

宽工作距机器视觉系统的设计

杨康 林峰

(福建师范大学光电与信息工程学院 光子技术福建省重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要 由于自动化机器视觉系统和装配线之间所需的空间差异很大,传统的定焦镜头难以满足,需要一款具有大跨度工作距的光学成像系统。基于物面位置改变对系统初级像差影响的理论,运用 Zemax 软件多重结构的功能,在设定的多个物距下进行优化设计,从而达到对宽工作距的需求。光学系统设计结果表明:调焦范围从 146 mm 到无穷远;最大光圈 F 数为 2.8,中心在空间频率 100 lp/mm 处调制传递函数(MTF)值大于 0.3,0.7 视场在 72 lp/mm处调制传递函数大于 0.3。这样的成像效果可以代替人工,观察到装配线上远近各个方位的零件运作情况,提高自动化的程度。

关键词 光学设计; 宽工作距; Zemax 软件; 多重结构

中图分类号 TN942.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.042203

Design of Machine Vision System with Wide Working Distance

Yang Kang Lin Feng

(Fujian Provincial Key Laboratory of Photonic Technology, College of Photoelectric and Information Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract As a result of the big difference in the required space between automation machine vision system and assembly line, the traditional fixed-focus lens cannot meet the practical requirements. There is a need for the big span working distance of optical imaging system. Based on the influence of changes in the object surface position on the primary aberration, with multiple structure function of Zemax software, the wide working distance lens is designed. The results show that the focusing range is from 146 mm to infinity, and the maximum aperture is $F2.8$. At the center field-of-view (FOV), the modulation transfer function (MTF) is greater than 0.3 at the spatial frequency of 100 lp/mm and the MTF at the 0.7 FOV is greater than 0.3 at the spatial frequency of 72 lp/mm. Such a system can replace the manual work to observe the whole assembly line and thus can improve the degree of automation.

Key words optical design; wide working distance; Zemax software; multiple structure

OCIS codes 220.3620; 220.4830; 150.3045; 040.1490

1 引言

机器视觉为工业自动化系统^[1]增加了新的维度,在一些不适合人工作业的环境或是人眼无法满足要求的情况下,用机器视觉代替人眼测量和判断能够提高生产效率、产品质量以及自动化程度。在装配线上它可以提供零件的尺寸、位置和方向。但是选择合适的工业镜头对于机器视觉能否发挥应有的作用是非常重要的。由于自动化机器视觉系统和装配线上的零件之间所需的空间差异很大,它可能小到只有上百毫米,大到一整座厂房。所以选择的工业镜头的工作距离不能是固定的或小范围变化的,而是要有一个大跨度工作距离。

市场上传统的定焦工业镜头可以通过镜头重新对焦的方式改变工作距离,但是镜头的共轭范围有限,对焦距离无法达到要求。所以设计一款宽工作距的光学成像系统是非常有意义的。本文以物面位置改变对系统初级像差的影响理论为基础,利用 Zemax 软件的多重结构设计优化得到了宽工作距的工业镜头。

收稿日期: 2012-12-10; **收到修改稿日期**: 2013-01-14; **网络出版日期**: 2013-03-11

作者简介: 杨康(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: yang.kang024@yahoo.com.cn

导师简介: 林峰(1968—),男,高级工程师,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: lfeng127@163.com

2 物面移动对像差的影响

所有参与成像的光线^[2]一定是由物面发出,并且必须通过入瞳。根据入瞳的特性可以把物面当作光瞳面,把入瞳看成物面,如图1所示。物面位置改变时有

$$(l^* - l_p)u^* = (l - l_p)u = y_p, \quad (1)$$

由近轴光线折射定律有

$$i_p = \frac{l_p - r}{r} u_p, \quad (2)$$

由(1),(2)有

$$\frac{i^* - i}{i_p} = \frac{u^* - u}{u_p} = \frac{h^* - h}{h_p} = A, \quad (3)$$

(1)~(3)式中 i 为入射角, i^* 为移动后的入射角, i_p 为入瞳作为物时的入射角, r 为球面曲率半径,其余带星号的是新物面位置时的量。 A 为一般情况的结果,对任何一个折射面都有 $A_1 = A_2 = \dots = A_k = A$ 。

