

文章编号 1004-924X(2010)10-2221-10

# 火炮身管疵病深度测量系统

曾朝阳<sup>1</sup>, 赵继广<sup>2</sup>

- (1. 装备指挥技术学院 光电装备系, 北京 101416;
2. 装备指挥技术学院 航天装备系, 北京 101416)

**摘要:**为了准确获取火炮身管疵病深度参数,提出了一种新的基于等效多基线立体成像的疵病深度测量方法,并采用单摄像机建立了疵病深度自动测量系统。首先,对摄像机采用 Tsai 两步法进行标校。接着,采用等效多基线立体成像法获取疵病图像。在此基础上,利用标校数据和图像的位置参数,通过疵病特征提取和疵病图像立体匹配处理,获取疵病深度图像的输出生,从而得到准确的疵病深度值,实现对火炮身管疵病深度参数的精确测量。测试结果表明:该疵病测量系统得到的疵病深度测量绝对误差 $<0.1$  mm,相对误差 $<5\%$ ,完全满足火炮身管疵病深度测量的需要,能够为火炮鉴定试验和伴装保障提供重要的技术支持。

**关键词:**火炮身管;疵病;深度测量;立体成像;图像匹配

**中图分类号:** TJ306; TP391    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/OPE.20101810.2221

## Measuring system of flaw depth of gun barrel

ZENG Zhao-yang<sup>1</sup>, ZHAO Ji-guang<sup>2</sup>

- (1. *Department of Optical and Electrical Equipment, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China*; 2. *Department of Space Equipment, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China*)

**Abstract:** In order to accurately obtain flaw depth parameters of a gun barrel, a new flaw depth measurement method based on the equivalent multi-baseline stereo imaging is proposed, and an automatic measurement system for the flaw depth is established in this paper. The Tsai two-step method is used to calibrate the camera, and the equivalent multi-baseline stereo imaging methods are taken to obtain the flaw image. On the basis of the above, this system extracts the image features and realizes the stereo matching processing according to the calibration data and location parameters. Then, it obtains the precise flow depth value and implements the accurate measurement of flaw depth parameters of the gun barrel. The test results show that the measuring absolute error of this flaw depth measuring system is less than 0.1 mm, and the relative error is less than 5%. These results can meet the need of the gun barrel for flaw depth measurement, and can provide an important technical support for the identification testing.

**Key words:** gun barrel; flaw; depth measurement; stereo imaging; image matching

收稿日期:2009-12-09;修订日期:2009-12-23.

基金项目:国家 502 工程资助项目(No. 200207193)

## 1 引言

火炮是重要的武器装备,而身管是火炮的重要组成部分。身管的工作条件极为恶劣和苛刻,尤其是其内膛,不仅要承受高温高压火药燃气的高温、冲刷和化学作用,还要承受高速运动弹丸的摩擦作用,致使身管会产生多种疵病。研究和实践表明,随着身管射击弹数的累积,内膛的烧蚀磨损量不断增加,将导致膛压下降,弹丸初速降低,从而引起弹丸在膛内运动摆动、飞离炮口起始扰动增大、射向偏移、弹丸飞行不稳定、弹着点散布变大等现象的发生。

在众多火炮身管内膛疵病中,有些疵病如阳线磨损、机械划伤、小烧蚀网等,即使长度、面积比较大,对于火炮的性能和安全性也不会造成严重影响;而有些疵病如阳线断脱、烧蚀沟、龟裂、冲凹等,即使面积不大,当达到一定深度时也会对火炮的结构完整性、刚度和强度造成严重影响,而且疵病越深,其扩展速度越快。如果不能及时准确地对疵病做出判断和处理,可能会导致炮弹卡滞、膛炸、弹道偏离等现象的发生,对火炮的使用安全和射击精度造成重大影响。并且随着高膛压、高初速新型火炮的出现,这类疵病的影响和危害程度越发严重。因此,及时准确地获取疵病的深度信息显得尤为重要。

国军标 GJB2977A-2006 对身管疵病的检测项目虽然有疵病深度的检测要求,但对检测标准、精度和方法都没有具体要求<sup>[1]</sup>。目前,试验鉴定单位普遍采用塑泥将疵病形状拓下再利用其它工具完成测量。由于火炮身管狭长,使其检测非常困难且测量精度完全取决于拓块质量的好坏;因此,火炮的研制和使用部门曾尝试用超声波、涡流等方法对身管内壁疵病深度进行定量检测,但由于膛膛空间、疵病成因、形状尺寸等方面的制约,检测效果均不太理想。2003 年前后,北京跟踪通讯技术研究所应用激光投影法设计了一种检测系统<sup>[2]</sup>,理论上它的测量精度非常高,但它的工程实现难度比较大,限制其投入实用的难点比较多,因此至今尚未见投入实际应用。

