

不同生长时期果树多源图像的配准方法研究

周 薇¹ 刘 刚¹ 马晓丹^{1,2} 冯 娟³

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, 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083

² 黑龙江八一农垦大学信息技术学院, 黑龙江 大庆 163319

³ 河北农业大学信息科学与技术学院, 河北 保定 071001

摘要 为了实现苹果树冠层的三维重建, 指导智能剪枝、疏花和采摘, 构建了集成光学混合探测(PMD)摄像机和彩色摄像头的图像采集系统, 研究了不同生长时期的多源图像配准方法。从相似度评价指标和 PMD 图像的像素可靠性两个方面来描述果树不同生长时期图像的不同特征。结合图像的特征信息, 提出了应采用基于深度信息的多源传感器标定技术, 实现果树从开花期到成熟期的图像配准; 对休眠期到发芽期的果树图像应采用基于图像特征的多源图像配准算法。对自然场景下的成熟期、休眠期、开花期果树图像共 90 组进行图像特征分析和不同配准方法试验验证, 成熟期和开花期的匹配率达到 100%, 休眠期的匹配率达到 86.11%。

关键词 机器视觉; 多源图像配准; 光学标定; 光学混合探测标记图像

中图分类号 TP242.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0215001

Study on Multi-Image Registration of Apple Tree at Different Growth Stages

Zhou Wei¹ Liu Gang¹ Ma Xiaodan^{1,2} Feng Juan³

¹ Key Laboratory for Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education,

Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology,

Ministry of Agricultural, China Agricultural University, Beijing 100083, China

² College of Information Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University,

Daqing, Heilongjiang 163319, China

³ College of Information Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China

Abstract In order to realize three-dimensional (3D) reconstruction for canopy and guide the operations of intelligent pruning, flower thinning and picking, a multi-image registration algorithm of apple tree at different growth stages is restigated. The robot vision system includes a color camera system and a photo mixing detector (PMD) camera. Image features at different growth stages are described by image similarity and reliable pixels. According to these image features. The optical calibration based on the distance information can be used from the flowering to the mature stage, while from the dormancy to the germination stage, the multi-image registration algorithm should be used. Ninety groups of pictures, including the stages of mature, dormancy and flowering are used to verification the viewpoint. The experimental result shows that, the matching rate reaches 100% at mature stage and flowering stage, while 86.11% at dormancy stage.

Key words machine vision; multi-image registration; optical calibration; flag image of photo mixing detector

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.4232; 150.6910; 150.6044

收稿日期: 2013-07-26; **收到修改稿日期**: 2013-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(31371532)、中央高校基本科研业务费专项资金(2013YJ008)

作者简介: 周 薇(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事检测技术与自动化装置方面的研究。

E-mail: suibian199090@126.com

导师简介: 刘 刚(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电子信息技术在农业中的应用方面的研究。

E-mail: pac@cau.edu.cn

1 引 言

剪枝、疏花疏果、套袋和采摘是苹果树栽培的重要环节,随着我国城镇化建设快速发展,农业劳动力趋于紧张,果园作业成本逐年提高,而机械化、自动化栽培可以在短时间内高质量地完成果园生产作业,而且节省人力和成本,是未来果园生产的发展方向^[1]。

机器视觉试图从图像或者多维数据中获取目标物体信息,为果园作业机械提供指导信息。国外对植株冠层的三维重建手段有三大类:1)立体视觉技术^[2-4],容易受室外非结构环境中的光照影响;2)激光扫描技术^[5-8],该方法建立模型效率较低,难以应用在农业生产中;3)三维数字化仪技术^[9-10],但测量时对环境条件要求高。光学混合探测(PMD)摄像机基于飞行时间法(ToF)的测距原理,能高帧速地捕获深度图像,近年来,这种相机在植株三维重建领域得到了初步应用^[11-12]。但是 PMD 摄像机分辨率低,常与其他传感器,尤其是彩色相机配合使用^[13]。

