

## 用于多光谱相机的机器视觉系统设计

王康生 林峰 谢忠鑫 林丽瑜 林俊杰 李思佳 陈玮民

### Machine vision system design for multispectral cameras

WANG Kangsheng, LIN Feng, XIE Zhongxin, LIN Liyu, LIN Junjie, LI Sijia, CHEN Weimin

引用本文:

王康生, 林峰, 谢忠鑫, 等. 用于多光谱相机的机器视觉系统设计[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 233–241. DOI: 10.5768/JAO202546.0201001

WANG Kangsheng, LIN Feng, XIE Zhongxin, et al. Machine vision system design for multispectral cameras[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 233–241. DOI: 10.5768/JAO202546.0201001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0201001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 低畸变宽工作距机器视觉镜头光学设计

Low distortion wide working distance machine vision optical lens design

应用光学. 2020, 41(5): 924–928 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501008>

#### 光场多光谱相机像方远心镜头光学设计

Optical design of image telecentric lens for optical field multispectral camera

应用光学. 2020, 41(3): 603–610, 617 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0305003>

#### 机器视觉螺纹图像评价方法

Thread image evaluation method based on machine vision

应用光学. 2022, 43(5): 904–912 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0502004>

#### 高低温试验装置中多光谱光学窗口组件设计

Design of multispectral optical window assembly for high and low temperature test device

应用光学. 2023, 44(3): 661–667, 683 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0305001>

#### 用于生物医疗信息采集的多光谱均匀光源系统

Multispectral uniform light source system for acquisition of biomedical information

应用光学. 2022, 43(1): 144–151 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0105004>

#### 微小球面显微光学系统设计与照明分析

Design and illumination analysis of tiny-spherical microscopic optical system

应用光学. 2023, 44(2): 262–267 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0201004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 02-0233-09

引用格式: 王康生, 林峰, 谢忠鑫, 等. 用于多光谱相机的机器视觉系统设计[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 233-241.

WANG Kangsheng, LIN Feng, XIE Zhongxin, et al. Machine vision system design for multispectral cameras[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 233-241.



在线阅读

# 用于多光谱相机的机器视觉系统设计

王康生, 林峰, 谢忠鑫, 林丽瑜, 林俊杰, 李思佳, 陈玮民

(福建师范大学 光电与信息工程学院 医学光电科学与技术教育部重点实验室)

福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007)

**摘要:** 传统的机器视觉系统只能捕捉特定波长范围的光线, 如可见光、近红外或紫外线, 适用于基本的图像捕捉和分析任务, 但在处理复杂的光学效应和色彩分析时存在局限性。随着传感器和镀膜技术的不断进步, 多光谱相机等产品应运而生。为了满足日益复杂的检测和分析需求, 机器视觉系统逐渐涵盖多个光谱区域。基于Zemax设计了一款应用于多光谱相机的机器视觉系统, 工作波段为400 nm~700 nm、700 nm~800 nm、800 nm~1000 nm, 焦距为12 mm, 相对孔径1:2.2, 半视场角为20.6°, 总长小于115 mm, 畸变小于0.8%, 远心度低于1°。设计结果表明: 系统通过整组调焦, 可实现在500 mm~1500 mm工作距内具有良好的成像质量, 并满足公差加工要求。

**关键词:** 光学设计; 多光谱; Zemax; 机器视觉

中图分类号: TN202

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0201001

## Machine vision system design for multispectral cameras

WANG Kangsheng, LIN Feng, XIE Zhongxin, LIN Liyu, LIN Junjie, LI Sijia, CHEN Weimin

(Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine (Ministry of Education), College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** Traditional machine vision systems are constrained to capture specific wavelength ranges of light, such as visible light, near-infrared, or ultraviolet, suitable for basic image capture and analysis tasks, but with limitations in dealing with complex optical effects and color analysis. As sensor and coating techniques continue to advance, the emergence of multispectral cameras has become apparent. In response to the escalating demands for sophisticated detection and analysis, machine vision systems are progressively integrating multiple spectral domains. A machine vision system for multispectral cameras based on Zemax was designed, with working bands of 400 nm to 700 nm, 700 nm to 800 nm, and 800 nm to 1000 nm, a focal length of 12 mm, a relative aperture of 1:2.2, a half field angle of 20.6°, a total length less than 115 mm, distortion less than 0.8%, and telecentricity lower than 1°. The design results indicate that the system achieves great imaging quality over a working distance of 500 mm to 1500 mm through a set of focusing adjustments and meets tolerance processing requirements.

