

分光轴式多源图像融合系统近距离配准方法研究

王贵圆,常本康,富容国,冯 澍,孙 斌,李英杰

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院,江苏 南京 210094)

摘 要: 为了解决分光轴式多源图像融合系统近距离图像配准问题,建立了一种双目成像配准模型,分析了分光轴系统的镜头中心距对配准精度的影响。该模型以物点对不同镜头的入射角差为切入点,以入射角差作为配准精度的判别依据,分析了配准精度随镜头中心距和物距的变化关系。结合探测器角分辨率和光轴调校精度,给出了分光轴系统像素级配准的距离范围计算公式,并且引入光轴初始夹角和图像像素平移量,实现近距离变视距图像配准。计算结果表明:分光轴系统光轴平时可对某一最近距离至无穷远范围内配准,当调节系统对更近距离配准时,可在一段有限范围内配准,缩小镜头中心距和提高光轴调校精度可以扩大系统的配准范围。利用提出的配准距离范围计算方法,结合目标测距,实现了分光轴式红外与可见光图像融合系统近距离变视距图像配准。

关键词: 图像配准; 双目成像; 分光轴

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1104003

Close range image registration of multi-source image fusion system with a separate optical axis structure

Wang Guiyuan, Chang Benkang, Fu Rongguo, Feng Shu, Sun Bin, Li Yingjie

(School of Electronic Engineering and Optic-electronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to solve the problem of close range image registration of multi-source image fusion system with a separate optical axis structure, a registration model of binocular imaging system was established to analyze the impact of the lens center distance on the registration accuracy. The incidence angle difference of object points to different lenses was considered in this model, which determined the registration accuracy. In this way, the relationships of registration accuracy, lens center distance and object distance were analyzed. Finally, considering the angular resolution of detectors and optical axis calibration accuracy, computational formula of the distance range of pixel-level registration of separate optical axis system was given, which could be adjusted for variable close range image registration by the initial angle of two optical axes and the pixel translation of the image. Calculation results indicate that the separate optical axis system can achieve pixel-level registration from a closest distance to infinity, when the optical axes are parallel. If the system is adjusted to register for a closer distance, the

收稿日期:2016-03-11; 修订日期:2016-04-20

基金项目:江苏省产学研联合创新资金(BY2012024);中国兵器工业集团预研项目(62201060402)

作者简介:王贵圆(1990-),男,博士生,主要从光电信号处理、光电系统设计等方面的研究。Email:wykinhat@163.com

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

registration range will become finite. Smaller lens center distance and higher optical axis calibration accuracy will help to expand the registration range. Finally, with the calculated registration range and the measured target distance, the variable close range image registration of infrared and visible light image fusion system with separate optical axis structure has been achieved.

Key words: image registration; binocular imaging system; separate optical axis

0 引言

图像融合技术是一种综合处理多传感器图像数据的手段,可以克服单一传感器光谱特性、空间分辨率、图像可读性等方面的局限性,已在夜视侦查、医学影像、电晕检测等领域得到广泛应用^[1-3]。图像配准作为图像融合的核心技术,涉及到光学系统结构设计和软件算法研究。近年来,国内外有关图像配准的算法层出不穷。如基于小波分析的红外图像自动配准方法^[4];基于 Harris 角点检测的特征匹配算法^[5];基于 SURF 的图像配准算法^[6]等。这些算法需要寻找图像之间的共同特征来计算匹配变换参数,往往用于同类的或者相似的图像配准。对于异类图像,则需要通过设计特殊的光学系统结构并辅以伸缩、平移以及旋转变换,才能实现实时准确的配准。