图像配准是利用多源相机实现三维重建的关键技术,是指依据一些相似性度量决定图像间的变换参数,使从不同传感器、不同视角、不同时间获取的同一场景的两幅或多幅图像,变换到同一坐标系下,在像素层上得到最佳匹配的过程^[14]。近年来,多源图像融合技术受到了广泛重视,许多学者对室内环境下基于图像特征的 ToF 相机和彩色相机的多源图像配准算法进行了深入研究,并取得较好效果^[15]。此外,也有国外学者^[16-18]采用基于光学标定多源传感器的方法实现了图像间的坐标变换,这种方法依赖于相机的深度信息。多源图像的灰度特性相差很大,缺乏一致性特征,因此配准算法大都是针对某一特定应用而独立研发的^[19],尚未发现适用

于果树各个不同生长时期的多源图像配准算法。

本文提出采用基于多源传感器标定技术来实现果树图像配准,并通过分析果树的 PMD 摄像机和彩色摄像头采集的多源图像特征,提出果树在不同生长时期的多源图像配准方法,旨在为后期果树的三维重建提供新的技术支持,最终为剪枝、疏花疏果和采摘等果园管理提供相关的理论依据。

2 视觉系统与图像特征描述

2.1 多源视觉系统和图像分析

在移动平台上,构建由一个 PMD [vision][®] CamCube3.0 摄像机和一个彩色摄像头组成的多源视觉系统,在文献[20]中有详细介绍。为了提高计算机运算速度,采用灰度化后的图像进行分析。

PMD 相机提供标记图像和强度图像。标记图像返回的是图像像素的质量信息,依靠其提供的可靠点和坏点可提高图像处理过程中的稳健性。强度图像呈现的是包括自然光线和近红外光线在内的入射光线的均值,与彩色摄像头图像的灰度信息较为接近,可用于实现基于图像特征的多源图像配准。但是由于在近红外光源照射下,果实和花叶的反射率明显高于枝干^[21-22],花叶生长茂密时,多源图像间的差异性较大,如图 1 和图 2 所示。

图 1 和图 2 分别是果树休眠期和开花期的多源图像,图 1(a)~(c)依次是彩色摄像头图像、PMD 强度图像和 PMD 标记图像,可看出彩色摄像头图像和强度图像显示休眠期的图像特征明显,多源图像间的相似度大,而标记图像的噪声严重,返回的深度信息不可靠;图 2 中彩色摄像头图像和强度图像的相似度小,但是标记图像中近距离花叶的像素点可靠性强。

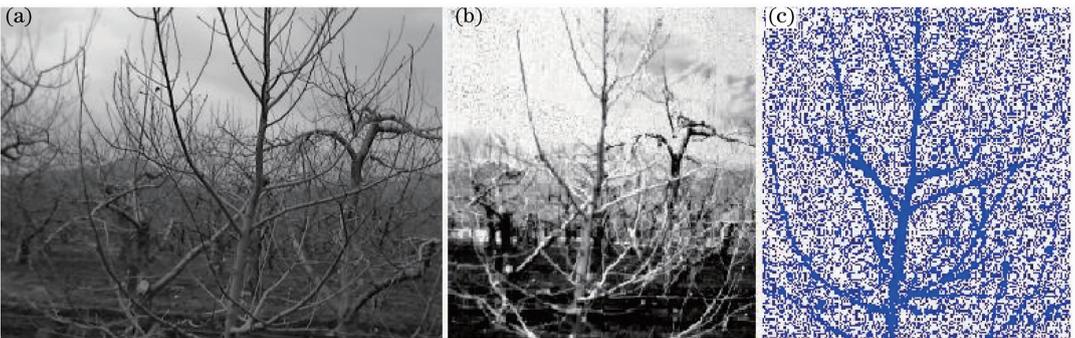


图 1 果树休眠期图像。(a)彩色相机图像;(b)PMD 强度图像;(c)PMD 标记图像

Fig. 1 Image of apple tree at dormancy stage. (a) Image of color camera; (b) intensity image of PMD; (c) flag image of PMD



图 2 果树开花期图像。(a)彩色相机图像；(b) PMD 强度图像；(c) PMD 标记图像

Fig. 2 Image of apple tree at flowering stage. (a) Image of color camera; (b) intensity image of PMD; (c) flag image of PMD

