

文章编号 1004-924X(2018)05-1181-10

偏振探测系统的图像配准

褚金奎*, 林 威, 张 然, 陈永台

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:分振幅式偏振探测成像系统的各分光路图像之间存在位置误差, 率先完成各分光路图像之间的图像配准是进行偏振探测的前提条件。针对探测过程中, 目标特征不明显、图像特征难以提取、各分光路图像间灰度变化较大的问题, 提出适用于分振幅式偏振探测成像系统各分光路图像的相似性度量函数, 并在此基础上, 完成各分光路图像间的配准工作。首先, 根据图像间的位置误差会造成偏振信息图像中出现信息异常区域的原理, 研究了相似性度量函数的提取算法; 接着, 根据探测系统的各分光路的成像特点, 确定图像间的几何变换参数; 以遗传算法作为参数优化搜索算法, 搜索得到最优的几何变换参数, 完成整个图像配准算法的设计; 最后, 分别利用构造图像和实际采集图像, 对配准算法进行了验证, 并以图像间互信息值(MI)衡量图像配准的精度。实验结果表明: 配准后的构造图像的 MI 为 2.692 5, 高于特征配准方法的实现精度; 实际采集图像配准后的 MI 达 1.849 3, 同样高于特征配准方法的实现精度。基本满足偏振探测系统的图像配准需求。

关键词:偏振探测成像系统; 图像配准; 偏振信息; 相似性度量函数; 互信息

中图分类号: P161.3; TP751.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182605.1181

Image registration of polarimeters

CHU Jin-kui*, LIN Wei, ZHANG Ran, CHEN Yong-tai

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

* Corresponding author, E-mail: chujk@dlut.edu.cn

Abstract: There are position errors between the images from each split optical path of the amplitude-division imaging polarimeters, image registration between the images from each split optical path is a precondition for polarized detection. In order to solve the problem that the features of the target are not obvious and difficult to extract, and that the change of gray scale of the image is large, a function of similarity measurement was proposed and it was suitable for the image registration of the amplitude-division imaging polarimeter. Based on the function, the images from each split optical path had been registered. First, according to the principle that the position error between the images can cause the abnormal information areas in the polarized image, the algorithm of extracting the similarity metric function was discussed. Next, according to the characteristics of the imaging system, the parameters of the geometric transformation between images were determined. Then, the genetic algorithm as the parameter optimization search algorithm was used to get optimal parameters of the geometric transformation between images, and the image registration algorithm was finished. Finally, the

收稿日期: 2017-08-14; 修订日期: 2017-09-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51675076, No. 51505062); 国家自然科学基金创新研究群体项目(No. 51621064); 中央高校基本科研业务费(No. DUT17GF109, No. DUT16TD20)

algorithm was verified by using constructed images and collected images respectively, and the image mutual information value (MI) is determined as the metric of the accuracy of image registration. The experimental results show that the MI between reference image and registered sensed image is 2.692 5 for the constructed image, and it is 1.849 3 for collected images. It indicates that the accuracy of registration by using this method is higher than that by using method based on feature. It can satisfy the registration requirements of the system.

Key words: imaging polarimeters; image registration; polarized information; similarity metric function; mutual information

1 引 言

伴随着光学研究的深入,光的偏振特性成为光学研究的一项重要内容,同时,应用偏振特性的目标探测也成为了研究热点,多种类型的偏振探测装置被研发并应用于军事目标探测,大气探测等诸多领域。其中,分振幅式偏振探测系统,需要多光路同时采集同一个目标的图像,然后利用多幅图像计算其偏振信息,计算过程中,需要对多幅图像进行图像间的配准工作,才能实现对目标偏振特性的精确解算^[1-3]。目前,国内外都有搭建此类型偏振探测系统的探索。其中,Craig A. Farlow 等^[4]搭建的偏振探测系统的各分光光路图像之间的位置关系依靠高精度的光路安装来保证,不需要进行图像位置关系的后处理。但是探测系统的灵活性受限。在国内,徐梦溪等^[5]搭建的偏振探测系统,利用特征配准的方法对采集的图像进行后处理,以得到正确的偏振信息。胡小平等^[6-8]搭建的偏振探测系统,具有结构固定的特点,通过对相机内参和外参的标定,即可得到各分光光路图像间的绝对位置误差,从而实现图像间的配准工作。

本课题组搭建的一款多光路分振幅实时偏振成像系统具有结构灵活的特点,可以更换镜头以适应不同环境下的偏振探测需求,同时该系统的各分光光路末端的工业相机的安装位置可以进行微调以保证每一条分光光路成像的清晰度。针对该系统的以上结构特点,该系统的图像配准方式不适合选用对相机内外参进行标定的方式,而是选择直接对采集图像进行后处理的配准方式。近年,图像配准技术伴随着数字图像技术的进步而

