

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.006

基于 RGB - D 相机的果树三维重构与果实识别定位^{*}

麦春艳 郑立华 孙红 杨玮

(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)

摘要: 为实现对果园果实机器人采摘提供科学可靠的技术指导,提出了一种基于 RGB - D 相机的苹果果树三维重构以及进行果实立体识别与定位的方法。使用 RGB - D 相机快速获取自然光照条件下果树的彩色图像和深度图像,通过融合果树图像彩色信息和深度信息实现了果树的三维重构;对果树的三维点云进行 $R - G$ 的色差阈值分割和滤波去噪处理,获得果实区域的点云信息;基于随机采样一致性的点云分割方法对果实点云进行三维球体形状提取,得到每个果实质心的三维空间位置信息和果实半径。实验结果表明,提出的果树三维重构和果实立体识别与定位方法具有较强的实时性和鲁棒性,在 0.8 ~ 2.0 m 测量范围内,顺光和逆光环境中果实正确识别率分别达 95.5% 和 88.5%;在果实拍摄面的点云区域被遮挡面积超过 50% 的情况下正确识别率达 87.4%;果实平均深度定位偏差为 8.1 mm;果实平均半径偏差为 4.5 mm。

关键词: 苹果采摘机器人 RGB - D 相机 三维重建 识别 定位 点云分割

中图分类号: TP391.41; S216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0035-06

Research on 3D Reconstruction of Fruit Tree and Fruit Recognition and Location Method Based on RGB - D Camera

Mai Chunyan Zheng Lihua Sun Hong Yang Wei

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

Abstract: In order to provide a scientific and reliable technical guidance for fruit harvesting robot in orchard, a method was proposed in this paper to reconstruct 3D image for apple tree and carry out recognition and location for each apple fruit. Firstly, the color image and depth image of the fruit trees were taken by an RGB - D camera, and the 3D reconstruction of each fruit tree was carried out by fusing its color and depth information. Then, 3D point cloud of the fruit region were segmented from tree's point cloud by applying the color threshold of $R - G$. Finally, the 3D shape of each fruit point cloud was extracted and its 3D spatial position information and radius were also obtained by using iteratively the RANSAC (Random sample consensus) algorithm to fit each fruit to a pre-defined apple model. The experimental results showed that the proposed method of 3D reconstruction of apple tree and recognition and location of its fruits had good real-time performance and strong robustness. In the measurement range of 0.8 ~ 2.0 m, the correct recognition rates of fruits under frontlighting and backlighting conditions were 95.5% and 88.5% respectively, and the correct recognition rate was 87.4% in the case that the sheltered area of fruit point clouds was over 50%, besides, the average position calculation error of the fruit was 8.1 mm, and the average radius calculation error was 4.5 mm.

Key words: Apple harvesting robot RGB - D camera 3D reconstruction Recognition Location Segmentation of point cloud

收稿日期: 2015 - 10 - 28 修回日期: 2015 - 11 - 12
^{*}北京市科委计划资助项目(D151100004215002)
作者简介: 麦春艳, 硕士生, 主要从事农业图像处理与应用研究, E-mail: 916205854@qq.com
通讯作者: 郑立华, 副教授, 博士生导师, 主要从事农业信息化研究, E-mail: zhenglh@cau.edu.cn

引言

果蔬采摘机器人是现代农业自动化程度的重要体现^[1-2]。快速准确地对成熟果蔬进行识别和定位是当前国内外研究的热点和难点。国内外学者尝试了基于机器视觉和图像处理技术对柑橘^[3-5]、猕猴桃^[6-7]、芒果^[8]、苹果^[9-12]等果园果实进行识别和定位的方法研究。以上研究均是在二维图像中识别果实后果实形心进行单点三维定位,使用该类方法不能准确反映现实作业环境中果实真实的大小、形状以及其与周围其他对象之间的相对位置关系,往往耗时较长且识别效果不佳,同时也不利于果蔬采摘机器人在复杂空间中快速规划准确的采摘路径以进行避障和实现下一步采摘动作。

