Dec.2017

复杂深孔内轮廓结构光图像畸变矫正算法

丁超1, 唐力伟1, 曹立军1, 邵新杰2, 邓士杰1

(1. 军械工程学院 火炮工程系,河北 石家庄 050003;

2. 军械工程学院 车辆与电气工程系,河北 石家庄 050003)

摘 要:为实现针对复杂深孔内轮廓表面几何参数的高精度测量,建立了基于结构光的内轮廓检测系统,但由于深孔内轮廓的曲面特性,相机采集到的图像相比于内轮廓展开后的平面图像存在较大的几何畸变,直接影响到内壁几何参数的量化精度。首先针对深孔内轮廓和内轮廓展开结构进行无差别建模,分析两者之间的空间坐标转换关系;然后综合考虑畸变矫正的精度和速度,借鉴三次样条插值函数、离散映射等理念提出了基于离散映射的深孔内轮廓矫正算法,实现针对深孔内轮廓的畸变在线矫正,检测精度达到亚像素水平,低于0.1 mm。

关键词:结构光; 复杂深孔; 畸变矫正

中图分类号: TP391 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.1217008

Image distortion correction algorithm for complicated deep-hole profile using structured-light

Ding Chao¹, Tang Liwei¹, Cao Lijun¹, Shao Xinjie², Deng Shijie¹

- (1. Artillery Engineering Department, College of Ordnance Engineering, Shijiazhuang 050003, China;
- 2. Vehicle and Electrical Engineering Department, College of Ordnance Engineering, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: To achieve the high precision measurement of the complicated deep-hole profile geometric parameters, the detection system for the profile based on the structured light was established. However the images collected by the camera had larger geometric distortion compared with the plane images from the profile because of the curvy surface features of the deep-hole profile. The geometric distortion affected the calculation accuracy of the geometric parameters directly. Firstly, the models were established indiscriminately for the deep-hole profile and its plane structure to analyze the space coordinate transformation between each other. Then, the ideas of the cubic spline interpolation and discrete mapping were referred to propose the deep-hole profile correction algorithm based on the discrete mapping considering the precision and speed of the distortion correction comprehensively. The purpose of correcting the deep-hole profile distortion online was achieved through the algorithm. The test precision reached the sub pixel level and the error was less than 0.1 mm.

Key words: structured-light; complicated deep-hole; distortion correction

收稿日期:2017-04-11; 修订日期:2017-05-17

基金项目:国家自然科学基金(51575523)

作者简介: 丁超(1990-), 男, 博士生, 主要从事机器视觉及数字图像处理方面的研究。Email:duncan1119@163.com

导师简介: 唐力伟(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事机械性能检测与故障诊断、机器视觉方面的研究。 Email:tom5157@163.com

第 12 期 www.irla.cn 第 46 卷

0 引 言

深孔类零部件作为机械制造领域的重要组成部分,广泛应用于各类管道、火炮身管的生产中[1]。针对该类零件内轮廓几何尺寸的相关检测要求较高,需要实现针对内轮廓的高精度在线检测。目前针对深孔内轮廓的检测手段主要有塞规接触法、涡流法、超声法等[2],检测精度和效率普遍偏低;基于结构光的光学检测方法[3-4]是当前的研究热点,可实现针对物体外表面几何特征的快速高精度测量,但在复杂深孔内表面检测方面应用较少。王颖等[5]采用机器视觉原理,提出一种基于圆结构光的管道内表面测量系统;张振友等[6]应用光机电控制技术和 CCD 成像技术针对身管内膛表面进行了定性及定量检测;李伟等[7]提出了一种基于结构光的路面错台三维检测方法。

在针对复杂深孔内轮廓的检测过程中,由于深 孔内壁曲面的固有特性,检测系统采集到的内壁图 像相比于内壁展开后的平面图像存在着较大的几何 畸变^[8],并且该畸变会随着相机视野的拉大而扩大, 直接影响到系统针对深孔内轮廓几何参数的测量精 度,为此需要将采集到的内轮廓图像作平面化处理, 即将原始内轮廓图像矫正为内轮廓展开后采集的平面图像。

文中依托 3ds Max 软件针对深孔内轮廓及其展开结构建模,通过精确分析两者间的空间坐标转换关系(Space Coordinate Conversion Relationship, SCCR),提出了基于离散映射的深孔内轮廓矫正算法(The Deep-Hole Profile Correction Algorithm Based on the Discrete Mapping, DPCDM),实现针对深孔内轮廓图像的畸变矫正。

