

# 无人机遥感图像几何畸变校正 全过程控制方法研究

赵丽斌<sup>1</sup>, 杜娇娇<sup>2</sup>, 贺 铮<sup>1</sup>, 王祝先<sup>3</sup>, 韩宏亮<sup>3</sup>, 范 蕊<sup>3</sup>, 徐望博<sup>3</sup>

(1. 黑龙江人工影响天气办公室, 哈尔滨 151000;

2. 沈阳工程学院, 沈阳 210000; 3. 黑龙江省气象数据中心, 哈尔滨 151000)

**摘要:** 几何畸变是一种常见的像素点突变行为, 在无人机遥感图像中, 像素点几何畸变行为的表现能力越强, 遥感主机对无人机图像的控制能力越弱。为准确校正像素点几何畸变行为, 提升遥感主机对无人机图像的控制能力, 针对无人机遥感图像几何畸变校正全过程控制方法展开研究; 提取无人机遥感图像的几何描述符, 并定义畸变像素点的尺度空间, 完成对畸变像素点的配准处理; 针对几何畸变像素点实施重采样, 通过计算畸变校正参数的方式, 求解校正处理函数, 实现对无人机遥感图像几何畸变的校正; 利用畸变校正交点, 确定图像几何畸变区域的覆盖范围, 再联合控制对象标定条件, 完成对无人机遥感图像几何畸变校正的全过程控制; 实验结果表明, 所提控制方法的应用, 可以避免几何畸变节点处的像素值出现明显变化的情况, 畸变前后的像素差不超过 5.0 pt, 能够实现对无人机遥感图像中像素点几何畸变行为的精准校正, 符合实际应用需求。

**关键词:** 无人机遥感图像; 几何畸变校正; 全过程控制; 描述符; 尺度空间; 重采样; 校正交点; 控制对象标定

## Research on Whole Process Control Method for Geometric Distortion Correction of UAV Remote Sensing Images

ZHAO Libin<sup>1</sup>, DU Jiaojiao<sup>2</sup>, HE Zheng<sup>1</sup>, WANG Zhuxian<sup>3</sup>, HAN Hongliang<sup>3</sup>, FAN Rui<sup>3</sup>, XU Yibo<sup>3</sup>

(1. Heilongjiang Weather Modification Office, Harbin 151000, China; 2. Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 210000, China; 3. Heilongjiang Provincial Meteorological Data Center, Harbin 151000, China)

**Abstract:** Geometric distortion is a common pixel mutation behavior, and the stronger the performance of pixel geometric distortion behavior in unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing images, the weaker the control ability of remote sensing host to UAV images. In order to accurately correct the pixel geometric distortion behavior and improve the control ability of remote sensing host over UAV images, a full process control method for geometric distortion correction of UAV remote sensing images is researched. The geometric descriptor of UAV remote sensing images is extracted, and the scale space of distorted pixels is defined to complete the registration processing of distorted pixels. Resampling is implemented for geometrically distorted pixels, and the correction processing function is solved by calculating correction parameters to achieve the correction of geometric distortion in UAV remote sensing images. The correction control points are used to determine the coverage range of the geometric distortion area in the images, and the full process control of geometric distortion correction of UAV remote sensing images is completed in conjunction with the calibration conditions of control objects. The experimental results show that the proposed control method can avoid obvious changes in pixel values at geometric distortion nodes, and the pixel difference before and after distortion does not exceed 5.0 pt, which can achieve accurate correction of pixel geometric distortion behavior in UAV remote sensing images and meet practical application requirements.

**Keywords:** drone remote sensing images; geometric distortion correction; full process control; descriptor; scale space; resampling; correction intersection; control object calibration;

## 0 引言

遥感是一种远距离非接触型的探测技术, 主要应用遥感传感器或传感器元件, 对电磁波辐射信号进行探测, 并可以将元件设备采集到的数据信息反馈回显示器主机之中, 以供其绘制出完整的地物景观图像。无人机遥感图像就是指应用无人机遥感技术所绘制的景观图像, 能够清晰反映出目标识别物体的宽度、广度等物理信息, 由于传感器设备

直接搭载于无人机飞行器之上, 所以应用该项技术所绘制遥感图像的覆盖区域更大, 且可在任意识别位置上长时间停留, 以便于遥感主机能够准确掌握对象节点的全部信息<sup>[1]</sup>。相较于常规遥感图像, 无人机遥感图像的精度水平更高, 特别是在地表环境复杂、高温、高湿等特殊环境下, 只要保证遥控器设备对于无人机飞行器的精准控制能力, 就能够获得满足实际应用需求的遥感图像信息。随着无人

收稿日期: 2023-07-05; 修回日期: 2023-08-17。

基金项目: 黑龙江省气象局基于地面降水量的区域历史回归等统计方法对一次人工增雨的效果检验研究 (HQZC2020052)。

作者简介: 赵丽斌(1985-), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 赵丽斌, 杜娇娇, 贺 铮. 无人机遥感图像几何畸变校正全过程控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 133-139.

