

文章编号: 0253-2239(2009)05-1211-05

# 旋转扫描序列图像的全景图拼接方法

王会峰 刘上乾 汪大宝 卢泉

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 针对火炮身管内表面观测的特殊需求, 考虑到传统的图像拼接方法效率低或精度低的缺陷, 提出了一种硬件和软件相结合的基于旋转扫描序列内表图像的全景拼接方案和图像拼接算法。该方案用步进电机驱动  $45^\circ$  平面反射扫描镜和 CCD 相机同步旋转来实现对等距内表面序列图像的快速获取, 利用获取的序列图像根据步进电机的步进角度完成内表面全景图像的粗级拼接, 即在拼接中首先对步进旋转角度  $\theta$  和图像素距离  $P$  进行标定, 然后根据标定结果选取待配准的子图像区域, 在子图像区域中采用基于相位相关的图像配准方法对图像进行像素级配准, 从而完成对序列图像的精级拼接。为了实现图像的平滑过渡避免出现拼接痕迹, 最后提出了基于人眼视觉特性的高斯函数权值加权图像融合过渡的方法。试验和仿真结果表明: 该方案能够实现内表图像的快速高精度全景拼接, 拼接的精度达到像素级, 拼接时间小于 500 ms, 能够满足内腔表面观测的实时性需求, 非常适合工程实际应用。

**关键词** 图像处理; 全景拼接; 旋转扫描; 序列图像; 相位相关; 标定

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092905.1211

## Panoramic Image Mosaic Method For Rotary Scanning Serial Image

Wang Huifeng Liu Shangqian Wang Dabao Lu Quan

(*Institute of Technology Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China*)

**Abstract** In the light of the special requirement of inner surface observation of cannon barrel and considering the shortage of traditional image mosaic, a kind of panoramic image mosaic method is presented combining hardware and software, which is based on rotated scanning serial inner surface image. In this method, a reflector with  $45^\circ$  angle and synchronous rotation of a CCD camera driven by a step motor are used to get the equidistant serial inner surface images quickly, then the inner surface full image are coarse mosaic according to the step angle based on the serial images. During the mosaic the rotator step angle  $\theta$  and the image pixel distance  $P$  calibrated first, then the sub-district to be matched are chosen according to calibrating, after that the precision matching on sub-pixel degree are implemented based on phase correlation, so mosaic of the serial images is realized in high precision. In order to obtain a smooth transition in full image seam Gaussian functions weighted amalgamation algorithm based on human visual system (HVS) character is used to blend images. Simulation and test shows that the algorithm can generate the seamless full image of the inner surface quickly and in high precision, the mosaic precision can reach sub-pixel and the time consumption is less than 500 ms, which can meet the real-time observation requirement, and suit to engineering application.

**Key words** image processing; panoramic image mosaic; rotary scanning; serial images; phase correlation; calibration

## 1 引 言

火炮内膛性能不仅对评判火炮寿命和安全性有十分重要的作用, 而且可以为火炮设计提供有价值

的参考资料。由于火炮内膛具有照度低、空间小和膛壁反射等特点, 在光学系统的设计中不可能有很大的视场, 同时由于火炮内膛的疵病、挂铜等缺陷不

**收稿日期:** 2008-06-11; **收到修改稿日期:** 2008-12-04

**作者简介:** 王会峰 (1976—), 男, 博士研究生, 从事光电成像与图像处理, 光电测控等方面的研究。

E-mail: conquest8888@126.com

**导师简介:** 刘上乾 (1937—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电成像与图像处理, 红外探测与跟踪、光电对抗等方面的研究。E-mail: sqliu@xidian.edu.cn

仅位置难以预料并且大小各异,给内膛质量的直接观测带来了很大的不便。为了能够直观地观测像机在爬行器行进一步时内表面的全景状态、描绘疵病的完整图像并测出其尺寸,往往需要将多幅相邻的序列内膛表面图像进行拼接。

近年来,人们在全景图拼接方面做了大量的工作,提出了一些有效的方法,但是都存在一定的局限性。目前常用的方法有两大类:一类是基于软件算法的拼接,当前最流行的算法有相位相关度法<sup>[1,2]</sup>、变换优化法<sup>[3]</sup>、基于几何特征的图像对齐<sup>[4,5]</sup>,这些算法的要求高且复杂度很大,为了获得高质量的全景图需要长时间的计算,让人无法忍受;另一类是基于硬件的拼接<sup>[6,7]</sup>,该方法对硬件设备要求高、成本高、拼接精度不太高,但拼接速度快。总之,上述两类方法由于没有考虑到成像的实际特性,存在一定的盲目性和片面性,本文结合实际工程应用创造性地提出了一种软件和硬件相结合的高精度全景图像拼接方法,满足了系统的需求,非常适合于工程实际应用。

