

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.036

# 采摘机器人果实识别的多源图像配准\*

冯娟<sup>1,2</sup> 刘刚<sup>1</sup> 王圣伟<sup>1</sup> 马晓丹<sup>1</sup> 周薇<sup>1</sup>

(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. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001)

**摘要:** 为了提高果实识别的准确性,减少非结构化环境对识别的影响,使用基于光学混合探测(PMD)技术的深度摄像机与RGB摄像机组合捕获果园环境的多源图像;SURF算法提取待配准图像的尺度不变特征,欧式距离作为判断特征相似性的测度,最近邻与次近邻比值实现特征向量的初匹配,最近邻的搜索策略加速匹配过程;剔除异常点与优化模型交替迭代的方法提纯匹配结果;并以均方误差(MSE)、归一化互信息(NMI)和相关系数(COEF)作为配准效果的客观评价标准。不同试验结果表明:双摄像机组合丰富了锁定目标区域的信息量,配准算法的实时性、鲁棒性及精度均能满足果园试验的要求。

**关键词:** 果实识别 非结构化环境 光学混合探测 多源图像 尺度不变特征 图像配准

中图分类号: TP242.6<sup>+</sup>2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)03-0197-07

## Multi-source Images Registration for Harvesting Robot to Recognize Fruits

Feng Juan<sup>1,2</sup> Liu Gang<sup>1</sup> Wang Shengwei<sup>1</sup> Ma Xiaodan<sup>1</sup> Zhou Wei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Information Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy rates and lower the impact on fruit recognition in unstructured environment, a combination of PMD camera and color camera was used to capture multi-source images of orchard scenes, SURF algorithm was used for extracting scale invariant features, Euclidean distance was regarded as a measure for judging the similarity of features, the ratio of distance from the closest neighbor to the distance of the second closest was utilized for initially matching feature vectors, BBF algorithm was devoted to speed up the closest neighbor's query, a kind of iterative method between picking out outlier points and optimization of model was applied to purify results, the performance of image registration was evaluated according to the MSE, NMI and COEF. The different experimental results show that the amount of information locking to object are enriched by the combination of cameras, the hybrid algorithm is real-time, robust and has ideal precision, which meets the need of orchard test.

**Key words:** Fruit recognition Unstructured environment Photo mixing detector Multi-source images Scale invariant feature Image registration

### 引言

减少非结构环境造成的影响、改善传感器局限

性和提高目标识别准确率一直是国内外果蔬采摘机器人研究需要攻克的难关及重点<sup>[1]</sup>。文献[2~6]中使用RGB摄像机采集果园环境中彩色信息,并以

收稿日期: 2012-11-29 修回日期: 2012-12-24

\* 国家自然科学基金资助项目(31071333)和保定市科学技术研究与发展计划资助项目(12ZG011)

作者简介: 冯娟, 博士生, 河北农业大学讲师, 主要从事机器视觉、农业机器人研究, E-mail: yurenmatou1011@163.com

通讯作者: 刘刚, 教授, 博士生导师, 主要从事电子信息技术在农业中的应用研究, E-mail: pac@cau.edu.cn

此衍生出色差、纹理和形状等特征参数作为果实识别的依据,但由于摄像机本身受环境光影响显著,且缺乏对空间分布情况的感知,不可避免地降低识别的准确率。文献[7~9]中采用的激光技术凭借对光照变化的强抗干扰性,易于解析扫描范围内物体的几何特性及相互间的层次关系,担当识别目标的重任,不足之处在于实现三维扫描速度慢,且缺乏颜色信息。文献[10]使用了热成像摄像机,通过图像中柑橘与枝叶的高对比度来检测果实,但目标物的热辐射依靠日光下的曝光时间,因此其反差效果具有一定的时间局限性。

目前机器视觉研究中最具潜力的是主动发射调制不相干光,并利用飞行时间法测量距离的光学混合探测(Photo mixing detector, PMD)技术<sup>[11]</sup>。采用该技术的摄像机最突出的优势是可全天候地以“高帧速”捕获场景的深度图像,利用距离信息方便地分离前景与背景,同时提供了多种图像以供目标识别。已取得的成果包括导航机器人的地图创建<sup>[12]</sup>、检测车位空间以协助停车<sup>[13]</sup>、人脸识别<sup>[14]</sup>等,而应用到果园这一复杂环境下的目标识别未见报道。另外由于摄像机捕获图像的分辨率较低、噪声较大,建议与其他传感器结合使用<sup>[15-17]</sup>。