迅速发展,目前图像配准技术已经应用到诸多领域,尤其在遥感图像、医学图像领域,应用广泛。常用的图像配准技术依然以特征配准为主。该方法依赖于图像特征的提取,特殊的应用场景,图像特征不明显,或者图像间灰度信息变化较大,都会影响配准的精度,甚至不能完成配准。另一种常用配准方法是基于灰度的图像配准方法,该方法同样对图像间灰度信息变化比较敏感,鲁棒性较差^[9]。

针对偏振探测系统的成像特点,本文提出一种配准方法,该方法依据偏振信息计算过程中,图像间存在位置误差,会造成偏振信息计算异常的原理,提出一种相似性度量函数,用于判断两幅图像的配准程度。从而根据该相似性度量函数,搜索得到两幅图像之间最优的配准位置,实现各分光光路图像之间的配准。

2 偏振探测系统的图像配准原理

2.1 偏振探测系统的成像特点

图 1 为分振幅式偏振探测系统的成像示意图。它主要包括镜头、非偏振分光棱镜、4 个分光光路、4 台工业相机。目标的入射光经过分光棱镜分光之后,分别在光路末端的工业相机上成像。由于 4 路分光路的安装存在误差,同一目标在成像面上的位置也会存在位置误差,即同一目标在图像中的位置不一致。如图 2 所示,分别由 4 路相机得到的由 3 张滤光片组成的图案的 4 幅图像,每幅图像尺寸为 $1\ 024 \times 1\ 280$ pixel。在目标的偏振信息解算过程中,4 幅图像中的对应像素点的目标不一致,则无法得到正确的偏振信息图像。

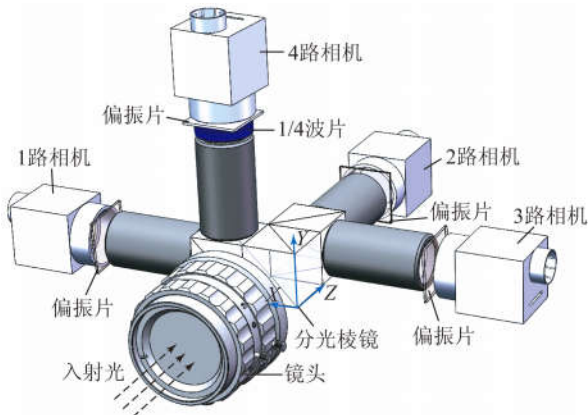


图 1 分振幅偏振探测成像系统的成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of amplitude-division polarimetric imaging system

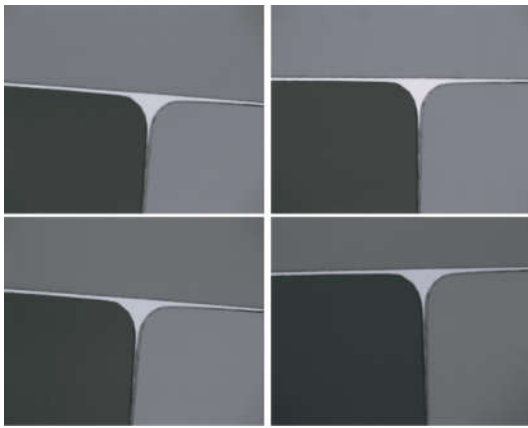


图 2 同一目标的 4 分光光路的图像

Fig. 2 Four images of the target from different optical paths

2.2 目标的偏振信息解算

首先, 选用斯托克斯 (Stokes) 矢量描述入射光的偏振状态。Stokes 矢量能够完整地表达光的偏振状态, 而且 4 个矢量元素都具有光强度的量纲, 便于测定^[10]。以下是 Stokes 矢量的定义:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{Q} \\ \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\mathbf{E}_x|^2 + |\mathbf{E}_y|^2 \\ |\mathbf{E}_x|^2 - |\mathbf{E}_y|^2 \\ 2\mathbf{E}_x\mathbf{E}_y\cos\delta \\ 2\mathbf{E}_x\mathbf{E}_y\sin\delta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: \mathbf{E}_x 和 \mathbf{E}_y 表示 X、Y 轴方向振动分量的光的电矢量; $\delta = \varphi_y - \varphi_x$, 表示 Y 轴方向与 X 轴方向的电矢量的相位差。

然后根据偏振探测系统的分光路光学结构, 计算各个分光路得到的光强值。其中, 偏振探测系统的 4 个分光光路包含不同的光学结构, 1 路

光路包含 0° 方向的偏振片, 2 路光路包含 45° 方向的偏振片, 3 路光路包含 90° 方向的偏振片, 4 路光路包含 135° 方向的偏振片和 $1/4$ 波片。入射光通过方位为 θ 的直线偏振器后, 其透射光 Stokes 矢量^[10]如下:

$$\mathbf{S}' = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2(2\theta) & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{Q} \\ \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix},$$

则前 3 个分光路的透射光强 \mathbf{I}_{path} 与入射光之间的关系如下:

$$\mathbf{I}_{\text{path}} = \frac{1}{2} (\mathbf{I} + \mathbf{Q} \cos 2\theta + \mathbf{U} \sin 2\theta). \quad (3)$$

