

基于相机系统设计的大气扰动消扰方法

张家铭^{1,2}, 孙聪^{1,2}, 李涛^{1,2}, 尚洋^{1,2*}

¹国防科技大学空天科学学院, 湖南 长沙 410073;

²湖南省图像测量与视觉导航重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 介绍一种通过设计相机成像系统来消除大气低频扰动的方法。精密光测工程通常在室外进行, 很难避免因大气扰动造成的系统误差。大气扰动可以分为高频扰动和低频扰动两部分, 高频扰动部分可以通过滤波消扰等图像处理方法消除。通过搭建相机对视成像系统的约束条件来消除由大气低频扰动引起的光测误差。在高速相机系统成像消扰实验中, 利用镜面反射成像完成对视成像系统的标定。对比实验组和对照组的结果发现, 测量误差从 2.99% 缩小至 0.35%。结果表明相机成像系统对于大气扰动中的低频扰动消除具有良好的校正效果。

关键词 成像系统; 精密光测; 镜头系统设计; 镜面反射标定; 大气扰动

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1211002

Atmospheric Disturbance Elimination Method Based on Camera System Design

Zhang Jiaming^{1,2}, Sun Cong^{1,2}, Li Tao^{1,2}, Shang Yang^{1,2*}

¹College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²Hunan Provincial Key Laboratory of Image Measurement and Vision Navigation, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract This paper describes a method for eliminating atmospheric low frequency disturbances by designing a camera imaging system. Precision optical measurement engineering is usually performed outdoors, so it is difficult to avoid systematic errors caused by atmospheric disturbances. The atmospheric disturbance can be divided into two parts, i. e., high frequency disturbance and low frequency disturbance. The high frequency interference can be eliminated by image processing methods such as filtering. The optical measurement error caused by the atmospheric low frequency disturbance can be eliminated by establishing the constraint condition of the opposite view camera imaging system. We conduct an experiment with high-speed cameras to eliminate atmospheric disturbances, and use the planar mirror reflection imaging to complete the calibration of the camera system. Comparing the results of the experimental group and the control group, the measurement error is reduced from 2.99% to 0.35%. The results show that the camera imaging system has a good correction effect in the low frequency disturbance cancellation in the atmospheric disturbance.

Key words imaging systems; precision optical measurement; lens system design; planar mirror reflection calibration; atmospheric disturbance

OCIS codes 110.0115; 010.1290; 080.3620

1 引 言

精密光学测量的大部分过程都在室外大气环境中进行。在测量的过程中, 一般认为大气是均匀、静止的。然而, 在实际测量时, 阳光、温度和气流等都

会对目标测量产生影响^[1]。其中, 近地面空气存在的热对流使地面附近的空气温度、密度不均匀, 甚至形成风。这种热对流会使光学测量的待测目标成像产生明显的变形和漂移, 从而影响特征提取精度。特别是自然风与物体相互作用或者运动物体与静止

收稿日期: 2019-05-29; 修回日期: 2019-08-07; 录用日期: 2019-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(11472302)

* E-mail: shangyang1977@nudt.edu.cn

空气相互作用形成湍流时,会产生光束闪烁、漂移等现象。在进行精密光学测量的过程中,大气运动产生的湍流会对精密光学测量的精度产生剧烈影响。气流扰动是大气在运动过程中受崎岖地面影响或地面受热不均匀所导致的。在室外环境中,光线由于气流扰动会发生折射或者弯曲,从而对光学测量的结果产生影响^[2-3]。地球的曲率、太阳光、温湿度变化,以及气流都会对实际的光学测量造成干扰。根据现有的研究结果,大气扰动的频率可以达到约100 Hz,低频频率一般为10~20 Hz,但也有频率低至0的扰动^[4]。

在室外的光学测量任务中,通常需要使用全站仪或经纬仪来对目标进行精确测量。然而,在室外测量时,通常难以搭建光路保护措施,这样就会受到大气扰动的影响。特别是当目标标定板距离较远时,经常能够明显地观察到目标标定板在全站仪或经纬仪的视野中晃动(即气流扰动引起的像点漂移),导致很难对其进行精确定位定向,从而使数据的精度受到影响。

在图像制导的飞行器目标定位上,图像测量的精确度也起着至关重要的作用,精度上的微小误差可能导致图像制导的导弹不能命中目标。特别是当目标距测站较远、观测角度较小时,大气折射给导引头视角带来的误差就更大,最大可达分级。因此,探明大气扰动对精密光学测量的影响并设法消除其误差是精密光学测量图像领域一个重要的研究部分。此外,在港口和船舶甲板上时常会出现海雾或高湿度环境,这会对由视觉导引辅助的装载调运和舰载机起降产生干扰。特别是在装载精密器件和舰载机着舰的过程中,大气扰动可能会对视觉导引产生严重偏差,从而对装载或着舰产生重大影响。

