

〈系统设计〉

微光与红外图像融合手持观察镜光学系统设计

孙爱平, 龚杨云, 朱尤攀, 余海虹, 黎小琳, 罗琳, 胡德超

(北方夜视科技集团有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 针对微光与红外图像融合手持观察镜展开论述。首先对比分离窗口布局与共用窗口布局的优劣, 针对本文所设计的手持观察镜, 选择共用窗口布局; 其次分析折反射系统的特点, 选择折反射与透射组合的图像融合光学型式; 第三依据相应指标, 对图像融合各个子系统开展光学设计; 最后分析图像融合系统所成图像, 得出此融合系统成像质量好, 分辨率高, 实现了图像融合的目的。

关键词: 微光; 红外; 图像融合; 图像配准; 手持观察镜

中图分类号: TN213

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2013)11-0712-06

Optical System Design of Low-light-level and Infrared Image Fusion Hand-held Viewer

SUN Ai-ping, GONG Yang-yun, ZHU You-pan, YU Hai-hong, LI Xiao-lin, LUO Lin, HU De-chao

(North Night Vision Science and Technology Group Co., Ltd., Kunming 650223, China)

Abstract: The paper discusses low-light-level and infrared image fusion hand-held viewer. Firstly, it makes a contrast with advantages and disadvantages between separable window layout and common window layout, and chooses common window layout for the hand-held viewer design. Secondly, it analyzes features of catadioptric system and chooses the image fusion optical type combined by reflection and transmission. Thirdly, based on the relevant indexes, it develops optical design for image fusion's subsystems. Finally, through analysis of the image from image fusion system, it draws a conclusion that the fusion system has good imaging quality and high resolution ratio, achieving image fusion.

Key words: low-light-level, infrared, image fusion, image registration, hand-held viewer

0 引言

作为中等距离侦查设备的微光与红外图像融合手持观察镜, 与单通道的微光或者红外手持观察镜相比, 能够适应更复杂的战场环境以及提高目标的发现、识别概率。微光系统与红外系统其成像机理不同, 它们所成图像具有不同的优缺点。微光图像对比度低, 直方图表现为灰度范围集中, 容易受到天气和外界光照环境的干扰, 尤其是外界有强光输入时会导致局部出现光晕, 严重时能够影响观察; 但是微光图像能够提供丰富的场景细节信息^[1-3]。红外图像热对比度高, 动态范围大, 受天气和外界光照环境的影响小; 但是目标所成的红外图像外观不自然, 不符合人眼视觉特性, 不利于人眼观察^[2-3]。微光系统探测距离较近;

红外系统探测距离比较远, 且具有穿透雾、霾、雨、雪的能力并且能够识别出简单伪装的人员和车辆目标。因此, 微光图像与红外图像的融合将有利于综合红外图像较好的目标指示特性和微光图像清晰的场景信息^[4-8]。

现如今我军装备的手持观察设备多为单波段的, 已经很难适应复杂多变的战场环境。因此, 针对微光与红外图像融合的优点, 本文设计了一款微光与红外图像融合手持观察镜的光学系统。

1 图像融合光学布局

图像融合系统按照获取外界目标图像信息的途径, 可分为2种布局形式: 分离窗口布局和共用窗口布局。下面以微光与红外图像融合为例, 分析2种布

局形式各自的特点。

1.1 共用窗口布局

共用窗口布局如图1所示。外界目标自身所辐射的红外能量和反射的微光能量被共用透镜组所接收，并传输到分光平板处。分光平板镀制有透射红外波段，反射微光波段的相应膜系。目标辐射的红外能量透过分光平板，经过红外物镜被红外探测器所接收并形成红外图像；目标反射的微光能量被分光平板、反射平板所反射，经过微光物镜被ICCD所接收并形成微光图像。红外图像与微光图像在图像处理器中使用相应算法进行图像配准以及图像融合，最终得到红外与微光的融合图像。融合后的图像在OLED上进行显示，人眼可通过目镜进行观察。