机技术的快速发展,越来越多的应用场景开始采用无人机遥感图像进行数据采集和分析。在气象观测领域,传统的气象观测主要依赖于气象站点、卫星和传统航空平台等,其固定性、不灵活性和高成本限制了对大尺度气象现象的观测能力,而无人机作为一种低成本、灵活性高的数据采集工具,具有更广阔的应用前景。

图像校正就是指针对失真图像所进行的复原性处理,其基本执行思路就是根据失真原因,建立数学操作模型,从而在提取出失真区域内像素信息的同时,按照失真逆过程恢复图像原本面貌。对于无人机遥感图像而言,在校正几何畸变类像素点突变行为时,需利用滤波器元件,估算失真图像中的像素值水平,再根据预先规定的误差标准,使复原后图像无限接近真实图像。在复原无人机遥感图像时,基于 CNN-SPGD 算法的校正方法根据高阶像差的数值水平,完成对无人机遥感图像的分割处理,再联合 Zernike 系数指标,确定校正后图像中几何畸变行为的表现强度<sup>[2]</sup>。基于频域解模糊的校正方法根据几何像素点的色散特征,判断畸变行为的表现程度,再通过测量极化误差的方式,完成对畸变像素的校正处理<sup>[3]</sup>。

然而在像素点几何畸变行为表现能力极强的情况下,上述两种方法的校正效果相对有限,并不能有效控制畸变前后的像素差,使其始终保持在较低的数值水平,特别是在几何描述符提取结果不明确的情况下,畸变像素点的尺度空间有可能偏离几何图像区域而独立存在,不但会影响显示器主机对地物景观图像的处理能力,还有可能导致过度校正或小范围校正等操作行为的出现<sup>[4]</sup>。这些畸变会严重影响图像的几何精度和信息提取,特别是对于气象观测来说,精确的几何校正是获取可靠的结果和定量分析的基础。此外,若像素点对象的取样不合理,还会使基站主机无法实现对几何畸变行为的配准处理,不但无法解决无人机遥感图像的矢量失真问题,还会影响主机元件对几何像素节点的处理能力,从而无法将图像复原至原始状态。针对上述问题,提出一种新型的无人机遥感图像几何畸变校正全过程控制方法,并通过对比实验的方式,突出该方法的实际应用价值,提高无人机遥感图像的几何精度和信息质量,从而为气象观测提供更可靠、精确的数据支持。

### 1 无人机遥感图像几何畸变像素点配准

无人机遥感图像几何畸变像素点配准是实现校正全过程控制的基础环节,利用提取所得几何描述符,定义完整的畸变像素点尺度空间,再通过像素点匹配的方式,得到准确的配准处理结果。

#### 1.1 遥感图像几何描述符提取

提取无人机遥感图像的几何描述符就是通过几何划分图像区域的方式,将聚合在一起的畸变像素点分割成完全独立的部分,并分别在每一区域内完成对像素对象的描述,再根据关联对比结果,获得符合校正需求的畸变行为描述条件,以便于基站主机能够对几何畸变校正行为进行全过程控制。为实现对无人机遥感图像的精准校正,单位图像

区域所包含的畸变像素点对象越多,在提取校正描述符时,所划分出的图像几何区域就越多<sup>[5]</sup>。针对无人机遥感图像的几何区域划分原则如图 1 所示。

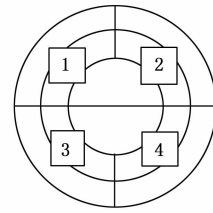


图 1 无人机遥感图像几何区域划分

在无人机遥感图像中,每一个几何描述符节点都负担大量的畸变像素对象,所以提取所得的描述符节点具有区域性校正像素畸变行为的能力<sup>[6]</sup>。设  $\Delta I$  表示无人机遥感图像几何畸变像素对象的单位累积量,  $\chi$  表示无人机遥感图像中的几何畸变区域划分参数,表示几何畸变节点处的图像像素表现特征,  $\vec{O}$  表示描述符对象的几何定义向量,且  $\chi > 0$ 、 $\vec{O} \neq 0$  的不等式取值条件恒成立,联立上述物理量,可将无人机遥感图像的几何描述符提取表达式定义为:

$$\delta = |\Delta I| \times \left(1 - \chi \frac{\vec{R}}{O}\right) \quad (1)$$

如果某一几何图像区域内,存在描述符数量小于畸变像素对象数量的情况,则有可能出现无法完全控制校正行为的问题,因此在设计全过程控制方法的过程中,应尽量使几何描述符提取表达式计算数值趋近其极大值结果。

#### 1.2 利用几何描述符构造畸变像素点尺度空间

像素点尺度空间是包含所有无人机遥感图像几何畸变像素对象的数据样本集合,且每一集合区间内所有数据对象都由一个几何描述符提取所得。所谓尺度,可以理解为数值界限标准,在同一无人机遥感图像几何区域内,尺度条件定义得越细致,基站主机在像素点尺度空间去取样所得的校正信息对象也就越符合全过程控制需求<sup>[7]</sup>。利用几何描述符构造畸变像素点尺度空间时,为保证畸变像素对象与校正节点之间数值对应关系的唯一性,要求基站主机所提取描述符必须属于同一个无人机遥感图像几何区域<sup>[8]</sup>。

