

旋转双光楔系统用于像移补偿的技术研究

赵军丽^{1,2}, 吴易明^{1,3}, 高立民¹, 张恒³, 尹逊龙³, 姚震^{1,2}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 西安中科光电精密工程有限公司, 陕西 西安 710119)

摘要: 摄像机在曝光时间内与目标的相对运动会产生像质模糊, 且速高比(或速距比)越大, 模糊状态越严重。目前, 光学式像移补偿方法主要采用反射镜元件, 针对其存在像旋校正机构复杂、运动定位控制难度大、摆扫式易产生光学振荡等缺点, 提出了应用旋转双光楔系统进行像移补偿的新方法。建立了双光楔系统的动态作用矩阵数学模型, 分析了光楔组件在各种独立运动状态下的出射光矢量轨迹, 进行了软件仿真。根据实际的像移补偿需求, 给出了双光楔系统的设计结果及控制方法。仿真和分析结果表明: 双光楔系统具有结构紧凑、控制方法简单、运动平稳、补偿能力强等显著优点, 对于大速高比(或速距比)的应用场合具有重要的实际意义。

关键词: 旋转双光楔; 动态光学矩阵; 像移补偿; 控制方法

中图分类号: TH745 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1506-06

Technology research on image motion compensation of the rotating double optical wedge

Zhao Junli^{1,2}, Wu Yiming^{1,3}, Gao Limin¹, Zhang Heng³, Yin Xunlong³, Yao Zhen^{1,2}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Xi'an CAS Photoelectric Precision Engineering Co., Ltd., Xi'an 710119, China)

Abstract: Image blur dues to the relative motion with the target in the camera exposure time, it would be worse while the ratio of speed and height (or speed and distance) increased. At present, the optical image motion compensation method bases mainly on the reflective element. In order to overcome the disadvantages of complicated image rotation corrected mechanism, difficult position location and optical vibration occurred by the swing scanning, a new method based on rotating double optical wedge was proposed, the dynamic working matrix was built, the emergent light vector's trajectory was analyzed and simulated. According to the actual image motion compensation demand, the double optical wedge designing result and controlling method were presented. Through analysis and simulation, the results show that this method has significant advantages such as compact structure, easy controlling method, stable motion state, high compensation capacity, etc. It has very important practical value for the occasions of

收稿日期: 2014-09-12; 修订日期: 2014-10-15

作者简介: 赵军丽(1984-), 女, 博士生, 主要从事光电瞄准、几何量测量方面的研究。Email: zhao.junli@163.com

导师简介: 吴易明(1975-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电精密测量方面的研究。Email: wym34@opt.ac.cn

the greater ratio of speed and height (or speed and distance).

Key words: rotating double optical wedge; dynamic optical matrix; image motion compensation; controlling method

0 引言

在航空、航天领域,飞行器搭载的光学成像设备在曝光时间内因运动姿态的变化(如平飞、俯仰、偏航和滚转运动等)使得摄像机与地面目标因相对运动而产生成像模糊^[1],且曝光时间越长,目标速高比越大,问题越严重。然而在一定的光照条件下,相机曝光时间不可能无限制缩短,目前技术上通过曝光时间内保持摄像机光轴不变的方法是进行像移补偿。主要采用机械式补偿、光学式补偿、电子式补偿^[2]、软件式补偿^[3]四种方法来改善画质。机械式补偿和电子式补偿主要是从相机角度,分别通过感光元件的机械移动、电荷转移的方式进行补偿,前者结构复杂,控制难度大,后者国内技术发展不成熟,研制周期长,成本高,而国外现有的电子式补偿相机向国内还处于禁运的状态;软件式补偿是一种后处理方法,是对既定模糊图像像质的改善,能力非常有限;光学式补偿目前主要应用反射平面镜进行摆扫运动,控制难度大,尤其是光学振荡消除困难。