本文根据火炮内膛的结构特点,研制了一套

火炮膛内疵病检测系统,采用等效多基线立体成像方法,在利用单摄像机获取疵病图像的同时精确定位图像在身管中的位置,然后在对疵病图像进行疵病特征提取的基础上完成了疵病图像的立体匹配,从而获取疵病的深度图像输出,得到疵病的深度值。

## 2 摄像机标校及图像采集

立体视觉的目的之一就是根据采集的二维图像恢复三维物体的几何信息,而物体表面某点的三维几何位置与其在图像中对应点之间的相互关系,是由摄像机成像的几何模型决定的,这些几何模型参数被称为摄像机参数。这些参数往往需要通过实验、计算等方法才能得到,确定参数的过程称为摄像机定标,它是立体视觉中一项基本而又重要的工作。

传统的摄像机定标方法可以分成四类。第一类是最优化算法,其典型代表是 Faig<sup>[3]</sup>的方法,该算法计算量非常大,它的简化方法是由 Karara 等人提出来的,被称为直接线性变换方法,但该算法在使用广角镜头或近距成像时误差比较大;第二类是利用透视变换矩阵的定标方法<sup>[4]</sup>,该类方法的优点是不需利用最优化方法求解,运算速度快,能够实现实时定标,在工程实际中得到了广泛应用;第三类称为两步法,它是由 Tsai 首先提出的<sup>[5]</sup>,由于该算法在保证定标精度的同时大大缩短了定标时间,从而成为了最常用的方法之一;第四类是双平面定标方法,它是由 Martins 等人首先提出的<sup>[6]</sup>,其缺点是需要求解的未知参数比较多,存在过分参数化的倾向。

在对火炮进行检测时,只需要对摄像机进行一次定标,要求的定标速度并不高,但对疵病深度测量精度的要求却非常高,因此,与之密切相关的定标精度自然是越高越好。所以,本课题组侧重考虑了定标精度的要求,在采用针孔模型的基础上,基于定标精度、实现难度、算法复杂程度的折衷考虑,选用了 Tsai 的两步法进行定标<sup>[7]</sup>,具体步骤如下:

(1)将待定标摄像机放于三角架上,将由圆点图案组成的靶标固定在导轨上,调整导轨方向与

摄像机光轴平行。同时,调整摄像机高度,使其中心与靶标中心在同一水平线上,如图 1(a)所示。

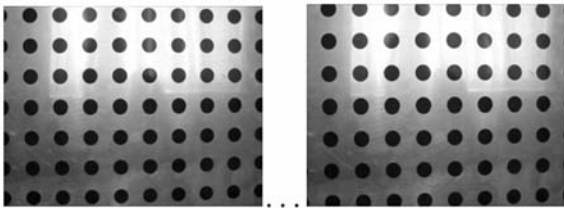
(2)采集当前靶标图像  $I_1$ ,经图像处理,获得靶标上各圆孔中心在计算机坐标系下的坐标,得到第一组定标实验数据。

(3)将靶标向前移动距离  $d$ ,获取靶标图像  $I_2$ ,经处理后得到第二组定标实验数据。类似地,将靶标移动  $N$  次,获得 5 组定标实验数据,靶标图像如图 1(b)所示。



(a)圆靶标定图

(a)Camera calibration test



(b)圆靶标图像

(b)Test images from circular targets

图 1 摄像机圆靶标定实验及靶标图像

Fig. 1 Camera calibration test and circular targets

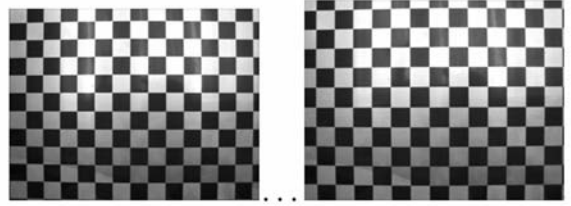
(4)将由正方形图案组成的靶标放在导轨上(如图 2(a)所示),重复步骤(2)、(3),得到另外 5 组标定实验数据,靶标图像如图 2(b)所示。

(5)利用 Tsai 的径向排列约束(Radial Alignment Constraint, RAC)定标算法,处理获得的实验数据得到了定标结果,如表 1 所示。



(a)方形靶标定图

(a)Camera calibration test



(b)方形靶标图像

(b)Test images from square targets

图 2 摄像机方形标定实验及靶标图像

Fig. 2 Camera calibration test and square targets

表 1 摄像机定标结果

Tab. 1 Measuring results of camera calibration (mm)