规定  $i$  表示满足几何描述符提取条件的畸变像素点取样参量,其定义式为:

$$i = \frac{1}{\alpha} \sum_{-\infty}^{+\infty} [U_{\max} - \beta u (y^2)^{-1}] \quad (2)$$

其中:  $\alpha$  表示几何区域内的像素点边界取样值,  $U_{\max}$  表示遥感图像几何描述符定义项的最大数值,  $u$  表示描述符节点的几何标记参数,  $y$  表示描述符节点内的畸变像素赋值,  $\beta$  表示描述符节点内的像素畸变系数。

联立公式 (1)、公式 (2),可将无人机遥感图像几何畸变像素点尺度空间表达式定义为:

$$Y = \frac{1}{1 + \left(\frac{\vec{R}}{\delta \times i}\right)^2} \quad (3)$$

其中:  $\vec{R}$  表示几何畸变像素点处的校正尺度定义向量。

单位控制周期内,基站主机提取所得的无人机遥感图像几何描述符数量越多,就表示畸变像素的单位累积量越大,故而为保证像素点尺度空间的完整性,应尽量避免在单一描述符节点处,重复定义畸变像素对象。

### 1.3 尺度空间内的像素点匹配处理

在尺度空间内完成对畸变像素点的匹配处理,就是在尺度空间内,对畸变像素点取值,再按照统一性原则,将校正前、校正后的像素点对象对应连接起来,并以当前所连接匹配连线为基础,完成对无人机遥感图像几何畸变校正行为的全过程控制。在原始无人机遥感图像中,像素点分布状态受到图像对比度、亮度等参数的影响,因此若像素点发生迁移,就表示当前区域内存在几何畸变行为。受到几何畸变行为的影响,像素点在无人机遥感图像中的分布顺序会发生改变,而这种变化行为的表现强度可以用像素点迁移距离来表示,通常来说,几何畸变行为的表现强度越大,像素点的迁移距离也就越远<sup>[9]</sup>。尺度空间内的像素点匹配处理原则如图2所示。

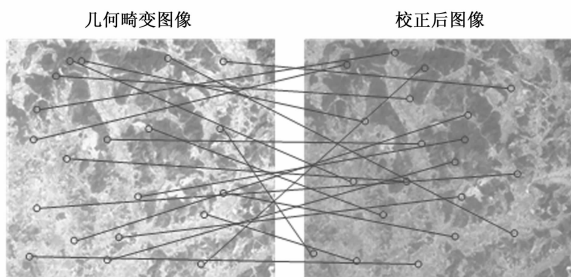


图2 校正前、后的畸变像素点匹配原则

规定  $E_1$  表示原始无人机遥感图像中的像素点分布参数,  $E_2$  表示畸变后遥感图像中的像素点分布参数,  $\bar{T}$  表示单位匹配区域内的像素点对应特征。在上述物理量的支持下,联立公式(3),可将无人机遥感图像尺度空间内的像素点匹配处理条件表示为:

$$r = -\frac{1}{2} Y^2 \frac{E_1}{E_2} | \bar{T} | \quad (4)$$

配准处理无人机遥感图像几何畸变像素点的过程中,畸变像素点与原始像素点之间的匹配关系并不会发生变化,因此校正前、后图像中的配准连接线段发生交叉或重叠现象都属于正常情况,但由于尺度空间内已存在像素点并不会消失,所以配准连接线段不存在断裂的可能<sup>[10]</sup>。

## 2 针对配准后几何畸变像素点的无人机遥感图像校正

在配准处理后,为充分校正无人机遥感图像的几何畸变行为,还应针对畸变像素点实施重采样,并通过计算畸变校正参数的方式,求解完整的校正处理函数表达式。

### 2.1 无人机遥感图像几何畸变像素点重采样

重采样不意味着摒弃已有畸变像素点实施重新采样,而是应在已有畸变像素点对象的基础上,在尺度空间内继续采样,且前次采样、后次采样所得像素点对象必须具有相同的几何畸变特征。为实现对无人机遥感图像几何畸变

校正行为的全过程控制,必须在重采样畸变像素点阵列中计算一个不在原阵列位置上的新像素值指标,且这个指标参量的取值不得与任意一个几何畸变像素信息相同<sup>[11]</sup>。

对于无人机遥感图像畸变像素点尺度空间内新像素值指标的计算满足如下表达式:

$$t = r \sum (e_1 + e_2 + \dots + e_n) + \frac{1}{2} \| \bar{W} \|^2 \quad (5)$$

其中:  $e_1, e_2, \dots, e_n$  表示  $n$  个随机选取的几何畸变像素对象,且其取值恒属于  $[1, +\infty)$  的数值区间,  $\bar{W}$  表示原阵列位置上的像素点几何畸变特征量均值。

如果将新像素值指标视为定值,则可以认为不与原无人机遥感图像中像素节点重合的像素对象都属于重采样处理的操作目标<sup>[12]</sup>。此外,在无人机遥感图像的单位几何畸变区域内,所需重采样的像素点数量越多,就表示需要校正的畸变对象越多。利用公式(5),推导几何畸变像素点重采样表达式为:

$$Q = \sum_{\epsilon=1} \sum_{\epsilon=1} t | \gamma \cdot \hat{q} |^2 \quad (6)$$

