光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.028

基于互信息的紫外成像仪中图像配准研究

侯思祖*，陈　宇，刘雅婷

（华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071003）

摘　要： 紫外成像仪为实现放电点定位和电气设备故障诊断，需要对来自不同传感器的紫外与可见光图像进行配准。针对紫外与可见光图像成像原理差异较大，特征点提取及匹配困难的问题，文章提出一种基于互信息的紫外与可见光图像配准算法并将其应用到紫外成像仪中完成实时配准。首先计算紫外与可见光图像中的互信息，将互信息作为相似性测度，采用刚体变换模型对图像进行变换，然后通过1＋1进化算法求取最优相似性测度时的空间变换参数而完成图像配准，并通过仿真和紫外成像仪样机验证了所提算法的有效性。

关键词： 紫外成像仪；图像配准；互信息；1＋1进化算法

中图分类号： TP391　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0598－07

Image Registration in Ultraviolet Imager Based on Mutual Information

HOU Sizu，CHEN Yu，LIU Yating

（School of Electrical and Electronic Engineering，North China Electric Power University，Baoding 071003，CHN）

Abstract： In order to achieve discharge point location and electrical equipment fault diagnosis，UV imagers need to register UV and visible light images from different sensors. Due to the large difference between the imaging principles of ultraviolet and visible light images and the difficulty in feature extraction and matching，a mutual image-based UV and visible image registration algorithm is proposed and applied to the UV imager for real-time registration. Firstly，the mutual information in the ultraviolet and visible light images is calculated. The mutual information is used as the similarity measure. The image is transformed by the rigid body transformation model. The image transformation parameters are obtained by the 1＋1 evolutionary algorithm to obtain the spatial transformation parameters of the optimal similarity measure，and the effectiveness of the proposed algorithm is verified by simulation and UV imager.

Key words： ultraviolet imager；image registration；mutual information；1＋1 evolutionary algorithm

0　引言

电力和铁路是国家的重要基础设施，其中输配电线路、变电站、高压设备及电气化铁路设备都会因为环境、安装、维护等因素的影响而产生高压放电现象。当带电体局部应力超过临界值时，会使周围空气电离而产生电晕放电现象并伴随产生光波、声波、电磁辐射和高频脉冲电流等[1-2]。这不仅会造成输电线路线损，同时也会降低电气设备的绝缘性能，导致设备缺陷和故障，严重威胁电网和铁路的运行安全，电磁波也会对无线通信产生很大的脉冲干扰[3]，威胁通信安全。因此研究一种能通过检测放电现象及时发现绝缘缺陷和预防故障发生的技术是非常必要的。

一般情况下，电晕放电可辐射的光波段覆盖紫

收稿日期：2020－03－03.

基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFF01011900).

* 通信作者：侯思祖　E-mail：1647354604@qq.com

外、红外、可见光谱段[4]。在电力巡检中，红外检测是一种常用的放电检测手段[5]，然而红外检测是利用热量来检测放电现象，不仅容易受到天气等环境因素的影响，而且当检测到热量信息时，表明电气设备已经发生了严重损坏，因此具有很大的安全隐患。而电晕放电的紫外光谱特性能量主要集中在 200～400 nm 波段，在自然界中，太阳辐射的紫外光在经过臭氧层时，其 240～280 nm 波段的紫外光会被吸收[6]，这一波段也被称为“日盲”紫外波段。所以，可以利用“日盲”紫外波段进行放电检测，由于高灵敏度的紫外探测可以发现高压设备的早期放电现象，故可及时地检测到高压电气设备的缺陷故障并提早解决，以保障电网及铁路的运行安全[7-9]。

深截止“日盲”紫外滤波片只能通过 240～280 nm 波段的紫外光，紫外镜头通过对紫外光信号的探测得到紫外光图像。由于成像后图像中仅包含紫外光信息，必须同时结合可见光通道对相同目标进行可见光成像，最后通过图像融合技术将目标与背景两幅图像进行融合，充分利用两者的互补信息，更加全面、准确地描述放电点位置、放电强度和放电类型等信息[10-11]。

