doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.024

基于特征点匹配的全景相机图像拼接方法研究

徐弘祯[1]　李世超[1]　季宇寒[1]　曹如月[1]　张　漫[1]　李　寒[2]

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 全景相机可获取农机周围 360°范围内的图像信息,具有覆盖范围大等特点,但需要对多镜头获取的图像进行拼接与融合,才能生成全景图像,为农机避障提供支持。以雷沃欧豹拖拉机为试验平台,搭载全景相机,获取实验农场的农田图像数据。首先对多幅图像进行预处理,包括通过柱面投影变换统一坐标系,采用基于特征点的 SIFT 算法提取图像的特征点并进行匹配;针对传统 SIFT 算法存在错误匹配而影响图像拼接质量的问题,使用 RANSAC 算法进行多次优化迭代,达到剔除错误匹配点的效果;针对匹配后生成的图像变换矩阵,为防止其线性结果不稳定并进一步优化结果,采用非线性的 LM 算法进行优化,使用线性加权平滑算法对图像进行融合,实现全景图像的生成。试验采用计算图像重叠区域相关系数定量评价图像拼接效果,并对获取的 30 组共 60 幅图像采用 RANSAC 算法和 LM 算法进行处理。结果表明,经过 RANSAC 算法处理后,误匹配点得到明显剔除,匹配特征点之间的平均几何距离偏移量明显减小,其平均值由 39.401 3 像素下降至 0.581 9 像素,相关系数由 0.287 8 上升至 0.724 9。与手动设置阈值的剔除误匹配点方法进行了比较,经过 RANSAC 算法处理后的平均相关系数为 0.724 9,大于阈值设为 0.4 时的 0.593 3,以及阈值设为 0.6 时的 0.200 7,证明该算法能够实现多种情况下的图像拼接,剔除误匹配点;经过 LM 算法处理后,平均几何距离偏移量由 0.581 9 像素进一步下降至 0.569 3 像素,平均相关系数由 0.724 9 进一步上升至 0.726 1,证明图像变换矩阵得到进一步优化,全景图像的拼接质量得到进一步提高。

关键词: 全景相机; 图像拼接; SIFT 算法; 特征点匹配; RANSAC 算法; LM 算法

中图分类号: S126; TP751　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)S0-0150-09

Panoramic Camera Image Mosaic Method Based on Feature Points

XU Hongzhen[1]　LI Shichao[1]　JI Yuhan[1]　CAO Ruyue[1]　ZHANG Man[1]　LI Han[2]

(1. *Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research*, *Ministry of Education*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The panoramic camera can obtain image information, within the scope of agricultural machinery around 360° coverage, with a large coverage and other characteristics, more conducive to agricultural machinery automatic navigation and obstacle avoidance. However, it is necessary to conduct image mosaic and fusion of the images acquired by the multi-lens as the test platform, so as to generate panoramic images for the research on obstacle avoidance of agricultural machinery. With a Lovol tractor for test platform, with a panoramic camera, images of the farmland in the experimental field were obtained, first of all, image preprocessing, mainly for cylindrical projection transformation unified coordinate system, after the SIFT algorithm based on feature points extraction of image feature points and matching for traditional SIFT algorithm matching errors and problems affecting the quality of image matching, using RANSAC algorithm, several optimization iteration to eliminate the effect of error matching points, in view of the image transformation matrix matching generated after, to prevent the

收稿日期: 2019-04-25　修回日期: 2019-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571570)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700400-2017YFD0700403)和北京农业信息技术研究中心开放项目(KF2018W002)

作者简介: 徐弘祯(1995—),男,硕士生,主要从事机器视觉导航研究,E-mail: xuhongzhen951207@gmail.com

通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

instability of its linear results and further optimization results, the nonlinear LM algorithm was used to refine the image, and then the linear weighted smoothing algorithm was used to fuse the image to achieve the generation of panoramic image. Calculated by using the experimental image overlap coefficient of correlation effect of quantitative evaluation of image mosaicking, and 30 groups of image, a total of 60 images were processed by RANSAC algorithm and the LM algorithm, and the experimental results showed that after RANSAC algorithm processing, matching point obviously by mistake, the average geometric distance between the matching feature points offset was decreased significantly, fell by an average of 39.401 3 pixels to 0.581 9 pixels, the correlation coefficient was from 0.287 8 to 0.724 9, compared with the traditional method of removing mismatched points by manually setting the matching threshold of SIFT algorithm, the correlation coefficient of 0.724 9 processed by RANSAC algorithm was obviously larger than that of 0.593 3 when the threshold was set at 0.4 and 0.200 7 when the threshold was set at 0.6, which proved that this study can be applied to image mosaic in many cases and eliminate mismatched points; after LM algorithm processing, the average geometric distance offset was further decreased from 0.581 9 pixels to 0.569 3 pixels, and the correlation coefficient was further increased from 0.724 9 to 0.726 1, proving that this study can further optimize the transformation matrix and improve the mosaic quality of panoramic images.

