

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)04-0640-07

论文索引信息: 谭志国, 鲁敏, 任戈, 刘顺发. 匹配与姿态估计的粒子群优化算法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4): 640-646

匹配与姿态估计的粒子群优化算法

谭志国¹⁾, 鲁敏¹⁾, 任戈²⁾, 刘顺发²⁾

¹⁾(国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 重点实验室, 长沙 410073) ²⁾(中国科学院光束控制重点实验室, 成都 610200)

摘要: 点模式匹配问题是机器视觉与模式识别领域中一个基础问题, 在目标识别、医学图像配准、遥感图像匹配、姿态估计等方面都得到广泛应用。提出一种在仿射变换下利用粒子群优化算法进行图像点模式下的匹配与姿态估计的方法。算法首先把点集匹配问题转化为解空间为仿射参数空间下的目标函数优化问题, 然后运用粒子群算法对相应的变换参数进行搜索, 获得问题最优解。本文贡献如下: 1) 给出一种仿射参数的初始估计方法, 提高了后续算法搜索效率; 2) 引入阈值和最近点规则, 改进了最近点匹配搜索方法, 能较好地拒绝出格点 (outliers), 并提高算法有效性; 3) 从两方面对 PSO 方法进行了改进, 加强了原 PSO 的全局和局部搜索能力。实验结果表明, 算法具有有效性和鲁棒性。

关键词: 计算机视觉; 姿态估计; 点模式匹配; 粒子群优化

Particle swarm optimization based pose and correspondence estimation

Tan Zhiguo¹⁾, Lu Min¹⁾, Ren Ge²⁾, Liu Shunfa²⁾

¹⁾(State Lab of Automatic Target Recognition, National University of Defense Technology, Changsha 410073 China)

²⁾(Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610200 China)

Abstract: Point Pattern Matching (PPM) is an important issue of computer vision and pattern recognition, which is widely used in target recognition, medical and remote image registration, pose estimation, etc. This paper proposes a particle swarm optimization (PSO) based approach for pose and correspondences estimation between the feature points of two images under affine transformation. In the method, the point sets matching problem is formulated as an objective function's optimization problem in the affine transformation parameters solution space. The PSO is used to search for optimal transformation parameters. There are three contributions made in this paper. Firstly, we develop an initial transformation parameters estimation method for PSO, which greatly improve the algorithms efficiency and veracity. Secondly, we introduce a threshold to correspondence finding, which rejects outliers and enhances veracity while using "Nearest Neighbors Search". Thirdly, we propose two approaches to improve the searching efficiency when using the original PSO. Experiments demonstrate the validity and robustness of the algorithm.

Keywords: computer vision; pose estimation; point pattern matching; particle swarm optimization

0 引言

在计算机视觉领域中, 点模式匹配问题一直是众多学者研究的焦点, 它包括对应图像中形状、点集

的匹配与相应变换参数(姿态)的估计。在许多高级计算机视觉应用中, 该问题都是十分重要的, 如图像检索、目标跟踪、全景拼图、目标识别、计算生物与计算化学等。许多学者都致力于解决匹配中的准确度与计算复杂度的问题。通常进行点集的匹配有两

收稿日期: 2009-11-03; 修回日期: 2010-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(60972114)。

第一作者简介: 谭志国(1978—), 男, 国防科技大学电子科学与工程学院博士后, 主要从事计算机视觉与目标识别研究工作。E-mail: tan5460@sina.com。

个关键问题,即点与点的对应关系和点集间的几何变换关系。基于这点可把目前的算法分为两大类。第1类是基于变换参数估计的方法,包括ICP算法^[1]、基于遗传算法的方法^[2-3]、软指派方法^[4-5]、双步EM估计算法^[6]等。该类方法,把对应点集假设为在某种变换关系和点与点对应关系下的最优化问题,通过对变换参数与点对应关系的反复估计,迭代获得问题最优解,因而参数与匹配估计为该算法的关键。第2类是基于特征比较的方法,如shape context方法^[7-8]、图匹配方法、谱图论方法^[9-11]等。该类方法提取点集中点的特征,通过比较特征来获取对应点的匹配关系。

