

文章编号 1004-924X(2014)09-2337-08

三维测量工业内窥镜的双目光学系统

郭俊锋¹, 刘 鹏^{1,2,3}, 焦国华^{2,3*}, 鲁远甫^{2,3}, 吕建成^{2,3}

- (1. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050;
2. 中国科学院 深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055;
3. 深圳生物医学光电传感技术工程实验室, 广东 深圳 518055)

摘要:针对国内工业内窥镜只限于观察,无法满足工件三维尺寸测量的现状,设计了一种探头外径为 6 mm 并且可以向任意方向弯曲的三维测量工业内窥镜,并介绍了该内窥镜的双目光学系统及镜体内部结构的设计。首先,基于双目立体成像的原理,提出了一种具有双物镜、单图像传感器的新型双目光学系统。其次,根据光学系统的技术要求,设计了内窥镜的头部结构。考虑到一些工件内部结构比较复杂,分别设计了内窥镜的可弯曲结构以及后部操控机构以方便一些精密工件的检测。最后,通过三维图像处理软件对待测物表面两个特征点进行长度测量试验,得到了两个特征点的间距。实验结果表明:待测物表面两个特征点的长度测量误差在 ± 0.2 mm 内。该系统基本实现了工业内窥镜的三维测量功能。

关键词:工业内窥镜;三维测量;双目光学系统;结构设计;蛇骨组件

中图分类号:TH878 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142209.2337

Binocular optical system of industrial endoscope for three-dimensional measurement

GUO Jun-feng¹, LIU Peng^{1,2,3}, JIAO Guo-hua^{2,3*}, LU Yuan-fu^{2,3}, LÜ Jian-cheng^{2,3}

- (1. School of Mechanical and Electronical Engineering,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
 2. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences,
Shenzhen 518055, China;
 3. Biomedical Engineering Laboratory for Photoelectric
Sensing Technology, Shenzhen 518055, China)
- * Corresponding author, E-mail: gh.jiao@siat.ac.cn

Abstract: As domestic industrial endoscopes are only limited in sample observations and can not measure the three-dimensional shapes of workpieces, this paper designs an industrial endoscope whose probe has an outside diameter of 6 mm and is bendable in any directions. It introduces the endoscopic binocular optical system and the endoscopic internal structure. First, a new type of binocular optical system with a dual objective lens and a single image sensor was proposed based on the binocular stereo imaging principle. Then, the endoscopic head structure was designed according to the technical

收稿日期:2013-09-25;修订日期:2013-11-13.

基金项目:深圳市科技研发资金重大产业技术攻关计划资助项目(No. ZD201111080111A)

requirements of optical system. In consideration of the complex internal structures of some workpieces, a bendable structure and a back-end control device of endoscope were respectively designed to facilitate detecting precision parts, and the working principle of two structures were described. Finally, the length of two feature points on the surface of target was measured by the three-dimensional image processing software to obtain the distance between the two points. The experiment shows that the length measurement error of the two feature points is within ± 0.2 mm. It basically realizes the three-dimensional measurement function of the industrial endoscope systems.

Key words: industrial endoscope; three-dimensional measurement; binocular optical system; structure design; snake bone component

1 引言

18 世纪末,德国科学家 Bozzine 首次提出内窥镜的思想,他把烛光作为光源,首次成功实现了人体内部直肠和子宫的观察,从此内窥镜技术应运而生^[1]。随着科技的飞速发展,内窥镜技术的应用已经从原有的医学领域扩展到航空、船舶制造、汽车装配等工业领域。工业内窥镜作为一种新型的无损检测设备,拓展了人眼的视距,突破了视觉限制,能够准确清晰地观察机器设备内部以及零件内表面的情况,如工件的磨损程度、裂痕、毛刺及异物等。它避免了检查过程中不必要的设备分解、拆卸以及可能引起的零部件损伤^[2],大大节省了维修成本,而且方便实用,因此是目前工业领域中不可或缺的重要检测工具。三维尺寸测量技术是现代化制造业发展的关键环节,随着工业制造水平的不断提高,具有复杂曲面的产品越来越多,这些曲面都要进行三维尺寸测量^[3]。

