

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.003

一种优化的图像配准算法^{*}

韩超 方露 章盛

(安徽工程大学 电气工程学院 芜湖 241000)

摘要:为了降低传统尺度不变特征变换(SIFT)算法的特征点检测与匹配的时间复杂度,提出一种优化的图像配准算法,即采用Trajkovic算法检测特征点,并采用SIFT算法的分配描述符方法分配特征点描述符参数,再用稀疏降维原理对特征点描述符参数进行降维处理,最后,采用基于双向匹配的相似性度量算法进行特征点匹配。模拟实验选择检测图像的特征点数、匹配对数、正确匹配对数、匹配正确率、配准时间与配准时间下降率6个指标作为评估标准,结果表明,优化算法在特征点配准正确率方面与传统SIFT算法相当,但在特征点配准速度方面有明显提升。

关键词:SIFT算法; Trajkovic算法; 稀疏降维; 图像配准; 双向匹配

中图分类号: TP391.41; TN957.52 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520

An optimized image registration algorithm

Han Chao Fang Lu Zhang Sheng

(College of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: To reduce the time complexity of the traditional SIFT algorithm related to the feature points detection and matching, an optimized image registration algorithm is proposed. Namely the feature points are extracted by Trajkovic algorithm, and the SIFT algorithm distribution descriptor method is adopted to allocate feature points descriptor parameters. Then sparse dimension reduction principle is used to reduce the feature points descriptor dimensions. Finally, the similarity measure algorithm based on bidirectional matching is used to match them. Six evaluation criteria including the feature points detection of image, matching pair, correct matching pair, matching accuracy, registration time and registration time drop rate are adopted in the simulation experiments. The simulation results show that the optimization algorithm in comparison with traditional SIFT algorithm is equivalent in the accuracy of feature point matching. However, it has obvious improvement in terms of feature points matching speed.

Keywords: SIFT algorithm; Trajkovic algorithm; sparse dimension reduction; image registration; bidirectional matching

1 引言

图像配准技术是近年来研究热点之一,广泛用于运动物体跟踪、双目识别和医疗诊断等多个领域,其中,特征点的检测与匹配是图像配准技术中两个重要的环节。在特征点检测的阶段,最经典的特征点检测算法主要有Forstner算法、Harris算法、SUSAN(small univalue segment assimilating nucleus)算法、尺度不变特征变换(scale

invariant feature transform, SIFT)算法、PCA-SIFT算法与SURF(speeded up robust feature)算法^[1-3]。图像配准技术在国外的起步比较早,在20世纪70年代图像配准就开始被一些国外科研工作者所研究。Moravec等人提出了Moravec算法,该算法是最早的特征点检测算法之一,但该算法对旋转、噪声不具有适应性。Forstner等人提出Forstner算法,该算法特征点检测准确度高,但时间复杂度高。Harris等人提出了一种改进的算法,即Harris算法,该算法检测的特征点对旋转、光照具有适应性,但不

收稿日期:2016-05 Received Date: 2016-05

*基金项目:安徽省自然科学基金(1508085MF121)、安徽省高校自然科学研究项目(KJ2016A056)、省级专业综合改革项目(2016zy013)、安徽检测技术与节能装置省级重点实验室开放基金(1506c085002)资助项目

具备尺度不变性。Smith 等人提出 SUSAN 算法,该算法时间复杂度低,同样不具备尺度不变性。为了克服上述特征点检测算法所存在的问题,David 等人提出一种用来描述局部特征的算法,即 SIFT 算法,该算法对尺度、光照和旋转保持一定的适应性,但该算法具有检测特征点耗时长、特征点描述符维数高的问题。Yan 等人在保持 SIFT 算法原有的基础上,再利用 PCA (principle component analysis) 算法对特征点描述符参数进行降维,提升了图像特征点的匹配速度,即 PCA-SIFT 算法。从 SIFT 算法被提出后,针对 SIFT 算法存在的问题,相关学者一直对其进行优化和改进^[4-5]。