2.2 图像相似度评价

灰度图像相似度计算主要用于评判两幅图像之间内容的相似程度,客观的评价指标有:互信息(MI)和均方根误差(RMSE, E_{RMS})^[23]。对于两幅图像 A、B,各指标的计算公式定义为

$$\begin{cases} M_i = H(A, B) - H(A) - H(B) \\ E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum [A(i, j) - B(i, j)]^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $H = -\sum_{i=0}^{L-1} p_i \ln p_i$, 表示图像的熵,熵的大小反映了图像携带信息量的多少, $H(A, B)$ 为两幅图像的联合信息熵, p_i 为灰度级为 i 的像素数与像素总数的比值, L 为图像总的灰度级数, N 为图像的像素总数, $A(i, j)$ 为图像 A 的像素点对应的灰度值, $B(i, j)$ 为图像 B 的像素点对应的灰度值。

互信息反映两个随机变量之间的相关性,两幅图像间的相关性越大,互信息值越大;均方根误差反映图像间的差异性,值越小说明图像间的差别越小。

2.3 PMD 图像的像素有效性评价

PMD 相机的标记图像反映了图像像素的可靠性,图像二值化后灰度值为 0 的点即为可靠像素点。图像可靠性的公式定义为

$$R = \frac{N_{A(i,j)=0}}{N} \quad (2)$$

式中 $N_{A(i,j)=0}$ 为图像 A 中灰度值为 0 的像素点数。

针对不同生长时期的图像特征,本文提出,成熟期、休眠期、发芽期的苹果树多源图像应采用基于图像特征的配准方法,开花期、坐果期、成熟期的苹果树多源图像应采用基于相机标定的配准方法。

3 基于多源传感器标定技术的图像配准

针对成熟期的果树图像,采用基于图像特征的方法实现了多源图像的配准^[20]。采用经典的

Harris 检测法提取角点,并在归一化互相关系数法的基础上,运用邻域的支持强度实现特征点匹配,最后进行仿射变换和双线性插值,得到配准图像。冯娟等^[24]以 SURF 算法提取待配准图像的尺度不变特征,欧氏距离作为判断特征相似性测度的算法实现图像配准。但是基于图像特征的图像配准算法并不适用于枝叶生长茂盛时期的果树图像,因此有必要开展从开花期到成熟期的多源配准方法研究。

为了用彩色摄像头的坐标系描述 PMD 相机的位置和方向,使用 Matlab 中的标定工具箱来获取内部参数、扭曲系数和外部参数^[25]。

3.1 参考坐标系

小孔成像是最常用的相机原理分析模型,如图 3 所示,空间中任一点 P 在图像中的位置可近似表示为小孔成像模型。模型中包含的四个坐标系,分别是:

- 1) 相机坐标系 ($O_{cL} - X_L Y_L Z_L$ 和 $O_{cR} - X_R Y_R Z_R$);
- 2) 成像平面坐标系 ($O_L - x_L y_L$ 和 $O_R - x_R y_R$);
- 3) 图像坐标系 ($O_1 - u_L v_L$ 和 $O_2 - u_R v_R$);
- 4) 世界坐标系能建立相机坐标系与环境的关系,为简化计算,假设世界坐标系与左相机坐标系重合。

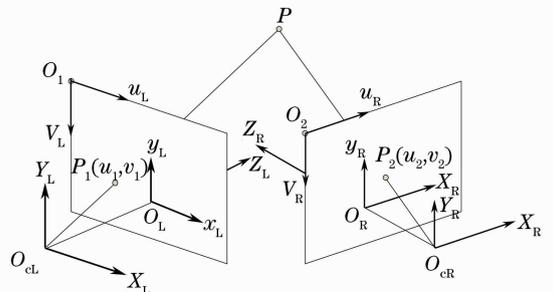


图 3 多源系统小孔成像模型

Fig. 3 Pin-hole model of multi-image vision system

3.2 多源相机标定

假设空间点 P 在 PMD 相机坐标系中的坐标是 (X_1, Y_1, Z_1) , 在 PMD 图像坐标系上的点是 $P_1(u_1, v_1)$; 点 P 在彩色相机坐标系中的坐标是 (X_2, Y_2, Z_2) , 在彩色图像坐标系上的点是 $P_2(u_2, v_2)$ 。由小孔成像原理容易得到

