

光机装校阶段红外与可见光图像配准技术研究

孙爱平, 皮冬明, 安长亮, 铁筱滢, 杨毕春, 李泽民

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 针对在光机装校阶段, 分析光学件和金工件的设计、加工和装配的累积误差对图像配准精度的影响。首先, 分析在光机装校时采取主观评价方法评价图像配准质量的原因; 其次, 具体分析物镜的焦距和畸变误差、光轴一致性误差和探测器安装面误差对图像配准精度的影响。通过分析误差产生的原因, 提出在光机装校时的解决办法。

关键词: 光机装校; 可见光图像; 红外图像; 图像配准

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2013)01-0050-06

Study on IR/Visible Image Registration for Lens Assembly

SUN Ai-ping, PI Dong-ming, AN Chang-liang, TIE Xiao-ying, YANG Bi-chun, LI Ze-min

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: This paper aims at, in the assembly stage, the analysis of errors on image registration accuracy accumulated in optical parts and metal parts design, processing and assembling. The first analysis takes subjective evaluation method to evaluate the quality of image registration. Secondly, the paper specifically analysis's the focal length of the object lens and distortion error, light axis consistency error and a detector mounting surface errors on the accuracy of image registration effect. Through the analysis of the error sources, the solution is proposed in the assembly.

Key words: visible image, infrared image, image registration

0 引言

图像融合是20世纪80年代提出的一个新概念, 是数据融合中主要以图像为研究对象的一个分支^[1]。现代战争中, 单一传感器已经不能满足作战的需要, 必须运用多传感器图像融合技术提供更详细的战场信息, 从而获取战争的主动权。在军事领域, 以多传感器图像融合为核心内容的战场感知技术已成为现代战争中最具影响力的军事高科技, 例如可见光图像与红外图像融合^[2]。红外图像可以在场景内定位具有较高温度的物体(热源), 而可见光图像则能提供背景信息, 将二者融合便能实现在背景中定位热源物体的功能^[3]。可见光图像与红外图像进行图像融合能获得更详细的目标信息, 甚至是隐藏、遮挡目标信息。

图像融合关键的一步是图像配准, 因此, 图像配准的好坏决定图像融合质量的好坏。图像配准误差可分为两个部分: 一是光机装校所引起的图像配准误

差, 二是图像配准算法模型所引起的误差。光机装校所引起的图像配准误差, 在现有文献所报道的图像融合和图像配准算法模型中往往被忽略掉, 即假设光机装校不影响图像配准精度^[4-6]。光机装校所引起的图像配准误差有一部分是非线性的, 即使使用后续的图像配准算法模型进行补偿, 是非常困难的。分析光机装校阶段的图像失配因素, 并提出相应的解决方案, 能较大降低设计图像配准算法模型的难度、提高图像配准的精度, 同时为以后的图像配准指出了另一条思路和方法, 具有比较重要的实用价值。

1 图像配准质量评价方式的选择

目前, 评价图像配准质量的方法可分为主观评价方法和客观评价方法^[3]。主观评价方法是让观察者观察所要进行测试的图像, 并依据事先规定的评价尺度和自己的经验, 对所测试的图像按视觉效果给出对应的质量分数, 对其分数进行统计处理所得到的结果为

图像配准主观质量评价的结果。客观评价方法是对融合图像质量的定量评价,它能够克服影响观察者进行图像质量判断的各种因素,定量表示出成像质量的好坏。在装校阶段,光机装校的效果如何,是否达到设计要求,需要调节哪个环节,都可通过主观评价方法判断出来,这是客观评价方法所不具备的。因此,主观评价方法是光机装校阶段进行图像配准的理论基础。如表 1^[7]所得出的结论和观点,都是使用主观评价方法得出的。

表 1 主观评价方法评分表

Table 1 The table for subjective evaluation method		
级别	绝对尺度	相对尺度
1	很好	该群中最好的
2	较好	好于该群中平均水平
3	一般	该群中平均水平
4	较差	差于该群中平均水平
5	很差	该群中最差的