图像融合就是综合利用各种成像传感器得到的同一目标或同一场景图像的冗余信息和互补信息,以获得更为全面准确的图像描述,其中图像配准是至关重要的一步<sup>[18]</sup>。本文围绕以上思路,将苹果园环境作为研究对象,利用深度摄像机与RGB摄像机组合获取多源图像,展开图像配准方法的研究,以期提高后期果实识别的准确性。

## 1 图像采集设备

深度摄像机选用德国PMD Technologies®公司的PMD® Camcube 3.0,如图1所示。其标准测量范围0.3~7.0 m,视角为 $40^\circ \times 40^\circ$ ,图像分辨率为200像素 $\times$ 200像素,对应帧速率为40 F/s。自带光源的发射波长为870 nm,在此波段,植物各部分的

反射率比可见光区的更高,而且果实的反射率明显高于叶子及树枝,可有效提高目标数据的可靠性。由于集成了抑制背景光技术(Suppression of background illumination, SBI),使其适用于户外环境。该摄像机内部包含2种感光元件:一种是传统图像传感器CMOS,用以获取场景的灰度图像;另一种采用了“智能像素阵列”,其特点是每个像素均能测量光源发射的调制红外光返回所用的时间和衰减幅值,结合光速,即可得知摄像机到被测物体的距离,并最终与深度图像与幅度图像呈现效果;由于环境光与调制光束通过同一个透镜镜头,保证了以上3种图像具有相同的视场和光照强度,无需额外处理就能将它们配准。选用Logitech C270摄像机采集彩色信息。其捕获画面的最大帧速率为30 F/s,视角为 $60^\circ$ ,并支持320像素 $\times$ 240像素的分辨率,可满足与深度摄像机低分辨率图像配准的要求。将2个摄像机以上下组合方式固定于机架,调整镜头使它们指向同样的目标。图2为采集果园场景的多源图像效果。

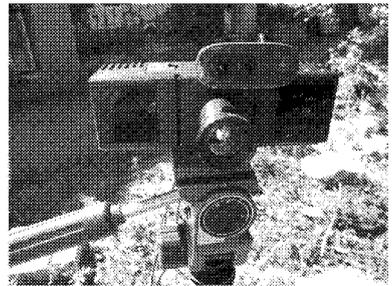


图1 图像采集设备

Fig. 1 Image-acquirement device

## 2 配准算法

配准的实质是利用图像中公有的景物,通过比较和匹配,找出图像之间的相对位置关系<sup>[19]</sup>。常用的方法有基于特征、基于灰度和基于变换域3类。由于文中两种摄像机的成像机理不同,对应的光谱灵敏度、分辨率和灰度均有所差异,附加考虑到降低计算复杂度,抑制对旋转、尺度变换及遮掩等的敏感

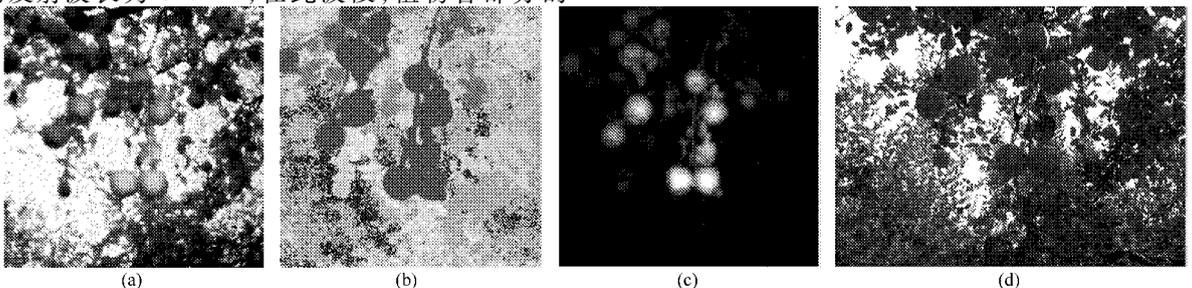


图2 果园场景中采集的多源图像

Fig. 2 Multi-source images acquired under orchard scene

(a) 灰度图像 (b) 深度图像 (c) 幅度图像 (d) 彩色图像

性,本文重点研究基于特征的图像配准算法。

## 2.1 待配准图像的分析

由第1节可知,通过设定距离阈值可将深度图像中的前景从背景中分离出来;也可用于区分在二维图像中显示为粘连,但实际空间里前后部分重叠的目标。幅度图像中蕴含着红外信号返回时的幅度衰减信息,其量值大小与光的飞行距离、目标表面的反射率等有关。从图2c可知,表层果实因离摄像机镜头较近,且表面光滑性优于枝叶,在图像中具有鲜明的对比度;而离镜头较远的部分,因信号衰减严重而不显示内容,使背景得到了良好的简化。另外,