前 3 个分光路中的偏振片的偏振方位角分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$, 分别代入式(3), 得到:

$$\mathbf{I}_1 = \frac{1}{2} (\mathbf{I} + \mathbf{Q} \cos(2 \times 0^\circ) + \mathbf{U} \sin(2 \times 0^\circ)), \quad (4)$$

$$\mathbf{I}_2 = \frac{1}{2} (\mathbf{I} + \mathbf{Q} \cos(2 \times 45^\circ) + \mathbf{U} \sin(2 \times 45^\circ)), \quad (5)$$

$$\mathbf{I}_3 = \frac{1}{2} (\mathbf{I} + \mathbf{Q} \cos(2 \times 90^\circ) + \mathbf{U} \sin(2 \times 90^\circ)). \quad (6)$$

第 4 路分光路中还包含 $1/4$ 波片。则入射光先通过 $1/4$ 波片, 再经过方位为 θ 的直线偏振器后, 结合透射光 Stokes 矢量计算公式, 可知其透射光强度如下^[10]:

$$\mathbf{I}_4 = \frac{1}{2} (\mathbf{I} + \mathbf{Q} \cos 2\theta + \mathbf{V} \sin 2\theta), \quad (7)$$

其中第 4 路分光路的偏振片的偏振方位角 θ 为 135° , 代入式(7), 可得第 4 路的透射光强度:

$$\mathbf{I}_4 = \frac{1}{2} (\mathbf{I} + \mathbf{Q} \cos(2 \times 135^\circ) + \mathbf{V} \sin(2 \times 135^\circ)). \quad (8)$$

实际探测过程中, 偏振探测系统通过 4 个分光路的图像, 得知透射光强度 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \mathbf{I}_3, \mathbf{I}_4$, 由透射光强度解算入射光的 Stokes 矢量 $\mathbf{S} = [\mathbf{I} \ \mathbf{Q} \ \mathbf{U} \ \mathbf{V}]^T$ 。入射光经过两次分光, 实际每束光线的光强是入射光光强的 $1/4$, 解算入射光的 Stokes 矢量时, 应该考虑到该因素。联合式(4), (5), (6), (8), 可得入射光的 Stokes 矢量与各分光路光强的关系如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{Q} \\ \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4(\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_3) \\ 4(\mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_3) \\ 8\mathbf{I}_2 - 4(\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_3) \\ 4(\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_3) - 8\mathbf{I}_4 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

得到入射光的 Stokes 矢量后,可以计算入射光的偏振度、偏振方位角、圆偏振度等信息。其中,偏振度的计算如下式所示:

$$DOP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}. \quad (10)$$

偏振方位角计算公式如下所示:

$$AOP = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q}. \quad (11)$$

圆偏振度的计算公式如下所示:

$$CDOP = \frac{\sqrt{V^2}}{I}, \quad (12)$$

由此可以得到目标的偏振信息图像。

2.3 图像几何变换方式

4 幅图像之间存在位置误差,需要通过对待配准图像进行一定的几何变换,完成图像位置的校正。图像的几何变换方式分为刚体变换、仿射变换、投影变换等等^[11],具体的几何变换方式要根据偏振探测系统的安装位置误差形式确定。四个分光路的成像面之间存在平移误差、旋转角度误差和图像缩放误差,其余的图像间畸变误差忽略不计,最终确定图像间的几何变换方式为仿射变换。完整的仿射变换包含 6 个变换参数,如式(13)所示:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \Delta x \\ a_{21} & a_{22} & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

仿射变换的齐次坐标表达式如式(14)所示:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \Delta x \\ a_{21} & a_{22} & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中: $I(x, y)$ 是原图像, $I'(x', y')$ 是变换后的图像。变换矩阵 \mathbf{M} 的前 4 个参数,又可以分解为图像旋转 θ , 图像剪切 J_x 和图像缩放 S_x, S_y 3 种图像变换的级联。

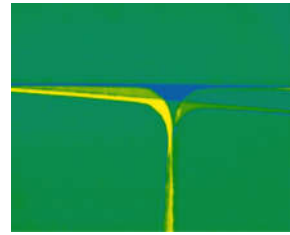
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & J_x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (15)$$

根据对相机安装位置误差的分析,将实际变换过程进行简化,以减少优化搜索过程的计算量。其中的 X 方向和 Y 方向的图像放缩参数 S_x, S_y 设置为一样,同时,忽略图像间的剪切, $J_x = 0$ 。确定实际使用的仿射变换的变换参数为 4 个,即 X 方向和 Y 方向的平移参数 $\Delta x, \Delta y$ 和图像间的旋转参数 θ , 以及图像的缩放参数 S 。

2.4 相似性度量函数

相似性度量函数可以评判图像的相似程度,常用的相似性度量有基于图像距离和基于相关系数的度量方法等^[12]。针对偏振探测系统的功能特点,通过对偏振信息图像进行分析,本文提出一种相似性度量函数。