提出一种基于PSO的点模式匹配与姿态估计算法。首先对点集匹配基本问题进行阐述,建立以变换参数为解空间的目标函数,在此基础上引入PSO方法对仿射参数解空间进行最优解搜索。同时,运用最近点方法求解点与点对应关系。

1 问题描述

点集匹配问题描述如下:给定两幅对应图像,提取特征点集 $\mathbf{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, $\mathbf{Q} = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 。点集匹配问题是在某种最佳的姿态下,求解 \mathbf{P} 、 \mathbf{Q} 点集中点与点的对应关系,使得 \mathbf{P} 点集尽可能地接近 \mathbf{Q} 点集。本文所述问题是在全局最小化的能量(目标)函数规范下,寻求最优的仿射变换参数 $\mathbf{A} = (\mathbf{F}, \mathbf{T})$ 和匹配对应关系。

在仿射变换下,任意一对匹配对应点对 p_i 与 q_j ,可用下式表示

$$q_j = \mathbf{F}p_i + \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} \quad (1)$$

式中, \mathbf{F} 为 2×2 的仿射变换矩阵, \mathbf{T} 为2维平移向量, $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ 为噪声项。

为求解匹配对应关系,定义匹配矩阵 \mathbf{M} ,其元素为 $\{m_{ij}\}$ 变量,定义为

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{若 } p_i \text{ 与 } q_j \text{ 匹配} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

为确保一对一的匹配,矩阵的每一行与列元素和都为1。此外,点集匹配通常会出现不完全匹配的情况,即点集中存在出格点。出格点是指匹配点集中存在在对应点集中不能找到对应点的元素。为解决该问题,在矩阵中额外加入一行与一列表示虚点 p_{m+1} 与 q_{n+1} ,使矩阵满足上述约束(虚点是实际图像中不存在,为满足约束而人为设置的点)。当

某一点为出格点时,把其与虚点对应,相应元素设为1。

由此, \mathbf{P} 、 \mathbf{Q} 匹配问题转化为如下能量函数最小化问题

$$E(\mathbf{M}, \mathbf{F}, \mathbf{T}) = \sum_{i,j} m_{i,j} \|q_j - \mathbf{F}p_i - \mathbf{T}\|^2 + \alpha \left(\sum_{j=1}^n m_{m+1,j} + \sum_{i=1}^m m_{i,n+1} \right) \quad (2)$$

式中,第1项为匹配误差,代表所有最小残差 $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ 的平方和,第2项用于控制出格点的惩罚项,当匹配点集中元素被判定为出格点时,会进行相应的惩罚从而使算法尽可能多的寻找匹配点对减少出格点的判定。 α 为惩罚因子, α 越大则表示对出格点判定的约束越严厉。整个匹配过程是寻找最优变换 $\mathbf{A} = (\mathbf{F}, \mathbf{T})$ 下,最佳的匹配矩阵 \mathbf{M} 使能量函数 $E(\mathbf{M}, \mathbf{F}, \mathbf{T})$ 最小。

2 基于粒子群优化的姿态估计

PSO是最初由Kennedy和Eberhart^[12]于1995年提出的一种用于求解复杂数值问题的优化方法。该方法易于实现,且被证明对于多种优化问题都非常有效。

2.1 基本PSO算法

PSO是模拟鱼群或鸟群的社会性觅食行为。把模拟的鱼群或鸟群称为种群,种群中成员称为粒子。粒子在觅食(搜索)过程中得益于其他成员的发现与经验。

首先,在解空间中初始化一个种群。文中解空间为由仿射变换参数 \mathbf{A} 组成的6维空间。每一粒子位置 $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})'$ 都为优化问题的一个解,并由目标函数,式(2)为之确定一个适应值。每个粒子将在空间中运动,并由速度 $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})'$ 决定其方向和距离。在每一代中,粒子跟踪两个极值,一个为粒子本身迄今找到的最优解 $\mathbf{u}_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in})'$,代表自身认知水平;另一个为全种群找到的最优解 $\mathbf{u}_g = (u_{g1}, u_{g2}, \dots, u_{gn})'$,代表社会认知水平。按追随当前最优粒子的原理,粒子 x_i 将按下列两式改变速度和位置

$$v_{id}(t+1) = v_{id}(t) + c_1 r_1 (u_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 r_2 (u_{gd}(t) - x_{id}(t)) \quad (3)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (4)$$

