文章编号:1001-5078(2019)02-0230-05 ·光学技术·

基于机器视觉的非球面双远心工业镜头设计

张欣婷[1],亢 磊[2],丁红昌[3],吴倩倩[1]
(1. 长春理工大学光电信息学院,吉林 长春 130012;
2. 中国中车长春轨道客车股份有限公司,吉林 长春 130062;3. 长春理工大学机电工程学院,吉林 长春 130012)

摘 要:根据大尺寸零部件精密测量的需求,设计了一套基于机器视觉的非球面双远心工业镜头,有效地代替人眼进行检测。系统采用7片透镜组成的对称式结构,孔径光阑居正中;引入2个新型非球面提高成像质量,并最大程度的减小了系统体积,使系统总长为292 mm。在奈奎斯特频率为50 lp/mm时,调制传递函数MTF值均高于0.6,并进行公差分析,满足成像要求。系统工作距127.3 mm、入瞳直径300 mm、景深80 mm、最大畸变0.005%、远心度小于0.01°,实现了大口径、大景深、低畸变等设计要求,达到了双远心的目的。该系统可广泛应用于航空航天、轨道客车和汽车船舶领域的生产和检测等环节。

关键词:光学设计;机器视觉;双远心光学系统;新型非球面;大景深;低畸变
中图分类号:TN216 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2019.02.018

Industrial lens design of aspheric double telecentric based on machine vision

ZHANG Xin-ting[1], KANG Lei[2], DING Hong-chang[3], WU Qian-qian[1]
(1. School of Optical and Electronic Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;
2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: According to the demand for precision measurement of large size parts, a set of double telecentric industrial lens based on machine vision is designed, which can effectively replace the human eye for testing. The system adopts a symmetrical structure consisting of 7 lenses with aperture diaphragm in the center. Two new aspheric surfaces are introduced to improve the imaging quality, and the volume of the system is reduced to the greatest extent, making the total length of the system 292 mm. When the Nyquist frequency is 50 lp/mm, the MTF value of the modulation transfer function is all higher than 0.6, and the tolerance analysis is carried out to meet the imaging requirements. The system working distance is 127.3 mm, the pupil diameter is 300 mm, the depth of field is 80 mm, the maximum distortion is 0.005%, and the telecentric degree is less than 0.01°, which realizes the design requirements of large aperture, large depth of field, and low distortion and achieves the purpose of double telecentric. The system can be widely used in aerospace, railway bus, automobile and ship production and testing.

Key words: optical design; machine vision; double telecentric optical system; new aspheric surface; large depth of field; low distortion

---

基金项目:吉林省科学技术厅项目;大部件数字化对接虚拟装配技术研究项目(No. 20170623028TC)资助。
作者简介:张欣婷(1984 -),女,副教授,博士,主要研究方向为光学设计与光学仪器及检测。E-mail:luoyiwuhens@163.com
收稿日期:2018-03-20

1 引 言

随着精密测量技术的不断发展,机器视觉系统得到了广泛应用,其具有检测精度高、连续性和稳定性好、观察范围广、响应速度快、灵活适应性强、能够实现非接触测量等优点。它能够提高生产的灵活性和自动化程度,应用于一些不适于人工作业的危险工作环境或者人工视觉难以满足要求的场合。同时,在大批量重复性工业生产过程中,用机器视觉检测方法可以大大提高生产的效率和自动化程度。一个典型的工业机器视觉系统包括:光源、镜头(定焦镜头、变倍镜头、远心镜头、显微镜头)、相机(包括 CCD 相机和 COMS 相机)、图像处理单元(或图像捕获卡)、图像处理软件、监视器、通讯/输入输出单元等。而光学成像镜头相当于人眼的晶状体,在整个机器视觉系统中起着至关重要的作用。