参数名称	参数值		
	圆靶标定实验	方形标定实验	
有效焦距 $f$	16.214 603	16.197 853	
畸变系数 $k$	-0.000 006	-0.000 008	
旋转矩 阵 $R$	$r_1$	0.999 879	0.999 913
	$r_2$	-0.000 203	-0.000 247
	$r_3$	0.005 746	0.005 775
	$r_4$	0.000 202	0.000 247
	$r_5$	0.476 650	0.475 489
	$r_6$	0.873 251	0.873 420
	$r_7$	-0.002 917	-0.002 784
	$r_8$	-0.873 247	-0.873 413
	$r_9$	0.476 640	0.475 476
平移矢 量 $T$	$T_x$	-100.370 695	-99.703 876
	$T_y$	0.871 247	0.871 265
	$T_z$	-103.767 549	-103.843 195

实验结果表明,应用上述方法可以实现摄像机的现场定标,且定标精度较高,在测试系统应用中获得了满意效果。

当摄像机完成定标后,将测量系统与运动执行机构固接后从药室塞入身管进行疵病图像采集。由于火炮身管空间狭小、内部结构复杂、照度低,为了保证采集图像的照度均匀、强度适中,本课题组选用了亮度可调的白光 LED 阵列作为照明光源。在采集图像前,首先调节光源亮度,避免图像过亮或过暗。当光照射到火炮内膛壁时被反射,反射光经平面反射镜折射进入 CCD 相机,即可获得图像。当运动执行机构保持轴向静止时,通过控制平面反射镜的旋转,即可得到该位置内膛壁的整周图像;当平面反射镜保持静止时,通过控制运动执行机构在轴向的移动,可实现多基线立体成像,其等效图像采集示意图如图 3 所示。

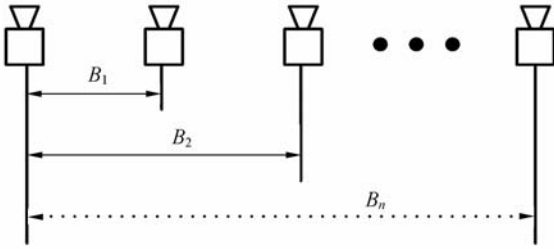


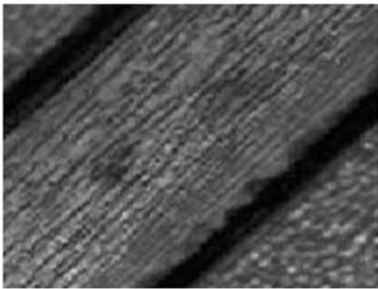
图 3 等效多基线立体成像采集示意图

Fig. 3 Diagram of equivalent multi-baseline stereo imaging acquisition

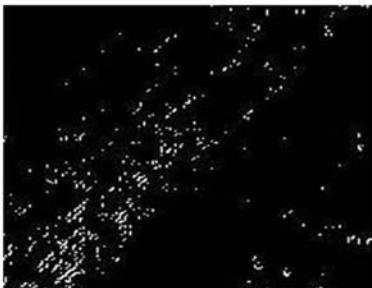
### 3 疵病特征提取

根据图像之间的视差确定 3D 信息,其关键是确定场景中同一目标点在不同图像中的对应关系,这需要选择合适的图像特征进行匹配。一般地,图像数据包含点状特征、线状特征、区域特征以及整体特征等不同层次的特征,准确地提取场景特征才能实现特征匹配,进而获得疵病深度的信息。

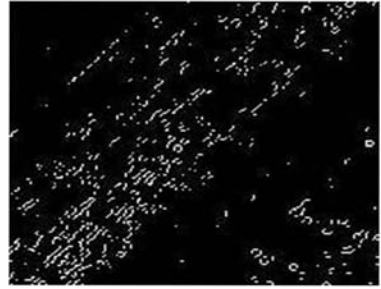
传统边缘检测算法主要是利用一阶导数、二阶导数的取极值规律,对图像中的某个小邻域构造检测算子<sup>[8]</sup>。常用的基于一阶导数的算法有门



