

考虑地形特征的无人机影像分区域加权平差拼接方法*

鲁 恒^{1,2} 李龙国^{1,2} 贺一楠³ 庄文化^{1,2} 蔡诗响^{1,2} 何 敬⁴

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065;

2. 四川大学水利水电学院, 成都 610065;

3. 北卡罗来纳大学地理与地球科学学院, 夏洛特 28223;

4. 成都理工大学国土资源部地学空间信息技术重点实验室, 成都 610059)

摘要: 无人机遥感手段以其方便、快捷、成本低、可云下飞行的优势正越来越多地应用于农情信息的获取。为了解决无人机影像的数量多、畸变大、影像拼接过程中产生大量累积误差等问题,对拼接过程中如何减少误差累积进行了研究。首先,根据记录影像匹配过程中中心点位置计算大致的匹配区域。然后,进行区域网概略计算,列出误差方程。对不同地形特征区域影像赋予权值,进行分区域加权平差。最后,利用3条航带的无人机影像分别对所提方法和直接拼接法进行了实验对比。实验结果表明:所提方法拼接后错位和鬼影现象减少了12%,拼接效率提高了15%,拼接后获得的面积扩大了8%。

关键词: 无人机影像 分区域 加权平差 影像拼接 地形特征

中图分类号: P231.5; TP75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0296-06

Method of UAV Image Mosaic Based on Weighted Adjustment
Considering Terrain Feature

Lu Heng^{1,2} Li Longguo^{1,2} He Yi'nan³ Zhuang Wenhua^{1,2} Cai Shixiang^{1,2} He Jing⁴

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

2. College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

3. Department of Geography and Earth Sciences, University of North Carolina, Charlotte 28223, USA

4. Key Laboratory of Geo-spatial Information Technology, Ministry of Land and Resources,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The development of precision agriculture demands high accuracy and efficiency of cultivated land information extraction. Due to the low spatial resolution of satellite remote sensing images, it is difficult to identify cultivated land of small areal extent in critical regions; this requires image data of high spatial resolution for specific or general cases. Simultaneously, unmanned aerial vehicle (UAV) has been increasingly used for natural resource applications in recent years as a result of its greater availability, the miniaturization of sensors, and the ability to deploy UAV relatively quickly and repeatedly at low altitudes. In order to solve the problem of large quantity, distortion and accumulated error in the process of UAV image mosaic, how to reduce accumulated error efficiently was researched. First of all, matching area was calculated according to the record center points in process of matching. Then error equation was listed based on the results of regional network summary calculation. Next,

收稿日期: 2015-06-23 修回日期: 2015-08-01

* 国家自然科学基金青年基金资助项目(51209153、41301021)、2014年基础测绘科技计划资助项目、数字制图与国土信息应用工程
国家测绘地理信息局重点实验室开放基金资助项目(DM2014SC02)和国土资源部地学空间信息技术重点实验室开放基金资助项目(KLGSI2015-04)

作者简介: 鲁恒,讲师,博士,主要从事“3S”技术在农业信息化中的应用研究,E-mail: luheng@scu.edu.cn

通讯作者: 李龙国,副教授,主要从事农业水土工程研究,E-mail: cwrh_awr@scu.edu.cn

images were given weight value by different terrain features areas to conduct area weighted adjustment. Finally, mosaic experiments were completed by the proposed method and direct mosaic method based on three flight strips UAV images. The experimental results show that the ghost and dislocation phenomenon was decreased by 12%, mosaic efficiency was increased by 15%, and the area after mosaic was expanded by 8%. The method can mosaic UAV images better at error control and efficiency.

Key words: UAV images Regional separation Weighted adjustment Image mosaic Terrain feature

引言

随着农业信息技术的发展,对农作物用地信息快速、准确提取的需求越来越高^[1-2],农情信息的获取也向着快速、高效的要求发展。农田信息卫星遥感系统数据获取的实时性不强,由于资源卫星每隔16~18 d才能重复获取同一地区的影像,而影像上每一像元的尺寸为10~30 m,因此无法满足农业生产和管理中适时性和准确性的要求。四川盆地在冷空气侵入前后往往云量较多,给遥感实时监测带来困难^[3]。无人机遥感手段以其方便、快捷、成本低、可云下飞行的优势正越来越多地应用于农情信息的获取,无人机遥感应用于农情信息获取首先涉及到实验区全区影像的拼接^[4-5]。

