



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	画像検査を志向した関心パタンの探索順序戦略の立案およびその効率的活用に関する研究
Author(s)	浅野, 裕一
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15217号
Issue Date	2022-09-26
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k15217
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/87174
Type	doctoral thesis
File Information	Hirokazu_Asano.pdf



博士論文

画像検査を志向した関心パタンの探索順序戦略の立案
およびその効率的活用に関する研究

Research of planning based on ordered search strategy
for feature patterns and its efficient application

浅野 裕一

2022年9月

北海道大学大学院情報科学研究科
システム情報科学専攻

本論文は北海道大学大学院情報科学研究科に
博士（工学）授与の要件として提出した博士論文である。

浅野 裕一

審査委員： 主査 田中 孝之 教授
副査 小野里 雅彦 教授
金井 理 教授

概要

本研究は産業応用における画像処理の照合課題について、実際の現場で稼働している自動検査装置での様々な運用条件に対応できるように配慮し探索順序に拘束されることなく領域の位置と大きさを適切に決定することにより、その効率化と信頼性の向上を目的とするものである。

現在の産業界の製造現場が抱える種々の問題、1) 労働者不足と技能工（匠工）が持つ技術を若手作業員（新工）に伝承することの難しさ、2) そこに起因する生産技術が抱える工場運営上の課題、3) 工程内検査での目視検査とヒューマンエラー、4) 自動検査機を開発するときの重要な点、5) 本論文で検証に用いた PCB に搭載される電子部品の小型化に伴う検査の難しさと組立不良についてどのようなものがあるかを例示する。

これらの内容を踏まえて本研究に着手するに至った経緯と従来の照合問題における探索領域の決定手法を中心に、現場で運用される画像検査装置にはどのようなシステム構成によって運用されているのかについて解説し、本研究で提案する内容である定式化された探索領域の決定に対する必要性について説明する。またその運用のされ方の例として金属加工後の検査と PCB に搭載された電子部品の検査について具体的な例を示し、検査以外で画像による位置決めについてロボットをアシストするビジュアルサーボについて示す。

画像検査および位置決めでは照合アルゴリズムについてこれまでにどのようなものが研究開発されどのように用いられているか、それを踏まえて任意の順序において照合アルゴリズムに依存することなく探索の効率化と信頼性の向上を実現するためにはどのようにすればよいかという課題を示す。また本研究を遂行するにあたり参考とする先行研究について動画像処理と静止画像処理の観点から調査した内容を示す。

第 1 の提案手法は「順序依存絞込み探索による関心パタンの効率的探索」として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者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。具体的には、設計上既知である複数の関心パタンの位置ベクトルを用い直前に照合した位置からベクトルで示された位置において、本研究で提案した関心パタンの面積に着目した独自のアルゴリズムにしたがって探索領域の大きさを求める手法を提案する。またこの手法を検証するために、PCB に搭載された電子部品の照合問題について本手法を用

いた探索を行い効率化と信頼性を検証するための照合アルゴリズムとして **OCM** を用いて評価を行う。

第 2 の提案手法は「論理和型および信頼区間型の探索領域拡張による複数関心パタンの順序探索」として、任意の探索順序という制約下において探索領域を効率的に設定する拘束条件を導入し、剛体のような関心パターンを対象とする相対位置にゆらぎをもつ照合課題に利用可能な処理を提案する。提案手法は特定のアルゴリズムに付随する処理ではなく、探索領域を決めるためのものとして独立した処理を目指している。具体的な手法について、先行探索の照合位置に基づいて以降の探索領域の位置と大きさを論理和によって求め照合を行い失敗したときには探索順序の最後に繰り下げてリトライを行うアルゴリズムを提案する。このときの初期探索領域を決定する手法については信頼区間という手法を用いている。この手法を検証するために第 1 の提案で用いたものと同じ **PCB** を使用し照合アルゴリズムに **SAD** と **NCC** を適用して検証を行い評価する。

上記 2 つの提案手法について研究を遂行する過程で得られた知識・技術を整理するとともに遂行しながら気が付いたことおよび今後の研究課題についてまとめる。CPU の演算能力の変遷や先行研究の考察、本研究で提案したアルゴリズムについて他の照合アルゴリズムへの対応、例えば **OpenCV** や商用画像処理アルゴリズムなどへ適用についてその可能性について考察する。また静止画像だけではなく動画への応用や、研究の過程で類似度マップから最大のマージンを確保した探索領域を生成することによって信頼性向上に寄与すると思われる手法について述べる。

最後に本研究の結論としての成果を示し、この手法が応用されることを期待するアプリケーションについて述べる。

目 次

第 1 章 序 論	1
1.1 生産技術の今.....	1
1.2 目視検査とヒューマンエラー	2
1.3 自動設備に求められるもの.....	5
1.4 PCB における順序と部品探索.....	6
1.4.1 部品検査の困難さ	6
1.4.2 PCB の不良項目	7
1.4.3 PCB の部品実装	10
1.4.4 PCB の部品探索	12
第 2 章 研究の背景	15
2.1 現場の画像処理.....	15
2.1.1 画像検査.....	15
2.1.2 加工穴のバリ検査.....	17
2.1.3 PCB の部品検査	17
2.1.4 製品検査.....	19
2.1.5 ロボットアシスト.....	19
2.2 現場の IoT	19
2.2.1 トレーサビリティ	20
2.2.2 画像検査の設定.....	21
2.2.3 本研究が目指すところ.....	22
2.3 探索の順序	24
2.3.1 順序依存絞込み探索	24
2.3.2 探索領域拡張による複数関心パタンの順序探索.....	26
2.4 照合アルゴリズム	26
2.5 先行研究.....	27
第 3 章 順序依存絞込み探索による関心パタンの効率的探索.....	31
3.1 順序依存絞込み探索.....	32
3.1.1 順序依存絞込み探索の概要	32
3.1.2 初期位置決め	33
3.1.3 探索順序立案のための戦略	34
3.1.4 モンドリアンランダム画像による検証.....	37

3.2	実画像による実験	38
3.3	ま と め	42
第 4 章	論理和型および信頼区間型の探索領域拡張による複数関心パタンの順序探索	44
4.1	信頼性と探索領域	44
4.1.1	画像照合の信頼性	44
4.1.2	位置ずれの問題	45
4.1.3	探索領域設定のための基本戦略	45
4.2	探索領域の決定	47
4.2.1	基本相対位置の利用	47
4.2.2	予測位置ずれ量	48
4.2.3	基本探索領域の大きさ	48
4.2.4	探索領域の拡張	49
4.2.5	論理和型拡張	49
4.2.6	信頼区間型拡張	51
4.2.7	複合型拡張	52
4.3	PCB による検証実験	52
4.3.1	実験 1, 固定探索領域	55
4.3.2	実験 2, 論理和型拡張	56
4.3.3	実験 3, 信頼区間型拡張	58
4.3.4	実験 4, 複合型拡張	59
4.3.5	実験の評価	61
4.4	考 察	63
4.4.1	照合判定	63
4.4.2	先行探索の参照数	65
4.4.3	論理和領域の外接矩形	65
4.4.4	多段試行の倍数 N の扱い	65
4.4.5	他の照合アルゴリズム	67
4.5	ま と め	67
第 5 章	研究のまとめ	69
5.1	研究より得られたこと	69
5.1.1	CPU パワーと探索の効率化・信頼性	69
5.1.2	見当たらない先行研究	70
5.1.3	研究に用いた検証用としての PCB	71

5.2	適用できる探索アルゴリズムの拡張.....	71
5.2.1	他の照合アルゴリズムへの適用.....	72
5.2.2	商用マシンビジョンライブラリへの適用.....	72
5.3	本研究の応用と発展.....	72
5.3.1	動画像への適用.....	73
5.3.2	対象パタンの誤検出可能性の検討方法.....	73
5.3.3	類似度分布による探索領域の推定.....	74
5.3.4	簡易推定存在領域の決定.....	75
5.3.5	他の対象物への応用.....	76
5.3.6	信頼区間の算定の自動化.....	78
第 6 章	結 論.....	80
	謝辞.....	82
	参考文献.....	84

目 次

図 1-1	現場の作業分掌	3
図 1-2	チップ部品の大きさのバリエーション	7
図 1-3	方向間違い	8
図 1-4	チップ立ち	9
図 1-5	挿入機の例	10
図 1-6	回路基板の例	11
図 1-7	マウンタの例	11
図 1-8	部品が大きい順	12
図 1-9	左上からスキャン順	13
図 1-10	基準から近い順	14
図 2-1	精密穴加工の位置決めとバリ検査	17
図 2-2	PCB の部品検査	18
図 2-3	PCB 組立検査	18
図 2-4	ロボット位置決めサポート	20
図 2-5	大きく設定した探索領域と最適な設定における近傍の類似パタンの例	23
図 2-6	順序依存絞込み探索の概要	25
図 2-8	支障がない回転の関心パターン	28
図 2-7	固定探索領域による探索	28
図 2-9	レジストレーションマークによる位置補正	29
図 2-10	回転を考慮した関心パターンと探索領域のマスク	30
図 3-1	順序依存絞込み探索の概略	31
図 3-2	順序依存絞込み探索の詳細	33
図 3-3	探索のフローチャート	36
図 3-4	モンドリアンランダム画像と選択したパターン領域	37
図 3-5	選択された関心パターン	37
図 3-6	PCB の明度の違い	39
図 3-7	対象画像と関心パターンを選択した領域	40
図 3-8	関心パターン	40
図 3-9	照合結果 (戦略 3 : 大きさの降順)	41
図 4-1	先行探索の結果に基づく順次探索の概略	46
図 4-2	多段試行による探索のフローチャート	47

図 4-3	基本的な探索領域.....	49
図 4-4	単純な矩形としての論理和型探索領域.....	50
図 4-5	対象画像と選択された関心パタンの領域.....	53
図 4-6	選択された関心パターン.....	53
図 4-7	LOOCV 法の概念図.....	54
図 4-8	先行探索によるベクトルと各照合結果と論理和型探索領域.....	57
図 4-9	全ての照合結果.....	57
図 4-10	探索領域が拡大される様子.....	58
図 4-11	論理和と信頼区間型による探索領域拡大の遷移.....	61
図 4-12	8 近傍検討の類似度分布.....	62
図 4-13	論理和による探索領域かが拡大される例.....	63
図 4-14	実験 3 (信頼区間型) と実験 4 (複合型) 探索結果.....	64
図 4-15	論理和型と信頼区間型による探索領域拡大の遷移.....	66
図 5-1	関心パターンと対象・疑似パターンによる類似度マップ.....	74
図 5-2	類似度プロファイルによるパタンの推定存在領域.....	75
図 5-3	探索領域の 4 隅.....	76
図 5-4	類似度マップによる簡易探索領域.....	77
図 5-5	切削加工部品に論理和型の適用例.....	77
図 5-6	信頼区間算定自動化のためのフローチャート.....	78

表 目 次

表 1-1	ヒューマンエラーの分類と特性.....	3
表 1-2	匠工と新工の違い.....	4
表 2-1	部品シリアル番号有無による工程の違い.....	21
表 3-1	ランダム順での探索時間.....	38
表 3-2	戦略 2 と 3 の探索時間.....	41
表 3-3	戦略 1 の探索時間.....	42
表 4-1	各パタン位置の標準偏差.....	54
表 4-2	x と y の 2 乗和の標準偏差.....	54
表 4-3	実験 1 の照合結果 (固定探索領域).....	55
表 4-4	実験 2 の照合結果 (論理和型探索領域).....	56
表 4-5	実験 3 の照合結果 (信頼区間型).....	59
表 4-6	実験 4 の照合結果 (複合型).....	60
表 4-7	照合結果のまとめ.....	67
表 4-8	SAD と NCC による照合結果の比較.....	68
表 5-1	筆者の画像システム開発用 PC の歴史 (太字は現在も保有).....	70

第1章 序 論

製品の生産現場では製品を「より高機能なものをより安く」ユーザに提供するために他社製品との差別化を図り製品の競争力を高めるよう日々努力を重ねている。製品製造でのコストは大きく部材費と製造工数の積算であり双方を削減することにより企業収益を向上する必要がある。これらを実現するために、設計担当者は従来の設計から部品の形状や構造および材質を見直して部材費の低減と作業工数削減に対して製造の自動化に対応するための改善を行い、生産技術担当者は製造プロセスの自動化および高速化を進めて高機能高品質な製品を少ない工数で生産することによって全体の生産能力を向上させるとともにコスト削減に尽力し、会社として製品の競争力を高める努力をしている。

本研究では生産現場で運用される画像処理システムに組み込まれている対象物の照合という課題に関するものとし、部品の小型化が進み目視での検査が難しくなっている PCB に搭載された電子部品の照合について探索領域を適切に設定する手法の提案と検証を行う。領域の位置と大きさを適切に設定することにより効率化と信頼性向上を目指しつつ現場技術者でも容易に設定し運用できる手法の開発を目指す。

1.1 生産技術の今

以前の生産現場での「ものづくり」においては匠と呼ばれる多くの経験と技術をもつ技能工によって支えられ、彼ら元で若手の工員が指導を受けながら作業を行い匠の技術が代々受け継がれるような体制による生産方法が伝統的に行われてきた。このような人材育成のサイクルが継続することによって技術が伝承されて若手が匠に成長して次世代に伝えられてきた。しかし近年ではこのサイクルがうまく回らなくなってきてしまった[1]。

総務省が公表する日本の人口構成は年々出生率が下がったことにより若年層が少なく、平均寿命が高く高齢者が多くなっているという少子高齢化が進んでいることが顕著になっているということが報道されている。これと同様に生産現場においても若手労働者が少なく高齢者が多いという現象が進んでおり、さらにニュースなどでも報じられているように若者が実際のものづくりの現場と言われる製造業に就職を希望する人が少なく、情報科学（例えば AI や IT のソフトウェア開発）などを用いた応用システムの開発する業界を好むような傾向が見られるようになってきている[2]。これに現場作業員の高齢化が拍車をかけたことによって、技能工が持つ匠の技術を若手に伝承するこ

とを一層難しくしている。これらのことは製造現場だけでなく生産をサポートする生産技術においても顕著に表れて大きな課題となっており、従来であれば豊富な経験を持つ技能工による知恵や知識、経験に基づいて解決策を模索したり改善したりすることが容易であった課題が新規に生産する製品の初期立ち上げのときや日々の製造現場で発生する課題や問題点について、容易に解決することも難しくなっている。また日本社会全体としてサラリーマンの意識の変化によるものとして労働環境が旧来の終身雇用と年功序列によるものから成果主義に移行したこととワーク・ライフ・バランスを重視するようになって労働移動[3]が進むとともに、若年層ではさらに仕事より生活を重視する傾向が高く高収入で自分に興味がある会社にジョブホッピング[4] [5]を繰り返すために会社としては従業員の定着率が悪く技術伝承をさらに困難にしている[6]。

日本の工場では生産に関わる人件費を抑制するために安価な労働力を求めて 1990 年台から人件費の安い海外、特に中国への進出を推進し生産に関わる人件費の削減を進めてきた[7]。しかし近年の中国での目覚ましい経済成長に伴い人件費が高くなってきたところに米国が中国に対する経済制裁が発動した。さらに 2020 年からのコロナショック (COVID-19) により海外では大規模なロックダウンが実施され人流が制限されたことにより以前のように安定した生産数量を確保することが難しくなると同時に資材輸送も滞るようになってしまった[8]。また人件費だけでなく原材料費の高騰も相まって海外生産に対する実質的な不安定要素と心理的な不安要因および物資不足による取引の不安定さも相まって現地工場の縮小や撤退が進んでいると同時に、日本国政府も製造業の国内回帰を推進している[9][10]。よって海外に依存していた生産現場を日本国内へ回帰させるような対処が進んでいるところであるが、上述のとおり日本の労働力不足と作業員の高齢化によりかつての日本の技術を伝承させることができないという問題に直面している。

1.2 目視検査とヒューマンエラー

匠の技術を持つ作業員（匠工）からの伝承サイクルが回らなくなったため、緻密な作業や目視検査などを経験や知識が豊富でない作業員（新工）にこれらの作業を割り当てざるを得ない状況になっている。匠工は経験によって作業の要領や勘所といった「コツ」を得ており製品の外観検査などでは不良が発生し易いポイントを押さえて作業するため疲労度も少ないとされ[11] [12]、新工はエラーも多く疲労度も高いとされている。生産現場において発生するエラーはヒューマンファクタと呼ばれ組織や設備など周囲の環境における人間側の行動特性ことを示し、エラーという形で顕在化したものをヒューマンエラーと呼ばれている[13][14]。厚生労働省は KY（危険予知）活動によるヒューマンエラーの検証するための資料として、表 1-1(a)に示すようなヒューマンエラーを 12 項目に

表 1-1 ヒューマンエラーの分類と特性

(a) ヒューマンエラーの 12 分類		(b) ヒューマンエラーに至る特性 12 カ条	
1	無知, 未経験, 不慣れ	1	人間だから, 間違える事がある
2	危険軽視, 慣れ	2	人間だから, ツイうっかりがある
3	不注意	3	人間だから, 忘れることがある
4	連絡不足	4	人間だから, 気が付かないことがある
5	集団欠陥	5	人間だから, 不注意の瞬間がある
6	近道・省略行動本能	6	人間だから, 一つしか見えない考えられない
7	場面行動本能	7	人間だから, 先を急ぐことがある
8	パニック	8	人間だから, 感情に走ることがある
9	錯覚	9	人間だから, 思い込みがある
10	中高年の機能低下	10	人間だから, 横着をする時がある
11	疲労等	11	人間だから, 人の見ていないとき違反をする
12	単調作業等による意識低下	12	人間だから, パニックになることがある

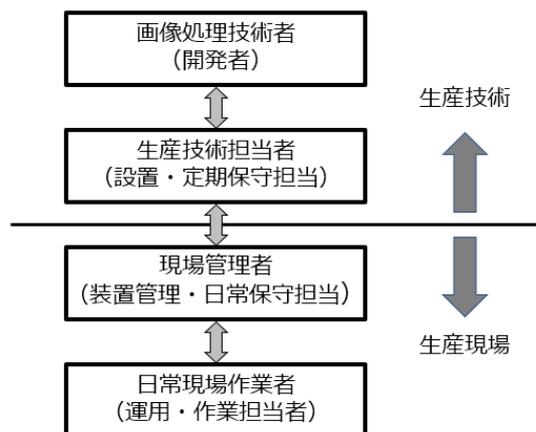


図 1-1 現場の作業分掌

分類[15] [16]して労働災害が発生する要因として注意喚起を行っており、製品製造のエラー回避にも適用されている。この内容は表 1-1(b)のように分かりやすく表現し現場標語にして広く使われている[17]。エラーは現場作業に携わるすべての人員には起こりうる可能性があるものの匠工と新工では表 1-2 のようにその発生要因が異なり、目視検査などでは検査基準が大きく振れて不安定になり検査漏れや過剰検査が発生するなどが懸念される[18]。不安定となる要因は 1) 勤務時間内の時間帯によるエラー、例えば昼食後や終業近くでは眠気や疲労、日々の体調の具合などによって検査レベルの変動、2) 複数人作業では検査能力の差異によって検査レベルにばらつきが生じて

表 1-2 匠工と新工の違い
(参考文献[5]より)

匠工 (熟練者)	新工 (初心者)
<ul style="list-style-type: none"> • 仕事に慣れており、意識せずに遂行できる(行為の自動化)ために、「うっかり」「ぼんやり」「不注意」などを起こしやすい。 • 仕事に慣れているために、行っている作業内容が正しいと信じ、手順書の方が間違っていると思いつく傾向がある。 • 早く作業できるために、手順通りでなく作業の抜けやトビが生じやすい。(その作業をやったかどうか不明確になる) • 仕事に余裕があるために、不必要なことをしてしまう。 	<ul style="list-style-type: none"> • 何が重要なかわからない。(情報の取捨選択ができない、混乱する) • 見通しが少ない。予測の幅が狭い。 • 作業が遅れがちで、円滑性に欠ける。そのため余裕が無く、緊張状態に陥りやすい。 • 外部からの割り込みで全体の作業手順が乱れる。

基準が統一されないことが挙げられる[19].

最近の現場では省力化のために匠工の技術を新工に伝承すると同時に、機械装置に緻密な動作や手法などの所作をアルゴリズムとしてプログラム化して生産し、目視検査の検査基準を数値化して画像処理システムに組み込み品質の安定を図っている。多くのものづくりの現場では図 1-1 に示すような体制で職務が分担され日々各自の作業を遂行しているが、生産現場の作業者が不足していると同時に現場管理者や生産技術担当者も不足しているため生産工程を管理し製品の組立手法から検査内容、不良要因の細部まで熟知し、新製品立ち上げでは新たな生産工程の設計や治工具類の開発など工程管理ができる人員も不足しているため現場サポートをすることも難しくなっている。

近年画像処理システムにおいても人工知能 (AI) や深層学習 (DL) を導入して外観検査を行うものが多くのメーカーより発表され展示会などで多く見られるようになり、セールストークとして「画像処理に対する知識がなくとも、短時間で生産ラインに導入できる」とし、画像処理の知識が全く不要であると宣伝をしている。実際には欠陥などの特徴を明瞭に撮像することができなければいかなるアルゴリズムも処理することは不可能であるので、運用する場面では光学系に対する知識や経験も必要であると思われる。さらに稼働前の作業として多くの良品と不良品の画像を用意してシステムに学習させる必要があるが、実際の現場では生産される製品のほとんどが良品であるため多くの不良品の画像を用意することは難しい。2022年現在、これらを用いた実用的な位置決めなどへ応用は精度が粗く欠陥検査の有無程度のものが大多数を占め、工業用途で必要とされる詳細な物理量、例えば対象物の位置や欠陥の面積・寸法計測などは難しく、正確な情報を必要とするロボットの位置決めサポートするような用途については研究途上である[20][21][22][23].

よって生産現場においての画像処理システムは革新的なアルゴリズムより古典的なアルゴリズムを採用する方が、1) 計測検査した結果が数値として明確に示すことができるので検査精度が安

定し、2) 信頼性の高いシステムを構築することができるので好まれている。また、現場もアルゴリズムの内容を理解している方式を採用することにより安心感の高いシステムが構築でき扱いやすいものとなっている。しかし、現場には画像処理の特長を理解している作業員が不足しているが新工への教育も困難であるために、画像処理技術者は現場で容易に扱うことができるような手法を組み込んで、知識の浅い作業員でも運用できるようにシステム構築する必要がある。

1.3 自動設備に求められるもの

生産現場では技能工による匠の技とその伝承による人材の確保と育成が期待できなくなった現在、超小型・高密度化された製品の製造作業に対してロボットとマシンビジョンを組み合わせた装置による自動組立や検査装置の導入が推し進められている[24]。このような装置における開発では製品や部品の特性を良く知った上で、限定された把持位置でのハンドリングという課題について、最適な把持フィンガの形状や材質の選定、移載のためのアクチュエータ選定、駆動モーション検討など多くの事柄に対しての経験と技術が必要となる[25]。また、装置の設置・運用では装置の可動部分と作業員の衝突による労働災害を防止するための安全装置の設計や安全区画の設定、作業員に対する安全教育と運用手順の指導などに多くの手間がかかるものであったため大手企業での導入が主であった。しかし、安全区画を設ける必要がなく作業員のすぐ隣で運用できる人協働ロボット[26]に対する規格が国際標準化機構（ISO）によって制定されたことを受けて日本産業規格（JIS）もこれらを含んだ規格[27][28]を定めるとともに、厚生労働省も労働安全衛生規則の一部を改正[29]し日本ロボット工業会などの関連団体に改正内容の詳細が通知[30]された。これらにより人協働ロボットを現場で運用するための下地が整い多くのメーカーからリリースされたことにより、装置開発のための機材を容易に入手することができるようになったことで生産現場に導入される事例[31]が増えてきた。さらにこれらをサポートするマシンビジョン装置では必要機材であるカメラの高画素化が進み演算用コンピュータの性能も大きく向上すると同時にこれら高性能な機材が入手しやすい価格になったことにより、位置決めや製品の外観検査などの工程にマシンビジョンが適用するときのハードルが下がってきた[32]。よって自動化された生産装置や検査装置にはマシンビジョンが搭載される例が多くなってきた。しかしながら、生産現場を管理する生産技術の技術者にも経験豊かな人材が不足しており、日々の生産状態を監視しつつ製品の品質を維持するため、あるいは装置の保守点検と管理する人材が十分でなく、現場で起こる日常の問題に対して即時に対応することが難しくなっている。

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

が重要であり、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ということが求められる[33]。マシンビジョンによる検査の手順では検査に要する時間を短縮するとともにその精度を向上させるために、1) 検査対象の位置を探索操作によって正確に同定し検査範囲を限定して、2) 指定された範囲内の画像についてのみ検査を実行するように2ステップで実行されることが多い。したがって生産タクト時間内に収めるために検査対象の位置探索を短時間で処理することが必要になり検査時間を十分に確保することが重要となった。

本論文においては、工業製品の生産自動化や品質検査を高度化するための基本技術の1つとなる画像計測技術を扱う。特に、微細部品などの位置決めや検査を高い信頼性を維持しながら効率的に実施するため、画像照合に基づくパタンの探索問題を対象とし、これを関心パターンと呼ぶ。実際の製造現場では微細部品の増加に伴って、高精度化かつ高信頼性を有する自動機や生産設備の要求が高まるとともにこれを実現するためのマシンビジョン用機材も入手しやすくなったことによって、微細部品の組立や外観検査などの工程に導入が進んできている[34] [35]。このためのマシンビジョンの諸機能に対しても同様の要求がある。本論文においてはこの中で特に画像探索問題を解決するための照合技術を扱う。

1.4 PCB における順序と部品探索

1.4.1 部品検査の困難さ

1979年ソニーからリリースされた“SONY Walkman”の登場以来ユーザはポケットに入れて容易に持ち運びできるポータブルな機器が好まれるようになり、さらに「小型軽量で高機能・多機能」なもの（例えばコンパクトデジタルカメラや小型音楽プレーヤ）が好まれるようになってきた。製造メーカーはこれに応えるように製品の機能を充実させることによって電子回路規模が大きくなり搭載部品数も増えてしまったことを打ち消すように機械部品や電子部品を超小型なものにするとともに部品を高精度かつ高密度に搭載することによって実現してきた。電子部品メーカーは製造メーカーの要求にしたがって図1-2に示すように部品サイズを世代ごとに小さくして対応してきたもの[36]、目視では検査できないほど小さくなったため（現在の抵抗・コンデンサ類の実用最小サイズは $0.2 \times 0.1 \text{ mm}$ ）検査はルーペなどを使って拡大しない限りほぼ不可能な状態になっている。よって実装後のPCBの品質検査は画像処理システムを搭載した自動機による検査システムが不可欠なものになってきている。

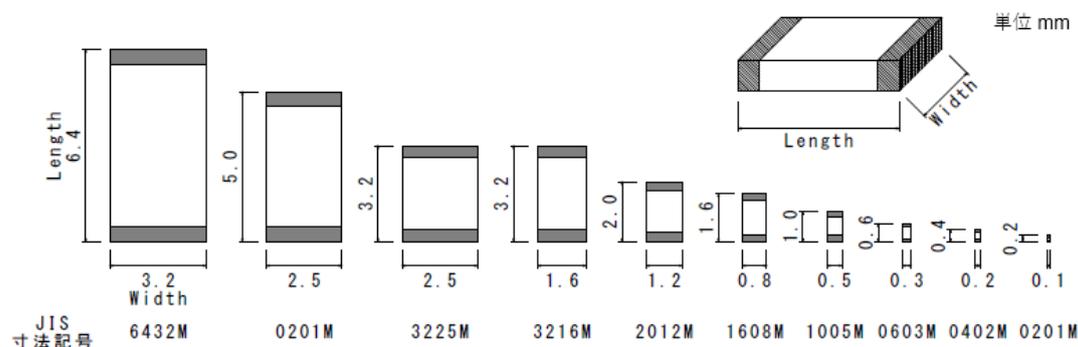


図 1-2 チップ部品の大さのバリエーション

1.4.2 PCB の不良項目

基板に搭載される電子部品に対する実装における不良にはいろいろなものが見られ、現場ではこれらの不良を撲滅するために日々努力をしているものの一部の作業では人手に頼らざるを得ない部分があり、人の手が介在している以上皆無にすることは難しい。特に基板実装では一度にセットされる部材が多く（チップ抵抗・コンデンサなどは1 リールあたり 1000~5000 個）一つの部品間違えが1 回の生産ロット（単位）全体に波及してしまうこと懸念される。このため、組立後早期に発見することが求められるためインラインの検査機が導入され、検査に許容できる時間は実装組立のタクトに合わせる必要がある。

<実装機の作業手順>

実装機では自動組立作業における装置を運転する手順は、1) 基板をスタッカにセット、2) 電子部品など搭載する部材が収納されたマガジンをセット、あるいはトレイ供給の場合はトレイをスタッカにセット、3) 組立プログラムの選択（事前にセットアップされているものを読み込む）、4) 組立作業開始、という単純な作業順序で進められ電子部品や装置に知識のない作業員でも運用できるようになっている。

次に実装不良の代表的な例を挙げて説明する[37].

