

基于改进曲率尺度空间算法的电力设备红外与可见光图像配准

李云红*, 罗雪敏, 苏雪平, 朱耀麟, 姚兰, 段姣姣

西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048

摘要 针对现有电力设备红外与可见光图像配准难度大、配准时间长等问题,提出一种改进曲率尺度空间(CSS)算法的电力设备红外与可见光图像配准方法。首先引入Freeman链码差提高CSS算法的特征点提取精度,其次为每个特征点分配点到弦的垂直距离特征主方向,采用加速稳健特征变换(SURF)算法获得特征描述算子,最后利用双边快速近似最近邻(FLANN)搜索匹配方法和随机抽样一致(RANSAC)方法得到正确的匹配点对,获得仿射变换模型参数。实验结果表明:改进CSS图像配准方法与SURF、尺度不变特征变换(SIFT)、CSS配准方法相比性能指标均有显著提升,平均均方根误差(RMSE)较其他3种算法分别降低了77.73%、80.32%、7.63%;平均匹配时间分别降低了30.82%、40.12%、10.57%,提高了电力设备红外与可见光图像配准的效率。

关键词 图像处理; 图像匹配; 电力设备; 红外与可见光图像; Freeman链码; 双边快速近似最近邻搜索匹配

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1210010

Registration Method for Power Equipment Infrared and Visible Images Based on Improved Curvature Scale Space Algorithm

Li Yunhong*, Luo Xuemin, Su Xueping, Zhu Yaolin, Yao Lan, Duan Jiaojiao

School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, Shaanxi, China

Abstract Aiming at the problems of difficult registration and long registration time of existing power equipment infrared and visible images, a registration method for power equipment infrared and visible images based on improved curvature scale space (CSS) algorithm is proposed. Firstly, the Freeman chain code difference is introduced to improve the feature point extraction accuracy of the CSS algorithm; Secondly, each feature point is assigned the main direction of the vertical distance from the point to the string, and the feature description operator is obtained using the speed up robust features (SURF) algorithm; Finally, the two-sided fast library for approximate nearest neighbors (FLANN) search matching and random sample consensus (RANSAC) method are used to obtain the correct matching point pair, and the affine transformation model parameters are obtained. The experimental results show that compared with the SURF, scale invariant feature transform (SIFT), and CSS registration methods, the improved CSS image registration method has significantly improved performance indicators and its average root mean square error (RMSE) is reduced by 77.73%, 80.32% and 7.63% and its average matching time is reduced by 30.82%, 40.12% and 10.57%, respectively. It improves the registration efficiency of the power equipment infrared and visible images.

Key words image processing; image registration; power equipment; infrared and visible images; Freeman chain code; two-sided fast library for approximate nearest neighbors search matching

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-05-26; 录用日期: 2021-06-11

基金项目: 陕西省科技厅青年科学基金(2019JQ-255)、陕西省科技厅自然科学基金基础研究重点项目(2022JZ-35)、国家级大学生创新创业训练计划项目(202110709002)

通信作者: hitliyunhong@163.com

1 引言

电力设备作为电力系统的重要组成部分,它的运行状态往往决定着整个电力系统的安全与稳定^[1]。随着坚强智能电网的建设,大量智能检测设备被投入到变电站及输电线的检修任务中,通过对获得的电力设备图像进行处理,能够有效提高设备运行的安全性及可靠性^[2]。

本文作者一直致力于图像处理方面的研究,在医学图像处理、电力图像处理、角点检测等方面做了许多工作^[3-4]。近几年,以红外与可见光图像为主的多源图像配准技术蓬勃发展,在电力领域也得到广泛应用。通过将红外与可见光图像进行配准,能够在获得电力设备外部条件的同时了解其内部的运行状态,从而极大地提高了电力设备的检测效率^[5-6]。

