

激光照射系统远距离动态指示精度的测量方法

景文博*, 黄炳坤, 曹根铭

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了满足实际工程应用对激光照射系统动态指示精度的高精度测量需求,提出一种无参考距离的双透视校正激光远场动态指示精度测量方法。采用同轴异源的设计方法,用可见光和近红外相机分别对靶板和光斑进行成像,通过室内标定获得双成像系统的配准矩阵,在外场测试中根据靶板合作目标获得可见光图像透视校正矩阵,结合两个矩阵推导出双透视校正矩阵,实现激光动态指示精度的测量。室内标定和室外动态指示精度测量实验的结果表明:双成像系统的图像配准标准误差为 0.94 mm,动态指示精度的平均误差为 2.45 mm,标准差为 9.90 mm,可见所提系统可用于激光照射系统指示性能的室外考评。

关键词 测量; 双成像系统; 指示精度; 图像配准; 双透视校正

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0704003

1 引言

激光照射系统的指示精度是激光制导武器打击精度的一个重要影响因素^[1-2],其测量方法主要分为直接测量和间接测量两类。直接测量法利用分布均匀的激光探测器阵列直接测量远距离的激光光斑,然后通过数据采集与处理系统计算激光光斑的能量中心,实现指示精度测量,然而探测器阵列靶板的制作成本较高,限制了直接测量方法测量空间分辨率的提升。如邢晖等^[3]选用激光探测器阵列靶板对激光照射系统的指示精度进行测量。间接测量法采用光学成像与图像处理相结合的方法实现指示精度的测量。例如,单相机立靶成像测量方法^[4-5]一般选用对近红外光不十分敏感的可见光相机,通过增大曝光量与增益实现十字目标与激光光斑同时成像,从而降低图像的信噪比。当激光照射系统的照射目标为运动目标时,采集到的图像将存在较大的透视畸变,影响真实指示精度的计算,仅使用单相机无法很好地解决这个问题。相比于单相机立靶成像测量方法,通过可见光相机与近红外相机立靶同步成像的测量方法更具优势。将可见光相机用于运动靶板目

标检测,近红外相机则用于激光光斑采集,这种方式相比于单相机靶板和光斑同时成像的方法具有更高的成像质量。张少迪等^[6]对双相机立靶同步成像的测量方法进行综合研究,设计并加工了一个由红外发光二极管作为合作目标的配准靶板,用于双相机成像系统的图像配准。值得注意的是,对于长焦距的望远光学系统,要想获得良好的配准精度,需要有足够大的有效配准靶面,合理控制定位孔的位置精度,并降低外界环境对配准靶板的合作配准目标成像的干扰。此外,靶板目标不断运动,使得双相机成像系统在不同时刻采集的图像存在不同的大角度透视畸变,透视畸变校正的准确性将影响指示精度的最终测量结果。

本文提出一种无参考距离的双透视校正的双成像系统测量方法,对激光照射系统远场动态指示精度进行精确测量。采用同轴光学系统的可见光与近红外双相机分别对靶板和光斑进行成像,设计平行光管星点阵列分划板,构建可见光和近红外成像系统的配准模型,完成双成像系统图像的室内配准;室外实验中通过运动靶板上的合作目标,建立无参考距离的双透视校正理论模型,实现可见光靶板图像

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-09-10; 录用日期: 2021-09-22

基金项目: 科技部项目(2018YFB1107600)、吉林省科技厅项目(20160204009GX, 20170204014GX)、高等学校学科创新引智计划(111计划 D21009)

通信作者: *wenbojing@cust.edu.cn

与近红外激光光斑图像的透视畸变校正,并在校正后的图像中提取十字目标和激光光斑中心位置,经计算获得激光照射系统的远场动态指示精度。

2 测量原理

图 1(a)为由双成像系统、平面靶板、激光照射系统以及工控机等组成的激光远场动态指示精度测量系统示意图。在双成像系统中,利用可见光相机对平面靶板进行成像,利用近红外相机对激光光斑进行成像。图 1(b)为双成像系统的光学结构示意图。此外,在近红外相机前加入 1064 nm 的窄带滤光片,可以提高激光光斑图像的信噪比。在进行动态指示精度计算前,首先需要解决由机械结构以及相机差异造成双相机图像不重合的问题,即进行双成像系统的图像配准;其次,需要解决由平面靶板沿着靶道不断运动造成的不同时刻大角度透视畸变问题,即进行成像系统的透视畸变校正。

2.1 双成像系统图像配准

图 2(a)所示为双相机的成像模型,其中 $O_w X_w Y_w$ 、 $O_{ni} X_{ni} Y_{ni}$ 和 $O_{vis} X_{vis} Y_{vis}$ 分别表示双成像