**Key words:** optical design; multispectral; Zemax; machine vision

收稿日期: 2024-04-26; 修回日期: 2024-11-11

基金项目: 福建省重大专项专题 (2021YZ040012)

作者简介: 王康生 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计研究。E-mail: 1791490566@qq.com

通信作者: 林峰 (1968—), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事成像光学领域的研发, 光机电产品工艺技术及检测研究。

E-mail: lfeng127@163.com

## 引言

典型机器视觉系统的传感器和照明都工作在可见光谱,普遍应用于零件定位、条形码识别、物体瑕疵检测等工业领域。2013年,杨康等<sup>[1]</sup>设计了一款宽工作距机器视觉系统,焦距55 mm,光圈数 $F$ 为2.8,光谱范围480 nm~660 nm,调焦范围从146 mm到无穷远,实现在装配线上替代人工监测各个方位零件运作情况。2020年,柳晓娜等<sup>[2]</sup>设计了一款低畸变、宽工作距机器视觉系统镜头,相对孔径1:1.8,视场角23.9°,工作波段450 nm~650 nm,畸变小于0.1%,工作距100 mm到无穷远,实现在宽工作距下保证物体测量精度。2022年,曹一青<sup>[3]</sup>设计了一款用于机器视觉系统的双远心镜头,放大倍率为-0.397, $F$ 数为3.3,工作波段400 nm~700 nm,工作距为100 mm,实现了低畸变高分辨率检测需求。2022年,刘巧玲<sup>[4]</sup>设计了一款用于药片缺陷检测的机器视觉镜头,焦距45 mm,光圈 $F$ 数为2,工作在可见光,实现在生产线上替代人工识别药片缺陷。针对大多数机器视觉镜头限制在可见光范围,本文以多光谱为出发点,设计了一款工作在400 nm~700 nm、700 nm~800 nm、800 nm~1 000 nm波段的机器视觉镜头,在近红外波段镜头在弱光环境或物体光谱特性分析时保持高对比度。例如在水果分拣中,利用多光谱相机的近红外通道可以直观地观察到水果在可见光下难以察觉的瘀伤<sup>[5]</sup>,如图1所示(资料来源:Quality Magazine)。同时,为了迎合工业中的不同应用场景,系统采用整组调焦方式,在500 mm~1 500 mm工作距内可实现高分辨率成像。



图1 可见光与近红外波段观察的苹果

Fig. 1 Apples under visible and near-infrared observation

## 1 光学系统设计

### 1.1 设计指标

首先,根据3个波段的设计目标,从市场上已有的多光谱相机中筛选,确定机器视觉镜头的参

数指标。目前,国内外多光谱相机主要有韵翔光电、长步道、基恩士、Kowa、JAI、GOYO、Blue-Vision 等公司的产品。考虑波段范围和传感器尺寸,最终选取 JAI 公司 Fusion 系列 FS-3200T-10GE-NNC 多光谱相机,如图2所示。



图2 FS-3200T-10GE-NNC 多光谱相机

Fig. 2 FS-3200T-10GE-NNC multispectral camera

该相机内部有14 mm长的棱镜,将可见光波段与近红外波段分为3个通道,分别成像在3个不同方位CMOS上。参考其手册,3个通道分别为400 nm~670 nm、700 nm~800 nm、820 nm~1 000 nm,光谱响应图如图3所示。

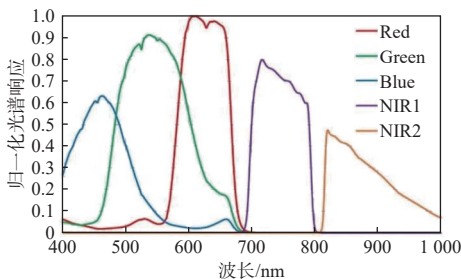


图3 多光谱相机的光谱响应图

Fig. 3 Spectral response diagram of multispectral camera

多光谱相机的CMOS传感器对角线尺寸为8.8 mm,像元尺寸为3.45  $\mu\text{m}$ ,相机接口为C型。为了避免成像时出现暗角,机器视觉镜头成像的半像高应略大于CMOS传感器对角线尺寸,将半像高设计目标值定为4.5 mm。根据香农采样定理,CMOS传感器的空间周期至少是图像空间周期的2倍,即CMOS传感器的空间频率是图像空间频率的一半<sup>[6]</sup>。空间频率可表示为

$$\nu = \frac{1000}{2\rho} \quad (1)$$

式中: $\nu$ 为空间频率; $\rho$ 为像元尺寸。将像元尺寸3.45  $\mu\text{m}$ 代入式(1)中,得到空间频率为145 lp/mm。若将焦距定为12 mm,则半视场角为

$$\omega = \arctan \frac{h'}{f} = 20.56^\circ \quad (2)$$

式中: $h'$ 为像高; $f$ 为焦距。详细系统设计指标如表1所示。

表 1 系统设计参数指标

Table 1 Indicators of system parameters

参数	指标
焦距/mm	12
$F$ 数	2.2
半视场角/(°)	20.56
半像高/mm	4.5
工作波段/nm	400~1 000
系统总长/mm	≤150
畸变/%	≤0.8
远心度/(°)	≤1
后截距/mm	≥17
工作距/mm	500~1 500

