

基于三维球面模型的全景视频实时拼接方法

宋聪聪¹, 高策^{1*}, 张艳超¹, 徐嘉兴¹, 刘海波²¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所精密仪器与装备研发中心, 吉林 长春 130033;²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所工程科研管理处, 吉林 长春 130033

摘要 针对主流配准方法被用于周扫型光电预警系统的全景图像拼接适用性有限的问题, 提出一种基于三维球面模型的全景视频实时拼接方法。首先, 基于周扫型光电预警系统的工作模式进行三维空间的全景重建并构建三维球面模型; 通过建模的方式对不同俯仰、方位角度下探测器采集图像的像素点空间位置进行定位。然后, 基于三维球面模型搜索不同俯仰角度下重叠视场在三维空间内的最佳配准线, 并推导出预警图像重叠区域的配准公式。最后, 通过逐行的加权融合算法和图像矫正方式实现全景图像无缝拼接。与主流的 5 种配准方法进行对比, 实验结果表明: 该方法切实可行, 具有较好的全景拼接效果, 有效弥补主流配准方法的不足, 即使对天空等特征不明显区域的全景拼接也具有较好的适用性与实时性, 全面保证了全景视频成像的连续性与稳定性, 对光电预警系统全景拼接任务具有重要的应用价值。

关键词 图像处理; 全景拼接; 三维球面模型; 图像配准; 光电预警系统

中图分类号 TP391 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221659

1 引言

近年来, 随着国际局部地区战火不断, 无人机作为新兴的武器载体, 改变了传统作战方式。无人机凭借着自身材质特殊, 体型小、飞行高度低、自身雷达反射面积小等特点, 使得常规的防空雷达较难侦测。因此, 探索更有效地防御手段迫在眉睫。

光电预警系统搭载不同波段红外探测器, 凭借对目标温度的高探测灵敏度, 以连续周视扫描方式, 实现对空中可疑目标的实时监视与预警。与传统雷达系统相比, 具有探测能力高、隐蔽性好、抗干扰能力强、成本低等特点, 有效弥补防空雷达对低空盲区、隐身小目标探测能力有限的问题^[1-3]。光电预警系统以方位匀速扫描的工作模式实现红外清晰图像的获取, 采用图像拼接技术对指定空域进行实时动态监视, 实现对可疑目标的识别及探测。图像拼接技术是实现全景视频成像的必要手段, 图像配准是决定全景成像效果至关重要的第一步^[4]。

目前, 图像拼接领域中较为主流的配准方法是基于模板匹配^[5-7]和基于特征匹配^[8-11]的方法。传统的模板匹配方法相似度度量包括: 平方差和、归一化积相关(NCC)、互信息等。曾安等^[10]针对传统互信息法配准易陷入极值的问题, 提出一种基于全卷积神经网络(FCN)结合互信息的配准方法。江苏蓬等^[11]提出以

共生矩阵作为相似性度量实现模板匹配, 但却无法应对尺度变换情况。除了传统方法, 近些年 Oron 等^[12]提出一种建立在最近邻匹配之上的相似性度量方法(BBS), 通过搜索最近邻点对数量最多的区域视为匹配结果。基于此, Talmi 等^[13]提出了可变形多相似性度量方法(DDIS), 降低了算法复杂度, 提高了对复杂变形、明显背景遮挡情况的鲁棒性。赖津翔等^[14]相继提出一种基于多数邻域相似性和环形投影变换的模板匹配方法, 解决了背景遮挡和任意旋转变换带来的问题, 但配准稳定性较差。

基于特征匹配的方法对尺度、旋转和灰度变化具有较好的易扩展性和适应性而备受学者关注, 应用也最为广泛。王中军等^[15]设计一种 SURF 特征融合局部互相关信息的图像配准方法; 利用 SURF 特征进行粗配准, 利用互相关信息提取单应矩阵实现精确配准。Divya 等^[16]针对 SIFT 算法用于合成孔径雷达图像配准时易受到散斑噪声影响的问题, 提出一种基于结构张量的 SIFT 算法; 利用张量扩散技术构造尺度层并提取特征, 以提高正确匹配对数量。丁国绅等^[17]为解决特征点冗余问题, 提出利用 FAST 算法构建八邻域准则, 利用双重位置迭代匹配方法提高匹配精度。高辰忠等^[18]为解决多源图像配准时的强度、旋转和尺度差异等问题, 提出了一种基于特征的局部主方向多尺度直方图(MS-HLMO)配准方法。

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-10-27; 录用日期: 2023-01-09; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(51675506)

通信作者: *50616636@qq.com

然而,当这些方法被用于周扫型光电预警系统的全景图像拼接时却存在诸多问题。基于模板匹配方法主要根据重叠区域图像灰度相关性进行配准,全景视频实时拼接易出现误匹配问题,帧间配准的不唯一性易引发全景视频的不稳定性与不连续性。基于特征匹配的方法配准精度较高,但却高度依赖于图像特征点的提取。而预警区域多为天空、戈壁等单一背景,重叠区域较小且图像特征不明显,易导致配准失败。此外,该类算法计算复杂度较高,往往难以满足实时性要求。鉴于上述不足,本文提出一种新型的基于三维球面模型的全景视频实时拼接方法。该方法基于预警系统的工作模式对全景图像进行三维空间重建,基于三维球面模型实现不同俯仰下相邻帧的最佳配准,并推导出预警图像的配准公式。最后,通过图像融合算法和图像矫直方式实现全景图像无缝拼接。该方法主要贡献如下:有效避免了基于特征匹配方法过度依赖图像特征进行配准的弊端,对天空、海面等特征不明显区域的全景成像具有较好的适用性;规避了模板匹配方法存在误匹配的风险,保证了全景视频成像的连续性与稳定性;以纯计算方式解决了预警图像配准问题,保持较好的配准精度和拼接质量的同时具有更强的稳定性,对光电预警系统全景拼接任务具有重要的应用价值。

2 三维球面模型的全景重建

2.1 预警系统的工作模式

光电预警系统以双转轴平台为主体架构,融合红外热成像探测感知技术,实现全方位全景成像,具体结构示意图如图 1 所示。其中,红外成像系统包括光学系统和图像探测器,光学系统光轴与探测器靶面垂直,并交于靶面中心。双转轴平台包括方位轴系和俯仰轴

系,红外成像系统绕方位轴旋转可实现全方位不间断成像,绕俯仰轴旋转可实现指定空域成像,形成“方位周扫,俯仰可调节”的工作模式。

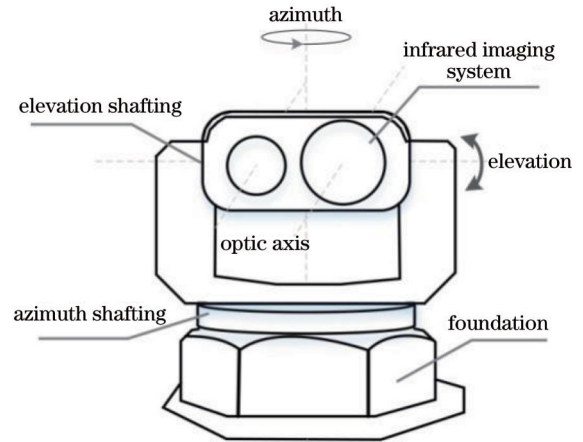


图 1 光电预警系统具体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the specific structure of the photoelectric early warning system

2.2 三维球面模型

根据预警系统“方位周扫,俯仰可调节”的工作模式对探测器采集图像进行三维空间的全景重建,其三维立体图及俯视图如图 2 所示。其中, I_i, I_{i+1} 为同一俯仰角下采集的相邻帧, F_A 为水平视场角, ω 为重叠视场角。系统通过调整不同俯仰角度绕方位轴旋转,成像光轴与方位轴的非正交性使得采集图像中心可构成近似球面。因此,不同俯仰、方位角度下探测器采集图像到全景图的定位采用球面三维旋转模型,任意图像像素在三维空间位置可以用方位角、俯仰角、图像分辨率及焦距等参数进行建模确定。

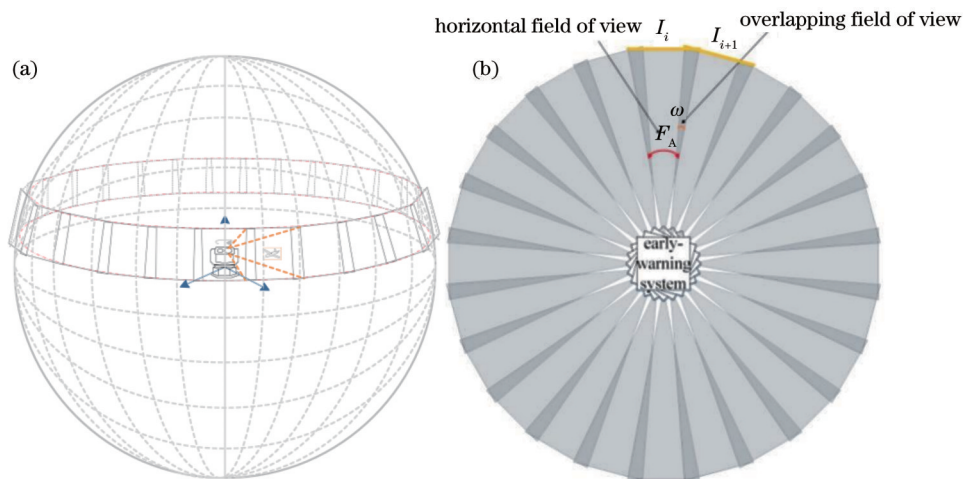


图 2 三维空间的全景重建。(a)立体图;(b)俯视图

Fig. 2 Panoramic reconstruction of three-dimensional space. (a) Stereogram; (b) top view

