

基于三维旋转模型的红外全景图像拼接方法

谢安宁¹, 张宏伟², 赵志刚¹, 孟智勇¹, 王增国¹

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003; 国防科技大学电子对抗学院, 湖南 长沙 410000)

摘要:分布孔径红外系统(DAIRS)是目前各国在红外搜索跟踪系统领域的重点发展方向, DAIRS系统为了减少冗余,通常减少重叠区域面积以获得较宽视场覆盖,这使得基于特征的拼接方法提取特征数量不足。本文通过构建三维旋转模型,采用基于梯度下降的图像配准方法,并在时间维度上进行多帧迭代来进行三维重建,再采用改进的亮度调整算法和多分辨率过渡区融合消除拼接痕迹。实验结果表明,本文算法对于平面投影和柱面投影都实现了全景图像的无缝拼接,过渡区通过多分辨率融合有利于进一步消除模糊现象。

关键词:分布孔径红外系统;全景拼接;三维重建;梯度下降

中图分类号:TN391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.04.021

Panoramic stitching of infrared image based on three-dimensional rotation model

XIE An-ning¹, ZHANG Hong-wei², ZHAO Zhi-gang¹, MENG Zhi-yong¹, WANG Zeng-guo¹

(1. Luoyang Electronic Equipment Test Center China, Luoyang 471003, China;

2. National University of Defense Technology, Changsha 41000, China)

Abstract: Distributed aperture infrared (DAIRS) system is the key development direction of infrared search and tracking systems in various countries. To reduce the redundancy, the DAIRS system usually reduce the overlap area to obtain wide field coverage, which leads to the shortage of the extracted features in the process of image stitching based on feature method. In this paper, by building three-dimensional rotation model and applying image registration based on gradient descent, three-dimensional reconstruction is done with iteration of multi-frame iteration on the dimension of time. Then the improved brightness adjustment algorithm and multi-resolution fusion of transition region are applied to eliminate the stitching traces. Experimental results show that the algorithm achieves seamless stitching of panoramic images for plane projection and cylindrical projection, and multi-resolution fusion of transition areas is beneficial to eliminate the fuzzy phenomenon.

Key words: DAIRS; panoramic stitching; three-dimensional reconstruction; gradient descent

1 引言

红外搜索与跟踪系统(IRST)越来越成为现代战争中不可或缺的一部分,属于第三代的IRST的分布孔径红外系统(Distributed Aperture Infrared System, DAIRS)^[1-2]采用精心布置在作战平台上的分布传感器组实现全方位、全空间敏感,克服了线列探测器扫描成像画面质量不高,信噪比低,更新频率慢等缺点。例如,美国F35上装备的光电分布孔径系

统AN/AAQ-37系统由六个红外传感器组成,分布在飞机四周,以实现360°全方位覆盖。

在DAIRS技术实现中,全景图像拼接技术作为关键技术之一,直接决定了成像质量的好坏。全景图像拼接技术一直是图像处理领域中的一个研究热点,拼接过程包括图像配准、图像定位、捆绑调整、拼接缝处理以及投影输出。依据图像配准方法的不同,已有算法可分为基于特征的方法、基于频域的方

法、基于像素的方法以及基于灰度相关的方法等。其中,基于特征的方法对图像旋转和尺度变化等均具有不变性,相比其他方法更具有稳定性和鲁棒性。例如,宗岩等人在传统 SIFT 算法的基础上对图像拼接中的特征匹配和图像融合两个关键部分进行了改进,改进后的算法能有效去除运动重影现象^[3];曾丹等人提出了基于全局拓扑结构的分级三角剖分图像拼接方法,大大减少了投影变换矩阵计算点数^[4];基于特征的方法需要一定数量且呈分散分布的正确特征点匹配对,而对于 DAIRS 系统,为了以最少的传感器数量覆盖全方位,往往相邻探测器之间具有较小的重叠区域,使得提取的特征点数量有限。

针对以上问题,本文采用基于梯度下降的配准方法来获取 DAIRS 的结构参数,采用三维旋转模型进行全景图像的三维立体重建,并通过改进的亮度调整和过渡区融合算法,实现了全景图像的无缝拼接。

