

旋转双棱镜引起的成像畸变及其校正

周 远^{1,2} 范世珣² 刘光灿¹ 陈 英¹ 范大鹏²

¹长沙学院电子信息与电气工程系, 湖南 长沙 410022

²国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073

摘要 针对旋转双棱镜扫描成像中棱镜引起的成像畸变进行研究并通过逆向光线追迹对其实施校正。为估算畸变的特点和程度,根据视轴指向及视场尺寸确定棱镜转角和入射光方向,基于矢量形式的折射定律对视场跨度内的光线通过两棱镜实行追迹。以锗棱镜的红外成像及玻璃棱镜的可见光成像为例模拟成像变形。结果表明,图像沿着偏离系统轴的方向被压缩。偏转角越大,图像变形越突出。为校正成像畸变,从像点通过棱镜实行逆向光线追迹。针对可见光成像搭建旋转双棱镜扫描成像系统并分析其成像畸变,结果表明成像畸变的模拟预测与实验观测结果相符。无论针对模拟图像还是实际图像,逆向光线追迹都能有效地校正成像畸变,改善成像质量。该畸变分析及其校正方法对旋转双棱镜成像应用具有一定的参考价值。

关键词 成像系统; 畸变校正; 光线追迹; 旋转双棱镜; 扫描成像

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0911003

Image Distortions Caused by Rotational Double Prisms and Their Correction

Zhou Yuan^{1,2} Fan Shisun² Liu Guangcan¹ Chen Ying¹ Fan Dapeng²

¹Department of Electronic and Communication Engineering, Changsha University, Changsha, Hunan 410022, China

²College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract The image distortions caused by the prisms are investigated in rotational double prism scanning imaging and the inverse ray tracing is performed to correct the image distortions. To evaluate the characteristic and the extent of distortions, the rotation angles of prisms and the incident direction are obtained based on the direction of the line of sight and the size of the field of view. The rays from the field of view span are traced through the two prisms based on the vector form Snell's law. The image deformations are modeled as case examples for the infrared images of germanium prism system and the visible images of glass prism system. The result shows that the images are compressed along the deflection direction from the system axis and the deformations become more prominent with increase in deviation angle. To correct the distorted images, the rays from the image points are traced inversely through the prisms. A scanning imaging system for the visible band, based on the rotational double prism, is built and its image distortions are analyzed. The results show that the simulation predictions for image distortions are correspond with the experimental observations. The inverse ray tracing can effectively correct the distortion and fairly improve the quality of the distorted images for both simulation images and experimental images. The analysis results about distortion and its correction method have referenced value on the imaging applications of rotational double prism.

Key words imaging systems; distortion correction; ray tracing; rotational double prisms; scanning imaging

OCIS codes 110.2960; 110.3000; 080.1010; 090.1000; 100.2980; 230.5480

收稿日期: 2015-03-23; 收到修改稿日期: 2015-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(61405256)、中国博士后科学基金(2013M542464)

作者简介: 周 远(1976—),男,博士,副教授,主要从事光束指向及扫描成像方面的研究。E-mail:zhouyuan304@163.com

1 引 言

旋转双棱镜系统通过一对共轴独立旋转的棱镜可在较宽角度范围内实现光束的连续任意转向。在一些激光应用,如自由空间激光通信、光互连、激光雷达、光电对抗、激光武器、干涉测量中,旋转双棱镜可被用来实现激光光束指向控制及扫描^[1-4]。此外,在许多成像应用中,旋转双棱镜也可用于移动视轴(LOS),实现宽视野搜索探测或目标跟踪^[5-7]。在这些成像应用中,双棱镜的插入将不可避免地带来额外的成像色差及畸变像差。旋转双棱镜引起的色差已被许多研究者深入研究。通过设计衍射光学器件或者胶合不同折射系数和色散参数的棱镜材料可以有效地校正成像色差^[7-9]。然而,对旋转双棱镜引起的成像畸变研究很少见。由于物方视场(FOV)中的光线入射棱镜的角度不一致,故当旋转两个棱镜将成像视轴移动到一个给定的位置时,来自整个视场的光线不可能得到一致的偏转,最终产生成像畸变。对于较小角度的视轴偏转,成像畸变不明显。但当视轴偏转角度较大时,棱镜导致的成像畸变变得特别显著,最终可导致成像目标不可识别。