式中, $d=1, 2, \dots, n$; $i=1, 2, \dots, S$, S 为种群规模, r_1 和 r_2 为均匀分布于 $[0, 1]$ 之间的随机数, c_1 和 c_2 为

加速度限定因子。通常粒子速度决定了算法的搜索能力。速度快表示算法全局搜索能力强;反之表示局部搜索能力强。

运用基本 PSO 算法常遇到两个问题:迭代初期局部搜索能力较弱,后期全局搜索能力弱,易陷入局部极值;存在粒子早熟问题,即当群体最优粒子正好处于目标函数局部最优时,容易使算法陷入局部值。

2.2 改进的 PSO 算法

惯性权重模型是由 Clerc 和 Kennedy 提出的一种改进 PSO 算法^[13],它用一个惯性权重系数来提高算法搜索能力。这样粒子速度更新公式变为

$$v_{id}(t+1) = Wv_{id}(t) + c_1r_1(u_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2r_2(u_{gd}(t) - x_{id}(t)) \quad (5)$$

式中, W 为惯性权重系数,取值一般在 $0.4 \sim 0.9$ 。然而,该方法在实际应用中,仍不能完全解决上述两个问题。为适应点集匹配问题,对该模型进行了改进。

2.2.1 解决群体搜索能力问题

造成问题的原因是粒子飞行速度初期较大,而后期较小。由于点匹配问题重要的衡量标志是匹配点对数,利用这一特性,对飞行速度进行控制。如果历次迭代搜索到的匹配点对数不断增加,飞行速度应减慢;当搜索到的点匹配对数停滞不前时,表明速度应加快。本文定义如下函数改变惯性权重系数,从而控制粒子速度

$$W_{i+1}(n, d, p) = \begin{cases} W_i & d < D, n < N \text{ 或 } p < Z \\ \gamma W_i & d \geq D \text{ 且 } p \geq Z \\ \beta W_i & n \geq N \text{ 且 } p \geq Z \end{cases} \quad (6)$$

式中, n 是全局最优匹配点数连续没有变化的次数, d 是全局最优匹配点数连续增加的次数, p 是该次迭代全局最优匹配的点对数, N, D, Z 分别为其相应的门限值, γ 为一个小于 1 的正减速系数, β 为一个大于 1 的正加速系数。为保持算法收敛和搜索能力, W 取值为 $0.4 \sim 0.9$ 。

2.2.2 解决粒子早熟问题

粒子早熟是由于最优粒子正好处于局部最优,速度更新公式后两项为零,而速度又较慢,则可能使群体最优值得不到更新,停滞于局部最优,最终使群体陷入局部值。

对速度更新公式的第 2 项 $c_1r_1(p_{id}(t) - x_{id}(t))$ 进行改进,由单个粒子的个体极值 p_{id} 更新,变为某一群体共识 p_{cd} 来更新速度。 p_{cd} 定义为与 i 粒子相邻的几个粒子组成群体的个体最优平均值。采取这

种方式后,每个粒子都借鉴了其邻域粒子经验,利用更多信息决策自己行为;同时早熟粒子不再被困局部。

2.3 仿射变换参数盲估计

对于随机搜索优化算法来说,解空间的初始化是非常关键的,好的初值能提高算法的搜索效率,PSO 算法也不例外。为解决该问题,提出一种局部随机的初始化方法来代替 PSO 中的全局随机初始化方法。文中首先给出一种仿射变换参数的盲估计方法来计算变换参数初值,而后赋予某一粒子。其他粒子,在该粒子的周围服从高斯分布随机散布。下面重点介绍仿射变换参数的盲估计方法。