现有的红外与可见光图像配准方法主要分为基于区域和基于特征两类。基于区域的配准方法通过统计红外与可见光图像之间的灰度相关性实现配准;而基于特征的配准方法则从局部不变特征匹配入手实现配准。鉴于电力系统在线监测对实时性要求高,电力设备红外与可见光图像配准更多采用基于特征的图像配准方法。并且,由于电力设备红外图像具有温度集中、轮廓特征相近、对比度低等特点,以及巡检设备获得的红外与可见光图像之间容易出现旋转尺度变化,导致电力设备红外与可见光图像配准难度较大。许多研究者针对上述特点,分别从改进红外图像质量^[7]、提高特征提取精度^[8]、设计非线性变换模型^[9]等方面提高电力设备红外与可见光图像配准精度。文献[10-11]分别采用尺度不变特征变换(SIFT)、加速稳健特征变换(SURF)算法实现电力设备红外与可见光图像配准,但对于具有明显旋转尺度变化的图像,算法鲁棒性较差;文献[12]采用Frei-Chen特征描述算子结合神经网络,将图像分解为高频和低频两部分,能够实现电力设备红外与可见光图像配准,但算法时间精度较低;文献[13]提出一种斜率一致性的电力设备红外与可见光图像配准方法,配准效果较好,但针对背景复杂且具有明显旋转尺度变化的图像配准效果较差;文献[14]采用曲率尺度空间(CSS)算法进行边缘特征点提取,结合SIFT描述算子实现图像配准;文献[15]在此基础上,提出以轮廓中线为特征主方向,提高了旋转尺度变化下电力设备

红外与可见光图像的配准精度,但仍存在伪角点的情况,并且SIFT描述算子运算量大,算法时实性有待提高。

针对上述问题,本文提出改进CSS的电力设备红外与可见光图像配准方法。通过该方法能够提高背景复杂的电力设备红外与可见光图像配准精度,同时具有较低的时间复杂度,实现了电力设备红外与可见光图像的高效配准。

2 改进CSS特征提取

电力设备的红外与可见光图像具有明显的轮廓特征,利用CSS算法能够在提取电力设备轮廓特征的基础上获得特征点。然而,电力设备可见光图像背景复杂,算法采用Canny算子进行边缘提取时会产生伪边缘,导致后续产生大量伪角点;并且红外图像中电力设备尺度较大,对轮廓特征的提取精度要求较高。因此,为了提高算法特征点提取精度引入Freeman链码差,对算法进行改进。

2.1 曲率尺度空间

1998年Mokhtarian等提出了著名的CSS角点检测算法,首先利用Canny算子获得边缘轮廓,再通过曲率尺度空间求得曲率极大值点,将其作为候选点同T形角点进行对比,最终得到小尺度下的特征点。下面介绍曲率尺度空间的计算方式。

设平面中某曲线 Γ 用弧长参数 u 表示为

$$\Gamma(u)=[x(u), y(u)], \quad (1)$$

对曲线 Γ 用尺度参数为 σ 的高斯函数进行平滑滤波,即

$$\Gamma_\sigma=[X(u, \sigma), Y(u, \sigma)], \quad (2)$$

式中: X 、 Y 分别为曲线上点的横、纵坐标; $X(u, \sigma)=x(u) \otimes g(u, \sigma)$, $Y(u, \sigma)=y(u) \otimes g(u, \sigma)$,其中 \otimes 表示卷积操作, $g(u, \sigma)$ 为一维高斯核函数。

因此,曲线 Γ_σ 的曲率可定义为

$$k(u, \sigma)=\frac{X_u(u, \sigma)Y_{uu}(u, \sigma)-X_{uu}(u, \sigma)Y_u(u, \sigma)}{[X_u(u, \sigma)^2+Y_u(u, \sigma)^2]^{1.5}}, \quad (3)$$

式中: $X_u(u, \sigma)=\frac{\partial}{\partial u}[x(u) \otimes g(u, \sigma)]=x(u) \otimes g_u(u, \sigma)$;

$$X_{uu}(u, \sigma)=\frac{\partial^2}{\partial u^2}[x(u) \otimes g(u, \sigma)]=x(u) \otimes g_{uu}(u, \sigma);$$

$$Y_u(u, \sigma)=\frac{\partial}{\partial u}[y(u) \otimes g(u, \sigma)]=y(u) \otimes g_u(u, \sigma);$$

$$Y_{uu}(u, \sigma) = \frac{\partial^2}{\partial u^2} [y(u) \otimes g(u, \sigma)] = y(u) \otimes g_{uu}(u, \sigma)。$$

