順序依存収束探索による関心パタンの効率的探索*

浅野裕一** 周 文俊*** 高氏秀則† 金子俊一††

Order-Dependent Convergent Search for Efficient Search of Feature Patterns

Hirokazu ASANO, Wenjun ZHOU, Hidenori TAKAUJI and Shun'ichi KANEKO

A novel algorithm, order-dependent convergent search, for efficient search of interest patterns is proposed. Order or sequence in searching plural patterns is analyzed for designing an efficient algorithm in computation cost, and then some schema for reducing the searching area are proposed. For the realization of experimental programs, a matching algorithm of robustness against illumination fluctuation is utilized. For testing the performance of the proposed algorithm, the experimental evaluation using both of synthesized data and real images of industrial products recognized the cost reduction in their registration.

Key words: Fast search, Efficient search, OCM, Order-dependent convergent search

1. 緒 言

製品の生産現場では製造プロセスの自動化および高速化を進めることによって生産能力を向上させ、またコストを削減して製品の競争力を高める努力を日々積み重ねている。近年マシンビジョンカメラやコンピュータの性能が向上し機材が入手しやすい価格になったことにより、製品の外観検査などの工程も自動化¹⁾²⁾が進められている。

一般的にインラインで使用される検査装置では、検査に許容できる時間と全体のラインバランスが重要となり、製造ラインの生産タクト時間以内に検査処理を完結しなければならない。画像による検査の手順では検査対象の位置を正確に同定し、指定された範囲内の検査を実行することが多い。よってタクト時間内に収めて検査時間を十分に確保するために、検査対象の位置の探索は最短時間で処理する必要がある。

従来から用いられている効率化のための手法としてすべての画素を使用しない照合の方法（例えば、部分テンプレートによる照合³⁾⁴⁾、ピラミッド探索⁵⁾など）、あるいは専用ハードウェアによる方法などがある。しかし、探索に有効な画素が限定されて信頼性の低下が懸念されたり、探索アルゴリズムが限定されて汎用性が失われたりする可能性がある。

本論文においては、探索の対象とする特徴のあるパターン、例えばPCB上に配置された電子部品などの外形、刻印されている文字などの特徴的な部分や基板上のレジストレーションマーク、銅箔パターンなどを関心パターンと呼び、それらのロバストかつ効率的な探索手法について提案する。

順序依存収束探索は、照合アルゴリズムに依存すること

なく関心パターンを高速に検出するための探索手法として、関心パタンの情報である面積と位置に着目した探索領域を決定する手法である。この探索のための戦略によって探索精度を保ちつつ高速に探索する手法を提案するとともに、その効率について実際の製品から得られた画像を用いて検証する。

順序依存収束探索について概略を説明する。この探索手法は関心パタンの固有な情報である面積と位置に着目し、複数の関心パターンを任意の順序で探索を進めて行く方法である。この固有情報は製品の設計データあるいは事前に作業員によって定義されることによって各関心パターンに対して固定された明確な値であり、これを頼りに探索をする。

この探索では2つの手法を同時に実現しながら探索を行う(図1)。前提条件として探索基準点Rと各関心パターンは設計上の位置は既知であるが、製造上の取り付けあるいは加工の誤差があるため実際の正確な位置は未知である。第1の手法として関心パタンの位置決めに関する技術について説明する。最初に探索基準点Rについて正確に位置を特定できる手法で正確に検出する。例としてはPCBでは電子部品を自動機によって実装するために用意されているレジストレーションマークや機械的な位置決めを行う基準ピン穴などの一意性の

Fig.1 Schematic of Order-Dependent Convergent Search

* 原稿受付 令和元年 7 月 9 日
 * 掲載決定 令和元年 10 月 16 日
 ** 正 会 員 北海道大学情報科学研究科(札幌市北区北 14 西 9) 鎌倉光機株式会社(埼玉県蕨市塚越 3-6-12)
 *** 北海道大学情報科学研究科
 † 正 会 員 北海道大学(札幌市中央区南 26 西 11-1-1)
 †† 正 会 員 北海道大学情報科学研究所

