

基于数字高程模型的航空相机图像清晰度检测方法

戴栋晨^{1,2}, 郑丽娜^{1*}, 张宇^{1,2}, 王海江^{1,2}, 康琦¹, 张洋¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为解决弱特征区域中航空相机成像清晰度检测的问题,根据前后两次图像间具有重叠区域的特点,提出了一种基于数字高程模型(DEM)的航空相机图像清晰度检测方法。该方法在引入高精度 DEM 数据后,以重投影误差最小化原则修正航空成像模型,应用尺度不变特征转换(SIFT)算法进行特征匹配,并利用特征点偏移位置计算主距变化量,最终将主距变化量作为清晰度检测的标准以实现弱特征区域航空图像的清晰度检测。实验表明,所提算法对不同清晰度的弱特征区域航空图像均能进行清晰度检测,其检测均方根误差为 16.275 μm ,小于光学系统的半焦深(19.2 μm),能够满足航空相机的实际工程精度要求。

关键词 图像处理; 航空相机; 清晰度检测; 数字高程模型; 航空成像模型; 特征匹配

中图分类号 V241.01 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221506

1 引言

航空相机作为一种获取地面信息的主要手段,具有成本低、机动灵活和时效性强等优点,广泛应用于军事侦察、地形测绘、道路建设和灾难预警等领域中^[1-4]。航空相机工作环境复杂,在获取航空遥感图像的过程中,受到地面高程差与温度、气压等外部环境的影响,光学系统会产生离焦,从而导致获取的航空遥感图像清晰度不足^[5-6]。为获取足够清晰的遥感图像,进行与航空相机清晰度检测相关的研究是获取高质量的航空遥感图像的关键^[7-10]。

航空相机清晰度检测方法发展至目前,主要技术方法有程序控制法、光电自准直法和基于图像处理的清晰度检测方法:程序控制法通过提前设置好的程序进行清晰度检测,其运行速度快,但对环境适应性低,受外界影响较大^[11];光电自准直法清晰度检测精度高,对地面景物要求低,但其相关结构复杂,实时性较差^[12];基于图像处理的清晰度检测方法通过航空遥感图像中高频信息的频谱分析完成清晰度检测,利用计算机运行速度快的优势实时完成航空遥感图像的清晰度检测,故其成为了目前国内外清晰度检测的主要方法^[13-16]。地球表面有 70.78% 的海洋、2.92% 的沙漠、7.01% 的草原和 9.26% 的森林,这些区域地面景物稀

少,航空相机获取的航空遥感图像中高频信息稀少,直接使用基于图像处理的清晰度检测方法容易出现失真现象。为解决上述问题,本文利用数字高程模型(DEM)进行航空相机图像的清晰度检测,能够在弱特征区域获得较好的检测效果。该方法引入高精度 DEM,根据获取的弱特征区域航空遥感图像前后两次图像具有重叠区域的特点,利用重投影误差最小化修正航空成像模型,依据弱特征重叠区域特征点的偏移量进行清晰度检测,弥补了基于图像处理的清晰度检测方法无法在弱特征区域进行清晰度检测的缺陷,拓展了基于图像处理的清晰度检测方法的适用性。

2 基本原理

2.1 基于重投影误差最小化修正航空成像模型

航空相机成像模型的建立需满足地面物点、摄影中心、像点位于同一直线,故使用摄影测量学的共线条件方程进行建立^[17-18],其形式为

$$\begin{cases} x-x_0 = -f \frac{a_1(X-X_s) + b_1(Y-Y_s) + c_1(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s) + b_3(Y-Y_s) + c_3(Z-Z_s)} \\ y-y_0 = -f \frac{a_2(X-X_s) + b_2(Y-Y_s) + c_2(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s) + b_3(Y-Y_s) + c_3(Z-Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x, y) 为像点坐标; (x_0, y_0) 为像主点坐标; f 为航

收稿日期: 2022-07-21; 修回日期: 2022-08-01; 录用日期: 2022-08-09; 网络首发日期: 2022-08-19

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(80-H30G03-9001-20/22)

