

基于主动式全景视觉的管道形貌缺陷检测系统

汤一平, 鲁少辉, 吴挺, 韩国栋

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 针对现有的管道缺陷检测技术不能同时对管道的形、貌缺陷进行检测与评估这一工程难题, 在前期研究工作的基础上, 设计了一种基于主动式全景视觉的管道内部缺陷检测系统, 能够快速获取管壁密集点云的三维坐标, 同时对内壁表面缺陷进行检测与评估。首先利用主动式全景视觉传感器(AODVS)实时获取内壁全景图像和激光横断面扫描全景图像, 然后对管道内壁全景图像进行柱状展开、预处理和缺陷检测及分类等处理; 然后对激光横断面扫描全景图像处理, 计算管道内壁点云的三维坐标, 进一步对管道缺陷部分进行定量分析, 最后利用三维建模技术重构带有真实纹理信息的管道模型。实验结果表明: 文中设计的检测系统能够对管道凹凸形变、孔洞、管壁裂缝、腐蚀等缺陷进行检测与分析, 具有较高的检测精度, 为管道内表面三维测量和重构提供了一种新的手段。

关键词: 主动式全景视觉传感器; 视觉三维测量; 全景激光; 管道缺陷检测

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1117005

Pipe morphology defects inspection system with active stereo omnidirectional vision sensor

Tang Yiping, Lu Shaohui, Wu Ting, Han Guodong

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: For the engineering problem of low efficiency of defects inspection and assessment of pipe with existing method, an in-pipe internal inspection system based on active stereo omnidirectional vision sensor(AODVS) was presented to acquire 3D coordinates of point cloud and detect the defects on the inner surface of pipes in real time. First, inner surface panoramic images and laser streak panoramic images were captured with AODVS, Inner surface images were processed as follow: unwrapping, preprocessing, feature extracting and defects classification, Laser streak images reflecting the shape of inner pipe were processed to calculate 3D coordinates of the point cloud of inner surface. Finally, the pipe's triangular grid model with real texture information was reconstructed by 3D modeling technique. Experiment results show the efficiency of proposed method to detect racial variation, holes, cracks and corrosions with high accuracy, this system provide a new online inspection approach to 3D measurement and reconstruction of industrial pipes.

Key words: AODVS; vision 3D measurement; omnidirectional laser; pipe defect detection

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(61070134)

作者简介: 汤一平(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事全方位视觉传感器应用、物联网和计算机视觉方面的研究。

Email: typ@zjut.edu.cn

0 引言

工业管道在能源、化工、城市水暖供应等领域的应用越来越广泛,管道运输已成为国民经济综合运输的重要组成部分。定期对管网设施进行结构性和功能性检测与评估,是保证运输过程安全可靠的关键。管道病害检测涉及管道形、貌缺陷,一方面要对内壁表面裂缝、腐蚀、孔洞等缺陷进行定性分类和定量分析,另一方面要快速、精准获取内壁点云三维坐标,对管道进行形变检测与三维重构,因此同步实现管道形、貌缺陷的定性定量检测一直是工程中的重点与难点。

传统的管道检测方法主要有:超声波检测法^[1]、涡流检测^[2]、漏磁检测法^[3]及射线法^[4]等非接触方法。上述检测方法耗时费力,需要多次接发检测信号才能完成一个横断截面的检测,且不能可视化地呈现管道缺陷检测结果;此外,近年来地下管道大量采用新型的塑料等合成材料,使得上述的检测方法失效,无法满足管道快速、精确三维重构的工程需要。

近年来,基于视觉的检测方法逐渐成为国内外的研究热点,并取得了一些引人瞩目的成果^[5-6]。CCTV(Closed Circuit Television)检测法是应用最为广泛的管道视觉检测方法^[7],但是在检测时存在以下缺陷和不足:首先,由于传统摄像机拍摄范围有限,需要不断变化视角(通过云台转动摄像机)来完成管壁一个截面的拍摄;其次,目前的图像获取方法无法对管道进行三维测量与重构。Kannala^[8]等人采用全景相机取代传统相机,能够一次性获取管壁整个圆周的图像,提高了检测效率。其采用的 SFM(Structure From Motion)方法实现三维坐标的重估计,需要实现特征点的选取与匹配,但是管壁图像背景复杂而不均匀,特征点选取往往很困难,从而导致检测精度的降低。