其中:  $\epsilon$  表示像素点几何畸变行为的边界值参数,  $\gamma$  表示无人机遥感图像内几何畸变像素节点的重定义系数,  $\hat{q}$  表示二次取样过程中的像素点几何畸变特征。理想情况下,重采样取得的无人机遥感图像几何畸变像素点个数与原有畸变像素点个数的差值水平较小,一般不会超过遥感图像总像素点个数的五分之一。

### 2.2 基于重采样的畸变校正参数计算

畸变校正参数就是指利用重采样结果,求解所得的几何畸变行为校正向量,若其取值属于  $(0, +\infty)$  的数值区间,则表示在采集遥感图像的过程中,无人机飞行方向与基站主机所规定的负行进方向重合;若畸变校正参数取值属于  $(-\infty, 0)$  的数值区间,则表示在采集遥感图像的过程中,无人机飞行方向与基站主机所规定的正行进方向重合。

全过程控制是长时间持续的控制行为,对于无人机遥感图像而言,像素点对象的几何畸变程度并不可控,特别是在完成重采样之后,如果不能保证校正前、校正后畸变像素点间的精准匹配关系,则有可能导致失衡控制行为的出现<sup>[13-14]</sup>。因此,对于畸变校正参数的计算,还应在完成几何畸变像素点重采样处理后,再次校准畸变前、畸变后像素点之间的对应关系,并以此实现对无人机遥感图像几何畸变的准确校正。

对于无人机遥感图像几何畸变校正参数的计算满足如下表达式:

$$A = \sqrt{\frac{Q}{\varphi^2 - 1}} \cdot | \bar{S} | \left( \frac{\bar{a}}{\varphi} \right)^2 \quad (7)$$

其中:  $\varphi$  表示几何畸变行为程度定义项参数,且  $\varphi > 1$  的不等式取值条件恒成立,  $\bar{S}$  表示无人机遥感图像中畸变后像素点的平均偏离距离,  $\bar{a}$  表示几何畸变行为的校正阈值,  $\varphi$  表示像素点几何畸变程度的度量系数。  $S > 0$  成立,表示所需校正像素点的几何畸变方向与基站主机所定义无人机飞行正方向相同;反之,若  $\bar{S} < 0$  成立,则表示所需校正像素点的几何

畸变方向与基站主机所定义无人机飞行负方向相同。

### 2.3 应用校正参数的校正处理函数求解

校正处理函数是校正无人机遥感图像几何畸变像素点的核心参考条件,完成配准处理后,原像素点与畸变像素点之间的对应关系能够保持稳定状态,因此在求解校正处理函数时,需保证校正参数取值方向与像素点几何畸变方向保持一致。对于函数,可以理解为自变量与因变量之间的数值映射关系,在校正处理无人机遥感图像几何畸变行为的过程中,为保证全过程控制效果的准确性,有必要对所涉及像素对象进行分别取值<sup>[15]</sup>。

应用校正参数求解无人机遥感图像几何畸变校正处理函数,应同时定义几何自变量、几何因变量两类物理参数<sup>[16]</sup>。设  $\kappa$  表示无人机遥感图像中具有几何畸变意图的自变量参数,实施校正处理的过程中,该项物理量的取值越大,就表示像素对象的数量越多。 $d$  表示无人机遥感图像中具有几何畸变意图的因变量参数,与自变量不同,该项物理量的取值越大,就表示几何畸变行为的表现能力越强。在上述物理量的支持下,联立公式(7),可将无人机遥感图像几何畸变校正处理函数表示为:

$$F = \sum_{i=1}^{\kappa} A^{i+1} \frac{\sqrt{(g_{\max})^2 - (g_{\min})^2}}{d^2} \quad (8)$$

其中: $\iota$  表示实时校正系数, $g_{\max}$  表示畸变像素行为指征的最大取值, $g_{\min}$  表示畸变像素行为指征的最小取值。由于校正处理可以有效控制无人机遥感图像几何畸变行为的表现强度,且为实现全过程控制,所取样像素对象都属于同一个尺度空间,所以在求解校正处理函数时,为避免取样顺序对校正结果造成影响,应按照几何畸变行为的表现顺序,完成对像素点信息的筛选。

### 3 几何畸变校正后的全过程控制方法设计

无人机遥感图像几何畸变校正全过程控制方法的设计,除了要参考校正处理函数表达式外,还需利用提取所得校正交点,求解几何畸变区域的覆盖面积,从而在标定控制对象的同时,完善全过程控制的具体执行流程。

#### 3.1 无人机遥感图像几何畸变校正交点提取

校正交点就是同时包含几何畸变像素对象与原始像素对象的无人机遥感图像节点,具有较强的可操作能力。通常情况下,一幅完整的无人机遥感图像中可以存在大量的校正交点,且经过校正处理后,交点密集分布区域的像素水平明显高于稀疏分布区域。实施几何畸变校正的全过程控制,出于控制效果稳定性的考虑,应对图像区域内的校正交点进行平均提取,一方面可以解决因遗漏某些畸变像素而造成的非精准校正问题,另一方面也能够判断出校正前、后畸变像素点之间的匹配关系,从而使基站主机能够更好控制整个校正处理环节<sup>[17]</sup>。