通信作者: *ailsazheng@163.com

空相机主距; (X, Y, Z) 为像点对应的物点坐标;

(X_s, Y_s, Z_s) 为摄影中心坐标; $R = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$ 为横

滚角 φ 、俯仰角 θ 和偏航角 ψ 方向余弦的旋转矩阵形式。其中, x_0, y_0, f 为内方位元素, $X_s, Y_s, Z_s, \varphi, \theta, \psi$ 为外方位元素。航空成像模型如图 1 所示, 其中 H_A 为 DEM 提供的地面点 A 的精确高程值。

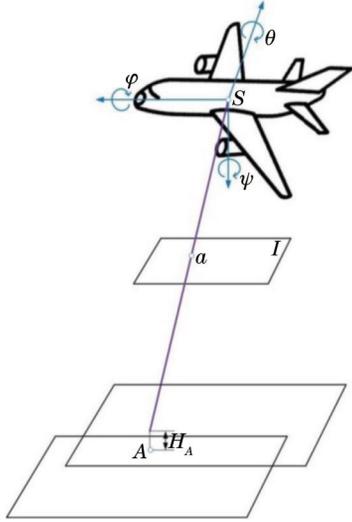


图 1 航空成像模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of aerial imaging model

航空相机因受到外界温度、气压变化等影响会造成像片发生光学畸变, 航空定向定位系统获取的外方位元素、地面坐标等偏差使得地面物点、摄影中心和像点难以满足式(1), 故需要对航空成像模型进行修正。工程上常用的方法为: 在航空成像区域内, 采取一定数量、分布均匀的地面控制点, 以重投影误差函数为目标函数, 修正航空成像模型。本文使用高精度 DEM 图像取代传统控制点作为修正航空成像模型的初始条件, 免去了复杂的人工工作, 亦能保证修正后的航空成

像模型的精确度。

相机两次成像重叠区域中的特征像点对应地面相同的景物, 使用 DEM 给航空成像模型提供地物目标的高程数据, 前次航空遥感图像中的一个特征像点对应一个地理信息坐标, 将其与后次图像中的像素点坐标误差作为单个像素的重投影误差, 对重叠区域内的每个像素的重投影误差求和作为重投影误差函数, 如图 2 所示。通过最小化重投影误差可以求取各影响因素的相对误差系数, 从而修正航空成像模型。重投影误差函数为

$$F = \min_{\gamma} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \| p_{ij} - J(\gamma, T, P_{ij}) \|_2, \quad (2)$$

式中: γ 为待求取的各影响因素的相对误差系数; p_{ij} 为前次幅面中第 i 行第 j 列的特征点的像素坐标; J 为航空成像模型, 具体形式如式(1)所示; $J(T, P_{ij})$ 可求取地面景物 P_{ij} 在后次幅面中对应特征点的位置; T 为各影响因素; P_{ij} 为特征点 p_{ij} 在对应地面景物中的地理坐标。

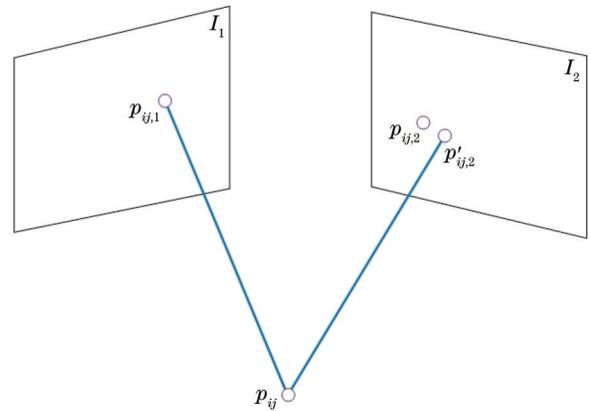


图 2 重投影误差示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reprojection error