由此三维工业内窥镜应运而生,并成为目前国内外学者的研究热点。Anton Schick 等人基于主动式三角测量原理提出了一种微型的三维扫描内窥镜,其探头直径仅为 3.6 mm,能够对任意形状的管道进行三维扫描测量,精度可达 0.1 mm^[4]。李少伟等人基于双目立体摄影测量原理设计了一种具有立体测量功能的工业内窥镜系统,并用该系统对钢管内部锈斑进行了长度测量。其误差在 0.03 mm 内,初步实现了立体测量功能,但是其探头直径为 40 mm,不能进入那些直径在 40 mm 以下的管道及孔腔内部^[1]。杨东林等人基于双目立体视觉原理设计了一种三维工业内窥镜系统,通过检测某火炮炮膛的膛线深度,验

证了系统的内视立体观察和尺寸的立体测量功能。但由于其内部的光学系统使用了两个 CCD 图像传感器,使得镜体的最小外径只能达到 12 mm,限制了它在直径 10 mm 以下的狭小空间内的应用^[5]。

目前,国际上生产具有三维测量功能的工业内窥镜的厂商主要有美国韦林和日本奥林巴斯^[1],其产品稳定、可靠性高,测量精度符合实际需求,但这些产品的售价较高,限制了其应用和推广。而国内生产商还不能生产成形的三维测量工业内窥镜产品,只能生产不具有双目立体成像性能普通工业内窥镜,所以国内生产的工业内窥镜不能准确判断裂纹的深度、零件的磨损程度以及零件产生故障的具体位置。尽管双目立体成像技术的理论已很成熟,但不同领域的内窥镜产品有着严格的尺寸要求,尤其是探头直径在 10 mm 以内的三维测量工业内窥镜,其技术难度主要表现在亚毫米级零件(包括光学零件)的装配工艺方面^[4],而一些超细孔腔场合对内窥镜探头直径的要求更高。本文针对以上应用需求和技术瓶颈,设计了一种探头直径为 6 mm 的双镜头、单图像传感器的工业内窥镜,并通过计算机软件技术和图像处理技术实现了该内窥镜对空间三维尺寸的测量。

2 双目立体成像原理

通常人类通过眼球的调整用单眼来辨认近处的三维物体;但由于眼球的调节范围有限,分辨力很低,而且单眼的判读距离不超过 5 m,因此只能通过双眼来辨认远处的三维物体。由于人的双眼存在一定的距离,即瞳距(一般成年人的瞳距约为

65 mm),因此在同一个视角方向不同距离的物体对双眼的张角也不同。根据几何光学原理,物体落在视网膜上的位置不同,这种双眼视网膜上的位置差称为双眼视差,它反映了客观物体的深度,从而产生立体感^[6]。

图 1 为双目立体成像的基本原理^[7],图中正下方为两个完全相同的摄像机。其中, O_l 和 O_r 分别为两摄像机的投影中心,它们之间的距离称为基线距,用 B 表示。 $O_l n_l$ 和 $O_r n_r$ 分别为左右摄像机像面 C_l 和 C_r 的两条法线,世界坐标系内一点 $A(X, Y, Z)$ 在像面 C_l 和 C_r 上的像点分别为 $a_l(u_l, v_l)$ 和 $a_r(u_r, v_r)$ 。这两点又被称为“共轭点”,分别作这两点与其对应相机的投影中心的连线,从而得到投影线 $a_l O_l$ 和 $a_r O_r$ 。