2.2 Freeman 链码差

Freeman 链码按照一定方向以 4-邻接或 8-邻接的方式对像素点进行编码, 可以获得轮廓的链码信息。图 1 是 8-邻接链码方向取值和链码指向。

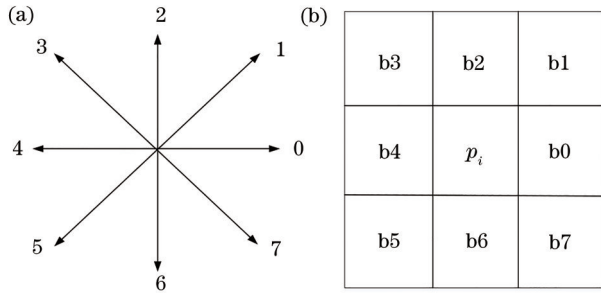


图 1 Freeman 8-邻接方向值和链码指向。(a) Freeman 8 方向取值; (b) Freeman 8 链码指向

Fig. 1 Freeman 8-adjacent direction value and chain code direction. (a) Freeman 8 direction value; (b) Freeman 8 chain code points

由于 Freeman 链码具有数值特征, 计算 Freeman 链码差可以获得轮廓中的角点特征。首先选定轮廓曲线上的点 P_i , 定义 d_i 表示前后两个像素点的链码差, 令 $f(i) = P_{i+1} - P_i, i \in (0, n)$, 其中, n

为该轮廓曲线的像素点, 则 d_i 按照下式进行计算:

$$d_i = \begin{cases} f(i), & |f(i)| \leq 4 \\ f(i) + 8, & |f(i)| > 4 \& f(i) \leq 0 \\ f(i) - 8, & |f(i)| > 4 \& f(i) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, d_i 为正表示链码方向采用逆时针方向, d_i 为负表示链码方向采用顺时针方向。

通过分析发现, 如果一个真实的角点存在, 那么相邻的两个像素点间的链码方向呈现 $\leq 90^\circ$ 的现象。因此, 计算 d_i 并按照如下条件对前后轮廓关系进行判断:

- 1) $d_i = \pm 1$, 表示前后两个方向夹角为 45° ;
- 2) $d_i = \pm 2$, 表示前后两个方向夹角为 90° ;
- 3) $d_i = \pm 3$, 表示前后两个方向夹角为 135° ;
- 4) $d_i = \pm 4$, 表示前后两个方向夹角为 180° ;
- 5) $d_i = 0$, 表示前后两个方向夹角为 0° 。