将求取的各影响因素的相对误差系数和各影响因素引入航空成像模型中, 修正后的航空成像模型为

$$\begin{cases} x - x_0 + dx = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 + dy = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: dx 和 dy 为各影响因素对求取的特征点坐标的影响偏差函数。

2.2 基于 DEM 的清晰度检测

如图 3 所示, 在航空相机成像过程中, 物距、主距和焦距满足高斯成像原理, 具体表达式为

$$\frac{1}{H} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \quad (4)$$

式中: H 为物距, 即地面景物到航空相机的距离; F 为

焦距。

在引入 DEM 图像后, 可以通过地面点的位置获取地面景物的高程数据, 载机绝对高度可通过航空定向定位系统获取。

获取航空相机拍摄区域的 DEM 图像, 根据拍摄前后两次图像之间具有重叠区域的特点, 将重叠区域内景物的地理信息作为公共已知量, 使用修正后的航空成像模型实现特征匹配算法, 并根据特征匹配点与

实际匹配点的误差量计算航空相机内方位元素的变化量。获取的内方位元素变化量满足

$$\begin{cases} x - x_0 + dx + \Delta x = -(f + \Delta f) \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}, \\ y - y_0 + dy + \Delta y = -(f + \Delta f) \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}, \end{cases} \quad (5)$$

式中： Δx 和 Δy 为匹配特征点的坐标偏移量； Δf 为航空相机主距变化量。

在获取航空相机拍摄区域的 DEM 图像后，相机

离焦所造成的图像清晰度不足的情形可以通过高斯成像公式反映在航空相机主距 f 的变化上。因此，通过获取准确的航空相机主距变化量 Δf ，即可完成航空图像的清晰度检测。

航空相机获取的清晰图像中的内方位元素变化量为 $(\Delta x, \Delta y, \Delta f) = (0, 0, 0)$ ，此时获取的航空图像是最为清晰的。根据匹配特征点的 Δx 和 Δy ，获得的主距 Δf 反映了后次幅面中焦距离焦距 ΔF 的大小，如图 4 所示。将主距变化量 Δf 作为清晰度的检测结果，通过航空相机的焦面驱动装置快速将航空相机焦平面调整至合适位置，以获取清晰度足够的航空遥感图像。

3 实验结果与分析

为获取高质量的图像，航空相机通常采用传统的基于图像处理的清晰度检测方法。然而，因地面景物的丰富程度不同，在景物稀少的区域中传统图像处理的清晰度检测方法会出现失准现象，故提出了基于 DEM 的清晰度检测方法。为了验证所提方法对航空图像清晰度检测的效果，以宽幅测量相机获取的航空遥感图像进行清晰度检测实验。在获取航空遥感图像的过程中，航空定向定位系统固定在航空相机上，航空相机固定在稳定平台上，稳定平台固定在载机上。在实验中，将航空相机获取的弱特征区域的航空遥感图像传输到图像处理计算机中，引入预先在计算机处理

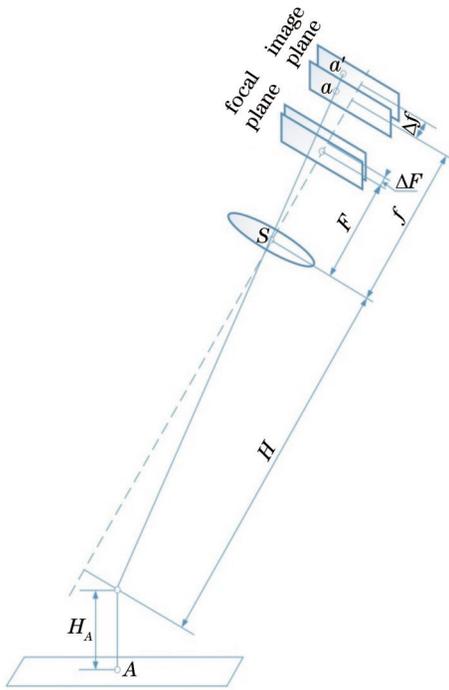


图 3 高斯成像定理与焦平面变化量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Gauss imaging theorem and focal plane variation