Key words: panoramic camera; image mosaic; SIFT algorithm; feature point matching; RANSAC algorithm; LM algorithm

0　引言

农机自动导航可提高农业生产效率,基于全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)的农机自动导航仅能提供农机位置信息,无法实时获取农机周围信息,为避障提供依据。机器视觉获取的环境图像中包含丰富的色彩信息,能够对障碍物进行有效的识别与追踪,为农机自动导航避障提供了解决方案[1-3]。传统的单镜头相机视场范围小、视野窄,无法获取大范围环境图像。全景相机作为一种新兴的全景图像获取系统,其视野能够覆盖90%的球面范围,视场范围大,能够获取农机周围360°范围内的图像信息,极大提高了农机自动驾驶的安全性。全景相机是多镜头相机,在获取全景图像时,需要对多镜头的图像进行全景图像拼接,才能生成一幅完整的全景图像[4-5]。全景图像拼接是一种将多幅相关的具有重叠区域的图像进行无缝拼接从而获得宽视角全景图像的技术[6-8]。近年来,国内外对图像拼接的研究已取得许多成果[9-18]。

相关研究已较好地解决了图像拼接中的各个环节的问题。但在农田环境下,农田图像的色彩纹理较为单一,在进行特征提取与匹配时会产生许多误匹配点,导致生成的图像变换关系不准确,影响全景图像拼接质量,需要对全景图像拼接的变换关系进一步优化。因此,本研究采用基于特征点的尺度不变特征转换算法,即SIFT算法,对图像进行匹配。针对SIFT算法产生的错误匹配特征点,使用RANSAC算法进行多次迭代,达到剔除误匹配点的效果;采用最小二乘法生成变换矩阵,为防止生成的线性结果不稳定,并进一步优化全景图像的拼接变换关系,采用LM算法进行精炼,以达到提高拼接质量的目的;最后通过线性加权平滑算法进行图像融合,生成全景图像。

1　材料与方法

1.1　试验平台及试验地点

1.1.1　硬件平台

试验平台选择雷沃欧豹M904-D型拖拉机,根据自动导航系统的技术要求,对拖拉机进行了改装,如图1所示,在拖拉机顶部设置了支架,供设备搭载使用。其中,全景相机采用PointGrey公司生产的Ladybug 5,由6个SONY CCD镜头构成,5个分布在侧面,1个分布在顶部,能够获取农机360°范围内的图像信息。其拍摄所得的全景图像能够覆盖90%的球面范围,每个摄像头的最高像素为500万,如图2所示,将全景相机安装在支架上,用于进行全景视觉导航避障的研究。



图1　全景相机搭载平台实物图

Fig. 1　Platform equipped with a panoramic camera



图 2 Ladybug 5 全景相机实物图

Fig. 2 Ladybug 5 panoramic camera

1.1.2 软件平台

本研究在 Windows 7 操作系统,Intel(R) Core(TM) i5 -4460 CPU 3.20 GHz,内存为 8 GB 的计算机环境下,通过全景相机的官方软件 LadybugCapPro 进行数据采集操作,获取农田图像信息,以 Matlab R2016a 为平台,对农田图像进行图像拼接的相关试验,并统计图像处理时的各参数值,进行试验分析。

1.1.3 试验地点与时间

试验地点为河北省涿州市中国农业大学教学实验场,试验时间为 2017 年 10 月 19 日。主要拍摄涿州市中国农业大学教学实验场中的农田环境,以及部分教学设施、教学楼等,获取的图像色彩、纹理均有一定差异,保证获取的图像种类覆盖范围广。使用其中的 30 组相邻镜头图像,共计 60 幅单镜头图像,原图像尺寸均为 1 024 像素 ×1 224 像素。

1.2 全景图像拼接

全景图像的拼接主要包括图像获取、图像预处理、图像配准和图像融合 4 个步骤,如图 3 所示。本研究图像获取是通过 LadybugCapPro 操控 Ladybug 5 全景相机拍摄完成的;图像预处理主要包括对图像的畸变校正、曝光校正等,以及在图像拼接时需要进行的图像投影坐标转换;图像配准主要是通过图像的匹配算法,获取图像之间的变换关系;图像融合则是通过图像融合算法对拼接后的图像进行像素融合,消除拼接痕迹,最终生成符合人眼视觉的全景图像。

1.2.1 图像预处理

使用官方软件 LadybugCapPro 完成对畸变镜头图像的校正,并进行图像色彩的平衡,完成对图像的初步预处理。同时,由于在采集多幅图像时,相机镜头的空间位置不同,朝向也不同,故其拍摄得到的图像的二维投影坐标系也会产生差异,若直接对图像进行拼接,则不能满足视觉一致性,产生拼接错误[19]。故在进行图像拼接前,需对图像进行投影变换,统一坐标系。柱面投影坐标系由于其计算简单,

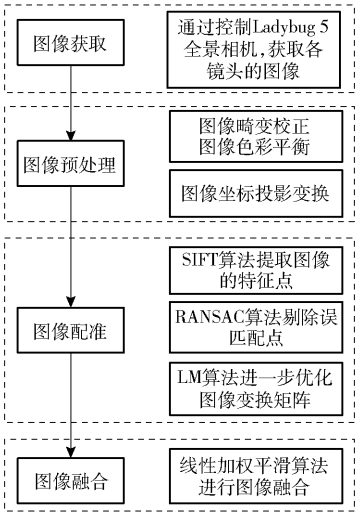


图 3 全景图像拼接流程

Fig. 3 Panoramic image mosaic flow chart

且在水平方向上不会改变图像的特征,易于计算机储存,有着广泛的应用。本文采用柱面投影坐标转换。

柱面投影坐标转换的公式为

$$\begin{cases} x' = f\sin\dfrac{\theta}{2} + f\sin\left(\arctan\dfrac{x-\dfrac{w}{2}}{f}\right) \\ y' = \dfrac{h}{2} + \dfrac{f\left(y-\dfrac{h}{2}\right)}{k} \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$k = \sqrt{f^2 + \left(\frac{w}{2} - x\right)^2} \tag{2}$$