目前,多源图像融合系统一般有三种光学结构:共光轴系统和分光轴系统。共光轴系统又可分为共光路系统和分光路系统两种形式。共光轴共光路系统采用双色焦平面阵列,两个波段共用一个镜头^[7]。共光轴共光路系统是图像配准的最理想的方案,两个波段共用一个光路,确保了两个波段图像的配准精度。但是采用这种结构前提是有相应的双色焦平面阵列,并且宽波段镜头设计难度较大。共光轴分光路系统采用分光元件,将入射光一分为二后为两个探测器分别接收。共光轴分光路系统采用独立的成像元件,并可灵活设计结构来避免色差。其光路分离手段有两种:吴礼刚^[8]等人设计的紫外与可见光双光谱照相系统采用的是孔径分光结构;汤天瑾^[9]等人设计的红外相机共孔径双波段成像光学系统采用了分色片实现双波段分光。这两种方式均实现了光路的分离,但也都存在能量损失的问题,这对于远距离目标探测或者微弱信号检测是不利的。分光轴系统采用两个平行放置的成像器件对准同一场景采集

不同波段的图像,两个成像器件完全独立,有各自的镜头和焦平面阵列^[10-11]。分光轴系统和共光轴系统最本质的区别在于分光轴系统的两个镜头之间存在中心距,这也是分光轴系统的劣势所在,因为镜头中心距会带来不可避免的视场差,影响配准精度,并且这个影响在近距离下更加明显。因此,分光轴式图像融合系统镜头中心距带来的影响以及近距离变视距图像配准问题值得深入研究。

文中提出了一种双目成像配准模型,详细分析了分光轴系统图像配准精度与镜头中心距、物距、视场角、分辨率等之间的关系,给出了分光轴系统图像配准的条件及计算公式,并结合测距,实现了分光轴式图像融合系统近距离变视距图像配准。

1 双目成像配准模型

由于不同成像设备的位置和角度的不同,它们对同一场景所拍摄到的图像中景物的大小、位置也会存在差异。从另一个角度来说,一个物点在图像中对应像点的位置是由该点对镜头的入射角和镜头的视场角决定的,正是由于入射角的差异和视场角的不同造成了同一物点在不同成像设备的图像中的位置不同,产生配准误差。因此,可以用入射角差来衡量图像的配准程度,而视场角大小的不同则可以通过一定比例的缩放来统一。

为了得到一个简洁的模型,需要做一些必要的假设:两个摄像机镜头中心在同一平面内,视场角大小相等,没有轴向旋转误差。镜头中心距可分为水平中心距与垂直中心距,通常两个镜头是水平放置或垂直放置,即只有水平中心距或者垂直中心距,并且水平与垂直方向的镜头中心距是分别影响水平与垂直方向的配准精度的,这里只考虑水平中心距,垂直中心距与之相同。由此,给出了双目成像系统的配准模型,如图1所示。

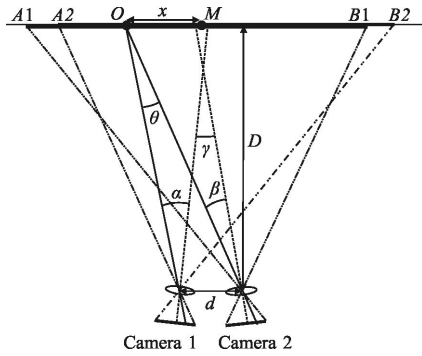


图 1 双目成像配准模型图

Fig.1 Figure of binocular imaging model

图 1 中摄像机 1 与摄像机 2 并排放置, 镜头中心距为 d , 两个镜头光轴之间的夹角为 γ 。其中, γ 为正时, 表示镜头 2 的光轴顺时针旋转 γ 角度后与镜头 1 的光轴平行; γ 为负时, 则逆时针旋转 γ 角度; γ 为零时, 则双目成像系统光轴平行。在距离 D 的物平面上, 两个摄像机的视场范围分别为 A_1B_1 、 A_2B_2 , 其中 A_2B_1 为两者的重合视场。在重合视场 A_2B_1 内偏离中心点 M 距离 x 处有一个目标点 O , 其对摄像机 1 和摄像机 2 的入射角分别为 α 、 β 。其中, α 、 β 为正时表示点 O 在光轴左侧, 为负时表示点 O 在光轴右侧。而 O 点对两个摄像机入射主光线的夹角 θ 为:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{x + 0.5 \times d}{D} - \tan^{-1} \frac{x - 0.5 \times d}{D} \quad (1)$$