## 1.2 设计原理

对于一般物体成像,不同物距成像对应不同的主光线,主光线的位置决定像高的大小。若将光阑位置放在成像系统的后焦面上,系统物空间入瞳位于无穷远处,对于不同物距的物体成像能够实现像高不变<sup>[7]</sup>。若将物方远心系统翻转,可获得像方远心系统,光阑位置在物方焦面上,系统像空间出瞳位于无穷远。然而,机器视觉系统作为一种复杂的像方远心系统,需要考虑畸变和工作距等因素,不能直接将光阑放置在像系统的物方焦面上。本文所选多光谱相机内部带有棱镜,机器视觉系统具有长后截距的特点。综合考虑,采用反远摄结构<sup>[8]</sup>,前组为负透镜组,后组为正透镜组,如图 4 所示。

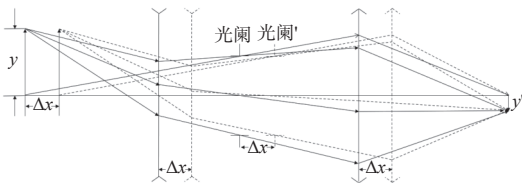


图 4 机器视觉系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of machine vision system

光阑位于机器视觉系统正透镜组与负透镜组之间,且偏向系统的中心位置<sup>[9]</sup>,用于校正畸变。系统采用整组调焦方式补偿不同工作距下的离焦,即机器视觉系统整体轴向移动,通过向前或向后延伸改变像距,但像面位置、镜组之间相对距离以及系统焦距保持不变。这种调焦方式需在光学系统设计时明确不同物距下对应的调焦量,便于之后设计调焦环时,在镜筒刻上 CMOS 传感器与

被摄物体之间成像距离的标尺。若工作距发生变化,可通过旋转调焦环带动镜筒上的螺纹使机器视觉系统产生移动。根据上述逻辑,利用 Zemax 的近轴面建立机器视觉系统模型,如图 5 所示。

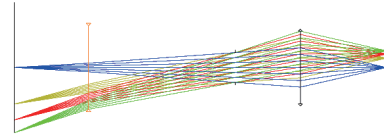


图 5 机器视觉光学模型

Fig. 5 Optical model of machine vision

## 1.3 色差校正

不同光学玻璃在给定波长下有不同的色散特性<sup>[10]</sup>,在设计过程中通过正-负透镜组合彼此抵消,达到消色差的目的。根据薄透镜消色差理论,位置色差可表示为

$$\sum_{n=1}^M C_i = \sum_{n=1}^M h_i^2 \frac{\varphi_i}{v_i} \quad (3)$$

式中: $M$ 为透镜数目; $h_i$ 为光线入射到透镜的高度; $\varphi_i$ 和 $v_i$ 分别为透镜的光焦度与阿贝数。对于双胶合薄透镜,前后透镜 $h_i$ 近似相等,其消色差条件满足下式:

$$\frac{\varphi_1}{v_1} + \frac{\varphi_2}{v_2} = 0 \quad (4)$$

通过式(4)实现 F 与 C 波长消色差,但 D 波长与 F、C 波长的光聚焦位置不同,其光焦差可表示为

$$\Delta\varphi_{dc1} = (n_{d1} - n_{c1})(C_1 - C_2) = \frac{(n_{d1} - n_{c1})}{(n_{f1} - n_{c1})}(n_{f1} - n_{c1})(C_1 - C_2) \quad (5)$$

$$P_1 = \frac{(n_{d1} - n_{c1})}{(n_{f1} - n_{c1})} \quad (6)$$

$$v_1 = \frac{(n_{d1} - 1)}{(n_{f1} - n_{c1})} \quad (7)$$

将式(4)、式(6)和式(7)代入式(5)中可得到 $\Delta\varphi_{dc1}$ ,即:

$$\Delta\varphi_{dc1} = P_1 \frac{\varphi_1}{v_1} \quad (8)$$

同理可得 $v_2$ 、 $P_2$ 、 $\Delta\varphi_{dc2}$ 。D、F、C 波长的光经过双胶合透镜时,光焦差 $\Delta\varphi_{dc}$ 可表示为

$$\Delta\varphi_{dc} = \Delta\varphi_{dc1} + \Delta\varphi_{dc2} = P_1 \frac{\varphi_1}{v_1} + P_2 \frac{\varphi_2}{v_2} \quad (9)$$

再将式(4)代入式(9)中,得到:

$$\Delta\varphi_{dc} = \frac{(P_1 - P_2)}{(v_1 - v_2)} \varphi = \frac{\Delta P}{\Delta v} \varphi \quad (10)$$



式 (5)~式 (10) 中,  $n_{d1}$ 、 $n_{f1}$ 、 $n_{c1}$  分别表示 D、F、C 波长的光通过前透镜时的折射率;  $C_1$ 、 $C_2$  为前透镜 2 个面的曲率;  $P_1$ 、 $P_2$  为前透镜与后透镜材料的相对色散;  $\Delta\varphi_{dc1}$ 、 $\Delta\varphi_{dc2}$  及  $\varphi$  分别为前透镜与后透镜在 D 波长与 F、C 波长下的光焦差与总光焦度。由式 (10) 可知, 胶合透镜总光焦度一定时, 2 种透镜材料的相对色散的差值越小, 且阿贝数的差值越大时, 胶合透镜产生的光焦差越小。