1 基于结构光的深孔内轮廓检测系统

1.1 检测系统基本原理

该系统组成架构如图 1(a)所示,主要包括 4 部分:结构光源模块(Structured Light Module, SLM),负责投射粗细不同但按规律排布的结构光栅到深孔内壁;图像采集模块(Image Acquisition Module, IAM),负责采集经深孔内壁反射后的变形结构光条;移动控制模块(Mobile Control Module, MCM),依托电机驱动控制步进电机移动检测系统;图像处理模块(Image Processing Module, IPM),量化结构光条变形量,分析其中隐藏的内轮廓几何信息,逆向还原深孔内轮廓模型。

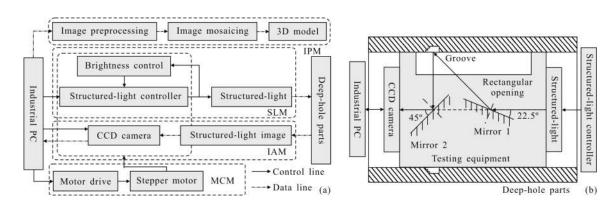


图 1 基于结构光的深孔内轮廓检测系统

Fig.1 Deep-hole profile detection system based on the structured light

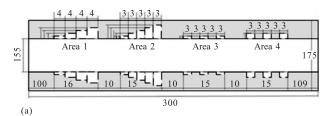
该系统原理如图 1(b)所示,针对投射到深孔内壁经凹槽反射后呈现变形、折断的结构光条,依据激光三角法准确量化结构光条的变形量并反推得到深孔内轮廓的几何参量。

1.2 深孔内轮廓模型设计与建模

为验证 DPCDM 算法的可行性, 文中针对实际

深孔零部件,如图 2(a)所示,仿真设计该部件的深孔内轮廓模型(Deep-Hole Profile Model, DPM)。通过对DPM 模型内壁进行检测,为实际深孔零部件的检测奠定基础,如图 2(b)所示;为实现算法的精确矫正以及相互间 SCCR 关系的确定,仿真设计了深孔内轮廓展开模型 (Deep-Hole Profile Plane Model, DPPM),

即将 DPM 模型沿内壁展开成平面模型,如图 2(c)所示。



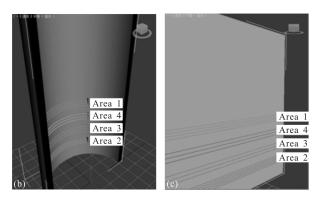


图 2 深孔内轮廓模型 Fig.2 DPM

2 深孔内轮廓模型检测

文中将图2(a)中模型 DPM 归类为多曲面模型 (Multi-Curvy-Surface Model, MCSM),即由于凹槽的存在导致模型内壁存在多处不同深度的曲面。由于 DPM 和 DPPM 内壁之间呈现非线性映射关系,推导两者间的 SCCR 关系需要进行大量的精确计算且要考虑多种影响因素。为此文中首先针对单曲面模型(Single-Curvy-Surface Model, SCSM)进行分析,采用分段线性方法(Piecewise Linear Method, PLM)¹⁹,建立 DPM 和 DPPM 内壁之间的 SCCR 数学模型,提出基于离散映射的深孔内轮廓矫正算法,实现针对 DPM 内壁的几何矫正,然后在此基础上扩展到多曲面模型。

2.1 内轮廓单曲面检测

文中分别针对 DPM 和 DPPM 设计了对应的 SCSM 模型,如图 3(a)和图 3(d)所示。模型采用标准 矩形凹坑的中心点作为特征点,在自然光源照射下通过 CCD 相机采集内壁图像,其中除模型改变外,其他条件保持不变,例如单曲面模型的空间位置和几何形状以及 CCD 相机和自然光源的空间位置等,保证了在单曲面模型条件下获得的 SCCR 关系能够顺利扩展到多曲面模型。内壁单曲面检测具体流程如图 4 所示。