目前,远心光学系统在机器视觉领域有着绝对的优势,可以实现各种尺寸零部件的非接触测量与在线检测。其主要是为纠正传统工业镜头视差而设计,它可以在一定的物距范围内,使得到的图像放大倍率不会变化,这对被测物不在同一物面上的情况是非常重要的应用。远心镜头由于其特有的平行光路设计一直为对镜头畸变要求很高的机器视觉应用场合所青睐。但是远心镜头的设计和制造相对普通镜头而言难度稍大,因此价格较高。国外远心镜头技术相对成熟,产品主要集中在德国施乃德、美国 Navitar、日本 Kowa 和意大利 Opto Engineering 等公司;国内起步相对滞后,较为先进的是 BTOS 远心镜头[1-2]。

本文需要模拟人眼的特性,设计一款基于机器视觉的双远心工业镜头。采用双远心光路结构减小视差、增大景深;利用新型非球面来提高成像质量、减少透镜的使用片数,使系统具有大景深、低畸变、微小倍率变化等人眼相关特性,并应用于大尺寸零部件的精密测量中。

2 双远心系统成像原理

在光学系统中,传统光学镜头的主光线并非平行于光轴入射,使得系统存在一定的视差,被测物体会产生由畸变而引起的外形变化和失真,影响测量精度,因此本文提出采用远心光路来进行精密测量。

远心光路分为三种类型,分别是物方远心光路、像方远心光路和物像方远心光路,即双远心光路。物方远心光路是将孔径光阑放在系统的像方焦平面处,此时入瞳位于无穷远,即主光线平行于光轴入射,主要用来进行长度测量;像方远心光路恰好相反,是将孔径光阑位于系统的物方焦平面处,出瞳位于无穷远,即主光线平行于光轴出射,主要用来进行距离测量;而双远心光路综合了上述两种光路的双重作用,在工业检测领域和精密测量领域备受青睐,其成像原理如图 1 所示。

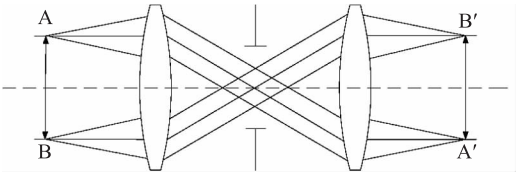


图 1 双远心系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of double telecentric

双远心光路一般为对称式结构,孔径光阑居正中,使得主光线平行于系统光轴入射和出射。平行光入射能够保证系统具有足够大的景深;而平行光出射是为了保证当工作距在景深范围内发生变化时,其成像高度,即放大倍率保持不变,且主光线的位置不变,因此系统不存在视差[3-4]。而传统工业镜头的主光线与光轴之间存在一定的夹角,即使物距在景深范围内变化,其像方视场也会有所改变,进而引起视差。相比之下,双远心镜头具有宽景深、低畸变、无视差、倍率恒定等优势,可用于各种尺寸的测量、定位和识别等领域。

3 新型非球面方程

现如今,非球面在光学设计领域中应用的非常广泛,它能很好地校正光学系统中存在的像差,进而减小系统的复杂程度。常用的非球面包括圆锥曲面、奇次非球面和偶次非球面[5-7],但是对这些非球面方程系数的项数选取问题并没有得到很好的解决,因此本文提出了一种新的非球面方程,使方程中的非球面系数和非球面斜率联系起来,新的非球面方程如下:

$$u = \frac{\rho}{\rho_{\max}}$$

$$z(\rho) = \frac{c_{bfs}\rho^2}{1+\sqrt{1-c_{bfs}^2\rho^2}} + \frac{u^2(1-u^2)}{\sqrt{1-c_{bfs}^2\rho_{\max}^2u^2}}\sum_{m=0}^{M} a_m Q_m^{bfs}(u^2) \tag{1}$$

其中,ρ 为到非球面光轴的距离;$\rho_{\max}$ 为元件边缘到光轴的距离;c_{bfs} 为最佳拟合球面的曲率;a_m 为多项式系数;Q 为方程中的各个多项式;u 为孔径角。要