#### 1.4 设计方法

通过查阅相关像方远心镜头文献, 选取申请号为 202310210193.2 的专利作为初始结构, 根据专利描述, 其工作波段为 400 nm~1 000 nm, 有效焦距为 43 mm,  $F$  数为 2.7, 对角线最大半视场角为  $15^\circ$ , 后工作距为 12.5 mm, 截至空间频率为 28 lp/mm。由于不能完美复现专利, 需要对初始结构的参数进行修改。根据波段、物距及调焦量划分出 9 个组态, 每个组态对应波段给予权重, 非该组态的波段权重置 0, 相当于放宽约束限制, 减轻了每个组态色差矫正负担。经过不断迭代优化, 最终的光学系统结构如图 6 所示。光学系统前组 4 片负透镜<sup>[11]</sup>将视场慢慢减小, 主要平衡系统大部分畸变。第 5 片透镜主要校正垂轴色差, 并与第 8 片透镜关于光阑互补, 抵消了一部分畸变。后组与艾尔弗目镜类似, 通过 2 组双胶合透镜与 1 片正透镜实现像方远心。

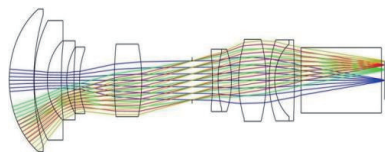


图 6 多光谱机器视觉镜头 2D 结构图

Fig. 6 2D structure diagram of multispectral machine vision lens

为了更准确地实现设计目标, 设计过程中将 14 mm 的棱镜<sup>[12]</sup>加入到机器视觉系统内, 其材质为 H-ZF6, 折射率为 1.755 2, 等效空气厚度为 24.572 8 mm, 等效棱镜与像面的空气间隔为 1 mm。从第 1 个镜片到第 10 个镜片为机器视觉镜头, 长度为 87.24 mm, 加上等效棱镜厚度和空气间隔, 总长小于 115 mm。

机器视觉系统分 3 个波段<sup>[13]</sup>: 400 nm~700 nm、700 nm~800 nm、800 nm~1 000 nm。设计时第一通道波长选取 407 nm、486 nm、588 nm、656 nm; 第二通道波长选取 707 nm、785 nm; 第三通道波长

选取 854 nm、912 nm、1 000 nm; 3 个通道的参考波长分别为 486 nm、707 nm、912 nm。根据工作距与波长, 在 Zemax 中设置 9 个多重组态, 对应的主要操作数有 THIC、PRWV 和 WLWT, 它们分别控制每个组态的空气厚度、参考波长及波长权重。第一通道、第二通道及第三通道分别对应 500 mm、1 000 mm、1 500 mm 工作距, 同时将棱镜与其前一组双胶合透镜的空气间隔设置为调焦量, 即第 19 面空气厚度, 最终工作距对应的调焦量如表 2 所示。

表 2 工作距对应的调焦量

Table 2 Focus adjustment amount corresponding to working distances

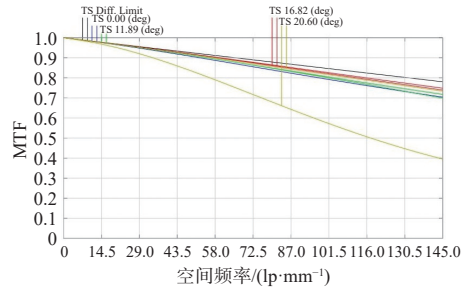
工作距/mm	500	1 000	1 500
调焦量/mm	2.189 7	2.057 0	2.010 0

机器视觉系统的后截距由多个因素组成, 包括第 19 面的空气厚度、14 mm 的棱镜厚度以及棱镜与像面之间空气间隔。由表 2 可知, 满足后截距大于或等于 17 mm 的设计目标。在实际生产过程中, 为了确保镜头能够与 17.526 mm 的 C 型接口匹配, 需要在镜筒上加工螺纹, 使镜头的后截距大于或等于相机的法兰距, 这种匹配的调整是为了确保成像系统的稳定性和性能的一致性。

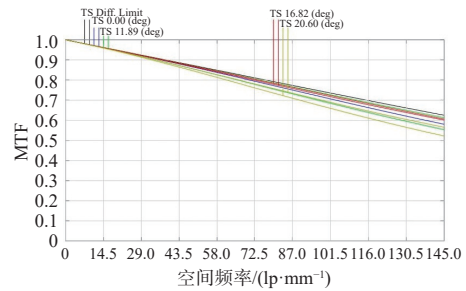
## 2 像质评价

### 2.1 调制传递函数

调制传递函数 (modulation transfer function) MTF 是评估成像系统性能的关键指标之一, 它描述了在特定频率下成像系统将物体对比度传输到像面的能力<sup>[14]</sup>。根据 CMOS 传感器 3.45  $\mu\text{m}$  的像元尺寸确定空间频率为 145 lp/mm, 即每毫米能分辨 145 条黑白线对。在 500 mm、1 000 mm、1 500 mm 工作距内不同波段的 MTF 曲线如图 7、图 8 和图 9 所示。由图 7 可知, 在 500 mm 工作距内 3 个波段的中心视场 MTF 均大于 0.5, 700 nm~800 nm 波段和 800 nm~1 000 nm 波段边缘视场 MTF 均大于 0.4, 400 nm~700 nm 波段边缘视场 MTF 略小于 0.4。由图 8 可知, 在 1 000 mm 工作距内 3 个波段的中心视场与边缘视场的 MTF 均大于 0.5。由图 9 可知, 在 1 500 mm 工作距内 3 个波段的中心视场 MTF 均大于 0.5, 边缘视场 MTF 均大于 0.3。