无人机影像的质量与外界的照射条件、风力大小有着非常密切的关系,当外界条件不好时所获取的影像会给影像拼接带来极大的困难^[6-8]。目前国内外学者在影像拼接方面进行了研究,也获得了一些研究成果。张珍梅^[9]研究了无人机影像质量评价和尺度不变特征(SIFT)拼接方法,但将SIFT算法直接用于无人机影像很难获得满意的效果。李胜睿等^[10]在基于梯度滤波的彩色图像快速拼接与实现技术中提出了多优先区域搜索算法,把影像分为不同区域进行匹配实验,但未考虑到无人机影像畸变比普通影像更大。Zhou^[11]对视频帧进行重采样和校正后完成拼接,实现了无人机影像的实时拼接,但未对拼接结果进行评估。

本文针对无人机影像数量多、畸变量大、在影像拼接过程中会产生大量累积误差等特点,提出计算影像匹配中心点的位置,利用中心点计算大致的匹配区域以减少匹配时间,并为后面拼接过程中的平差做好前期准备以减少累积误差提高拼接精度。根据无人机影像旁向重叠度低且飞行姿态差异大等特点,采用“先旁向匹配再航向匹配、两边航带向中间聚拢”的策略。由于地形起伏较大的区域其影像变形会更大,特征点的点位偏移量也会更大,通过计算相邻影像对获得的匹配特征点数量把影像分为平地、山地区域影像,对它们的匹配中心点进行加权平差计算,最终完成无人机影像的拼接。

1 研究方法

1.1 无人机影像重叠区域估计

为了减少冗余影像边缘的影响,提高影像拼接的效率,通过采集影像中心点的位置来估计粗略的重叠区域。定义第 m 次拼接的两张相邻影像为 I_r 和 I_s , D_m 为 I_r 中心点和 I_s 中心点的距离。当无人机受外界影响较小时,可认为无人机处于稳定飞行状态,且偏转较小,因此待拼接的影像对匹配区域是基本相同的。第 $m+1$ 次拼接的两张相邻影像 I_s 中心点和 I_t 中心点之间的间距 D_{m+1} 近似等于 D_m ,影像 I_t 的中心点可以通过 I_s 的中心点求出,同时也能获取大概的重叠区域。

假定第 m 次影像拼接的结果为 R_m , R_m 是由前次拼接结果 R_{m-1} 和影像 I_s 拼接而成,计算出 R_{m-1} 的中心点在影像中的行、列号,记为 (x_m, y_m) , $(x_{m,s}, y_{m,s})$ 为 I_s 的中心点在影像中的位置。在第 $m+1$ 次拼接过程中,待拼接图像为 R_m 和 I_t ,即 (x_{m+1}, y_{m+1}) 为 R_m 的中心点在影像中的坐标位置, $(x_{m+1,t}, y_{m+1,t})$ 为 I_t 的中心点在影像中的坐标位置,特征点搜索区域可由中心点所在位置表示。将无人机的飞行速度在影像的 x 方向和 y 方向上进行分解,可得到无人机在 x 方向和 y 方向上的分速度分别为 v_x 和 v_y , $v_{m+1,x}$ 和 $v_{m+1,y}$ 代表无人机在 R_m 和 I_t 之间的飞行速度,可得到每张影像的中心点坐标计算公式

$$\begin{cases} x_{m+1} = x_m + (v_{m+1,x} - v_x) \Delta t \\ y_{m+1} = y_m + (v_{m+1,y} - v_y) \Delta t \\ x_{m+1,t} = x_{m,s} + (v_{m+1,x} - v_x) \Delta t \\ y_{m+1,t} = y_{m,s} + (v_{m+1,y} - v_y) \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

式中, Δt 表示相邻两张影像的曝光时间间隔。根据式(1)可分别计算出每张影像的中心点坐标,记为: $X = (x_m, x_{m,s}, x_{m+1}, x_{m+1,t}, \dots)$, $Y = (y_m, y_{m,s}, y_{m+1}, y_{m+1,t}, \dots)$ 。进而可获取下一张待拼接影像与之前影像的特征匹配区域,利用改进的SIFT^[12-13]特征点搜索方法进行匹配。