棱镜引起的成像畸变与镜头畸变不同。镜头畸变是相机镜头导致的畸变,可用成熟的标定模型来有效校正^[10-13]。对于旋转双棱镜引起的成像畸变,目前还没有完整成熟的模型来描述其特点,传统的畸变校正方法无法用来校正这种畸变。Lavigne 等^[6]针对成像镶嵌拼接应用提出了一种单映映射变换校正方法。该变换是一种线性校正方法,能实现实时快速畸变校正。然而,该方法只涉及图像像素点的映射变换,没考虑光在系统中的实际传播与成像,且其畸变校正精度不高。

本文通过研究不同视轴指向下两棱镜引起的畸变特性,利用逆光线追迹方法实现准确的畸变校正并针对可见光成像搭建旋转双棱镜扫描成像实验系统对研究结果及校正方法进行验证。对视场跨度内的光线通过两棱镜实施追迹,计算两棱镜引起的像点位置偏移以最终估算成像畸变。应用逆向光线追迹实现畸变校正。即对像面像点发出的光线逆向通过两棱镜实施追迹。对真实实验图像和理论分析模拟图像做畸变比较并验证畸变校正方法的可行性。由于主要关心旋转双棱镜引起的成像畸变,故研究中采用简单的针孔相机模型,即忽略成像中的镜头畸变。

2 旋转双棱镜引起的成像畸变

典型旋转双棱镜成像系统原理图如图 1 所示。两棱镜 Π_1 、 Π_2 的横截面为直角三角形,两直角边面相互平行且垂直于共同旋转轴 Z 轴。为实现一定空间角度内所有指向的全覆盖,两棱镜必须达到完全匹配^[1],故通常让两棱镜具有相同的折射系数和顶角,即 $n_1 = n_2 = n$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ 。两棱镜旋转角 θ_1 、 θ_2 以 x 轴为测量起始。视轴方向以极坐标中的偏转角 Φ 和方位角 Θ 描述。通过两棱镜的共轴独立旋转,可使指向视场中心的视轴在一个圆锥形空间角度区随意偏转,实现视场整体移动。

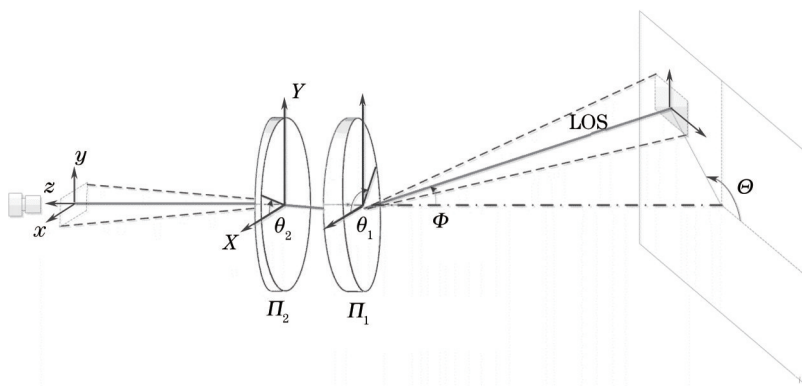


图 1 旋转双棱镜扫描成像系统原理图及其坐标系

Fig.1 Schematic and coordinate diagram for rotational-double-prism-based scanning imaging system

2.1 物方视场中入射光线描述

设定相机坐标系与世界坐标系重合。当成像视轴与系统光轴(即 Z 轴)一致时,物方视场中入射光线量能通过针孔相机模型无畸变地投影到理想像面上,这是一个透视投影过程,其入射光线矢量 $s_0^i = (K_0^i, L_0^i, M_0^i)$ 与其像平面上理想像点 $P_0 = (x, y)$ 之间的关系为

$$(K_0^i, L_0^i, M_0^i)^T = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}(x, y, f)^T, \quad (1)$$

$$(x, y, f)^T = \frac{f}{M_0^i}(K_0^i, L_0^i, M_0^i), \quad (2)$$

式中 f' 为镜头焦距。通过映射可将像面坐标 (x, y) 转为像素坐标 (u, v)