图像配准是图像融合的前提和保障，对于来自不同镜头的图像进行融合时，首先要保证两幅图像在空间上对齐[12]。目前，图像配准技术在遥感、医学、模式识别以及各种异源传感器图像融合等领域中应用广泛[13]。Chen 等[14]提出了一种基于角点仿射变换的紫外双光谱图像配准技术，给紫外双光谱图像配准提供了很好的思路。Cao 等[15]针对 CT 及 MRI 异源图像配准提出了一种多模态的基于区域自适应的配准方法。Du 等[16]针对红外与可见光图像配准提出了一种尺度不变的强度保持特征描述符，通过对角点进行匹配，使用仿射函数进行配准。但是这些研究都是在两幅图像具有一定相似特征的基础上进行的，对于相似特征较少的图像并不能很好地处理，存在很大的误差。

因此，针对紫外图像与可见光图像之间相似特征难以匹配的问题，本文从像素灰度的角度，提取两幅图像的互信息，通过将互信息作为相似性测度，采用 1+1 进化算法寻找最优刚体变换模型，通过该最优变换模型实现紫外图像与可见光图像在空间上的对齐。该刚体变换模型的有效性在实际的紫外成像仪样机上得到了验证。

1　互信息配准

1.1　互信息配准流程

信息论中将互信息定义为信息之间的关系，可以表示为两个随机变量之间统计相关性的度量，由此可以得出图像互信息的计算方法。作为图像多模态配准中的度量，图像互信息利用对图像灰度值的统计数据形成单个图像的灰度值概率函数和两个图像相似部分对应的灰度值联合概率函数，以此来衡量两幅图像的相关程度。在图像配准的过程中，认为两幅图像的相关性最大时对应的互信息也最大。基于互信息的图像配准最早在 1995 年被用于医学图像配准中，此后研究人员对于互信息的配准方法做了大量研究。

对于以互信息作为相似性测度的图像配准来说，目标就是寻找一个空间变换模型，使得两幅图像中的对应点相互对齐，以便进行比较或融合。基于互信息的图像配准流程如图 1 所示。

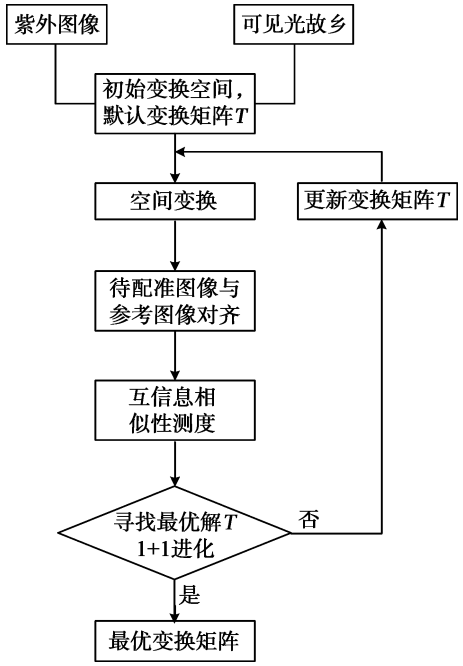


图 1　基于互信息的图像配准流程图

它的流程可以概括为：首先提取两幅图像的特征空间信息，计算紫外图像与可见光图像之间的互信息，然后通过优化搜索算法对空间变换矩阵进行更新迭代，从中找出使两幅图像相似性测度互信息最大的最优变换矩阵 $\boldsymbol{T}$，最后根据变换矩阵实现对紫外图像的空间变换，使其在空间上与可见光图像配准，达到图像融合的要求。

1.2 图像互信息相关理论

基于图像灰度信息的相似性测度是一种通过统计和概率估计的方法对图像进行匹配的表示相似程度的参数。常见的图像灰度信息相似性测度包括互相关法、均方差和法及互信息法等。在多模态图像中最常用的为互信息法，互信息法是一种不需要对源图像做预处理的方法，被广泛应用于医学图像配准中。互信息法对于各种模式的图像配准都具有有效性，鲁棒性及可靠性较高。本文采用基于互信息的相似性测度来提高紫外与可见光图像的匹配精度，下面介绍一些图像互信息的基本概念。

1)熵

在信息论中，熵表示随机变量的不确定性。假设随机事件 x_i 出现的概率为 p_i，则信息量为：$I(x_i)=-\log 2p_i$，单位为 bit。而信息量的数学期望为信源的平均信息量，即信源的信息熵。