1.2 分区域加权平差

根据1.1节的方法完成区域匹配,利用计算出的每张影像的中心点 (X, Y) 进行分区域加权平差。

相邻影像对匹配得到的同名特征点 O , 在左、右影像中的影像坐标分别记为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 。考虑到线性正行变换能保持变换前后角度不变, 因此采用正行变换多项式来表达几何形变^[14-15], 在右影像中 O 的坐标 (x_2, y_2) 加上变形改正量 Δ_x, Δ_y , 有

$$\begin{cases} \Delta_x = a_1 + a_3x_2 - a_4y_2 - 2a_6x_2y_2 + a_5(x_2^2 - y_2^2) \\ \Delta_y = a_2 + a_4x_2 - a_3x_2 - 2a_5x_2y_2 + a_6(x_2^2 - y_2^2) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 为通过外业控制点解算出的系数。对于同名点 O 有误差方程

$$\begin{cases} \theta_x = \Delta_x - (x_1 - x_2) \\ \theta_y = \Delta_y - (y_1 - y_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中, θ_x, θ_y 代表 (x_2, y_2) 的误差。同理, 对匹配获得的所有同名点可列出误差方程

$$V = BX - L \quad (4)$$

其中

$$V = \begin{bmatrix} \theta_x^1 \\ \theta_y^1 \\ \vdots \\ \theta_x^n \\ \theta_y^n \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} x_1^1 - x_2^1 \\ y_1^1 - y_2^1 \\ \vdots \\ x_1^n - x_2^n \\ y_1^n - y_2^n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_2^1 & -y_2^1 & (x_2^1)^2 - (y_2^1)^2 & -2x_2^1y_2^1 \\ 0 & 1 & y_2^1 & x_2^1 & 2x_2^1y_2^1 & (x_2^1)^2 - (y_2^1)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & x_2^n & -y_2^n & (x_2^n)^2 - (y_2^n)^2 & -2x_2^ny_2^n \\ 0 & 1 & y_2^n & x_2^n & 2x_2^ny_2^n & (x_2^n)^2 - (y_2^n)^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

它的最小二乘解为

$$X = (B^T B)^{-1} B^T L \quad (6)$$

计算出 X 后, 可计算出右影像中每个像元的新坐标为 $(x_2 + \Delta_x, y_2 + \Delta_y)$, 由此可进行影像拼接。

在进行平差之前, 首先需进行区域网概略计算, 这是为了获取精度更高的平差初值, 剔除观测数据中的粗差。具体过程为: 确定研究区的中心定义为原点, 设定飞行的任一航带为 X 轴, 建立研究区的坐标系。利用外业测量获得的所选航带首尾两端的平面控制点, 计算两点的变换参数, 根据变化参数将研究区所有平面控制点的坐标均转换到设定的坐标系下。完成区域网概略计算后, 即可利用相邻航带间的控制点和连接点进行整体平差运算, 确定各条航带的改正参数, 计算出加密点的坐标。

需要考虑的是由于不同地形区域的控制点对平差结果的贡献是不同的, 例如: 丘陵或山地区域地形

畸变较大, 导致控制点点位偏差较大; 平地区域的控制点由于地表变形较小, 相对精确。因此, 针对控制点所在的不同地形特征区域, 赋予不同的权值, 代入改正方程中进行后续计算。根据记录的匹配中心点位置参与区域网平差的示意图如图 1 所示。



图 1 匹配中心点参与区域网平差示意图
Fig. 1 Schematic drawing of matching central point participating in block adjustment

无人机影像本身畸变较大, 不同地形区域对接结果的影响也是不同的, 山地区域影像畸变量很大, 这会导致提取出的山地区域特征点之间的绝对距离和平地区域有较明显的差异; 平地区域受影像畸变影响小, 点位坐标更为准确。因此在进行平差时, 山地区域赋予较小权重, 平地区域赋予更高权重。通过研究发现山地区域能够匹配出的同名点很少, 而平地区域能匹配出更多的同名点, 这进一步说明了影像范围中的山地区域畸变大、可获取的影像特征少。因此, 可采用记录统计所获得的特征点数量来确定每张影像所包含区域的地形特征情况, 进而确定它的权重。分别记录所有影像的匹配特征点数量, 计算出获取的特征点的平均值, 将具有平均值特征点的影像权重设置为 1, 其它影像根据特征点数量赋予对应权重, 将赋权后的影像加入到区域网平差中, 既加重了关键影像参与运算的比例, 又降低了非关键影像可能导致的误差增大。

