

DOI: 10.3969/j.issn.1673-064X.2022.01.018

中图分类号: TE927

文章编号: 1673-064X(2022)01-0137-06

文献标识码: A

基于激光扫描视觉三维建模的 井筒可视化检测技术

姚强¹, 王志兴², 杜旭², 严正国^{3,4}, 阚绍佑^{3,4}, 杨琨^{3,4}

(1. 中石化江汉石油工程技术研究院, 湖北 武汉 430000; 2. 中国石油川庆钻探 长庆井下技术作业公司, 陕西 咸阳 712000;
3. 西安石油大学 电子工程学院, 陕西 西安 710065; 4. 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 为保证油气井的安全生产, 需要准确掌握套管的损坏状况。采用线结构光视觉检测的原理, 提出了一种基于激光扫描、视觉三维建模的井筒可视化检测方法。利用环形激光器扫描井筒, 井下摄像机记录扫描结果, 通过视频处理技术识别扫描结果, 提取井筒特征参数, 建立了三维数字化井筒模型。该方法缩短了仪器长度, 采用非接触测量, 解决了仪器容易受阻的问题, 降低了作业成本, 提高了检测精度和径向分辨率。仿真实验结果表明: 该方法的理论精度为 0.245 mm, 建立的三维井筒模型更加精确。为有效检测套管的损坏状况提供了一种新的检测方法。

关键词: 套损检测; 线结构光; 激光扫描; 三维重构; 非接触测量

Research on Borehole Visual Inspection Technology Based on Laser Scanning and Vision 3D Modeling

YAO Qiang¹, WANG Zhixing², DU Xu², YAN Zhengguo^{3,4}, KAN Shaoyou^{3,4}, YANG Kun^{3,4}

(1. Petroleum Engineering Technology Research Institute, Sinopec Jiangnan Oilfield, Wuhan, Hubei 430000, China;
2. Changqing Downhole Technical Operation Company, PetroChina Changqing Drilling Engineering Company Limited, Xi'an, Shaanxi 712000, China; 3. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyu University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;
4. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: To ensure the safe production of oil and gas wells, it is necessary to accurately understand the damage of casing. A borehole visual inspection technology based on laser scanning and vision 3D modeling is proposed based on the principle of linear structural light vision inspection, and a three-dimensional digital wellbore model is established by scanning wellbore using annular laser, recording the scanning result using downhole camera, identifying the scanning result using video processing technology and extracting the characteristic parameters of the wellbore. This technology shortens the length of the instrument, solves the problem that the instrument is easy to encounter resistance force by non-contact measurement, reduces the operation cost, and improves detection accuracy and radial resolution. The simulation results show that the theoretical inspection accuracy of this technology is 0.245 mm, and the established 3D wellbore model is more accurate, which provides a new method for the effective detection of casing damage.

Key words: casing damage detection; linear structure light; laser scanning; three-dimensional reconstruction; non-contact measurement

姚强, 王志兴, 杜旭, 等. 基于激光扫描视觉三维建模的井筒可视化检测技术[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(1): 137-142.

YAO Qiang, WANG Zhixing, DU Xu, et al. Research on borehole visual inspection technology based on laser scanning and vision 3D modeling[J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2022, 37(1): 137-142.

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05060)

第一作者: 姚强(1971-), 男, 工程师, 研究方向: 生产测井及仪器仪表研发。E-mail: qlyao345@163.com

通讯作者: 严正国(1976-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 可视化测井技术及仪器。E-mail: zhgyan@xsyu.edu.cn