其中, 满足条件 1)~3) 时, 可判断该点为角点; 而满足条件 4)、5) 时, 则判断该点不是角点。

2.3 改进 CSS 特征检测步骤

将上述得到的 Freeman 链码差引入 CSS 角点检测算法中, 得到改进 CSS 的特征检测方法。图 2 为改进后的 CSS 特征检测算法流程图。

其中, 为了更多地降低算法的时间复杂度, 本

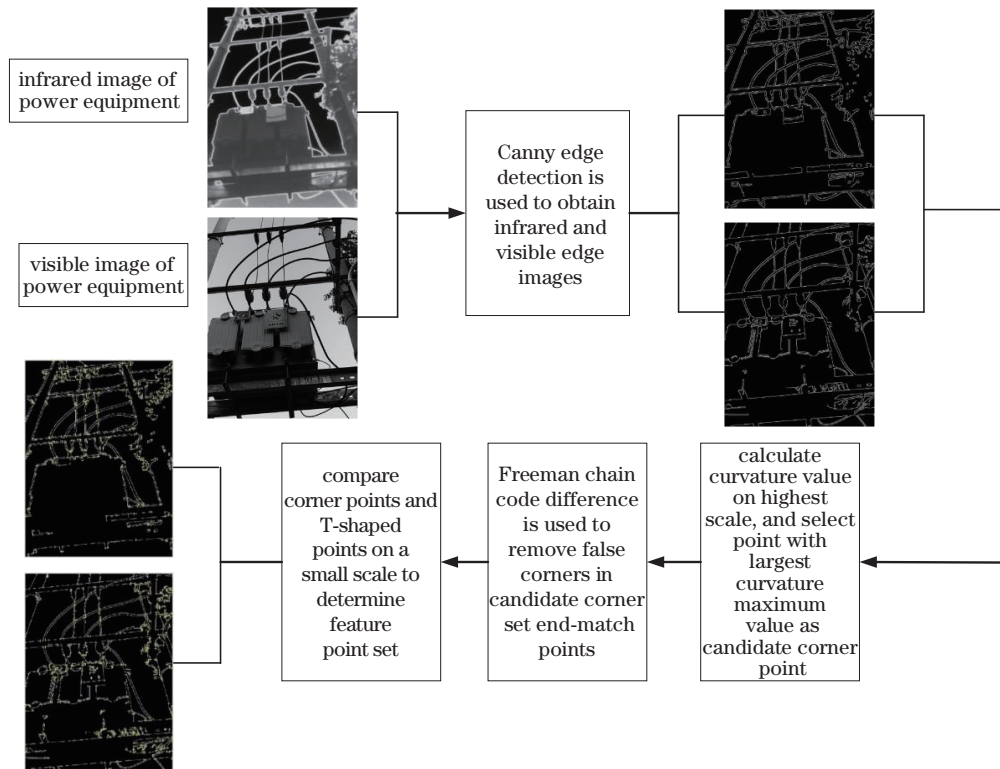


图 2 改进的 CSS 特征点检测算法流程

Fig. 2 Flow chart of improved CSS feature point detection algorithm

文采用 Otsu 分割阈值作为电力设备红外图像的 Canny 边缘检测运算阈值。

3 改进 SURF 特征描述

SURF 算法具有旋转尺度不变性,并且运算时间相对较短,但针对具有旋转尺度变化的多源图像配准效果较差。而变电站获得的电力设备红外与可见光图像通常具有旋转尺度变化,并且电力系统在线监测要求时间复杂度低。因此,为了满足以上需求,提出以点到弦的垂直距离方向为特征主方向,对 SURF 算法进行改进。

3.1 点到弦的垂直距离特征主方向

图 3 是点到弦的距离示意图,设 $P_i [i \in (0, N)]$ 为该轮廓曲线 C 上的一个特征点, P_0, P_N 分别为该轮廓曲线 C 上的起点和终点; $L_{0,N}$ 为 P_0 和 P_N 连结的轮廓曲线 C 的弦长; L_1, L_2 分别为 P_i 与 P_0, P_i 与 P_N 的距离; d_{\min} 为 P_i 到 $L_{0,N}$ 的垂直距离。由先验知识可知,每一个点 P_i 有且只有一条 d_{\min} , 因此将 d_{\min} 所在方向作为特征主方向。

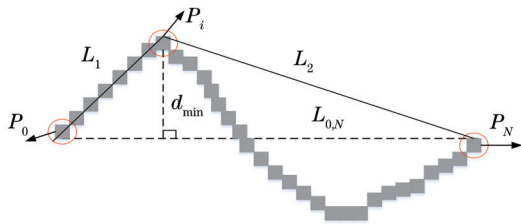


图 3 点到弦的距离示意图

Fig. 3 Schematic diagram of distance from point to string

定义点 P_0, P_N 的坐标分别为 $(x_0, y_0), (x_N, y_N)$, 则 d_{\min} 所在方向角 α 为

$$\alpha = \begin{cases} \arctan\left(\frac{x_N - x_0}{y_N - y_0}\right) + \frac{\pi}{2}, & y(i) \geq \frac{y_0 + y_N}{2} \\ \arctan\left(\frac{x_N - x_0}{y_N - y_0}\right) + \frac{3\pi}{2}, & y(i) < \frac{y_0 + y_N}{2} \end{cases} \quad (5)$$

图 4 是不同尺度下的特征主方向示意图,由于起点及终点始终确定,当曲线的尺度发生改变时,其对应的弦长只产生 λ 倍的变化,由相似三角形定理可知方向角始终不变。因此,以点到弦的垂直距离方向为特征主方向,可以实现旋转尺度不变性。其中, λ 采用自适应取值,分别计算特征点与起点和终点的距离,结合相似三角形规则可求出对应 λ 。