假设一个随机变量 X 内存在 N 个随机事件 $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$，随机事件出现的概率集合为 $P=\{p_1,p_2,\cdots,p_n\}$，也就是随机变量 X 的概率密度函数为 $p(x)$，则随机变量 X 的熵可以定义为

$$H(X)=-\sum p(x)\log p(x) \tag{1}$$

此外联合熵表示两个随机变量的相关性。联合熵越小表示这两个随机变量越相关，若两个随机变量越不相关，它们的联合熵会越大。假设 $p_{XY}(x,y)$ 是两个随机变量 X,Y 的联合概率密度函数，则联合熵的数学定义为

$$H(X,Y)=-\sum_{x,y} p_{XY}(x,y)\log p_{XY}(x,y) \tag{2}$$

2)图像互信息

图像互信息可以度量两幅图像的统计独立程度，基于前面熵和联合熵的定义，给定紫外与可见光图像 UV 和 V，他们的互信息可以定义为

$$MI(\mathrm{V},\mathrm{UV})=H(\mathrm{V})+H(\mathrm{UV})-H(\mathrm{V},\mathrm{UV}) \tag{3}$$

或

$$MI(\mathrm{V},\mathrm{UV})=\sum_{\mathrm{v},\mathrm{uv}} p(\mathrm{v},\mathrm{uv})\log\frac{p(\mathrm{v},\mathrm{uv})}{p(\mathrm{v})p(\mathrm{uv})} \tag{4}$$

式(3)中，$MI(\mathrm{V},\mathrm{UV})$ 为可见光与紫外光图像的互信息，$H(\mathrm{V})$，$H(\mathrm{UV})$ 和 $H(\mathrm{V},\mathrm{UV})$ 分别表示可见光图像的熵、紫外光图像的熵、可见光与紫外光图像的联合熵。式(4)中，$p(\mathrm{v},\mathrm{uv})$ 表示可见光与紫外光图像的联合概率密度函数，$p(\mathrm{v})$ 和 $p(\mathrm{uv})$ 分别表示可见光图像的概率密度函数和紫外光图像的概率密度函数。根据互信息的定义，对于可见光与紫外光的互信息计算流程如图 2 所示。

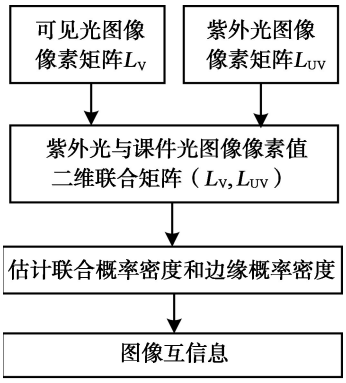


图 2 紫外光与可见光图像互信息计算流程

可见光图像和紫外光图像的像素灰度值分别表示为 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{V}}(i,j)$，$\boldsymbol{L}_{\mathrm{UV}}(i,j)$：

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{V}}(i,j)=\begin{bmatrix} L_{\mathrm{V}}(1,1) & L_{\mathrm{V}}(1,2) & \cdots & L_{\mathrm{V}}(1,n) \\ L_{\mathrm{V}}(2,1) & L_{\mathrm{V}}(2,2) & \cdots & L_{\mathrm{V}}(2,n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{\mathrm{V}}(m,1) & L_{\mathrm{V}}(m,2) & \cdots & L_{\mathrm{V}}(m,n) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{UV}}(i,j)=\begin{bmatrix} L_{\mathrm{UV}}(1,1) & L_{\mathrm{UV}}(1,2) & \cdots & L_{\mathrm{UV}}(1,n) \\ L_{\mathrm{UV}}(2,1) & L_{\mathrm{UV}}(2,2) & \cdots & L_{\mathrm{UV}}(2,n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{\mathrm{UV}}(m,1) & L_{\mathrm{UV}}(m,2) & \cdots & L_{\mathrm{UV}}(m,n) \end{bmatrix} \tag{5}$$

其中，$i=1,2,\cdots,m$，$j=1,2,\cdots,n$，其中 i,j 分别表示像素的横纵坐标，m,n 分别表示图像的宽高像素数。先将可见光图像和紫外图像对应坐标的像素值整合成一个二维向量$(\boldsymbol{L}_{\mathrm{V}}(i,j),\boldsymbol{L}_{\mathrm{UV}}(i,j))$，$i=1,2,\cdots,m$，$j=1,2,\cdots,n$。然后通过直方图估计法估计出两个图像的联合概率密度 $p(\mathrm{v},\mathrm{uv})$ 和边缘概率密度 $p(\mathrm{v})=\sum p(\mathrm{v},\mathrm{uv})$，$p(\mathrm{uv})=\sum p(\mathrm{v},\mathrm{uv})$。最后，根据式(4)计算出两幅图像的互信息。