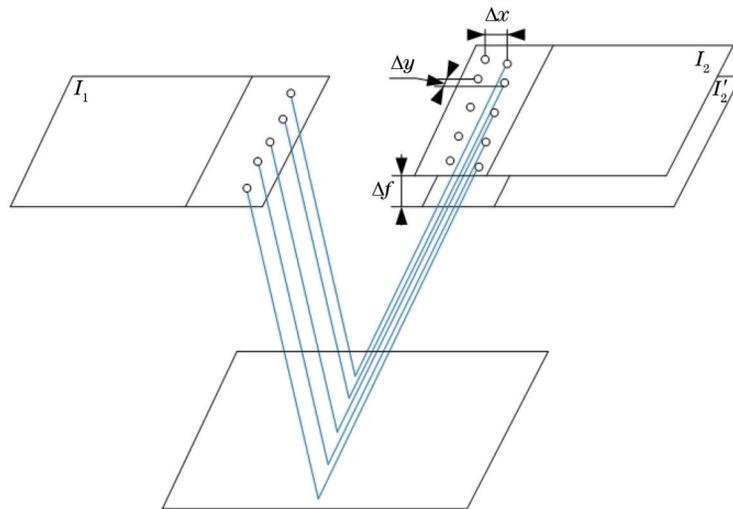


图 4 基于 DEM 的清晰度检测方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sharpness detection method based on DEM

好的精度达到毫米级的 DEM 图像,使用尺度不变特征转换(SIFT)算法提取弱特征图像处于重叠区域的特征,并根据特征点偏移量计算主距变化量,最后依据主距变化量相应地调整机械结构,从而获得清晰度足够的航空遥感图像。

在清晰度检测实验中,所使用的航空相机的焦距为 375 mm, F 数为 4, CCD 像元尺寸为 $7.4 \mu\text{m}$, 幅面大小为 $4864 \text{ pixel} \times 3232 \text{ pixel}$, 光学系统的半焦深为 Δ 。半焦深的计算公式为

$$\Delta = 2F^2\lambda, \quad (6)$$

式中: λ 为入射光波长(可见光为 $0.6 \mu\text{m}$)。此时,相机光学系统的半焦深为 $19.2 \mu\text{m}$ 。将清晰度检测误差 ΔF 保持在光学系统半焦深之内,即可保证航空相机成像清晰。在本次实验中,选取多组重叠区域特征点稀少的清晰度不足的后次幅面与足够清晰的前次幅面,以验证所提算法对不同清晰度图像的清晰度检测效果,如图 5 和图 6 所示。



图 5 所提算法对弱特征区域进行清晰度检测的结果

Fig. 5 Sharpness detection result of weak feature areas by proposed algorithm

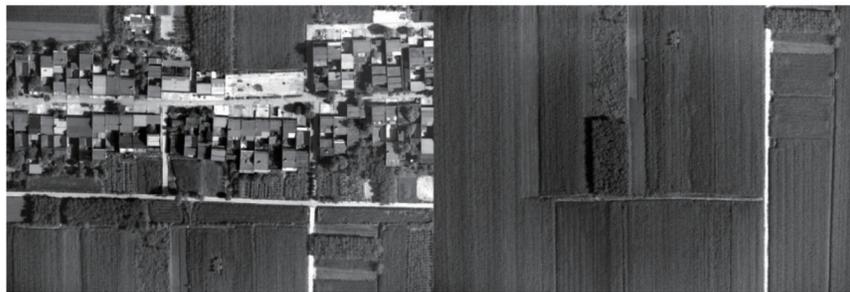


图 6 所提算法完成清晰度检测并调整机械结构后获取的航空图像

Fig. 6 Aerial image obtained after sharpness detection by proposed algorithm and mechanical structure adjustment

由图 5 和图 6 可知,所提算法能够获得清晰度检测参数,不受处理的航空遥感图像高频信息较少影响,通过调整航空相机焦面驱动机构即可使航空相机获取清晰的航空遥感图像。