当存在 3 对或 3 对以上的匹配对应点时,计算 P, Q 点集间的仿射变换参数是较为简单的。但在实际情况下,点对间的匹配对应关系通常是未知的,因此直接估计仿射变换参数是非常困难的。为此,给出一种在匹配对应关系未知时的仿射变换参数盲估法。方法分为两步:首先,去除平移参数影响;然后,构建虚拟匹配对应点,估计仿射矩阵。

2.3.1 平移参数

假设点集 Q 是 P 经过仿射变换得到,满足如下关系式

$$Q = PF^T + hT \quad (7)$$

式中, $F = \begin{bmatrix} f_1 & f_3 \\ f_2 & f_4 \end{bmatrix}$ 为仿射矩阵, $T = (t_x, t_y)$ 是平移参数, $h = (1, 1, \dots, 1)^T$ 。设 P, Q 质心分别为 $p_{cid} = (x_{cid}, y_{cid})$, $q_{cid} = (\bar{x}_{cid}, \bar{y}_{cid})$, 则有

$$\begin{cases} \bar{x}_{cid} = f_1x_{cid} + f_2y_{cid} + t_x \\ \bar{y}_{cid} = f_3x_{cid} + f_4y_{cid} + t_y \end{cases} \quad (8)$$

由式(8),如果 P 与 Q 点集质心都在坐标原点,即 $p_{cid} = (0, 0)$, $q_{cid} = (0, 0)$, 则 $t = (0, 0)$ 。即把 P 与 Q 点集质心移至同一坐标原点,初值估计时可不考虑平移矢量,此时有

$$Q = PF^T \quad (9)$$

2.3.2 构建虚拟对应点估计仿射矩阵

式(9)中仿射变换是一种线性变换,因此可通过线性操作来构建点集匹配关系进行参数估计。下面介绍一种简单易行的构造虚拟点对方法,并建立这种匹配关系。

通常经 2.3.1 节方法处理后, P, Q 点集在图像坐标系的 4 个象限中都有点分布,此时 $\forall p_i \in P$ 的

坐标为 (x_i, y_i) , $\forall q_i \in Q$ 的坐标为 (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 。假设 Q 中的点与 P 中匹配对应点处于同一象限,即仿射变化不严重情况。设 k_1, k_2, k_3, k_4 分别为 P 和 Q 在坐标系 4 个象限的匹配点对数,由式(9)可得

$$\begin{cases} \frac{1}{k_N} \sum_{p_i \in V_N} \bar{x}_i = \frac{1}{k_N} \left(f_1 \sum_{q_j \in V_N} x_j + f_2 \sum_{q_j \in V_N} y_j \right) \\ \frac{1}{k_N} \sum_{p_i \in V_N} \bar{y}_i = \frac{1}{k_N} \left(f_3 \sum_{q_j \in V_N} x_j + f_4 \sum_{q_j \in V_N} y_j \right) \end{cases}$$

式中, $N=1, 2, 3, 4$, V_N 表示第 N 象限。得到 4 对虚拟匹配点对

$$\begin{aligned} \bar{p}_N &= \left(\frac{1}{k_N} \sum_{q_j \in V_N} x_j, \frac{1}{k_N} \sum_{q_j \in V_N} y_j \right)^T \\ \bar{q}_N &= \left(\frac{1}{k_N} \sum_{p_i \in V_N} \bar{x}_i, \frac{1}{k_N} \sum_{p_i \in V_N} \bar{y}_i \right)^T \end{aligned}$$

即 4 个象限子点集质心。通过该方法,可以较好地对应仿射参数进行估计。然而,实际中上述假设不完全成立,但该方法仍能较好地为算法提供初值估计。

3 估计匹配对应关系

本节主要解决点集匹配对应关系 M 估计问题。一般来说,可采取最近点原则进行点集匹配对应。它定义点集中点在另一点集中的匹配对应点为与该点距离最近的点。这里不对该方法作详细介绍,只是指出在应用中出现的两个问题。