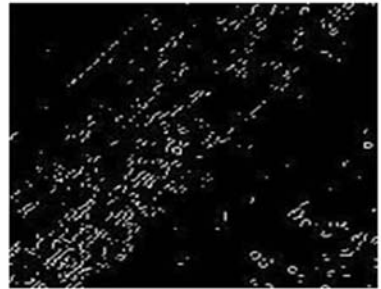
(a) 烧蚀网疵病图  
(a) Flaw image



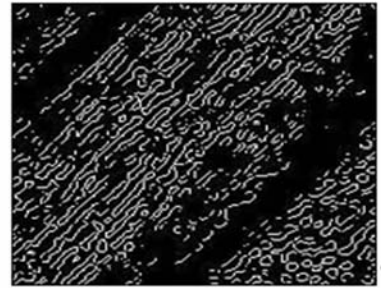
(b) Roberts 算子  
(b) Roberts operator



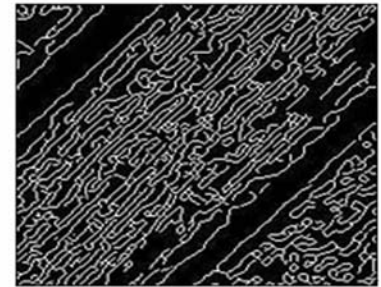
(c) Sobel 算子  
(c) Sobel operator



(d) Prewitt 算子  
(d) Prewitt operator



(e) LoG 算子  
(e) LoG operator

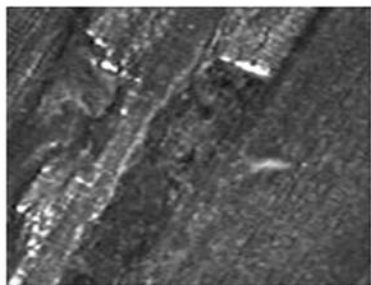


(f) Canny 算子  
(f) Canny operator

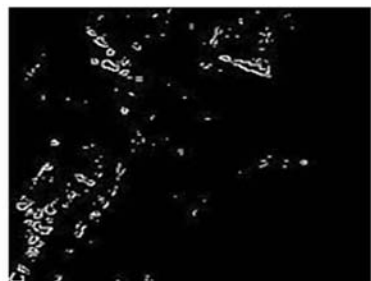
图 4 由不同算法实现烧蚀网疵病图像的边缘检测  
Fig. 4 Edge detection of erosion flaw image by different algorithms

限法、Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子等。随着现代数学的发展,许多新型的边缘检测算法得到了推广应用,主要包括 Canny 边缘检测<sup>[9]</sup>、数学形态学边缘检测<sup>[10]</sup>等。为了选择一种适合本测量系统的边缘检测算法,分别利用 Roberts、Sobel、Prewitt、LoG 以及 Canny 算子对烧蚀网、阳线断脱两种疵病图像进行了处理,实验结果分别如图 4 和图 5 所示。

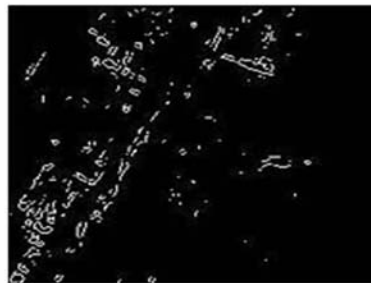
由图可以看出:Roberts 算子提取的边缘不完整,有相当一部分没有检测出来,且检测出来的部分连续性不好;Sobel 算子和 Prewitt 算子检测的结果非常相似,能够较全面地检测出边缘,但边缘不够细锐,定位精度不高;LoG 算子能检测出很多细微的变化,且边缘较细,位置较准确,但产生了一些虚假边缘;Canny 算子相比其他算子检测效果最好,能检测出比较完整、连续、精确的边缘,其原因在于使用两个不同的阈值分别检测强边缘和弱边缘,只有当弱边缘与强边缘相连时,才将弱边缘检测出来。根据边缘检测效果对比,最终选用 Canny 算子作为本系统的边缘检测算子。在提取出边缘点集之后,剔除一些离散边缘点,填补一些间断边缘点,将边缘连接成闭合曲线,从而完成特征提取。



(a) 阳线断脱疵病图  
(a) Flaw image



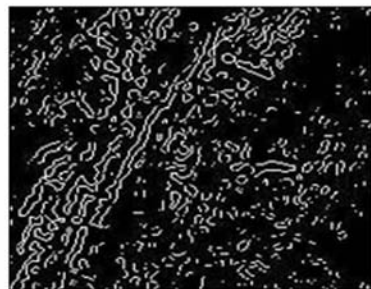
(b) Roberts 算子  
(b) Roberts Operator



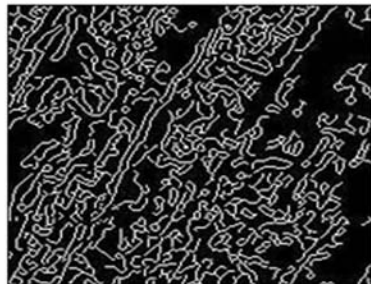
(c) Sobel 算子  
(c) Sobel Operator



(d) Prewitt 算子  
(d) Prewitt Operator



(e) LoG 算子  
(e) LoG Operator



(f) Canny 算子  
(f) Canny Operator

图 5 由不同算法实现阳线断脱疵病图像的边缘检测  
Fig. 5 Edge detection of land flaw image by different algorithms

## 4 疵病图像立体匹配

立体匹配就是根据对所选特征的计算,建立特征间的对应关系,将同一空间的景物在不同图像中的映象点联系起来,并由此得到相应的视差图。它不同于通常意义上的图像模板匹配,因为立体匹配是在存在视点差异、几何畸变、噪声干扰等情况下的图像间进行的,不存在任何标准模板。因此,立体匹配成为深度测量中最重要,也是最困难的工作。