$$\begin{cases} X_1 = (u_1 - u_{o1}) \frac{Z_1}{f_{11}} \\ Y_1 = (v_1 - v_{o1}) \frac{Z_1}{f_{12}} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} X_2 = (u_2 - u_{o2}) \frac{Z_2}{f_{21}} \\ Y_2 = (v_2 - v_{o2}) \frac{Z_2}{f_{22}} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 (u_{o1}, v_{o1}) 、 (u_{o2}, v_{o2}) 分别是 O_L 在图像坐标系中的坐标值, f_{11} 、 f_{12} 分别是 PMD 相机在 x 、 y 方向上的焦距, f_{21} 、 f_{22} 是彩色相机在 x 、 y 方向上的焦距, 以上各值称为相机内部参数。

对于 PMD 相机和彩色相机坐标系之间, 有下式的转换关系

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 称为相机的外部参数。 $\mathbf{R} =$

$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$ 是旋转矩阵, $\mathbf{T} = [t_1 \ t_2 \ t_3]^T$ 是平移矢量。

由(4)式、(5)式可得到

$$\begin{cases} u_2 = \frac{(r_{11}X_1 + r_{12}Y_1 + r_{13}Z_1 + t_1) \cdot f_{21}}{r_{31}X_1 + r_{32}Y_1 + r_{33}Z_1 + t_3} + u_{o2} \\ v_2 = \frac{(r_{21}X_1 + r_{22}Y_1 + r_{23}Z_1 + t_2) \cdot f_{22}}{r_{31}X_1 + r_{32}Y_1 + r_{33}Z_1 + t_3} + v_{o2} \end{cases}. \quad (6)$$

把(3)式代入(6)式, 得到 PMD 相机和彩色相机的图像坐标系之间的变换关系。

采用多源视觉系统采集 12 组不同姿势的标定板图片, 采用单目标定函数获取相机内部参数, 在此基础上立体标定得到外部参数。从(6)式可以看出, 图像坐标系之间的转换关系依赖于相机的内外参数和 PMD 相机测得的深度值。

3.3 特征点选取和仿射变换

由于三对不共线的特征点即可满足精确图像配准的要求, 本文利用 PMD 相机提供的标记图像随

机选取有效特征点。前文中提到, 标记图像中的白色点云是噪声点, 对应的距离误差较大, 故提出采用膨胀算法去除噪声点。灰度图像膨胀实质上是求邻域内最大值作为输出, 因此经膨胀处理后, 黑色区域对应的像素点可视为可靠点。

仿射变换是一种二维坐标到二维坐标之间的线性变换, 是平移、旋转、反转和缩放的组合, 适用于相机成像之间的坐标变换。分别对 PMD 相机中的强度图像和距离矩阵进行仿射变换, 即可得到彩色图像中的每个像素点对应的特征和深度信息。

4 试验验证与分析

课题组于 2012 年 10 月到 2013 年 7 月在北京昌平区香堂村建立的苹果采摘机器人试验示范基地内进行了大量试验, 选取自然光线下成熟期、休眠期、萌芽期、开花期的苹果树图像数据各 30 组用于试验研究。

4.1 不同生长时期的果树图像特征试验

随机选取成熟期、休眠期和开花期的图像数据各 12 组, 对 PMD 图像和彩色图像分别灰度化后, 采用 Matlab 平台中的 `cpselect` 函数手动选取同名点, 把 PMD 强度图像的坐标系变换到彩色图像坐标系后, 对两幅图像进行相似度评价和深度信息有效性评价试验, 结果如图 4 所示。

