

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.028

# 基于双目立体视觉的果树三维信息获取与重构\*

蔡健荣<sup>1</sup> 孙海波<sup>1</sup> 李永平<sup>2</sup> 孙力<sup>1</sup> 陆化珠<sup>1</sup>

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013; 2. 宁波大红鹰学院信息工程学院, 宁波 315175)

**【摘要】** 为实现果实收获机器人避障,研究了树枝空间信息提取方法和果树树枝三维重建方法:采用归一化互相关法获取立体图像视差图,在图像中提取树枝骨架并采用多线段逼近法提取特征点;结合视差图,利用双目立体视觉原理计算树枝骨架特征点的空间坐标,再利用距离图像求取树枝半径信息;将分枝点断开形成简单线图形,简化了树枝三维信息。在空间坐标原点采用12棱柱构建各段树枝模块,通过仿射变换将三维模块以正确的位姿与其他模块组合成果树模型。试验表明,生成的虚拟果树为水果采摘机器人避障及路径规划提供了环境参照。

**关键词:** 果树 双目视觉 三维信息获取 模型重构

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0152-05

## Fruit Trees 3-D Information Perception and Reconstruction Based on Binocular Stereo Vision

Cai Jianrong<sup>1</sup> Sun Haibo<sup>1</sup> Li Yongping<sup>2</sup> Sun Li<sup>1</sup> Lu Huazhu<sup>1</sup>

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Electronic and Information, Ningbo Dahongying University, Ningbo 315175, China)

### Abstract

In order to avoid obstacles for fruit harvesting robot, the method of spatial information extraction of tree branch was studied. The method of normalized cross-correlation was used to get the disparity map of stereo image, branch skeleton was extracted and feature points were extracted by multi-segment approximation method. The spatial coordinates of branch feature points were calculated by combining with the disparity map based on binocular stereo vision, the radius of branch feature points were calculated by using the branch range image, in the end, the forked branch was divided into separate section. Rapid model reconstruction for fruit tree was researched: firstly, each branch module was constructed by 12-prism in the coordinate origin; then, every module was set to the correct posture by affine transformation; finally, the complete fruit tree model was restructured. Experiments show that the virtual trees provide the actual environment reference for obstacle avoidance and path planning of fruit picking machine.

**Key words** Fruit trees, Binocular vision, 3-D information perception, Model reconstruction

### 引言

为应对当前农业劳动力减少和水果采摘成本过高的问题,开发智能化采摘机器人是一个有效解决途径。作业环境的非结构化是采摘机器人研究面临的重大问题。由于果实着生位姿随机,给识别和定

位带来困难;树枝等障碍物的存在给机器人采摘带来更多难题<sup>[1]</sup>。所以,机器人在正确识别果实的同时,还必须能正确识别和定位障碍物,避免机器人运动时与之发生碰撞。目前,关于收获机器人障碍物识别和定位研究报道较少。与之相关的研究有 Shlyakhter、Teng 和王春华等运用图像处理与图形学

收稿日期: 2011-05-17 修回日期: 2011-06-14

\* 国家自然科学基金资助项目(30771243)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA10Z263)

作者简介: 蔡健荣,教授,博士生导师,主要从事收获机器人、农产品无损检测技术研究,E-mail: jrcai@ujs.edu.cn

相结合的方法,提取树木骨架及形态,其目的是实现真实场景模拟,但因注重模型细节,建模时间较长<sup>[2-4]</sup>。

双目立体视觉系统通过两个视点观察同一场景获取两幅图像,根据三角测量原理计算不同图像对应像素间的视差(disparity),获取深度信息,从而实现场景三维重构。完整的立体视觉分为6个模块:摄像机标定、图像获取、特征提取、立体匹配、空间信息恢复和后处理<sup>[5]</sup>。本文采用区域匹配方法匹配树枝,并结合树枝二维图像特征,提取树枝空间信息,在此基础上重建树枝三维模型,为机器人果实采摘路径规划提供环境数据。