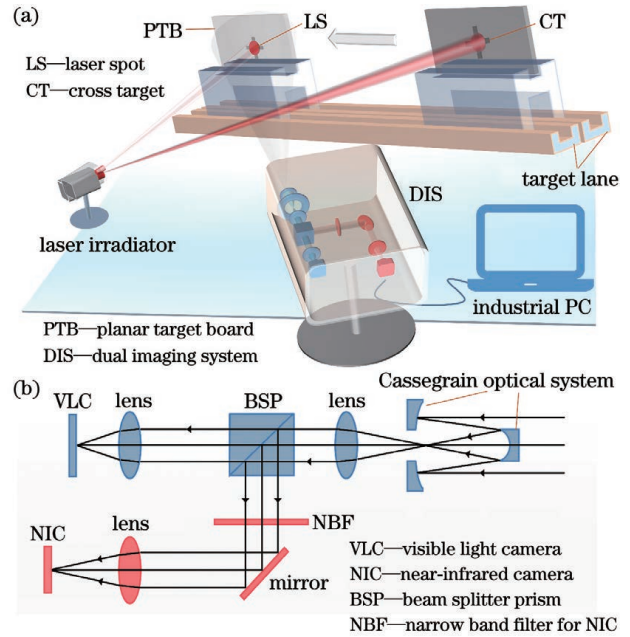


图 1 激光远场照射动态指示精度测量系统。(a)动态指示精度测量系统;(b)双成像系统光学结构

Fig. 1 Laser far-field dynamic indication accuracy measurement system. (a) Dynamic indication accuracy measurement system; (b) optical structure of dual imaging system

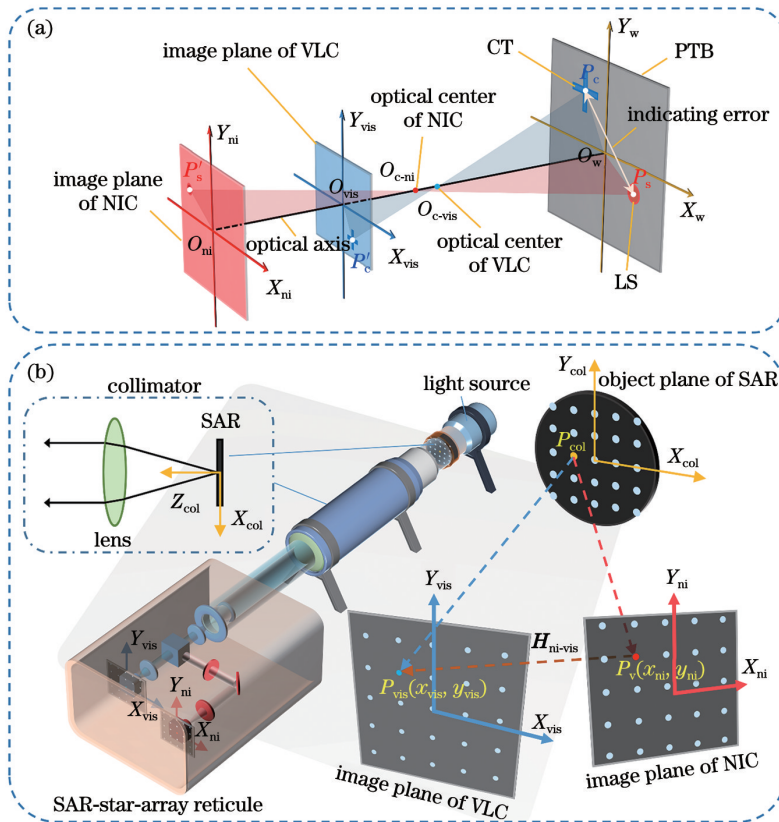


图 2 双成像系统的图像配准示意图。(a)双相机成像模型;(b)双成像系统图像配准

Fig. 2 Schematic of image registration of dual imaging system. (a) Dual camera imaging model; (b) image registration of dual imaging system

系统的物面坐标系、可见光相机的图像坐标系以及近红外相机的图像坐标系。\$P_c\$ 和 \$P'_c\$、\$P_s\$ 和 \$P'_s\$ 分别为十字目标和激光光斑的中心物点和中心像点。在双相机图像配准后,结合几何成像模型,可以通过十字目标和激光光斑中心像点之间的指示误差值,反向计算得到实际物理世界的指示误差值。