对于校正交点的提取具有双向性操作特征,在几何畸变行为表现方向为正时,所提取交点也必须指向正方向,反之交点对象则必须指向负方向<sup>[18]</sup>。利用公式(8),推导无人机遥感图像几何畸变校正交点的提取表达式为:

$$D = \sum_{\mu=1}^{+\infty} (h_0 - \sum_{\nu=1}^{+\infty} fF\hat{H}^2) \quad (9)$$

其中: $h_0$  表示交点分布密度的标准数值, $\mu$  表示密集图像区域内的交点分布参数, $\nu$  表示稀疏图像区域内的交点分布参数, $f$  表示针对几何畸变校正条件的校正交点取样系数, $\hat{H}$  表示单位校正区域内的交点位置定义项。基站主机对于无人机遥感图像几何畸变校正行为的控制,必须参考正交点分布情况,且只有在正交点密度水平大于畸变像素点密度水平的前提下,才能保障全过程控制的准确性。

#### 3.2 校正交点处的无人机遥感图像几何畸变区域求解

无人机遥感图像几何畸变区域是指畸变像素点的边界存在范围。水平方向上,畸变像素点保持均匀的波动状态,且极大值与极小值之间的差值水平决定了无人机遥感图像在水平方向上的几何畸变表现强度;竖直方向上,畸变像素点保持完全连贯的分布状态,极大值与极小值之间的差值水平决定了无人机遥感图像在竖直方向上的几何畸变表现强度<sup>[19]</sup>。

在校正交点处,几何畸变区域的覆盖范围越大,就表示该区域内所包含的无人机遥感图像几何畸变像素对象越多。求解几何畸变区域时,对于像素对象的定义必须满足较交叉取样的原则<sup>[20]</sup>。所谓交叉取样,就是指畸变像素对象的分布应满足相互关联状态,即畸变像素不可以单独存在,每一个畸变像素周围需要包含两个或两个以上其他类型的像素节点,但这些像素节点是否表现为畸变状态并不是必要条件。

对于校正交点处无人机遥感图像几何畸变区域的求解满足如下表达式:

$$G = \lambda \sum_{\nu \in (0, +\infty)} \left[ f(D)^2 - \frac{1}{j} (\bar{K})^2 \right] \quad (10)$$

其中: $\lambda$  表示校正交点对于畸变像素的识别系数, $\nu$  表示几何畸变像素分布向量的最小取值, $f$  表示畸变校正节点与非畸变校正节点之间的像素量差参数, $j$  表示校正交点对于畸变像素的导入向量, $\bar{K}$  表示几何畸变区域内的像素参量定义特征。畸变区域的覆盖范围越大,就表示待校正的无人机遥感图像几何畸变像素对象越多,实施全过程控制时,所需提取的校正交点也就越多。

#### 3.3 几何畸变区域内的无人机遥感图像控制对象标定

在几何畸变区域,完成对无人机遥感图像控制对象的标定就是将满足同一校正标准的像素对象筛选处理,再利用相同的控制标记对这些像素对象进行记录,从而使得基站主机能够提取到其所需的所有畸变像素对象,并控制校正行为的整个执行流程。基站主机对于控制对象的定义较为局限,在无人机遥感图像中,只有具有明显几何畸变行为趋向的像素点才能成为目标控制对象,且在标定处理的过程中,为达到理想化的控制效果,每一畸变区域所遵循的标定原则完全相同<sup>[21-22]</sup>。

规定  $l$  表示几何畸变区域内的无人机遥感图像核心控制对象,其定义式如下:

$$l = \frac{\mu \cdot L}{G} \quad (11)$$

其中:  $\mu$  表示满足几何定义标准的畸变像素点筛选系数,  $L$  表示满足同一几何畸变需求的校正区域划分阈值。

利用公式 (11), 可将几何畸变区域内的无人机遥感图像控制对象标定表达式表示为:

$$M = \sqrt{l \left[ \ln \left( \frac{2\bar{Z}}{\omega} \right) + \bar{Z}^2 \right]} \quad (12)$$

其中:  $\bar{Z}$  表示满足全过程控制需求的畸变像素点表达向量,  $\omega$  表示几何畸变区域内的像素点对象标定系数,  $\bar{Z}$  表示单位校正周期内的图像控制对象积累量均值,  $\bar{X}$  表示基于全过程控制行为的畸变像素对象取样特征。由于控制对象标定行为的方向性取值符号影响基站主机对畸变像素点的处理能力, 所以在校正无人机遥感图像几何畸变行为时, 为保证全过程控制指令的执行有效性, 要求标定参数计算值必须与畸变像素点校正行为保持一一对应关系。

### 3.4 面对标定对象的几何畸变校正全过程控制

实现无人机遥感图像几何畸变校正的全过程控制是一个较为复杂的流程, 要求基站主机、无人机飞行器、遥感摄像装置、图像处理器等各个元件之间的紧密配合。具体的全过程控制方法执行流程如图 3 所示。