为验证所提算法的通用性,分别对强特征区域与弱特征区域使用 Robert 等提出的经典清晰度检测算法和所提算法,并重复进行了 15 次实验,清晰度检测曲线如图 7 所示。可以发现,利用所提算法对从地面

景物稀少的区域获取的航空遥感图像进行清晰度检测得到的清晰度检测归一化函数曲线满足单峰性、无偏性,且具有一定的灵敏度。求取清晰度检测参数的均方根误差,如表 1 所示,其中“ \times ”表示 Brenner 等多种方法在弱特征区域无法完成清晰度检测。

由表 1 可知,所提算法与经典的基于图像处理的算法在地面景物丰富的区域均能实现清晰度检测。在地面景物丰富的区域使用不同清晰度检测算法进行

表 1 不同清晰度检测方法对强特征区域与弱特征区域的检测精度比较

Table 1 Comparison of detection accuracies of different sharpness detection methods for strong characteristic areas and weak characteristic areas

Algorithm	Sharpness detection accuracy	
	of strong characteristic area	of weak characteristic area
Brenner	20.8	\times
Laplacian	28.4	\times
Robert	25.8	\times
Sobel	19.7	\times
Proposed algorithm	15.8	16.3

unit: μm

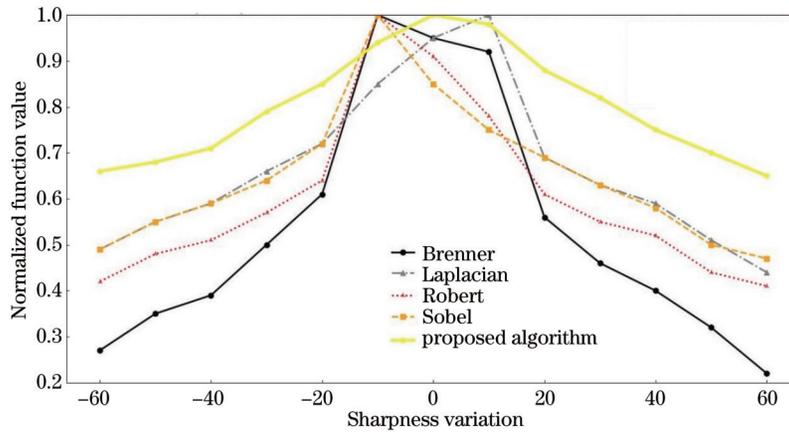


图 7 经典清晰度检测算法与所提算法在弱特征区域的清晰度检测归一化函数曲线

Fig. 7 Sharpness detection normalization function curves of classical sharpness detection algorithms and proposed algorithm in weak characteristic areas

15次重复实验,其中所提算法清晰度检测参数的均方根误差为 $15.8 \mu\text{m}$, 相较 Laplacian、Sobel 等经典的清晰度检测算法检测精度更高。由于所提算法需要引入 DEM 数据,故其清晰度检测精度受引入数据模型的精度影响。同时,所提算法需要修正航空成像模型,模型较为复杂,不如经典的清晰度检测算法实时性高。经典的基于图像处理的清晰度检测算法受到地面景物的限制,在地面景物稀少的区域中容易产生失准现象,而所提算法由于依靠的是航空成像模型进行清晰度检测,故对拍摄地区景物丰富程度的要求较低,在地面景

物稀少的区域也能保证清晰度检测精度。在地面景物稀少的区域进行多次重复实验,所提算法的清晰度检测参数的均方根误差可以达到 $16.3 \mu\text{m}$, 完全满足航空相机获取图像的清晰度检测需求。

在本次实验中,为验证弱特征区域选取特征点位置对所提算法清晰度检测精度的影响,选取分布在弱特征区域内前后两次幅面重叠区域中不同区域的特征点进行计算后次幅面相对前次幅面的内方位元素变化量,进行重复 20 次提取与计算,其均方根误差如表 2 所示。