首先,设定入射光为 30° 的线偏振光,通过在镜头前放置 30° 方向的偏振片实现该设定过程。针对图 2 的目标进行探测,观察偏振探测系统解算出的偏振信息图像,该过程中的偏振信息图像选择为偏振方位角图像(AOP 图像),则正常偏振信息区域的偏振方位角应为 30° , 其余异常偏振信息区域均由图像间的位置误差造成。其中,图 3(a) 是没有经过配准的 4 幅图像计算得到的 AOP 图像。图 3(b) 是经过粗配准之后的 4 幅图像计算得到的 AOP 图像。两幅图像都经过了伪彩色处理,不同的色彩代表不同的偏振方位角(彩图见期刊电子版)。



(a) 未经配准的 4 幅图像解算出的 AOP 图像

(a) AOP image calculated from four images without registration



(b) 粗配准后的 4 幅图像解算出的 AOP 图像

(b) AOP image calculated from four images with rough registration

图 3 系统解算出的 AOP 图像

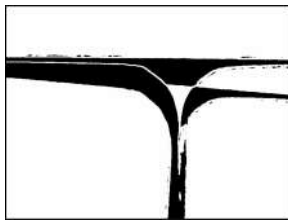
Fig. 3 AOP image calculated by the polarimeter

从偏振信息图像中,直观地看出由图像间位置误差造成的异常偏振信息的存在。统计图像中的正常偏振信息数量作为一种衡量图像间是否配准的相似性度量函数。获取正常偏振信息数量的算法主要包括图像分割、直方图统计等步骤。在图像分割过程中,以 30° 的偏振方位角作为 AOP 图像中的理论真值,并以此为图像分割的阈值范

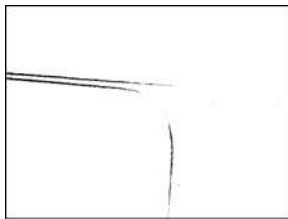
围中点,然后再确定阈值的上下限,就可以将偏振信息图像 P 的正常偏振信息区域与异常偏振信息区域分割开从而得到二值图像 bwP 。阈值分割的公式(16)给出了阈值分割过程与阈值下限 lT 和上限 uT 的关系:

$$bwP(x, y) = \begin{cases} 1, & lT < P(x, y) < uT \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

根据公式(9)可知,不同光路的图像对偏振信息图像的影响不同。而且,采集的图像存在一定的灰度值波动误差,该误差会造成偏振信息存在一定的波动。因此不同光路的图像与基准图像配准时,应该选择不同的阈值上下限对偏振信息图像进行阈值分割,主要是为了将偏振信息的波动包含在正常的偏振信息范围内,以提高阈值分割的准确度,同时也是为了提高相似性度量函数衡量两幅图像配准程度的准确度。图 4 所示,是对图 3 中的两幅偏振信息图像进行阈值分割后的二值图像。图像中的黑色区域为异常偏振信息区域,白色区域为正常的偏振信息区域。



(a)对图 3(a)阈值分割后的二值图像
(a) Binary image resulted from figure 3(a)



(b)对图 3(b)阈值分割后的二值图像
(b) Binary image resulted from figure 3(b)
图 4 偏振信息图像阈值分割后的二值图像

Fig. 4 Binary image obtained by using threshold segmentation for polarized image

以上过程中,选择的偏振信息图像是 AOP 图像。而以 1 路图像为基准图像,对 4 路图像进行配准的时候,根据公式(9)和(11)可知,偏振方位角数据计算并不涉及 4 路图像,因此无法利用 AOP 图像计算 1 路和 4 路图像之间的相似性度量函数。在配准 1 路图像和 4 路图像时,选择 CDOP 图像进行图像分割,此时,以圆偏振度为 0

作为 CDOP 图像中的理论真值,同样地,确定分割阈值的上下限,最终实现 CDOP 图像的阈值分割,确定 1 路图像与 4 路图像间的相似性度量函数。经过分析以上图像间的位置误差,认为图像间存在的位置误差包括 X 方向和 Y 方向的平移误差 $\Delta x, \Delta y$ 和图像间的旋转角度 θ ,以及图像的缩放系数误差 S 。对应地,定义图像的相似性度量函数为:

$$e = F(\Delta x, \Delta y, \theta, S) \quad (17)$$

计算相似性度量函数的函数值 e 的算法流程图,如图 5 所示。其中,函数值 e 的绝对大小与图像大小以及图像中的图形有关。具体数值由二值图像进行直方图统计得到,即通过公式(16)得到异常偏振信息区域与正常偏振信息区域分离的二值图像,再统计正常偏振信息区域的像素数量作为函数值 e 。因此相似性度量函数 $F(\Delta x, \Delta y, \theta, S)$ 反映的是正常偏振信息区域的大小。不同的图像,相同的位置误差参数也会有不同的函数值 e 。因此该函数没有具体的数学表达形式,其具体的算法实现如图 5 所示。