受镀膜工艺的限制，在分光平板处目标所辐射的红外能量以及所反射的微光能量均衰减为原来的50%左右，整机性能下降将近一半，远远不能满足性能要求。如果采用此分光平板，要达到原来的整机性能，则需要接收红外能量、微光能量的光学孔径面积为原来的2倍，即半径要增大 $\sqrt{2}$ 倍。透镜半径的增加以及所加入的共用透镜组、分光平板、反射平板，造成整机系统体积加大、重量增加。

共用窗口布局，微光物镜和红外物镜是同轴的，能够保证同一物点在不同距离处所成的微光像点、红外像点是完全重合的。这种布局型式，能大大减小图像配准的难度，实现在任何观察点的图像配准。

优点：能够实现不同物距处图像的完全配准。

缺点：体积大，重量重。

1.2 分离窗口布局

分离窗口布局如图2所示。外界目标自身所辐射的红外能量被红外物镜所接收并传输到红外探测器形成红外图像；外界目标所反射的微光能量被微光物

镜所接收并传输到ICCD形成微光图像。红外图像与微光图像在图像处理器中使用相应算法进行图像配准以及图像融合，最终得到红外与微光的融合图像。融合后的图像在OLED上进行显示，人眼可通过目镜进行观察。

由于红外物镜与微光物镜的光轴不同轴，造成不同距离的物点所成的红外像点与微光像点间具有一定的间隔，且此间隔随物点距离观察点的距离不同而不同。假设一物点A处在微光物镜光轴上，距离微光物镜间距分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 ，物点A所成微光像点分别为 A_1 、 A_2 、 A_3 ，所成红外像点分别为 A_{IR}^1 、 A_{IR}^2 、 A_{IR}^3 ，如图3所示。在任何距离处，物点A所成微光像点处于像面与微光光轴的交点处；物点A处于不同距离时，对应的红外像点与红外光轴间隔也不同，且随物点A的距离变化而变化。因此在后续图像配准过程中，不可能实现在不同距离点处图像完全的配准。即如果以 L_2 处为基准进行图像配准，则同时 L_1 、 L_3 处所成图像不能实现图像配准，造成“重影”现象。

分离窗口的布局，不需要共用透镜组以及分光平板、反射平板，能够避免不理想的分光膜系，其体积比较小、重量较轻。

优点：体积小、重量轻。

缺点：不能实现不同物距处图像的完全配准。

对于体积和重量要求严格，而对图像融合质量要求不是太严格的条件下，可以采用分离窗口布局，主要使用于头盔，如美军单兵夜视仪ENVG(D)。对体积和重量要求不是很严格，而对图像融合质量要求比较苛刻的条件下，可以采用共用窗口布局，主要使用于手持观察镜以及车载、机载观瞄设备上。因此本文所设计的微光与红外图像融合手持观察镜，采取共用窗口布局型式。

