

# パラメトリックな変形耐性画像マッチングを用いた物体検出

若原, 徹 / WAKAHARA, Toru

---

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

科学研究費助成事業 研究成果報告書

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2020-05-08

令和 2 年 5 月 8 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00250

研究課題名(和文)パラメトリックな変形耐性画像マッチングを用いた物体検出

研究課題名(英文)Object detection using distortion-tolerant, controllable, parametric image matching

研究代表者

若原 徹 (WAKAHARA, Toru)

法政大学・情報科学部・教授

研究者番号：40339510

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：1. 射影変換に対する変形耐性を持つGPT相関法とマルチスケール窓探索法の組合せにより、領域ベースでの手法による高い物体検出性能を達成した。2. GAT相関法およびGPT相関法に、対応点でのHOG特徴の類似性に基づく重み付けを導入し、「全体-部分」画像マッチングの収束速度およびマッチング性能を向上した。3. 処理時間のかかるマルチスケール窓探索法に替えて、スライディング離散フーリエ変換とフーリエ記述エッジ方向ヒストグラムの組合せによる高速な初期位置探索法を提案した。4. GAT相関法およびGPT相関法で、テンプレート画像の二乗ノルムを厳密に保存する再定式化を行い、画像マッチング性能を大きく向上した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、物体検出のための画像マッチングの研究分野で、現在主流でありながら十分な性能が達成できていない特徴ベースのアプローチではなく、変形耐性画像マッチングを用いた領域ベースの物体検出を行うという独特かつ明快な研究戦略に立つ。本研究の最たる独創性は、物体検出で原理的に要請される変形耐性をあらかじめパラメトリックな変形モデルとして搭載したGAT相関法およびGPT相関法をベースとし、テンプレート画像の全体と目標画像中の部分領域との間で最適な「全体-部分」マッチングを追求する点にある。計算量の大幅削減による高速化を得てその実用可能性が明らかになれば、本研究の社会的意義ならびに波及効果は極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：1. A combination of projection transformation tolerant GPT correlation method and multi-scale subwindow search method achieved a high accuracy of area-based object detection. 2. Enhanced GAT and GPT correlation methods using weights based on similarity in HOG features between corresponding points improved both convergence speed and matching ability. 3. Instead of using time-consuming multi-scale subwindow search method, we proposed a high-speed technique of search for optimal, initial matching location by means of a combination of sliding discrete Fourier transformation and Fourier descriptor of histogram of edge directions. 4. Reformulation of GAT and GPT correlation methods so that they should guarantee the L2 norm of template image in a rigorous manner improved greatly an ability of image matching.

研究分野：情報学、知覚情報処理・知能ロボテックス

キーワード：パターン認識 変形耐性画像マッチング 物体検出

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 2枚の画像間で《検出したい物体に相当するテンプレート画像の「全体」と目標画像の「部分」とをマッチングする》のが物体検出の技術である。テンプレート画像にアフィン変換や射影変換などの変形が施されたものが目標画像に埋め込まれている場合、変形耐性を有する「全体 - 部分」間の画像マッチング手法が必要となる。それらは特徴ベースと領域ベースの手法に大別される。前者では、画像からエッジやコーナー等の特徴点を抽出し、特徴点近傍での濃淡勾配方向分布等の局所的記述子により、2枚の画像間で特徴点の対応付けを行い、RANSAC (Random Sampling Consensus) を用いて射影変換を表す Homography 行列を決定することで画像マッチングを実現していた。しかし、低分解能や画像劣化により特徴点が安定に抽出できない場合や2枚の画像間で共通する特徴点が抽出できない場合、特徴ベースの手法は破綻するという難点があった。