光学系统的像差是对一定位置的物面而言,所以物面位置变化像差也会随之变化,由物面初级像差与光阑初级像差之间的联系,不进行复杂推导,在这里直接给出物面移动与初级像差之间的关系^[2,3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum S_{I_p}^* = \sum S_{I_p} \\ \sum S_V^* = \sum S_V + A \sum S_{I_p} \\ \sum S_{IV}^* = \sum S_{IV} \\ \sum S_{III}^* = \sum S_{III} + A(2 \sum S_V + J \Delta u_p^2) + A^2 \sum S_{I_p} \\ \sum S_{II}^* = \sum S_{II} = A(3 \sum S_{III} + \sum S_{IV} + J \Delta u_p) + A^2(3 \sum S_V + 2J \Delta u_p^2) + A^3 \sum S_{I_p}, \quad (4) \\ \sum S_I^* = \sum S_I + A(4 \sum S_{II} + J \Delta u^2) + A^2(6 \sum S_{III} + 2 \sum S_V + 3J \Delta u u_p) + \\ \quad A^3(4 \sum S_V + 3J \Delta u_p^2) + A^4 \sum S_{I_p} \\ \sum C_{II}^* = \sum C_{II} + A \sum C_{I_p} \\ \sum C_I^* = \sum C_I + A \left[2 \sum C_{II} - J \left(\frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n} \right) \right] + A^2 \sum C_{I_p} \end{array} \right.$$

式中 A 与(3)式中的相同,它表征物面移动的量, $\sum S_I$, $\sum S_{II}$, $\sum S_{III}$, $\sum S_{IV}$, $\sum S_V$, $\sum C_I$, $\sum C_{II}$ 为初级像差系数,分别代表球差、彗差、像散、像面弯曲,畸变位置色差,倍率色差, J 为拉斯不变量,而 $\sum S_{I_p}^*$ 、 $\sum S_{I_p}$ 和 $\sum C_{I_p}$ 分别是物面移动后的光阑球差、移动之前的光阑球差和光阑位置色差。可以看出物面移动除了光阑球差和像面弯曲不变以外会导致其他像差都发生变化。由于 $A = \frac{i^* - i}{i_p} = \frac{u^* - u}{u_p} = \frac{h^* - h}{h_p}$,当物距在较远处变化时 i^* 与 i , u^* 与 u , h^* 与 h 几乎一样,所以 $A \rightarrow 0$,因此物体距镜头较远时像差几乎不随物距变化。

要校正各个物面的像差原则上是不可能的^[3],因为我们不能要求垂直于光轴的线段和沿轴线段都能理想成像,它违反光能传播的基本定律。因此,下面的设计着重减小物面移动导致的像差变化,从而来平衡所需要参与成像的各物面的像差,获得想要的结果。由(4)式,光阑球差虽然不因物距改变,但它对各种像差都有影响,所以对需要在不同物距使用的系统,在设计时需设法校正正好光阑球差,以消除或减小物面位置改变所引起的像差变化。

3 宽工作距机器视觉指标及设计方案

3.1 技术指标

根据调研,综合考虑工作厂房装配线的环境以及镜头所起到的作用,本文设计的成像光学系统参数指

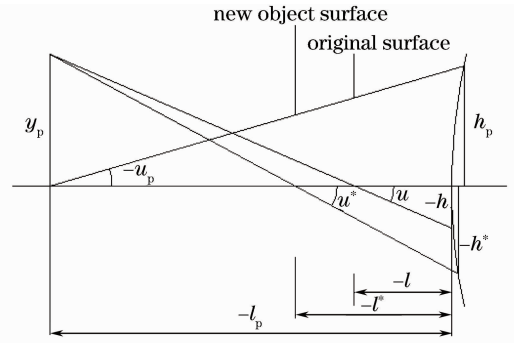


图1 入瞳成像光路示意图

Fig. 1 Schematic of the entrance-pupil imaging optical path

为:焦距 55 mm,光谱为可见光谱,最大光圈 F 数为 2.8,调焦范围从 146 mm 到无穷远。感光芯片 CCD 的靶面尺寸为 $8.8 \text{ mm} \times 6.6 \text{ mm}$,有效像素为 $1265 \text{ pixel(H)} \times 949 \text{ pixel(V)}$,像元尺寸 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$,空间截止频率^[4,5] $N_y = \frac{1}{2d}$,其中 $d=7 \mu\text{m}$,则 $N_y=71.43 \text{ lp/mm}$,因此以调制传递函数(MTF)表征的中心分辨率最好能达到 100 lp/mm 大于 0.3,而 0.7 视场能达到 72 lp/mm 大于 0.3。