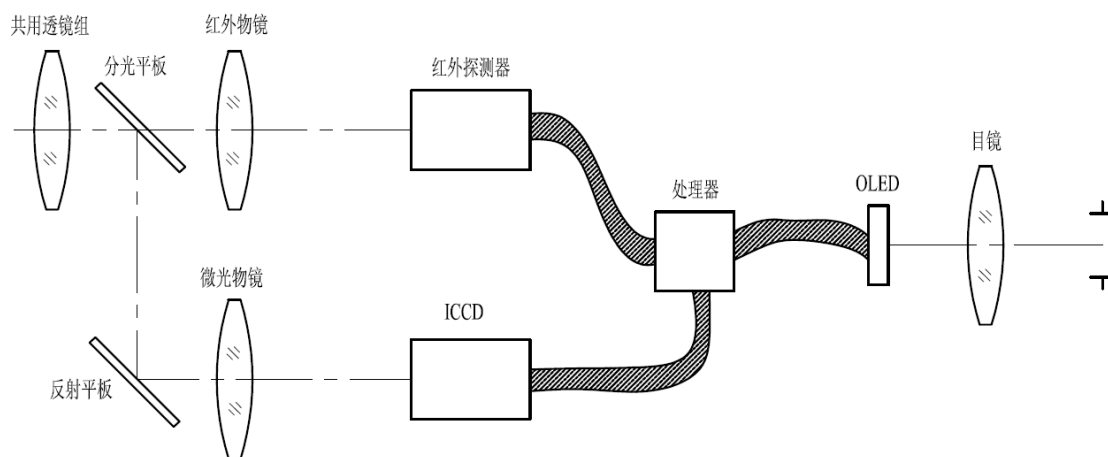


图1 共用窗口布局图

Fig.1 Layout of common window

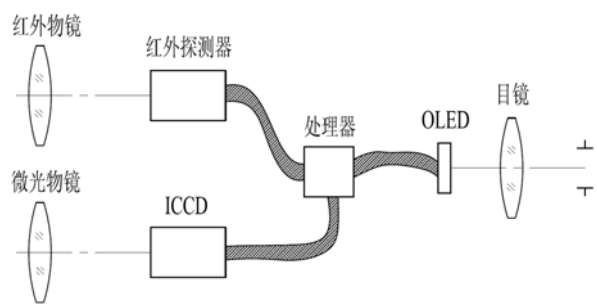


图2 分离窗口布局图
Fig.2 Layout of separable window

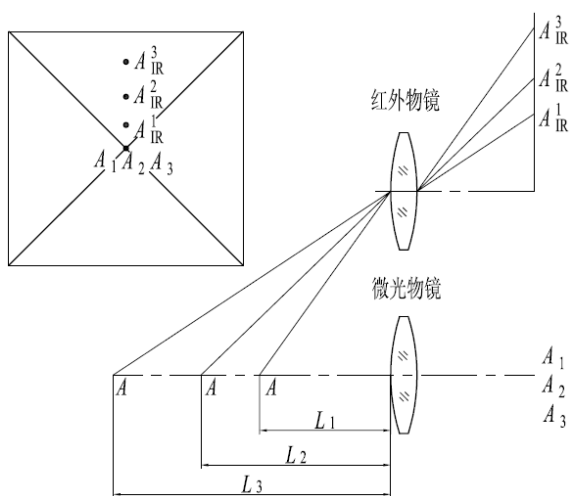


图3 分离窗口图像融合系统图像融合示意图
Fig.3 Image fusion of separable window

2 图像融合光学选型

共用窗口布局能够保证微光物镜与红外物镜的光轴同轴，实现在任何物距处图像的完全配准，但是由于分光膜系工艺的限制，使系统的性能有所下降，且体积变大、重量变重。因此，希望能够找到一种既能保证微光物镜与红外物镜同轴，又能避免使用分光膜系，进而使体积变小、重量变轻的光学结构型式。

通过分析折反射这种特殊的光学结构型式，其中心部分不可避免的有部分遮拦。遮拦掉的部分，不参与折反射系统的成像，对折反射系统而言是无用的部分。如果能够利用这部分，参与另一种光学系统的成像，则既能保证两个光学系统的光轴同轴，又能使整机系统的体积和重量得到控制，如图4所示。因此，本文所论述的微光与红外图像融合手持观察镜采取折反射与投射式相组合的光学型式。目标发射的微光能量被折反射系统所接收并于ICCD处成微光图像；目标自身所辐射的红外能量，被折反射系统遮拦区域所嵌入的反射镜进行光路折转，被红外物镜所接收并于红外探测器处成红外图像。微光图像与红外图像经后续的图像处理，实现图像融合，通过监视器显示，