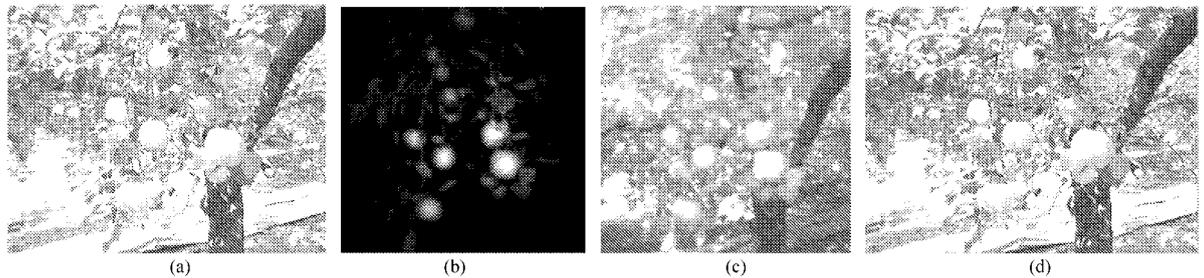


图3 较强光照情况下采集的果树图像

Fig. 3 Fruit tree image acquired under light conditions

(a) 彩色图像 (b) 幅度图像 (c) 灰度图像 (d) 彩色图像转换的灰度图像

## 2.2 图像特征的提取方法

点特征是图像配准中常用到的图像特征之一。提取方法有经典的 Harris 检测法,它对噪声影响和视角变换不敏感,但图像尺度发生变化时,很难确定图像间的对应关系<sup>[20]</sup>;SIFT (Scale invariant feature transform) 算法提取的特征能够对旋转、尺度缩放、亮度变化等保持不变,且适用于稍有透视形变的场合,但计算数据量大、时间复杂度高、耗时长<sup>[21]</sup>;SURF (Speeded up robust feature) 算法在继承上述优点的基础上,较大地提升执行效率<sup>[22]</sup>,更适用于非结构环境下的实时信息感知,本文借鉴该方法提取特征点。

为了提高检测特征点的整体性能,处理过程均基于积分图像进行,其优点在于避免重复性求和运算,且计算时间独立于求和区间大小。如文献[23]中所述,采用了一种  $9 \times 9$  的方框滤波器(类似于尺度参数为 1.2 的高斯核函数)对图像卷积,得到整幅图像各个点的近似 Hessian 矩阵为

$$\mathbf{H}'(X, \sigma) = \begin{bmatrix} D_{xx}(X, \sigma) & D_{xy}(X, \sigma) \\ D_{xy}(X, \sigma) & D_{yy}(X, \sigma) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $X$ ——积分图像的像素点

$D_{xx}(X, \sigma)$ ——采用  $x$  方向滤波器对图像卷积结果

$D_{xy}(X, \sigma)$ ——采用  $xy$  方向滤波器对图像卷积结果

分析图3a和3b可知,即便在光照强度较大的环境下拍摄,果实在图像中仍能表现出显著的特征,这点得利于 SBI 技术。虽然以上两种图像存在多方面优点,却与彩色图像的形成机理和像素含义存在不同,这会给配准过程中的特征提取带来很大的偏差。彩色图像转换为灰度图像后,内容更接近 PMD 摄像机采集的灰度图像,如图3c和3d所示;又因 PMD 摄像机采集的多源图像是事先配准好的,只要其一实现与彩色图像的配准,即可完成所有图像的配准,但过程中需对图像进行必要的预处理。

$D_{yy}(X, \sigma)$ ——采用  $y$  方向滤波器对图像卷积结果

$\sigma$ ——尺度值

相应行列式为

$$\det(\mathbf{H}'(X, \sigma)) = D_{xx}(X, \sigma)D_{yy}(X, \sigma) - (\omega D_{xy}(X, \sigma))^2 \quad (2)$$

通过计算式(2)的值生成代表全部点的响应图,式中  $\omega$  为调节参数,通常取 0.9;在卷积操作中通过调整滤波器的大小,以获得多尺度空间的响应图序列,各尺度的计算式为

$$\sigma = 1.2N/9 \quad (3)$$

式中  $N$ ——滤波器的行数(或列数)

在  $3 \times 3 \times 3$  的立体邻域内利用非极大值抑制法找到响应的局部极值,并将对应点列为候选特征;通过插值运算以精确定位特征点的位置和尺度。

