

文章编号: 1001-3806(2016)01-068-05

一种管道内 3 维形貌检测系统

戴欣冉, 钱晓凡*, 徐天杰, 郎海涛

(昆明理工大学 理学院 激光研究所, 昆明 650500)

摘要: 为了解决常见结构光管道内 3 维形貌检测系统存在光线遮挡引起测量误差和“盲区”的问题, 采用了一种新改进的圆结构光垂直照明、用两个互补金属氧化物半导体摄像机同步拍摄的管道内 3 维形貌检测系统, 建立了适合该系统的图像处理 and 系统标定方法, 完成了检测实验。结果表明, 该系统可以很好地解决“盲区”问题, 减小了测量误差, 系统的标准差为 0.50mm, 并能得到完整的管道内壁 3 维形貌信息。

关键词: 测量与计量; 3 维形貌检测; 圆结构光; 系统标定

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.01.015

A novel 3-D shape inspection system for in-pipe surfaces

DAI Xinran, QIAN Xiaofan, XU Tianjie, LANG Haitao

(Institute of Laser, Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to solve the problem of measurement error and blind zone because of light obstruction and obtain a satisfactory 3-D shape of in-pipe surface, a novel 3-D shape inspection system for in-pipe surfaces was proposed. The system was set up with a circular structured light to illuminate vertically and dual complementary metal oxide semiconductor cameras to record images simultaneously. Image process algorithm and calibration method for the inspection system were founded. The results of verification experiment show that standard deviation of the system is 0.50mm. The system has good ability to solve the problem of blind zone, reduce the measurement error, and obtain whole 3-D shapes of in-pipe surfaces.

Key words: measurement and metrology; 3-D shape inspection; circle structured light; system calibration

引言

管道由于经济、安全、高效的特点, 逐渐成为石油、天然气的重要运输手段, 同时也在工业、农业等各行业有着广泛的应用。但是, 由于管道输送的对象大部分都具有腐蚀性, 而且部分管道长期置于地下工作, 恶劣的环境会对管道造成损伤, 导致泄漏事故的发生, 因此定期的管道检测对于保障安全生产具有重要的意义^[1-3]。通常检测管壁是否有裂纹和厚度变化主要借助超声检测^[4-5]、漏磁检测^[6]、射线探伤和高频涡流检测, 而检测管道因腐蚀、外力和磨损引起的内径变化和形变(即要获得管道的 3 维形貌^[7]), 则更多借助光电检测的方法^[8-10]。目前检测管道内壁 3 维形貌最具代表性的光电方法有闭路电视(closed circuit television, CCTV)摄像法^[11]、光截面法、结构光法^[12-14]和基于位

置传感器的光电检测法^[15]等, 并且逐渐与机器视觉相结合^[16]。

结构光法融合了影像技术和图像处理技术, 是光电检测法中最常用的一种, 其原理是将结构光投射在管道内壁上, 通过研究管道内径变化与结构光形变之间的关系实现 3 维形貌检测, 根据投射光源形式的不同又可以分为点结构光法^[14]、圆结构光法^[17]、线结构光法、多线结构光法、面结构光法、网格结构光法和编码结构光法等。但无论哪种方法都或多或少受到“盲区”的影响并引入测量误差。本文中针对该问题, 受双目结构光扫描技术的启发^[18-19], 从改进结构光和光电记录系统两方面入手进行了研究, 建立了一种新的管道内 3 维形貌检测系统。

1 典型的结构光管道内壁 3 维形貌检测系统及改进

结构光 3 维形貌检测以光学三角法测量原理为基础: 目标物(待测物体)、投影点、观测点在空间上构成唯一的三角关系, 系统逐个检测管道的剖面, 再用这些剖面拼接出完整的管道内壁 3 维形貌。典型的圆结构光管道内壁 3 维形貌检测系统如图 1 所示。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61067004)

作者简介: 戴欣冉(1985-), 女, 硕士研究生, 现主要从事光信息处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: qianxiaofan1@sina.com