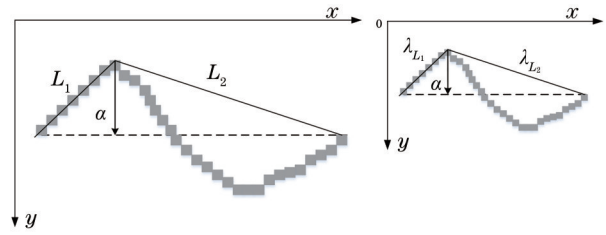


图 4 特征主方向示意图

Fig. 4 Schematic diagram of feature main direction

3.2 特征描述步骤

改进后的 SURF 特征描述步骤如下:

- 1) 以提出的点到弦的垂直距离方向为特征主方向,并选取一个边长为 20 s 的正方形区域;
- 2) 将该正方形区域划分为 16 个边长为 5 s 的区域,采用尺寸为 2 s 的 Haar 小波计算响应值;
- 3) 分别统计区域内 25 个像素点水平方向和垂直方向上的 Haar 小波特性;
- 4) 得到每个响应值对应的 $\sum dx, \sum |dx|, \sum dy, \sum |dy|$, 形成 4 维的特征描述向量 $\mathbf{v} = (\sum dx, \sum |dx|, \sum dy, \sum |dy|)$;
- 5) 通过归一化处理得到 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 维的特征描述算子。

4 特征点匹配

传统配准算法普遍采用单向匹配的策略,利用欧氏距离、Hausdroff 距离、汉明距离等测度准则,选取满足的特征点对实现配准。这种单向匹配方法不仅具有较高的时间复杂度,而且容易漏点,得到过多的误匹配点对,具有较大的配准误差。因此,为了提高算法时间精度并尽可能地获取较多准确的匹配点对,采用一种结合双边快速近似最近邻 (FLANN) 搜索和随机抽样一致 (RANSAC) 的匹配方法对电力设备红外与可见光图像进行配准。

4.1 FLANN 搜索匹配方法

FLANN 算法是一种二值特征匹配方法,通过计算不同欧氏距离下特征点的最近邻点实现特征匹配。设计一种 FLANN 搜索匹配方法,其中, I_1 为红外图像, I_2 为可见光图像。点 q, m 分别为 I_1 中点 p 在 I_2 上的最近邻特征点和次近邻特征点,对应的特征向量为 F_q, F_m, F_p 。而 r, s 则分别为 I_2 中点 n 在 I_1 上的最近邻特征点和次近邻特征点。对应的特征向量为 F_r, F_s, F_n 。

主要步骤如下:

1) 采用式(6)计算点 q 、 m 分别与点 p 的欧氏距离 d_{pq} 、 d_{pm} 以及点 r 、 s 分别与点 n 的欧氏距离 d_{nr} 、 d_{ns}

$$\left\{ \begin{aligned} d_{pq} &= \sqrt{\sum_{i=1}^{64} [F_p(i) - F_q(i)]^2} \\ d_{pm} &= \sqrt{\sum_{i=1}^{64} [F_p(i) - F_m(i)]^2} \end{aligned} \right\}, \left\{ \begin{aligned} d_{nr} &= \sqrt{\sum_{i=1}^{64} [F_n(i) - F_r(i)]^2} \\ d_{ns} &= \sqrt{\sum_{i=1}^{64} [F_n(i) - F_s(i)]^2} \end{aligned} \right\}; \quad (6)$$

2) 计算距离比值 R_1 、 R_2

$$R_1 = \frac{d_{pq}}{d_{pm}}, R_2 = \frac{d_{nr}}{d_{ns}}; \quad (7)$$

3) 分别判断距离比值 R_1 、 R_2 与阈值 T_h (T_h 一般取 0.4~0.8, 本文取 0.75) 的关系: 如果 $R_1 < T_h$ 则点 p 与 q 匹配成功, 否则匹配失败; 如果 $R_2 < T_h$ 则点 n 与 r 匹配成功, 否则匹配失败;

4) 保留两次搜索匹配结果一致的特征点对, 由此得到红外与可见光图像一一对应的特征匹配结果。

4.2 误匹配点剔除

RANSAC 算法具有高稳健性, 常被应用于剔除误匹配点对。从预匹配点对中随机选择 4 对初始匹配点对计算仿射变换模型参数, 再通过计算剩下的匹配点对经过坐标变换后与预匹配点对间的距离, 经过若干次抽样计算剔除误匹配点对, 实现精匹配。