为了增加对特征点描述的信息量和独特性,采用基于邻域分布的统计法来完成。其过程包括确定特征点主方向和构建描述向量两部分,前者主要用于保证提取特征的旋转不变性,后者则用于高概率的特征匹配。在以特征点为中心的圆形邻域中,利用 Haar 小波卷积同尺度下的积分图像,以得到水平与垂直方向的响应,利用高斯函数对其进行加权,采用角度为  $\pi/3$  的扇形窗口,以特定步长沿逆时针方向旋转,累积窗口内的响应以得到一个局部矢量,选择幅值最大矢量的方向为该特征点主方向;再以特

征点为中心建立一个正方形邻域,将其坐标轴旋转到主方向,并将其划分成4个子区域;分别进行如上的卷积与加权操作,统计各子区域的响应及响应的绝对值的和,以形成尺度不变特征的多维描述向量;通过归一化处理后,可使其对光照有一定的鲁棒性。

### 2.3 特征点的匹配方法

待配准图像中对应的特征点相互称为同名点,特征点的匹配是通过一定的算法识别同名点的过程,本文选用欧氏距离作为判断特征点相似性的测度。

为了避免点之间多对一、一对多或伪同名点的误匹配,采用特征向量的最近邻与次近邻比值法进行初匹配,其上限阈值设为0.7;过程中使用基于KD-Tree特征结构的BBF(Best bin first)算法<sup>[24]</sup>加快对最近邻的搜索,以提高匹配速度。

经上述操作仍会存在不同程度的误匹配,需对结果进一步提纯。文中选用剔除异常点与优化模型交替迭代的方法——RANSAC(Random sample consensus)<sup>[25]</sup>实现。主要步骤为:

(1) 初始化最大迭代次数  $I_{\max}$ 、模型的容错度  $T_{\text{ol}}$  和一致点数量的下限  $N_{\text{lim}}$ 。

(2) 从匹配特征点集中随机抽取非线性的若干对,用来推导坐标转换的参数,以建立初始模型。

(3) 逐一验证剩余点对是否满足当前的转换模型,将未超出容错范围的点作为支持该模型的一致点,并记录其数量  $N_{\text{con}}(I)$ 。

(4) 若  $N_{\text{con}}(I) \geq N_{\text{lim}}$ ,重新估计转换参数,并通过最小二乘法对其优化。

(5) 重复步骤(2)、(3)、(4),直到循环次数  $I = I_{\max}$  停止。选取  $N_{\text{con}}(I)$  最多的一组(若存在等数量情况,则优选标准差最小的),相应的转换模型为最佳结果,非一致点作为异常点予以剔除。

由于两个摄像机的视野范围存在差异,表现在图中为同名点的相对位置关系符合平移、旋转等规律,因此建立的数学模型具备仿射变换特性。

综上所述,采用的配准算法流程图如图4所示。

## 3 试验与结果分析

使用文中的摄像机组在北京市昌平区香堂村果园采集多幅富士苹果树图像。试验所用PC机配置为主频3.2 GHz,内存1.96 GB,操作系统为Microsoft Windows XP;使用摄像机自带的Logitech Webcam和Lightvis软件捕获画面,存储格式分别是JPG与BMP;Matlab R2010b用于图像处理和多样数据读取。

### 3.1 不同场景的图像配准试验

为了验证文中算法的稳健性,进行了不同场景

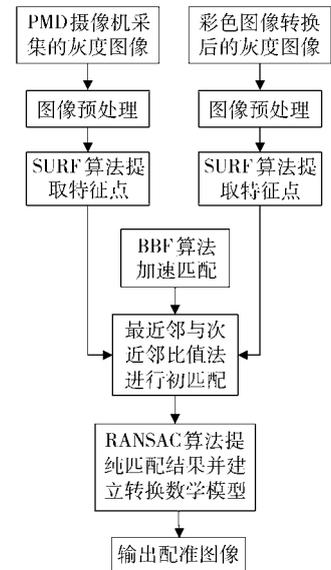


图4 本文配准算法的流程图

Fig. 4 Flow chart of registration algorithm

图像的配准试验。拍摄角度和内容特点包括:逆光,果实与背景颜色区别较大;逆光,果实与背景颜色接近;顺光,由于产生较强的眩光,使目标与部分背景颜色差异不大。以下对其中3幅场景图像的配准过程作进一步说明。

将同一场景连续捕获的10幅灰度图像取均值作为待配准图像,以降低噪声的干扰;同时采用双线性插值策略对其进行放大,并利用直方图均衡法来增强对比度,以提高特征点检测的鲁棒性;选择彩色图像为基准图像,由于RGB摄像机的观察范围较大,需要对彩色图像进行剪裁,并最大限度地保留其与灰度图像间的重叠区域。处理后的图像分辨率均为240像素×240像素。