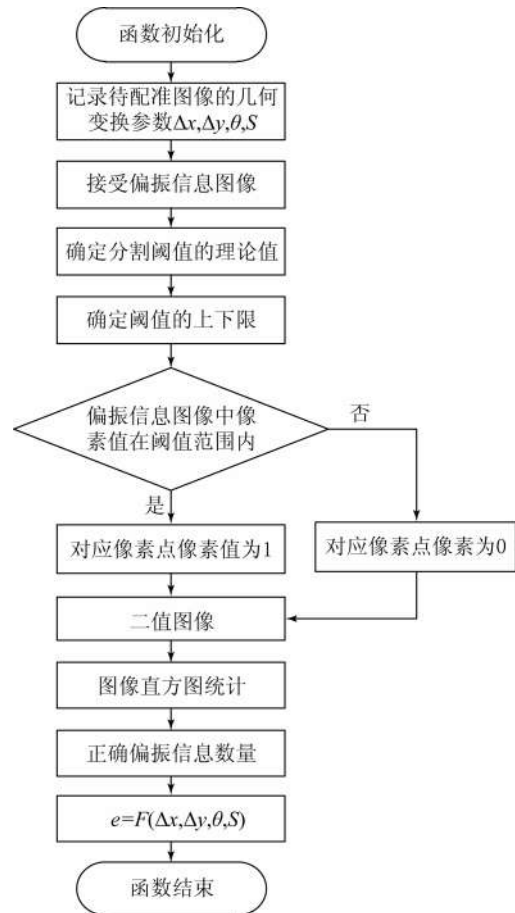


图 5 计算相似性度量函数的算法流程图
Fig. 5 Flow chart of calculating similarity metric function

2.5 图像配准流程

利用上述相似性度量函数判断基准图像与待配准图像之间的配准程度,并利用优化算法对待配准图像的几何变换的 4 个参数: X 方向和 Y 方向的平移量 Δx 、 Δy 和旋转角 θ ,以及图像的缩放系数 S 进行不断地更新,最终找到相似性度量函数的最大值 e_{max} ,并输出对应的最优图像间变换参数,完成整个图像配准过程,图 7 展示了整个图像配准过程的算法流程。首先,在偏振探测系统进行图像配准初始化的过程中,在镜头前设置偏振方位角为 30° 的线偏振片,然后对目标进行探测,采集得到 4 幅图像。目的之一是以 30° 的偏振方位角或者入射光的圆偏振度为 0 作为偏振信息图像中的理论真值,以此确定图像阈值分割的阈值上下限。另一个目的是可以根据入射光的属性,即 30° 的线偏振光,进而确定 4 个分光路图像的理论光强值比例。 30° 的线偏振光 Stokes 矢量:

$$[I \quad Q \quad U \quad V]^T = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

通过式(3)和式(7),忽略分光造成分光路光强减弱的因素,可得 4 个分光路与入射光强的理论光强比例:

$$I : I_1 : I_2 : I_3 : I_4 = 1 : \frac{3}{4} : \frac{2+\sqrt{3}}{4} : \frac{1}{4} : \frac{1}{2} \quad (19)$$

根据以上理论光强比例,可以简化搜索迭代过程。因为 4 个分光路图像,相互之间都存在位置误差,其中 3 幅待配准图像的每一幅图像都与基准图像之间有一组几何变换参数,如果将 3 幅待配准图像与基准图像同时代入至图像配准模块,则会同时引入 12 个几何变换参数,该过程将大大增加优化搜索过程的计算复杂度。图像配准模块采用一次配准一幅待配准图像,重复多次的方式完成 3 幅待配准图像与基准图像的配准工作。如图 6 所示,1 路图像与 2 路图像的配准过程示意图形象地解释了以 1 路图像作为基准图像,以 2 路图像作为待配准图像的图像配准模块的工作过程。

具体的配准步骤是每次只输入一幅待配准图像和一幅基准图像至图像配准模块,计算偏振信息图像时所需要的 4 幅分光路图像,还有两幅图像没有输入。该系统通过以上理论光强比例式

(19)和基准图像的光强值,构造其余两幅分光路图像。构造的分光路图像,由基准图像按照光强比例关系获得,因此与基准图像不存在位置误差,此时偏振信息图像中的异常偏振信息均由待配准图像与基准图像之间的位置误差造成,那么相似性度量函数也唯一地衡量待配准图像与基准图像之间的配准程度。