利用三维重建技术构建准确的果树三维空间形态模型,不仅对于科学指导果园果树智能化管理具有重要意义,对于果蔬采摘机器人规划蔽障动作也至关重要。而在果蔬三维重建基础上进行果蔬准确识别和定位,则能够提高系统整体处理速度,避免了先进行二维识别再进行三维重建的重复计算工作,同时也为果蔬采摘机器人准确确定下一系列采摘动作提供了基础空间数据。目前果蔬三维重建多采用立体视觉技术^[13-15]、激光扫描技术^[16-17]或三维数字化仪技术^[18-19]来实现。这些方法存在着易受光照影响、设备价格高昂或信息获取速度较慢等问题。Nguyen 等^[20]尝试对果树进行三维重构并使用欧氏聚类分割的点云处理技术对苹果果树进行三维空间中的果实识别,但所提方法必须在人工照明的黑色塑料棚中进行。冯娟等^[21]提出了一种基于激光扫描的三维图像的苹果识别算法,利用轮廓跟踪技术和随机圆环法获得果实形状特征完成对苹果的识别,但它只针对果树上单个苹果进行了识别。为了给果园机器人果实采摘提供科学可靠的技术指导,本文以果园成熟期红富士苹果为研究对象,提出一种基于 RGB-D 相机的苹果果树三维重建以及在三维空间中进行果实颜色分割和三维立体形状提取的识别和定位方法。

1 材料和方法

1.1 实验设备和信息采集

Kinect 是 RGB-D 相机,如图 1 所示,它能够快速获得目标物的彩色图像和深度图像^[22]。第 2 代 Kinect 采用了飞行时间(Time of flight, ToF)主动光源技术,能够在自然环境下使用而不受光照变化的影响。第 2 代 Kinect 具有出色的深度信息采集能力,能够快速获取目标场景的 RGB-D 信息以及操

作简单且价格低廉等优点,目前广泛应用于目标场景的三维重建^[23-24]。另外,基于国内外调查^[25-26]和实测数据发现,在 0.8 ~ 2.0 m 的测量范围内, Kinect 的空间定位精度可达 4 mm,此精度能够满足果蔬机器人采摘的应用需求,同时 0.8 ~ 2.0 m 的测距范围也与果蔬采摘机器人机械臂的臂长相匹配。



图 1 Kinect 相机
Fig. 1 Kinect camera

实验地点位于北京市昌平区香堂村苹果园,果树品种为红富士。在苹果成熟采摘期(2015 年 9 月 20 日)使用 Kinect 相机拍摄在自然光照条件下的果树,总共获得 70 幅果树彩色图像(1 920 像素×1 080 像素)及其对应深度图像(512 像素×424 像素),其中顺光图像 38 幅,逆光图像 32 幅,果实拍摄面被枝叶遮挡面积大于 50% 的图像共计 30 幅。

1.2 果树三维重构

融合 Kinect 拍摄的果树彩色图像和深度图像信息可以快速得到果树在 Kinect 相机空间中的三维点云信息,实现果树的三维重构。建立 Kinect 相机空间坐标系,其示意图如图 2 所示。

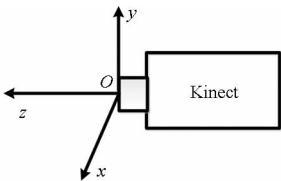


图 2 Kinect 相机坐标系
Fig. 2 Kinect camera coordinate system

利用微软公司提供的软件开发工具包 Kinect for Windows SDK 2.0 以及应用程序编程接口 API 可以获得彩色图像像素坐标系、深度图像像素坐标系和相机坐标系之间的坐标映射关系。根据三者间的坐标映射关系进行计算可得目标场景在相机空间坐标系中的 xyz 坐标信息,同时也能得到其 RGB 颜色信息,即获得具有真实颜色信息的目标场景的三维点云数据,进而完成果树的三维重构。果树三维重构的流程如图 3 所示。

1.3 基于颜色阈值的果树三维点云分割

为实现果实准确的立体识别和定位,首先需要对果实进行背景分割。颜色特征是区分果实和背景的重要属性,基于颜色阈值的分割方法是一种使用较为广泛的图像分割方法^[27]。本文选择 R-G 的色差特征阈值分割方法,对果树三维点云进行背景分