采用SURF算法提取的特征点如图5a、图6a和图7a所示,经过初始匹配后的同名点在图5b、图6b和图7b中用线相连,其中存在一些误配的点对,若直接用这些点对估计仿射变换参数,必然得不到理想的配准结果。采用RANSAC算法对匹配的点对进行提纯,结果如图5c、图6c和图7c所示,错误匹配对被有效剔除,通过建立的最佳变换模型得到配准结果如图5d、图6d和图7d所示。利用加权平均的方法融合幅度图像与彩色图像,由图5e、图6e和图7e可知,因为叠加了衰减信息和颜色信息,凸显出了目标区域,这为下一步果实识别提供了更加丰富的线索。

### 3.2 不同配准算法的对比试验

为了验证文中算法的实时性与准确性,逐一融合Harris、SIFT和SURF算法完成图像配准。试验中用白色PVC管特制了边长为0.5 m的正方形框以限定一个感兴趣区域(ROI),将其置于果树前,如

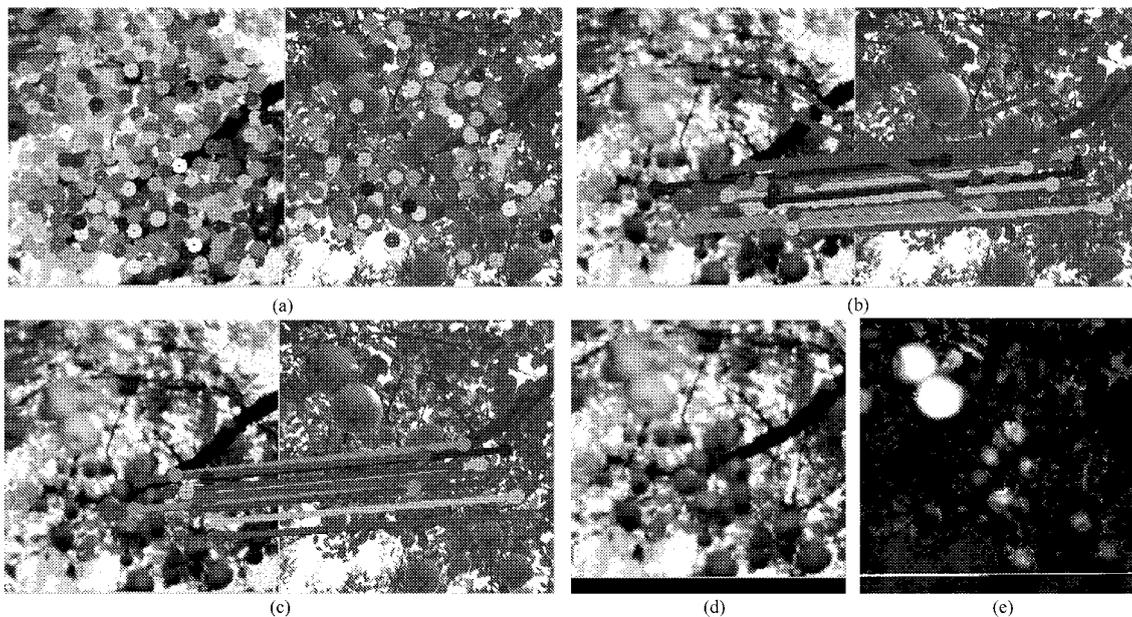


图 5 场景 1 图像的配准过程效果图

Fig. 5 Registration process based on first scene image

(a) 特征点提取效果图 (b) 初匹配的同名点对连线图 (c) 提纯后的匹配点对连线图 (d) 配准图像 (e) 加权平均后的融合图像

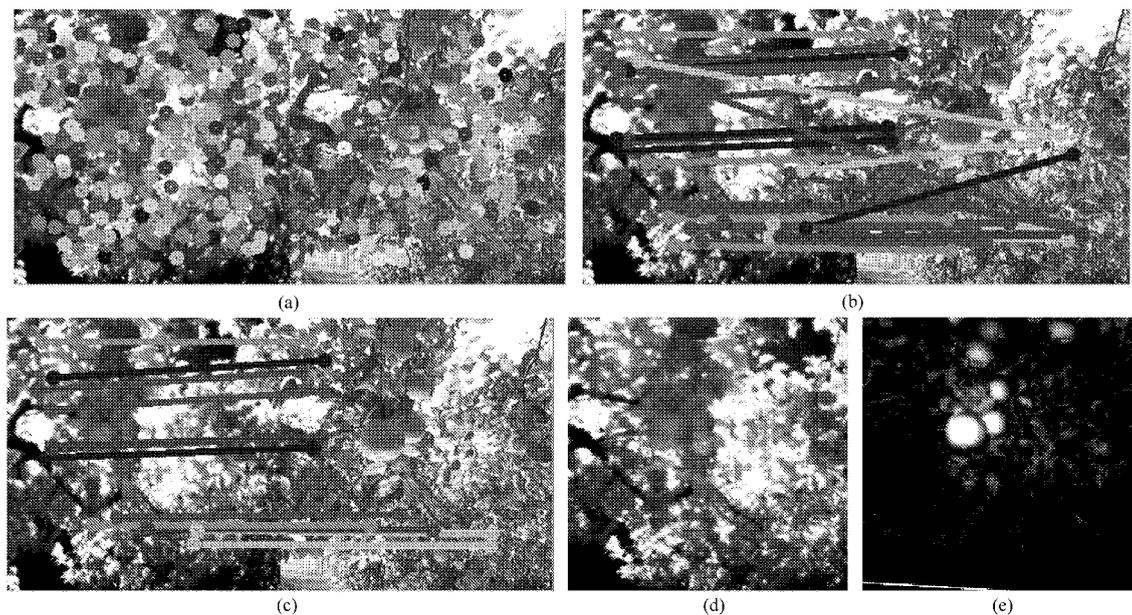


图 6 场景 2 图像的配准过程效果图

Fig. 6 Registration process based on second scene image