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/d_x & \gamma \\ 0 & 1/d_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中 d_x 和 d_y 分别为像素实际的宽度和高度, (u_0, v_0) 为光轴与像面交点的像素坐标, γ 描述了两成像坐标的歪斜偏离。

当旋转双棱镜将成像视轴转到任何别的指向位置, 描述为偏转角 Φ 和方位角 Θ , 光线矢量围绕单位矢量 $(u_x, u_y, u_z) = (-\sin \Theta, \cos \Theta, 0)$ 确定的轴旋转 Φ 。围绕任意轴的旋转可用 Rodrigues 旋转矩阵 M_1 有效描述^[14-15], 其转置矩阵为

$$M_1^T = A_1 + (I - A_1) \cdot \cos \Phi + B_1 \cdot \sin \Phi, \quad (4)$$

式中 I 为单位矩阵, A_1 和 B_1 表示为

$$A_1 = \begin{bmatrix} u_x^2 & u_x u_y & u_x u_z \\ u_y u_x & u_y^2 & u_y u_z \\ u_z u_x & u_z u_y & u_z^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & -u_z & u_y \\ u_z & 0 & -u_x \\ -u_y & u_x & 0 \end{bmatrix}.$$

则视场中的入射光线矢量可表示为

$$\hat{s}^i = \hat{s}_0^i \cdot M_1. \quad (6)$$

2.2 旋转双棱镜中的光线追迹

棱镜 II_1 第一个表面的法向单位矢量为表示为

$$\hat{n}_1 = (\sin \alpha_1 \cos \theta_1, \sin \alpha_1 \sin \theta_1, -\cos \alpha_1), \quad (7)$$

式中 θ_1 为棱镜 II_1 的旋转角。利用矢量形式折射定律可得折射光线矢量为^[16-17]

$$\hat{s}_1^r = \frac{1}{n_1} \left[\hat{s}^i - (\hat{s}^i \cdot \hat{n}_1) \hat{n}_1 \right] - \hat{n}_1 \sqrt{1 - \frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_1^2} (\hat{s}^i \cdot \hat{n}_1)^2}. \quad (8)$$

由于两棱镜内表面相互平行, 两棱镜间的间隙不改变光线的方向。故入射到棱镜 II_2 第二表面的光线矢量为

$$\hat{s}_2^i = \hat{s}_1^r. \quad (9)$$

其单位法向矢量为

$$\hat{n}_2 = (-\sin \alpha_2 \cos \theta_2, -\sin \alpha_2 \sin \theta_2, -\cos \alpha_2), \quad (10)$$

式中 θ_2 为棱镜 II_2 的旋转角。利用矢量形式的折射定律可得系统出射光线矢量 \hat{s}_2^r 的方向余弦 (K_2^r, L_2^r, M_2^r) 为

$$\hat{s}_2^r = (K_2^r, L_2^r, M_2^r) = n_2 \left[\hat{s}_2^i - (\hat{s}_2^i \cdot \hat{n}_2) \hat{n}_2 \right] - \hat{n}_2 \sqrt{1 - n_2^2 + n_2^2 (\hat{s}_2^i \cdot \hat{n}_2)^2}. \quad (11)$$

因此, 成像点最终坐标可表示为

$$x' = \frac{K_2^r}{M_2^r} f', \quad y' = \frac{L_2^r}{M_2^r} f'. \quad (12)$$

同样, 采用(3)式所列的成像转换可得最终的像素坐标 (u', v') 。

2.3 成像畸变分析

通过光线追迹可针对任意单个像素点计算两棱镜引起的像点位置偏移。针对任意给定的视轴指向, 应用文献[18]的方法可准确计算两棱镜的旋转角 θ_1 和 θ_2 。基于理想针孔模型, 可利用传感器像素数、像素尺寸

及视场尺寸(以水平视场 θ_h 表示)确定镜头焦距及每个像素点对应的像面坐标 (x, y) 。由(1)~(6)式可推导出像素点对应的物方视场光线矢量。由(7)~(12)式可得出最终的像素坐标 (u', v') 。通过从理想像素坐标 (u, v) 到最终实际像素坐标 (u', v') 的像素逐个映射,可对任何给定视轴指向展示整个视场内的图像变形。