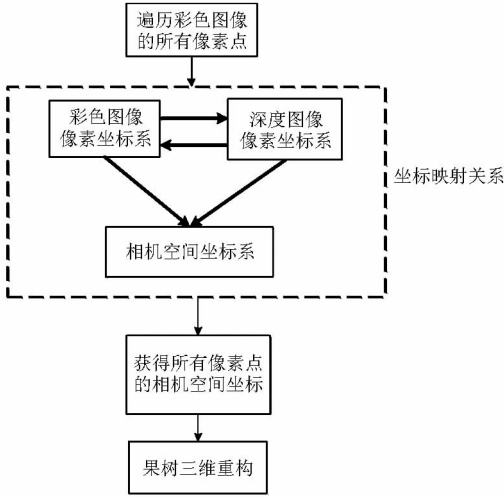


图3 果树三维重构流程图

Fig. 3 Flow chart of reconstruction of fruit tree

离。

$$\begin{cases} R_s - G_s > \sigma & (\text{果实区域}) \\ R_s - G_s \leq \sigma & (\text{背景区域}) \end{cases} \quad (1)$$

当点云 s 的 R 、 G 、 B 信息中的 $R_s - G_s$ 大于阈值 σ (本文 $\sigma = 13$) 时该点被识别为果实点云数据, 否则被识别为背景点云数据。通过颜色阈值分割后只保留果实点云数据, 去除背景点云数据, 可为后续果实的三维识别奠定基础。

1.4 果实三维点云滤波去噪

经过颜色阈值分割后得到的果实区域点云数据中往往存在着一些偏离主体目标物较远的离群噪声点, 本文采用离群滤波的方法滤除这些噪声点。对于果实点云数据 (点云数量为 n), 计算每个点云 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 到它所有空间临近点 $p_j(x_j, y_j, z_j)$ ($j = 1, 2, \dots, k$) 的平均距离 d_i 并计算全局距离平均值 μ 和标准差 σ

$$\begin{cases} d_i = \sum_{j=1}^k \frac{1}{k} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \\ \mu = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{n} \\ \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \mu)^2} \end{cases} \quad (2)$$

距离 d_i 在 $\mu \pm \alpha\sigma$ 之外的点被定义为离群点, 将其从点云集中滤除^[28], 其中参数 α 取决于搜索临近点个数 k 的大小, 本文将 k 设定为 90, α 设定为 1.0。滤波去噪的算法流程如图 4 所示。

1.5 果实的三维形状提取算法

由于果实个体之间的差异性, 每个果实的形状各不相同, 但总体上苹果果实表面的三维形状近似于球面。为了对苹果果实进行有效的三维形状提取

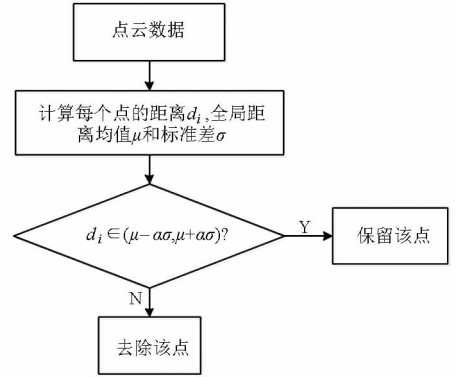


图4 滤波去噪算法流程图

Fig. 4 Flow chart of filtering algorithm

并进行果实定位, 本文采用随机采样一致性 (Random sample consensus, RANSAC) 的点云球面分割算法对果实三维形状进行提取。RANSAC 算法由 Fishier 和 Bolles 提出, 通过随机取样剔除局外点的影响, 构建一个仅有局内点数据组成的基本子集^[29]。RANSAC 具有较高的鲁棒性和效率, 广泛应用于矩阵估计、特征匹配和三维模型处理等计算机视觉领域^[30-32]。定义待提取的三维形状模型

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (3)$$

其中点 (x_0, y_0, z_0) 表示在空间直角坐标系 $Oxyz$ 中的球心位置, r 表示球面的半径。由于每个苹果的半径各不相同, 因此设定待提取的球面模型的半径 r 的取值范围为 2.5 ~ 5.0 cm。以经过颜色分割和滤波去噪得到的果实区域点云数据为输入, 通过多次迭代 RANSAC 算法对输入点云进行球面分割, 每次迭代后将已分割的点云从输入点云集中剔除, 直到剩余点云数量小于给定阈值或无法提取出给定模型为止。对果实点云进行三维形状提取的算法流程如图 5 所示。