立体匹配过程首先是在两个或多个点集中寻找对应关系,进而求取各点处的视差;然后,根据视差信息和投影模型恢复场景的高程信息。当成像模型已知时,可直接根据对应点的视差信息恢复场景的三维描述<sup>[11]</sup>。

根据匹配基元的不同,现有的立体匹配方法可以分为三类:区域匹配、特征匹配和相位匹配。尽管人们针对上述三种基本匹配算法的不足提出了很多改进算法<sup>[12-14]</sup>,但立体匹配属于典型的“病态”计算问题的本质没有改变。于是,人们试图加入一些约束条件将“病态”问题转化为“良态”问题,常用的约束有外极线约束、一致性约束、唯一性约束、连续性约束和相容性约束<sup>[15]</sup>。

假设场景中同一物点在两个不同图像中的投影点与像面中心的距离分别为  $x_l'$  和  $x_r'$ ,则双目视觉视差计算公式为

$$d = x_l' - x_r' = B \frac{F}{z}. \quad (1)$$

由上式可知,对于给定的物距  $z$  和焦距  $F$ ,视差  $d$  与基线长度  $B$  成正比。基线长度越大,视差计算精度越高,需要搜索的视差范围也越大,当场景中存在重复特征或周期模式时,误匹配的概率也会相应增大。Okutomi 和 Kanade 提出的多基线立体匹配可以较好地解决这一问题<sup>[16]</sup>。

多基线立体视觉是采用三个或三个以上的摄像机,也可用一个相机沿着某一方向在多个位置采集图像。令其中的一个为参考相机,它所获取的图像称之为参考图像,每增加一个相机(或图像采集点)就可以和参考相机之间构成一个双目视觉对。显然, $n$  个相机(或视点)可构成  $n-1$  个双目视觉对,基线长度为  $B_i (i=1, 2, \dots, n-1)$ 。沿着外极线方向计算各个视觉对的 SSD 曲线,将各

个视觉对所得的 SSD 曲线相加得到 SSSD(Sum of SSD)曲线,该曲线上的极小值点就对应于所求的匹配点的位置。然后根据匹配点的位置可以得到该点到相机的距离,从而获得三维的距离值,多基线立体匹配具有消除重复纹理图像匹配模糊性的特点。

由于火炮内膛空间狭小,只能采用单相机完成测量。假设相机沿垂直于光轴的水平线移动(如图 3 所示),在点  $P_0, P_1, \dots, P_n$  采集一系列图像  $f_i(x, y), i=0, 1, \dots, n$ ,从而得到一系列立体图像对,基线长度分别为  $B_0, B_1, \dots, B_n$ 。

根据式(1),在点  $P_0$  采集的图像与在点  $P_i$  采集的图像之间有视差

$$d_i = B_i \frac{F}{Z}, i=0, 1, \dots, n. \quad (2)$$

因为这里只考虑水平方向,可将图像函数  $f_i(x, y)$  用  $f_i(x)$  表示,则在各个位置得到的图像可以表示为:

$$f_0(x) = f(x) + n_0(x), \quad (3)$$

$$f_i(x) = f(x - d_i) + n_i(x). \quad (4)$$

其中,  $n_0(x), n_i(x) \sim N(0, \sigma_n^2)$ 。在图像  $f_0(x)$  的窗口  $W$  中,像素点  $x$  处的视差方差和定义为

$$e_{d_i}(x, \hat{d}_i) = \sum_{j \in W} [f_0(x+j) - f_i(x+\hat{d}_i+j)]^2 \quad (5)$$

其中,  $\hat{d}_i$  是位置  $x$  处的视差估计值。由于 SSD 的度量  $e_{d_i}(x, \hat{d}_i)$  是一个随机变量,从而可以通过计算它的期望值分析其性质:

$$E[e_{d_i}(x, \hat{d}_i)] = E\left\{ \sum_{j \in W} [f(x+j) - f(x+\hat{d}_i - d_i + j) + n_0(x+j) - n_i(x+\hat{d}_i + j)]^2 \right\} = \sum_{j \in W} [f(x+j) - f(x+\hat{d}_i - d_i + j)]^2 + 2N_w \sigma_n^2$$

其中,  $N_w$  为窗口内点数。上式表明,当  $\hat{d}_i = d_i$  时,  $e_{d_i}(x, \hat{d}_i)$  取极小值,即有正确的视差。

当场景中出现周期模式时,不确定性问题出现,即使利用多基线也无法消除。于是,引入倒距离  $\zeta = 1/z$  和 SSSD 函数,最终通过计算包含倒距离的 SSSD 值消除由周期模式引起的不确定性问题,示意图如图 6 所示。