收稿日期: 2014-10-09; 收到修改稿日期: 2014-11-06

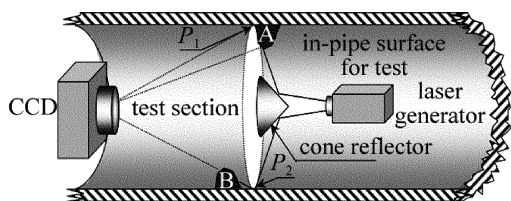


Fig. 1 Schematic diagram of classical 3-D inspection system for in-pipe surface with circle structured light

系统主要由圆结构光传感器(激光器和锥反射镜)、摄像机和计算机(完成图像采集、处理并显示结果)三部分构成。注意图1中检测剖面与管壁的两个交点 P_1 和 P_2 ,如果管壁有严重的缺陷将会对结构光造成遮挡:缺陷A在检测剖面与结构光传感器之间,会遮挡投向 P_1 点的结构光,使真正进入摄像机的光线反射自A,而非检测剖面上的 P_1 点,从而引入测量误差。同样,缺陷B在检测剖面之后,会遮挡反射自 P_2 点的结构光,导致“盲区”。

针对这个问题,作者从结构光和光电记录系统两方面进行了改进,建立了如图2所示的新检测系统。

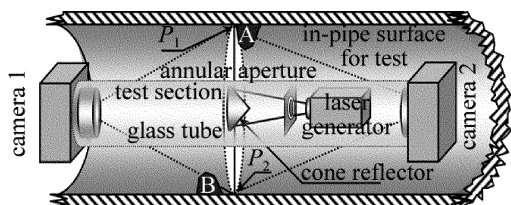


Fig. 2 Schematic diagram of an improved 3-D inspection system for in-pipe surface with circle structured light

首先,在圆结构光传感器中增加了一个环形光阑,激光束(波长 $\lambda = 533\text{nm}$)通过该光阑,经锥面反射镜后成为一发散的薄面状圆结构光,与检测面重合,垂直透射到待测管壁上,这样可以避免在检测剖面与结构光传感器之间的缺陷(见缺陷A),遮挡结构光,以至将结构光从缺陷的表面(而不是检测剖面与管壁的交点)反射入摄像机,继而引入测量误差的问题。其次,新增加了一台摄像机(见图中摄像机2),用以避免在检测剖面之后的缺陷(见缺陷B)遮挡结构光,导致“盲区”出现的问题。圆结构光传感器和两台摄像机相对位置固定,封存于一个透明玻璃管内,构成系统的光电探头,便于在待测管道内整体移动。

两台大恒DH-HV3151UC型互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)摄像机($2048\text{pixel} \times 1536\text{pixel}$)输出的图像信号,接入到由HL-1型51开发板、STC89C52RC单片机和PC机各一构成的图像采集和处理系统。为了避免在拍摄过程中出现“盲区”,两台CMOS摄像机必须同步拍摄,利用CMOS的外触发实现这一功能。设计用开发板和单片机作为双CMOS外同步触发的下位机,通过集成开

发软件Keil $\mu\text{Vision4}$ 来编写所需的单片机C语言控制程序,经Keil $\mu\text{Vision4}$ 编译后形成后缀名为.HEX的可执行文件,然后将程序烧入单片机内。通过串口通信控制器和上位机向单片机发送控制指令,产生控制双CMOS同步曝光并采集的脉冲信号,而双CMOS直接与上位机相连,将采集到的图像数据传到上位机,通过上位机处理并保存。程序流程如图3所示。

