

信号与信息处理

基于标定配准的红外微光图像融合研究

张海斌,汪晓洁

(中国电子科技集团公司光电研究院,天津 300308)

摘要 红外和微光图像各具特点,红外图像显示热目标,受照明条件与恶劣天气的影响较小,但红外图像对比度较低,目标细节的反映能力较差,成像效果不符合人眼视觉习惯。微光图像具有图像清晰、层次丰富、符合人眼的视觉习惯等特点,但受照明条件和天气影响较大。将微光图像与红外图像融合,二者优势互补,有利于提高光电系统的探测侦察能力。红外和微光图像融合过程分为图像配准和图像融合两个步骤,文中图像配准采用基于标定图像的配准方法,图像配准精确,图像融合采用主成分分析法,融合后的图像细节显示更为丰富。

关键词 红外;微光;配准;融合

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-03-0036-06

Research on Infrared and Low-light-level Image Fusion Based on Calibration Registration

ZHANG Hai-bin, WANG Xiao-jie

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: Infrared and low-light-level (LLL) images have respective features. Hot targets can be displayed on infrared images. Infrared images are less influenced by actual lighting conditions and bad weathers but have a low contrast. In addition, infrared images are weak in reflecting the details of the targets. The imaging effect of infrared images does not comply with the visual habit of human eyes. LLL images have the features of high definition, rich image slice and compliance with the visual habit of human eyes. However LLL images are greatly disturbed by lighting conditions and weathers. By integrating with respective advantages, the fusion of LLL and infrared images helps to promote the detection and reconnaissance capacities of electro-optical systems. Such fusion is divided into image registration and fusion. The image registration based on calibrated image is adopted to ensure an accurate image registration. The main component analysis method is used for image fusion. After fusion, the details of the images can be displayed more completely and vividly.

Key words: infrared; low-light-level (LLL); registration; fusion

红外图像显示热目标,受照明条件与恶劣天气的影响较小,但同时红外图像对比度较低,目标细节的反映能力较差,成像效果不符合人眼视觉习惯。微光图像利用景物反射的月光、星光、大气辉光等微弱自然光实现对物体的成像。与红外图像相比,微光图像具有图像清晰、层次丰富、符合人眼

的视觉习惯等特点,但微光图像易受天气影响,在烟雾等天气情况下会丢失许多场景信息,尤其是对于目标与背景色度差异较小的情况下,容易丢失目标。将微光图像与红外图像融合,二者优势互补,使得融合图像同时具有微光和红外的优点,有利于提高光电系统的探测侦察能力。

红外微光图像融合过程分为图像配准和图像融合两个步骤,在进行图像融合前,必须对红外和微光图像进行空间配准,完成图像配准后,再进行图像融合。

1 红外微光图像空间配准

由于红外和微光传感器的安装角度偏差以及不同光学镜头设计参数存在差异,对同一场景而言,红外和微光图像的差异表现在:成像位置不同、分辨率不同、灰度响应值不同、径向形变不同等方面。因此对红外和微光图像进行像素级融合处理前需要对图像进行精确配准,保证同一目标成像位置相同,使图像配准精度达到像素级。

红外和微光图像配准是指通过相似性度量标准来计算图像间相对安装参数和映射参数,将从不同传感器获取的同一时刻同一场景的两幅图像,转换到同一坐标系同一指定位置上。待配准图像相对于基准图像的配准可定义为两幅图像在空间和灰度上的映射。 $I_1(x, y)$ 和 $I_2(x, y)$ 分别表示两幅图像在任一位置 (x, y) 的灰度值,则两幅图像间的映射可表示为

$$I_2(x, y) = g(I_1(f(x, y))) \quad (1)$$

式中, f 为二维空间坐标变换,如映射变换; g 为灰度变换。

在不同波段的图像配准中,通常选取一个波段图像作为基准图像,另一波段图像参考基准图像进行配准,将不同响应范围的图像映射到同一灰度范围内。常用的图像配准方法有基于图像灰度的配准方法、基于图像特征的配准方法,文中采用基于标定的图像配准方法。