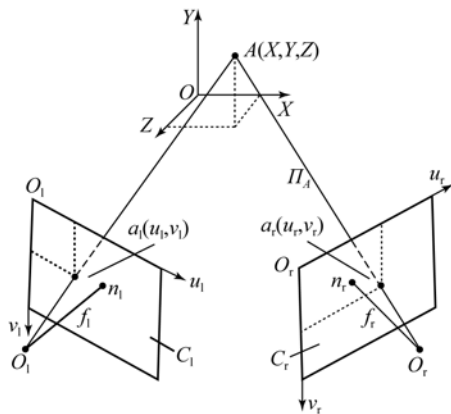


图 1 双目立体成像原理

Fig. 1 Principle of binocular stereo imaging

假设两摄像机像面在同一平面上,则物点 A 在左右摄像机像面上像点的 Y 坐标相同,即 $v_l = v_r$,由几何关系可得:

$$\begin{cases} u_l = f \frac{X}{Z}, \\ u_r = f \frac{(X-B)}{Z}, \\ v_l = v_r = f \frac{Y}{Z}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: f 为两个摄像机的焦距。所以视差为:

$$d = u_l - u_r = f \frac{B}{Z}. \quad (2)$$

式(2)就是双目立体成像的基本原理,即根据视差来获得立体信息^[5]。

3 内窥镜光学系统设计

3.1 双目光学系统技术方案

为了实现立体测量,在三维测量内窥镜系统中必须要有两路光学系统,分别用来摄取左、右分离图像,再通过软件进行三维重建。目前,国外三维测量工业内窥镜产品采用的双目光学系统主要有两种技术方案:双物镜、双图像传感器成像技术^[5]和双物镜、单图像传感器分时成像技术^[8]。

双物镜、双图像传感器成像技术采用两组光学参数相同的物镜,分别成像至两个相同参数的图像传感器靶面上,图像处理软件同时截取两个图像传感器中的图像信号并进行三维重建。但该技术对图像传感器体积的要求严格,需要使用微小型图像传感器,但此类图像传感器的成本较高。

双物镜、单图像传感器分时成像技术采用两组光学参数相同的物镜,在其后方分别设置两个机械快门,通过微电机或微晶振动分时交替开合两个快门,使两个物镜分时成像至图像传感器靶面上,然后通过计算机软件进行三维重建。该技术对于微动快门技术有着精细要求,如果处理不好,将会大大降低产品的可靠性。

由于上述两种技术方案的实现较为困难,故本文提出一种双物镜、单图像传感器靶面分区成像技术。该方案采用两组光学参数相同的物镜,并在其后方放置两块相互交错 180° 的棱镜,从而将两组物镜接收的图像分别成像在图像传感器靶面上左右两个均分区域上,通过图像处理软件读取并分隔成左右两幅图像,然后通过计算机软件进行三维重建。由于两块棱镜并靠间隙小,因此两个图像分界线清晰,光学信息不会互相干涉影响。该技术尽管分辨率低于前面两种,但是只采用了一个图像传感器,能够保证内窥镜探头的直径达到预期指标,而且成本低,性价比较高,3种双目光学系统的特性对比如表 1 所示。根据元件的不同,图像传感器可分为 CCD 和 CMOS 两种。与 CCD 相比,CMOS 具有成本低、耗电少、数据传输快、集成度高等优点。由于内窥镜探头的直径为 6 mm,而市场上直径小于 6 mm 的 CCD 售价非常高,但微型图像传感器又是内窥镜成像系统中不可缺少的一个重要组成部分^[9],所

以本系统最终采用 1.95 mm(1/13 inch) CMOS 摄像机作为图像传感器。该 CMOS 直径为 5.5 mm, 长度为 15 mm, 分辨率约为 31 万像素 (642×482)。

表 1 三种双目光学系统特性的比较

Tab.1 Characteristics of three kinds of binocular optical systems

成像方案	图像传感器体积	分辨率	测量精度	实时性	可靠性	内窥镜直径	难度	成本	性价比
双物镜、双图像传感器	小	高	高	实时	较高	较粗	中等	高	一般
双物镜、单图像传感器	扩大一倍	高	中等	丢帧	较低	略粗	高	中	中等
本文	扩大一倍	低一半	高	实时	非常高	较细	高	低	高