3.2 设计方案

由于设计系统时需要针对光阑球差进行校正,而光阑球差跟光阑位置有关,所以本文设计采用两种方案:1) 双高斯初始结构,光阑在中间的六片分离式;2) 光阑在后方的六片分离式。用这两种初始结构找到一个更合适更有效的结构校正光阑球差,使整个像差达到所需的结果。

然后在 Zemax 的多重结构^[6]中设计 3 个工作距,146 mm 为最近工作距,对应结构 1,过渡距离 280 mm 和无穷远分别对应结构 2 和结构 3,而因为物体在离镜头较近的位置移动时 $A = \frac{i^* - i}{i_p} = \frac{h^* - h}{h_p}$ 的值变化也更大,所以在优化时对结构 1 和结构 2 适当地加大权重。

根据(4)式中的 $\sum S_V^* = \sum S_V + A \sum S_{I_p}$,只要知道两个物面位置的畸变就能够求出光阑球差系数,但实际上并不要求出它的值,只要将其控制在接近于零的范围即可。所以可以对 146 mm 和 280 mm 这两个结构利用操作数对畸变进行控制,在校正它们的同时,使它们之差的绝对值尽量接近零,这样就可以满足校正光阑球差的要求,从而保证物面移动时整个系统像差变化不至过大,最终使参与成像的工作距内成像满足要求,像差比较平衡。

4 优化过程

4.1 结构的确定

图 2 所示为双高斯初始结构优化后无穷远处即结构 3 的外形结构图和点列图,图 3 是光阑在后的结构优化后无穷远处即结构 3 的外形结构图和点列图。

点列图中点的密集程度可以衡量系统成像质量的优劣^[7],密集程度用弥散斑的半径反映。由图 2 和图 3 对比可以看出图 2(b)中的均方根(RMS)值除了 Field 1 与图 3(b)的 Field 1 接近之外其他视场全部更小。而且从图 3(a)中可以看出第二片的两个面圆心几乎重合,对镜片定心工艺^[8]的精度有较高的要求,而图 2(a)中镜片的曲率就比较合理了。因此,对称型结构对系统像差校正和平衡的效果更佳,下面就选择对称型结构继续优化。

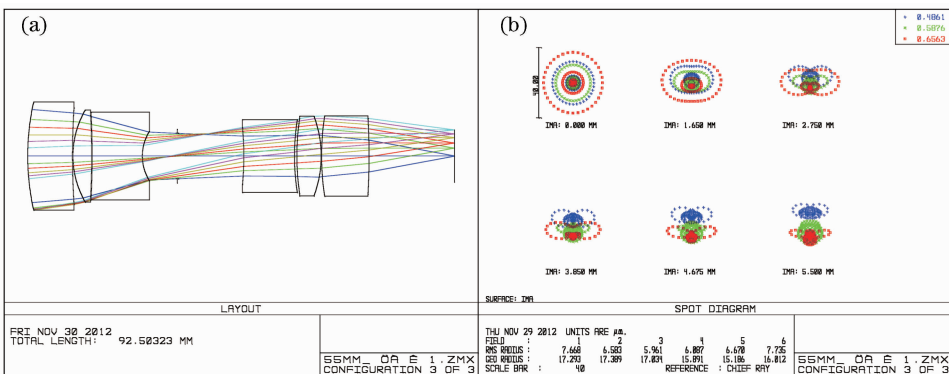


图 2 双高斯结构优化后无穷远处的(a)外形结构图和(b)点列图

Fig. 2 Infinity correlation diagram of double Gaussian structure after optimization. (a) Layout; (b) spot diagram

4.2 对称型的再优化

调整透镜与透镜之间的距离是为了校正 S_{IV} ,由(4)式可知 S_{IV} 是不随物面移动而变化的,而且对移动后其他的像差也几乎没什么影响,可以稍微放宽对 S_{IV} 的校正。由图 2(a)可以发现第二片和第三片之间以及第四片和第五片之间距离很小,相邻面的曲率也相近,可以尝试把它们胶合起来,双胶合有利于改善位置色