当 $x=0$ 时, θ 取到最大值, 这意味着

$$\theta_{\max} = 2 \times \tan^{-1} \frac{d}{2 \times D} \quad (2)$$

可以计算用 θ_{\max} 代替 θ 产生的误差:

$$\varepsilon = \frac{\theta_{\max} - \theta}{\theta_{\max}} \quad (3)$$

随着 x 与 D 的比值逐渐增大, 误差也逐渐变大, 即 θ 在逐渐变小, 这意味着市场中心的配准误差较视场边缘的大。当 $x/D \leq 0.2$ 时, 误差 ε 小于 5%。故当视场角较小时 (一般小于 20°), θ 可由误差 θ_{\max} 近似代替。

目标点 O 对摄像机 1 和摄像机 2 的入射角差为 δ 为:

$$\delta = |\beta - \alpha| \quad (4)$$

由几何关系可知:

$$\delta = |\theta - \gamma| \quad (5)$$

即

$$\delta = \left| 2 \times \tan^{-1} \frac{d}{2 \times D} - \gamma \right| \quad (6)$$

2 配准距离定量计算

2.1 像素级配准范围的计算方法

由公式(6)可以计算出双目成像系统的重合视场中的目标对于两个摄像机的入射角差, 根据摄像机的角分辨率可以进一步计算两个摄像机图像的配准精度。其中, 对于每一个系统而言, 镜头中心距离 d 为定值, 在光轴校准之后, 两个镜头光轴之间的夹角为 γ 也为定值。那么, 公式(6)反映的其实就是入射角差 δ 随物距 D 变化的关系, 也就是物距 D 对配准精度的影响。换言之, 在配准精度的要求下, 物距 D 需要满足一定的条件。

当镜头中心距离 d 为定值, 不妨取 $d=0.2 \text{ m}$, 由公式(6)可以画出入射角差与物距的关系图, 如图 2 所示, 横轴为物距 D , 纵轴为入射角差 δ 。其中曲线 a 为两个摄像机光轴理想平行时入射角差 δ 随物距 D 的变化曲线, 即 $\gamma=0$ 且 $\Delta\gamma=0$ 。考虑到光轴调校时存在一定的误差, 实际入射角差 δ 的计算公式应调整为:

$$\delta = \left| 2 \times \tan^{-1} \frac{d}{2 \times D} - \gamma - \Delta\gamma \right| \quad (7)$$

像素级配准要求图像配准误差在一个像素以内, 即两个摄像机入射角差绝对值应小于其角分辨率, 即:

$$\delta \leq d\varphi \quad (8)$$

故 $\theta = \pm d\varphi$ 即为像素级配准的边界范围。将公式(7)代入公式(8)并将 $\Delta\gamma$ 项移至不等式左侧得:

$$\left| 2 \times \tan^{-1} \frac{d}{2 \times D} - \gamma \right| \leq d\varphi - \Delta\gamma \quad (9)$$

由公式(9)可以将光轴调校误差 $\Delta\gamma$ 看作是缩小了满足像素级配准的边界范围, 如图 2 所示, 两条水平线 $\delta = \pm(d\varphi - \Delta\gamma)$ 即为考虑了误差之后的满足像素级配准的边界范围。曲线 a_0 与边界线交于点 N_0 , 这意味着从 575 m 至无穷远的范围内图像是满足像素级配准的。

光轴平行时系统只能对 575 m 以外的范围满足像素级配准, 为了对更近距离处的视场配准, 两个摄像机光轴需要有一个初始夹角, 即 γ 不为零 (大于零), 即曲线将向下移动 γ 。不难看出, 当 γ 从零开始增大时, 曲线 a_0 与上界线的交点逐渐左移, 即系统可以在更近距离处配准; 当 $\gamma \leq d\varphi - \Delta\gamma$ 时, 曲线 a_0 与

下界线无交点,配准范围可至无穷远处;当 $\gamma > d\varphi - \Delta\gamma$ 时,曲线 a_0 与下界线交于一点,系统只能在有限范围内配准,并且随着 γ 变大,这个范围逐渐变近且变小。如图 2 所示,当 $\gamma=0.1$ 时,初始曲线 a_0 移动至曲线 a_1 处。曲线 a_1 与上界线交于 N_1 点,与下界线交于 L_1 点,此时满足像素级配准要求的范围为 210~795 m。