<欠品>

実装機は直交ロボット先端のエンドエフェクタの吸着ヘッドや把持ヘッドによって部品を取り出し位置でピックアップして基板上の所定の位置に実装する。この一連の流れの中で吸着ミスや把

持ミス、あるいは吸着の圧抜けによる移動中の落下などで所定の位置に達したときに部品が欠落してしまい実装されない場合がある。主な原因としては、部品の変形などによる吸着ミス、吸着ヘッド先端のノズルの劣化による圧抜けや把持ヘッドのフィンガの摩耗によって正確に把持できないなどがある。

<部品違い>

実装機による部品実装では部品違いによる不良については稀に発生し、原因は人為的ミスによるものである。作業手順2)においてマガジンをセットするとき、人為的なポカミスを防ぐためにマガジンにはバーコードやQRコードが印刷されたラベルが貼付されておりここに記載されたデータを装置に付属されたリーダーで読み込んでからセットするように構成しヒューマンエラーを排除している。しかし、部品をマガジンにセットするのは人手であるためそのときにエラーが起こる可能性がある。部品はメーカーからリールあるいはスティック、トレイ形態で納入された部品をそのままの状態でもマガジンに組み込んでから実装機にセットするので、このときリールを取り間違えて別の部品をセットしてしまった場合には、そのまま実装されるため間違った部品が搭載されてしまう。

<方向間違い>

実装機による部品実装では方向違いによる不良についても稀に発生して原因は人為的ミスによるものである。上述のとおり同一部品を使用しメーカーから納入されそのままの状態でも実装機専用のマガジンをセットし実装機にセットするときには、部品はメーカーからの納入仕様書に基づいて部品の方向が定められているため問題は起こらない。しかしながら汎用部品、例えば電解コンデンサやダイオード、ロジック IC などでは複数のメーカーから同一規格のものが複数のメーカーから供給されている場合があり、部品単価や供給状態などの市場状況に応じて代替品を使用する場合も

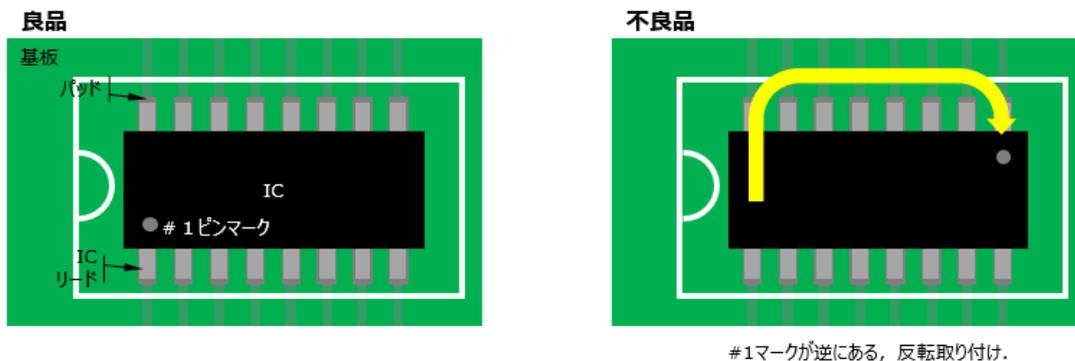


図 1-3 方向間違い

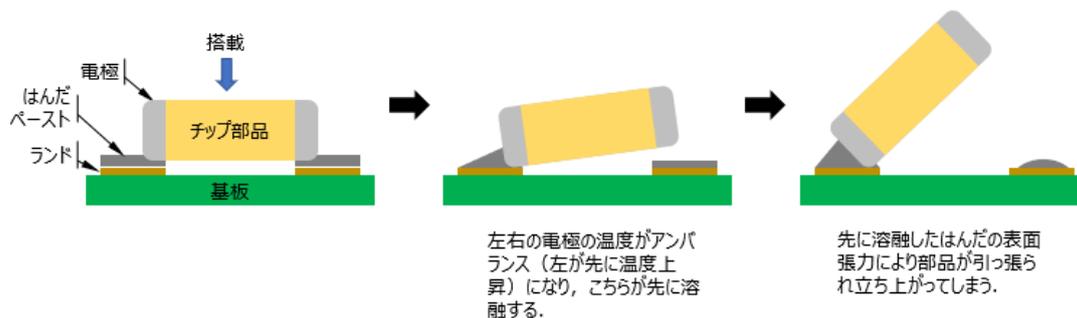


図 1-4 チップ立ち

ある。このときメーカーによってリールなどにセットされている部品の向きが異なる場合があり、実装機を運用する作業員が方向違いを知らずにセットしてしまった場合、図 1-3 のように部品の向きが反転された状態で実装されてしまうことがある。

別の例ではメーカーから供給される部品がリールなどではなくバルク供給される場合があり、このままでは実装機に投入できないので、事前にテーピング装置でリール形態に再梱包してからマガジンにセットする場合がある。このときに部品の方向を間違ってしまった場合に方向違いが起こることがある。

<チップ立ち>

部品を実装機で所定の位置に配置しはんだリフロー炉を通したとき、図 1-4 のように部品が立ち上がってしまう現象のことであり[38]，“マンハッタン現象（マンハッタンの高層ビル群に見立てて）”あるいは“ツームストーン現象（墓石が立っているように見えるから）”とも言われている。面実装部品を搭載する基板の組立工程では、部品実装前の工程としてパターン生成後の生基板にはんだの金属粉末と松やになどのフラックスを混合したクリーム状のはんだペーストをスクリーン印刷で所定の位置に印刷したものに部品を実装する。その後リフロー炉で基板全体に熱を加えてはんだを溶解して基板上の銅箔回路と電子部品を接合する。この過程において、実装機からリフロー炉への移動にコンベアが用いられており、移動時の連続した微振動が基板に伝わりはんだペーストから部品が浮き上がったり、リフローの熱で溶解したはんだペーストに生じる表面張力によって溶けたはんだが玉状になり搭載した部品が引き込まれてしまったりすることが原因である。

この現象は前述の通り部品の大きさが一層小さくなってきたため起こりやすい[39]と言われている。この不良を防ぐための対処方法として部品を実装する基板面に接着剤を滴下したのちに実装し部品が固定[40]された状態でリフローする手法も取られているが、この作業のために 1 工程増えるために生産コストが上昇する一因にもなっている、



図 1-5 挿入機の例
株式会社 FUJI, モジュール型汎用自動組立機 sFAB-SH カタログより

1.4.3 PCB の部品実装

<リード部品>

電子部品の実装に用いられる実装機では空走距離を短くして時間を短縮するとともに NC (Numerical Control) 装置として運用するため機械的位置決め精度が高い $XYZ\theta$ 軸をもつ直交ロボットが使用される。図 1-5(a) に市販されている実装機[41]の外観と図 1-5(b) にロボットのエンドエフェクタとして装備されている部品を把持するハンドの様子を示す。ハンドには取り付けられた部品を把持するフィンガや吸着パッドの大きさについては小型化することが可能であるが、モータや空圧によって駆動するアクチュエータ部分を小さくすることは難しい。

このために部品を実装する付近の上空にはハンドがアクセスするための空間が必要となり、対象部品の周辺に実装される他の部品の取り付け位置や大きさによって順序を考慮しなければならない。図 1-6 にリード部品の実装の例を示す。この例では電解コンデンサと抵抗を実装するときの順序として、高さのある電解コンデンサを先に抵抗を後に実装するとハンドが機械的に干渉して抵抗が実装できなくなってしまうため、抵抗を先に行いコンデンサを後に実装するという順序を考慮する必要がある。

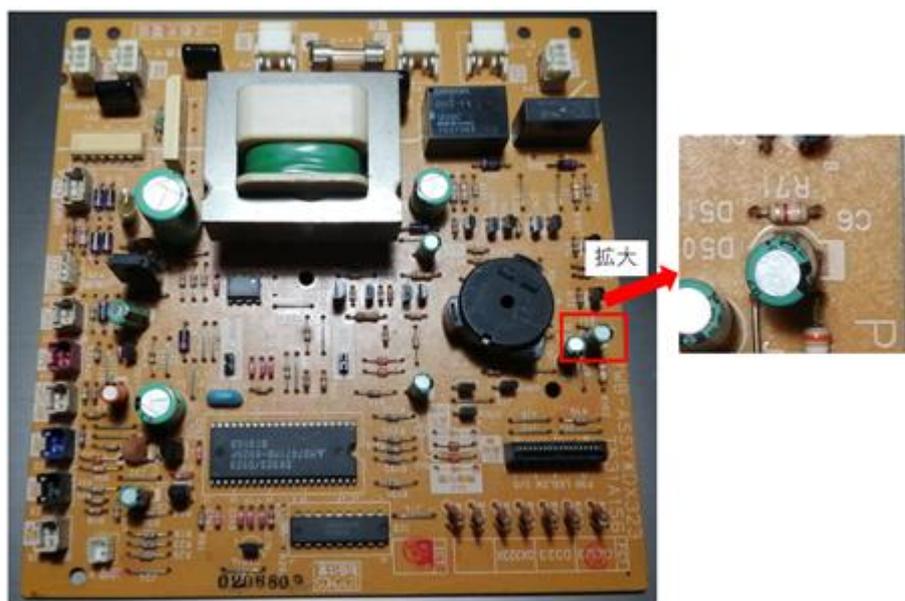


図 1-6 回路基板の例



(a) 電子部品実装ロボット

(b) ロータリヘッド

図 1-7 マウンタの例
株式会社 FUJI, 電子部品実装ロボット 実装機 NXT III カタログより

<SMD 部品>

SMD (Surface mount device) を PCB に実装するときは図 1-7(a) のようなマウンタ[42]によっ

て部品が配置されマウンタのロボットにはロータリヘッド図 1-7(b) が装着されている。ヘッドには一度に多数の部品をピックアップでき部品供給部と実装部の間を往復する回数（空走時間）を少なくするようなシステムになっている。よって一度にピックアップした複数部品を配置するときその範囲を狭くすることによって部品ごとの空走時間を短くして効率を上げている。

1.4.4 PCB の部品探索

PCB に搭載された部品の探索順序について、一般的に現場で設定されている順序について筆者の経験を含めていくつか例を上げる。下記の図 1-7~10 の ■ の大きさは部品の大きさを示し位置は同じとする。青矢印と丸数字は探索順序を示す。

<部品が大きい順>

図 1-8 のように部品の大きさが大きい順に進められる。一般的に部品の大きさが大きいということ、つまり関心パタンの大きさが大きい方がパターン内の特徴が豊富であるということに起因する。正規化相関を用いた場合、大型の IC の上面のように型番などが記されている以外は特徴のある模様がない場合でもその模様がないということが有効に機能するためと思われる。

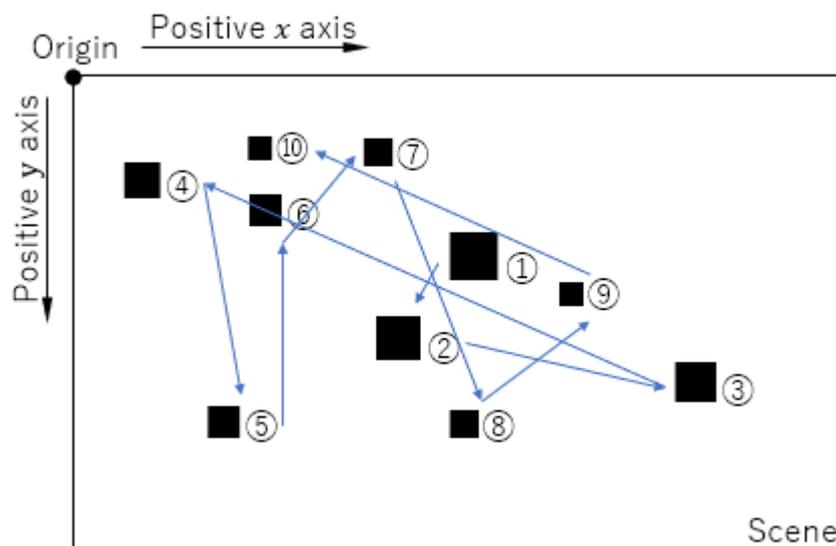


図 1-8 部品が大きい順

<左上からスキャン>

図1-9のように画像の左上から右に進めて右端まで到達したら左端に戻る方法である。この理由については分からないものの、一般的に画像処理の原点が左上にあるため、あるいは“Zの法則”，“Fの法則” [43]と言われる人の視線移動の法則によるものではないかと推測される。

<基準点から距離が近い順>

画像上の基準点から距離の近い順に探索する方法である。基準点は図1-10(a)のように画像の上としたり図1-10(b)のようにあらかじめ設置されたレジストレーションマークなどの基準となる位置としたりする場合がある。

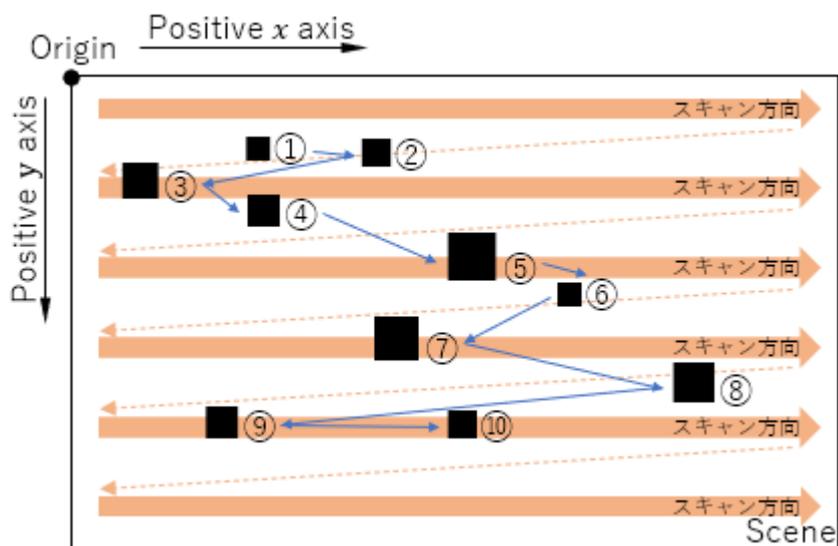
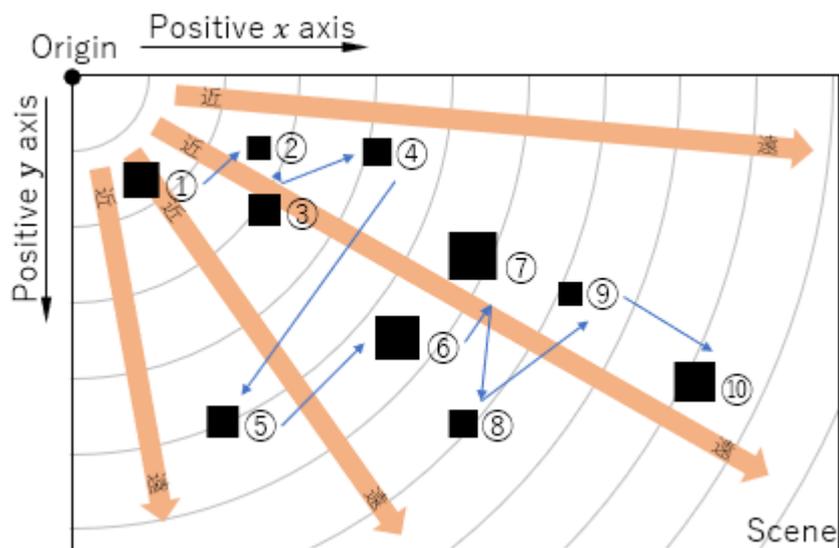
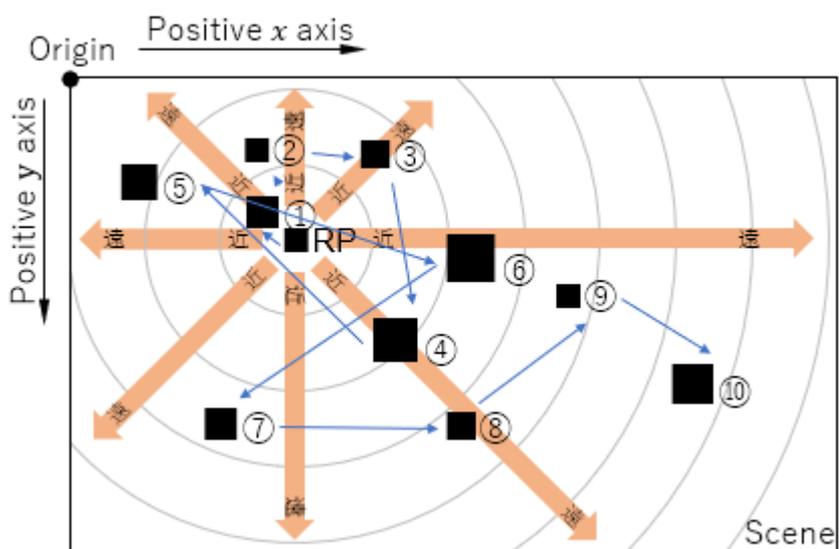


図 1-9 左上からスキャン順



(a) 左上基準



(b) 基準点 (RP) 基準

図 1-10 基準から近い順

第 2 章 研究の背景

実際の現場における照合課題の稼働前の初期設定として関心パタンの登録、探索領域の位置と大きさ、照合の閾値などのパラメータを決定し、一般的な運用方法としてそれぞれの設定は固定したものをを用いてその範囲内で探索を行う方法が多く用いられている。探索対象全体に位置ずれがある場合には、あらかじめ設けられているレジストレーションパターンや位置の信頼性の高いパターン、例えば製品を固定するためのねじ穴や PCB の端面などの位置を探索し得られた照合位置から全体の位置に対する座標変換を行って探索領域の位置を補正する方法がとられている。

探索領域の先行研究として動画像における手法としては、自動車や無人搬送車などに取り付けられたカメラから移動先の障害物などを探索するときの領域決定手法や固定カメラにおいて人流などを追跡するような対象物の移動を検出するときに用いる方法などの先行研究は多数あり、静止画像については位置を求める手法に対して研究されたものは多くある。しかしながら探索領域の位置と大きさの決定手法について、産業用途の関心パタンの探索における領域の位置と大きさを直接的あるいは同様の研究動機ともつ先行研究は見当たらなかった。

2.1 現場の画像処理

生産現場における自動機において様々な場面で画像処理システムが搭載され運用されている。これらがどのような用途に使われているかについて述べる。

2.1.1 画像検査

現場で運用される工業用の画像処理システムは大きく 2 通りに分類され、1) 専業メーカー（パナソニック[44]、オムロン[45]など）から一体型としてリリースされ筐体の中に CPU, RAM, ROM などとともにあらかじめ用意された汎用処理ソフトウェア（画像取込、表示、計測ツール、照合ツール、I/O 入出力などの基本的な機能など）が組み込まれており、専用カメラ、照明およびインタフェースも用意されているので、ユーザは計測や検査などの使用方法に合わせてカメラなどの機材を選択してシステム構築するもの、2) Windows や LINUX などの OS を搭載した汎用 PC をベースにし開発者自らがカメラなどの光学機器や画像取込、I/O 入出力のインタフェースボードの機材選定を行ってハードウェアを構築し、画像処理の内容に合わせたアルゴリズム開発を行って全体のシ

システムを開発して運用するものがある。よって専用機ではユーザが考案したアルゴリズムなどを組み込むことは難しいものの簡便にシステム構築でき、汎用 PC ベースではすべての責任、例えば機材選定からアルゴリズム構築、効率化・信頼性の保証までを負わなければならないがシステムの自由度が高く様々な案件に対応することができる。

PC ベースの画像処理システムでは、処理エンジンとしてインテルが開発・公開し多くの研究開発者が独自のアルゴリズムを公開しているオープンソースの OpenCV[46]と、商用マシンビジョンライブラリとして COGNEX 社 (米国) の VisionPro/CVL[47]や MVTec 社 (独国) の HALCON[48]など市販されているものがある。OpenCV ではソースコードが公開されている反面アルゴリズムの信頼性は保証されていないと考えてよい。一方、商用マシンビジョンライブラリはメーカーが開発にあたってはエンドユーザから集めた数十万枚の画像データベースを元に開発を進めたアルゴリズムであり照合結果については検証ロボットによる自動処理によってデータベースに紐づけられた真値との比較によって結果の信頼性はメーカーの責任の元に担保されているため実際の現場でも多く用いられている。現場で運用するためには、画像処理システム開発技術者が画像処理に関する機能 (カメラからの画像取込、照合やエッジ検出などの処理、GUI 機能など) が網羅されたライブラリで供給される関数群をベースにして Microsoft 社の Visual Studio を用いてアプリケーションソフトウェアとして開発を行う。ソフト開発では関心パタンの登録手順や探索領域設定、各種パラメータ類などの設定も技術者の責任で作成、例えばソフト内部に固定値としたり GUI でユーザが設定できるようにしたりして利便性を高めたりする。現場から開発者に要求されるソフトウェアの要件としては 1) ラフな光学条件設定において、2) 関心パターンをおおまかに登録、3) 適当な探索領域の設定、4) 正確にかつ短時間で探索できるという条件において最適な照合アルゴリズムを設計することを言われるものの実現するためにはハードルが高い[49] [50]。しかし開発において本論文の提案を組み込むことにより商用ライブラリを用いたときでも効率化と信頼性の向上を図ることができ、3) についての一助になると思われる。

近年マシンビジョン用機材 (PC およびカメラ、レンズ、照明など) が多くの生産工場に導入されたために機材価格が安価になってきたと同時に種類が豊富になってきた。具体的にはカメラは高画素化が進み古くは 0.3M (640 × 480画素) のみしかなかったが、最近では 5M (2500 × 2000画素) も一般的に使われるようになり[51] [52]、レンズもカメラに合わせて有効像円が大きく最小錯乱円が小さく分解能が大幅に向上したのも用意されている。

画像による製品の外観検査では検査機能を単独で使用する例は少なく、事前に探索などにより対象物の位置決めを行い、照合位置に基づいて検査領域を特定し処理を行うといったように検査だけでなく照合などの位置決めと一緒に用いられることが多い。また照合のみにより対象の存在確認が行われ部品の欠品や位置ずれなどを検出するために用いられる。

実際の現場では不良撲滅するために様々な欠陥に対してどのような検査機能を用いて運用して

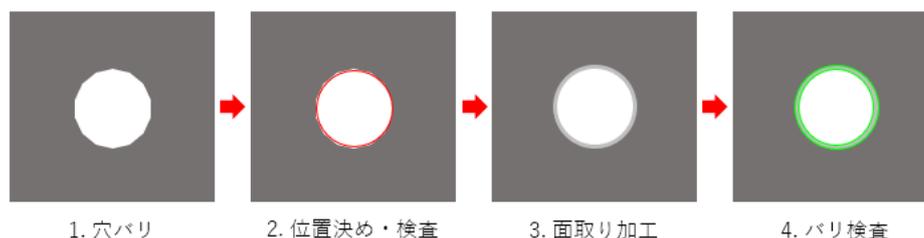


図 2-1 精密穴加工の位置決めとバリ検査

いるかについて、いくつかの事例を示すと同時に研究の切掛けとしたい。

2.1.2 加工穴のバリ検査

金属部品の加工では旋盤やボール盤を用いて切削加工されるが、特に穴あけではドリルを用いて穿孔が行われ貫通穴では工具の抜け際で刃物の切り残しが出てしまいバリとなってきたりきれいに加工されず、これは切削加工を行ったときには必ず生じるものである。バリの現れ方は被切削材の硬さによって異なり、アルミや真鍮などでは大きなバリ、鉄やステンレスなどでは小さなバリとなる。よって穿孔後はバリを除去する加工が必要となるが通常は穴加工では一連の流れとして穿孔直後に面取り加工を行うことで検査を行わない。しかしシャフトが挿入される勘合穴の場合は穴形状のより精密さが要求されるため画像によるバリの除去状態の検査を行い、必要に応じて追加工するように段取りする。図 2-1 のように穴の位置決めと同時に検査を行いバリ有りと判断したときにその位置で追加工する。

2.1.3 PCB の部品検査

PCB の検査ではいくつかの不良項目が上げられるが、本研究で検証に用いた照合による検査は部品に関するもので、図 2-2 に示すように部品の取り付け位置のずれや欠品、方向違い、部品間違いがあり主要な項目である。実際の検査ではこれ以外にはんだブリッジ、未はんだ、はんだボールなどがあるものの本研究での検証には適さないので除外した。

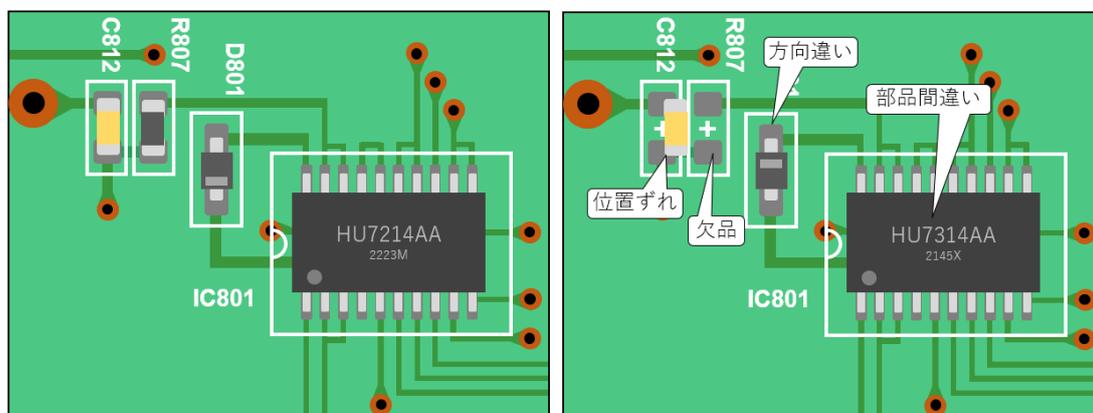


図 2-2 PCB の部品検査

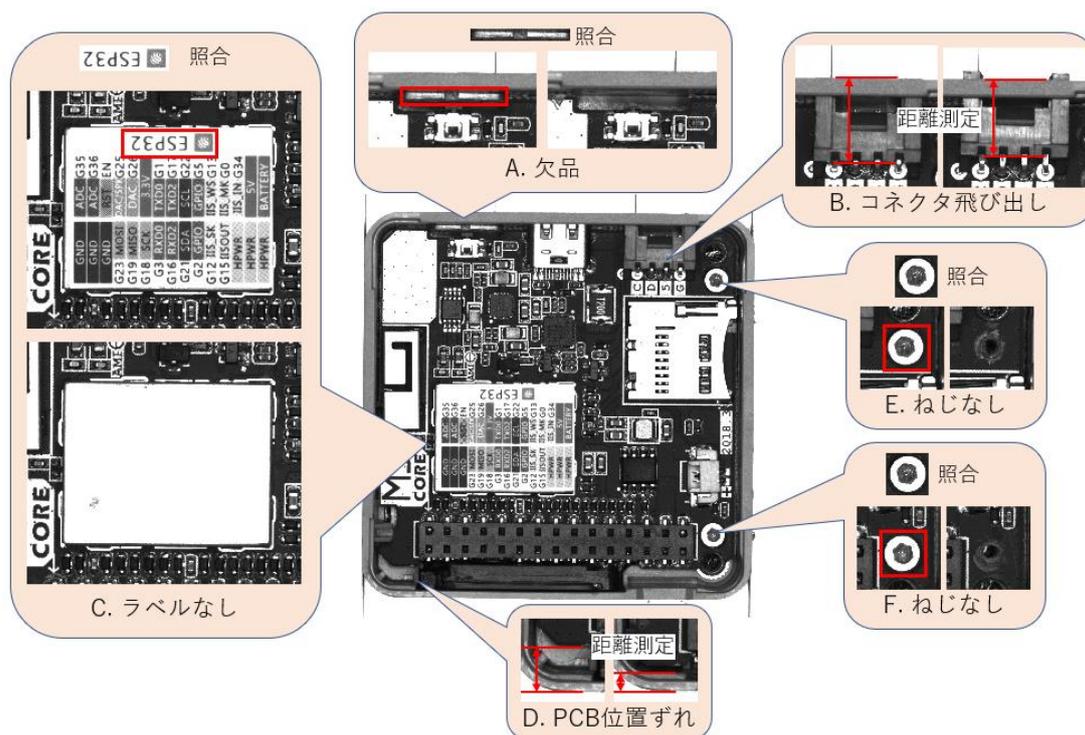


図 2-3 PCB 組立検査

2.1.4 製品検査

本研究で使用した PCB をケースに挿入して組み立てる作業を例にして想定される不良とその検査方法についてまとめる。

検査内容は図 2-3 に示す通り 6 項目あり, A. 欠品, B. コネクタ飛び出し, C. ラベルなし, D. PCB 位置ずれ, E. F. ねじなしである, それぞれの検査に適用するアルゴリズムは照合 (A. B. E. F.) とエッジ検出 (B. D.) であり, 適用方法の概要を図中に示す。

