

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 15 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330207

研究課題名(和文) 変形耐性を制御可能なパラメトリック画像マッチングの研究

研究課題名(英文) Research on 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. 2枚の濃淡画像間で正規化相互相関値を最大化する最適な2次元射影変換(独立な8パラメータを含む)を決定するパラメトリックな変形耐性画像マッチング法を提案し、GPT相関法と命名した。2. GPT相関法とk近傍法を組み合わせ、公開手書き数字データベースMNISTの認識実験を行った結果、世界最高性能のエラー率0.30%を達成した。3. 上記2.の実験で用いたC言語プログラムのソースコードをWeb上で公開した。4. GPT相関法の定式化を厳密化し、さらに計算モデルも改良することで、最適解への収束性を大きく向上した。これを強化されたGPT相関法と命名した。

研究成果の概要(英文)：1. A new technique of 2D projection transformation (PT) invariant template matching, GPT (Global Projection Transformation) correlation, was proposed. The GPT correlation method determines optimal eight parameters of PT that maximize a normalized cross-correlation value between an input image and the PT-superimposed template. 2. Recognition experiments made on the well-known MNIST handwritten digit database via a combination of the GPT correlation and k-NN techniques achieved the lowest error rate of 0.30% ever reported for k-NN based classification. 3. The programs in C language with source codes used in the above-mentioned experiments were published on the Web. 4. The GPT correlation method was greatly enhanced to stabilize and accelerate convergence to the optimal solution of eight parameters via strict formalization of the objective function and refinement of its computational model.

研究分野：情報学、知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：パターン認識 変形耐性画像マッチング

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 現実世界の画像認識でクラス毎の学習サンプル数が少数である場合、統計的パターン認識手法が適用できない。このため、最適なテンプレート生成と変形耐性を有するテンプレートマッチングへの期待が大きかった。特に、変形成分をパラメトリックに記述できる変形モデルを用いることによって、変形耐性を制御可能な画像マッチングが実現できる。

(2) しかし、研究開発当初は、線形なアフィン変換（独立な6パラメータを含む）の最適化によるテンプレートマッチングは研究代表者により提案されていたが、非線形な変形成分をパラメトリックに決定できる画像マッチング手法は存在しなかった。また、変形耐性画像マッチングと学習サンプルの全数登録によるk近傍法との組み合わせが有力であったが、処理量が膨大化する難点があった。

## 2. 研究の目的

(1) 非線形な変形モデルとして2次元射影変換（独立な8パラメータを含む）を取り上げて当該変形をパラメトリックに制御可能な画像マッチング手法を確立する、特に2枚の濃淡画像間で一方の画像に最適な2次元射影変換を施して正規化相互相関値を最大化する計算モデルを確立することを目的とした。

(2) 計算モデルは閉形式で解ける準最適解を用いた逐次代入による反復解法で構成し、2次元射影変換の最適解への効率的かつ高速な収束および処理量の大幅削減を実現すること、特に画像認識問題に適用して当該変形耐性画像マッチングとk近傍法との組み合わせによる認識性能を示すことを目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 第一の方法として、2次元射影変換がアフィン変換（独立な6パラメータを含む）と部分射影変換（独立な2パラメータを含む）の合成であることに着目し、アフィン変換成分と部分射影変換成分を個別に求めて、それら準最適解を反復代入する逐次代入法の適用を検討する。アフィン変換成分の決定では研究代表者が以前提案したGAT（Global Affine Transformation）相関法を採用し、部分射影変換成分の決定に新規手法を提案する。

(2) 第二の方法として、上記(1)で述べた2次元射影変換を変形モデルとするパラメトリックな画像マッチング手法において、研究代表者が以前GAT相関法で検討したものと同様な高速化技法を適用し、処理量の大幅削減を検討する。その上でk近傍法と組み合わせる具体的な画像認識課題に適用する。

(3) 第三の方法として、2次元射影変換成分を、アフィン変換成分と部分射影変換成分に分けて個別に求めるのではなく、同時に8パラメータを決定する新規の計算モデルを検討する。これにより2次元射影変換成分の最適解への収束性を大きく向上させる。

