远距离多波段红外图像融合系统及配准方法

李英杰,张俊举,常本康,钱芸生,刘 磊

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院,江苏 南京 210094)

摘 要:研制了一种短波红外、中波红外和激光测距仪联合工作的图像融合系统。系统实现了全天时可透雾的远距离场景监控、远距离目标测距,并能够检测 1.06 μm 和 1.57 μm 的激光光束。为了保证系统的融合图像质量,提高配准精度,提出了一种光轴平行度校正方法,实现短波红外和中波红外图像的粗配准;提出了一种新的迭代优化方法,通过寻找最优配准参数来获得最佳的融合性能,采用基于人眼感兴趣区域的清晰度指标作为评价函数来完善配准过程, 采用粒子群优化算法解决联合优化问题,实现短波红外和中波红外图像的精配准。实验结果表明该系统在远距离场景监控和战场态势感知等方面具有较大的应用潜力。

关键词:图像配准; 融合系统; 光轴平行度; 激光测距

中图分类号:TP391 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0526002

Remote multiband infrared image fusion system and registration method

Li Yingjie, Zhang Junju, Chang Benkang, Qian Yunsheng, Liu Lei

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A kind of image fusion system which contained short wave infrared detection, medium wave infrared detection and laser ranging device had been developed. The system realized three functions which were remote scene monitoring, remote target ranging and detecting the laser beam at 1.06 and 1.57 μm bands during all day and through the fog. In order to ensure the fusion image quality of system and improve the registration accuracy, an optical axis parallelism correction method to realize the coarse registration between the short wave infrared image and medium wave infrared image has been proposed; a new iteration optimization method which found the optimal register parameters to get the best fusion results has been put forward. This method used definition index of the fusion image interesting region to improve the register process, and used particle swarm optimization algorithm to solve joint optimization problem and to realize the accurate registration. The experimental results demonstrated the potential of the system for applications like remote scene monitoring and battlefield situational awareness.

Key words: image registration; image fusion system; optical axis parallelism; laser ranging

收稿日期:2015-10-24; **修订日期**:2015-11-27

基金项目:国家自然科学基金(61101195);江苏省自然科学基金(BK20130775)

作者简介:李英杰(1987-),男,博士生,主要从事图像处理算法方面的研究工作。Email: lyj53528016@gmail.com

导师简介:常本康(1950-),男,教授,博士生导师,主要从事光电发射、光电探测方面的研究工作。Email: bkchang@njust.edu.cn

0 引 言

随着光电探测系统向着高精度、全天候、多功能等方向发展[1],红外成像技术不断发展和日趋成熟,越来越多的光电系统选择多波段传感器结合激光测距装置来实现可疑目标的探测和跟踪任务,并利用得到的目标信息(位置、速度等)完成火控、水炮系统的导引功能[2-3]。多波段红外图像融合则因其在夜视侦察、观瞄制导等方面的应用潜力成为近年来的研究热点。图像配准精度作为影响融合图像质量的一个重要因素,被越来越多的研究人员关注[4]。目前融合系统常用的配准方法分为前端光学结构校正[5]和后端图像算法配准[6]两种。前者通过校正光电系统中探测器的光轴平行度来实现图像的粗配准,后者通过相应的图像配准算法达到图像的精配准。

文中为了提高中波红外和短波红外图像融合系统的融合图像配准精度,研制了中波红外和短波红外光轴平行度检测装置(下文简称光轴平行度检测装置)来实现融合图像的粗配准,提出了一种多波段红外图像配准算法实现融合图像的精配准。该系统对多个场景进行测试,结果证明该系统输出的图像配准精度高,融合质量好,稳定性佳,可以有效地应用于复杂战场环境下的夜视监控。

1 探测系统组成

由于雾霾以及江面、海面上的水汽对可见光图像的成像质量影响较大,而在短波红外波段有 3 个透雾的大气窗口,系统采用制冷中波红外热像仪、InGaSn 短波红外探测器以及激光测距装置来实现目标信息的探测功能。系统的实物如图 1 所示。图(a)探测云台,图(b)激光测距装置,图(c)InGaAs 短波红外探测器,图(d)制冷中波红外探测器,图(e)惠普图形工作站。制冷中波红外热像仪工作波段为 3.7~4.8 μm,分辨率为 320×256,噪声等效温差(NETD≤35 mK),最小可分辨温差(MRTD)≤200 mK。InGaSn 短波红外探测器工作波段为 0.95~1.7 μm,分辨率为 320×256,暗电流小于 0.01 pA/pix/s。激光测距机采用单脉冲激光器,工作波长为 1.57 μm,针对 2.3 m×2.3 m 的军绿色目标,测距能力可达 10 km。