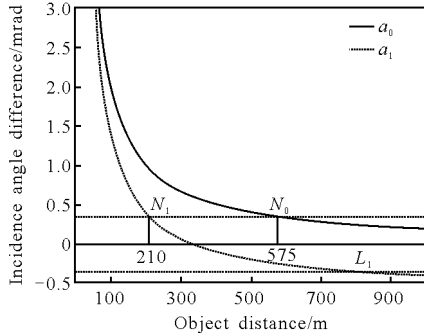


图 2 入射角差与物距关系图

Fig.2 Figure of the relationship between incidence angle difference and object distance

对于平行光轴成像系统而言,当光轴调校至平行时,曲线 a_0 与上界线有交点,与下界线无交点,图像满足像素级配准的视距范围存在下限 D_n ,不难算出

$$D_n = \frac{d}{2 \times \tan \frac{d\varphi + \Delta\gamma}{2}} \quad (10)$$

当系统需要对更近距离的目标成像时,需要设置初始光轴夹角或者初始像素偏移量,从图像上来看就是下移曲线 a_0 或者上移边界线,当 $\gamma > d\varphi - \Delta\gamma$ 时,曲线 a_0 与下界线有了交点,系统配准视距同时存在下限 D_n 和上限 D_f 。并且随着逐渐增大,下限 D_n 和上限 D_f 逐渐变小,系统可以对更近距离处的目标配准。但是,由于曲线 a_0 的斜率是减缓的,下限 D_n 和上限 D_f 之差也在逐渐变小,像素级配准的范围越来越小。

2.2 平移 m 个像素后配准范围计算方法

理想平行光轴系统只能对一定距离以外的视场满足像素级配准,为了探测近距离的物体,系统光轴需要有一个初始夹角,即增大 γ 的值。然而给系统光轴一个初始夹角增大光轴调校的难度,不便操作。从图中看,增大 γ 会使曲线下移,改变曲线与边界线的交点位置。如果让曲线不动边界线上移,同样可以达到这个效果。已知,入射角与像素点相对应,相邻像素点之间入射角差即为角分辨率 $d\varphi$,将图像按像素整体平移就改变了入射角差,也就实现了图中边

界线的上移。而图像按像素整体平移在软件上是很容易实现的,可以方便地实现对较近距离目标图像的配准。设像素量为 m ,由公式(9)可得:

$$\left| 2 \times \tan^{-1} \frac{d}{2 \times D} - m \times d\varphi \right| \leq d\varphi - \Delta\gamma \quad (11)$$

由此可以计算出像素级配准的最近距离 D_n 为:

$$D_n = \frac{d}{2 \times \tan \frac{(m+1)d\varphi - \Delta\gamma}{2}} \quad (12)$$

当 $m=0$ 时,像素级配准的最远距离 D_f 为无穷大。

当 $m > 0$ 时,像素级配准的最远距离 D_f 为:

$$D_f = \frac{d}{2 \times \tan \frac{(m-1)d\varphi + \Delta\gamma}{2}} \quad (13)$$

2.3 影响配准范围的因素

首先考虑镜头中心距离 d 对配准范围的影响。如图 3 所示,当 d 取值 0.2、0.1、0.05 时,分别得到曲线 a_0 、 a_2 、 a_3 。可以看出:随着镜头中心距离 d 的减小,曲线变得扁平,对于确定的像素级配准的边界范围,像素级配准的距离范围增大了。所以,在设计双目成像系统前端结构时,应尽可能地使两个镜头靠近,减小镜头中心距离,这样可以提高配准的距离范围。