王颖^[9]等提出了一种圆结构光视觉检测系统,投射的圆结构光被物体表面形状调制成包含物体三维信息的光条,通过解析光条信息得到管壁密集点云的三维坐标。但是在检测时需要现场标定,限制了检测范围(不同管径的视觉检测需要调整焦距),同时无法对管壁裂缝、腐蚀等缺陷进行检测。综上所述,管网设施快

速、精准的自动化形貌缺陷检测仍需突破以下关键技术:

(1)管道内壁表面缺陷的定性定量检测。裂缝(横向、纵向)、腐蚀、孔洞等缺陷需要获得管道内壁全景图像,此外还要对缺陷进行精确定位。目前基于图像处理的方法即使能实现上述缺陷的定性分类,但是缺少内壁点云的三维信息无法计算缺陷的位置与尺寸。

(2)检测几何量。管道内径、横截面积等几何量的计算需要准确获取管道内表面点云的精确三维坐标。目前的检测系统需要满足结构光发射中心与管道中轴线严格重合以消除非对准问题引入的测量误差,此外针对不同管径的管道需要重新标定,限制了检测范围及检测效率。

文中将全方位视觉与全方位激光融合,设计了一种基于主动式全景视觉的管道内部缺陷检测系统,同时解决以下问题:①爬行者以 1 m/s 的速度行进,实时获取管道内壁全景图像和激光横断面切片图像(以下统称“内壁全景图”与“激光切片图”),全景图包含管道内壁真实纹理信息,切片图中的激光条纹反映了管道横断面的几何形状;②通过数字图像处理技术对管道内壁缺陷进行检测与分类;③采用计算机视觉技术对管道内表面进行三维测量与三维重建,将内壁全景图进行柱状展开,对三维模型进行纹理映射,反映管道内壁的真实形貌,为管道轴向变形检测提供数据。系统经一次标定后可适用多场景多目标的检测,且检测时不需要考虑中轴线配准等难题。

1 主动式全景视觉检测原理

检测系统主要由单视点全方位视觉传感器(ODVS)、圆形激光投射器和锥形镜面组成,激光器发射圆形结构光经锥面镜反射到待测管道表面,反射光线与锥形镜面轴线垂直。

如图 1 所示,ODVS 由具有单视点折反射特性的双曲面镜与透视相机组合而成,垂直反射的激光光条在管壁投射点为 G ,根据双曲面光学特性,物点 G 将沿 GO_m 在镜面 P 点成像, P 点经镜面反射必将聚焦于摄像机光心 O_c ,上述的 O_m 与 O_c 为双曲面两个焦点。