2 基于图像灰度的配准方法

基于图像灰度的配准方法^[1-2]首先要定义一种相似性度量标准,通过遍历整幅图像,搜索当前图像与基准图像相似性最大位置对应的参数值,获取当前图像与基准图像的相对安装角度。该方法配准精度取决于两幅图像场景灰度的相关性,然而,由于不同波段传感器针对同一场景输出的图像灰度差异较大,严重影响灰度配准精度。常用的相似

性度量有以下几种

(1)两幅图像灰度的平方差之和为

$$MSD = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I_2(x+u, y+v) - I_1(x, y))^2 \quad (2)$$

式中, $I_2(x, y)$ 为当前待匹配图像; $I_1(x, y)$ 为基准图像; M 和 N 分别为图像的高和宽。

(2)相关性

采用直方图作为图像描述算子,图像 I_1 和 I_2 的直方图分别表示为 $\text{Hist}_{I_1}^u$ 和 $\text{Hist}_{I_2}^u$,则两幅图像的相关系数定义如下式所示

$$\rho(I_1, I_2) = \frac{\sum_{u=1}^{256} (\text{Hist}_{I_1}^u - \text{Hist}_{I_2}^u)^2}{\sqrt{\sum_{u=1}^{256} (\text{Hist}_{I_1}^u - \text{Hist}_{I_2}^u)^2}} \quad (3)$$

式中, I_1 和 I_2 分别表示基准图像和当前待匹配图像; $\text{Hist}_{I_1}^u$ 和 $\text{Hist}_{I_2}^u$ 分别表示图像 I_1 和 I_2 的归一化统计直方图;上标 u 表示直方图的第 u 个元素;图像 I_1 和 I_2 直方图 $\text{Hist}_{I_1}^u$ 和 $\text{Hist}_{I_2}^u$ 对应的欧氏距离越小,两幅图像的相似度越大。

(3)峰值信噪比

峰值信噪比常用来评价当前图像与基准图像之间的差异,峰值信噪比数值越大,表示两幅图像相似性越大,反之,两幅图像之间相似性越小。其计算公式如下式所示

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{(2^n - 1)^2}{MSE} \right) \quad (4)$$

式中, n 为像素灰度比特数,一般情况下,显示图像为8位;MSE表示当前图像 I_2 与基准图像 I_1 的均方误差,其定义如下式所示

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I_2(x, y) - I_1(x, y))^2 \quad (5)$$

式中, M 和 N 分别表示图像的高和宽。

(4)位相相关

图像位相相关法通过在当前图像 I_1 中找出与基准图像 I_2 相匹配的子块来实现图像匹配,两子块相关系数定义如下式所示

$$\rho(x, y) = \frac{\text{cov}(S_{x,y}, S'_{x,y})}{\sqrt{D_{x,y} D'_{x,y}}} \quad (6)$$

式中, $S_{x,y}$ 和 $S'_{x,y}$ 分别表示 I_2 和 I_1 中图像左上角开始的图像子块; $D_{x,y}$ 和 $D'_{x,y}$ 分别表示 $S_{x,y}$ 和 $S'_{x,y}$ 的方差; cov 表示 $S_{x,y}$ 和 $S'_{x,y}$ 的协方差。方差和协方差定义如

下式所示

$$D_{x,y} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (S_{x,y} - \overline{S_{x,y}})^2$$

$$D'_{x,y} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (S'_{x,y} - \overline{S'_{x,y}})^2$$

$$cov(S_{x,y}, S'_{x,y}) = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (S_{x,y} - \overline{S_{x,y}})(S'_{x,y} - \overline{S'_{x,y}})$$
(7)
(8)

基于图像灰度的配准方法利用全部图像灰度信息来进行图像配准,图像配准精度高,但由于参与计算图像像素数较多,相关性计算量大,算法运行耗时长,效率低。

3 基于图像特征的配准方法

基于图像特征的配准方法^[3-4]由于其高效、精准和适用性强等特性得到了广泛的应用,是目前应用最多的图像配准方法。在多波段图像融合中,由于不同波段传感器对同一场景输出图像的灰度差异很大,应用基于图像灰度的配准方法得到的配准图像匹配精度较低,因此,利用图像特征进行图像配准更具适用性。常用的图像不变特征包括图像边缘、纹理、不变矩等图像特征。由于基于图像特征的配准方法仅仅应用了图像的显著特征,应用的图像信息更加合理,算法运算效率高。基于图像特征的配准方法流程如图1所示。

