

文章编号 1004-924X(2012)09-2103-07

中心偏移的全景环形图像快速展开

卜雄洙*, 李桂娟, 杨 波, 王新征

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:采用机器视觉技术检测管道内表面质量时,获取的原始图像几何中心与其前景区管壁全景环形图像中心存在偏移,从而会使以图像几何中心展开的图像产生失真的现象。本文针对存在中心偏移的全景环形图像提出了快速展开算法以减小由上述原因造成的图像中几何特征量的测量误差。提出的算法通过最小二乘拟合圆心法找到全景环形图像上代表管壁某一截面的拟合圆,继而得到全景图像的中心参数,然后通过四分之一圆扫描方法快速展开全景图像,并对展开图像的帧纵横比进行修正,还原全景图像。实验结果表明:将一幅全景图像环状检测区域展开成分辨率为 2 044 pixel × 199 pixel 的矩形图像所需时间为 0.868 s,展开图像中目标外形尺寸相对误差均在 1.54% 以内,满足图像处理对实时性和准确性的要求。

关键词:全景图像;图像展开;锥面镜;最小二乘法

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122009.2103

Fast unwrapping of panoramic annular image with center deviation

BU Xiong-zhu*, LI Gui-juan, YANG Bo, WANG Xin-zheng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: buxul05@mail.njust.edu.cn

Abstract: When machine vision technology is used to detect the inner surface quality of a pipeline, the geometric center of an original image will deviate the center of a pipe wall panoramic annular image in the original one's foreground area. However, it will lead to serious deviation in the image unwrapped with the geometric center. In order to reduce the measuring errors of the geometry characters, a fast unwrapping algorithm for the panoramic annular image with center deviation was proposed. Firstly, the least square fitting circle method was used to find a fitting circle representing a cross-section of the wall on the image and to obtain the center parameters of panoramic annular image. Then, by unwrapping the panoramic annular image with a quarter circle scanning method and by correcting the frame aspect ratio of the unwrapping image, the panoramic image was completely restored. Experimental results indicate that it takes 0.868 s to unwrap the annular detection area of a panoramic image into a rectangular one with the resolution of 2 044 pixel × 199 pixel, and the relative errors in outline dimensions of the tested targets are less than 1.54%. It is shown that the method could satisfy the real time

收稿日期:2012-04-23;修订日期:2012-06-05.

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(No. K2010481)

and accuracy requirements in the image processing.

Key words: panoramic image; image unwrapping; conic mirror; least square method

1 引言

在工业及国防生产应用的很多领域需要对相关管道内壁情况进行检测,如在油田安全生产上需要定时检测集输系统管道,防止管道内壁腐蚀穿孔造成停产事故和环境污染;在兵器生产领域,需要对身管内膛的防烧蚀镀铬质量进行检测,以提高身管的抗烧蚀能力,进而提高身管的寿命等。国内外对管道内壁进行检测的方法很多,主要分接触式和非接触式检测两类。接触式检测方法主要有空气塞规法^[1]、涡流法^[2]和超声检测法^[3],这三种方法操作简单,但精度较低。非接触式检测方法是国内外管道内壁检测技术的发展方向,检测方法主要包括 CCD 摄像法^[4-5]、激光三角法^[6]和激光投影法^[7]。目前,国内激光三角法和激光投影法尚处于开发阶段,而基于光电检测技术的 CCD 摄像法在管道检测领域应用较广泛,它利用折反射透镜与镜片组组成的光学回路,结合 CCD 图像传感器和计算机软件,完成对管道内壁图像的获取、处理、计算,从而实现管道内壁的无损检测。

基于折反射全景成像的检测方法由于没有扫描部件、设计柔性好、无拼接获得 360°大视场等优点,近年来在机器人、计算机视觉等领域应用广泛。在管道检测中,为了便于对管道内壁情况进行观察和精确测量,需要将利用折反射方法所成的管壁全景环形图像做线性化处理,即将全景环形图像展开成管壁矩形像。研究时发现由于检测设备和管道对中误差会造成所获取的原始图像前景区全景环形图像中心发生偏移。环形中心坐标是图像展开算法中的必要参量。展开全景图像时,如不考虑中心偏移问题,以图像的几何中心作为环形中心参量,展开的图像将存在较大失真。如文献^[8]中的展开实例,虽然对全景图做了展开处理,但展开图中的网格各边弯曲,展开结果缺乏准确性。因此,实际展开图像时必须考虑全景环形图像中心位置对展开结果的影响。另外,在图像检测系统中,CCD 扫描的图像数据全部上传至