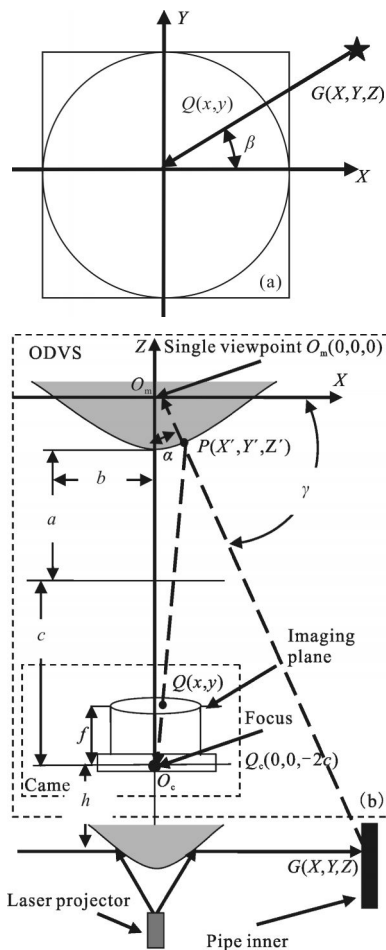


图 1 三维坐标测量原理

Fig.1 Measurement of 3D coordinates

以单视点 O_m 为原点建立空间坐标系 O_m-XYZ , 物点 G 的入射光线 GO_m 与全方位视觉传感器的主轴 O_mO_c 的夹角称为入射角, 记为 α ; 入射光线在 O_m-XY 平面的投影与 X 正半轴夹角称为方位角, 记为 β ; 物点 G 到原点 O_m 的空间距离为 r , 那么任意激光投射点的空间坐标可以由 (α, β, r) 唯一确定, 利用公式(1)和公式(2)可以计算空间点的三维坐标。

$$r_p = \frac{h}{\cos \alpha_p} \quad (1)$$

$$\alpha_p = \arctan\left(\frac{\|u''\| \beta_p}{f(\|u''\| \beta_p)}\right) = \arctan\left(\frac{\|u''\| \beta_p}{\alpha_0 + \alpha_2 \|u''\| \beta_p}\right) \quad (2)$$

式中: $\|u''\| \beta_p$ 为点在成像平面的点到成像平面中心的距离; α_0, α_2 标定的为全方位视觉传感器内外参数; H 为摄像机光心到激光平面的距离, 即 GO_m 在 Z 轴的投影距离。

如果将 G 点坐标转换成笛卡尔坐标系下的坐标表示, 计算方法由公式(3)给出:

$$\begin{cases} X=r \times \sin \alpha \times \sin \beta \\ Y=r \times \sin \alpha \times \cos \beta \\ Z=h \end{cases} \quad (3)$$

2 系统结构设计

单视点全方位视觉传感器(ODVS)、光源系统、爬行器构成检测系统的核心机构, 能实现管道形貌数据的自动采集、自动分析, 如图 2 所示。系统采用的 ODVS 视场范围为 $120^\circ \times 360^\circ$ ^[10], 用于折反射成像的双曲面设计详见参考文献[11]和[12]。光源系统包括用于管道内照明的 LED 灯、圆形激光发射器以及用于反射激光的锥形镜面。ODVS、圆锥镜面、激光发射器同轴连接, 光源设备、ODVS 以及爬行器通过 4 根透明杆支撑固定。由于激光经锥形镜面反射后垂直于固定杆投射到管道内壁, 穿过固定杆部分的激光发生折射后光路不变, 内壁上相应位置的激光投射点强度减弱, 文中采用的激光中心点提取算法依然能够准确提取其中心位置, 由于篇幅有限, 激光提取算法在文中不做详细阐述。

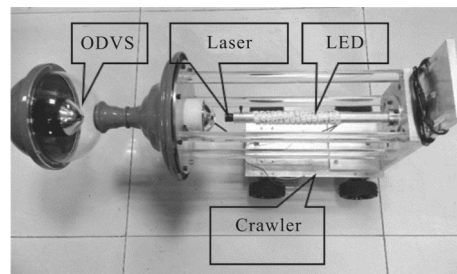


图 2 基于主动式全景视觉的管道缺陷检测装置

Fig.2 Inspection device based on AODVS

检测时, ODVS 实时拍摄内壁全景图和激光切片图保存到数据库。为了从激光切片图准确计算管道内壁点云的三维坐标, 测量前需要对 ODVS 进行标定, 系统只需标定一次, 对于不同尺寸的管道检测无需重复标定。标定是为了建立成像平面像素点与其在三维空间中对物点入射角 α 的一一对应关系, 标定原始数据通过等角旋转 ODVS 拍摄一组全景图片(如图 3 所示), 标定算法详见参考文献[13]。

标定出全方位视觉传感器的内外参数后, 就能

通过公式(4)计算成像平面像素点与对应入射角之间的映射关系:

$$\tan \alpha = \frac{\|u''\|}{f(\|u''\|)} = \frac{\|u''\|}{\alpha_0 + \alpha_1 \|u''\| + \alpha_2 \|u''\|^2 + \dots + \alpha_N \|u''\|^N} \quad (4)$$