## 2 内表面序列图像获取原理

旋转扫描成像系统主要由旋转扫描反射镜、CCD 像机、步进电机、场景照明 LED 阵列、管道爬行以及定中装置构成,如图 1 所示。爬行装置在一次爬行并定中过程中,步进电机带动扫描反射镜和 CCD 摄像机绕管轴以一定的步进角度同步旋转一周,每转一步拍摄一幅内壁图像,当扫描成像系统旋转一定角度后便获得一组无相对旋转序列内表面图像。该成像系统的光路示意图如图 2 所示,CCD 拍摄的图像大小受反射扫描镜大小、CCD 像机视场和孔径角的影响。将 CCD 像机和反射镜同步旋转一周获得的内表面序列图像中相邻的序列图像进行拼接,便可获得环形带的周视全景展开图。

## 3 等步长序列图像快速拼接

要实现对等步长周视序列图像的快速拼接首先要对旋转角位移和像素距离的关系进行标定,在标定的基础上就可以快速的选取相邻两帧图像的特征子图像域,实现图像的快速粗对齐,然后选用适当的算法对这些特征子图像内相邻图像帧进行精匹配。由于粗对齐实现的是硬件标定和子图像区域的选取,大大减小了图像块的遍历像素量,从而实现了相邻图像帧的快速高精度拼接,提高了同等精度下的

拼接效率。

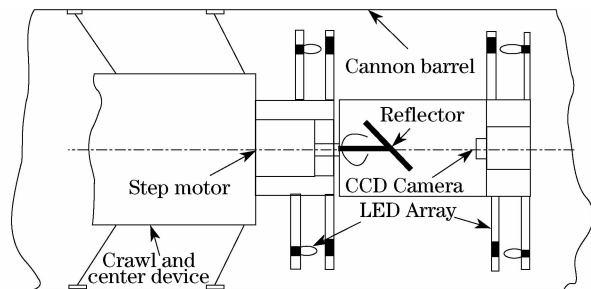


图 1 旋转扫描序列图像获取原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle to obtain rotary scanning serial images

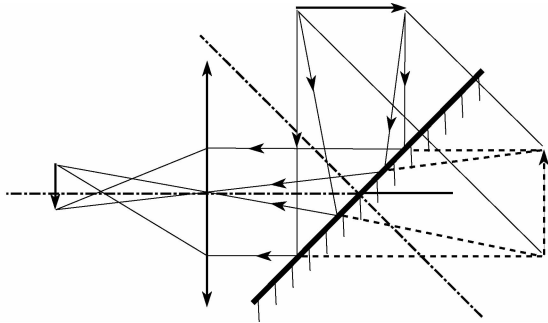


图 2 旋转扫描成像光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the optical layout of imaging

### 3.1 仿射变换模型

通常,从同一视角不同位置拍摄的同一场景的两幅图像之间的关系可以用高等几何的仿射变换理论来描述,仿射变换<sup>[8]</sup>是一种线性变换,可用于场景图扩展的映射和匹配。设参考帧图像 R 和当前帧图像 C 之间满足仿射变换关系,则两帧中对应点  $(x_2, y_2)$  和  $(x_1, y_1)$  满足关系式

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中  $a_{11} = a_{22} = \cos \theta$ ,  $a_{12} = -a_{21} = \sin \theta$ ,  $t_x = \Delta x$ ,  $t_y = \Delta y$ ,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  分别为当前帧相对于参考帧的平移量,  $\theta$  为两帧图像之间的旋转角度。在工程应用中可以根据不同的场合对式(1)中的六个参数简化和近似,通常相邻帧间只有平移,这时仿射变换可以简化为