计算机进行分析和处理,因此图像变换过程中需要处理大量的数据,尤其对于高分辨率图像而言,直接影响了系统检测的实时性。提高图像处理过程的实时性,除了对图像进行压缩处理以减少一定的数据量外,还可以对图像处理过程中的算法进行改进和优化。针对上述问题,本文提出了一种基于锥面镜的全景环形图像快速展开算法,对成像过程中全景环形图像的中心进行了查找,并通过优化的图像展开算法和图像帧纵横比修正算法,高效准确地实现了全景环形图像的还原。

2 全景图像的获取及处理方法

该管道内壁光电检测系统包含有可获得全景图像的锥面反射镜、能直接对管壁局部区域进行观察的 45°平面反射镜、提供照明的环形光源、放大本体成像倍数的物镜和目镜、CCD 摄像机以及相关连接装置等^[9],其结构示意图如图 1 所示。

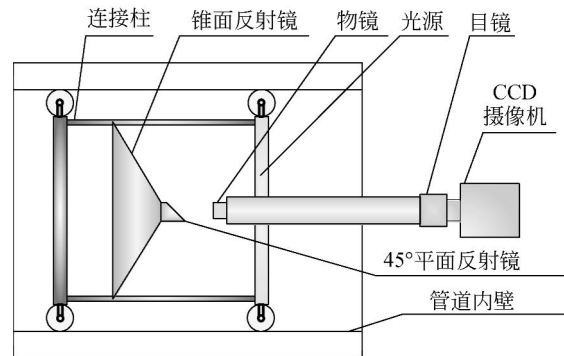


图 1 管道内壁检测系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of pipe wall detection system

检测时,管道某一段柱状内壁通过锥面镜及平面镜反射,最终在目镜上呈现出一幅管道内壁 360°的全景图。如图 2 所示,圆环的外圆为该段管道在空间坐标系原点所在截面圆,圆环的径向变化反映了管道内壁圆柱面的轴向变化。中间小圆区域为平面镜成像区域,转动平面反射镜方向,可直接对管壁局部进行无失真观察。

系统所成全景图像环状区域与管道内壁一一对应,圆环上任意一点可以唯一确定管道内壁上

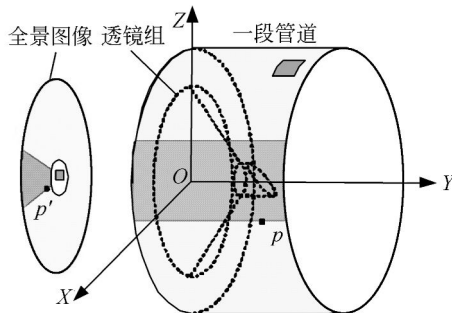


图 2 锥面镜全景成像示意图

Fig. 2 Schematic of panoramic imaging by conic mirror

一点。因此,可以将全景图像环形区域展开成平面矩形图来分析内壁情况。随着全景摄像探头的移动,可以得到整段管道内壁在不同深度的全景图像,对每张全景图像进行相应的分析,就能实现对整段管道内壁的检测。

3 全景图像中心偏移分析

获取的图像通常存在由相机位置引起的透视误差和由镜头引起的非线性失真,这会导致图像内的被测对象发生变形,最终给测量结果带来误差。图像的透视误差是由相机轴向和被测对象所在平面不垂直造成的。非线性失真是由相机镜头的光学误差引起的几何失真,离轴线越远,图像畸变现象越严重。