式中: $\|u''\|$ 为成像平面的像素点到中心点的距离; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ 为全方位视觉传感器的内外部参数, 建立的对应关系如表 1 所示。



图 3 标定原始图像

Fig.3 Original images for calibration

表 1 ODVS 的标定结果

Tab.1 ODVS calibration results

Calibration parameter	α_0	α_2	α_4	A	t	Center point
ODVS	-110.210	0.002 3	-0.000 000 027	$\begin{bmatrix} 0.999 9 & -10.1e-005 \\ -9.1e-005 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 49.461 \\ -15.692 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 587.096 \\ 348.682 \end{bmatrix}$

3 缺陷检测软件系统

文中以工业运输管道为检测对象, 设计了基于主动式全景视觉的管道病害检测控制系统, 各单元协调控制步骤如下。

步骤 1: 管道爬行器置于管道底部, 输入被测管道的直径 d_0 , 长度 L_L , 读取长度测量仪的初始刻度值 L_0 , 假设爬行器的移动步长阈值为 T_z , 为保障所拍摄的管道内壁环状全景图是连续的 (连续两张全景图像有重叠区域), 阈值按照如公式(5)计算:

$$T_z \leq \frac{d_0}{2} \left(\frac{1}{\tan \alpha_{\max}} + \frac{1}{\tan \alpha_{\min}} \right) \quad (5)$$

式中: α_{\max} 表示 ODVS 的仰角; α_{\min} 为 ODVS 的俯角。

步骤 2: 爬行器的移动距离通过公式(6)计算。

$$Z_m = L - L_0 \quad (6)$$

式中: L 为长度测量仪当前的长度数据; 当移动距离 Z_m 为 nT_z ($n=0, 1, 2, \dots$) 时, 电源系统开启 LED 照明电源, 同时关闭激光发射器, ODVS 抓拍此位置的内壁全景图, 全景图保存时以爬行器此刻的移动距离 “ Z_m ” 作为文件名并传输给图像接收单元, 图像读取单元读取图像文件后将其保存在存储单元中。

步骤 3: 内壁全景图抓拍完毕, 电源系统关闭 LED 照明电源同时开启激光发射器, 控制爬行机器人以恒速移动, $i=0, \Delta Z(0)=Z_m$ 。

步骤 4: ODVS 以固定频率连续抓拍激光切片图, 计算当前爬行器移动距离 Z_m , 将所抓拍的激光切

片图以爬行距离 “ $Z_m+laser$ ” 作为文件名保存, 图像单元读取激光切片图像文件后, 将其保存在所述的图像存储单元中, 并计算 $i=i+1, \Delta Z(i)=Z_m, \Delta Z=\Delta Z(i)-\Delta Z(0)$ 。

步骤 5: 判断 $\Delta Z < T_z$ 是否成立, 若成立跳转到步骤 4。

步骤 6: 判断 $Z_m < L_L$ 是否成立, 若成立停止爬行器移动, 跳转到步骤 2。

步骤 7: 检测结束。

通过上述检测过程, 抓拍到两组图像序列, 即以 “ $Z_m+laser$ ” 为前缀的激光切片全景图和以移动距离 “ Z_m ” 为前缀的内壁全景图。

图 4 所示为基于主动式全景视觉的管道缺陷检测处理框图, 通过上述检测过程, ODVS 拍摄的管道内壁全景图和激光切片图存储在图像数据库中, 基于内壁全景图的缺陷检测模块读取内壁全景图像, 全景图首先进行柱状展开和预处理, 然后通过特征提取等处理单元, 分别计算管壁表面疑似缺陷的面积、周长、圆形度、凸度及边界离心率等特征量, 最后判断疑似缺陷类型; 基于激光切片图的缺陷检测模块读取所有切片图像序列, 通过相应的处理单元计算出管道内壁密集点云的三维信息, 并计算管道横截面积、最小直径, 然后计算管道横截面变形程度, 最后结合内壁全景图的纹理信息和管壁点云的三维信息, 对管道内壁进行三维重构。