(2) 一方、領域ベースの手法では、2枚の画像間のマッチング尺度として、画像劣化に耐性のある正規化相互相関値が広く用いられる。特に、正規化相互相関値を最大化するような最適変換パラメータ(アフィン変換では6個、射影変換では8個)を山登り法で探索する GAT 相関法 (Global Affine Transformation Correlation) や GPT 相関法 (Global Projection Transformation Correlation) が提案されていた。しかし、それらは「全体 - 全体」での変形耐性画像マッチングを実現したものであり、テンプレート画像の「全体」と目標画像の「部分」とをマッチングするという物体検出には未だ適用されていなかった。領域ベースの物体検出では、マッチングすべき部分領域の効率的探索、変形耐性のある強力な画像マッチング、という2つの課題があるが、前者に対する取り組みが未着手であった。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では領域ベースの物体検出手法として、変形耐性をパラメトリックに制御できる画像マッチング手法である GAT 相関法ないし GPT 相関法の拡張を図る。まず、「全体 - 部分」間の画像マッチングのマッチング尺度として、局所的な画像特徴の類似性をより積極的に重み付けに用いた正規化相互相関値を新たに導入した。さらに、マッチングすべき部分領域の探索にはマルチスケールでのスライディング窓探索を用いることとした。これらの組合せにより、変形耐性を有しかつ部分領域との画像マッチングを高精度に実現する、領域ベースの物体検出手法の確立を目的とした。

(2) 上記(1)の領域ベースの物体検出手法では、処理時間が膨大化するという難点が予想される。特に、マルチスケール窓探索法の適用は明らかに処理量を線形に増大化する。これを解決するため、マッチングすべき部分領域の探索法として、特徴ベースの画像マッチング手法の適用を新たに提案する。また、GAT 相関法ないし GPT 相関法は山登り型の反復解法に依るため、処理時間の削減が望まれる。これに対しては、計算モデルの再考により、収束速度の向上を図ることとした。これらの施策により、領域ベースの物体検出手法の処理時間を大幅に短縮することを目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) 第一の方法として、GAT 相関法ないし GPT 相関法の計算モデルにおいて、局所的な画像特徴の類似性をより積極的に重み付けに用いた正規化相互相関値の最大化を目的関数とする。具体的には、これまで対応点での濃淡勾配方向の一致のみをマッチング条件としてきたのに対して、対応点の近傍での濃淡勾配方向分布の類似性をマッチング条件として用いる手法を提案する。これにより、テンプレート画像が埋め込まれた部分領域とのマッチングを促進し、かつ目標画像中でのそれ以外の部分領域との誤ったマッチングを効率的に回避することが可能となる。

(2) 第二の方法として、「全体 - 部分」の画像マッチングのためのマルチスケール窓探索法は処理時間がかさむために、これに替えて、特徴ベースの画像マッチング法に着目し、テンプレート画像とマッチングすべき目標画像中の部分領域を高速に探索する手法を提案する。ただし、ここでの特徴ベースの画像マッチングはあくまで初期位置探索を目的としたものであり、正確で安定な画像マッチングは後段に控える領域ベースの GAT 相関法もしくは GPT 相関法により実現する。これにより、変形耐性を有する領域ベースの画像マッチング法の能力を保持したままで、前段の部分領域探索のための処理時間を大幅に短縮することが可能となる。

(3) 第三の方法として、GAT 相関法および GPT 相関法について、それぞれ変換パラメータに関する非線形な最適化問題を段階的に線形近似して、連立一次方程式の解を逐次代入する反復解法に帰着させていたが、あらためて線形近似の方法を見直して最適解への収束を加速する新規の計算モデルを提案する。これにより、変形耐性を有する GAT 相関法ないし GPT 相関法の処理時間を短縮する。

(4) 上記の第一から第三の方法にいずれについても、テンプレート画像に多様なアフィン変換および射影変換を施した人工画像を目標画像に用いる、あるいは射影変換、ボケや雑音を含む公開画像データベースを用いて、「全体 - 部分」間の画像マッチング実験を行う。特に、代表的な

特徴ベースの物体検出手法との性能比較を行い、提案手法の優位性を示す。

#### 4. 研究成果

(1) まず、射影変換に対する変形耐性をパラメトリックに制御できる画像マッチング手法である GPT 相関法とマルチスケール窓探索法の組合せにより、領域ベースでの手法による高い物体検出性能を確認した。ここでは、後述する研究成果(2), (3), (4)の内容は未だ反映されていない。図1に、公開データ Graffiti Dataset を用いた実験結果を示す。「全体 - 部分」間の画像マッチングで高い正規化相互相関値が得られていることが明らかである。