如图 2(b) 所示,为实现双成像系统的图像配准,简化图像配准过程,提高配准精度,使用位于平行光管分划板位置的星点阵列分划板代替实际配准靶面。该配准方法不受大气湍流等外界环境的影响,且不受实际配准靶面制作工艺的限制。其中 \$O_{col}X_{col}Y_{col}\$ 表示平行光管成像系统的物面坐标系。\$P_{vis}\$ 和 \$P_{ni}\$ 分别表示 \$O_{col}X_{col}Y_{col}\$ 的一个星点 \$P_{col}\$ 在可见光相机和近红外相机上的对应像点。\$(x_{vis}, y_{vis}, 1)^T\$ 和 \$(x_{ni}, y_{ni}, 1)^T\$ 分别表示 \$P_{vis}\$ 和 \$P_{ni}\$ 对应的齐次坐标。由于双成像系统的远距离成像目标均在同一观测平面上,因此满足无穷单应性关系^[7],即双成像系统的配准关系可以表示为

$$\lambda \begin{bmatrix} x_{vis} \\ y_{vis} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ni} \\ y_{ni} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{ni-vis} \begin{bmatrix} x_{ni} \\ y_{ni} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: \$\mathbf{H}_{ni-vis}\$ 表示双成像系统的配准矩阵; \$\lambda\$ 表示非零尺度因子。根据双成像系统采集的多配准点对,即可求解出双成像系统的配准矩阵。其中,成像系统的像素坐标与图像坐标的变换关系表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 & \mu_x u_0 \\ 0 & \mu_y & \mu_y v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: \$(x, y, 1)^T\$ 和 \$(u, v, 1)^T\$ 分别表示相机上某一点的齐次图像坐标与齐次像素坐标; \$\mu_x\$ 和 \$\mu_y\$ 分别表示相机水平和垂直方向的像元大小; \$(u_0, v_0)\$ 表示相机的像素中心坐标。

2.2 双透视校正

实际外场试验时,由于平面靶板沿着靶道不断运动,双相机的图像存在大角度的透视畸变,且运动过程中畸变程度不相同。如图 3 所示,计算的真正指示误差 \$l_p\$,需要在双成像系统图像配准的基础上,利用可见光图像的透视校正矩阵 \$\mathbf{T}_{vis}\$ 对同一图像坐标系下的十字目标和激光光斑图像进行相同的透视畸变校正。其中,近红外图像的双透视畸变校正表示为

$$\mathbf{T}_{ni} = \mathbf{T}_{vis} \mathbf{H}_{ni-vis} \circ \quad (3)$$

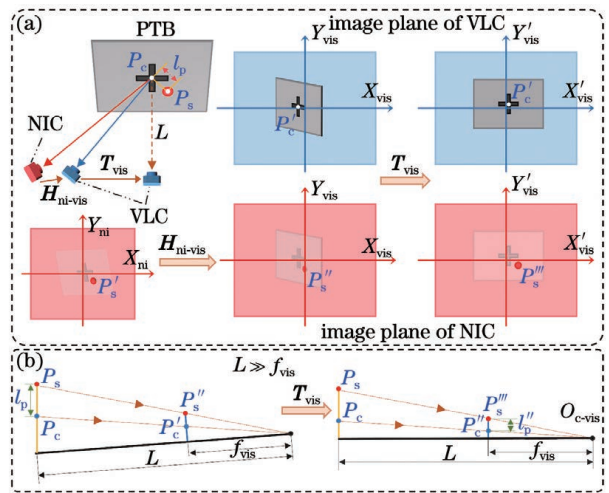


图 3 基于有参考距离的双透视校正。(a) 双成像系统的双透视校正示意图; (b) 经过图像配准后的双成像系统几何成像模型

Fig. 3 Dual-perspective correction with reference distance. (a) Dual-perspective correction of dual imaging system; (b) geometric imaging model of dual imaging system after image registration

通常情况下,真实的透视畸变校正需要测量相机光心到平面靶板的垂直距离 \$L\$,并结合可见光相机的焦距 \$f_{vis}\$ 进行有参考距离的透视畸变校正,此时的指示误差 \$l_p\$ 为

$$l_p = \frac{L}{f_{vis}} l'_p, \quad (4)$$

式中: \$l'_p\$ 表示经过配准和透视校正后十字目标和激光光斑在图像上的中心距离。由(4)式可知,每进行一次指示误差计算,均需要测量 \$L\$,但是远距离测距的精度难以保证。值得注意的是,由于平面靶板距离双成像系统足够远,在一定的运动范围内,十字目标和激光光斑在相机上的图像尺寸不会变化很大,也不会超过相机的图像尺寸,因此,在靶板上设计水平和垂直间距分别为 \$l'_h\$ 和 \$l'_v\$ 的 4 个合作目标点,如图 4 所示,将图像上无透视畸变的合作目标点的水平和垂直图像间距固定设置为 \$l''_h\$ 和 \$l''_v\$,可以得到 4 个有透视畸变和无透视畸变的理想合作目标的关系

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ x'_2 \\ y'_2 \\ x'_3 \\ y'_3 \\ x'_4 \\ y'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & \kappa_h l'_h \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \kappa_v l'_v \\ 1 & 0 & \kappa_h l'_h \\ 0 & 1 & \kappa_v l'_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