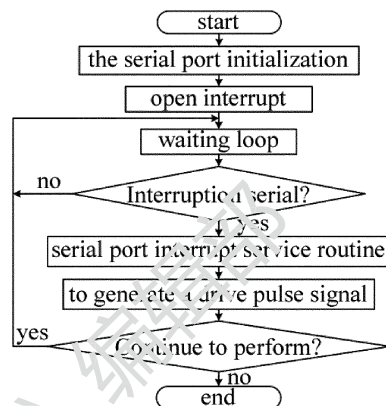


Fig. 3 Control flowchart of microcontroller

2 图像处理及检测系统标定

为了从采集的变形圆结构光图像信息得到正确的管道内壁3维形貌,必须做图像处理。结构光形成的检测面与待测物体的交线是有一定宽度的光条,其横截面光强分布近似服从高斯分布^[16],通常检测面中心视为光条的中心。为了提取光条中心,作者先对图像做必要的预处理:滤除杂散光,再将图像二值化。以一幅实际的检测图像为例,处理过程如图4所示。

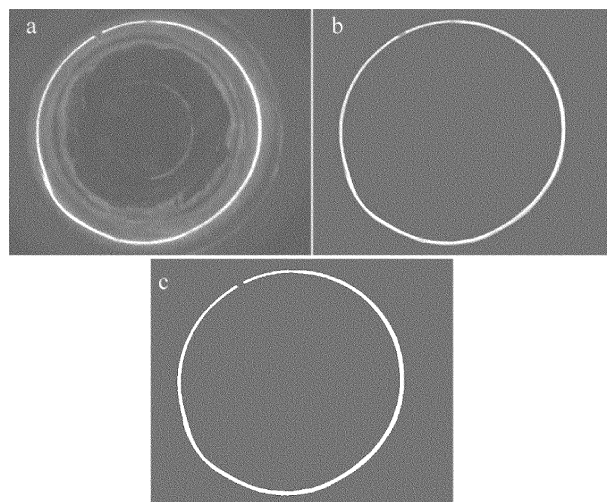


Fig. 4 Pre-process of image

a—original image b—filtered image c—binary image

假设光条上一个像素点(坐标为 (m_i, n_i))在待测圆周上,圆心处像素的坐标以及圆周半径分别为 (m_0, n_0) 和 R ,应该有如下圆方程:

$$(m_i - m_0)^2 + (n_i - n_0)^2 = R^2 \quad (1)$$

该方程展开后可写为:

$$m_i^2 + n_i^2 = 2m_i m_0 + 2n_i n_0 - m_0^2 - n_0^2 + R^2 \quad (2)$$

设光条上的像素点共有 N 个, 则有 N 个形如(2)式的等式, 可合并为一个矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} m_1^2 + n_1^2 & \cdots & m_i^2 + n_i^2 & \cdots & m_N^2 + n_N^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2m_0 & 2n_0 & -m_0^2 - n_0^2 + R^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_1 & \cdots & m_i & \cdots & m_N \\ n_1 & \cdots & n_i & \cdots & n_N \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

该矩阵方程中 3 个矩阵分别为 $1 \times N, 1 \times 3, 3 \times N$ 的形式, 如果记矩阵 $T = [2m_0 \quad 2n_0 \quad -m_0^2 - n_0^2 + R^2]$, 则从(3)式可以求解 T 的最小二乘解, 从而得到待测圆周的圆心坐标 (m_0, n_0) 和半径 R 。

接下来是细化光条。根据得到的圆心坐标 (m_0, n_0) 和每一个像素点坐标 (m_i, n_i) , 将像素点坐标从直角坐标 (m_i, n_i) 转换为原点与圆心重合的极坐标 (r_i, θ_i) , 然后将从 $0 \sim 2\pi$ 的极角取等间隔 $\Delta\theta$ 分割为 M 份:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 0, \theta_2 = \Delta\theta, \theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta = 2\Delta\theta, \\ \cdots, \theta_i &= (i-1)\Delta\theta, \cdots, \theta_M = 2\pi \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\Delta\theta = \frac{2\pi}{M-1}$, 再将 N 个像素点按极角 $\theta_i (i=1, 2, 3, \cdots, M)$ 排序, 并分别计算每个极角间隔内像素点半径(极径)的平均值:

$$\bar{r}_i(\theta_i) = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s r_j, ((i-1)\Delta\theta \leq \theta_j < i\Delta\theta) \quad (5)$$