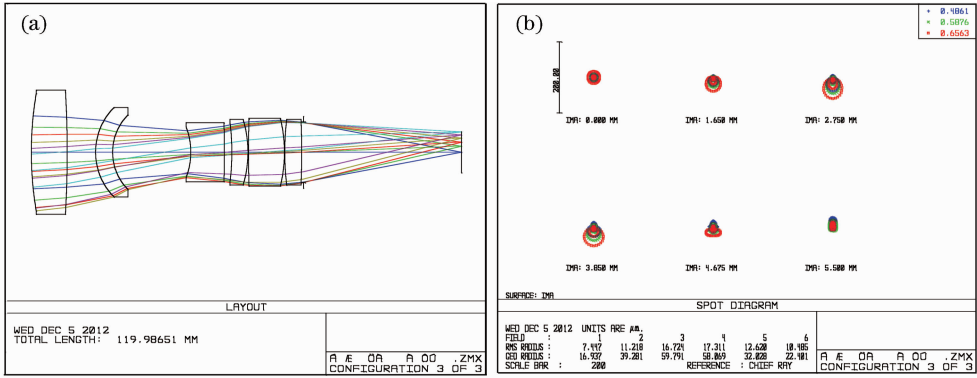


图 3 光阑在后优化后无穷远处的(a)外形结构图和(b)点列图

Fig. 3 Infinity correlation diagram of stop behind structure after optimization. (a) Layout; (b) spot diagram

差、倍率色差以及高级像差。图 4 所示为胶合之后的优化结构图，整个系统由六片透镜组成，依次是冕牌、冕牌与火石胶合、火石与冕牌胶合，最后是冕牌，材料上成对称式^[9]有利于像差的校正。镜片的第一个面到最后一个面的总长是 65.2 mm，而后截距由工作距离为无穷远处时的 19.75 mm 到工作距离最近(146 mm)时的 35.41 mm。后截距变化量 15.66 mm，由于是整组移动，所以用凸轮^[10]很容易实现。

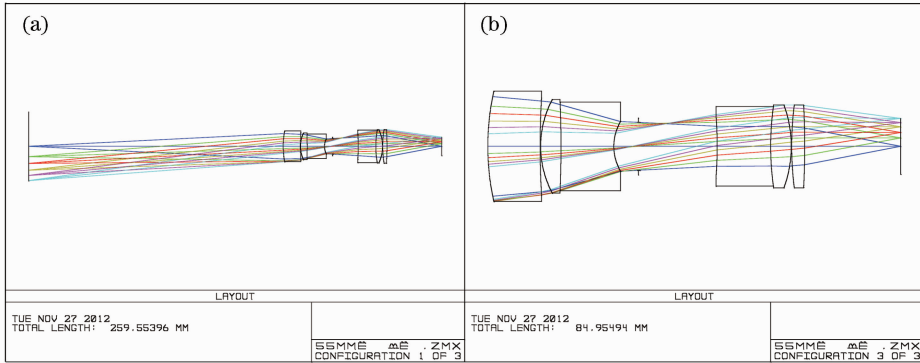


图 4 胶合后的系统结构图。(a) 146 mm 的工作距离；(b) 无穷远

Fig. 4 Schematic diagrams of optical system structure with agglutination for working distances of (a) 146 mm and (b) infinity

5 优化结果分析

图 5 是胶合前工作距离 146 mm 和无穷远处的 MTF 曲线，图 6 是胶合后对应的 MTF 曲线。对比图 5 和图 6 发现胶合后远近处的 MTF 都有所提高。

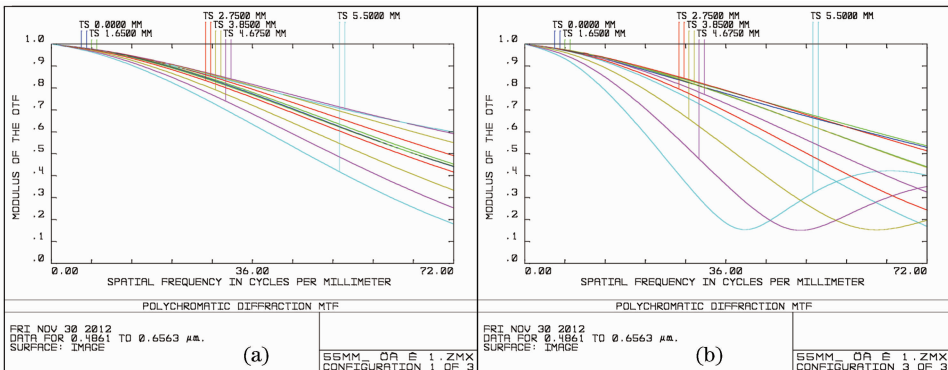


图 5 胶合前的 MTF 曲线。(a) 146 mm 的工作距离；(b) 无穷远

Fig. 5 MTF curves of the system without agglutination for working distances of (a) 146 mm and (b) infinity