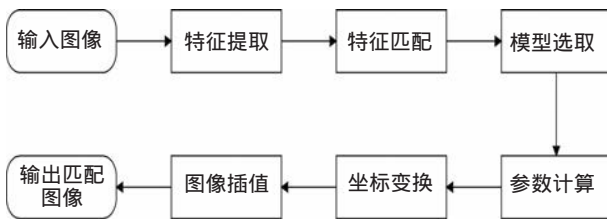


图1 图像特征匹配流程图

基于图像特征的配准方法通过对输入图像进行特征提取、特征匹配、模型选取、参数计算、坐标变换和图像插值等步骤,得到输入图像与基准图像相对安装角度。经过空间坐标变换,将输入图像投影到基准图像所在平面,再经过灰度插值处理,使得同一目标在两幅图像中位置相同。

4 基于标定图像的配准方法

4.1 空间图像配准

采用标定法对图像进行空间配准,以红外传感器为基准,标定微光传感器。首先,计算红外传感器和微光传感器在理想小孔成像模型下的无畸变图像,根据模拟源在红外和微光传感器中成像位置,计算得到微光传感器相对于红外传感器的相对安装角度,获取同一场景下配准后图像。

计算微光传感器相对安装角度,首先要进行相关坐标系定义,算法中涉及传感器坐标系和物方空间坐标系定义,传感器坐标系 $o-xyz$ 的原点 o 位于传感器的投影中心, ox 轴为光轴,垂直于镜头向外, oy

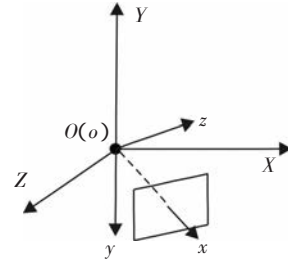


图2 传感器坐标系和物方空间坐标系示意图

平行于成像平面,指向成像平面的下方, oz 平行于成像平面,指向成像平面的右方。物方空间坐标系 $O-XYZ$ 的原点 O 位于传感器投影中心上, OX 轴向右, OY 轴竖直向上, OZ 轴垂直于 OXY 面且满足右手定律,见图2。

设红外传感器安装角度为 $(0,0,0)$,微光传感器安装角度为 (γ_a, ρ_a, r_a) ,其中 γ_a 、 ρ_a 和 r_a 分别为微光传感器安装方位角、俯仰角和横滚角。

已知传感器安装角、视场大小和图像分辨率,可以计算得到理想小孔成像模型下成像点坐标 (x,y) 在物方空间坐标系中坐标 (x',y',z') ,有下式

$$x' = x - \frac{l}{2}; y' = y - \frac{l}{2}; z' = \frac{l}{\tan \theta}$$
(9)

式中, (x',y',z') 表示在初始位置下图像中 (x,y) 点在物方空间坐标系下的坐标; l 为半视场对应图像大小, θ 为水平方向半视场大小。经过坐标转换,可以计算得到任一指定视线角下成像面上的像点 (x,y) 在物方空间坐标系下的坐标 (x'',y'',z'') 。

$$A = \begin{bmatrix} \cos(y_a)\cos(p_a) - \sin(p_a)\cos(r_a) + \sin(y_a)\cos(p_a)\sin(r_a) & \sin(p_a)\sin(r_a) + \sin(y_a)\cos(p_a)\cos(r_a) \\ \cos(y_a)\sin(p_a) & \cos(p_a)\cos(r_a) + \sin(y_a)\sin(p_a)\sin(r_a) & -\cos(p_a)\sin(r_a) + \sin(y_a)\sin(p_a)\cos(r_a) \\ -\sin(y_a) & \cos(y_a)\sin(r_a) & \cos(y_a)\cos(r_a) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad \text{则 } [x'', y'', z'']^T = A \cdot B$$