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}. \quad (2)$$

图像配准和拼接就是以上述仿射变换为基础的。

### 3.2 等步长旋转扫描序列图像的 $\theta - P$ 标定

当序列图像是等角度旋转获得时,其任意 2 幅相邻图像间的拼接距离都相同。因此利用这个拼接距离,可大幅度减小计算量,将剩下的所有图像迅速

拼接起来。设 CCD 相机的焦距保持不变,绕轴线做等角度(设为  $\theta_1$ ) 旋转,间隔相等的距离获得一组序列图像帧,分别记为 1、2、3... ,如图 3 所示。其中  $J_1$  点为第 1 幅图像与第 2 幅图像的拼接点, $J_2$  点为第 2 幅图像与第 3 幅图像的拼接点。将图 3 中第 1、2 幅图像先进行配准(软件拼接),得到拼接点位置  $J_1$  的坐标值。然后计算第 1、2 幅图像左边缘到拼接点  $J_1$  的像素距离  $P_1, P_2$ 。根据上面条件,CCD 摄像头每次绕轴等角度旋转  $\theta_1$  相当于沿着内表面移动了  $\theta_1 \times R = P_1 - P_2$  ( $R$  为管内腔半径)。因此第 2、3 幅图像左边缘到拼接点  $J_2$  的像素距离依然为  $P_1, P_2$ , 依此类推。进而可以在等角度旋转获得的每一幅图像中分别以  $P_1, P_2$  为像素距离在附近截取一些狭长的几个像素的子带作为特征块进行拼接。

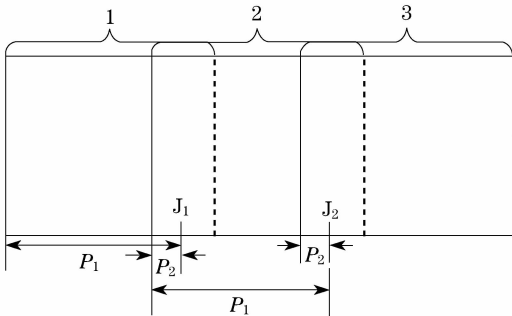


图 3 拼接距离标定示意图

Fig. 3 Sketch map of mosaic pixel distance calibration

### 3.3 基于子图像和相位相关配准

相位相关法最早在 1975 年由 Kuglin 和 Hines 提出,具有场景无关性,能够对纯粹二维平移的图像精确地对齐。它基于二维傅里叶变换的平移性质,由于其较小的计算时间开支而广泛应用在图像全局对齐中<sup>[1]</sup>。一般的图像对齐算法都是基于空间域的,然而相位相关度法是基于频域计算的,两幅图像的平移矢量可以通过它们互功率谱的相位直接计算出来,也就是说,相位相关是基于互功率谱的相位估计的。

设  $f_1(x, y)$  和  $f_2(x, y)$  表示空间平移相关的两幅离散图像,即  $f_1(x, y) = f_2(x - x_0, y - y_0)$ , 则图像的二维离散傅里叶变换(DFT)为

$$F(\xi, \eta) = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\xi x / M + \eta y / N)},$$

其中  $F(\xi, \eta)$  是复变函数; $\xi, \eta$  是频域变量; $x, y$  是空域变量。二维离散傅里叶逆变换(IDFT)为

$$f(x, y) = \sum_{\xi=0}^{M-1} \sum_{\eta=0}^{N-1} F(\xi, \eta) e^{-j2\pi(\xi x / M + \eta y / N)}.$$

据互功率谱相关知识,相应的傅里叶变换  $F_1$  和  $F_2$

也是相关的,即  $F_2(\xi, \eta) = e^{-j(\xi x_0 + \eta y_0)} F_1(\xi, \eta)$ 。两幅图像  $f_1$  和  $f_2$  的归一化互功率谱用相应的傅立叶变换  $F_1$  和  $F_2$  表示时,相位相关的公式如下:

$$\frac{F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)}{|F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)|} = e^{-j(\xi x_0 + \eta y_0)},$$

$$\xleftrightarrow{\text{IFT}} \delta(x - x_0, y - y_0) \quad (3)$$

其中  $F^*$  表示  $F$  复数的共轭,位移位置是在  $(x_0, y_0)$ 。式(3)左边是归一化互功率谱,归一化功率谱的傅立叶反变换是互相关的。归一化互功率谱的结果是简单复指数,即相位差。相位差的傅里叶反变换是在平移运动上的  $\delta$  脉冲,因此只要检测(3)式 DFT 结果的最大值位置就可以获得两幅图像的平移量,即可以获得两幅图像的对齐点,并且相位相关算法具有较高的匹配精度。此外,还由于相位相关函数对于灰度值及其尺度的变化不敏感,所以这种算法不易受这些误差因素影响。

在求出后续图像的拼接点位置后,可以将剩下的所有图像一起拼接起来。即除第 1 个拼接点  $J_1$  (初始拼接点)需要用软件拼接(匹配)法获得外,其余的拼接点均可用简单的数学计算完成,从而大幅度提高了拼接速度,能够满足工程上快速实时性的要求。