高いパターンを信頼性の高いアルゴリズム（例えば正規化相関など）を用いて探索基準点 R の位置を特定することが望ましい。この R から設計上の位置付近にある関心パターン 1 に対して、設計上の位置情報を元に探索領域を設定して探索する。続いて関心パターン 1 の検出位置から関心パターン 2 の設計上の位置に探索領域を設定して探索する。これを順次繰り返して対象とする関心パターンすべてを追跡して探索する。第 2 の手法として探索領域を絞り込みながら信頼性を向上し高速化する手法について説明する。関心パターン 1 の探索領域については、パタンの位置の揺らぎを考慮して作業者によって設定される。関心パターン 2 以降の探索領域は、本論文で示す手法に基づき戦略的に縮小することで高速化を図る。

画像照合の手法としては、これまでに多くの研究がなされており、古典的な手法として画素値の差分の絶対値の総和 (Sum of Absolute Difference: SAD)⁶⁾、画素値の差分の二乗和 (Sum of Squared Difference: SSD)⁷⁾、方向符号照合 (Orientation Code Matching: OCM)⁸⁾、一般的な正規化相関など⁹⁾がある。検証では、対象画像の明度変化や遮蔽にロバストな照合法として一定の成果が得られており、基本照合として古くから提案されている手法を用いることが望ましい。本研究では、実際の現場での過去の経験からロバストな照合法である OCM を利用して検証する。

検証のための対象画像は、我々が生産現場で経験した問題（例えば検出時間が長く実用に即さないものなど）から判断して、これらの事例に近い PCB とした。画像中に類似したパターンが複数散見され、設計上の位置は既知であるものの製造上の配置誤差が生じるものとして PCB に搭載された電子部品を探索対象とした。

本論文での画像に対する座標軸は撮影された画像内での画素を基本単位として扱い、画像の水平方向の並びを x 軸（右方向を正）垂直方向の並びを y 軸（下方向を正）とする。パターンや探索領域の大きさや配置も画素を単位とする。実際の現場での運用においては撮影倍率や周辺装置の駆動系のパラメータ、検査対象の部品配置などを考慮する必要があるが、これらの設計については本提案アルゴリズムの外部で計算されることを期待する。

2. 順序依存絞込み探索

本章では、関心パタンの配置（設計）情報であるパタンの面積と位置を頼りに、パターン自体の探索の信頼性の向上と高速化に対して有効に作用する効率的探索のための手法を提案する。

一般に工業製品表面における関心パタンの配置は設計段階において決まるが、本論文の目的に則して観測画像内における配置情報の自動検出処理を考えるためには、部品実装における配置誤差などの影響を考慮することが必要である。近年の多画素高分解能カメラによる撮像データを扱うためには、このような考慮がより重要となる。

探索の順序を決めるための手掛かりとしてはいくつかの方法が考えられ、組立順、座標順、面積順、任意の順序などが挙げられる。しかし何れの探索順序によっても探索時間を高速化できるのかという問題については、関心パタンの面積と探索領域が固定され探索アルゴリズムに同じものを用いている限り順序を変えただけでは高速化は図れない。

本研究では探索の信頼性を維持しつつ高速化のために、関心パタンの位置と面積に基づいて考案した探索領域の位置と画素数を

Fig.2 Description of Order-Dependent Convergent Search

用いて探索を効率化する手法について提案して検証する。

2.1 順序依存絞込み探索の概要

一般に工業製品を対象とする画像は、1) 複数の関心パターンが対象画像内に分布して設計公差の範囲内に収められて配置され、2) 各個別の関心パターンはそれぞれの大きさおよび外観（テクスチャ）を持つ。このような一般特性を頼りとして、1) 関心パターン間の期待される相対変位を配置情報として利用する、また 2) 大きさやテクスチャなどの固有特性に依存する信頼性および照合値自体に基づいて探索順序を立案する手法について検討する。