表 2 弱特征区域特征点位置对清晰度检测精度的影响

Table 2 Influence of feature point position in weak feature areas on sharpness detection accuracy

Pixel coordinate of feature point in previous image (upper left corner is origin)	Root-mean-square error of image sharpness parameter calculation / μm
(4231, 2875)	16.275
(3491, 2943)	16.778
(3486, 3082)	14.314
(2058, 3152)	14.210
(1789, 2645)	14.573
(1560, 2693)	14.928
(74, 2610)	17.806
(4229, 2596)	18.324
(3499, 2551)	13.877
(3482, 2703)	15.002
Root-mean-square error of total error	16.275

弱特征区域中的景物分布不均匀,在引入高精度 DEM 后,利用重投影误差最小化修正航空成像模型,剔除了外方位元素测量误差和光学畸变等系统误差,但因残差的影响,仍然会造成清晰度检测结果的误差。由表 2 可知,选取图像不同区域的景物提取特征会对清晰度检测结果产生影响:选取接近重叠区域中心位置的特征点计算清晰度检测参数的误差较小;选取重

叠区域边缘位置的特征点计算清晰度检测参数,精度相对选取中心区域特征点计算清晰度检测参数降低了约 38%,为所提算法选取重叠区域特征点位置提供了一定的指导。所提算法在弱特征区域计算清晰度检测参数的均方根误差为 $16.275 \mu\text{m}$, 小于光学系统的半焦距 ($19.2 \mu\text{m}$), 满足航空相机实际工程精度需求,证明所提算法具备一定的工程应用价值。