建模过程涉及坐标系转换、像素焦距及成像光轴方向等。以预警系统的成像系统为球心,以成像系统的焦距 f 为半径建立球面三维旋转模型。在相机坐标

系 $x_c y_c z_c$ 下,图像上任意像素 $P(x, y)$ 的坐标为 $(x - W/2, y - H/2, -f)$ 。在世界坐标系 XYZ 下,当预警系统的俯仰角为 α ,方位角为 β 时,则相机坐标系

x_c, y_c, z_c 绕世界坐标系中的 X 轴旋转 α , 绕世界坐标系中的 Y 轴旋转 β , 如图 3 所示。则预警图像像素 $P(x, y)$ 在世界坐标系下的坐标 (u, v, w) 可表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - \frac{W}{2} \\ y - \frac{H}{2} \\ -f \end{bmatrix}. \quad (1)$$

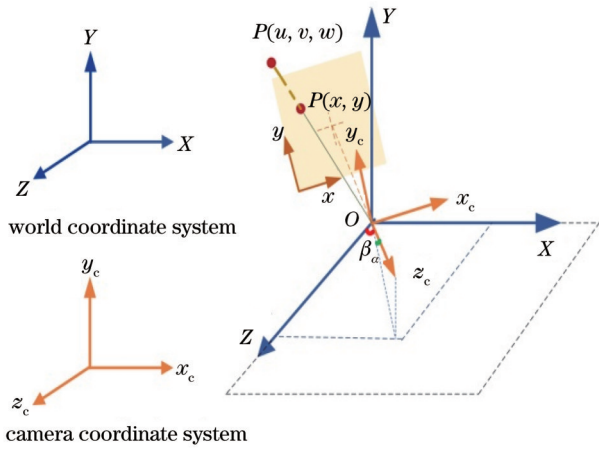


图 3 相机坐标系旋转示意图

Fig. 3 Schematic diagram of camera coordinate system rotation

2.3 像素焦距

式(1)中 x, y 以像素为单位, 焦距 f 则为像素焦距。已知采集图像大小为 $W \times H$, 图像视场范围为 $F_A \times F_E$, 则像素焦距 f 为

$$f = \frac{W/2}{\tan(F_A/2)} \quad \text{or} \quad f = \frac{H/2}{\tan(F_E/2)}. \quad (2)$$

3 基于三维球面模型的全景拼接

3.1 搜寻最佳配准线

预警系统在周视扫描过程中以恒定频率实现图像采集, 为实现任意空域的全景成像, 相邻帧间必有重叠视场, 随着系统的俯仰角增大, 视场重叠区域也逐渐增大, 这是成像系统的旋转轴与光轴不垂直造成的。在合理范围内, 无论俯仰角多大, 相邻帧在三维空间内都具有相交唯一性。如图 4 所示, I_i 和 I_{i+1} 为同一俯仰下采集的相邻帧, 在三维空间内交于直线 MN 。 $P(x, y), P'(x', y')$ 为重叠视场的两个实物成像景点, 由于视角偏差, $P'(x', y')$ 在相邻帧的不同成像位置, 成像效果有差异。 $P(x, y)$ 在相邻帧的交线处, 成像效果相同。因此, 基于相邻帧的相交唯一性和交线处的成像一致性将二维平面的图像配准问题转化为三维空间平面相交问题是一条新思路。

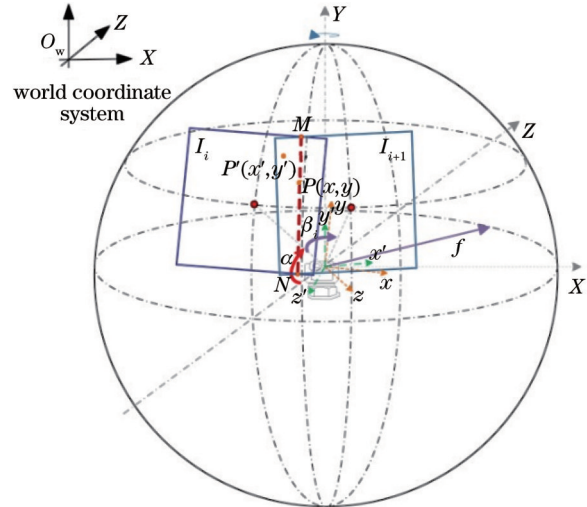


图 4 基于三维球面模型的最佳配准线

Fig. 4 Optimal registration line based on 3D spherical model

当预警系统的俯仰角为 α 时, 图像 I_i 的方位角为 β_i , 图像 I_{i+1} 的方位角为 β_{i+1} , 则在 I_i 和 I_{i+1} 图像中任意像素的坐标分别为

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & 0 & -\sin \beta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_i & 0 & \cos \beta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - \frac{W}{2} \\ y_i - \frac{H}{2} \\ -f \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u_{i+1} \\ v_{i+1} \\ w_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_{i+1} & 0 & -\sin \beta_{i+1} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_{i+1} & 0 & \cos \beta_{i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i+1} - \frac{W}{2} \\ y_{i+1} - \frac{H}{2} \\ -f \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中,假设系统周扫的画幅数为 N ,则相邻帧间光轴的转向角为 $\beta_r = 360^\circ/N$, β_i 和 β_{i+1} 满足 $\beta_{i+1} = \beta_i + \beta_r$ 。由于相邻帧具有空间唯一相交性,该交线的空间坐标满足 $u_{i+1} = u_i, v_{i+1} = v_i, w_{i+1} = w_i$,则相邻帧间的最佳配准线 MN 在图像 I_i 和 I_{i+1} 上的像素点位置 (x_i, y_i) 和 (x_{i+1}, y_{i+1}) 解为

$$y_i = y_{i+1}, \quad (5)$$

$$x_i = \frac{(\cos \beta_r - 1)[(y_i - H/2) \sin \alpha - f \cos \alpha]}{\sin \beta_r} + \frac{W}{2}, \quad (6)$$

$$x_{i+1} = \frac{(1 - \cos \beta_r)[(y_{i+1} - H/2) \sin \alpha - f \cos \alpha]}{\sin \beta_r} + \frac{W}{2}, \quad (7)$$

其中,当 $y_i = 0, 1, \dots, H - 1$ 时, x_i 和 x_{i+1} 具有对应的唯一解。此时,便可在相邻帧中搜寻 MN 配准线的像素位置。由于成像系统的转向角一定,同一俯仰角下仅需求解一次配准线的像素位置,这极大地降低了全画幅拼接的计算复杂度。

3.2 预警图像配准公式

用上述三维空间建模方法可确定不同俯仰下的最佳配准线,但图像拼接依旧是基于二维坐标系进行的。

由于周扫过程中旋转轴与光轴的非正交性,导致相邻帧坐落于二维坐标系时存在图像旋转现象,并且仰角越高,重叠区域越大,相邻帧的位置关系示意图如图 5 所示。图像 I_{i+1} 经旋转 θ 角后进行平移,使得相邻帧 I_i 和 I_{i+1} 图像的第一行和最后一行重合于 M_2, N_2 两点,以 M_2N_2 为对称轴的重叠区域 $B_2M_2C_1FN_2E$ 为对称六边形。则光电预警系统相邻预警图像重叠区域的配准公式为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & T_x \\ \sin \theta & \cos \theta & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} T_x = W - f_{A_2N_2}(1 + \cos \theta) \\ T_y = f_{A_2N_2} \cos \theta \\ \theta = 2 \arctan \left(\frac{f_{B_2M_2} - f_{A_2N_2}}{H} \right) \end{cases}, \quad (9)$$

式中: (x_{i+1}, y_{i+1}) 为图像 I_{i+1} 的像素坐标; (x_i, y_i) 为图像 I_i 的像素坐标; (T_x, T_y) 为平移量; $f_{A_2N_2}, f_{B_2M_2}$ 可根据式 (5)~式 (7) 获得的最佳配准线确定,即当 $y_i = y_{i+1} = 0$ 时, $x_i = f_{A_1N_2}, x_{i+1} = f_{A_2N_2}$; 当 $y_i = y_{i+1} = H - 1$ 时, $x_i = f_{B_1M_2}, x_{i+1} = f_{B_2M_2}$ 。