2.1.5 ロボットアシスト

ロボットで組立や加工を行うときに取り付け部品と対象物の位置を正確に求めて対処する必要があるとき, 図 2-4 に示すようにロボットに取り付けられたハンドアイカメラによって撮像された画像から対象位置を探索してロボットにフィードバックするビジュアルサーボによって運用される[53]。

2.2 現場の IoT

近年生産現場にも IoT 化が進んできており工場内にもネットワークが整備されて工程に設置されたパソコンや測定器, 自動組立・検査装置が接続され, 工程の状態や不良に発生などの生産状況が一元的に管理されるようになってきた。

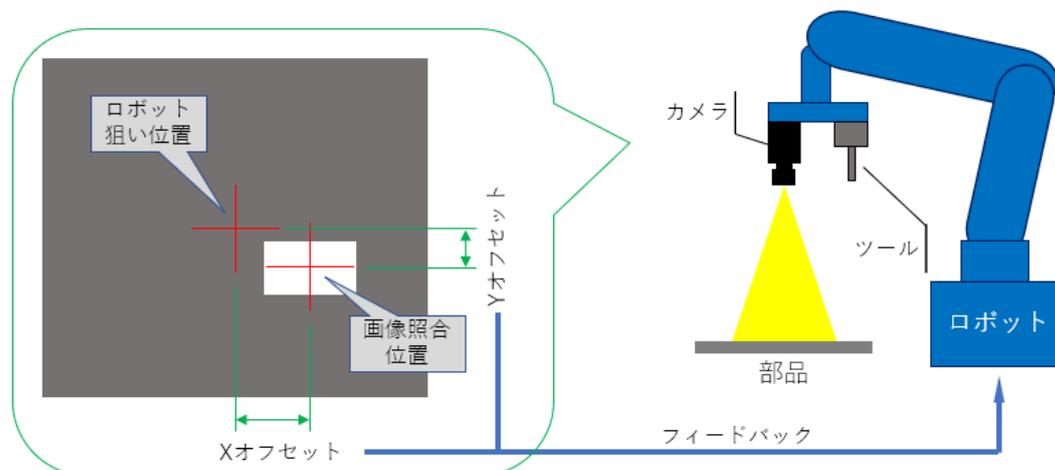


図 2-4 ロボット位置決めサポート

2.2.1 トレーサビリティ

産業界ではドイツ連邦政府が発表したインダストリ 4.0（第 4 次産業革命）[54][55]の重要性を主要諸国の産業界が再認識し、近年急速に発展したデジタル技術を製造業に活用して生産体制を強化する取り組みを進めている。代表的な事例としては、工程内で運用している機械装置の故障予知や製品の品質管理などがあげられる[56][57][58]。

現場で製造される製品について 1995 年に製造物責任法（PL 法）が施行され、製品の欠陥によって人の生命、身体又は財産に被害を被ったことを証明した場合に、被害者は製造業者等に対して損害賠償を求めることができる[59]とされるため、製造業者は品質管理を厳格に行い製造時どのように組立工程や検査を経て出荷されたのかの記録、具体的には工程の作業日時、作業名/装置 ID、組立状態や検査の結果の数値データを残すようにしている。よってデジタル技術を活用した製造工程ではトレーサビリティのため個々の部品に固有のシリアル番号をバーコードや QR コードなどの印字によって事前に付与し、工程ではコードを読み取ってから作業を行う。これによって人手による組立あるいは自動組立では責任の所在を明確にし、自動装置ではシリアル番号とともに計測検査処理を実行した検査結果を記録するような仕組みを採用するものが増えてきた。しかし一部の部品では大きさが小さいもの（小型ねじなど）、印字するスペースがないもの（レンズなど）、品質を管理するほどの重要部品ではないもの場合にはシリアル番号を与えないものもある。

表 2-1 に示すように生産現場での自動検査装置はシリアル番号の有無によって大きく 2 通りの運用方法があり、設定された検査項目に対して 1) 付与されている場合途中で不良が発見されても

表 2-1 部品シリアル番号有無による工程の違い

シリアル番号	あり	なし
理由	製造履歴のトレース	スペースがない 重要な部品ではない
生産ラインコスト	ネットワークの配備 データサーバの設置 工程に端末設置	オフライン検査機の設置
検査記録の保存	可能	不可能
画像検査	全て検査, 結果を記録	途中打ち切り, 結果を破棄
タクトタイム	全て実施するので一定	不良があると短くなる
改修工程	検査記録を参照	オフラインで再検査
製品コスト	シリアル付与のコスト	改修時の再検査コスト

検査を最後まで完遂してから排出し、不良内容はデータベースに記録する方法、2) 付与されていない場合には検査工程の途中で不良が発見されたときその時点で検査を打ち切ってしまう不良排出し次製品の検査に取り掛かり不良内容は記録しない方法がある。

2.2.2 画像検査の設定

光学条件を設定するにあたり画像システムに搭載された照合アルゴリズムにどのようなものがあるのか、その特徴はどういうものかを理解している必要がある。

例えば探索アルゴリズムに OCM などのエッジをベースにした照合アルゴリズムでは関心パタンのコントラストの高いユニークな紋様や外形エッジなどの特徴に対して有効であり明度変化に対しても堅牢であるが逆にコントラストが低く、外形や特徴を示す外形エッジなどが少ないあるいは明瞭でないパターンに対しては誤検出や未検出などの不具合が懸念される。一方 NCC などの面をベースにしたものでは、画像のエッジなどが明瞭でなくコントラストが低く特徴の明暗が緩やかに変化するようなグラデーションパターンに対して有効であるものの、明度が変化に対しては弱い性質がある。よって搭載された搭載された照合アルゴリズムを理解し探索対象の特徴を見極めて光量設定を行う必要がある。

しかしながら、画像処理装置の照合アルゴリズムの特徴を十分に理解していない多くの古い現場技術者の中には、画素のグレー値が 255 (8 bit の場合) に偏るように光量を大きくしていわゆる「白トビ」画像に設定することが良いと考える傾向がある。これは以前の装置に対して採用されていた 2 値画像処理に対する知識の流れ、あるいは NCC などの面ベースのアルゴリズムが多く適用されてきたことによる経験によるものと思われ、彼らの中には「画像処理は明度変化に弱い」という知

識がある。よって計測検査の対象物に対するわずかな位置や傾きの変化による反射の具合や対象物そのものの表面状態により生じてしまう明度変化が起こりにくくなるようにするための調整手法と思われる。しかし現代での画像処理は2値画像ではなく多値画像を扱い多種多様な照合アルゴリズムがあるため、適用されているものに適した光量調整が必要になる。

光量の設定にあたっては、画像のグレー値のヒストグラムにより適切な調整ができるようなアルゴリズムにより設定をグラフィカルに表示してガイダンスを示したり、照明電源を直接制御したりして自動設定できるような機能と搭載するケースもある。

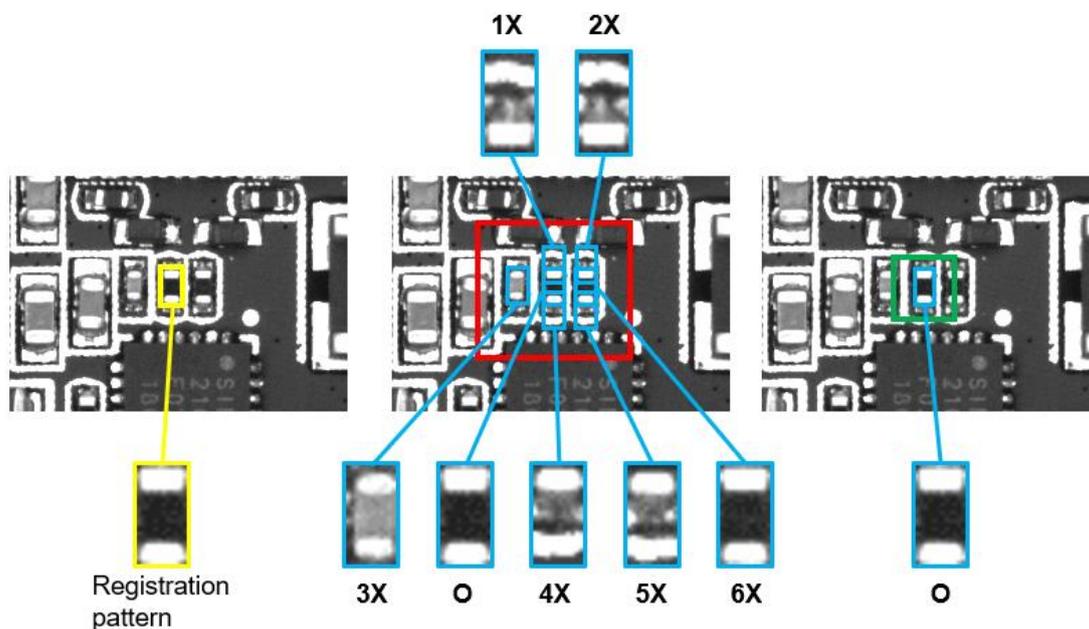
光学倍率の設定は照合アルゴリズムの精度に基づく探索対象に対する照合結果の分解能とカメラの撮像素子の画素サイズとレンズによる光学倍率によって決定される。例えば照合アルゴリズムの精度が ± 1 画素、探索対象の位置決め精度が $\pm 0.1\text{ mm}$ ($100\mu\text{m}$)、カメラの画素サイズが $3.45\text{ }\mu\text{m}$ のとき、光学倍率は $3.45[\mu\text{m}]/100[\mu\text{m}] \times 1[\text{画素}] = 0.0345$ [倍] となるので、カメラとレンズを選定した段階で作動距離が決まるため、現場技術者が変更するケースは少ないと思われる。

2.2.3 本研究が目指すところ

画像システム開発技術者は現場で運用する担当に対して画像に対する知識を与えることも人材育成という観点から重要であるが、知識が十分でないことを承知した上で彼らに対して一定の指標を示したり注意喚起したりして装置の適切な設定と運用を促すように工夫をして誰にでも使いやすい画像システムを提供することも重要である。

現場技術者であっても1) 対象物の特徴に対する観察力(特徴の把握)、2) 計測および検査内容と画像処理装置の内部の様子に理解(装置の特性理解)、3) 必要な計測・検査精度を把握(要求精度と画像精度のバランス)などの能力が必要であり不足している技術者は最高のパフォーマンスを引き出すことができず、未検出(検出できない)や誤検出(目的以外の対象位置を検出)などの不具合が多発してしまう可能性が高い。これらの能力を得るためにも多くの経験を積み重ねることが必要であり若手技術者を育成するサイクルが上手く回っていないのが実情である。

探索領域の設定は適切な大きさをもって設定されるべきものであり、探索対象の公差などを考慮せず大きな余裕を持たせて設定することは照合に要する処理コストの増大や近隣に配置されている他の類似パタンの誤検出など不具合を誘発する可能性が高くなるため避けるべきである。つまり対象の探索領域は、1) 関心パターン自身の設計上あるいは実力値としての設置公差を考慮して、2) 配置されている周辺に配置されている同一あるいは類似したパタンの存在の有無などの状況を把握した上で設定することが望まれる。



(a)画像全体と関心パターン (b)大きな探索領域に含まれる類似パターン (c)最適な探索領域と照合結果

図 2-5 大きく設定した探索領域と最適な設定における近傍の類似パタンの例

例として、図 2-5 のように電子部品が搭載された PCB を用いチップ抵抗を探索対象としてこれが正しい位置に配置されているか否かの検査を行うものとして説明する. 図の (a) は撮像された画像と選択された関心パターンを示しこれに基づいて照合を行うものとする. (b)は対象が存在すると思われる領域 (赤色矩形) を大きく設定した場合を示し, (c) は適切な大きさで領域 (緑色矩形) を選択したものを示す. (b) では領域を大きく設定したことにより領域内に目的とする対象 (図中 O) 以外に複数の電子部品 (図中 3X, 6X) や基板のランドとシルク印刷のマーキングなどによる類似パターン (1X, 2X, 4X, 5X) が観察されるため誤検出の可能性が高く, 特に 6X は関心パターンに酷似しているため高い確率で誤検出することが予想される. 一方 (c) での領域は (b) で O 以外の部品 nX を排除しているため誤検出となることがなくなる.

これらを設定には関心パタンの特徴を理解すると同時に周辺の状況として誤検出してしまい可能性などを配慮しなければならないため, 画像処理に対する知識と経験および周辺の観察力が必要となるが, 生産技術および現場技術者の人的リソース不足と現場技術者の経験不足により最適な設定をすることが難しくなっている.

探索領域をどのような大きさで決めるかという問題については関心パターンを設定することと同様に対象が存在する領域の周辺まで配慮して設定することが重要である. 関心パタンの設定のとき

は特徴的なパターンを含みコントラストが高く対象ごとの輝度変化が少ない部分を選択するなどの配慮し、探索領域の設定では 1) 対象となるパタンの配置誤差や公差などを配慮し、2) 周辺に類似したパタンの有無、3) 複数の対象において輝度が変化などで関心パターンに似たようなものが観察されない、なども考慮する必要がある。これらの課題については知識が十分でない技術者、例えば照合アルゴリズムの特徴やその振る舞いなどの知識がなくとも、多くの照合アルゴリズムに適用することが可能であって、効率的かつ信頼性の高い探索領域を設定することが可能なアルゴリズムの開発が必要と考えて研究のテーマとして着手した。

2.3 探索の順序

工程内での検査工程は AOI (Automated Optical Inspection) と呼ばれる「自動 (外観) 光学検査」装置という検査専用機を用いたり AOI を組立装置内に組み込んで組立から検査の一連の作業を同時に行ったりするものが用いられている。

前述のように工程内の検査において、シリアル番号を付加した部品では検査対象とするものすべてを探索 (全数検査) して結果を記録しなければならないため、検査工程全体を通して効率化を検討する必要がある。一方付加していないものについては途中で打ち切ってそのまま終了 (打ち切り検査) するためその要件として不良の発生率が高い対象から順に検査を行い、早い段階で次の対象に移行するように順序を決めたほうが効率的である。

いずれの場合においても探索の順序は対象の特性や運用手順などを踏まえたり、現場担当の判断によって決められたりするものであるため、探索アルゴリズムや画像システム開発者の都合によって決められるものではないので、いかなる順序においても効率化と信頼性の向上が実現できるようにする必要がある。

2.3.1 順序依存絞込み探索

順序依存絞込み探索は、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。

順序依存絞込み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

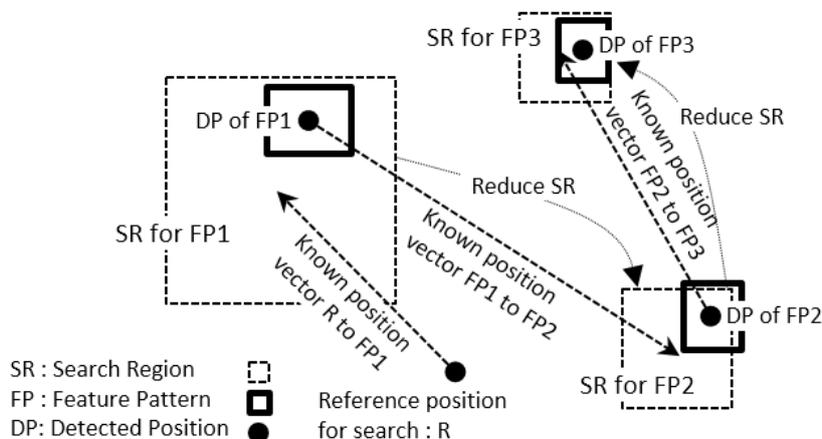


図 2-6 順序依存絞込み探索の概要

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者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。

この探索では図 2-6 に示すように 2 つの手法を同時に実現しながら探索を行う。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。

2.3.2 探索領域拡張による複数関心パタンの順序探索

順序問題は実際の現場において自動検査装置などを構築する上で重要な要素である。例えば1枚の観測画像内において、1) 部品の配置によって決まるものとして座標順、距離の近い順序、2) 経験や実績によって決まる順序などがある。2) の具体的な例としては部品の位置ずれや欠品などの不良を出しやすい部品を先に探索し不良が発見され次第、以降の処理を打ち切ることによって装置全体のスループットを向上させる手法がある。いずれの場合においても、画像検査における検査順序は処理アルゴリズムの都合により決められるものではなく、多様な探索順序に対応できるように配慮しながら効率化と信頼性を維持し位置探索を行う必要がある。

産業分野での画像処理においては探索対象物の特性や検査内容に応じて照合アルゴリズムを理解して適切なものを採用する必要がある。また照合や検査で不具合が発生したときに原因を解析したりアルゴリズムに修正を加えたりすることも多い。よって、照合手法はその特質を深く理解している従来手法を採用することが好まれるため、これらに対応可能な探索手法を考案する必要がある。

本論文は産業機器に適用する関心パタンの探索問題への応用を目的として利便性を高めることを目指すものである。産業分野で多く用いられる複数の関心パターンを含む静止画像で探索を行う課題について、ユーザが適切に設定したテンプレートに対して用途に応じた様々な照合アルゴリズムを用いて運用される。ここに上述した探索順序という制約下において探索領域を効率的に設定する拘束条件を導入し、剛体のような関心パターンを対象とする相対位置にゆらぎをもつ照合課題に利用可能な処理を提案する。提案手法は特定のアルゴリズムに付随する処理ではなく、探索領域を決めるためのものとして独立した処理を目指している。独自性は1) 先に詳述したような探索順序が装置や生産の都合によってあらかじめ定められている制約条件を守りながら、2) 探索領域の位置と大きさを適切に求めるという問題について扱うという点である。

探索領域はいわゆる論理和という形で拡張し照合に失敗したものはリトライを行う2つの処理を組み合わせることで信頼性の維持と効率化を図るための独自の手法を試みるものである。

2.4 照合アルゴリズム

従来から用いられている信頼性を維持しつつ効率化するための手法として、画素を効率的に選択する方法（例えば、部分テンプレートによる照合[60][61]、ピラミッド探索[62]など）、あるいは専用ハードウェアによる方法[63]などがあり、その有効性は従来より認められているが探索に有効な

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、探索空間となる単一情景内で複数の関心パターンを順次にかつ効率的に検出する問題を考える。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位置決めの対象とする。順序問題は実際の現場において自動検査装置などを構築する上で重要な要素である。例えば 1 枚の観測画像内において、1) 部品の配置 によって 決まるものとして座標順、距離の近い順序、2) 経験や実績によって決まる順序 などがある。2) の具体的な例としては部品の位置ずれや欠品などの不良を出しやすい部品を先に探索し不良が発見され次第以降の処理を打ち切ることによって装置全体のスループットを向上させる手法がある。いずれの場合においても多様な探索順序に対応できるように配慮しながら効率化と信頼性を維持し位置探索を行う必要がある。

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) [64], 画素値の差分の二乗和(Sum of Squared Difference : SSD) [65], 方向符号照合 (Orientation Code Matching : OCM) [66], 一般的な正規化相関などがあるが、本論文においては照合アルゴリズムについては扱わずこれらに依存しない探索領域の位置と大きさに基づく戦略の設計について扱う。

順序依存絞込み探索の検証では、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。探索領域拡張による複数関心パタンの順序探索の検証では、様々なアルゴリズムに適用可能な探索領域の位置と大きさに基づく戦略の設計について扱い、手法を検証するため基本的な手法と思われる SAD と NCC を用いて実験することとする。

2.5 先行研究

古典的なマシンビジョンによる照合課題の事例における探索領域の決定手法は、ユーザが経験値などに基づいて固定された位置と大きさを設定した運用されている。図 2-7 に示すように観測画像内に適当な座標 (例えば左下角を原点、画素の並びに沿った横方向を x 縦方向を y) を設定し、ユーザが事前に関心パターンを登録するときにこの座標を基準とし固定した位置および大きさを用いられている。このときの大きさについて PCB に搭載された電子部品の検査を例とすると、探索領域の大きさは 1) 検査対象とする電子部品の配置公差は最低限必要な大きさである。さらに PCB を治具などで位置決めするときの誤差について、2) PCB 全体が (x, y) 方向に位置ずれがあり照

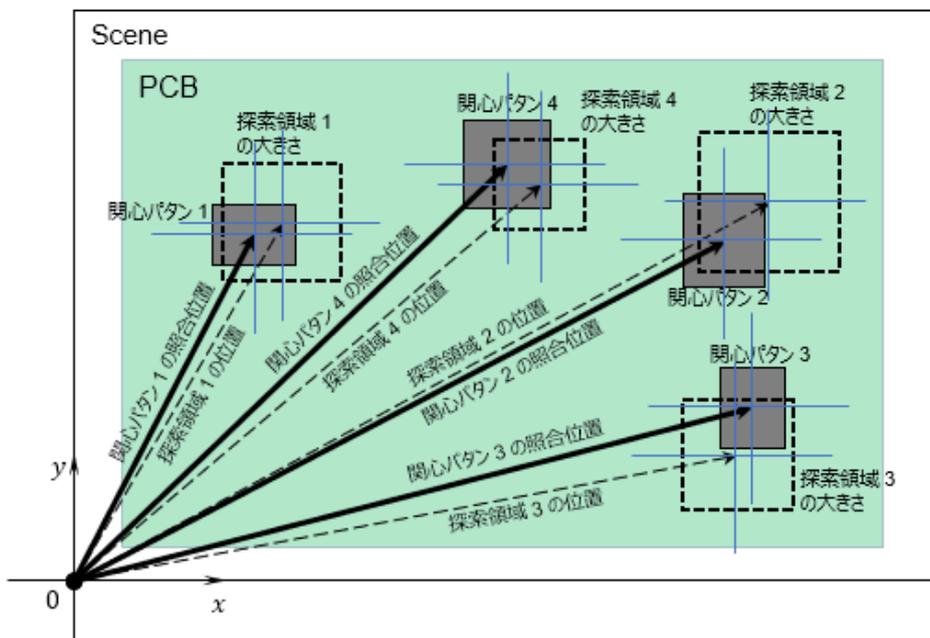


図 2-8 固定探索領域による探索

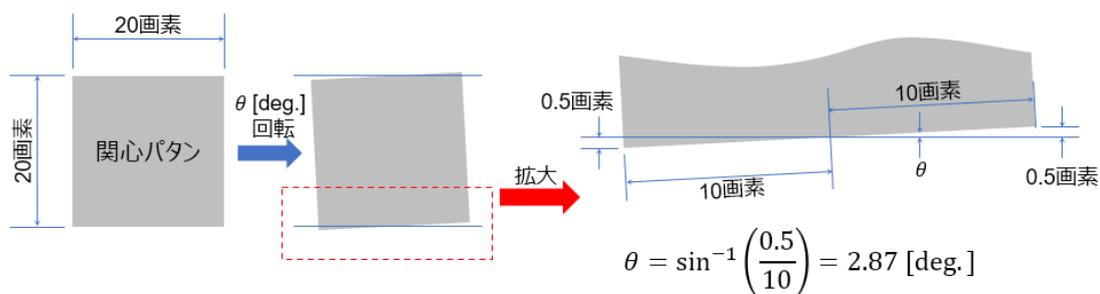
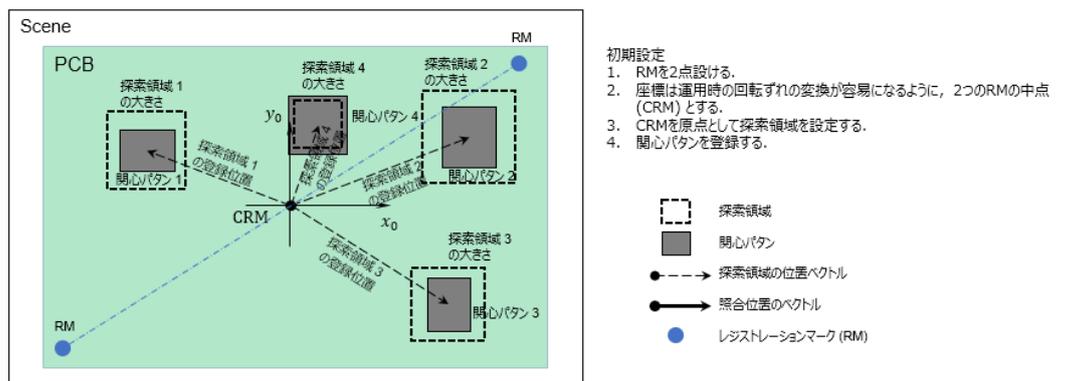
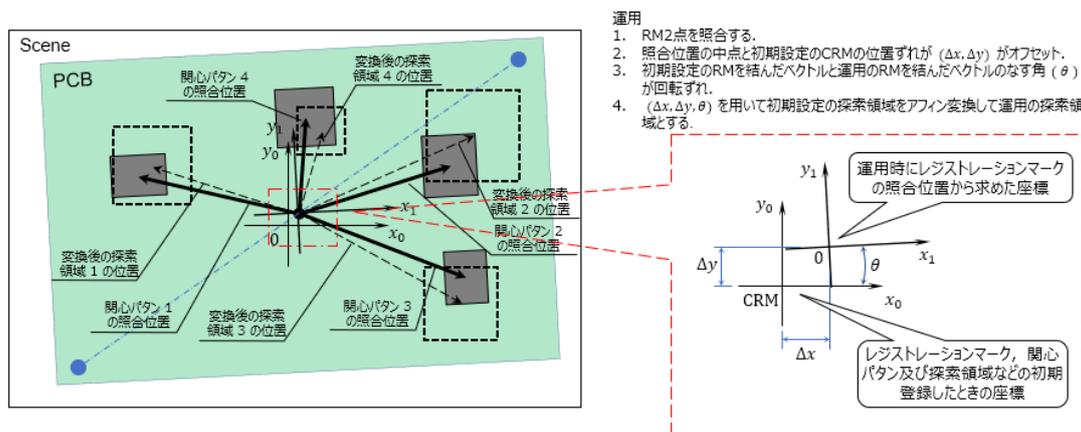


図 2-7 支障がない回転の関心パタン

合に支障がない程度の回転 (θ) があるような場合には、1)と2)を加算して設定する必要がある。参考までに“支障がない回転”とは、経験値として 2.87[deg.] (関心パタンの大きさが 20 × 20 画素のとき) 程度である。この根拠は図 2-8 に示すように 20 × 20 画素のパタン中心で回転したとき、最外縁の画素の回転ずれが 0.5 画素未満ということによるものである。



(a) 初期設定の方法



(b) 運用時の探索領域の補正

図 2-9 レジストレーションマークによる位置補正

上述の手法に対して2)の誤差によって加算されてしまう領域の大きさを排除するため、あるいは3)角度 (θ) の誤差が大きい場合には図2-9に示すように対象に2つ以上のレジストレーションマークを設け事前に照合を行って全体の位置ずれ $(\Delta x, \Delta y, \theta)$ を求め [67][68], ユーザによって初期設定された探索領域の座標をアフィン変換して照合操作を行う。このとき関心パターンと探索領域は図2-10のように回転によって拡張されてしまう部分については、照合操作に関与しないようにマスクして照合することが望ましい。