其中仿射变换模型采用下式来表达:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a \\ a_{10} & a_{11} & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: (x', y') 是红外图像的点; (x, y) 是可见光图像中与 (x', y') 相对应的点。

5 实验结果及其分析

为了验证本文算法, 与文献[13-15]中的方法进行对比实验。实验中选择尺度参数 $\sigma = 3$, 实验环境为 Intel(R) Core(TM) i5-1035G1 CPU@1.00 GHz 硬件平台和 Matlab R2019b 软件平台。

5.1 实验评价指标

均方根误差(RMSE)是衡量配准算法精度的重要指标, RMSE 越小说明配准效果越好, 其定义为

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{1i} - x_{2i})^2 - (y_{1i} - y_{2i})^2}, \quad (9)$$

式中: (x_{1i}, y_{1i}) 为红外图像匹配点坐标; (x_{2i}, y_{2i}) 为对应的可见光图像匹配点坐标; n 为匹配点对个数。

查准率(Precision)和查全率(Recall)也是评价图像配准的两个有效指标, 其定义为

$$R_{\text{precision}} = \frac{N_{\text{correct points}}}{N_{\text{all points}}}, R_{\text{recall}} = \frac{N_{\text{correct points}}}{N_{\text{min corners}}}, \quad (10)$$

式中: $N_{\text{correct points}}$ 表示算法正确匹配点数; $N_{\text{all points}}$ 表示算法所有匹配点数; $N_{\text{min corners}}$ 表示红外图像和可见光图像中提取的最小角点数。

5.2 实验配准结果

图 5 是 8 组采用本文提出算法实现的红外与可

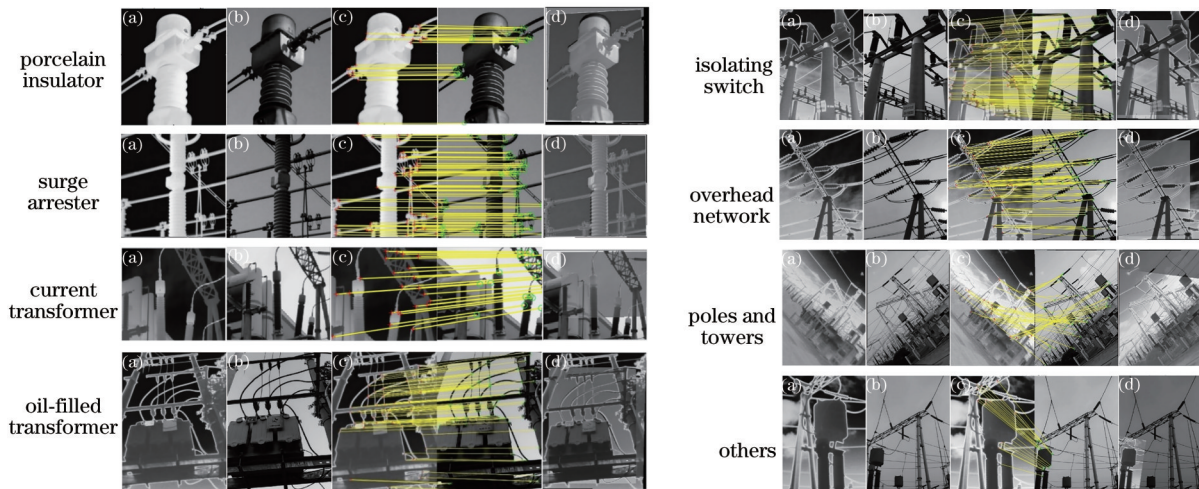


图 5 电力设备红外与可见光图像配准。(a) 红外图像; (b) 可见光图像; (c) 配准图像; (d) 融合图像

Fig. 5 Infrared and visible image registration of power equipment. (a) Infrared images; (b) visible images; (c) registration images; (d) fusion images

见光图像配准效果图,包括瓷质绝缘子、避雷器、电流互感器、油浸式变压器、隔离开关、母线、杆塔和其他设备的红外图像、可见光图像、配准图像及融合图像。从图中可以看出提出算法的配准精度较高,融合后的图像边缘清晰,能够清楚反映电力设备的红外图像特征和可见光图像特征。