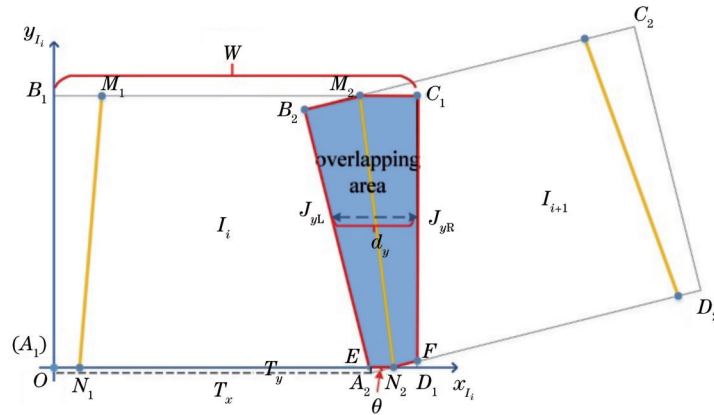


图 5 相邻帧位置关系示意图

Fig. 5 Diagram of position relationship between adjacent frames

3.3 图像融合和图像矫正

为消除明显的拼接缝隙,利用图像融合算法对相邻帧的重叠区域进行逐行融合拼接。根据上述配准公

式可计算重叠区域边界坐标以及配准像素对。

$I_i(x, y)$ 为融合后的图像,可表示为

$$I_i(x, y) = \lambda I_i(x_i, y_i) + (1 - \lambda) I_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}), \quad (10)$$

$$\lambda = \begin{cases} 1, & (x, y) \in I_i(x_i, y_i) \\ \frac{[d_y - (x - J_{yL})]}{d_y}, & (x, y) \in I_i(x_i, y_i) \cap I_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}), \\ 0, & (x, y) \in I_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: λ 为权值渐变因子; J_{yL} 为第 y 行重叠区域左边界坐标; J_{yR} 为第 y 行重叠区域右边界坐标; d_y 为第 y 行重

叠像素数,即 $d_y = J_{yR} - J_{yL}$ 。

通过逐帧融合拼接可获得扇环形 360° 全景图像,

如图 6(a) 所示。为使全景图像具有较高的可视性,综合考虑人类视觉感受及全景呈现方式,基于最佳配准线对拼接后图像进行矫直处理。设最佳配准线 M_1N_1 、 M_2N_2 的像素坐标分别为 $(M_{1,x}, M_{1,y})$ 、 $(N_{1,x}, N_{1,y})$ 、 $(M_{2,x}, M_{2,y})$ 、 $(N_{2,x}, N_{2,y})$, 设矫直后的坐标分别为 $(K, 0)$ 、 $(K, H-1)$ 、 $(W+K-1, 0)$ 、 $(W+K-1, H-1)$, 其中, K 为常数。根据矫直前后的坐标对, 利用透射变换方法实现全景图像矫直, 矫直后的图像示意图如图 6(b) 所示。

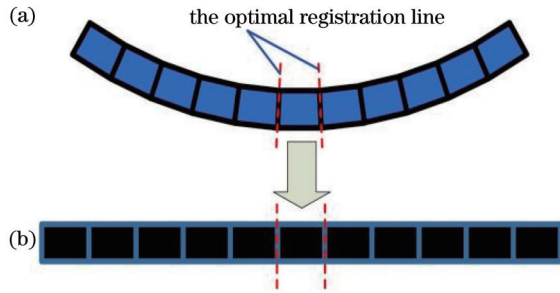


图 6 全景图像矫直。(a) 矫直前; (b) 矫直后

Fig. 6 Panoramic image straightening. (a) Before straightening; (b) after straightening

4 实验结果及分析

采用分辨率为 640×512 、像元尺寸为 $25 \mu\text{m}$ 、视场大小为 $4.42^\circ \times 3.54^\circ$ 的制冷型红外探测器输出的原始图像序列进行实验, 周扫画幅数为 83, 俯仰角范围为 $-5^\circ \sim 40^\circ$ 。为了验证所提方法的可行性和优越性, 对不同俯仰角度 ($0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, \dots, 30^\circ$)、不同场景采集到的图像序列进行了大量实验, 并分析比较所提方法与主流方法的配准效果与实时性。主流方法中包括: NCC 方法, DDIS 方法^[13], 基于位置、尺度和方向的特征点匹配算法 (PSO-SIFT)^[19], 基于特征的轮廓角主方向配准方法 (CAO-C2F)^[20], 基于特征的局部主方向多尺度直方图配准方法 (MS-HLMO)^[18]。用于比较的算法都使用原始作者提供的代码, 实验仿真平台均为 Matlab2019a。实验仿真平台为 Intel Core i7-10510U CPU, 运行内存为 8 GB, 在 64 位 Windows10 系统上实现, 编程环境为 VS2010。限于篇幅问题, 对俯仰角度为 $0^\circ, 5^\circ, 20^\circ$ 条件下的 4 种不同场景图像进行详细对比分析。

基于三维球面模型的全景视频实时拼接方法实验步骤如下。

步骤 1, 根据已知的图像分辨率、像元尺寸及视场大小计算像素焦距, 即式 (2) 所示。

步骤 2, 根据周扫画幅数计算转向角 β_r 并获取俯仰角分别为 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, \dots, 30^\circ$ 的图像序列。

步骤 3, 根据式 (5)~式 (7) 计算最佳配准线像素位置, 即获得 $f_{A_2N_2}$ 和 $f_{B_2M_2}$ 。

步骤 4, 根据式 (8)、式 (9) 推导出的配准矩阵以及式 (10)、式 (11) 对重叠区域进行逐行的加权融合。

步骤 5, 基于最佳配准线对拼接后的全景图像进行矫直处理。

首先, 对俯仰角度为 0° 的复杂背景图像进行配准。由式 (5)~式 (7) 可知, $f_{A_2N_2} = 6$ 、 $f_{B_2M_2} = 6$ 。基于此, 对复杂背景图像进行拼接。所提方法和对比方法的拼接效果如图 7 所示。由于待配准图像重叠区域较小, 基于特征匹配方法 (PSO-SIFT、CAO-C2F、MS-HLMO) 的检测区域为全图像时, 易造成特征点冗余问题。因此, 将特征点检测区域缩小为感兴趣区域 (图 7(g) 框内区域)。为准确评估配准精度, 将具有代表性的景物的配准结果进行放大显示, 通过对比 NCC、DDIS、PSO-SIFT 以及所提方法中放大景物可以看出, PSO-SIFT、NCC 和所提方法对重叠区域的路灯臂、墙体、树干等景物都实现精准配准, 有效完成了复杂场景下的拼接任务, DDIS 方法在墙体、树干拼接处存在明显的错位现象。而 CAO-C2F 和 MS-HLMO 方法在感兴趣区域内仍无正确匹配对, 导致拼接失败。

针对单一背景图像拼接, 对俯仰角度为 5° 的墙体场景图像进行配准。此时, $f_{A_2N_2} = 6$ 、 $f_{B_2M_2} = 8$ 。所提方法和对比方法的拼接效果如图 8 所示。由图 8(d)、图 8(i) 的 1 号放大区域可知, DDIS 方法和所提方法均可实现较好的配准拼接。与 DDIS 方法和所提方法相比, NCC 方法拼接后的图像丢失了部分原图像信息, 即图 8(i) 中 2 号区域。当图像特征及场景较为单一时, NCC 方法易出现误匹配的情况。由于单一背景图像在感兴趣区域无明显特征, 不利于特征提取。因此, 基于特征匹配方法 (PSO-SIFT、CAO-C2F、MS-HLMO) 的检测区域为全图像。PSO-SIFT 方法错误的匹配对导致拼接效果不佳, 如图 8(f) 所示。由于场景的特殊性, 导致 CAO-C2F 方法的匹配对看似准确, 实际上配准失败, 因为匹配对并未在重叠区域内。同样, MS-HLMO 方法也无正确的匹配对, 拼接失败。综上所述, 基于特征点配准方法并不适用于单一场景例如天空、墙体等特征不明显区域的配准拼接。

同一俯仰角度下, 对吊塔场景图像进行配准。此时, $f_{A_2N_2} = 6$ 、 $f_{B_2M_2} = 8$ 。所提方法和对比方法的拼接效果如图 9 所示。由图 9(c) 可知, DDIS 方法搜索的匹配区域明显错误, 导致拼接处存在明显的错位现象, 如图 9(d) 所示。NCC 方法和所提方法均在吊塔拼接处表现出更高的配准精度, 实现了无缝拼接。而 PSO-SIFT 方法在 1 号区域产生明显的重影, 在 2 号区域拼接效果良好, 如图 9(f) 所示。从匹配对结果来看, CAO-C2F、MS-HLMO 方法匹配精度较低, 无法进行下一步拼接。