被人眼所观察。

3 图像融合光学系统设计

3.1 图像融合系统设计指标

此微光与红外图像融合手持观察镜光学性能参数如表1所示。

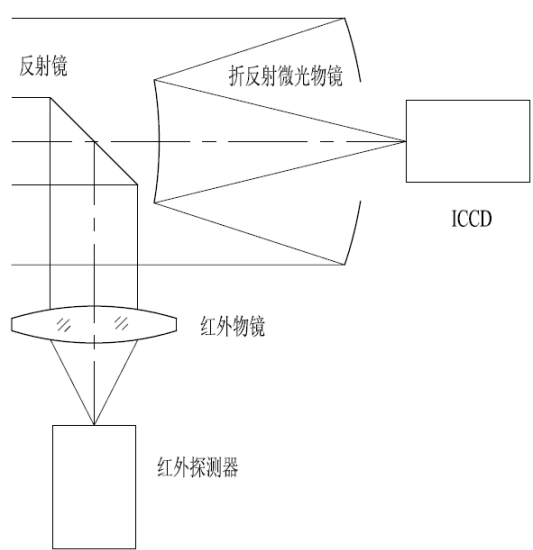


图4 图像融合系统光学结构示意图
Fig.4 Layout of image fusion system

表1 图像融合系统设计参数

Table 1 Image fusion system design parameters	
红外物镜	焦距 63.75 mm
	视场 9.75°×7.32° (对角 12.18°)
	F/# 2
	工作波段 8~12 μm
	探测器类型 640×480@17 μm
目镜	焦距 25 mm
	视场 21.73°×16.38° (对角 33.4°)
	出瞳直径 8 mm
	出瞳距离 25.7 mm
微光物镜	焦距 75 mm
	视场 12.18°
	F/# 1.2
	工作波段 550~850 nm
ICCD 类型 1XZ16/16WHS-1L 耦合 1/3" 的 CCD (W-01CDB3)	
整机倍率	2.8×

3.2 微光物镜光学设计

微光物镜采用卡塞格林折反射的光学型式，光学结构型式如图5所示。它由前校正组、主反射镜、次

反射镜以及后校正组所组成。为了增加微光物镜系统的光学变量，便于校正光学像差，主反射镜采用内反射型式，这样可以增加一个厚度和一个半径的变量。为了减少微光物镜光学系统的复杂型，便于后期系统的装调，次反射镜与前校正组后表面重合。从系统的重量和成本考虑，所有的透镜材料采用 K9。整个折反射光学系统的遮拦比为 0.51。

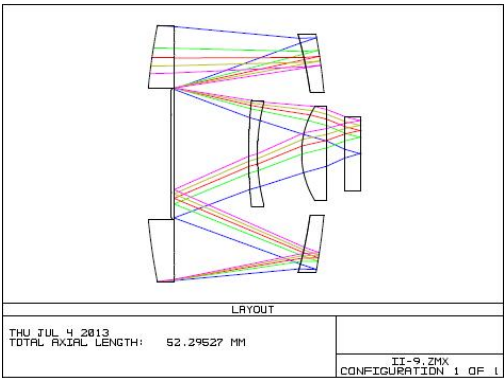


图 5 微光物镜光学系统外形结构图

Fig.5 Layout of low-light-level objective

微光物镜传递函数曲线及点列图如图 6 所示。轴上传递函数在 40 lp 时对比度为 80%，只比极限值低 10%。除全视场子午方向外，所有视场传递函数在 40 lp 时对比度大于 60%。全视场子午方向传递函数在 40 lp 时，其对比度大于 50%。包围约 68% 能量的均方根

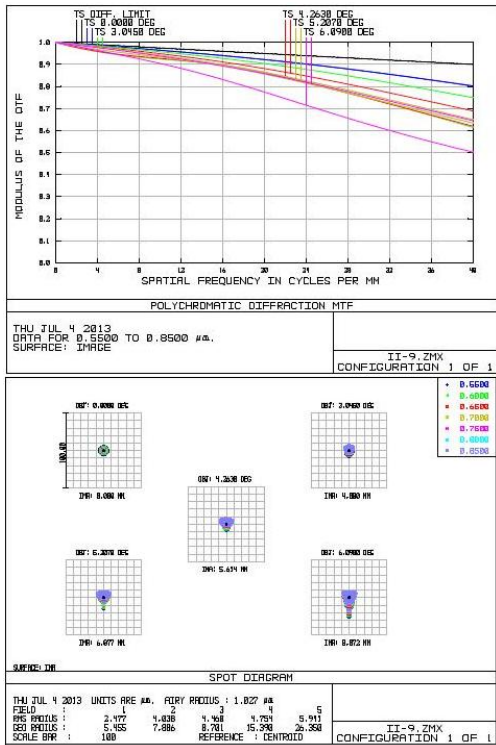


图 6 微光物镜系统传递函数及点列图

Fig.6 MTF and spot diagram of Low-Light-Level objective

半径，在 0ω 、 0.5ω 、 0.707ω 、 0.85ω 以及 1ω 时分别为 $2.477\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.038\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.460\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.754\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5.941\text{ }\mu\text{m}$ 。均方根半径除 1ω 因受慧差影响，有点偏大，其余视场均比较小。由图 6 所示，微光物镜光学系统像差校正比较理想，成像质量比较好，能够满足图像融合系统的需要。

