

基于 SIFT 的 POCS 图像超分辨率重建

王凤娇,陈光化,周 文

(上海大学 机电工程与自动化学院,上海 200072)

摘 要:针对传统的 POCS 图像超分辨率重建算法中广泛使用的基于改进的 Keren 配准算法,对于序列帧间存在剪切和非均匀尺度变换现象时,很难做到精确的亚像素级配准,文中讨论了一种基于 SIFT 算法的 POCS 序列图像超分辨率重建算法。首先利用 SIFT 算法提取序列帧与参考帧间的 SIFT 关键点,随后选取匹配关键点对,通过 RANSAC 去除误配点的同时估算出六参数仿射变换参数,最后使用 POCS 重建算法得到最终的重建结果。实验结果表明:该方法能有效地解决因运动估计不准而引起的重建图像效果不好的问题,特别是在序列帧间存在剪切和非均匀尺度变换现象时,重建效果明显好于传统的 POCS 算法,具有更强适应性。

关键词:超分辨率;凸集投影;尺度不变特征转换;图像配准;仿射变换

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)11-0039-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.11.010

Multi-frame Image Super-resolution Reconstruction Based on SIFT

WANG Feng-jiao, CHEN Guang-hua, ZHOU Wen

(School of Electrical and Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University,
Shanghai 200072, China)

Abstract: On account of improved Keren registration algorithm used widely in traditional POCS image super-resolution reconstruction is difficult to achieve registration of sub-pixel accuracy for the situation where exists shear and non-uniform scale transformation between image sequence, a multi-frame image super-resolution reconstruction method is discussed in this paper based on SIFT algorithm. Firstly, SIFT keypoint pairs between current frame and reference frame are extracted by using SIFT algorithm. Then the parameters of six-parameter affine transformation are calculated through RANSAC. Lastly, the reconstruction image can be gained by utilizing POCS super-resolution reconstruction method. Experimental results show that the method considered in this paper can solve reconstruction problem which results from inaccurate sub-pixel image registration and has better adaptability, especially in the case where exists shear and non-uniform scale transformation between image sequence, and the reconstruction effect is better than traditional POCS algorithm.

Key words: super-resolution; POCS; SIFT; image registration; affine transformation

0 引言

超分辨率图像重建^[1]利用同一场景的低分辨率退化图像序列重建出一幅分辨率较高的图像,它的两个必要条件是:同一场景的图像序列,即必须提高时间采样率;图像序列中的各帧图像间存在亚像素级的运动,这样各帧图像才能提供互补的非冗余信息。超分辨率图像重建将图像序列中的非冗余信息进行融合和恢复,得到比低分辨率序列中的任何一帧图像分辨率更高、细节更丰富的高分辨率图像。文中采用的重建算法是凸集投影(Project Onto Convex Sets, POCS)算

法^[2-3],该算法利用投影到凸集的原理进行图像重建,能更好地结合各种先验约束条件,如图像正定、能量有界、数据可靠等,且直观有效,是近年来空域算法的热点之一^[4]。在序列超分辨率图像重建中,图像配准^[5]的准确性和可靠性是影响重建图像质量的关键因素之一。目前图像配准方法概括起来有两种:区域法和特征法。区域法又称为模板匹配法,这种方法是利用图像区域之间的相关性,对图像的灰度信息进行匹配的一种方法,区域配准法无法利用图像的结构信息,对于复杂的图像转换几乎无效,而传统的 POCS 图像超分

收稿日期:2013-12-14

修回日期:2014-03-19

网络出版时间:2014-09-11

基金项目:国家“863”高技术发展计划项目(2013AA03A1121)

作者简介:王凤娇(1988-),女,硕士研究生,研究方向为图像超分辨率重建。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140911.0956.013.html>

分辨率重建算法大多采用区域法配准;特征法并不直接对图像灰度信息进行操作,而是首先从基准图像和浮动图像中提取一些共同特征作为配准基元,然后通过建立配准基元之间的对应关系估算出基准图像与浮动图像之间几何变换模型及其参变量值,具有鲁棒性强和适应性强的优点。文中采用尺度不变特征转换(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)算法提取特征点,因为尺度不变特征配准法对大位移、旋转、伸缩等具有良好的鲁棒性。采取 SIFT 算法进行重建前的序列帧与参考帧的特征点提取,能有效地消除几何形变、噪声干扰等对重建图像的影响。