3.2 双目光学系统组成

根据双目光学系统的技术要求可知,系统的焦距必须很短。为保证有足够的后截距来安置棱镜,系统采用了一种双物镜光轴平移拉近的设计方案,如图 2 所示。该光学系统由两组构成相同的光学元件组成,它们包括透镜一、透镜二、透镜三、光阑、棱镜和滤光片、图像传感器。图像传感器采用的小尺寸 CMOS 摄像机可直接装入内窥镜前端,能够省去多组转像透镜,简化系统、提高成像质量^[10]。系统具体的技术指标为:(1)像高 $y=0.9\text{ mm}$; (2)半视场角 $\omega=50^\circ$; (3)焦距 $f=0.6485\text{ mm}$; (4)相对孔径 $D/f=1/6$; (5)物距 $L=25\text{ mm}$; (6)波段 λ 在 $0.486\sim 0.656\ \mu\text{m}$ 。

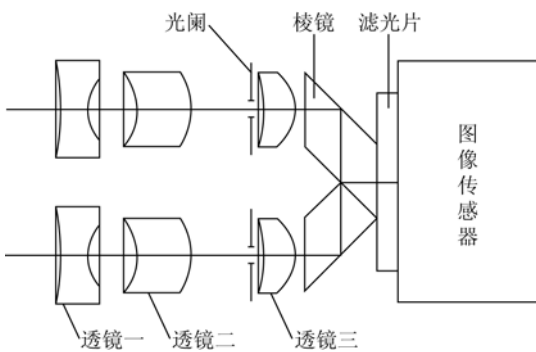


图 2 双目光学系统

Fig. 2 Binocular optical system

如图 3 所示,系统采用两块 45° 角斜方棱镜,两块棱镜相互交错 180° , 且并列粘接在一起(确保两棱镜的出射面共面),其作用是使两路成像光束平移,在到达像面之前两光轴不会发生重叠,从而保证在图像传感器上的左右两图像不会互相干扰。

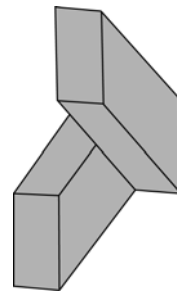


图 3 棱镜粘接后的结构图

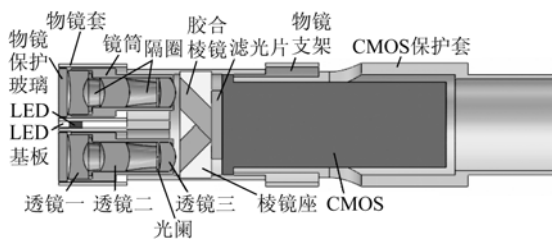
Fig. 3 Prisms after gumming

4 三维测量工业内窥镜系统结构设计

4.1 三维工业内窥镜头部结构

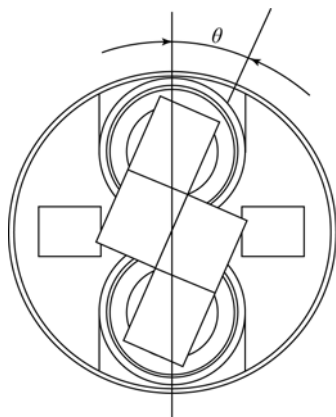
根据双目光学成像系统的设计要求,为了搭建双目光学成像系统,设计了三维测量工业内窥镜的头部结构(即探头),如图 4 所示。