(a) 特征点提取效果图 (b) 初匹配的同名点对连线图 (c) 提纯后的匹配点对连线图 (d) 配准图像 (e) 加权平均后的融合图像

图 8 所示。对类似场景采集的图像经过预处理操作后,调用 Matlab 内部函数 cpselect,启动相应的 GUI 界面,于两幅图像的重叠部分手动提取 4 对拐角点作为特征点。这样既达到了仿射变换的最少控制点对要求,也可保证特征点均匀分布,提高匹配精度。由此得的配准图像作为标准图像模板,与其他方法配准的结果进行对比,见图 9。配准效果的客观评价指标包括:均方误差 (Mean squared error, MSE)  $M_{SE}$ 、归一化互信息 (Normalized mutual information, NMI)  $N_{MI}$ 、相关系数 (Correlation coefficient, COEF)

$C_{EF}$ , 计算式分别为

$$M_{SE} = \frac{1}{N} \sum_{(r,c)} (R(r,c) - S(r,c))^2 \quad (4)$$

$$N_{MI} = \frac{H(R(r,c)) + H(S(r,c)) - H(R(r,c), S(r,c))}{\max(H(R(r,c)), H(S(r,c)))} \quad (5)$$

$$C_{EF} = \frac{\sum_{(r,c)} (R(r,c) - \bar{R})(S(r,c) - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{(r,c)} (R(r,c) - \bar{R})^2 \sum_{(r,c)} (S(r,c) - \bar{S})^2}} \quad (6)$$