求非球面顶点与最佳拟合球面的顶点重合,同时在选取 c_{bfs} 时,要使非球面和球面之间的最大偏离量尽可能小,即:

$$c_{bfs} = \frac{2f(\rho_{\max})}{[\rho_{\max}^2 + f(\rho_{\max})^2]} \tag{2}$$

式中,$f(\rho_{\max})$ 为边缘矢高差。

沿最佳拟合球面法线方向的非球面斜率为:

$$s_m(u) = \frac{d}{du}[u^2(1-u^2)Q_m^{bfs}(u^2)] \tag{3}$$

其 $s_m(u)$ 各项间的点乘积为:

$$\frac{\int_0^1 S(u)T(u)w(u)u\,du}{\int_0^1 w(u)u\,du} \tag{4}$$

其中,$w(u) = \dfrac{1}{u\sqrt{1-u^2}}$,为元件口径的权重因子,它可以控制口径内的最大非球面斜率。为了使 $s_m(u)$ 各项正交归一化,可以根据式(2)、(3)合理地选择 $Q_m^{bfs}(x)$,则 $Q_m^{bfs}(x)$ 前 6 项方程为:

$$Q_0^{bfs}(x) = 1$$

$$Q_1^{bfs}(x) = \frac{1}{\sqrt{19}}(13-16x)$$

$$Q_2^{bfs}(x) = \sqrt{\frac{2}{95}}[29-4x(25-19x)]$$

$$Q_3^{bfs}(x) = \sqrt{\frac{2}{2545}}\{207-4x[315-x(577-320x)]\}$$

$$Q_4^{bfs}(x) = \frac{1}{3\sqrt{131831}}(7737-16x\{4653-2x[7381-8x(1168-509x)]\})$$

$$Q_5^{bfs}(x) = \frac{1}{3\sqrt{6632213}}[66657-32x(28338-x\{135325-8x[35884-x(34661-12432x)]\})]$$

相对于最佳拟合球面而言,非球面斜率的均方可表示为:

$$\frac{1}{\rho_{\max}^2}\sum_{m=0}^{M} a_m^2 \tag{5}$$

式(5)可以将非球面斜率与非球面系数建立关系,并通过非球面系数来控制非球面斜率,对于非球面的设计和检测都有着极高的应用价值。

4 双远心光学系统设计

4.1 设计结果

目前双远心镜头的设计方法主要有两种:一种是先设计一个像方远心系统,再对其光路结构进行对称变换,得到相对应的物方远心系统;另一种是分别设计像方远心系统和物方远心系统,再将两个光路组合成双远心系统。而本文的设计与上述两种方法都不同,直接将一个普通光学系统优化成双远心光学系统[8-10]。同时,在光学设计软件 Zemax 中设置优化操作数 DIST 和 MTFA 来优化系统的畸变和调制传递函数,设计结果如图 2 ~ 图 5 所示。

图 2 所示为双远心光学系统结构图。系统对可见光波段成像,采用 7 片透镜,为对称式结构,光阑居中,位于第 4 片透镜的前表面;第 2 片透镜的前表面和第 6 片透镜的后表面采用新型非球面。系统总长 292 mm、工作距 127.3 mm、入瞳直径 300 mm、F# 为 4.3、景深可达 80 mm。