然而,该方法也具有一定的局限性,表现之一就是窗口大小为固定值。当窗口相对实际需要偏小时,不能覆盖足够的灰度范围,导致图像信噪比偏低,视差估算精度下降;当窗口相对实际需要

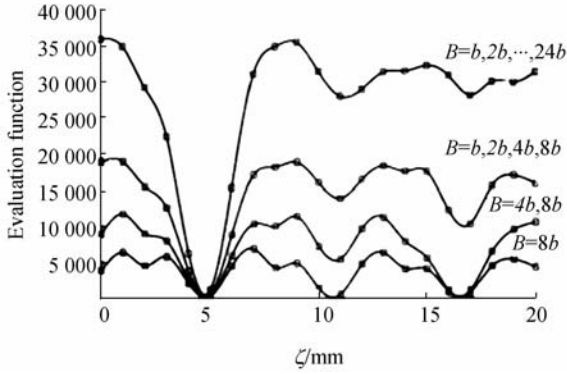


图 6 多基线立体图像对合成示意图

Fig. 6 Synthetic diagram of multi-baseline stereo image pairs

偏大时,覆盖区域场景点的深度发生变化,导致最大相关点或最小 SSD 点有可能偏离正确的匹配位置。针对这一局限性,Kanade 和 Okutomi 提出了基于自适应窗口的立体匹配算法<sup>[17]</sup>。另外一个局限性就是当场景中连续多个局部最小值时,上述方法很难找到正确的匹配位置,Jeon 等人提出了鲁棒的立体匹配算法,较好地解决了这一局限性<sup>[18]</sup>。

总体而言,火炮内膛疵病图像立体匹配的条件较差,主要表现在以下几方面:一是图像存在畸变,二是图像中存在重复特征,三是存在连续多个局部最小值,四是受噪声的干扰。因此,设计一种立体匹配算法能够抑制甚至消除上述不利因素非

常关键。

在综合现有算法优点的基础上,本文提出了适用于本测量系统的多基线立体匹配算法,基本流程如图 7 所示。

### 5 疵病深度图像输出及测量结果

由于立体匹配的结果是三维信息,而计算机视觉一般只能表示二维信息,需要一种策略实现由三维信息到二维信息的转换。目前,大部分学者倾向于采用深度图表示立体匹配的结果,具体就是将深度值映射到对应的灰度空间 0~255 中,使得每个像素点包含的信息不是灰度值,而是每个像素点处的深度值。深度值越大,其映射值越接近 255,灰度值越高。这样,就巧妙地以二维图像的形式表达了三维信息,具有占用空间小、计算速度快的优点,在一些实时性要求较高的场合得到了广泛应用。

因为基于特征的立体匹配算法只能恢复出图像中特征点处的视差值,为了恢复景物表面的完整信息,必须追加一个视差表面内插重建过程。通过对离散数据进行插值,得到不在特征点处的视差值。插值之后,疵病深度变连续,即可输出深度图,获取疵病的深度信息。

为了验证所提算法的可行性,对一根 120 mm 口径的迫榴炮身管分别选取不同长度的基线进行了实验。首先以  $b_1=3$  mm 为基线采集 6 幅疵病图像,然后以  $b_2=5$  mm 为基线采集 4 幅疵病图像,分别如图 8 和图 9 所示。按照上述算法得到的深度图像分别如图 10(a),(b)所示。