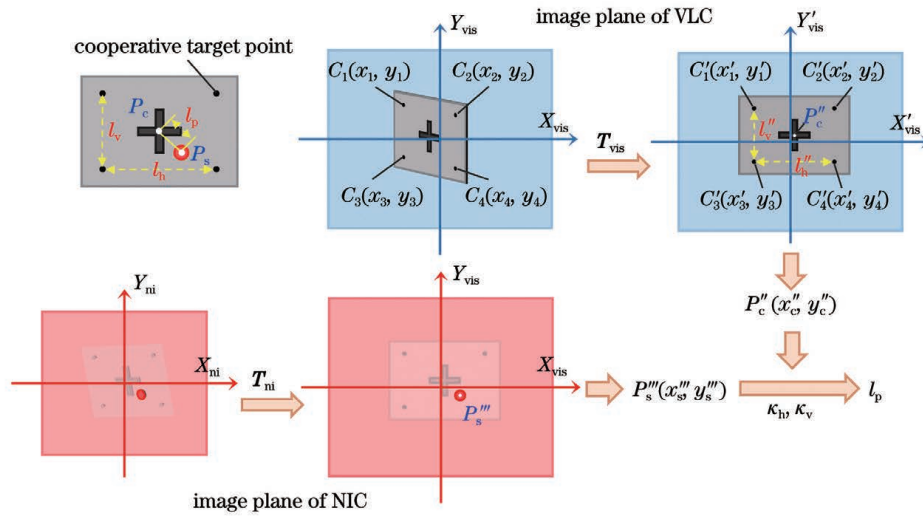


图 4 基于无参考距离的双透视校正及指示误差计算

Fig. 4 Dual-perspective correction without reference distance and calculation of indicating error

式中： $\kappa_h = \frac{l''_h}{l_h}$ 和 $\kappa_v = \frac{l''_v}{l_v}$ 分别表示无透视畸变图像与物面的水平和垂直比例因子。通过(5)式的 4 个合作目标点之间的关系，可以求解出可见光图像的无参考透视校正矩阵 T_{vis} ，最终的指示误差 l_p 可表示为

$$l_p = \sqrt{[\kappa_h(x'''_s - x''_c)]^2 + [\kappa_v(y'''_s - y''_c)]^2} = \sqrt{l_{px}^2 + l_{py}^2}, \quad (6)$$

式中： $l_{px} = x'''_s - x''_c$ ； $l_{py} = y'''_s - y''_c$ 。

3 实验与分析

本实验主要分为 3 个步骤：首先，在室内利用平行光管星点阵列分划板对双成像系统进行图像配准；然后，在室外通过靶板上的 4 个合作目标点以及已知位置的合作自检灯，采用无参考距离的双透视

校正方法，对测量系统自身的动态测量精度进行标定；最后，在室外进行实际的激光照射系统动态指示精度测试实验，验证测量系统的有效性。

3.1 室内双成像系统配准

基于 2.1 节提出的多配准点目标的图像配准模型，搭建主要由双相机成像系统、大口径平行光管、星点阵列分划板以及全光谱光源等组成的双成像系统室内图像配准实验系统，如图 5 所示。其中：可见光相机的等效焦距为 545 mm，图像分辨率为 1392 pixel × 1040 pixel，像元尺寸为 6.45 μm × 6.45 μm；近红外相机的等效焦距为 566 mm，图像分辨率为 640 pixel × 512 pixel，像元尺寸为 20 μm × 20 μm；平行光管的焦距为 1600 mm；星点阵列分划板的相邻星点间距为 2 mm ± 0.05 μm。

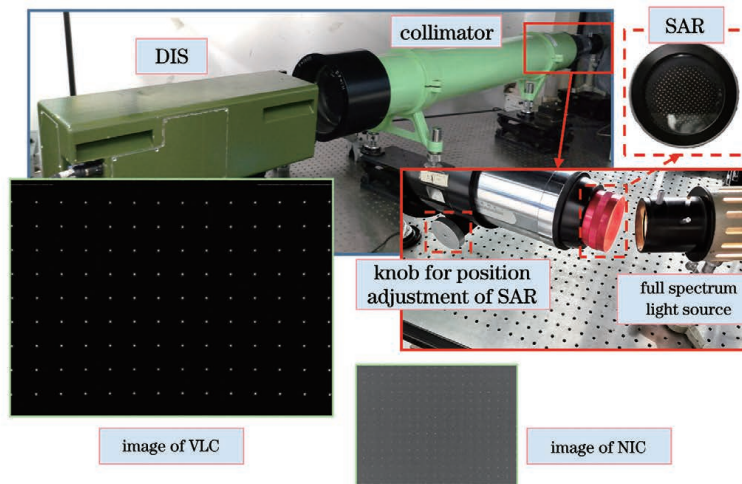


图 5 双成像系统图像配准实验设备

Fig. 5 Experimental setup for image registration of dual imaging system

为提高配准精度,在进行双成像系统图像配准前,首先采用张氏标定法^[8-9]进行相机标定,对两相机的图像进行光学畸变校正。图 6 所示为双成像系统的图像配准过程,为了提高图像的辨识度,对两相机采集到的图像分别进行不同的伪彩处理。双成像系统的单次图像配准误差定义为

$$E_{\text{ni-vis}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{\mu_{x_{\text{vis}}}^2 (u''_{i_{\text{ni}}} - u'_{i_{\text{vis}}})^2 + \mu_{y_{\text{vis}}}^2 (v''_{i_{\text{ni}}} - v'_{i_{\text{vis}}})^2}}{f_{\text{vis}}} L, \quad (7)$$