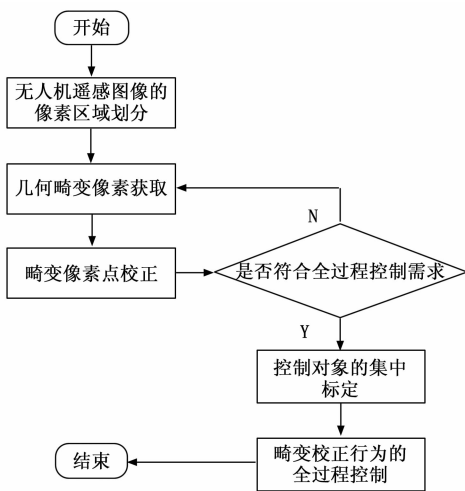


图 3 全过程控制方法执行流程

划分无人机遥感图像的像素区域是实施全过程控制方法的起始环节<sup>[23]</sup>。在一幅完整的无人机遥感图像中, 像素节点的分布只受到像素密度水平的影响, 且几何畸变行为的发生并没有明确特征, 所以发生畸变行为后, 畸变与非畸变节点混合在一起。而划分无人机遥感图像的像素区域则可以将畸变与非畸变节点区分开来, 从而便于基站主机对已畸变像素对象进行校正处理。为实现对像素对象的集中标定, 基站主机对于畸变像素点的校正处理必须遵循全过程控制需求<sup>[24]</sup>。所谓全过程控制, 就是指基站主机对于像素点的校正处理存在于整个畸变行为过程中, 且出于精确性考虑, 同一类型畸变行为所对应标定参量的取值也必须相等。由于无人机遥感图像几何畸变校正的行为周期相对较长, 所以全过程控制方

法的执行也需要一定的等待时间。

## 4 实例分析

为突出说明无人机遥感图像几何畸变校正全过程控制方法、基于 CNN-SPGD 算法的校正方法、基于频域解模糊的校正方法的实用差异性, 设计如下对比实验。

### 4.1 实验环境

在本研究中, 为了保证实验结果的准确性, 需要满足一定的实施条件和实验环境。实验需要在空旷区间内进行, 确保无人机能够悬停稳定。该区域应尽量避免干扰物和突出物的存在, 以免影响遥感图像的拍摄质量。本次实验采用的无人机型号为 DJI Phantom 4 Pro V2.0; 摄像头分辨率为  $5\,472 \times 3\,648$  像素, 镜头焦距为 8.8 mm, 光圈为  $f/2.8$ , 传感器类型为 1 英寸 CMOS; 在实验过程中, 共采集了 200 张遥感图像; 实验开展过程周围环境的温度恒定在  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , 通过空气调节设备控制空气的相对湿度为 50%RH; 应用 ENVI 5.5 和 MATLAB R2021a 软件处理遥感图像; 所应用的计算机 CPU 为 Intel Core i7-10700K (8 核心, 16 线程), 内存为 32 GB DDR4, 硬盘大小为 1 TB SSD。

在图 4 所示遥感区域内进行实验, 当无人机悬停在某一空旷区间内时, 开始进行遥感摄像, 并利用 Windows 软件调节所采集到遥感图像的色度水平, 使实验所需图像的平均色度水平始终保持在 50%。对无人机遥感图像进行色度分析, 如图 4 所示。

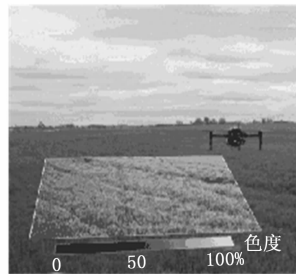


图 4 无人机遥感图像的色度分析

对于无人机遥感图像而言, 几何畸变是一种像素点突变行为, 会导致既定区域内的像素水平发生变化, 因此为保证实验结果的准确性, 必须使遥感图像畸变区域内的平均色差为 50%, 具体调节原则如图 5 所示。

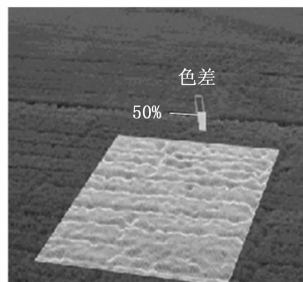


图 5 几何畸变区域内的像素色差调节

出于公平性考虑, 无人机遥感图像几何畸变校正全过程控制方法、基于 CNN-SPGD 算法的校正方法、基于频域

解模糊的校正方法只能针对同一幅畸变图像进行处理。

### 4.2 原理与流程

在无人机遥感图像中，像素点几何畸变行为的表现能力越强，遥感主机也就越难实现对无人机图像的有效控制，而这种控制效果在实验过程中就表现为畸变前后的像素差数值。在不考虑其他干扰条件的情况下，畸变前后的像素差水平越高，就表示像素点几何畸变行为的表现能力越强，遥感主机对于无人机图像的控制能力也就越弱。