近年の探索領域の位置や大きさおよび順序問題を解決する手法の他の研究事例として、例えば動画画像系列内において特徴点の抽出と追跡を行う KLT 法[69], 移動する特定パタンの探索領域を動的に設定する方法[70], アクティブ探索の拡張手法として区分けされた照合位置の順序を選択する方

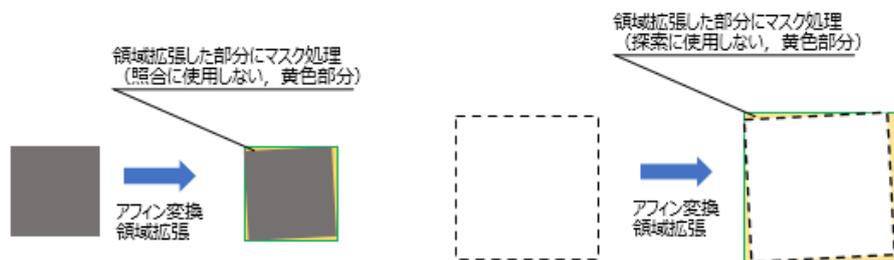


図 2-10 回転を考慮した関心パターンと探索領域のマスク

法[71]などの手法があり有効に利用されている。関心パタンの探索すべき位置を求める手法は数多く提案されている[72][73][74]。しかしながら、関心パタンの探索順序をどのように指定すればよいかという問題[75]や、固定された探索順序がどのような影響をもつかという問題に関する研究は確認できなかった。そこで我々は探索における順序というものを利用した関心パターンを探索する課題について検討した。

第3章 順序依存絞込み探索による関心パタンの効率的探索

順序依存絞込み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[75]。この固有情報は製品の設計データあるいは事前に作業者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3-1)。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

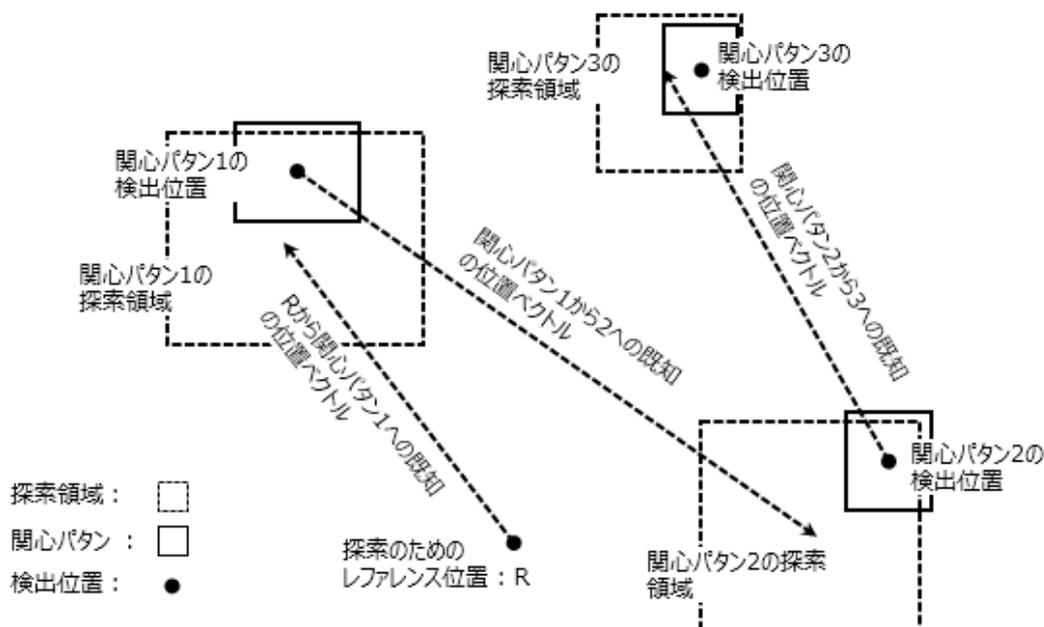


図 3-1 順序依存絞込み探索の概略

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。

3.1 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。

3.1.1 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3-2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)

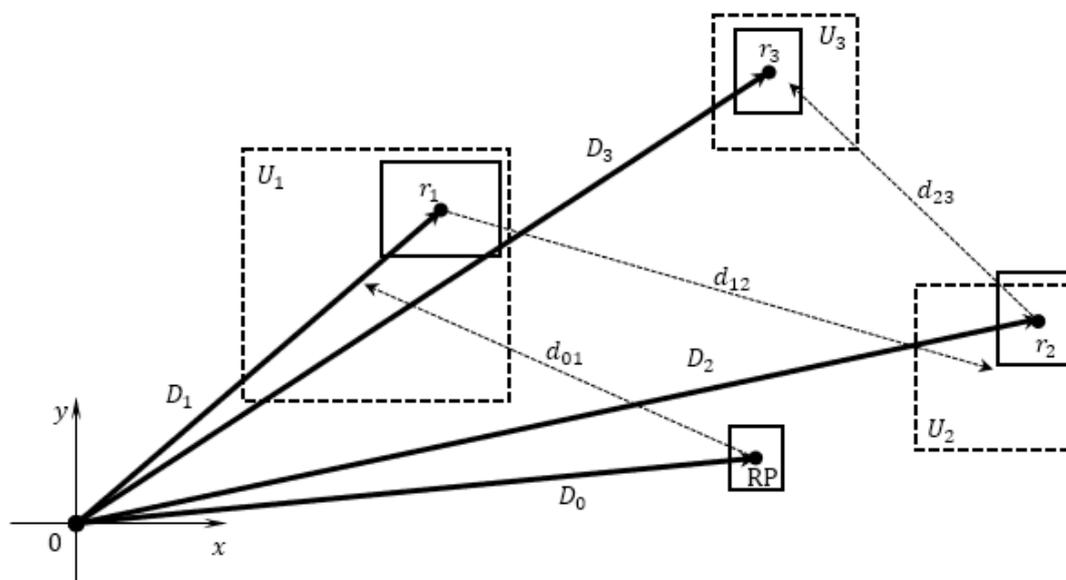


図 3-2 順序依存絞り込み探索の詳細

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。

3.1.2 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。

3.1.3 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）の関心パター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 $N_2 = u_1 \sum_{k=1}^K \left(\frac{s_1}{\sum_{n=1}^k s_n} \right)$ となる。よって効率比 $N_0 : N_1 : N_2$ は次式となる。

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

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。

<初期位置決め>

RP r_0 を用いて D_0 を求める。

<順序依存絞り込み探索>

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。
-

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、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いので順序並び替えの必要性は高くない。しかし、大小様々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、 $s_{a(1)}$

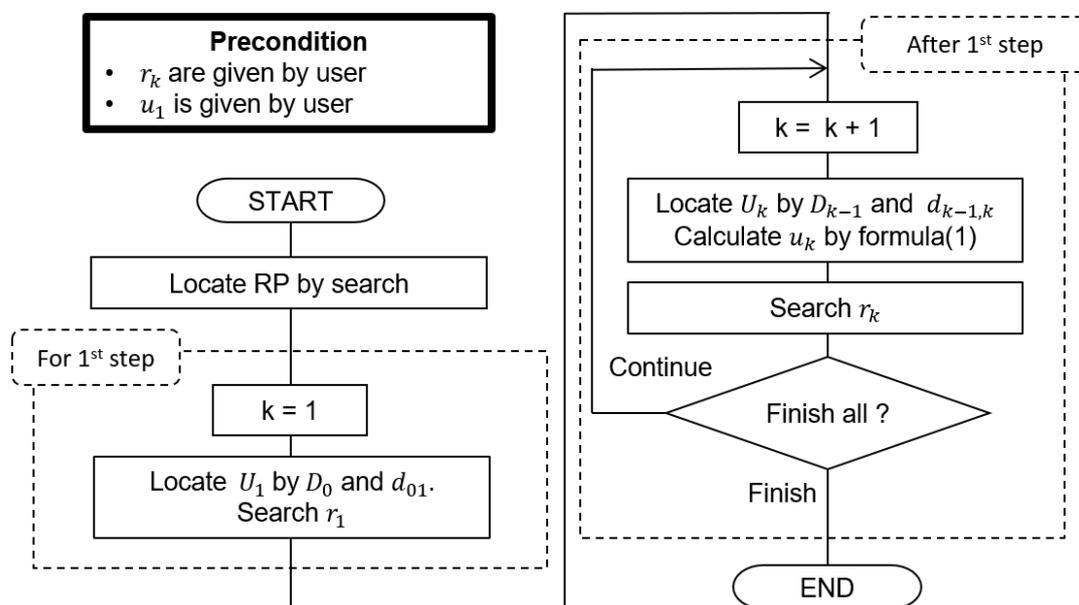


図 3-3 探索のフローチャート

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 3-3 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> ある基準にしたがって並べ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)

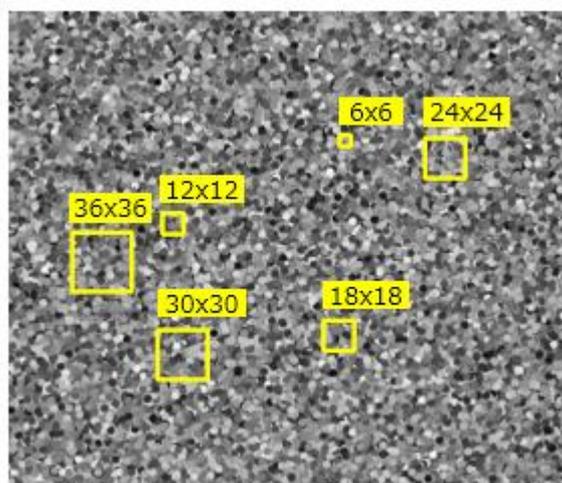


図 3-4 モンドリアンランダム画像と選択したパターン領域



図 3-5 選択された関心パターン

3.1.4 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 3-4 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 3-5）。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 [76]により

表 3-1 ランダム順での探索時間

探索順序	単位 : ms	
	探索時間	時間順位
□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 は一辺 XX 画素の正方形の大きさをもつ関心パタン

例 : □36 は 36 × 36 の大きさの関心パタン

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 3-1)。

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) 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 3-1 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。

3.2 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±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 3-6 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

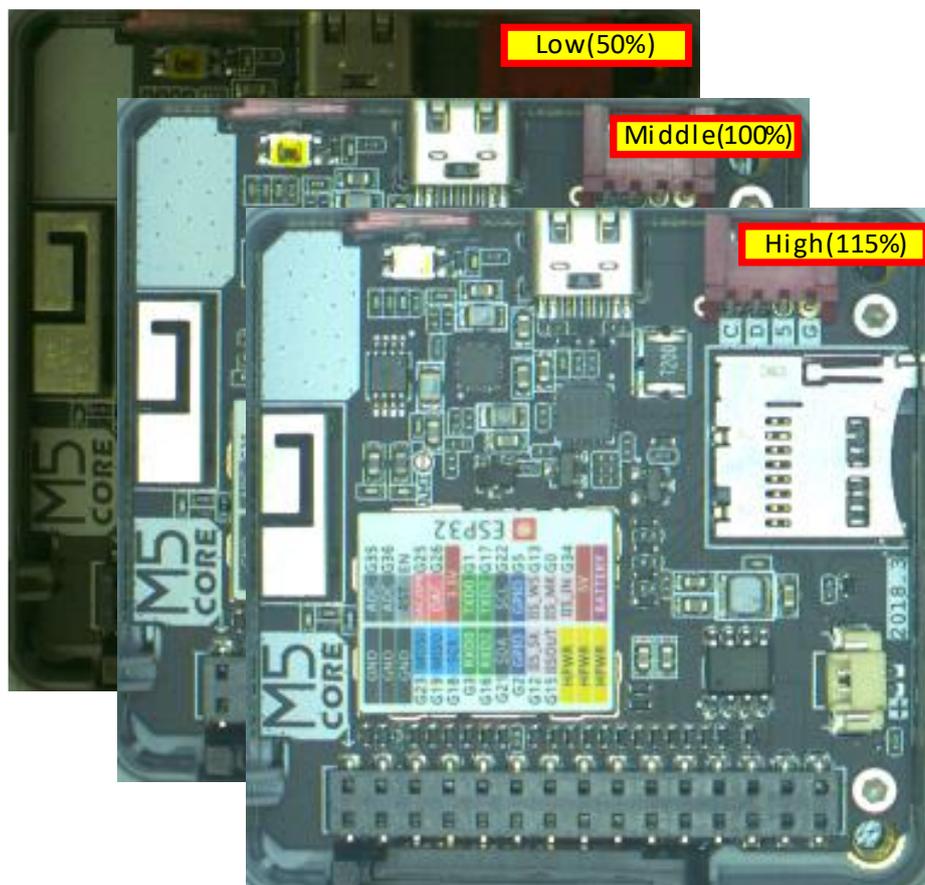


図 3-6 PCB の明度の違い

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[77]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ース 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通りの光量ですべての PCB を撮像し, 計 27 枚の観測画像を得た(図 3-6). これらの画像のうち, 1枚の PCB 画像から関心パタンを切り出し, 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

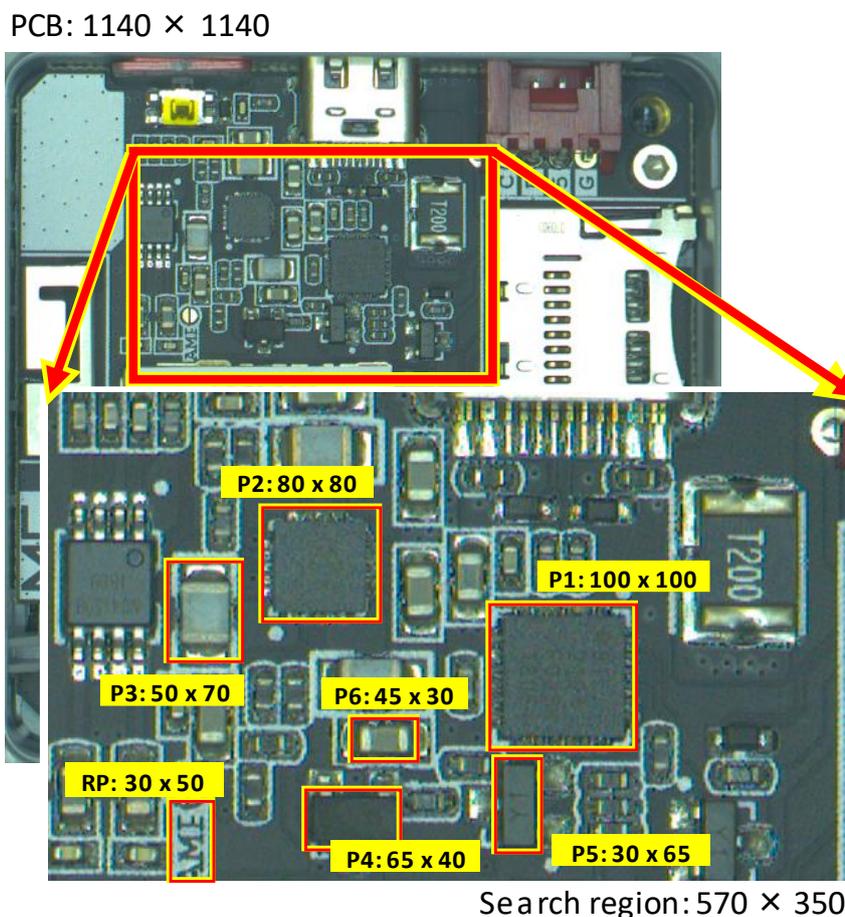


図 3-7 対象画像と関心パターンを選択した領域

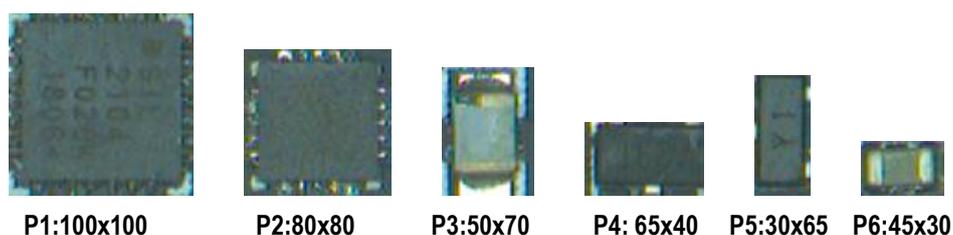


図 3-8 関心パターン

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 3-6 の照明条件 Middle(100%)の画像とした。図 3-7 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 3-8 に示す。図 3-9 は戦略 2 ($u_1 = 25 \times 25$ (#1)) お

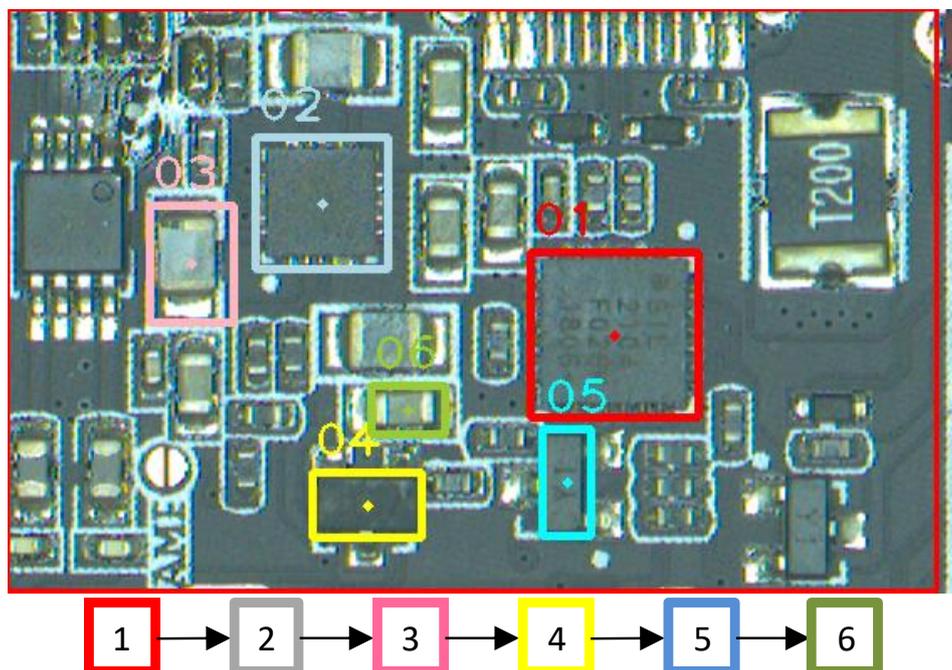


図 3-9 照合結果 (戦略3: 大きさの降順)

表 3-2 戦略2と3の探索時間

							単位 : ms
昇順(i)	P6	P5	P4	P3	P2	P1	合計
(#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
降順(ii)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	合計
(#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

よび戦略3 (大きさの降順(ii)) に従った絞込み探索の結果を示し、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 ± 1 画素の誤差で検出し、探索時間は66.49ミリ秒(表3-2(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

表 3-3 戦略1の探索時間

	単位 : ms						
(iii)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	合計
(#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

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3-2に、戦略1のみ(iii)の探索時間を表3-3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。

3.3 ま と め

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かと思われる。

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。

この提案手法では探索領域の縮減によって照合精度を維持した上で効率化を図るものであり、いかなる探索順序においても効率化が可能であるが、縮減率は関心パタンの大きさに基づくものであ

るため式 (1) の比率に相当する部分 B_{k-1}/B_k が小さいときには縮減率が大きくなり効率化が向上する, つまり関心パタンの大きさを昇順としたときがより効率化が得られることが分かった.

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.

第4章 論理和型および信頼区間型の探索領域拡張による複数関心パタンの順序探索

本章では探索順序という制約下において探索領域を効率的に設定する拘束条件を導入し、剛体のような関心パターンを対象とする相対位置にゆらぎをもつ照合課題に利用可能な処理を提案する[78]. 提案手法は特定のアルゴリズムに付随する処理ではなく、探索領域を決めるためのものとして独立した処理を目指している. 独自性は1) 先に詳述したような探索順序が装置や生産の都合によってあらかじめ定められている制約条件を守りながら、2) 探索領域の位置と大きさを適切に求めるといふ問題について扱うという点である.

探索領域はいわゆる論理和という形で拡張し照合に失敗したものはリトライを行う 2 つの処理を組み合わせて信頼性の維持と効率化を図るための独自の手法を試みるものである.

4.1 信頼性と探索領域

一般的な探索の問題における探索領域は信頼できる位置、例えば対象画像の原点やレジストレーションマークの照合位置などを基準とし、事前情報であるパタンの相対位置に基づいた位置とユーザが指定した大きさによる固定探索領域を用いる例が多く見られる. しかし領域を過大に大きくすると照合するべきではない類似したパターンが含まれて誤検出の可能性が高くなり、逆に小さくし過ぎるとパターンが含まれずに未検出となって信頼性が低下する.

4.1.1 画像照合の信頼性

本論文ではアルゴリズムの誤りやバグなどの不具合がないものとし、画像照合の信頼性は各々の関心パタンの照合について事前に求めた真値と探索結果に差異がないことをもって評価した. 探索の信頼性が揺らぐ要因としては関心パターンや照合判定、探索領域の設定問題がある. 関心パタンの

領域選択は探索対象となる部品などのユニークなパターンが含まれかつ余計なもの（例えば PCB のシルク印刷やレジスト印刷など）が含まれないように設定する必要がある。照合判定では出力された類似度が最大となる位置を照合位置とすることが多いが、さらに「周辺 8 近傍の値より大きい」という条件（以下、ピーク条件と呼ぶ）を付加して照合判定し信頼性を向上させた。詳細は 5.1 節 照合判定 で述べる。探索領域の設定は、探索の信頼性への影響が特に大きく、これを適切に設定することが、信頼性の高い探索の実現に重要であることから、本論文では、信頼性の高い効率的な探索のための探索領域設定手法を提案する。

4.1.2 位置ずれの問題

計算コストを抑えるのと同時に類似パターンによる誤照合を防ぎ信頼性を向上させるため、探索領域の設定はなるべく小さくするほうが良い。具体的には関心パターンには部品の特徴を含む特有なものとし、探索領域は対象となるパターンが存在すると推定される位置を中心として対象部品の配置誤差を考慮した範囲に留めるように配慮する。例えば PCB 上の類似した部品が隣接して配置されているときを考える。その部品は密接して配置されていることはなく間隔をもって配置されるので、部品の大きさの 2 倍程度の大きさであれば隣接する部品が含まれることはない。これを目安として探索範囲の上限を設けるように配慮する。本提案の有用性について PCB を対象として考える。＜PCB のベア基板＞銅箔パターンをエッチングするための露光装置の精度では光学的な歪みにより数ミクロンのばらつきが発生することがあるため、本提案が有効であると思われる。＜PCB 上の電子部品＞マウンタによってベア基板に印刷されたクリームはんだ上に配置される電子部品がリフロー工程のときはんだの表面張力によって部品が移動するため数百ミクロンのランダムな位置ばらつきが生じるため、本提案が有効であると思われる。

このように探索対象となる製品の特性や製造方法などを理解した上で探索問題に臨むことによって照合の位置精度や信頼性を向上させることができる。

4.1.3 探索領域設定のための基本戦略

探索領域を決めるための要素はその位置と大きさであり、これらを適切に決めるための基本戦略を説明する。

初期値として外部から与えられる探索領域を基本探索領域と呼ぶことにし、位置の設定には事前情報である各関心パターン間の相対位置関係を利用する。これは各関心パタンの配置情報である設計

値や実測値に基づいて求めることができる。事後情報として対象とする関心パターン自身の探索より前に照合したパタンの位置に基づいた探索領域の位置と大きさを決定する手法も併せて利用する。また対象画像に歪みや伸縮がある場合、一般的には探索操作の前にいくつかの信頼できるパターンを照合して画像全体の歪みの情報を得た上で画像全体の座標を補正する方法などが用いられる。提案手法では、事後情報に基づいて探索領域を決定することにより画像の歪みを吸収することも可能である。

基本探索領域の大きさの設定には予測位置ずれ量を利用する。これはあらかじめ求めた位置ずれ量の統計量に基づいた事前情報から予測することができる。探索領域の大きさは、探索初期段階ではなるべく小さく設定しておき、1巡目の試行として探索を開始して順次探索領域を拡張し、未検出したパターンについては最後に繰り下げて2巡目の試行とすることで効率的な探索を行う。

図4-1では2番目の関心パターンである r_2 の探索が1巡目の試行で未検出となり2巡目の試行に繰り下げられた例を示す。図中の黒の実線矩形(外枠の矩形)はカメラから得られた1枚の画像を表し、青は1巡目の試行、茶色は2巡目の試行の探索範囲、灰色は照合後の関心パターンを表す。また、色付きの矢印はパターン間の相対位置、丸印は照合位置を示す。

信頼性の高い関心パターン(Registration Pattern)を用いて求められた基準となる位置を以下では

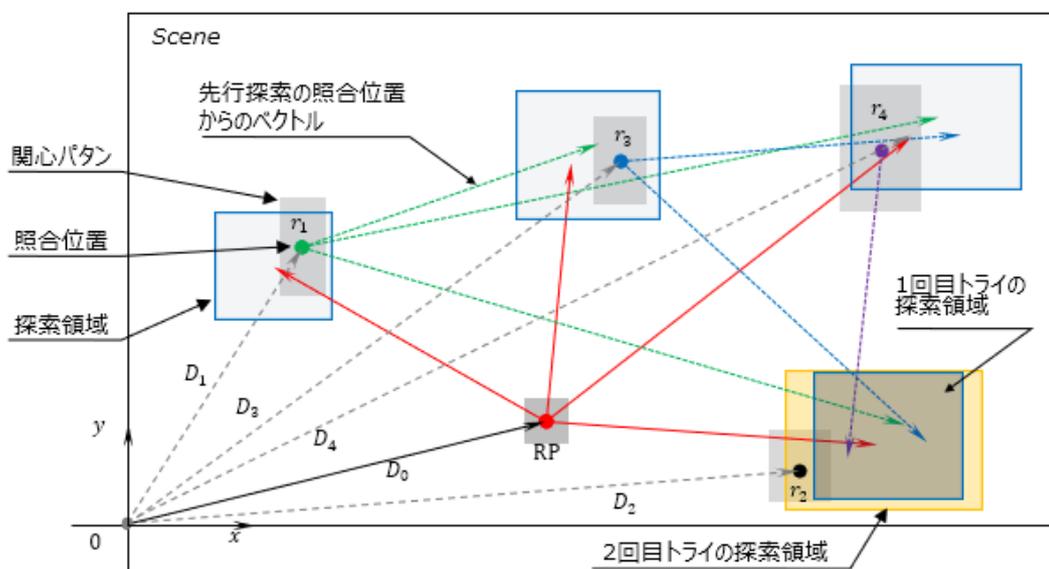


図4-1 先行探索の結果に基づく順次探索の概略
左下角を原点とした座標系の例

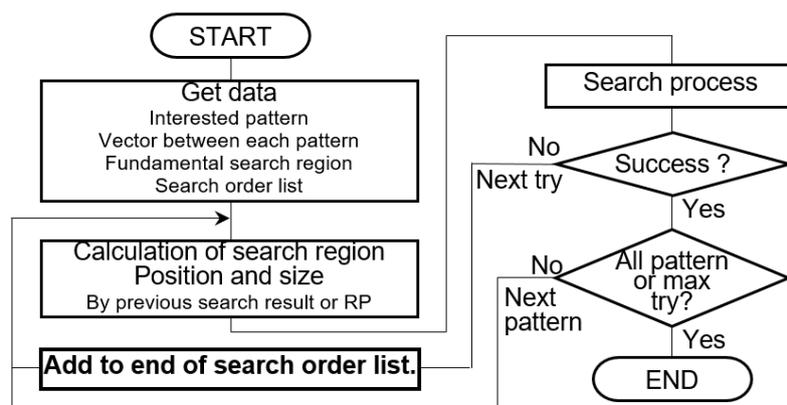


図 4-2 多段試行による探索のフローチャート

RP と呼ぶことにする。RP と探索対象より先に求められた照合位置 D_k （添え字 k は探索順序を表す）を基点とする配置情報に基づいて対象とする関心パタンの探索領域を決める。