3.3 红外物镜光学设计

红外物镜采用设计光阑远离红外透镜组的两片式结构型式，如图 7 所示。两个透镜材料都选择锗。为了增加光学系统校正时的变量，提高光学系统所成图像的质量，在两个透镜前表面分别加入了非球面。红外物镜采取设计光阑远离透镜组的设计型式，能够缩小距离透镜组一定间距处的光束孔径。微光折反射物镜前校正组光束孔径为 $\phi 62.4\text{ mm}$ ，中心遮拦区域为 $\phi 32\text{ mm}$ 。为使微光物镜与红外物镜不干涉，以微光物镜光轴为基准，红外透镜组距离微光光轴间隔取为 34 mm，且控制距离红外透镜组 34 mm 处光束孔径不大于 $\phi 32\text{ mm}$ 。此红外物镜设计光阑与透镜组间隔为 23 mm。

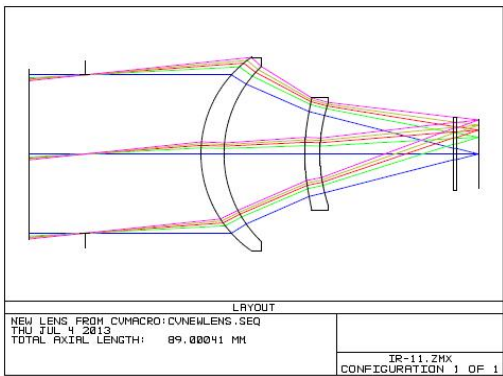


图 7 红外物镜光学系统外形结构图

Fig.7 Layout of infrared objective

红外物镜传递函数曲线及点列图如图 8 所示。通过图 8 可得，红外物镜各个视场的传递函数都比较好，贴近系统的衍射极限；各个视场包围约 68% 能量的均方根半径值比一个艾利斑半径值要小得多，即红外物镜所成像点绝大部分能量分布在艾利斑之内。通过红外物镜的传递函数曲线以及点列图可得，红外物镜系统像差校正比较理想，能够得到比较清晰的红外图像。

3.4 目镜光学设计

目镜采取单-单-双的光学结构型式，如图 9 所示。目镜各个面均为球面，所选材料分别为 LaK4、LaK7、LaK3、ZF7。其中第 1 透镜弯向设计光阑，是为了增大目镜后节距的间隔；第 4 透镜提供负的光焦度，是