在几何光学领域,能够实现像偏转的元件主要分为反射式和折射式,反射平面镜为前者。折射式棱镜^[4]中,楔镜在两折射面之间小夹角时产生的色散角影响非常小,能够在绕轴旋转时对光路实现预定的偏向、旋转,通常都用于补偿器上。近年来,出现了旋转双光楔系统用于大范围扫描^[5]、激光加工^[6]、光轴校正^[7]等领域的相关报道,在此启发下,文中将旋转双光楔系统用于像移补偿,并对其关键技术进行分析计算。

1 旋转双光楔系统的静态作用矩阵

笛卡尔坐标系下光学元件的静态作用矩阵^[8] R 为:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(x, \hat{x}') & \cos(x, \hat{y}') & \cos(x, \hat{z}') \\ \cos(y, \hat{x}') & \cos(y, \hat{y}') & \cos(y, \hat{z}') \\ \cos(z, \hat{x}') & \cos(z, \hat{y}') & \cos(z, \hat{z}') \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: m, \hat{m}' (取 x, y, z)表示入射光坐标系与出射光坐

标系中相应坐标轴的偏转角,因为余弦在第一象限和第四象限取值均为正,所以无需定义角度方向。需要指出的是,光学元件的静态作用矩阵一定是建立在既定坐标系的基础上,一旦光学元件的固联坐标系发生改变,作用矩阵也要相应进行变换。

入射光矢量用 In 表示,出射光矢量用 Out 表示。根据光学元件的静态作用矩阵,出射光矢量与入射光矢量的关系为:

$$Out = RIn \quad (2)$$

图 1 为双光楔系统的原理图。设双光楔系统中第一光楔、第二光楔的楔角分别为 α_1, α_2 ,材料折射率分别为 n_1, n_2 。初始状态(静态)下,第一光楔、第二光楔的光轴截面均与 XOZ 平面重合,且沿 X 轴负方向厚度递增。 γ 为入射光线与 X 轴的夹角,图 1 中所示方向为正。 δ 为出射光线与 X 轴的夹角。

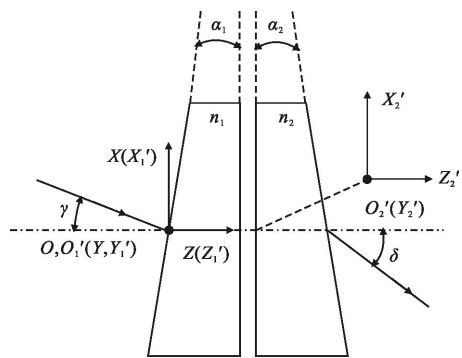


图 1 双光楔系统原理图

Fig.1 Principle of rotating double optical wedge

为了获得静态双光楔系统的作用矩阵,首先建立双光楔系统的成像坐标系 $OXYZ$ 。其中,坐标原点 O 位于光学系统光轴上,与第一光楔第一斜面相交; Z 轴为光轴,指向像方为正; X 轴为大地竖轴,竖直向上为正; Y 轴遵循右手螺旋法则,在原理图中为垂直纸面向上。

在此种建模方式下,单光楔的功能为对入射光矢量产生绕 Y 轴顺时针角量为 $\delta_i(i=1,2)$ 的偏转,静态单光楔作用矩阵 R_{xi} 为:

$$R_{X_i} = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & 0 & -\sin \delta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \delta_i & 0 & \cos \delta_i \end{bmatrix}, i=1, 2 \quad (3)$$

式中: $\delta_i = (n_i - 1)\alpha_i$, $i=1, 2$, 脚标 X 表示是用楔镜的拼音首字母。

静态双光楔的作用矩阵 R 为:

$$R_X = R_{X_2} R_{X_1} \quad (4)$$

相应地出射光矢量计算公式为:

$$Out(\gamma) = R_{X_2} R_{X_1} In = \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & 0 & -\sin \delta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \delta_2 & 0 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & 0 & -\sin \delta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \delta_1 & 0 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} In \quad (5)$$