国内对图像配准技术的研究相对国外起步要晚一些,但也呈现出强劲的发展势头。针对 SIFT 算法在检测特征点方面耗时长的问题,息等利用 Forstner 算法替代 SIFT 算法检测特征点部分进行特征点检测,许佳佳等人^[6]利用 Harris 算法替代 SIFT 算法检测特征点部分进行特征点检测,彭勃宇等人^[7]利用 SUSAN 算法替代 SIFT 算法检测特征点部分进行特征点检测,模拟实验结果表明,与传统算法相比,特征点检测速度有了显著的提升。刘辉等人^[8]使用 8×8 像素的正方形模板代替传统 SIFT 算法的 16×16 像素的正方形模板生成特征点描述符参数,把 128 维描述符参数降到 64 维,特征点匹配速度相对于传统算法有了显著的提升。在特征点匹配的阶段,NCC (normalized cross correlation) 算法 SSDA (sequential similarity detection algorithm) 算法是基于灰度的匹配算法,该类算法适用性强,但误差较大。欧氏距离算法和 Hamming 距离算法是基于相似度的匹配算法^[9],该类算法主要针对特征点检测算法,正确率较高,但该类算法针对高维特征点描述符参数具有匹配速度较慢,针对这个问题,采用变换基矩阵将高维特征点描述符信号稀疏,再采用随机测量矩阵将稀疏特征点描述符信号投影到低维空间上,得到一个低维特征点描述符信号,用其代替高维特征点描述符信号进行后续处理,即稀疏降维原理。稀疏降维原理是压缩感知理论^[10]的基本组成部分,主要应用于图像处理、成像技术和信号处理等方面^[11-13]。

本文在基于传统的 SIFT 算法的图像配准算法基础上,采用 Trajkovic 算法^[14]、稀疏降维原理^[15]和双向匹配方法^[16]对传统 SIFT 算法进行优化,得到 Trajkovic-SDR-SIFT 算法。与传统的 SIFT 算法的图像配准算法相比,Trajkovic-SDR-SIFT 算法在保持特征点检测和匹配正确率相当时,提高了特征点检测和匹配的速度。

2 优化的 SIFT 算法

David Lowe 等提出的 SIFT 算法流程分为 3 步:1)建立高斯金字塔,检测金字塔每一层的候选极值点,优化候

选极值点,得到极值点即为特征点,同时为特征点分配方向参数;2)利用特征点的方向参数和 8×8 正方形局部区域为特征点生成描述符参数;3)采用最近邻次近邻算法进行特征点的匹配。本文在保持匹配正确率相当的情况下,为满足图像配准的实时性要求,提出 Trajkovic-SDR-SIFT 算法,该算法采用 Trajkovic 算法对 SIFT 算法步骤 1) 进行优化、采用稀疏降维原理对 SIFT 算法步骤 2) 进行优化、采用双向匹配方法对 SIFT 算法步骤 3) 进行优化。Trajkovic-SDR-SIFT 算法的流程如图 1 所示。

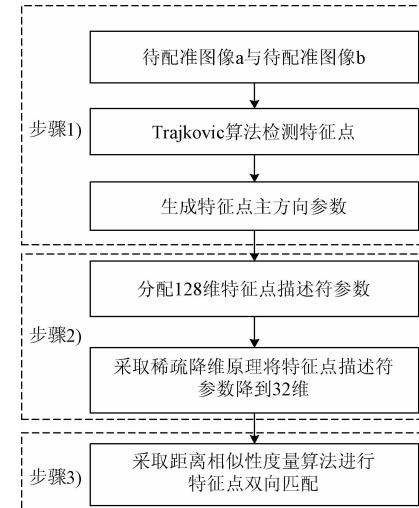


图 1 Trajkovic-SDR-SIFT 算法的流程

Fig. 1 Flow chart of Trajkovic-SDR-SIFT algorithm

2.1 Trajkovic 算法

Trajkovic 算法又称为 MIC 算法,由 Trajkovic 和 Headley 于 1998 年提出,该算法是在 SUSAN 算法的基础上进行改进的算法,大大提升了角点检测速度。Trajkovic 算法采用像素插值法对像素点每个方向上的灰度值变化程度进行比较,Moravec 算法只对像素点有限个方向上的灰度值变化程度进行比较,因此 Trajkovic 算法有更好的性能。Trajkovic 算法与 Harris 算法相比,两种算法的检测效果相当,但是 Trajkovic 算法的速度远快于 Harris 算法。综合 Trajkovic 算法在检测效果和检测速度方面的性能,本文选取 Trajkovic 算法来检测特征点,针对 Trajkovic 算法对噪声敏感问题,选择在角点检测前利用高斯平滑滤波去改善这一问题。Trajkovic 算法以图像中像素点为中心,取 7×7 像素的窗口,在该窗口的基础上得到包含 37 个像素的圆形窗口,再在圆形窗口基础上计算像素点的响应量,即在 360° 方向上计算通过圆形窗口中心的直线与圆形窗口边缘的交点同圆形窗口中心的灰度值变化程度,取 360° 方向的响应量中最小值,作为该像素点的响应量 $R(x,y)$ 。此时,根据不同的要求设定经验值,若 $R(x,y)$ 小于经验响应值,保留该像素点,