図 2 は順序依存絞込み探索を示す。本論文では関心パターンを矩形領域とする。初期位置 (D_0) 決めるために用いる関心パターンを本論文では、RP (Registration Pattern) と呼ぶ。1つの実線矩形の中心 D_0 は対象画像にわたる初期探索によって検出した初期（中心）位置決めされた関心パターン RP を示し、本手法の初期位置を定める。この RP の位置の探索手法すなわち関心パタンの大きさ、探索アルゴリズム、探索領域の設定については、探索対象の特徴を理解した上で最適な条件設定をして位置決めする必要がある。破線矩形は探索領域を示し、この領域は第 k 番めの探索位置 D_k の一つ前の探索位置 D_{k-1} （実線矢印の先端位置）から相対変位 $d_{k-1,k}$ （破線矢印、製品の設計値などを示す）を中心とする探索領域である。更に範囲内の各黒点は照合処理（本論文では OCM）によって得られる（と仮定する）最適照合位置を示し、実線矩形は関心パターンが照合した領域を示す。いま、総数 K の関心パターン r_i と r_j のすべての組合せに対して相対変位 d_{ij} とする。図中で D_0 は探索を始める初期位置、 D_i は関心パターン r_i の確定位置を示す。すべての関心パタンの確定位置 ($D_1, D_2, \dots, D_K$) を効率的に求めることが本論文の目的である。

2.2 初期位置決め

初期位置 (D_0) 決めるために用いる関心パターンが必要とする基本条件として、1) 探索の信頼性が高く、照合間違いの可能性のできる限り低いものであり、2) 対象画像中において一意性の高いパターンであることが要請される。前者は照合評価値（類似度）の高いこと、後者は評価値余有（最善値と次善値との差）の大きいことに相当する。以上は一般的な議論ではあるが、RP は一意性が高いもの（レジストレーションマークや特徴量が多く他に類似したパターンを持たないものなど）を設定する必要がある。実製品に適用するときの探索設定では、計算コストを考慮して領域を大きく設定することなく製品上の RP の設計位置に対する公差や配置誤差が探索領域を逸脱しないように設定する。本論文にお

いては実験の章においてそれぞれの場合に即して説明することとした。

2.3 探索順序立案のための戦略

本論文では、関心パターンや探索領域の添え字はそれらのID番号であり、同時に（並び替え以前の）探索順序を表す。まず、探索領域の大きさである画素数を固定し任意に割り付けられた探索順序（ r_1 を1番目、 r_2 を2番目のように探索）を導入すること自体を戦略1とし、次に述べる探索領域の画素数自体を制御する戦略2と区別する。探索の信頼性は一般的に関心パタンの大きさ（画素数）、コントラストの強度、エッジなどの特徴の豊富さなどによると思われるが、本論文においては関心パタンの大きさのみに注目し、大きいパターンを用いて検出された位置ほど信頼性が高く、それに続く探索領域の大きさを小さく設定できるという考え方を導入する。第 k 番目の関心パタンの画素数を s_k とする。探索領域 U_k の画素数 u_k を次式のように定式化する。本論文では探索領域を関心パターンが走査する領域ではなく、その中心を配置する正方形領域とする。

$$u_k = \begin{cases} u_1 & (k=1) \\ \left\lceil \sqrt{u_{k-1} \frac{B_{k-1}}{B_k}} \right\rceil^2 & (k \geq 2) \end{cases} \quad (1)$$

$$B_k = \sum_{n=1}^k s_n \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (2)$$