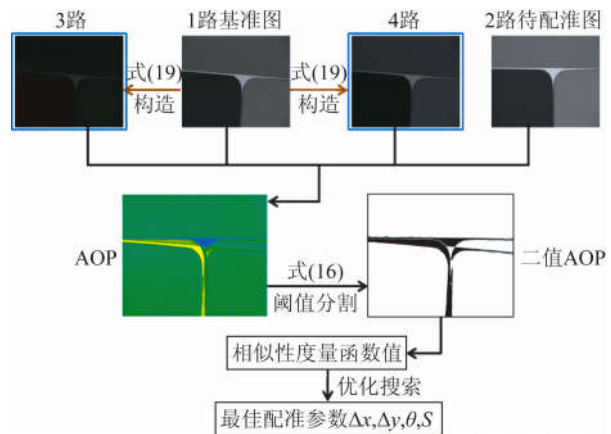


图 6 1 路图像与 2 路图像配准过程示意图

Fig. 6 Registration process of first image with second image

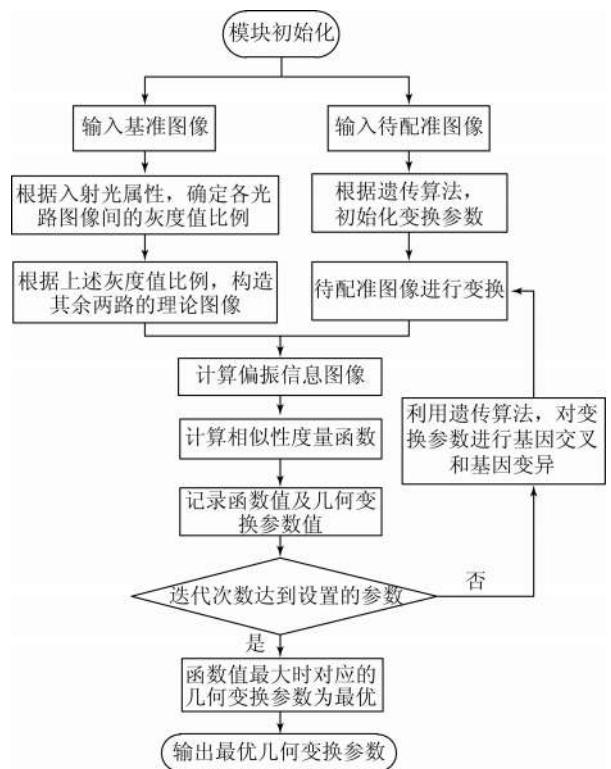


图 7 图像配准算法流程图

Fig. 7 Flow chart of image registration

配准模块运行结束一次,完成一幅待配准图像与基准图像的配准,同样的过程,重复 3 次,完成 3 幅待配准图像与基准图像之间的配准,结束整个偏振探测系统的图像配准初始化过程。依据上述相似性度量函数的定义,整个配准过程就是利用优化算法,迭代求解相似性度量函数最大值的过程^[13]。常用的优化搜索算法有很多, Powell 算法、粒子群算法、遗传算法、蚁群算法等^[14-16]。本文采用的优化搜索方法为遗传算法,能够适应 4 个变量的优化搜索过程,并且具有良好的收敛性。通过基因交叉、基因变异等手段对搜索变量进行不断更新,并利用相似性度量函数衡量图像配准效果,满足迭代优化算法终止条件后,输出最优的几何变换参数。

3 算法测试实验与结果

3.1 配准精度衡量

图像配准的精度衡量,目前还没有统一的标准,常用的度量方法有均方根误差(RMSE)、互信息(MI)等^[17]。RMSE 适用于基于图像特征的配准算法的精度衡量,本文的配准算法并不涉及图像特征,故选择互信息作为配准精度的衡量标准。互信息可以描述两个随机变量的相关性,依据信息熵的概念,两幅图像间的互信息可以表示为:

$$I(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B) \quad I(A, B) = \sum_{a,b} p_{AB}(a, b) \log_2 \frac{p_{AB}(a, b)}{p_A(a) \times p_B(b)}, \quad (20)$$

其中: $H(A)$ 表示图像 A 的熵, $H(B)$ 表示图像 B 的熵, $H(A, B)$ 表示图像 A 和 B 的联合熵, $p_A(a)$ 表示图像 A 的概率分布, $p_B(b)$ 表示图像 A 的概率分布, $p_{AB}(a, b)$ 表示图像 A 和图像 B 的联合概率分布。

3.2 理想图像的测试实验

由于偏振探测系统输出的目标的偏振信息依赖于 4 幅图像的灰度信息,该特点决定了偏振信息图像计算过程对原始图像的噪声很敏感。在测试算法的可行性阶段,通过构造无噪点的理想图像验证算法。首先,构造一幅图像假设为入射光图像,且入射光的偏振属性为 30° 的线偏振光,则其经过各光路之后,形成的图像灰度可以通过式(19)的光强比例关系得到。且 4 幅分光路图像之间存在一定的位

移、旋转完成位置误差的设置。如图 8 所示,为入射光图像及 4 个分光路图像。其中,以 1 路光路图像作为基准图像,其位置不做变动。

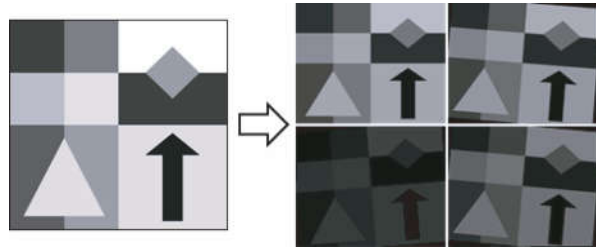


图 8 入射光图像及 4 个分光路图像

Fig. 8 Image of incident light and four images from four optical paths respectively