作为角点,反之,剔除该像素点。假设用 C 表示圆的中心,那么通过中心 C 的任意一条直线与圆相交的两个点为 P 与 P' ,响应量的定义表达式如下:

$$R(x, y) = \min((I_p - I_c)^2 + (I_{p'} - I_c)^2), \forall_{p, p'} \quad (1)$$

式中: $R(x, y)$ 是像素点 (x, y) 的响应量, I_c 是中心像素点的灰度值, $I_p, I_{p'}$ 是任意方向上通过中心像素点的直线与圆相交的两个点的灰度值。

2.2 稀疏降维原理

将 2.1 节中得到的角点作为特征点,采用 SIFT 算法的分配方向参数方法与生成描述符参数方法分别生成特征点方向参数和特征点描述符参数。假定特征点描述符参数向量为 \mathbf{K} , \mathbf{K} 可以表示成 R^{128} 空间中的 128×1 的列向量,为将问题简化,本文采取小波变换基矩阵 Ψ 为规范正交基。通过把向量 $\{\Psi_i\}_{i=1}^{128}$ 作为列向量,表示成 128×128 的基矩阵为 $\Psi = [\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_{128}]$,因此描述符参数列向量 \mathbf{K} 可以通过小波基变换矩阵 Ψ 表示为 \mathbf{X} ,其中 \mathbf{X} 是稀疏的 128 维列向量,具体表达式如下:

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^{128} \Psi_i \mathbf{K}_i = \Psi \mathbf{K} \quad (2)$$

如式(2)所示, \mathbf{X} 可以看作是描述符参数列向量 \mathbf{K} 在 Ψ 域的另一种表示形式,只是在这样的变换域中, \mathbf{X} 是稀疏的列向量,减少了之前 \mathbf{K} 列向量的冗余,使得系数值大的参数可以保留,系数小的参数通过小波基变换方式进行去除。通过这样的方式, \mathbf{X} 列向量中有 k 个系数不为 0,其余 $128 - k$ 个系数为 0 或者非常小,对于稀疏非常小的系数,可以设置阈值的方式,将小于该阈值的值全部设置为零,含有 k 个系数的稀疏列向量 \mathbf{X} 叫做 k 稀疏列向量,本文中 k 的选择为 32,本节会对 k 的选择进行解释。

如果稀疏列向量 $\mathbf{X} \in R^{128}$ 在小波正交基 Ψ 下是稀疏的, \mathbf{K} 是稀疏列向量 \mathbf{X} 在 Ψ 域等价或逼近表示 $\mathbf{K} = \Psi^T \mathbf{X}$,建立一个 32×128 维的随机投影矩阵 $\Phi \in R^{32 \times 128}$,将稀疏信号 \mathbf{X} 投影到随机投影矩阵 Φ 上,得到测量向量 \mathbf{Y} ,如下:

$$\mathbf{Y} = \Phi \mathbf{X} = \Phi \Psi \mathbf{K} \quad (3)$$

式中: Φ 是 32×128 维的随机投影矩阵, \mathbf{X} 是稀疏的 128 维列向量, Ψ 是 128×128 维的小波正交变换基矩阵, \mathbf{K} 是 128 维的特征点描述符列向量, \mathbf{Y} 是 32 维的测量列向量。

随机投影矩阵 Φ 对于 \mathbf{K} 列向量从 128 维降维到 32 维起到关键性的作用,因此 Φ 的选择非常重要,对于 k 稀疏的 \mathbf{X} 列向量可进行稀疏变换的充分条件是 $\Theta = \Phi \Psi$ 满足式(4),这就是有限等距约束(RIP)。

$$1 - \varepsilon \leq \frac{\|\Theta \mathbf{K}\|}{\|\mathbf{K}\|} \leq 1 + \varepsilon \quad (4)$$

式中: ε 是一个较小的常数。

选择的 Φ 和 Ψ 满足高度不相关的概率大,就能保证 \mathbf{K} 列向量可以稀疏,因此在确定小波正交变换基 Ψ 的时候,就要使得 $\Theta = \Phi \Psi$ 满足 RIP 条件,通常 Φ 选择高斯随机矩阵。

利用小波正交变换基矩阵 Ψ 和随机投影矩阵 Φ 将 128 维的特征点描述符向量 \mathbf{K} 降到 32 维测量向量 \mathbf{Y} ,用 32 维测量向量 \mathbf{Y} 作为配准的特征点参数。本文在模拟实验中采用随机投影矩阵 $\Phi \in R^{16 \times 128}$,此时图像的匹配速度有较大的提高,但是由于测量向量的维数选择过低,导致后期特征点的配准数目降低,配准效果较差,因此综合选择随机投影矩阵为 $\Phi \in R^{32 \times 128}$,即选择特征点描述符为 32 维。