式中,矩阵 A 为坐标转换矩阵。

根据目标所在射线上一点在物方空间坐标系下的坐标,可以计算得到目标在物方空间坐标系下的方位角和俯仰角如图3所示。

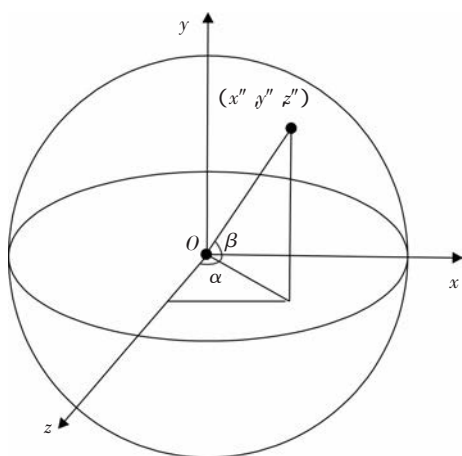


图3 方位角俯仰角示意图

其计算公式如下式所示

$$\alpha = \arctan(\text{fabs}(x''/z''))$$

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{if } x'' = 0 \text{ and } z'' = 0 \\ \alpha = \alpha & \text{if } x'' \geq 0 \text{ and } z'' > 0 \\ \alpha = 180^\circ - \alpha & \text{if } x'' \geq 0 \text{ and } z'' < 0 \\ \alpha = -\alpha & \text{if } x'' \leq 0 \text{ and } z'' > 0 \\ \alpha = \alpha - 180^\circ & \text{if } x'' \leq 0 \text{ and } z'' < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\beta = \arctan\left(y'' / \sqrt{x''^2 + z''^2}\right) \quad (12)$$

式中, α 为方位角; β 为俯仰角。

通过以上计算,得到了一组与目标点坐标 (x_{ki}, y_{ki}) 和 (x_{hi}, y_{hi}) 相对应的目标方向指示值 $(\alpha_{ki}, \beta_{ki})$ 和 $(\alpha_{hi}, \beta_{hi})$ 。当微光传感器理论安装角与实际安装角一致时,目标在微光图像中方向指示值与在红外图像中方向指示值满足下式所示条件。

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_{ki} - \alpha_{hi})^2 + (\beta_{ki} - \beta_{hi})^2} < \varepsilon \quad (13)$$

式中, ε 为一个极小值。

一般情况下,微光传感器相对红外传感器的安装角应在 5° 以内,采用穷尽法计算微光传感器相对

安装角,将目标函数 T_{\min} 最小时对应的安装角 y_{\min} 、 p_{\min} 和 r_{\min} 作为微光传感器相对红外传感器的安装角。

$$T_{\min} = \min_{y=-5, p=-5, r=-5}^{y=5, p=5, r=5} (T_{y,p,r}) \quad (14)$$

$$T_{y,p,r} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_{ki} - \alpha_{hi})^2 + (\beta_{ki} - \beta_{hi})^2}$$

成像面上像点在物方空间中坐标与坐标系原点连线所在射线方程,一定会与红外和微光传感器输出图像存在交点,因此,可以反推出成像面上像点 p 与投影中心连线所在射线方程,点 p 在下式所描述的射线上。

$$(tx, ty, tz)^T \cdot l \quad (l > 0) \quad (15)$$

根据成像面上像点坐标 $p(x, y)$ 、传感器实际安装角度 (y, p, r) 和传感器内部参数,计算可得到成像面上像点与红外和微光传感器输出图像的映射关系,其计算公式如下式所示

$$\begin{cases} \text{row} = ty \times d/tx + \frac{w}{2} \\ \text{col} = tz \times d/tx + \frac{w}{2} \end{cases} \quad (16)$$