2 图像配准分析

可见光与红外分离窗口图像融合系统工作原理图如图 1 所示。外界景物信息通过可见光物镜和红外物镜分别传输到各自的探测器件——CCD 和非制冷型红外探测器 (UFPA),探测器件把图像信息传输到处理器进行图像处理,最后在显示器上显示融合后的图像。

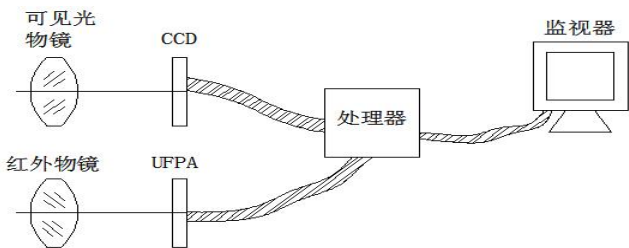


图 1 图像融合系统示意图

Fig.1 The diagram of image fusion system

在进行图像融合处理之前,首先要对融合的源图像进行图像配准。图像配准的三个方法为:图像的缩放、图像的平移和旋转。在光机装校时,影响图像配准精度的因素是零部件的设计、加工和装配,即光学镜头部分光学件和金工件的加工装配误差、各个光学镜头光轴装配的一致性误差和探测器安装位置的误差。图像的缩放可消除光学镜头部分焦距、畸变误差和光学镜头各个光轴一致性误差所引起的图像失配;图像的平移和旋转可消除探测器安装位置误差所引起的图像失配。反之,选配光学镜头的焦距、畸变以

及调整各个光学镜头的一致性可实现图像的缩放;调节探测器的安装位置可实现图像的平移和旋转。这是指导图像融合系统,在光机装校阶段实现图像配准的理论基础。

图像失配的三个因素对图像配准精度的影响,在一个可控的范围内是呈随机分布的。图像配准效果良好时,得到可见光与红外重合的图像;如果图像配准效果较差,同一目标的可见光图像和红外图像产生图像失配误差—— Δd 的间距,出现“重影”现象。通过调节相应部件,使两像点间距 Δd 逐渐减小,对人眼的夹角 $\Delta\theta$ 不断减小,直至小于人眼的极限分辨角 $\Delta\omega$,则人眼不能分辨开来两像点,可认为消除了“重影”现象,图像配准精度达到一个比较好的效果。主观评价方法评价图像配准质量的依据可表示为:

$$\frac{\Delta d}{f_{\text{人眼}}} = \tan \Delta\theta \leq \tan \Delta\omega \tag{1}$$

2.1 焦距、畸变因素影响

物镜的焦距和畸变的差异引起像高大小的不等,需要通过图像的缩放保持像高的一致性。选配物镜使焦距和畸变影响所引起的像高差不能被人眼所分辨时,可以认为实现了图像的缩放。假设待配准图像已消除光轴一致性误差和探测器安装位置误差因素的影响,只考虑镜头的焦距、畸变误差因素,分析待选配物镜焦距和畸变的关系。

考虑某一目标所发出的光信息(此目标距离镜头足够远),以同一视场角 ω 分别进入可见光物镜和红外物镜,在各自接收器上所成像高分别为 y_w' 、 y_{IR}'

$$y_w' = f_w' \times \tan(1 - \delta y_w'), y_{IR}' = f_{IR}' \times \tan(1 - \delta y_{IR}') \tag{2}$$

式中: y_w' 、 y_{IR}' , f_w' 、 f_{IR}' 和 $\delta y_w'$ 、 $\delta y_{IR}'$ 分别为可见光物镜和红外物镜的像高、焦距和畸变大小。探测器件与显示器显示区域大小不等,当图像由探测器件传输到显示器时有一定的倍率转换关系。其垂轴放大倍率为

$$\beta_w = \frac{d}{d_w}, \beta_{IR} = \frac{d}{d_{IR}} \tag{3}$$

式中: d 为显示器对角尺寸; d_w 、 d_{IR} 为探测器对角尺寸; β_w 、 β_{IR} 为显示器与 CCD、非制冷型红外探测器之间垂轴放大率。已知外界景物在探测器件上所成像高 y_w' 、 y_{IR}' ,则在显示器上显示像高为 y_w 、 y_{IR} ,即:

$$y_w = \beta_w \times y_w', y_{IR} = \beta_{IR} \times y_{IR}' \tag{4}$$

畸变 $\delta y_w'$ 、 $\delta y_{IR}'$ 对图像配准影响 $\Delta y'$ 为:

$$\Delta y' = |y_w - y_{IR}| = |f_w' \times \tan \times (1 - \delta y_w') - f_{IR}' \times \tan \times (1 - \delta y_{IR}')| \tag{5}$$

如要保证畸变对图像配准不产生影响,畸变值必须满足一定条件。以人眼处于距离显示器 L 处观察时,

目标像高差值 $\Delta y'$ 对人眼的张角为 $\Delta\omega$

$$\tan \Delta\omega = \frac{\Delta y'}{L} \quad (6)$$

一般认为人眼观察目标时极限分辨角为 1 mrad, 则目标像高差值 $\Delta y'$ 对人眼的张角小于 1 mrad 时, “重影”现象消失, 可以认为图像配准精度达到使用要求。即有:

$$\tan \Delta\omega \leq 0.001 \quad (7)$$

整理(2)~(7), 可得到下式

$$\frac{d \cdot \tan \omega}{L} \cdot \left| \frac{f'_w \cdot (1 - \delta y'_w)}{d_w} - \frac{f'_{IR} \cdot (1 - \delta y'_{IR})}{d_{IR}} \right| \leq 0.001 \quad (8)$$

一般情况下, 融合系统的视场角 ω 小于 90° , 处于第一象限。视场角 ω 的正切函数在第一象限下为增函数。讨论(8)式, 如果在图像融合系统的最大视场角时, 满足图像配准精度的要求, 可以认为在整个视场角内都能满足图像配准精度的要求。则(8)式可修正为:

$$\frac{d \cdot \tan \omega_{\max}}{L} \cdot \left| \frac{f'_w \cdot (1 - \delta y'_w)}{d_w} - \frac{f'_{IR} \cdot (1 - \delta y'_{IR})}{d_{IR}} \right| \leq 0.001 \quad (9)$$

如果选配的可见光物镜和红外物镜的焦距、畸变满足(9)式, 可以认为消除了焦距、畸变误差对图像配准精度的影响。

2.2 光轴一致性因素影响

假设物镜焦距、畸变和探测器的安装位置没有误差, 分析光轴一致性误差所引起图像失配。产生光轴一致性误差的因素是可见光物镜和红外物镜的光轴有夹角。

以红外物镜光轴为基准, 当可见光物镜与红外物镜的光轴不一致时, 可见光物镜光轴相对于红外物镜光轴具有一定的夹角量 θ 。目标 AB 以相同的距离经过红外物镜和可见光物镜所成像分别为 A_1B_1 、 A_2B_2 , 在监视器上分别显示为 $A'_1B'_1$ 、 $A'_2B'_2$ 。由于光轴的不一致性, 在监视器上目标 AB 的可见光像与红外像有 h 的差异量, 如图 2 所示。在距离监视器 L 处观察时, 对人眼张角为 $\Delta\omega_1$, 即:

$$\tan \Delta\omega_1 \leq \frac{h}{L} \quad (10)$$

根据(3)式, 可见光图像与红外图像的 h 差异量在监视器上所对应差异量为 h_1 :

$$h_1 = \frac{h \times d_w}{d} \quad (11)$$

在可见光系统中, h_1 的像高所对应的夹角, 可近似看做可见光物镜光轴相对于红外物镜光轴的倾角

θ , 即有:

$$h_1 = f'_w \times \tan \theta \quad (12)$$

式(12)即给出了可见光与红外光轴一致性对图像配准的影响。如要保证一致性误差对图像配准不产生影响, 依人眼分辨极限 1 mrad 为基准, 当可见光像与红外像差异对人眼夹角小于 1 mrad 时, 即有:

$$\tan \Delta\omega \leq 0.001$$

综合(10)~(12)及(7)式, 可得:

$$\frac{f'_w \times d \times \tan \theta}{d_w \times L} \leq 0.001 \quad (13)$$

即当产生光轴一致性误差的夹角 θ 满足(13)式, 可认为消除了光轴一致性误差对图像配准的影响。

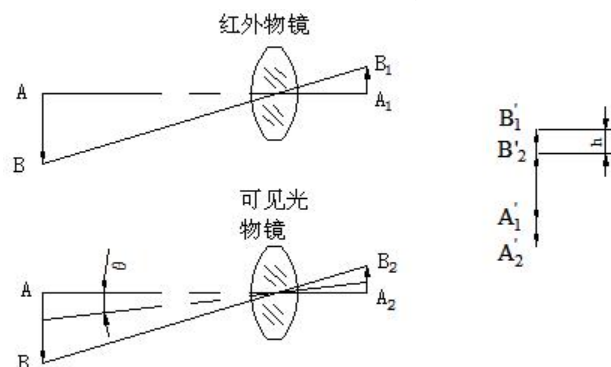


图 2 光轴一致性对图像配准的影响

Fig.2 Optical axis affects on image registration

2.3 探测器安装位置因素影响

确定探测器安装位置需要六个参量: 三个位移量 x 、 y 、 z ; 三个角度参量 α 、 β 、 γ 。三个位移量制约图像配准中图像平移因素; 三个角度量制约图像配准中图像旋转因素。假定选配的物镜焦距、畸变误差和光轴一致性误差满足图像配准精度要求。设定光线传播方向沿 X 负轴向, 理想像面为 YOZ 平面。在进行图像配准的过程中, 进行图像配准涉及到两种消除方法: 粗调和精调。粗调, 即在光机装校阶段, 进行图像的初步配准, 减轻建立图像配准算法模型的难度, 这也是本文的分析点; 精调, 即在建立的图像配准算法模型上进行更进一步的图像配准。

下面分别讨论探测器安装位置对图像平移和图像旋转因素的影响。

2.3.1 平移因素的影响

假设探测器安装面的三个角度参量 $\alpha=\beta=\gamma=0^\circ$, 即不考虑探测器安装面的旋转因素。探测器安装面只受 x 、 y 、 z 三个位移参量的影响。同一目标 AB , 以相同视场角 ω 分别经过可见光物镜和红外物镜, 在 CCD 和非制冷型红外探测器上各自成像, 显示器上呈现为大小相等的两目标像 A_1B_1 、 A_2B_2 。

当 $y=z=0$ 时, 则探测器安装位置只沿 X 轴向

有平移误差。探测器上所成的像 $A_1'B_1'$ 、 $A_2'B_2'$ 、分别与理想像面的位移差为 m_1 、 m_2 ，如图3所示。如果 m_1 与 m_2 不同时为零，探测器件没有处在理想像面上，具有一定的离焦量，显示器上所成目标图像不清晰。探测器件安装位置在 X 轴向的误差，不影响图像融合系统的配准精度，只与图像的清晰度有关。调节探测器件的安装位置，可同时得到清晰的目标图像。