在图 4(a)中,透镜一、透镜二和透镜三分别通过隔圈和光阑固定在镜筒中,为了防止透镜与物体直接接触,在镜筒前端设置一块物镜保护玻璃,并用物镜套将其固定,同时物镜套也与镜筒相互固定,最后用物镜支架分别对物镜套和镜筒进行固定(镜筒外端与物镜支架不接触的部分空间通过填充环氧胶来固定)。在镜筒后端相同位置分别安置一块相同尺寸的轴线平移棱镜,用棱镜座固定,两块棱镜相互交错 180° , 通过光敏胶胶合在一起。为使两物镜的轴心与棱镜的几何中心对准,在装配中两个物镜的中心线必须与两棱镜的胶合面(出射面)相错一个 θ 角,如图 4(b)所示。角的大小及棱镜的边长取决于图像传感器的靶面尺寸和两个透镜的轴心距。为消除杂光的干扰,筒内壁经氧化涂黑处理。



(a) 剖面图

(a) Cross-section



(b) 俯视图

(b) Top-view

图 4 内窥镜头部结构

Fig. 4 Schematic diagram of endoscopic head

两块棱镜将两个物镜的图像成像至 CMOS 靶面的左右两个区域,且互不产生光线干涉,图像中心的分界线宽度取决于两个棱镜的黏合紧密程度(可近似为零宽度)。CMOS 将视频信号传递至后端的图像采集卡,由图像采集卡将模拟信号转换成数字信号,再经三维影像合成专用软件对接收到的图像进行左右分割,从而形成两幅图像,并进行三维重建与尺寸测量。另外,如图 4(a)所示,物镜套前端设有一个发光二极管(LED)的焊接基板,其横截面形状与物镜支架相同,在基板左右两边分别焊接了两个低功耗、高亮度、色温大于 5 600 K 的 LED,用作照明,其尺寸为 2.3 mm × 1.2 mm。LED 发光二极管的外端面与物镜保护玻璃端面平齐,其间隙用黑色环氧胶填充,以确保 LED 的照射光线不会干扰两个透镜组。图 5 为内窥镜探头端面照片。



图 5 内窥镜探头

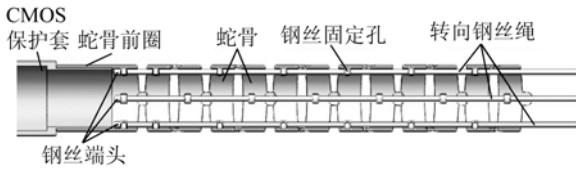
Fig. 5 Probe of endoscope

4.2 三维测量工业内窥镜头部可弯曲结构

为了在近距离范围观察到尽可能宽的目标,必须实现大视场角,但视场角太大,会增大系统畸变^[11]。因此,本文在三维测量工业内窥镜的头部结构后端设计了一种头部可弯曲的结构,以保证内窥镜工作探头向任意方向弯曲,从而消除了视觉盲区。该结构的核心部分为蛇骨组件^[12],如图 6(a)所示。蛇骨组件是由若干组“<”型和“>”型的圆环组成,圆环之间相错 90°,由可转动转轴依次压铆在一起,两根圆环为一组。圆环的内部设有 4 根转向钢丝绳,分别穿过固定在相同转向的圆环内侧的钢丝固定孔,4 根钢丝绳上下和左右分别配对成组,在 4 根钢丝绳的前端固定有钢丝端头,以限制钢丝拉出蛇骨组件,图 6(b)为蛇骨组件的实物图。

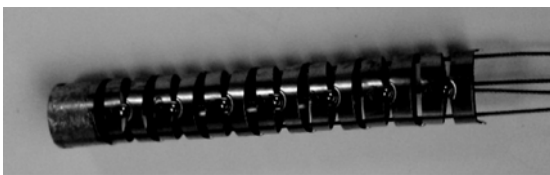
在图 6(a)所示的平面中,当蛇骨组件需要向上弯曲时,通过控制上面的钢丝绳收紧,下面的钢丝绳放松,使得蛇骨组件向上弯曲。同理,若需要向下弯曲,则下面的钢丝绳收紧,上面的钢丝绳放松。当相邻的“<”型和“>”型圆环的间隙为零时视为转动至极限,“<”型和“>”型圆环的个数决定了蛇骨组件的可转动角度。在垂直于图 6(a)所示平面中,转动的机理相同,分别拉动另外两根钢丝绳可以实现蛇骨整体的左右两方向弯曲。如果两组钢丝绳连动,就可以实现任意方向上的弯曲。为了保护内部机构,在蛇骨组件外部至 CMOS 保护套台阶外圆处套装一个不锈钢丝网套。由于它有一定的刚度,因此在一定的外力作用下,蛇骨组件不会发生自然弯曲,只有通过背部