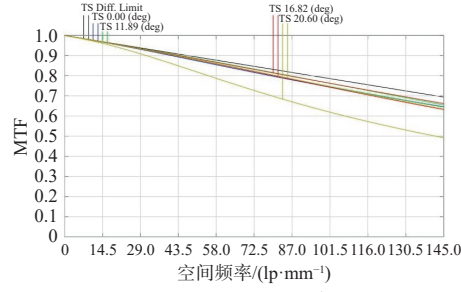
(a) 400 nm~700 nm波段



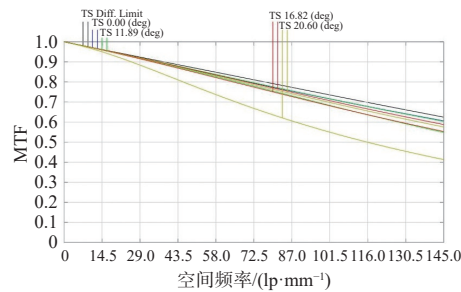
(c) 800 nm~1000 nm波段

图 8 1 000 mm 工作距下系统 MTF 图

Fig. 8 MTF diagrams of system at 1 000 mm working distance



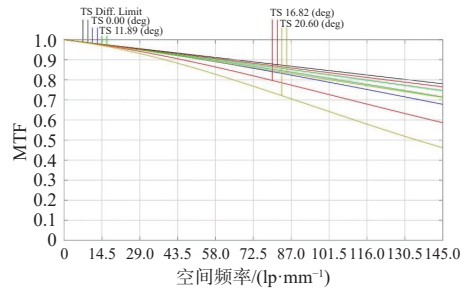
(b) 700 nm~800 nm波段



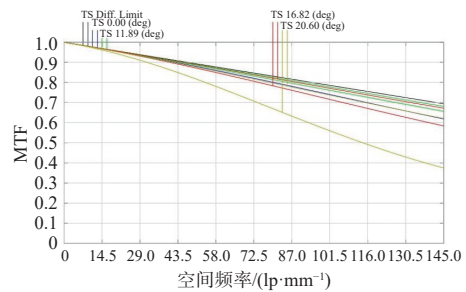
(c) 800 nm~1 000 nm波段

图 7 500 mm 工作距下系统 MTF 图

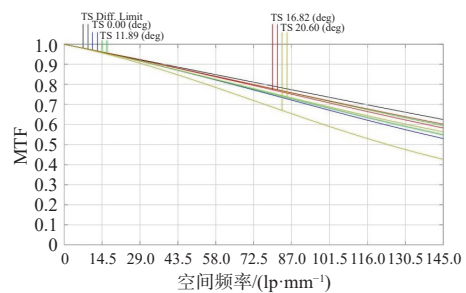
Fig. 7 MTF diagrams of system at 500 mm working distance



(a) 400 nm~700 nm波段



(b) 700 nm~800 nm波段

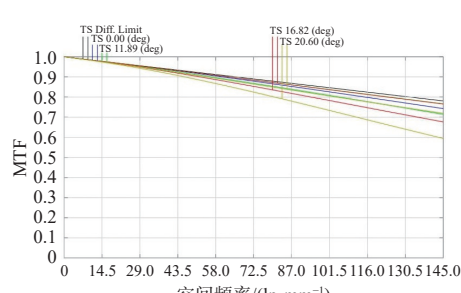


(c) 800 nm~1 000 nm波段

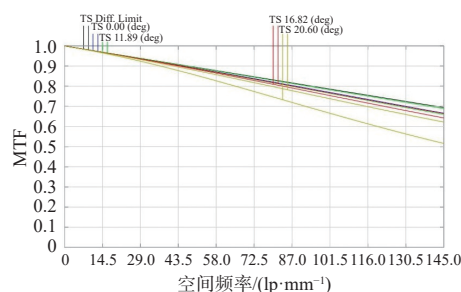
图 9 1 500 mm 工作距下系统 MTF 图

Fig. 9 MTF diagrams of system at 1 500 mm working distance

对比图 7、图 8 和图 9 可以发现, 在 400 nm~700 nm 波段、500 mm 工作距内和 700 nm~800 nm 波段、1 500 mm 工作距内系统 MTF 不够均匀, 尤其在边缘视场处, 相对于中心视场, MTF 值偏低。相比其他组态, 这 2 个组态像质最差。为了避免让