表 1 给出了 8 组实验数据下 4 种算法的配准结

果对比,从数据中可以看出,提出算法平均查准率、查全率较其他 3 种算法均有明显提高,特别是针对具有明显旋转尺度变化的图像,提出算法鲁棒性更高,其平均 RMSE 为 1.6649,与其他 3 种配准算法相比分别降低了 77.73%、80.32%、7.63%,由于平均 RMSE 系数更小,说明提出算法具有优越性。

表 1 不同配准算法配准结果对比

Table 1 Comparison of registration results of different registration algorithms

Sample	Algorithm	Matching logarithm	Correct logarithm	Precision	Recall	RMSE
Porcelain insulator	SURF	24	19	80.1%	16.57%	1.1637
	SIFT	27	21	78.8%	18.49%	1.2254
	CSS	24	19	79.2%	22.89%	0.6124
	Proposed	22	19	86.4%	25.33%	0.5382
Surge arrester	SURF	70	62	89.2%	29.03%	1.3783
	SIFT	74	72	97.2%	33.51%	1.0759
	CSS	72	72	100.0%	37.63%	0.3728
	Proposed	71	70	98.6%	35.45%	0.3732
Current transformer	SURF	17	14	82.4%	17.28%	1.1639
	SIFT	18	12	66.2%	5.87%	2.2933
	CSS	15	10	66.7%	6.49%	1.6206
	Proposed	23	17	78.3%	14.40%	0.8547
Oil-filled transformer	SURF	104	87	83.7%	10.82%	8.9042
	SIFT	112	100	89.6%	10.13%	7.9943
	CSS	99	89	89.9%	11.03%	3.5009
	Proposed	84	77	91.7%	11.32%	3.3786
Isolating switch	SURF	125	102	81.3%	12.58%	8.6207
	SIFT	131	122	93.1%	11.75%	9.8135
	CSS	129	123	95.3%	18.36%	1.7532
	Proposed	124	119	95.6%	19.10%	1.6254
Overhead network	SURF	137	108	78.8%	7.73%	7.9346
	SIFT	144	119	82.6%	7.45%	7.8762
	CSS	103	94	91.3%	12.81%	1.7383
	Proposed	100	93	93.0%	13.13%	1.6997
Poles and towers	SURF	113	51	45.1%	3.67%	17.0624
	SIFT	127	42	33.1%	2.92%	21.3027
	CSS	90	76	84.4%	6.26%	3.1172
	Proposed	41	36	87.8%	10.17%	2.9451
Others	SURF	38	17	44.7%	2.49%	13.5783
	SIFT	43	14	32.6%	1.94%	16.0831
	CSS	26	21	80.8%	3.85%	1.7036
	Proposed	22	20	90.9%	5.18%	1.4723

表 2 给出了 8 组实验数据下 4 种算法的配准时间对比,从数据中可以看出,提出算法具有较低的

时间复杂度。其中,对于具有明显旋转尺度变化的图像,提出算法较其他 3 种算法时间精度提高更为

表 2 不同配准算法配准时间对比

Table 2 Comparison of registration time of different registration algorithms

unit: s

Algorithm	Sample							
	Porcelain insulator	Surge arrester	Current transformer	Oil-filled transformer	Isolating switch	Overhead network	Poles and towers	Others
SURF	1.3924	1.7323	1.2329	7.5741	7.2139	7.8943	14.2306	11.9724
SIFT	1.3662	1.7258	1.6003	8.0834	7.8941	8.2205	17.5256	15.0933
CSS	1.3905	1.7049	1.5452	6.7979	6.0891	6.7697	10.8787	6.0108
Proposed	1.2942	1.7027	1.1802	6.6223	5.7783	6.1267	9.2164	4.9132

显著,其平均用时为 4.6043 s,较其他 3 种算法分别降低了 30.82%、40.12%、10.57%,平均匹配时间更少、鲁棒性更强,满足电力系统在线检测的实时性要求。