式中 (x,y)——原图像平面上的像素点坐标值

(x',y')——柱面投影后的图像平面上的像素点坐标值

f——图像焦距

θ——图像视场角

w——图像像素宽度

h——图像像素高度

1.2.2 图像配准

图像配准是生成全景图像中的重要环节,即通过寻找两幅图像的相似之处,找到两幅图像的重叠区域,从而确定两幅图像之间的变换关系,实现图像变换,即实现图像之间的配准。图像配准相关的算法大致可以分为两类,一类是基于图像特征,常用的有 SIFT 算法、加速稳健特征(Speeded up robust features,SURF)算法等,该类算法是通过计算图像中具有明显特征的像素点,并匹配两幅图像之间的像素点,从而获得变换关系,实现图像配准;另一类是基于图像区域的算法,即根据图像之间像素的灰度关系,确定两幅图像之间的重叠区域,从而获得两幅图像之间的变换关系[20]。

采用 SIFT[21] 算法对图像进行配准，提取图像的特征点。其主要思想是对不同尺度下的图像，寻找其相邻图层的像素极值点，并对其特征进行相应描述，生成特征点。因此，SIFT 算法检测生成的特征点具有尺度不变、旋转不变等特性，该算法能够适用于多种图像，检测生成稳定的特征点。SIFT 算法生成特征点需要 4 个步骤：①构建不同的尺度空间，得到高斯差分金字塔。②在每一组高斯差分金字塔中，寻找相邻图层的极值点。③极值点的精确定位。④极值点特征描述符的生成[22-24]。

(1)构建不同的尺度空间，得到高斯差分金字塔。首先对原始图像进行降采样，不断缩小图像的尺寸，从而将不同尺寸的图像构成图像金字塔的每一层，后采用不同模糊程度的高斯模糊模板对图像金字塔的每一层图像进行不同程度的模糊处理。即依据高斯模糊模板对图像进行卷积运算，假设 $I(x,y)$ 是图像 I 的像素点坐标，σ 是高斯模糊模板的尺度因子。则高斯模糊模板 $G(x,y,\sigma)$ 公式为

$$G(x,y,\sigma)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{3}$$

将图像与高斯模板卷积运算，可得到图像的尺度空间

$$L(x,y,\sigma)=G(x,y,\sigma)*I(x,y) \tag{4}$$

将高斯金字塔每组中相邻上下两层图像相减，得到高斯差分图像(Difference of Gaussian, DoG)，从而构成高斯差分金字塔，如图 4 所示。

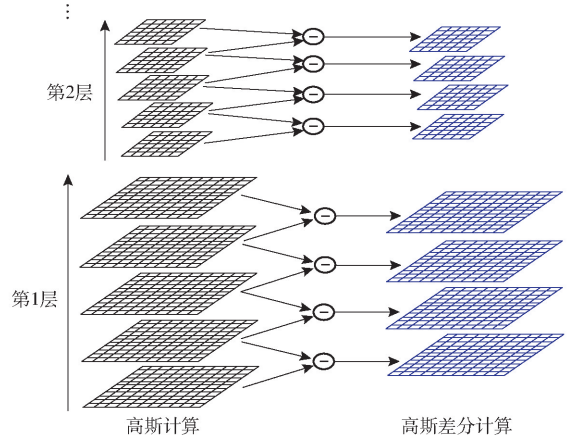


图 4　DoG 金字塔示意图

Fig. 4　Pyramid of DoG

(2)在每一组高斯差分金字塔中，寻找相邻图层的极值点。将高斯差分金字塔的每一组中的相邻两层图像进行对应比较，即一图层中的待检测点，将与该图层中该点的邻域进行比较，同时也与上下两侧相邻图层中的对应点的邻域进行比较，若同时满足该点是最大值或最小值，则确定该点为一极值点。

(3)极值点的精确定位。由于图像为离散空间，并非连续空间，所以某些上一步检测出的坐标并不能很好地代表真正的连续空间中的极值点，故通过拟合三维二次函数来精确确定关键点的位置和尺度。

(4)极值点特征描述符的生成。SIFT 算法对检测得到的极值点各梯度方向的值进行统计，将其中的最大值作为主方向，并将坐标轴旋转为该主方向，从而能够使该极值点邻域像素点的各梯度方向均旋转至以该主方向为坐标轴的坐标系中，使极值点具备旋转不变性。后在该极值点所在的尺度空间的 4×4 邻域范围内，插值计算每个像素点的 8 个方向的梯度，共同用来描述该极值点，从而生成极值点特征描述符，即为特征点。

SIFT 算法在经过特征描述符之间的匹配后，采用特征点之间的欧氏距离作为筛选匹配的标准，计算特征点至另一图像对应的特征点的欧氏几何距离，选取其中欧氏几何距离最小的和仅次于最小的两个特征点，通过计算二者欧氏几何距离的比值，若比值小于一特定阈值，则认可这一对匹配点，反之则剔除。

试验结果表明该算法仍存在许多误匹配现象，影响图像的拼接效果。本文采用 RANSAC 算法，对匹配结果进行进一步优化，其能通过不断的迭代，对匹配的特征点对进行筛选，最终得出正确的匹配点对，获得图像的变换矩阵[25-28]。其具体步骤如下：