4 结 论

为满足航空相机在军事侦察、地形测绘的应用需求,需要实时获取清晰的航空遥感图像,而获得清晰图像的关键是精确的清晰度检测技术。为解决弱特征区域中航空相机成像清晰度检测的问题,根据前后两次图像间具有重叠区域的特点,提出了一种基于 DEM 的航空相机图像清晰度检测方法。在引入 DEM 数据的基础上,以重投影误差最小化为准则优化航空成像模型,根据航空遥感图像前后两次幅面重叠区域的景物地理信息,计算后次幅面相对于前次幅面的主距变化量,从而获取其清晰度检测结果。经多次实验验证:所提算法在特征稀少的区域中清晰度测量均方根误差为 $16.275\ \mu\text{m}$;在航空相机光学系统的半焦深小于 $19.2\ \mu\text{m}$ 的范围内,精度满足航空相机实际工程精度需求,即所提算法具备一定的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 吴宏圣. TDI CCD 全景航空相机像移补偿研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
Wu H S. Study of image motion compensation in panoramic aerial camera with TDI CCD[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [2] 许永森, 田海英, 惠守文, 等. 国外传输型航空相机的发展现状与展望[J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 38-43.
Xu Y S, Tian H Y, Hui S W, et al. Trend and development actuality of the real-time transmission airborne reconnaissance camera[J]. OME Information, 2010, 27(12): 38-43.
- [3] Tian Y M, Sun A F, Luo N, et al. Aerial image mosaicking based on the 6-DoF imaging model[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(1): 74-89.
- [4] 黄凌锋, 董峰, 傅雨田. 基于成像系统姿态信息的分时积分图像偏移修复[J]. 光学学报, 2022, 42(24): 2411001.
Huang L F, Dong F, Fu Y T. Time sharing integral image offset restoration based on the attitude information of imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(24): 2411001.
- [5] 李福东. 航空远距离倾斜摄影相机扫描稳像及像移补偿技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Li F D. Research on scanning & motion compensation of airborne camera for long range oblique photography[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [6] 叶一青, 易定容, 张勇贞, 等. 基于倾斜摄像头的显微自动对焦方法[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1218001.
Ye Y Q, Yi D R, Zhang Y Z, et al. Microscopy autofocus method using tilt camera[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1218001.
- [7] 许永森, 丁亚林, 田海英, 等. 斜视状态下航空遥感图像移的计算与补偿[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1779-1783.
Xu Y S, Ding Y L, Tian H Y, et al. Calculation and compensation for image motion of aerial remote sensor in oblique situation[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(11): 1779-1783.
- [8] 许兆林, 王尚强. 图像清晰度评价函数在航空相机中的应用[J]. 光电与控制, 2012, 19(7): 57-59, 84.
Xu Z L, Wang S Q. Application of the image definition criterion function in aerial camera[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(7): 57-59, 84.
- [9] 惠守文. 长焦距斜视实时航空相机自动调焦技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
Hui S W. Study of automatic focusing technique for long focus oblique real-time aerial camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [10] 钱立勇, 吴德成, 刘东, 等. 高光谱成像激光雷达扫描镜的分析与设计[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0928002.
Qian L Y, Wu D C, Liu D, et al. Analysis and design of hyperspectral imaging LiDAR scanning mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0928002.
- [11] 苗壮, 何斌. 基于摆扫反射镜的大视场成像移模型[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(2): 242-246.
Miao Z, He B. Image motion model of large field of view imaging based on swing mirror[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(2): 242-246.
- [12] 张赫, 乔川, 匡海鹏. 基于激光测距的机载光电成像系统目标定位[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 8-16.
Zhang H, Qiao C, Kuang H P. Target geolocation based on laser range finder for airborne electro-optical imaging systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(1): 8-16.
- [13] 王海江, 郑丽娜, 康琦. 基于多重差分滤波效应的航空相机图像检焦方法[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0411001.
Wang H J, Zheng L N, Kang Q. Image focusing method based on multiple differential filtering effects for aerial cameras[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0411001.
- [14] 翟心愿. 基于单目的实时同步定位与制图的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Zhai X Y. Study on real-time single camera based SLAM[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [15] Vogiatzis G, Hernández C. Video-based, real-time multi-view stereo[J]. Image and Vision Computing, 2011, 29(7): 434-441.
- [16] 齐晓世. 基于单目视觉的无人机 SLAM 技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
Qi X S. Research on UAV SLAM technology based on monocular vision[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [17] 莫德林, 张永生, 王涛, 等. 航空线阵摆扫式相机严格成像模型的构建与验证[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(3): 270-277.
Mo D L, Zhang Y S, Wang T, et al. Construction and verification of rigorous imaging model of airborne linear array whiskbroom camera[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2018, 35(3): 270-277.
- [18] 王洁, 黄伟, 张剑勇, 等. 航天验证器运动参数摄影测量方法[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0311001.
Wang J, Huang W, Zhang J Y, et al. Motion parameters of space validator relay videometrics method[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0311001.

Sharpness Detection Method for Aerial Camera Images Based on Digital Elevation Model

Dai Dongchen^{1,2}, Zheng Lina^{1*}, Zhang Yu^{1,2}, Wang Haijiang^{1,2}, Kang Qi¹, Zhang Yang¹

¹*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract

Objective The working environment of aerial cameras is complex. In the process of acquiring aerial remote sensing images, the optical system is defocused due to the influence of external environments such as ground elevation difference, temperature, and air pressure. The obtained aerial remote sensing images are not clear enough. The sharpness detection methods based on image processing complete the sharpness detection through the spectrum analysis of high-frequency information in aerial remote sensing images. Taking advantage of the fast running speed of computers, the sharpness detection of aerial remote sensing images is completed in real time. Therefore, it has become the main method of sharpness detection both in China and abroad. However, the weak characteristic areas such as oceans, grasslands, and deserts, which cover more than half of the earth, have less high-frequency information in aerial remote sensing images. When using conventional image methods for sharpness detection, the error rate is high. According to the characteristics of overlapping areas between the two images, a method of aerial camera image sharpness detection based on a digital elevation model (DEM) is proposed. This method introduces a high-precision DEM, and according to the acquired weak characteristic areas, the two images before and after the aerial remote image sensing feature overlapping areas. The aerial imaging model is modified by minimizing the re-projection error, and the sharpness is detected according to the offset of feature points in the weak characteristic overlapping areas. It makes up for the defect that the sharpness detection methods based on image processing can't detect the sharpness in weak characteristic areas and expands the applicability of the sharpness detection methods based on image processing.