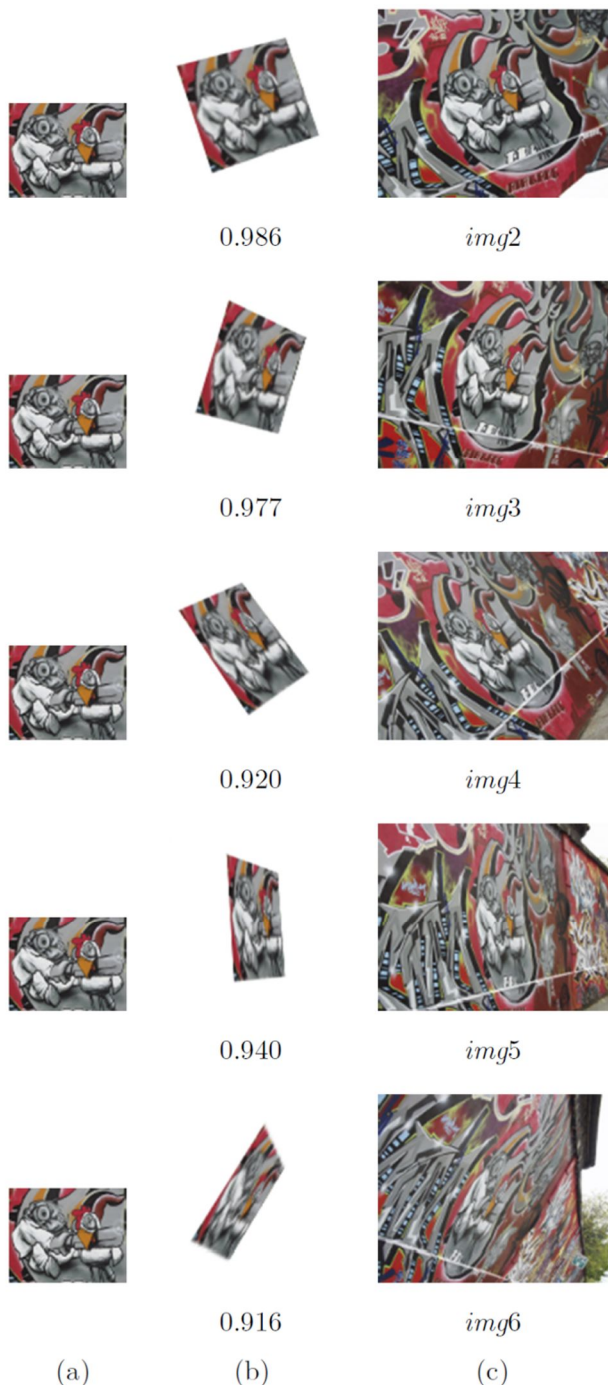


図1 GPT 相関法とマルチスケール窓探索法の組合せによる画像マッチング  
(a) テンプレート画像 (b) マッチング画像と相関値 (c) 目標画像

(2) GAT 相関法ないし GPT 相関法を物体検出に適用するには「全体 - 部分」間の画像マッチングの安定化が必須であった。そのため、最適なアフィン変換ないし射影変換のパラメータを決定する目的関数の中に 2 枚の濃淡画像間での局所的特徴の類似性をより強く反映した重み付けを導入し、新たな目的関数を定式化した。具体的には、局所的特徴として、特徴マッチングの研究分野で有用性が実証されている、各点の局所近傍領域での濃淡勾配方向の頻度分布である HOG 特徴 (Histogram of Oriented Gradients) に着目した。本研究では特に、マッチングの安定性および計算量抑制の観点から、画像内の各点での濃淡勾配方向を 8 方向に量子化して、出現頻度順に第一および第二の濃淡勾配方向ラベルの組合せのみを取り出して当該点の特徴とした。評価

実験には公開データ Graffiti Dataset を用いた。その結果、特徴ベースの代表的手法である SURF-RANSAC 手法を上回り、高い画像マッチングおよび物体検出精度が得られることを確認した。特に、これまで対応点での濃淡勾配方向の一致のみをマッチング条件としてきたのに対し、対応点の近傍での濃淡勾配方向分布の類似性をマッチング条件として用いることで、最適な変換パラメータに収束するまでの山登り法の反復回数が  $1/2 \sim 1/3$  に減少し、その結果として処理速度を 2 倍から 3 倍に向上することができた。