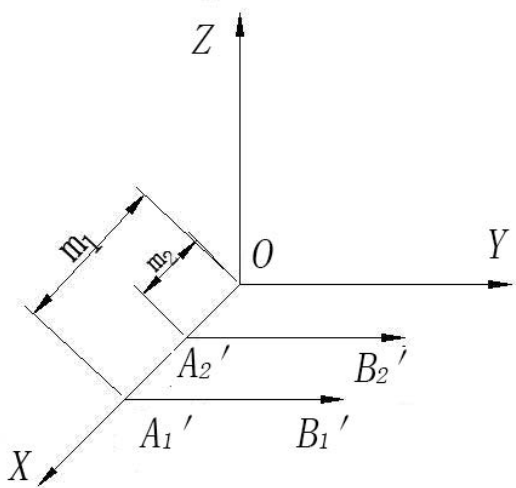


图3 探测器沿 X 轴向移动时对图像配准的影响

Fig.3 The influence of image registration in detector moving along X axis

当 $x=z=0$ 时，探测器安装位置只沿 Y 轴向移动。安装过程中具有 Y 轴向平移误差，则显示器上呈现出大小相等的两目标像 A_1B_1 、 A_2B_2 ，其相对位置如图4所示。 d_y 为两目标像 A_1B_1 、 A_2B_2 在 Y 轴向的误差线量。当 $x=y=0$ 时，探测器安装位置只沿 Z 轴向移动。安装过程中具有 Z 轴向误差，则显示器上呈现出大小相等的两目标像 A_1B_1 、 A_2B_2 ，其相对位置如图5所示。 d_z 为两目标像 A_1B_1 、 A_2B_2 在 Z 轴向的误差线量。依红外探测器为基准， d_y 、 d_z 线量在监视器上对应的线量大小为 d'_y 、 d'_z ：

$$\begin{aligned} d'_y &= \frac{d_w \times d_y}{d} \\ d'_z &= \frac{d_w \times d_z}{d} \end{aligned} \quad (14)$$

以现有的加工装配水平，探测器安装位置在 Y 、 Z 轴向误差线量很小，即 d'_y 、 d'_z 线量非常的小，则有 $d_y \leq L$ 和 $d_z \leq L$ 。 Y 、 Z 轴向线量误差 d_y 、 d_z 对人眼的张角为：

$$\begin{aligned} \Delta\omega_y &\approx \text{tg} \Delta\omega_y = \frac{d_y}{L} \\ \Delta\omega_z &\approx \text{tg} \Delta\omega_z = \frac{d_z}{L} \end{aligned} \quad (15)$$

依人眼极限分辨角 1 mrad 为基准，当 Y 、 Z 轴向

线量误差 d_y 、 d_z 对人眼夹角小于 1 mrad 时，则有：

$$\begin{aligned} \frac{d_y}{L} &\leq 0.001 \\ \frac{d_z}{L} &\leq 0.001 \end{aligned} \quad (16)$$

由(15)~(16)式可得：

$$\begin{aligned} \frac{d'_y \times d}{d_w \times L} &\leq 0.001 \\ \frac{d'_z \times d}{d_w \times L} &\leq 0.001 \end{aligned} \quad (17)$$