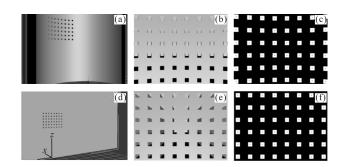


图 3 深孔内轮廓模型单曲面检测与预处理 Fig.3 SCSM test and pretreatment of the DPM

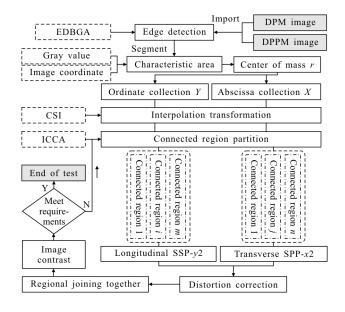


图 4 深孔内轮廓单曲面检测流程 Fig.4 SCSM test process of the deep-hole profile

步骤 1:单曲面图像预处理,分别读取模型 DPM 和 DPPM 的内壁,如图 3(b)和图 3(e)所示;为便于后续图像处理,采用基于灰度差统计的边缘检测算法 (The Edge Detector Algorithm Based on Gray-Level-Difference Analysis, EDBGA) [10]针对图像特征区域进行分割,提取图像中的矩形凹坑,如图 3(c)和图 3(f)所示,两类模型内壁采集图对比图见下文;其中灰度差计算如公式(1)所示:

$$\Delta I_{i,j} = \begin{cases} I_{i,j} - I_k, & |I_{i,j} - I_k| \ge T \\ 0, & |I_{i,j} - I_k| < T \end{cases}$$

$$\tag{1}$$

式中: $I_{i,j}$ 为目标点灰度值; I_k 为与目标点相邻的像素点灰度值;T为阈值。

步骤 2:特征区域质心提取,分别计算二值化后图 3(c)和图 3(f)中所有矩形(即特征区域)的质心 r, 其中 r_i 表示第 i 个特征区域的质心(即特征点),如公

第 12 期 www.irla.cn 第 46 巻

式(2)所示:

$$r_{i} = \sum_{j=1}^{n_{i}} g_{i,j} \cdot r_{i,j} / \sum_{j=1}^{n_{i}} g_{i,j}, \text{ } \sharp \text{ } \vdash r_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j})$$
 (2)

假设第 i 个特征区域由 n_i 个像素点组成,每个像素点的灰度值分别是 $g_{i,1}, g_{i,2}, \dots, g_{i,n}, r_{i,1}, r_{i,2}, \dots, r_{i,n}$ 表示第 i 个特征区域内部每个像素点的图像坐标。

步骤 3:构建质心横、纵坐标集合,针对获得的所有特征点 r 图像坐标分别建立横向坐标集合 X 和纵向坐标集合 Y,以 X 为例,如公式(3)所示:

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m,1} & x_{m,2} & \cdots & x_{m,n} \end{bmatrix}$$
 (3)

其中 m=6, n=8。

步骤 4: 连通区域划分, 考虑到 DPM 和 DPPM 内壁之间存在非线性几何畸变以及深孔内壁属于参数化表面,采用图像连通区域算法(Image Connected

Components Algorithm, ICCA)分别在横、纵坐标方向上针对图像进行区域划分,以横坐标 X 为例将图像划分为 x1<X1(i,1)、 $X1(i,j)<x1 \le X1(i,j+1)$ 和 x1>X1(i,n) 共 n+1 个区域,其中 X1 表示 DPM 内壁特征点横向坐标集合;x1 表示目标点横坐标, $1 \le i \le m$, $1 \le j \le n$ 。

步骤 5:空间转换关系推算,基于特征区域质心坐标集合 X 和 Y 采用三次样条插值函数 (Cubic Spline Interpolation, CSI)针对图像($M \times N$)进行插值变换,在质心坐标集合内部相邻元素间从横、纵坐标方向进行插值得到光滑曲线,如图 5(a) 所示;针对目标点(x1,y1)分析其所属连通区域,利用特殊分段多项式(Special Piecewise Polynomial, SPP)分别从横、纵坐标方向准确量化其畸变量,如公式(4)和公式(5)所示,其中坐标(x1,y1)经过矫正后的新坐标为(x2,y2), $1 \le x1 \le M, 1 \le y1 \le N; X1$ 和 Y1 分别表示 DPM 内壁特征点横向和纵向坐标集合。

$$x2 = \begin{cases} X2(i,1) + x1 - X1(i,1), & x1 \leq X1(i,1) \\ X2(i,j) + \frac{[x1 - X1(i,j)] \cdot [X2(i,j+1) - X2(i,j)]}{X1(i,j+1) - X1(i,j)}, & X1(i,j) < x1 \leq X1(i,j+1) \\ X2(i,n) + x1 - X1(i,n), & x1 > X1(i,n) \\ Y2(1,j) + y1 - Y1(1,j), & y1 \leq Y1(1,j) \end{cases}$$