式中: $(u''_{i_{\text{ni}}}, v''_{i_{\text{ni}}})$ 和 $(u'_{i_{\text{vis}}}, v'_{i_{\text{vis}}})$ 分别表示图像配准后的近红外星点像素坐标和对应的可见光星点像素坐标; $\mu_{x_{\text{vis}}}$ 和 $\mu_{y_{\text{vis}}}$ 分别表示可见光相机水平和垂直方向的像元大小; n 表示配准点对的数量。在两相机的星点图像上选取 9×9 的配准点对(即配准对的数量 $n=81$)进行双成像系统图像配准。当 L 设置为 1 km, 实验次数为 10 次时, 配准标准差为 0.94 mm, 对应的像素标准差为 0.08 pixel, 验证了所提配准方法的有效性。

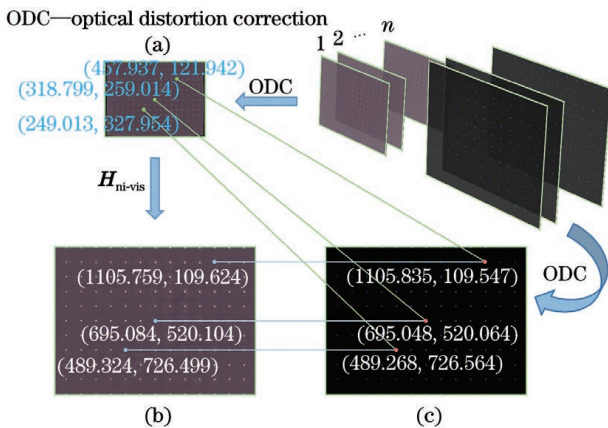


图 6 双成像系统图像配准过程。(a)光学畸变校正后的近红外星点图像;(b)图像配准后的近红外星点图像;(c)光学畸变校正后的可见光星点图像

Fig. 6 Image registration of dual imaging system. (a) Star image of near-infrared camera with ODC; (b) star image of near-infrared camera after image registration; (c) star image of visible light camera with ODC

3.2 室外动态测量精度标定

在对测量系统进行室外动态测量精度标定实验时,理论上应该使用激光照射器照射靶板上的某个与十字目标有一定距离的固定目标,以这个固定目标与靶板十字目标中心的实际距离差作为测量真值。但是,激光在传播过程中会受到大气湍流等因素的影响,激光照射器一般不可能准确照射在靶板的指定固定目标,从而引入许多不确定的随机测量

误差,影响真实测量值的获取。为了解决这些问题,得到准确的真实测量值,在靶板上的某个固定位置安装一个全光谱合作自检灯作为待检测的激光光斑,模拟指向不变的激光,减少随机测量误差的影响。基于 2.2 节提出的双透视校正模型,搭建主要由双相机成像系统、十字目标靶板、合作自检灯以及工控机等组成的室外动态测量精度标定实验系统。其主要步骤如下:

1) 在图 7(a)所示的十字目标靶板上安装确定位置的合作自检灯作为近红外相机的检测目标,4 个固定距离的合作目标点用于透视投影校正。

2) 将十字目标靶板放置在距双成像系统大约 1 km 的卡车上,靶板与地面垂直法线的夹角为 15° , 随卡车在指定靶道上运动,两相机经外触发进行同步拍摄,识别可见光靶板图像上的透视校正合作目标点,分别对可见光图像和近红外图像进行透视畸变校正。

3) 分别检测可见光图像上的十字目标中心和近红外图像上的合作自检灯中心,计算两者的中心指示偏差,将其与理论设计值进行比较,计算得到测量误差 l_{pe} , 并统计计算动态测量标准差 E_{pe} , 其计算方式为

$$\begin{cases} l_{\text{pe}}^i = \sqrt{(l_{\text{per}}^i)^2 + (l_{\text{pey}}^i)^2} \\ E_{\text{pe}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sqrt{(l_{\text{pe}}^i - l_{\text{pe}}^{\text{ave}})^2} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: m 表示拍摄的连续图像帧数; l_{pe}^i 表示计算的第 i 帧测量误差; $l_{\text{pe}}^{\text{ave}}$ 表示平均测量误差; l_{per}^i 和 l_{pey}^i 分别表示计算得到的第 i 帧图像在水平和垂直方向的测量误差。