式中: $In = [-\sin(\gamma) \ 0 \ \cos(\gamma)]^T$ 。

公式(5)表征了静态下,双光楔系统对入射光线进行绕 Y 轴顺时针 δ_1 的偏转后,在此基础上再绕 Y 轴顺时针进行 δ_2 的偏转。

当 $\delta_1 = \delta_2$ 时,公式(4)可以简化为:

$$R_X = \begin{bmatrix} \cos 2\delta_1 & 0 & -\sin 2\delta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\delta_1 & 0 & \cos 2\delta_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

即双光楔系统使入射光线产生绕 Y 轴顺时针角量为 $2\delta_1$ 的偏转。

2 旋转双光楔系统的动态作用矩阵

当光楔在装配过程中存在误差,或者主动旋转后,光楔的瞬时状态不再是静态,系统的作用矩阵会发生变化,这种变化包含了光楔的内部参数,同时与外部产生的旋转角度矢量相关(存在方向性),称为动态作用矩阵。

首先建立第一光楔、第二光楔的固联坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 、 $O_2X_2Y_2Z_2$ 。在初始状态,光楔未发生任何旋转,两个坐标系处于原理图中所示位置,此时 $O_1X_1Y_1Z_1$ 与 $OXYZ$ 重合, $O_2X_2Y_2Z_2$ 由 $OXYZ$ 沿 Z 轴平移得到。

旋转双光楔系统的特点在于每个光楔在一定的控制技术下可以独立绕 Z 轴以 ω_1 、 ω_2 的角速度旋转,约定逆时针转动为正向转动。某一时刻 t ,每个光楔与成像坐标系 X 轴负轴的绝对角度 θ_{1t} 、 θ_{2t} 分别为:

$$\theta_{it} = \omega_i t + \theta_{i0}, i=1, 2 \quad (7)$$

式中: θ_{i0} ($i=1, 2$) 为相应光楔零时刻的绝对角度。

绕 Z 轴旋转 θ_{it} (逆时针为正) 的旋转矩阵 r_{it} 为:

$$r_{it} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{it} & \sin \theta_{it} & 0 \\ -\sin \theta_{it} & \cos \theta_{it} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, i=1, 2 \quad (8)$$

则某一时刻,出射光线 $Out_t(\gamma)$ 的矢量表达式为:

$$Out_t(\gamma) = r_{2t}^{-1} R_{X_2} r_{2t}^{-1} r_{1t}^{-1} R_{X_1} r_{1t} In(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \theta_{2t} & -\sin \theta_{2t} & 0 \\ \sin \theta_{2t} & \cos \theta_{2t} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & 0 & -\sin \delta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \delta_2 & 0 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_{1t} & \sin \theta_{1t} & 0 \\ -\sin \theta_{1t} & \cos \theta_{1t} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & 0 & -\sin \delta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \delta_1 & 0 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_{1t} & \sin \theta_{1t} & 0 \\ -\sin \theta_{1t} & \cos \theta_{1t} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -\sin(\gamma) \\ 0 \\ \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: r_{it}^{-1} 为 r_{it} 的逆矩阵。

由于 γ 不为零时,计算结果相对复杂得多,在简化分析不影响结论的前提下,此处计算水平入射 ($\gamma=0$) 时, $Out_t(0)$ 的三个坐标轴分量为:

$$\begin{aligned} & -\sin \delta_1 [\cos \theta_{1t} (\cos \delta_2 \cos^2 \theta_{2t} + \sin^2 \theta_{2t}) - \sin \theta_{1t} (\cos \theta_{2t} \sin \theta_{2t} - \cos \delta_2 \cos \theta_{2t} \sin \theta_{2t})] - \cos \delta_1 \sin \delta_2 \cos \theta_{2t} \\ & -\sin \delta_1 [\sin \theta_{1t} (\cos \delta_2 \sin^2 \theta_{2t} + \cos^2 \theta_{2t}) - \cos \theta_{1t} (\cos \theta_{2t} \sin \theta_{2t} - \cos \delta_2 \cos \theta_{2t} \sin \theta_{2t})] - \cos \delta_1 \sin \delta_2 \sin \theta_{2t} \\ & \cos \delta_1 \cos \delta_2 - \sin \delta_1 (\sin \delta_2 \sin \theta_{1t} \sin \theta_{2t} + \sin \delta_2 \cos \theta_{1t} \cos \theta_{2t}) \end{aligned} \quad (10)$$