由上式得到的曲线 $\bar{r}_i(\theta_i) (i=1, 2, 3, \cdots, M)$ 即为细化后的光条。

尽管两台摄像机在设置时已经尽量调校到对称、同轴, 但实际上还是会有一些偏差, 需要对图像做匹配处理: 取没有形变的标准圆形管道, 分别用两台摄像机拍摄, 将图像按前述作预处理, 计算各自的圆心和半径, 并完成细化。然后固定其中一台摄像机的结果不变, 将另一台摄像机细化曲线缩放到半径与前者相同, 再整体平移该曲线, 使两者的圆心相互重合。记录下半径缩放倍数和曲线整体平移量, 作为实际检测时图像匹配的参量。

最后是所得曲线的融合: 对两台摄像机均没有遮挡的部分, 融合后的半径取两台摄像机测得半径的平均值; 对一台摄像机有遮挡而另一台无遮挡的部分, 融合后的半径取无遮挡摄像机测得半径。由于所用结构光“垂直”投射到管壁上, 遮挡信号的是检测位置处之外的缺陷, 而检测位置处待检缺陷不会形成遮挡, 故融合算法不会导致缺陷的漏判。融合过程如图 5 所示。

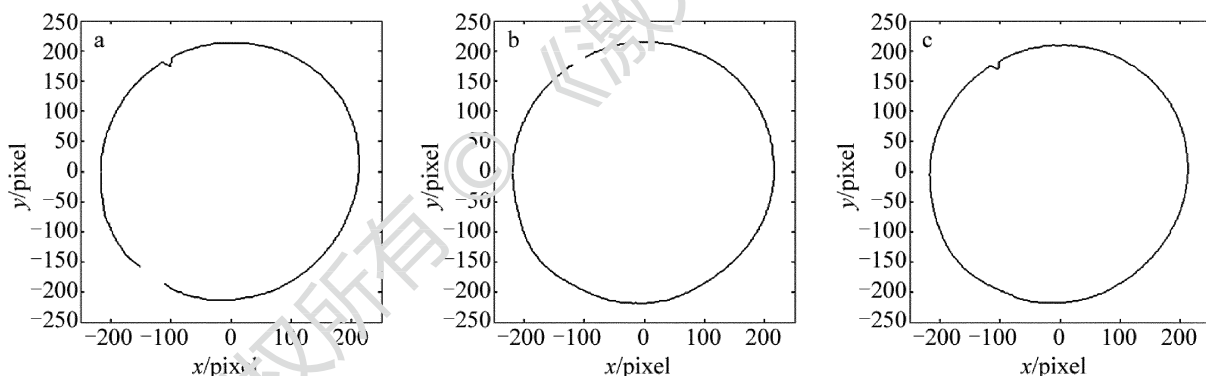


Fig. 5 Schematic diagram of image thinning and fusion

a—thinning image of camera 1 b—thinning image of camera 2 c—fusion image

需要说明的是, 系统选用一根金属杆作为支架, 1 号摄像机在支架方向上的光线会被遮挡, 其位置是确定和已知的。在该遮挡位置, 用 2 号摄像机的测量值通过融合补全曲线。从图 5a 可以看到, 左下角处有一段细化曲线缺失, 这是被支架遮挡形成的, 在左上角处有一凸起, 由于该凸起物的遮挡, 在图 5b 的对应位置处曲线无检测值, 即单独从摄像机 1 或摄像机 2 得到的细化曲线都是不完整的, 有“盲区”存在, 将两条细化曲线融合后得到的曲线才是完整的。

3 系统标定

最后是测量系统的精度并进行校准, 即系统标定。

采用将摄像机和结构光一并进行现场标定的方法进行。

由于结构光沿垂直于管壁的方向照射, 不方便同时设置并测量半径各不相同的标靶, 以一小块有高反射率的平板为标靶, 它可以准确移动到半径不同的测量点(每次半径增加 5.0mm)。圆结构光投射到标靶上反射一竖直亮线, 用摄像机拍摄下来, 对图像做预处理、细化, 分别求出各条细线到圆心的垂直距离(即半径 r_s)对应的像素数 p , 多次测量求平均, 得到标靶半径与像素数的实验测量值表, 见表 1。