(1)从匹配的特征点对中随机选取 4 对，并通过线性最小二乘法计算出变换矩阵，作为初始的图像变换矩阵。

(2)通过初始的图像变换矩阵，对其他匹配的特征点对计算误差函数值，将误差函数值符合筛选阈值的匹配特征点对设定为内点，反之，不符合筛选阈值的匹配特征点对设定为外点。并记录内点和外点的数量。

(3)重复步骤(1)，再次随机选取 4 对匹配的特征点对，记录其生成的变换矩阵对应的内点和外点数量，若内点数量较上一变换矩阵生成的多，则将图像变换矩阵更新为新生成的变换矩阵，反之，则仍为上一变换矩阵。

重复此循环过程，直至遍历完所有匹配特征点对的组合，或至设定的最多迭代次数。此时最后结果生成的变换矩阵，则为图像之间的变换矩阵，通过公式进行图像之间的变换。

$$\begin{bmatrix} a' \\ b' \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{H} \begin{bmatrix} a \\ b \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

其中

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中 (a,b)——变换矩阵处理前图像像素点坐标

(a',b')——变换矩阵处理后图像的像素点坐标

$\boldsymbol{H}$——图像变换矩阵

m_{11}、m_{12}、m_{21}、m_{22}——图像旋转和尺度变化参数

m_{31}、m_{32}——图像水平方向与垂直方向的形变参数

m_{13}、m_{23}——图像水平方向与垂直方向的偏移量

通过 RANSAC 算法提纯匹配点对后,通过线性最小二乘法生成图像的变换矩阵,但由于线性结果的不稳定性,且为了进一步精炼变换矩阵,本文采用了非线性的优化算法——Levenberg - Marquard 算法,简称 LM 算法。该算法是一种经典的非线性无条件约束优化算法,可用于解决非线性最小二乘问题,同时,也可对输入的误差函数进行优化。其大体思路为从输入的起始目标点开始,先给定一个初始的可信赖的最大位移量,即为“步长”,以该“步长”为半径,在此范围内计算误差函数的值,寻找最优的解,不断改变“步长”,直至求得最优解[29-30]。本文的具体实施步骤如下:

(1)选择经过 RANSAC 算法优化的匹配特征点对的平均几何距离偏移量 E 作为优化变换矩阵的标准,则输入的误差函数为 $E(\boldsymbol{H})$,计算该输入误差函数的初始值,计算公式为

$$E(\boldsymbol{H}) = \sum_i \frac{d(q_i', \boldsymbol{H}q_i)}{n} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} e_i^2(\boldsymbol{H}) \tag{7}$$

式中 i——像素点序号

q_i——序号为 i 的像素点坐标值

q_i'——与 q_i 对应的像素点坐标值

$e_i(\boldsymbol{H})$——误差函数的单项残差

n——所有匹配特征点对的个数

$d(q_i', \boldsymbol{H}q_i)$——$q_i'$ 与 $\boldsymbol{H}q_i$ 的欧氏几何距离

平均几何距离偏移量越小,则证明匹配关系越正确。

(2)计算迭代步长 h_{lm},其计算公式为

$$h_{lm} = -(\boldsymbol{J}_e^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_e + \mu\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{J}_e^{\mathrm{T}}e(\boldsymbol{H}) \tag{8}$$

式中 $\boldsymbol{J}_e$——雅可比矩阵,是多元函数一阶偏导数以一定方式排列而成的矩阵

μ——乘法因子

$\boldsymbol{I}$——防止迭代步长矩阵不可逆而引入的单位矩阵

判断迭代步长是否小于预先设置的迭代步长阈值,若小于,则跳出循环,生成变换矩阵 $\boldsymbol{H}$,反之则继续循环。

(3)使用迭代步长更新误差函数的输入参数。假设 $\boldsymbol{H}_k$ 为第 k 次迭代时的 $\boldsymbol{H}$ 变换矩阵,则可通过计算公式进行更新

$$\boldsymbol{H}_{k+1} = \boldsymbol{H}_k + h_{lm} \tag{9}$$

(4)重新计算误差函数的值,根据预先设定的误差函数的阈值,判断当前误差函数的值,若小于则跳出循环,生成变换矩阵 $\boldsymbol{H}$,反之则继续循环。若迭代次数达到预先设定的最大迭代次数,则跳出循环,生成变换矩阵 $\boldsymbol{H}$,反之则继续循环。

1.2.3 图像融合

若图像直接进行拼接,则在重叠区域的拼接部分会有明显的拼接痕迹,有断裂感,影响图像拼接质量与视觉体验。于是需采用图像融合算法对重叠部分进行融合处理。本文采用的是线性加权平滑算法,计算简便,融合效果较好,有着广泛的应用。其公式为

$$P(x,y) = \alpha P_1(x_1,y_1) + (1-\alpha)P_2(x_2,y_2) \tag{10}$$

式中 $P(x,y)$——融合后重叠区域对应的像素点像素值

$P_1(x_1,y_1)$——融合前待处理图像位于重叠区域的像素点像素值

$P_2(x_2,y_2)$——融合前位于重叠区域与 (x_1,y_1) 对应的像素点像素值

α——融合权重,随像素点至重叠区域边缘的距离改变而线性改变,范围为 0 ~ 1

1.3 图像拼接性能评价

本文通过计算两幅图像拼接后重叠区域的相关系数 r 来定量描述图像拼接质量[31-33],其计算公式如下

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}(I_{1i} - \bar{I}_1)(I_{2i} - \bar{I}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(I_{1i} - \bar{I}_1)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(I_{2i} - \bar{I}_2)^2}} \tag{11}$$