## 4. 研究成果

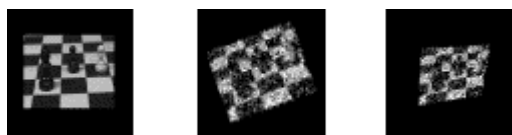
(1) 入力画像と2次元射影変換を施したテンプレートとの正規化相互相関値を最大化する最適な2次元射影変換を決定する問題に取り組んだ。非線形な最適化問題であるため、まず2次元射影変換をアフィン変換と部分射影変換の合成に分解し、個別に準最適解を求める計算モデルを導出した。準最適解であるため、アフィン変換のみ、部分射影変換のみ、合成した2次元射影変換の中で目的関数をより大きくする変換を選択してテンプレートを変形する。この操作を反復することで最適な2次元射影変換への収束を実現した。この変形耐性画像マッチング手法をGPT（Global Projection Transformation）相関法と命名した。これは汎用的かつ有力な2次元射影変換不変の画像マッチング手法を確立する着実な前進であり、その意義は極めて大きい。

(2) GPT相関法では、2枚の濃淡画像間で正規化相互相関値を最大化する最適な2次元射影変換成分を決定する際、①1枚の画像の総画素数をNと記すと、準最適解を求めるための計算量がNの2乗オーダーとなる、②準最適解を最適解に収束させるために反復解法を用いる、ために多くの処理時間がかかった。今回、以前GAT相関法で検討したものと同様な高速化技法として、上記①に対して、(a)変数分離の手法により計算量をNの1乗オーダーにする、(b)定型計算をテーブル参照で置き換える、を採用した。この高速化GPT相関法により、元のGPT相関法と比較すると、マッチング精度は維持したままで、処理時間を約50分の1に短縮できた。

(3) 高速化GPT相関法とk近傍法を組み合わせ、公開手書き数字データベースMNISTの認識実験を行った。ただし、マッチング尺度として、GPT相関法で最適な2次元射影変換を施されたテンプレートと入力画像との間で算出された濃淡勾配方向が等しい点間の平均距離を新たに提案して用いた。提案手法でのエラー率は0.30%を達成した。これはk近傍法と組み合わせた認識手法として世界最高性能であり、当該研究分野へのインパクトは極めて大きい。

(4) 上記(3)の認識実験で用いたC言語プログラムのソースコードを下記URLからWeb上で公開し、研究成果を社会に発信した。  
<https://sourceforge.net/projects/opencvpt/>

(5) 上記(1)の GPT 相関法では、2次元射影変換をアフィン変換と部分射影変換の合成に分解して、アフィン変換の6パラメータと部分射影変換の2パラメータについて個別に準最適解を求めていたため、最適な2次元射影変換への収束が遅くなる、あるいは局所解に陥りやすいという難点があった。これを解決するため、2次元射影変換の8パラメータを同時に決定する新たな計算モデルの定式化を行った。これにより画像マッチング性能が大きく向上した。この手法を強化された GPT 相関法と命名した。評価実験では、元画像に回転と雑音を加えたもの、射影歪みと雑音を加えたものを入力画像として、元画像とのマッチングを行った。図1に、実験に用いた



た画像例を示す。図2に、回転角と相関値の関係を示す。図3に、射影歪みの大きさと相関値の関係を示す。図2および図3より、強化された GPT 相関法の優位性が明らかである。

