

文章编号:1002-2082(2016)01-0091-05

# 基于线结构光的视频内窥镜测量技术

姚 敏

(武汉东湖学院 电信学院, 湖北 武汉 430212)

**摘要:**针对视频内窥镜的测量需求,提出了一种基于线结构激光照射的测量技术。采用线激光作为定标光照射物体表面,建立了线结构光成像模型,标定了不同物距时的放大率和图像中线位置间的比例系数。通过构建测量平台计算了物体的几何参数,实验结果表明测量误差在10%以内,能够满足视频内窥镜观测和测量要求。

**关键词:**视频内窥镜;线结构光;几何参数

中图分类号:TN206;TP752

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201637.0103004

## Measurement method for video probe based on line-structured light

Yao Min

(School of Electronics & Information, Wuhan Donghu University, Wuhan 430212, China)

**Abstract:** Considering the requirement of measurement for video probe, a method for measuring points, lines and surfaces of object by using line-structured laser was presented. The line-structured light imaging model was built, where the linear laser was used as an auxiliary light source irradiating on the surface of the object. Compared to the object image, the proportional coefficient was calibrated with multiplying factor in different distances and laser line positions. The geometry parameters were calculated based on the measurement platform. The experimental results show that the measuring error is less than 10%, which indicates the method can satisfy the requirements of the video probe.

**Key words:** video probe; line-structured light; geometry parameter

## 引言

视频内窥镜是无损检测仪器的一个分支,它采用光纤导光、光电成像和机械传动的原理设计,通常具有照明、观测和记录功能,可以方便地观测挡板后、管道内和其他人眼目视无法直接看到的设备部位,免去了昂贵的毁坏和繁复的拆卸工作,节约了检修成本,提高了工作效率。早期的视频内窥镜只具备成像观测功能,随着现代工业设备越来越精密化,对于设备缺陷、损伤的测量已经变得与观测一样重要。可测量的视频内窥镜能够在观测图像的同时对设备部件裂纹、凹陷等损伤进行测量,获得损伤部位的长度、面积、轮廓等细节

信息,为设备的故障定位、损伤评估提供直观可靠的数据支撑,在飞机检修、管道勘测、船舶检查、精密铸造等现代工业的各个领域获得了广泛应用。

奥林巴斯公司1998年推出了可测量型内窥镜,开发了IV6C6系列和IV8C6系列内窥测量系统<sup>[1-2]</sup>,该系统利用了立体视觉的三角测量原理,通过双CCD来模仿人类的视觉系统。韦林公司在其PXL型航空专用视频内窥镜系统中应用了比较、阴影等测量方法<sup>[3]</sup>。国内对内窥镜检测技术的研究起步比较晚,20世纪80年代开始从国外引进工业内窥镜技术,并进行消化吸收。国内的一些研究机构也对内窥镜系统的软、硬件进行了研究,在

收稿日期:2015-09-18; 修回日期:2015-10-31

基金项目:武汉东湖学院校级基金项目“分块压缩感知在图像重构中的应用研究”

作者简介:姚敏(1981—),女,湖北孝感人,副教授,主要从事光电图像信息处理研究。E-mail:13930599@qq.com

一定程度上取得了一些成果。上海交通大学设计了一种工业视频内窥镜<sup>[4]</sup>,用于检查零件内表面Φ0.5mm细牙螺纹。南京航空航天大学发动机故障诊断研究所从实际需求出发,研制出一套基于立体视觉的内窥图像分析系统,该系统改善了传统技术存在的依赖于目测和无法定量测量损伤的缺陷<sup>[5]</sup>。目前,国内生产并投放市场的内窥镜产品主要有硬性内窥镜、光纤内窥镜、电子视频内窥镜等几类产品,其工作原理与国外相同,但是在测量功能和性能上与国外产品存在明显差距<sup>[6]</sup>。国内发表了一些基于机器视觉的测量方法<sup>[7]</sup>,但鲜有在视频内窥镜产品中应用。

视频内窥镜的探头直径纤细,内窥探头端面集成了成像传感器、镜头、温度传感器、照明光束等多种模块,空间狭小,布局紧凑,传统基于结构光数字投影的测量方法无法直接在视频内窥镜上应用<sup>[8-9]</sup>。本文介绍了一种基于单线激光的测量方法,采用红外激光器作为光源,通过光纤导光到头部,光纤头部带有准直器和柱状透镜,投射出的线状激光束与视频内窥镜CCD靶面短边平行,作为辅助标定线,通过建立单线结构光测量模型<sup>[10]</sup>,标定激光线与物距位置关系,在观测物体表面同时,能够测量长度、面积、高度/深度等多种几何参数。通过在视频内窥镜探头上的集成和成像测量实验,验证了方法的正确性。