引言

油、气井的油套管在服役期间由于受到腐蚀、地层外部应力、井液腐蚀、井下作业的影响,可能发生扩径、缩径、形变甚至破损,影响生产安全^[1]。因此,准确掌握套管损坏状况对于研究其损坏机理及采取保护和修补措施具有十分重要的意义^[2]。目前,国内外用于油套管检测的方法主要有3种:多臂井径测井^[3-4]、磁方法测井^[5]和可视化测井^[6-8]。多臂井径测井利用多臂一次下井可录取最大、最小内径,套管的变形、破损、射孔质量,但无法检测套管的腐蚀状况,也无法定量解释;径向分辨率取决于探测臂的数量,数量越多分辨率越高,但由于结构尺寸的限制,管径较小时能安装的探测臂较少,管径较大时能安装的探测臂较多,径向分辨率一般为 9° ^[9-10];而且测量时探测臂需要张开接触管壁进行测量,管壁变形或破损时增大了仪器遇阻的风险。磁方法测井如管子分析仪、电磁测厚仪等,利用磁性可以对套管的破损、射孔的质量和剩余壁厚进行检测,但无法检测套管的变形、腐蚀,且无法定量解释。可视化测井通过测井电缆实时获取井眼视频图像,能够非常“真切”地反映井下真实状况,对套管的变形、破损、腐蚀、粘污、错断、射孔质量等进行检测,并提供更加直观、可靠的检测结果。但由于摄像机本身固有的特性,无法构建井眼立体特征,定量描述也存在一定的困难。

为此,本文提出一种基于激光扫描视觉三维建模的井筒可视化检测方法,该方法基于激光视觉技术提取激光条纹边界,通过对边界上的坐标点进行采样、量化、插值对齐边界数据,为便于观察管柱缺陷再给管柱填充颜色,绘制出精确的管柱三维模型。

1 线结构光视觉数学模型

线结构光视觉检测是一种非接触式测量检测,原理如图1所示。激光器投射出“一”字型的线结构光,该线结构光被套管内壁调制成包含套管内壁三维信息的光条。设光条上的 P 点被摄像机拍摄,其透视投影关系如图2所示。图2中, $O_c-X_cY_cZ_c$ 为摄像机坐标系, O_c 点为摄像机的光心, Z_c 为摄像机的光轴, O_cO 为摄像的焦距; $O_w-X_wY_wZ_w$ 为世界坐标系; $O-XY$ 为像素坐标系。

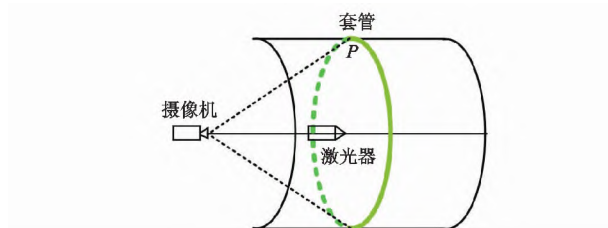


图1 线结构光视觉检测

Fig. 1 Line structured light vision inspection principle

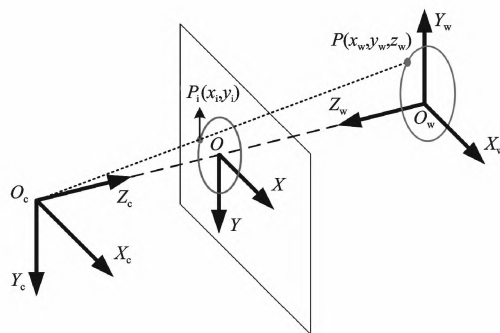


图2 线结构光视觉检测的数学模型

Fig. 2 Mathematical model of line structured light vision inspection

P 点在世界坐标系中的坐标为 (x_w, y_w, z_w) , P 点对应像素坐标系中的点 $P_i(x_i, y_i)$,则由透视投影关系可得三维点 P 与其对应像点之间的坐标转换关系为

$$\rho \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_4 & r_7 & t_x \\ r_2 & r_5 & r_8 & t_y \\ r_3 & r_6 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ρ 为不为零的比例因子; $A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为

摄像机内参矩阵, f_x, f_y 分别为摄像机在 X 轴与 Y 轴上的有效焦距, C_x, C_y 为计算机帧存图像中心点坐

标; $R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 为摄像机坐标系及世界坐标系

对应坐标轴夹角的余弦值组成的矩阵; $t = (t_x, t_y, t_z)^T$ 为摄像机光心与世界坐标系原点的平移关系。

将式(1)进一步简化为

$$\rho P_i = A [R \quad t] P_w \quad (2)$$

式中: $P_i = (x_i, y_i, 1)^T$ 为像素坐标系下的齐次坐标;