6 结 论

提出的改进 CSS 的电力设备红外与可见光图像配准算法平均 RMSE 为 1.6649,平均用时为 4.6043 s,在提高配准精度的同时,有效降低了时间复杂度。实验结果表明:采用 Freeman 链码差对 CSS 算法进行改进,能够有效提高特征点的提取精度;而利用提出的点到弦的垂直距离作为特征主方向,具有旋转尺度不变性,结合 SURF 描述算子能够很好地实现特征描述;采用 FLANN 搜索匹配方法能够在提高配准速度的同时保证配准的精度。由于本文采用的实验数据主要为光照、背景变化大的电力设备红外与可见光图像,因此,下一步研究目标是进一步提高可重复率特征点的提取效率,从而提高旋转尺度变化较大的电力设备红外与可见光图像配准的精度及速度。

参 考 文 献

- [1] 张旭,魏娟,赵冬梅,等. 电网故障诊断的研究历程及展望[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2745-2753.
Zhang X, Wei J, Zhao D M, et al. Research course and prospects of power grid fault diagnosis[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2745-2753.
- [2] 林刚,王波,彭辉,等. 基于改进 Faster-RCNN 的输电线路巡检图像多目标检测及定位[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 213-218.
Lin G, Wang B, Peng H, et al. Multi-target detection and location of transmission line inspection image based on improved Faster-RCNN[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 213-218.
- [3] Li Y H, Bi Y D, Zhang W C, et al. Multi-scale anisotropic Gaussian kernels for image edge detection [J]. IEEE Access, 2019, 8: 1803-1812.
- [4] Li Y H, Zhang H H, Chen J N, et al. Non-reference image quality assessment based on deep clustering[J]. Signal Processing: Image Communication, 2020, 83: 115781.
- [5] 赵洪山,张则言. 基于文化狼群算法的电力设备红外和可见光图像配准[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1610003.
Zhao H S, Zhang Z Y. Power equipment infrared and visible images registration based on cultural wolf pack algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1610003.
- [6] Liu X Z, Ai Y F, Tian B, et al. Robust and fast registration of infrared and visible images for electro-optical pod[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1335-1344.
- [7] 纪利娥,杨风暴,王志社,等. 可见光和红外反相图像的 SURF 特征双向匹配[J]. 光电工程, 2014, 41(5): 77-82.
Ji L E, Yang F B, Wang Z S, et al. Bi-directional matching algorithm based on SURF features for visible and negative image of infrared image[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(5): 77-82.
- [8] 杨琼楠,马天力,杨聪镔,等. 基于优化采样的 RANSAC 图像匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101104.
Yang Q N, Ma T L, Yang C K, et al. RANSAC image matching algorithm based on optimized sampling [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 101104.
- [9] 张丹,黄欢,尚振宏. 基于互信息的 Active Demons 非刚性图像配准算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 161009.
Zhang D, Huang H, Shang Z H. Nonrigid image registration algorithm based on mutual information Active Demons[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161009.

- [10] Li H W, Wang B H, Li L. Research on the infrared and visible power-equipment image fusion for inspection robots[C]//2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, October 5-7, 2010, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2010: 11637478.
- [11] 李寒, 王库, 刘韶军. 基于灰度冗余和 SURF 算法的电气设备红外和可见光图像配准[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 111-115, 123.
Li H, Wang K, Liu S J. Registration method between infrared and visible images of electrical equipment based on gray-scale redundancy and SURF [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 111-115, 123.
- [12] Mishra A, Mahapatra S, Banerjee S. Modified Frei-Chen operator-based infrared and visible sensor image fusion for real-time applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(14): 4639-4646.
- [13] 许金鑫, 李庆武, 马云鹏, 等. 基于斜率一致性的电气设备红外和可见光图像配准方法[J]. 光电子·激光, 2017, 28(7): 794-802.
- Xu J X, Li Q W, Ma Y P, et al. Registration method between infrared and visible images of electrical equipment based on slope consistency[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2017, 28(7): 794-802.
- [14] 朱英宏, 李俊山, 汤雨. 基于 CSS 角点提取的红外与可见光图像匹配算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(11): 2540-2545.
Zhu Y H, Li J S, Tang Y. Matching algorithm for IR/visible images based on CSS corner extraction[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(11): 2540-2545.
- [15] 姜骞, 刘亚东, 方健, 等. 基于轮廓特征的电力设备红外和可见光图像配准方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 252-260.
Jiang Q, Liu Y D, Fang J, et al. Registration method for power equipment infrared and visible images based on contour feature[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 252-260.