## 1 单线结构光测量方法

单线激光测量是基于结构光学辅助测量的原理,由定标光源向待测物体表面投射一条亮线,CCD采集包含亮线的物体表面图像,在图像中亮线的位置包含了待测物体的物距和尺度参数等几何信息<sup>[11-13]</sup>。

如图1所示建立直角坐标系XYZ,其中X轴代表水平方向,Z轴代表光轴方向,Y轴垂直于纸面向内,原点C位于物镜中心,物平面垂直于Z轴,物距为l,成像探测器靶面垂直于Z轴,焦距为f。

SFE为探头单线定标光投向物平面的光束所围成为平面,θ为平面SFE与靶面中线SO之间的夹角,A为投射平面与光轴Z的交点。EF为单线定标光在待测物体表面所形成的亮线,E'F'为EF在靶面上的图像。P为亮线EF上的一点,P'为P在靶面上的像点,B为点P在光轴Z上的投影,P'

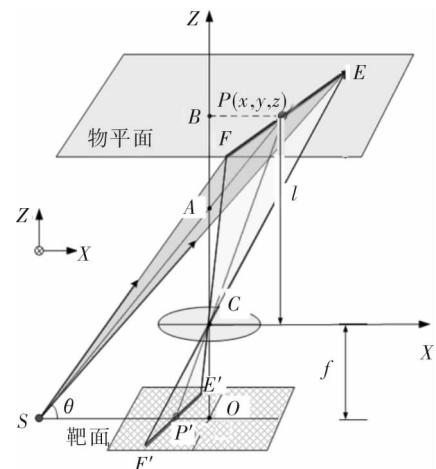


图1 单线结构光测量的原理示意图

Fig. 1 Diagram of line-structured laser measurement

点在靶面的坐标为 $(x_0, y_0)$ 。

单线定标光投射平面SFE为一固定平面,其投射光源点S与靶面中心点O的距离s和θ角度均为已知量,其平面方程可以确定。直线PP'可以通过物象关系进行解算,通过P'点在靶面的位置和直线PP'方程即可得到物空间P点的坐标。

根据物像关系及三角形相似原理,由

$\triangle SAO \sim \triangle PAB$ ,可得到:

$$\frac{SO}{BP} = \frac{AO}{AB} \quad (1)$$

其中  $SO = s$ ,  $AO = s \times \tan\theta$ ,  $AB = l + f - AO$ , 代入(1)式得:

$$BP = \frac{l + f - s \times \tan\theta}{\tan\theta} \quad (2)$$

由 $\triangle P'CO \sim \triangle PCB$ ,可得到:

$$\frac{P'O}{BP} = \frac{CO}{BC} \quad (3)$$

其中  $P'O = x_0$ ,  $CO = f$ ,  $BC = l$ , 代入(3)式可得:

$$BP = \frac{x_0 \times l}{f} \quad (4)$$

由(2)式、(4)式消掉BP可以得到:

$$l = \frac{f \times (f - s \times \tan\theta)}{x_0 \times \tan\theta - f} \quad (5)$$

由(5)式可以得到解算物距l所需的待拟合曲线为

$$l = \frac{k}{x_0 - b} \quad (6)$$

这里已知像点P'距离靶面中心的横坐标 $x_0$ ,通过测量l,可以通过最小二乘拟合得到固定参数k、b。由于视频内窥镜成像物镜参数确定后,f、s、θ参数固定,因此,物距方程中的参数k、b固定不变,

只需标定一次即可求得。

将标定后参数  $k, b$  代入(6)式解算得到物距  $l$ , 即可求得待测物体表面  $P$  点的  $X$  轴和  $Y$  轴坐标为

$$P_x = \frac{x_0 \times l}{f}, P_y = \frac{y_0 \times l}{f} \quad (7)$$

由于测量过程中难于准确获取点  $P$  到光心  $C$  的实际距离, 只能测得点  $P$  到镜头的距离, 物距值  $l$  不是  $P$  到原点  $C$  的真实垂直距离, 因此, 在拟合(6)式时, 需要加上修正量  $l_0$ , 得到  $l + l_0 = \frac{k}{x - b}$ 。