实验过程中,结合几何成像公式,1 km 外的目标靶板图像上无透视畸变的合作目标点的水平和垂直图像间距固定为 2.18 mm 和 0.92 mm。对连续 340 帧图像进行动态测量精度统计计算,结果如图 7(e)所示。需要指出的是,实验过程中不考虑大气湍流的影响。可以看出,测量系统的水平和垂直测量误差主要在 $-20 \sim 20$ mm 范围内浮动,其最大测量误差值小于 28.28 mm, 对应到图像上的偏差为 2 pixel。连续 340 帧图像的平均测量误差为 2.45 mm, 标准差为 9.90 mm, 该结果与已有的研究成果^[9]基本一致, 因此所设计系统可用于激光照射系统指示性能的室外考评。

3.3 室外动态精度测试实验

在测量激光照射系统的室外动态指示精度时,激光照射器的相关参数如下:波长为 1064 nm, 单脉

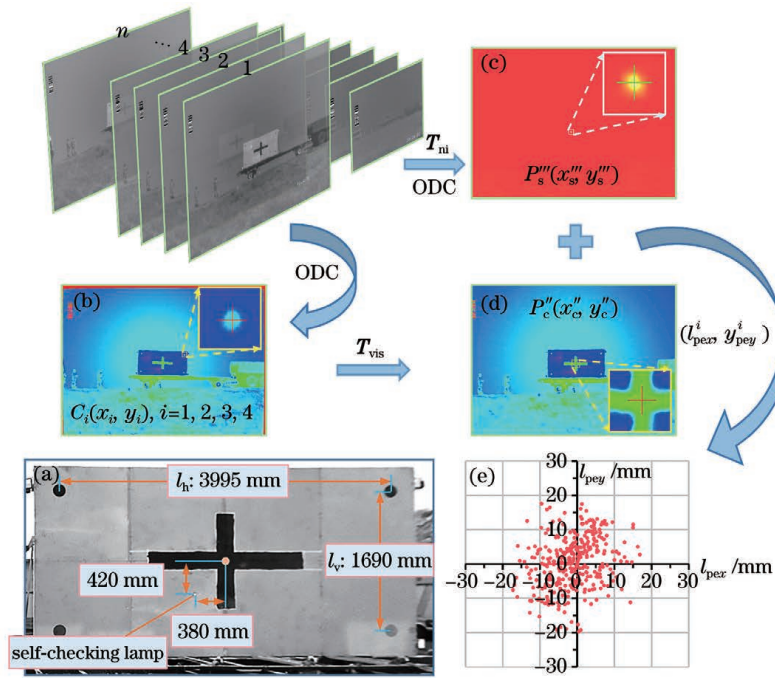


图 7 室外动态测量精度标定实验。(a) 十字目标靶板; (b) 光学畸变校正后的可见光图像; (c) 双透视投影校正后的近红外图像; (d) 透视投影校正后的可见光图像; (e) 动态测量精度标定结果

Fig. 7 Outdoor dynamic measurement accuracy calibration experiment. (a) Cross target board; (b) visible light image with optical distortion correction; (c) near-infrared image with dual-perspective correction; (d) visible light image with perspective correction; (e) calibration results of dynamic measurement accuracy

冲发射能量为 40~60 mJ, 脉冲频率约为 20 ps, 最长照射时间为 45 s, 束散角为 0.3 mrad, 传输距离约为 5 km。室外动态精度测试实验的过程与

3.2 节基本相同, 不同之处在于将合作自检灯换成实际的激光照射系统光斑, 即近红外相机的检测目标替换为激光光斑。图 8(b) 所示为经过双透视投

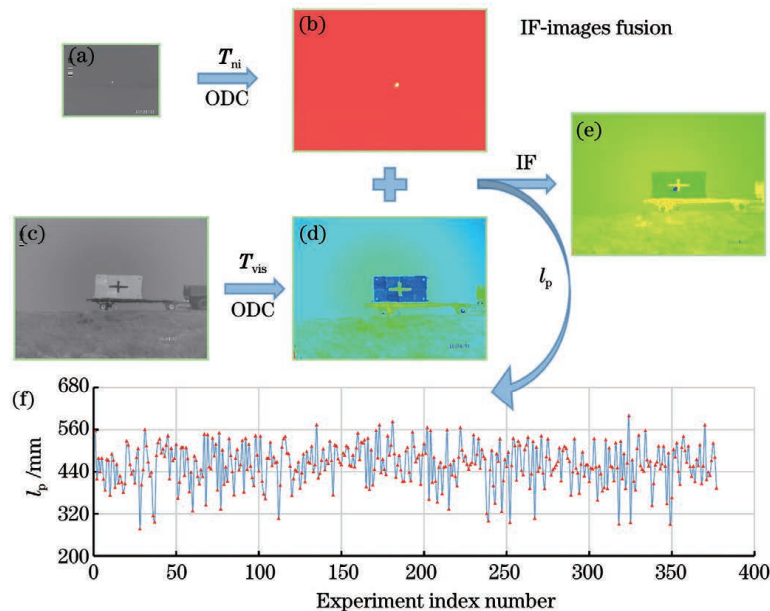


图 8 动态指示精度测试实验结果。(a) 近红外原图; (b) 双透视投影校正后的近红外图像; (c) 可见光原图; (d) 透视投影校正后的可见光图像; (e) 融合图像; (f) 动态指示精度测试结果