Methods In this study, an aerial imaging model and feature point matching are used to obtain image sharpness parameters. Firstly, a DEM is used to provide the elevation data of the ground object in the aerial imaging model. The sum of the re-projection error of each pixel in the overlapping areas is regarded as the re-projection error function. By minimizing the re-projection error, relative error coefficients of various influencing factors can be obtained, so as to modify the aerial imaging model. Then, according to the characteristics of the overlapping areas between the two images, the geographical information of sceneries in the overlapping areas is regarded as public knowledge. The modified aerial imaging model is used to realize the feature point matching algorithm. In addition, according to the error between the feature matching points and the scale-invariant feature transformation (SIFT) algorithm matching points, the change in the azimuth elements in the aerial camera is calculated. Finally, the change in the principal distance is used as the sharpness detection result. Through the focal plane driving device of the aerial camera, the focal plane of the aerial camera can be quickly adjusted to an appropriate position, so as to obtain aerial remote sensing images with sufficient sharpness.

Results and Discussions In the experiment, aerial remote sensing images of the weak characteristic areas obtained by the aerial camera are transmitted to an image processing computer, and the DEM images with the accuracy of millimeter level processed by the computer in advance are introduced. SIFT algorithm is used to extract the features of the weak characteristic images in the overlapping areas, and the change in principal distance is calculated by the offset of feature points. Finally, the corresponding mechanical structure is adjusted according to the change in the principal distance, and aerial remote sensing images with sufficient sharpness are obtained. In this experiment, we select the second dimension with insufficient sharpness and the previous dimension with enough clear feature points in multiple groups of overlapping areas to verify the sharpness detection effect of the proposed algorithm between images with different sharpness (Fig. 5 and Fig. 6). In areas with abundant ground sceneries, 15 repeated experiments are carried out using different sharpness detection algorithms. The root-mean-square error of the sharpness detection parameters of the algorithm in this paper reaches $15.8 \mu\text{m}$ (Table 1). After 15 repeated experiments in areas with scarce ground sceneries, the root-mean-square error of the sharpness detection parameters of proposed algorithm can reach $16.3 \mu\text{m}$. The classic sharpness detection algorithms such as Robert and proposed algorithm are used for weak characteristic areas, and 15 experiments are repeated. The sharpness detection curves are shown in Fig. 7. The root-mean-square error of sharpness detection parameters in the weak feature areas calculated by proposed algorithm can reach $16.275 \mu\text{m}$ (Table 2), and it meets the actual engineering

accuracy requirements of aerial cameras. It is proved that proposed algorithm has a certain engineering application value.

Conclusions In order to meet the application requirements of aerial cameras in military reconnaissance and topographic mapping, it is necessary to obtain clear aerial remote sensing images in real time. The key to obtaining a clear image is precise sharpness detection technology. In order to solve the problem of aerial camera imaging sharpness detection in weak characteristic areas, the characteristics of overlapping areas between the two images are analyzed, and a method of image sharpness detection of aerial cameras based on DEM is proposed. Based on DEM data, an aerial imaging model is optimized by minimizing the re-projection error. According to the geographical information of the sceneries in the overlapping areas of the aerial remote sensing images in the front and back formats, the change in the principal distance of the latter format relative to the previous format is calculated, so as to obtain the sharpness detection results. After many experiments, the root-mean-square error of sharpness measurement in areas with few features is $16.275\ \mu\text{m}$, which is within the range of half focal depth of an aerial camera optical system ($19.2\ \mu\text{m}$). The accuracy meets the actual engineering accuracy requirements of aerial cameras, and the proposed algorithm has a certain engineering application value.

Key words image processing; aerial cameras; sharpness detection; digital elevation model; aerial imaging model; feature matching