2 最优空间变换

2.1 1+1 优化算法

对于基于互信息的图像配准来说，当寻找到两幅图像最大的互信息时，得出的空间变换参数会使紫外图像(待配准图像)在空间上与可见光图像(参考图像)对齐。这里需要采用一种有效的进化搜索算法通过迭代计算来求得满足最大互信息的空间变换参数。

1+1 算法是一种进化优化算法[17]，其流程如图 3 所示，通过该算法可以寻找最优的配准参数。该

算法可以满足大量的数据处理需求，同时克服了不同尺度参数的问题。在一般的进化算法中，s 表示一个个体，它的能量 $E(s)$ 表示该个体的适应度。通常来说，一个个体的能量越小，它的适应度越强。现有的个体会在每个优化步骤开始时形成种群，而作为每一优化步骤的结果，新个体（子体）是由群体（父体）的某种突变产生的。新个体被增加到种群中，然后随着适者群的生存而被减少到原来的种群规模。在 1+1 进化算法中，种群规模和新个体的数量都为 1。其中突变是一种均值为 $\mu = s - parent$、协方差为 ε^2 的多维正态分布的随机向量。在每一次优化步骤中协方差 ε^2 会自适应地变换。如果新的种群由更合适的个体组成，则增长因子 $\boldsymbol{C}_{\text{grow}}$ 会使 ε^2 增加，反之降低因子 $\boldsymbol{C}_{\text{shrink}}$ 会使 ε^2 减小。

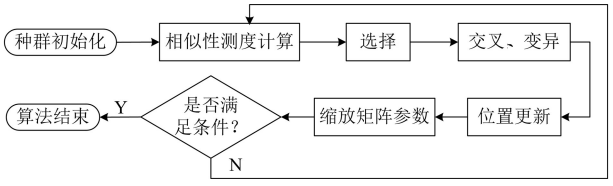


图 3　1+1 进化算法流程图

1+1 算法通过随机选择参数空间中的新位置来迭代，该新位置由当前位置为中心的概率函数控制。原始的 1+1 优化算法会对所有的参数使用同一个方差，而各向同性概率函数会受局部信息更新规则的影响而增加或减少。1+1 进化算法的数学表达式如下：

$$\boldsymbol{\varphi}_t \sim N(0,1) \tag{6}$$

$$\boldsymbol{x}_{t+1} = \boldsymbol{x}_t + \boldsymbol{\alpha}_t \boldsymbol{\varphi}_t \tag{7}$$

$$\boldsymbol{\alpha}_{t+1} = \begin{cases} \boldsymbol{\alpha}_t \boldsymbol{C}_{\text{grow}}, & f(x_{t+1}) < f(x_{\text{opt}}) \\ \boldsymbol{\alpha}_t \boldsymbol{C}_{\text{shrink}}, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{x}_{\text{opt}} = \begin{cases} \boldsymbol{x}_{t+1}, & f(x_{t+1}) < f(x_{\text{opt}}) \\ \boldsymbol{x}_{\text{opt}}, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{9}$$

其中，$\boldsymbol{C}_{\text{grow}}$，$\boldsymbol{C}_{\text{shrink}}$，$\boldsymbol{x}_0$，$\boldsymbol{\alpha}_0$ 是已知参数，表示均值为 0、方差为 1 的各向同性正态分布的多维随机向量。作为各向同性概率函数的结果，可能不会调整相等的缩放参数和能量的局部特征。因此，利用二阶统计量来更新多维高斯概率函数，并以此对 1+1 进化算法进行改进。缩放参数 α_t 表示的正常密度函数的简单缩放被矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的乘法所替代，也就是协方差 $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{A}^* \boldsymbol{A}'$，其中 $\boldsymbol{A}'$ 是 $\boldsymbol{A}$ 的转置。可参考以下公式：

$$\boldsymbol{\varphi}_t \sim N(0,1) \tag{10}$$

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{\varphi}_t + m \sim N(m, \boldsymbol{A}^* \boldsymbol{A}') \tag{11}$$

因此，缩放和平移向量 $\boldsymbol{\varphi}$ 就是服从均值为 m、协方差为 $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{A}^* \boldsymbol{A}'$ 的正态分布。在每次迭代搜索过程中，通过新的局部信息来更新协方差矩阵，以此求得最大互信息。