$$y2 = \begin{cases} Y2(i,j) + \frac{[y1 - Y1(i,j)] \cdot [Y2(i+1,j) - Y2(i,j)]}{Y1(i+1,j) - Y1(i,j)}, & Y1(i,j) < y1 \leq Y1(i+1,j) \\ Y2(m,j) + y1 - Y1(m,j), & y1 > Y1(m,j) \end{cases}$$

$$(5)$$

步骤 6:矫正后误差分析,循环执行步骤 5 直到 通区域进行拼接得到一幅完整的几何矫正图像,如 x1=M=480,y1=N=640 为止,然后针对所有离散的连 图 5(b)所示,相关数据如表 1 和表 2 所示;将矫正后

表 1 畸变矫正纵向坐标 Y 相关数据

Tab.1 Related data of the distortion correction in the Y direction

Serial number	Y1/pixel	Y2/pixel	e1/pixel	Serial number	Y1/pixel	Y2/pixel	e1/pixel	Serial number	Y1/pixel	Y2/pixel	e1/pixel
1	33	32.515	0.485	17	368	367.50	0.50	33	201	200.899	0.101
2	117	116.438	0.562	18	452	451.517	0.483	34	284	283.517	0.483
3	201	200.461	0.539	19	33	32.386	0.614	35	368	367.50	0.50
4	284	283.50	0.50	20	117	116.499	0.501	36	452	451.483	0.517
5	368	367.408	0.592	21	201	200.50	0.50	37	33	32.509	0.491
6	452	451.469	0.531	22	284	283.627	0.373	38	117	116.563	0.437
7	33	32.548	0.452	23	368	367.221	0.779	39	201	200.589	0.411
8	117	116.535	0.465	24	452	451.50	0.50	40	284	283.50	0.50
9	201	200.390	0.610	25	33	32.330	0.670	41	368	367.496	0.504
10	284	283.368	0.632	26	117	116.890	0.110	42	452	451.451	0.549
11	368	367.517	0.483	27	201	200.529	0.471	43	33	32.485	0.515
12	452	451.550	0.450	28	284	283.50	0.50	44	117	116.484	0.516
13	33	32.534	0.466	29	367.50	366.89	0.610	45	201	200.723	0.277
14	117	116.653	0.347	30	452	451.517	0.483	46	284	283.50	0.50
15	201	200.399	0.601	31	33	32.483	0.517	47	368	367.593	0.407
16	284	283.518	0.482	32	117	116.384	0.616	48	452	451.453	0.547

表 2 畸变矫正横向坐标 X 相关数据

Tab.2 Related data of the distortion correction in the X direction

Serial number	X1/nixel	X2/pixel	e2/pixel	Serial number	X1/pixel	X2/pixel	e2/pixel	Serial number	X1/nixel	X2/pixel	e2/pixel
1	27	26.474	0.526	17	195	194.50	0.50	33	446	445.917	0.083
1	21	20.474	0.520	11	195	194.50	0.50	99	440	445.917	0.005
2	27	26.448	0.552	18	195	194.911	0.089	34	446	445.517	0.483
3	27	26.373	0.627	19	278.50	277.590	0.910	35	446	445.50	0.50
4	27	26.50	0.50	20	278.50	278.017	0.483	36	446	445.045	0.955
5	27	26.595	0.405	21	278.50	278.017	0.483	37	530	529.437	0.563
6	27	26.487	0.513	22	279	278.762	0.238	38	530	529.769	0.231
7	111	110.449	0.551	23	279	278.375	0.625	39	530	529.416	0.584
8	111	110.089	0.911	24	279	278.50	0.50	40	530	529.50	0.50
9	111	110.909	0.091	25	362	361.484	0.516	41	530	529.159	0.841
10	111	110.098	0.902	26	362.50	362.262	0.238	42	530	529.120	0.880
11	111	110.517	0.483	27	363	362.345	0.655	43	614	613.291	0.709
12	111	110.187	0.813	28	362	361.50	0.50	44	614.50	614.467	0.033
13	195	194.405	0.595	29	362	361.331	0.669	45	614	613.371	0.629
14	195	194.877	0.123	30	362	361.517	0.483	46	614	613.50	0.50
15	195	194.080	0.920	31	446	445.676	0.324	47	614	613.50	0.50
16	195	194.518	0.482	32	446	445.236	0.764	48	614	613.491	0.509