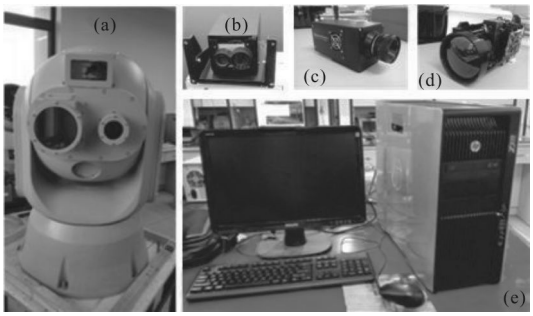


图 1 系统功能和结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of system structure and function

2 光轴平行度检测装置组成和测试原理

文中采用大口径平行光管法来进行光轴平行度的测量,大口径平行光管由离轴抛物面反射镜和平面反射镜组成。装置工作原理如图 2 所示,1. 光源系统;2. 透光度调节器;3. 反射镜 a;4. 十字靶标;5. 五维位移台;6. 反射镜 b;7. 离轴抛物面镜;8. 被测系统;9. 显示器。该方法将十字靶标置于离轴抛物面镜焦面上,照明光源置于靶标后方,靶标材料为发热电阻丝,通电后,靶标处的光线和热辐射经过离轴抛物面镜产生平行光束,进入被测系统,通过在被测系统的显示器上观测十字靶标处中心是否落在各个子系统的视场中心判定各个探测器的光轴是否平行。

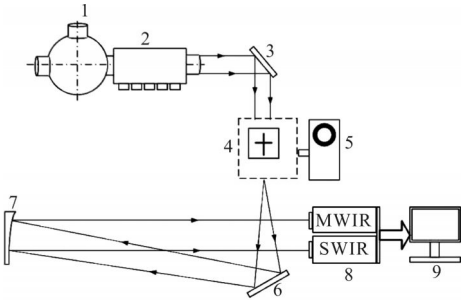


图 2 装置工作原理图

Fig.2 Working principle of the device

图 3 中的反射镜为离轴抛物面反射镜,它是取自抛物面离轴的一部分。实际上,整个抛物面为其母线 $y(x)$绕轴旋转而成。在图中坐标系下,抛物线表达式为:

$$y^2(x)=2px \tag{1}$$

其焦点为 $F(P/2,0)$,准线 $X=-P/2$。

根据公式(1)可知,凡是从焦点 F 处发出的光,经过离轴抛物面镜后变为平行光。利用这一特性,将十字靶标放在焦点 F 处,并将待测系统置于区域 A,此时探测器相当于在观测无穷远处的一个十字靶标。

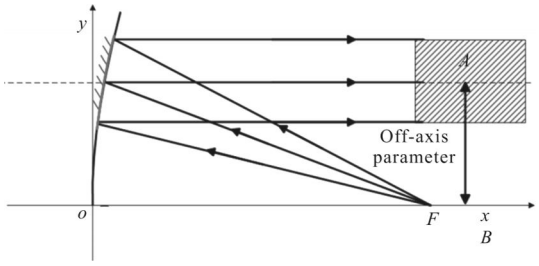


图 3 离轴抛物面镜光路图

Fig.3 Light path diagram of off axis parabolic mirror

在光轴校正的过程中，以中波红外探测器作为基准，使十字靶标所成的像与红外探测器的十字分划线中心重合。再将待配准的短波红外探测器对准十字靶标进行观察，此时通过靶标所成的像与探测器的十字分划线中心偏离量便可得出被测系统短波红外与中波红外光轴的平行度偏移量。平行度的计算方法如公式(2)所示：

$$\begin{cases}\alpha_x=\arctan(\dfrac{\mathrm{d}x}{f})\\ \alpha_y=\arctan(\dfrac{\mathrm{d}y}{f})\end{cases}\tag{2}$$