$P_w = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$ 为世界坐标系下的齐次坐标。

P 点位于光平面上一点,满足光平面在世界坐

标系下的空间方程:

$$a_1x_w + a_2y_w + a_3z_w + a_4 = 0. \quad (3)$$

式中: a_1, a_2, a_3, a_4 为光平面方程的系数。联立式(2)、(3)得线结构光视觉检测的数学计算模型,即

$$\begin{cases} \rho P_i = A [R \quad t] P_w; \\ a_1x_w + a_2y_w + a_3z_w + a_4 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

式(4)可由像素坐标系中任意一点 P_i 确定空间点 P 在世界坐标系下的三维坐标,完成从像素坐标系到世界坐标系或摄像机坐标系的三维重建过程。利用该模型进行计算时,首先需要提前完成摄像机内部参数和光平面方程标定。

2 井筒三维模型构建方法

2.1 视频图像的获取

视频获取几何模型如图3所示。摄像机在井筒中居中(摄像机中轴线与管柱中轴线重合),摄像机前端安装360°水平激光器,在管柱上投射出环状光带。水平激光器距摄像头的距离应满足在摄像机画面中能观察到大小适中的完整环状光带。仪器在井筒中匀速运动并进行管柱激光扫描,摄像机记录扫描结果。

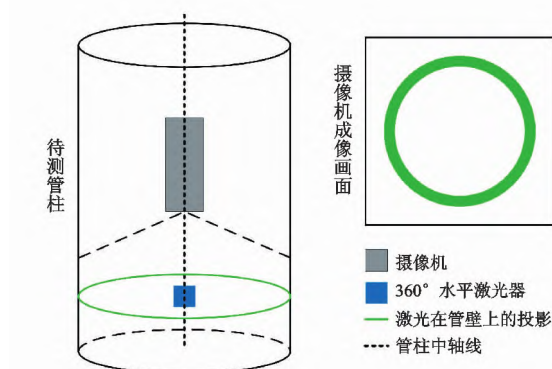


图3 视频获取几何模型

Fig.3 Video acquisition geometric model

2.2 目标轮廓检测

以激光扫描线为检测对象,检测对象轮廓。传统的激光提取方法主要有:几何法^[11]、Steger法^[12]、极值法^[13]、灰度重心法^[14]、骨架细化法^[15]等^[16]。本文研究了激光在图像中的布局规律,通过选取合适的像素值阈值,有效降低了背景噪声的干扰,提高了算法速度。通过数学形态学处理中的边界跟踪提取激光边界轮廓。激光扫描图像和激光边界检测结果如图4所示。

果如图4所示。



(a) 激光扫描图像



(b) 激光边界检测结果

图4 目标轮廓检测

Fig.4 Contour detection of target

2.3 三维绘图

在三维坐标系中,将检测到的边界按顺序在轴向叠加绘制,可得到管柱的激光扫描三维模型,如图5所示。图5中,横轴、纵轴和竖轴分别是世界坐标系中的 X 、 Y 、 Z 轴,单位为像素数(pixel)。

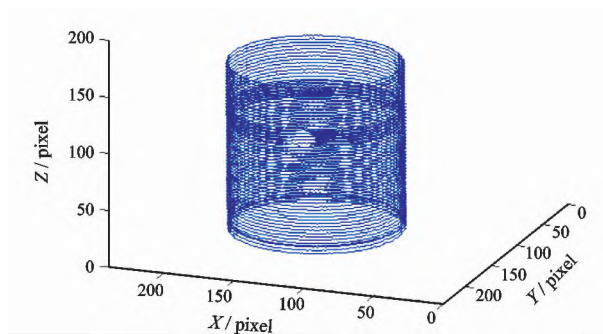


图5 由边界构建的三维井筒模型

Fig.5 3D wellbore model constructed by boundary

3 采样与量化

经过以上步骤的处理,得到的三维井筒模型由激光光条构成,并没有达到绘制三维数字化井筒的目标。而且理想情况下,完好的管柱激光检测的结果是等宽的同心圆环,实际检测到的边界会存在圆环不等宽、圆环不同心、圆环不闭合、边界长度及数量不统一等问题。为了绘制出三维数字化的井筒模型,还需要对数据进行处理。数据处理分为边界中