ここで、 u_1 は最初（RPによる初期位置決め直後）の関心パタンのための探索領域の画素数である。これは対象画像の品質（照明不足、ボケ度合、付加ノイズなど）と公差（製品設計上の許容位置ずれ量）にも依存して設定される値とし、 B_k は k 番まで関心パタンの画素数の和、 $\lceil \cdot \rceil$ は整数化（切上げ）演算を示す。上式においては u_{k-1} と u_k との間には反比例則 $u_{k-1} : u_k = B_k : B_{k-1}$ を成立させた。例えば3つめの関心パターン（ $k=3$ ）を探索するための領域の大きさを決めるとき、直前までに照合を済ませ新たに獲得して増やすことができた情報量（画素数） $s_1 + s_2$ にいま探すべき関心パタンの分 s_3 を加えて、 $B_3 = s_1 + s_2 + s_3$ となる。関心パタンの探索の信頼性が増えたその分探索領域を減少させられると考える。このように u_3 を $u_2 B_2 / B_3$ と小さく設定して探索効率を高めることを狙っている。この戦略2の効果を見積もる。戦略1および戦略2を共に利用しないときの探索画素総数を $N_0 = K^2 u_1$ とする（各関心パターンごとに一定の大きさ $K u_1$ の探索領域を走査するとした）。戦略1のみの場合探索領域は一定なので $N_1 = K u_1$ 、戦略2のみの場合は探索領域が順次低減されるので $N_2 = u_1 \sum_{k=1}^K \left(s_1 / \sum_{n=1}^k s_n \right)$ となる。よって効率比 $N_0 : N_1 : N_2$ は次式となる。

$$K^2 : K : \left(1 + \frac{s_1}{s_1 + s_2} + \dots + \frac{s_1}{s_1 + s_2 + \dots + s_K} \right) \quad (3)$$

すべての関心パターンが同一の画素数を持つとき、上式の第3項は $\sum_{k=1}^K (1/k)$ と簡略化され、例えば $K=5$ のときにはおよそ 10:2:1 となる。

続いて、順序並び替えを行う戦略3について検討する。ここでは、元の順列を並び替えた順列（ $a(1), a(2), \dots, a(k)$ ）を決めるため（ここで a は並び替えを定義する）に関心パタンの画素数を利用する。例えば PCB 上に配置された部品を探索するような場合、

Fig.3 Flow of the search

同一サイズの部品探索では関心パタンの画素数にばらつきが大きくないので順序並び替えの必要性は高くない。しかし、さまざまな部品を探索するような場合、関心パタンの画素数にばらつきが大きいときについて検討を進める。式(3)の()内の各項はすべて正かつ加算であるので全体の最小化は各項独立の最小化と等価である。まず、第1項では、探索領域 U_1 内でパターン $r_{a(1)}$ をくまなく走査することを考えると、 $s_{a(1)}$ は最小であるべきである。次に第2項においては、 $s_{a(2)}$ は大きい方がよいように思われるが、上記と同様の点について考慮すればその選択は単純ではない。ここでは次に小さな関心パターン $r_{a(2)}$ を選ぶ戦略を提案する。第3以降の項についても同様に設定する。即ち、小さい順の系列とする戦略となる。

これまで設計した3つの戦略に基づく順序依存絞込み探索のアルゴリズムをまとめておく。

図3に探索フローを示す。本節のまとめとして提案する戦略を整理しそれらの組合せについて検討する。

<戦略1> 探索領域の画素数を固定して任意の順序を導入する。

（例：探索対象位置の座標順）

<戦略2> 関心パタンの画素数に依存して探索領域を順次低減していく。

（探索順序は任意）

<戦略3> ある基準に従って並び替え後の順序に従う。

（例：関心パタンの画素数の昇順または降順）

<初期位置決め>

RP r_0 を用いて D_0 を求める。

<順序依存絞込み探索>

1. $k=1, 2, \dots, K$ として、以下2.と3.を繰り返す。
2. 探索領域 U_k を位置 $D_{k-1} + d_{a(k-1)a(k)}$ に設定する。関心パターン $r_{a(k)}$ を用いて探索（照合処理）を行う
3. 確定位置 D_k を求める。