1.3 实验流程

第 $m-1$ 次影像拼接的结果为 R_{m-1} , 第 m 次拼接的影像为 R_{m-1} 和 I_s , 令 $(x_{0,m-1}, y_{0,m-1})$, $(x_{0,s}, y_{0,s})$ 分别代表第 m 次拼接时 R_{m-1} 和 I_s 匹配特征集的中心点。实验流程为:

- (1) 根据拼接顺序获得第 m 次拼接的影像 I_s 。
- (2) 依据 $(x_{0,m-2}, y_{0,m-2})$ 和 $(x_{0,m-1}, y_{0,m-1})$ 预测第 m 次拼接的两幅影像 R_{m-1} 和 I_s 的匹配特征点集的中心点 $(x_{0,m-1}, y_{0,m-1})$ 和 $(x_{0,s}, y_{0,s})$, 并记录下来。
- (3) 以 $(x_{0,m-1}, y_{0,m-1})$ 为中心点的矩形区域和以 $(x_{0,s}, y_{0,s})$ 为中心的矩形区域进行特征点计算与匹配, 并剔除误匹配特征点, 获得最终的特征匹配点集。
- (4) 利用获得的特征点集坐标, 根据它们所在影像上的位置是平地或山地区域进行加权, 同时以

中间航带为基准、旁边航带向中间靠拢的方式进行区域网平差计算,得到所有特征点的误差改正模型,进行改正。

(5) 完成影像的拼接过程,并从拼接结果、效率、所获取的最终拼接面积等方面进行方法间的对比。

2 实验结果与分析

实验采用的无人机影像为 2013 年 4 月在四川省德阳市某基本农田保护区获取,无人机的北京测控空间信息技术有限公司开发的 CK-GY04 型,预设拍摄航高为 600 m,航向重叠度 70%,旁向重叠度 40%,飞机所装载的相机镜头焦距为 16 mm。受天气状况影响,无人机飞行时的飞机姿态不够稳定,滚转角和俯仰角均较大,特别是相邻航带间航拍时飞机的飞行方向相反,而风向是基本不变的,这就导致相邻航带间拍摄出的影像之间的差异更大。为了验证本文方法的有效性和优势,利用同样的影像做两组实验,对比它们的拼接效果。

首先进行单航带拼接实验,使用 3 条相邻航带的影像数据,拼接结果如图 2 所示。通过分析可发现,由于无人机在获取第 1 航带和第 3 航带影像时飞行方向是相同的,拼接后影像所表现出的形态特征基本一致,而无人机在获取第 2 航带影像时的飞行方向与第 1、第 3 航带飞行时相反,因此形成了同 1、3 航带影像相反的形态特征,这体现了无人机的飞行轨迹以及影像畸变的特征。观察图 2a、2b 中第 1 航带与第 2 航带之间的重叠区域,可发现越是靠近航带两端的重叠区域差异越大,如果仅是通过特征点匹配进行拼接,很难满足所有特征点能配对完全,因为一旦满足航带左边区域的拼接,航带右边区域必然会由于拉伸过度产生巨大畸变,即使勉强完成拼接,也很难获得优质的拼接结果。

通过图 2 单条航带拼接效果来看,可明显发现拼接过程中产生了大量的误差累积,若按照传统意义上的影像拼接方法进行单张影像的直接累加拼接,会产生大量的影像错位、重叠产生鬼影、严重扭曲等,甚至拼接到后期由于影像变形量过大,导致后续影像无法再进行拼接。图 3 所示为直接利用每张影像进行累加拼接的结果。从图 3 中可发现有部分区域出现明显的错位、鬼影现象。这是因为在把新的待拼接影像往已拼接的影像上累加时,匹配获得了部分拼接特征点,但是已拼接的影像实际已有大量的累积误差,从而导致影像在部分区域出现错位和鬼影现象。