図 4-2 に提案手法のフローチャートを示す。位置ずれ量が大きく未検出となった関心パタンの照合は、探索順序を最後に繰り返して 2 巡目の試行として探索領域を拡張後に照合することによって信頼性を確保する。必要に応じて順次探索領域を拡張して探索を継続していく。この手法を多段試行と呼ぶこととする。

4.2 探索領域の決定

4.2.1 基本相対位置の利用

一般的に探索領域は画像に対する一意の位置、例えば画像座標の定位置あるいは基準となるレジストレーションマークなどを基点にしてそこからの相対位置によって決められることが多い。探索対象がフィルムや紙のように全体的に伸縮があり製品ごとに一定でないような製品での探索問題では探索領域を決めるためにその伸縮を考慮して探索領域を大きく設定する必要がある。しかし事前に伸縮率などを考慮して探索領域を大きく設定するため類似パターンが領域内に入ってきたり計算コストが増加したりすることが懸念される。本提案では製品の設計情報である各関心パターン間の相対位置の情報に基づいて探索領域の位置を決める方法を提案する。

4.2.2 予測位置ずれ量

探索にあたっては実際のパタンの位置ずれ量を知っておくと探索領域の大きさ (U_k) を設定するときに大いに参考になる。具体的には探索対象とする製品を適当な数を用意して実際の探索操作に先立ち試験的に探索操作を行う。用意する数は多いほど良いが多すぎると位置ずれ量を求める作業にコストがかかるので 10~20 個程度とし、位置ずれに対して様々な事例を含んでいることを期待して異なる生産ロットのものが適している。予測位置ずれ量は計測値の標準偏差、平均、最大値などとして算出される。例えば最大値を用いれば探索が失敗するケースが少なくなるが計算コストがかかり、正規分布を仮定して標準偏差を用いて 1σ から開始すれば失敗率はおよそ 30% と見積もられ、多段試行によるアプローチでバックアップすることになる。手順としては 1) 関心パタンの切出し、2) 探索領域を対象パターン付近で適当に設定、3) 探索アルゴリズムを適用して探索、4) 探索結果の外れがないかを目視で評価、5) 求められた結果の x 座標および y 座標の位置について標準偏差を求める。本論文では関心パターンごとに標準偏差を求めて平均化処理を行い σ_x および σ_y を求めて各軸方向の予測位置ずれ量とし、探索領域の大きさを決めるための要素としその 2 乗和 $\sigma_x^2 + \sigma_y^2$ をパターンとしての予測位置ずれ量 σ としてパタンの探索順序などを決めるための指標とした。

4.2.3 基本探索領域の大きさ

基本相対位置の利用で探索領域の位置を設定することはできたが大きさをどのようにするかという問題について課題が残る。そこで本論文では予測位置ずれ量を利用して基本探索領域の大きさを決める方法を提案する。基本探索領域の大きさを $w_0 \times h_0$ とすると

$$w_0 \times h_0 = [(2N\sigma_x + 1)] \times [(2N\sigma_y + 1)] \quad (4)$$

ここでは探索領域の大きさを決めるための係数 N はユーザが任意に設定し、 $\lceil \cdot \rceil$ は四捨五入の演算を示す。 w_0 を $2N\sigma_x + 1$ としたのはパターンが $\pm\sigma_x$ ばらついて中心画素を 1 画素加えたものとする。また h_0 も同様とする。図 4-3 に例として $N = 1$ とし RP からの基本相対位置が中心

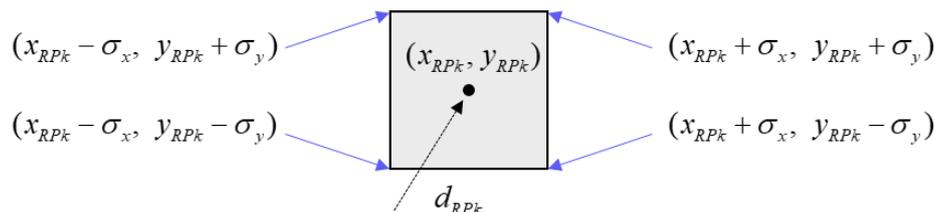


図 4-3 基本的な探索領域

を指す探索領域を示す。

4.2.4 探索領域の拡張

本論文では基本的な方針として関心パターンは指定された基本位置を中心とした一定の範囲に存在するとしてこれを基準に信頼性を確保しつつ探索領域を拡張する手法について考案する。ここでは論理和型拡張，信頼区間型拡張および両者の複合型拡張の3通りの手法について提案する。実際の運用ではこれらを単独で用いたり組み合わせたりすることで探索対象の特性によって使い分けが必要がある。

4.2.5 論理和型拡張

基本相対位置の利用では基点として RP のみを利用するが，運用の過程ではいくつかの探索が先に行われていて（先行探索）その照合位置を得ている。そこで，事後情報である先行探索で得られた複数の照合位置を基点にした複数の探索領域の重なりによって得られる論理和領域を探索する論理和型拡張を提案する。この手法によれば，偏りの有無によらずにその傾向を反映した領域拡張を可能とし効率的な探索を実現することが期待できる。

ければ、論理和を用いた領域は拡張されず基本探索領域として与えた大きさのままである。

論理和を正しく求めると図 4-4 の破線で囲まれた矩形の外郭を追跡するような多角形になってしまうが探索問題において取り扱いが煩雑であるので、ロボットを協調動作させるときの 3 次元空間において、双方のエンドエフェクタの衝突を回避するときに用いられる AABB (Axis-aligned bounding boxes) [79] [80] を 2 次元に応用し、全体を包含する外接矩形としても大きな差異はないと考える。このとき探索領域の大きさ $w_k \times h_k$ は次式となる。

$$w_k \times h_k = \left[\left(\max_{i=RP,1,2,\dots,k-1} (x_{ik}) - \min_i (x_{ik}) + 2N\sigma_x + 1 \right) \right] \times \left[\left(\max_i (y_{ik}) - \min_i (y_{ik}) + 2N\sigma_y + 1 \right) \right] \quad (6)$$

ここで σ_x と σ_y はあらかじめ求めた予測位置ずれ量、 N はユーザの指定する係数值、 (x_{ik}, y_{ik}) は先行探索による探索中心を示す。図 4-4 の例では、 $\max_i (x_{ik})$ は x_{14} 、 $\min_i (x_{ik})$ は x_{24} 、 $\max_i (y_{ik})$ は y_{34} 、 $\min_i (y_{ik})$ は y_{RP4} である。論理和型は先行探索の照合位置に基づく指向性をもった探索領域の適応的な拡張を目指している。先行探索の参照数について考える。例えば動画探索などにおいては、時間の経過にしたがって参照数を限定して用いる場合がある。一方、本手法では静止画像を対象とする探索問題を扱うためその参照数は限定せずに関心パタンの数としている。なお、この参照数を最適に設定する問題については今後の課題としたい。

4.2.6 信頼区間型拡張

パタンの配置には様々な要因による位置ずれがあり、このずれ量には関心パターンごとに個別の配置特性があることを配慮した方法である。例えば PCB に配置する電子部品では部品を PCB に搭載するマウンタの機械的特性あるいは基板の特性に依存する場合が多い。よって部品の位置ずれの傾向を標準偏差によって求め傾向を予測位置ずれ量として用いて探索領域の大きさを決定する手法である。具体的には予測位置ずれ量の大きさ σ を N 倍して用いる。

一般的には照合が成功しなかったとき、その直後に探索条件を変更したり、別のバックアップアルゴリズムを用意したりすることが多い。信頼区間型拡張は、多段試行で登録した関心パタンの探索が一巡したあとで探索が繰り返されたパタンの探索を行うときに N を増やして探索領域を拡張することによって探索の信頼性を確保している。信頼区間型は無指向性の拡張手法である。

4.2.7 複合型拡張

この手法は前述の2つの手法を同時に適用して探索を進めるものである。

探索にあたっては基本探索領域に予測位置ずれ量 σ に N 倍の値を与えて論理和型で1巡目の試行として探索を進め、探索領域の拡張に関する手法は論理和を用いることによって関心パタンの誤差によって逐次探索領域は拡大して探索を行っていき、照合が未検出となった関心パターンについてはそのときの探索領域の大きさを記憶して、すべての探索の最後に繰り下げて2巡目の試行とする。

2巡目の試行に繰り下げられた関心パターンは1巡目の試行以降に論理和で探索領域が拡張されている可能性があるため、記憶された探索領域の大きさと現在の大きさと比較して拡張されていれば探索領域の大きさを維持し、同じときには信頼区間型拡張によって探索領域を拡張して探索を行う。

4.3 PCB による検証実験

実際の工業製品の画像データを元に探索の実験を行った。複雑な背景を有し関心パタン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位置ずれなどの検査問題について検証した。10枚の同一市販品のPCBを用いて、同一の照明条件下で撮像し観測画像データを得て、うち1枚を登録する関心パタンの切り出し用、残りの9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）を含むようななるべく小さな画像とした。基板上のシルク印刷やレジスト塗布などは位置ずれが大きいことが知られており、これらを可能な限り含まないことが肝要である。実験では20個を選択し、探索順序は10通りのランダム順とした。細部について数値を比較すべき実験においては、同じランダム値を使用した。例えば、各表のR1はR-J-S-N-P-F-L-D-I-A-M-Q-H-C-E-K-O-B-G-T, R2はP-A-D-J-I-C-F-B-T-N-M-H-O-E-L-R-G-K-Q-Sなどとして統一した。さらに、予測位置ずれ量の大きさの昇順および降順の2通りを加えて全12通りとした。図4-5は実験に用いたPCB上の部品配置領域(760×760)および大きさの異なる関心パタンの位置を示し、図4-6に関心パタンの画像とID付けおよび大きさを示す[81]。照合精度の確認に用いる真値は9枚すべてのPCBに対して20個の関心パターンを信頼性のあるアルゴリズムで照合して結果を目視によって確認し、実験では得られた照合位置と真値の差異が(0,0)であることを確認して厳格に評価した。照合手法として本実験

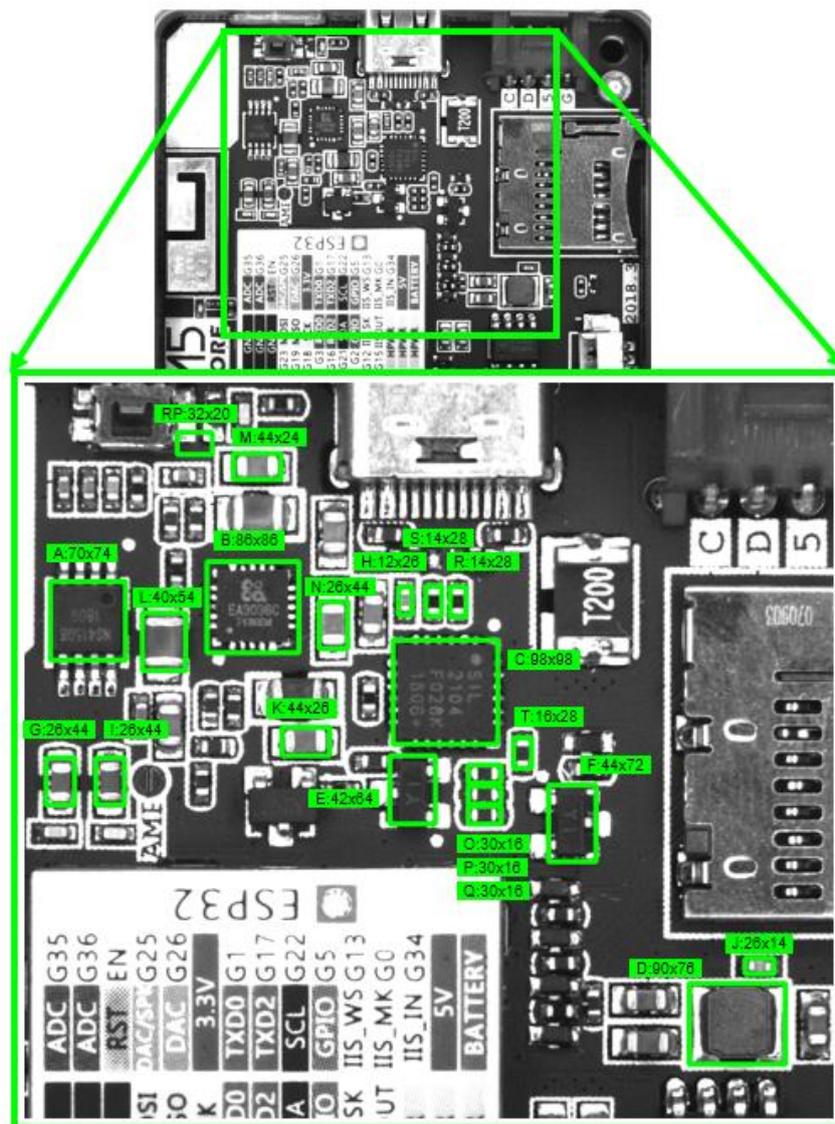


図 4-5 対象画像と選択された関心パタンの領域

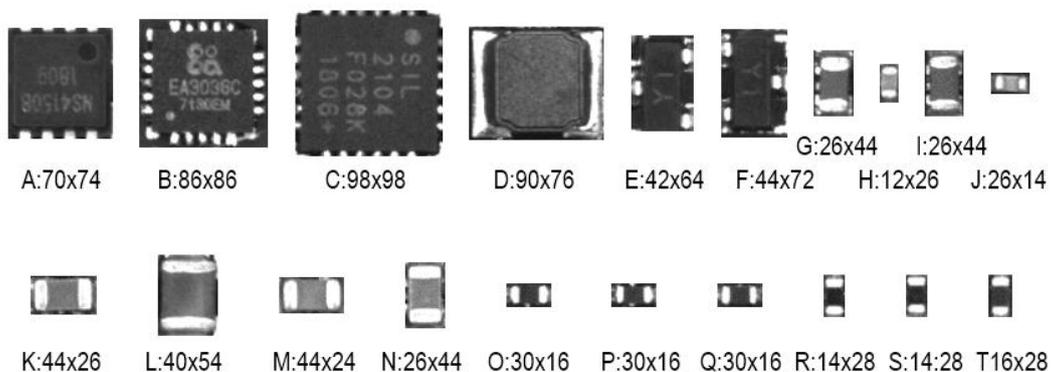


図 4-6 選択された関心パターン

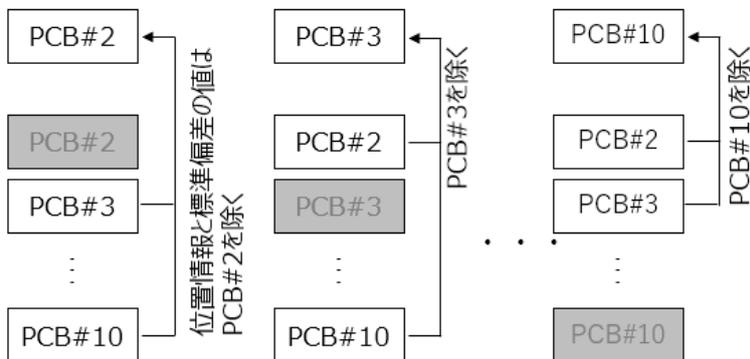


図 4-7 LOOCV 法 の 概 念 図

表 4-1 各パタン位置の標準偏差.

パタン ID	A		B		C		D		E		F		G		H		I		J	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
PCB#2	0.744	1.852	0.354	1.035	0.000	0.535	0.926	1.458	1.512	1.069	2.053	1.195	1.195	1.553	0.641	0.707	1.165	1.458	0.756	0.926
PCB#3	0.916	1.852	0.463	0.991	0.354	0.518	0.744	1.282	1.669	1.126	2.264	1.165	1.488	1.512	0.916	0.744	1.165	1.414	0.756	0.707
PCB#4	0.916	1.581	0.463	0.916	0.354	0.535	0.916	1.458	1.598	1.069	2.188	1.195	1.458	1.356	0.886	0.707	1.188	1.246	0.707	0.744
PCB#5	0.926	1.195	0.463	0.756	0.354	0.518	0.916	1.282	1.598	0.744	2.264	0.916	1.458	0.926	0.916	0.535	1.188	1.188	0.835	0.916
PCB#6	0.926	1.852	0.463	1.035	0.354	0.535	0.916	1.512	1.598	1.069	2.264	1.195	1.458	1.512	0.916	0.707	1.188	1.414	0.835	0.926
PCB#7	0.926	1.847	0.463	1.035	0.354	0.535	0.916	1.458	1.512	1.069	2.200	1.195	1.488	1.553	0.916	0.707	0.991	1.458	0.835	0.926
PCB#8	0.926	1.852	0.354	1.035	0.354	0.518	0.744	1.458	1.512	1.126	1.808	1.246	1.195	1.553	0.886	0.744	1.165	1.458	0.756	0.916
PCB#9	0.707	1.768	0.463	0.916	0.354	0.535	0.916	1.282	1.642	1.126	2.264	1.195	1.458	1.512	0.916	0.744	1.188	1.414	0.835	0.926
PCB#10	0.916	1.753	0.463	0.991	0.354	0.518	0.916	1.512	1.414	1.035	1.773	1.165	1.309	1.488	0.756	0.744	0.744	1.188	0.707	0.916

パタン ID	K		L		M		N		O		P		Q		R		S		T		平均	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1.690	1.126	0.926	1.982	1.309	1.188	1.309	1.685	0.707	0.926	1.061	0.744	1.061	0.835	0.756	0.707	0.463	0.926	0.641	1.069	0.963	1.019	
1.832	1.195	1.061	1.927	1.195	1.195	1.389	1.669	0.835	0.916	1.061	0.756	1.069	0.886	0.744	0.641	0.518	0.916	0.641	1.035	1.054	1.035	
1.604	1.126	1.126	1.768	1.408	1.035	1.246	1.408	0.756	0.744	1.061	0.744	1.069	0.835	0.744	0.518	0.518	0.744	0.535	0.835	1.037	0.963	
1.808	0.886	1.061	1.356	1.458	0.707	1.408	1.309	0.835	0.707	0.835	0.518	1.061	0.744	0.756	0.641	0.518	0.707	0.641	1.035	1.065	0.912	
1.832	1.195	1.165	1.927	1.488	1.188	1.408	1.685	0.835	0.926	1.061	0.744	1.061	0.886	0.756	0.707	0.463	0.926	0.641	1.069	1.081	1.061	
1.808	1.126	1.126	1.927	1.458	1.188	1.389	1.604	0.756	0.926	1.061	0.744	0.916	0.835	0.756	0.707	0.518	0.926	0.641	1.126	1.051	1.039	
1.458	1.126	1.126	1.996	1.309	1.195	1.061	1.669	0.707	0.916	0.835	0.756	0.886	0.886	0.756	0.707	0.463	0.916	0.463	1.126	0.938	0.992	
1.768	1.126	1.165	1.982	1.408	1.188	1.408	1.604	0.835	0.926	1.061	0.744	1.061	0.835	0.756	0.707	0.518	0.926	0.641	1.126	1.068	1.054	
1.604	1.126	1.061	1.885	1.488	1.195	1.246	1.553	0.756	0.916	0.926	0.756	0.916	0.744	0.463	0.641	0.518	0.916	0.535	1.035	0.943	0.981	

表 4-2 x と y の 2 乗和の標準偏差

パタン ID	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
PCB#2	3.982	1.196	0.286	2.982	3.429	5.643	3.839	0.911	3.482	1.429	4.125	4.786	3.125	4.554	1.357	1.679	1.821	1.071	1.071	1.554
PCB#3	4.268	1.196	0.393	2.196	4.054	6.482	4.500	1.393	3.357	1.071	4.786	4.839	2.857	4.714	1.536	1.696	1.929	0.964	1.107	1.482
PCB#4	3.339	1.054	0.411	2.964	3.696	6.214	3.964	1.286	2.964	1.054	3.839	4.393	3.054	3.536	1.125	1.679	1.839	0.821	0.821	0.982
PCB#5	2.286	0.786	0.393	2.482	3.107	5.964	2.982	1.125	2.821	1.536	4.054	2.964	2.625	3.696	1.196	0.964	1.679	0.982	0.768	1.482
PCB#6	4.286	1.286	0.411	3.125	3.696	6.554	4.411	1.339	3.411	1.554	4.786	5.071	3.625	4.821	1.554	1.679	1.911	1.071	1.071	1.554
PCB#7	4.268	1.286	0.411	2.964	3.429	6.268	4.625	1.339	3.107	1.554	4.536	4.982	3.536	4.500	1.429	1.679	1.536	1.071	1.125	1.679
PCB#8	4.286	1.196	0.393	2.679	3.554	4.821	3.839	1.339	3.482	1.411	3.393	5.250	3.143	3.911	1.339	1.268	1.571	1.071	1.054	1.482
PCB#9	3.625	1.054	0.411	2.482	3.964	6.554	4.411	1.393	3.411	1.554	4.393	5.286	3.393	4.554	1.554	1.679	1.821	1.071	1.125	1.679
PCB#10	3.911	1.196	0.393	3.125	3.071	4.500	3.929	1.125	1.964	1.339	3.839	4.679	3.643	3.964	1.411	1.429	1.393	0.625	1.107	1.357

では工業的によく利用されていると思われる SAD を用いた。SAD では両画像の全画素値における平均絶対値差を、正規化し 0.0~1.0 の範囲に収めた。1) 類似度が最大を示す位置において 2) ピ

表 4-3 実験 1 の照合結果 (固定探索領域)

(a) 成功数と失敗数

順序	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	昇順	降順
1回目	OK	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155
トライ	NG	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

Rx: ランダム順

(b) 処理時間 単位 : ms

順序	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	昇順	降順	平均
PCB#2	5.297	5.298	5.308	5.293	5.294	5.296	5.303	5.298	5.282	5.302	5.329	5.309	5.301
PCB#3	5.280	5.316	5.312	5.284	5.311	5.284	5.288	5.313	5.285	5.285	5.315	5.302	5.298
PCB#4	5.301	5.298	5.321	5.273	5.295	5.292	5.288	5.305	5.313	5.285	5.305	5.291	5.297
PCB#5	5.290	5.287	5.315	5.299	5.294	5.312	5.301	5.300	5.294	5.293	5.330	5.307	5.302
PCB#6	5.298	5.305	5.313	5.290	5.302	5.287	5.299	5.321	5.305	5.287	5.322	5.293	5.302
PCB#7	5.273	5.314	5.318	5.293	5.300	5.287	5.284	5.296	5.302	5.275	5.339	5.310	5.299
PCB#8	5.292	5.292	5.337	5.287	5.307	5.310	5.277	5.293	5.300	5.283	5.336	5.312	5.302
PCB#9	5.312	5.283	5.325	5.293	5.293	5.308	5.325	5.317	5.300	5.292	5.308	5.304	5.305
PCB#10	5.289	5.314	5.308	5.304	5.302	5.287	5.316	5.313	5.285	5.301	5.315	5.310	5.304

Rx: ランダム順

ーク条件を満たす 3) 正規化類似度の値が判定閾値 0.7 以上という 3 条件が成立する位置を探索位置とした。予測位置ずれ量は各 PCB に配置された 20 個の対象パタンの位置について RP を基点とした位置の標準偏差を求めた。さらに LOOCV 法 (leave-one-out cross-validation) を用いて各 PCB の予測位置ずれ量を求めた。この方法は 1 つのサンプルを検証用とし残りを学習用とすることによりサンプル数が少ないときに多くの検証をすることができる方法であり、図 4-7 に示すように対象とする PCB の予測位置ずれ量をそれ以外の PCB のパターン位置から得ることにより検証回数を増やした。本方式を用いて PCB ごとの予測位置ずれ量を PCB#2~#10 を求めた結果について各軸方向の (σ_x) と (σ_y) を表 4-1 に示しパタンの位置ずれ量 (σ) を表 4-2 に示す。PCB によって部品の配置誤差が違いため部品の位置ずれ量の昇順・降順 (探索実験で使用) が PCB ごとに若干異なる。次節に提案手法を検証するための実験とその結果を示す。成功した照合についてはパターンが各 PCB の電子部品ごとに求めた真値と差異がないことを確認し失敗したものは誤照合ではなく未照合であったので照合の信頼性は確保できた。

4.3.1 実験 1, 固定探索領域

提案手法を全く適用しない探索として固定探索領域による探索を行った。実験の条件は 1) 対象パタンの直前の照合位置に基づいた直前探索による探索領域の設定[75], 2) 5×5 の固定領域, 3)

多段試行を行わないとした。成否の数を表 4-3 (a) に、探索時間を表 4-3 (b) に示す。この結果を基準として各手法による探索実験を行い検証用に用いた。

4.3.2 実験 2, 論理和型拡張

実験条件は 1) 先行探索の結果を用いる論理和による探索領域の設定, 2) 先行探索の利用数はすべてを利用, 3) 基本探索領域は 5×5 の固定領域, 4) 多段試行は行わないこととした。表 4-4 (a) は照合成否を示し, 表 4-4 (b) は探索時間を示す。探索順序をランダムとしたとき 3 つの探索順 (RND1, 5, 7) ですべての探索に成功した。図 4 - 8 に先行探索の結果に基づいた論理和型の探索領域が求めるときのベクトル (d_{ij}) , 数字は探索順序を示し, 図 4 - 9 に照合した位置の例について示す。また図 4 - 10 は実際に探索領域が拡張される例を示す。#6 はパタンの配置誤差が少ないため拡張が小さく, #7 は大きい例である。また#5 は偏りが大きく上方向に, #8 は左方向に探索領域が拡張されていることがわかる。

表 4-4 実験 2 の照合結果 (論理和型探索領域)

(a) 成功数と失敗数

順序	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	昇順	降順
1回目 OK	180	179	178	178	180	176	180	176	171	177	179	168
探索 NG	0	1	2	2	0	4	0	4	9	3	1	12

Rx: ランダム順

(b) 処理時間 単位 : ms

順序	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	昇順	降順	平均
PCB#2	8.442	7.451	8.273	8.447	8.441	8.352	7.723	8.255	7.909	8.431	7.528	7.900	8.096
PCB#3	8.471	7.402	8.242	8.464	8.451	8.357	7.705	8.120	7.918	8.416	7.604	7.938	8.091
PCB#4	8.500	7.397	8.207	8.475	8.467	8.427	7.645	8.142	7.897	8.344	7.531	7.967	8.083
PCB#5	8.450	7.499	8.264	8.433	8.436	8.341	7.728	8.192	7.899	8.331	7.503	7.882	8.080
PCB#6	8.456	7.415	8.266	8.497	8.426	8.340	7.676	8.179	8.018	8.325	7.582	7.952	8.094
PCB#7	8.500	7.402	8.212	8.441	8.499	8.425	7.681	8.154	7.910	8.526	7.505	7.994	8.104
PCB#8	8.447	7.471	8.215	8.453	8.454	8.345	7.700	8.137	7.900	8.358	7.510	7.872	8.072
PCB#9	8.475	7.413	8.274	8.496	8.443	8.413	7.661	8.203	7.942	8.335	7.550	7.932	8.095
PCB#10	8.457	7.406	8.237	8.424	8.507	8.427	7.648	8.145	7.901	8.386	7.518	8.012	8.089