2.2　空间变换模型

根据相似性测度互信息取最大的原则，采用 1+1 进化算法对空间变换参数进行搜索迭代，寻找最优空间变换参数，使得紫外图像与可见光图像在空间坐标上对齐。

图像配准的主要目的就是解决两幅图像在空间上的映射问题。其中待配准图像与参考图像之间可能会存在平移、旋转、尺度变换甚至是非线性变换，如图 4 所示。

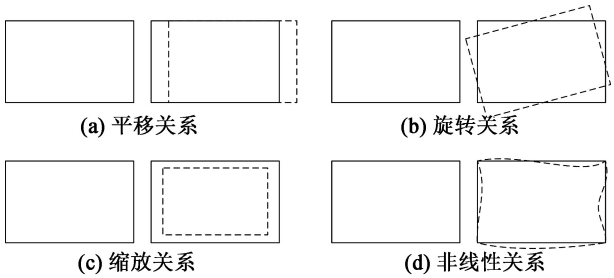


图 4　图像间变换关系示意图

由于紫外成像仪中两个镜头的摆放位置是经过光学对准的，故两幅图像之间不存在旋转问题，配准过程中只会涉及平移。这里采用简单的刚体变换，刚体变换是一种保持图像形状，并保持图像中任意两点间的距离不变的图像变换模型。刚体变换的数学表达式如下：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & t_x \\ \sin\theta & \cos\theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

其中，(x, y) 是原图像灰度值的坐标，(x', y') 是经过刚体变换后的图像灰度值的坐标，θ 为旋转角度，t_x 为水平平移量，t_y 为竖直平移量，单位为像素。

3　仿真结果

3.1　主观分析

本文提出的基于互信息的紫外与可见光图像配准算法的仿真流程图如图 5 所示。

利用对互信息的相似性测度进行度量，以刚体变换作为空间变换模型实现待配准图像的变换，通过 1+1 优化算法搜索满足相似性测度的空间变换参数，然后将其应用到待配准图像上以实现紫外光图像与可见光图像在空间上的对齐，并对经过配准

的图像计算叠加精度，以证明算法的有效性。

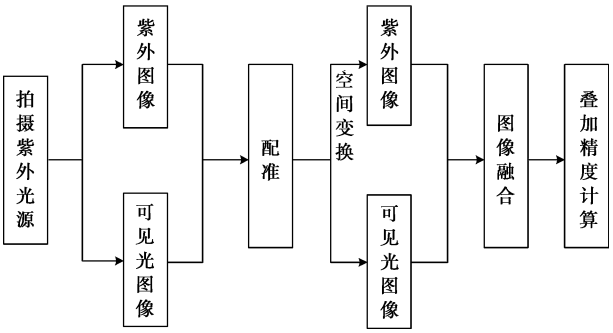


图 5 仿真流程图

图 6～8 分别表示采用基于互信息的图像配准算法对 6，10 和 15 m 距离下的十字低压汞灯紫外光图像和可见光图像进行配准的仿真结果。对配准后的紫外光图像与可见光图像进行简单叠加后可以明显看到紫外光图像与可见光图像已经很好地完成了空间对齐，这表明基于互信息的紫外与可见光图像配准算法在主观视觉上可以满足紫外与可见光图像配准的要求。



(a) 可见光图像 (b) 紫外光图像 (c) 配准后的融合图像

图 6 6 m 距离下基于互信息的图像配准算法仿真结果



(a) 可见光图像 (b) 紫外光图像 (c) 配准后的融合图像

图 7 10 m 距离下基于互信息的图像配准算法仿真结果



(a) 可见光图像 (b) 紫外光图像 (c) 配准后的融合图像

图 8 15 m 距离下基于互信息的图像配准算法仿真结果

3.2 紫外光与可见光图像叠加精度

前面的仿真结果表明基于互信息的紫外与可见光图像配准方法的配准结果在主观视觉方面有着很好的效果。下面通过专门用来测量紫外成像仪中紫外光图像与可见光图像的配准精度指标从客观数据方面证实本文提出的基于互信息的紫外与可见光图像配准算法的精确性。该配准精度指标表示紫外成像仪中紫外通道与可见光通道对同一紫外光源成像时的最大叠加角度偏差，单位为 mrad，测试方法如图 9 所示，在保证同一视场角下，通过紫外成像仪对紫外平行光管进行成像，成像后求取紫外通道中心点（质心）和可见光图像中线点（质心），由式（13）求得最大叠加角度偏差，然后换算成叠加精度。

$$d\theta = \sqrt{\left(\frac{dx}{W}\times\theta_W\right)^2 + \left(\frac{dy}{H}\times\theta_H\right)^2} \tag{13}$$

