

文章编号 1004-924X(2015)增-0739-06

无人机光学影像分区域加权平差拼接

鲁 恒^{1,2,3}, 李龙国^{1,2}, 付 箫⁴, 庄文化^{1,2*}, 蔡诗响^{1,2}

1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;
2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065;
3. 成都理工大学 国土资源部地学空间信息技术重点实验室, 四川 成都 610059;
4. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756)

摘要:针对无人机影像数量多、畸变大,在影像拼接过程中会产生大量累积误差的问题,对如何减少拼接过程中的误差累积进行了研究。首先,根据记录影像匹配过程中心点位置计算大致的匹配区域以减少匹配时间。接着,进行区域网概算,列出误差方程,并对不同地形特征区域赋予权值进行分区域加权平差。最后,利用无人机影像分别对本文方法和传统的直接拼接法进行实验。实验结果表明:本文提出的方法可使鬼影和错位现象减少 12%,拼接效率提高 15%,拼接后获得的面积扩大了 8%。结果显示本文方法能从误差控制和效率上较好地完成无人机影像拼接。

关键词:无人机;光学影像;分区域;加权平差;影像拼接

中图分类号: TP75; P231.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0739

Optical image stitching for UAV based on weighted adjustment and regional separation

LU Heng^{1,2,3}, LI Long-guo^{1,2}, FU Xiao⁴, ZHUANG Wen-hua^{1,2*}, CAI Shi-xiang^{1,2}

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. Key Laboratory of Geo-special Information Technology of the Ministry of Land and Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
 4. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)
- * Corresponding author, E-mail: whzhuang04@mails.ucas.ac.cn

Abstract: When the images from an Unmanned Aerial Vehicle(UAV) is stitched, it will produce a lot of accumulated errors because of the large image quantity and image distortion. Therefore, a method to efficiently reduce the accumulated error was researched. Firstly, a general matching area was calcu-

收稿日期: 2015-06-02; **修订日期:** 2015-06-30.

基金项目: 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(No. DM2014SC02); 国土资源部地学空间信息技术重点实验室开放基金(No. KLGSIT2015-04); 德阳市重点科技支撑计划项目(No. 2013ZZ074-05)

lated according to the record center position in the stitching process to reduce the matching time. Then error equation was listed to carry on the regional network, and different terrain feature areas were given to conduct the area weighted adjustment. Finally, UAV images were used to the experiment for proposed method in this paper and the traditional direct splicing method. The experimental results on the proposed method show that the ghost and dislocation phenomenon are decreased by 12%, stitching efficiency increased by 15%, and the area of the stitching after expanding has improved by 8%. It concludes that the method can stitch UAV image better in the error control and efficiency.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle(UAV); optical image; regional separation; weighted adjustment; image stitching

1 引 言

随着遥感技术的不断发展,方便、快捷、低成本的无人机遥感手段正越来越多地应用到民用领域^[1-3]。在抗灾救灾、遥感监测等方面,无人机相对于其它航空遥感也具有一定优势,它能够快速获得待研究区的高分辨率影像^[4-5],但是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,当条件不好时,就会给后续的影像处理带来极大困难。特别是在获取灾区影像方面,如何能够快速准确地拼接出全景图,对于救灾管理、规划、调配救援人员都具有极大的意义^[6]。

目前国内外学者在影像拼接方面进行了大量研究,也获得了很多的研究成果。张珍梅^[7]研究了无人飞行器遥感影像飞行质量及影像快速拼接方法,重点介绍了无人机影像质量的评价和常用的尺度不变特征变换(Shift Invariant Feature Transform, SIFT)匹配拼接方法;李胜睿^[8]等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,取得了一定的成果。Guoqing Zhou^[9]首先对视频帧进行重采样和校正,然后进行拼接,完成了无人机序列影像的实时拼接。

针对无人机影像的数量多、畸变大,以及在影像拼接过程中会产生大量累积误差等特点,提出利用所记录影像匹配过程中的中心点位置计算大致匹配区域,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。根据序列无人机影像航带间的重叠度低且飞行姿态差异大等特点,提出了使用“先航带间匹配再航带内匹配、旁边航带向中间航带靠拢”的策略。由于地势起伏越大的区域其影像变形会更大,匹配