式中 N——重叠区域像素点的总数

I_{1i}、I_{2i}——两幅拼接图像重叠区域相对应的、序号为 i 的像素点像素值

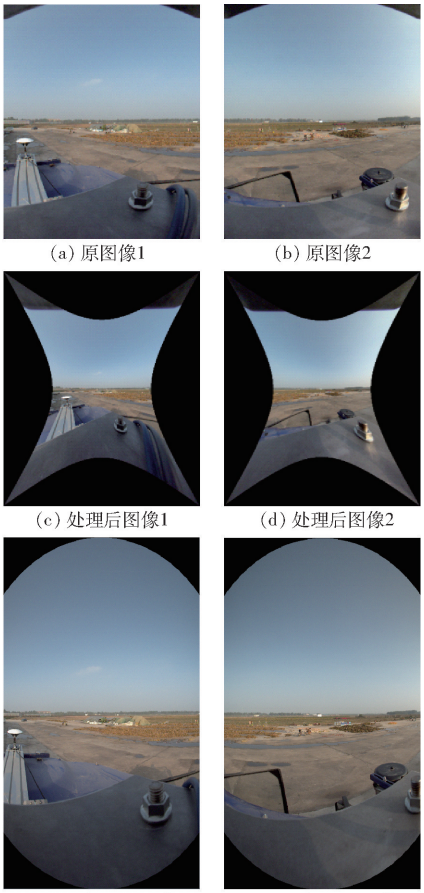
$\bar{I}_1$、$\bar{I}_2$——两幅拼接图像重叠区域的像素平均值

r 最大为 1,表明两幅图像的重叠区域完全相同,越接近 1,则两幅图像重叠区域相关性越强,图像拼接质量越高。

2　结果与分析

2.1　图像采集与预处理

本研究通过 Ladybug 5 全景相机官方软件对全景相机进行操控，获取农田的图像信息，并通过该软件处理生成每个镜头的原图像，以及畸变校正和色彩平衡后的图像，图 5 为原图像与处理后的图像。



(a) 原图像1　(b) 原图像2　(c) 处理后图像1　(d) 处理后图像2　(e) 柱面投影后图像1　(f) 柱面投影后图像2

图 5　原图像与处理后的图像

Fig. 5　Original images and processed images

2.2　RANSAC 算法剔除误匹配点

本研究通过对比 RANSAC 算法剔除误匹配点前后图像相关系数的变化，以及在 1.2.2 节中所提及的平均几何距离偏移量 E，来定量判断 RANSAC 算法对图像拼接质量的影响。

将经过柱面投影处理后的图 5e、5f 两幅图像作为待拼接图像，进行 RANSAC 算法处理。图 6 为未经 RANSAC 算法处理前，SIFT 算法生成的特征点，并进行匹配情况，左图中标记的红色点即为 SIFT 算法成功匹配的特征点，右图中标记的绿色点即为对应的 SIFT 算法成功匹配的特征点，黄色的线段即为二者之间的连接线，表示二者成功匹配，可以清晰地看到，由红圈标记出来的即为明显的错误匹配点对，此外还有不明显的错误匹配点，图 7 为经过 RANSAC 算法后，特征点的匹配情况，可以看到错误的匹配点对被明显剔除。表 1 为采用 RANSAC 算法处理前后各参数统计结果。

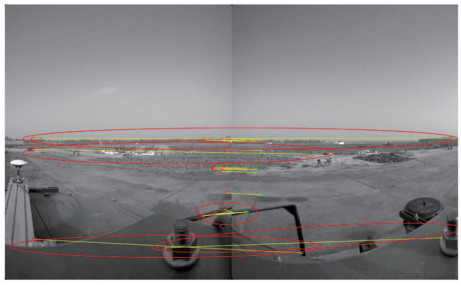


图 6　未经 RANSAC 算法处理的特征点匹配结果

Fig. 6　Feature points matching before RANSAC algorithm processed

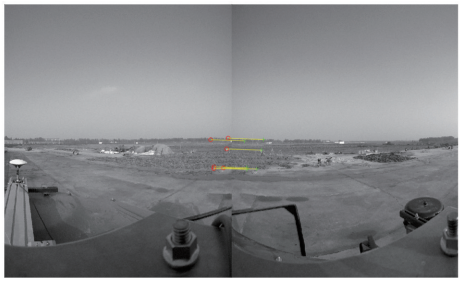


图 7　经 RANSAC 算法处理后特征点匹配结果

Fig. 7　Feature points matching after RANSAC algorithm processed

表 1　RANSAC 算法处理前后各参数统计结果

Tab. 1　Value of each parameter before and after processed by RANSAC algorithm

处理类型	匹配点数/个			平均几何距离偏移量/像素			相关系数		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
处理前	62.8	111	24	39.401 3	132.627 6	3.234 4	0.287 8	0.883 5	0.083 0
处理后	30.1	69	10	0.581 9	0.764 9	0.395 5	0.724 9	0.950 5	0.383 0

从表 1 可以看出，匹配点数虽有所减少，由平均值 62.8 个减小为平均值 30.1 个，但是平均几何距离偏移量明显减小，由平均值 39.401 3 像素减小为平均值 0.581 9 像素，相关系数明显提高，由平均值 0.287 8 提高为平均值 0.724 9，证明能够剔除误匹配点数，明显提高图像拼接质量。