利用构造的 4 幅图像,输入至图像配准模块,可以得到 3 幅待配准图像与基准图像之间的几何变换参数。其中,在优化搜索过程中,几何变换参数的搜索步长的精度要求如表 1 所示。然后由计算出的几何变换参数,对待配准图像进行几何变换,再计算变换后的待配准图像与基准图像的互信息值(MI)。并将配准精度与常用的 SIFT 特征配准方法的配准精度进行比较,比较结果如表 2 所示。

表 1 几何变换参数的搜索步长的精度要求

Tab. 1 Requirement of accuracy of step length of geometric transformation parameters

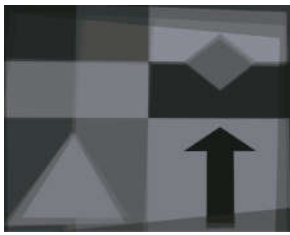
几何变换参数	平移 $\Delta x/\text{pixel}$	平移 $\Delta y/\text{pixel}$	旋转/ $^\circ$	放缩 S
精度要求	0.1	0.1	0.01	0.01

表 2 构造图像的配准结果

Tab. 2 Registration results of constructed images

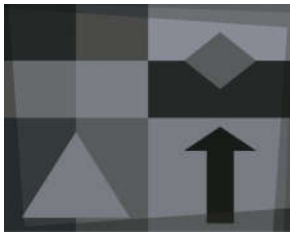
待配准图像	2 路图像	3 路图像	4 路图像
SIFT 方法配准(MI)	2.464 8	2.107 1	2.295 3
本方法配准(MI)	2.666 4	2.572 2	2.692 5

为了更直观地观察配准的效果。图 9 列出了 4 幅配准后的图像的叠加融合图,每幅图像的权重为 0.25,通过融合图像,可以看出特征配准方法配准后的图像之间仍存在明显的位置误差,而本文算法能够实现的配准效果较好。



(a)特征配准方法配准后的图像融合效果图

(a)Fusion image resulted from method based on feature



(b)本文算法配准后的图像的融合效果图

(b)Fusion image resulted from proposed method

图 9 两种方法配准后的图像的融合效果

Fig. 9 Fusion images obtained by using two methods

以上实验结果表明,在被探测目标的特征不明显,图像间灰度变化较大的极端情况下,本算法能够实现比特征配准算法更高的配准精度。以互信息评价配准效果,两幅尺寸为 $1\ 024 \times 1\ 280$ 的图像,其互信息值可达 2.692 5。

3.3 实际目标图像的测试实验

配准算法的可行性实验证明了算法原理的合理性,然后利用实际采集得到的目标图像验证算法的实际工程应用效果。实际采集得到的目标图像具有一定的图像噪点。利用偏振探测系统对图 2 所示的目标进行探测,采集目标图像。最终配准效果如表 3 所示,配准结果仍然利用互信息进行衡量。

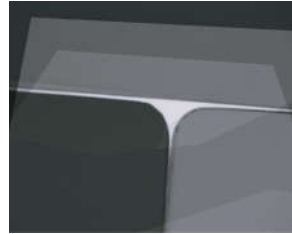
表 3 实际目标图像的配准结果

Tab. 3 Registration results of collected images

待配准图像	2 路图像	3 路图像	4 路图像
SIFT 方法配准(MI)	1.789 5	1.103 8	1.627 3
本方法配准(MI)	1.849 3	1.495 9	1.737 3

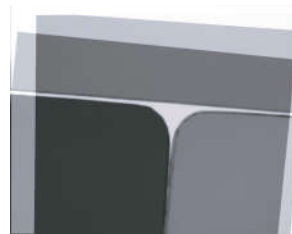
同样地,利用图像的叠加融合图,直观地对比两种方法的配准效果。图 10 列出了两种方法配准后的图像的融合图。同样可以看出本文算法能够实现的配准效果较好。为了更加直观地说明目标图像无法使用特征配准的方法实现准确配准,

图 11 给出了基准图像与 2 路图像之间的特征点对匹配的仿真结果。从中可以看出,图像中的特征点对过少,因此会导致图像误配准或者配准精度较低的结果。



(a)特征配准方法配准后的图像融合效果图

(a)Fusion image resulted from method based on feature



(b)本文算法配准后的图像的融合效果图

(b)Fusion image resulted from proposed method

图 10 两种方法配准后的图像的融合效果

Fig. 10 Fusion images obtained by using two methods

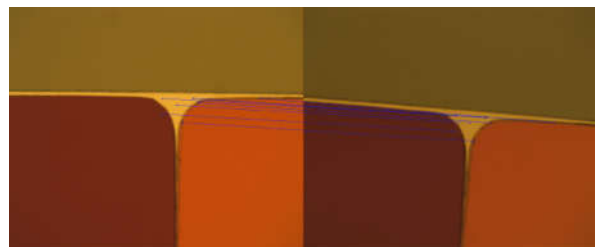


图 11 两幅图像的特征点对匹配关系仿真图

Fig. 11 Matching of feature point pairs from two images

实验结果表明,针对探测目标特征不明显、特征提取困难的情况,本文提出的配准算法可以完成图像配准工作,但是受到实际采集图像中的噪点影响,配准后的待配准图像与基准图像之间的 MI 并不高,为 1.849 3,同样高于特征配准方法实现的配准精度。表明了算法在实际工程应用中具有良好的实用性。

