\}$  の符号列が得られる.  $\mathbf{P}_{s_i}$  と  $\mathbf{P}_{i^*}$  の  $i=16$  の値を  $\{-1\}$  とすることで直交 M 系列を得る.

### 2.5. ICA を用いたボケ学習方法

提案手法では色頻度情報  $\mathbf{X}$  をマーカの間コードに利用している. 色頻度情報は, マーカまでの距離や配置によって解像度ボケが発生する. そこで, 前節までに述べたコードと復号器に解像度ボケの情報を学習させることで精度向上を狙う. 具体的には, 計算機上で作成したマーカを回転 (roll, pitch, yaw) させ, ガウス関数を重畳してマーカのボケ画像群を作成する. そして, 重み行列  $\mathbf{B}$  の初期値を  $\mathbf{P}$  としてボケ画像群を ICA により学習する (Fig.3 参照). ICA は  $\mathbf{S}$  の確率密度が優ガウス分布を仮定し, 自然勾配法[13]によって相互情報量を最小化する. ICA の更新式は,

$$\mathbf{B} \leftarrow \mathbf{B} + \epsilon \Delta \mathbf{B} \quad (4)$$

$$\Delta \mathbf{B} = \{(\mathbf{I} + \mathbf{E}[\varphi(\mathbf{S})\mathbf{S}^T])\mathbf{B}^T\}^T \quad (5)$$

$$\varphi(s) = -\tanh(s) \quad (6)$$

で与えられる. ただし,  $\epsilon$  は 0.1 とし,  $\mathbf{I}$  は単位行列である.

最終的な復号器と色頻度情報は次式で与えられる.

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}^T \mathbf{X} \quad (7)$$

$$\mathbf{X} = \sum_i^n \mathbf{X}_i = \sum_i^n \mathbf{B}_i S_i \quad (8)$$

## 3. 実験

### 3.1. 向きに対するマーカの検出性能評価

マーカ構造と SIFT-Localization による向き変化に対する検出性能を確認する実験を行った. マーカの向きを roll, pitch 方向に 10 度ずつ変化させ, キーポイントが検出可能かどうかをシミュレーションにより検証した. 結果, roll, pitch それぞれに対しては 75 度まで, roll, pitch を組み合わせて変化させた場合は 60 度まで, マーカに対応するキーポイントを検出可能であった. その様子を Fig.4 に示す. キーポイントの検出位置は 1pixel 以下の誤差で正確に検出可能であった (Fig.4, Scale:  $\sigma k^2$ ). 2 重円構造のマーカを利用することにより, SIFT のスケール空間においてマーカ内にキーポイントが複数検出されることを確認した. このことから, 単一円のマーカに対するロバスト性を確認した.