Rx: ランダム順

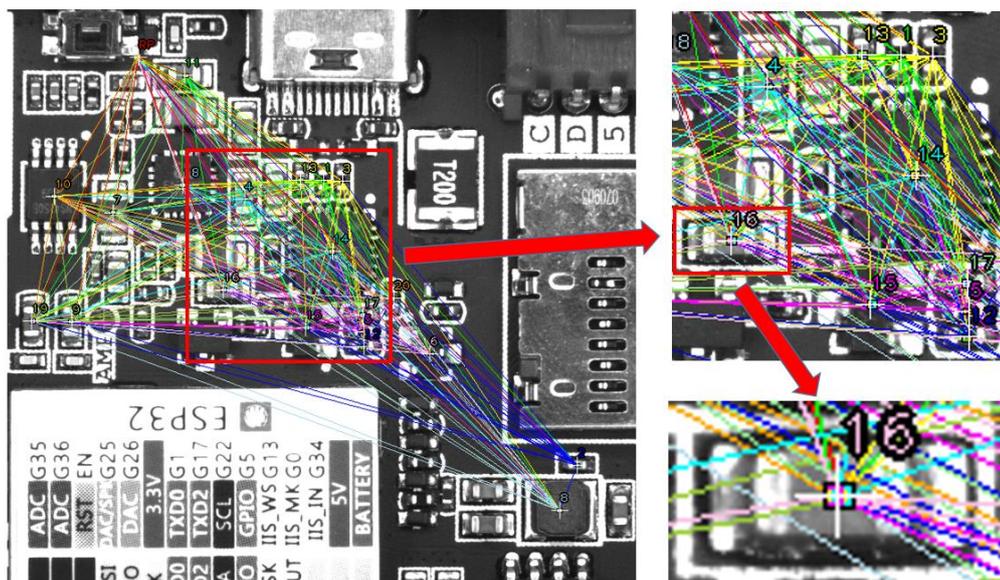


図 4-8 先行探索によるベクトルと各照合結果と論理和型探索領域

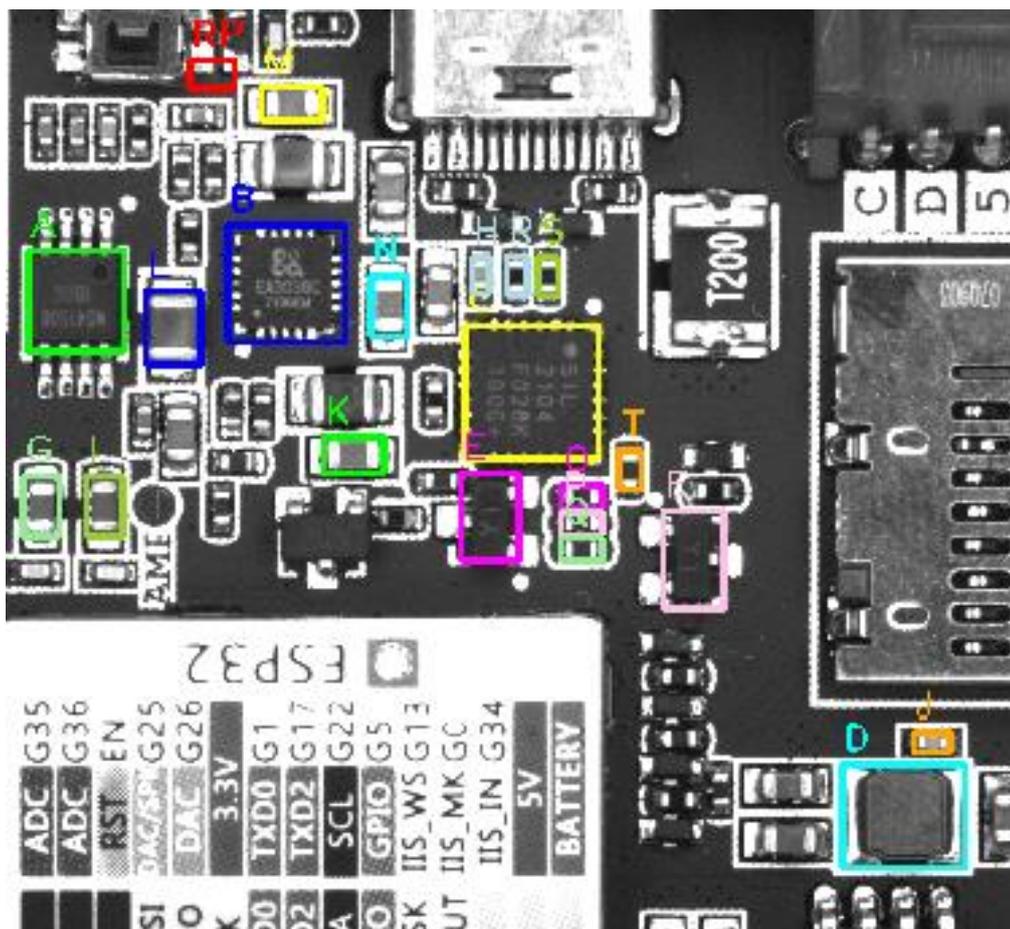


図 4-9 全ての照合結果

4.3.3 実験 3, 信頼区間型拡張

探索領域の大きさを予測位置ずれ量に基づいて決定し失敗したものを多段試行する手法を用いた。実験の条件は 1) 直前の成功探索に基づいた探索領域の位置, 2) 探索領域の大きさは予測位置ずれ量, 3) 照合失敗は探索の最後に繰り返し下げて多段試行を行う方法で探索実験を行った。パラメタ N の決定については事前に得られた予測位置ずれ量の大きさと試行回数をどの程度に設定するかによって決めることができる。 N を大きく取りすぎると探索範囲が広くなり、小さく取ると多段試行の回数が増えていずれの場合においても処理時間が長くなる。しかし、課題ごとに適当な値があると思われるので一般論として以下のように考える。予測ずれ量を位置のばらつきの標準偏差 (σ) によって求めているので、例えば 3σ (99.7%) の範囲について 2 回の試行で位置を得ることを期待するとき $N = 1.5, 3.0, 4.5 \dots$ とし、3 回のときは $N = 1.0, 2.0, 3.0 \dots$ とすることが望まれる。ここでは手法の振舞いについてその傾向を顕著にするため、6 回の試行とするためにパラメタ N

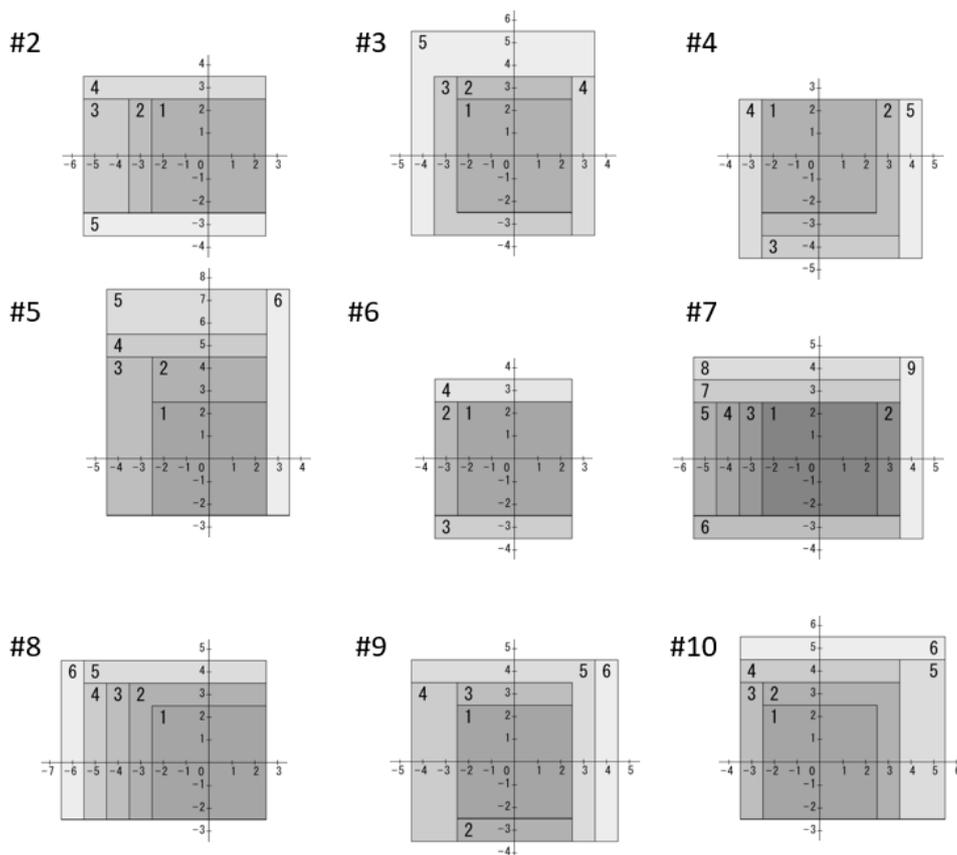


図 4-10 探索領域が拡大される様子
探索順序は R7 (#XX : PCB ID)

の初期値を 0.5 とし、試行ごとに 0.5 ずつ増加し最大 10 回まで試行した。表 4-5 (a) は照合の成否、(b) は探索時間を示す。R10 においては多段試行を 9 回まで繰り返して照合可能となったものが 1 パタンあったが、この関心パターンは最大の位置ずれ量をもつことがわかった。

4.3.4 実験 4, 複合型拡張

ここまでは提案した個別の手法に着目して実験をしてきたがこれらの機能を組合せて探索を行うことにより手法を適用した効果を検証するための実験を行った。実験の条件は、1) 探索領域は実験 3 と同様に 0.5 step, 2) 探索過程での領域の位置と大きさは先行探索による論理和, 3) 探索

表 4-5 実験 3 の照合結果 (信頼区間型)

(a) 成功数と失敗数

探索順序		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	昇順	降順
1回目	OK	87	88	87	82	84	90	89	83	89	90	82	80
	トライ NG	93	92	93	98	96	90	91	97	91	90	98	100
2回目	OK	51	50	58	56	63	35	51	63	39	43	51	51
	トライ NG	42	42	35	42	33	55	40	34	52	47	47	49
3回目	OK	27	20	18	25	14	23	24	20	33	16	41	33
	トライ NG	15	22	17	17	19	32	16	14	19	31	6	16
4回目	OK	10	14	11	9	12	23	12	5	10	26	1	11
	トライ NG	5	8	6	8	7	9	4	9	9	5	5	5
5回目	OK	2	4	3	2	3	6	2	5	5	1	3	2
	トライ NG	3	4	3	6	4	3	2	4	4	4	2	3
6回目	OK	0	0	0	3	0	1	0	2	3	2	0	0
	トライ NG	3	4	3	3	4	2	2	2	1	2	2	3
7回目	OK	2	1	3	2	3	1	1	2	1	1	1	2
	トライ NG	1	3	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
8回目	OK	1	3	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
	トライ NG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9回目	OK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	トライ NG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
全ての探索計	OK	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
	NG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Rx: ランダム順

(b) 処理時間 単位 : ms

順序	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	昇順	降順	平均
PCB#2	5.850	4.694	5.560	5.742	5.156	6.783	6.491	6.645	6.674	6.681	4.766	5.912	5.913
PCB#3	5.833	4.674	5.561	5.777	5.157	6.853	6.522	6.611	6.686	6.639	4.800	5.970	5.924
PCB#4	5.894	4.662	5.613	5.740	5.146	6.859	6.471	6.671	6.679	6.684	4.798	5.978	5.933
PCB#5	5.836	4.694	5.548	5.743	5.150	6.801	6.496	6.643	6.673	6.645	4.806	5.945	5.915
PCB#6	5.831	4.649	5.601	5.734	5.133	6.779	6.490	6.619	6.673	6.620	4.805	5.964	5.908
PCB#7	5.835	4.695	5.572	5.741	5.177	6.844	6.506	6.667	6.687	6.644	4.822	5.976	5.930
PCB#8	5.850	4.709	5.585	5.762	5.127	6.849	6.507	6.668	6.686	6.635	4.793	5.981	5.929
PCB#9	5.862	4.694	5.595	5.715	5.128	6.847	6.485	6.625	6.717	6.597	4.778	5.967	5.918
PCB#10	5.837	4.633	5.586	5.755	5.138	6.790	6.499	6.635	6.666	6.636	4.773	5.992	5.912

Rx: ランダム順

表 4-6 実験4の照合結果 (複合型)

(a) 成功数と失敗数

探索順序	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	昇順	降順
1回目 OK	107	102	108	103	106	108	107	104	103	108	108	101
トライ NG	73	78	72	77	74	72	73	76	77	72	72	79
2回目 OK	45	49	48	48	59	34	27	65	45	43	59	43
トライ NG	28	29	24	29	15	38	46	11	32	29	13	36
3回目 OK	26	28	24	29	14	33	43	11	31	29	13	35
トライ NG	2	1	0	0	1	5	3	0	1	0	0	1
4回目 OK	2	1	0	0	1	5	3	0	1	0	0	1
トライ NG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
全ての探索計 OK	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
NG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Rx: ランダム順

(b) 処理時間 単位 : ms

順序	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	昇順	降順	平均
PCB#2	6.280	6.110	7.350	7.166	6.988	6.702	6.970	9.213	8.623	8.410	6.244	6.940	7.250
PCB#3	6.330	6.107	7.355	7.236	7.008	6.751	6.929	9.180	8.677	8.429	6.175	7.013	7.266
PCB#4	6.296	6.095	7.359	7.187	7.015	6.713	6.949	9.265	8.615	8.459	6.199	7.025	7.265
PCB#5	6.224	6.101	7.274	7.193	7.041	6.697	6.948	9.199	8.625	8.341	6.174	7.030	7.237
PCB#6	6.199	6.097	7.319	7.125	6.962	6.698	6.930	9.212	8.587	8.323	6.182	6.937	7.214
PCB#7	6.304	6.111	7.345	7.192	7.047	6.637	6.910	9.265	8.679	8.394	6.207	7.062	7.263
PCB#8	6.243	6.104	7.334	7.232	7.023	6.723	6.916	9.257	8.573	8.389	6.195	7.025	7.251
PCB#9	6.268	6.075	7.266	7.184	6.980	6.696	6.920	9.225	8.605	8.403	6.164	6.934	7.227
PCB#10	6.207	6.118	7.299	7.178	6.971	6.708	6.922	9.199	8.631	8.377	6.151	7.013	7.231

Rx: ランダム順

が失敗したものは多段試行する方法を適用した。本実験での多段試行のときの探索領域の大きさは、1) 先回の探索が失敗しても以降に続く他の探索の照合位置に基づいた論理和によって領域が拡張されていれば係数 N を維持し、2) 同じ大きさだったときには N に 0.5 を加算する、3) 以降 N 巡目の試行を繰り返したときも先回の探索領域の大きさと現在の大きさを比較し同じであれば 0.5 ずつ増やす方法とした。

表 4-6 (a) は照合の成否、(b) は探索時間を示す。図 4-11 は論理和によって探索領域が拡張する様子を 1 巡目の試行および以降の試行を合わせて示し、[●]印は照合が成功したときの探索領域の大きさを示す。1 巡目の試行では乱数によって決められた順序にしたがって探索が進められるが、2 巡目の試行以降では 1 巡目で失敗したものが多段試行によって探索が継続されている。探索実験結果では多段試行を 3 回繰り返すすべての探索が成功し 1 PCB あたり平均 7.2msec で照合できた。グラフでは多段試行の進みが 2 グループに分かれている。これはグループ A の予測位置ずれ量 (σ) が 0.5 未満のため探索領域の幅または高さが 1 となってしまうため、当該位置に対象パターンがある場合のみ照合が可能であるため多くのパターンが照合できなかったことに起因する。

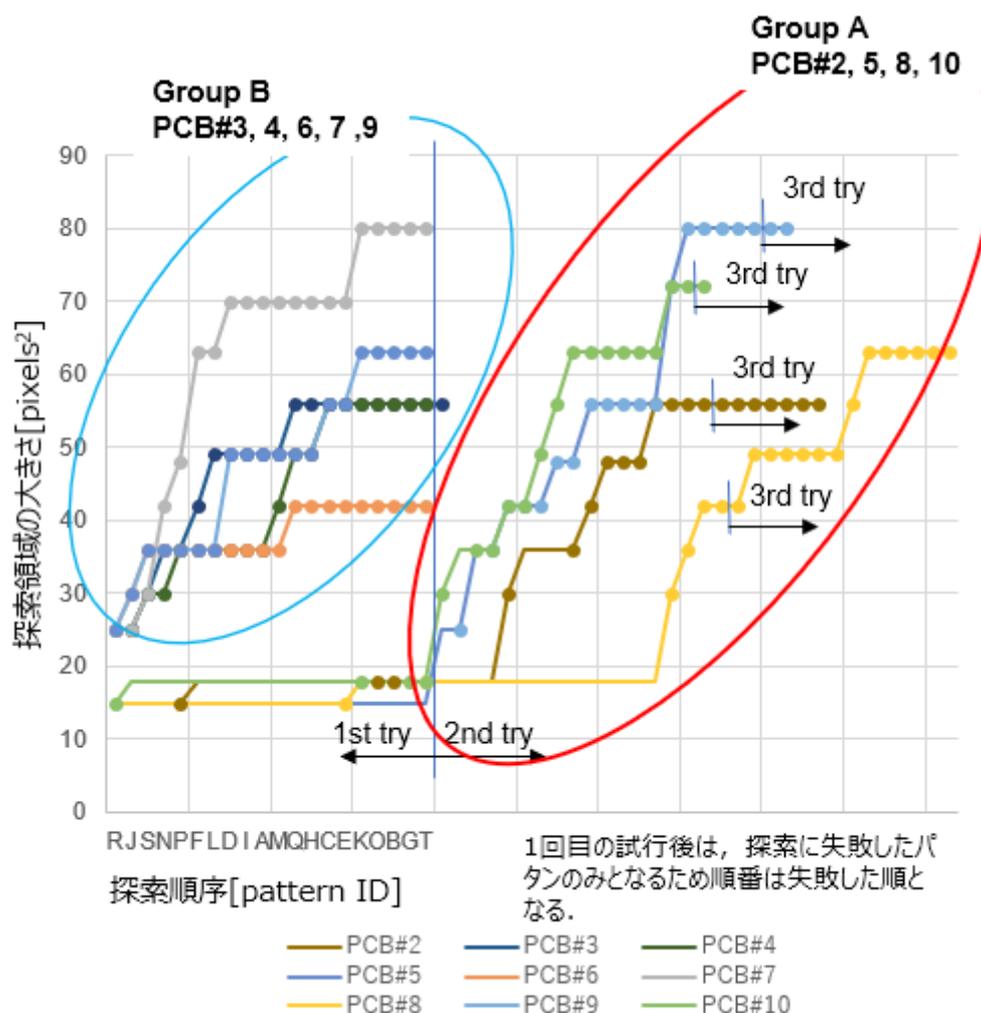


図 4-11 論理和と信頼区間型による探索領域拡大の遷移 (探索順序は R3, 拡大ステップは 0.5)

4.3.5 実験の評価

本論文で提案した探索領域を決定する 2 つの手法を単独で適用したものとこれらを複合したもの、これらの手法を全く使わないものの 4 通りの実験を行った。各実験において探索順序を考慮した関心パタンの総数は 2160 個 (探索対象の PCB が 9 枚, PCB 1 枚あたり 20 個の関心パターン, 探索順序 12 通り) を用いた。探索順序に関する実験条件は、前述のとおり乱数によって決められた順序が 10 通りに予測ずれ量の昇順と降順を加えて全 12 通りとした。

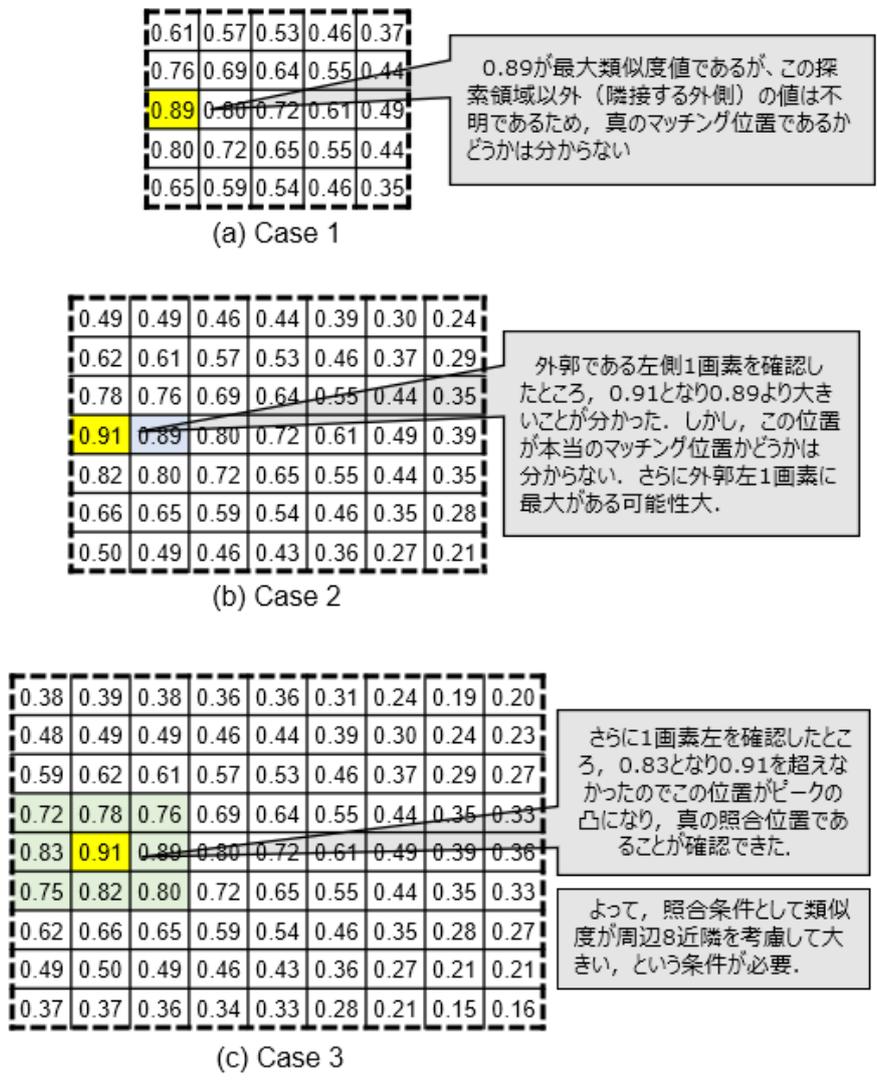


図 4-12 8 近傍検討の類似度分布
 マス目は画素、数値は類似度、破線矩形は探索領域を表す
 黄色の画素は探索領域内で類似度が最大となる箇所を表す

実験 1 は提案手法を用いない固定探索領域 5×5 として実行され探索実験の基礎的な振る舞いを示している。実験 2 は論理和型による拡張を適用したもので、実験 1 と比較して探索成功数が増え信頼性が向上した。実験 3 は信頼区間型として基本探索領域の大きさを予測位置ずれ量を用い未検出となったときには多段試行するようにし、すべての探索に成功し信頼性が向上した。実験 4 では 2 つの提案手法を適用した複合型として探索の振る舞いがさらに向上するかを検証した。すべての対象パターンを照合することができた。また、実験 3 および 4 においては、N に適当な値（この実験では 0.5 step という小さめな値）を与えても照合できることが検証できた。

実験では探索領域は 0.5 step を用いて進めたが 図 4 - 11 の Group A ように 1 巡目の試行では

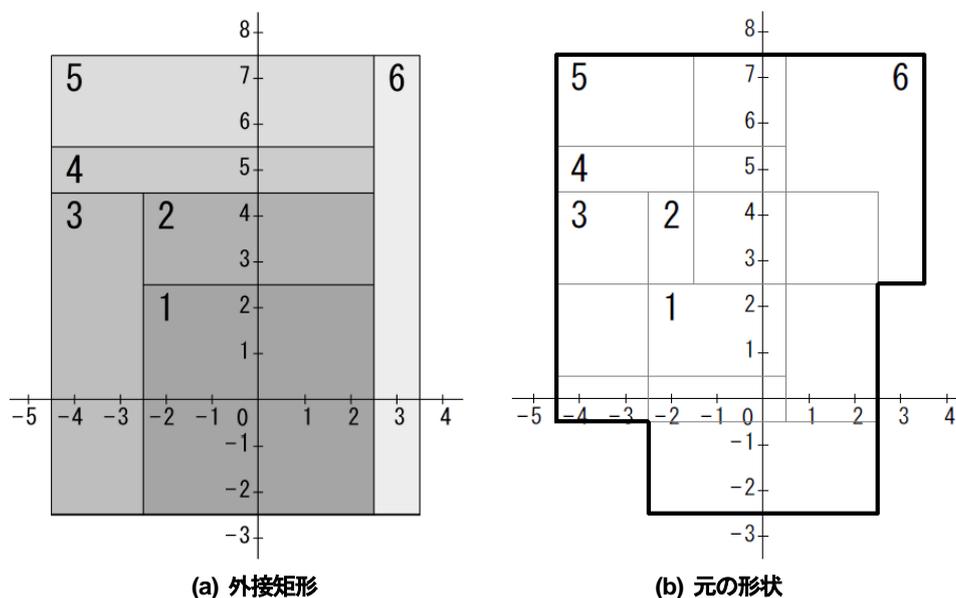


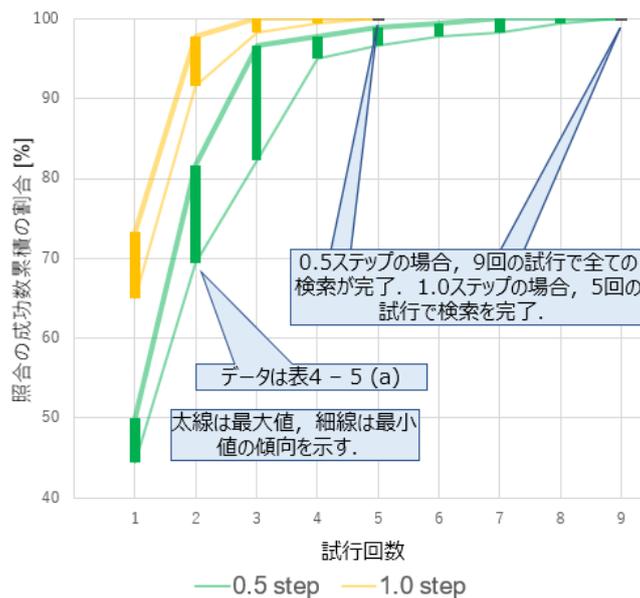
図 4-13 論理和による探索領域かが拡大される例
PCB ID#7 を用い探索順序は R7, 初期探索領域は 5 × 5 画素

照合に失敗した例が多数みられ 2 巡目の試行以降の多段試行によって照合した例が多くある。ここでの問題は 0.5 step としたことが原因であるため、 $N = 1.0, 2.0, 3.0, \dots$ (1.0 step と呼ぶ) とした場合についても検証したいと考え、この詳細については次節において検討する。

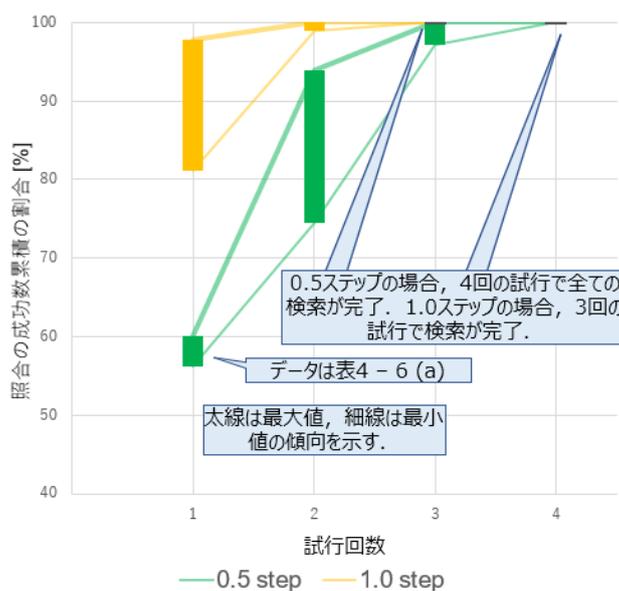
4.4 考 察

4.4.1 照合判定

照合判定の条件として、「類似度が最大」と「ピーク条件」の 2 条件を満たす位置を照合位置とした。この条件を用いたのは、実験の過程において類似度が最大のみによる判定では正しい位置が照合できなかったことに起因する。図 4-12 に説明を記す。(a) Case 1 では探索領域を 5 × 5 画素とし照合操作を行ったとき、領域内での最大類似度は 0.89 であるが真の照合位置ではないことが判明した。続いて(b) Case 2 では上下左右に 1 画素拡張したとき、0.89 の左に 0.91 がありこちらの方が、類似度が高い。ここでさらに左方に類似度最大がある可能性が考えられるので確認する必要がある。(c) Case 3 ではさらに 1 画素拡張したところ、0.91 がこの領域での最大であるというこ