本次实验的具体执行流程为：

1) 将无人机遥感设备采集的图像信息输入 Windows 软件中，调节图像色度水平，得到实验所需无人机遥感图像。

记录所得实验图像的像素值，并将其定义为畸变前的像素水平。

2) 应用无人机遥感图像几何畸变校正全过程控制方法处理畸变后的实验图像，所得结果为实验组畸变后的像素水平。

3) 应用基于 CNN-SPGD 算法的校正方法处理畸变后的实验图像，所得结果为第一对照组畸变后的像素水平。

4) 应用基于频域解模糊的校正方法处理畸变后的实验图像，所得结果为第二对照组畸变后的像素水平。

5) 将实验组、第一对照组、第二对照组像素值与畸变前像素值进行对比，并分别计算各组的像素差数值。

6) 根据所得像素差数值，总结实验规律。

### 4.3 数据处理

记录无人机遥感图像畸变前的像素水平，如表 1 所示。

表 1 畸变前的无人机遥感图像像素水平

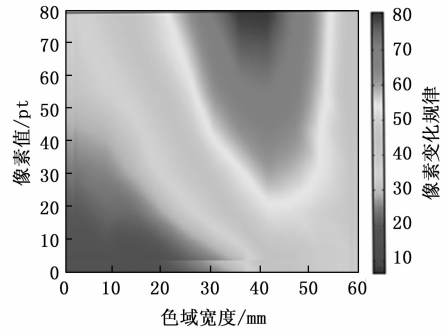
色域宽度/mm	像素值/pt
10	40.1
20	54.9
30	71.5
40	80.6
50	72.4
60	49.8

实验组、第一对照组、第二对照组畸变后无人机遥感图像的像素值水平，具体如图 6 所示。

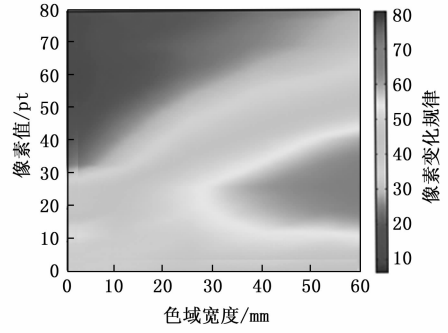
利用表 1、图 6 中的像素值，统计实验组、第一对照组、第二对照组与畸变前像素的差值水平，详情如表 2 所示。

表 2 畸变前后的像素差

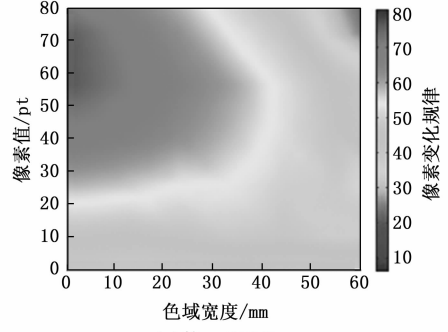
色域宽度/mm	实验组像素差/pt	第一对照组像素差/pt	第二对照组像素差/pt
10	3.3	20.1	29.9
20	4.5	19.8	8.3
30	2.1	42.6	18.8
40	0.4	50.9	35.3
50	1.2	42.4	38.6
60	0.9	16.5	21.0



(a) 实验组



(b) 第一对照组



(c) 第二对照组

图 6 畸变后的无人机遥感图像像素水平

分析表 2 可知，色域宽度为 20 mm 时，实验组像素差数值最大，但也仅能达到 4.5 pt。色域宽度为 40 mm 时，第一对照组像素差取得最大值 50.9 pt，与实验组最大值相比，增大了 46.4 pt。色域宽度为 50 mm 时，第二对照组像素差取得最大值 38.6 pt，与实验组最大值相比，增大了 34.1 pt。

在无人机遥感图像几何畸变校正全过程控制方法的作用下，畸变前后的像素差始终保持在低水平状态，这就表示像素点几何畸变行为强度能够得到较好控制，在提升遥感主机对于无人机图像的控制能力方面，具有较强的实用性价值。

### 5 结束语

相较于基于 CNN-SPGD 算法的校正方法、基于频域解模糊的校正方法，无人机遥感图像几何畸变校正全过程控制方法的设计，通过配准畸变像素点的处理方式，完成对无人机遥感图像的校正，又根据校正交点的取样结果，标定具体的控制对象。实用性方面，无人机遥感图像几何畸

变校正全过程控制方法的应用,可以避免畸变后像素值出现明显变化的情况,将畸变前后的像素差控制在低水平状态,与精准校正无人机遥感图像中像素点几何畸变行为的应用需求相符合。