式中：dx 为横向偏差距离；dy 为径向偏差距离；α_x 为水平方向光轴平行度偏移；α_y 为垂直方向光轴平行度偏移。

因此待测系统的总的光轴平行度偏移 α 为：

$$\alpha=\sqrt{\alpha_x^2+\alpha_y^2}\tag{3}$$

调节短波红外探测器的位置直至 α=0，此时可以认为两者的光轴平行。

3 检测装置误差分析及解决方案

3.1 光轴平行度检测装置自身不确定度引起的误差u

(1)目标靶位置引入的测量误差

由于光轴平行度检测装置的十字靶标位置是通过 5 维位移台进行调节。在确定焦点位置时，需将五棱镜放置在图 3 中的区域 A，区域 B 内安装观测用的 JZC 型自准测微平行光管，沿 Y 轴方向来回移动五棱镜，同时调节靶标位置，当平行光管目镜中靶标的像与平行光管的十字分划线的相对位置不变时，可以认为十字靶标在离轴抛物面镜的焦点处。JZC 型自准测微平行光管的测角范围为 0~10′，测量精度不大于 3″。因此由于靶标在焦点位置的不确定性引起的误差为：

$$u_{11}=3''=0.014\,4\ \mathrm{mrad}\tag{4}$$

(2)离轴抛物面镜加工误差引入的测量误差

离轴抛物面反射镜的 P-V 误差小于 $\lambda/4$。假设其满足均匀分布，取 $K=\sqrt{3}$，λ 为氦氖激光器的波长 632.8 nm，则有：

$$u_{12}=2\times\mathrm{arctg}\left(\frac{0.632\,8\times10^{-3}/4}{3\,000}\right)\times\frac{1}{\sqrt{3}}=6.09\times10^{-5}\ \mathrm{mrad}\tag{5}$$

(3)十字靶装夹垂直度引入的测量误差

目标靶装夹的垂直度对于校准结果的影响很小，可以归纳到 a 中。

(4)空气扰动引起的误差

$$u_{13}=3.4''=0.016\,5\ \mathrm{mrad}\tag{6}$$

因此，光轴校正装置自身的总误差为：

$$u_1=\sqrt{u_{11}^2+u_{12}^2+u_{13}^2}\approx0.021\,9\ \mathrm{mrad}\tag{7}$$

3.2 光轴平行度检测装置校轴精度测试

为了检验光轴平行度检测装置是否达到理论分析的精度指标，使用经纬仪进行了校轴精度测试。

利用精度为 2″的经纬仪瞄准靶标十字分划，垂直于抛物面镜光轴方向移动测微台，从经纬仪上读出十字分划的偏差角量 θ_0，并根据公式(8)计算出轴线的偏差量 θ：

$$\theta=\mathrm{arctg}(D/F)\tag{8}$$

式中：D 为五维位移台的位移量(mm)；F 为离轴抛物面反射镜焦距(mm)，该系统中 F=3 000 mm。经过多次实验测量，将 θ 分别与 θ_0 进行比较，定义系统测角误差 $\delta=|\theta-\theta_0|$。测试结果见表 1。

表 1 校轴精度测试

Tab.1 Optical axis precision calibration test

No.	D/mm	Parameter	θ_0	θ	δ/mrad
1	0	187°52′27″			
2	1.5	187°50′45″	102″	103.5″	−0.007
3	3	187°49′00″	105″	103.5″	0.007
4	4.5	187°47′15″	105″	103.5″	0.007
5	6	187°45′27″	108″	103.5″	0.021
6	7.5	187°43′48″	99″	103.5″	−0.021
7	9	187°42′05″	103″	103.5″	−0.0023
8	10.5	187°40′24″	101″	103.5″	−0.012
9	12	187°38′37″	107″	103.5″	0.016
10	13.5	187°36′56″	101″	103.5″	−0.012
11	15	187°35′10″	106″	103.5″	0.012