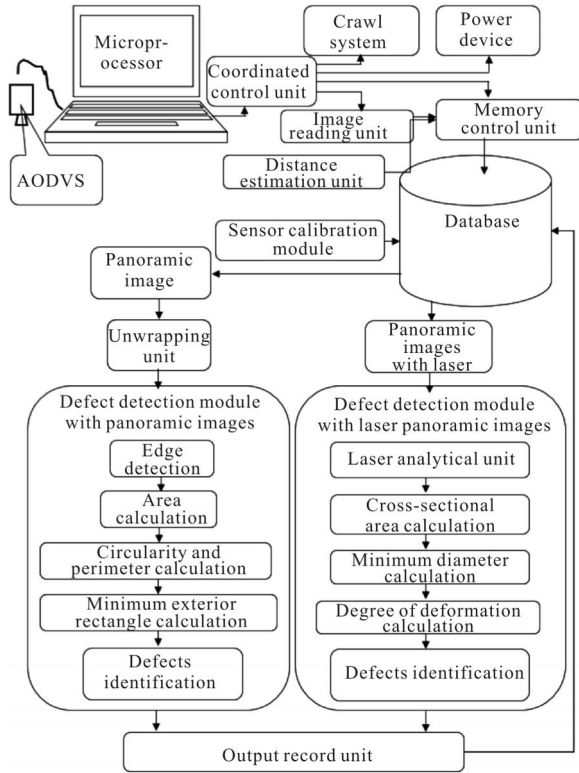


图 4 处理流程

Fig.4 Processing flow

4 实验结果

图 5 为系统对尺寸为 50 cm×60 cm×100 cm 的方形管道进行检测,预先在管道内壁上设置了腐蚀、裂缝等缺陷,检测过程中 ODVS 间隔 1 cm 抓拍一张激光切片图,抓拍内壁全景图的间隔阈值为 50 cm。

首先对内壁全景图进行柱状展开和预处理,提取出疑似缺陷区域,如图 6 所示,计算疑似缺陷区域的面积、周长、圆形成度、凸度和边界离心率的值如表 2 所示,最后判定出疑似缺陷的类型。

另一方面,对所有激光切片图进行处理,图 7 所示为某一位置拍摄的激光切片图,提取激光线中心位置,如图 8 所示,最后根据标定的数学模型计算管



图 5 检测环境

Fig.5 Inspection environment

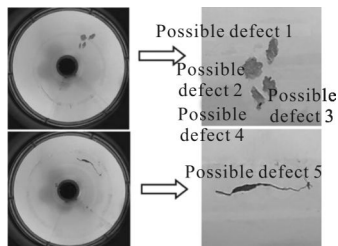


图 6 腐蚀与裂缝缺陷

Fig.6 Corrosion and crack defects

表 2 疑似缺陷判定

Tab.2 Determination results of the possible defects

Geometrical feature	Possible defect 1	Possible defect 2	Possible defect 3	Possible defect 4	Possible defect 5
Area	781	1058	703	492	847
Perimeter	155.498	164.992	131.221	133.802	411.198
Circularity	0.403	0.495	0.520	0.339	0.063
Convexity	0.753	0.862	0.806	0.871	0.252
Boundary eccentricity	2.139	1.103	1.322	2.178	7.523
Category	Corrosion	Corrosion	Corrosion	Corrosion	Annular crack

壁点云的三维坐标。根据三维坐标值计算管道横截面面积平均值为 0.300 8 m²,实际横截面积为 0.3 m²,检测相对误差为 0.27%,图 9 为管道的三角格网模型和纹理映射后的三维模型。