## 2 视频内窥镜测量探头模型

带测量功能的视频内窥镜探头设计上需考虑定标光和照明光的布置, 主要包括: 成像物镜、单线激光和若干个照明光出口, 如图 2 所示。

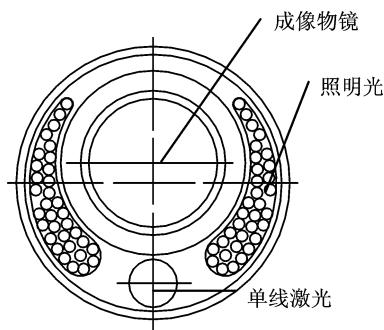


图 2 视频内窥镜探头端面布局

Fig. 2 Arrangement of video probe

探头外径 7 mm, 端面中间部分是成像物镜, 视场  $70^\circ$ , 口径 3.4 mm, 内部最大直径 4.8 mm, 为便于定标光和照明光的设计, 布置上采用偏心设计, CCD 镜头位于探头中心上方。其下方布置有单线定标光, 照明光根据间隔布置在 CCD 镜头四周, 形成均匀环形照明光带, 利于扩大照明方位和成像均匀<sup>[14-15]</sup>。

测量结构光的光源为红光激光, 采用光纤导光至插入管前端的出光口, 光纤头部带有准直器, 出光口处分别对应刻有光栅窗片, 用于将点光源扩散成单线条纹光, 垂直物体表面投射时激光线与图像短边平行, 如图 3 所示。

## 3 实验及结果分析

### 3.1 比例系数的标定

由于激光光线与 CCD 位置相对固定, 随着物距变化, 图像的放大率  $\beta$  发生改变, 同时图像上单

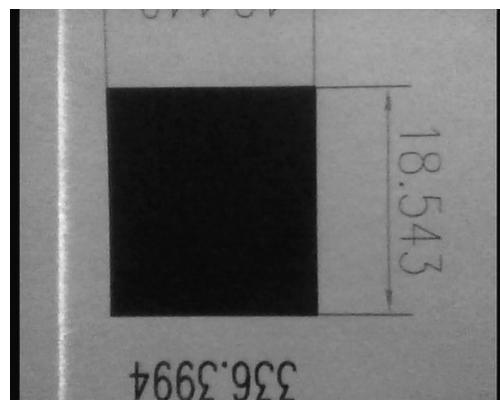


图 3 单线激光投射图

Fig. 3 Projection of single line laser

线激光偏离左边缘的位置  $X$  也发生变化。通过标定可以得到不同距离上的放大率  $\beta$  和线结构光位置  $X$  的关系。在测量时对线结构光位置  $X$  进行定位, 根据标定出的关系查找表可以得到相应的放大率  $\beta$ 。表 1 给出了实验标定出的放大率  $\beta$  和单线激光偏离左边缘的位置  $X$  以及物距值之间部分对应关系, 实际标定中物距值采样初始间隔为 1 mm, 距离越远, 采样间隔越大, 范围从最近 7 mm 至最远 100 mm 处, 共标定约 44 个点。

表 1 标定放大率  $\beta$  和线结构光位置  $X$  以及物距值之间的对应关系

Table 1 Relation among magnification  $\beta$  position  $X$  and object distance

距离/mm	线结构光位置/pixel	放大率 $\beta$ /(mm/pixel)
7	89.5	0.0139
8	119.4	0.0155
9	143.0	0.0171
10	161.3	0.0188
20	249.5	0.0349
50	307.2	0.0839
100	327.5	0.1614

### 3.2 实验结果及分析

采用测量标准图板和键盘等实际物体进行了实验, 分别测量点点距离、点线距离、区域面积、曲线长度、倾斜长度、高度/深度等项目, 其中目标的真实值事先用游标卡尺精确测量确定标出, 测量值采用多次取平均, 每次测量时线激光在图像位置可以不同, 线上参考点也随机选择以保证测量时的真实性。图 4~图 9 给出了单次的测量情况, 其中图 4~图 6 是测量标准图板上点点距离、点线距离和区域面积的试验截图, 图 7~图 9 是测量键盘上按键的曲线长度、倾斜距离和高度/深度的实