2 结果和讨论

2.1 果树图像采集和三维重建

使用 Kinect RGB-D 相机对自然光照条件下的果树进行拍摄, 得到果树的彩色图像和其对应的深度图像, 如图 6 所示。对彩色图像和深度图像进行信息融合, 实现果树的三维重构 (其中深度范围为 0.8 ~ 2.0 m), 图 7 显示了图 6 中果树的三维重构结果, 得到具有真实颜色信息的果树三维形态结构。

2.2 果实区域点云颜色分割和滤波去噪

获得果树的三维点云数据后, 使用 $R - G$ 的颜色阈值分割方法, 对果实和背景进行点云分割。图 8 显示了图 7 中果树点云的分割结果。可以看出, 经过颜色阈值分割后, 果实和背景被较好地分割开来, 得到果实区域的点云数据。

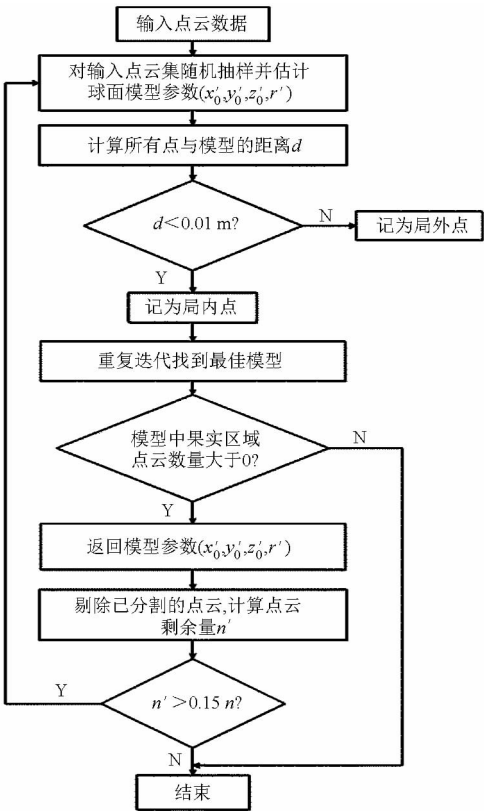


图 5 果实点云三维形状提取算法流程图
Fig.5 Flow chart of 3D shape extraction algorithm of fruits



图 6 Kinect 采集图像
Fig.6 Images acquisition by Kinect
(a) 彩色图像 (b) 深度图像

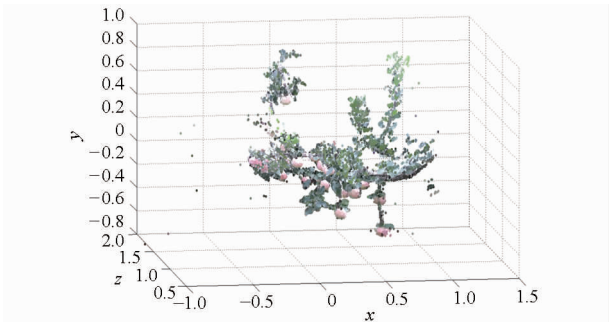


图 7 果树三维点云图像
Fig.7 Point cloud of fruit tree

为提高果实三维形状提取的效率和准确率,对果实区域的点云先进行滤波去噪预处理。图 9 显示了图 8 中果实点云经过离群滤波处理后得到的点云结果。可以看到,经过滤除偏离主体的不稳定噪声点,得到了更为准确有效的果实点云数据。