(a)実験 3



(b) 実験 4

図 4-14 実験 3 (信頼区間型) と実験 4 (複合型) 探索結果
多段試行の倍数は 0.5 と 1.0

とが分かった。これらにより類似度が最大となりかつ周辺 8 近傍が小さいという条件とすることで信頼性の向上を図った。

4.4.2 先行探索の参照数

先行探索の参照数について本提案ではすべての照合結果を用いて自身の探索領域とした。しかし、1) 多数の関心パターンを登録し一連の探索の後半では先行探索の数が増えるにしたがい計算コストも増えてしまったとき、2) 照合位置の偏差の大きいものの連鎖によって論理和領域が過大になり信頼性が低下する可能性も考えられる。このような事態が起こったときに、先行探索の数を限定したり位置ずれが大きいものを除外したりする方策について配慮が必要になると思われる。しかし上記 2) では偏差が大きかったものについて、どのような判断基準をもって採用の可否を行うかについては容易ではないと思われる。よって参照数の決定および例外値を除外する手法については今後の課題としたい。

4.4.3 論理和領域の外接矩形

論理和型拡張において探索領域を外接矩形とした。図 4-13 に実際に単純な論理和領域と外接矩形についてどの程度の差が生じるのかについて示す。(b) において灰色の矩形は領域拡張の過程で先行探索の結果に基づいて指定された領域、黒の多角形は単純な論理和領域である。本実験においてこの差は探索にほとんど影響がないと思われ、外接矩形を用いることが可能であると考えられる。

4.4.4 多段試行の倍数 N の扱い

本提案では基本探索領域の大きさを決める手法として、あらかじめいくつかの製品に対して試験的に関心パタンの位置を測定して、そこで得られた結果ばらつきから信頼区間として標準偏差 σ を用いた。実験 3 と 4 で提案手法が可能であるか否かについて検証するために倍数 N (ステップ) に 0.5 step を用いて検証実験を進めた。しかしながら、ステップの取り扱いについてはさらに検証する必要があると考える。生産の工程において一般的に使われる標準偏差について、その整数倍となる値として 1.0, 2.0, 3.0 のように使われる場合が多い。これに倣って図 4-14 に 0.5 step と 1.0 step としたとき、信頼区間型拡張 (実験 3, 図 4-14 (a)) と複合型拡張 (実験 4, 図 4-14 (b)) 探索を行ったときの多段試行のステップと照合成功数の累積を示す。横軸には多段試行の N 巡目の試行の回数を表し縦軸はすべての関心パターンに対する成功したパターン数の累積の割合を示す。結果としては、実験 3 では多段試行の回数が 9 回 (0.5 step) から 5 回 (1.0 step) に減少し、実験 4 では 4 回 (0.5 step) から 3 回 (1.0 step) に減少した。また表 4-7 に実験 1 と 2 と、1.0 step の

ときの実験 3 と 4 の処理時間とコストについて結果をまとめ、図 4 - 15 には各 PCB の探索が進むにしたがって探索領域の大きさの推移を照合の成否について 図 4 - 11 と同様に示す。表 4-7 のコストパフォーマンスは成功率を処理時間（単位：msec）で除したものである。図 4-11 と 15 を比較してステップの取り方によって試行回数が増えることは推測できる。一般的な知識として配置の揺らぎが正規分布であるとすれば、 1.0σ のとき 68.3%、 2.0σ で 95.4%の探索対象が含まれると考えられるので $1.0\sim 2.0$ 程度が適当ではないかと思われる。しかし計算コストについて N を大きく設定した場合には探索領域が大きくなり論理和拡張が有効に働かず処理時間の増大し、小さく設定（本実験の $N = 0.5$ ）したときには 1 回目トライでの失敗が多くなり多段試行の回数が増え処理時間が増えると推測されるものの、適切な値については先行探索の結果が各々の対象によって異なり結果に基づく探索領域の変化により容易には推測できない。このステップを決める方法はどのよ

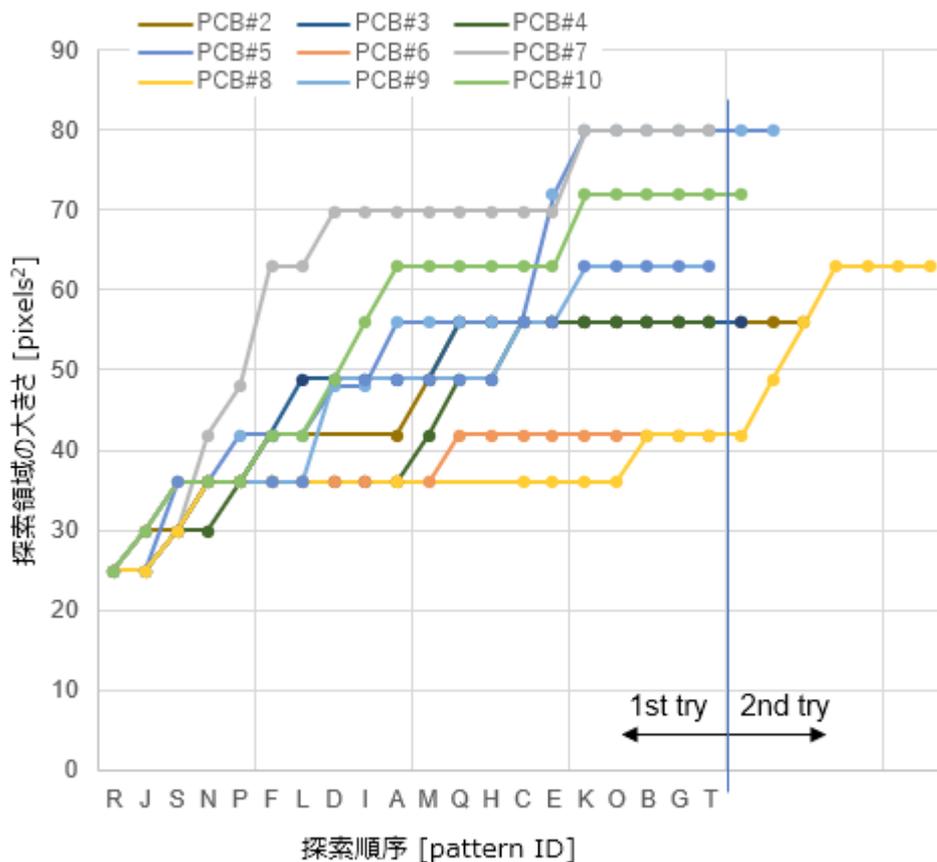


図 4-15 論理和型と信頼区間型による探索領域拡大の遷移 (探索順 R3, 1.0 ステップの例)

うな系列を設定することによって効率化が図れるのかという問題については今後の研究課題とした。

4.4.5 他の照合アルゴリズム

別の照合アルゴリズムの例として、実産業界で多く用いられる正規化相関を用いて前節の実験 3 および 4 のみを同一の実験仕様において実施した。表 4-8 に結果を示す。処理時間は用いるアルゴリズムによって異なるもののその傾向は予測位置ずれ量と論理和領域を併用した実験 4 が実験 3 に比較して良い結果を示した。効率化の比率もそれぞれの実験 3 を基準として約 1.3 倍であった。提案手法は探索領域を適切に決定する枠組みであるため様々な照合アルゴリズムに対して利用可能な処理が実現でき、また信頼性の高い効率的な探索が可能であることを実験によって検証できた。

4.5 ま と め

本研究では、設計上の位置があらかじめ既知の工業製品における位置決めの問題において、信頼性を維持しながら効率的に探索し、また探索順序に拘束されない手法を提案した。基本的な戦略として探索領域の大きさを決める 2 つの手法として、1) 先行探索の照合位置に基づいて示される領域による論理和型拡張、2) 予測位置ずれ量を利用した基本探索領域の大きさを決める信頼区間型拡張、および両者を用いる複合型拡張を提案した。また位置ずれが大きく照合に失敗した関心パタンの探索については、探索順の最後に繰り返し実施する多段試行の方法を提案した。これらの手

表 4-7 照合結果のまとめ

手法	論理和	信頼区間	成功数	成功率	処理時間 [msec]	CP	CP比
実験 1	---	---	1860	86.11%	5.301	0.162	1.000
実験 2	○	---	2122	98.24%	8.089	0.121	0.748
実験 3	---	○	2160	100.00%	8.654	0.116	0.711
実験 4	○	○	2160	100.00%	6.586	0.152	0.935

CP : コストパフォーマンス / CP比 : 実験 1 を基準 / 全探索数 : 2160

表 4-8 SAD と NCC による照合結果の比較

	手法	成功数	成功率	処理時間 [msec]	CP	CP比
SAD	実験 3	2160	100.00%	8.654	0.116	1.000
	実験 4	2160	100.00%	6.586	0.152	1.314
NCC	実験 3	2160	100.00%	21.363	0.047	1.000
	実験 4	2160	100.00%	16.519	0.061	1.293

CP : コストパフォーマンス / CP比 : 各々の実験 3 を基準 / 全探索数 : 2160

法の有効性を検証するために実際の工業製品である PCB に配置された電子部品を関心パターンとして提案手法を適用した探索の実験を行った。結果としては照合精度を保ちつつ探索領域を適切に設定することによってすべての関心パタンの照合ができたことによって信頼性の高い照合ができた。また、探索領域を先行探索の位置ずれを参照して拡張したことにより効率的に探索できることを確認した。

本研究の検証においては照合法に主に SAD を利用したが、本提案は探索領域の位置と大きさをいくつかの戦略に基づいて的確に調整する手法であるので様々な照合アルゴリズムに適用することが可能と考えられる。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かと思われる。

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。

また本研究での対象としては剛体 (PCB に搭載された電子部品) をターゲットとしたが、剛体でないもの、例えば WEB 材と呼ばれるシート状に基材に加工されたもの (樹脂フィルムへの加工、布への印刷など) で一定範囲内の伸縮があるようなものについても有効に機能すると思われるので、今後生産現場においてこのような課題が生まれたときにその実用性について検証を進めたいと考えている。

第 5 章 研究のまとめ

本研究を遂行する過程において得られた知識・技術を整理するとともに遂行しながら気が付いたことおよび今後の研究課題についてまとめる。

5.1 研究より得られたこと

本研究を進める過程で静止画像における画像処理の探索領域に関する学問としての研究は見当たらないものの、筆者自身も画像システムの開発技術者として様々な経験を積みこれらに基づいて各々のシチュエーションに応じて工夫をして運用してきた。その長い間携わってきた中で探索領域の位置と大きさについてのアルゴリズム開発は多数扱ってきたがここに順序を関連付けて決定する手法について開発したことはなく、本研究の過程ではこれまでの経験を頼りにいろいろとアイデア出しながら開発を進めてきた。今回このような形で研究できたことはこれまでの経験をさらに広げるための一つとなり今後の研究開発に大きなプラスになったと思う。

5.1.1 CPU パワーと探索の効率化・信頼性

1990 年代、多くの研究開発者が実用的な速度で照合処理を実行できるように CPU の演算量を減らすためのアルゴリズムの工夫や専用の演算 IC を搭載した処理ボードを開発したりして効率化を進めてきた。しかし近年は高速 CPU と豊富なメモリにより演算量を減らさずとも効率化が進んできた。さらに演算能力に余裕が生まれたことによりさらなる信頼性の向上に目を向けられ、旧来のアルゴリズムに対して新たな機能を付加したり新しいロバストな照合アルゴリズム、例えば光量変化、遮蔽、対象の回転や拡大縮小などに対応できるものの研究開発が行われたりしたことにより照合の信頼性も向上してきた。

筆者自身は当時から画像処理に携わっており、その頃の処理は専用ボードやワークステーションで実行していたものから PC 単体で行うようになってきた時代であり、今から思えば当時の PC に搭載された CPU は非力で演算処理は遅くメモリも豊富でなかった[82]。参考までに表 5-1 に筆者が 90 年代後半から研究開発運用した PC の仕様を示す。このように画像に関わっていた過去について当時使用していた PC 環境 (CPU 性能, メモリ容量, データストレージ容量) について整理す

表 5-1 筆者の画像システム開発用 PC の歴史 (太字は現在も保有)

年	CPU	コア	クロック [Hz]	メモリ [Byte]	HDD [Byte]	OS
1992	Intel 80386DX+387	1	20M	4M	100M	MS-DOS
1993	Intel 80486DX	1	33M	8M	100M	MS-DOS
1995	Intel Pentium	1	90M	64M	250M	Windows 3.5
1996	Intel Pentium	1	166M	256M	512M	Windows 4.0
1998	Intel MMX Pentium	1	200M	256M	1G	Windows 4.0
1999	Intel Pentium III 750	1	750M	1G	2G	Windows 4.0
2000	Intel Pentium III 1000	1	1G	1G	8G	Windows 2000
2002	AMD Athlon XP (2000+)	1	1.6G	1G	40G	Windows 2000
2004	AMD Athlon XP (2600+)	1	1.9G	2G	120G	Windows XP
2005	AMD Athlon XP (3800+)	2	2G	4G	160G	Windows XP
2008	Intel Core 2 Duo (P8600) Note	2	2.4G	4G	512G	Windows XP
2010	Intel Core i5 (760)	4	2.8G	8G	1T	Windows XP
2011	Intel Core i5 (2400)	4	2.5G	8G	2T	Windows 7
2014	Intel Core i7 (4710MQ) Note	4	2.5G	8G	1T	Windows 7
2019	Intel Core i7 (9700K)	8	3.6G	16G	4T	Windows 10
2021	Intel Core i7 (1165G7) Note	4	2.8G	16G	1T	Windows 10

ると性能が大きく進化したことに改めて気づかされた。

近年、現場では多くの装置に画像処理システムが搭載され対象や用途に応じて多くの照合アルゴリズムがされているものの現場の知識不足により、これらに対して新たな課題である 1) 探索領域を適切に設定する手法により効率化と信頼性を向上させ、2) 画像処理の知識が十分でなくとも設定することができる手法の必要性が現場から要求されるようになった。ここで課題となるものが、1) 関心パタンの設定、2) 探索領域の方法、3) 照合アルゴリズムを最適に演算するためのパラメータ、これら 3 項目を適切に設定するための手法をどのようにするかが検討の材料となる。本研究では多くのシチュエーションで使用することができる探索領域の設定について多くの現場に適用できる手法として開発することが有効であると考え遂行してきたがこれらに類する先行研究は見当たらなかった。

5.1.2 見当たらない先行研究

現場での稼働前の初期設定としての探索領域を決定する手法について、多くの場合は位置と大きさを固定した領域を決めておいてその範囲内で探索を行う方法が用いられている。探索対象全体に位置ずれがあるような場合には、あらかじめ設けられているレジストレーションマークや位置の信頼性が高いパターンなどを探索し得られた照合位置から全体の位置を補正するための座標変換を行

って位置を補正するし大きさを固定したまま探索する方法が用いられている。また対象とする探索対象の一つ前の照合位置からのベクトルによって探索領域を決定するトラッキング探索を用いることもあるが、このときは信頼性を向上させるために対象の距離が近い順に探索を進めることにより誤差を少なくすることができるため探索順序に制限が生じてしまう。

本研究の過程において 1) 任意の順序で 2) 探索領域の位置と大きさを適切に決定する手法に関して先になされた研究や基本技術、具体的な応用技術について類似したものなどを含めて調査した。これらについての先行研究としては動画像における手法として自動車や無人搬送車などに取り付けられたカメラからの画像により移動先にある固定あるいは移動物体などの障害物など探索する Visual SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) の領域決定手法や固定カメラにおいて人流などを追跡するような移動物体を検出するときに用いる方法などは多数あり、静止画像については位置を求める手法に関して研究されたものはあるが任意の探索順序において領域の決定手法や信頼性を検討したのを見当たらず先行研究としての参考になる資料が得られなかったため新規性や独自性があり今回の研究のテーマとして適していると確信した。

5.1.3 研究に用いた検証用としての PCB

本研究では効率化と信頼性の向上について両立させる観点から着手し、PCB の部品探索を目的としてまず信頼性の向上に向けて対象部品と隣接部品の類似度とのマージンがどの程度確保できるのかについて検討した。電子部品の抵抗やコンデンサを PCB に配置した場合、対象とする部品の周辺に同じものが連続して配置される場合が多く対象と隣接の類似度マージンが確保できないことが判明した。また PCB に配置された部品の周囲には部品番号や型番を示すためのシルク印刷があり印刷位置が正確でなくずれがランダムに生じているため、印刷された記号や図柄をパターンと見てしまい関心パターンとの類似度マージンが小さくなる場合があり誤検出の原因となるためこれらも探索領域からできるだけ排除して信頼性を確保しなければならないことが分かった。

5.2 適用できる探索アルゴリズムの拡張

本研究では産業用の静止画の照合課題における探索の順序に拘束されることなく領域を適切に決定するためのアルゴリズムの提案であるため、様々な照合アルゴリズムに適用することが可能であると思われる。

5.2.1 他の照合アルゴリズムへの適用

順序依存絞込み探索の検証では OCM を用いて検証し、探索領域拡張による順序探索の検証では SAD を用いて検証したが、これ以外の照合アルゴリズムについて適用できるのかという課題についてさらに進める必要があると思われる。これらについては、今後の実現場での運用の際に本研究の成果を適用して検証を進めていきたい。

5.2.2 商用マシンビジョンライブラリへの適用

一般的に市販されている汎用画像処理システムにはボックスマシンビジョンと商用マシンビジョンライブラリの2種類があり、ボックスタイプは基本的なハードウェアとソフトウェアが筐体にインストールされており現場ですぐに運用できるため、ユーザは関心パタンの登録と探索領域などの設定を行うだけで簡単に運用できるように構成されている。しかし独自のソフトウェア（本研究による提案手法など）を記述してソフトウェアを構築することはできない。一方、商用マシンビジョンライブラリで提供される機能の信頼性はメーカーの責任の元に担保され少ない労力でシステム構築ができるため実際の現場でも多く用いられている。現場で運用するためには、画像処理システム開発技術者が供給される関数に対して Microsoft 社の Visual Studio を用い関心パターンや探索領域などのパラメータと与えてアプリケーションソフトウェアの開発を行う。ソフト開発ではこれらのパラメータなどの設定も技術者が自由に与えることができるので GUI でユーザが設定できるようにしたりして利便性を高めたりする。この開発において本論文の提案を組み込むことにより商用ライブラリを用いたときでも効率化と信頼性の向上を図ることができるとと思われる。

今後、実際現場に設置されている画像処理システムや新規に開発するものに本提案の探索領域の決定手法を適用して多くの照合アルゴリズムに適用できるか否かについて実機検証を進めつつ、この手法をさらに発展させて探索課題の効率化と信頼性の向上を図りたいと考える。

5.3 本研究の応用と発展

本研究を静止画でなく動画にも応用できることは可能なのか、また研究の過程で効率化と信頼性を求めた上での他の探索領域の決定手法について次への研究テーマとして検討する。

5.3.1 動画像への適用

提案手法について静止画だけでなく動画像にも応用することができるのではないかという点について検討する。

本研究で扱った静止画の画像処理はカメラで撮像された画像のとある一瞬のフレーム画像をもって処理を行っている。一方動画像の画像処理は時間の流れによって連続的に得られた静止画像に対して処理を行い、それを時系列にしたがって移動体の検出を行う処理を行うことで成立している。つまり本提案の手法に対して対象に対する時系列の移動ベクトルを反映させることにより適用できるのではないかと推測される。

5.3.2 対象パタンの誤検出可能性の検討方法

パタンの探索問題では、信頼性の観点から探索領域内に本来照合すべきパターン（対象パターン）が唯一存在することが望ましくそのように位置と大きさを設定することを求められるが、実際の製品における探索では図5-1に示すように関心パターンに酷似した照合すべきでないはないパターン（疑似パターン）が存在することも多い。対象パタンの類似度が疑似パタンの類似度を常に上回っておりその差が大きくマージンが取れていれば誤照合が起きる可能性が極めて低いが、その差が小さく製品の色や光の反射、あるいは照明状態の変化によって類似度が逆転し疑似パターンが対象パターンを上回った場合に誤照合となるので注意を要する。測定方法としては単純に関心パターンを照合アルゴリズムに登録し、部品の取り付け公差や製品固定時の誤差などを考慮した累積誤差を部品の探索範囲として領域の位置と大きさを設定して照合処理を行い得られた類似度の値でマージンが確保されているかを評価する。

この誤照合を排除するための確実な方法は、対象パタンの探索領域に疑似パターンが含まれないようにしてこのような問題を積極的に取り除くことが重要である。よって探索領域の大きさについては対象パタンの位置の公差によるばらつきを考慮した上で最小となるようにする必要がある。

生産においては設計値に基づく公差によって個々のばらつきを管理しているが、製品製造の現場ではそれ以外に実力値というものがあり具体的には設計上の公差は 10.0 ± 0.1 となっているが実力は ± 0.05 以内の精度で生産されている場合がある。このようなときには対象パターンがどの程度ばらついているかの度合いを探索するときの事前情報として知識を得ておくこと探索領域の大きさ

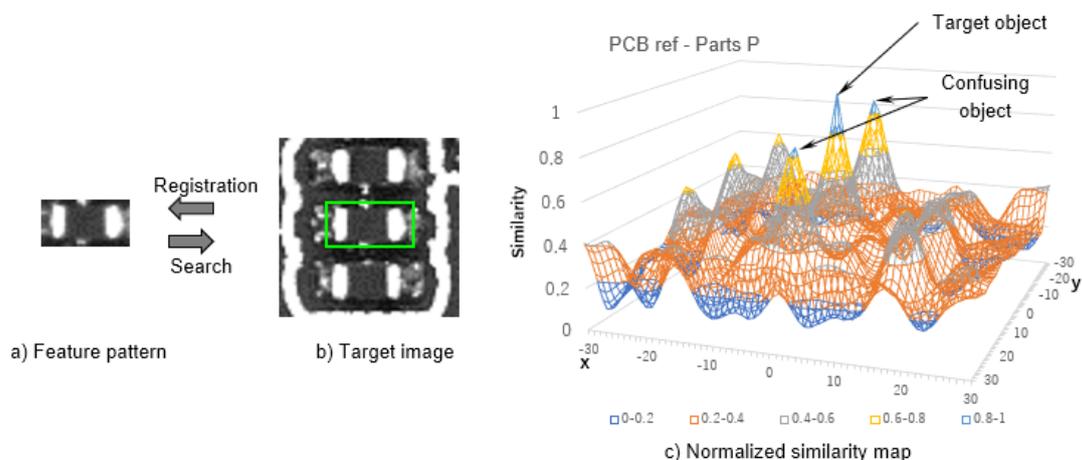


図 5-1 関心パターンと対象・疑似パターンによる類似度マップ

を決めるときの目安になる。具体的には対象となる製品について過去の経験値や実力値を参考にしたり、本提案の信頼区間型のばらつき評価のように製品をいくつか用意し信頼のおける探索のアルゴリズムを用いて探索操作を行って照合結果を求めその値が妥当であるかを評価してばらつき範囲より求めたりする方法も使うことができる。

このアルゴリズムを信頼性の事前検討を行うためのアルゴリズムとして関数化し、実際の現場運用でその効果を検証するための作業を進められるようにして、照合課題に対するサポート機能を実現したいと考える。

5.3.3 類似度分布による探索領域の推定

前項の手法によって求めた類似度マップに基づいた探索領域を選択する手法を用いて運用するための方法として、図 5-2 に示すようにマップの谷線をトラッキング（赤線囲み）しこの範囲を探索領域とする手法について、今後の研究テーマの一つとして新しい提案ができるのではないかと思いこれに基づいた手法を説明する。

具体的な方法については次のような手順で進めていく。

1. 探索する製品の画像を撮像する。以降、この画像を用いる。
2. 関心パターンとする領域を指定して探索アルゴリズムに登録する。
3. 関心パターンを中心として公差の 2 倍程度の大きさの仮探索領域を設定する。
4. 探索領域全体のすべての位置での類似度を得る。

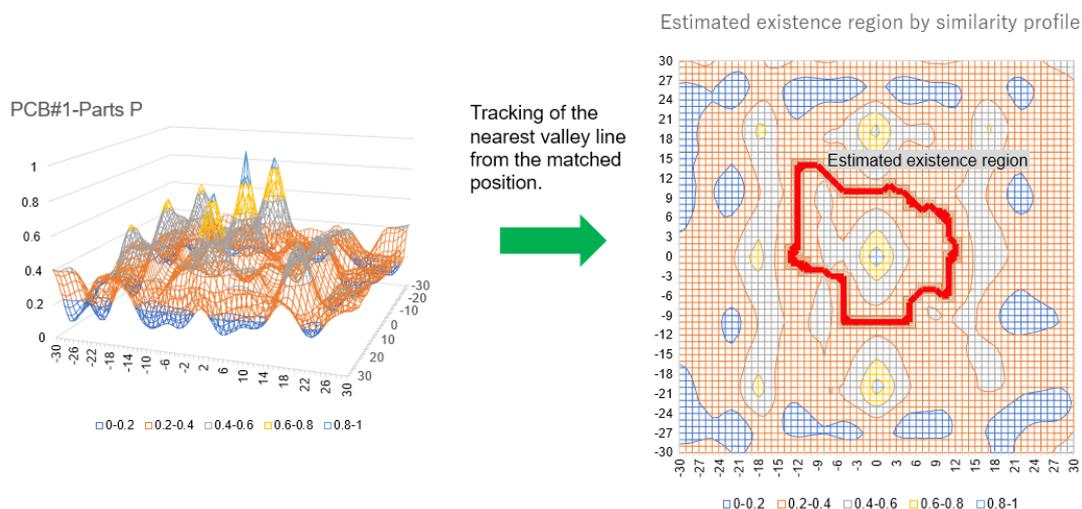


図 5-2 類似度プロファイルによるパタンの推定存在領域

5. 得られた類似度を正規化し、正規化類似度を求める。
6. 正規化類似度マップを作製する。
7. 関心パタンの位置を頂点とし周囲の谷線を求め、この範囲内を推定探索領域とする。

この手法により決定された探索領域内には対象パターンに対する唯一の類似度ピークが存在し疑似パタンの類似度を積極的に排除できるため誤検出の可能性はなくなると考えられる。しかしこの多角形探索領域を作成するためには谷線を求めるために境界探索のアルゴリズムを作成することが必要となりその開発と検証に多くの時間を要すると考えられる。実際の照合において一般的な探索領域は矩形形状を用いるため多角形を設定することはできないので、多角形の外接矩形を定めてこの中から照合に不要な部分にマスクを施して運用する必要がある。

5.3.4 簡易推定存在領域の決定

前述の正規化類似度マップから推定存在領域を求める方法はアルゴリズムが複雑になるため簡易的に領域を決定する方法について提案する。

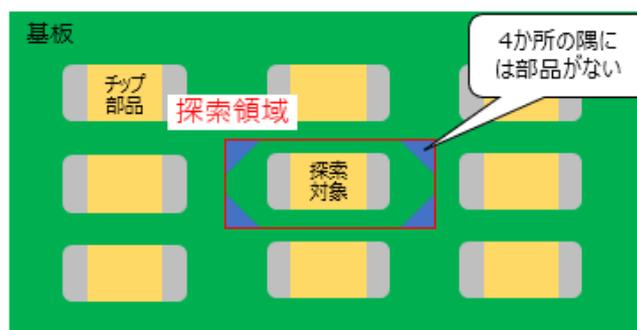


図 5-3 探索領域の 4 隅

本研究では検証にインタフェイス基板を用いたが一般的な PCB に搭載された電子部品の配置について全体を見渡すと部品の配置位置はランダムに配置されているように観察されるが、対象パターンを中心に局所的に観察したとき縦横の方向に一定に間隔をもって規則正しく整列されてように配置されている[83]. つまり図 5-3 のように探索対象を基点として矩形形状で探索領域を決めるとき領域の 4 か所の隅付近には疑似パターンとなって誤検出するようなものが存在しないということに着目して探索領域の形状を簡略化するための方法を検討した. 図 5-4(a)に示すように類似度マップにおいて照合した位置を通る x 軸および y 軸方向の切断面において照合に直近の類似度が最も低くなる位置 x_n, x_p , および y_n, y_p からなる図 5-4(b)に示すよう緑色の矩形形状として用いる方法である. この図での具体的な例では, 関心パターンを切り出した中心を $(0, 0)$ として X 軸方向は $-13 \sim 12$ の範囲とし Y 軸方向は $-10 \sim 10$ の範囲を推定存在領域とするものである.

実際の運用では推定存在領域にパタンの位置ずれや配置の公差を考慮して適切な探索領域を決めることが必要であると思われる.

この手法により探索領域の大きさを容易に決定することができるため効率化に寄与するものと思われるが, 実際の効果については未検証であるため今後の研究課題としたい.