2.4 モンドリアンランダム画像による検証

モンドリアンランダム画像は、乱数によって指示された位置とグレー値を用いて塗りつぶし図形を描画した特徴を持たない画像である。本検証では関心パタンの大きさによる探索の効率を実験するため、確実に位置が照合できるようにする必要がある。よって描画する図形の大きさに注意し、最小の関心パターンサイズより大きくならないように設定することが望まれる。もし最小サイズを超えてしまった場合には、関心パタンの位置（本検証ではランダムな位置か

Fig.4 Mondrian random image and region of selected patterns

Fig.5 Selected feature patterns

Table 1 Search time under random order Unit: ms

Search order	Search time	Ranking
□6 ⇒ □12 ⇒ □18 ⇒ □24 ⇒ □30 ⇒ □36	0.18	1
□6 ⇒ □18 ⇒ □24 ⇒ □36 ⇒ □30 ⇒ □12	0.20	2
□12 ⇒ □36 ⇒ □30 ⇒ □18 ⇒ □24 ⇒ □6	0.45	3
□18 ⇒ □24 ⇒ □6 ⇒ □12 ⇒ □36 ⇒ □30	0.97	4
□24 ⇒ □6 ⇒ □30 ⇒ □36 ⇒ □12 ⇒ □18	1.46	5
□30 ⇒ □18 ⇒ □6 ⇒ □12 ⇒ □36 ⇒ □24	2.21	6
□36 ⇒ □24 ⇒ □12 ⇒ □6 ⇒ □30 ⇒ □18	2.54	7

□XX is the size of a square feature pattern with one side of XX pixels.

Ex. □36 means 36 × 36 sized feature pattern.

ら切り出す) によってグレー値が一様な領域を関心パターンとして選択する可能性があり照合ができなくなる。よって描画する図形の形状は直径 5 画素の円を描画した。また対象画像の大きさは350 × 300画素とした。

関心パタンの探索順序について、ランダム順序による探索の検証を行った。図 4 に乱数によって作成されたモンドリアンランダム画像を示し、この画像から36 × 36 画素から6 × 6画素まで 6 画素ステップで大きさを変えた正方形のパターン 6 通りをランダムな位置から切り出して関心パターンとした(図 5)。ここでは、RP の設定は省略した。また探索対象とする画像を実際のものに近づけるため、元の画像にガウス分布を持つランダムノイズ($\sigma=7$)を Box-Muller 法⁹⁾により生成し全画素に添加した。このときの S/N 比は 15.8dB であった。戦略 3 については、乱数によって得られたランダムな順序として探索の検証を行った(表 1)。

最初の探索領域 u_1 は 21 × 21 画素とし、以降の探索領域 u_k は式(1)にしたがって定めた。探索結果の検証方法は関心パターンを選択した領域の位置を真値とし、探索結果として得られた照合位

置と比較した。探索精度については 100 回の照合実験の結果、照合した位置が真値と一致(□12~36: すべて差異 0, □6: 99/100 回が差異 0, 1/100 回が(0,1)の位置ずれを示した)として良好な位置を得ることができ、探索に要した時間は表 1 に示す。この例では関心パタンの大きさを昇順とした場合、最も計算時間が短くなった。戦略 3 に示した提案について、どのような順序がより良いかという点はさらに詳しい検討を必要とするため今後の課題としたい。

3. 実画像による実験

本提案の検証のために実際の工業製品を用い、カメラおよび照明を用いて実際の環境で収集された画像データを元に探索の実験を行った。収集したデータ画像は照明条件の変動として、実際の現場に複数の検査機器が用意されたときの設定誤差や経年劣化に伴う光量低下を考慮して 1) 機器間のばらつきとして基準値 $\pm 5\%$ 、2) 照明の経年劣化による光量低下として初期値+0, -20%という経験値に基づいて、基準値+5%, -25%を参考値とし、実際の検証ではこれらの条件以外に製品のバラつき(製品ごとの光沢や色味の違い)を考慮して基準値+15%, -50%を上下限とした。まず、図 6 の Middle の画像を用意した。このとき探索対象画像の中心付近の複数画素のグレー値を計測し平均を求め、これを基準値の 100%(Middle)とする。この状態のまま光源の設定を変化させて同様に複数画素の平均を計測する。このとき平均の 50%(Low)と 115%(High)となる設定値を用いた。また、使用した機材は照明本体 IMAR-130W (IMAC Co. Ltd.)、照明電源 IDGB-30M2-TP/PI (IMAC Co. Ltd.)、およびカメラ acA2040-90uc (BASLER.) である。