利用表 1 中的实验值 p , 通过多项式拟合可以得到像素与半径的函数关系式:

$$r = 6.579 \times 10^{-5} p^2 + 0.371 p - 3.010 \quad (6)$$

Table 1 Experimental data of target radius r_s and corresponding pixels p

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
r_s/mm	64.0	69.0	74.0	79.0	84.0	89.0	94.0	99.0	104.0	109.0	114.0	119.0
p/pixel	174.8	188.5	199.8	213.1	224.7	238.2	251.6	261.2	275.5	289.2	302.0	312.6
r/mm	63.85	69.26	73.74	79.04	83.68	89.09	94.50	98.38	104.19	109.78	115.03	119.39
measurement error/mm	-0.15	0.26	-0.25	0.04	-0.32	0.09	0.50	-0.62	0.19	0.78	1.03	0.39
No.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
r_s/mm	124.0	129.0	134.0	139.0	144.0	149.0	154.0	159.0	164.0	169.0	174.0	
p/pixel	322.6	335.1	346.6	358.6	372.3	384.4	394.0	408.7	417.1	431.1	444.0	
r/mm	123.52	128.70	133.48	138.49	144.23	149.32	153.38	159.61	163.18	169.15	174.68	
measurement error/mm	-0.48	-0.30	-0.52	-0.51	0.23	0.32	-0.62	0.61	-0.82	0.15	0.68	

将用于标定的半径值 r_s 与用(6)式计算得到的实测半径 r 相减,得到系统的测量误差,也列于表1中,由此可以求得系统的标准差为 $\sigma_r = 0.50\text{mm}$ 。

实验数据和拟合曲线见图6。从(6)式和图6可以看到,半径 r 与像素数 p 有很好的线性关系,说明所用 CMOS 摄像机镜头的畸变很小。

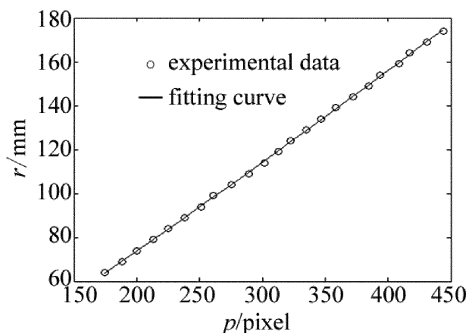


Fig. 6 Experimental data and fitting curve of r and p

4 测量实验

为了验证检测系统,作者用一段已知内径标称值和预设缺陷大小的 PVC 管道,进行了内壁3维形貌检测系统的测量实验。该 PVC 管道内径标称值为158.0mm,管道内预设了两个高度分别为7.0mm和8.0mm的凸起,以及一个深度为2.0mm的凹陷。

用实验图像处理得到的管道内壁半径为214.1pixel,代入(6)式得半径为79.44mm,即系统测得的管道内壁直径为158.88mm,测量误差为0.56%。

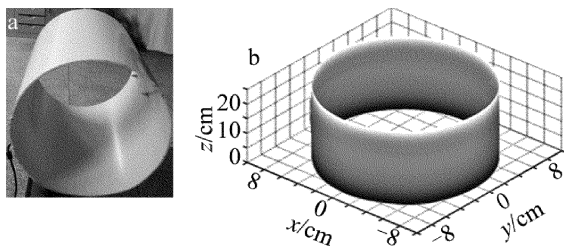


Fig. 7 Testing pipe sample and the reconstructed 3-D shape of in-pipe surface
a—the pipe for test b—reconstructed 3-D shape of in-pipe surface

而两个凸起和凹陷处图像的像素值分别为26.6pixel, 29.3pixel和13.6pixel,同样代入(6)式得到它们的测量值分别为6.91mm,7.92mm和2.05mm,与实际预设值对比,测量误差分别为1.29%,1.00%和2.50%。待测管道实物及重构3维形貌如图7所示。