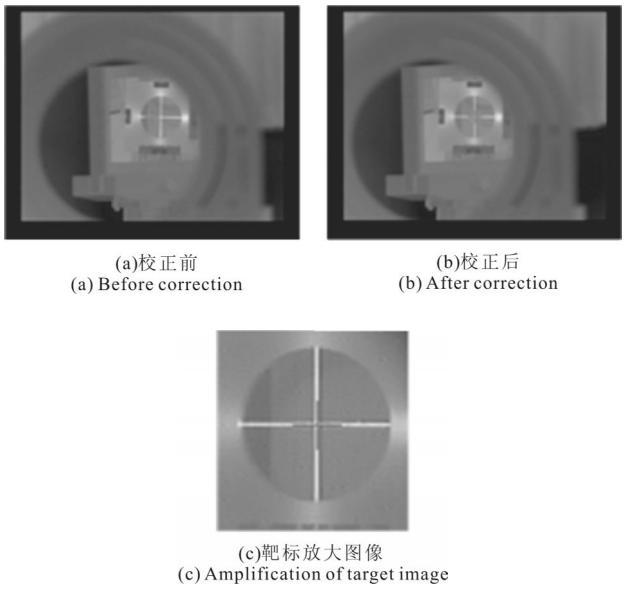
由上述校轴精度测试结果得出：实验中光轴平行度检测装置的最大测角误差为 δ=0.021 mrad，与理论计算值非常接近，均小于 0.05 mrad 的技术要求，证明该光轴测量装置测量精度达到要求。

4 光轴平行度校正

4.1 中波红外探测器自校正

由于系统要求的光轴平行度<0.5 mrad，在进行系统的光轴平行度校正时，以中波红外探测器为基准，此时必须对中波红外探测器进行自校正，自校正过程如图 4 所示(环境照度<0.02 lux，环境温度 23°)。

图 4(a)给出了红外自校正前中波红外探测器图像，可以发现十字分划线与十字靶标偏离，且相互之间存在旋转。图 4(b)给出了经过平移和旋转校正后的十字靶标校正图像，可以发现此时十字分划线与十字靶标完全重合，图 4(c)为靶标的放大图像。



(a)校正前
(a) Before correction

(b)校正后
(b) After correction

(c)靶标放大图像
(c) Amplification of target image

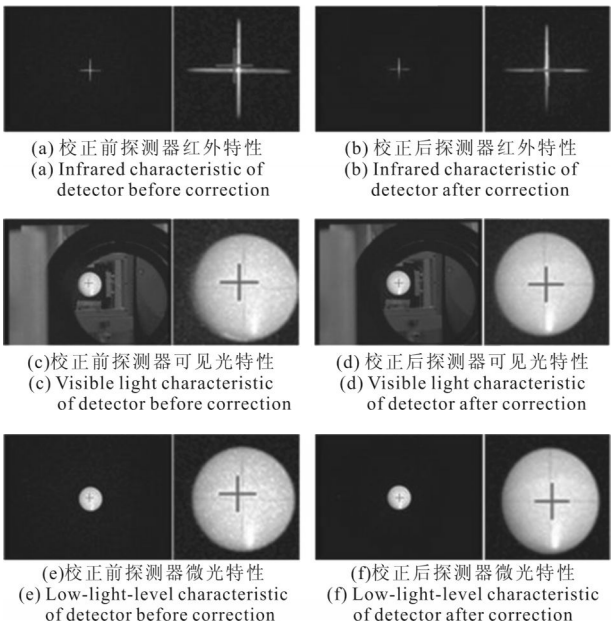
图 4 红外自校正过程

Fig.4 Self-calibration process of infrared detector

4.2 短波红外探测器光轴校正

在对中波红外探测器进行自校正之后，需要对短波红外探测器进行光轴平行度校正。由于短波红外探测器同时具备红外特性、可见光特性和微光特性，分别在三种情况下进行校正，校正过程如图 5 所示。

图 5(a)是光轴校正前短波红外探测器的红外特性图，图 5(b)是校正后的红外特性图，环境照度<0.02 lux，环境温度 20 ℃，图 5(c)和(d)是光轴校正前后的可见光特性图，环境照度为 180 lux，环境温度 20 ℃，图 5(e)和(f)是光轴校正前后的微光特性图，环境照度<0.02 lux，环境温度 20 ℃。