2.3 特征点双向匹配

针对 2.2 节中得到的 32 维特征点描述子,在距离相似性度量算法的基础上,采用双向匹配方法进行匹配。假定图像甲与图像乙为目标匹配图像对。图像甲中特征点描述符为 $U_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{32})$,图像乙中特征点描述符为 $V_j(y_1, y_2, y_3, \dots, y_{30}, y_{32})$,则图像甲与图像乙中特征点的距离相似性度量值如式下:

$$d(U_i, V_j) = \sum_{m=1}^{32} |x_m - y_m| \quad (5)$$

式中: x_m 是图像甲中特征点描述符的元素, y_m 是图像乙中特征点描述符的元素, $d(U_i, V_j)$ 是特征点之间的距离相似性度量值。

基于双向匹配的相似性度量算法的原理是,首先,以图像甲的特征点为参考点 U_i ,利用式(5)遍历图像乙中特征点,得到最近邻特征点 V_{1j} 和次最近邻特征点 V_{2j} ,如果最近邻特征点 V_{1j} 和次最近邻特征点 V_{2j} 满足式(6),则参考点 U_i 的匹配点为最近邻特征点 V_{1j} ,遍历图像甲中所有的特征点,得到匹配点对集 A 。然后,以图像乙的特征点为参考点 V_i ,利用式(5)遍历图像甲中特征点,得到最近邻特征点 U_{1j} 和次最近邻特征点 U_{2j} ,如果最近邻特征点 U_{1j} 和次最近邻特征点 U_{2j} 满足式(6),则参考点 V_i 的匹配点为最近邻特征点 U_{1j} ,遍历图像乙中所有的特征点,得到匹配点对集 B 。最后,将匹配点对集 A 与匹配点对集 B 作比较,如果两个集中图像甲与图像乙中特征点完全相同,则是有效的匹配点对,有效的匹配点对的集合为最终的匹配点对。

$$\frac{d(U_i, V_{1j})}{d(U_i, V_{2j})} < T_h \quad (6)$$

式中: $d(U_i, V_{1j})$ 、 $d(U_i, V_{2j})$ 分别是图像甲的特征点与图像乙的特征点的最近邻特征点的距离相似性度量值、次最近邻特征点的距离相似性度量值, T_h 是设定的阈值。

3 模拟实验

实验编程软件为 MATLAB R2012a, 计算机采用 Intel

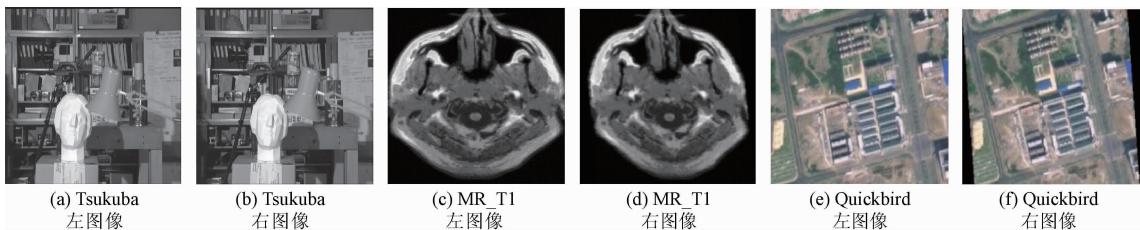


图 2 特征点检测图像

Fig. 2 The images of feature points detection

本文约定文献[6]算法为算法1、文献[8]算法为算法2, 采用传统SIFT算法、算法1、算法2与Trajkovic-SDR-SIFT算法分别对图2(a)~(f)进行图像特征点检

Core 2 P7450@ 2.13 GHz 双核, 内存为 2 G, 操作系统为 32 位 Windows XP。实验采用 Tsukuba 图像、Quickbird 图像和 MR_T1 图像作为角点检测图像, 如图 2 所示。