以锩棱镜系统的红外成像为例模拟分析成像畸变特点。锩棱镜顶角为 $\alpha = 5^\circ$, 在长波红外波段(中心波长为 $10 \mu\text{m}$)其折射系数 $n = 4.00$ ^[19]。应用Li的方法求得系统的最大偏转角 $\Phi_m = 32.49^\circ$ 。针孔相机的横向视场值 $\theta_h = 5^\circ$, 传感器的像素数为 $480 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$ 。针对棋盘方格标靶,就不同的视轴方向模拟成像。图 2 展示了视轴偏转角 Φ 分别为 20° 和 Φ_m , 方位角 Θ 分别为 0° 、 45° 和 90° 时对应的成像畸变。其余象限视轴指向对应的成像畸变如图 2 所示的镜像。由图 2 可知,当视轴与系统光轴共线时(即 $\Phi = 0^\circ$),旋转双棱镜没有产生明显成像畸变。然而,在其他的视轴指向上,图像沿偏离光轴的方向呈现畸变压缩。随着视轴偏转角 Φ 的增大,压缩畸变变得更加突出。当视轴的偏转角 Φ 达到最大值 Φ_m 时,压缩畸变最明显。

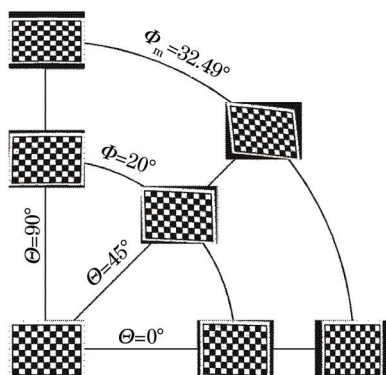


图 2 不同视轴方向对应的成像畸变

Fig.2 Image distortion for different light of sight directions

值得注意的是,棱镜引起的成像畸变实际上依赖于两棱镜的旋转角位置。然而,对于一个给定的视轴指向,存在两套棱镜旋转角的解。这两套旋转角解将导致不同的图像变形。图 3 针对锩棱镜系统比较了同一视轴指向下两套棱镜旋转角解对应的成像畸变。图 3(a)~(c)对应的视轴偏转角 Φ 均为 20° , 方位角分别为 0° 、 45° 和 90° 。其中顶行图和底行图分别为同一视轴指向下两套旋转角解所对应的成像图。可知两种情况下的畸变大体相同,即沿着偏离光轴的方向图像出现畸变压缩。

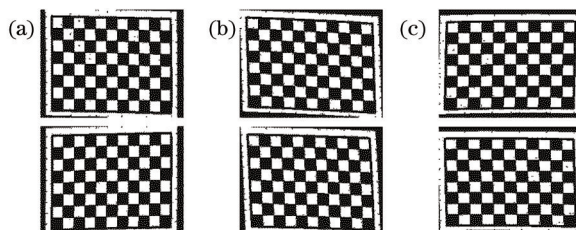


图 3 同一视轴指向下两套棱镜旋转角解对应的成像畸变比较

Fig.3 Image distortion at the same LOS position for the two sets of solutions to the rotational angles

图 4 比较了同一视轴指向下不同成像视场所对应的成像畸变。视轴的偏转角 $\Phi = 30^\circ$, 方位角 $\Theta = 45^\circ$, 成像视场 θ_h 分别为 5° 、 15° 和 25° 。对于小视场[图 4(a)],变形图像呈现出简单的平行四边形。然而,随着成像视场的增大,图形边缘变得弯曲[图 4(b)和图 4(c)]。

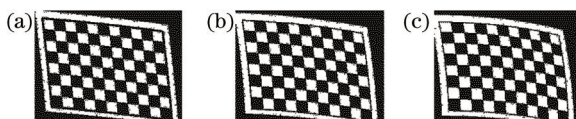


图 4 同一视轴指向下不同成像视场所对应的成像畸变

Fig.4 Image distortion at the same LOS position for different FOVs

为定量描述旋转双棱镜引起的成像畸变程度,分析实际像点位置与对应理想像点位置之间的均方根差

(RMSE),其表达式为

$$x_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N [(u' - u)^2 + (v' - v)^2]}, \quad (13)$$