而一种常用于进行误匹配点剔除的方法便是针对图像的不同情况，手动调整传统 SIFT 算法中特征点的几何距离最小值与次小值之间的比值，常用的阈值设定为 0.6、0.5、0.4 等，阈值越小，则认为剔除

误匹配点的力度越大,即认定为正确匹配点的条件越苛刻。常用的阈值设定为 0.5,本研究是在阈值为 0.5 的情况下,运行 RANSAC 算法进一步剔除误匹配点,提高图像拼接质量。表 2 为本文采用的 RANSAC 算法与手动阈值设定为 0.6、0.5、0.4 处理后参数的统计结果。

表 2 RANSAC 算法与手动设置阈值处理前后各参数统计结果

Tab. 2 Value of each parameter before and after processed by RANSAC algorithm and set threshold manually

参数		手动设置阈值			阈值设为 0.5 RANSAC 处理
		0.4	0.5	0.6	
匹配点数/个	平均值	41.7	62.8	106.1	30.1
	最大值	81	111	153	69
	最小值	15	24	38	10
平均几何距离偏移量/像素	平均值	5.770 2	39.401 3	54.138 1	0.581 9
	最大值	10.138 5	132.627 6	144.771 2	0.764 9
	最小值	0.401 1	3.234 4	20.304 1	0.395 5
相关系数	平均值	0.593 3	0.287 8	0.200 7	0.724 9
	最大值	0.942 7	0.883 5	0.568 3	0.950 5
	最小值	0.315 9	0.083 0	0.057 0	0.383 0

从表 2 可以看出,将手动阈值设定在 0.4 时,匹配点数的平均值为 41.7 个,相较于设定阈值在 0.5 时的 62.8 个,以及相较于阈值设定在 0.6 时的 106.1 个,明显减小,但仍多于将阈值设定在 0.5 后进行 RANSAC 处理的 30.1 个;在平均几何距离偏移量方面,将阈值设定在 0.4 时其平均值为 5.770 2 像素,远小于阈值为 0.5 时的 39.401 3 像素,以及阈值设定为 0.6 时的 54.138 1 像素,但仍大于进行 RANSAC 处理后的 0.581 9 像素;而相关系数方面,阈值为 0.4 时,其相关系数的平均值为 0.593 3,相较于阈值为 0.5 时的 0.287 8,以及阈值为 0.6 时的 0.200 7 有着明显的提高,证明图像的拼接质量有所提高,但仍小于经过 RANSAC 处理后的 0.724 9,证明经过 RANSAC 处理后进行图像拼接能够获得更好的质量。

从表 2 还可以看出,随着阈值设定的不断变小,图像特征点进行匹配的条件逐渐苛刻,错误匹配点的剔除效果逐渐增强,以及提高图像拼接质量效果逐渐明显。但当阈值设定为 0.4 及更小的情况时,在错误匹配点得到剔除的同时,往往会因特征点匹配条件过于苛刻,导致部分应正确匹配的特征点无法实现匹配,从而影响了图像变换关系的生成,无法拟合生成正确的图像变换关系,导致图像质量下降,甚至还能产生匹配点个数过少,无法生成图像变换关系的现象。比如图 5a、5b 两幅农田图像,在进行阈值设定为 0.4 的特征匹配时,生成的成功匹配点个数为 0,导致二者无法进行图像拼接。故将阈值设置为 0.4 及更小时,特征点匹配的结果会不稳定,无法适应多种情况下的图像拼接。

综上,传统的手动设定阈值的方法无法适应多种情况下的图像拼接,且需人工调整,无法实现自动图像拼接,而采用 RANSAC 算法能够实现自动剔除误匹配点,且不会产生无法成功匹配的现象,能够实现多种情况下图像拼接质量的提高,且获得的图像拼接质量更好。

2.3 LM 算法优化变换矩阵

以 1.2.2 节中所提及的平均几何偏移量 E 作为 LM 算法的输入误差函数,通过对比 LM 算法优化图像变换矩阵前后图像相关系数的变化,以及输入误差函数值的变化,来定量判断 LM 算法对变换矩阵的优化,本文图像的选择均是对应 2.1 节试验的图像。表 3 是对 LM 算法处理前后的数据各参数统计的结果。

表 3 LM 算法处理前后各参数统计结果

Tab. 3 Value of each parameter before and after processed by LM algorithm

处理类型	平均几何距离偏移量/像素			相关系数		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
处理前	0.581 9	0.764 9	0.395 5	0.724 9	0.950 5	0.383 0
处理后	0.569 3	0.737 6	0.374 6	0.726 1	0.952 0	0.384 4

从表 3 可以看出,经过 LM 算法对变换矩阵进行优化后,平均几何距离偏移量减小,由平均值 0.581 9 像素减小为 0.569 3 像素,相关系数增加,由平均值 0.724 9 增加为 0.726 1,证明 LM 算法对图像的变换矩阵具有优化效果,能够提高图像的拼接质量。