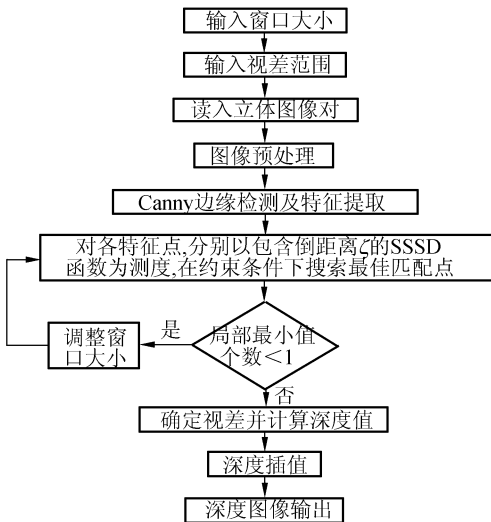


图 7 多基线立体匹配示意图

Fig. 7 Flowchart of multi-baseline stereo image matching

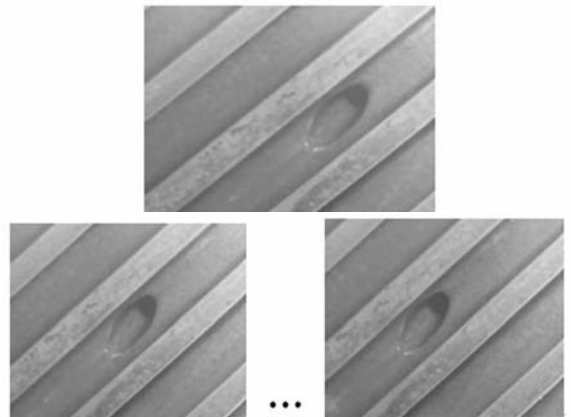


图 8 基线  $b_1=3$  mm 时的疵病图像

Fig. 8 Flaw image when baseline  $b_1=3$  mm

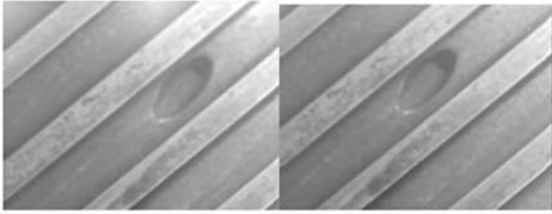
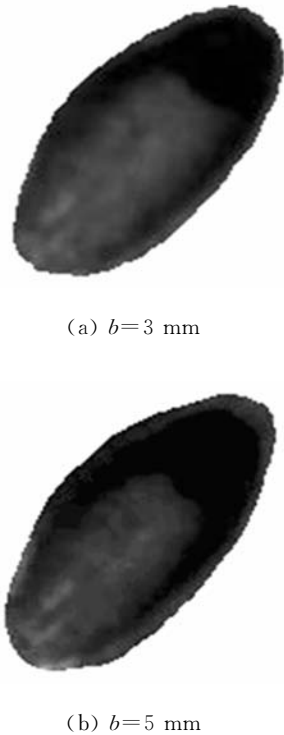
图 9 基线  $b_2 = 5$  mm 时的疵病图像Fig. 9 Flaw image when baseline  $b_1 = 5$  mm(a)  $b=3$  mm(b)  $b=5$  mm

图 10 恢复的疵病深度图像

Fig. 10 Restored flaw depth image

根据倒距离的定义可知,  $d_i = B_i F \zeta$ 。由此可得错误的倒距离  $\zeta_f$  为:

$$\zeta_f = \zeta + \frac{a}{B_i F}, \quad (6)$$

上式中  $\zeta$  为真实的倒距离,  $a$  为常数。由于匹配位置的正确度取决于  $\zeta_f - \zeta$  的大小, 因此当  $a$  和  $F$  不变时, 基线长度  $B_i$  越长则  $\zeta_f - \zeta$  越小, 匹配位置越精确, 测量精度越高。

## 参考文献:

- [1] 总装备部. GJB 2977A-2006 火炮静态检测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.  
General Armament Department. GJB 2977A-2006

由疵病深度图像也可以看出, 利用长基线恢复的深度图像表面更平滑, 更满足表面相容性约束, 即基线越长测量精度越高。

由于图 10 所示的冲凹疵病在身管轴向 3 615 mm 处, 无法用游标卡尺等工具测量其深度值。为了确定测量结果精度, 本文应用了间接验证法, 用该算法测量火炮身管阳线的高度; 而阳线高度是可以根据火炮结构参数计算出来的, 从而可以通过比较实际值与测量值来分析误差。对 120 mm 身管进行了 3 次测量, 测量结果如表 2 所示。

表 2 120 mm 身管阳线测量结果

Tab. 2 Measuring results of land of 120 mm gun barrel

	实际值 /mm	测量值 /mm	误差 /mm	相对误差 (%)
实验 1	2.25	2.16	0.09	4.0
实验 2	2.25	2.18	0.07	3.1
实验 3	2.25	2.15	0.10	4.4

由表 2 可以看出, 本算法可以较精确地进行深度测量, 且测量结果误差限制在 0.1 mm 之内, 完全满足疵病深度参数测量的需要。

## 6 结 论

本文根据新型火炮身管疵病检测要求精度高、测量条件差、可靠性高等特点, 针对火炮身管内膛空间狭长的特点提出了等效多基线立体成像的疵病深度测量方法, 设计实现了火炮身管疵病深度测量系统, 该系统目前已应用于火炮的科研和鉴定试验任务中。测量实验结果证明: 该测量系统对疵病深度测量的绝对误差限制在 0.1 mm 以内, 相对误差控制在 5% 以内, 完全符合疵病深度测量的技术指标要求, 满足了身管疵病深度测量的要求。三年来的应用证明了该系统测量结果精确, 设备操作简便, 测量数据完全符合目前以及未来的任务需要, 对提高火炮的技战术性能具有重要作用。

*Inspecting and Measuring Methods for Static Gun* [S]. Beijing: China Standard Press, 2006. (in Chinese)