2 基于三维旋转模型的立体重建与降维显示

DAIRS 系统各探测器一般分布在同一平台上,由里向外探视,如图 1 所示。

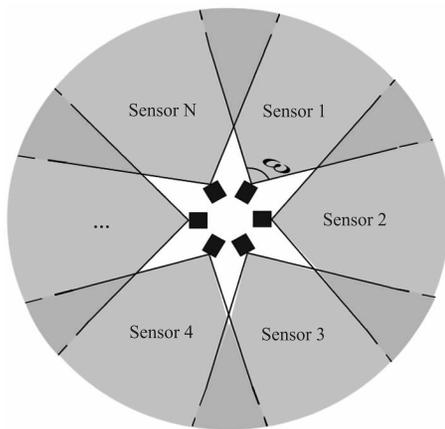


图 1 DAIRS 分布示意图

Fig. 1 Diagram of distribution of DAIRS

探测器可近似绕一定点旋转排布,因此可以使用球面极坐标系,图像配准问题转化为围绕球形表面配准问题。由于探测器位置固定,图像在球面全景上的初始位置已知,为了对位置进行精确校正,采用基于梯度下降的相关函数配准方法进行高精度配准。各探测器图像到全景图的定位采用三维旋转模型,图像在球面上的位置可以用三个旋转参数和一个焦距参数确定^[5]。

2.1 三维旋转模型

根据探测器投影模型,世界坐标系到图像坐标

系的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} = TVR \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

其中:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & C_x \\ 0 & 1 & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad V = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}$$

式中, T 、 V 、 R 分别为图像到中心的平移、探测器焦距以及三维旋转矩阵。若将图像坐标系原点设为图像的中心,那么探测器图像之间的转换关系为:

$$W = VR_A R_B^{-1} V^{-1} \quad (2)$$

旋转矩阵的计算采用罗德里格斯 (Rodriguez) 公式,设三参数旋转向量为 $\Omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$, 它的幅值为 $\theta = \|\Omega\|$, 单位向量为 $\hat{n} = \Omega/\theta$, 那么旋转矩阵为:

$$R(\hat{n}, \theta) = I + \sin\theta X(\hat{n}) + (1 - \cos\theta) X(\hat{n})^2 \quad (3)$$

式中:

$$X(\hat{n}) = \begin{bmatrix} 0 & -\hat{n}_z & \hat{n}_y \\ \hat{n}_z & 0 & -\hat{n}_x \\ -\hat{n}_y & \hat{n}_x & 0 \end{bmatrix}$$

如果探测器垂直和水平焦距相等,那么图像之间的投影变换矩阵 $W = (w_1, \dots, w_8, 1)$ 包含 3 个旋转参数和 2 个焦距参数,它比 8 参数的投影变换模型更简单,适用于球面全景图像的拼接。下面采用 ECC 方法^[6]迭代求解 W 各参数。

假设一幅图像是没有旋转的,则图像坐标变换为 $\bar{X}' = V'RV^{-1}\bar{X}$, $\bar{X}' = z' [x' \ y' \ 1]$ 与 $\bar{x} = z [x \ y \ 1]^T$ 为图像坐标的齐次形式。如果配准参数用 $P = [f' \ w_x \ w_y \ w_z \ f]^T$ 表示,则图像配准问题归结为配准参数 P 的求解问题,求解过程采用基于梯度下降的配准方法,目标函数利用归一化相关系数:

$$\rho(P) = \frac{\bar{i}_y \bar{i}_w(P)}{\|\bar{i}_y\| \cdot \|\bar{i}_w(P)\|} \quad (4)$$

式中,设 \bar{i}_y 、 $\bar{i}_w(P)$ 分别为参考图像和待配准图像经过投影变换后的像素值,已减去了各自的均值。雅戈比矩阵的求解^[6]对于三维旋转模型采用链式法则得到:

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{p}} = \frac{\partial \mathbf{x}'}{\partial \bar{\mathbf{x}}} \frac{\partial \bar{\mathbf{x}}}{\partial \mathbf{p}} \quad (5)$$

式中:

$$\frac{\partial \mathbf{x}'}{\partial \bar{\mathbf{x}}} = \frac{\partial \begin{bmatrix} x/z & y/x \end{bmatrix}}{\partial \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}} = \begin{bmatrix} 1/z & 0 & -x/z^2 \\ 0 & 1/z & -y/z^2 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{x}}}{\partial \mathbf{p}} = V' \frac{\partial R}{\partial \Omega} V^{-1} \bar{\mathbf{x}}$$

同样 $\partial R/\partial \Omega$ 的求解可以逐步进行,如:

$$\frac{\partial R}{\partial \Omega} = \frac{\partial R(\hat{n}, \theta)}{\partial (\sin \theta \quad \cos \theta \quad X(\hat{n}) \quad X(\hat{n})^2)} \cdot \frac{\partial (\sin \theta \quad \cos \theta \quad X(\hat{n}) \quad X(\hat{n})^2)}{\partial (\hat{n} \quad \theta)} \cdot \frac{\partial (\hat{n} \quad \theta)}{\partial \Omega} \quad (6)$$

DAIRS 系统为了减少冗余,通常减少重叠区域面积以获得较宽视场覆盖,这使得有些时候图像重叠区域缺少结构信息而导致配准失效。为了克服此类问题,在时间维度上进行扩展,利用多帧图像进行配准,此时雅戈比矩阵和参数更新向量变为:

$$\bar{G}(t) = \bar{G}(t-1) + \nabla I \cdot \frac{\partial \mathbf{x}'}{\partial \mathbf{p}} \quad (7)$$

$$\Delta \mathbf{p}(t) = \Delta \mathbf{p}(t-1) + (\bar{G}'\bar{G})^{-1} \bar{G}' \{ \lambda \hat{\mathbf{i}}_y, -\hat{\mathbf{i}}_w \} \quad (8)$$

通过这种积累多帧图像像素的方法可以提高图像配准的准确性,经过一段时间后,由于类似震动、温度等环境因素改变可能造成图像发生微小位移,图像配准校正作为离线任务在需要进行。

通过前面的图像配准获得的配准参数可以把图像二维平面的点 $\bar{x}_i = [x_i, y_i, f_i]$ 转换到三维空间坐标 $\bar{P}_i(X, Y, Z)$:

$$\bar{P}_i = R_i^{-1} V_i^{-1} \bar{x}_i \quad (9)$$

拼接后的图像通常以球面的形式来存储,三维空间坐标与球面极坐标之间的转换关系为:

$$\theta = \arctan \frac{X}{Z}$$

$$\phi = \arctan \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (10)$$

由此获得的全景图像为视点固定的球面全景图像。

2.2 全局捆绑调整

运用上面的方法对相邻图像进行配准之后,可以得到图像之间的旋转矩阵,为了获得全景图像,图像序列依次进行到球面的拼接。设图像 I_i 与图像 I_j 之间的旋转矩阵为 $R_{ij} = (r_1, \dots, r_9)$,如果将其中一幅图像作为参考平面,那么其他图像相对参考图像总的旋转矩阵 R_i 为相应旋转矩阵的乘积。在图像配

准过程中, R_{ij} 的求解并不是完全精确,特别是较多图像的拼接过程中较小的误差经累计后将导致明显的全局误差,为了减少累积误差,需对旋转矩阵进行全局捆绑调整。在全景图像中,对应于每幅图像中心 \bar{x}_i 的向量为 \mathbf{q}_i 为:

$$\mathbf{q}_i = R_i^{-1} \bar{x}_i \quad (11)$$

那么相对于所有的 R_i ,应该使目标函数最小:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=i \pm 1} (\mathbf{q}_i - R_{ji} \mathbf{q}_j) \quad (12)$$

此类非线性最优化问题可以使用 Levenberg-Marquardt 算法^[7]求解。

在选择球面全景坐标系时,最初假设探测器靠得非常近,可以近似认为所有探测器有相同的光心,如果探测器之间只存在旋转运动,在成像时就不会产生视差。但实际情况中,所有探测器的光心并不一定完全重合,由于基线存在导致视差效应,在全景图像中表现为重叠区域出现“鬼影”。为了消除视差,需要对图像进行局部变形,图像局部配准一般用到稠密光流算法,但该算法十分耗时,无法做到实时处理,因此在拼接过程中不打算进行消视差处理。

2.3 降维显示

因为视点为球形空间,因此大视角的全景图不能近似为平面图像,而是球面全景。使用三维旋转模型仅仅获得了序列图像在三维空间的平面形式,要实现全景图像拼接需要将空间平面图像映射到球面上,再使用正确的投影方法将球面全景转换为平面全景,便于观察和显示。

转为平面全景的方法有:平面投影、圆柱投影、墨卡托投影、正弦投影等,由于这里的 DAIRS 系统主要是在水平方向扩展 360° 视场,所以主要采用前面两种投影形式。

3 过渡区拼接缝处理

图像经过配准之后,如果直接进行拼接,在图像的重叠区域会看到明显的拼接痕迹,下面主要经过两个步骤来使图像过渡更加自然:一是调节图像之间的亮度差异,尽量使各图像具有亮度一致性;二是对于过渡区采用多分辨率融合方法,消除“鬼影”现象。

3.1 亮度调整模型参数求解

在图像拍摄过程光照条件完全一致是根本不存在的,对于多探测器成像,由于成像角度、光照条件以及探测器本身的自平衡处理通常是图像具有明显的曝光差异。曝光差异使图像拼接效果不佳,因此在图像进行坐标变换之后,需要对曝光差异进行调

整来减少图像之间的亮度差异。

亮度调整最简单的模型是比例模型,假设重叠区域对应点的亮度值分别为 $P_i(\mathbf{x})$ 、 $P_j(\mathbf{x}')$,对应点的亮度值只相差一个比例因子,分别统计图像 I_i 和 I_j 对应重叠区域亮度的累加值 V_i 、 V_j ,根据累加值来对比例系数进行估计:

$$K = \frac{V_j}{V_i} = \frac{\sum P_j(\mathbf{x}')}{\sum P_i(\mathbf{x})} \quad (13)$$

亮度调整更精确的方法就是对图像亮度差异进行线性估计:

$$P_j(\mathbf{x}') = \alpha P_i(\mathbf{x}) + \beta \quad (14)$$

式中, α 为图像间的亮度增益; β 为图像间的亮度偏执量。参数 α 、 β 的求解可以采用 RANSAC 方法^[8],比例模型为线性模型的特殊形式。利用 RANSAC 算法对线性模型进行估计的方法虽然更加精确,但它需要不断迭代过程,运算量非常大,因此本文使用采样的方法来对模型参数进行求解,如图2所示。



图2 亮度调整匹配取样示意图

Fig. 2 Diagram of luminance adjustment based on match sampling

以图像 I_i 和 I_j 亮度调整为例,在图像 I_i 的重叠区域均匀间隔取 k 个点,取样点的坐标为 \mathbf{x}_i^k ,根据图像配准获得的配准参数 $\mathbf{p} = [f' \ w_x \ w_y \ w_z \ f]$,可以计算 \mathbf{x}_i^k 在图像 I_j 的对应坐标为 $\hat{\mathbf{x}}_j^k$ 。然后统计取样点 \mathbf{x}_i^k 为中心邻域 $w \times h$ 矩形内像素的亮度平均值:

$$\bar{V}_i^k = \frac{1}{(w+1) \cdot (h+1)} \sum_{i=-w/2}^{w/2} \sum_{j=-h/2}^{h/2} P(\mathbf{x}_i^k + i, \mathbf{y}_i^k + j) \quad (15)$$

类似的可以求得 $\hat{\mathbf{x}}_j^k$ 邻域内像素的亮度平均值为 \bar{V}_j^k ,采用曲线拟合的方法估计线性模型参数,经亮度调整后的结果如图3所示。

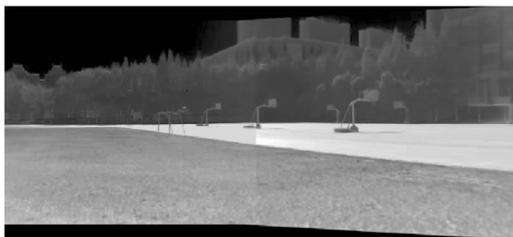


图3 亮度调整后的拼接图像

Fig. 3 Stitching image after brightness adjustment

3.2 过渡区融合

理想情况下,过渡区对应像素具有相同的像素值。但实际情况下,即使经过曝光差异调整之后,由于各种因素在过渡区仍可以看到拼接痕迹,这些因素包括渐晕、光心不重合导致的视差现象、图像配准误差以及图形畸变矫正误差等。为了提高全景图像的质量,需要对过渡区进行融合。

过渡区图像融合又称为图像平滑,目前常用的融合算法有直接平均法、距离权重法、对比度调制法等。直接平均融合方法由于算法简单,融合效果不佳。距离权重法中的好的距离选择能得到非常好的效果,但一般需要搜索最佳拼接线,计算量大。对比度调制法对于两幅图像以上的图像融合适用性不好,且调制图像的量化处理对整幅图像的亮度有影响。下面分析了另一种线性融合算法,并在此基础上运用了多分辨率图像融合操作。

3.2.1 线性融合

经过前面的图像配准操作,获得了 n 幅图像 $I_i(x, y)$ ($i \in \{1, \dots, n\}$) 在球面坐标系中的位置 $I_i(\theta, \phi)$ 。为了合并多张图像的信息,给每幅图像指派一个权重函数 $W(x, y) = w(x)w(y)$, $w(x)$ 在图像中心具有最大值1,线性变换到边缘变为0,如图4所示。

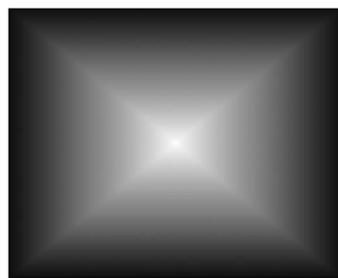


图4 权重函数 $W(x, y)$

Fig. 4 Weight function $W(x, y)$

每幅图像的权重函数也经过重新采样变换到球面坐标 $W_i(\theta, \phi)$,简单的融合方法是计算每幅图像沿着射线的图像强度加权之和,计算方法为:

$$I_{\text{linear}}(\theta, \phi) = \frac{\sum_{i=1}^n I_i(\theta, \phi) \cdot W_i(\theta, \phi)}{\sum_{i=1}^n W_i(\theta, \phi)} \quad (16)$$

如果存在配准误差,线性融合方法可能使高频分量模糊,因此为了提高融合效果,进步采用多分辨率融合方法^[9]。

3.2.2 多分辨率融合

多分辨率融合方法的原理是在大的空间范围融合低频成分,在小的空间范围融合高频成分,为此对

加权函数作相应的修改:

$$W_{i,\max}(\theta,\phi) = \begin{cases} 1 & \text{if } W_i(\theta,\phi) = \arg \max_j W_j(\theta,\phi) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

也就是说,如果 $W_i(\theta,\phi)$ 在位置 (θ,ϕ) 处是所有权重中最大的值 $W_i(\theta,\phi)$ 就为 1,0 表示其他权重有更大的值。图像的多分辨率分解通过以下方式形成:

$$\begin{cases} B_{i,\sigma}(\theta,\phi) = I_i(\theta,\phi) - I_{i,\sigma}(\theta,\phi) \\ I_{i,\sigma}(\theta,\phi) = I_i(\theta,\phi) * g_\sigma(\theta,\phi) \end{cases} \quad (18)$$

式中, $g_\sigma(\theta,\phi)$ 表示尺度为 σ 高斯滤波算子; * 表示卷积运算; $B_{i,\sigma}(\theta,\phi)$ 表示尺度属于 $[0,\sigma]$ 范围内的频率分量,融合该尺度频率分量的权重函数由最大权重图得到:

$$W_{i,\sigma}(\theta,\phi) = W_{i,\max}(\theta,\phi) * g_\sigma(\theta,\phi) \quad (19)$$

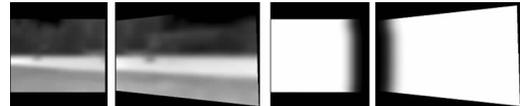
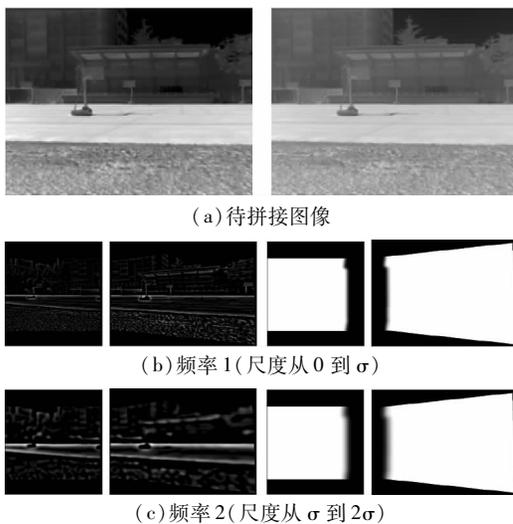
接下来的频率分量使用更大尺度的带通图像和更加模糊的权重函数,对于 $k > 1$ 的情形有:

$$\begin{cases} B_{i,(k+1)\sigma} = I_{i,k\sigma} - I_{i,(k+1)\sigma} \\ I_{i,(k+1)\sigma} = I_{i,k\sigma} * g_\sigma \\ W_{i,(k+1)\sigma} = W_{i,k\sigma} * g_\sigma \end{cases} \quad (20)$$

为了使带通图像具有相同的空间尺度,高斯滤波算子的标准差 σ' 设为 $\sqrt{(2k+1)}\sigma$ 。对于每个频率分量,图像融合采用对应的权重函数进行线性融合:

$$I_{\text{linear},k\sigma}(\theta,\phi) = \frac{\sum_{i=1}^n B_{i,k\sigma}(\theta,\phi) \cdot W_{i,k\sigma}(\theta,\phi)}{\sum_{i=1}^n W_{i,k\sigma}(\theta,\phi)} \quad (21)$$

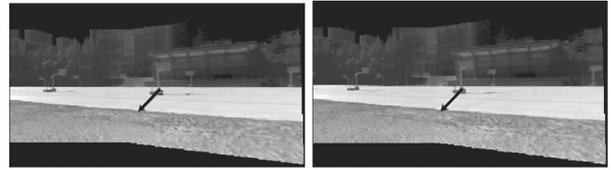
这样做的好处使高频分量 ($< k\sigma$) 在小的空间范围内融合,而低频分量在更大的方位内融合。图像的多分辨率融合过程如图 5 所示。



(d) 频率 3 (尺度大于 2σ)

图 5 图像的 3 层分解以及不同尺度的权重函数图

Fig. 5 Three layers of image decomposition and graphs of weight function with different scales



(a) 线性融合

(b) 多分辨率融合

图 6 线性与多分辨率融合的对比如

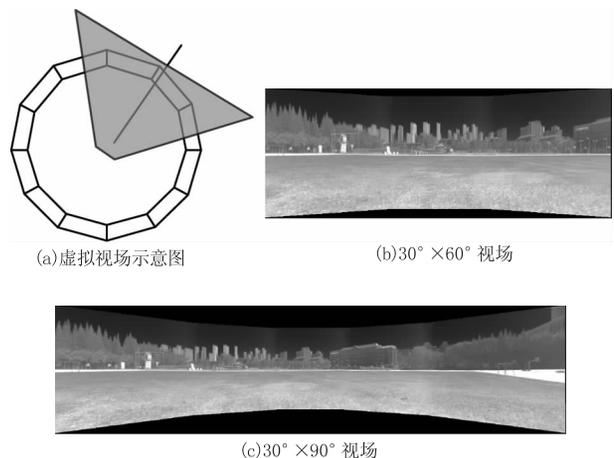
Fig. 6 Comparison of linear and multi-resolution fusion

图 5 中图像为配准后的图像,左侧显示是待拼接图像不同尺度的频率分量,右侧为对应的权重函数,对于不同的频率分量使用不同权重函数进行融合,最后再进行重构得到最终的融合图像。

图 6 显示是分别采用线性融合方法与多分辨率融合方法对图像过渡区进行融合的结果,多分辨率融合采用 3 层分解, σ 取值为 5。两者的差异在箭头所指的方向比较明显,线性融合在过渡区域造成了一些模糊,而多分辨率融合方法更加清晰。

4 全景图像拼接实现与实验

本文实验中,中波采用制冷型 HgCdTe 探测器,工作波段 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,分辨率为 320×256 ;长波红外采用非晶硅探测器,工作波段 $8 \sim 14 \mu\text{m}$,分辨率为 640×480 。如图 7(a) 所示,DAIRS 系统在不需全景显示的时候,可以认为在光心有一虚拟相机,任意选择需要的视角进行显示。



(a) 虚拟视场示意图

(b) $30^\circ \times 60^\circ$ 视场

(c) $30^\circ \times 90^\circ$ 视场

图 7 平面投影显示

Fig. 7 Display of plane projection

图 7(b)、7(c) 显示了两个视场的平面投影结

果,可以看到全景图像中的直线投影仍为直线,图像中的景物没有径向变形,但缺点是视场越大,图像拉伸越剧烈。因此,平面投影适合于小视场范围、目标定位要求比较高的场合。圆柱投影拼接结果如图8所示。



图8 圆柱投影结果

Fig. 8 Display of cylindrical projection

从拼接结果可以看出,柱面投影可以克服平面投影图像边缘剧烈拉伸的缺点,能够实现水平 360° 全景显示。亮度调整和过渡区融合之后的全景图如图9所示,亮度实现了均衡化,图像重叠区域光滑过渡,成功的消除了拼接痕迹。从全景图像拼接结果来看,论文采用的基于三维旋转模型的立体重建方法能实现比较好的拼效果,全局捆绑调整有利于得到全景一致性结果,过渡区由于采用改进的多分辨率线性融合,从图9中可以看到过渡区很多细节部分得到了凸显,基本上没有重影现象,有利于之后的红外小目标检测。



图9 经亮度调整和过渡区融合后的全景图像

Fig. 9 Panoramic image after brightness adjustment and transition zone fusion

5 总结

本文针对 DAIRS 系统重叠区域太窄无法采用基于特征方法的问题,利用基于梯度下降的方法对图像进行配准来获取系统结构参数,采用5参数的旋转模型推导和实现了三维重建过程,并通过捆绑调整减少级联误差。同时采用改进的亮度调整和过渡区融合算法实现了图像的无缝拼接,亮度调整采用匹配取样的方式可以减少算法的计算量,过渡区通过多分辨率融合进步减小了融合时的模糊现象。为了实现实时处理,本文方法没有采用稠密光流算法对图像进行局部配准,但仍然得到了较好的效果。

参考文献:

- [1] Thomas C, Brusgard. Distributed-aperture infrared sensor systems[C]. SPIE Proceedings, Infrared Technology and Applications, 1999, 3698: 58 - 66.
- [2] ZHANG Yuan. DAIRS and its new development[J]. Science and Technology Consulting Herald, 2007, (14): 18. (in Chinese)
张渊. 分布孔径红外系统及其新进展[J]. 科技咨询导报, 2007, (14): 18.
- [3] ZONG yan, WANG Yangping, LIU Ping. Improved image stitching and fusion algorithm based on feature points[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(1): 89 - 92. (in Chinese)
宗岩, 王阳萍, 刘萍. 改进的基于特征点的图像拼接融合算法[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(1): 89 - 92.
- [4] ZENG Dan, CHEN Jian, ZHANG Qi, et al. Global topology based image stitching using hierarchical triangulation [J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(1): 144 - 150. (in Chinese)
曾丹, 陈剑, 张琦, 等. 基于全局拓扑结构的分级三角剖分图像拼接[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(1): 144 - 150.
- [5] M Brown, D G Lowe. Automatic panoramic image stitching using invariant features[J]. International Journal of Computer Vision, 2006, 74(1): 59 - 73.
- [6] ZHANG Hongwei, FAN Xiang, ZHU Bin, et al. Dual-band infrared image registration with the introduction of outliers rejection mechanism[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(s1): 23 - 28. (in Chinese)
张宏伟, 樊祥, 朱斌, 等. 引入外点剔除机制的双波段红外图像的配准[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(s1): 23 - 28.
- [7] K Levenberg. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares[J]. The Quarterly of Applied Mathematics, 1944, 2(2): 164 - 168.
- [8] A F Martin, C B Robert. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography [J]. Communications of AMC, 1981, 24(6): 381 - 395.
- [9] P Burt, E Adelson. A multiresolution spline with application to image mosaics[J]. ACM Transactions on Graphics, 1983, 2(4): 217 - 236.