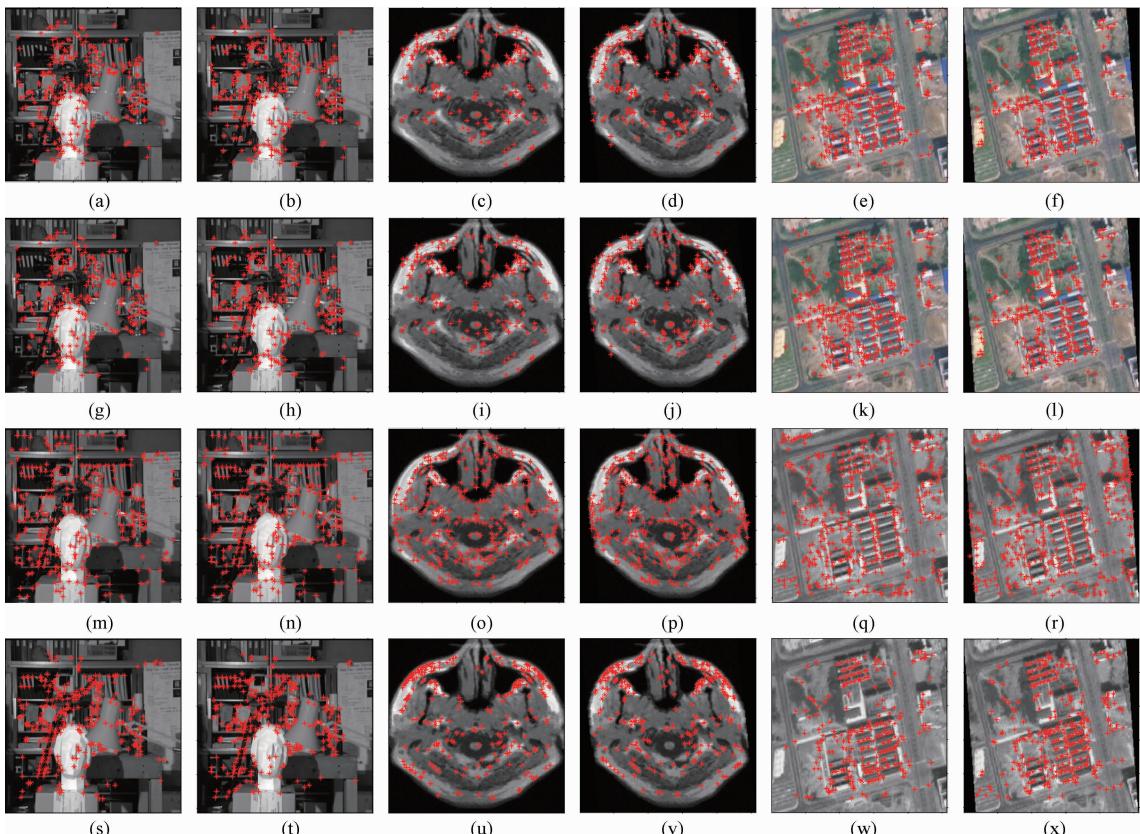


图 3 图像特征点检测结果

(a)~(f) 采用传统 SIFT 算法对图 2 中 3 对图像的特征点检测实验结果; (g)~(l) 采用算法 1 对图 2 中 3 对图像的特征点检测实验结果; (m)~(r) 采用算法 2 对图 2 中 3 对图像的特征点检测实验结果;

(s)~(x) 采用 Trajkovic-SDR-SIFT 算法对图 2 中 3 对图像的特征点检测实验结果

Fig. 3 The results of the images feature points detection

(a)~(f) The experimental results for the feature points detection of the traditional SIFT algorithm for three pairs of images in figure 2;

(g)~(l) The experimental results for the feature points detection of the first algorithm for three pairs of images in figure 2;

(m)~(r) The experimental results for the feature points detection of the second algorithm for three pairs of images in figure 2;

(s)~(x) The experimental results of feature points detection of the Trajkovic-SDR-SIFT algorithm for three pairs of images in figure 2

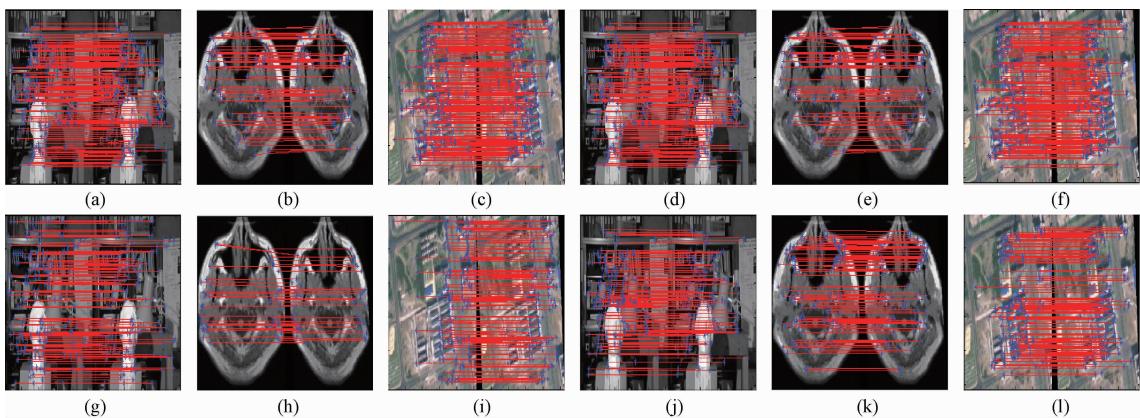


图 4 图像特征点配准结果

(a) ~ (c) 采用传统 SIFT 算法对图 2 中 3 对图像的匹配实验结果; (d) ~ (f) 采用算法 1 对图 2 中 3 对图像的匹配实验结果; (g) ~ (i) 采用算法 2 对图 2 中 3 对图像的匹配实验结果; (j) ~ (l) 采用 Trajkovic-SDR-SIFT 算法对图 2 中 3 对图像的匹配实验结果