5 结论

由于目前的检测系统大多采用单探头结构,结构光管道内3维形貌检测系统存在光线遮挡,会引起测量误差和“盲区”,针对这个问题,作者提出了一种使用改进的圆结构光垂直照明、双摄像机同步拍摄的管道内3维形貌检测系统,建立了适合该系统的图像处理 and 系统标定方法,完成了检测实验。实验证明,该系统可以很好地解决“盲区”问题,系统的标准差为 $\sigma_r = 0.50\text{mm}$,并能得到完整的管道内壁3维形貌信息。

参考文献

- [1] YUAN H M. Question and answer of the pipeline inspection technologies[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010:100-105 (in Chinese).
- [2] DURAN O, ALTHOEFER K, SENEVIRATNE L D. Pipe inspection using a laser-based transducer and automated analysis techniques[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(3): 401-409.
- [3] JIANG C J, JU X M. The development and actuality of oil-gas pipeline detection technologies[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, 40(3):83-86 (in Chinese).
- [4] XUE L J, ZHANG J H, FU D L, et al. The application of ultrasonic guided wave testing technology on the inspection of pipelines [J]. Guangzhou Chemical, 2013, 41(15):184-186 (in Chinese).
- [5] REBER K, BELLER M, WILLEMS H, et al. A new generation of ultrasonic in-line inspection tools for detecting, sizing and locating metal loss and cracks in transmission pipe lines[J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2002, 1:665-671.
- [6] YANG L J. The internal pipeline detection with magnetic flux leakage [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014:50-52 (in Chinese).
- [7] ZHANG G J, HE J J, LI Z X. A novel 3-D shape inspection system for inside surface of microminiature workpiece[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(3):302-306 (in Chinese).
- [8] MA B B, LI Y, NENG Ch X. The detection of inner-pipeline obstruction with laser projection photograph method [J]. Optoelectronic Engineering, 2013, 40(1): 113-115 (in Chinese).

- [9] WANG Y, ZHANG R. In-pipe surface circular structured light 3-D vision inspection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3):891-896(in Chinese).
- [10] DURAN O, ALTHOEFER 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 and Engineering*, 2007, 4(1): 118-126.
- [11] CHEN Y, YU P. Automatic nondestructive optical technique for detection of surface pipeline [J]. *Measurement Technology*, 2000, 50(6):6-9(in Chinese).
- [12] CHEN Y, YU P. Photoelectric sensing technology for nondestructive detection of pipeline [J]. *Measurement Technology*, 1999, 19(4): 265-269(in Chinese).
- [13] WANG Y, WANG J L. Optoelectronic inspection of in-pipe surfaces [J]. *Application of Optical*, 2008, 29(5):735-739(in Chinese).
- [14] TSUBOUCHI T, KAWAGUCHI Y, TAKAKI S. A straight pipe observation from the inside by laser spot array and a TV camera[C]// *Proceedings of 2000 International Conference on Intelligent Robots and Systems*. New York, USA:IEEE, 2000:82-87.
- [15] WU E Q, KE Y L, LI J X, *et al.* Non-contact inspection based on laser-PSD for the inner surface of small-diameter pipes [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(9):1080-1084(in Chinese).
- [16] WU B, HAN W Q, SHAO Zh Y, *et al.* Surface defects inspecting inside small bores based on machine vision [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(11):2137-2141(in Chinese).
- [17] WANG Y, ZHANG R, ZHANG Y. Constructing method of calibration feature points used for circle structure light vision sensor[J]. *Application of Optical*, 2012, 33(5): 884-888(in Chinese).
- [18] DI X, QU X H, JIAN G W, *et al.* Rapid measurement and modeling technologies of large pipes and their application [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(2): 338-343(in Chinese).
- [19] ZHANG Sh B, XIONG X M, JIANG Q B, *et al.* Trinocular vision 3-D coordinate measuring system based on target[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4):523-528(in Chinese).