如果可见光 CCD 的轴向位移量满足(17)式时，可认为消除了探测器安装面平移误差对图像配准精度的影响。

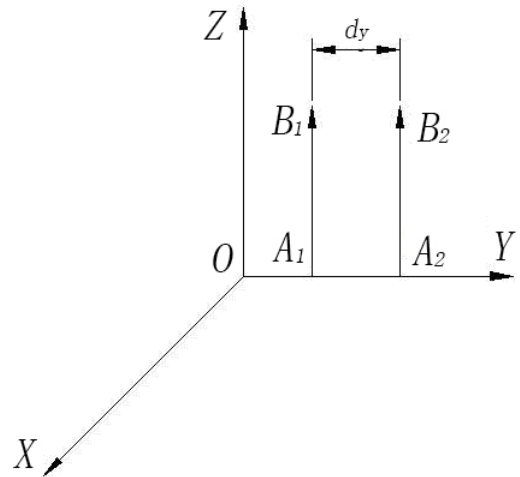


图4 探测器沿 Y 轴向移动时对图像配准的影响

Fig.4 The influence of image registration in detector moving along Y axis

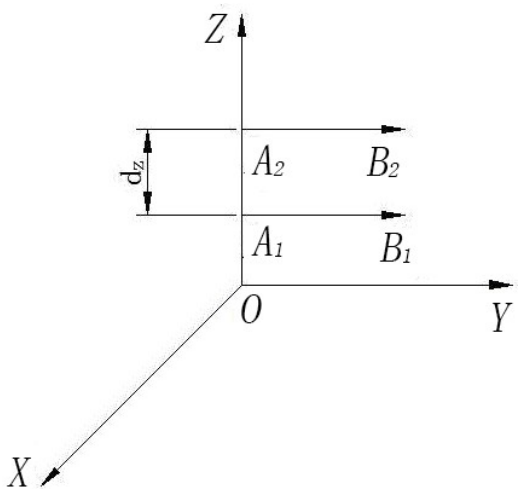


图5 探测器沿 Z 轴向移动时对图像配准的影响

Fig.5 The influence of image registration in detector moving along Z axis

2.3.2 旋转因素的影响

假设探测器安装面的三个位移参量 $x=y=z=0$, 即不考虑探测器安装面平移因素的影响。探测器安装位置只受 α 、 β 、 γ 三个角度参量的影响。同一目标 AB , 以相同视场角分别经过可见光物镜和红外物镜, 在 CCD 和非制冷型红外探测器上各自成像, 显示器上呈现为大小相等的两目标像 A_1B_1 、 A_2B_2 。平面 YOZ 为显示器图像显示平面。当 $\beta=\gamma=0^\circ$ 时, 探测器只绕 X 轴向旋转。两等大目标像 A_1B_1 、 A_2B_2 在平面 YOZ 上, 因绕 X 轴旋转 α 角度后, 所拉开的最大间隔为 d_α , 如图 6 所示。当 $\alpha=\gamma=0^\circ$ 时, 探测器只绕 Y 轴向旋转。 A_1B_1 绕 Y 轴向旋转 β 角度后, 在平面 YOZ 上的投影为 A_2B_1' , 其中间隔 B_2B_1' 为绕 Y 轴旋转后等大目标像之间的最大间隔 d_β , 如图 7 所示。当 $\alpha=\beta=0^\circ$ 时, 探测器只绕 Z 轴向旋转。 A_1B_1 绕 Z 轴向旋转 γ 角度后, 在平面 YOZ 上的投影为 A_2B_1' , 其中间隔 B_2B_1' 为绕 Z 轴旋转后等大目标像之间的最大间隔 d_γ , 如图 8 所示。在现有的加工装配条件下, 探测器安装位置绕 X 、 Y 、 Z 轴旋转的角度 α 、 β 、 γ 都很小。即探测器旋转 α 、 β 、 γ 角度后, 在显示器上等大两目标像之间最大间隔 d_α 、 d_β 、 d_γ 也很小, 则有 $d_\alpha \ll L$ 、 $d_\beta \ll L$ 、 $d_\gamma \ll L$ 。因探测器安装位置的旋转, 所产生的目标像最大间隔对人眼的张角为:

$$\begin{aligned}\Delta\omega_\alpha &\approx \tan \Delta\omega_\alpha = \frac{d_\alpha}{L} \\ \Delta\omega_\beta &\approx \tan \Delta\omega_\beta = \frac{d_\beta}{L} \\ \Delta\omega_\gamma &\approx \tan \Delta\omega_\gamma = \frac{d_\gamma}{L}\end{aligned}\quad (18)$$

如果此张角小于人眼极限分辨角 1 mrad 时, 可以认为消除了图像配准中探测器安装面旋转因素的影响。因旋转而产生的线量 d_α 、 d_β 、 d_γ 满足如下关系式:

$$\begin{aligned}\frac{d_\alpha}{L} &\leq 0.001 \\ \frac{d_\beta}{L} &\leq 0.001 \\ \frac{d_\gamma}{L} &\leq 0.001\end{aligned}\quad (19)$$

通过以上分析, 消除图像配准中探测器安装面平移(或旋转)因素的影响, 需要两种方法: 一是在总体设计时, 探测器安装面具有三个维度的线量(或角量)调节机构, 进行图像配准得粗调; 二是在图像处理中, 使图像具有两个维度的图像移动(或图像缩放)操作, 进行图像配准的精调。