## 4 图像融合和平滑过渡

由于光照条件和曝光时间的不同,使采集的图像在亮度上会有较大的差别,因此在图像的缝合线处会产生亮度的突变现象,这将影响生成的全景图的效果。重叠区域平滑过渡的方法是对相邻图像重叠区域局部光强的逐渐过渡,该方法使图像融合<sup>[9]</sup>结果更加平滑流畅。

设平滑前有

$$P(x, y) = \begin{cases} I_L(x_1, y_1) & (x_1, y_1) \in I_L \\ I_R(x_2, y_2) & (x_2, y_2) \in I_R \end{cases}, \quad (4)$$

其中  $I_L(x_1, y_1), I_R(x_2, y_2)$  分别为待融合图像区域点  $(x, y)$  像素的值; $(x_0, y_0)$  代表两幅图像的平移矢量(图 3 中  $P_1 - P_2$ )。 $(x_1, y_1) = (x_2 + x_0, y_2 + y_0)$  则为融合平滑后该点像素的值

$$P(x, y) = \varphi(x, y) I_L(x_1, y_1) + [1 - \varphi(x, y)] \cdot I_R(x_2, y_2), (x, y) \in I_L \cap (x, y) \in I_R \quad (5)$$

其中  $\varphi(x, y), 1 - \varphi(x, y)$  分别为重叠像素点对应  $I_L, I_R$  的权值。为了使得图像在水平和垂直方向上均能平滑过渡,加权系数  $\varphi$  采用基于人眼视觉特性(HVS)的高斯函数,一维和二维高斯函数分别定义为

$$G_{\sigma}(x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right], \quad (7)$$

其中  $\sigma$  对平滑性有重要的影响,它反映了平滑的程度。对  $\sigma$  的设置参照融合区域的频率分析,详见相关参考资料。

采用这种函数加权的过渡区图像融合算法保证了图像逐渐过渡,消除了接缝处的明显界限。

### 5 试验与仿真

试验分别在平移当量平台和旋转扫描平台上进行,平移当量平台的移动距离为 25 mm、精度  $\pm 0.1$  mm,旋转平台旋转角度是  $30^\circ$ 、精度  $\pm 0.45^\circ$ 。CCD 像机采用 WAT902HS,焦距  $f=6$  mm,序列图像分辨率为  $470 \times 740$ ,所观测火炮内表面内径大小为 105 mm。采集的序列图像采用 CPU 为 P4-2.8 GHz,内存 512 MB 的计算机在 VC++6.0 平台上开发实现仿真。试验结果表明:在平移平台上当标定拼接距离  $P < 370$  pixel 时拼接效果较好,在实际条件下拼接一幅内表面全景图像时间小于 500 ms,

能够达到测量中的实时观测的要求。图 4 为在平移当量平台上采集的一组序列图像,图 5 为对图 4 实施拼接后的全景图像(考虑到篇幅,图中都作了相应缩小)。图 6 是旋转平台上获取的一组特殊环境内表面图像,图 7 为采用文中算法拼接的结果。

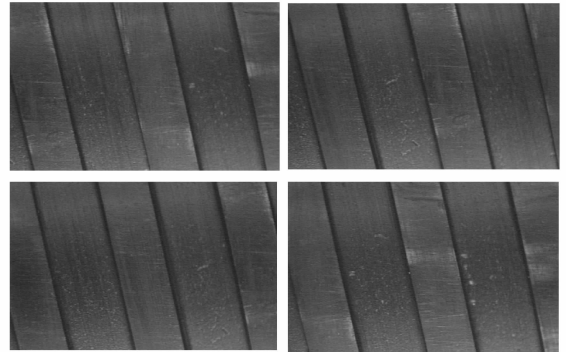
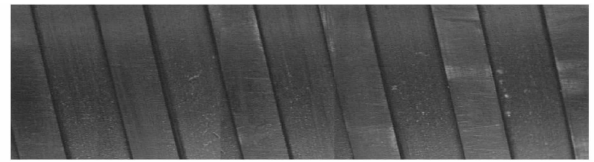
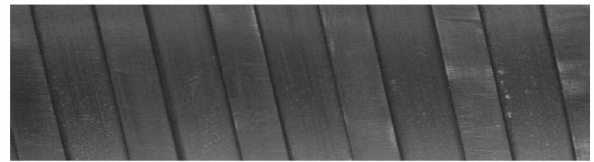