实际获取全景图像时,调整摄像机镜头与管道轴线垂直度以减少透视误差。此时,若检测装置与管道位置存在对中偏差,会使得经采集系统获取的环形像中心不在图像的几何中心上,实际环形中心需要通过相关软件方法来加以查找确定。因此,研究全景图像展开算法时,首先要考虑原始图像前景区中心偏移的情况,对全景图像的中心进行查找,然后根据锥面镜的几何成像原理,采用相关非线性修正方法,实现全景图像线性化。

4 校正展开算法

将存在中心偏移的全景环形图像展开可分为两步:

1. 查找图像的中心,即全景图上管道内壁截面圆所成同心圆圆心。该中心点决定了圆环展开

时,管道同一截面圆上的点能否处于展开图的同一条直线上。

2. 展开全景图。对展开算法的研究是全景图像展开过程的关键部分,一个好的算法决定了能否准确、高效地实现管道内壁全景图像的还原,继而影响整个检测系统的检测精确度。

4.1 中心点查找

目前提取圆心的算法主要有以下几种:基于广义 Hough 变换的圆心坐标快速提取方法,细化法,正交扫描法,最小二乘拟合圆心法等。利用广义 Hough 变换所求圆心的精度有一定局限,计算量大速度较慢;细化法和正交扫描法都是以线段来逼近,抗噪声性能差,误差较大;利用最小二乘法拟合圆心,计算简便、精度高,在实际应用中是一种行之有效的圆心拟合算法^[10]。

在对全景图中心点查找时采用最小二乘拟合圆心的算法。对于管道内壁处于同一截面圆上的点,其所在位置光照、环境相似,因此其在全景图上的灰度值相近,利用全景图上待检环状区域内灰度近似的若干点坐标,拟合出平面圆,从而求出其圆心。该算法直接依赖于测量数据,因此适用于求取任何平面圆的圆心和半径。

对于给定的圆度测量数据 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, m)$,理想圆圆心 (u_1, u_2) 的最小二乘估计值是方程组

$$\begin{aligned} (x_i - \hat{u}_1)^2 + (y_i - \hat{u}_2)^2 &= R^2, \\ (i=1, 2, \dots, m-1) \end{aligned} \quad (1)$$

的最小二乘解。

求解得平面圆圆心的最佳线性无偏估计为:

$$\begin{cases} \hat{u}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} b_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{m-1} a_i c_i - \sum_{i=1}^{m-1} b_i c_i \cdot \sum_{i=1}^{m-1} a_i b_i}{\sum_{i=1}^{m-1} a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{m-1} b_i^2 - (\sum_{i=1}^{m-1} a_i b_i)^2} \\ \hat{u}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{m-1} b_i c_i - \sum_{i=1}^{m-1} a_i c_i \cdot \sum_{i=1}^{m-1} a_i b_i}{\sum_{i=1}^{m-1} a_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{m-1} b_i^2 - (\sum_{i=1}^{m-1} a_i b_i)^2} \end{cases} \quad (2)$$

为了减小圆心计算过程中的随机误差,可多次检测不同的环状区域,对其分别进行圆心拟合计算,剔除具有明显误差的圆心数据,取平均值作为最终的圆心坐标参数。

4.2 全景图像展开

展开图像时,采用反向映射法作为图像像素

灰度级的赋值方法。反向映射法的具体实现过程是:从展开后图像上的输出像素出发,找到原始图像上对应的坐标位置,由于该位置的坐标值可能不是整数,因此需要由原始图像上该对应位置周围像素点的灰度值进行插值运算求出该位置的灰度值,然后将求得的灰度值赋给展开图像上对应的像素点即可。

因为图像的数据量非常大,为了提高图像处理的速度,在展开时采用四分之一圆扫描方法。假设已知圆心在原点的圆上一点 (x, y) ,根据对称性可得另外 3 个象限圆上对应点 $(-x, y)$ 、 $(-x, -y)$ 、 $(x, -y)$,因此只需讨论全景四分之一圆的转换,与文献[11]中进行全景 360°的图像转换算法相比,降低了算法的复杂性,提高了算法效率。以第一象限为例,对四分之一圆扫描展开算法具体说明如下:

建立直角坐标系如图 3 所示。先根据原图待展开区域信息确定展开图尺寸。记原图像待展开圆环中心点坐标为 (x'_0, y'_0) ,待展开内径为 r ,外径为 R ,展开基准圆半径为 r_c ,展开图的宽度为 W_{new} ,高度为 H_{new} 。则有:

$$\begin{cases} x'_0 = \hat{u}_1 \\ y'_0 = \hat{u}_2 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} W_{new} = 2 \cdot \pi \cdot r_c \\ H_{new} = R - r + 1 \end{cases}. \quad (4)$$

在数字图像中, $r, R, r_c, W_{new}, H_{new}$ 以像素个数计量,因此均取整数。其中,选取的基准圆半径 r_c 越小,图像展开计算量越小,同时展开图像分辨率越低。

根据两幅图像相关变量的对应关系,建立展开图像中的像素点与原图像中的像素点间的仿射变换数学模型。设展开图前 1/4 图中的像素点 $G(x, y)$ 对应全景图像第一象限中的 $F(x', y')$ 点。为了方便转换,在图 3(a)中设置下列坐标系,图像坐标系 I:以图像左上角 O_I 为原点,向右为 X 轴正方向,向下为 Y 轴正方向;辅助坐标系 II:以 $O_{II}(x'_0, y'_0)$ 为原点,向右为 X 正方向,向上为 Y 正方向。坐标系 II 中,全景图像第一象限像素坐标展开前后有如下转换关系:

$$\begin{cases} x'_{II} = (y+r) \cos \theta \\ y'_{II} = (y+r) \sin \theta \end{cases}, \quad (5)$$

其中: θ 为全景图第一象限中任意点和原点 O_{II} 连线与 x_{II} 轴正方向所成的弧度,由弧度、弧长、半径对应关系可知

$$\theta = x/r_c, \quad (6)$$

其中: $x \in [0, \frac{1}{4}W_{new}]$, $\theta \in [0, \pi/2]$ 。

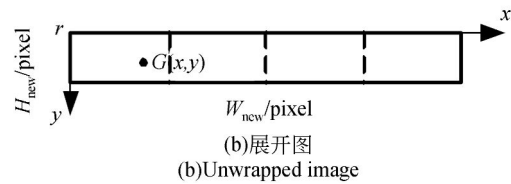
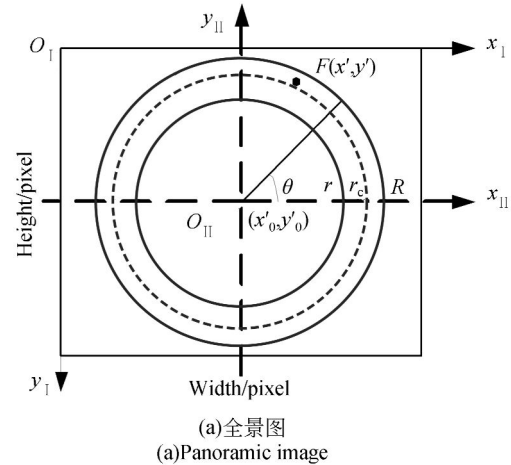


图 3 全景图与展开图直角坐标系示意图

Fig. 3 Rectangular coordinate system schematic of panoramic and unwrapped images

最后,将辅助坐标 II 平移到图像坐标系 I 处,得展开矩形前 1/4 区域中的点 $G(x, y)$ 和对应的环形第一象限点 $F(x', y')$ 之间的坐标变换关系。

$$\begin{cases} x'_1 = x'_0 + x'_{II} = x'_0 + (y+r) \cos(x/r_c) \\ y'_1 = y'_0 - y'_{II} = y'_0 - (y+r) \sin(x/r_c) \end{cases}. \quad (7)$$

由直角坐标系对称性可得另外 3 个象限像素坐标对应转换关系如下:

$$\begin{cases} x'_2 = x'_0 - x'_{II} = 2x'_0 - x'_1 \\ y'_2 = y'_1 \end{cases}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} x'_3 = x'_0 - x'_{II} = 2x'_0 - x'_1 \\ y'_3 = y'_0 + y'_{II} = 2y'_0 - y'_1 \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} x'_4 = x'_1 \\ y'_4 = y'_0 + y'_{II} = 2y'_0 - y'_1 \end{cases}, \quad (10)$$