- [2] 王坚, 任现君, 苏建刚. 基于激光投影法的火炮身管内膛疵病深度测量[J]. 中国测试技术, 2004, 30

- (5):16-18.  
WANG J, REN X J, SU J G. Measurement for the Flaws in the inner wall of a artillery pipe based on laser projection method [J]. *China Measurement Technology*, 2004, 30(5):16-18. (in Chinese)
- [3] FAIG W. Calibration of close-range photogrammetric systems; mathematical formulation [J]. *Remote sensing*, 1975, 41(12):1479-1486.
- [4] 陈刚, 陈华, 车仁生. 空间点的立体视觉传感器标定方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9):1439-1444.  
CHEN G, CHEN H, CHE R SH. Calibration method for stereo vision sensor based on spatial points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1439-1444. (in Chinese)
- [5] TSAI R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[C]. *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*. 1986:364-374.
- [6] MARTINS H A, BIRK J R, KELLEY R B. Camera models based on data from two calibration planes [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, 17(2):173-180.
- [7] 孙长库, 魏崑, 张效栋, 等. CCD 摄像机参数标定实验设计[J]. *光电子技术与信息*, 2005, 18(2):43-46.  
SUN CH K, WEI W, ZHANG X D, *et al.*. Experimental design for CCD camera parameters calibration [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2005, 18(2):43-46. (in Chinese)
- [8] 阮秋琦, 阮宇智. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.  
GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital Image Processing*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)
- [9] CANNY J F. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6):679-698.
- [10] 张伟伟, 刘学锋. 基于数学形态学的图像边缘检测研究[J]. *计算机与数字工程*, 2006, 34(9):59-60.  
ZHANG W W, LIU X F. Research of image edge detection based on mathematics morphology[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2006, 34(9):59-60. (in Chinese)
- [11] 姜凯, 陈海霞, 刘立峰, 等. 基于模板抽样的快速图像匹配算法[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(3):311-315.
- JIANG K, CHEN H X, LIU L F, *et al.*. Fast image matching algorithm based on template sampling[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3):311-315. (in Chinese)
- [12] 王昕, 马岩, 杨剑, 等. 区域立体匹配算法的实现及改进[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10):2002-2008.  
WANG X, MA Y, YANG J, *et al.*. Implementation and improvement of area-based stereo matching algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):2002-2008. (in Chinese)
- [13] 纪华, 吴元昊, 孙宏海, 等. 结合全局信息的 SIFT 特征匹配算法[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2):439-444.  
JI H, WU Y H, SUN H H, *et al.*. SIFT feature matching algorithm with global information [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):439-444. (in Chinese)
- [14] 李德广, 李科杰, 高丽丽. 基于多尺度多方向相位匹配的立体视觉方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4):600-602.  
LI D G, LI K J, GAO L L. Stereo vision using multiresolution and multiorientation phase matching [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4):600-602. (in Chinese)
- [15] 章毓晋. 图像理解与计算机视觉[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.  
ZHANG Y J. *Computer Vision and Image Understanding*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese)
- [16] OKUTOMI M, KANADE T. A multiple-baseline stereo[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(4):353-363.
- [17] KANADE T, OKUTOMI M. A stereo matching algorithm with an adaptive window; theory and experiment[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(9):920-932.
- [18] JEON J, KIM K, KIM C, *et al.*. A robust stereo-matching algorithm using multiple-baseline camera[C]. *Proceedings of Computers and Signal Processing*, 2001: 263-266.

## 作者简介:



曾朝阳(1971—),男,湖南洞口人,副教授,1993年、2005年于装备指挥技术学院获得学士、硕士学位,主要从事光学测量、激光雷达及光电检测方面的研究。E-mail: cyzeng@139.com



赵继广(1967—),男,山东五莲人,教授,1989年、1992年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,现为装备指挥技术学院航天装备系主任,主要从事光学测量、激光雷达及空间测量方面的研究。E-mail: zhaoyy8600@163.com

## ● 下期预告

## 光纤端面断裂理论分析与试验

李殿军,李世明,孟范江

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,吉林 长春 130033)

为从理论和试验两个方面解决光纤端面制备问题,根据固体断裂力学原理对脆性均匀固体物质的断裂过程进行了具体的分析与讨论,得到了圆柱形物质在某一点的断裂路径具有发展方向上的稳定性和唯一性的结论,并据此提出了一种简便的光导纤维端面制备的设想。根据该设想,设计了一个光导纤维切割装置并进行了光纤端面制备的试验研究。在试验过程中,分别对于光纤芯径为 0.2, 0.3, 0.6, 0.8和 1 mm 的光导纤维端面进行了切割试验,并应用读数显微镜和可见激光传输光束显示等技术手段测试了这些光纤端面的光学质量。实验结果显示:制备的光纤端面质量完全满足实际应用要求;光纤端面质量完好的概率达到 100%。