(a) 400 nm~700 nm波段

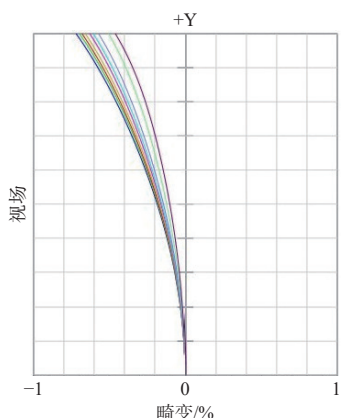


(b) 700 nm~800 nm波段

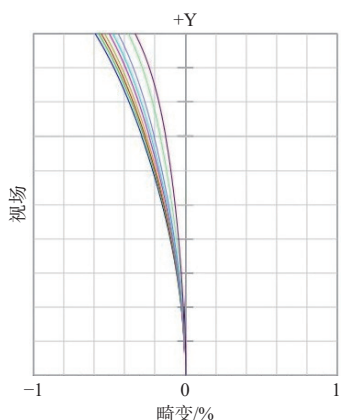
像质评价图占据过多篇幅,后面着重分析这2个组态。

## 2.2 畸变与远心度

畸变<sup>[15]</sup>描述了在固定工作距下,放大倍率在视场范围内的变化情况。它衡量了成像系统中产生的形状失真程度,不同波段和不同工作距内镜头畸变图如图10所示。



(a) 400 nm~700 nm波段500 mm工作距畸变



(b) 700 nm~800 nm波段1500 mm工作距畸变

图10 不同波段和工作距内镜头畸变图

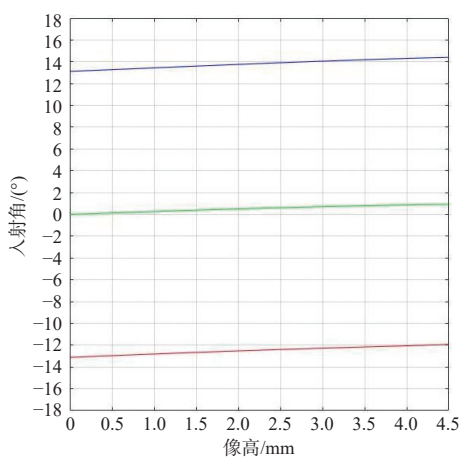
Fig. 10 Distortion diagrams under different bands and working distances

图10中1对应的最大视场角度为 $20.6^\circ$ 。从图10中可知,400 nm~700 nm波段、500 mm工作距和700 nm~800 nm、波段1500 mm工作距镜头畸变均小于0.8%,符合畸变小于1%的设计目标。

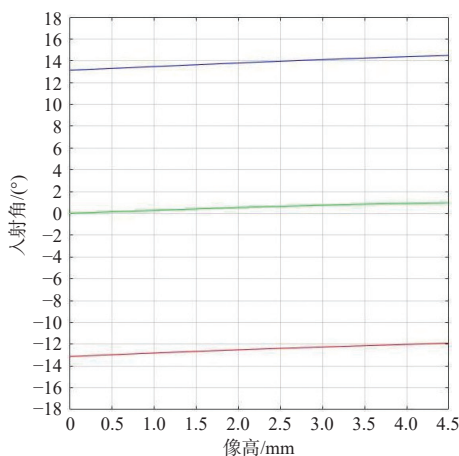
远心度<sup>[16]</sup>描述了在指定参考波长下,不同视场主光线偏离光轴的程度。它反映了镜头的远心性能,特别是在成像中心点以外区域的主光线偏离情况,不同波段和不同工作距下的远心度如图11所示。

图11中横坐标以像高作为视场,最大半像高为4.5 mm,纵坐标表示光线在像面处的入射角。

图11(a)和图11(b)中3根光线分别始于入瞳的下边缘、中心、上边缘,参考波长分别为486 nm与707 nm。随着像高的增大,从入瞳开始追迹到像面,并采样其对应的入射角。从图11(a)和图11(b)中可以看出,像高与入射角成线性关系,且各视场主光线偏离光轴的角度不大,其中最大主光线偏角的追迹数据约为 $0.977^\circ$ ,满足远心度小于 $1^\circ$ 的设计目标。



(a) 400 nm~700 nm波段500 mm工作距远心



(b) 700 nm~800 nm波段1500 mm工作距远心

图11 不同波段和工作距内的远心度

Fig. 11 Telecentricity under different bands and working distances

## 2.3 位置色差

位置色差又称纵向色差,描述了不同色光通过透射材料时,因光焦度不同而聚焦在光轴的不同位置。因此,光学系统的波段越宽,位置色差越难矫正。根据消色差理论,本文两组胶合透镜的材料选取遵循相对色散差小、阿贝数相差大的特点。前组胶合透镜使用H-ZLAF55C与H-FK95N,相对色散差为0.057,阿贝数差为51.811;后组胶