ここで使用した計算環境の主な仕様は、プログラミング言語 C++, CPU: Core-i7 2.50GHz 4 cores, メモリ: 8GB である。

照合精度の確認については、目視によって与えた真値¹⁰⁾と照合位置を比較して評価した。

複雑な背景を有し関心パタンの大きさの種類が豊富なパターン探索問題として、PCB 上の部品配置に関する検査問題(正誤、反転、位置ずれ、欠品などの視覚検査)に順序依存絞込み探索を適用して検証した。9 枚の市販のインタフェイス PCB (同一製品)を対象として、前述の照明変動の条件を考慮して 3 通りの光量で

Fig.6 PCB board

PCB: 1140 × 1140

Fig.7 Target image and selected region of feature patterns

Fig.8 Feature patterns

Fig.9 Result of search (3rd Plan: Descending order in size)

すべてのPCBを撮像し、計27枚の観測画像を得た(図6)。これらの画像のうち、1枚のPCB画像から関心パターンを切り出し、残りの8枚のPCBから得られた24枚の画像を探索対象画像とした。関心パタンの大きさは部品配置に関する検査のための特徴(部品外形や部品上面に印刷された型番など)を含む最小の大きさとし、図6の照明条件Middle(100%)の画像とした。図7は実験に用いたPCB上の探索領域(570×350)および大きさの異なる6つの関心パターンと初期位置決めのためのRPの様子を示す。関心パタンのID付けおよび画素数はそれぞれP1:100×100, P2:80×80, P3:50×70, P4:65×40, P5:30×65, P6:45×30とし、切出された関心パターンを図8に示す。図9は戦略2($u_1 = 25 \times 25$ (#1))および戦略3(大きさの降順(ii))に従った絞込み探索の

Table 2 Search time of plan 2 and 3 Unit: ms

AO(i)	P6	P5	P4	P3	P2	P1	Total
(#1)	4.36	2.74	2.01	1.48	1.76	1.43	13.78
(#2)	1.75	1.00	0.83	0.45	0.89	0.52	5.43
(#3)	0.60	0.28	0.41	0.16	0.32	0.50	2.26

DO(ii)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Total
(#1)	38.80	13.54	5.15	4.68	2.63	1.70	66.49
(#2)	13.59	4.52	2.12	1.97	1.03	0.66	23.89
(#3)	4.92	1.80	0.87	0.80	0.35	0.22	8.97

AO: Ascending order in size

DO: Descending order in size

Table 3 Search time of plan 1 Unit: ms

(iii)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Total
(#1)	4.29	6.98	10.38	11.50	22.02	34.92	90.10
(#2)	1.51	2.45	3.66	3.94	8.29	13.43	33.28
(#3)	0.58	0.98	1.32	1.45	2.94	4.85	12.12

結果を示し、実物の対象画像に対しても提案手法によって照合が可能であることを示した。6つの関心パタンの探索結果は位置精度としてx方向に±1画素、y方向に±1画素の誤差で検出し、探索時間は66.49ミリ秒(表2(ii)・(#1))となった。