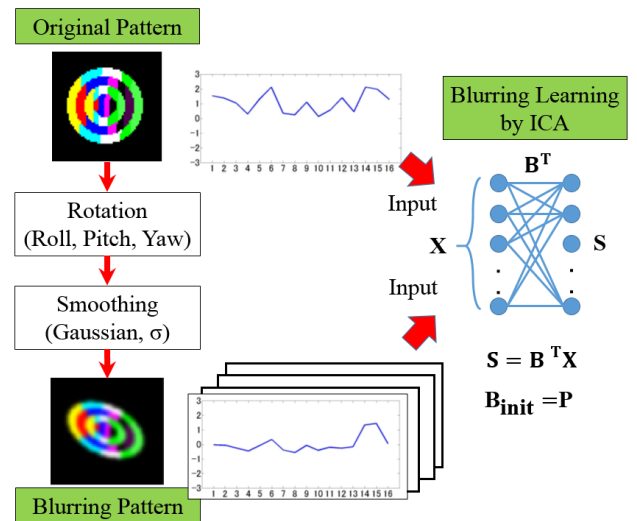


Fig. 3 Update Code Generator/Detector by ICA

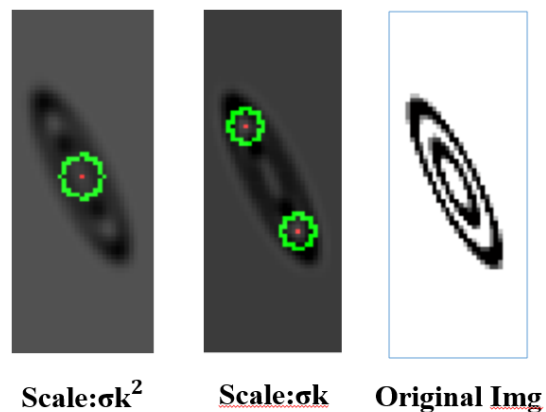


Fig. 4 Marker Detection by SIFT-Localization (roll: 60deg, pitch: 60deg)

### 3.2. 距離に対するマーカの検出性能評価

マーカ構造と SIFT-Localization による距離・スケール変化に対する検出性能を評価した。市販プリンタ(エプソン製 EP802A)を用いたシール印刷(エプソン製 ミニフォトシール)により 17×23mm のマーカを作成した。作成したマーカを壁に配置し、マーカからの距離が 1m, 2m の場所で撮影した画像(640×480)からマーカ検出を行った。1m の場所でマーカに焦点距離を合わせ、2m の場所では 1m で合わせた焦点距離のまま撮影を行った。2つの距離で撮影した画像に対する SIFT-Localization の結果を Fig.5 に示す。

1m と 2m のどちらの場合においてもマーカに対応するキーポイント検出が可能であり、スケールはそれぞれ  $\sigma k^5$  と  $\sigma k$  であった。マーカの面積占有率は 1m の場合で 1.1%, 2m の場合で 0.31% であった。カメレオンコード[7]においては 640×480 の画像に対して 0.6% であり、提案手法は同等以上の性能であることが分かる。

一方、検出されるキーポイントはマーカ以外にも多く存在し、スケールによって反応する箇所が異なることが分かる。Fig.5, Fig.6 はスケールに対応する円が描かれている。スケールが小さい場合は壁のテクスチャに反応し、大きい場合はカレンダーの文字に反応していることが分かる (Fig.6)。また、検出されたキーポイントは合計 5003 点であり、1 オクターブ目が 3680 点、2 オクターブ目が 866 点、3 オクターブ目が 457 点であった(場所 2m の場合)。VGA の画像数 307200 点であるため探索点数は 1/6 になる。

以上の結果から、提案手法はマーカの向き・距離のパラメータに依存せず、同一のロジックでマーカ検出が可能であることが分かる。

### 3.3. コード生成/復号器の検証

本節では、検出されたマーカからコード情報を正しく読みとれるかを評価した結果を述べる。コード情報の各 bit に対応する色頻度情報  $X_i$  の値とそのマーカ画像を Fig.7 に示す。色頻度情報  $X_i$  は M 系列そのものである (Fig.7 上段)。マーカ画像を読み込み、色の頻度情報表現から中間コードを求め、復号器にかけた結果を Fig.8 に示す。いずれも該当する bit が正しく抽出できていることがわかる。

次に、偶数 bit の 2,4,6,8,10,12,14bit 目を 1 にした場合の結果を Fig.9(A) に示す。左図が色の頻度情報  $X$ 、右図が相関値出力結果の  $S=W^T X$  である。同時に情報表現が出来ていることが確認できる。1bit をマーカ画像の全体で表現し、信号の重畳による情報の埋め込みが出来ていることが確認できる。