的人为操作才能转动。在不锈钢丝网套表面套有一层蛇骨橡皮,用来提高组件的耐磨性。整个结构的中间部分设置为空心,用来牵引 CMOS 视频线和 LED 的电源线。



(a) 蛇骨组件结构示意图

(a) Schematic diagram of snake bone component



(b) 蛇骨组件实物图

(b) Photo of snake bone

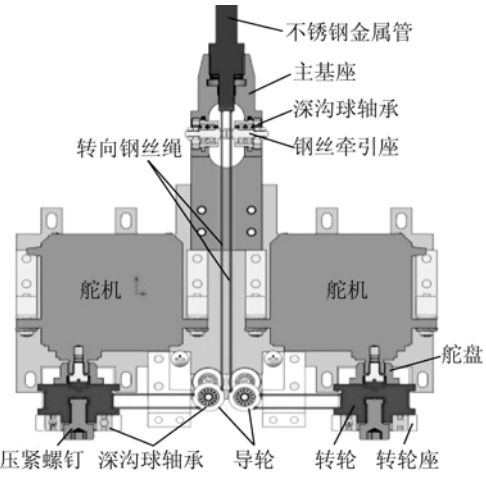
图 6 内窥镜头部可弯曲结构

Fig. 6 Flexible part of endoscopic head

4.3 三维测量工业内窥镜后部操控机构

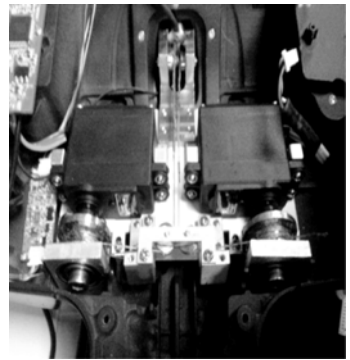
在蛇骨组件后端设置了操控机构,用于控制蛇骨组件的转动。为提高整体的耐磨性及防水性,在头部及蛇骨组件的最外层套装有不锈钢螺旋金属管及塑脂密封管。整个后部操控机构的作用是使头部能上下、左右活动,以增加观察区域和消除盲区,其结构示意图及实物图如图 7 所示。

蛇骨组件的 4 根转向钢丝绳通过主基座上的钢丝绳牵引座进行轴向牵引,然后将 4 根转向钢丝绳对准 4 个导轮(图示平面内,左右两个导轮在空间上呈一定的夹角)上的光滑圆弧状引导沟道,并分别旋绕在两个转轮上,同一组转向钢丝绳的旋绕方向相反。每一组转向钢丝绳的两头在转轮的中间轴向位置的圆孔中相对穿出,通过压紧螺钉将拉紧的 4 根转向钢丝绳固定在转轮内。两个转轮分别固定在两舵机的主转轴上,由舵机控制转动角度和转动速度,通过控制转向钢丝绳的拉紧和收缩,使内窥镜探头可向任意方向弯曲。本机构采用 Analog Servo 公司生产的 HD-1501MG 大扭力金属齿轮舵机,其重量轻、扭矩大(17 kg·cm),适合用来控制钢丝绳的拉紧和收缩^[13]。