如图 6 所示,空间截止频率为 72 lp/mm 时除了无穷远的 0.7 视场的子午曲线 MTF 接近 0.3 以外,0.7 视场以内其他 MTF 都超过了 0.3,而在空间截止频率为 100 lp/mm 时,除了工作距离 146 mm 的中心视场刚刚达到 0.29 以外,其他的工作距离 280 mm 到无穷远处中心视场都能达到 0.53 以上,基本上可以满足设计要求。而测量零件精度^[11]的标准为像元尺寸与实际最小值之比等于焦距与物距之比,实际最小值就是各物距对应的测量精度,再由软件读出各物距对应的物高,如表 1 所示。

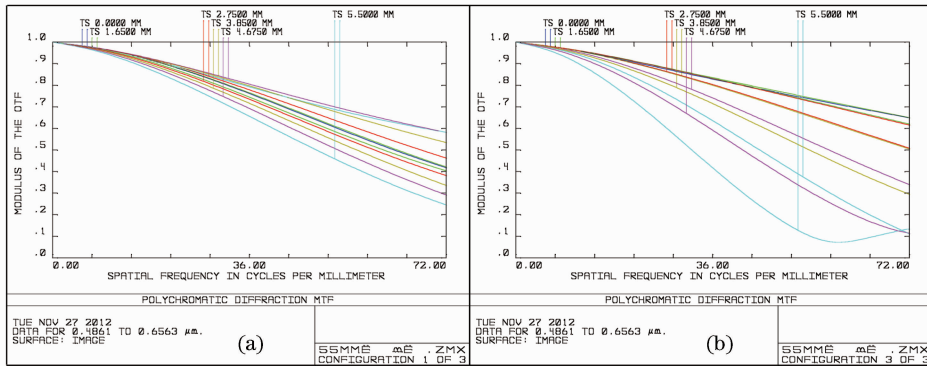


图 6 胶合后的 MTF 曲线。(a) 146 mm 的工作距离; (b) 无穷远

Fig. 6 MTF curves of the system with agglutination for working distances of (a) 146 mm and (b) infinity

表 1 工作距离对应的物高和测量精度值

Table 1 Object heights and measurement accuracy for different working distances

Working distance /mm	Object height /mm	Measurement accuracy /mm
5000	1010	0.636
1000	210	0.127
500	110	0.064
280	66	0.036
146	38	0.019

由表 1 可见,物体离镜头越远精度越差,当物体在近处测量尺寸时精度最高。

图 7 给出了镜头的场曲和畸变^[12]。畸变只引起像的变形,对像的清晰度并无影响。因此,对于一般的光学系统,只要人眼感觉不出像的变形(相对畸变小于 3%),这种像差就无妨碍。图 7(a)表明物距 146 mm 对应的畸变为 -0.54%,图 7(b)表明无穷远处对应的畸变为 -0.33%,远远超出人眼的辨别能力。