合透镜使用 H-LAK7A 与 H-ZPK7, 相对色散差为 0.029, 阿贝数差为 17.471, 最终位置色差如图 12 所示。

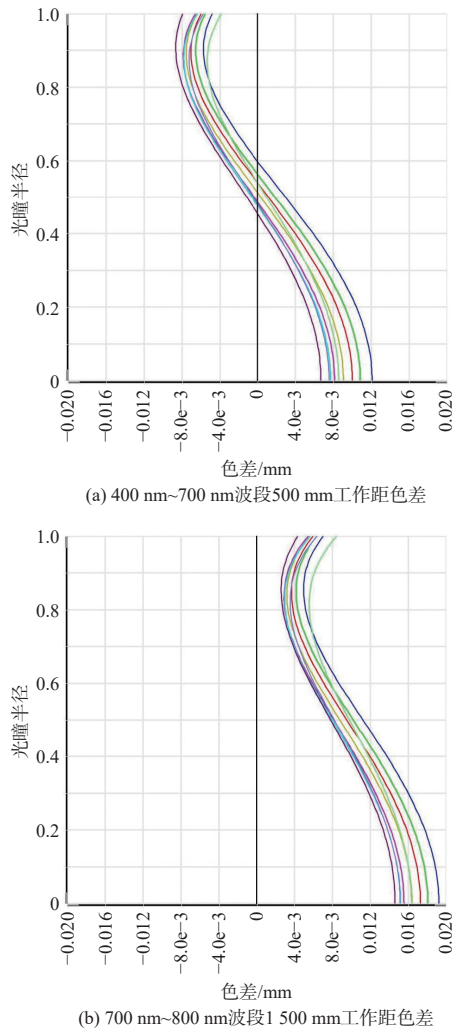


图 12 不同波段和工作距下的位置色差

Fig. 12 Longitudinal aberration under different bands and working distances

图 12 中横坐标色差表示不同色光与光轴交点离像面的距离, 纵坐标为归一化光瞳半径, 1 对应最大的入瞳半径为 2.73 mm。从图 12 中可以看出, 400 nm~700 nm 波段、500 mm 工作距下各视场位置色差均匀分布在像面两侧, 且不同工作距下轴上视场最大位置色差小于 0.02 mm。

### 3 公差分析

由于材料特性、加工工艺、环境变化等因素, 零件很难无偏差地按照设计值制造。公差描述了零件可接受的变化范围, 直接影响产品的性能和质量<sup>[17]</sup>。本节分析 400 nm~700 nm 波段 500 mm

工作距内机器视觉系统的公差和性能。首先确定公差参数, 如表 3 所示。

表 3 允许公差变化范围

Table 3 Variation ranges of permissible tolerance

允许公差	参数
曲率半径/rings	4
厚度/mm	$\pm 0.03$
X方向表面偏心/mm	$\pm 0.02$
Y方向表面偏心/mm	$\pm 0.02$
X方向元件偏心/mm	$\pm 0.015$
Y方向元件偏心/mm	$\pm 0.015$
X方向表面倾斜/(°)	$\pm 0.016\ 7$
Y方向表面倾斜/(°)	$\pm 0.016\ 7$
X方向元件倾斜/(°)	$\pm 0.016\ 7$
Y方向元件倾斜/(°)	$\pm 0.016\ 7$

以衍射 MTF 平均值为评价标准, 在空间频率 145 lp/mm 处, 通过 Zemax 的公差分析功能对机器视觉系统进行蒙特卡罗分析, 如图 13 所示。

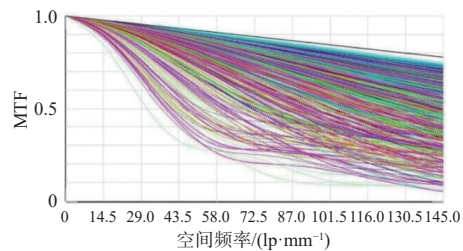


图 13 系统在 145 lp/mm 处蒙特卡罗分析图

Fig. 13 Monte Carlo analysis of system at 145 lp/mm

通过蒙特卡罗公差分析结果可知, 在空间频率 145 lp/mm 处机器视觉系统的 MTF 均值为 0.538 7, 将样本数按照概率统计, 结果如表 4 所示。

表 4 蒙特卡罗公差分析结果

Table 4 Results of Monte Carlo tolerance analysis

蒙特卡罗样本百分比/%	MTF值
90	$>0.422\ 8$
80	$>0.483\ 3$
50	$>0.566\ 6$
20	$>0.600\ 3$
10	$>0.620\ 0$

### 4 结论

本文设计了一款用于多光谱相机的机器视觉系统, 焦距为 12 mm, 相对孔径 1 : 2.2, 半视场角为



20.6°, 半像高为 4.5 mm, 工作波段 400 nm~700 nm、700 nm~800 nm、800 nm~1 000 nm, 畸变小于 0.8%, 后截距大于 17 mm, 总长小于 115 mm。机器视觉系统的设计波段和像高分别涵盖多光谱相机的工作波段与 CMOS 传感器对角线, 系统特征可概述为多光谱、长后截距、低畸变, 且能通过整组调焦的方式实现各个波段在 500 mm~1 500 mm 工作距内具有良好的成像质量。最后, 通过公差分析说明了系统设计的合理性和可制造性。