心点计算、边界中心角计算量化、边界采样与插值、井筒三维曲面绘制。

3.1 边界中心点的计算

激光边界的中心点即为目标区域的质心,求取目标区域二维质心坐标 $O(ox, oy)$:

$$ox = \frac{\sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n s \cdot g(s, t)}{\sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n g(s, t)}; \quad (5)$$

$$oy = \frac{\sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n t \cdot g(s, t)}{\sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^n g(s, t)}. \quad (6)$$

式中: s, t 分别为图像像素的横、纵坐标; m, n 分别为图像中一行、一列像素的数量; $g(s, t)$ 为图像在 (s, t) 处的灰度值。对激光边界进行扫描跟踪, 可得所有边界像素点的横纵坐标, 边界点坐标记为 (x_i, y_i) 。

3.2 边界中心角的计算和量化

边界点 (x_i, y_i) 所对应的中心角为 θ_i , 以边界中心点 $O(ox, oy)$ 为原点, 以水平向右为 x 轴正方向, 以垂直向上为 y 轴正方向建立二维坐标系。连接边界点与原点所成直线与 x 轴正方向所成夹角为 θ_i , 如图 6 所示。

其中,

$$\theta_i = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_i - oy}{x_i - ox}\right), x_i > ox, y_i > oy; \\ \arctan\left(\frac{y_i - oy}{x_i - ox}\right) + \pi, x_i < ox; \\ \arctan\left(\frac{y_i - oy}{x_i - ox}\right) + 2\pi, x_i > ox, y_i < oy; \\ \frac{\pi}{2}, x_i = ox, y_i > oy; \\ \frac{\pi}{2}, x_i = ox, y_i < oy. \end{cases} \quad (7)$$

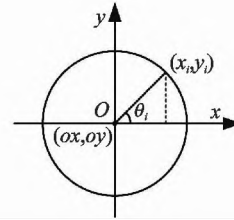


图 6 边界中心角

Fig. 6 Central angle of boundary

以采样间隔将中心角均匀量化, 采样点数为 N , 则采样间隔为 $2\pi/N$, 量化后的中心角为

$$\theta_{qi} = \text{int}\left(\frac{\theta_i}{2\pi/N}\right) \cdot 2\pi/N. \quad (8)$$

对于边界点 (x_i, y_i) , 按式 (5)、(6) 可得边界中心点坐标 (ox, oy) , 再由式 (7) 可得边界中心角的值, 最后由式 (8) 量化边界中心角的值。以采样点数 120 为例, 选取了边界点中的 9 个点按上述方法求得各值见表 1。

3.3 边界采样与插值

对边界进行扫描, 抽取中心角量化值发生跳变处一侧的边界点作为采样点, 对外部边界 (或者内部边界) 在圆周上进行均匀重采样, 采样后数据长度和位置对齐。采样时, 由于有些边界不闭合, 如图 7(a) 所示, 该图为当管柱内壁有凸起时的激光边界检测图像, 这种情况会造成凸起的地方采样点没有数值 (图 7(b))。为了解决这个问题, 需要进行插值, 根据图形学原理对缺失的数据点进行插值, 插值后效果如图 7(c) 所示。

3.4 井筒三维曲面绘制

为了增强三维绘图效果, 更易于观察管柱缺陷, 利用实际管径减去管径参考值得到管径变化量, 将变化量作为颜色填充在管柱表面。利用采样数据和管径变化量数据构建三维模型, 得到管柱三维表面图, 如图 8 所示。120 点的圆周采样分辨率等效于 120 臂井径仪的解释成像效果, 径向分辨率可达 3° 。

表 1 边界采样与量化数据表

Tab. 1 Boundary sampling and quantization data table

序号	(x_i, y_i) / pixel	$\theta_i / (^\circ)$	$\theta_{qi} / (^\circ)$	(ox, oy) / pixe
1	(105, 80)	267.00	267	(108.37, 140.15)
2	(104, 81)	265.85	264	
3	(103, 81)	264.71	264	
4	(102, 81)	264.13	264	
5	(101, 81)	262.99	261	
6	(100, 81)	262.41	261	
7	(99, 81)	261.27	261	
8	(98, 81)	260.12	258	
9	(97, 81)	259.55	258	