(a) 校正前探测器红外特性
(a) Infrared characteristic of detector before correction

(b) 校正后探测器红外特性
(b) Infrared characteristic of detector after correction

(c)校正前探测器可见光特性
(c) Visible light characteristic of detector before correction

(d) 校正后探测器可见光特性
(d) Visible light characteristic of detector after correction

(e)校正前探测器微光特性
(e) Low-light-level characteristic of detector before correction

(f)校正后探测器微光特性
(f) Low-light-level characteristic of detector after correction

图 5 光轴平行度校正前后对比图

Fig.5 Optical axis parallelism compared image before and after correction

通过图 5 和公式(2)可以计算光轴校正前后两个探测器在水平和垂直方向的平行度偏移量，如图 6 所示，仿真平台为 Matlab2012a。

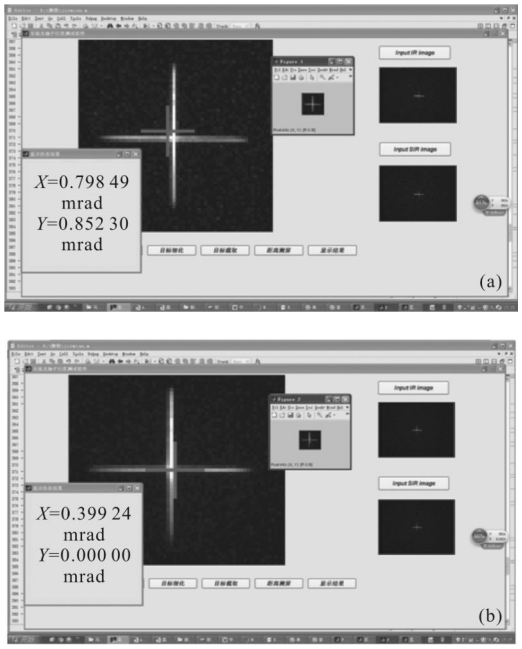


图 6 光轴校正前后系统的平行度偏差

Fig.6 Parallel misalignment of the system before and after correction

图 6(a)是光轴校正前的偏移量计算值,其中 α_x=0.798 mard,α_y=0.852 mard, 总偏移量 α=1.168 mard,远高于 0.5 mrad 的技术指标。图 6(b)是光轴校正后的偏移量计算值, 其中 α_x=0.399 mard,α_x=0 mard,总偏移量 α=0.399 mard,符合指标要求。

4.3 激光测距机光轴校正

激光测距机光轴校正原理与短波红外探测器类似, 当激光测距机光轴与中波红外探测器光轴平行时, 射出的激光光束落点应该在十字靶标分划线中点。调整过程中, 首先将感光纸安装在十字靶标后端;之后调节激光探测器位置,多次发射激光束,通过肉眼观测激光束在感光纸上的光斑落点是否与十字靶标分划线中点重合,以此判断光轴是否平行。由于此前已经将短波红外探测器与中波红外探测器光轴调节至平行, 此时可以认定三种探测装置的光轴达到平行。

5 多波段红外图像配准算法

通过光轴平行度检测装置矫正后的前端光学系统,视场重合度大于 99.1%,可以保证短波红外图像和中波红外图像的粗配准。为了得到更好的配准精度,设计了一种多波段红外图像配准算法,该方法联合考虑配准与融合过程, 利用融合图像的图像质量来描述配准精度问题。假设参考图像和待配准图像被高度配准时,融合图像的图像质量应该最好;一旦出现误匹配,融合图像的图像质量也会降低。因此通过构建一个鲁棒性佳的融合图像评价函数来估计配准精度, 可以将图像配准问题简化为定义融合质量评价函数并求解其全局最优解的问题。算法流程如图 7 所示。对于给定的短波红外和中波红外图像,联合优化的过程可以表述为: 找到最优的仿射变换矩阵以获得融合质量最佳的图像。为了达到这一目的,文中采用粒子群优化算法[7]来实现全局最优值的迭代求解。首先定义初始配准参数,构建初始仿射变换矩阵,对 SWIR 图像进行配准;之后采用基于 Laplace 金字塔的融合算法将配准后的 SWIR 图像与 MWIR 图像进行融合, 构建融合图像质量评价函数来对融合图像进行客观评价;最后,通过迭代不断更新仿射变换矩阵,找到评价函数的全局最优解,这一过程可以称为联合优化过程。