#### 参考文献:

- [1] 白俊龙,王章琼,闫海涛. K-means 聚类引导的无人机遥感图像阈值分类方法 [J]. 自然资源遥感, 2021, 33 (3): 114-120.
- [2] 刘维,徐珺楠,金玟冉,等. 基于 CNN-SPGD 算法的相干光通信像差校正方法研究 [J]. 光学精密工程, 2022, 30 (6): 743-754.
- [3] 张永胜,于春锐,计一飞,等. 一种基于频域解模糊的星载 P 波段全极化 SAR 法拉第旋转效应校正方法 [J]. 电子学报, 2023, 51 (3): 585-592.
- [4] 张纯江,徐菁远,庆宏阳,等. 主从结构微电网逆变器离网全过程平滑切换控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46 (23): 125-133.
- [5] 姜文晖,占 锟,程一波,等. 结合多层级解码器和动态融合机制的图像描述 [J]. 中国图象图形学报, 2022, 27 (9): 2775-2787.
- [6] 衡红军,范昱辰,王家亮. 基于 Transformer 的多方面特征编码图像描述生成算法 [J]. 计算机工程, 2023, 49 (2): 199-205.
- [7] 蔡旭航,朱留存,张 震,等. 基于多尺度超像素融合的 RGB-D 单幅图像阴影检测算法 [J]. 吉林大学学报(理学版), 2022, 60 (2): 392-400.
- [8] 涂 兵,朱 禹,周承乐,等. 多尺度超像素纹理特征保持与融合的高光谱图像分类 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (6): 2207-2215.
- [9] 谈 杰,范乃吉,白 斌,等. 高斯滤波对规则斑点图像的亚像素匹配精度影响研究 [J]. 中国测试, 2022, 48 (4): 6-11.
- [10] 姚永祥,张永军,万 一,等. 顾及各向异性加权力矩与绝对相位方向的异源影像匹配 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46 (11): 1727-1736.
- [11] 况 发,熊邦书,欧巧凤,等. 基于广度残差与像素点注意力的图像去模糊模型 [J]. 应用科学学报, 2022, 40 (6):
- [18] 杨松青,蒋 沅,童天驰,等. 基于 Tsallis 熵的复杂网络节点重要性评估方法 [J]. 物理学报, 2021, 70 (21): 273-284.
- [19] 张 畅,吴 琼,滕云田,等. 激光干涉绝对重力仪数据采集与处理的时间优化方法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 41 (8): 130-136.
- [20] 卢继哲,阿辽沙·叶,刘 宣,等. 基于区块链技术的分布式电能计量数据采集及安全机制研究 [J]. 电测与仪表, 2021, 58 (6): 13-20.
- [21] 梅春睿,刘中杰,胡旭东,等. 基于 Hough 变换的发控转接组

996-1005.

- [12] 牟晓霜,黎 森,王 玺,等. 基于分块平滑投影二次重构算法的单像素成像系统 [J]. 强激光与粒子束, 2022, 34 (11): 157-164.
- [13] 文高进,王洪民,钟 灿,等. 基于图像熵的红外非均匀性参数化校正优选方法 [J]. 航天返回与遥感, 2021, 42 (4): 91-98.
- [14] 李柏慷,张 峰,丁 磊. 双馈风机参与调频的速度控制器模糊协同控制及参数校正策略 [J]. 电网技术, 2022, 46 (2): 596-605.
- [15] 潘风蕊,李 涛,邢立冬,等. 面向 OpenVX 核心图像处理函数的并行架构设计 [J]. 计算机科学与探索, 2022, 16 (7): 1570-1582.
- [16] 邓宇乔,宋 歌,杨 波,等. 基于身份的可验证密钥的公钥内积函数加密算法 [J]. 计算机学报, 2021, 44 (1): 209-221.
- [17] 刘云锴,彭 程,边 赟. 基于直线段检测器的多阈值图像表格框线提取算法 [J]. 计算机应用, 2021, 41 (S1): 250-254.
- [18] 徐 君,叶 钊,黄 敏,等. 低轨卫星对中继卫星可视性计算方法及应用 [J]. 航天器工程, 2022, 31 (4): 32-38.
- [19] 任全会,孙逸洁,黄灿胜. 基于区域间相似度的红外与可见光图像融合算法研究 [J]. 红外技术, 2022, 44 (5): 492-496.
- [20] 刘雁孝,吴 萍,孙钦东. 基于区域卷积神经网络的图像秘密共享方案 [J]. 计算机研究与发展, 2021, 58 (5): 1065-1074.
- [21] 娄 群,吕钧瀚,文立华,等. 基于亚像素边缘检测的高精度相机标定方法 [J]. 光学学报, 2022, 42 (20): 90-98.
- [22] 孔维翌,郭乃网,周向东. 基于像素语义信息的单图像视图生成深度预测方法 [J]. 计算机应用与软件, 2023, 40 (4): 192-198+235.
- [23] 周海强,赵春祝,顾婷艳,等. 基于高斯混合模型及近似线性规划的风电系统校正控制方法 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42 (12): 35-42.
- [24] 刘元元. 基于 VxWorks 操作系统的某随动系统控制算法软件设计与实现 [J]. 火炮发射与控制学报, 2021, 42 (3): 76-81.
- 合视频监测软件设计与实现 [J]. 导弹与航天运载技术, 2021 (5): 104-109.
- [22] 王 峰,张亮亮,王海波,等. 基于 K-means 聚类算法的电驱产线监测模型的建立与软件实现 [J]. 现代制造工程, 2021 (2): 127-133.
- [23] 吕 娜,潘 武,陈柯帆,等. 控制器故障下的软件定义机载网络数据平面迁移策略 [J]. 航空学报, 2021, 42 (3): 349-358.
- [24] 马胡伟,周建江,周明月,等. 基于 RTX64 的飞行器虚拟飞行软件控制系统的设计 [J]. 电光与控制, 2021, 28 (1): 90-93.

(上接第 132 页)