特征点的位置偏移也会更大,通过两影像间获得的匹配同名点数目近似地把影像分为平地、丘陵、山区等不同区域,对它们的匹配中心点加权分别进行平差计算,最终完成影像拼接。

2 研究方法

2.1 无人机影像重叠区域估计

无人机获取影像前会根据设计的航高和航线来确定航向和旁向重叠度,具体是通过航高、航线间距以及飞行速度进行计算,但是在后期的拼接过程中,为了节省拼接时间,降低拼接困难程度,经常会对获取的影像做一些预处理,例如删除一些转弯处畸变大的影像、把影像周围畸变大的部分裁剪掉等。所以不能直接按照飞行设计的影像重叠度来判断立体像对的相交区域。本文通过记录匹配特征点集中心点的位置来大概计算相交区域,并为后续的正差提供数据支持。

设第 k 次拼接的两幅影像为 M_i 和 M_j , T_k 为 M_i 和 M_j 的间距,它大概近似于影像 M_i 和 M_j 的匹配中心点的距离。当飞机飞行情况比较稳定,只有轻微振动和偏移的情况下,航拍序列影像中待拼接影像对的匹配区域基本相同,下一次用于拼接的两幅影像 M_j 和 M_m 之间的间距 T_{k+1} 近似等于 T_k ,可以通过 M_j 的匹配中心点近似求出影像 M_m 的匹配中心点,这样,匹配范围也能够近似得到,记录下这些匹配中心点坐标的位置。具体的计算过程如下:

设第 k 次拼接的拼接结果为 RM_k ,它是由上一次的拼接结果 RM_{k-1} 和影像 M_j 拼接而成的, $(c_{k,x}, c_{k,y})$ 为 RM_{k-1} 的匹配特征点集中心点在影像中的坐标位置, $(c'_{k,x}, c'_{k,y})$ 为 M_j 的匹配特征点集中心点在影像中的坐标位置,那么在第 $k+1$ 次

拼接过程中,待拼接图像为 RM_k 和 M_m ,则特征查询区域的中心区可以近似由匹配特征的中心点来表示,即 $(c_{k+1,x}, c_{k+1,y})$ 为 RM_k 的匹配特征点集中心点在影像中的坐标位置, $(c'_{k+1,x}, c'_{k+1,y})$ 为 M_m 的匹配特征点集中心点在影像中的坐标位置, $(v_{k+1,x}, v_{k+1,y})$ 为 M_j 和 M_m 之间的飞行速度,则可以得到:

$$\begin{cases} c_{k+1,x} = c_{k,x} + (v_{k+1,x} - v_{k,x})\Delta t + w_x \\ c_{k+1,y} = c_{k,y} + (v_{k+1,y} - v_{k,y})\Delta t + w_y \\ c'_{k+1,x} = c'_{k,x} + (v_{k+1,x} - v_{k,x})\Delta t + w_x \\ c'_{k+1,y} = c'_{k,y} + (v_{k+1,y} - v_{k,y})\Delta t + w_y \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $v_{k,x}, v_{k,y}$ 分别为飞机在影像的 x 轴和 y 轴上的分速度, $\Delta t = T_{k+1} - T_k$, w_x 和 w_y 分别为飞机侧摆、振动引起的噪声。由此分别记录每个匹配特征点集中心点在影像中的坐标, $X = (c_{k,x}, c_{k,y}, c'_{k,x}, c'_{k,y}, c_{k+1,x}, c_{k+1,y}, c'_{k+1,x}, c'_{k+1,y}, \dots)$, 预测下一个待参加拼接的影像的匹配区域,利用 SIFT^[10-11] 特征搜索进行匹配。利用以上方法对影像匹配区域进行预测可以大大降低匹配时间,如果搜索区域为原影像的 $1/n$,则该方法的特征搜索时间为对整幅影像的 $1/n_0$ 。

2.2 匹配中心点分区域加权平差

根据 2.1 节中介绍的方法寻找到匹配区域,并记录每个匹配特征点集中心点在影像中的坐标: $X = (c_{k,x}, c_{k,y}, c'_{k,x}, c'_{k,y}, c_{k+1,x}, c_{k+1,y}, c'_{k+1,x},$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_2^1 & -y_2^1 & (x_2^1)^2 - (y_2^1)^2 & -2x_2^1 y_2^1 \\ 0 & 1 & y_2^1 & x_2^1 & 2x_2^1 y_2^1 & (x_2^1)^2 - (y_2^1)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & x_2^n & -y_2^n & (x_2^n)^2 - (y_2^n)^2 & -2x_2^n y_2^n \\ 0 & 1 & y_2^n & x_2^n & 2x_2^n y_2^n & (x_2^n)^2 - (y_2^n)^2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