图 4 给出了果树不同生长时期的各 12 组图像特征的量化信息。图 4(a)表明果树休眠期的多源图像间的图像互信息差异略高于成熟期, 明显高于开花期; 图 4(b)中的均方根误差值有较大差异, 从小到大依次是: 休眠期、开花期和成熟期; 图 4(c)中显示果树在成熟期和开花期的有效像素比例分别为 0.820 和 0.777, 明显高于休眠期的 0.455。上述结果可以得出, 从果树休眠期到成熟期, 多源图像间的相似度逐渐减小, 有效像素比逐渐增大。产生此规律的原因是, PMD 相机具有波长为 870 nm 的自带光源, 植物在此近红外波段的反射率高于可见光波段, 且果实花叶的反射率高于枝干, 因此随着花叶的生长, PMD 图像与可见光图像之间的差异逐渐增大, PMD 图像的可靠像素比也逐渐增大。

根据试验结果可推断出: 休眠期、发芽期的苹果树多源图像应采用基于图像特征的配准方法, 开花期、坐果期、成熟期的苹果树多源图像应采用基于相机标定的配准方法。

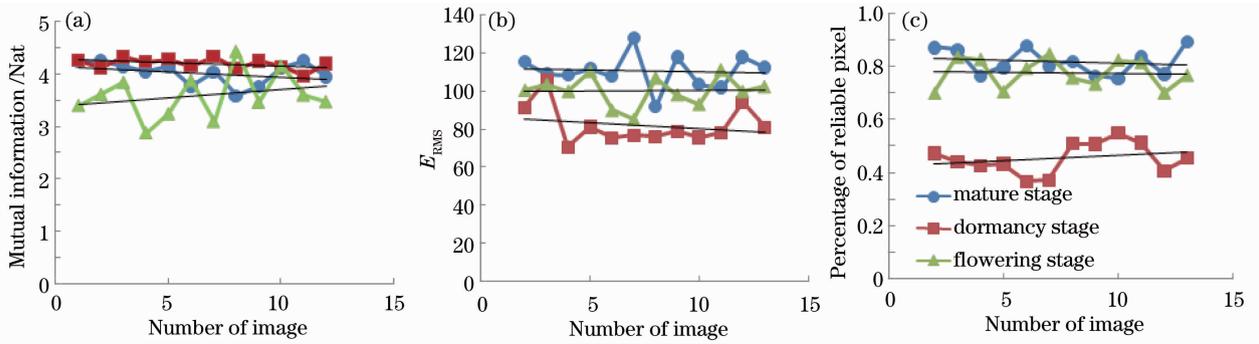


图 4 不同时期的果树图像特征。(a)互信息；(b)均方根误差；(c)有效像素比

Fig. 4 Image characters of apple tree at different stages. (a) Mutual information; (b) root mean square error; (c) percentage of reliable pixel

4.2 基于传感器标定技术的配准方法验证

以开花期的果树图像为例进行详细的过程分析,如图 5 所示。图 5(a)、(b)是视觉系统获取的彩色图像和 PMD 强度图像,图 5(c)是 PMD 标记图像,经过膨胀处理后得到图 5(d),这一处理保证了随机选择的待匹配点的可靠性,图 5(e)是利用摄像机标定确定的转换关系得到的同名点。基于图 5

(e)中的同名点,对 PMD 相机的深度矩阵和强度图像进行仿射变换,得到图 5(f)和图 5(g),图 5(f)的灰度信息反映了彩色图像各像素点(多源图像的共有像素)的距离值。为了验证配准精度,对多源图像进行简单的加权叠加,得到图 5(h),图中的标记部分显示了坐标变换后的 PMD 强度图像和彩色图像吻合度较高,能够实现多源图像的精确配准。