图 4 所示为利用本文方法对相同影像进行拼接

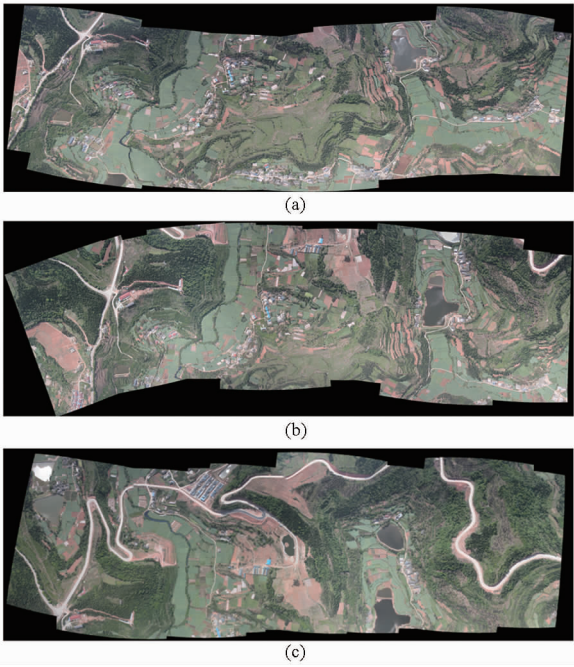


图 2 3 条相邻航带拼接结果

Fig. 2 Results of three neighboring flight strips mosaic
(a) 第 1 航带 (b) 第 2 航带 (c) 第 3 航带

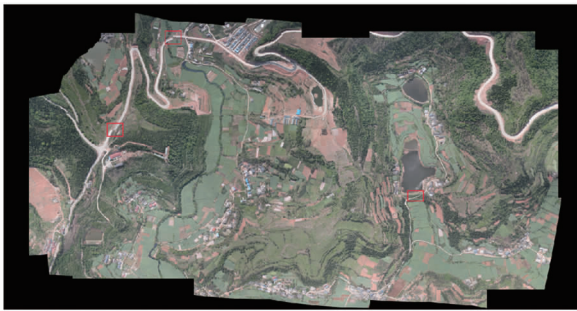


图 3 直接拼接结果

Fig. 3 Result of direct image mosaic



图 4 本文所提方法拼接结果

Fig. 4 Result of suggested image mosaic method

的结果。为了更直观地对比两种方法的拼接结果,在完成拼接后的全区域影像上选取了 3 个典型区域进行放大,从左至右,用红色矩形框表示,分别命名为区域 1、区域 2、区域 3。如图 5 所示,将两种方法局部区域放大进行对比,通过本文所提方法完成拼接后的影像未出现错位、鬼影情况。同时对比图 3

和图 4 可以发现,本文方法拼接出的影像能充分利用已有影像,拼接的范围更大,图 3 中很多边缘区域由于扭曲不能显示。通过加入控制点分别对图 3 和图 4 进行配准后,对比拼接后获取的实际面积可发现,利用本文方法获取的实际面积比直接拼接法扩

大了 8%。通过统计可发现,本文方法拼接后影像相较直接拼接法出现错位和鬼影情况减少了 12%。由于减少了特征点匹配的搜索范围,使得特征点匹配的收敛速度加快,拼接效率比直接拼接法提高了近 15%。