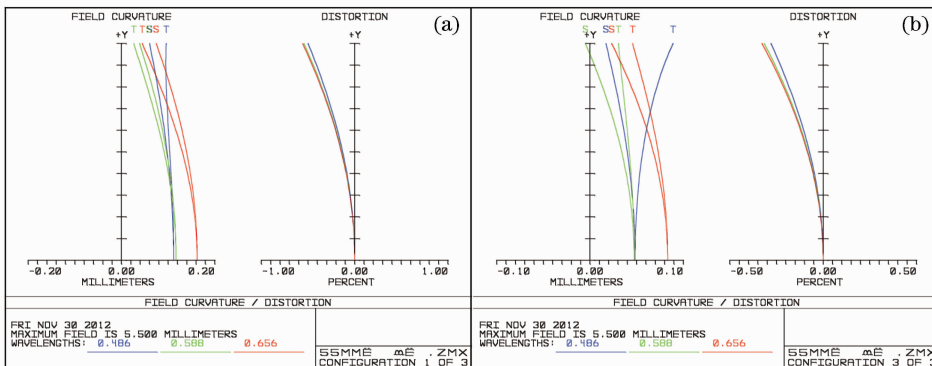


图 7 畸变图。(a) 146 mm 的工作距离; (b) 无穷远

Fig. 7 Distortion for working distances of (a) 146 mm and (b) infinity

图 8 为系统的相对照度曲线。由图可知,在像面边缘处的照度为中心照度的 70% 左右,系统像面照度的均匀性较好。

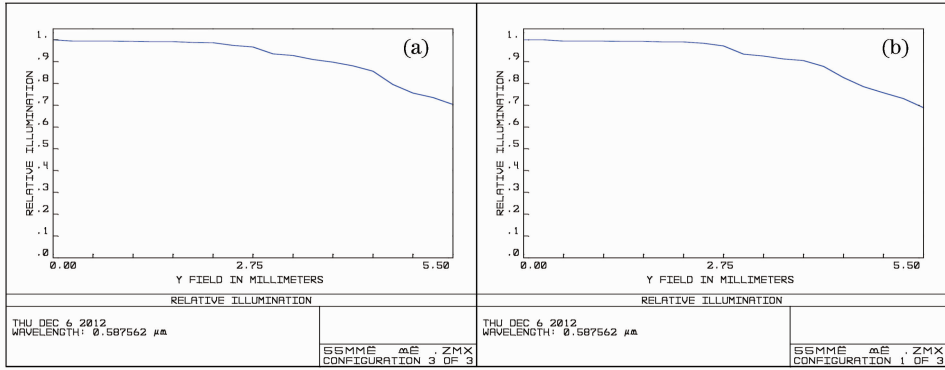


图8 相对照度图。(a) 146 mm的工作距离;(b) 无穷远

Fig. 8 Relative illumination for working distances of (a) 146 mm and (b) infinity

6 结 论

基于物面移动对像质的影响理论,考虑整个装配线所需的安全监控范围,设计了宽工作距离成像光学系统。其各项指标为焦距 55 mm,最大光圈 F 数为 2.8,靶面尺寸 6.6 mm×8.8 mm,光谱范围 480~660 nm,调焦范围为 146 mm 到无穷远,中心视场在空间频率 100 lp/mm 处调制传递函数大于 0.3,0.7 视场在 72 lp/mm 处调制传递函数大于 0.3,计算得出镜头的分辨率可达到百万像素。该成像系统的大跨度工作距可以在一些不适合人工作业的环境下进行监控并代替人眼测量和判断,能够提高生产效率、产品质量及自动化程度,同时可避免因人眼疲劳导致的事故,有较好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Yang Jun, Li Xirong. Application of machine vision in coal mine machinery[J]. *J. Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 2011, **26**(3): 81~84
杨 君,李细荣. 机器视觉技术在煤矿机械上的应用[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2011, **26**(3): 81~84
- 2 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng, Fan Shifu. Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007. 159~166
李晓彤,岑兆丰,范世福. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2007. 159~166
- 3 王之江. 光学设计理论基础[M]. 北京:科学出版社, 1985. 171~251
- 4 Zhao Man, Jiang Bo, Fan Xiuying *et al.*. Measurement and analysis on the modulation transfer function of CCD camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(7): 071201
赵 曼,姜 博,范秀英等. CCD 相机调制传递函数的测试分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(7): 071201
- 5 Chang Lingying, Zhao Baochang, Yang Jianfeng *et al.*. Optical system design of a two-linear array stereoscopic mapping CCD camera[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0816001
常凌颖,赵葆常,杨建峰等. 两线阵立体测绘 CCD 相机光学系统设计[J]. 中国激光, 2011, **38**(8): 0816001
- 6 Li Ning, Tang Yong, Li Yuyao *et al.*. Design of optical system for laser micro-manipulator with adjustable working distance [J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(6): 557~560
李 宁,唐 勇,李玉瑶等. 工作距离可调的激光显微操纵器光学系统设计[J]. 中国光学与应用光学, 2009, **2**(6): 557~560
- 7 Huang Yifang, Li Lin. Optical Design Tutorial[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. 29~31
黄一帆,李 林. 光学设计教程[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2009. 29~31
- 8 舒朝谦,田爱玲,杭凌侠. 现代光学制造技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2010. 151~159
- 9 Liu Guanghong, Wu Gang, Ling Qing *et al.*. Modelling of Offner imaging spectrometers and aberration analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0322001
刘光宏,吴 刚,凌 青等. Offner 成像光谱仪建模及像差分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0322001
- 10 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2674~2679
陆 强,季轶群,沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2674~2679
- 11 Tian Yuanyuan, Huang Hecheng, Tan Qingchang *et al.*. Size measurement of parts based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011501
田原媛,黄合成,谭庆昌等. 基于机器视觉的零件尺寸测量[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(1): 011501
- 12 Liu Yali, Wang Min, Huang Muwang. Iris identification optical lens with high precision[J]. *J. Applied Optics*, 2012, **33**(3): 575~579
刘雅丽,王 敏,黄木旺. 高精度虹膜识别光学镜头的研制[J]. 应用光学, 2012, **33**(3): 575~579