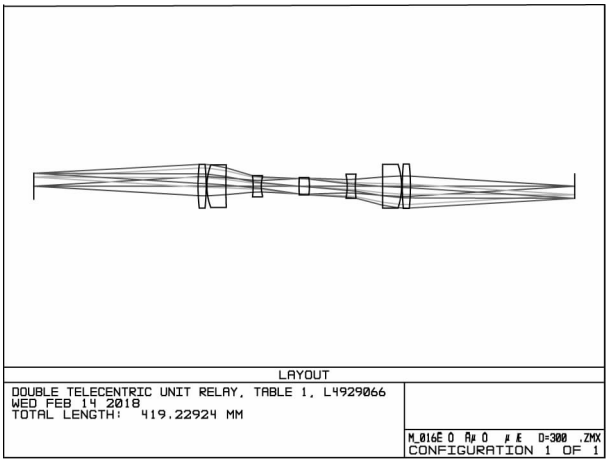


图 2 光学系统结构图

Fig. 2 Configuration diagram of optical system

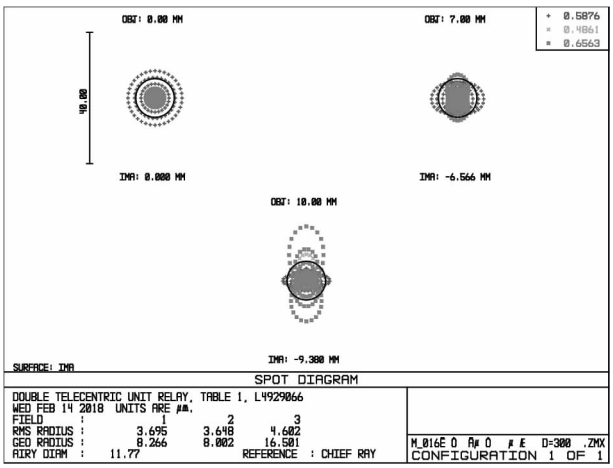


图 3 光学系统点列图

Fig. 3 Spot diagram of optical system

图 3 为所示双远心光学系统点列图。从图中可

见,三个视场的点列图几乎都在艾里斑之内,满足成像要求。

图 4 所示为双远心光学系统调制函数曲线。在奈奎斯特频率 50 lp/mm 时,全视场的 MTF 值均高于 0.6,接近衍射极限,成像质量较好。

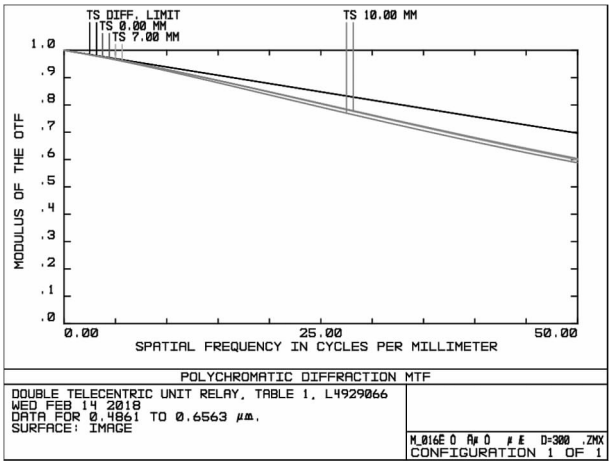


图 4 调制传递函数曲线

Fig. 4 Modulation transfer function curve

图 5 所示为双远心光学系统像散、场曲及畸变曲线。该系统重点考察畸变的大小,因此需要观察右侧的图形。从曲线中可以读出,其最大畸变为 0.005%,已经是非常小的一个数值,完全可以与人眼相媲美。

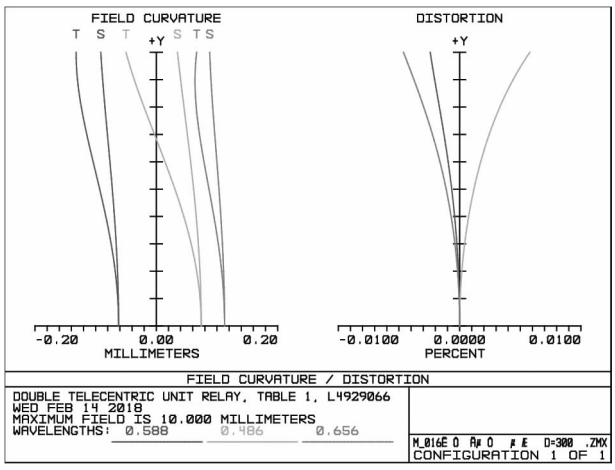


图 5 像散、场曲及畸变曲线

Fig. 5 Astigmatic, field curve and distortion curve

此外,双远心光学系统的设计还需要考察远心度。在 Zemax 中,将 General 中的 telecentric object space 勾选上,设置物方远心;在优化函数编辑器中,输入优化操作数 RANG,指定光线与局部坐标轴 Z 的夹角,设置像方远心。通过软件计算,该系统的远心度小于 0.01°。

4.2 公差分析

系统设计完成之后,需要对其进行公差分析,把实际加工、装调时所产生的相关误差考虑进去,给予一定的公差分量。

公差分析主要有三种方法,分别是:灵敏度分析、反灵敏度分析和蒙特卡罗分析。灵敏度分析是已知公差范围,计算各公差对系统评价函数的影响;反灵敏度分析恰好相反,是已知系统各公差对评价函数的影响,来计算各结构参数的公差;蒙特卡罗分析不同于前两者,它是比较综合的评价方法,同时考虑所有公差对系统的影响,因此本设计采用蒙特卡罗分析法,对系统的 MTF 设置公差并进行分析,分析结果如表 1 所示。