利用本文算法完成目标图像的配准后,对目标的偏振信息进行了计算,图 12 列出了目标场景的偏振度图像和偏振方位角图像,两幅图像都经过了伪彩色处理。可以看出,计算的目标的偏振信息与入射光的偏振状态是一致的,也表明了本文提出的配准算法的实用性。



(a)配准后的 4 幅图像解算出的 AOP 图像

(a)AOP image calculated from the four images with registration



(b)配准后的 4 幅图像解算出的 DOP 图像

(b)DOP image calculated from the four images with registration

图 12 系统解算出的 AOP 和 DOP 图像

Fig. 12 AOP and DOP images calculated by the polarimeter

参考文献:

- [1] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, *et al.*. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [2] FUJITAK, NISHIDA M, ITOH Y, *et al.*. Development of simultaneous imaging polarimeter [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6269: 62693D.
- [3] 李双, 袁楨炜, 杨长久. 同时偏振成像探测技术初探 [J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(3): 198-202.
- [4] FARLOWC A, CHENAULT D B, PEZZANITI J L, *et al.*. Imaging polarimeter development and applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4481: 118-125.
- [5] 徐梦溪, 王慧斌, 陈婷, 等. 三通道同步偏振成像及观测目标检测方法 [J]. *仪器仪表学报*. 2013, 34(11): 2408-2417.
- [6] XU M X, WANG H B, CHEN T, *et al.*. Research on three-channel synchronous polarization imaging and target detection method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(11): 2408-2417. (in Chinese)
- [7] WANG Y J, HU X P, LIAN J X, *et al.*. Geometric calibration algorithm of polarization camera using planar patterns [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2017, 22(1): 55-59.
- [8] FANC, HU X P, LIAN J X, *et al.*. Design and calibration of a novel camera-based bio-inspired polarization Navigation sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(10): 3640-3648.
- [9] 王玉杰, 胡小平, 练军想, 等. 仿生偏振视觉定位定向机理与实验 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2109-2116.
- [10] WANG Y J, HU X P, LIAN J X, *et al.*. Mechanisms of bionic positioning and orientation based on polarization vision and corresponding experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2109-2116. (in Chinese)
- [11] 余先川, 吕中华, 胡丹. 遥感图像配准技术综述 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2960-2972.
- [12] YU X CH, LÜ ZH H, HU D. Review of remote sensing image registration techniques [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2960-2972. (in Chinese)
- [13] 新谷隆一, 范爱英, 康昌鹤. 偏振光 [M]. 北京: 原子能出版社, 1994.
- [14] SHINTANIR, FAN A Y, KANG CH H. *Polarized Light* [M]. Beijing: Atomic Energy Publishing Press, 1994. (in Chinese)
- [15] 章毓晋. 图像处理基础教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [16] ZHANG Y J. *Fundamental Course of Image Processing* [M]. Beijing: Publishing House of Elec-

- tronics Industry, 2012. (in Chinese)
- [12] 段汕, 王小凡, 张洪. 图像相似性度量方法的研究 [J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 121-125.
- DUAN SH, WANG X F, ZHANG H. Research on method of similarity measure for images [J]. *Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2016, 35(4): 121-125. (in Chinese)
- [13] 陈显毅. 图像配准技术及其 MATLAB 编程实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- CHEN X Y. *Image Registration Technology and Implementation by MATLAB* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [14] DALYA, YAZID H, AMARA N E B, *et al.*. Multimodal image registration using multiresolution genetic optimization [C]. *Proceedings of the 7th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT)*, IEEE, 2016: 557-562.
- [15] GUI P, SHAO D G, MA L, *et al.*. Normalized mutual information-based image registration using differential search algorithm [C]. *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, IEEE, 2016: 329-332.
- [16] 程振进, 王全保, 陈吉安, 等. 基于混合遗传算法的数字图像相关方法 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 710-717.
- CHENG ZH J, WANG Q B, CHEN J A, *et al.*. Digital image correlation method based on hybrid genetic algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 710-717. (in Chinese)
- [17] 龚志成, 裴继红, 谢维信. 多光谱遥感卫星图像的精确配准方法研究 [J]. 信号处理, 2013, 29(10): 1398-1406.
- GONG ZH CH, PEI J H, XIE W X. Research of accurate registration method for multispectral remote sensing images [J]. *Journal of Signal Processing*, 2013, 29(10): 1398-1406. (in Chinese)

作者简介:



褚金奎(1965—),男,河南平顶山人,博士,教授,博士生导师,1986年于杭州电子科技大学获得学士学位,1989年于西安科技大学获得硕士学位,1992年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事智能机器人、仿生传感器和微机电测试技术等方面的研究。E-mail: chujk@dlut.edu.cn



林威(1992—),男,河南商丘人,硕士研究生,2015年于河南理工大学获得学士学位,主要从事偏振探测系统的图像配准研究。E-mail: linwei2015@mail.dlut.edu.cn