为了增大目镜的出瞳距离。

余视场均小于 10 μm 。因此可得，此目镜的像差得到

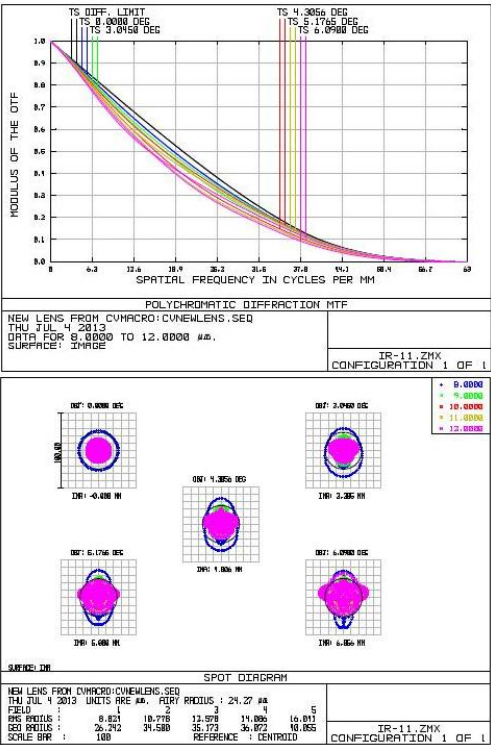


图 8 红外物镜系统传递函数及点列图

Fig.8 MTF and spot diagram of infrared objective

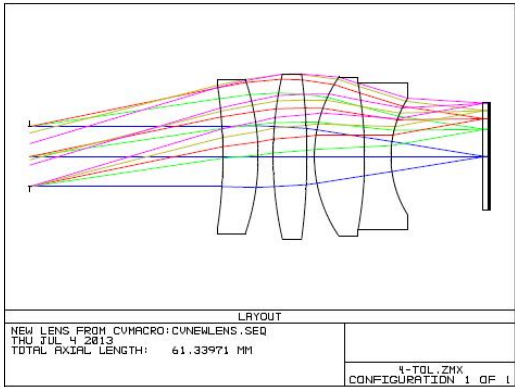


图 9 目镜光学系统外形结构图

Fig.9 Layout of eyepiece optical system

图 10 为目镜出瞳直径为 $\phi 8\text{mm}$ 时的传递函数曲线以及点列图。出瞳直径为 $\phi 8\text{mm}$ 时，各个视场的传递函数在 33lp 处，其对比度集中在 30%~50%之间，且点列图相对较好。目镜出瞳直径设定为 $\phi 8\text{mm}$ ，是考虑到调节双眼瞳距的需要，目镜出瞳直径实际是以小于 $\phi 5\text{mm}$ 使用的。图 11 为目镜出瞳直径为 $\phi 5\text{mm}$ 时的传递函数曲线以及点列图。出瞳直径为 $\phi 5\text{mm}$ 时，除全视场弧矢方向外，其余各个视场各个方向的传递函数在 33lp 时对比度在 50%以上，全视场弧矢方向对比大于 30%。各个视场包围约 68%能量的均方根半径值，除全视场有点大外（全视场为 12.3 μm ），其

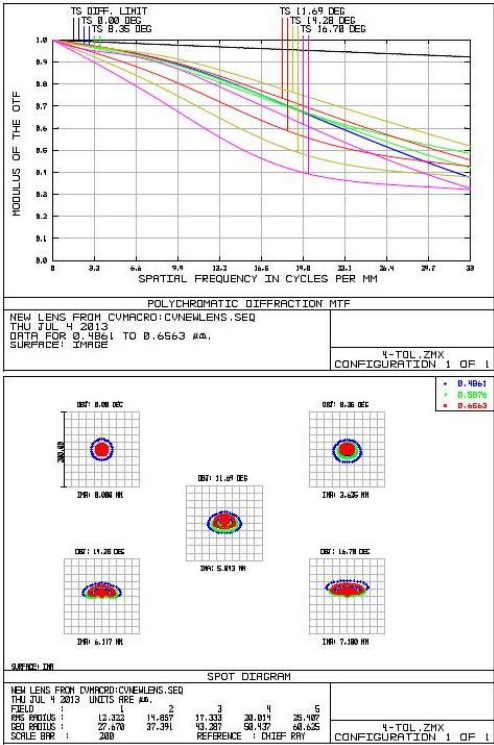


图 10 出瞳直径为 $\phi 8\text{mm}$ 的目镜系统传递函数及点列图

Fig.10 MTF and spot diagram of eyepiece optical system for exit pupil diameter $\phi 8\text{mm}$

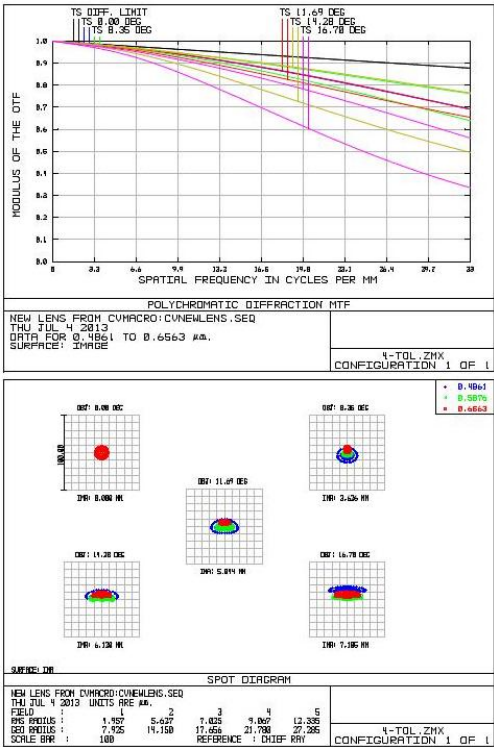


图 11 出瞳直径为 $\phi 5\text{mm}$ 的目镜系统传递函数及点列图

Fig.11 MTF and spot diagram of eyepiece optical system for exit pupil diameter $\phi 5\text{mm}$