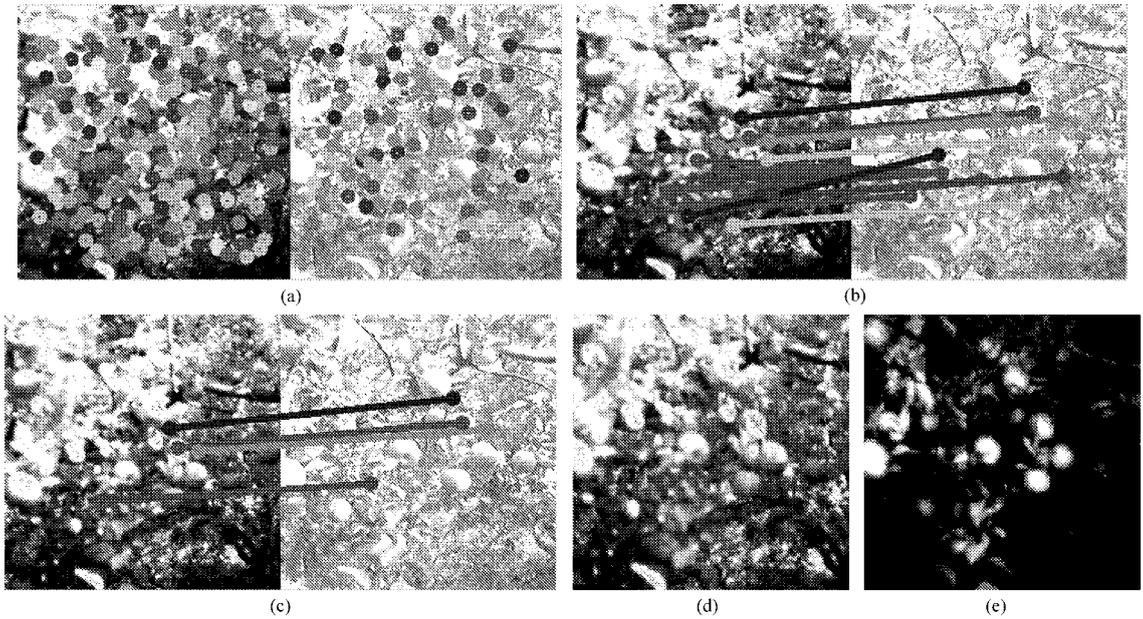


图7 场景3图像的配准过程效果图

Fig. 7 Registration process based on third scene image

(a) 特征点提取效果图 (b) 初匹配的同名点对连线图 (c) 提纯后的匹配点对连线图 (d) 配准图像 (e) 加权平均后的融合图像

式中  $N$ ——图像的像素总数

$S(r,c)$ ——标准图像的灰度

$R(r,c)$ ——配准图像的灰度

$H(S(r,c))$ ——标准图像的信息熵

$H(R(r,c))$ ——配准图像的信息熵

$H(R(r,c), S(r,c))$ ——两幅图像的联合信息熵

$\bar{S}$ ——标准图像的灰度均值

$r$ ——图像行序号  $c$ ——图像列序号

$\bar{R}$ ——配准图像的灰度均值

其中 MSE 越小, NMI 越大, COEF 越接近 1 说明配准

效果越好。各种算法的平均运行时间与评价指标数值如表 1 所示。

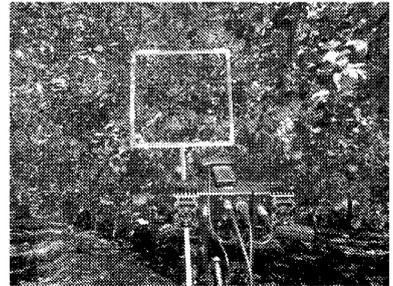


图8 采集 ROI 图像的试验现场

Fig. 8 Testing spot for acquiring ROI images

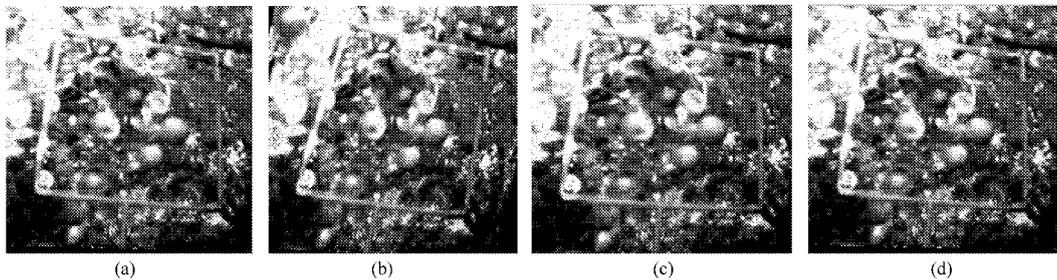


图9 不同算法的配准图像

Fig. 9 Registration images based on different algorithms

(a) 手动配准图像 (b) 基于 Harris 算法的配准图像 (c) 基于 SIFT 算法的配准图像 (d) 基于 SURF 算法的配准图像

表1 不同算法的配准效果对比

Tab. 1 Registration effect comparison based on different algorithms

算法	运行时间/s	MSE	NMI	COEF
Harris	2.551 2	0.091 3	0.363 9	0.533 2
SIFT	5.723 8	0.012 9	0.707 1	0.833 2
SURF	1.030 5	0.006 2	0.832 4	0.969 1

## 4 结束语

使用基于 PMD 技术的深度摄像机捕获果园非结构化环境的图像,包含的重要信息量不受光线变化和果实表面颜色的影响;将 RGB 摄像机与深度摄像机组合使用,采集的多源图像经预处理后进行配准,可使颜色、深度及幅度等信息相互融合、弥补不