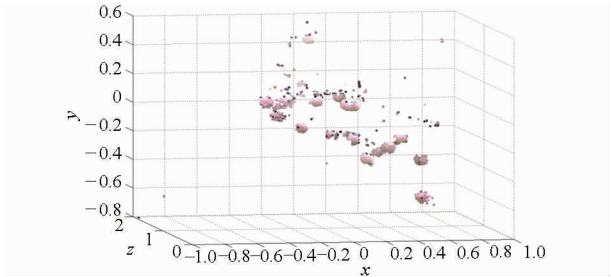


图 8 果实点云颜色分割结果
Fig.8 Color segmentation of fruit point cloud

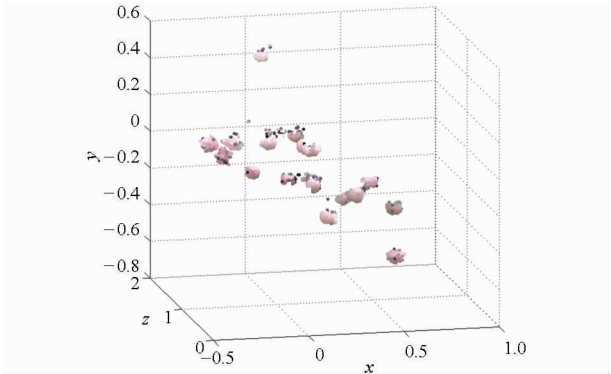


图 9 果实点云滤波去噪结果
Fig.9 Filtering of fruit point cloud

2.3 果实三维形状提取

为得到果实的三维空间位置信息和半径大小,本文以立体球面为果实三维形状提取模型,多次迭代 RANSAC 算法对果实区域点云进行球面模型点云分割,得到每个果实的三维空间坐标和半径。图 10显示了图 9 的果实三维形状提取结果,其中蓝色三维球面为各个果实拟合的三维形状结果,同时还可以根据拟合结果得到每个果实的空间位置和半径大小。可以看出,即使由于单一角度拍摄以及枝叶遮挡导致果实立体空间信息不完整,本文所提出的果实形状提取算法也能利用其不完整信息进行模型拟合,较好地对果实进行立体识别和定位。

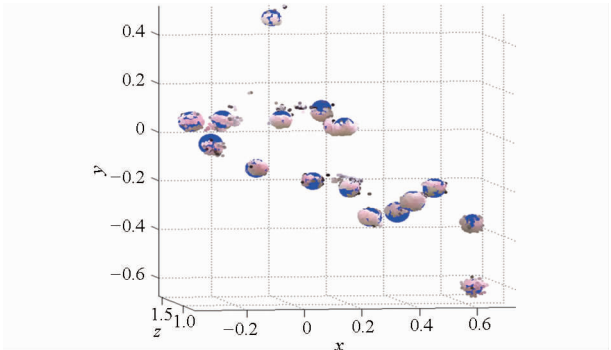


图 10 果实三维形状提取结果
Fig.10 3D shape extraction of fruits

2.4 果实的识别和深度定位误差分析

为进一步量化本文所提出果实识别和定位算法的准确性和稳定性,本文对顺光、逆光以及被遮挡情

况下的果树果实进行了识别,分析不同情况下果实识别结果以及平均深度定位偏差、半径偏差和果实正确识别率,识别结果如表 1 所示。其中,对 Kinect 相机以及苹果进行纵垂投影,在它们的投影面(地面)上使用钢卷尺测得苹果圆心到相机平面的地面投影线的垂直距离,将该距离作为苹果质心到拍摄平面的真实深度距离;利用游标卡尺对被识别苹果进行横向和纵向的径长测量,以测量值均值的一半作为该苹果的真实半径。由表 1 可以看出,在各种情况下,本文所提出的果实立体识别和定位方法都能取得较好的处理效果,果实平均深度定位偏差为 8.1 mm,果实平均半径偏差为 4.5 mm。

表 1 不同情况下的果实识别定位效果
Tab.1 Fruit identification and location results under different conditions

果实区域情况	果树 图像数	平均深度定 位偏差/mm	平均半径 偏差/mm	正确识 别率/%
顺光拍摄	38	8.2	4.1	95.5
逆光拍摄	32	8.8	4.8	88.5
被遮挡面积小于 50%	40	6.4	4.3	92.7
被遮挡面积大于 50%	30	9.1	4.6	87.4

2.5 算法效率分析

通过信息融合的方法对果树进行了快速重建,然后对基于 $R-G$ 的颜色阈值分割和离群滤波方法得到了准确的果实区域点云,最后基于 RANSAC 的三维球面模型点云分割方法,根据每个果实的不完整信息逐一进行球面形状拟合并进行形状提取,得到其空间位置信息和半径。基于图 6 图像信息(图像中有 17 个果实)的果树三维重构、果实识别和定