(3) 物体検出のための「全体 - 部分」間に画像マッチングを領域ベースの手法で行う場合、マッチングすべき部分領域の探索にはマルチスケールでのスライディング窓探索を用いるのが従来のアプローチであった。上記(1)の研究成果においてもこのマルチスケール窓探索法を採用した。しかし、処理量の膨大化が難点となった。そこで、領域ベースの「全体 - 部分」間の画像マッチングのための高精度かつ高速な初期位置探索の実現に取り組んだ。具体的には、画像劣化やアフィン変換ないし射影変換に頑健となるように、スライディング離散フーリエ変換とフーリエ記述エッジ方向ヒストグラムの組合せによる目標領域特徴量に基づく初期位置探索法を提案した。提案手法と従来の特徴ベースの代表的手法である ASIFT/ASURF と RANSAC を組み合わせる手法を、公開データ Graffiti, Boat, Bark, UBC Datasets に適用して、初期位置探索性能の比較実験を行った。その結果、特にボケや雑音重畳などの画像劣化を含む場合やテンプレート画像に含まれる特徴点数が少ない場合に対し、特徴ベースの手法が脆弱で容易に破綻するのに対し、提案手法が極めて頑健に初期位置探索を実現できることを明らかにした。また、初期位置探索に要する時間についても、高速性を特長とする特徴ベースの手法に対し、領域ベースの提案手法はほぼ同等の処理時間であった。本研究成果により、領域ベースの「全体 - 部分」間の画像マッチングにおいて、処理量が膨大化するマルチスケール窓探索法を用いず、提案手法の初期位置探索を採用することで処理時間を抑制して、後段の変形耐性を有する GAT 相関法ないし GPT 相関法による高精度な画像マッチングにつなげることが可能となった。

(4) これまでの GAT 相関法ないし GPT 相関法は、それぞれテンプレート画像にアフィン変換ないし射影変換を施して得られる正規化相互相関値を目的関数として、この目的関数の最大化問題を山登り法で解いていた。ただし、目的関数の定式化において、アフィン変換ないし射影変換を施されたテンプレート画像の二乗ノルムが保存されていないという理論的難点があった。その結果、正規化相互相関値の最大値への収束回数が増大したり、時には反復の過程で正規化相互相関値が不規則に振動したりすることがあった。これを解決するため、アフィン変換ないし射影変換を施したテンプレート画像の二乗ノルムを厳密に保存するように目的関数を再定式化した。これにより、元々非線形であった最適化問題がさらに複雑となったが、段階的な線形近似を工夫して新たな計算モデルを提案した。特に 6 パラメータから成るアフィン変換を扱う GAT 相関法については、連立一次方程式の解を逐次代入して反復する単純な計算モデルに帰着させることに成功した。一方、8 パラメータから成る射影変換を扱う GPT 相関法については、連立一次方程式の解法に帰着させることはできず、Newton-Raphson 法を用いた反復解法で構成されており、現状では計算モデルとして十分に簡明とは言えないという課題が残った。公開データ Graffiti Dataset に適用して評価実験を行った結果、二乗ノルムの保存を厳密に保証した GAT 相関法および GPT 相関法は、それぞれ従来の GAT 相関法および GPT 相関法を明らかに上回る「全体 - 部分」間での安定かつ高精度な画像マッチングを実現した。さらに、テンプレート画像にアフィン変換や射影変換を施して得られる人工画像を目標画像として用いた画像マッチング実験も行った。以下、二乗ノルムの保存を保証した GAT 相関法（ノルム正規化 GAT 相関法）と、従来手法である特徴ベースの ORB 法、領域ベースの ECC 法、ノルム正規化なしの GAT 相関法と GPT 相関法の比較実験結果を示す。図 2 に、実験に用いた画像例を示す。図 3 に、回転角と相関値の関係を示す。図 4 に、射影歪み成分の大きさと相関値の関係を示す。新規提案のノルム正規化 GAT 相関法の高いマッチング性能と安定性が明らかである。