验结果,表 2 给出了上述截图的实验结果。

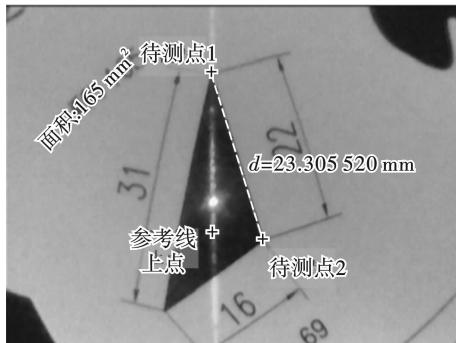


图 4 两点之间的距离测量实验结果

Fig. 4 Result of measurement between two points

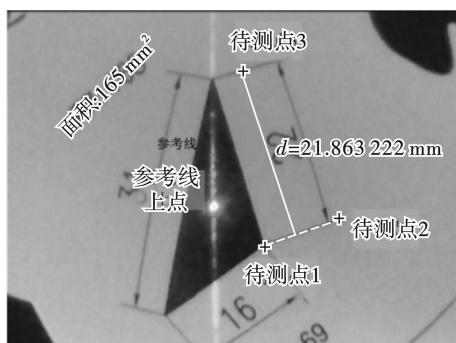


图 5 点到直线的距离测量实验结果

Fig. 5 Result of measurement from point to line

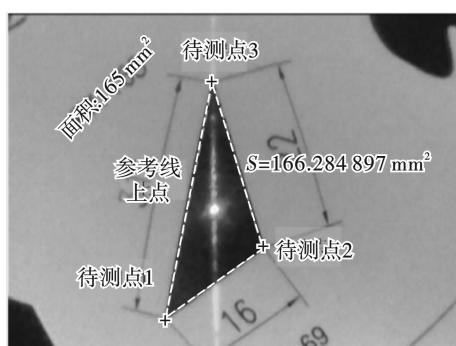


图 6 面积测量实验结果图

Fig. 6 Result of area measurement



图 7 曲线长度测量实验结果

Fig. 7 Result of curve measurement



图 8 倾斜测量实验结果图

Fig. 8 Result of slope measurement

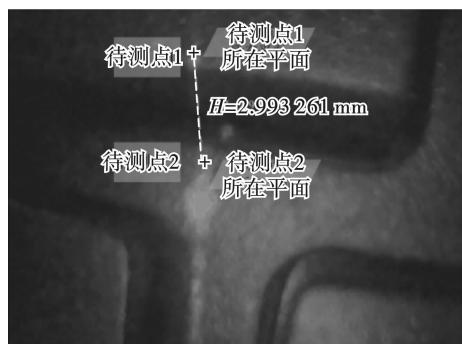


图 9 高度测量试验结果

Fig. 9 Result of height measurement

表 2 对标准图板和键盘实物的测量结果

Table 2 Results of measurement of plate & keyboard

测量类型	真实值	测量值	绝对误差	相对误差
点点间距离/mm	22	23.31	1.31	5.95%
点线间距离/mm	22	21.86	0.14	0.63%
区域面积/mm <sup>2</sup>	165	166.28	1.28	0.78%
曲线长度/mm	8	8.17	0.17	2.12%
倾斜距离/mm	14.8	15.71	0.91	6.14%
高度/深度/mm	3.2	2.99	0.21	6.56%

通过多次现场测量实验,在该视频内窥镜应用时测量误差均可控制在 10% 以内,距离类的测量误差小于 2 mm,可满足该视频内窥镜损伤定量探测的需求。分析其误差原因,影响测量精度的原因有以下几点:首先是视频内窥镜探头的成像光轴与被测量物体表面不完全垂直,根据单线结构光测量方法可知,光面必须垂直于 XZ 轴,否则对精度有影响,但实际内窥操作中很难通过图像来判断;其次是在实验中对物距与像点到图像中心的距离标定也存在一定的误差,该误差会直接影响测量的精度;最后是在进行测量操作时在图像上选取待测点线和参考线上点时为人工操作,选点精度也会因人而异,但一般在几个像素范围内,对测量精度影响较小。

## 4 结论

本文提出了在视频内窥镜上应用基于线结构光的测量技术,介绍了测量系统平台的组成和基于单线激光投射的测量方法,论述了测量过程中相应的标定方法,并对实验结果进行了分析,通过实验验证了测量系统的可行性,将此方法应用于某型视频内窥镜的高精度测量开发,取得了较好的效果。下一步的工作将考虑改善线结构光的激光束质量,增加检测算法自动提取单线激光中心点,并开展自动标定工装的设计,以进一步提高检测精度和实用性。