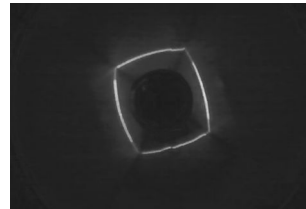


图 7 激光切片图

Fig.7 Panoramic image of laser

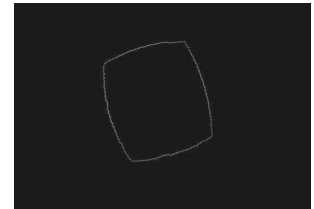


图 8 提取的激光中心线

Fig.8 Extracted laser central line

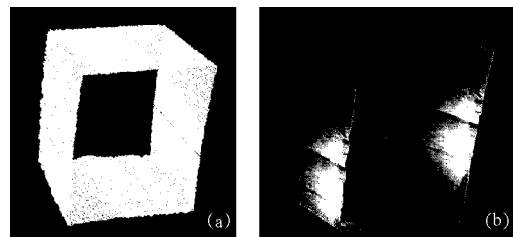


图 9 三角格网模型与带有纹理信息的三维模型

Fig.9 Triangular grid model and texture mapping model

为了验证检测系统对管壁孔洞的检测效果,对直径为 50 cm 的圆形管道进行检测,预先在管壁中央留出规则孔洞,如图 10 所示,为有孔洞缺陷的圆形管道的三角格网模型,系统能检测出管壁孔洞位置并对其进行三维模型的绘制。此外,还对管道接口处的弯头部分进行测量和三维重构,检测装置在旋转、平移后,点云坐标能实现全局配准,转换到世界坐标系下的坐标。

文中还开发设计了一个基于主动式全景视觉的管道内部缺陷检测人机交互界面,如图 11 所示,系统能够分别对管道进行点云显示、三角格网模型显示以及带有纹理信息的三维模型显示,用户可以对模

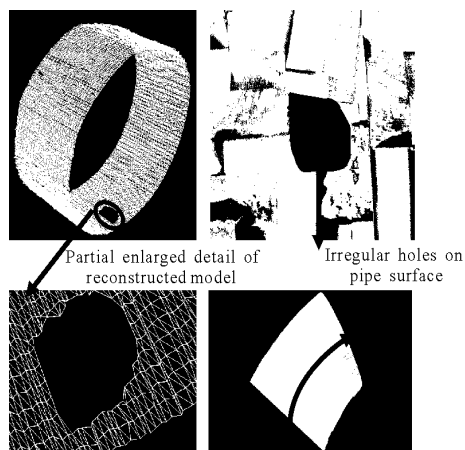
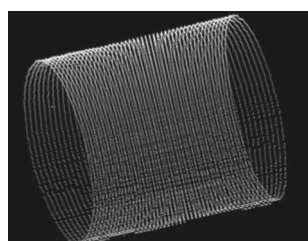


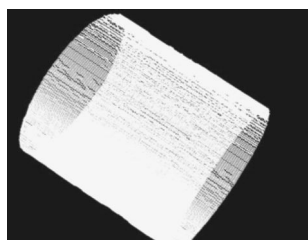
图 10 弯曲管道、带孔洞的圆形管道的重构

Fig.10 Reconstruction of curved pipe and circular pipe with hole



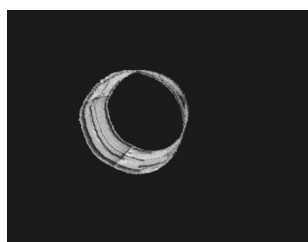
(a) 内壁全景图柱状展开

(a) Unwrapped image of internal panoramic image



(b) 三维模型显示

(b) 3D model display



(c) 控制、显示选项卡

(c) Control and display TAB

图 11 管道缺陷检测系统用户界面

Fig.11 User interface of defects inspection system

型进行缩放、平移和旋转来改变观察视角,还能对管道内壁全景展开图进行显示。同时系统还将各单元控制模块集成到界面上,用户可以根据自己的需求设定全景激光的扫描范围和步长,以满足不同扫描范围及