最后, 对俯仰角度为 20° 的楼体场景图像进行配准。此时, $f_{A_2N_2} = 22$ 、 $f_{B_2M_2} = 28$ 。所提方法和对比方法

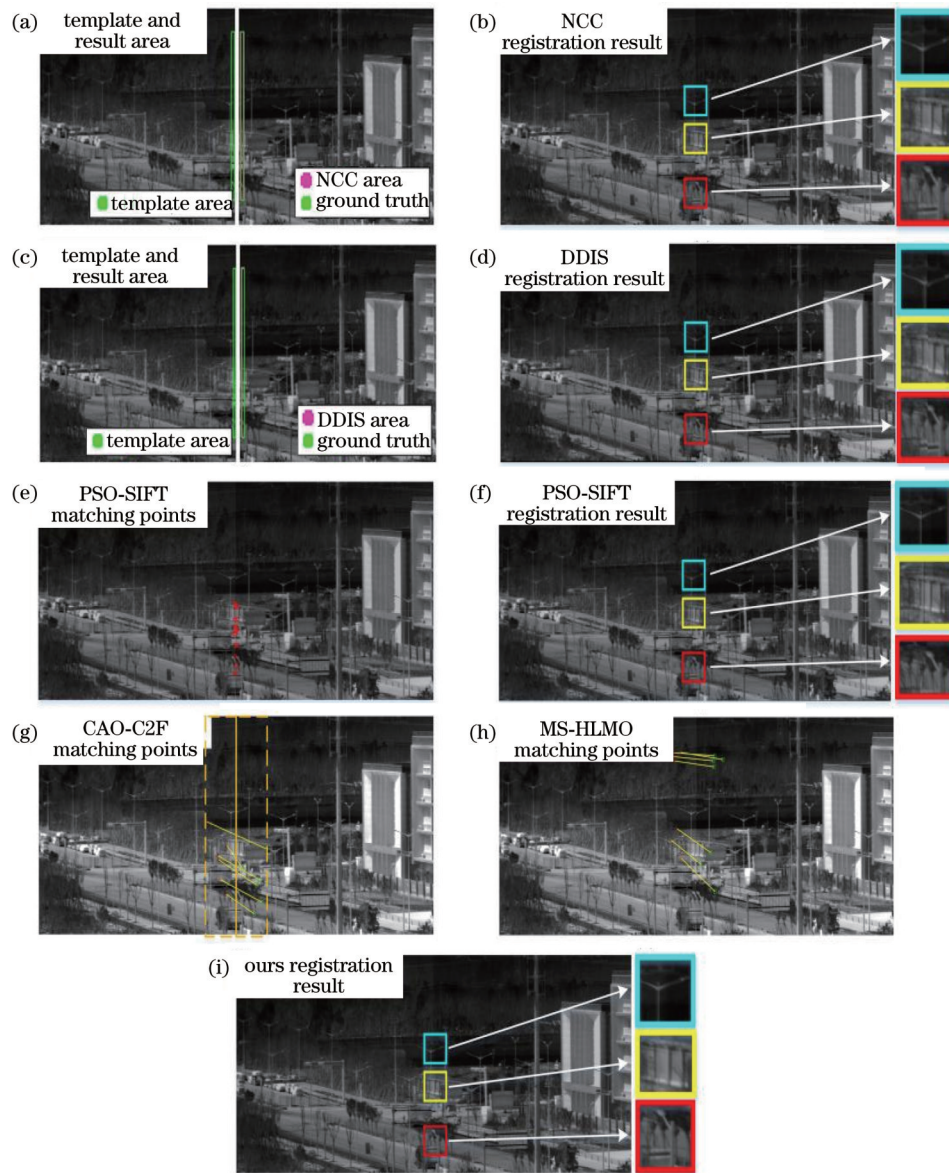


图 7 当俯仰角度为 0° 时的复杂背景图像拼接效果。(a) NCC 模板和匹配区域；(b) NCC 拼接结果；(c) DDIS 模板和匹配区域；(d) DDIS 拼接结果；(e) PSO-SIFT 匹配对；(f) PSO-SIFT 拼接结果；(g) CAO-C2F 匹配对；(h) MS-HLMO 匹配对；(i) 所提方法拼接结果

Fig. 7 Stitching effect of complex background images when the pitch angle is 0° . (a) Template and matching area of NCC; (b) stitching result of NCC; (c) template and matching area of DDIS; (d) stitching result of DDIS; (e) PSO-SIFT matching points; (f) stitching result of PSO-SIFT; (g) CAO-C2F matching points; (h) MS-HLMO matching points; (i) stitching result of the proposed method

的拼接效果如图 10 所示。通过对比分析可知, NCC 和 DDIS 方法在 2 号区域具有较好的拼接效果, 但在 1 号区域具有拼接缝隙, 放大图中显示出轻微的断层现象。这是成像系统旋转轴和光轴的不正交性, 使得基于模板匹配的配准方法未将图像旋转特性考虑在内, 导致无法同时兼顾上下重叠区域的精准配准。PSO-SIFT 和所提方法在 1 号和 2 号区域的拼接处均表现出精准的对齐效果。CAO-C2F、MS-HLMO 方法的匹配对无效, 导致拼接失败。

针对全景视频成像系统, 算法的实时性是极其重要的。为准确评估各算法的计算复杂度, 所有方法均

在相同的实验条件下运行 50 次, 各方法完成相邻图像拼接的平均耗时如表 1 所示。由表 1 可知, MS-HLMO、PSO-SIFT 运行时间较长, 具有较高的计算复杂度; CAO-C2F、DDIS 方法运行时间一般; NCC 和所提方法的运行时间较短, 可满足全景视频拼接的实时性需求。

综上所述, 针对光电预警系统的全景视频实时拼接任务, 基于模板匹配的方法在系统俯仰角较大时配准精度有限; 在图像背景较为单一时存在误匹配的风险, 易导致图像信息的丢失。基于特征点匹配的方法计算复杂度较高, 且高度依赖于匹配对的提取; 而预警

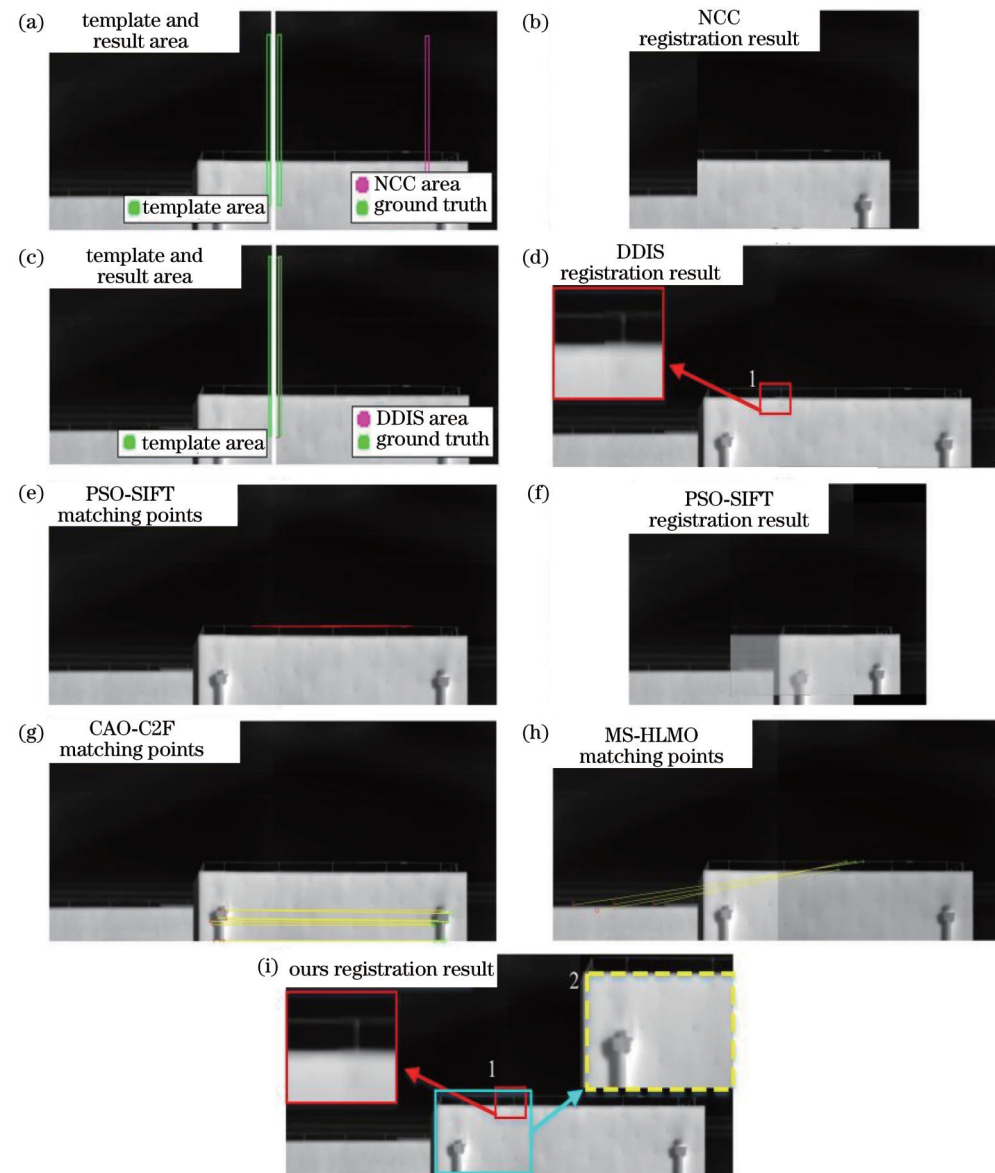


图 8 当俯仰角度为 5° 时墙体场景图像的拼接效果。(a) NCC 模板和匹配区域;(b) NCC 拼接结果;(c) DDIS 模板和匹配区域;(d) DDIS 拼接结果;(e) PSO-SIFT 匹配对;(f) PSO-SIFT 拼接结果;(g) CAO-C2F 匹配对;(h) MS-HLMO 匹配对;(i) 所提方法拼接结果