位等处理过程的总运行时间为 4.35 s。每一个果实的识别和定位时间低于 1 s,能够满足果蔬采摘机器人的实时性要求。

3 结论

(1) 基于 RGB-D 相机和信息融合技术对果树进行三维重建,能够获得自然光照条件下具有真实颜色信息的果树三维形态结构。果树三维形态的构建不仅符合果实采摘机器人的立体视觉特性,还有利于采摘机器人进行有效避障并做出准确高效的采摘动作。

(2) 基于 $R-G$ 的颜色阈值分割方法能有效地对苹果果实和背景点云进行分割,再利用离群滤波的方法对分割得到的果实区域点云数据进行噪声点滤除,可以获得准确的果实点云信息。

(3) 基于 RANSAC 的球面模型点云分割算法可以快速准确地对图像中的果实三维形状进行提取并得到其相应的空间位置信息和半径。同时,对于逆光和被遮挡的情况,该算法也能通过果实区域的不完整信息进行较好的模型拟合和形状提取。

(4) 本文所提出的基于 RGB-D 相机的自然光照条件下的苹果果树三维重建和果实立体识别与定位方法具有较高的稳定性、准确性和实时性,在逆光环境中果实识别率达 88.5%,对果实点云区域被遮挡面积超过 50% 的情况,识别率达 87.4%,果实平均深度定位偏差为 8.1 mm,平均半径偏差为 4.5 mm。结果说明,该方法能够快速构建果树三维结构并进行具有较高精度和效率的果实识别和定位,可以服务于果蔬采摘机器人进行果实采摘。

参 考 文 献

1 Khoshroo A, Arefi A, Khodaei J. Detection of red tomato on plants using image processing techniques [J]. Agricultural Communications, 2014, 2(4): 9-15.

2 Sharma D J, Kaur J. Robotic apple harvesting using computer vision based on shape & colour analysis and object positioning[J]. Digital Signal Processing, 2014, 6(7): 226-233.

3 Moltó E, Pla F, Juste F. Vision systems for the location of citrus fruit in a tree canopy[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1992, 52: 101-110.

4 Palaniappan Annamalai, Won Suk Lee, Burks T F. Color vision system for estimating citrus yield in real-time[C]//2004 ASAE Annual International Meeting, ASAE Paper 043054, 2004.

5 吕强,蔡健荣,赵杰文,等. 自然场景下树上柑橘实时识别技术[J]. 农业机械学报, 2010,41(2): 185-188.

6 Lú Qiang, Cai Jianrong, Zhao Jiwen, et al. Real-time recognition of citrus on trees in natural scene[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2):185-188. (in Chinese)

7 Wijethunga P, Samarasinghe S, Kulasiri D, et al. Digital image analysis based automated kiwifruit counting technique[C]//Image and Vision Computing New Zealand 23rd International Conference, Paper 4762149, 2008.

8 崔永杰,苏帅,王霞霞,等. 基于机器视觉的自然环境中猕猴桃识别与特征提取[J]. 农业机械学报,2013,44(5): 247-252.

9 Cui Yongjie, Su Shuai, Wang Xiaxia, et al. Recognition and feature extraction of kiwi-fruit in natural environment based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 247-252. (in Chinese)

10 Payne A B, Walsh K B, Subedi P P, et al. Estimation of mango crop yield using image analysis segmentation method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 91: 57-64.

11 Payanon D M, Kataoka T. Fruit detection system and an end effector for robotic harvesting of Fuji apples[J]. Agricultural Engineering International CIGR Journal, 2010, 12(1): 203-210.