图 1 中有两对匹配对应点,其中实心点 1 与空心点 1', 2 与 2' 匹配。如果根据最近点原则,只能找到 1 对匹配对应点。实际在进行匹配点选择时,通常不仅仅是最近点,在距离范围限定的情况下还会选择次近点。

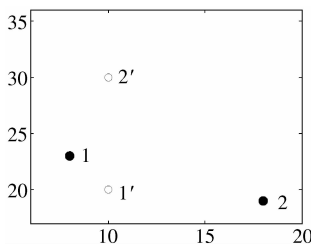


图 1 匹配对应点

Fig. 1 Finding correspondences

此外,考虑 P 与 Q 为不完全匹配情况,两个点集都存在出格点。当 Q 中所有非出格点都找到相应 P 中的对应匹配点时, Q 中的出格点则会任意寻找 P 中的出格点作为匹配对应点,从而导致误匹

配。在这种情况下,需对匹配关系进行控制。由此,给出如下方法来估计点对间的匹配对应关系。

1) $\forall q_i \in Q$ 在 P 中寻找匹配点,需满足

$$d(q_i, P) = \min_{p_j \in P} \|q_i - p_j\| \leq \varepsilon \quad (10)$$

如果存在数个点与 P 中一点匹配,则选择距离最近的作为匹配对应点。

2) 通过第 1 步,未匹配对应的点组成了 \bar{Q}, \bar{P} 两个点集。这时对 \bar{Q}, \bar{P} 重复第 1 步,直到 $\forall q_i \in \bar{Q}$ 都找到匹配对应点或满足

$$d(q_i, \bar{P}) = \min_{p_j \in \bar{P}} \|q_i - p_j\| > \varepsilon \quad (11)$$

通过该方法可解决上述问题。阈值 ε 可以限制匹配对应判定的距离范围,并在该范围内尽可能多的找到匹配点对,从而减少出格点的误判。

通过以上阐述,算法流程如图 2 所示。

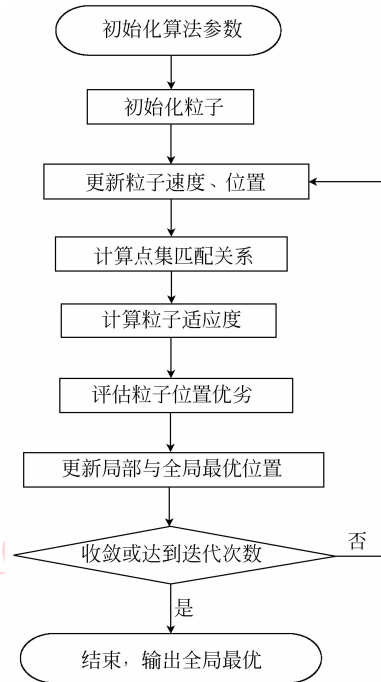


图 2 本文算法流程图

Fig. 2 Flow diagram of the algorithm

4 随机点集实验

为验证算法有效性,文中进行了 4 组实验。实验中 PSO 参数分别为:种群规模 $S = 20$, $c_1, c_2 = 2.0$, 最大迭代次数 $itr = 250$, 权重系数参数 $N = 10$, $D = 5$, $Z = 0.66 \min(m, n)$, $W_0 = 0.7$, $\gamma = 0.8$ 以及 $\beta = 1.2$ 。实验中,对本文算法与 ICP 算法以及文献[14]中软匹配(SA)算法进行了比较。

文中进行了大量的随机点集实验。每次实验中首先随机在大小为 120×120 像素大小图像中产生 70 个点的点集 P , 然后对其进行仿射变换、旋转、加噪、加出格点等操作, 由此得到点集 Q 。