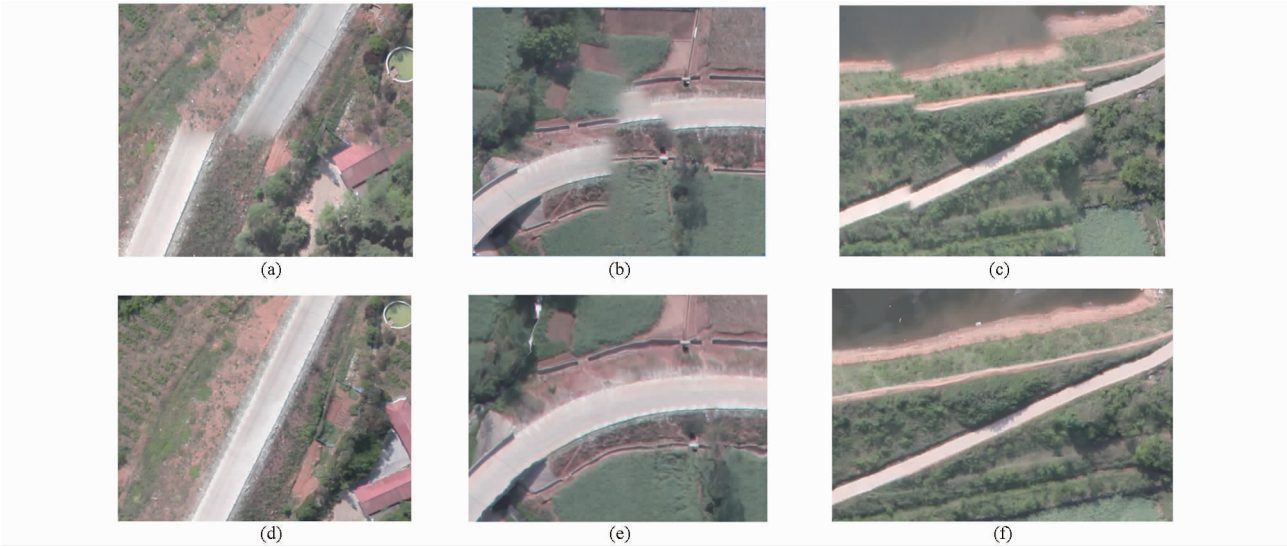


图 5 两种方法拼接结果局部区域放大图

Fig.5 Results of image mosaic typical area enlargement based on two methods

(a) 图 3 区域 1 (b) 图 3 区域 2 (c) 图 3 区域 3 (d) 图 4 区域 1 (e) 图 4 区域 2 (f) 图 4 区域 3

3 结束语

由于无人机受外界条件影响较大,处于不同航带拍摄的影像存在着不同的畸变和轨迹特征,在拼接过程中会形成大量的累积误差导致不能获得优质的全区域图像。本文基于上述原因提出的根据不同

地形特征赋予不同权值的方法,能很好地解决拼接过程中容易出现的错位和鬼影现象,通过计算估计匹配区域减少特征点匹配搜索时间,尽量利用到所有关键影像,两种拼接方法结果的对比说明了方法的有效性。

参 考 文 献

1 Rango A, Laliberte A. Impact of flight regulations on effective use of unmanned aircraft systems for natural resources applications [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2010,4(1): 043539.

2 刘峰,刘素红,向阳. 园地植被覆盖度的无人机遥感监测研究[J]. 农业机械学报,2014,45(11):250-257.
Liu Feng, Liu Suhong, Xiang Yang. Study on monitoring fractional vegetation cover of garden plots by unmanned aerial vehicles [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(11):250-257. (in Chinese)

3 王利民,刘佳,杨玲波,等. 基于无人机影像的农情遥感监测应用[J]. 农业工程学报,2013,29(18):136-145.
Wang Limin, Liu Jia, Yang Lingbo, et al. Applications of unmanned aerial vehicle images on agricultural remote sensing monitoring [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(18):136-145. (in Chinese)

4 Andrea S, Albert R. Texture and scale in object-based analysis of subdecimeter resolution unmanned aerial vehicle(UAV) imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009,47(3): 761-769.

5 Ma Lei, Cheng Liang, Han Wenqi, et al. Cultivated land information extraction from high-resolution unmanned aerial vehicle imagery data[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014,8(1): 083673.

6 张永军. 无人驾驶飞艇低空遥感影像的几何处理[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2009,34(3):284-288.
Zhang Yongjun. Geometric processing of low altitude remote sensing images captured by unmanned airship[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2009,34(3): 284-288. (in Chinese)

7 鲁恒,李永树,李何超,等. 无人机影像数字处理及在地震灾区重建中的应用[J]. 西南交通大学学报,2010,45(4):533-538.
Lu Heng, Li Yongshu, Li Hechao, et al. Digital processing of unmanned aerial vehicle images and its application in the reconstruction of the quake-stricken area[J]. Journal of Southwest Jiaotong university, 2010,45(4):533-538. (in Chinese)

8 Andrea S, Jeffrey E, Rango A, et al. Acquisition, or thorectification, and object-based classification of unmanned aerial vehicle