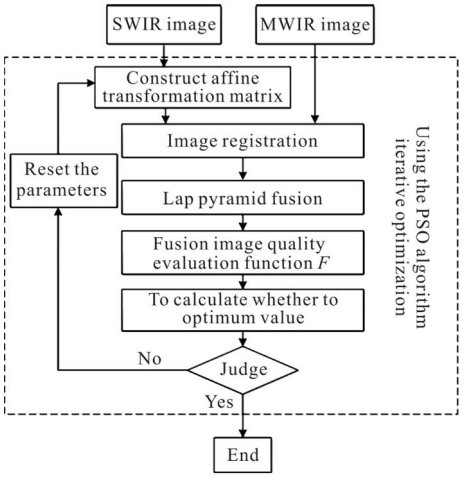


图 7 算法流程图

Fig.7 Algorithm process

5.1 融合质量评价函数 *F*

图像的边缘和纹理区域通常包含人眼敏感的图像特征信息,可视为人眼感兴趣区域 ROI(region of interest)[8]。通过 Soble 算子分别提取 SWIR 和 MWIR 图像的边缘信息,可以得到两幅图像的像素梯度信息。

之后利用 Otsu 的自动阈值选取法, 对梯度图像进行二值化, 便可得到短波红外图像的感兴趣区域 ROI_SWIR 和中波红外图像的感兴趣区域 ROI_MWIR。两者取并集,得到联合感兴趣区域 JROI (joint region of interest), 该区域包含融合图像边缘和细节区域。计算融合图像在区域 JROI 中的 Peli 高频带对比度 $C_0(x,y)$[9],得到清晰度评价指标 F:

$$F=-\sum_{(x,y)\in \mathrm{JROI}} C_0(x,y) \tag{9}$$

其中 $C_0(x,y)$的定义如公式(10)所示:

$$C_k(x,y)=\frac{(\phi_k-\phi_{k+1})*I(x,y)}{\phi_{k+1}*I(x,y)} \tag{10}$$

式中:I (x,y) 为输入图像;ϕ_0 为高斯核函数;$\phi_k=(\sigma_k\sqrt{2\pi})^{-2}\exp[-(x^2+y^2)/\sigma_k^2]$,其中 σ_k 该正态分布的标准差,$\sigma_k=2^k$,$(\phi_k-\phi_{k+1})$ 为高斯差函数。当 k 取值为 0 时,便得到 Peli 高频带对比度 $C_0(x,y)$。$C_0(x,y)$可用于表述复杂图像的边界信息, 而图像的高频信息的缺失将导致图像的模糊。通过计算融合图像在区域 JROI 中的 Peli 高频带对比度,可以衡量融合图像的清晰度, 从而评价 SWIR 和 MWIR 图像配准的精度问题。

5.2 粒子群优化算法

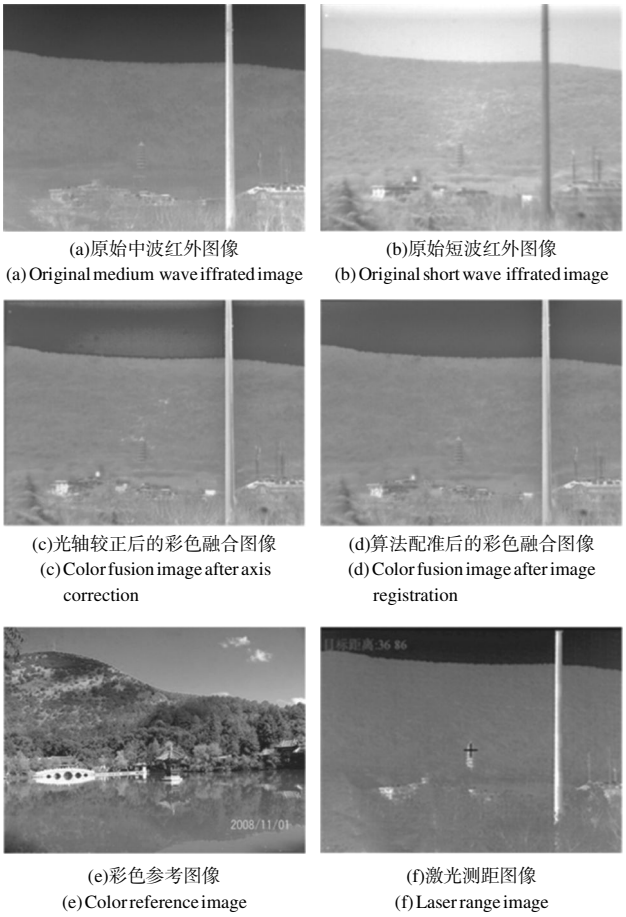
粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization,PSO)是一种基于群体协作的随机搜索算法。算法初始化为一群粒子,每个粒子都具有一个随机位置,一个决定运动方向和距离的速度以及一个由目标函数决定的适应值,各粒子根据对个体和群体的学习分析来动态调整自己的速度,在解空间进行搜索,通过迭代找到全局最优解。在每次迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己:(一)是粒子自身所能达到的最优解,称作个体极值 pbest;(二)在当前种群中能够达到的最优解,称作全局极值 gbest。粒子根据如下公式更新自己的速度和位置[10]:

$$v_{ij}^{k+1}=w_k v_{ij}^k+c_1 r_1(\mathrm{pbest}_{ij}^k-x_{ij}^k)+c_2 r_2(\mathrm{gbest}_{ij}^k-x_{ij}^k)$$
$$X_{ij}^{k+1}=X_{ij}^k+V_{ij}^{k+1} \tag{11}$$

式中:i 为粒子 i;j 为速度 (或位置) 的第 j 个空间维度;k 为迭代次数;v_{ij}^k 和 x_{ij}^k 为第 i 粒子在第 k 次迭代中在第 j 个维度的速度和位置,两者均被限制在 $[v_{j\,\min},v_{j\,\max}]$ 和 $[x_{j\,\min},x_{j\,\max}]$ 范围内;pbest_{ij}^k 为第 i 粒子在第 j 个维度上的个体极值位置;gbest_{ij}^k 为粒子群在第 j 个维度上的全局极值位置;r_1、r_2 为[0,1]区间内的随机数,c_1,c_2 为学习因子;w_k 为惯性权重系数。在文中种群维数取 3 (分别表示 x 方向平移,y 方向平移和缩放,由于经过光轴平行度校正,笔者认为探测器之间不存在旋转角度上的误差),种群数目取 20,c_1,c_2=2,w_k 由 0.9 逐渐减小为 0.4,$v_{j\,\min}=x_{j\,\min}=-10$,$v_{j\,\max}=x_{j\,\max}=10$,最大迭代次数为 50。

6 实验结果与讨论

为了测试所研制的短波红外与中波红外图像融合的光电探测系统的图像融合质量,文中对其进行了实验测试,系统 PC 平台为惠普 Z820 图形工作站,主频为 Intel Xeon E5-2650 2.8 GHz,内存为64 GB,编程语言为 VC++。测试结果如图 8 所示。图中场景包含紫金山、宁古寺以及近处的建筑,其中宁古寺距离探测系统约为 3.6 km。实验时间为 2015 年 3 月 19 日 17 时,环境温度为 15°,天气阴,PM2.5 指标为 153,属于中度污染天气,肉眼看不清宁古寺。由图8(a)可知,中波红外图像对热目标非常敏感,可以明显地地辨认出宁古寺和近处的建筑,但对于树木等细节信息的分辨力很差。由图 8(b)可知,短波红外图像具有