第 1 组实验, 在不同的仿射变换下对算法进行了测试。实验中, 仿射变换矩阵的行列式大小从 0.3 至 3 之间不断变化, 递进为 0.05, 每次递进进行实验 20 次。图 3 显示了实验的统计结果。与 ICP 算法及 SA 算法比较, 实验中本文算法在仿射变换不严重的情况下即仿射矩阵行列式范围在 $[0.7, 2.4]$ 时, 有较好地表现。当矩阵行列式过小或过大时, 误匹配率由于严重的仿射形变而随之增大。ICP 算法在当矩阵行列式小于 0.6 时相对有较好表现, 但随着该值大于 1.4 时, 误匹配率迅速增大。SA 算法则在当该值大于 1.8 时, 误匹配率迅速增大。

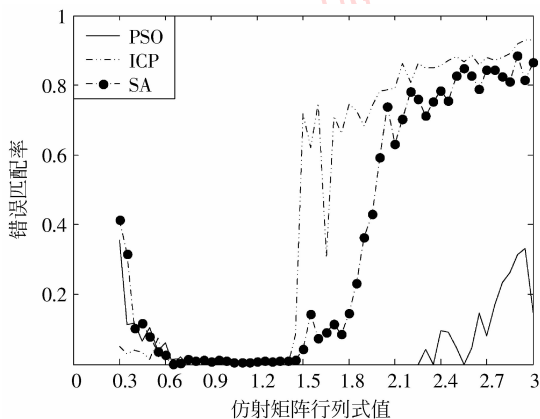


图 3 不同行列式值实验统计结果

Fig. 3 Statistical result of different determinant

第 2 组实验测试了旋转对算法的影响。实验在经过一定仿射变换后, 点集 P 再进行不同角度的旋转得到 Q 。旋转角度为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间, 旋转后 Q 中加入标准差为 0.01 的随机噪声, 每一度旋转进行 20 次实验。图 4 给出不同旋转下误匹配率的统计结果。实验结果表明, 本文算法与 ICP 算法及 SA 算法在旋转较小时性能接近, 但本文算法有更为稳定的结果。本文算法在旋转 $0^\circ \sim 25^\circ$ 之间的误匹配率都非常小。在实际应用中, 10° 左右的旋转是较为常见的。相对来说, ICP 算法在 15° 附近则出现较剧烈的变化; 而 SA 算法较为稳定, 但表现略逊于本文算法。

分析前两组实验, 由于 3 种算法采用的都是以空间位置匹配特征, 距离为匹配准则, 因空间距离不

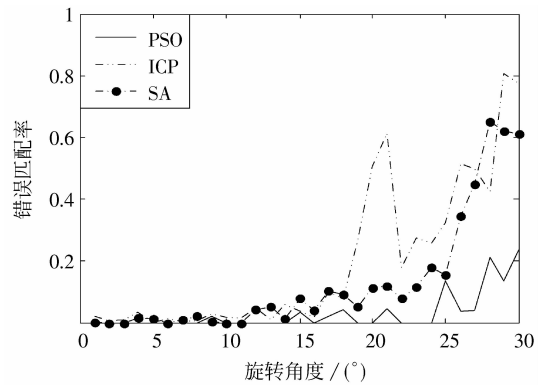


图 4 不同旋转仿射矩阵下实验统计结果

Fig. 4 Statistical result of different rotation affine matrix

具有仿射不变性, 当仿射程度与旋转较大时, 算法性能都会下降。SA 算法在匹配方式上有所改进, 在一定程度上改善了算法性能。本文算法采取了初值估计策略, 在实验中具有更好地表现。

第 3 组实验测试了算法的抗噪性能, 在一定仿射变换的基础上给 Q 点集中点的坐标都加入不同强度高斯噪声。噪声标准差为 σ , 以像素为单位, 以 0.12 个单位进行增强, 逐渐从 0.12 变化到 12 个单位, 每次递增进行实验 50 次。如图 5 所示, 总体上来说, ICP 与本文算法抗噪性能接近, 而 SA 算法性能更好。当噪声标准差小于 6 个单位时, 本文算法则有比 ICP 及 SA 算法更为优秀的表现。当噪声标准值大于 9 个单位时, ICP 算法表现略好, SA 算法更为突出, 但此时 3 种算法的误匹配率已经达到 30% 左右。更好抗噪性能的研究也是将来的重点之一。