1 图像配准原理

设两幅图像分别为 $f(x', y')$ 和 $g(x, y)$, 则两幅图像在数学上有如下变换关系^[6]:

$$g(x, y) = I[f(h(x, y))] \quad (1)$$

其中, h 表示空间变换; I 表示灰度变换。

通常灰度变换在图像预处理过程中处理, 因此图像配准一般只关心坐标的几何变换。在超分辨率重建过程中, 常常将图像之间的变换简化为刚体变换或仿射变换。

在仿射模型决定的运动场中, 连续两帧图像中的像素点位置满足如下对应关系^[7]:

$$I_1(P) = I_2(AP + D) \quad (2)$$

其中, P 为图像的像素位置; A 为仿射模型的线性项; D 为仿射模型的平移项。

在二维图像中, 小范围的区域运动可以看作平面刚体的转动和平动以及镜头拉动造成的缩放, 因此通用的六参数仿射模型($a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, x_0, y_0$) 可以简化为四参数模型(k_1, k_2, x_0, y_0), 即 RST (旋转-变化-平移) 模型。RST 模型^[8-9] 实际上是仿射变换的一种特例, 令 $k_1 = \lambda \cos \theta$, $k_2 = \lambda \sin \theta$, 图像间二维空间上的仿射变换可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ -k_2 & k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)对应的坐标系模型如图 1 所示。四参数仿射模型只存在平移、旋转、等比例缩放(或称均匀尺度变换)变换的情况。此坐标系模型有两个特性: 二坐标轴需正交和二坐标轴需尺度相同。

文中传统的 POCS 算法图像配准中的运动变换所选用的模型为文献[10]中所提出的四参数仿射变换模型, 即:

$$\begin{aligned} x' &= x + k_1 x + k_2 y + x_0 \\ y' &= y + k_1 y - k_2 x + y_0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, (x, y) 为原图像 $g(x, y)$ 的坐标; (x', y') 为

经过仿射变换后的图像 $f(x', y')$ 的坐标; k_1, k_2, x_0, y_0 为四参数仿射变换模型的参数。

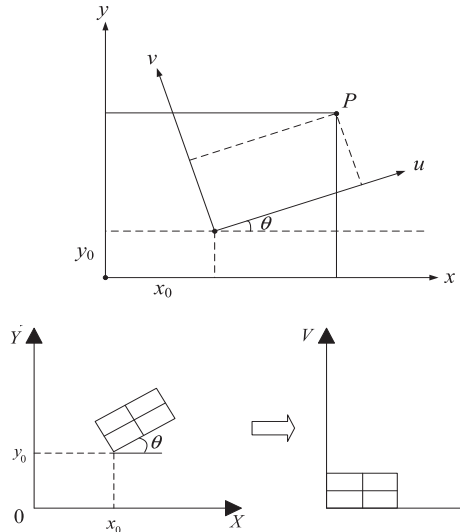


图 1 四参数仿射变换坐标系模型

文中基于 SIFT 算法的 POCS 图像超分辨率重建算法的运动变换模型为六参数仿射变换模型, 即:

$$\begin{aligned} x' &= \lambda_x \cdot \cos(\theta + \Delta\theta) \cdot x - \lambda_y \cdot \sin(\theta + \Delta\theta) \cdot y + x_0 \\ y' &= \lambda_x \cdot \sin(\theta + \Delta\theta) \cdot x + \lambda_y \cdot \cos(\theta + \Delta\theta) \cdot y + y_0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, λ_x, λ_y 分别为 x 轴、 y 轴尺度参数; θ 为旋转角度; $\Delta\theta$ 为 $x - y$ 轴不正交之偏角, 这个偏角可产生图像的错切; x_0, y_0 分别为坐标原点沿 x 轴和 y 轴的平移量。

由式(5)可知, 六参数仿射变换可以是不等比例缩放(或称非均匀尺度变换), 所以六参数仿射变换等效于在四参数仿射变换的基础上再加上错切和非等比例缩放等畸变, 即称六参数仿射变换为一般的仿射变换形式。式(5)可以简写成:

$$\begin{aligned} u &= a_{11} \cdot x + a_{12} \cdot y + x_0 \\ v &= a_{21} \cdot x + a_{22} \cdot y + y_0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $a_{11} = \lambda_x \cdot \cos(\theta + \Delta\theta)$; $a_{12} = -\lambda_y \cdot \sin(\theta + \Delta\theta)$; $a_{21} = \lambda_x \cdot \sin(\theta + \Delta\theta)$; $a_{22} = \lambda_y \cdot \cos(\theta + \Delta\theta)$ 。