表 1 蒙特卡罗分析结果

Tab. 1 Analysis results of Monte Carlo

Nominal	0.603574981		
Best	0.623409672	Trial	16
Worst	0.600012364	Trial	5
Mean	0.602801689		
Std Dev	0.033597601		
Compensator Statistrics			
Change in back focus			
Minimum	-0.139405		
Maximum	0.178493		
Mean	0.016342		
Standard Deviation	0.043982		
90% > =	0.589803452		
50% > =	0.600798342		
10% > =	0.621546909		

由表 1 可知,调制传递函数 MTF 的名义值为 0.603574981、最佳值为 0.623409672、最差值为 0.600012364。有 90% 的 MTF 曲线高于 0.589803452、50% 的 MTF 曲线高于 0.600798342、10% 的 MTF 曲线高于 0.621546909。由以上分析可知,所设置的公差对 MTF 的影响十分微小,满足设计要求。

5 结 论

本文设计了一套基于机器视觉的非球面双远心工业镜头。系统采用 7 片透镜,引入 2 个新型非球面提高成像质量,并最大程度的减小了系统体积,使总长为 292 mm。调制传递函数曲线

在奈奎斯特频率50 lp/mm时,MTF值均高于0.6,同时对MTF进行了公差分析,满足成像要求。系统工作距127.3 mm、入瞳直径300 mm、F#为4.3、景深80 mm、最大畸变0.005%、远心度小于0.01°,实现了大口径、大景深、低畸变,达到了双远心的目的。

参考文献:

[1] ZHANG Wuyi,ZHANG Jichao,HOU Yuanshao,et al. The selection of lens in the machine vision system[J]. Journal of zhongyuan institute of technology,2011,22(6):18 - 21. (in Chinese)
张五一,张继超,侯远韶,等. 机器视觉系统中镜头的选择[J]. 中原工学院学报,2011,22(6):18 - 21.

[2] F Lahajnar,S Kovacic. Machine vision system for positioning and part verification of gas oil filters based on eigenimages[J]. Proceeding of SPIE - The Innernational Society for optical Engineering,2000,3966:220 - 227.

[3] M A Pate. Optical design and specification of telecentric optical systems[J]. Proceeding of SPIE - The Innernational Society for optical Engineering,1998,3482:877 - 886.

[4] G Erdei,G Szarvas,P Kallo,and E. Loerincz. Telecentric/inverse-telecentric objective for optical data storage purposes[J]. Proc. SPIE,1998,3573:380 - 383.

[5] Youngshik Yoon. Design and tolerancing of achromatic and ansstigmatic diffractive-refractive lens systems compared with equivalent conventional lens systems[J]. Appl. Opt.,2000,39(16):2551 - 2558.

[6] Rigler,A. K.,Vogl,T. P.. Spline functions:an alternative representation of aspheric surface[J]. Appl. Opt.,1971,10(7):1648 - 1651.

[7] Hyun Sook Kim,hang Woo Kim,Seok Min Hong. Compact mid-wavelength infrared zoom camera with 20:1 zoom range and automatic athermalization[J]. Optical Engineering,2002,41(7):1661 - 1667.

[8] YU Daoyin,TAN Hengying. Engineering Optics[M]. Beijing:Beijing Machinery Industry Press,2011. (in Chinese)
郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:北京机械工业出版社,2011.

[9] YUAN Xucang. Applied optical [M]. Beijing: National Defense Industry Press,1988:291. (in Chinese)
袁旭沧. 应用光学[M]. 北京:国防工业出版社,1988:291.

[10] LI Lin,An Liansheng. The theory and application of computer aided optical design [M]. Beijing:Beijing National Defense Industry Press,2002. (in Chinese)
李林,安连生. 计算机辅助光学设计的理论与应用[M]. 北京:北京国防工业出版社,2002.