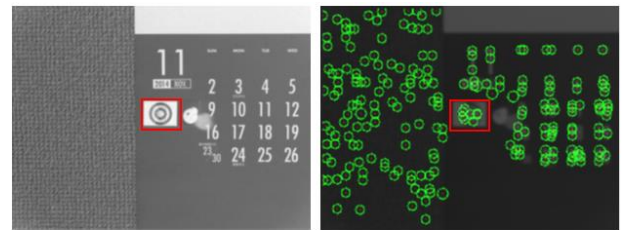
次に、ノイズに対する耐性を確認する実験を行った。Fig.9(A) に対し、白色誤差をマーカ画像に加えた際の結果を Fig.9 の (B) と (C) に示す。一様乱数を発生させ、

(B) は RGB 値で  $\pm 10.24$ , (C) は同様に  $\pm 25.6$  変化させた。その結果、(B) はコード情報を正しくデコードすることができ、(C) では出来なかった。マーカ画像に加えた白色誤差が復号器への入力誤差になるが、その際は白色誤差でないことを確認した。RB 成分の頻度を判定する閾値が大きく関わるためである。これらの結果より、色の閾値の評価が別途必要であると考えられる。

### 3.4. ICA を用いたボケ学習の効果検証

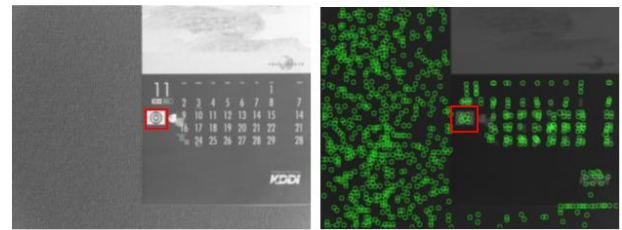
解像度ボケに対するロバスト性を評価する実験を行った。提案手法は、マーカのボケ画像群(回転とボケ)を用いることで各 bit の中間コードパターン(色の頻度情報  $X$ ) を学習させる。各 bit については、以下のマーカ画像 900 個を訓練データとして作成し、全 16bit 分で計 14400 通りの画像より学習を行った。実験では、学習の反復回数を 10000 回とした。

結果を Fig.10 に示す。上段が学習後の行列 B であり、下段が各 bit に対応したコードの認識結果(復号器の出力)である。Fig.7 上段で示した行列 W が M 系列の形は残しつつも、学習により変形していることが分かる。また、Fig.8 と同様に各 bit の認識も正しく可能であることを確認した。



location: 1m

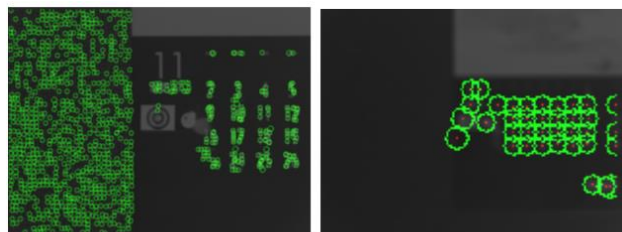
1m, Scale:  $\sigma k^5$   
Detect



location: 2m

2m, Scale:  $\sigma k$

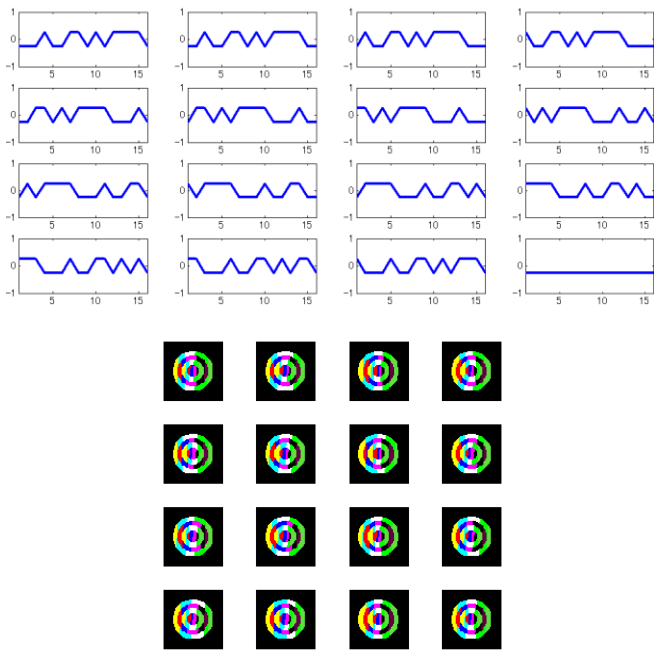
Fig. 5 Marker Detection by SIFT-Localization