Fig. 4 The results of image feature points registration

(a) ~ (c) Matching experimental results of the traditional SIFT algorithm for three pairs of images in figure 2;

(d) ~ (f) Matching experimental results of the first algorithm for three pairs of images in figure 2;

(g) ~ (i) Matching the experimental results of the second algorithm for three pairs of images in figure 2;

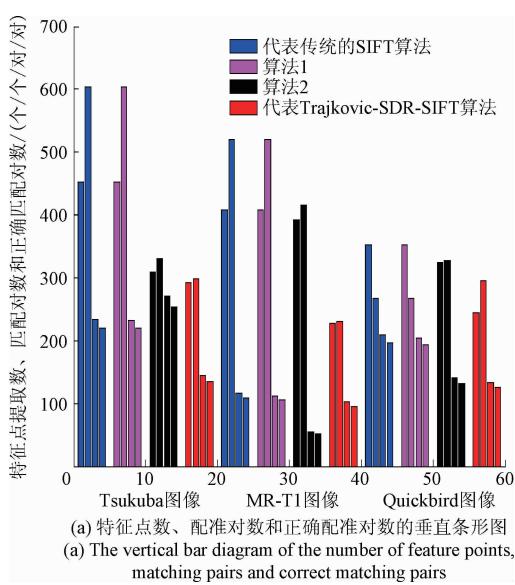
(j) ~ (l) Matching the experimental results of the Trajkovic-SDR-SIFT algorithm for three pairs of images in figure 2

1、算法 2 与 Trajkovic-SDR-SIFT 算法之间的效率,选择检测图像的特征点数、匹配对数、正确匹配对数、匹配正确率、配准时间与配准时间下降率一共 6 个指标作为评估标准,其中,匹配正确率与配准时间下降率的计算公式如式(7)、(8)所示。实验定量分析如图 5(a)~(d) 所示,通过图 5(b) 可知,在匹配的正确率方面,Trajkovic-SDR-SIFT 算法、算法 1、算法 2 与传统 SIFT 算法相当。通过图 5(d) 可知,Trajkovic-SDR-SIFT 算法与传统 SIFT 算法相比,图 2 中 3 对图像在配准速度方面分别提升近 77.94%、

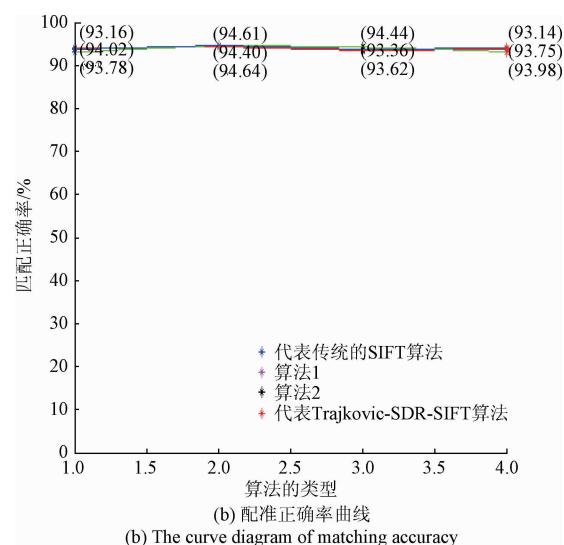
77.97% 与 49.29%; Trajkovic-SDR-SIFT 算法与算法 1 相比,图 2 中 3 对图像在配准速度方面分别提升近 59.19%、65.95% 与 28.86%; Trajkovic-SDR-SIFT 算法与算法 2 相比,图 2 中 3 对图像在配准速度方面分别提升近 40.44%、58.54% 与 19.23%。

$$\text{配准正确率} = \frac{\text{正确配准对数}}{\text{配准对数}} \quad (7)$$

$$\text{配准时间下降率} = \frac{T_{\text{传统算法}} - T_{\text{优化SIFT算法}}}{T_{\text{传统算法}}} \quad (8)$$



(a) 特征点数、配准对数和正确配准对数的垂直条形图
(a) The vertical bar diagram of the number of feature points, matching pairs and correct matching pairs