它的最小二乘解为:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{L}. \quad (7)$$

2.2.2 平差过程

解算出 \mathbf{X} 后,则可以算出右影像中每个像素的新坐标 $(x_2 + \delta_x, y_2 + \delta_y)$,进而可进行影像拼接。

由于区域网概算能为区域网平差提供较好的初值,剔除观测数据和控制数据中的粗差,故首先进行区域网概算。其实质是建立自由比例尺的航带网,并确定每一航带在区域中的概略位置,以拼成一个松散的区域网。建立区域的地辅坐标系,

$(c'_{k+1,y}, \dots)$, 利用这些坐标进行分区域加权平差。

2.2.1 平差方法

对于匹配得到的同名点 P ,在左影像中的影像坐标为 (x_1, y_1) ,在右影像中的影像坐标为 (x_2, y_2) ,由于正行变换能够保持变换前后任意空间曲线之间的夹角不变,因此用正行变换多项式来模拟几何变形^[12-13],在 (x_2, y_2) 上加入如下的变形改正:

$$\begin{cases} \delta_x = a_1 + a_3 x_2 - a_4 y_2 + a_5 [x_2^2 - y_2^2] - 2a_6 x_2 y_2 \\ \delta_y = a_2 + a_4 x_2 - a_3 y_2 + a_6 [x_2^2 - y_2^2] - 2a_5 x_2 y_2 \end{cases}. \quad (2)$$

则对 P 点有如下误差方程:

$$\begin{cases} \theta_x = \delta_x - l_x = \delta_x - (x_1 - x_2) \\ \theta_y = \delta_y - l_y = \delta_y - (y_1 - y_2) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: θ_x, θ_y 表示点 (x_2, y_2) 的误差,同理,对所有的同名点可以列出如下误差方程:

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{X} - \mathbf{L}. \quad (4)$$

其中:

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

确定全区的中心即原点,一般选择最中间航带的最中心处。然后确定 x 轴,可设第一条航带为 x 轴。利用第一航带的首尾两端的平面控制点,计算两点的变换参数,将区域中所有控制点的坐标按两点变换参数变换到该地辅坐标系中。

如果第一条航带中没有适当的控制点,则可采用紧邻该航带的上一条航带中的适当连接点作为空间相似变换依据。另外要保持各航带模型坐标的独立性,不能将相邻航带的连接点的坐标取中数,这样会使得平差结果不理想,图 1 为区域网概算示意图。

区域网概算之后,充分利用相邻航带间的公共连接点及控制点,列出误差方程,进行整体平差运算,确定各航带的模型变形改正参数,按航带分别修正模型变形,计算出各加密点的坐标。

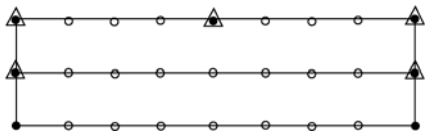


图 1 区域网概算示意图

Fig. 1 Schematic of regional network estimation

由于不同区域控制点的坐标的影响是不同的,例如平地的控制点变形较小相对精确,而山区的地形畸变相对较大,很多点定位不够精确,这就需要对不同地域的控制点赋予不同的权值,将这些权值加入模型改正方程中,可以得到精度最高的结果。根据控制点的位置,把它们分成不同区域,且它们当作具有一定权值的观测值来看待,有利于定位和减少控制点的粗差。所记录的匹配中心点位置参数与区域网平差的示意图如图 2 所示。



图 2 匹配中心点参与区域网平差示意图

Fig. 2 Schematic of matching center points participated in block adjustment

2.2.3 分区域加权平差

由于无人机影像本身畸变较大,其不同区域对拼接精度的影响不同,例如平地区域的畸变较小,它的点位误差相应会较小,而山地区域两特征点之间的距离以及相对位置关系和平地是有一定差异的,所以为了使平差的结果更加准确,需要分不同区域进行加权控制。对平地区域点位坐标应赋予更高的权重,山地区域赋予相对较小的权重。通过大量实验发现一般山地区域寻求到的同名点较少,而平地会获得更多的同名点,这是由于山区畸变大、影像特征少导致的。因此,直接利用计算获得的特征点数目确定每张影像所包含区域的特