不同扫描精度的需要。扫描前的预备工作仅仅是将文中的检测装置放置在待测管道初始位置。

5 结论

文中基于主动式全景视觉技术提出了能够同时检测管道形、貌缺陷以及管道内表面三维重构的方法,并开发了相应的检测系统。实现了全景激光与全景视觉传感器的融合,全景视觉传感器获取管壁全景图像,经过柱状展开、预处理等步骤,提取疑似缺陷区域,最后对缺陷进行模式分类;同时,拍摄的全景激光扫描图像能够解析管道内壁点云的三维坐标,点云采集方式不存在数据重叠、冗余的情况,不需要数据配准等病态计算步骤,检测时不需考虑装置中线与管道中轴线配准等繁琐问题。实验结果表明,文中提出的检测方法和系统能够实现对管壁裂缝、腐蚀、凹凸形变、孔洞等缺陷的检测,结合内壁全景图的纹理信息和激光切片图计算的点云三维信息,能够恢复管道的三维形貌,具有较高的检测精度。

文中取得的成果总结如下:

(1)提供了一种同时检测管道形、貌缺陷的自动化检测装置,并开发了相应的检测系统,实现采集、识别、判定自动化。

(2)文中设计的检测装置最大工作管径为1000 mm,最小工作管径为 400 mm,对于不同管径检测时不需要重新标定,且不需要考虑进行中轴线配准等技术难题。

(3)将反映内壁纹理信息的全景图和管壁三维点云结合,实现管道内壁三维建模。

参考文献:

- [1] Comez F, Althoef K, Senevirayne L D. Modeling of ultrasound sensor for pipe inspection [J]. *IEEE*, 2003, 2(9): 2555-2560.
- [2] Xin Wei, Ding Keqin, Huang Donglin, et al. Pulse eddy current detection simulation of the pipe corrosion with insulation layer [J]. *Nondestructive Testing*, 2009, 31(7): 509-512. (in Chinese)
- 辛伟, 丁克勤, 黄冬林, 等. 带保温层管道腐蚀缺陷的脉冲涡流检测技术仿真[J]. *无损检测*, 2009, 31(7): 509-512.
- [3] Tang Ying, Pan Mengchun, Luo Feilu, et al. Detection of corrosion in pipeline using pulsed magnetic flux leakage testing[J]. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18(1): 38-43. (in Chinese)

- 唐莺, 潘孟春, 罗飞路, 等. 管道腐蚀检测中的脉冲漏磁检测技术[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(1): 38-43.
- [4] Wang Ying, Wang Jianlin. Optoelectronic inspection of in-pipe surfaces [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(5): 735-739. (in Chinese)
王颖, 王建林. 细管道内表面光电检测方法研究 [J]. 应用光学, 2008, 29(5): 735-739.
- [5] Duran O, Althofer K, Seneviratne L D. Automated pipe defect detection and categorization using camera/laser-based profiler and artificial neural network [J]. *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, 2007, 4 (1): 118 - 126.
- [6] Wu Bin, Xing Xiukui, Zhang Yunhao. Flexible in-line measurement technology for surface defects of small bores[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 2944-2951.
吴斌, 邢秀奎, 张云昊. 微细管道内壁缺陷柔性在线测量技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2944-2951.
- [7] Koch C, Georgieva K, Kasireddy V, et al. A review on computer vision based defect detection and condition assessment of concrete and asphalt civil infrastructure ☆ [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2015, 29: 196-210.
- [8] Kannala J, Brandt S S, Heikkilä J. Measuring and modelling sewer pipes for video [J]. *Machine Vision and Applications*, 2008, 19(2): 73-83.
- [9] 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.
- [10] Tang Yiping, Ye Yongjie, Zhu Yihua, et al. The application research of intelligent omni-directional vision sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20 (6): 1316-1320. (in Chinese)
汤一平, 叶永杰, 朱艺华, 等. 智能全方位传感器及其应用研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(6): 1316-1320.
- [11] Yamazawa K, Yagi Y, Yachida M. Obstacle detection with omnidirectional image sensor hyperOmni vision [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995 (5): 1062-1067.
- [12] Wang Qing, Tang Yiping, Zong Mingli, et al. Design of vertically aligned binocular omnistereovision sensor [J]. *Eurasip Journal on Image & Video Processing*, 2010, 7525 (1): 1-24.
- [13] Scaramuzza D, Martinelli A, Siegwart R. A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras[C]//IEEE International Conference on Intelligent Systems, 2006(6): 5695-5701.