(b) 配准正确率曲线
(b) The curve diagram of matching accuracy

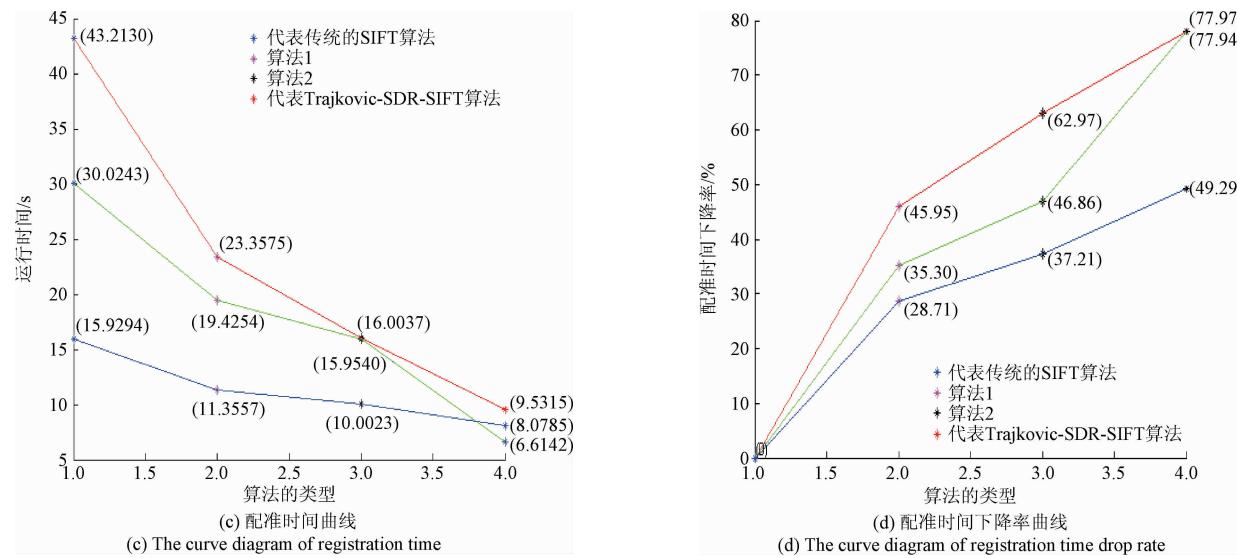


图5 图像配准定量分析图

Fig. 5 The quantitative analysis of image registration

为了验证 Trajkovic-SDR-SIFT 算法的运行速度,从一个包含 250 张图像的图像库中,分别选取 50、100、150、200、250 张图像作为一个实验子集合,对传统 SIFT 算法与 Trajkovic-SDR-SIFT 算法的运行时间进行统计,实验结

果如表 1 所示。从表 1 的实验结果可知,Trajkovic-SDR-SIFT 算法的运算速度相对于传统 SIFT 算法有明显的提高。

表1 不同规模图像子集合的运行时间比较

Table 1 The comparison of the running time of different scale image sets

(s)

| 算法类型 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 传统 SIFT 算法 | 2 558.744 8 | 4 093.219 9 | 5 111.479 6 | 6 207.366 5 | 7 313.770 8 |
| 算法 1 | 1 593.307 4 | 2 594.640 6 | 3 293.816 1 | 4 053.643 6 | 4 816.718 1 |
| 算法 2 | 761.056 9 | 1 569.724 3 | 2 212.75 | 2 914.564 8 | 3 567.862 1 |
| Trajkovic-SDR-SIFT 算法 | 560.998 1 | 1 327.138 2 | 1 818.297 5 | 2 535.914 5 | 2 930.217 2 |

4 结 论

本文以基于传统的 SIFT 算法的图像配准算法为依据,采用 Trajkovic 算法与稀疏降维原理分别优化了传统算法的特征点检测与生成特征点描述符部分,同时采用距离相似性度量算法进行双向匹配,得到一种优化 SIFT 算法,即 Trajkovic-SDR-SIFT 算法。在特征点配准正确率相当的情况下,Trajkovic-SDR-SIFT 算法在特征点检测和匹配速度上具有明显的优势。

参考文献

- [1] EL-GAYAR M M, SOLIMAN H, MEKYA N. A comparative study of image low level feature extraction algorithms [J]. Egyptian Informatics Journal, 2013, 14(2): 175-181.
- [2] CHEON S H, EOM I K, MOON Y H. Fast descriptor extraction method for a SURF-based interest point [J]. Electronics Letters, 2016, 52(4): 274-275.
- [3] BAI S, HOU J J, OHNISHI N. Combining LBP and SIFT in sparse coding for categorizing scene images [J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2014, 97(9): 2563-2566.
- [4] JOGLEKAR J, GEDAM S S, KRISHNA M B. Image matching using SIFT features and relaxation labeling technique-a constraint initializing method for dense stereo matching [J]. Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(9): 5643-5652.
- [5] SEDAGHAT A, EBADI H. Remote sensing image matching based on adaptive binning SIFT descriptor [J]. Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53 (10): 5283-5293.
- [6] 许佳佳,张叶,张赫. 基于改进 Harris-SIFT 算子的快速图像配准算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015,