3 结论

(1)对基于特征点匹配的全景相机图像拼接方法进行了改进,首先通过柱面投影统一各镜头图像的二维投影坐标系,然后针对传统 SIFT 算法会生成

错误匹配的问题，使用 RANSAC 算法剔除误匹配点对，并通过 LM 算法进一步优化图像变换矩阵，提高了全景图像的拼接质量。

（2）通过 RANSAC 算法对经过 SIFT 算法特征点提取并匹配后的图像进行处理，分析比较处理前后的参数可知：匹配点个数平均值由 62.8 减小为 30.1，误匹配点对明显减少；平均几何距离偏移量由 39.401 3 像素减小为 0.581 9 像素；相关系数平均值由 0.287 8 提高为 0.724 9，图像拼接质量明显提高。与手动设置阈值的剔除误匹配点对方法进行了比较，证明该算法能够实现多种情况下的图像拼接，且获得的图像拼接质量更好。

（3）采用 LM 算法对经过 RANSAC 算法剔除误匹配点后的图像进行处理，分析比较处理前后的参数可知：平均几何距离偏移量由 0.581 9 像素减小为 0.569 3 像素；相关系数平均值由 0.724 9 提高至 0.726 1，图像的变换矩阵得到进一步优化，图像拼接质量得到进一步提高。

参 考 文 献

[1] 魏爽，李世超，张漫，等. 基于 GNSS 的农机自动导航路径搜索及转向控制[J]. 农业工程学报，2017，33(增刊 1)：70－77.
WEI Shuang，LI Shichao，ZHANG Man，et al. Automatic navigation path search and turning control of agricultural machinery based on GNSS [J]. Transactions of the CSAE，2017，33(Supp. 1)：70－77.（in Chinese）

[2] 张漫，项明，魏爽，等. 玉米中耕除草复合导航系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2015，46(增刊)：8－14.
ZHANG Man，XIANG Ming，WEI Shuang，et al. Design and implementation of a corn weeding-cultivating integrated navigation system based on GNSS and MV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(Supp.)：8－14.（in Chinese）

[3] 李天华，吴增昊，廉宪坤，等. 基于定向摄像头的大拱棚运输车视觉导航研究[J]. 农业机械学报，2018，49(增刊)：8－13.
LI Tianhua，WU Zenghao，LIAN Xiankun，et al. Navigation line detection for greenhouse carrier vehicle based on fixed direction camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(Supp.)：8－13.（in Chinese）

[4] 李盛辉，夏春华，姬长英，等. 自主导航农业车辆的全景视觉同时定位与地图创建[J]. 江苏农业学报，2017，33(3)：598－609.
LI Shenghui，XIA Chunhua，JI Changying，et al. Simutaneous localization and mapping for autonomously-navigating agricultural vehicle based on panoramic vision[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences，2017，33(3)：598－609.（in Chinese）

[5] YANG L，NOGUCHI N. Human detection for a robot tractor using omni-directional stereo vision[J]. Computers & Electronics in Agriculture，2012，89(3)：116－125.

[6] 张欣. 全景拼接的关键技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2009.
ZHANG Xin. Research on key techniques of panoramic mosaic [D]. Harbin：Harbin Engineering Unversity，2009.（in Chinese）

[7] 韩松卫. 运用特征点匹配的图像快速拼接算法研究[D]. 天津：河北工业大学，2010.
HAN Songwei. Research on matching algorithm for image fast stitching using feature points[D]. Tianjin：Hebei University of Technology，2010.（in Chinese）

[8] 汪华琴. 基于特征点匹配的图像拼接方法研究[D]. 武汉：华中师范大学，2007.
WANG Huaqin. Research on image mosaic method based on feature point matching[D]. Wuhan：Central China Normal University，2007.（in Chinese）

[9] 邓非，胡玉雷，黄云. 一种基于 SURF 算法的柱面全景影像拼接方法[J]. 测绘地理信息，2015，40(4)：14－22.
DENG Fei，HU Yulei，HUANG Yun. A method of cylindrical panoramic image mosaic based on SURF algorithm[J]. Journal of Geomatics，2015，40(4)：14－22.（in Chinese）

[10] 王腾蛟，成礼智. 基于 Levenberg－Marquardt 改进算法的图像拼接[J]. 计算机应用，2009，29(10)：2693－2694.
WANG Tengjiao，CHENG Lizhi. Image mosaic via improved Levenberg－Marquardt algorithm[J]. Journal of Computer Applications，2009，29(10)：2693－2694.（in Chinese）

[11] 文伟东，张明. 基于 SIFT 算法的全景图像拼接技术研究[J]. 计算机系统应用，2017，26(7)：227－231.
WEN Weidong，ZHANG Ming. Research on panoramic image mosaic technology based on SIFT algorithm[J]. Computer System and Applications，2017，26(7)：227－231.（in Chinese）

[12] LARAQUI A，SAAIDI A，SATORI K. MSIP：multi-scale image pre-processing method applied in image mosaic[J]. Multimedia Tools and Applications，2018，77(6)：7517－7537.