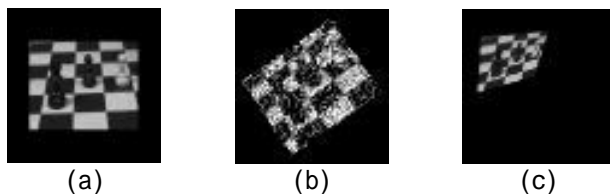


図 2 実験に用いた画像例  
(a) テンプレート画像 (b) 回転と雑音重畳 (c) 射影歪み

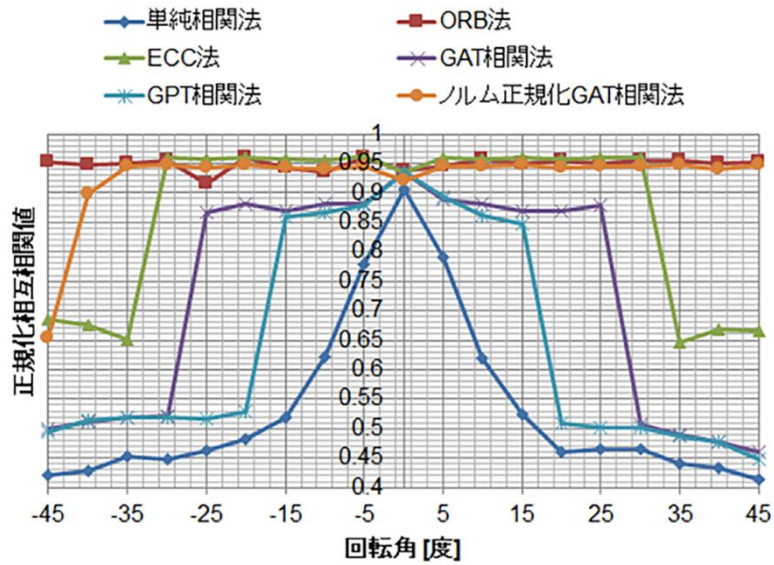


図3 回転角と相関値の関係

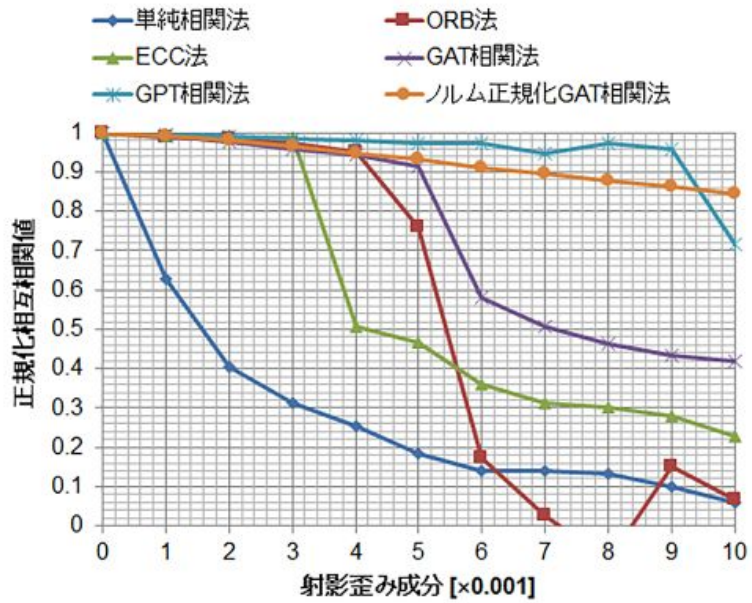


図4 射影歪み成分の大きさと相関値の関係

(5) 研究成果は国際会議で発表し、広く社会に発信した。特に、(3)の研究成果については学術論文誌に投稿し、採録・掲載された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Toru Wakahara, Shizhi Zhang, Yukihiko Yamashita	4. 巻 11049
2. 論文標題 Image registration using 2D projection transformation invariant GPT correlation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 2019 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2019)	6. 最初と最後の頁 3K-1 ~ 3K-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2517185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shizhi Zhang, Toru Wakahara, Yukihiko Yamashita	4. 巻 1
2. 論文標題 Image Matching Using GPT Correlation Associated with Simplified HOG Patterns	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of 7th International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications	6. 最初と最後の頁 1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IPTA.2017.8310122	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 山下 幸彦、若原 徹	4. 巻 J103-D
2. 論文標題 領域画像マッチングのための目標領域特徴量による初期位置探索法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D 情報・システム	6. 最初と最後の頁 330 ~ 340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2019JDP7056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Toru Wakahara, Yukihiko Yamashita	4. 巻 1
2. 論文標題 Image Alignment using Norm Conserved GAT Correlation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 2019 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications	6. 最初と最後の頁 48 ~ 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/DICTA47822.2019.8945880	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山下幸彦、若原徹
2. 発表標題 領域画像マッチングのための初期探索法
3. 学会等名 電子情報通信学会PRMU研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----