为消除大气扰动的影响,研究人员从多个领域都做出过努力^[5-6]。在摄影测量领域,采取措施主动避免大气扰动,如在避免阳光直射、气流较小的环境

中,或者是类似于远望号在搭建光路保护措施的条件下进行测量。在计算流体力学领域,通过给湍流建立流体模型来消除湍流造成的影响^[7]。在天文学领域,由于大气传输具有闪烁特性^[8-9],将哈勃望远镜送出地球大气层,从而避免了大气扰动。近年来,自适应光学和幸运成像技术也取得了较大的进展。自适应光学使用可变形镜面校正因大气抖动造成的光波波前畸变^[10-11]。幸运成像技术采用多次短时间曝光,然后挑选受影响少的部分照片进行移动、叠加,从而生成一张图像^[12]。在大气光学领域,建立大气折射率模型,用两种波长的光束在大气中进行测量,由于两种光在大气中的折射率不同,因此可以测出实际折射率,继而进行修正^[13-14]。在无线激光通信(即自由空间光通信)领域,通过测量计算出关于大气扰动引起的角度或距离的漂移程度等^[15-17]。在精密光学测量领域,更多地探索运用削弱流场、图像滤波还原,以及相机系统设计等方法进行消扰^[18-20]。本文主要采用相机系统设计的方法来减小像点漂移,提高精密测量中目标图像的测量精度。

2 相机系统成像理论

精密光学测量的消扰在生活中应用得十分广泛,特别是在工程建设、视觉导航和科研测量中。例如,在测量航天测量船的船体变形时,由于船体变形自身数据很少,这就对精密光学测量的图像测量精度提出了极高的要求。为了避免大气扰动对测量数据产生影响,利用远望号航天测量船进行测量时,在测量光路上安装了多个大钢管^[21],如图1所示。

光线在传播的过程中受到大气扰动并发生折射等现象。大气扰动是由于太阳直射地面产生高温,水蒸气伴随着高温气流运动,导致空气的湿度、温度和密度变得不均匀,从而使光线在传播时发生较大的且不稳定的折射现象(图2)。

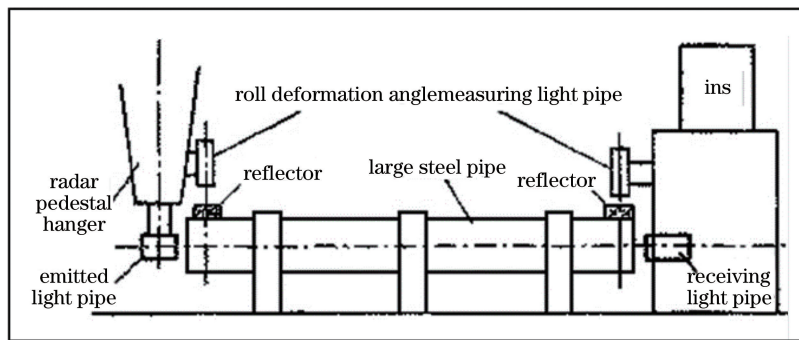


图1 远望号横摇变形角测量光管布局图

Fig. 1 Light pipe layout for "Yuan Wang" roll deformation angle measurement

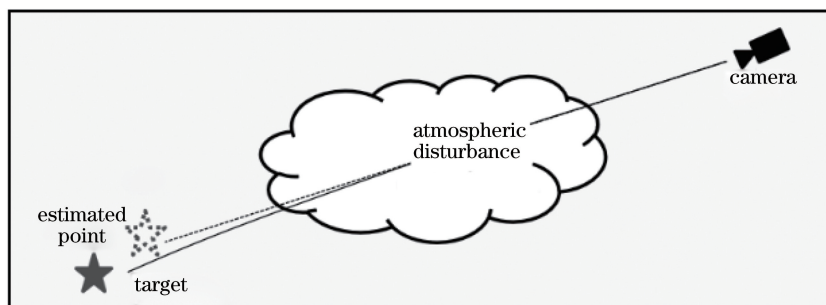


图 2 大气扰动模型

Fig. 2 Atmospheric disturbance model

在进行大气扰动消扰的过程中,可从图像端出发,尝试在图像数据的处理中将扰动消除^[22-23]。然而,图像端的去扰动处理虽然对于高频扰动部分具有一定的效果,但在低频扰动消除方面的表现却比较差。而且,从图像端来消扰的方法不稳定,精度和准确度都易受到影响。对于镜面成像^[24]和对视成像系统的建立,可以利用相机和固连标定板之间的位姿关系约束将大气扰动中的低频扰动消除掉。

在相机对视成像系统的设置中,使用两个同型号的相机,分别将其命名为相机 1 和相机 2。相机 1 位于初始位置,在距离相机 1 一定距离的合作目标处设置相机 2,并将两个相同的标定板分别固连到这两个相机上。两个相机能够通过拍摄对面相机的标定板进行标定,分别获取对面相机的固