征情况,进而确定它的权重能够减少计算时间,而且比较精确。而把所有影像的匹配同名点数目单独记录,将具有平均值同名点数目影像权重赋予 1,其它的根据同名点数目赋予相应权重,参与到区域网平差中,这样能获得更好的结果。

2.3 算法步骤

设无人机飞行获得的序列影像为 M , RM_{k-1} 为第 $(k-1)$ 次的拼接结果, M_i 为第 $k-1$ 次拼接的影像,当前第 k 次拼接的两幅影像为 RM_{k-1} 和 M_j , 设 $PMS_{k-1}(x, y)$ 和 $PM_k(x, y)$ 分别为第 k 次拼接时 RM_{k-1} 和 M_j 中匹配特征集的中心点。计算步骤如下:

(1) 为了使得相互约束条件较差的航带间获得更多的连接点,采用先航带间再航带内的方式进行拼接,以确定具体的拼接顺序。

(2) 依据拼接顺序获得第 k 次拼接的影像 M_j 。

(3) 根据 $PMS_{k-2}(x, y)$ 和 $PMS_{k-1}(x, y)$ 预测第 k 次拼接的两幅影像 RM_{k-1} 和 M_j 的匹配特征点集的中心点 $PMS_{k-1}(x, y)$ 和 $PM_k(x, y)$, 并记录下来。

(4) 以来 $PMS_{k-1}(x, y)$ 为中心点的矩形区域和以 $PM_k(x, y)$ 为中心的矩形区域进行特征匹配和误匹配点删除,得到最终的匹配点集。

(5) 对于这些特征点集中心点坐标,根据它们所在地的情况对它们分别加权,同时,以“中间航带为基准旁边航带向它们靠拢”的方式进行拼接,对中心点集也赋予相对较高的权重,根据 2.2 节所述理论进行区域网平差计算,得到所有特征点的误差模型,进行改正。

(6) 完成影像的拼接。

3 实验结果与分析

实验影像为四川某地区无人机拍摄下来的序列影像,拍摄的高度是不变的,但由于该次飞行时风力较大,飞机的姿态不够稳定,左右摆动明显,特别是相邻航带间拍摄时飞机的航行方向相反,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。为了证明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。

由于每条单独航带中的影像之间的共同点类似,重叠度较高拼接起来更容易,故可通过各航带

单独的拼接图来了解飞行作业的风向影响以及各航带影像的畸变特征。本例使用两条相邻航带的影像数据,首先单独对它们进行拼接,结果如图 3、图 4 所示。通过分析可发现:由于第一航带和第三航带飞行方向是相同的,都形成了往上凸出的形状,而第二航带是相反的,其飞行方向就形成了相反的形状,这体现了飞行轨迹以及影像畸变的特征。同时,观察第一条航带与第二条航带的相同区域可以发现,越右边的重叠区域,差异越大,如图 4,5 所示。如果仅通过同名点匹配进行拼接的话,一旦左边区域实现拼接,右边区域必然会产生巨大畸变,从而对拼接效果产生影响。

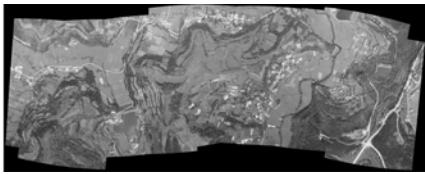


图 3 第一条航带拼接图

Fig. 3 Result of the first flight strip mosaic

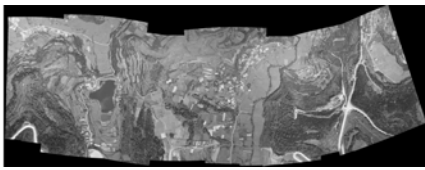


图 4 第二条航带拼接图

Fig. 4 Result of the second flight strip mosaic

由上面两条航带的单独拼接效果图可以发现,影像拼接过程会产生大量的误差累积,如果对每张影像进行直接累加拼接,则会出现大量的影像不能拼接,以及扭曲、错位、重叠的现象。本文所提方法能够极大地减少拼接结果错位、重叠的情况。图 5 为直接对每张影像进行累加拼接的效果图,图 6 为图 5 中 3 个比较明显的错位、重叠现象的放大图。这是由于将新影像往已拼接的影像上拼接时,会找到一些拼接同名点,但是已拼接影像已经产生了大量的累积畸变,从而导致影像重叠、错位现象。