効率化の挙動を比較するために探索領域 u_1 を 25×25 (#1), 15×15 (#2), 9×9 (#3)として探索の実験を行った。戦略2および3(大きさの昇順(i)と降順(ii))の探索時間を表2に、戦略1のみ(iii)の探索時間を表3に示す。戦略2の探索順序の違いによる比較では、すべての u_1 の大きさにおいて探索順序が昇順である(i)の方が短い時間で探索することができた。戦略1と戦略2および3の比較では、(#1)において(iii)の探索時間は90.10ミリ秒、(i)では13.78ミリ秒となり6.54倍の効率化となり、同様に(#2)の(iii)は33.28ミリ秒、(i)は5.43ミリ秒で6.13倍、(#3)の(iii)は12.12ミリ秒、(i)は2.26ミリ秒で5.36倍の効率化となった。また、(ii)と(i)においても約1.4倍(#1~3)の効率化となった。本検証においては順序依存絞込み探索の有用性が確認できた。

4. 結 言

本研究では、設計上の位置が予め既知の工業製品における位置決めに対して信頼性を維持しつつ高速に探索を行うための手法を検討した。そして複数の関心パターン間の相対位置の固有性による探索位置の決定手法とパタンの画素数による探索領域を狭めていく手法に基づき、対象物を探索する際に探索順序が進むに連れ探索の効率化が進む「順序依存絞込み探索」による高速化の手法を提案しその効果を検証した。本研究の検証においては照合法に方向符号照合法(OCM)を利用したが、本提案は探索領域を戦略に基づいて狭める手法なので照合法に依存することなく適用することができる。よって、製品の生産ラインでの加工や検査の工程での画像による位置決めに対して広く応用できるのではないと思われる。

また、この高速化手法による探索アルゴリズムを用いて、実製品であるPCBについてPCB上に配置された電子部品の照合実験を行った。実験の結果として、照合精度を保ちつつ、大幅な処理時間の削減が実現できた。

この提案手法の応用例として PCB のランド形状の検査, ランドやビアの位置計測, 部品実装後の部品違い検査などへ適用されることに期待する.

謝 辞

本研究の実験に際して協力を頂いた北海道大学工学部学生及川貴司さんに感謝し, また貴重な助言を頂いた同情報科学研究院准教授田中孝之博士に感謝する.

参 考 文 献

- 1) 橋本学, 棚沢信, 中川泰夫: 生産システム分野における画像応用の現状と期待, 精密工学会誌 **75**, 2 (2009) 225.
- 2) 石井 明: 画像応用検査・計測技術の展望, 精密工学会誌 **61**, 5 (1995) 603.
- 3) 奥田晴久, 橋本 学, 鷺見和彦, 佐々木和則: 部分テンプレート組み

合わせ最適化に基づくロバスト画像照合, 電学論誌(C), **124**, 3 (2004) 629.

- 4) 池田 光二, 吉田 昌司, 中島 啓介, 浜田 長晴, 依田 晴夫: 正規化相関演算の単調関数化による高速テンプレートマッチング, 信学論, **J83-D-II**(9), (2000) 1861.
- 5) 石丸光宏, 佐藤誠: 画像特徴を考慮した適応型方向符号ピラミッド探索処理, 画像電子学会誌, **43**, 1 (2014) 13.
- 6) L.G.Brown, A survey of image registration techniques, ACM Com. Surv., **24**, 4 (1992) 325.
- 7) M. B. Hisham, S. N. Yaakob, Raof R. A. A, A. B A. Nazren, N.M.Wafi, "Template Matching Using Sum of Squared Difference and Normalized Cross Correlation", 2015 IEEE student conference on research and development (SCORED), (2001) 100.
- 8) F. Ullah, S. Kaneko, and S. Igarashi: "Orientation Code Matching for Robust Object Search", IEICE transactions on information and systems **E84-D**, 8, (2001) 999.
- 9) D. Lee, J. Villasenor, W. Luk, and P. Leong. "A hardware Gaussian noise generator using the box-muller method and its error analysis." IEEE Transactions on Computers, **55**, 6 (2006) 659.
- 10) <https://hce-lab.net/cloud/index.php/s/SZ5riY2g4GdF5e>