式中 N 为传感器的像素数。图 5 针对锗棱镜系统展示了 RMSE 随视轴偏转角 Φ 及视场的改变。其中视轴的方位角 Θ 分别为 0° 、 45° 、 90° , 水平视场 θ_h 分别为 5° 和 15° 。可见 RMSE 随偏转角 Φ 增加而增加, 同时也依赖于方位角及成像视场。

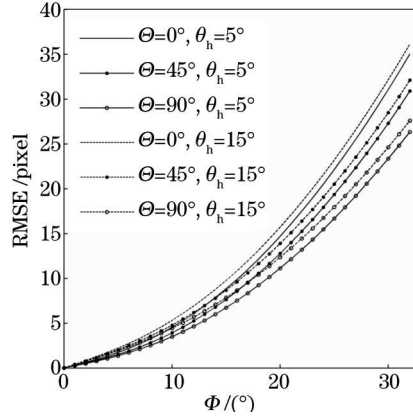


图 5 RMSE 随视轴偏转角 Φ 的改变

Fig.5 Variations of RMSE as a function of LOS altitude Φ

3 逆光线追迹实现成像畸变校正

根据光线可逆定律, 可通过反向光线追迹来校正旋转双棱镜引起的成像畸变。从成像面上的像素点投射光线, 反向追迹光线通过系统, 投射出射光线在一虚拟屏上得到畸变校正的图像。从成像面上像素点投射光线的光线矢量可表示为

$$(\hat{s}^i)_{\text{Back}} = -\hat{s}_0^i. \quad (14)$$

棱镜 Π_2 的第二表面及棱镜 Π_1 的第一表面的法向单位矢量为

$$(\hat{n}_2)_{\text{Back}} = -\hat{n}_2, (\hat{n}_1)_{\text{Back}} = -\hat{n}_1. \quad (15)$$

基于矢量形式的折射定律反向执行光线追迹, 棱镜 Π_2 的第二表面上的折射光线矢量为

$$(\hat{s}_2^r)_{\text{Back}} = \frac{1}{n_2} \left\{ (\hat{s}^i)_{\text{Back}} - \left[(\hat{s}^i)_{\text{Back}} \cdot (\hat{n}_2)_{\text{Back}} \right] (\hat{n}_2)_{\text{Back}} \right\} - (\hat{n}_2)_{\text{Back}} \sqrt{1 - \frac{1}{n_2^2} + \frac{1}{n_2^2} \left[(\hat{s}^i)_{\text{Back}} \cdot (\hat{n}_2)_{\text{Back}} \right]^2}. \quad (16)$$

同样, 棱镜 Π_1 的第一表面的入射光线可以表示为

$$(\hat{s}_1^i)_{\text{Back}} = (\hat{s}_2^r)_{\text{Back}}. \quad (17)$$

基于矢量形式的折射定律可得从棱镜 Π_1 的第一表面出射的光线可表示为

$$(\hat{s}_1^r)_{\text{Back}} = n_1 \left\{ (\hat{s}_1^i)_{\text{Back}} - \left[(\hat{s}_1^i)_{\text{Back}} \cdot (\hat{n}_1)_{\text{Back}} \right] (\hat{n}_1)_{\text{Back}} \right\} - (\hat{n}_1)_{\text{Back}} \sqrt{1 - n_1^2 + n_1^2 \left[(\hat{s}_1^i)_{\text{Back}} \cdot (\hat{n}_1)_{\text{Back}} \right]^2}. \quad (18)$$

为了得到校正的图像, 需要以单位矢量 $(\sin \Theta, -\cos \Theta, 0)$ 为轴将出射光线旋转 Φ 。这样成像视轴被旋转到与系统光轴共线, 便于得到最终的像素校正位置。明显可知, 该旋转矩阵 M_2 为矩阵 M_1 的逆矩阵, 其转置矩阵可表示为

$$M_2^T = A_1 + (I - A_1) \cdot \cos \Phi - B_1 \cdot \sin \Phi. \quad (19)$$

出射光线矢量分量可表示为

$$\left[(K_1^r)_{\text{Back}}, (L_1^r)_{\text{Back}}, (M_1^r)_{\text{Back}} \right] = (\hat{s}_1^r)_{\text{Back}} \cdot M_2. \quad (20)$$