较好的校正，能够提供较好的图像。

3.5 畸变的匹配

对于共窗口布局的融合系统，要实现微光图像与红外图像的光学配准，需要满足 2 个条件：倍率一致和畸变一致。微光系统与红外系统的倍率一致，才能保证同一目标所成的微光理想像与红外理想像大小一致；微光物镜与红外物镜的畸变一致，才能保证同一目标所成的微光实际像与红外实际像大小一致，否则就会因微光像与红外像之间间距而产生“重影”现象，增加后续图像配准的难度。图 12 为微光物镜与红外物镜的场曲/畸变曲线。由图 12 可得微光物镜与红外物镜的畸变曲线走势相同，并且各单色光畸变值非常接近，减小了因倍率色差而产生“重影”现象的严重程度。表 2 为微光物镜与红外物镜的中心波长在几个视场点的畸变值。由表 2 可知，微光物镜与红外物镜畸变最大差值量小于 0.15%，为一极小的量。因此此微光物镜与红外物镜的畸变匹配效果非常好，能够避免因畸变所产生的“重影”现象。

4 图像系统成像效果分析

此图像融合系统在小菜园园区、夜间进行演示实验，实验截图如图 13 所示。微光图像能够得到场景比较清晰的细节，红外图像能够得到比较清晰的目标，融合后的图像能够综合二者优点，得到场景清晰、目标明确的微光与红外图像融合图像。证明此微光与

表 2 红外物镜与微光物镜的畸变

Table 2 Distortion of infrared objective and low-light-level objective

视场/ ω	红外/%	微光/%
0	0	0
0.5	0.1393	0.1675
0.707	0.3145	0.3687
0.85	0.4998	0.5817
1	0.7673	0.9006



(a) 微光图像

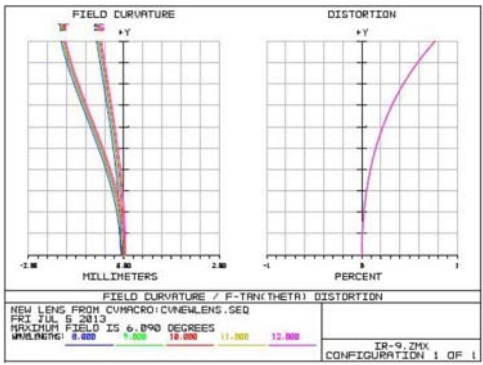


(b) 红外图像

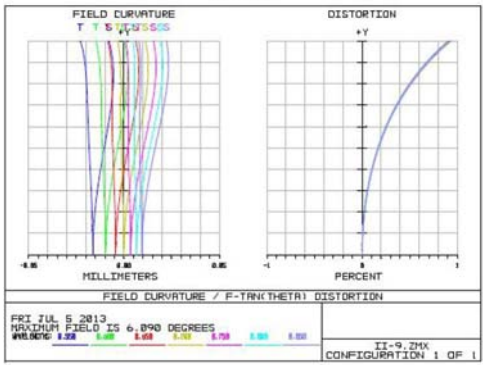


(c) 融合图像

图 13 图像融合实验结果



(a) 红外



(b) 微光

图 12 红外物镜与微光物镜的场曲及畸变

Fig.12 Curvature and distortion of infrared objective and low-light-level objective

红外图像融合手持观察镜成像质量高，效果好。

5 结论

本文所论述的微光与红外图像融合手持观察镜，依据共用窗口布局工作的原理，采取微光折反射系统与红外透射式系统相组合的图像融合光学型式，实现了微光与红外的图像融合。此微光与红外图像融合手持观察镜经过实验验证，得到场景清晰、目标明确的微光与红外图像融合图像。

Fig.13 The experiment results of image fusion

(下转第 736 页)

定量测试的近红外光谱预测模型,该法与国标法测得结果相比,预测误差 $<0.5\%$ 。说明利用短波近红外光进行玉米品质检测可行。光路简单,设备成本低,除了样品池外无其他可调部件,提高了系统的可靠性和稳定性。适于批量生产和推广,具有良好的经济效益。