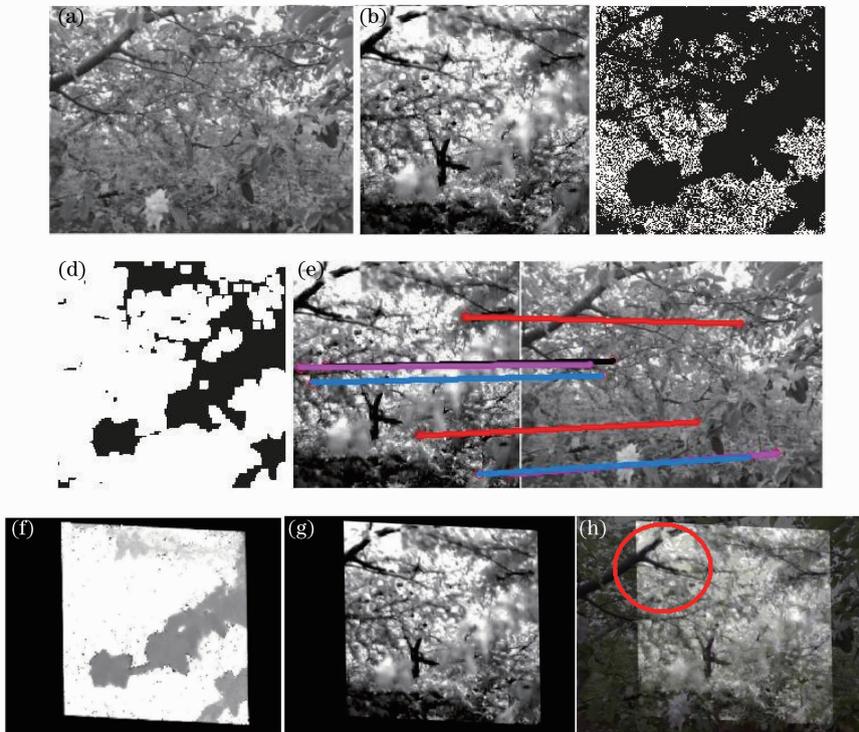


图 5 基于传感器标定的匹配过程。(a)彩色图像；(b) PMD 强度图像；(c) PMD 标记图像；(d)膨胀处理后的标记图像；(e) 匹配效果图；(f)彩色图像的深度信息图；(g) 配准图像

Fig. 5 Image registration processing based on optical calibration. (a) Color image; (b) intensity image of PMD; (c) flag image of PMD; (d) flag image after dilating; (e) result of corresponding points; (f) depth information after transformation; (g) intensity image after transformation; (h) fusion image with weighted values

4.3 不同生长时期的配准方法的评估试验

为了评估文中提出的果树不同生长时期采用不

同配准算法的有效性,分别从剩余的 18 组数据中随机选取 14 组果树休眠期、开花期和成熟期的图像数

据进行验证试验,包括 8 组顺光条件下不同生长时期的图像数据和 6 组逆光条件下的图像数据。对于每组图片均采用两种方法:基于图像特征的多源图

像配准算法^[17]和本文中的基于多源传感器标定的配准方法,匹配率的统计结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 顺光条件下不同生长时期的匹配率统计结果

Table 1 Statistical results of matching rate at different periods in frontlighting

| Items | Method based on image feature | | | Method based on optical calibration | | |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------|-------------------------------------|-----------------|--------------|
| | Dormancy stage | Flowering stage | Mature stage | Dormancy stage | Flowering stage | Mature stage |
| Matching points | 72 | 67 | 69 | 0 | 72 | 72 |
| Correct matching points | 62 | 38 | 56 | 0 | 72 | 72 |
| Matching rate / % | 86.11 | 56.72 | 81.16 | — | 100 | 100 |

表 2 逆光条件下不同生长时期的匹配率统计结果

Table 2 Statistical results of matching rate at different periods in backlighting

| Items | Method based on image feature | | | Method based on optical calibration | | |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------|-------------------------------------|-----------------|--------------|
| | Dormancy stage | Flowering stage | Mature stage | Dormancy stage | Flowering stage | Mature stage |
| Matching points | 56 | 53 | 54 | 0 | 54 | 54 |
| Correct matching points | 47 | 27 | 40 | 0 | 54 | 54 |
| Matching rate / % | 83.93 | 50.94 | 74.07 | — | 100 | 100 |