#### 参考文献:

- [1] 杨康, 林峰. 宽工作距机器视觉系统的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 166-171.  
YANG kang, LIN Feng. Design of machine vision system with wide working distance[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 166-171.
- [2] 柳晓娜, 王少勃, 欧阳名钊, 等. 低畸变宽工作距机器视觉镜头光学设计[J]. 应用光学, 2020, 41(5): 924-928.  
LIU Xiaona, WANG Shaobo, OUYANG Mingzhao, et al. Low distortion wide working distance machine vision optical lens design[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(5): 924-928.
- [3] 曹一青. 一种用于机器视觉系统的双远心镜头设计[J]. 红外技术, 2022, 44(2): 140-144.  
CAO Yiqing. Design of double telecentric lens using machine vision system[J]. Infrared Technology, 2022, 44(2): 140-144.
- [4] 刘巧玲. 可用于药片缺陷检测的机器视觉光学镜头设计[J]. 光源与照明, 2022(5): 95-97.  
LIU Qiaoling. Design of machine vision optics that can be used for tablet defect detection[J]. Light Sources and Lighting, 2022(5): 95-97.
- [5] 杨泽青, 李志蒙. 水果外观品质视觉检测及自动分级控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2024, 46(2): 42-46.  
YANG Zeqing, LI Zhimeng. Design of visual inspection and automatic grading control system for fruit appearance quality[J]. Manufacturing Automation, 2024, 46(2): 42-46.
- [6] 巢海远, 肖青云. 图像采样定理和几何变换教学内容探析[J]. 电气电子教学学报, 2023, 45(5): 161-164.  
CHAO Haiyuan, XIAO Qingyun. Analysis of image sampling theorem and geometric transformation[J]. Journal of Electrical and Electronic Education, 2023, 45(5): 161-164.
- [7] 宋菲君, 陈笑, 刘畅. 近代光学系统设计概论[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 297-305  
SONG Feijun, CHEN Xiao, LIU Chang. Introduction to modern optical system design[M]. Beijing: Science Press, 2019: 297-305.
- [8] 谷婷婷, 向阳. 广角大孔径 CCD 摄像镜头光学设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(2): 210-212.  
GU Tingting, XIANG Yang. Video lens design for CCD camera of wide-angle large aperture[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 32(2): 210-212.
- [9] GUO S C, FANG L, CHEN F C. Design of zoom optical system from visible to NIR-II for vivo fluorescence imaging device[J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1421.
- [10] 骆魁桢, 于方津, 高兴宇. 机器视觉光学系统的复消色差设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 326-332.  
LUO Kuizhen, YU Fangjin, GAO Xingyu. Apochromatic design of machine vision optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 326-332.
- [11] 李京蔓, 向阳, 李琦, 等. 机器视觉大视场宽景深光学系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(1): 18-22.  
LI Jingman, XIANG Yang, LI Qi, et al. Optical system design of large field of view and wide depth based on machine vision[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 42(1): 18-22.
- [12] 唐志方, 牟达, 杨旭, 等. 基于 DMD 的数字光刻定焦变焦投影系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(2): 52-56.  
TANG Zhifang, MU Da, YANG Xu, et al. Projection system design of fixed focus and variable magnification for digital lithography based on DMD[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 42(2): 52-56.
- [13] 刘博, 刘钧, 高明, 等. 光场多光谱相机像方远心镜头光学设计[J]. 应用光学, 2020, 41(3): 603-610.  
LIU Bo, LIU Jun, GAO Ming, et al. Optical design of image telecentric lens for optical field multispectral camera[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(3): 603-610.
- [14] 蔡达岭, 范君柳, 吴泉英, 等. 基于机器视觉的小景深高分辨率双远心光学系统的设计[J]. 激光杂志, 2020, 41(4): 24-28.

- CAI Daling, FAN Junliu, WU Quanying, et al. Design on bilateral telecentric optical system with small depth of field and high resolution for machine vision[J]. *Laser Journal*, 2020, 41(4): 24-28.
- [15] 景磊. 大倍率高分辨率机器视觉远心镜头设计[J]. *现代信息科技*, 2019, 3(12): 141-144.
- JING Lei. Design of telecentric lens for high power and high resolution machine vision[J]. *Modern Information Technology*, 2019, 3(12): 141-144.
- [16] 叶文伟, 周天福, 黄锦媛, 等. 基于机器视觉的双视野双远心光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(1): 214-220.
- YE Wenwei, ZHOU Tianfu, HUANG Jinxuan, et al. Design of dual-vision double telecentric optical system based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(1): 214-220.
- [17] 邓桦湖, 林峰. 光学设计中降低公差灵敏度的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 182-189.
- DENG Pinghu, LIN Feng. Method of tolerance sensitivity reduction of optical design[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 182-189.