式(6)的矩阵形式可写为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)对应的坐标模型如图 2 所示。六参数仿射模型存在平移、旋转、缩放和错切的情况。此坐标模型有两个特性: 二坐标轴可不正交(即错切)和二坐标轴尺度可不相同(即非等比例缩放)。

由上所述可知, RST 模型虽然适用于大多数情况, 但仍不能反映非均匀尺度变换、实际中由于平台移动倾斜等引起的剪切变换。在应用中, 图像目标通常会

发生尺度、旋转等变化。所以在文中选择使用六参数仿射变换运动模型。

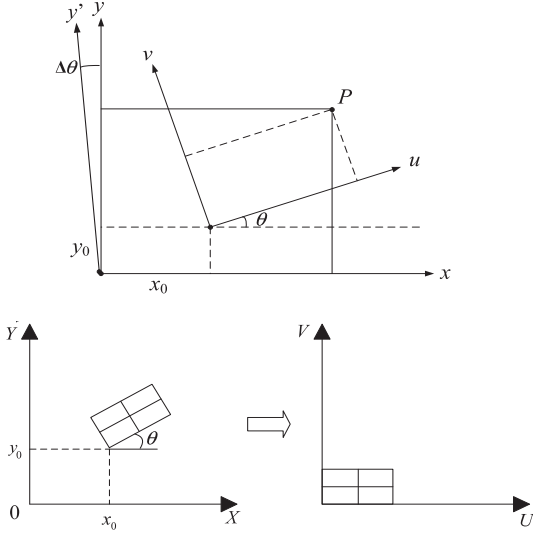


图 2 六参数仿射变换坐标系模型

文中选择 SIFT 算法提取出序列帧与参考帧间的特征点对,引入 RANSAC^[11]鲁棒优化去除不可靠的特征点对的同时估算出变换矩阵的六个参数,完成特征图像的匹配。

2 SIFT 特征提取算法及变换矩阵估计

SIFT 算法^[12]是一种基于尺度空间、对图像缩放和旋转保持不变性的提取局部特征的算法。提取图像 SIFT 特征的步骤主要包括:构造尺度空间、检测极值点、确定关键点主方向和生成关键点的描述子四部分。

为使特征具有尺度不变性,首先将序列图像通过不同尺度的高斯核函数连续滤波和下采样,形成高斯金字塔图像,然后将相邻尺度的两个高斯图像相减得到高斯差分尺度空间(Difference-of-Gaussian, DoG)。为了检测差分尺度空间的局部极值点,每一个采样点都有 26 个相邻点,分别是同尺度中的 8 个相邻点和上下相邻尺度对应位置的 9×2 个点,采样点和所有相邻点比较为最大值或最小值时即为极值点,将所有的极值点作为候选关键点。通过拟合三维二次函数以精确确定关键点的位置和尺度,同时去除低对比度的关键点和不稳定的边缘响应点。

为使 SIFT 特征向量满足旋转不变性,首先为每个关键点确定一个主方向。在对应的高斯滤波图像上,在以关键点为中心的邻域窗口内采样,用直方图统计邻域像素的梯度方向。直方图的峰值代表了该关键点邻域梯度的主方向。至此,已找出了关键点的位置、尺度和主方向。接下来就是构造每个关键点的描述子,取以关键点为中心的 16×16 像素邻域,并将其分为 4×4 图像子块,每个像素定义 8 个方向的向量信息,就可生成 4×4×8=128 维的特征向量。通过对特征向量的

归一化,可以提高特征向量的亮度不变性。至此,每个 SIFT 关键点都可由一个 128 维向量表示。当两幅图像的 SIFT 特征向量生成后,下一步采用关键点特征向量的欧氏距离来作为两幅图像中关键点的相似性判定度量。取参考图像任一关键点和待配准图像中每个关键点的欧式距离,再从中找出欧式距离的最小距离和次小距离,如果最小距离除以次小距离小于某个比例阈值(文中取 0.6),则接受这一对匹配点,否则剔除。