式中, w 为传感器输出图像半视场所占像素数; d 为传感器的放大系数; row 为行坐标; col 为列坐标。

根据式(9)~式(16),得到微光相对红外传感器的校准图像,使得不同传感器输出图像中同一场景在成像面上投影位置相同。

4.2 图像亮度配准

图像亮度配准采用归一化方法,由于红外传感器输出14位灰度范围图像,微光传感器输出11位灰度范围图像,为了避免归一化过程中由于数据压缩带来的数据损失,以红外传感器输出图像为基准,将微光传感器输出图像灰度范围线性映射为14位图像。

$$f'(x, y) = f(x, y) \cdot C_A / C_B \quad (17)$$

式中, $f(x, y)$ 为微光传感器输出图像在 (x, y) 点的灰度值; C_A 和 C_B 分别为红外传感器和微光传感器输出灰度范围最大值。

5 图像融合方法

一般情况下,图像融合分为像素级、特征级和决策级图像融合。像素级图像融合是图像融合的基础,是图像融合领域中研究重点。像素级图像融合方法包括主成分分析法^[5]、小波变换法^[6]和塔形分解法^[7]等。其中,由于主成分分析法算法实现简单,便于在硬件环境中实现,算法运行效率高等优势,得到了广泛的应用。

5.1 主成分分析方法

红外和微光图像融合能够突出融合后图像中的目标,便于使用者对当前环境的理解,有利于发现图像中存在的伪装、迷惑和隐藏目标,为使用者更快、更精确地发现目标,并作出相应的应对方案提供依据。

考虑到系统的设计和实现,在保证输出图像实时性的同时得到质量较好的融合图像,采用主成分分析法对红外和微光图像进行融合。通过主成分分析,选择最优化的权值。

对红外和微光红外传感器输出的红外图像 A 和微光图像 B ,融合图像中任意一点 (x,y) 的灰度值由主成分分析法计算得到的红外分量和微光分量所占比重决定,设 w_A 和 w_B 为 (x,y) 点的权重系数,则融合后图像在点 (x,y) 的灰度值由下式计算得到

$$F(x,y) = w_A f_A(x,y) + w_B f_B(x,y) \quad (18)$$

式中, $F(x,y)$ 表示融合图像 (x,y) 点的灰度值。计算任意一点的权重系数,首先计算红外和微光图像的灰度均值 m_A 和 m_B ,其计算公式如下式所示

$$m_A = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{x=1, y=1}^{x=m, y=n} f_A(x,y) \quad (19)$$

$$m_B = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{x=1, y=1}^{x=m, y=n} f_B(x,y)$$

再根据红外图像和微光图像的灰度均值,分别求出红外和微光图像的标准差和两图像的协方差,其计算公式如下式所示

$$V_A = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{x=1, y=1}^{x=m, y=n} (f_A(x,y) - m_A)^2$$

$$V_B = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{x=1, y=1}^{x=m, y=n} (f_B(x,y) - m_B)^2$$

$$C_{AB} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{x=1, y=1}^{x=m, y=n} (f_A(x,y) - m_A) \cdot (f_B(x,y) - m_B) \quad (20)$$

式中, V_A 和 V_B 分别为红外图像和微光图像的方差; C_{AB} 表示两图像的协方差。

红外和微光图像的协方差矩阵反映了图像灰度的分布情况,有下式

$$C = \begin{bmatrix} V_A & C_{AB} \\ C_{AB} & V_B \end{bmatrix} \quad (21)$$

通过计算协方差矩阵特征值来得到红外和微光图像所占权重。令 $\det(C - \lambda_i) = 0$,则有

$$\begin{vmatrix} V_A - \lambda_1 & C_{AB} \\ C_{AB} & V_B - \lambda_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (22)$$

式中, λ_1 和 λ_2 分别为协方差矩阵的两个特征值,当 $\det(C - \lambda_i) = 0$ 时,选取特征值最大时,特征向量对应的元素值作为红外和微光的权重系数 w_A 和 w_B 。