连标定板信息,进而完成对视成像硬件系统的搭建(图 3)。

在完成系统的搭建后,开始对整个系统建立坐标系。先建立两个相机坐标系,在相机 2 处搭建 W - XYZ 世界坐标系,在相机 1 处搭建 C_1 - $X_1Y_1Z_1$ 相机坐标系。整个模型搭建完成后发现,相机上固连标定板的位姿无法通过相机直接标定来确定。相机与固连标定板在同一个平面上,难以直接估计位姿,因此考虑利用平面镜的反射来改变相机的视场,从而拍摄到相机自身固连的标定板(图 4)。然后,通过移动平面镜就可以改变相机上的固连标定板在相机视场中的位置和姿态,多次拍摄固连标定板在相机视场中的图像,再根据平面反射镜的几何关系求得固连标定板与固连相机的位姿关系。

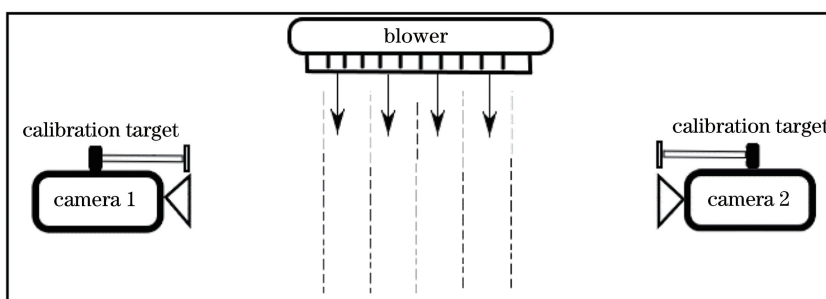


图 3 对视成像系统模型图

Fig. 3 Opposite view imaging system model

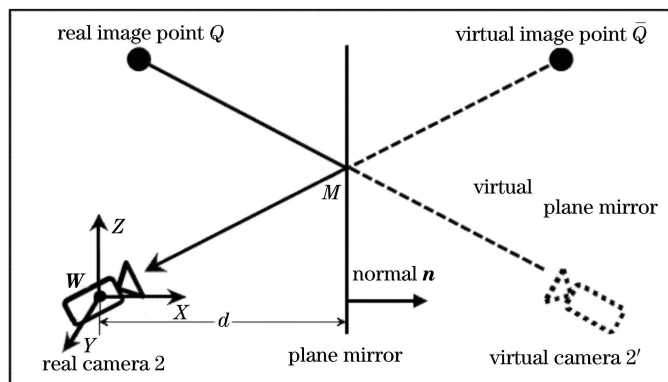


图 4 镜面反射成像系统

Fig. 4 Plane mirror reflection imaging system

已知世界坐标系 W -XYZ, 并预先完成两个相机的内参标定, 设标定结果的内参矩阵分别为 \mathbf{K}_1 和 \mathbf{K}_2 。平面镜在世界坐标系下表示为 (\mathbf{n}, d) 。其中, d 表示平面镜所在平面到世界坐标系原点的距离, \mathbf{n} 表示在世界坐标系下平面镜所在平面法向的单位向量。对于平面镜上任一点 $M(x_m, y_m, z_m)$, x_m, y_m, z_m 为 M 点世界坐标系下的坐标, 则有

$$\mathbf{n} \cdot \overrightarrow{WM} = d. \quad (1)$$

假设点 Q 在世界坐标系下, 则 Q 点在平面镜中对应的虚像 \bar{Q} 点与 Q 点存在对应的几何关系。平面镜中虚像由自身物像加横线上标来表示。相机在平面镜中的视场就是平面镜中的虚像。假设 $\mathbf{Q} = (x_q, y_q, z_q)^T$, 则 $\bar{\mathbf{Q}} = (\bar{x}_q, \bar{y}_q, \bar{z}_q)^T$, x_q, y_q, z_q 为 Q 点在世界坐标系下的坐标, $\bar{x}_q, \bar{y}_q, \bar{z}_q$ 为 \bar{Q} 点在世界坐标系下的坐标。

由于相机是中心投影模型, 设 \bar{Q} 点在图像坐标系下的图像坐标为 (\bar{x}, \bar{y}) , 根据中心投影模型, 有

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x & 0 \\ 0 & F_y & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

进一步可得

$$Z_c \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x & 0 \\ 0 & F_y & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{R}} & \bar{\mathbf{T}} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Q} \\ 1 \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{M}} \begin{bmatrix} \bar{Q} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{M} 为相机参数矩阵; \mathbf{Q} 与 $\bar{\mathbf{Q}}$ 分别是实像和透过平面镜的虚像在世界坐标系下的位置矢量; $\bar{\mathbf{R}}$ 和 $\bar{\mathbf{T}}$ 分别为相机相对于镜面中虚像点 \bar{Q} 的旋转矩阵和平移向量; Z_c 是物点到光心的距离在光轴方向的投影; (F_x, F_y) 是等效焦距; C_x 为光心横坐标; C_y 为光心纵坐标; x 为图像坐标系横坐标; y 为图像坐标系纵坐标; \mathbf{R} 为旋转矩阵, \mathbf{T} 为平移向量, $\mathbf{0}_{3 \times 1}$ 为 3×1 的列向量; X 为世界坐标系下 X 轴坐标; Y 为世界坐标系下 Y 轴坐标; Z 为世界坐标系下 Z 轴坐标; $\bar{\mathbf{M}}$ 为 \bar{Q} 点处相机参数矩阵。根据像点关于平面镜的几何关系, 有

$$\begin{bmatrix} \bar{Q} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} Q \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{S} 为转换矩阵。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} - 2\mathbf{nn}^T & 2d\mathbf{n} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $\mathbf{I} - 2\mathbf{nn}^T$ 为 Householder 矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵。因此, 可以分别构建出相关于像点 Q 和虚像点 \bar{Q} 的位姿关系的变换, 从而得到