故校正的像点坐标可表示为

$$(x')_{\text{Back}} = \frac{(K_1')_{\text{Back}}}{(M_1')_{\text{Back}}} f', (y')_{\text{Back}} = \frac{(L_1')_{\text{Back}}}{(M_1')_{\text{Back}}} f'. \quad (21)$$

对于畸变图像上任何单个的像素点,由(1)式和(14)式得到反向投射光线的光线矢量,通过(15)~(21)式可计算出每个坐标点校正的坐标位置,采用(3)式所列的成像转换可得校正的像素坐标 $[(u')_{\text{Back}}, (v')_{\text{Back}}]$ 。因此,在实际操作时,通过逐个像素点的映射对应可实现成像畸变的校正。为校正一个给定的图像,仅需提供棱镜的旋转角、相机的视场及系统元件参数,包括顶角及折射系数。

针对以上锩棱镜系统红外成像不同视轴指向下模拟的畸变图像,应用反向追迹方法分别逐个校正图像,结果如图6所示。图6(a)为最大视轴偏转角下方位角分别为 0° 、 45° 和 90° 时的畸变图像,图6(b)为对应的校正图像。可以看出,逆向光线追迹法能准确地校正棱镜引起的成像畸变,有效地改善成像质量。校正的图像与理想未畸变的图像一致。然而,应该注意的是,反向的像素-像素映射填充拓宽了图像的尺寸(或成像视场)。由于图像被压缩,校正图像里的一些像素点没被相应地填充。因此,在实际图像校正中,可用插值来正确地扩展畸变图像,实施反向像素填充,将校正的图像裁剪到最初的尺寸。

应该提出,逆向光线追迹方法仅能校正棱镜引起的成像畸变,因此,在实施反向光线追迹校正前,需先标定相机并校正镜头畸变。

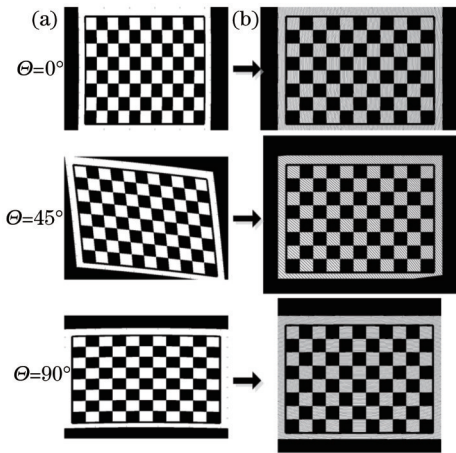


图6 逆向光线追迹法对不同视轴指向下的畸变图像校正的结果
Fig.6 Correction results using inverse ray tracing for different LOS positions

4 实验验证和分析

为验证以上成像畸变分析及其逆光线追迹校正方法,利用设计的旋转双棱镜成像系统在不同的视轴指向采集了系列图像并用逆光线追迹方法对这些真实畸变图像实施校正。实验方案、实验系统场景照片分别如图7(a)、7(b)所示。摄像机安装在旋转双棱镜后面并调整使其视轴与棱镜旋转轴共线。旋转两棱镜,可实现视轴的扫描。在实验中,仔细调节两棱镜方位使成像视轴偏向最大,并让视轴分别偏向最左边和最右边,以便捕获左侧和右侧视野角度。棋盘状目标靶包含 21×13 个黑白相间的正方形图样,仔细调整其方位使其余视轴方向垂直。电荷耦合器件(CCD)摄像机传感器像素数为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。调节镜头视场,使水平视场值 $\theta_h = 38^\circ$ 。图7(c)展示了旋转双棱镜扫描系统的结构。系统由两相同的K9玻璃棱镜组成,棱镜顶角 $\alpha = 10^\circ$ 。对于 $\lambda = 555 \text{ nm}$ 的成像波长,其折射系数 $n = 1.5187$ 。利用文献[18]方法容易算出该系统对视轴的最大偏转角 $\Phi_m = 10.66^\circ$ 。采用RENISHAW编码器来测量棱镜旋转角度,该编码器每旋转一周可产生720000个脉冲,故其测量精度可达 0.0005° 。为减小传动误差,棱镜旋转采用力矩电机直驱。为精确控制棱镜的方位,采用闭环实现伺服控制。