其中，$d\theta$ 表示最大叠加角度偏差，单位为（°），dx，dy 表示紫外光图像与可见光图像质心坐标的差值，W，H 分别是横向和纵向像素数，θ_W，θ_H 分别是水平方向和竖直方向视场角度。经过式（12）计算后得出最大角度偏差 $d\theta$，通过角度弧度换算公式求得紫外与可见光叠加精度 $d\omega$。

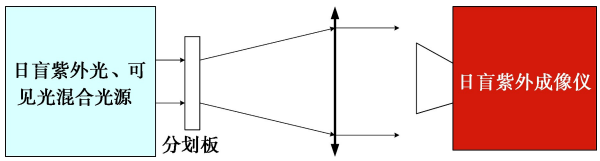


图 9 紫外光与可见光叠加精度测试示意图

通过对经过图像配准算法配准的紫外光图像和可见光图像测试叠加精度以验证基于互信息的紫外光与可见光图像配准算法的有效性。对 6～15 m 不同距离、不同位置的十字低压汞灯进行配准，并对配准后的图像进行测试。首先通过对十字汞灯求取质心的方法求得紫外光图像和可见光图像的质心坐标，然后根据式（13）计算最大叠加角度偏差，并计算叠加精度。计算结果如表 1 所示。

表 1 6～15 m 距离的紫外与可见光图像叠加精度

距离/m	紫外光图像质心坐标	可见光图像质心坐标	叠加角度偏差 $d\theta$/(°)	叠加精度 $d\omega$/mrad
6	(859.67,705.17)	(861.46,706.99)	0.010 1	0.18
7	(1 004.62,716.85)	(1 006.36,715.41)	0.008 6	0.15
8	(1 048.50,725.00)	(1 049.82,722.39)	0.012 4	0.22
9	(988.81,738.31)	(990.28,736.39)	0.009 8	0.17
10	(982.53,729.07)	(982.88,724.19)	0.021 7	0.38
11	(836.33,687.33)	(836.96,685.55)	0.008 2	0.14
12	(884.39,732.78)	(884.44,729.82)	0.013 2	0.23
13	(1 122.00,623.50)	(1 121.03,620.56)	0.013 5	0.23
14	(1 025.13,702.36)	(1 023.56,699.32)	0.014 5	0.25
15	(911.83,680.92)	(912.05,678.96)	0.008 7	0.15

根据以上所给信息可计算得出，在 6～15 m 距离下不同位置的紫外与可见光图像叠加精度远小于项目所提指标 0.5 mrad，故可以满足实际的工程需要。通过此验证可以确认基于互信息的紫外与可见光图像配准算法对于紫外成像仪中的紫外配准是非常有效的。

4　紫外成像仪中的实时配准

紫外成像仪的图像配准采用机械配准和外部标定参数的方式。机械配准指的是根据光学方面的计算将紫外相机与可见光相机按照一定的位置进行固定以满足两通道成像尽量保持在同一光轴，经过机械配准后紫外与可见光相机成像后会使两幅图像的叠加具有近似相同空间变换，如图 10 所示。也就是说，对于同一台紫外成像仪，可以采用外部计算好的空间变换参数来进行校正。采用本文提出的基于互信息的紫外与可见光图像配准算法来计算空间变换参数，通过此空间变换参数来实现对经过机械配准的图像进行软件补偿。

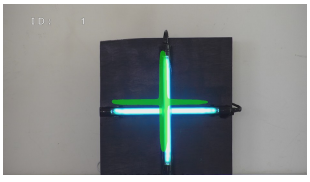


图 10　机械配准后的融合图像

对不同距离下的十字低压汞灯进行拍摄，并计算其空间变换参数，如表 2 所示。通过分析计算所得的空间变换参数，其中 $\cos\theta=1$，$\sin\theta\approx0$，可知对于待配准图像的旋转角度可近似等于 0。t_x，t_y 分别为水平平移和竖直平移的像素数。