5.3.5 他の対象物への応用

本研究では PCB に搭載された電子部品の照合について実験を行い提案手法の検証を行った. この手法を他の対象物へ応用することは可能であるかについて検討する.

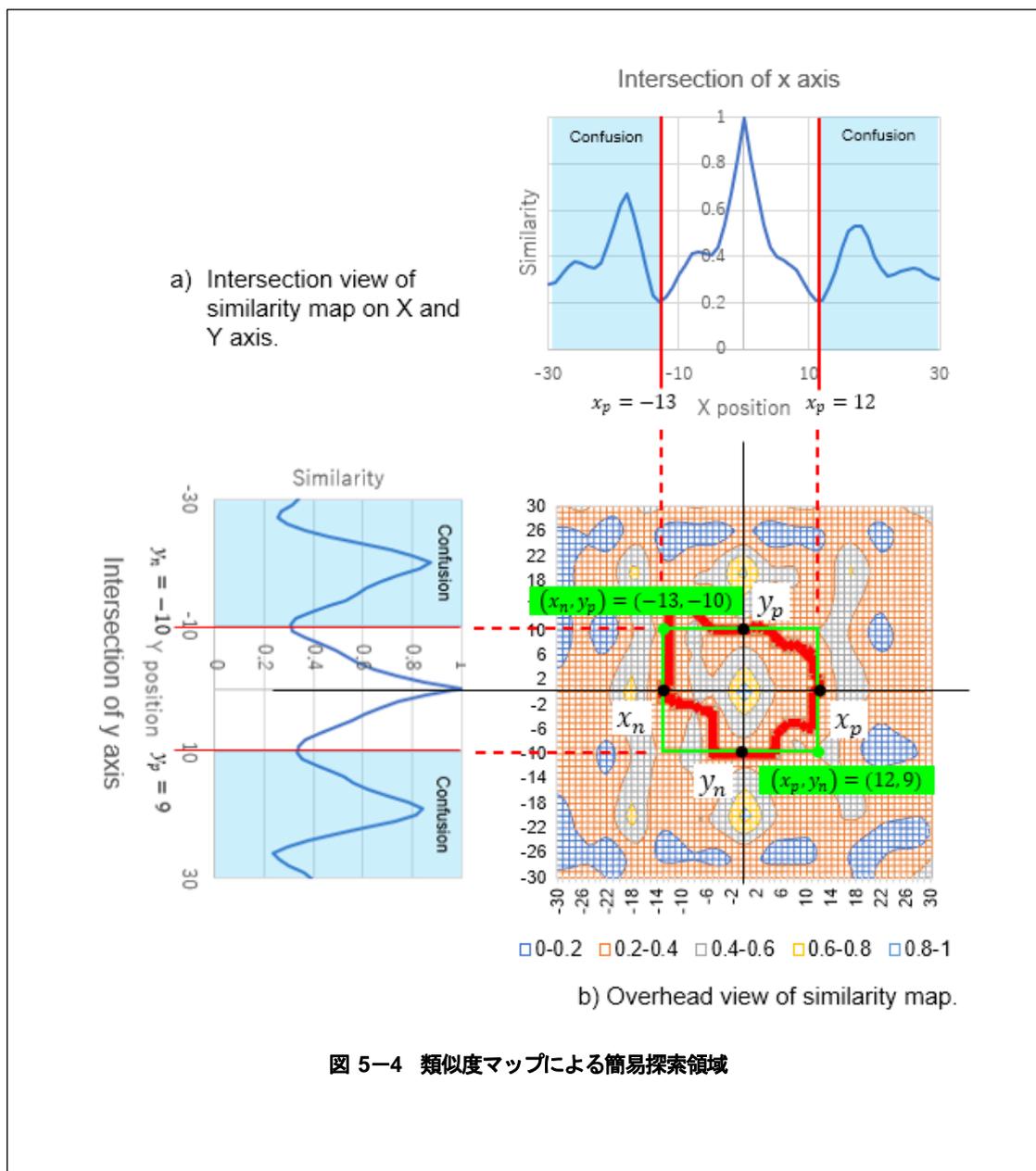


図 5-4 類似度マップによる簡易探索領域

この手法は設計上あらかじめ位置が定められている剛体に対して検査対象を照合するためのものであるため、これに類する物体であれば適用できるのではないと思われる。例えば切削加工部品（図 5-5）やプレス部品の加工位置の検査、樹脂の成型部品などへの応用が考えられる。

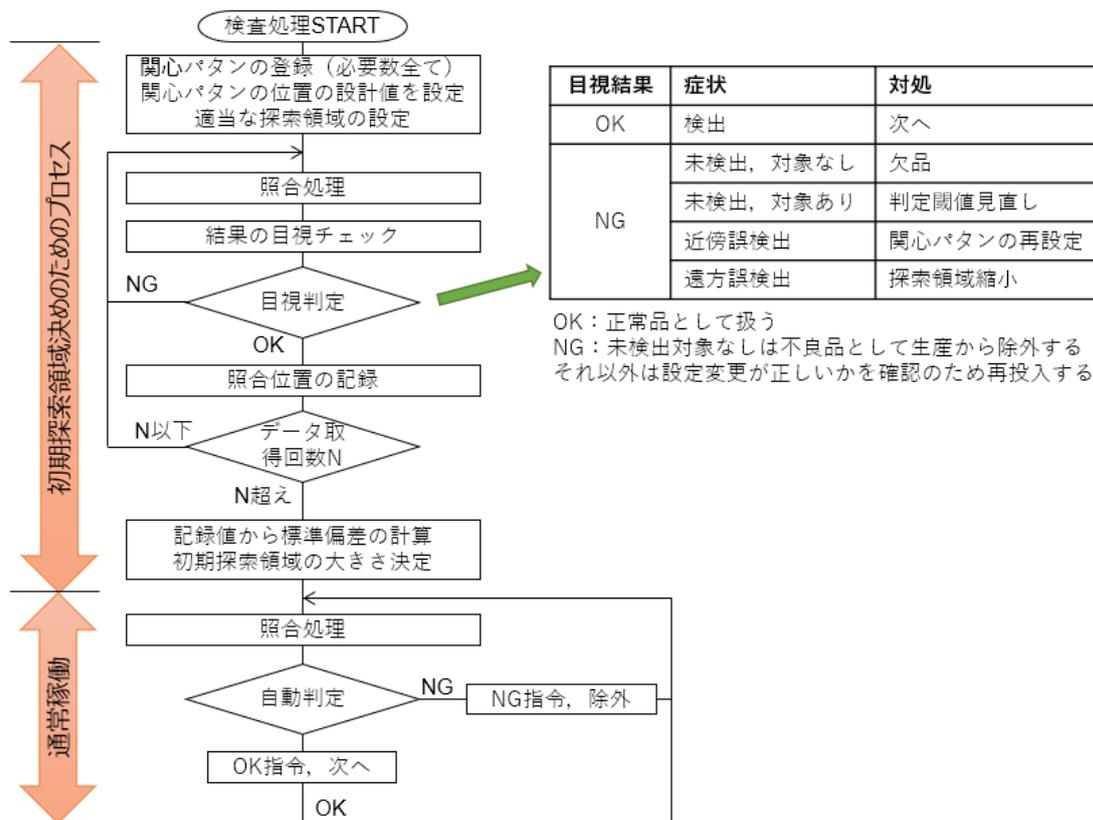


図 5-6 信頼区間算定自動化のためのフローチャート

5.3.6 信頼区間の算定の自動化

探索領域拡張による順序探索では事前作業としていくつかのサンプルを用意し、検査対象の照合操作により得られた位置のばらつきから標準偏差を求め、これを信頼区間として運用を開始する必要がある。しかしこの作業に手間を最小限にして時間を短縮するために事前の照合とその結果に基づいた演算の過程を通常の検査工程の一部として組み込み半自動化させることによって省力化する方法を提案する。

1. 照合が必要なすべての関心パターンを登録する。
2. 設計値に基づいた関心パタンの位置の設計値（ベクトル）を設定する。
3. 初期探索領域としてばらつきの標準偏差を求めるときの照合に使用するための適当な探索領域を設定、誤検出が起きないように配慮がする。
4. 装置上で通常の運用と同じ操作を行うが、照合結果の表示を作業員が目視で確認し合否を判断する。

5. OK であれば結果を記録し, NG であれば判断内容に基づいて製品を取り扱う.
 6. 1~5 の操作を複数回 (標準偏差を求めるために必要数) 繰り返す. 結果のばらつきが大きいときは回数を増やした方が, 精度が高まる.
 7. 指定した回数が終了後, 得られた結果より信頼区間を求める.
 8. 7 の信頼区間をもって通常の検査の運用を行う.
- この一連の流れを図 5-6 にフローチャートとして示す.

第6章 結 論

本研究では工業製品における複数の関心パターンを持つ照合課題に対して予め定められている探索順序にしたがって領域の位置と大きさを決定し効率化と信頼性の向上を目的として2つの手法、1) 順序依存絞込み探索による関心パタンの効率的探索、2) 論理和型および信頼区間型の探索領域拡張による複数関心パタンの順序探索、を提案した。

順序依存絞込み探索では、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かとと思われる。

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。

探索領域拡張による複数関心パタンの順序探索では、設計上の位置があらかじめ既知の工業製品における位置決めの問題において、信頼性を維持しながら効率的に探索し、また探索順序に拘束されない手法を提案した。基本的な戦略として探索領域の大きさを決める2つの手法として、1) 先行探索の照合位置に基づいて示される領域による論理和型拡張、2) 予測位置ずれ量を利用した基本探索領域の大きさを決める信頼区間型拡張、および両者を用いる複合型拡張を提案した。また位置ずれが大きく照合に失敗した関心パタンの探索については、探索順の最後に繰り下げて実施する多段試行の方法を提案した。これらの手法の有効性を検証するために実際の工業製品である PCB に配置された電子部品を関心パターンとして提案手法を適用した探索の実験を行った。結果としては照合精度を保ちつつ探索領域を適切に設定することによってすべての関心パタンの照合結果が正しい位置で成功し信頼性の高い照合ができた。また、探索領域を先行探索の位置ずれを参照して拡張したことにより効率的に探索できることを確認した。

本研究の検証においては照合法に SAD と NCC を利用したが、本提案は探索領域の位置と大きさをいくつかの戦略に基づいて的確に調整する手法であるので様々な照合アルゴリズムに適用することが可能と考えられる。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かとと思われる。

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

論文執筆に際し、大変多くの先生方からご指導ご鞭撻を賜りましたことを冒頭にて先に厚く御礼申し上げます。

はじめに、ヒューマンセントリック工学研究室にてご指導いただきました、金子俊一教授、田中孝之教授への謝辞を述べます。金子俊一教授との出会いは20数年前に研究会でお会いしたことから始まり、前職では共同研究として「画像によるシボ面の外観検査システムの開発」をお願いしたところ快く引き受けてくださり研究の過程では手法やアルゴリズムを一緒になって議論しながら研究を進める中で画像処理に対する多くのアドバイスをいただきました。そして、その中で社会人博士課程への進学を薦めていただき私個人のこれまでの画像処理の開発に携わった経験の集大成として一つの研究をまとめたいという希望から北海道大学への進学を決めました。進学後は指導教授として研究の進め方を一からご指導いただき、日ごろのローカルミーティングをはじめ、論文の書き方、また研究者として何が重要か、研究を進める上で生じる課題にどのように克服するかについて手取り足取りご教示いただきました。社会人になってからのほとんどは研究開発の指導をする立場になってしまい、研究の進め方を指導してもらう機会がまったくなくなった最近の私においてとても新鮮な経験であるとともに大切な財産となりました。このような機会を与えてくれた金子教授に感謝申し上げます。田中教授には金子教授が定年退官された後、指導教官として引継ぎをしていただくとともに研究全般に渡ってご助言とご指導をいただき感謝申し上げます。

北海学園大学工学部、高氏秀則教授は金子教授からご紹介いただき、博士課程で研究を遂行するにあたって様々なアイデアや違った視点からの考察、研究の道筋、論文などについてローカルミーティングを通して丁寧にご指導いただき感謝申し上げます。

そして、本論文をまとめる上で副査として多くのご助言をいただきました小野里雅彦教授、金井理教授に感謝申し上げます。

最後に、研究活動に従事する中でサポートしていただいた方々への謝意を示します。

研究室では、留学生の Wenjun ZHOU さん、Sheng XIANG さん、Yaping YAN さん、Ying TIAN さんには実験のお手伝いをいただき、吉川美紀秘書、途中雅恵秘書には遠隔地の学生であるため学内の事務手続きなどを代行していただいた大変お世話になりました。ありがとうございます。

社会人として会社勤務をしながら進学することは業務に支障が生じることが懸念されるにも関わらず、私個人の研究についてご理解いただいたとともに多くの面でサポートいただいた鎌倉光機株式会社 代表取締役 鎌倉俊哉氏、および社員の皆様に感謝申し上げます。

以上の方々をはじめ、御支援、御協力をいただきながら、ここにお名前を記すことができなかつ

た多くの方々に心より感謝申し上げます。

最後に、研究者としての機会を提供し家庭の時間の多くを研究業務と論文執筆に割くことを理解してくれたとともに、長きにわたる多大な支援、暖かい見守り、日常生活を励ましの言葉とともに支えてくれた妻貴美江と、2人の子供たち菜緒子と晃弘に感謝します。

参考文献

1. 松井 雄史：「中小製造業における技能承継問題の実態とその解決策」，日本政策金融公庫論集，No. 49，pp. 1 - 18 (2020)
2. 「1月1日時点の就職意識調査，キャリアス就活 2023 学生モニター調査結果」，株式会社ディスコ キャリタス リサーチ (2022)
3. 厚生労働省：「平成 25 年版労働経済白書（労働経済の分布）」，厚生労働省 (2013)
4. 小原篤次：「早期離職は若者の責任なのか？」，長崎県立大学東アジア研究所東アジア評論，No. 13，pp. 63 - 71 (2021)
5. 八井田収：「半導体産業競争力に対して立地および知識等の内部資源が与える影響の違いについての論考—技術とアーキテクチャの異なる半導体設計企業の事例を用いて—」，労働戦略研究，No. 10，pp. 17 - 29 (2016)
6. 名取隆：「ものづくり企業の持続的競争優位の条件とは—技術・技能の暗黙知の組織的継承が鍵—」，研究・イノベーション学会年次学術大会講演要旨集，No. 35，pp. 158 - 161 (2020)
7. 新宅純二郎：「海外現地生産の進展と国内製造業への影響」，赤門マネジメント・レビュー，Vol. 15，No. 5，pp. 267 - 284 (2016)
8. 丹下英明：「求められる中小企業の海外事業再編 コロナ後の成長を目指して」，Vol. 71，No. 11，pp. 40 - 43 (2021)
9. 独立行政法人日本貿易振興機構「JETRO 製造業レポート」，日本貿易振興機構，March 2021，pp. 1 - 7 (2021)
10. 三井住友 DS アセットマネジメント株式会社「マーケットキーワード」，三井純友 DS アセットマネジメント (2020)
11. 山下龍生，菊池拓男：「効率的な熟練技能の訓練計画選定における最適化問題の適用について」，工業教育，Vol. 68，No. 1，pp. 58 - 62 (2020)
12. 山本孝：「生産マネジメントと技術・技能の伝承—熟練技能伝承システムを中心に—」，日本生産管理学会論文誌，Vol. 15，No. 2，pp. 1 - 8 (2020)
13. 「ヒューマンファクター分析ハンドブック」，宇宙航空研究開発機構，JERG-0-018A (2017)
14. 秦 清治，興水大和，富田 洋：「トータル生産システムにおけるヒューマンファクター」，電学論 (D)，Vol. 121，No. 6，pp. 629 - 634 (2001)
15. 「ヒューマンエラーはなぜ起こる」，一般財団法人 中小建設業特別教育協会，https://www.tokubetu.or.jp/human_error/human_error03.html，(閲覧日：2022 / 7 / 30)
16. 中村秀樹，高木元也，志村満，降旗達生：「安全活動にカツを入れる本」，労働調査会，(2007)

17. ヒューマンファクター事始め ヒューマンファクター講座：「Chapter 3 ヒューマンエラーはゼロにならない」, ヒューマンファクター勉強グループ http://www5f.biglobe.ne.jp/~kotohaji/HF/HF2nd/chapter_2nd_3.html, (閲覧日：2022 / 7 / 30)
18. 石井 明：「いまだからこそ目視検査を見直す」, 精密工学会誌, Vol. 84, No. 12, pp. 963-966 (2018)
19. 石井 明：「目視検査を成功させる」, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会公演論文集, pp. 957 - 958 (2014)
20. 藤吉弘亘：「第 1 回 機械学習の進展による画像認識技術の変遷」, 計測と制御, Vol. 58, No. 4, pp. 291 - 297 (2019)
21. 佐々木大知, 福田浩章, 高橋和也：「製造業における製品品質のオンラインリアルタイム診断ツール」, 情報処理学会研究報告, SE-204, No. 16, pp. 1 - 6 (2020)
22. 久保田進也, 「Deep Learning の外観検査への適用と研究動向」, 精密工学会誌, Vol. 85, No. 1, pp. 27 - 30 (2019)
23. 生田目琢哉, 堀本直生, 大谷 崇, 岩永健太, 西野恭弘：「AI を用いた検査工程の精緻化・合理化への取り組み」, マツダ技報, No. 38, pp. 120 - 126 (2021)
24. 妹尾拓, 山川雄司, 石川正俊：「高速ビジョンのロボット応用」, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 9, pp. 769 - 773 (2014)
25. 鷺見和彦：「柔軟物も取り扱える生産用ロボットシステムの開発」, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 10, pp. 1082 - 1085 (2009)
26. 金唯眞, 山田陽滋, 岡本正吾：「人間-ロボット協働作業系の安全」, 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 10, pp. 923 - 927 (2019)
27. 日本産業規格：「JIS B8433-1 ロボット及びロボティックデバイス—産業用ロボットのための安全要求事項—第 1 部：ロボット」, 日本規格協会 (2015)
28. 日本産業規格：「JIS B8433-2 ロボット及びロボティックデバイス—産業用ロボットのための安全要求事項—第 2 部：ロボットシステム及びインテグレーション」, 日本規格協会 (2015)
29. 厚生労働省：「労働安全衛生規則の一部を改正する省令の施行等について」, 基発 1224 第 2 号 平成 25 年 12 月 24 日 (2013)
30. 厚生労働省：「産業用ロボットに係る労働安全衛生規則第 150 条の 4 の施行通達の一部改正に当たっての留意事項について」, (2013)
31. カワダロボティクス：「あの企業が NEXTAGE を採用したワケ～生産自動化ミッションに取り組む技術者に読んでほしいハンドブック～」, (2020)
32. 橋本学：「ロボットビジョンのための 2D 画像処理的アプローチの現状と期待—2D 画像計測から見た物体認識の系譜と展望—」, 精密工学会誌, Vol. 87, No. 8, pp. 666 - 670 (2021)

33. 鈴木陽一郎, 金雁, 小山秀夫: 「製造プロセスにおける人員配置がその性能へ与える影響のシミュレーションによる検討」, 日本経営システム学会誌, Vol. 32, No. 2, pp. 111 - 121 (2015)
34. 石井 明: 「画像応用検査・計測技術の展望」, 精密工学会誌, Vol. 61, No. 5, pp. 603 - 604 (1995)
35. 橋本学, 糊沢信, 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, Vol. 75, No. 2, pp. 224 - 227 (2009)
36. 見山克己: 「プリント配線板と実装における高密度化の動向」, 表面技術, Vol. 71, No. 9, pp. 565 - 568 (2020)
37. 「【生産技術のツボ】リフローはんだ欠陥の原因と対策はコレだ! 不良・不具合の種類別に絵まとめ」, アイアール技術者教育研究所, https://engineer-education.com/production-engineering-34_reflow-soldering_defect/, (閲覧日: 2022/7/30)
38. Young-Gyu Kim, andTae-Hyoung Park: 「SMT Assembly Inspection Using Dual-Stream Convolutional Networks and Two Solder Regions. 」, Applied Sciences, Vol. 10, No. 13: 4598 (2020)
39. 山本静男: 「さらなる高密度実装の実現に向けた 0201 サイズチップ抵抗器の開発」, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 20, No. 3, pp. 120 - 123 (2017)
40. 北村和夫, 八木友久, 伊達仁昭, 山岸康男: 「接着剤併用型 Sn-Bi はんだペーストの開発」, 第24回マイクロエレクトロニクスシンポジウム, pp. 295 - 298 (2014)
41. 「モジュール型汎用自動組立機 sFAB-SH カタログ」, Cat.No.sFABSH_2021.Jan_J, 株式会社FUJI (2021)
42. 「モジュール型チップマウンター NXT III /NXT III c カタログ」, Cat.No.NXTIII_IIIc_K_2022.Jan_J, 株式会社FUJI (2022)
43. 「視線の移動の法則について F の法則、Z の法則とは?」, http://web-directors.net/modules/pico/index.php?content_id=58, (閲覧日: 2022/7/30)
44. パナソニック株式会社 産業デバイス事業部, 「FA 用画像処理機, イメージチェッカ PV200 series」, パナソニック FA センサ・システムカタログ (2019)
45. オムロン株式会社: 「画像処理システム FH シリーズ」, オムロン 画像処理システムカタログ, (2022)
46. 「Home - OpenCV」, <https://opencv.org/>, (閲覧日: 2022/7/30)
47. COGNEX 株式会社: 「画像処理ソフトウェア, ビジョンアプリケーションのパワーと柔軟性」, COGNEX カタログ (2021)
48. 株式会社 LINX, 「世界最先端画像処理ライブラリ HALCON」, LINX 製品カタログ (2021)
49. 浅野裕一: 「画像計測・検査システムの信頼性 第3回 信頼性の静的検証」, 映像情報インダ

- ストリアル, Vol. 41, Issue 11, pp. 70 - 76 (2009)
50. 浅野裕一：「画像計測・検査システムの信頼性 第4回 信頼性の静的検証 (2)」, 映像情報インダストリアル, Vol. 41, Issue 12, pp. 100 - 105 (2009)
 51. 浅野裕一：「まるまる!マシンビジョンカメラ入門 ゼロから学ぶ“基礎の基礎” 2章 カメラの種類」, 映像情報インダストリアル増刊号, Vol. 43, Issue 13, pp. 15 - 22 (2011)
 52. 江藤剛治：「超高速カメラ開発の歴史と展望」, 応用物理学会誌, Vol. 90, No. 6, pp. 332 - 338 (2021)
 53. 樋口義章, 下ノ村和弘：「ハンドアイの画像座標に基づくロボットアーム制御」, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2014, No. 14-2: 2A1-Q02_1, (2014)
 54. 徳増伸二, 「インダストリー4.0の時代の我が国製造業の変革と方向性」, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 7, pp. 13 - 16 (2017)
 55. 清水伸二, 「IOT, インダストリー 4.0 時代に精密工学は何をすべきか」, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 1, pp. 7 - 12 (2017)
 56. 田中康裕, 高木徹, 浦川敏倫, 太田悠太：「機械学習を用いた生産ロボット減速機の故障予知手法の開発」, 自動車技術会論文集, Vol. 50, No. 2, pp. 585 - 590 (2019)
 57. 榎原伸介：「知能ロボットによる工場自動化と IoT, AI 活用について」, システム制御情報学会誌, Vol. 61, No. 3, pp. 101 - 106 (2017)
 58. 小宮昌人, 石垣圭一：「日系製造業のインダストリー 4.0 加速に向けた組織トランスフォーメーション」, 知的資産創造, Vol. 27, No. 9, pp. 62 - 71 (2019)
 59. 渡辺吉明：「製品リコールと自主回収のプロセスと重要事項—製品事故未然防止と再発防止に向けて—」, 新PL研究, No. 5, pp. 15 - 26 (2020)
 60. 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 (C), Vol. 124, No. 3, pp. 629 - 636 (2004)
 61. 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, Vol. J83-D-II, No. 9, pp. 1861 - 1869 (2000)
 62. 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, Vol. 43, No. 1, pp. 13 - 20 (2014)
 63. 村松彰二, 小林芳樹, 高橋一哉, 清水英志：「テンプレートマッチングにおけるハードウェア化と高速化手法の開発」, 信学論, Vol. J83-D-II, No. 7, pp. 1667 - 1675 (2000)
 64. L.G.Brown : 「A survey of image registration techniques. 」, ACM Com. Surveys, Vol. 24, No. 4, pp. 326 - 376 (1992)
 65. M. B. Hisham, S. N. Yaakob, Raof R. A. A, A. B A. Nazren, and N.M. Wafi : 「Template Matching Using Sum of Squared Difference and Normalized Cross Correlation. 」, 2015 IEEE

- student conference on research and development (SCOReD) , pp. 100 - 104 (2001)
66. F. Ullah, S. Kaneko, and S. Igarashi: 「Orientation Code Matching for Robust Object Search. 」, IEICE transactions on information and system, Vol. E84-D, No. 8, pp. 999 - 1006 (2001)
 67. 谷水克行: 「カラー印刷物外観検査」, 精密工学会誌, Vol. 61, No. 5, pp. 620 - 624 (1995)
 68. 小泉光義: 「実装プリント板の寸法・平面度の検査に用いられる最近の技術」, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 5, No. 4, pp. 336 - 341 (2002)
 69. 都築勇司, 藤吉弘亘, 金出武雄: 「SIFT 特徴量に基づく Mean-Shift 探索による特徴点追跡」, 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. SIG 6, pp. 35 - 45 (2008)
 70. 張山昌論, 竹内俊樹, 亀山充隆: 「ウィンドウサイズの適応的選択に基づく高信頼ステレオマッチングと VLSI 化」, 計測自動制御学会論文集, Vol. 39, No. 3, pp. 225 - 233 (2003)
 71. 竹田信子, 加藤博一, 西田正吾: 「照合幅と照合順序を考慮した高速類似領域探索法」, 信学論, Vol. J90-D, No. 8, pp. 2157 - 2167 (2007)
 72. 宮本敦, 中平健治: 「ルールベース型血管分類器の判定パラメータ自動調整技術」, 電学論 (C), Vol. 135, No. 4, pp. 435 - 461 (2015)
 73. 中村あすか, 富永浩文, 前川仁孝: 「探索の重複領域削減による階層的狭み撃ち探索の高速化」, 情報処理学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 76 - 84 (2011)
 74. 藤田悠介, 中村秀明, 浜本義彦: 「画像処理によるコンクリート構造物の高精度なひび割れ自動検出」, 土木学会論文集 F, Vol. 66, No. 3, pp. 459 - 470 (2010)
 75. 浅野裕一, 周文俊, 高氏秀則, 金子俊一: 「順序依存絞込み探索による関心パタンの効率的探索」, 精密工学会誌, Vol. 80, No. 2, pp. 171 - 176 (2020)
 76. 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, Vol. 55, No. 6, pp. 659 - 671 (2006)
 77. <https://drive.google.com/file/d/16MsOJlXqMmDeqvr3iBINp5FQTKvdhQ2/view?usp=sharing>, (閲覧日: 2022/7/30)
 78. 浅野裕一, 高氏秀則, 田中孝之, 金子 俊一: 「論理和型および信頼区間型の探索領域拡張による複数関心パタンの順序探索」, 電学論 (C), Vol. 142, No. 8, pp. 971 - 981 (2022)
 79. Y. Shen, Q. Jia, G. Chen, Y. Wang, H. Sun: 「Study of rapid collision detection algorithm for manipulator. 」, 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, pp. 934 - 938 (2015)
 80. V. Román-Ibáñez, F. A. Pujol-López, H. Mora-Mora, M. L. Pertegal-Felices, A. Jimeno-Morenilla: 「A low-cost immersive virtual reality system for teaching robotic manipulators programming. 」, Sustainability 10.4.1102, pp. 1 - 13 (2018)

81. https://drive.google.com/file/d/1oKFP7oyqhm6jLEIC9Q6_f7l-PyzmPiBG/view?usp=sharin, (閲覧日 : 2022 / 7 / 30)
82. Yifan Sun, Nicolas Bohm Agostini, Shi Dong, David Kaeli : 「Summarizing CPU and GPU design trends with product data. 」 , arXiv preprint arXiv : 1911.11313 (2019)
83. 河村薫, 白石博, 岡常雄, 浦口久司 : 「ICAD/PCB における実装設計」, 情報処理学会研究報告システム LSI 設計技術 (SLDM) , Vol.1982, No.51, pp.1 - 7 (1982)