匹配特征点对初步建立以后,因文中选取的是六参数仿射变换模型,至少需利用 3 组匹配点就可以计算出图像之间的坐标转换系。但由于 SIFT 预匹配过程很容易产生误匹配点,文中引入随机抽样一致(RANdom SAmple Consensus, RANSAC)算法来去除不可靠的匹配点对,同时估算出变换矩阵的六个参数,完成特征图像的匹配。

3 POCS 算法的原理

POCS 算法是信号重建与优化分析中的重要理论方法,是一大类迭代重构的算法。该算法利用集合论方法来重建高分辨率图像。该方法中所求图像可能满足若干个不同的约束条件,每个约束条件对应不同的凸集,而所求的超分辨率重建图像存在于一组凸集的交集中。高分辨率图像对应的解空间与一组凸形的约束集合相交,这组凸的约束集合代表了期望的超分辨率图像的一些特性,如像素值非负、能量有界、噪声的概率分布特性、平滑性等,通过这些约束集合可以得到简化的解空间^[13]。POCS 方法就是建立在约束集这一概念基础之上的一个迭代过程。

在超分辨率图像重建中,首先要建立一个联系原始高分辨率图像和低分辨率观测序列图像的获取模型,一般的图像获取模型可表示为:

$$g_l(m_1, m_2) = \sum_{(n_1, n_2)} f(n_1, n_2) h_l(m_1, m_2; n_1, n_2) + \eta_l(m_1, m_2) \quad (8)$$

其中, $g_l(m_1, m_2)$ 为第 l 帧低分辨率观测图像; $f(n_1, n_2)$ 为原始的高分辨率图像; $h_l(m_1, m_2; n_1, n_2)$ 表示空间点扩散函数(Point Spread Function, PSF),称为降质函数; $\eta_l(m_1, m_2)$ 表示加性噪声。

设 $f_{\text{ref}}(x, y)$ 为参考帧中的像素值, $f(x, y)$ 为模拟当前的高分辨率图像的像素经过成像系统后的估计值,则投影像素的估计值为:

$$\hat{f}(x, y) = \sum_{x=X_0-2}^{X_0+2} \sum_{y=Y_0-2}^{Y_0+2} f_{\text{ref}}(x, y) h(x, y) \quad (9)$$

其中, $h(x, y)$ 为点扩散函数的归一化函数。

设 r 为原来 LR 图像的像素值 $g(x, y)$ 与投影像素的估计值 $\hat{f}(x, y)$ 之间的残差,如果 r 的绝对值大于指

定的阈值 e ,就对参考帧中 PSF 窗口内的像素灰度值进行修正:

$$f_{\text{ref}}(x,y) = f_{\text{ref}}(x,y) + \begin{cases} (r-e)h'(x,y), & \text{若 } r > e \\ 0 & \\ (r+e)h'(x,y), & \text{若 } r < -e \end{cases} \quad (10)$$

4 实验结果与讨论

在实验中用到的低分辨率图像序列可以是模拟生成低分辨率图像序列和相机实际拍摄的图像序列,对这两种图像序列进行重建结果的评价标准是不一样的。模拟生成低分辨率图像序列的重建结果由于有原始高分辨率图像的存在,因此可以进行直观的数字比较,如均方误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR),也可以使用人眼观察的方式进行;而实际拍摄的序列图像的重建结果则只能采用人眼观察的方式进行比较。

文中选取实际拍摄的六张书本照片,经过预处理转化成格式为 bmp 的图像(如图 3 所示),这六帧书本图像之间位移量大、旋转角度大,存在剪切、非均匀尺度变换等现象。以序列图像的第一帧作为参考帧,图 4 为书本超分辨率重建实验结果图。



图 3 实际拍摄书本低分辨率图像序列



(a)双三次插值放大图 (b)传统 POCS 重建图 (c)文中算法重建图

图 4 实际拍摄的图像序列的重建实验结果图

图 4(a)是以参考帧双三次插值放大 4 倍所得到的结果图,以(a)作为超分辨率迭代的初始帧;(b)是利用传统 POCS 重建算法得到的重建结果图;(c)是利用文中算法得到的重建结果图。