Fig. 8 Stitching effect of wall scene images when the pitch angle is 5° . (a) Template and matching area of NCC; (b) stitching result of NCC; (c) template and matching area of DDIS; (d) stitching result of DDIS; (e) PSO-SIFT matching points; (f) stitching result of PSO-SIFT; (g) CAO-C2F matching points; (h) MS-HLMO matching points; (i) stitching result of the proposed method

图像重叠区域较小,并且大多为天空、戈壁等特征不明显区域,错误的匹配对易导致拼接失败或错位现象,因此上述算法并不适用于所提的全景视频实时拼接。所提方法计算复杂度较低,充分满足全景视频成像的实时性需求;与上述配准方法相比,所提方法在任意俯仰角度下均保持良好的配准精度,具有较好的全景拼接效果,并且在不同俯仰角下具有配准结果唯一性。当系统俯仰角度分别为 0° 、 5° 、 20° 时,所提方法拼接的部分全景图如图 11 所示。

5 性能影响性分析

根据上述论证可知,基于三维球面模型的全景视

频实时拼接方法取得较好的拼接效果。但仍有一些主要因素对配准结果产生影响,将进行深入的定量分析与评价。

基于预警系统的工作模式进行三维空间建模,通过建模的方式对不同方位俯仰角度下的图像像素空间位置进行定位,而建模过程涉及图像分辨率、全画幅数、俯仰角度、焦距等参数,参数的准确性是必要条件。其中,图像分辨率、全画幅数参数是易确定的;俯仰角度与光电预警系统的测量精度息息相关。焦距参数由式(2)的视场角确定,对配准性能具有一定影响。因此,对不同视场角条件下相邻帧间的配准性能进行深入分析。

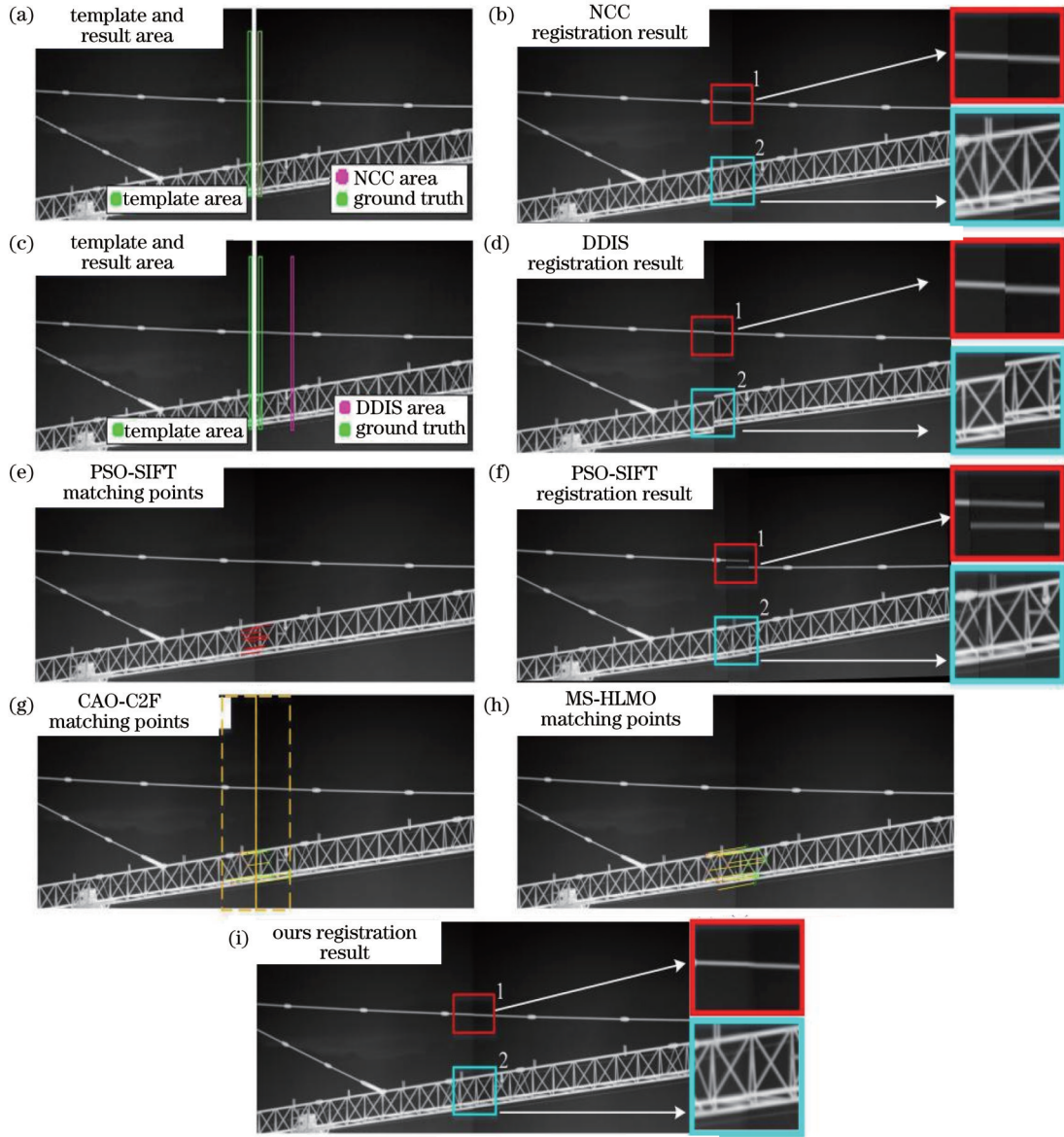


图 9 当俯仰角度为 5° 时吊塔场景图像的拼接效果 (a) NCC 模板和匹配区域; (b) NCC 拼接结果; (c) DDIS 模板和匹配区域; (d) DDIS 拼接结果; (e) PSO-SIFT 匹配对; (f) PSO-SIFT 拼接结果; (g) CAO-C2F 匹配对; (h) MS-HLMO 匹配对; (i) 所提方法拼接结果

Fig. 9 Stitching effect of tower scene images when the pitch angle is 5°. (a) Template and matching area of NCC; (b) stitching result of NCC; (c) template and matching area of DDIS; (d) stitching result of DDIS; (e) PSO-SIFT matching points; (f) stitching result of PSO-SIFT; (g) CAO-C2F matching points; (h) MS-HLMO matching points; (i) stitching result of the proposed method

以水平视场角 4.42° 为基准, 0.02° 为步进单位, 当俯仰角度分别为 0°、5° 时, 相邻帧的 $f_{A_2N_2} \sqrt{f_{B_2M_2}}$, 如表 2 所示。由表 2 可知, 0.02° 的水平视场角偏差使得像素焦距发生约 30 个单位的改变, 进而导致 M_2 、 N_2 像素坐标移动 1~2 个单位。像素焦距值大于基准焦距, M_2 、 N_2 像素坐标值越大, 意味着相邻帧间重叠像素越多; 像素焦距值小于基准焦距, M_2 、 N_2 像素坐标值越小, 相邻帧间重叠像素越少。

当俯仰角度为 0° 时, 不同水平视场角的配准效果如图 12 所示。通过分析图 12 的 2 号区域可知, 图 12 (a)~图 12 (c) 条件下, $f_{A_2N_2} \sqrt{f_{B_2M_2}}$ 过大导致路灯头明显

被覆盖, 丢失部分信息。图 12 (e)、图 12 (f) 条件下, $f_{A_2N_2} \sqrt{f_{B_2M_2}}$ 过小导致拼接处路灯头重复出现。分析图 12 的 1 号区域可知, 图 12 (a)、图 12 (e)、图 12 (f) 条件下, 路灯臂未对齐。图 12 (d)、图 12 (g) 条件下, 1、2 号区域拼接效果较好。

当俯仰角度分别为 5° 时, 不同水平视场角下的配准效果如图 13 所示。分析图 13 的 2 号区域可知, 图 13 (a)~图 13 (d) 条件下, 塔体配准均未对齐, 丢失部分细节。图 13 (e) 条件下, 塔体拼接效果在可接受范围内。图 13 (f) 条件下, 塔体出现重影。图 13 (g) 条件下, 塔体拼接效果较好。