当两光楔的形状、旋转方向、速度均相同时, $\delta_1 = \delta_2$, $\theta_{1t} = \theta_{2t}$, 矢量 $Out_t(0)$ 为:

$$Out_t(0) = \begin{bmatrix} -\sin 2\delta_1 \cos \theta_{1t} \\ -\sin 2\delta_1 \sin \theta_{1t} \\ \cos 2\delta_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由公式(11)可以看出,出射光随着时间的变化,在 XOY 平面上的轨迹是一个圆,圆心位于光轴上,以 $2\delta_1$ 为半角。

当两光楔的形状、速度相同,旋转方向相反时, $\delta_1 = \delta_2$, $\theta_{1t} = -\theta_{2t}$, 矢量 $Out_t(0)$ 为:

$$Out_t(0) = \begin{bmatrix} -2\sin \delta_1 (\cos^3 \theta_{1t} \cos \delta_1 - \cos^3 \theta_{1t} + \cos \theta_{1t}) \\ -2\sin \delta_1 \cos^2 \theta_{1t} \sin \theta_{1t} (\cos \delta_1 - 1) \\ 2\sin^2 \delta_1 \sin^2 \theta_{1t} - 2\sin^2 \delta_1 + 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由于 δ_1 为小量, $Out_t(0)$ 简化为:

$$Out_r(0) = \begin{bmatrix} -2\sin\delta_1\cos\theta_{1r} \\ 0 \\ 1-2\sin^2\delta_1\cos^2\theta_{1r} \end{bmatrix} \quad (13)$$

由公式(13)可以看出,出射光轨迹是一条在 X 轴上的线段,线段的一个端点与 Z 轴夹角为 $-2\delta_1$,线段的另一端点 Z 轴夹角为 $2\delta_1$ 。

当两光楔的形状相同,一个光楔不旋转,另一光楔旋转时, $\delta_1=\delta_2, \theta_{1r}=0, \theta_{2r}$ 发生变化时,矢量 $Out_r(0)$ 为:

$$Out_r(0) = \begin{bmatrix} (-\sin\delta_1\cos\theta_{2r}-\sin\delta_1)(\cos\delta_1\cos\theta_{2r}-\cos\theta_{2r}+1) \\ \sin\delta_1\sin\theta_{2r}(\cos\delta_1-\cos\theta_{2r}+\cos\delta_1\cos\theta_{2r}) \\ \cos^2\delta_1-\sin^2\delta_1\cos^2\theta_{2r} \end{bmatrix} \quad (14)$$

由于 δ_1 为小量, $Out_r(0)$ 简化为:

$$Out_r(0) = \begin{bmatrix} -\sin\delta_1\cos\theta_{2r}-\sin\delta_1 \\ \sin\delta_1\sin\theta_{2r} \\ 1-2\sin^2\delta_1\cos^2\theta_{2r} \end{bmatrix} \quad (15)$$

由公式(15)可以看出,出射光轨迹是一个圆,圆心在 X 轴上,与 Z 轴夹角为 $-\delta_1$,并且以 δ_1 为半角。

3 旋转双光楔系统的 Matlab 仿真

运用 Matlab 软件对旋转双光楔的像偏转特性进行模拟。因为单个光楔的偏转角与光楔的楔角和材料折射率有关,在仿真阶段,不考虑具体的参数值,假定两光楔形状相同,且 $\delta_1=1^\circ, \delta_2=1^\circ$,取 $\gamma=0^\circ, 1^\circ, \dots, 10^\circ$ 的共计 11 条入射光线进行仿真,选取与成像坐标系相距 100 mm(实际系统分析时与镜头焦距值匹配)的 Z 轴垂直面作为投影平面。