从图 4 可以看出:双三次插值的方法由于仅仅是单帧图像进行的空间扩展,边界模糊,效果一般;传统的 POCS 重建算法使用的运动模型是四参数仿射变换模型,运用文献[5]中提出的改进的 Keren 配准方法求取运动参数,配准误差较大,最终导致序列帧间存在剪切、非均匀尺度变换等现象,其重建结果较差,由此说明了精确的亚像素级图像配准在超分辨率重建中的重要作用。由于没有原始高分辨率图像,只能从主观方面判断得到,利用文中算法所得的重建结果良好,优于双三次插值算法和传统的 POCS 算法。

由以上仿真实验可知:对于存在大位移、大角度旋转、剪切和非均匀尺度变换现象的序列图像,利用文中算法得出的重建结果的效果比用传统 POCS 算法的要好,特别是在具有剪切和非均匀尺度变换现象的序列图像情况下,文中算法得出的重建结果图效果好于插值算法,而传统的 POCS 算法在这种情况下重建结果较差。所以,基于 SIFT 算法的 POCS 图像超分辨率算法具有良好的适用性。

5 结束语

文中分析了传统的 POCS 超分辨率重建算法所使用的改进的 Keren 配准算法存在的局限,该局限表现在序列帧间存在剪切和非均匀尺度变换现象的情况下,不能得到精确的亚像素级配准,从而导致超分辨率重建图像效果不好。针对这个问题,文中讨论了一种基于 SIFT 算法的 POCS 图像超分辨率重建算法,通过利用 SIFT 算法找到序列帧与参考帧间的 SIFT 关键点,同时运动估计模型采用六参数仿射变换模型而不是简化的四参数仿射模型,利用 RANSAC 去除奇异点并估算出六参数仿射变换参数。仿真实验结果表明,对于存在大位移、大角度旋转、剪切和非均匀尺度变换现象的序列图像,基于文中算法得到的重建结果图效果优于传统 POCS 图像超分辨率重建算法的效果。

参考文献:

- [1] 禹 晶. 序列图像超分辨率重建方法的研究[D]. 北京:北京工业大学,2007.
- [2] Stark H, Oskoui P. High-resolution image recovery from image-plane arrays, using convex projections[J]. Journal of the Optical Society of America (A), 1989, 6(11):1715-1726.
- [3] Sezan M I, Stark H. Image restoration by the method of convex projections (Part2) applications and numerical results[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1982, MI-1(2):99-101.
- [4] 苏秉华, 金伟其, 牛丽红, 等. 超分辨率图像复原及其进展[J]. 光学技术, 2001, 27(1):6-9.

应度函数,都进行 20 组实验,每次进化的值取为 20 次实验的均值,见表 1。

表 1 三种方法进化代数 RMSE 均值表

算法	2	4	6	8	10	12
PSO	0.055 6	0.499 5	0.047 5	0.046 1	0.044 4	0.042 8
CFA PSO	0.057 6	0.500 0	0.047 4	0.046 1	0.044 0	0.042 7
ARPSO	0.058 1	0.046 7	0.042 3	0.038 5	0.037 7	0.037 7

将上述数据用 Matlab 拟合成曲线,如图 1 所示。

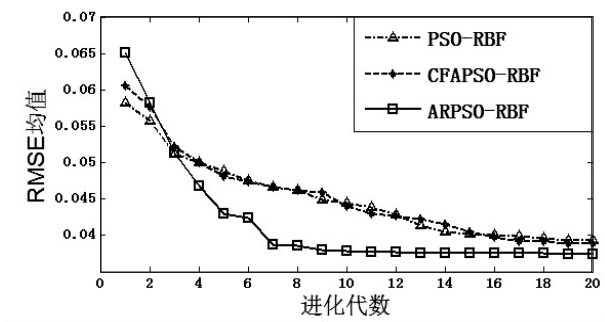


图 1 Matlab 拟合曲线

由图 1 可以看出,无论是在收敛速度方面还是在收敛精度方面,ARPSO 都好于基本 PSO 和 CFA PSO 方法,从第 8 代开始,基本就进入了平稳阶段,此时平均用时为 10.379 s,而其余两种方法基本到第 18 代以后才进入平稳阶段,PSO 平均用时为 19.687 s,CFA PSO 平均用时为 18.528 s。

5 结束语

应用保证种群多样性的微粒群算法针对径向基函数神经网络的聚类半径这一参数进行优化,依照文中提出的算法进行迭代优化,最终可以确定最优聚类半径值,进而实现了对 RBF 结构的优化。仿真结果表明,应用 ARPSO 算法训练径向基函数神经网络,可以显著提高收敛的精度和速度,同时也从侧面表明 ARPSO 算法提高了跳出局部最优解的可能性。

参考文献:

[1] Haykin S. Neural networks;a comprehensive foundation[M]. 2nd ed. U. S;Prentive Hall,1998.