(a) (b) (c)  
図1 実験に用いた画像例  
(a)元画像 (b)回転と雑音 (c)射影歪みと雑音

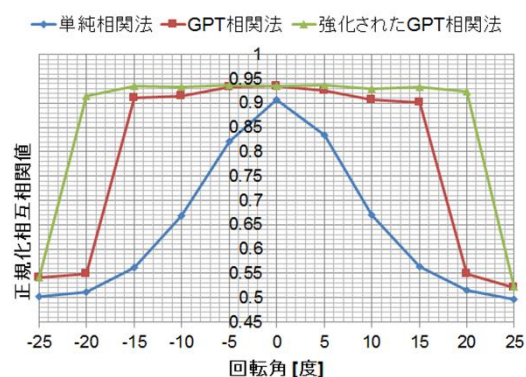


図2 回転角と相関値の関係

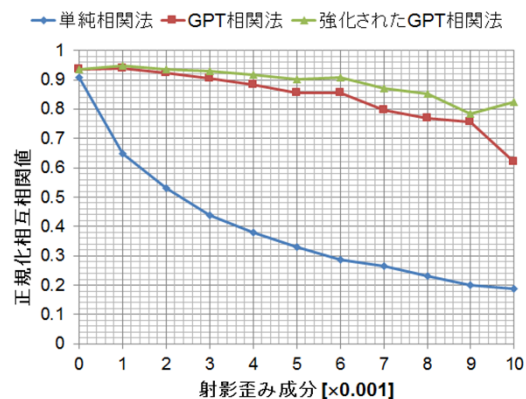


図3 射影歪みの大きさと相関値の関係

(6) これまで理論的な難しさから考慮していなかった GPT 相関法における 2次元射影

変換画像のノルム正規化の検討を進めた。具体的には、変換画像のノルムを保存する目的関数の厳密な定式化、および Newton-Raphson 法による反復解法の計算モデルへの新たな導入を行い、2次元射影変換8パラメータの準最適解を同時に決定することが可能となった。これにより、最適解への収束性が大きく向上し、GPT 相関法のマッチング能力の向上および処理量削減を合わせて達成できた。

(7) 研究成果は国際会議で発表し、広く社会に発信した。特に、上記(2)、(3)で述べた画期的な研究成果である高速化 GPT 相関法と k 近傍法との組み合わせによる高精度画像認識技術については権威ある海外ジャーナルに投稿して採録・掲載となった。海外からの閲覧およびダウンロード数も極めて多い。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Yukihiko Yamashita and Toru Wakahara, "Affine-transformation and 2D-projection invariant k-NN classification of handwritten characters via a new matching measure," Pattern Recognition, vol. 52, no. 4, pp. 459-470, Apr. 2016. 査読有.  
DOI: 10.1016/j.patcog.2015.10.002

[学会発表] (計6件)

- ① Shizhi Zhang, Toru Wakahara, and Yukihiko Yamashita, "Theoretical criterion for image matching using GPT correlation," Proc. 23<sup>rd</sup> International Conference on Pattern Recognition, pp. 544-549, Cancun (Mexico), Dec. 5, 2016. 査読有.  
DOI: 10.1109/ICPR.2016.7899692
- ② Shizhi Zhang, Toru Wakahara, and Yukihiko Yamashita, "An improved criterion for image matching using GPT correlation with a norm normalization factor," Proc. of 19<sup>th</sup> Meeting on Image Recognition and Understanding (MIRU2016), PS1-4, pp. 1-4, アクトシティ浜松 (静岡県浜松市), 2016年8月2日. 査読有.
- ③ Toru Wakahara and Yukihiko Yamashita, "Enhanced GPT correlation for 2D projection transformation invariant template matching," Proc. of 37<sup>th</sup> German Conference on Pattern Recognition, Springer LNCS 9358, pp. 435-445, Aachen (Germany), Oct. 9, 2015. 査読有.  
DOI: 10.1007/978-3-319-24947-6\_36
- ④ Toru Wakahara and Yukihiko Yamashita, "GPT correlation for 2D projection transformation invariant template matching," Proc. 22<sup>nd</sup> International Conference on

Pattern Recognition, pp. 3810-3815, Stockholm (Sweden), Aug. 28, 2014. 査読有.

DOI: 10.1109/ICPR.2014.654

- ⑤ Yukihiro Yamashita and Toru Wakahara, “k-NN classification of handwritten characters using a new distortion-tolerant matching measure,” Proc. 22<sup>nd</sup> International Conference on Pattern Recognition, pp. 262-267, Stockholm (Sweden), Aug. 26, 2014. 査読有.

DOI: 10.1109/ICPR.2014.54

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )