

利用目标直线边缘交点的某型航侦 CCD 相机图像拼接

张德新¹, 马广富², 邵晓巍¹

- (1. 上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240 ;
2. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对某型航侦 CCD 相机图像序列之间的特殊变换关系, 提出了一种基于目标直线边缘交点的图像拼接方法。该方法在将相机图像重叠区域分割为较小独立区域的基础上, 首先使用 Canny 边缘检测算子提取各个区域中的边缘信息, 并用 Hough 变换提取边缘中的直线边缘。其次通过提出一种依据直线极坐标参数的区域扩展和选择策略来选择包含完整目标的子图像区域, 并提取该区域中目标直线边缘的交点。最终根据提取到的直线边缘交点坐标实现图像配准, 且采用双线性插值法融合配准区域, 实现了图像的无缝拼接。实际的飞行效果验证了该图像拼接方法的有效性。

关键词: 航侦 CCD 相机; 直线边缘; 图像配准; 无缝拼接

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)01-0234-05

Image mosaic for one aerial reconnaissance CCD camera based on object straight edge nodes

Zhang Dexin¹, Ma Guangfu², Shao Xiaowei¹

- (1. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: An image mosaic method of object straight edge nodes was proposed by the unique transformation relation between the image sequences of one aerial reconnaissance CCD camera. In that scheme, overlap area of images were first segmented into smaller sub-images independently, and Canny edge detection operator was employed to extract the edge information from each single area, then straight edges from the obtained edge information were also derived by Hough transform. Moreover, a strategy of area expanding and selection was proposed to extract the straight edge nodes, and it was applied to keep the segment area containing an effective object. Finally, image registration was finished according to the obtained straight edge nodes, and seamless mosaic image could be achieved by bilinear interpolation method. The actual mosaic results are also presented to verify the effectiveness of the proposed image mosaic approach.

Key words: aerial reconnaissance CCD camera; straight edge; image registration; seamless mosaicing

收稿日期: 2011-05-22; 修订日期: 2011-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(60774062)

作者简介: 张德新(1982-), 男, 博士生, 主要从事航空图像处理方面的研究。Email: hrjiang7975@126.com

0 引言

航侦 CCD 相机不仅能全天候执行航侦任务,而且能够通过机载设备向地面指挥中心传递图像信息,为指挥员提供实时的战场信息^[1],因此从诞生起,就受到各国军方的高度重视。但受限于材料工艺水平的发展,单 CCD 传感器难以满足航空侦察大视场的要求。为了提高这种相机的视场,目前常用的方法有两种^[2-3]:多 CCD 拼接和单 CCD 推扫。这两种方法本质相同,都采用图像拼接技术将具有一定重叠率的图像序列拼接成一幅等效的大视场航侦图像,以满足航空侦察大视场的要求。

随着航空侦察任务的不同,航空侦察图像序列中的目标和背景也不尽相同。航侦图像序列拼接时,很难通过建立先验知识库实现图像的配准。因此,航侦图像拼接常用模板匹配和特征匹配两种方法来实现相邻图像之间的配准。模板匹配是一种以互相关系数为判断准则的图像配准方法^[4],具有算法简单、易于实现的优点。但是其计算量大、误匹配率高,配准精度受图像灰度值的影响大。为了克服单一模板匹配配准方法中的不足,参考文献[5-6]提出了一种特征和模板匹配相结合的图像配准方法。该方法以特征匹配指定模板匹配搜索的粗略区域,再在粗匹配区域内用模板匹配实现图像的精确配准。与单一的模板匹配法相比,该方法能够提高图像配准率,降低图像处理量,但是仍然无法克服图像配准精度受图像灰度值波动影响的缺点。特征匹配是航侦图像拼接技术中的另一个研究热点,目前常用的匹配特征有点^[7]、线^[8]和区域^[9]等。相比较而言,这种方法具有匹配精度高、数据处理小的优点。但受限于航侦图像背景复杂,图像配准过程中的特征提取和描述都不容易实现,而这两点正是影响图像匹配精度的重要因素。因此,基于特征匹配的拼接方案只适用于特定的航侦图像序列。

由我国自行研制的某型航侦 CCD 相机采用单 CCD 推扫方式获取局部图像序列。因相机系统在设计时融合了像移和图像重叠率波动补偿装置,相邻图像序列之间的畸变和重叠率波动都比较小。文中先利用该型相机图像序列之间的仿射变换模型,结合相机的实际工作参数,将图像在航向和航侧上的

变换关系近似为平移变换,从理论上验证目标直线边缘交点在这种图像序列配准中的可行性。在此基础上,提出利用图像中目标直线边缘交点进行配准的图像拼接方法,该方法在传统直线边缘特征提取的基础上,通过一定的策略选择包含完整目标信息的图像子区域,并在该子区域中延长目标直线边缘生成用于图像配准的交点。为了降低图像配准的难度,以一幅图像中的目标区域为基准,通过成像重叠率参数估计其在另一幅图像中的粗配准区域。最后用双线性插值法对直线边缘交点精配准后的图像重叠区域进行融合,实现图像的无缝拼接。

1 图像序列变换关系

文中所涉及的某型航侦 CCD 相机结构可见参考文献[10],它通过旋转相机光学转筒获取航侧两边具有一定重叠率的图像序列,通过控制扫描间隔保证航向上的图像重叠率。在这些获取的图像序列中,以像面主点为坐标原点,飞机航向为 x 轴正方向,建立满足右手法则的像面坐标系 $o-xy$; α 、 β 和 γ 分别表示飞机姿态扰动的偏航角、俯仰角和滚动角; θ 、 f 、 V 和 T 分别表示成像扫描倾角、相机焦距、飞机速率和扫描间隔,且令 $\varphi = \theta + \gamma$ 。那么,扰动下的水平图像与其他位置图像之间的关系坐标变换^[11]如公式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} x_h \\ y_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:矩阵 r 表示两幅图像之间的仿射变换;向量 $t = [t_x, t_y]^T$ 表示两幅图像之间的平移变换;下标 h 和 p 分别表示水平像面和倾斜像面上的点坐标; $r(i, j)$ 表示矩阵 r 的第 i 行、第 j 列,矩阵 r 为:

$$r = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\alpha & \cos\beta\sin\alpha \\ -\cos\varphi\sin\alpha + \sin\varphi\sin\beta\cos\alpha & \cos\varphi\cos\alpha + \sin\varphi\sin\beta\sin\alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$t_x = \frac{f}{H} VT - f\sin\beta, t_y = f\cos\beta\sin\varphi \quad (3)$$

相机系统测试结果表明:经相机补偿装置补偿后的俯仰角扰动量 $|\beta| \leq 0.0013 \text{ rad}$,滚动角扰动量 $|\gamma| \leq 0.0013 \text{ rad}$;扫描间隔内的偏航角扰动量 $|\alpha| \leq 0.0048 \text{ rad}$ 。据此,可将矩阵 r 简化为:

$$r = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

由公式(4)可知:图像在航向上的变形可以忽略不计,而在航侧方向上存在微小的伸缩变形。

假设具有直线边缘的航侦目标边缘长度不超过 15 m,根据水平航侦图像摄影比例尺公式:

$$n = \frac{fL}{Hp} \quad (5)$$

式中: f 为相机焦距; L 为目标直线边缘长度; H 为航高; p 为像元尺寸; n 为像元数。并将相机工作参数代入公式(5)可知,直线边缘在图像中的长度不超过 340 个像元。当相机扫描角在 $[0.043, 0.095]$ rad 范围内工作时,根据公式(4)可得该直线边缘的两个端点在图像中伸缩变化最大不超过 1.5 个像元。显然,这对航侦图像拼接精度的影响可以忽略。

综上所述,可将该型相机图像序列之间的变换关系近似为平移变换。此时,如果假设一幅图像中的两条直线交点为 $a(x_1, y_1)$,另一幅图像中对应直线的交点为 $A(x_2, y_2)$,这两点便构成一对配准点对。

2 直线边缘交点提取

根据该型航侦 CCD 相机图像序列之间近似平移变换的特点,在图像拼接的过程选择直线边缘交点作为图像配准的特征点。在直线边缘交点提取的过程中,分图像分割、直线特征提取、特征区域扩展和特征点提取 4 步实现。

2.1 图像分割

在特征提取的过程中,航侦图像重叠区域内像元数多、单像元位宽。为了减少图像拼接数据量、提高拼接速度,在特征提取前,根据一般航侦目标对应的图像大小将图像重叠区域分割为 N 个大小为 101×101 的独立区域。如果用 Π 表示整个重叠区域, Π_i 表示各个独立的区域, $i=1, 2, \dots, N$,则它们之间的关系如下:

$$\Pi_1 \cup \Pi_2 \cdots \Pi_N = \Pi;$$

$$\Pi_i \cap \Pi_j = \emptyset, i, j=1, 2, \dots, N, \text{ 且 } i \neq j$$

由于按重叠率及其波动幅度估算的图像重叠区域不一定是分割区域的整数倍,实际应用中,在保留原图像重叠区域的基础上,以图像重叠边缘为起点,按公式(6)选择用于图像处理的重叠区域。

$$\begin{cases} n_2 = (\lfloor n_1/100 \rfloor + 1) \times 100 \\ m_2 = (\lfloor m_1/100 \rfloor + 1) \times 100 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $n_1 \times m_1$ 表示按重叠率及其波动幅度估算的图像重叠区域大小; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整运算; $n_2 \times m_2$ 表示用于计算的图像重叠区域大小。

2.2 直线边缘特征提取

由于航侦图像中包含丰富的特征信息,如点、边缘和区域等,因此可根据不同航侦图像目标和背景的特点,选择不同的特征实现航侦图像序列的配准。以图像中的目标边缘为研究对象,通过提取目标边缘中的直线边缘为后续图像配准服务。在图像处理的过程中,首先用边缘检测方法中可靠性和定位精度高的 Canny 边缘检测算子^[12]提取图像中的边缘信息,再通过 Hough 变换^[13]提取边缘中的直线边缘。

2.3 特征区域扩展和选择策略

航侦图像中的目标具有多变性,虽然在图像分割时考虑了一般目标的大小,但是不能保证单分割区域中就包含完整的目标信息。因此,在各个分割区域直线提取的基础上,通过一定的策略将包含目标一部分边缘信息的分割区域扩展为包含完整目标边缘的图像子区域,并用该子区域中目标直线边缘的交点作为图像配准的特征点。在区域扩展的过程中,假设规则目标的直线边缘相互垂直。在此基础上,定义区域扩展和选择规则如下:

(1) 区域中至少包含两条线段 l_1 和 l_2 ,且用直线法式描述的 ϕ 角满足 $|\phi_1 - \phi_2| \approx 90^\circ$,则该区域为待定区域;

(2) 以待定区域中两条线段延长线的交点为起点,起点和两条线段上的任一点构成搜索方向;

(3) 在每个搜索方向上的相连区域,如果存在线段 l 满足 l 与 l_1 共线或 l 与 l_2 共线,则该区域与原待定区域构成新的待定区域;

(4) 重复步骤(2)和(3)直至待定区域中至少包含另两条线段 l_3 和 l_4 ,且满足 $|\phi_1 - \phi_3| \leq \Delta_\phi$, $|\rho_1 - \rho_3| \leq \Delta_\rho$; $|\phi_2 - \phi_4| \leq \Delta_\phi$, $|\rho_2 - \rho_4| \leq \Delta_\rho$,则认为该区域为包含完整目标的区域。其中 ρ_i 表示直线到原点的距离, Δ_ϕ 和 Δ_ρ 为设定的阈值。

2.4 特征点提取

根据特征区域扩展和选择策略可获得包含完整目标的子图像区域。在该区域中,通过延长相互垂直的线段即可生成与特征角点近似的特征点。在延长线段产生交点的过程中,为了避免因目标附近存在

与其直线边缘平行的其他直线边缘而产生多个特征点的情形发生,定义同一条线段 l_m 与其他线段延长线的交点分别为 A_1, A_2, \dots, A_n , 如果这些点集中的存在两个交点 A_a 和 A_b , 且由它们构成的线段 $A_a A_b$ 同时满足公式(12)和公式(13), 则这两点为目标的期望直线边缘交点。

$$l_m \subset A_a A_b \tag{12}$$

$$|A_a A_b| = \min |A_x A_y| \tag{13}$$

式中: $x, y \in [1, n]$ 且 $x \neq y$ 。

3 图像拼接

3.1 图像配准

图像配准是以提取到的特征点为基础,在两幅待配准的图像重叠区域寻找匹配点对,并用这些点对的参数求解两幅图像之间的变换参数。结合该型航侦相机的成像特点,在图像配准的过程中,以一幅图像中包含完整目标信息的子图像区域 B_1 为基准。通过图像重叠率参数波动估计出该区域在另一幅图像中对应的子区域 B_2 。按以上特征点提取的方法在 B_2 中提取特征点,并以两个区域中提取到的特征点横坐标和纵坐标大小为配准准则。这样既能减少图像特征提取的处理量,又能提高特征点匹配的准确率。

3.2 图像融合

图像融合是为了消除两幅图像因成像位置、光照度等摄影因数不同而形成的图像差异,形成一幅无缝的拼接图像。由于这里的图像序列变换关系近似于线性变换,选用双线性插值方法^[14]对配准后的图像重叠区域进行融合处理。如果用 f_1 和 f_2 分别表示两幅图像的灰度函数, x_{max} 和 x_{min} 分别表示图像在航向上的灰度最大值和最小值, 则用这种方法融合后的图像灰度函数 f 表示为:

$$f = \alpha f_1(x, y) + (1 - \alpha) f_2(x, y) \tag{14}$$

式中: $\alpha = (x_{max} - x) / (x_{max} - x_{min})$ 。

4 实验结果及分析

以该型相机在某次飞行测试的两幅序列图像为研究对象,图 1(a)和图 1(c)分别为三航道图像序列中的航侧(左侧)图像和与其相邻的水平图像,图 1(b)和图 1(d)分别为根据图像重叠率和波动估计出的两幅图像重叠区域部分。图像拼接的过程中,先在图 1(b)上

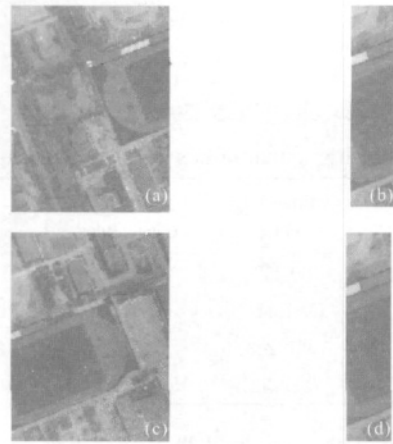


图 1 相邻航侦图像及其重叠区域

Fig.1 Adjacent images and their overlap area

提取包含完整目标的图像区域,结果如图 2(a)所示。图 2(b)为该目标区域上 Canny 边缘检测算子提取出的边缘,图 2(c)为利用 Hough 变换以及直线段延长线交点形成的封闭目标边缘,图 2(d)是按重叠率参数在水平图像上估计出的与图 2(a)匹配的图像区域,图 2(e)是该区域上的 Canny 边缘检测算子处理结果,图 2(f)为

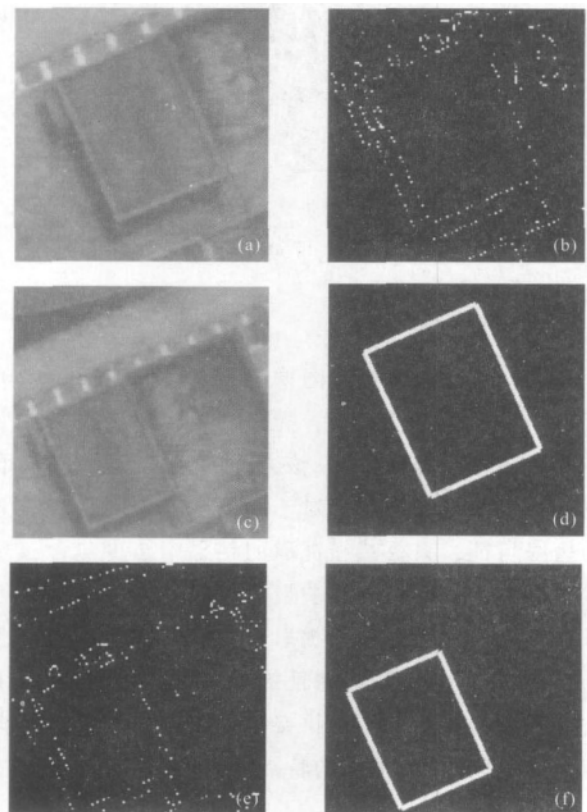


图 2 重叠区域目标提取结果示意图

Fig.2 Diagram of target extract in overlap area

用相同方法提取到的封闭目标边缘。图 2(c)和图 2(f)中的交点参数对应关系如表 1 所示。

表1 直线边缘交点匹配参数

Tab.1 Matching parameters of straight edge nodes

| No. | Oblique edge nodes | Horizontal edge nodes | Matching value |
|-----|--------------------|-----------------------|----------------|
| 1 | (59,111) | (48,254) | (11,-143) |
| 2 | (161,341) | (149,489) | (12,-148) |
| 3 | (335,263) | (324,411) | (11,-148) |
| 4 | (233,33) | (224,176) | (9,-143) |

从表 1 可以看出,通过线边缘交点匹配的值在航向上不超过 3 个像元,航侧上不超过 5 个像元,匹配误差较小。根据该方法实现的图像拼接结果如图 3 所示,拼接的效果表明,这种方法可以满足图像拼接系统的要求。



图 3 图像拼接结果

Fig.3 Result of image mosaic

5 结论

根据某型航侦相机图像序列之间的变换关系可近似为平移变换的特点,提出利用目标直线边缘交点进行图像配准的方法。该方法的原理表明,在提取图像直线边缘特征时,对于图像中处于同一直线上的边缘特征,只要特征提取的结果中至少包含该直线边缘的一段就不会影响最后交点的参数。这样可以极大地弱化边缘特征提取对边缘封闭性和连续性的要求,解决传统边缘特征提取中存在的难点。利用这种方法配准后的图像拼接效果表明,该方法具有特征点提取简单、可靠的特点。

参考文献:

[1] McCartney M I, Zein-Sabatto S, Malkani M. Image

registration for sequence of visual images captured by uav[C]// IEEE Symposium on Computational Intelligence for Multimedia Signal and Vision Processing, 2009: 91-97.

- [2] Liu Ming, Xiu Jihong, Liu Gang, et al. Developments of overseas aerial reconnaissance camera[J]. *Electronics Optics & Control*, 2004, 11(1): 56-59. (in Chinese)
- [3] Sheikh Y, Gritai A, Junejo I, et al. Establishing a common coordinate view in multiple moving aerial cameras [C]// SPIE, 2005: 114-121.
- [4] Gao Yinghui, Shen Zhenkang. Registration and stitching algorithm of aviation swaying image set [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 170-174. (in Chinese)
- [5] Jagannadan V, Prakash M C, Sarma R R, et al. Feature extraction and image registration of color images using Fourier bases [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2005, 16(8): 657-662.
- [6] Li Qiang, Zhang Bo. A fast matching algorithm based on image gray value [J]. *Journal of Software*, 2006, 17(2): 216-222. (in Chinese)
- [7] Ni Weiping, Bian Hui, Yan Weidong. Sequential images mosaic based on interest-point detection and affine transform model [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(3): 330-334. (in Chinese)
- [8] Rezaei-Rad G, Aghababaie M. Comparison of SUSAN and sobel edge detection in MRI images for feature extraction [J]. *IEEE Information and Communication Technologies*, 2006, 18(1): 1103-1107.
- [9] Lee S K, Griffith D, Song N O. An analytical approach to shared backup path provisioning in GMPLS networks [J]. *Proceedings of Milcom*, 2002, 1(1): 75-80.
- [10] Zhang Dexin, Ma Guangfu, Qu Guozhi. A new super-wide-angle aerial reconnaissance CCD camera design [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 46-52. (in Chinese)
- [11] Ma Guangfu, Zhang Dexin, Jiang Xiaonan. A fast image mosaicing method for an aerial reconnaissance camera [C]// Information and Automation (ICIA), 2010: 2306-2309.
- [12] John Canny. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactionos on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [13] Tai Xiangpei. Matlab Image Processing and Interface Program [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 449-450. (in Chinese)
- [14] Huang Yingdong, Li Jie, Fan Ningjun. Aerial image mosaic algorithm of MAV [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(9): 99-104. (in Chinese)