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1}^T & 1 \end{bmatrix} \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\mathbf{I} - 2\mathbf{nn}^T) & 2d\mathbf{Rn} + \mathbf{t} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{R}} & \bar{\mathbf{t}} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: \mathbf{t} 为 Q 点平移向量; $\bar{\mathbf{t}}$ 为 \bar{Q} 点平移向量; \triangleq 表示等价于。由于利用平面镜完成的成像是虚像点的成像, 因此可以通过成像关系求得虚像点相对于相机的位姿关系, 即旋转矩阵 $\bar{\mathbf{R}}$ 和平移向量 $\bar{\mathbf{T}}$ 。同时, 根据平面镜成像的几何关系和相机对虚像点的成像关系可以求出平面镜的法向单位向量 \mathbf{n} , 求解方程为

$$\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{U} \mathbf{S}_0 \mathbf{V}^T, \quad (7)$$

式中: $\hat{\mathbf{R}}$ 为旋转矩阵 \mathbf{R} 统计量的估计值; \mathbf{U} 为正交阵; \mathbf{V} 为对角阵; $\mathbf{S}_0 = \text{diag}[1 \quad 1 \quad \det(\mathbf{UV}^T)]$; $\det(\cdot)$ 为求矩阵对应行列式的值; $\text{diag}[\cdot]$ 表示对角矩阵。 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 满足 $\mathbf{G} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T$, 即 \mathbf{G} 的奇异值分解。其中, $\mathbf{\Sigma}$ 为 \mathbf{G} 奇异值分解后的正交阵, \mathbf{G} 为所有旋转矩阵的求和。 \mathbf{G} 的计算公式为

$$\mathbf{G} = \sum_{j=1}^{M_0} \bar{\mathbf{R}}_j, \quad j=1, \dots, M_0, \quad (8)$$

式中: $\bar{\mathbf{R}}_j$ 为第 j 个旋转矩阵; M_0 为旋转矩阵总数。

可以求出

$$\hat{\mathbf{n}}_j = \mathbf{E}_{-1}^{\text{EigV}}(\bar{\mathbf{R}}_j^T \hat{\mathbf{R}}), \quad j=1, \dots, M_0, \quad (9)$$

式中: $\hat{\mathbf{n}}_j$ 为法向单位向量 \mathbf{n} 统计量的估计值; $\mathbf{E}_{-1}^{\text{EigV}}(\bar{\mathbf{R}})$ 表示非正常旋转矩阵 $\bar{\mathbf{R}}$ 特征值为 -1 的特征向量。

在求得真实旋转矩阵和平面反射镜法向单位向量之后, 根据位姿关系变换的约束, 可以得到

$$\bar{\mathbf{t}}_j = 2d_j \bar{\mathbf{R}}_j \mathbf{n}_j + \mathbf{t}, \quad j=1, \dots, M_0, \quad (10)$$

式中: $\bar{\mathbf{t}}_j$ 为第 j 个平移向量; d_j 为第 j 个平面镜到世界坐标系原点的距离; \mathbf{n}_j 为第 j 个法向单位向量 \mathbf{n} 。

根据该线性约束关系, 可以对下述 N 个约束的矩阵形式求解得到 $\hat{\mathbf{t}}$ 的最小二乘解, $\hat{\mathbf{t}}$ 为平移向量 \mathbf{t} 统计量的估计值:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & 2\mathbf{R}n_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{I} & 0 & 2\mathbf{R}n_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{I} & 0 & 0 & \cdots & 2\mathbf{R}n_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{t}_1 \\ \tilde{t}_2 \\ \vdots \\ \tilde{t}_N \end{bmatrix}. \quad (11)$$

求出相机相对于像点 Q 的旋转矩阵和平移矩阵,就确定了相机固连标定板与相机间的位姿关系。所以,在大气扰动下可以利用对视成像系统约束来消除扰动误差。

经过对两个高速相机对视成像系统中固连标定板的位姿求解,得到了相机自身固连标定板相对于相机的位姿关系。从两个固连标定板中分别提取 n 个点,根据这些点在其本身相机坐标系中的坐标构建矩阵 \mathbf{P}_1 和 \mathbf{P}_2 (\mathbf{P}_1 和 \mathbf{P}_2 都是 $3 \times n$ 的矩阵)。根据前文,世界坐标系 W - XYZ 建立在相机 2 上,首先确定两个对视相机的位姿关系。由前文可知,相机 1 和相机 2 的内参标定结果分别为 \mathbf{K}_1 和 \mathbf{K}_2 。