由表 1 和表 2 可以看出,顺光条件下,基于图像特征的多源图像配准算法在果树休眠期和成熟期的匹配率分别为 86.11% 和 81.16%,在果树开花期的误匹配点较多;逆光条件下,基于图像特征的配准方法在各时期的匹配率均略低于顺光情况;基于传感器标定的配准方法能够实现开花期和成熟期的果树图像的同名点匹配,且基于传感器标定的配准方法不受光线变化的影响,而在休眠期由于标记图像噪点多,膨胀处理后,很难找到可靠的特征点。

基于图像特征的多源配准算法是通过提取两幅图像中共有的图像特征,采用互相关系数法、互信息法、聚类法等进行特征匹配^[26],依靠的是图像像素点的灰度梯度变换,因此在多源图像间特征差异较大的情况下,难以找到正确匹配对;基于传感器标定的多源配准依赖于 PMD 摄像机的深度信息^[16],有效像素比越大,配准结果越准确。结合不同生长时期的果树图像特征试验,得到以下规律:果树休眠期和发芽期,应采用基于图像特征的配准方法;果树开花期、坐果期和成熟期,应采用基于传感器标定的配准方法。

5 结 论

1) 采用图像互信息和均方根误差能够客观地对多源图像进行相似度评价,并利用 PMD 相机标记图像,描述了果树不同生长阶段的图像特征。研究分析了苹果树在休眠期、开花期和成熟期的图像,对比得到果树在成熟期和休眠期的多源图像相似度高,随着花叶的铺散,相似度降低,但是 PMD 图像

的可靠性增加。

2) 针对 PMD 相机和彩色相机构成的多源视觉系统,提出了基于多源传感器标定的方法,用于实现图像高效配准。利用 Matlab 的标定工具箱得到两个相机成像平面间的转换关系,依赖标记图像自动选取特征点。试验结果表明该方法的同名点匹配率高,能精确地实现多源图像配准。

3) 针对果树不同生长时期的图像特征,提出了不同的多源图像配准方法。冬眠期和发芽期的苹果树多源图像应采用基于图像特征的配准方法,开花期、坐果期、成熟期的苹果树多源图像应采用基于相机标定的配准方法,研究结果为果树不同生长时期的三维重建提供了新的技术支持。

参 考 文 献

- 1 Wang Jingyan, Li Zhuang, Li Min, *et al.*. Existing problem, countermeasure and development trend of apple industry in China [J]. *China Fruits*, 2011, (2): 62–65.
汪景彦, 李 壮, 李 敏, 等. 我国苹果业存在问题及其对策与发展趋势[J]. *中国果树*, 2011, (2): 62–65.
- 2 M Nielsen, D C Slaughter, C Gliever, *et al.*. Vision-based 3D peach tree reconstruction for automated blossom thinning [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(1): 188–196.
- 3 Yang Liang, Guo Xinyu, Lu Shenglian, *et al.*. 3D morphological reconstruction of cucumber leaf based on multiple images [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(2): 141–144.
杨 亮, 郭新宇, 陆声链, 等. 基于多幅图像的黄瓜叶片形态三维重建[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 141–144.
- 4 Wang Chuanyu, Zhao Ming, Yan Jianhe, *et al.*. Three-dimensional reconstruction of maize leaves based on binocular stereovision system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(4): 198–202.