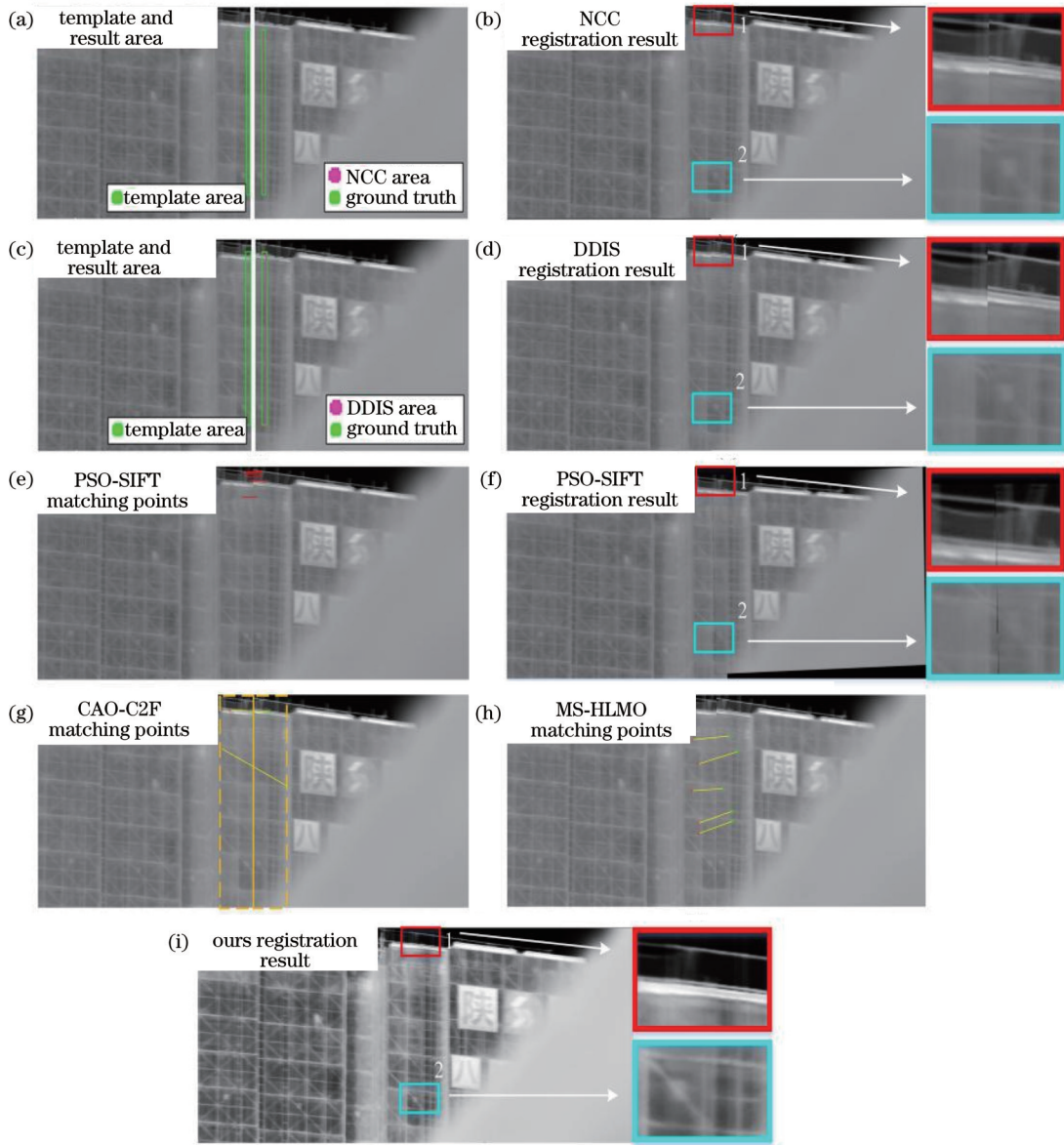


图 10 当俯仰角度为 20° 时楼体场景图像的拼接效果。(a) NCC 模板和匹配区域;(b) NCC 拼接结果;(c) DDIS 模板和匹配区域;(d) DDIS 拼接结果;(e) PSO-SIFT 匹配对;(f) PSO-SIFT 拼接结果;(g) CAO-C2F 匹配对;(h) MS-HLMO 匹配对;(i) 所提方法拼接结果

Fig. 10 Stitching effect of building scene images when the pitch angle is 20° . (a) Template and matching area of NCC; (b) stitching result of NCC; (c) template and matching area of DDIS; (d) stitching result of DDIS; (e) PSO-SIFT matching points; (f) stitching result of PSO-SIFT; (g) CAO-C2F matching points; (h) MS-HLMO matching points; (i) stitching result of the proposed method

表 1 不同方法完成相邻图像拼接的平均耗时

Table 1 Average time consumption of different methods when stitching adjacent images

unit: s

Method	CAO-C2F	MS-HLMO	PSO-SIFT	NCC	DDIS	Ours
Time	4.205	16.089	12.883	0.104	1.921	0.015

像素焦距值离基准焦距越远,相邻帧间重叠像素将越多,拼接处丢失信息越严重;像素焦距值离基准焦距越近,相邻帧间重叠像素将越少,拼接处重复信息区域越广。像素焦距值越接近基准焦距,配准效果在可接受范围内,如图 12(d)、图 13(e)所示。综

上所述,像素焦距的不准确性将对相邻帧间的配准性能产生影响。此外,光电预警系统测量的俯仰角精度同样是影响配准性能的主要因素。因此,建模参数的准确性是保证所提方法具有良好配准性能的前提条件。

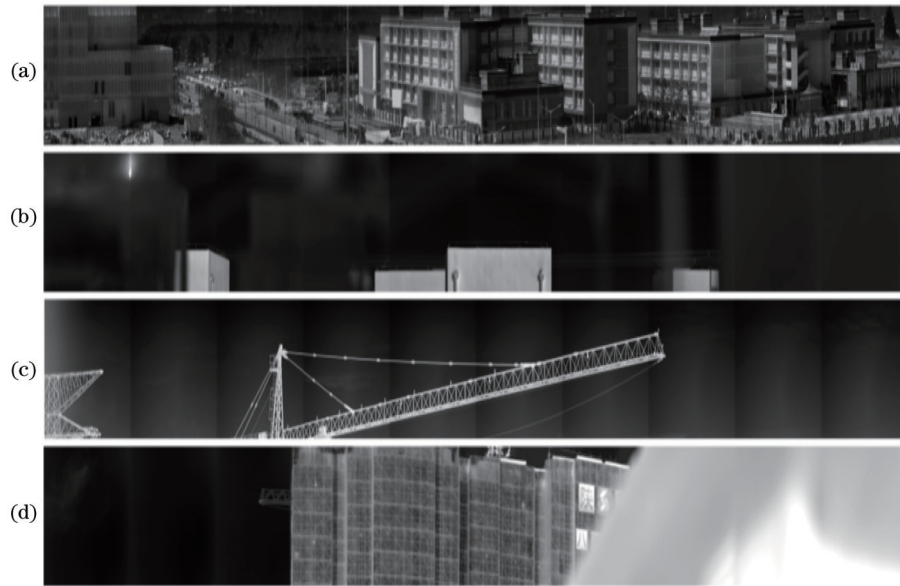


图 11 所提方法拼接的部分全景图。(a)俯仰角度为 0° 时复杂背景的部分全景图;(b)俯仰角度为 5° 时墙体场景的部分全景图;(c)俯仰角度为 5° 时吊塔场景的部分全景图;(d)俯仰角度为 20° 时楼体场景的部分全景图

Fig. 11 Partial panorama stitched by the proposed method. (a) Partial panorama of complex background when the pitch angle is 0° ; (b) partial panorama of wall scene when the pitch angle is 5° ; (c) partial panorama of tower scene when the pitch angle is 5° ; (d) partial panorama of building scene when the pitch angle is 20°