从相机 1 处观测相机 2 的固连标定板上某一点 $\mathbf{P}_2(x_2, y_2, z_2)$, 根据相机中心投影模型,可得

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{y}_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_{21}} \begin{bmatrix} F_{1x} & 0 & C_{1x} \\ 0 & F_{1y} & C_{1y} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{21} \\ Y_{21} \\ Z_{21} \end{bmatrix} = \mathbf{K}_1 \begin{bmatrix} X_{21} \\ Y_{21} \\ Z_{21} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} X_{21} \\ Y_{21} \\ Z_{21} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{21} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{21}, \quad (13)$$

式中: (F_{1x}, F_{1y}) 为相机 1 的等效焦距; C_{1x} 为光心在相机 1 图像坐标系下的横坐标; C_{1y} 为光心在相机 1 图像坐标系下的纵坐标; (X_{21}, Y_{21}, Z_{21}) 为点 \mathbf{P}_2 在相机 1 相机坐标系 C_1 - $X_1Y_1Z_1$ 下的坐标; (\bar{x}_1, \bar{y}_1) 为相机 1 图像坐标系下的坐标; $\mathbf{R}_{21}, \mathbf{T}_{21}$ 为相机 2 的相机坐标系到相机 1 的相机坐标系的旋转矩阵和平移向量,即由 6 参数确定的相机外参数; \mathbf{K}_1 为相机 1 的内参数矩阵。同理,对于相机 2 观测相机 1 上的固连标定板,可以得到相似的两个方程:

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_2 \\ \bar{y}_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_{12}} \begin{bmatrix} F_{2x} & 0 & C_{2x} \\ 0 & F_{2y} & C_{2y} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{12} \\ Y_{12} \\ Z_{12} \end{bmatrix} = \mathbf{K}_2 \begin{bmatrix} X_{12} \\ Y_{12} \\ Z_{12} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} X_{12} \\ Y_{12} \\ Z_{12} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{12} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{12}. \quad (15)$$

通过这两组方程可以建立对视成像系统的约束条件。通过上述两组方程和相机位姿关系可以建立冗余的约束条件进行变换求解,可得

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{21}^{-1} \begin{bmatrix} X_{21} \\ Y_{21} \\ Z_{21} \end{bmatrix} - \mathbf{R}_{21}^{-1} \mathbf{T}_{21}, \quad (16)$$

$$\mathbf{R}_{12} = \mathbf{R}_{21}^{-1}, \quad (17)$$

$$\mathbf{T}_{12} = -\mathbf{R}_{21}^{-1} \mathbf{T}_{21}. \quad (18)$$

(17)式和(18)式为对视成像系统的约束方程,表示两个相机坐标系的关系是固定的,则由两个坐标系中相机测量的数据解算出的位姿关系也应是固定的。利用这个约束,就可以完成对由大气扰动产生的光学测量误差的分析和消扰。

相机在拍摄目标时进行定位,但由于受到大气扰动的影响,定位的结果与目标实际位置必然不同。大气扰动所带来的误差应被认为是由于光线经过不均匀大气发生折射的积分,即由于不断发生的偏移量的累加而产生了最终的扰动误差。因此,对视成像系统添加的系统约束起到了关键作用。

在对视成像系统中,由于大气扰动的存在,两个对视相机成像的光路都会受到大气干扰,并发生偏移,目标点测量的位姿出现错误。同时,大气扰动导致目标点测量发生了偏移,所以必然不再满足对视成像模型的位姿约束条件。因此,通过对视成像系统的条件约束就可满足对大气扰动的修正和消扰。

两个相机通过触发器获取同一时刻的图像数据。根据大气扰动模型,首先通过图像处理来消除高频扰动。本研究选取卡尔曼滤波进行消扰。卡尔曼滤波是一种通过去除噪声来还原真实数据的数据处理技术。通过卡尔曼滤波消去图像中的噪声和高频扰动,然后通过对视成像系统来消除图像数据中的低频扰动。

在消除低频扰动时,首先分析确定两个相机成像的结果分别与实际对视成像系统约束条件的差值。根据对大气扰动误差的分析,确认两个相机相对于对视成像理想约束下的差值。由于大气扰动的影响,理论上两个相机相对于对视成像系统约束的差值方向相反。将两个相反部分的差值相互抵消,剩下的部分为差值的余值。将余值分到两个相机上,进行目标实际位姿的优化解算。

采用基于光束法平差优化和约束条件的位姿求

解进行目标位姿的优化解算。因为已经确定了约束条件,本研究选取平均值作为目标的初值。根据相机成像模型的共线方程,将目标的位姿参数作为优化参数,将目标的重投影误差作为优化方程进行非线性优化,从而确定目标的最终位姿参数。

3 实验结果与分析

实验中选择两个相同的高速相机进行实验,实验所用的高速相机型号为 Estrong-CL200(分辨率:

2048 pixel×1088 pixel),同时选择两个型号同为 Nikon AF-S 的镜头,其焦距范围为 55~300 mm,等效焦距为 83~450 mm,最大放大倍率为 0.28,最大光圈为 $F4.5\sim F5.6$,最小光圈为 $F22\sim F29$ 。