参考文献:

- [1] 王加华,王一方,屈凌波.粮食品质近红外光谱无损检测研究进展[J].河南工业大学学报:自然科学版,2011,32(6):80-87.
- [2] 范如芹,杨学明,张晓平,等.东北黑土不同组分有机碳的近红外光谱测定[J].光谱学与光谱分析,2012,32(2):349-353.
- [3] 李仰军,王高.多特征波长窗法检测痕量甲醛气体的研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(12):3332-3335.
- [4] 林敏,吕进.基于神经网络与近红外光谱的玉米成分检测方法[J].红外技术,2004,26(3):78-81.
- [5] Ciurczak E W. Use of ileal infrared spectroscopy in ceretd products[J]. *Food Testing and Analysis*, 1995(5): 35-39.
- [6] MATERTENSK, REYNS P, et al. On-line measurement of grain quality with NIR technology[J]. *Transaetions of the American Soeity of Agriecultural Engineers*, 2004, 47(4): 1135-1140.
- [7] Flintham J E, Gale M D. The Tom Thumb dwarfing gene Rht3 in wheat[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 1983, 66: 249-256.

- [8] 郭文锦,王红武,陈绍江,等.基于近红外光谱的商品玉米品种快速鉴别方法[J].光谱学与光谱分析,30(5):1248-1251.
- [9] 韩东海,王加华.水果内部品质近红外光谱无损检测研究进展[J].中国激光,35(8):1123-1131.
- [10] 占细雄,林君.乙醇汽油近红外分析仪信号提取技术[J].吉林大学学报:工学版,2006,36(4):585-589.
- [11] 高荣强,范世福.现代近红外光谱分析技术的原理及应用[J].分析仪器,2002(3):9-12.
- [12] 郭浩,杨晓峰.2011年中国玉米市场回顾及2012年展望[J].中国畜牧杂志,2012,48(4):8-12.
- [13] 王多加,周向阳,金同铭.近红外光谱检测技术在农业和食品分析上的应用[J].光谱学与光谱分析,2004,24(4):447-450.
- [14] 褚小立.化学计量学方法与分子光谱分析技术[M].北京:化学工业出版社,2011.
- [15] 严衍禄,赵龙莲,韩东海,等.近红外光谱分析基础与应用[M].北京:中国轻工业出版社,2005.
- [16] 刘国良,张涛,曹彦波,等.便携式短波近红外漫透射玉米成分快速分析仪的研制和应用[J].现代科学仪器,2006,16(6):37-39.
- [17] 唐忠厚,李洪民,马代夫.甘薯蛋白质含量近红外反射光谱分析模型应用研究[J].中国食品学报,2008,8(4):169-173.
- [18] 于义良.概率统计学[M].北京:中国人民大学出版社,2004:131-140.

(上接第717页)

参考文献:

- [1] 王利平,王利平,孙韶远,陈钱,等.微光图像特征分析及图像融合技术研究[J].红外与毫米波学报,2000,19(4):289-292.
- [2] 刘德坤,龚俊斌,马佳义,等.一种车载的红外与微光图像融合系统设计[J].红外与激光工程(增刊),2010,39:303-307.
- [3] 骆媛,王岭雪,金伟其,等.微光(可见光)/红外彩色夜视技术处理算法及系统进展[J].红外技术,2010,32(6):337-344.
- [4] 徐铭蔚,李郁峰,陈念年,等.多尺度融合与非线性颜色传递的微光

与红外图像染色[J].红外技术,2012,34(12):722-728.

- [5] 刘坤,郭雷,陈敬松.基于区域分割的序列红外图像融合算法[J].红外与激光工程,2009,38(3):553-557.
- [6] 柏连发,张毅.微光图像和紫外图像分析与融合方法研究[J].红外与激光工程,2007,36(1):113-117.
- [7] 金伟其,王岭雪,赵源萌.彩色夜视成像处理算法的新进展[J].红外与激光工程,2008,37(1):147-150.
- [8] 张俊举,常本康,张宝辉,等.远距离红外与微光/可见光融合成像系统[J].红外与激光工程,2012,41(1):20-24.