## 参考文献

- [1] Wu Song, Zhao Jianhua, Huang Zhenjia. Video endoscope applications in nondestructive detection [J]. Aerospace Materials & Technology, 2004, 30 (3): 57-60.
- 伍颂,赵建华,黄振佳. 可测量视频内窥镜在无损检测中的应用[J]. 宇航材料工艺,2004,30(3):57-60.
- [2] Ross J. Anglo Japanese collaboration in the design of medical and industrial endoscope equipment[J]. The Institution of Electrical Engineers, 1998, 491: 5/1-5/2.
- [3] Everest VIT INC. VideoProbe XL ProTM 系列产品介绍[J]. 航空制造技术,2000,13:109-110.
- Everest VIT INC. VideoProbe XL ProTM product introduction[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2000,13:109-110.
- [4] Jiang Pingping, Yan Guozheng, Ding Guoqing, et al. Development of a portable industrial endoscope video[J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(4):407-410.
- 姜萍萍,颜国正,丁国清,等. 一种便携式工业视频内窥镜的开发[J]. 光学精密工程,2002, 10 (4): 407-410.
- [5] Yu Hui, Zuo Hongfu, Chen Guo, et al. Design and implementation of a new type of industrial endoscope system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004,23(6):556-560.
- 于辉,左洪福,陈果,等. 一种新型工业内窥系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报,2004,23(6):556-560.
- [6] An Quan. Industrial endoscope applications in nondestructive testing[J]. Nondestructive Testing, 2004, 25(4):33-34.
- 安全. 工业内窥镜在无损检测中的应用[J]. 无损探伤,2004,25(4):33-34.
- [7] Ye Shenghua, Zhu Jigui, Wang Zhong, et al. Visual inspection technology and its application[J]. Chinese Engineering Science, 1999, 1(1): 262-263.
- 叶声华,邾继贵,王仲,等. 视觉检测技术及应用[J]. 中国工程科学, 1999, 1(1): 262-263.
- [8] Sun Changku, You Qiang, Lu Rongsheng, et al. Online measurement of seamless steel pipe straightness by laser vision[J]. Journal Measurement, 2002, 23 (3):174-177.
- 孙长库,尤强,卢荣胜,等. 无缝钢管直线度激光视觉在线测量[J]. 计量学报,2002,23(3):174-177.
- [9] Zhang Guangjun, Tian Xu. 3-D structured light and its application in industry[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1996, 22 (6):650-654.
- 张广军,田叙. 结构光三维视觉及其在工业中的应用[J]. 北京航空航天大学学报,1996,22(6):650-654.
- [10] Salvi J, Pages J, Batlle J. Pattern codification strategies in structured light systems[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4):827-849.
- [11] Dipanda A, Woo S. Towards a real-time 3D shape reconstruction using a structured light system[J]. Pattern Recognition, 2005,38(10):1632-1650.
- [12] Lyu Naiguang, Sun Peng, Lou Xiaoping. Key techniques for 3-D structured light photogrammetry[J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University, 2010,25(1):1-5.
- 吕乃光,孙鹏,娄小平. 结构光三维视觉测量关键技术的研究[J]. 北京信息科技大学学报:自然科学版, 2010,25(1):1-5.
- [13] Zhang Wanjiang, Xu Min. Research on visual inspection system for backside welding of tailored blanks laser welding[J]. Instrument Technique and Laser, 2010,(9):84-87.
- 张万江,许敏. 基于结构光视觉的激光拼焊焊缝背面质量检测方法研究[J]. 仪表技术与传感器,2010, (9):84-87.
- [14] An Dong, Da Feipeng, Gai Shaoyan. A new system calibration method based on fringe projection profilometry[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35 (1):81-84.
- 安东,达飞鹏,盖绍彦. 新的基于条纹投影轮廓测量的系统标定方法[J]. 应用光学,2014,35(1):81-84.
- [15] Zhu Tongjing, Zhou Ping. Crucial algorithm for Structural light 3D measurement system calibration [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35 (5): 848-852.
- 朱统晶,周平,结构光三维测量系统标定的关键算法研究[J]. 应用光学,2014,35(5):848-852.