公式(7)、(8)、(9)、(10)建立了原始全景图像

与展开图上像素点的一一对应关系,接着进行对应点灰度值复制,实现全景环形像的展开。

由于系统中锥面反射镜锥角不为 90° ,光线反射过程中,通过锥面镜反射的管壁全景图像相面不与系统轴线垂直,实际成像过程中存在近大远小现象,使全景环形图像径向存在非线性拉伸;同时,系统展开图像宽度大小受基准圆半径影响。因此,展开图像与实际管壁图像相比,帧纵横比存在偏差。由于通过系统反射光路分析图像纵向非线性拉伸系数较复杂^[12],实际研究时采用操作较为简单的特征图像标定方法修正展开图像帧纵横比。

标定时,在管壁上覆盖一张方形网格图纸,利用检测系统获取其全景图像,并对图像进行展开处理。从展开的标定图像中得到一组对角方格节点坐标数据 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$,通过最小二乘拟合法得二次行列多项式:

$$y = P(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2. \quad (11)$$

设图像修正后坐标为 (X, Y) ,则图像修正前后其坐标反向映射关系式为:

$$\begin{cases} x = X \\ y = P(Y) \end{cases}, \quad (12)$$

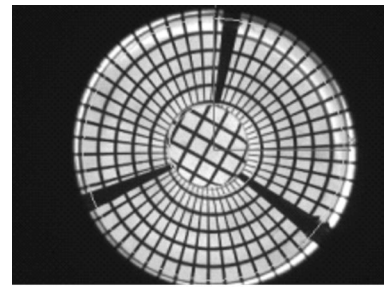
其中: $X \in [0, W_{\text{new}}], Y \in [0, P^{-1}(H_{\text{new}})]$ 。

根据图像修正关系式(12)进行图像灰度值复制,即可修正展开图像帧纵横比,得到与实际管道内壁图像帧纵横比相同的展开图。

4.3 展开结果

采用美国 NI 公司的 LabVIEW 软件实现了对相关图像处理算法的软件编程,展开算法时间复杂度为 $O(mn)$ ^[13],其中 $m = (\text{int}) \frac{1}{4} W_{\text{new}}, n = H_{\text{new}}$ 。为验证算法的准确性和可行性,利用大恒 DH-SV4021FC/FM 型分辨率为 $1\,392 \times 1\,040$ 的 CCD 相机采集 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 方形网格图像和实际管道图像,并利用软件程序对其分别进行检测处理。

网格图像处理结果如图 4 所示。



(a)网格全景图
(a)Grid panoramic image



(b)中心点不准确的展开图
(b)Unwrapped image with inaccurate center



(c)中心点准确、帧纵横比修正前的展开图
(c)Unwrapped image with accurate center and inexact frame aspect ratio



(d)中心点准确、帧纵横比修正后的展开图
(d)Unwrapped image with accurate center and exact frame aspect ratio

图 4 网格全景图对比

Fig. 4 Comparison among grid panoramic images

其中,图 4(a)为利用锥面镜全景成像装置采集的网格全景图。图 4(b)为中心点不准确时的展开图,此时,全景图像中的网格各边都存在歪斜现象。图 4(c)为在准确查找中心点的基础上,采用本文快速展开算法结合双线性插值法插值^[14]后的图像,与图 4(b)相比,图 4(c)展开图更准确,但图像的纵向存在拉伸失真的现象。对图 4(c)进行帧纵横比修正后得到分辨率为 $2\,044\text{ pixel} \times 199\text{ pixel}$ 的最终展开图,如图 4(d)所示。对图 4(d)依次进行滤波、增强、二值化和边缘提取,最后通过 Hough 变换拟合图像不同区域的网格边缘直线并计算直线间的距离得到其横向和纵向间隔^[15],测量结果如表 1 所示。