根据对视成像的要求,将合作标定板固连在相机上,通过标定板标定相机,分别求解两个相机的内参数。在相机进行镜面标定之前,完成相机的标定,标定结果如表 1 所示,其中, (u_0, v_0) 为畸变中心, (k_1, k_2, k_3) 为径向畸变, (p_1, p_2) 为切向畸变。

表 1 相机标定结果

Table 1 Camera calibration results

Camera	Distortion center (u_0, v_0) /pixel	Lens distortion $(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)$ /%
Camera 1	(454.4, 974.4)	$(-5.97 \times 10^{-3}, 7.93 \times 10^{-2}, -4.68 \times 10^{-2}, 1.96 \times 10^{-2}, -2.65 \times 10^{-4})$
Camera 2	(399.9, 969.7)	$(8.33 \times 10^{-3}, -2.35 \times 10^{-2}, -6.87 \times 10^{-2}, 4.77 \times 10^{-3}, -3.53 \times 10^{-4})$

在移动平面镜的同时,要保证相机上的固连标定板通过平面镜反射能够出现在相机镜头的视场中,从而能够采集固连标定板的图像数据。在测量过程中,要保证相机及固连标定板位置姿态固定,才能够求得平面镜的位姿参数,从而进行固连标定板相对相机的位姿估计求解。

根据控制点的坐标,结合相机模型和平面反射镜的模型、相机参数,以及相机与其相应的固连合作标定板的关系,将其作为初值,通过光束法平差优化得到最终的标定结果。系统标定的重投影误差如图 5 所示,图 5 中 u', u'' 均表示误差。这里选取重投影误差来检测系统标定的结果,以保证结果的准确性。

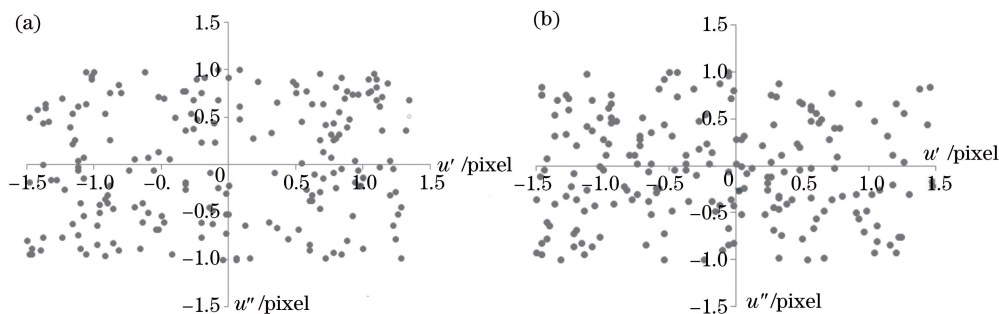


图 5 相机系统标定的重投影误差分布。(a)相机 1;(b)相机 2

Fig. 5 Reprojection error of camera system calibration. (a) Camera 1; (b) camera 2

利用前文确定的固连标定板位姿估计方法来确定固连标定板相对于相机的位姿关系。利用平面镜反射成像来完成相机对其固连标定板图像数据的采集,从而确定固连标定板相对于相机位姿的关系。固连标定板的位姿,可以通过相机采集的数据求解。表 2 列出了相机经过镜面成像解算得到的相对固连的位姿参数,其中, (A_x, A_y, A_z) 为求得的相机在 x

轴、 y 轴、 z 轴方向的旋转角, (T_x, T_y, T_z) 分别为求得的相机在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的平移量。

根据实验设计,在完成相机固连标定板的位姿求解后,还要将两个相机对视配置,使得两个相机能够同时对对侧相机的固连合作标定板进行成像。至此,就完成了高速相机对视系统的搭建。该系统可以通过两个相机同时对另一侧相机的固连合作标定

表 2 通过平面镜解算得到的标定板的位姿参数

Table 2 Pose parameters of calibration plate with planar mirror resolving

Camera	(A_x, A_y, A_z) /rad	(T_x, T_y, T_z)
Camera 1	(1.551, 0.095, 0.246)	(-19.053, 70.374, 1.201)
Camera 2	(-0.115, 0.149, -1.577)	(43.081, -19.101, 2.527)

板进行测量,通过标定好的固连合作标定板位姿,该系统就可以进行对视成像实验。

对视成像实验是为了消除大气扰动中图像处理阶段难以消除的低频扰动,由于实验在室内搭建,大气扰动较小,因此考虑人为添加低频干扰。实验中,在两个对视相机光路中央增加风速为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、风向垂直于光路的风机作为低频扰动。为降低相机成像过程中的光路误差,选用长 30 mm 、宽 20 mm 的小型标定板,每个小方格边长为 2.5 mm 。对两个相

机间的距离从近到远进行多次测量,以验证消扰效果。

在实验中,为了能够直观地比较对视成像系统对大气扰动的消扰效果,设置对照组与实验组进行实验。在对照组中,将两个相机在实验室空间中进行对视成像,并测得相应数据;在实验组中,增加风机作为低频扰动,以突出对视成像在消除低频扰动上的处理效果。两组实验的原始图像数据如图 6 所示。