1m, Scale:  $\sigma k$

2m, Scale:  $\sigma k^9$

Fig. 6 Scale difference of SIFT-Localization



**Fig. 7 Frequency Information of Color and its Patterns**  
[ICA への入力画像パターン]

- Roll: 0~20度を5度刻み, 5パターン
- Pitch: 0~20度を5度刻み, 5パターン
- Yaw: 0~360度を30度刻み, 12パターン
- Gaussian: 0, 1.0, 2.0の3パターン

偶数 bit の 2,4,6,8,10,12,14bit 目を同時に立てた場合のマーカで効果確認をする。先に示した学習パターンで、計 900 通りの試験データで評価した。結果を Fig.11 に示す。Fig.11 の上段左が {解像度ボケなし, ICA 学習なし}, Fig.11 の上段右が {解像度ボケなし, ICA 学習あり} の復号器の出力結果である。いずれも正答している。一方, Fig.11 の下段左が {解像度ボケあり, ICA 学習なし}, Fig.11 の下段右が {解像度ボケあり, ICA 学習あり} の復号器の出力結果である。下段左は 8bit 目, 9bit 目の認識が失敗しているが, 下段右では成功していることが分かる (図中破線)。900 通りの試験データで, ICA 学習なしで 630 回正答できたものが, ICA 学習によって, 748 回正答に向上した (復号成功率 13% 増)。

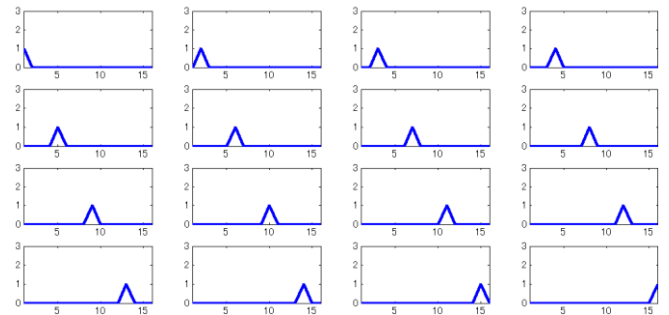
#### 4. まとめ

ロボットが様々な物体を把持するようなタスクを前提に, どのようなマーカが最適かを考え, マーカの配置, 距離, 焦点距離の自由度に焦点を当てた新しいマーカを提案した。上記のようなアプリケーションでは, マーカの情報の多さではなく, マーカの検出のし易さとマーカの体格の小ささが求められる。マーカが小さくなくても正しく読み取りができるということは,

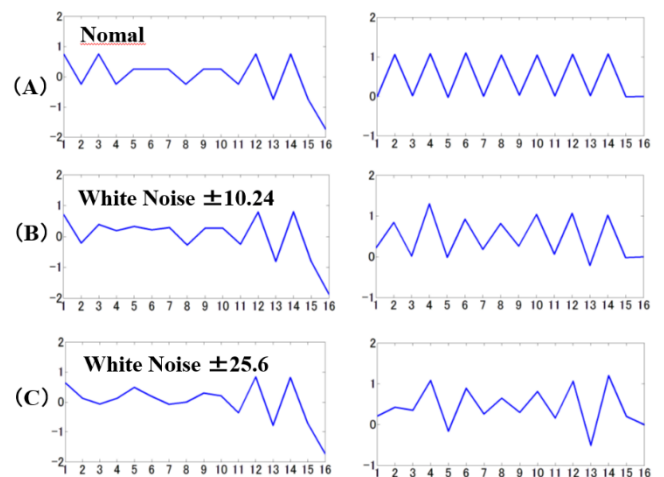
低解像度でもロバストにデータを読み取るための要件になる。提案手法は, (1)マーカそのものの見つけやすさ, (2)マーカの解像度ボケに対するロバスト性, の2点を対象に開発を進めた。