(a) 后部操控机构示意图

(a) Schematic diagram of back-end control device



(b) 后部操控机构实物图

(b) Photo of back-end control device

图 7 内窥镜后部操控机构

Fig. 7 Endoscopic back-end control device

5 实验

为了验证系统的有效性,本文用内窥镜系统进行了成像试验,将内窥镜探头伸入台式电脑主机的网卡接口内,系统采集到的图像如图 8 所示。图 8 表明,系统采集的图像清晰,满足成像要求。

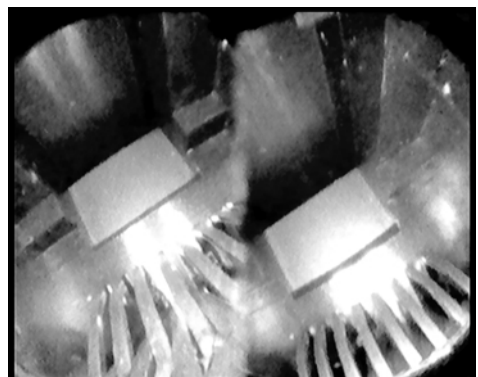


图 8 网卡接口内部图像

Fig. 8 Inner image of network card interface

然后对本系统进行了长度测量实验,待测物为规则的标准方形测量块,对其表面上的对称特征点的间距进行了长度测量。在系统采集到的两幅图像上任意选取4组特征点进行手选标定^[3],如图9所示。当探头与被测物表面的距离为25 mm时,利用内窥镜系统中安装的图像处理软件对标定的4组特征点进行静态测量,得到的测量结果如表2所示。由表2可知,内窥镜系统对

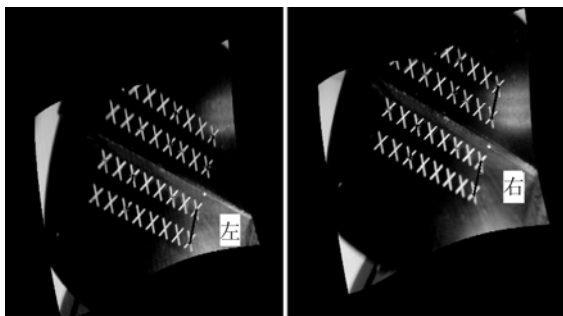


图9 特征点标定

Fig. 9 Calibration of feature points

表2 测量结果与准确值对比

Tab. 2 Comparison of measurement results with standard values

测量结果/mm	准确值/mm	误差	相对误差/%
4.98	5.00	-0.02	-0.4
4.92	5.00	-0.08	-1.6
4.83	5.00	-0.17	-3.4
5.02	5.00	0.02	0.4

参考文献:

- [1] 李少伟,王晴,黄桂平. 一种具有双目立体测量功能工业内窥镜的设计与系统集成[J]. 测绘工程, 2012, 21(1):67-69.
LI SH W, WANG Q, HUANG G P. The design and system integration of binocular stereo industrial endoscope with measurement [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2012, 21(1):67-69. (in Chinese)
- [2] 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.
JIANG P P, YANG G ZH, DING G Q. Small portable video technoscope for parts detection [J]. *Opt.*

特征点间距的测量平均值为4.937 5 mm,均方差为0.071 5 mm。

6 结 论

为了实现复杂工件尺寸的三维测量,本文采用双物镜、单CMOS设计了工业内窥镜系统,将内窥镜探头的直径控制在6 mm内,并且探头可以向任意方向转动。该内窥镜能够满足工业检测中一些毫米级超细孔隙内部的三维测量需求,具有良好的应用前景。

用该内窥镜对标准方形测量块表面上4组特征点的间距(实际值为5 mm)进行了测量。实验结果表明,系统的测量误差在±0.2 mm内,与国外同类产品(如奥林巴斯内窥镜系统)相比,测量精度还有待提高。因此,本系统有两点需要改进:

(1)由于搭建光学系统时存在装配误差,使得光学系统中光阑与透镜组的轴心没有完全重合,从而系统采集到的图像边缘存在圆弧形的不可视区域,缩小了图像的可标定范围,影响了测量精度,所以后续研究的首要任务是完善系统的装配工艺;