在实际紫外成像仪样机中配有激光测距模块，可以通过该模块测量目标与紫外成像仪之间的距离，并根据查找表的方式按距离对放电目标的紫外图像进行变换。其中图 11 为紫外成像仪未经过配准所拍摄的在 6，10 和 15 m 距离下的融合图像。图 12 为紫外成像仪在经过上述配准方法后，所拍摄的在 6，10 和 15 m 距离下的已配准的融合图像。可以看到经过上述配准方法后得到的融合图像在主观视觉上已满足配准要求。

表 2　不同距离下的空间变换参数

距离/m	变换参数			
	$\cos\theta$	$\sin\theta$	t_x	t_y
6	1	0.006 5	24.976 8	54.284 8
7	1	0.007 6	23.777 0	57.665 3
8	1	0.009 9	23.550 8	60.953 4
9	1	0.008 7	23.929 0	61.436 5
10	1	0.005 1	26.655 1	54.751 5
11	1	0.000 000 9	26.402 1	53.932 4
12	1	0.000 04	26.439 6	53.233 1
13	1	0.009 3	23.598 2	55.289 6
14	1	0.000 1	23.608 3	55.697 1
15	1	0.000 1	24.023 6	54.697 1



(a)6 m 距离　(b)10 m 距离　(c)15 m 距离

图 11　不同距离下未配准的融合图像



(a)6 m 距离　(b)10 m 距离　(c)15 m 距离

图 12　不同距离下配准后的融合图像

因为这些参数是在外部进行标定的，在实际应用中已经将配准参数计算完毕并按照查找表的方式写入到图像融合处理平台中，故可直接通过表中参数对紫外图像进行变换。在紫外成像仪样机检测中，图像配准及融合后的实时性达到 40 f/s，实现了配准及图像融合的实时性。

此外，通过对已配准紫外成像仪进行叠加精度测试，从客观数据来证明本算法应用到紫外成像仪的有效性。3.2 节已经介绍了一种测量紫外成像仪图像叠加精度的计算方法，本节按照此方法对已完成配准的紫外成像仪进行叠加精度的测试，测试结果如表 3 所示。

表 3　已完成配准的紫外成像仪叠加精度测试结果

距离/m	紫外光图像质心坐标	可见光图像质心坐标	叠加角度偏差 $d\theta$/(°)	叠加精度 $d\omega$/mrad
6	(981.11,736.33)	(979.09,740.55)	0.019 9	0.34
7	(1 202.43,736.62)	(1 199.93,741.09)	0.021 5	0.37
8	(1 057.67,873.33)	(1 056.63,877.30)	0.018 0	0.31
9	(1 168.11,760.99)	(1 170.46,764.64)	0.018 0	0.31
10	(870.26,730.25)	(872.99,732.75)	0.013 0	0.22
11	(880.79,737.00)	(877.37,738.74)	0.013 8	0.24
12	(1 207.36,714.38)	(1 209.28,716.89)	0.012 9	0.22
13	(1 239.14,699.00)	(1 237.98,702.25)	0.015 0	0.26
14	(1 210.27,801.25)	(1 209.34,804.89)	0.016 5	0.28
15	(911.35,789.35)	(910.38,792.38)	0.013 8	0.24

5 结论

紫外成像仪利用紫外图像与可见光图像两者之间的信息，经过严格的图像配准来精确地定位放电点的位置，以满足电力及铁路巡检中对于故障的定位及诊断。图像配准一般采用基于特征的配准方法，将两幅图像的相似特征进行匹配，计算空间变换参数。而对于紫外图像来说，由于紫外图像与可见光图像之间的相似特征很少，特征匹配误差较大，故本文提出采用基于互信息的方法对紫外图像和可见光图像进行配准，该方法利用图像的灰度计算两者之间的互信息，并采用进化算法求取最大相似性测度，从而得出满足要求的空间变换参数。由于紫外成像仪镜头结构的特性，实时配准时只需要在仪器出厂前校准配准参数即可，故该方法虽然消耗时间较长，但相比于基于特征的配准方法更适合于紫外图像的配准。对不同距离下拍摄的图像进行配准的仿真试验及应用到实际紫外成像仪中都验证了本文所提方法的有效性。

参考文献：

[1] 艾建勇，金立军. 基于紫外图像的接触网棒瓷绝缘子污秽状态检测[J]. 电工技术学报，2016，31(10)：112-118.
Ai J Y，Jin L J. Rod porcelain insulator filth state detection of catenary based on ultraviolet image [J]. Trans. of China Electrotechnical Society，2016，31(10)：112-118.