(1)に関しては, マーカの配置 (遠近, 奥行・斜めの配置, 回転) に影響されない検出方法として SIFT に最適なマーカ構造 (2重円構造) を提案した。実験により, マーカ画像占有率 0.31% (VGA サイズの場合) でも検出できることを確認した。ロボットが自由度の高い環境で作業する際は, 事前に対象物がどこに存在するかを知ることは難しい。このような状況下では, マーカに対して適切に焦点距離を合わせることは難しく, ボケに対してロバストな提案手法が有効であると考えられる。

また, マーカ内の色頻度情報によってデータを表現する方法を提案した。こうすることにより, どのような配置 (回転, 拡大縮小) であっても, 得られる値は不変である。今回の実験では, マーカ中に設けた層状構造を正確に切り出す方法や, 色頻度情報を獲得するための色に対する閾値の決定方法, に関してはプロトタイプでの検証ができていない。今後, これらの検討は重要な課題であると考えられる。



**Fig. 8 Marker Detection by SIFT-Localization**



**Fig. 9 Superimposed signal test by Code Detector**

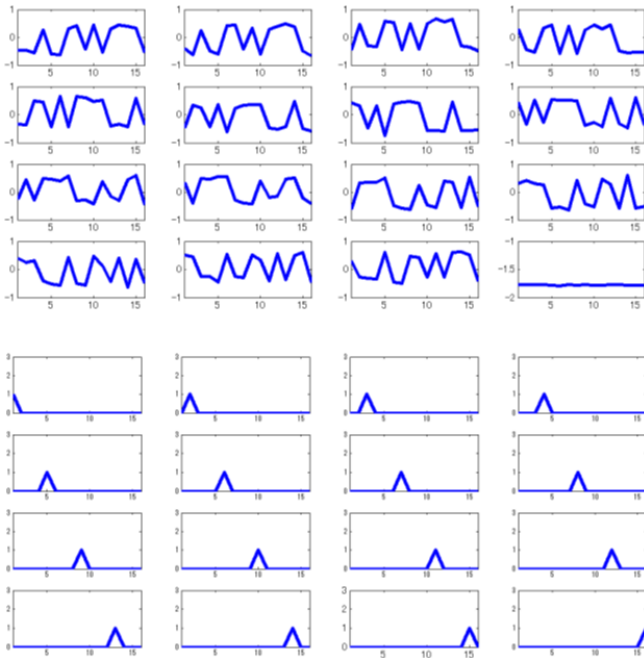


Fig. 10 Result of update Code Detector by ICA

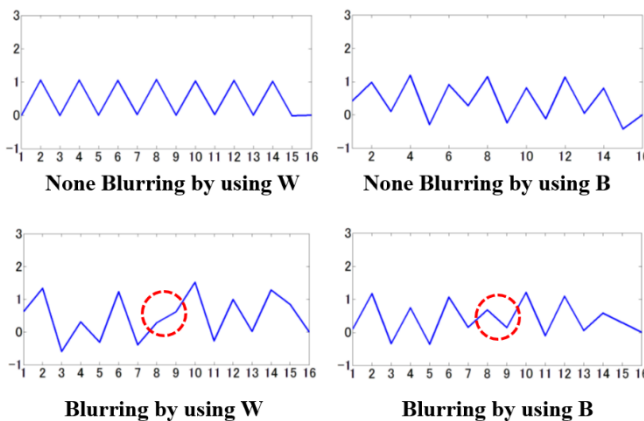


Fig. 11 Effect of Blurring Learning

(2)に関しては、解像度ボケに対応可能な符号化方法を検討し、解像度が低下した状態でも正しくデータの読み出しが可能な手法を検討した。具体的には、マーカ全体で符号を重畳表現する方法を提案した。符号をマーカの個々のエリア要素で表現した場合、解像度の低下に伴いデータの欠損が発生する。一方、マーカ全体で符号を表現すれば、一部の微小な欠損を全体が補って符号を表現できるというメリットがある。Fig.9で示したように、白色誤差を加えたとしても正しく符号をデコードできることを確認した。

提案手法では、拡散符号で知られる M 系列を符号に使用した。M 系列が持つ自己相関の高さと相互相関の低さの性質を符号の重畳に利用した。M 系列は画像透かしなどで使用されており、全画像領域に対して FFT を施した上で高周波数領域に重畳するのが一般的であ

る。提案手法のように、拡散符号を画像に直接的に埋め込む事例は少ない。これは、重畳する画像領域を特定する必要があり、また、重畳した際に RGB の上限値によって信号が飽和するためである。これらの問題を解決するため、提案手法は信号を色頻度情報に一旦変換し、その成分比を用いることで飽和の問題を解決した。また、重畳する画像領域の特定は SIFT を用いたマーカ検出により対処した。

最後に、M 系列で生成した復号器を ICA により学習した。ICA は、入力信号から指定した数の独立成分を抽出する方法である。ボケ画像を ICA の学習に用いることにより、解像度ボケも表現可能な基底を求め、解像度ボケによる符号変化の吸収を可能とした。実験結果からも、符号復号器として ICA を用いる提案手法の有効を確認した。