(1) 当两光楔旋转方向、速度均相同时, $\theta_{1r}=\theta_{2r}$ 分别取离散点 $(0^\circ, 0^\circ), (1^\circ, 1^\circ), \dots, (360^\circ, 360^\circ)$ 共计 361 种状态。

仿真结果如图 2 所示。从上至下依次为 $0^\circ\sim 10^\circ$

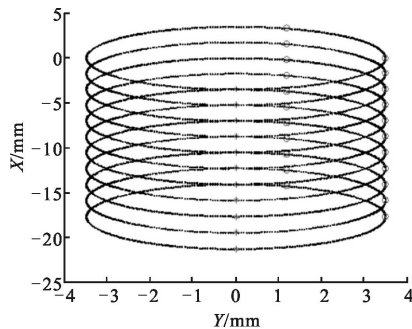


图 2 双光楔同向同速旋转

Fig.2 Double optical wedge rotating in the same direction and at the same speed

的光线轨迹,“*” 点为各光线在转角为 0° 时的投射光点,正向(逆时针)旋转时,投射光点向右依次经过第一“O”点、第二“O”点,经过 360° 旋转后,又回到起点,再次进入周期循环。

(2) 当两光楔旋转方向相反、速度相同时, $\theta_{1r}=\theta_{2r}$ 分别取离散点 $(0^\circ, -0^\circ), (1^\circ, -1^\circ), \dots, (360^\circ, -360^\circ)$ 共计 361 种状态。

仿真结果如图 3 所示。上半部分为 $0^\circ\sim 10^\circ$ 的光线轨迹,下半部分仅呈现了 0° 和 10° 两条光线的轨迹。从图中可以看出,光楔的旋转过程中会产生小量的 Y 轴偏移,当旋转至 180° 时,光点再次回到 Y 轴上。轨迹整体为一线段,与理论分析相符合。

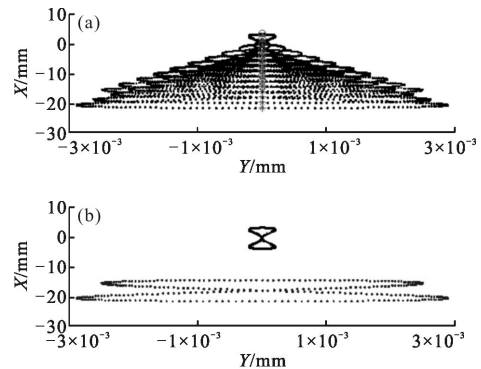


图 3 双光楔同速异向旋转

Fig.3 Double optical wedge rotating at the same speed but in the opposite direction

(3) 当第一光楔不参与旋转、第二光楔以旋转时, $\theta_{1r}=\theta_{2r}$ 分别取离散点 $(0^\circ, 0^\circ), (1^\circ, 1^\circ), \dots, (360^\circ, 0^\circ)$ 共计 361 种状态。

仿真结果如图 4 所示。水平入射光线的圆心不再位于 X 轴上,而是向下产生了偏移,这是由第一光

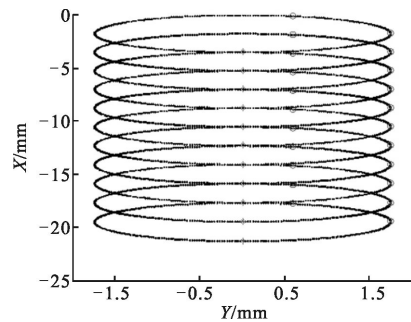


图 4 单光楔旋转

Fig.4 Single optical wedge rotating at a certain speed

楔的偏转效应引起的, 投射光点的轨迹依然是一个圆, 但是半径为双光楔同向同速旋转的一半, 同样是 360° 周期循环。

4 旋转双光楔像移补偿系统设计

随着地面监控预警需求的提出, 搭载于二维转台上的摄像机采用主动搜索的工作模式, 在曝光成像过程中与潜在目标存在相对运动, 曝光时间越长, 转台速度越高(速距比越大), 像质越差, 需要进行像移校正。