足,以得到表征果实区域的最大特征量;采用的配准算法在鲁棒性、实时性、精度方面均能满足果园试验的要求,可为采摘机器人的果实识别研究提供一种新途径。

## 参 考 文 献

- 1 Li P L, Lee S H, Hsu H Y. Review on fruit harvesting method for potential use of automatic fruit harvesting systems [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 23: 351 ~ 366.
- 2 司永胜, 乔军, 刘刚, 等. 苹果采摘机器人果实识别与定位方法 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41 (9): 148 ~ 153.  
Si Yongsheng, Qiao Jun, Liu Gang, et al. Recognition and location of fruits for apple harvesting robot [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41 (9): 148 ~ 153. (in Chinese)
- 3 熊俊涛, 邹湘军, 陈丽娟, 等. 基于机器视觉的自然环境中成熟荔枝识别 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42 (9): 162 ~ 166.  
Xiong Juntao, Zou Xiangjun, Chen Lijuan, et al. Recognition of mature litchi in natural environment based on machine vision [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42 (9): 162 ~ 166. (in Chinese)
- 4 Patel H N, Jain R K, Joshi M V. Fruit detection using improved multiple features based algorithm [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2011, 13 (2): 1 ~ 5.
- 5 Li P L, Lee S H, Hsu H Y. Study on citrus fruit image data separability by segmentation methods [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 23: 408 ~ 416.
- 6 Linker R, Cohen Q, Naor A. Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 81: 45 ~ 57.
- 7 Xu Y H, Zhang C W, Xu H Q. A new obstacle avoidance method for mobile robot based on laser range finder [J]. *Robot*, 2010, 32 (2): 179 ~ 183.
- 8 Lee K H, Ehsani R, Castle W S. A laser scanning system for estimating wind velocity reduction through tree windbreaks [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 73: 1 ~ 6.
- 9 Ahamed T, Kulmutiwat S, Thanpattranon P, et al. Monitoring of plant growth using laser range finder [C] // 2011 ASABE Annual International Meeting, 2011.
- 10 Bulanon D M, Burks T F, Alchanatis V. Image fusion of visible and thermal images for fruit detection [J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 103 (1): 12 ~ 22.
- 11 Lindner M, Kolb A. Lateral and depth calibration of PMD-distance sensors [C] // ISVC'06: Proceedings of the Second International Conference on Advances in Visual Computing, 2006, 2: 524 ~ 533.
- 12 Wiedemann M, Sauer M, Driewer F, et al. Analysis and characterization of the PMD camera for application in mobile robotics [C] // Proceedings of the 17th World Congress, the International Federation of Automatic Control, 2008: 13 689 ~ 13 694.
- 13 Scheunert U, Fardi B, Mattern N, et al. Free space determination for parking slots using a 3D PMD sensor [C] // Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2007: 154 ~ 159.
- 14 Kim J, Park S, Kim S, et al. Registration method between tof and color cameras for face recognition [C] // 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011: 1 977 ~ 1 980.
- 15 Schulze M. An approach for the calibration of a combined RGB-sensor and 3D camera device [C] // Proceedings of SPIE 8085, Videometrics, Range Imaging and Applications XI, 2011.
- 16 Crabb R, Tracey C, Puranik A, et al. Real-time foreground segmentation via range and color imaging [C] // 2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1 ~ 5.
- 17 Huhle B, Fleck S, Schilling A. Integrating 3D time-of-flight camera data and high resolution images for 3DTV applications [C] // 2007 3DTV Conference, 2007: 1 ~ 4.
- 18 李明喜, 毛罕平, 张艳诚. 基于提升小波和分形的苹果树多源图像融合算法 [J]. *农业机械学报*, 2007, 38 (10): 91 ~ 93, 121.  
Li Mingxi, Mao Hanping, Zhang Yancheng. Fusion algorithm for multi-sensor images based on lifting wavelet transform and fractal theory [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38 (10): 91 ~ 93, 121. (in Chinese)
- 19 敬忠良, 肖刚, 李振华. 图像融合理论与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- 20 王君本, 卢选民, 贺兆. 一种基于快速鲁棒特征的图像匹配算法 [J]. *计算机工程与科学*, 2011, 33 (2): 112 ~ 117.
- 21 尹春霞, 徐德, 李成荣, 等. 基于显著图的 SIFT 特征检测与匹配 [J]. *计算机工程*, 2012, 38 (16): 189 ~ 191, 195.
- 22 李小昌, 朱丹. 采用尺度不变特征和区域选择的图像配准方法 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41 (2): 537 ~ 542.  
Li Xiaochang, Zhu Dan. Image registration method based on region selection and scale-invariant feature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (2): 537 ~ 542. (in Chinese)
- 23 Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded up robust features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110 (3): 346 ~ 359.
- 24 纪华, 吴元昊, 孙宏伟, 等. 结合全局信息的 SIFT 特征匹配算法 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17 (2): 439 ~ 444.  
Ji Hua, Wu Yuanhao, Sun Honghai, et al. SIFT feature matching algorithm with global information [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17 (2): 439 ~ 444. (in Chinese)
- 25 李寒, 王库, 刘韶军. 基于灰度冗余和 SURF 算法的电气设备红外和可见光图像配准 [J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39 (11): 111 ~ 115, 123.  
Li Han, Wang Ku, Liu Shaojun. Registration method between infrared and visible images of electrical equipment based on gray-scale redundancy and SURF [J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39 (11): 111 ~ 115, 123. (in Chinese)