提案手法は、(a)マーカの円構造と SIFT、(b)色頻度情報による表現、を用いて配置に依存しないマーカ検出のし易さを実現した。さらに(c)1bit 表現方法、(d)拡散符号の利用、(e)ICA による解像度ボケの学習、によって解像度ボケに対するロバスト性を実現した。今後はプロタイプの試作を通して性能評価を行う。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金による。

## 文 献

- [1] Baxter HP : <http://www.rethinkrobotics.com/baxter/>
- [2] NEXTAGE HP : <http://nextage.kawada.jp/>
- [3] S. Hinterstoisser, C. Cagniard, S. Ilic, P. Sturm, N. Navab, P. Fua, V. Lepetit, Gradient Response Maps for Real-Time Detection of Texture-Less Objects, IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.34, no.5, pp.876-888, May 2012
- [4] 特許出願公開番号：特開平 7-25407 二次元コード
- [5] 河本悠, 日浦慎作, 浅田尚紀, "符号化開口を用いたバーコード画像のぼけ除去," 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM), Vol. 2011-CVIM-177, No. 14, pp.1-8, 2011.
- [6] 加藤祐二, 高橋友和, 出口大輔, 井手一郎, 村瀬洋, "低解像度 QR コード認識のための 2 値グリッド拘束付き 2 段階超解像," 電子情報通信学会論文誌, J96-D, No.2, pp.328-337, Feb.2013
- [7] カメレオンコード <http://www.shift-2005.co.jp/>
- [8] カラービット <http://www.colorbit.jp/new/>
- [9] 本田匠, 金子俊一, "色特徴を用いたロバストパターン照合技術と実応用," OplusE, vol.35, no.12 pp.1375-1380, Dec.2013
- [10] D. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," Int. Jo Computer Vision, 60-2, pp.91-110, 2004
- [11] P. Comon, "Independent component analysis, A new concept?," Signal Processing, Vol.36, No.3, pp.287-31, 1994
- [12] 松尾憲一, スペクトラム拡散技術のすべて, 東京電機大学出版局, 2005
- [13] S.Amari, "Natural Gradient Works Efficiently in Learning," Neural Computation, 10, 251-276, 1998