- 王传宇, 赵 明, 阎建河, 等. 基于双目立体视觉技术的玉米叶片三维重建[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 198—202.
- 5 P Raunonen, S Kaasalainen, M Kaasalainen, *et al.*. Approximation of volume and branch size distribution of trees from laser scanner data [J]. Int Archives Photogramm, Remote Sens, Spatial Inf Sci, 2011, 38(5): W12.
- 6 Y Lin, J Hyyppa. Multiecho-recording mobile laser scanning for enhancing individual tree crown reconstruction [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(11): 4323—4332.
- 7 A Bucksch, K Khoshelham. Localized registration of point clouds of botanic trees [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(3): 631—635.
- 8 Wang Jian, Zhou Guomin. 3D reconstruction of tree stems based on laser scanning of standing [J]. Microcomputer Information, 2009, 25(24): 228—230.
- 王 剑, 周国民. 基于激光扫描仪的树干三维重建方法研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(24): 228—230.
- 9 Wang Fei. Research on the Fractal Dimension and Three-Dimensional Digitized Modeling and Star Value of 'FUJI' Apple Trees Trained to Tall Spindle Shape [D]. Xi'an: Northwest A & F University, 2012.
- 王 菲. 高纺锤形富士苹果树分形维数及三维数字化建模和STAR值的研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2012.
- 10 T Watanabe, J S Hanan, P M Room, *et al.*. Rice morphogenesis and plant architecture: measurement, specification and the reconstruction of structural develop by 3D architectural modeling [J]. Annals of Botany, 2005, 95(7): 1131—1143.
- 11 B Adhikari, M Karkee. 3D reconstruction of apple trees for mechanical pruning [C]. An ASABE Meeting Presentation, 2011, 1111613.
- 12 Y Chene, D Rousseau, P Lucidarme, *et al.*. On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 82: 122—127.
- 13 S Foix Salmerón, G Alenyà Ribas, C Torras Genís. Exploitation of time-of-flight (ToF) cameras [J]. Technical Report IRI-TR-10-07, IRII, CSIC-UPC, 2010.
- 14 Liu Guixi, Liu Dongmei, Liu Fengpeng, *et al.*. A robust image registration algorithm based on feature points matching [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 454—461.
- 刘贵喜, 刘冬梅, 刘凤鹏, 等. 一种稳健的特征点配准方法[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 454—461.
- 15 E Bermejo, O Cordon, S Damas, *et al.*. Quality time-of-flight range imaging for feature-based registration using bacterial foraging [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(6): 3178—3189.
- 16 J Kim, S Park, S Kim, *et al.*. Registration method between ToF and color cameras for face recognition [C]. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011: 1977—1980.
- 17 K D Kuhnert, M Stommel. Fusion of stereo-camera and PMD-camera data for real-time suited precise 3D environment reconstruction [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006, 1-12: 4780—4785.
- 18 M Lindner, I Schiller, A Kolb, *et al.*. Time-of-flight sensor calibration for accurate range sensing [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(12): 1318—1328.
- 19 Xin Yanan, Deng Lei. An improved remote sensing image fusion method based on wavelet transform [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 021001.
- 辛亚楠, 邓 磊. 基于小波变换的遥感图像融合方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 021001.
- 20 Zhou Wei, Feng Juan, Liu Gang, *et al.*. Application of image registration technology in apple harvest robot [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11): 20—26.
- 周 薇, 冯 娟, 刘 刚, 等. 苹果采摘机器人中的图像配准技术研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 20—26.
- 21 Yuan Ting, Zhang Junxiong, Li Wei, *et al.*. Feature acquisition of cucumber fruit in unstructured environment using machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 170—174.
- 袁 挺, 张俊雄, 李 伟, 等. 基于机器视觉的非结构环境下黄瓜标特征识别[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 170—174.
- 22 D Piatti, F Rinaudo. SR-4000 and CamCube3.0 Time of Flight (ToF) cameras: tests and comparison [J]. Remote Sensing, 2012, 4(4): 1069—1089.
- 23 Zhu Kang, He Xinguang. Selective remote sensing image fusion method based on the local feature of contourlet coefficients [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 021001.
- 朱 康, 贺新光. 基于Contourlet系数局部特征的选择性遥感图像融合算法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(2): 021001.
- 24 Feng Juan, Liu Gang, Wang Shengwei, *et al.*. Multi source images registration for harvesting robot to recognize fruits [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 197—203.
- 冯 娟, 刘 刚, 王圣伟, 等. 采摘机器人果实识别的多源图像配准[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 197—203.
- 25 M Lindner, A Kolb, K Hartmann. Data-fusion of PMD-based distance-information and high-resolution RGB-images [C]. ISSCS, 2007, 1-2: 121—124.
- 26 Liu Xiaochun, Zhong Tao, Yu Qifeng, *et al.*. Multi-modal image registration based on local frequency information using modified simplex-simulated annealing algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0615002.
- 刘晓春, 钟 涛, 于起峰, 等. 基于局部频率信息和单纯型模拟退火的异源图像配准[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0615002.

栏目编辑: 李志兰