- 10 Lak M B. Apple fruits recognition under natural luminance using machine vision[J]. Advance Journal of Food Science & Technology, 2010, 2(6): 325 – 327.
- 11 Ji W, Zhao D, Cheng F, et al. Automatic recognition vision system guided for apple harvesting robot[J]. Computers & Electrical Engineering, 2012, 38(5): 1186 – 1195.
- 12 司永胜, 乔军, 刘刚. 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. Recognition and shape features extraction of apples based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 148 – 153. (in Chinese)
- 13 Nielsen M, Slaughter D C, Gliever C. Vision-based 3D peach tree reconstruction for automated blossom thinning[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(1): 188 – 196.
- 14 Adhikari B, Karkee M. 3D reconstruction of apple trees for mechanical pruning[C]//ASAE Annual Meeting, Paper 1111613, 2011.
- 15 蔡健荣, 孙海波, 李永平, 等. 基于双目立体视觉的果树三维信息获取与重构[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 152 – 156.
Cai Jianrong, Sun Haibo, Li Yongping, et al. Fruit trees 3-D information perception and reconstruction based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 152 – 156. (in Chinese)
- 16 Lin Y, Hyypä J. Multiecho-recording mobile laser scanning for enhancing individual tree crown reconstruction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(11): 4323 – 4332.
- 17 高自强, 王忠仁. 3 维激光扫描树干提取与建模研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(7): 67 – 73.
Gao Ziqiang, Wang Zhongren. A study of extraction and modeling of three-dimensional laser scanning of tree trunk[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35(7): 67 – 73. (in Chinese)
- 18 王菲, 张社奇, 李丙智, 等. 高纺锤形苹果树三维重建和光照特性的评价[J]. 北方园艺, 2012(6): 10 – 13.
Wang Fei, Zhang Sheqi, Li Bingzhi, et al. Three-dimensional reconstruction of trees trained to tall spindle shape and assessment of light characteristics[J]. Northern Horticulture, 2012(6): 10 – 13. (in Chinese)
- 19 马晓丹, 孟庆宽, 张丽娇, 等. 图像拼接重建苹果树冠层器官三维形态[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 154 – 162.
Ma Xiaodan, Meng Qingkuan, Zhang Lijiao, et al. Image mosaics reconstruction of canopy organ morphology of apple trees[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(12): 154 – 162. (in Chinese)
- 20 Nguyen T T, Vandevoorde K, Kayacan E, et al. Apple detection algorithm for robotic harvesting using an RGB – D camera [C]//International Conference of Agricultural Engineering, Paper C02290001, 2014.
- 21 冯娟, 刘刚, 司永胜, 等. 基于激光扫描三维图像的树上苹果识别算法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 217 – 222.
Feng Juan, Liu Gang, Si Yongsheng, et al. Apple fruit recognition algorithm based on laser scanning 3-D image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 217 – 222. (in Chinese)
- 22 Catuhe D. Programming with the kinect for windows software development kit[M]//Redmond: Microsoft Press, 2012: 55 – 59.
- 23 Shum H P H, Ho E S L, Jiang Y, et al. Real-time posture reconstruction for microsoft kinect[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(5): 1357 – 1369.
- 24 Lim Y W, Lee H Z, Yang N E, et al. 3-D Reconstruction using the Kinect sensor and its application to a visualization system[C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Paper 6378311, 2012.
- 25 余涛. Kinect 应用开发实战: 用最自然的方式与机器对话[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 20 – 59.
- 26 Gai J, Tang L, Steward B L. Plant recognition through the fusion of 2D and 3D images for robotic weeding[C]//ASABE Annual International Meeting, ASABE Paper 152181371, 2015.
- 27 耿茵茵, 蔡安妮. 自动图像阈值分割算法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(17): 119 – 122.
Geng Yinyin, Cai Anni. An automatic thresholding algorithm for image segmentation[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(17): 119 – 122. (in Chinese)
- 28 Rusu R B, Marton Z C, Blodow N, et al. Towards 3D point cloud based object maps for household environments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(11): 927 – 941.
- 29 Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381 – 395.
- 30 李娜, 马一薇, 杨洋, 等. 利用 RANSAC 算法对建筑物立面进行点云分割[J]. 测绘科学, 2011, 36(5): 144 – 145.
Li Na, Ma Yiwei, Yang Yang, et al. Segmentation of building facade point clouds using RANSAC[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(5): 144 – 145. (in Chinese)
- 31 Luchowski L, Kowalski P. Using RANSAC for 3D point cloud segmentation[J]. Theoretical and Applied Informatics, 2013, 25(2): 105 – 117.
- 32 Schnabel R, Wahl R, Klein R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection[J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(2): 214 – 226.