[13] 常伟，刘云. 一种改进的快速全景图像拼接算法[J]. 电子测量技术，2017，40(7)：90－99.
CHANG Wei，LIU Yun. Improved rapid algorithm of image mosaic[J]. Electronic Measurement Technology，2017，40(7)：90－99.（in Chinese）

[14] 马嘉琳，张锦明，孙卫新. 基于相机标定的全景图拼接方法研究[J]. 系统仿真学报，2017，29(5)：1112－1119.
MA Jialin，ZHANG Jinming，SUN Weixin. Research on panoramic image mosaic method based on camera calibration[J]. Journal of System Simulation，2017，29(5)：1112－1119.（in Chinese）

[15] 王丹丹，陈康. 基于虚拟现实的柱面全景图像拼接方法研究[J]. 科技通报，2017，33(10)：113－116.
WANG Dandan，CHEN Kang. Research on mosaic method of cylindrical panoramic image based on virtual reality[J]. Bulletin

of Science and Technology, 2017, 33(10):113 - 116. (in Chinese)
[16] 马无锡. 阈值自适应的 SIFT 全景图像拼接算法[J]. 浙江工贸职业技术学院学报, 2017,17(2):35 - 40.
MA Wuxi. Adaptive threshold SIFT panorama image matching algorithm[J]. Journal of Zhejiang Industry and Trade Vocational College, 2017, 17(2):35 - 40. (in Chinese)
[17] 任刚, 彭冬亮, 谷雨. 基于圆柱面映射的快速图像拼接算法[J]. 计算机应用研究, 2017,34(11):277 - 281.
REN Gang, PENG Dongliang, GU Yu. Fast image mosaic algorithm based on cylindrical surface mapping[J]. Application Research of Computes, 2017, 34(11):277 - 281. (in Chinese)
[18] 杨镇豪. 基于柱面变换的图像拼接技术[J]. 现代计算机, 2018(10):13 - 16,22.
YANG Zhenhao. Image mosaic technology based on cylinder transformation[J]. Modern Computer, 2018(10):13 - 16,22. (in Chinese)
[19] 苏海翔. 基于 SURF 的图像拼接及柱面全景图优化[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014.
SU Haixiang. Image mosaic and cylindrical panorama optimization based on SURF[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
[20] 吴乐富, 丁广太. 基于区域的图像拼接算法[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(18):4044 - 4050.
WU Lefu, DING Guangtai. Reigion-based images stitching algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(18): 4044 - 4050. (in Chinese)
[21] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91 - 110.
[22] 李艳丽, 向辉. 基于 SIFT 特征点的图像拼接[C]//中国计算机图形学大会,杭州,2006.
[23] 荣燕. 基于 SIFT 的全景图像拼接算法研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2018.
RONG Yan. Research on sift-based panoramic imiage mosaicking algorithm[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
[24] 陈月. 基于 SIFT 特征检测与匹配的快速图像拼接方法研究[D]. 长春:吉林大学, 2017.
CHEN Yue. Study on fast image stitching method based on SIFT feature detection and matching[D]. Changchun: Jilin Unversity, 2017. (in Chinese)
[25] 赫更新, 马嘉文,张西克,等. SURF 与 RANSAC 组合图像拼接算法[J]. 应用科技, 2018, 45(4):45 - 49.
HE Gengxin, MA Jiawen, ZHANG Xike, et al. An improved image mosaic algorithm based on SURF and RANSAC[J]. Applied Science and Technology, 2018, 45(4):45 - 49. (in Chinese)
[26] 戴雪龙, 邓斯玉. 基于改进的 SIFT 和 RANSAC 的图像拼接技术[J]. 信息通信, 2017(10):100 - 102.
DAI Xuelong, DENG Siyu. Image mosaic technology based on improved SIFT and RANSAC[J]. Information and Communication, 2017(10):100 - 102. (in Chinese)
[27] 王武, 于林韬. 基于 SURF 和 RANSAC 的快速图像拼接[J]. 数字技术与应用, 2017(11):39 - 40.
WANG Wu, YU Lintao. Fast image stitching based on SURF and RANSAC[J]. Digital Technology and Application, 2017(11):39 - 40. (in Chinese)
[28] 赵辉, 陈辉, 于泓. 一种改进的全景图自动拼接算法[J]. 中国图象图形学报, 2018, 12(2):336 - 342.
ZHAO Hui, CHEN Hui, YU Hong. An improved fully-automatic image mosaic algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2018,12(2):336 - 342. (in Chinese)
[29] 张彪, 邹哲, 陈书界,等. 基于仿射变换与 Levenberg - Marquardt 算法的织物图像配准[J]. 光学学报, 2017,37(1): 351 - 359.
ZHANG Biao, ZOU Zhe, CHEN Shujie, et al. Fabric image registration based on affine transform and Levenberg - Marquardt algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2017,37(1):351 - 359. (in Chinese)
[30] 赵书睿. 全景图像拼接关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
ZHAO Shurui. The key technology of panorama mosaic[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
[31] 段汕, 张晔, 张彬彬. 二维图像强度-几何相关系数的统计研究方法[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2018, 37(1):144 - 148.
DUAN Shan, ZHANG Ye, ZHANG Binbin. Statistical method of intensity-geometrical correlation coefficient for 2D images [J]. Journal of South-Central University for Nationalities(Nat. Sci. Edition),2018,37(1):144 - 148. (in Chinese)
[32] 段汕, 张彬彬, 张晔. 图像形态相关系数一般问题的研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2018, 37(2):128 - 132.
DUAN Shan, ZHANG Binbin, ZHANG Ye. Research on the general problems of image morphological correlation coefficient [J]. Journal of South-Central University for Nationalities(Nat. Sci. Edition),2018,37(2):128 - 132. (in Chinese)
[33] 马文娟,许峰,周继振. 基于相关系数之和的图像融合质量评价[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2018, 27(4): 20 - 24.
MA Wenjuan, XU Feng, ZHOU Jizhen. Evaluation of image fusion quality based on sum of correlation coefficients[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology(Natural Science Edition), 2018,27(4):20 - 24. (in Chinese)