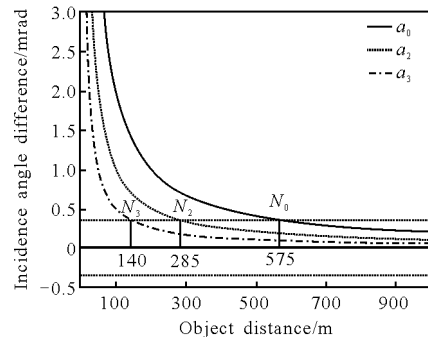


图 3 不同镜头中心距对比图

Fig.3 Contrast figure of different lens center distances

由公式(9)可以看出,摄像机的角分辨率 $d\varphi$ 和光轴调校误差 $\Delta\gamma$ 共同决定了入射角差 δ 像素级配准的边界范围,反映在图中即为两边界线之间的宽度,边界线越宽,系统配准的距离范围就越大。因此,摄像机的角分辨率 $d\varphi$ 越高,其对入射角差 δ 的要求就越高,像素级配准的距离范围越小,而光轴调校误差 $\Delta\gamma$ 会进一步缩小配准的边界范围。那么尽可能地减小光轴调校误差有利于提高配准精度,增大像素级配准的距离范围。显然,光轴调校误差必须小于角

分辨率, 否则无法达到像素级配准。

3 分光轴式红外与可见光图像融合系统配准实验

实验采用的红外与可见光图像融合系统如图 4 所示, 系统采用分光轴式结构, 图中左侧为 CCD 相机, 右侧为红外热像仪, 在两个探测下方分别有一个银灰色旋杆, 可以精确调节 CCD 相机的左右旋转和红外热像仪的上下俯仰。红外热像仪分辨率为 320×256 , 视场角为 11.3° , 角分辨率为 0.48 mrad ; CCD 相机的分辨率为 752×582 , 视场角为 $7.2^\circ \sim 41^\circ$ 可调, 两探测器的轴距为 95 mm 。系统采用以 TMS320DM642 型 DSP 为核心的图像融合电路进行图像的配准及融合。系统光轴调校采用大口径平行光管法^[12], 光轴调校平台如图 5 所示, 离轴抛物面反射镜口径 300 mm , 焦距 3 m , 光轴调校精度 0.05 mrad 。



图 4 红外与可见光图像融合系统

Fig.4 Infrared and visible light fusion system

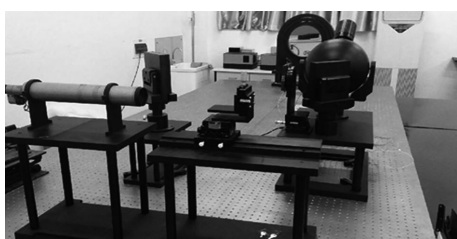


图 5 光轴调校平台

Fig.5 Optical axis calibration bench

光轴调校结果如图 6 所示, 图 6(a) 中黑色十字线为 CCD 相机拍摄到的靶标图像, 图 6(b) 中白色十字线为红外热像仪拍摄到的靶标图像, 在图 6(c) 中两个十字线不重合, 此时系统光轴不平行。调节红外热像仪的上下俯仰和 CCD 相机的左右旋转, 使得十字线完全重合, 如图 6(d) 所示, 此时系统光轴平行。