图 7 为利用本文方法对同一影像进行拼接后的效果图,对于图 5 中的 3 个相同区域的最终的拼接效果进行放大,如图 8 所示。由图 8 可见,基本没有出现重叠、错位的情况。同时对比图 5 和图 7 可发现,本文方法能充分利用已有影像,拼接范

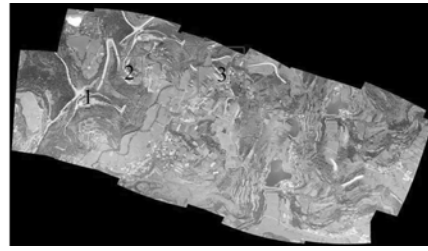


图 5 直接拼接结果

Fig. 5 Result of direct mosaic

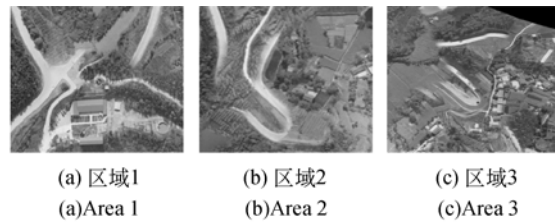


图 6 直接拼接法中 3 个区域放大图

Fig. 6 Enlarged views of 3 areas in direct mosaic

围也更大。但是图 5 中很多边缘区域都不能显示,这是因为影像拼接过程中的累积误差过大导致边缘影像没能拼接上。对图 5 图 7 加入控制点分别进行配准后,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%。通过统计发现本文方法拼接后影像出现鬼影和错位的情况较直接拼接法减少了 12%。

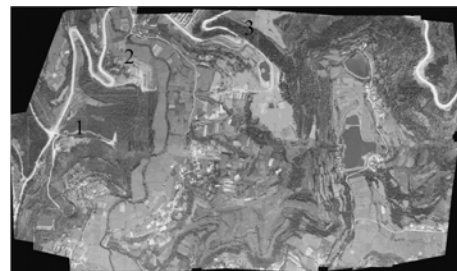


图 7 本文方法拼接结果图

Fig. 7 Result of proposed method



图 8 本文方法拼接图中三个区域放大图

Fig. 8 Enlarged views of 3 areas in proposed method

4 结 论

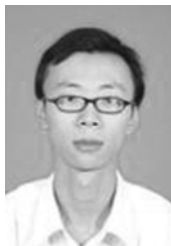
本文提出一种解决无人机影像拼接过程中易出现的重叠、错位现象的方法。通过预测匹配区域,减少匹配搜索时间,并且还能解决很多边缘

影像不能拼接上全景图的问题,最后拼接结果也说明该方法的有效性。另外,由于本文是先记录匹配中心点集的坐标并对它们进行区域网平差处理,减少了同名点匹配的搜索范围,也让拼接过程中的同名点匹配的收敛速度加快,使得本文方法在拼接速度上比直接拼接法提高了近 15%。

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] 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.
- [3] MA L, CHENG L, HAN W Q, *et al.*. Cultivated land information extraction from high-resolution unmanned aerial vehicle imagery data[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014,8(1): 083673.
- [4] 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 L M, LIU J, YAGN L B, *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.
- [5] 鲁恒,李永树,何敬,等. 一种基于特征点的无人机影像自动拼接方法[J]. *地理与地理信息科学*, 2010, 26(5):16-19.
LU H, LI Y SH, HE J, *et al.*. An automatic mosaic method in unmanned aerial vehicle images based on feature points [J]. *Geography and Geo-information Science*, 2010,26(5):16-19.
- [6] 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.
- [7] ZHOU G Q. 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.
- [8] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [9] YAN K, RAHUL S. PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image descriptors[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004,20(2): 560-513.
- [10] YUAN X X, ZHU W, WU J L, *et al.*. GPS-supported bundle block adjustment without ground control points [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(10): 852-857.
- [11] YUAN X X, JI SH P, XIE CH. Bundle block adjustment based on imagery given orientation parameters [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(11): 955-959.

作者简介:



鲁 恒(1984—),男,四川眉山人,博士,讲师,2007年于成都理工大学获得学士学位,2012年于西南交通大学获得博士学位,主要从事“3S”技术在农业水利工程中的应用研究。E-mail:luheng@scu.edu.cn



李龙国(1970—),男,四川人,副教授,1993年于成都科技大学获得学士学位,1998年、2007年于四川大学分别获得硕士、博士学位,主要从事农业水利工程研究。E-mail: Lilg700605@sina.com