5.2 实验结果与分析

红外微光融合后的图像如图4所示。

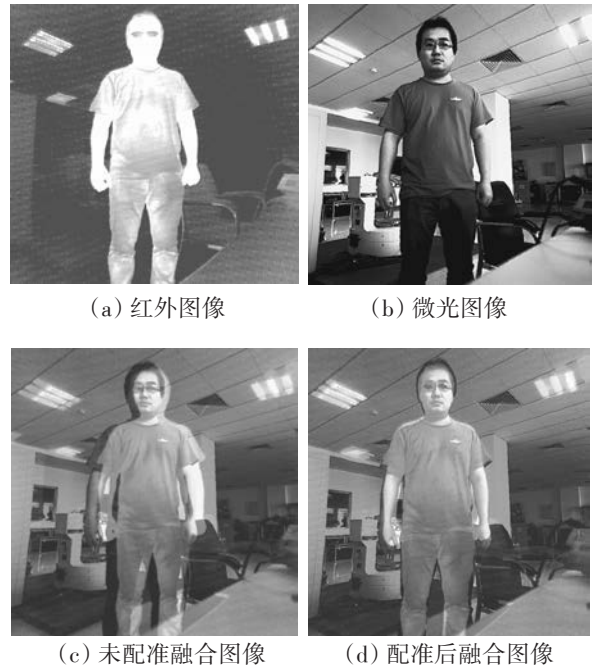


图4 内场红外微光融合图像

融合后图像相对于单一图像来说具有很多优点:例如图像细节更加丰富,改善了几何纠正精度,增加了单一图像不清晰区域的特征,某一图像中丢失的信息可用另一传感器图像数据来替换,从而获得目标清晰的观测图像。融合后图像增加了目标特征信息,有利于精确、快速地对目标进行探测、识别和跟踪。

6 结 论

通过标定方法实现了红外和微光图像的配准,实现了在不同安装角度下,红外图像和微光图像的配准。采用主成分分析方法对标定后的图像进行融合,融合后的图像能够充分体现红外和微光图像各自的优点,不仅能够很好的实现场景中的热目标,还增加了图像显示的细节,使图像显示层次更加丰富,更有利于人眼观察。通过图像融合,将二者优势互补,提高了光电系统的探测、识别和跟踪能力。

参考文献

- [1] 温江涛,王伯雄,秦焱. 基于局部灰度梯度特征的图像快速配准方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009 (5):673-675.
- [2] 高爽,肖扬. 两种基于灰度相似性测度的超声波图像配准方法的比较[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(3):337-341.
- [3] 侯鹏洋,季艳,高峰,等. 一种基于SIFT特征的快速逐层遥感图像配准方法[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(5): 873-877.
- [4] 彭文,童若锋,钱归平,等. 使用特征点与灰度值的医学图像局部配准方法[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(5):944-950.
- [5] YANG Shu-yuan, WANG Min, JIAO Li-cheng. Fusion of multi-spectral and panchromatic images based on support value transform and adaptive principal component analysis [J]. Information Fusion, 2012, 13:177-184.
- [6] XU Xiao-jun, WANG You-ren, CHEN Shuai. Medical image fusion using discrete fractional wavelet transform[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2016, 27:103-111.
- [7] JIN Hai-yan, XING Bei, WANF Lei, et al. Fusion of remote sensing images based on pyramid decomposition with Baldwinian clonal selection optimization[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 73:204-211.
- [8] 杨秋实,何炳阳. 基于拉普拉斯金字塔的夜视图像融合[J]. 光电技术应用, 2016, 31(1): 41-45.
- [9] 冯清枝. 基于小波融合的视频图像增强方法[J]. 光电技术应用, 2016, 31(2): 47-51.
- [10] 杨海梅,赵龙,王庆娥,等. 基于二维连续小波变换的干涉条纹图相位的提取[J]. 光电技术应用, 2016, 31(4): 42-46.

《光电技术应用》期刊简介

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。以光电技术为主要专业特色,传播光电技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

期刊所设栏目主要有综述、光电系统、光学设计、红外技术、激光技术、光电探测、光电器件与材料、信号与信息处理、电路与控制、测试、试验与仿真等。

期刊拥有优秀的编委会成员,审稿专家涉及光电技术的各个领域,具有审稿速度快、质量高,编辑人员具有较高的职业素质,工作认真负责、反馈速度快,期刊版面设计合理、美观大方,印刷质量好,出刊及时。

竭诚欢迎广大读者踊跃投稿。