(a)原始中波红外图像
(a) Original medium wave iffrated image

(b)原始短波红外图像
(b) Original short wave iffrated image

(c)光轴较正后的彩色融合图像
(c) Color fusion image after axis correction

(d)算法配准后的彩色融合图像
(d) Color fusion image after image registration

(e)彩色参考图像
(e) Color reference image

(f)激光测距图像
(f) Laser range image

图 8 短波红外与中波红外图像融合结果

Fig.8 Experiment result of SWIR and MWIR image fusion

较好的透雾效果,能够清晰地显现肉眼无法看到的宁古寺,且对于树木、山峦等细节信息较为清晰,但由于近处树木的影响,很难发现掩藏在树木之间的建筑物。图 8(c)为经过光轴校正后的彩色融合图像,可以发现经过光轴平行度校正后的光电探测系统采集到的图像视场重合度非常高,但是图像在平移和缩放上依旧存在少许偏差,需要精确配准。图 8(d)是利用文中提出的联合配准和融合方法得到的彩色融合图像,可以看出,融合图像兼具中波红外和短波红外的特点,既能够突显目标信息,又能够表现丰富的背景纹理,融合图像的色彩对抗较强,观察者可以很容易分辨出目标。图 8(e)为色彩传递是所使用的彩色参考图像,图 8(f)是对宁古寺这一目标的激光测距结果,测距时先打开屏幕上的十字分划线,将目标锁定在分划线十字靶心;开启脉冲激光测距装置,测量目标距系统的距离,并将所测得距离在屏幕的左上角显示;由图 8(f)所示,宁古寺距离光电探测系

统的距离为 3 686 m,与实际情况相符。

7 结 论

文中提出的中波红外和短波红外光轴平行度检测装置，能够很好的地解决多探测器光电探测系统的光轴一致性问题。保证各个探测器的光轴夹角小于 0.5 mrad，采集到的图像重合率不小于 99.1%,可以实现融合图像的粗配准。为了实现图像精配准,文中提出的了基于融合图像感兴趣区域清晰度指标的联合配准和融合方法，该方法将联合考虑图像配准过程和图像融合过程，利用人眼感兴趣区域的清晰度指标来描述配准精度,成像效果好,鲁棒性佳。当场景进行切换时，探测系统算法配准时间小于 1 s，可以很好的满足实时性要求。通过野外实验测试,结果表明：经过光轴校正和图像配准后的中波红外与短波红外图像融合的光电系统，能够有效地提取和综合各探测器采集到的特征信息，实现目标识别和增强的作用,提高目标的发现和识别概率。系统包含的激光测距功能,可以准确的测量目标的位置信息,并利用得到的目标信息(位置、速度等)完成火控、水炮系统的导引功能,可广泛地应用于光电探测领域。

参考文献：

[1] Zhang Junju, Chang Benkang, Zhang Baohui, et al. Long-distance image fusion system for infrared and LLL/visible bands[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(1): 20-24. (in Chinese)
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.

[2] Lu Jun, Lv Tongguang. Application and development of optoelectronic detection technology in fire control system[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41 (4): 1047-1051. (in Chinese)
陆君, 吕彤光. 光电探测技术在火控系统中的应用及发展[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1047-1051.

[3] Wang Lei, Li Yongheng. Research on calibration method of photoelectric system optical axis parallelism [J]. ***Journal of Gun Launch & Control***, 2013, 3: 72-75. (in Chinese)
王雷, 李永恒. 光电系统光轴平行度校准方法研究 [J]. 火炮发射与控制学报, 2013, 3: 72-75.

[4] Bentoutou Y, Nasreddine T, Kidiyo K, et al. An automatic image registration for applications in remote sensing [J]. ***IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters***, 2005, 43(9): 2127-2137.

[5] Yang Wenzhi, Jing Hongwei, Wu Shibin, et al. Visible and infrared optical axis parallelism tester[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(5): 900-904. (in Chinese)
杨文志, 景洪伟, 吴时彬, 等. 可见光与红外光轴平行度检测仪[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 900-904.

[6] Jain Shweta, Kanwal Navdeep. Overview on image registration [C]//2014 International Conference on Medical Imaging, m-Health and Emerging Communication Systems, 2014: 376-381.

[7] Trelea I C. The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection[J]. ***Information Processing Letters***, 2003, 85(6): 317-325.

[8] Gao Shaoshu, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. The evaluation model of perceived definition based on visible light and infrared color fusion image [J]. ***Spectroscopy and Spectral Analysis***, 2012, 32(12): 3197-3202. (in Chinese)
高绍姝, 金伟其, 王霞, 等. 可见光与红外彩色融合图像感知清晰度评价模型 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(12): 3197-3202.

[9] Peli E. Contrast in complex images [J]. ***Journal of the Optical Society of America***, 1990, 7(10): 2032-2040.

[10] Bai Lianfa, Han Jing, Zhang Yi, et al. Registration algorithm of infrared and visible images based on improved gradient normalized mutual information and particle swarm optimization [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41 (1): 248-254. (in Chinese)
柏连发, 韩静, 张毅, 等. 采用改进梯度互信息和粒子群优化算法的红外与可见光图像配准算法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 248-254.