图像与标准 DPPM 内壁图像进行对比,结果如图 5(c) 所示;同时提取两幅图像内部特征区域质心插值变换后的光滑曲线,相互间作差值,结果如图 6 所示。 判断矫正结果是否满足任务需求,若不满足,则适当增加特征点数目并重新划分连通区域。

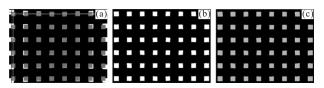
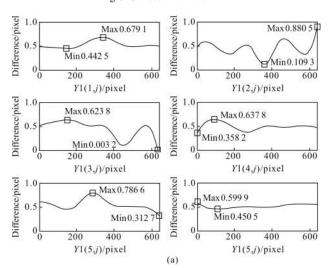


图 5 深孔内轮廓模型图像矫正

Fig.5 Correction of the DPM



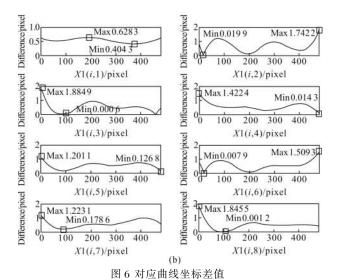


Fig.6 Coordinate difference of the corresponding curve

由图 5(c)定性分析知,经过几何矫正后的 DPM 图像特征区域与标准 DPPM 图像特征区域(即图 3(f)) 基本重合;由表 1 和表 2 知,矫正后图像和标准图像特征区域质心坐标纵向图上误差 e1 和横向图上误差 e2 均小于单个像素;由图 6 知,插值变换后对应曲线之间在纵向坐标上图像误差 e1 均小于单个像素,在横向坐标上依据图 6(b)中误差分布,去除矫正后图像左、右适当边缘处像素点,选取误差均低于单个像素的中心区域,该区域在横向坐标上图像误差

www.irla.cn

e2 均小于单个像素;结合实际尺寸,如图 7 所示,图像 误差对应的实际误差 E1<E<0.1 mm 和 E2<E<0.1 mm, 其计算过程如公式(6)和公式(7)所示。

$$AB=2R\tan\left(\frac{\alpha}{2\times180^{\circ}}\times\pi\right)\approx55.8004 \text{ mm}$$
 (6)

$$E = \frac{AB}{N} \approx 0.087 \text{ 2 mm}, \text{ } \pm \text{P} \text{ } N = 640$$
 (7)

其中, $\alpha=39.598^{\circ}$ 、R=77.5 mm;E 表示单个像素 对应的实际尺寸。

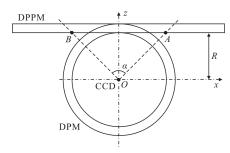


图 7 深孔内轮廓模型及展开模型实际尺寸

Fig.7 Actual size of DPM and DPPM

2.2 内轮廓多曲面检测

在准确获取单曲面模型中空间坐标转换关系的 基础上,针对深孔内轮廓多曲面模型进行分析。多曲 面检测手段就是在保证畸变矫正精度的基础上,针 对内轮廓中的不同深度曲面, 分别采用单曲面检测 手段进行分析,检测过程较为繁琐。

在多曲面模型中,针对图2中具有代表性的区 域2和3进行检测并验证上述方法的可行性。以区 域 3 为例,在 DPM 和 DPPM 条件下内壁采集分别如 图 8(a)和图 8(b)所示。为实现针对内壁凹槽几何参

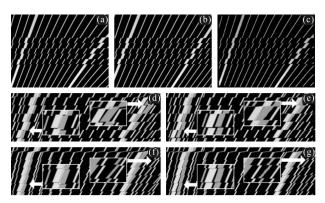


图 8 深孔内轮廓模型多曲面检测与矫正

Fig.8 MCSM test and correction of the DPM

数的准确量化,分析凹槽的边缘特性,判断凹槽边缘 属于单曲面问题, 为此采用单曲面模式下获得的空 间坐标转换关系分析区域 3、避免了多曲面检测的 复杂流程,便于实现在线检测。

借鉴单曲面检测手段针对图 8(a)分别进行区域 划分和插值变换,准确量化其几何畸变,并针对图像 中分散的连通区域进行拼接得到完整的矫正后图 像,如图 8(c)所示。将矫正前后 DPM 图像分别与标准 DPPM 图像进行对比,结果分别如图 8(d)和图 8(e) 所示,综合比较两图像对比结果判断 DPCDM 算法 实现了针对 DPM 图像的畸变矫正。