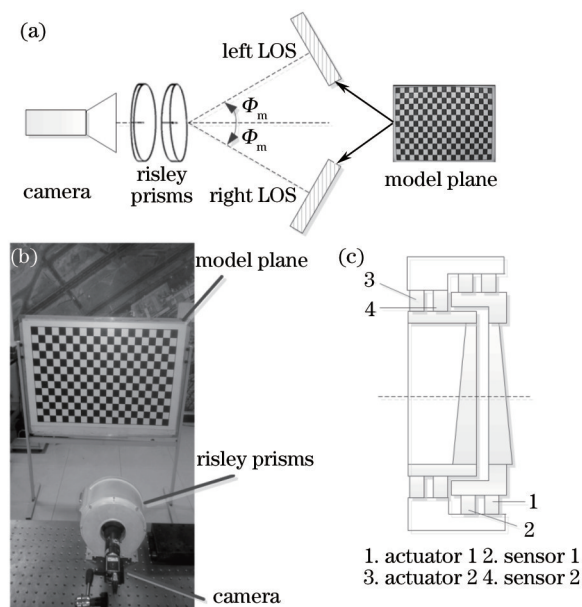


图 7 旋转双棱镜成像系统示意图

Fig.7 Schematic diagram of the rotational double prism imaging system

由于采用的成像视场较大,实验中摄像机镜头将产生径向畸变。为单独分析棱镜产生的畸变特征,需要将该镜头畸变尽量校正。采用文献[20]方法估测了摄像机参数及径向畸变参数,将棋盘目标靶板放置在系统左侧和右侧并调整其方位使其与成像视轴垂直。根据各自视轴指向反算出两棱镜的旋转角度并按此控制好棱镜的方位,获取相应的图像。利用文献[20]法针对获得的图像进行镜头畸变校正,得到镜头畸变校正图像,该图像能体现棱镜引起的成像畸变。

图 8 展示了获得的原始图像、摄像机镜头畸变校正后的图像及校正棱镜引起的畸变后的图像。针对实验系统的具体参数,用光线追迹方法模拟棱镜引起的成像畸变,其结果如图 8(a)所示。应用文献[20]方法对原始图像进行镜头畸变校正,结果如图 8(b)所示。应用逆光线追迹校正棱镜引起的畸变,结果如图 8(c)所示。比较图 8(a)和 8(b)可知,用光线追迹的方法模拟得出的棱镜畸变与实验观测到的畸变其形状特点符合较好。两者间的小差异来源于实验误差,如目标靶板的对准误差、旋转双棱镜的装调误差等。与图 8(b)比较,图 8(c)中展示的图像畸变明显减小,证明通过逆光线追迹校正棱镜引起的误差是可行的。在图 8 中,左侧和右侧获取的图像分别被展示第一行和第二行。

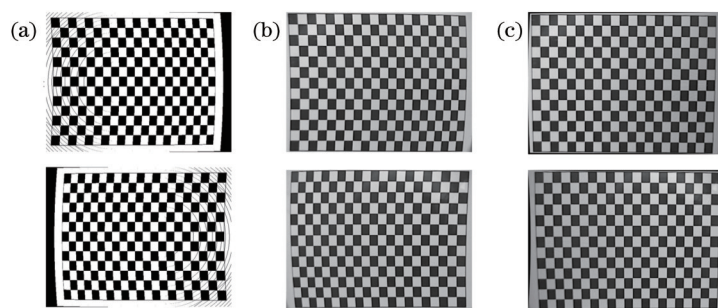


图 8 棱镜引起的成像畸变及其校正

Fig.8 Image distortions derived from the prisms and their correction

虽然实验针对可见光成像,但其结果也同样适用于红外成像。由于红外材料的折射系数可以达到更大,因此可针对红外成像实现更大的成像视轴偏转。因此与可见光成像相比,基于旋转双棱镜实现大角度红外扫描成像将引起更突出的成像畸变。而这种畸变,可用逆光线追迹法进行有效校正。

与 Lavigne^[6]的单映映射变换校正方法相比,逆光线追迹法考虑了棱镜方位及结构参数的影响,故其有更明确的物理含义且校正结果更加准确。应注意的是,该校正方法是非线性的,因此在实际畸变校正中,该方法需要一定的计算时间。