表 1 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 网格图像测量结果

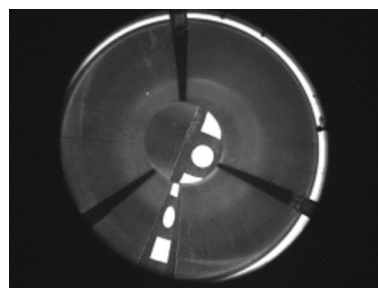
Tab. 1 Measurement results of $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ grid image

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	均值	标准差	相对	时间
									/mm	/mm	误差	/s
横向间隔/mm	7.685	7.685	7.877	8.069	8.261	8.069	7.685	7.685	7.877	0.229	1.54%	0.868
纵向间隔/mm	7.877	7.877	8.069	7.685	8.069	7.877	7.877	7.877	7.853	0.123	1.24%	

网格检测结果表明:通过查找全景图像中心点进行图像展开检测处理,其横向和纵向间隔相对误差在 1.54% 以内,全景展开时间为 0.868 s。

在一根实际管道内侧某位置粘贴 10 mm×10 mm 圆形和方形目标,获取该位置管道全景图像并进行了检测。其全景图和展开图如图 5 所示,由图 5(a)可知,该管道全景图存在明显的中心偏移现象,通过本文算法,目标测量结果如表 2 所示。

表 2 测量结果中,外切矩形参量为目标在图像行列方向所占最小矩形尺寸。由表中目标高宽比可知,该管道内壁全景展开图像帧纵横比已得到修正。由于方形目标不与管道平行,表中方形边长利用面积参数求得。最终得到圆形直径相对误差为 1.27%,方形边长相对误差为 1.49%。



(a)管道内壁全景图
(a)Panoramic image of pipe wall



(b)管道内壁全景展开图
(b)Unwrapped image of pipe wall

图 5 管道内壁检测

Fig. 5 Pipe wall detection

表 2 10 mm×10 mm 目标测量结果

Tab. 2 Measurement results of 10 mm×10 mm targets

项目 目标	外切矩形(mm)		高宽比 (b/a)	面积 /m ²	直径/边长 /mm	尺寸相 对误差
	宽 a	高 b				
圆形	10.127	10.127	1.000	80.245	10.127	1.27%
方形	10.375	10.367	0.999	102.997	10.149	1.49%

5 结 论

本文研究了基于锥面镜全景成像系统的管道内壁光电检测系统。对全景图像成像时由于设备中心偏差导致原始图像前景区全景环形图像中心偏移的情况进行了研究。利用最小二乘拟合圆心算法,全景图像 1/4 圆扫描展开算法和图像帧纵横比修正方法,准确快速地将一段管道内壁全景图像还原成便于观察和测量的矩形图像。实验结果表

明:在 LabVIEW 软件平台下,将采集的全景图像环形检测区域展开成分辨率为 2 044 pixel×199 pixel 像素的矩形图像所需时间为 0.868 s,展开图像中目标外形尺寸相对误差均在 1.54% 以内,满足图像处理过程实用性、准确性的要求。在实际管道检测中,由于设备与管道中心对中调节难度高,全景图像中普遍存在中心偏移现象;另外,如何实现图像处理的实时性和准确性是图像技术领域的热门研究。因此,本文提出的全景图像展开算法具有很好的实际应用价值和意义。

参考文献:

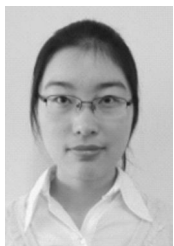
- [1] MINER R M. Methods and apparatus for testing roundness and straightness of pipes and tubes, *United States Patent*: 4354379[P]. 1982.
- [2] DO H H, MYUNG S C, DEOK H L, *et al.*. A case study on detection and sizing of defects in steam generator tubes using eddy current testing [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240 (1): 204-208.
- [3] RAIS A, SOURAV B, TRIBIKRAM K. Cylindrical guided waves for damage in underground pipes using wavelet transforms [J]. *SPIE*, 2006, 6174: 767-776.
- [4] MORITZ R, CHRISTAN W F. Rotating optical geometry sensor for inner pipe-surface reconstruction [J]. *SPIE*, 2010, 7538.
- [5] 孙文雅,李天剑,黄氏,等. 基于图像处理的管道裂缝检测[J]. *制造业自动化*, 2012, 34(1): 36-39.
SUN W Y, LI T J, HUANG M, *et al.*. Crack inspection of pipeline based on image processing [J].