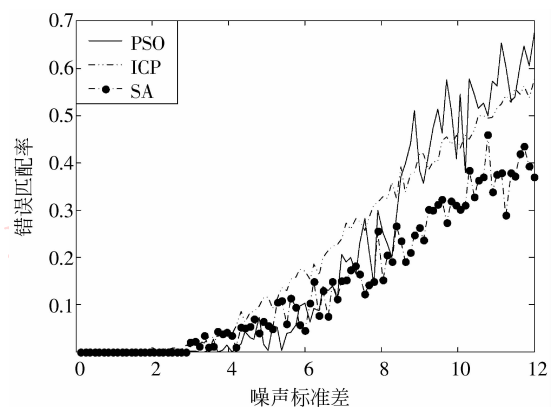


图 5 不同噪声情况下实验统计结果

Fig. 5 Statistical result of noises added

第 4 组实验对算法的抗出格点性能进行了测试。在一定仿射变换下,给 Q 点集加入不同比率的出格点。出格点比率从 0.1 开始以 0.03 的比率增加,逐渐到 1,每次递增进行实验 50 次。图 6 给出了实验结果,图中显示本文算法比 ICP 算法具有更好的抗出格点性能,与 SA 算法性能相近。分析原因,主要是 SA 算法与本文算法都采用了通过设置虚点方法来处理出格点问题,从而在一定程度上改善了算法在该方面的性能。而本文中采取的次近点匹配方式与初值估计策略,使本文算法表现略胜于 SA 算法。实验中,当出格点比率小于 0.8 时,本文算法能成功匹配,而当比率为 1 时,则失效。这也是将来需要进一步研究的工作。

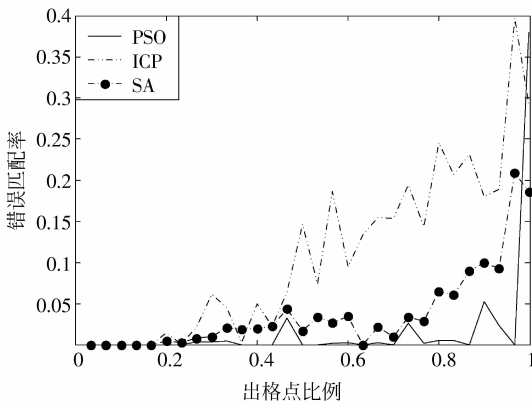
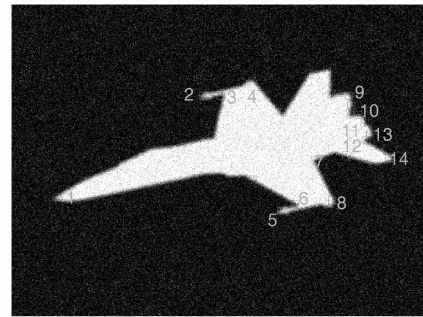


图 6 不同比率出格点下实验统计结果
Fig. 6 Statistical result of outliers added

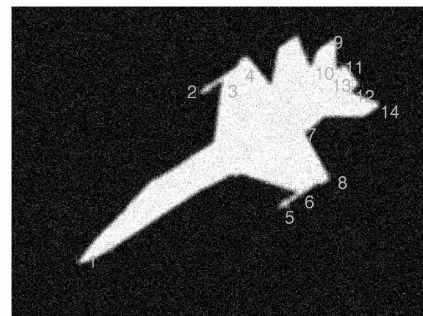
5 姿态与匹配对应实验

算法可用于基准图像与输入图像中特征点集之间的姿态与匹配计算。通常图像中提取角点作为特征点。在进行图像配准与目标识别时,从输入图像中提取角点获得输入点集,然后运用本文算法来估计基准图像特征点集与输入点集的匹配对应关系。图 7 给出了基准图像与输入图像及其相应提取的特征点集。这两幅图像是在不同姿态下 5 000 m 距离获得的模拟 F18 飞机的红外图像。在这种情况下,目标可近似为平面目标,图像投影服从仿射变换,因此可利用本文方法进行它们之间的姿态估计。在基准图像和输入图像中分别提取 24 和 26 个特征点。运用本文方法找到 14 对匹配对应点,分别在图中进行相应标记。在图 7 中,还给出了两幅图像进行配