- (UAV) imagery for rangeland monitoring[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2010, 48(6): 661–672.
- 9 张珍梅. 无人飞行器遥感影像飞行质量检查及影像快速拼接方法研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2011.
Zhang Zhenmei. Study on remote sensing images flying quality checking and quick mosaic based on UAV system[D]. Beijing: Capital Normal University, 2011. (in Chinese)
- 10 李胜睿, 李翠华. 基于梯度滤波的彩色图像快速拼接与实现技术[J]. 厦门大学学报, 2003, 42(1): 29–34.
Li Shengrui, Li Cuihua. Fast stitching algorithm & implementation for color images based on grad-filtering[J]. Journal of Xiamen University, 2003, 42(1): 29–34. (in Chinese)
- 11 Zhou Guoqing. Near real time ortho rectification and mosaic of small UAV video flow for time critical event response[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(3): 739–747.
- 12 Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key points[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91–110.
- 13 Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, 1999: 1150–1157.
- 14 袁修孝, 朱武, 武军郦, 等. 无地面控制 GPS 辅助光束法区域网平差[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2004, 29(10): 852–857.
Yuan Xiuxiao, Zhu Wu, Wu Junli, et al. GPS-supported bundle block adjustment without ground control points[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(10): 852–857. (in Chinese)
- 15 袁修孝, 季顺平, 谢酬. 基于已知定向参数影像的光束法区域网平差[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(11): 955–959.
Yuan Xiuxiao, Ji Shunping, Xie Chou. Bundle block adjustment based on imagery given orientation parameters[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(11): 955–959. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 295 页)

- 8 何诚, 董志海, 张思玉, 等. 基于决策树系统的遥感植被分类技术[J]. 测绘科学, 2014, 39(1): 83–86.
He Cheng, Dong Zhihai, Zhang Siyu, et al. Vegetation classification technology of hyperspectral remote sensing based on decision tree tool[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(1): 83–86. (in Chinese)
- 9 吴黎, 张有智, 解文欢, 等. 基于 TM 的混合分解模型提取水稻种植面积研究[J]. 农机化研究, 2013, 35(2): 44–47.
Wu Li, Zhang Youzhi, Xie Wenhuan, et al. The mixture model extraction of rice planted area based on TM data[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(2): 44–47. (in Chinese)
- 10 李霞, 王飞, 徐德斌, 等. 基于混合像元分解提取大豆种植面积的应用探讨[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 213–217.
Li Xia, Wang Fei, Xu Debin, et al. Application research on the method for extracting soybean covered areas based on the pixel unmixing[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 213–217. (in Chinese)
- 11 Wang Lei, Satoshi Uchida. Use of linear spectral mixture model to estimate rice planted area based on MODIS data[J]. Rice Science, 2008, 15(2): 131–136.
- 12 景元书, 李根, 黄文江. 基于相似性分析及线性光谱混合模型的双季稻面积估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 177–183.
Jing Yuanshu, Li Gen, Huang Wenjiang. Estimation of double cropping rice planting area using similar index and linear spectral mixture model[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 177–183. (in Chinese)
- 13 Zhang Jiahua, Feng Lili, Yao Fengmei. Improved maize cultivated area estimation over a large scale combining MODIS–EVI time series data and crop phenological information[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 94: 102–113.
- 14 Lv Tingting, Liu Chuang. Study on extraction of crop information using time-series MODIS data in the Chao Phraya Basin of Thailand[J]. Advances in Space Research, 2010, 45(6): 775–784.
- 15 Hu Y H, Lee H B, Scarpace F L. Optimal linear spectral unmixing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1): 639–644.
- 16 卢远, 林年丰. 半干旱地区土地退化遥感动态监测方法——以吉林省通榆县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 94–98.
Lu Yuan, Lin Nianfeng. A method of remote sensing dynamic monitoring of land degradation in semi-arid region—a case study: Tongyu County in Jilin Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(1): 94–98. (in Chinese)
- 17 王立辉, 黄进良, 孙俊英. 基于线性光谱混合模型的油菜种植面积遥感监测方法研究[J]. 遥感信息, 2010(3): 55–59.
Wang Lihui, Huang Jinliang, Sun Junying. Study on remote sensing monitoring of rape acreage based on linear spectral mixture model[J]. Remote Sensing Information, 2010(3): 55–59. (in Chinese)