[2] 王胜辉，冯宏恩，律方成. 电晕放电紫外图像参数变化特性及距离修正[J]. 仪器仪表学报，2014，35(8)：1823-1830.
Wang S H，Feng H En，LV F C. Parameter variation characteristic and observation distance correction of corona discharge ultraviolet image [J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2014，35(8)：1823-1830.

[3] 隋晓杰，宋守信. 高压输电线路电晕放电分析[J]. 电力建设，2006，27(3)：37-38.
Sui X J，Song S X. Analysis on corona discharge of HV transmission lines[J]. Electric Power Construction，2006，27(3)：37-38.

[4] 贾志东，王林军. 基于紫外成像技术的瓷绝缘子串放电程度量化评估[J]. 高电压技术，2017，43(5)：1467-1475.
Jia Z D，Wang L J. Quantitative assessment of porcelain insulator string discharge degree based on UV imaging technology[J]. High Voltage Engineering，2017，43(5)：1467-1475.

[5] 肖慧慧，胡晓东，邓 阳. 综合应用多种带电检测手段确诊设备局部放电缺陷[J]. 机车电传动，2018(4)：101-102，123.
Xiao H H，Hu X D，Deng Y. Comprehensive application of various live detection methods for partial discharge detection [J]. Electric Drive for Locomotives，2018(4)：101-102，123.

[6] Zhang Y B，Da-Jian L I，Zhao J. Corona UV imaging detection technology and its application[J]. Chinese J. of Quantum Electronics，2014，31(5)：622-627.

[7] 吴礼刚，何文荣，胡晋荪，等. 日盲紫外-可见光双光谱照相机系统[J]. 光学精密工程，2010，18(7)：1529-1535.
Wu Ligang，He Wenrong，Hu Jinsun，et al. Solar blind UV and visible dual-spectral camera [J]. Optics and Precision Engin.，2010，18(7)：1529-1535.

[8] Jiao Guohua，Zhang Yizhou，Dong Yuming，et al. An optical system in solar-blind UV for corona discharge detection[C]// Proc. IEEE Inter. Conf. on Real-time Computing & Robotics，2016.

[9] 匡 蕾，顾 燕. 紫外像增强器用于电力安全检测的研究[J]. 红外技术，2015，37(11)：986-990.
Kuang L，Gu Y. Research on the application of UV image intensifier in security detection of power equipment[J]. Infrared Technol.，2015，37(11)：986-990.

[10] Hu Bo，Ma Lixin，Yuan Shujuan，et al. New corona ultraviolet detection system and fault location method[C]// 2012 China Inter. Conf. on Electr. Distribution，2012：1-4.

[11] Luo Y，Wu Y，Hu J，et al. Research on detection method for spatial discharge of high voltage electrical equipment based on ultraviolet monitoring video[C]// 2017 IEEE 5th Inter. Symp. on Electromag. Compatibility，2017：1-5.

[12] Elstrom U V，Wysocka B A，Muren L P，et al. Daily kV cone-beam CT and deformable image registration as a method for studying dosimetric consequences of anatomic changes in adaptive IMRT of head and neck cancer [J]. Acta Oncologica，2010，49(7)：1101.

[13] Fan B，Huo Ch L，Pan Ch H. Registration of optical and SAR satellite images by exploring the spatial relationship of the improved SIFT[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett.，2013，10(4)：657-661.

[14] Chen T，Yuan Sh，Li J P，et al. Image registration for a UV-Visible dual-band imaging system[J]. Optics and Lasers in Engin.，2018，105(6)：209-218.

[15] Cao H X，Yang J，Gao Y，et al. Region-adaptive deformable registration of CT/MRI pelvic images via learning-based image synthesis [J]. IEEE Trans. on Image Processing，2018，27(7)：3500-3512.

[16] Du Q，Fan A，Ma Y，et al. Infrared and visible image registration based on scale-invariant PIIFD feature and locality preserving matching [J]. IEEE Access，2018，6：64107-64121.

[17] Styner M，Brechburhler C，Szekely G，et al. Parametric estimate of intensity inhomogeneities applied to MRI[J]. IEEE Trans. on Medical Imaging，2000，19：153-165.

作者简介：

侯思祖(1962—)，男，教授，博导，研究方向包括配网故障定位诊断、电力通信网综合管理和检测。