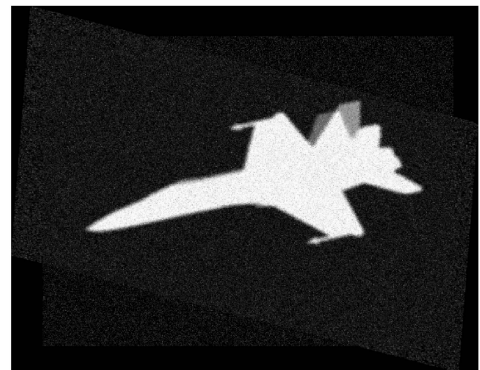
准的结果,该结果从某种角度解释了图中某些对应点未能匹配上的现象。



(a) 基准图像及特征点集



(b) 输入图像及特征点集



(c) 配准图像

图 7 匹配与姿态估计实验

Fig. 7 Correspondence and pose estimation

6 结 论

提出一种基于 PSO 的点集匹配与姿态估计算法,它能有效地估计两个点模式间的仿射变换参数及点对对应关系,同时拒绝出格点。在模拟点集实验中,与 ICP 算法进行比较,本文算法在抗仿射形变、抗噪和抗出格点方面都具有一定优势,而在图像数据的特征点匹配中,也显示了良好的性能,说明其具有一定的鲁棒性与有效性。本文算法能广泛应用于目标探测、识别、图像配准和检索等领域。

参考文献 (References)

- [1] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2):239-256.
- [2] Zhang L H, Xu W L, Chang C. Genetic algorithm for affine point pattern matching [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(1-3): 9-19.
- [3] Ansari N, Chen M H, Hou E S H. Point pattern matching by a genetic algorithm [C]//Proceedings of 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. New York, USA: IEEE Press, 1990:1233-1238.
- [4] Chui H, Rangarajan A. A new algorithm for non-rigid point matching [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York, USA: IEEE Press, 2000, 2: 44-51.
- [5] Gold S, Rangarajan A, Lu C P, et al. New algorithms for 2D and 3D point matching: pose estimation and correspondence [J]. Pattern Recognition, 1998, 31(8):1019-1031.
- [6] Cross, A D J, Hancock E R, Graph matching with a dual-step EM algorithm [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(11):1236-1253.
- [7] Belongie S, Malik J, Puzicha J. Shape matching and object recognition using shape contexts [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(4):509-522.
- [8] Belongie S, Malik J, Puzicha J. Shape context: a new descriptor for shape matching and object recognition [C]//Advances in Neural Information Processing Systems 13th Proceeding Conference. Cambridge, MA: MIT Press, 2000:831-837.
- [9] Shapiro L S, Brady J M. Feature-based correspondence: an eigenvector approach [J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(5): 283-288.
- [10] Xue Z, Teoh E K. A novel eigenvector approach to pose and correspondence estimation [C]//Proceedings IEEE International Conference on Systems. New York, USA: IEEE Press, 2000: 1489-1494.
- [11] Carcassoni M, Hancock E R. Spectral correspondence for point pattern matching [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(1):193-204.
- [12] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C]//Proc. IEEE International Conference on Neural Network. New York, USA: IEEE Press, 1995: 1942-1948.
- [13] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. IEEE Transactions on Evolut. Comput, 2002, 6(7): 58-73.
- [14] Lian Wei, Zhang Hongcai, Pan Quan. A point matching algorithm using quadratic form as barrier function [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(9):1080-1087. [连玮, 张洪才, 潘泉. 一种采用二次式作为阻尼项的点匹配算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(9):1080-1087.]