Fig. 8 Experimental results of dynamic indication accuracy of measurement system. (a) Original image of near-infrared camera; (b) near-infrared image with dual-perspective correction; (c) original image of visible light camera; (d) visible light image with perspective correction; (e) fusion image; (f) measurement results of dynamic indication accuracy

影校正后的近红外激光光斑图像,其信噪比良好。将两相机图像进行融合,结果如图 8(e)所示,可以清晰地看到,激光光斑位于靶板十字中心的左下方。图 8(f)所示为连续 376 帧图像的动态精度测试结果(注意:图像的 y 像素坐标轴方向为从上到下)。测量结果显示激光照射器的动态指示误差在 240~600 mm 范围内波动,其平均指示误差为 354.65 mm,标准差为 58.28 mm。上述的测量结果可以作为激光照射器性能、分析弹道命中精度和制导误差,以及进行实弹飞行试验故障诊断的参考信息。

4 结 论

提出一种无参考距离的双透视校正的激光远场动态指示精度双成像系统测量方法。利用平行光管以及位于平行光管分划板位置的星点阵列分划板,构建多配准点目标的图像配准理论模型,简化双成像系统的图像配准过程,提高了双相机成像系统的图像配准精度,其配准像素标准差为 0.08 pixel,对应成像距离为 1 km 的实际配准标准差为 0.94 mm。基于构建的无参考距离的双透视校正理论模型,利用十字目标靶板上的合作自检灯对测量系统的动态测量精度进行实际标定,数据结果表明,测量系统的平均测量误差为 2.45 mm,动态测量标准差为 9.90 mm,测量系统的精确度和稳定性良好。最后,搭建实际的激光照射系统进行动态指示精度测试实验,进一步验证了所提测量方法的有效性,该系统可用于激光照射系统指示性能的室外考评。

参 考 文 献

- [1] Zhang T F, Zhang H X, Hui J J, et al. A review on development and application of laser-guided weapons [J]. *Electronics Optics & Control*, 2015, 22(10): 62-67, 94.
张腾飞, 张合新, 惠俊军, 等. 激光制导武器发展及应用概述 [J]. *电光与控制*, 2015, 22(10): 62-67, 94.
- [2] Xu H L, Chen Z Q, Guo L E, et al. Analysis of the influence of target designation error on the laser homing guidance weapon hit accuracy [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(3): 44-46.
徐宏林, 陈战旗, 郭略, 等. 目标指示误差对激光制导武器命中精度的影响 [J]. *弹箭与制导学报*, 2010, 30(3): 44-46.
- [3] Xing H, Qu W D, Lei P, et al. Design for detector array target of laser far field detect system [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(7): 531-533.
邢晖, 曲卫东, 雷萍, 等. 激光远场直接探测系统探测器阵列靶板的设计 [J]. *激光与红外*, 2006, 36(7): 531-533.
- [4] Sun Q, Wu H, Song M, et al. A method for measuring the radiation accuracy of airborne electro optical stabilization system [J]. *Electronic Test*, 2016(16): 50-51.
孙强, 吴辉, 宋敏, 等. 论一种机载光电稳瞄系统照射精度的测量方法 [J]. *电子测试*, 2016(16): 50-51.
- [5] Huang J P, Wang Y J, Sun H H, et al. Precise position measuring system for laser spots [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 841-848.
黄继鹏, 王延杰, 孙宏海, 等. 激光光斑位置精确测量系统 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 841-848.
- [6] Zhang S D, Sun H H. High precision method of long-ranged laser spot position measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 0708003.
张少迪, 孙宏海. 远距离激光光斑位置高精度测量方法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0708003.
- [7] Yu J, Da F P. Calibration refinement for a fringe projection profilometry system based on plane homography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 140: 106525.
- [8] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [9] Jing W B, Huang B K, Liu J, et al. Calibration of different-source cameras for laser irradiation performance measurement [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(5): 924-931.
景文博, 黄炳坤, 刘健, 等. 激光照射性能测量中异源相机的标定方法 [J]. *兵工学报*, 2020, 41(5): 924-931.