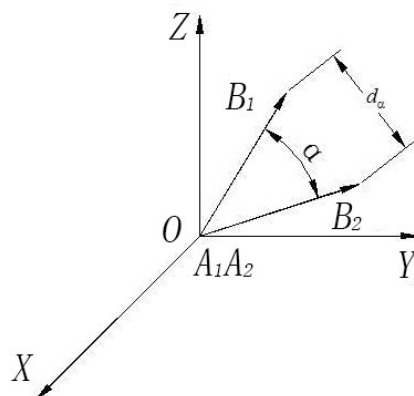


图 6 探测器绕 X 轴向旋转时对图像配准的影响

Fig.6 The influence of image registration in detector rotation along X axis

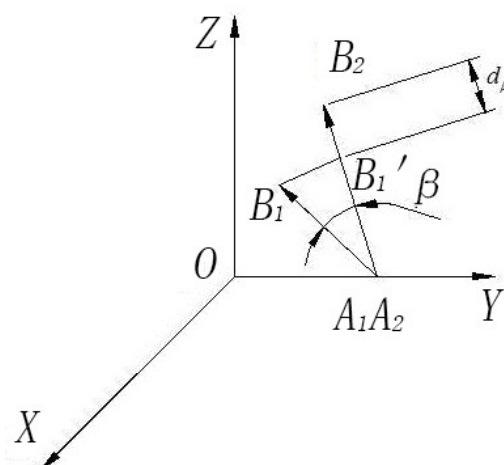


图 7 探测器绕 Y 轴向旋转时对图像配准的影响

Fig.7 The influence of image registration in detector rotation along Y axis

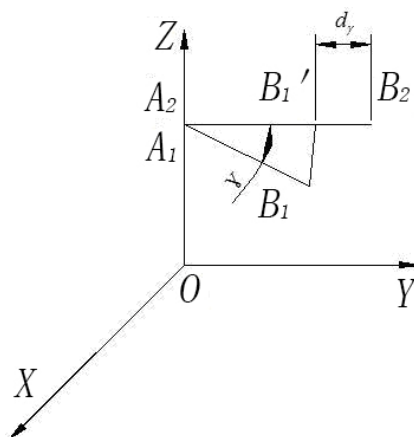


图 8 探测器绕 Z 轴向旋转时对图像配准的影响

Fig.8 The influence of image registration in detector rotation along Z axis

3 图像配准操作方案简介

于待调校系统足够远的距离处放置一个大米字的靶板目标,通过整机系统进行观察。调节 CCD 和非制冷型红外探测器的安装位置,使可见光系统和红外系统的米字靶板像重合。移动靶板,使其处于融合系统不同的视场处,重复以上操作。调校至目标在系统的各个视场点处,两目标像不易被人眼识别出来时,就可认为图像融合系统达到一个比较理想的图像配准精度要求。

4 结论

本文以可见光与红外图像融合系统为例,采用主观评价方法,分别分析了物镜的焦距和畸变误差、光轴一致性误差、探测器安装位置的平移和旋转误差对图像配准的影响。针对各种误差因素对图像配准的影响,寻找其产生的原因,给出相应的解决方案。其目的在于,通过在光机装校阶段的图像配准,降低后续

数字图像配准的难度,提高图像配准的精度。同时,对图像融合系统的光机装校是否合格,提出一种合理的判断依据。

参考文献:

- [1] 倪平平. 红外与微光图像融合夜视系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2006: 1-2.
- [2] 王睿. 可见光与红外图像融合技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008: 9-10.
- [3] 王鲲鹏, 徐一丹, 于起峰. 红外与可见光图像配准方法分类及现状[J]. 红外技术, 2009, 31(5): 270-274.
- [4] 刘伟光, 周利华. 一种塔形分解的红外与可见光图像融合方法[J]. 红外技术, 2004, 26(4): 31-35.
- [5] 李勇量, 倪国强, 陈小梅. 采用可编程器件实现图像实时融合系统的控制[J]. 光电工程, 2003, 30(8): 11-14.
- [6] 陈刚, 汤彪等. 基于相关面特征的多子区异谱图像匹配算法[J]. 红外技术, 2012, 34(4): 229-236.