与飞行器不同的是, 转台结构一般为“地平式”结构, 包括方位轴、俯仰轴与视准轴。工作模式为方位扫描一周, 俯仰抬升或俯降一个定角度值, 即相当于仅存在一维像移, 可以利用同速异向旋转双光楔的方式进行配置。

根据转台在方位上的扫描速度 ω_0 、曝光时间 t_0 以及曝光周期 T_0 , 可以计算得到曝光时间内的转角需求 δ_0 为:

$$\delta_0 = \omega_0 t_0 \quad (16)$$

一般情况下, 双光楔的像移补偿能力 δ_{max} 不小于 1.2 倍的 δ_0 。

图 5 为旋转双光楔进行一维像移补偿的控制原理图。双光楔系统主要由两个光楔、各自的驱动电机及调速模块组成。控制器实时采集方位光电码盘的角度信息, 结合时钟信号可以得到转台的方位瞬时角速度, 在曝光时间内, 通过调速模块使得光楔的角度偏转速率与转台的瞬时转速一致。

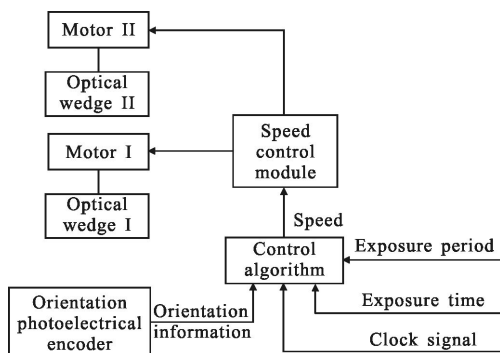


图 5 旋转双光楔一维像移补偿控制原理图

Fig.5 Principle of rotating double optical wedge controlling in one-dimension image motion compensation

需要指出的是, 同速异向旋转双光楔系统对出

射光点的偏转是周期性的, 即由正向偏转至极大偏转位置, 然后再反向偏转至极小偏转位置, 再正向偏转, 周而复始。在应用中, 曝光起始时刻对应的光楔位置和目标与摄像机相对运动方向有关, 且保证曝光时间内光楔的偏转处于同向运动状态。曝光周期包括了曝光时间和电荷转移时间, 电荷转移时间应与光楔的回转时间匹配。

以上分析了一维像移补偿方法。将旋转双光楔应用于航空、航天领域时, 像移除了前向像移(相当于一维像移)外, 还存在斜视像移、旋转像移、偏航像移等。斜视像移因像面上不同区域的旋转速度不同, 采用双光楔会产生一定的像移补偿残差; 旋转像移分为偏心旋转和同心旋转, 可以分别采用单光楔旋转、同速同向双光楔方式予以解决; 偏航像移可以能通过异速旋转方式解决, 只是控制算法相对复杂一些。表 1 给出了同速异向旋转双光楔进行一维像移补偿时带来的俯仰方向的像移残差。其中设定系统焦距 f 为 100mm, 楔角 δ_1 与 δ_2 相等为 1°, 入射光线 γ 为 11°。

表 1 同速异向旋转双光楔一维像移补偿残差列表
Tab.1 Residual error data of one-dimension image motion compensation

No.	Image motion/mm	Rotation angle/(°)	X compensation /mm	Y compensation /mm
1	0	0	0	0
2	0.4	27.7	0.400 1	0.008 5
3	0.8	39.6	0.801 0	0.01
4	1.2	49.0	1.200 5	0.01
5	1.6	57.2	1.599 5	0.092
6	2.0	64.7	1.998 5	0.007 8
7	2.4	71.8	2.399 9	0.006
8	2.8	78.6	2.800 1	0.003 9
9	3.2	85.2	3.197 9	0.001 7
10	3.8	95.1	3.800 3	0.001 7
11	4.2	101.7	4.197 9	0.003 9
12	4.6	108.5	4.597 8	0.005 9
13	5.0	115.6	4.998 7	0.007 5
14	5.4	123.2	5.402 1	0.008 8
15	5.8	131.4	5.799 6	0.009 5
16	6.2	140.9	6.200 8	0.009 3
17	6.6	152.9	6.600 0	0.007 7
18	7.0	180	6.980 0	2.3×10 ⁻¹⁸