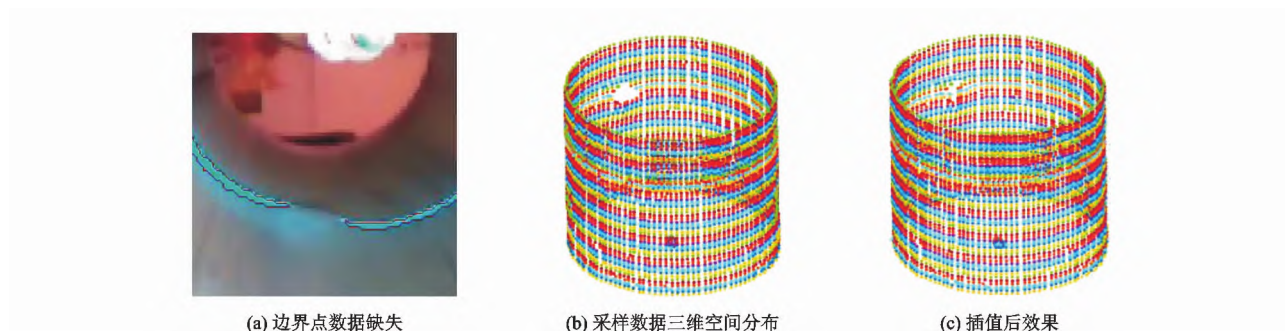


图7 边界采样与插值

Fig.7 Boundary sampling and interpolating

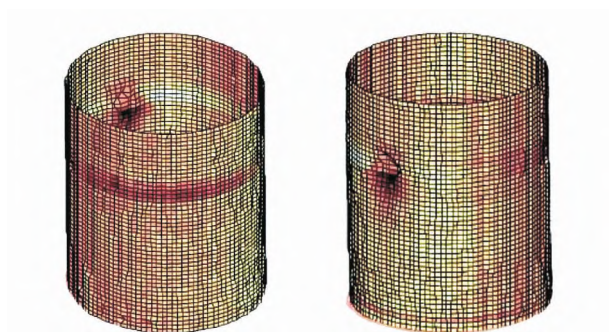


图8 120点采样重建模型

Fig.8 Comparison of 120-point sampling reconstruction model with real object

4 仿真实验结果分析

基于激光扫描视觉三维建模的井筒可视化检测技术,对型号 N80、内径 62 mm、周长 195 mm 的倒角油管进行检测,摄像机获取图像的分辨率为 480×480 pixel。根据 8 连通链码^[17]的原理来提取激光中心条纹的周长,则链码所围激光中心条纹区域的周长,即链的长度

$$C = N_e + \sqrt{2} \cdot N_o \quad (9)$$

式中: N_e 为链码中偶数码的数目; N_o 为链码中奇数码的数目。

由式(9) 计算得激光条纹中心的周长为 796 pixel,所以本文方法理论上可以达到 796 点采样,即 0.245 mm 的精度。边界采样点数越多,生成的管柱三维表面模型分辨率越高,管柱缺陷的细节也越明显。

5 结 论

(1) 基于线结构光视觉检测原理,建立了数字化三维井筒模型,使井筒的缺陷更易于观察。研究适用于空井筒或者井液透光良好的环境中。

(2) 与传统多臂井径测量的机械接触式方法相比较,本文研究方法是一种非接触式测量,降低了仪器遇阻遇卡的风险,分辨率高,并且能够适应不同管径的检测。

(3) 检测精度与摄像机获取图像的分辨率以及采样点数有关,图像分辨率越高,采样点数越大,精度也越高。

参 考 文 献:

- [1] 冯耀荣,付安庆,王建东,等. 复杂工况油套管柱失效控制与完整性技术研究进展及展望[J]. 天然气工业, 2020,40(2): 106-114.
FENG Yaorong, FU Anqing, WANG Jiandong, et al. Failure control and integrity technologies of tubing/casing string under complicated working conditions: research progress and prospect [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 106-114.
- [2] 刘洪亮,王成荣,杜建平,等. 四十臂井径成像及电磁探伤组合测井技术在吐哈油田的应用[J]. 测井技术, 2012,36(4): 416-420.
LIU Hongliang, WANG Chengrong, DU Jianping, et al. Combined logging application of 40-arm caliper imaging and electro-magnetic defect detection technology in Tuha Oilfield [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(4): 416-420.
- [3] 李刚,朱广亮,王永康,等. 多臂井径成像测井技术及在克拉玛依油田的应用[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(2): 190-192.
LI Gang, ZHU Guangliang, WANG Yongkang, et al. Multi-arm caliper imaging logging (MIC) and its application in Karamay Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(2): 190-192.
- [4] 华景颇,陈晓华,董兰芳. 工程测井资料在区块套损分析中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(4):

- 78-80.
- HUA Jingpo, CHENG Xiaohua, DONG Lanfang. Application of engineering well logging data in casing damage [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(4): 78-80.
- [5] 谢荣华, 刘继生, 张月秋, 等. 检查套管损坏的电磁探测测井方法及应用 [J]. 测井技术, 2003(3): 242-245.
- XIE Ronghua, LIU Jisheng, ZHANG Yueqiu, et al. Detecting casing damages with electromagnetic defect detection log and its applications [J]. Well Logging Technology, 2003, (3): 242-245.
- [6] 张家田, 郑向秀, 吴银川, 等. 可视化测井技术的发展、装备及应用 [J]. 测井技术, 2018, 42(5): 489-496.
- ZHANG Jiatian, ZHENG Xiangxiu, WU Yinchuan, et al. Development, equipment and application of visual logging technology [J]. Well Logging Technology, 2018, 42(5): 489-496.
- [7] 张斌山, 严正国, 张郁山, 等. 视频测井图像处理技术与应用 [J]. 测井技术, 2019, 43(4): 376-379.
- ZHANG Binshan, YAN Zhengguo, ZHANG Yushan, et al. Video log interpretation processing technology and its application [J]. Well Logging Technology, 2019, 43(4): 376-379.
- [8] 刘颖. 国内外老油田套损特征及大庆油田套损防控建议 [J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(6): 58-65.
- LIU Ying. Casing failure characteristics of the mature oilfields at home and abroad and suggestions of the failure prevention and control for Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(6): 58-65.
- [9] 陈福利, 柴细元, 金勇, 等. 多臂井径测井检测套损及其评价方法 [J]. 测井技术, 2005(1): 79-81.
- CHEN Fuli, CHAI Xiuyan, JIN Yong, et al. Inspection and evaluation method of casing damages with multi-arm caliper log [J]. Well Logging Technology, 2005(1): 79-81.
- [10] 刘玉凤, 杨波, 胡素萍. 多臂井径技术评价与应用 [J]. 测井技术, 2004(3): 221-224.
- LIU Yufeng, YANG Bo, HU Suping. Evaluation and application of the multi-armed caliper logging technology [J]. Well Logging Technology, 2004(3): 221-224.
- [11] LYVERS E P, MITCHELL O R, AKEY M L, et al. Subpixel measurements using a moment-based edge operator [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(12): 1293-1309.
- [12] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- [13] TRUCCO E, FISHER R B, FITZGIBBON A W, et al. Calibration, data consistency and model acquisition with laser strippers [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1998, 11(4): 293-310.
- [14] ZHOU P, XU K, WANG D. Rail profile measurement based on line-structured light vision [J]. IEEE Access, 2018, 6: 16423-16431.
- [15] 霍龙. 基于视觉的复杂曲面几何形状三维测量技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2004.
- HUO Long. There search on 3D measurement of free form surface based on computer vision technique [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2004.
- [16] 李莹莹, 张志毅, 袁林. 线结构光光条中心提取综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 13-22.
- LI Yingying, ZHANG Zhiyi, YUAN Lin. Survey on linear structured light stripe center extraction [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 13-22.
- [17] 刘建华, 王建伟. 基于图像处理的 CT 图像肝癌诊断技术研究 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(7): 917-923.
- LIU Jianhua, WANG Jianwei. Liver cancer diagnosis based on CT image processing [J]. Journal Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(7): 917-923.

责任编辑: 熊 惠