5 结 论

针对物方视场内的入射光线通过旋转双棱镜系统进行了光线追迹,计算得出最终模拟成像图像并基于此分析棱镜引起的成像畸变。提出逆光线追迹方法并对棱镜畸变进行校正。搭建可见光旋转双棱镜扫描成像系统并利用其在不同视轴指向下采集成像图,比较验证畸变分析及其校正方法的正确性。结果表明,沿着偏离光轴的方向,图像被压缩。随着视轴偏转角度的增大,图像压缩变形变得更突出。模拟得到的畸变图像与实验得到的真实图像其畸变特性很吻合。对模拟和真实畸变图像校正的结果表明逆光线追迹方法可有效地校正棱镜引起的成像畸变,改善成像质量。逆光线追迹畸变校正方法考虑了棱镜参数及方位影响,校正结果准确。畸变分析及逆光线追迹校正方法能为旋转双棱镜成像应用提供方法指引。

参 考 文 献

- 1 Sanchez M, Gutow D. Control laws for a three-element Risley prism optical beam pointer[J]. Proc SPIE, 2006, 6304: 630403.
- 2 Garcia T G, Flores J L, Alvarez B J. Alignment of vectorial shearing interferometer using a simple recognition algorithm[J]. Proc SPIE, 2008, 7073: 707324.
- 3 Degnan J, Machan R, Leventhal E, *et al.*. Inflight performance of a second generation, photon counting, 3D imaging lidar[J]. Proc SPIE, 2008, 6950: 695007.
- 4 Zhang Yong, Cao Xibin, Wu Long, *et al.*. Experimental research on small scale Risley prism scanning imaging laser radar system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0814001.
张 勇, 曹喜滨, 吴 龙, 等. 小面阵块扫描激光成像系统实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0814001.
- 5 Takata Y, Torigoe T, Kobayashi E, *et al.*. Distortion correction of wedge prism 3D endoscopic images[C]. IFMBE Proceeding, 2008, 19:750-753.
- 6 Lavigne V, Ricard B. Fast Risley prisms camera steering system: Calibration and image distortions correction through the use of a three-dimensional refraction model[J]. Opt Eng, 2007, 46(4): 043201.
- 7 Bos P J, Garcia H, Sergan V. Wide-angle achromatic prism beam steering for infrared countermeasures and imaging applications: Solving the singularity problem in the two-prism design[J]. Opt Eng, 2007, 46(11): 113001.
- 8 Lacoursiere J, Doucet M, Curatu E O, *et al.*. Large-deviation achromatic Risley prisms pointing systems[J]. Proc SPIE, 2002, 4773: 123-131.
- 9 Florea C, Sanghera J, Aggarwal I. Broadband beam steering using chalcogenide-based Risley prisms[J]. Opt Eng, 2011, 50(3): 033001.
- 10 Brown D C. Close-range camera calibration[J]. Photogramm Eng, 1971, 37(8): 855-866.
- 11 Faig W. Calibration of close-range photogrammetry systems: Mathematical formulation[J]. Photogramm Eng, 1975, 41(12): 1479-1486.
- 12 Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE J Robotics Automat, 1987, 3(4): 323-344.
- 13 Xu Song, Sun Xiuxia, Liu Xi, *et al.*. Geometry method of camera self-calibration based on a rectangle[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1115002.
徐 嵩, 孙秀霞, 刘 希, 等. 基于矩形的摄像机自标定几何方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1115002.
- 14 Mebius J E. Derivation of the Euler-Rodrigues formula for three-dimensional rotations from the general formula for four-dimensional rotations[J]. General Mathematics, 2007: 0701759.
- 15 Koks D. Explorations in Mathematical Physics [M]. New York: Springer, 2006, 147.
- 16 Born M, Wolf E. Principles of Optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- 17 Amirault C T, Dimarzio C A. Precision pointing using a dual-wedge scanner[J]. Appl Opt. 1985, 24(9): 1302-1308.
- 18 Li Y J. Closed form analytical inverse solutions for Risley-prism-based beam steering systems in different configurations[J]. Appl Opt, 2011, 50(22): 4302-4309.
- 19 Fu Qiang, Zhang Xin. Materials choose for mid-wave/long-wave dual-waveband infrared optics[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0208003.
付 强, 张 新. 中波/长波双色红外光学系统材料选择[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0208003.
- 20 Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.