[2] 崔海青,刘希玉. 基于粒子群算法的 RBF 网络参数优化算法[J]. 计算机技术与发展,2009,19(12):117-119.

[3] Moddy Y, Darken C J. Fast learning in networks of locally tuned processing units[J]. Neural Computation,1989(1):281-294.

[4] Dai Weibao, Zou Pinghua, Feng Minghua, et al. Boiler Combustion Optimization based on ANN and PSO-Powell algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2009,16(2):198-203.

[5] 段其昌,赵敏,王大兴. 一种改进 PSO 优化 RBF 神经网络的新方法[J]. 计算机仿真,2009,26(12):126-129.

[6] 刘鑫朝,颜宏文. 一种改进的粒子群优化 RBF 网络学习算法[J]. 计算机技术与发展,2006,16(2):185-187.

[7] 曾建潮,崔志华. 微粒群算法的统一模型及分析[J]. 计算机研究与发展,2006,43(1):96-100.

[8] Mendes R, Kennedy J, Neves J. The fully informed particle swarm:simpler,maybe better[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation,2004,8(3):204-210.

[9] Shi Yuhui, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer [C]//Proc of IEEE international conference on evolutionary computation. Anchorage;IEEE,1998:69-73.

[10] 张顶学,关治洪,刘新芝. 基于 PSO 的 RBF 神经网络学习算法及其应用[J]. 计算机工程与应用,2006,42(20):13-15.

[11] 刘洪波,王秀坤,谭国真. 粒子群优化算法的收敛性分析及其混沌改进[J]. 控制与决策,2006,21(6):636-640.

[12] 周驰,高亮,高海兵. 基于粒子群优化算法的约束布局优化[J]. 控制与决策,2005,20(1):36-40.

[13] Riget R, Vesterstrom J S. A diversity-guided particle swarm optimizer - the ARPSO[R]. Denmark:University of Aarhus, 2002.

[14] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]//Proc of international conference on neural networks. [s. l.]: [s. n.], 1995:1942-1948.

[10] 马俊,曾玉龙,范冲. 一种基于 Keren 亚像素配准方法的改进算法[J]. 测绘与空间地理信息,2007,30(5):106-109.

[11] Fishchler M, Bolles R. Random sample consensus;a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM,1981,24(6):381-395.

[12] 潘子昂. 基于 SIFT 算法的图像匹配研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.

[13] 徐美芳. POCS 图像超分辨率重建技术研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2010.

(上接第 42 页)

[5] 宋智礼. 图像配准技术及其应用的研究[D]. 上海:复旦大学,2010.

[6] 曾德贤,赵继广,曾朝阳. 基于简化仿射变换模型的图像配准方法[J]. 装备指挥技术学院学报,2005,16(1):84-87.

[7] 王栋,王伟,许晓鸣. 基于四参数仿射模型的频域运动估计技术[J]. 电子学报,2003,31(1):131-134.

[8] 曾文锋,李树山,王江安. 基于仿射变换模型的图像配准中的平移、旋转和缩放[J]. 红外与激光工程,2001,30(1):18-20.

[9] 李海彦. 基于仿射变换的多姿态人脸矫正与识别[D]. 苏州:苏州大学,2013.

基于SIFT的POCS图像超分辨率重建

作者：[王凤娇](#)，[陈光化](#)，[周文](#)，[WANG Feng-jiao](#)，[CHEN Guang-hua](#)，[ZHOU Wen](#)

作者单位：[上海大学 机电工程与自动化学院, 上海, 200072](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2014(11)

引用本文格式：[王凤娇](#). [陈光化](#). [周文](#). [WANG Feng-jiao](#). [CHEN Guang-hua](#). [ZHOU Wen](#) [基于SIFT的POCS图像超分辨率重建](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2014(11)