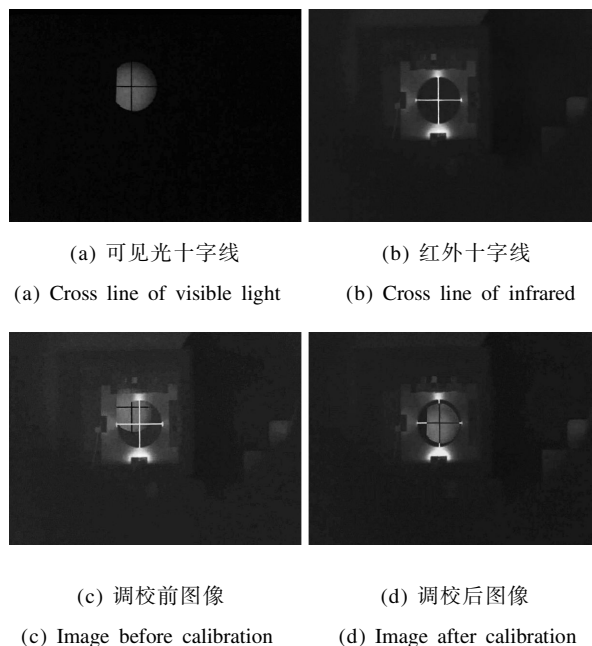


图 6 光轴调校示意图

Fig.6 Optical axis calibration

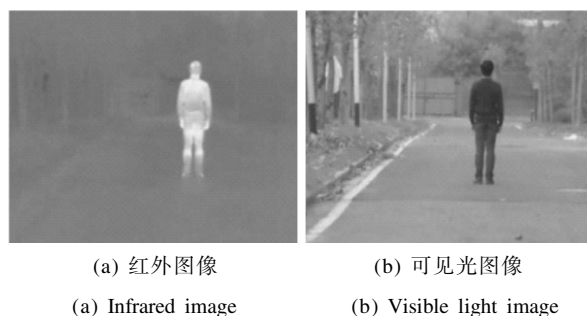
系统光轴调校平行后, 能够对远距离目标配准, 而对近处的目标配准则需要通过图像平移实现。对红外图像左移 m 个像素后, 系统配准的距离范围可以根据公式(12)和公式(13)算出, 结果如表 1 所示。

表 1 系统配准距离范围表

Tab.1 Registration range of the system

m	0	1	2	3	4	5	6
D_r/m	221	104	68	51	40	34	29
D_v/m	∞	1900	179	94	64	48	39

系统的配准实验在室外进行, 以人为目标并利用激光测距机确定目标距离。实验时室外温度为 10°C , 红外热像仪能够拍摄到清晰的目标图像, 如图 7(a) 所示。为了增强目标在可见光图像中的对比, 实验人员穿着深色衣服, 可见光图像如图 7(b) 所示。图 8 中, 目标距离为 40 m , 在这个距离下系统没有配



(a) 红外图像

(b) 可见光图像

(a) Infrared image

(b) Visible light image



(c) 配准前图像 (d) 配准后图像
(c) Image before registration (d) Image after registration

图 7 目标距离 40 m 的图像

Fig.7 Image with a distance of 40 m

准,在图 7(c)中可以看到可见光目标和红外目标偏差了一段距离,根据表 1 对系统设置像素平移量为 4,融合结果如图 7(d)所示,此时可见光目标和红外目标基本重合在一起,配准效果很好。

还进行了多个不同距离的配准实验,结果如图 8 所示,其中编号 1 的距离为 55 m、编号 2 为 70 m、编号 3 为 100 m。根据表 1,这 3 个距离时系统所需的像素平移量分别为 4、3、2。图 8 中(a1)、(a2)和(a3)为配准前的融合图像,图 8(b1)、(b2)和(b3)为配准后的融合图像。从图 8 中可以看出,随着距离变远,可见光目标和红外目标偏差的距离逐渐变小,但是仍然存在,根据表 1 设置像素平移量后,系统能够实现可见光目标和红外目标的配准。