分析深孔内轮廓模型中区域 2 处凹槽边缘特 点,判断凹槽边缘均不在同一曲面,属于多曲面问 题,采用多曲面检测手段分块分析该区域,会导致计 算量成倍增加。由图 2(a)分析知,区域 2 处凹槽依次 递减 1 mm, 采用单曲面检测手段分析区域 2, 在检 测精度和速度上依然满足任务需求,矫正前后 DPM 图像与 DPPM 图像对比结果分别如图 8(f)和图 8(g) 所示,由对比图分析知,DPCDM 算法实现了针对多 曲面模式下 DPM 图像的畸变矫正。

3 结 论

为精确矫正深孔内轮廓曲面图像存在的几何畸 变,针对深孔内轮廓及其展开结构进行建模,通过分 析两者间的空间转换关系提出了基于离散映射的深 孔内轮廓矫正算法。在算法的研究过程中,通过选取 适当数目的特征点进行分析, 在保证检测精度的基 础上实现了针对深孔内轮廓的在线检测:同时算法 采用开源设计思维, 便于研究人员根据不同的任务 需求通过调整特征点数目有偏重地灵活调整检测精 度和速度之间的关系。下一步计划针对多曲面检测 手段作进一步优化, 在保证精度的基础上尽量简化 操作流程。

参考文献:

- [1] Leng Huiwen, Xu Chunguang, Feng Zhongwei, et al. A method for measuring complicated deep-hole profile based on ring structured light [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(7): 1084-1090. (in Chinese) 冷惠文,徐春广,冯忠伟,等.基于圆结构光的复杂深孔内 轮廓尺寸测量方法 [J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(7): 1084-1090.
- [2] Leng Huiwen, Xu Chunguang, Xiao Dingguo, et al. A

第 12 期 www.irla.cn 第 46 卷

- method for measuring complicated deep-hole profile using line-structured-light sensor [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(2): 139–143. (in Chinese) 冷惠文,徐春广,肖定国,等. 基于线结构光的复杂深孔内轮廓三维测量方法 [J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(2): 139–143.
- [3] Xu Jing, Xi Ning, Zhang Chi, et al. Real-time 3D shape inspection system of automotive parts based on structured light pattern [J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(1): 1–8.
- [4] Barone S, Paoli A, Razionale A V. Shape measurement by a multi-view methodology based on the remote tracking of a 3D optical scanner [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(3): 380-390.
- [5] Wang Ying, Zhang Rui. In-pipe surface circular structured light 3D vision inspection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 891–896. (in Chinese) 王颖, 张瑞. 管道内表面圆结构光视觉三维测量系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 891–896.
- [6] Zhang Zhenyou, Yang Qizi, Yu Zhengqing, et al. Research on digital detector for detecting the flaws of anti-aircraft artillery barrel [J]. *Acta ArmamentarII*, 2015, 36(4): 590–594. (in Chinese) 张振友,杨岐子,于政庆,等. 数字式高炮身管疵病探测仪

- 的设计[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 590-594.
- 7] Li Wei, Sha Aimin, Sun Zhaoyun, et al. Joint faulting three-dimension detection method on cement concrete pavement with line-structure Light [J]. *Journal of Tongji University* (*Natural Science*), 2015, 43(7): 1039–1044. (in Chinese) 李伟, 沙爱民, 孙朝云, 等. 基于线结构光的水泥混凝土路面错台三维检测 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2015, 43(7): 1039–1044.
- [8] Yang R G, Majumder A, Brown M. Camera based calibration techniques for seamless multi-projector displays
 [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(2): 193–206.
- [9] Zhu Bo, Xie Lijun, Yang Tingjun, et al. An adaptive calibration algorithm for projected images in daily environment [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2012, 24(7): 941–948. (in Chinese) 朱博,解利军,杨廷俊,等. 自适应复杂环境的投影图像校正算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(7): 941–948.
- [10] Yin Runmin, Ping Jie, Chai Xudong, et al. An edge detector based on gray level difference analysis [J]. *Computer Engineering*, 2006, 32(8): 201–203. (in Chinese) 殷润民, 平洁, 柴旭东, 等. 一种基于灰度差统计的边缘检测方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(8): 201–203.