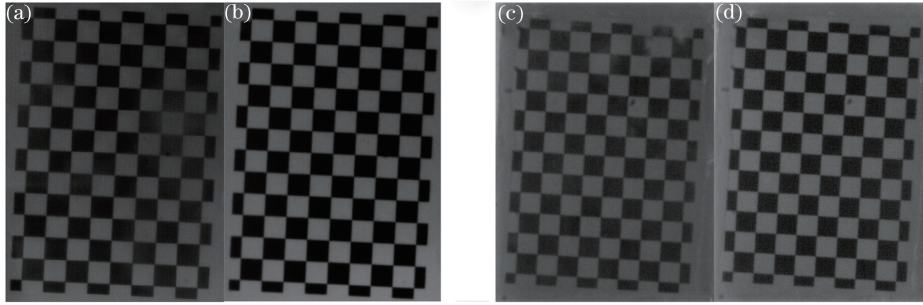


图 6 两相机实验组与对照组的原始数据。(a)相机 1 实验组;(b)相机 1 对照组;(c)相机 2 实验组;(d)相机 2 对照组
Fig. 6 Raw data of experimental group and control group. (a) Experimental group of camera 1; (b) control group of camera 1; (c) experimental group of camera 2; (d) control group of camera 2

对采集到的两组数据进行处理。通过对拍摄得到的图像组中的合作标定板进行提取,得到合作标定板在图像上的像点坐标,再结合在标定部分中确定的合作标定板在与之固连的相机的相机坐标系下的坐标,对两个相机的相机坐标系的转换关系进行求解,得到两个坐标系变换的旋转矩阵和平移向量。

首先,针对对照组得到的对视图像数据进行分析。由于对照组无干扰,因此可以直接计算对视相机的位姿关系。分别用两个对视相机拍摄到的图像进行位姿解算。对于实验组得到的对视图像组,分别将两个相机拍摄到的图像进行单独解

算。考虑到对视成像系统的干扰,在解算对视相机参数时,需要将合作标定板的位姿作为修正参考数据代入相机位姿进行计算。因此在通过实验组数据解算得到原始位姿参数之后,考虑对视成像约束条件,以该结果作为初值,对位姿参数进行优化,最终得到一组通过对视成像系统约束条件优化的位姿参数。表 3 是根据对照组实验数据解算得到的位姿参数,表 4 是根据实验组实验数据解算得到的位姿参数,表 5 是对实验组实验数据进行优化后解算得到的位姿参数。

根据上述对比组实验数据的解算结果,验证对视成像系统约束,结果表明,在无扰动的条件下,对

表 3 由对照组数据解算得到的位姿参数

Table 3 Calculated pose parameters of control group

Camera	$(A_x, A_y, A_z) / \text{rad}$	(T_x, T_y, T_z)
Camera 1	$(-1.515, -0.055, 0.047)$	$(-99.702, 179.014, 860.905)$
Camera 2	$(-1.524, 0.202, -0.049)$	$(-0.493, -121.131, 934.423)$

表 4 由实验组数据解算得到的位姿参数

Table 4 Pose parameters calculated from experimental group data

Camera	$(A_x, A_y, A_z) / \text{rad}$	(T_x, T_y, T_z)
Camera 1	$(-1.515, -0.055, 0.048)$	$(-95.672, 169.535, 833.601)$
Camera 2	$(-1.525, 0.204, -0.048)$	$(-0.833, -115.622, -909.013)$

表 5 实验组数据解算得到的位姿参数优化结果

Table 5 Pose parameter optimization results calculated from experimental group data

Camera	$(A_x, A_y, A_z) / \text{rad}$	(T_x, T_y, T_z)
Camera 1	$(-1.515, -0.054, 0.048)$	$(-99.082, 178.890, 859.223)$
Camera 2	$(-1.524, 0.203, -0.048)$	$(-0.603, -120.542, 929.835)$

两个相机得到的图像分别进行位姿解算,得到的结果满足对视成像系统约束条件。在这种条件下,对比组中并未添加任何人为的扰动,所以在实验室条

件下认为这种情况下是无扰动的,该情况下计算得到的位姿参数较为精确。将其作为标准值与实验组结果解算的位姿参数进行对比(表 6)。

表 6 实验组初始解算结果、优化后结果与对比组结果的对比

Table 6 Comparison of initial solution results and optimization results of experimental group with results of control group

Data	$(A_x, A_y, A_z) / (^\circ)$	Distance error / %
Initial data of experimental group	$(0.057, 0.093, 0.115)$	2.99
Optimized data of experimental group	$(0.023, 0.076, 0.115)$	0.35

对实验结果进行比较,可以发现优化后的结果在三个旋转角的解算精度上有一定的提高,在距离误差上的优化效果较为明显,说明通过高速相机对视成像系统确实可以对由该类折射引起的扰动实现一定程度的修正,特别是在位置距离参数的解算结果上,优化的效果非常明显,对于实际测量有较好的指导意义。