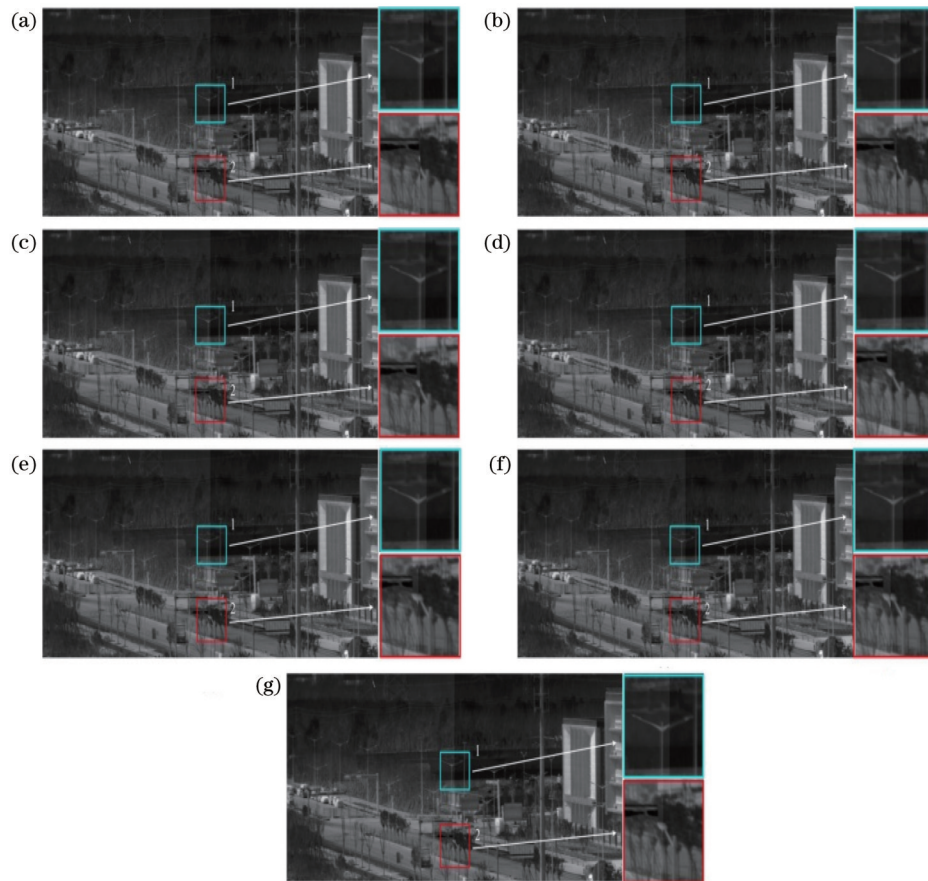


图 12 当俯仰角度为 0° 时,不同水平视场角下的配准效果。(a)水平视场角为 4.50° ;(b)水平视场角为 4.48° ;(c)水平视场角为 4.46° ;(d)水平视场角为 4.44° ;(e)水平视场角为 4.40° ;(f)水平视场角为 4.38° ;(g)水平视场角为 4.42°

Fig. 12 Registration effect of different horizontal field angles when the pitch angle is 0° . (a) Horizontal field angle is 4.50° ; (b) horizontal field angle is 4.48° ; (c) horizontal field angle is 4.46° ; (d) horizontal field angle is 4.44° ; (e) horizontal field angle is 4.40° ; (f) horizontal field angle is 4.38° ; (g) horizontal field angle is 4.42°

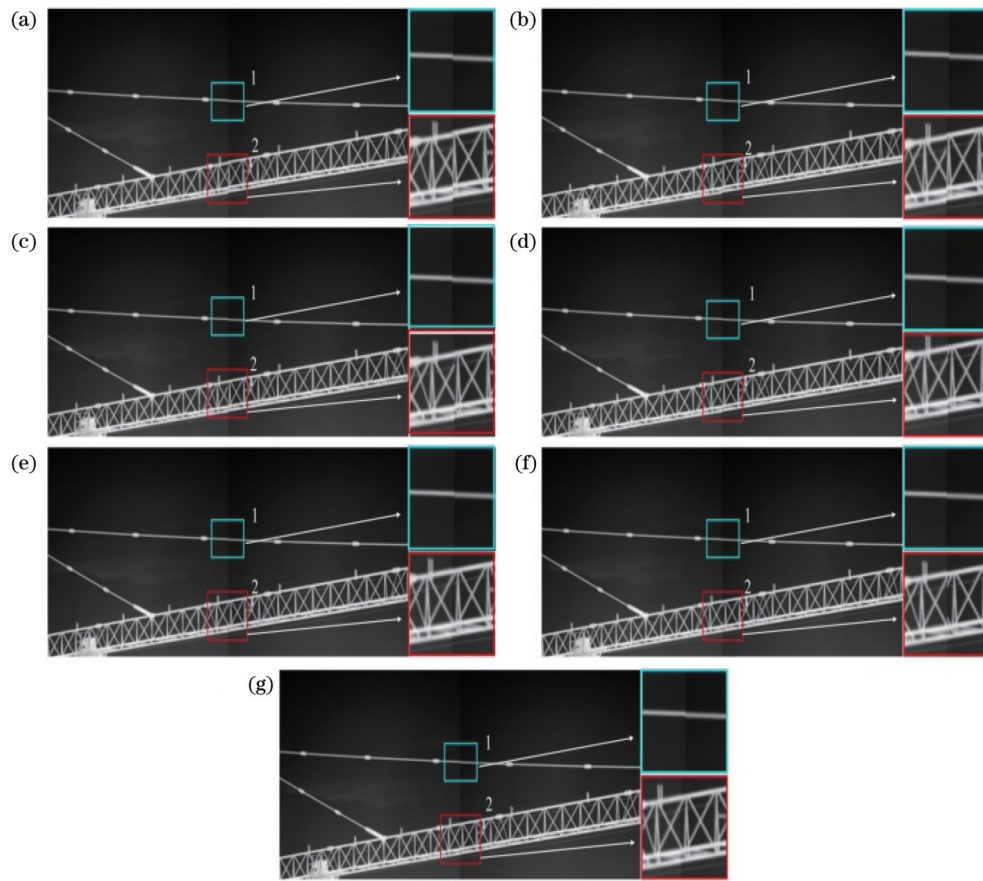


图 13 当俯仰角度为 5° 时,不同水平视场角下的配准效果。(a)水平视场角为 4.50° ; (b)水平视场角为 4.48° ; (c)水平视场角为 4.46° ; (d)水平视场角为 4.44° ; (e)水平视场角为 4.40° ; (f)水平视场角为 4.38° ; (g)水平视场角为 4.42°

Fig. 13 Registration effect of different horizontal field angles when the pitch angle is 5° . (a) Horizontal field angle is 4.50° ; (b) horizontal field angle is 4.48° ; (c) horizontal field angle is 4.46° ; (d) horizontal field angle is 4.44° ; (e) horizontal field angle is 4.40° ; (f) horizontal field angle is 4.38° ; (g) horizontal field angle is 4.42°

表 2 不同水平视场角下的 $f_{B_2M_2}, f_{A_2N_2}$

Table 2 $f_{B_2M_2}, f_{A_2N_2}$ at different horizontal field angles

Horizontal viewing angle / ($^\circ$)	Pixel focus	$(f_{B_2M_2}, f_{A_2N_2})$ when the pitch angle	
		is 0°	is 5°
4.50	8145	(12, 12)	(14, 12)
4.48	8181	(10, 10)	(12, 11)
4.46	8218	(9, 9)	(11, 9)
4.44	8255	(7, 7)	(9, 8)
4.40	8330	(5, 5)	(7, 5)
4.38	8368	(3, 3)	(5, 3)
4.42	8292	(6, 6)	(8, 6)

6 结 论

针对光电预警系统的全景视频成像问题,提出了一种基于三维球面模型的全景视频实时拼接方法。该方法将二维平面的图像配准问题转化为三维空间平面相交问题,以周扫式光电预警系统的成像特性以及工作模式为出发点进行三维空间建模,通过推导出的预警系统的配准公式实现全景图像无缝拼接。并将所提

方法与主流的 5 种配准方法在俯仰角度分别为 0° 、 5° 、 20° 时的配准结果进行对比分析,实验结果表明:所提方法在配准精度,拼接质量以及复杂、单一等场景的适用性方面均体现出明显的优势,具有较好的质量成像,也全面保证了全景视频的连续性与稳定性。值得注意的是,建模参数的准确性是保证所提方法具有良好配准性能的前提。所提方法已成功应用于红外搜索系统中,未来将有望大量应用在边境、城市、岛屿或其他重