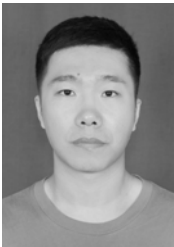
(2)由于CMOS摄像头存在畸变,导致系统采集到的两幅图像的尺寸有所差异,因此进行手选标定时,特征点需要多次标定才能匹配,影响了测量精度。

Precision Eng., 2002, 10(4):407-410. (in Chinese)

- [3] 全燕鸣,黎淑梅,麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4):1054-1061.
QUAN Y M, LI SH M, MAI Q Q. On machine 3D measurement of workpiece dimensions based on binocular vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4):1054-1061. (in Chinese)
- [4] ANTON S, FRANK F, MICHAEL S. 3D measuring in the field of endoscopy [J]. *SPIE*, 2011, 8082:808216.
- [5] 杨东林,卢栋,冯大伟. 基于图像处理的三维工业内窥镜研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6):1285-1289.
YANG D L, LU D, FENG D W. Research on 3D-

- industrial endoscope based on image processing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(6):1285-1289. (in Chinese)
- [6] 李海滨, 单文军, 刘彬. 双目立体视觉测距系统系统误差模型的研究[J]. *光学技术*, 2006, 32(1):24-26. LI H B, SHAN W J, LIU B. Research of error-model on two eyes stereoscopic measurement system [J]. *Optical Technology*, 2006, 32(1):24-26. (in Chinese)
- [7] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2008. ZHANG G J. *Measurement Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [8] 于波, 王立鼎. 一种双目分时显微立体成像系统的研制[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(4):49-52. YU B, WANG L D. Development of a binocular field sequential stereo microscopic imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(4):49-52. (in Chinese)
- [9] VRUSBALI R K, ERICA L, JENNIFER K B. Design of a handheld optical coherence microscopy endoscope [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2011, 16(6):066018.
- [10] 冯大伟, 姜会林, 张光伟. 基于双目立体视觉的医用三维电子内窥镜系统[J]. *长春理工大学学报: 自然科学版*, 2012, 35(1):38-42. FENG D W, JIANG H L, ZHANG G W. 3D medical electronic endoscope system based on binocular stereo vision [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2012, 35(1):38-42. (in Chinese)
- [11] 赵秋玲, 王霞, 关立强. 90°视向角口腔内窥镜光学系统设计[J]. *光子学报*, 2009(6):1482-1485. ZHAO Q L, WANG X, GUAN L Q. Optical system for stomatology endoscope with 90° line of vision [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009(6):1482-1485. (in Chinese)
- [12] 金付龙. 蛇骨组件: 中国, 201120166854. 9 [P]. 2011-05-24. JIN F L. *Snake bone component*: China, 201120166854. 9[P]. 2011-05-24. (in Chinese)
- [13] 张玲玲, 曲泽超. 蛇形机器人的机构设计及运动分析[J]. *机电工程*, 2012, 29(5):512-515. ZHANG L L, QU Z CH. Mechanism design and motion analysis of snake-like robot [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2012, 29(5):512-515. (in Chinese)

作者简介:



刘 鹏(1988—), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要从事精密机械结构设计、先进控制技术等方面的研究。E-mail: 262488987@qq.com

导师简介:



郭俊锋(1978—), 男, 山西翼城人, 博士, 副教授, 2008年于西北工业大学获得博士学位, 主要从事现代测试技术与数字信号处理、先进控制技术、数字化设计建模与仿真等方面的研究。E-mail: junf_guo@163.com

通讯作者:



焦国华(1979—), 男, 江西吉安人, 博士, 副研究员, 2008年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得博士学位, 主要从事光电信号处理、光电测量技术、微光学制造和应用等方面的研究。E-mail: gh.jiao@siat.ac.cn