由表 1 像移列和 X 补偿量列可以看出, 当光楔旋转精度达到 0.1° 时, 像移补偿的残差极大值为

0.002 2 mm;由|Y|偏移量列可以看出,俯仰方向的像移残差在半视场为 11° 时的极差为0.01 mm。实际上,除了近红外相机有如此大的视场角外(像元尺寸在10个微米量级),对于可见光相机(像元尺寸在5个微米量级),100 mm焦距时,半视场一般不会超过 3° 度,即通过旋转双光楔进行像移补偿后,其残差不超过1个像素。

5 结论

文中针对大速高比(速距比)像面模糊严重的问题,在研究了现有像移补偿方法,尤其是反射镜式光学补偿方法存在的不足基础上,提出了一种利用旋转双光楔系统进行像移补偿的新方法。分析了双光楔的静态作用矩阵,指出坐标系建模与矩阵相互关联的关键点,对于两个独立旋转可控的旋转双光楔,求解了动态作用矩阵,从理论分析和直观软件仿真两个方面描述了出射光矢量的轨迹方程和图例。针对实际的应用需求,将同速异向旋转双光楔方案应用于地面搜索转台一维像移补偿,给出了控制原理,得到了不超过1个像素大小的像移补偿精度。指出旋转双光楔同样可以用在航空、航天领域,飞行器扫描所产生的像移补偿中。

参考文献:

- [1] Li Shi. Real-time restoration algorithms research for aerial images with different rates of image motion[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010: 2-8. (in Chinese)
李仕. 航空异速像移模糊实时恢复算法研究与GPU平台实现 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010: 2-8.
- [2] Li Weixiong, Yan Dejie, Wang Dong. Image motion compensation method of high resolution space camera's imaging with pitch angle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2442-2448. (in Chinese)
李伟雄, 闫得杰, 王栋. 高分辨率空间相机俯仰成像的像移补偿方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(9): 2442-2448.
- [3] Liu Ming. Research on detection and compensation technology of forward image motion in aerial photography based on image restoration [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005: 55-66. (in Chinese)
刘明. 基于图像复原的航空摄影前向像移检测及补偿技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005: 55-66.
- [4] Li Shixian, Zheng Yuenian. Handbook of Optical Design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990: 261-262. (in Chinese)
李士贤, 郑乐年. 光学设计手册 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990: 261-262.
- [5] Meng Lizhuang. The application of the dual-wedge prism scanning in the forward looking infrared navigation equipment [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2013: 19-36. (in Chinese)
孟立庄. 双光楔扫描技术在红外导航设备中的应用[D]. 西安: 西安工业大学, 2013: 19-36.
- [6] Guo Yunzeng, Yang Xiaojun, Yang Xiaojun, et al. Simulation study of rotating double optical wedge vectoring optics path based on Matlab[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 856-859. (in Chinese)
郭云增, 杨小军, 杨小君, 等. 旋转双光楔光路引导系统 Matlab 仿真研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 856-859.
- [7] Lv Pu, Han Guohua. Application of dual wedges in optical axis alignment for laser rangefinders [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2): 151-159. (in Chinese)
吕溥, 韩国华. 双光楔在激光测距机光轴校正中的应用 [J]. *激光技术*, 2012, 36(2): 151-159.
- [8] Zhao Junli, Wu Yiming, Gao Limin. Detecting method of right-angled prism tilting[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 1-5. (in Chinese)
赵军丽, 吴易明, 高立民. 直角棱镜棱脊不平度的检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 1-5.