- Manufacturing Automation*, 2012, 34(1): 36-39. (in Chinese)
- [6] WU J, SMITH J S, LUCAS J. Weld bead placement system for multipass welding [J]. *Science, Measurement & Technology*, 1996, 143(2): 85-90.
- [7] 郑军,徐春广,荆佩忠,等. 基于环形激光的深孔内膛形貌检测系统研究[J]. *光电工程*, 2004, 31(1): 32-35.
ZHEN J, XU CH G, JING P ZH, *et al.*. A study on a detection system based on ring laser used for inner wall of deep hole [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(1): 32-35. (in Chinese)
- [8] 解振东. 一种特殊的实时图像处理——圆环图像展开[J]. *物探化探计算技术*, 2001, 23(3): 286-288.
XIE ZH D. A special method of real time image processing for circular image transformation [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2001, 23(3): 286-288. (in Chinese)
- [9] 屠大维,陶靖. 光电内窥参数检测装置[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(5): 129-134.
TU D W, TAO J. The equipment for optoelectronic spy system for quantitative testing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 129-134. (in Chinese)
- [10] 朱嘉,李醒飞,谭文斌,等. 基于圆心约束最小二乘圆拟合的短弧测量[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2486-2492.
ZHU J, LI X F, TAN W B, *et al.*. Measurement of short arc based on centre constraint least-square circle fitting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2486-2492. (in Chinese)
- [11] ZHANG Z H, LI K J, WU X B, *et al.*. Research and implementation of the algorithm for unwrapped and distortion correction basing on CORDIC for panoramic image [J]. *SPIE*, 2008, 6623: 66231C-66231C-9.
- [12] 马子领,王建中. 折反射全景侦察图像展开和矫正方法[J]. *弹箭与制导学报*, 2010, 30(5): 173-176.
MA Z L, WANG J ZH. Unwrapping and distortion correction of catadioptric panoramic reconnaissance image [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(5): 173-176. (in Chinese)
- [13] 刘怀恩,朱昌杰,李璟. 时间复杂度的几种计算方法[J]. *电脑知识与技术*, 2011, 7(19): 4636-4638.
LIU H Y, ZHU CH J, LI J. Several calculation methods of time complexity [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2011, 7(19): 4636-4638. (in Chinese)
- [14] 王昊京,王建立,王鸣浩,等. 采用双线性插值收缩的图像修复方法[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1234-1241.
WANG H J, WANG J L, WANG M H, *et al.*. Efficient image inpainting based on bilinear interpolation downscaling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1234-1241. (in Chinese)
- [15] 韩九强,胡怀中,张新曼,等. 机器视觉技术及应用[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
HAN J Q, HU H ZH, ZHANF X M, *et al.*. *Machine Vision Technology and Applications* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. (in Chinese)

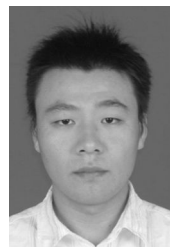
作者简介:



卜雄洙(1966—),男,吉林延吉人,博士,教授,博士生导师,1993年于南京理工大学获得博士学位,主要从事智能测控技术与系统、动态测试与虚拟仪器技术、机器视觉等方面的研究。E-mail: buxu105@mail.njust.edu.cn



李桂娟(1988—),女,江苏南通人,硕士研究生,2010年于南京理工大学获得学士学位,主要从事智能传感器、机器视觉等方面的研究。E-mail: li_guijuan@126.com



杨波(1986—),男,江苏徐州人,博士研究生,2009年于南京理工大学获得学士学位,主要从事测试系统、新型传感技术等方面的研究。E-mail: yangbo0286@163.com



王新征(1986—),女,河南周口人,博士研究生,2008年、2011年分别于河南科技大学获得学士、硕士学位,主要从事机器视觉、智能传感器等方面的研究。E-mail: wxinzheng@163.com