- 29(1): 48-54.
- XU J J, ZHANG Y, ZHANG H. Fast image registration algorithm based on improved Harris-SIFT descriptor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(1):48-54.
- [7] 彭勃宇,王歲,周誠,等.面向增强现实的SUSAN-SURF快速匹配算法[J].计算机应用研究,2015,32(8):2538-2542.
- PENG B Y, WANG W, ZHOU CH, et al. SUSAN-SURF fast matching algorithm for augmented reality [J]. Application Research of Computers, 2015, 32 (8): 2538-2542.
- [8] 刘辉,申海龙.一种基于改进SIFT算法的图像配准方法[J].微电子学与计算机,2014,31 (1): 38-42.
- LIU H, SHEN H L. Image match method based on improved SIFT algorithm [J]. Microelectronics and Computer, 2014, 31(1): 38-42.
- [9] 高全学,高菲菲,赫秀娟,等.基于图像欧氏距离的二维局部多样性保持投影[J].自动化学报,2013,39 (7): 1062-1070.
- GAO Q X, GAO F F, HAO X J, et al. Image euclidean distance-based two-dimensional local diversity preserving projection [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(7): 1062-1070.
- [10] 荆楠,毕卫红,胡正平,等.动态压缩感知综述[J].自动化学报,2015,41(1):22-37.
- JING N, BI W H, HU ZH P, et al. A survey on dynamic compressed sensing [J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(1): 22-37.
- [11] 杨飒,杨春玲.基于压缩感知与尺度不变特征变换的图像配准算法[J].光学学报,2014,34 (11): 1110001.
- YANG S, YANG CH L. Image registration algorithm based on a sparse random projection and scale-invariant feature transform [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1110001.
- [12] 林煜东,和红杰,尹忠科,等.基于稀疏表示的可见光遥感图像飞机检测算法[J].光子学报,2014,43(9): 0910001.
- LIN Y D, HE H J, YIN ZH K, et al. Airplane detection in optical sensing image based on sparse-representation [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(9): 0910001.
- [13] 王峰,罗建军,唐兴佳,等.一种基于压缩传感的超分辨率光学三维成像技术[J].光子学报,2015,44(3): 0328001.
- WANG F, LUO J J, TANG X J, et al. Super resolution optic three-dimensional imaging based on compressed sensing [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44 (3): 0328001.
- [14] 孙亮,王双庆,邢建春.一种基于自适应阈值的改进MIC算法[J].微电子学与计算机,2015,32(5): 79-83.
- SUN L, WANG SH Q, XING J CH. An improved MIC corner detection algorithm based on adaptive threshold [J]. Microelectronics and Computer, 2015, 32(5): 79-83.
- [15] 周霞,卓志宏,姚敏.基于超图稀疏编码框的图像特征提取方法[J].激光杂志,2015,32(5): 79-83.
- ZHOU X, ZHUO ZH H, YAO M. Image feature extraction method based on sparse coding framework of hypergraph [J]. Laser Journal, 2015, 36(1): 17-20.
- [16] 许刚,林园胜,江娟娟,等.改进型SIFT立体匹配算法研究[J].计算机工程与应用,2015,51(6): 134-138.
- XU G, LIN Y SH, JIANG J J, et al. Research on improved SIFT stereo matching algorithm [J]. Computer Engineering and Application, 2015, 51(6): 134-138.

作者简介



韩超,2006年于安徽大学获得硕士学位,2009年于安徽大学获得博士学位,现为安徽工程大学副教授,主要研究方向为全息显示、全息打印、图像处理。
E-mail: hanchaozh@126.com



Han Chao received M. Sc. from Anhui University in 2006 and Ph. D. from Anhui University in 2009, respectively. Now he is an associate professor at Anhui Polytechnic University. His main research interests include holographic display, holographic printers, and image processing.

方露,2014年于安徽工程大学获得学士学位,现为安徽工程大学硕士研究生,主要研究方向为图像处理、目标跟踪。
E-mail: ahpu3008@163.com



Fang Lu received B. Sc. from Anhui Polytechnic University in 2014. Now he is a M. Sc. candidate in Anhui Polytechnic University. His main research interest includes image processing and target tracking.

章盛,2011年毕业于安徽职业技术学院,2016年于安徽工程大学获得硕士学位,主要研究方向为图像拼接、软件开发。
E-mail: 9612568341@qq.com

Zhang Sheng graduated from Anhui Vocational and Technical College in 2011, and received M. Sc. from Anhui Polytechnic University in 2016. His main research interests include image mosaicking and software development.