Measuring Method for Long-Distance Dynamic Indication Accuracy of Laser Irradiation System

Jing Wenbo^{*}, Huang Bingkun, Cao Genming

School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract

Objective The indication accuracy of the laser irradiation system is an important factor influencing the strike accuracy of laser-guided weapons. When the irradiation target of the laser irradiation system is a moving target, the collected images possess a large perspective distortion, which affects the calculation of the real indication accuracy. Only a single camera cannot solve this problem well. Compared with the single-camera vertical target imaging measurement method, the measurement method that uses visible light and near-infrared cameras to simultaneously capture the vertical target has more advantages. The visible light and near-infrared cameras are used to detect the moving target and collect the laser spot, respectively. This method has higher imaging quality than the method of simultaneous imaging of the single-camera target and the spot. Note that to achieve good registration accuracy for a long focal length telephoto optical system, these conditions, including large effective registration target surface, controlled position accuracy of the positioning hole, and cooperation of the registration target plate must be considered. Also, the imaging of the registered target is susceptible to interference from the external environment. Simultaneously, due to the continuous movement of the target, the images collected by the dual-camera imaging system at different times have different perspective distortions. Furthermore, the accuracy of the perspective distortion correction affects the final measurement result of the indication accuracy. Thus, our proposed dual-imaging system measurement method without reference distance but with dual-perspective correction is useful for the measurement of the far-field dynamic indication accuracy of the laser irradiation system.

Methods Before calculating the dynamic indication accuracy, we solve the essential problem that the images of the dual cameras do not overlap due to the mechanical structure and difference of cameras, that is, the image registration of the dual-imaging system. The problem of large-angle perspective distortion at different moments caused by movement is to correct the perspective distortion of the imaging system. Here visible light and near-infrared dual cameras of the coaxial optical system are used for telephoto imaging. Also, we design and construct the collimator star point array reticle and registration model of the visible light and near-infrared imaging system, respectively, to complete the indoor registration of the dual-imaging system. For the outdoor experiment, a theoretical model of dual-perspective correction without reference distance is established using the cooperative target on the moving target board to realize the perspective distortion correction of the visible light target board and near-infrared laser spot images, and extract the cross target and laser spot from the corrected image. Next, the center position is calculated to obtain the far-field dynamic indication accuracy of the laser irradiation system.

Results and Discussions At 1 km imaging distance for the dual-imaging system and 10 experiments, the registration and corresponding pixel standard deviations are 0.94 mm and 0.08 pixel, respectively. In the outdoor dynamic measurement accuracy calibration experiment of the measurement system and combined with the geometric imaging formula, the horizontal and vertical image spacing of the cooperative target point without perspective distortion on the target board image 1 km away are 2.18 and 0.92 mm, respectively. Continuous 340 frames of images are used for dynamic measurement accuracy statistical calculation, as shown in Fig. 7(e). Results show that the horizontal and vertical measurement errors of the measurement system are mainly floating, and the maximum measurement error value is less than 28.28 mm, corresponding to the image. The deviation is 2 pixel. The average measurement error and standard deviation of the continuous 340 frame image pairs are 2.45 and 9.90 mm, respectively. The system can be effectively used in the outdoor evaluation of the indicating performance of the laser irradiation system. We note that the process of evaluating the outdoor dynamic indication accuracy of the laser irradiation system is the same as that of the outdoor dynamic measurement accuracy calibration experiment of the measurement system. However, a slight difference is that the cooperative self-inspection lamp becomes the actual laser irradiation system spot, that is, the detection target of the near-infrared camera is replaced and becomes the

laser spot. Fig. 8(b) shows the near-infrared laser spot image corrected by the dual perspective projection, and its signal-to-noise ratio is good. Fig. 8(e) shows the result of fusing images of the two cameras. Here, the laser spot is located at the lower left of the target board. Fig. 8(f) shows the dynamic accuracy test results of 376 consecutive frames of images (note: the direction of the y pixel coordinate axis of the image is from top to bottom). The measurement result data show that the dynamic indication error of the laser irradiator is floating with an average indication error and standard deviation of 354.65 and 58.28 mm, respectively.

Conclusions In this paper, we propose a laser far-field dynamic indication accuracy measurement method without reference distance using dual-perspective correction. First, we simplify the image registration process of the dual-imaging system and improve the image registration accuracy of the dual-camera imaging system for the registration standard deviation of 0.08 pixel. The actual registration standard deviation for a corresponding imaging distance at 1 km is 0.94 mm. Furthermore, we calibrate the dynamic measurement accuracy of the measurement system using a cooperative self-test lamp on the target plate by dual-perspective correction theoretical model without reference distance. The average measurement error of the measurement system is 2.45 mm with a dynamic measurement standard deviation of 9.90 mm. Finally, we perform practical dynamic indication accuracy tests of laser irradiation systems, to further verify the effectiveness of the proposed measurement method.

Key words measurement; dual-imaging system; indication accuracy; image registration; dual-perspective correction