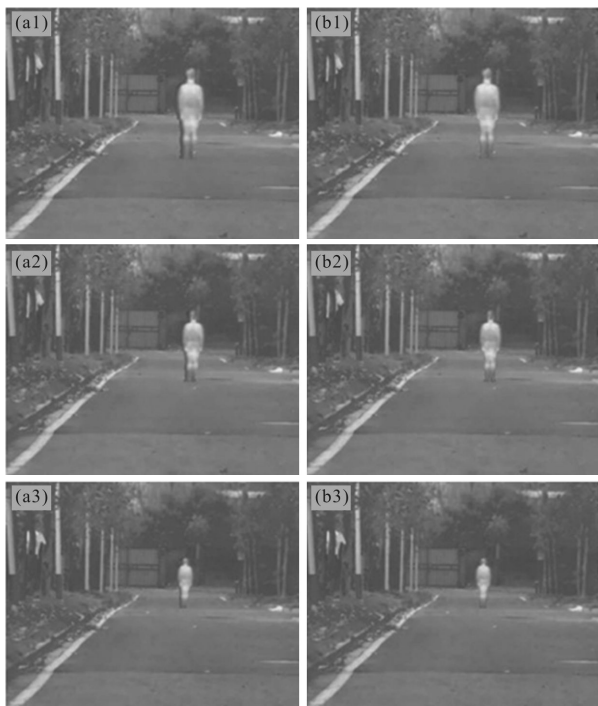


图 8 不同目标距离的图像

Fig.8 Image of different distances

4 结 论

文中研究了分光轴式多源图像融合系统近距离配准问题,提出了一种双目成像模型,从入射角考虑,分析了分光轴系统中镜头中心距产生的影响。计算结果表明,分光轴式图像融合系统对远距离目标探测的配准误差可以忽略不计。而当目标距离变近时,因轴距产生的配准误差会逐渐增大,此时可通过调节光轴初始夹角或者设置图像像素平移量,实现近距离的图像配准。文中给出了分光轴式多源图像融合系统离配准范围的定量计算公式,结合目标距离测量,可实现对近距离目标探测的图像配准。分光轴式红外与可见光图像融合系统配准实验结果表明:利用文中的方法,分光轴式图像融合系统能够实现近距离变视距图像配准。

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] Tong Tao, Yang Guang, Meng Qiangqiang, et al. Multi-sensor image fusion algorithm based on edge feature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 2446-2451. (in Chinese)
童涛, 杨忱, 孟强强, 等. 基于边缘特征的多传感器图像融合算法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 2446-2451.
- [3] Wang Shaohua, Mei Bingxiao, Ye Ziqiang, et al. Ultraviolet imaging detection technology and application in corona discharge detection of electrical equipment [J]. *High Voltage Apparatus*, 2011, 47(11): 92-96. (in Chinese)
王少华, 梅冰笑, 叶自强, 等. 紫外成像检测技术及其在电气设备电晕放电检测中的应用 [J]. *高压电器*, 2011, 47(11): 92-96.
- [4] Niu Yongsheng, Ni Guoqiang. Automated registration for infrared image based on wavelet analysis [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2000, 9(1): 66-72.
- [5] Zeng Qi, Liu Liu, Li Jianxun. Image registration method based on improved Harris corner detector[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(6): 573-576.

- [6] Liu Xiaojun, Yang jie, Sun Jianwei, et al. Image registration approach based on SIFT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 156–160. (in Chinese)
刘小军, 杨杰, 孙坚伟, 等. 基于 SIFT 的图像配准方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 156–160.
- [7] Zhang Bao, Chui Enkun, Hong Yongfeng, et al. Infrared MWIR/LWIR dual-FOV common-path optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23 (2): 365–401. (in Chinese)
张葆, 崔恩坤, 洪永丰, 等. 红外双波段双视场共光路光学系统[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(2): 365–401.
- [8] Wu Ligang, He Wenrong, Hu Jinsun, et al. Solar blind UV and visible dual-spectral camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1529–1535. (in Chinese)
吴礼刚, 何文荣, 胡晋荪, 等. 日盲紫外-可见光双光谱照相系统[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7): 1529–1535.
- [9] Tang Tianjin, Li Yan. Dual-band common aperture optical system for infrared camera [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 513–518. (in Chinese)
汤天瑾, 李岩. 红外相机共孔径双波段成像光学系统[J]. 应用光学, 2015, 36(4): 513–518.
- [10] Sun Bin, Chang Benkang, Zhang Junju, et al. Design of fusion system based on infrared moving target segmentation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2064–2069. (in Chinese)
孙斌, 常本康, 张俊举, 等. 基于红外运动目标分割的夜视融合系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2064–2069.
- [11] Pei Chuang, Jiang Xiaoyu, Zhang Pengwei, et al. A dual-channel fusion system of visual and infrared images based on color transfer[C]//SPIE, 2013, 8907: 89074F.
- [12] Ma Shibang, Yang Hong, Yang Zhaojin, et al. Multi-spectral axes parallelism calibration of electro-optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(5): 917–921. (in Chinese)
马世帮, 杨红, 杨照金, 等. 光电系统多光轴平行性校准方法的研究[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 917–921.