图 6 特殊环境获取的旋转扫描序列帧

Fig. 6 Rotary scanning serial images obtained in special environment



(a) Mosaic image of special images without fusion



(b) Mosaic image of special images after fusion

图 7 特殊扫描序列图像全景拼接图

Fig. 7 Panoramic image of special rotated scanning serial images

### 6 结 论

针对特殊环境下火炮内表面观测的特殊需求,设计了一套旋转扫描序列的内表面全景图像观测装置,重点分析了旋转扫描序列图像的拼接方法,为了满足系统实时显示的需求,提出了一种基于硬件和软件相结合的全景图像拼接方法,论述了拼接中的标定、图像配准和过渡区图像融合平滑等问题。试验结果表明该系统能够在规定的时间内完成火炮内表面特殊图像的全景拼接,且拼接精度高、速度快,适合于工程实际应用,同时也为同类问题提供了一种可以参考的解决方案。

### 参 考 文 献

1 B. S. Reddy, B. N. Chatterji. An FFT based technique for



图 4 平移当量序列图像

Fig. 4 Serial images with equal translational motion



(a) Mosai cimage of figure 4 without fusion



(b) Mosaic image with fusion based on human vision character

图 5 平移当量平台图像全景拼接图

Fig. 5 Mosaic image based on plat with equal translational motion

- translation, rotation, and scale invariant image registration[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1996, **5**(8):1266~1271
- 2 Hongjie Xie *et al.*. Automatic image registration based on FFT algorithm and IDL/ENVI [C]. *International Conference on Remote Sensing and GIS/GPS, ICORG*, 2000, 1:391~402
  - 3 R. Szeliski. Video mosaics for virtual environments[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1996, **16**(2):22~30
  - 4 Thierry Blaszk, Rachid Deriche. Recovering and characterizing image features using an efficient model based approach [C]. *Technical Report 2422*, INRIA, November 1994
  - 5 Bao P., Xu D. Complex wavelet-based image mosaics using edge preserving visual perception modeling [J]. *Computers and Graphics*, 1999, **23**(3):309~321
  - 6 Chen Shizhe, Hu Tao, Liu Guodong *et al.*. Fast and precision image mosaic based on grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **2**(14):242~246  
陈世哲, 胡涛, 刘国栋等. 基于光栅的快速精确图像拼接[J]. *光学精密工程*, 2006, **2**(14):242~246
  - 7 Fan Q W, Wang X L, Hou L *et al.*. Speeding mosaic technology based on isometry serial image [J]. *Journal of Sichuan University* (Engineering science edition), 2005, **37**(1):139~142  
樊庆文, 王小龙, 侯力等. 基于等距序列图像的快速拼接技术[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2005, **1**(36):139~142
  - 8 Mei X M, Liu Z X, Wang H C *et al.*. *Advanced Geometry (second edition)*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000  
梅向明, 刘增贤, 王汇淳等. *高等几何(第二版)*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
  - 9 Ye Chuanqi, Miao Qiguang, Wang Baoshu. An image fusion algorithm using region segmentation and contourlet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **3**(28):447~453  
叶传奇, 苗启广, 王宝树. 基于区域分割和 Counterlet 变换的图像融合算法[J]. *光学学报*, 2008, **3**(28):447~453
  - 10 Liu Guixi, Liu Dongmei, Liu Fengpeng *et al.*. A Robust image registration algorithm based on feature points matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3):454~461  
刘贵喜, 刘冬梅, 刘凤鹏等. 一种稳健的特征点配准算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3):454~461
  - 11 Hu Shejiao, Ge Xiwang, Su Ling. Panoramic image mosaic based on domain correlation[J]. *J. Hefei University of Technology*, 2007, **30**(1):29~32  
胡社教, 葛西旺, 苏菱. 基于相位相关的全景图像拼接[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2007, **30**(1):29~32
  - 12 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):792~796  
李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6):792~796
  - 13 Jing Genqiang, Zhang Tianxu, Yang Weidong *et al.*. Local adaptive mosaic algorithm for serial images[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(6):622~625  
荆根强, 张天序, 杨卫东等. 局部自适应序列图像拼接[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(2):622~625
  - 14 Xie Kai, Gou Hengye, Tian Wen. A survey of image mosaics [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **32**(4):630~635  
解凯, 郭恒业, 田文. 图像 Mosaics 技术综述[J]. *电子学报*, 2004, **33**(2):630~635
  - 15 Z. Barbara, F. Jan. Image registration methods: a survey[J]. *Image and Vision Computing*, 2003, **21**(6):977~1000.