4 结 论

针对大气扰动的特点,将近地面大气扰动分为高频扰动和低频扰动两个部分,进一步结合相机成像模型对扰动过程进行了理论分析,其中,低频扰动对于光学测量像点的影响表现为成像区域的整体偏移。提出利用成像系统约束来消除大气低频扰动,并进行实验验证。实验中,搭建了镜面反射成像系统,对相机系统进行了标定。对视成像理论认为,两个相机拍摄到的图像对应同一条受扰光路。通过理论分析和实验发现,在低频扰动的影响下,将通过两个相机拍摄得到的图像分别进行位姿解算得到的结果代入固连标定板位姿,该测量系统能够通过对视成像系统的约束来减小这部分误差的影响。实验结果表明,该方法能够有效降低位置解算的位姿和距离误差。在后续的实验设计中,可以考虑通过将相机镜头和圆形标定板相结合来降低系统误差,从而进行更高精度的实验测量。

参 考 文 献

- [1] Yu Q F, Shang Y. Videometrics: principles and researches[M]. Beijing: Science Press, 2009: 5-20.
于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北

京: 科学出版社, 2009: 5-20.

- [2] Drummond J. Manual of photogrammetry [J]. The Photogrammetric Record, 2005, 20(112): 390-392.
[3] Palmén E. The rôle of atmospheric disturbances in the general circulation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1951, 77(333): 337-354.
[4] Mahrt L. Intermittency of atmospheric turbulence [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1989, 46(1): 79-95.
[5] Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y, *et al.* Theory of optical scintillation [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1999, 16(6): 1417-1429.
[6] Marchetti E, Close L M, Véran J P, *et al.* Adaptive optics systems V [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9909: 99090W.
[7] Abe K, Kondoh T, Nagano Y. A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows: I. Flow field calculations [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(1): 139-151.
[8] Tang J C, Qian X M, Miao X K, *et al.* Effects of aberrations on on-axis scintillation propagating properties of focus Gaussian beams in turbulent atmosphere [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1101001.
唐军成, 钱仙妹, 苗锡奎, 等. 像差对聚焦高斯光束大气传输轴闪烁特性的影响 [J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1101001.
[9] Li Z F, Wang S R, Huang Y, *et al.* Spectral stray light correction of forward limb imaging spectrometer for atmospheric exploration [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1101001.
李占峰, 王淑荣, 黄煜, 等. 前向临边大气探测成像

- 光谱仪光谱杂散光修正[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1101001.
- [10] Perreault J A, Bifano T G, Levine B M. Adaptive optic correction using silicon-based deformable mirrors[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3760: 12-22.
- [11] Söderberg P G. Principle of adaptive optics[J]. Acta Ophthalmologica, 2009, 87(s244).
- [12] Harmeling S, Hirsch M, Sra S, *et al.* Online blind deconvolution for astronomical imaging [C]//2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), April 16-17, 2009, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2009: 11499054.
- [13] Earnshaw K B, Hernandez E N. Two-laser optical distance-measuring instrument that corrects for the atmospheric index of refraction[J]. Applied Optics, 1972, 11(4): 749-754.
- [14] Zhao Z J, Xu F Y, Xu S C, *et al.* Measurement of atmospheric infrared radiance and extinction characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0401004.
赵志军, 许方宇, 徐世春, 等. 大气红外辐射及消光特性实测研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0401004.
- [15] Khalighi M A, Uysal M. Survey on free space optical communication: a communication theory perspective [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 2231-2258.
- [16] Kashani M A, Safari M, Uysal M. Optimal relay placement and diversity analysis of relay-assisted free-space optical communication systems[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(1): 37-47.
- [17] Yang F, Cheng J L, Tsiftsis T A. Free-space optical communication with nonzero boresight pointing errors [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(2): 713-725.
- [18] Stevens B, Giorgetta M, Esch M, *et al.* Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6 [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, 5(2): 146-172.
- [19] Gepshtein S, Shtainman A, Fishbain B, *et al.* Restoration of atmospheric turbulent video containing real motion using rank filtering and elastic image registration [C]//2004 12th European Signal Processing Conference, September 6-10, 2004, Vienna, Austria. New York: IEEE, 2004: 477-480.
- [20] Kahnert M, Nousiainen T, Lindqvist H. Review: model particles in atmospheric optics[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, 146: 41-58.
- [21] Pan L. Ship position measurement technology for aerospace survey ship[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 5-30.
潘良. 航天测量船船姿船位测量技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 5-30.
- [22] Archer G E, Bos J P, Roggemann M C. Reconstruction of long horizontal-path images under anisoplanatic conditions using multiframe blind deconvolution [J]. Optical Engineering, 2013, 52(8): 083108.
- [23] Li D, Jiang H Z, Liu Y, *et al.* Simulation of the atmospheric turbulence image reconstruction based on compressed sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9301: 93013J.
- [24] Wang G, Guo P Y, Shang Y, *et al.* On the Cramer-Rao lower bound of camera pose estimation using planar mirror reflection for expanding the camera's FOV[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(1): 39-46.
王刚, 郭鹏宇, 尚洋, 等. 平面镜反射辅助视场下相机位姿估计问题的 Cramer-Rao 下界[J]. 实验力学, 2016, 31(1): 39-46.