要地区的安全监控领域中。此外,为保证红外图像拼接过渡自然,由光照条件、探测器本身原因带来的图像曝光差异问题将是下一步的研究方向。

参 考 文 献

- [1] 洪川. 光电监视设备在低空预警监视领域中的应用[J]. 电子测试, 2016(14): 123-124.
Hong C. Application of photoelectric monitoring equipment in low altitude early warning and monitoring field[J]. Electronic Test, 2016(14): 123-124.
- [2] 何铮进, 孟祥, 孙必慎. 无人机红外预警技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(6): 587-591.
He Z J, Meng X, Sun B S. Research on infrared early warning technology on UAV[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2011, 6(6): 587-591.
- [3] 王程, 倪旖, 李亮, 等. 针对小型商业无人机的预警技术发展现状与思考[J]. 空天防御, 2021, 4(1): 83-90.
Wang C, Ni Y, Li L, et al. Development status and thinking of early warning technology for small commercial unmanned aerial vehicles[J]. Air & Space Defense, 2021, 4(1): 83-90.
- [4] Li X H, Feng R T, Guan X B, et al. Remote sensing image mosaicking: achievements and challenges[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2019, 7(4): 8-22.
- [5] 靳京京, 卢文龙, 郭小庭, 等. 基于 SURF 和 RANSAC 算法的同步相移干涉图位置配准方法[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1012002.
Jin J J, Lu W L, Guo X T, et al. Position registration method of simultaneous phase-shifting interferograms based on SURF and RANSAC algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1012002.
- [6] 刘天赐, 宋延嵩, 李金旺, 等. 基于 ORB 特征的高分辨率图像拼接改进算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0810004.
Liu T C, Song Y S, Li J W, et al. Improved algorithm for high-resolution image stitching based on ORB features[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0810004.
- [7] 唐颖复, 王忠静, 张子雄. 基于改进 SIFT 和 SURF 算法的沙丘图像配准[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(2): 161-169.
Tang Y F, Wang Z J, Zhang Z X. Registration of sand dune images using an improved SIFT and SURF algorithm[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(2): 161-169.
- [8] 吕波凯, 吴成茂, 田小平. 一种基于最佳伙伴相似性的快速图像匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101018.
Lü B K, Wu C M, Tian X P. Fast image matching algorithm based on best-buddies similarity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 101018.
- [9] 范文强, 辛绍杰, 邓寅喆. 基于霍夫变换与模板匹配的栅格地图拼接方法[J]. 计量与测试技术, 2022, 49(1): 81-84.
Fan W Q, Xin S J, Deng Y Z. Grid map mosaic method based on Hough transform and template matching[J]. Metrology & Measurement Technique, 2022, 49(1): 81-84.
- [10] 曾安, 王烈基, 潘丹, 等. 基于 FCN 和互信息的医学图像配准技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(18): 202-208.
Zeng A, Wang L J, Pan D, et al. Research on medical image registration technology based on FCN and mutual information algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(18): 202-208.
- [11] 江苏蓬, 向伟, 刘云鹏, 等. 采用多特征共生矩阵的模板匹配[J]. 光学精密工程, 2021, 29(6): 1459-1467.
Jiang S P, Xiang W, Liu Y P, et al. Template matching with multi-feature co-occurrence matrix[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(6): 1459-1467.
- [12] Oron S, Dekel T, Xue T F, et al. Best-buddies similarity-robust template matching using mutual nearest neighbors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018, 40(8): 1799-1813.
- [13] Talmi I, Mechrez R, Zelnik-Manor L. Template matching with deformable diversity similarity[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 1311-1319.
- [14] Lai J X, Lei L, Deng K Y, et al. Fast and robust template matching with majority neighbour similarity and annulus projection transformation[J]. Pattern Recognition, 2020, 98: 107029.
- [15] 王中军, 晁艳锋. 采用 SURF 特征和局部互相关信息的图像配准算法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 492-497.
Wang Z J, Chao Y F. Image registration algorithm using SURF feature and local crosscorrelation information[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 492-497.
- [16] Divya S V, Paul S, Pati U C. Structure tensor-based SIFT algorithm for SAR image registration[J]. IET Image Processing, 2020, 14(5): 929-938.
- [17] 丁国绅, 乔延利, 易维宁, 等. 基于光谱图像空间的 F-SIFT 特征提取与匹配[J]. 光学精密工程, 2021, 29(5): 1180-1189.
Ding G S, Qiao Y L, Yi W N, et al. Feature extraction and matching of F-SIFT based on spectral image space[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(5): 1180-1189.
- [18] Gao C Z, Li W, Tao R, et al. MS-HLMO: multiscale histogram of local main orientation for remote sensing image registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5626714.
- [19] Ma W P, Wen Z L, Wu Y, et al. Remote sensing image registration with modified SIFT and enhanced feature matching[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(1): 3-7.
- [20] Jiang Q, Liu Y D, Yan Y J, et al. A contour angle orientation for power equipment infrared and visible image registration[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2559-2569.

Real-Time Stitching Method of Panoramic Videos Based on Three-Dimensional Spherical Model

Song Congcong¹, Gao Ce^{1*}, Zhang Yanchao¹, Xu Jiaying¹, Liu Haibo²

¹*Precision Instrument and Equipment R&D Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;*

²*Engineering Research Management Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China*

Abstract

Objective The photoelectric early warning system is equipped with infrared detectors of distinct wavebands, and with high detection sensitivity to the target temperature, it realizes real-time monitoring and early warning of suspicious targets in the air by means of continuous weekly scanning. The technology of image stitching is required for panoramic video imaging in photoelectric early warning systems, and image registration is the first step to determine the effect of panoramic imaging. Currently, the mainstream registration methods in the field of image stitching are based on template matching and feature matching. Nonetheless, when mainstream registration methods are applied to the panoramic image stitching of circumferential-scanning photoelectric early warning systems, numerous issues arise. The method based on template matching predominantly carries out registration according to the gray correlation of the image in the overlapping area. It is prone to the issue of incorrect matching when applied to the real-time stitching of panoramic videos, and the non-uniqueness of the registration between frames easily causes instability and discontinuity in panoramic video imaging. The method based on feature matching has high registration accuracy, and yet it is highly dependent on the extraction of the feature points of images. Nevertheless, the early warning areas are mostly simple backgrounds such as the sky and Gobi. The overlapping area is small, and the image features are not obvious, which easily leads to registration failure. Additionally, such algorithms have high computational complexity and generally cannot meet the real-time requirement. In view of the above shortcomings, we propose a new real-time stitching method for panoramic videos on the basis of a three-dimensional spherical model. This method is feasible, with a good panoramic stitching effect, and can effectively compensate for the deficiencies in mainstream registration methods. It features good applicability and real-time performance even for panoramic stitching of areas with inconspicuous features such as the sky.

Methods In this study, a real-time stitching method for panoramic videos based on a three-dimensional spherical model is proposed. In this method, the registration problem of a two-dimensional plane image is converted into an intersection issue of a three-dimensional space plane, and the registration problem of an early warning image is solved only by computation. In the first place, the panoramic reconstruction of three-dimensional space is carried out according to the operation pattern of the circumferential-scanning photoelectric early warning system, and the three-dimensional spherical model is constructed. By modeling, we locate the spatial position of the pixels of the images collected by the detector at different pitch and azimuth angles. Subsequently, we search the optimal registration line of the overlapping field of view in the three-dimensional space of distinct pitch angles predicated on the basis of the three-dimensional spherical model and accordingly deduce the registration formula of the overlapping area of the early warning image. Finally, the seamless stitching of panoramic images is realized by a line-by-line weighted fusion algorithm and image straightening method.

Results and Discussions In this paper, the proposed method is compared with five mainstream registration methods in four scenarios at pitch angles of 0° , 5° , and 20° . In terms of registration accuracy, the experimental results demonstrate that template matching-based methods (NCC and DDIS) have the risk of wrong matching, which can cause image information loss, as displayed in Figs. 8(b) and 9(d). The non-uniqueness of matching between adjacent frames is not conducive to the continuity and stability of panoramic video imaging. The methods based on feature matching (PSO-SIFT, CAO-C2F, and MS-HLMO) are highly dependent on the extraction of matching pairs; incorrect matching pairs may result in stitching failure, as depicted in Figs. 7(g), 7(h), 8(g), 8(h), 9(g), 9(h), 10(g), and 10(h), or dislocation, as illustrated in Figs. 8(f) and 9(f). Therefore, they are not suitable for the real-time panoramic video stitching described in this paper, but the proposed method is feasible. Regardless of the complex background or the single wall background of the early warning image, it displays high registration accuracy at the stitching point and can achieve the seamless stitching of panoramic images, as illustrated in Figs. 7(i), 8(i), 9(i), and 10(i). As for algorithm complexity, MS-HLMO and PSO-SIFT have a long running time and high computational complexity, while the running time of CAO-C2F and DDIS is normal. NCC and the proposed method have a shorter running time, which can meet the real-time requirements of

panoramic video stitching. In conclusion, the proposed method effectively compensates for the drawbacks of mainstream registration methods and solves the registration problem of early warning images only by computation. It maintains better registration accuracy and stitching quality and has greater stability, which is of great practical value for panoramic stitching of photoelectric early warning systems.

Conclusions A real-time stitching method of panoramic videos on the basis of a three-dimensional spherical model is proposed to solve the issue of the limited applicability of mainstream registration methods in panoramic image stitching of circumferential-scanning photoelectric early warning systems. The registration problem of a two-dimensional plane image is converted into an intersection problem of a three-dimensional space plane by this method. Moreover, a three-dimensional spherical model is constructed according to the imaging characteristics and working pattern of the circumferential-scanning photoelectric early warning system. Modeling yields the registration formula of the early warning system and enables the seamless stitching of panoramic images. In comparison with the registration results of five mainstream registration methods at pitch angles of 0° , 5° , and 20° , the experimental results demonstrate that the proposed method has great advantages in registration accuracy, stitching quality, and scene applicability. It not only has better imaging quality but also fully guarantees the continuity and stability of panoramic video imaging. Additionally, the primary factors influencing the registration performance of the proposed method are thoroughly analyzed. It is fully proved that the accuracy of the modeling parameters is a prerequisite to ensure the registration effectiveness of the proposed method. The proposed method has been successfully applied in the infrared search system. In the future, it is anticipated to be widely utilized in the security monitoring of borders, cities, islands, and other vital areas.

Key words image processing; panoramic stitching; three-dimensional spherical model; image registration; photoelectric early warning system