## 1 树枝二维信息提取

果树品种为柑橘日南1号,果树高1.43 m,树冠直径约为0.79 m,采集环境为室内日光灯照明,采集距离1~2 m。选用加拿大Point Grey Research公司生产的Bumblebee 2双目摄像机,基线距为120 mm,最大分辨率1 024(H)×768(V),所用分辨率640(H)×480(V),相机芯片为:Sony ICX204,1/3"芯片,靶面尺寸为4.8 mm(宽)×3.6 mm(高),对角线6 mm,最大帧速18 帧/s,焦距6 mm,视角50°。

以树枝为试验对象,进行信息提取和三维重建。从场景图像可见(图1a),树枝形状复杂,直接恢复三维信息耗时过长,需简化特征。首先,图像转换成距离图像(图1b);其次,提取距离图像骨架(图1c)。简化后的树枝骨架可分成两类,直树枝和弯曲树枝。直树枝采用端点或分支点及半径构建圆柱(台)表征;弯曲树枝,采用多线段逼近方式拟合树枝骨架,再结合树枝距离图像获取特征点处树枝半径信息,采用多段圆柱(台)替代原树枝。

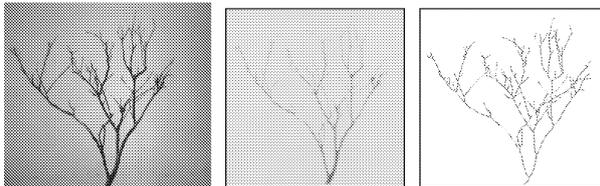


图1 树枝场景图像(左视觉)

Fig.1 Branch scene image (left vision)

(a) 原始图像 (b) 树枝距离图像 (c) 树枝骨架图像

多线段逼近拟合曲线法,是将整条曲线通过反复增加特征点数,以线段拟合曲线的方法。可以逼近所有无交错曲线到任意精度<sup>[6-8]</sup>,拟合方法如图2所示。具体步骤如下:

(1) 求曲线AB最小外接矩形。

(2) 最小外接矩形的宽为 $d$ ,与曲线AB的切点为C。

(3) 如果 $d$ 大于预设阈值 $t$ ,将曲线AB分为AC、CB两条轮廓线,迭代求解,直到所有的最小外接矩形的宽均小于阈值 $t$ 。

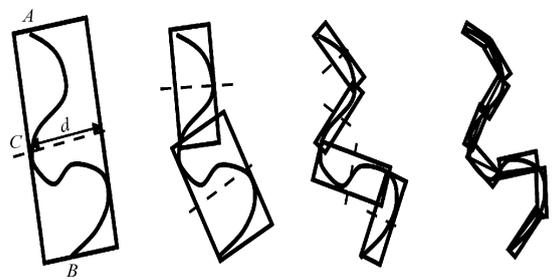


图2 多线段逼近示意图

Fig.2 Sketch of multi-segment approximation

为保证树枝的定位精度,在拍摄范围内多边形拟合的最小阈值 $t=4$ (像素值)时,既可有效逼近弯曲树枝,又可以尽量简化树枝数据,便于后续快速重构。得到树枝骨架的拟合线段如图3a所示。图3b为拟合图与树枝骨架图对比,由图可见两者位置差异很小,不足以影响定位精度。此时,线段的端点即为树枝的特征点,根据特征点的坐标,可以从树枝距离图像中获取特征点处的半径。每一段树枝均可由一个或多个圆柱(台)表示,每条逼近线段采用 $\{(x_{i1}, y_{i1}), r_1; (x_{i2}, y_{i2}), r_2\}$ 表示。 $(x_{i1}, y_{i1})$ 、 $(x_{i2}, y_{i2})$ 是左目图像中线段两个端点坐标, $r_1$ 和 $r_2$ 为两端点在距离图像上的半径。

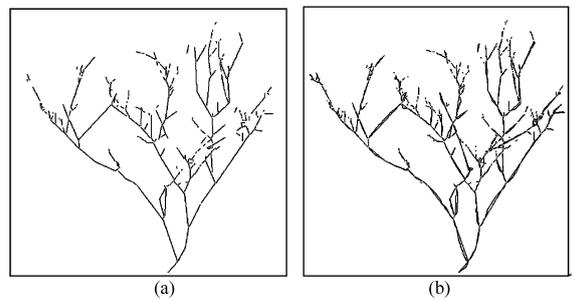


图3 多线段逼近结果

Fig.3 Result of multi-segment approximation

(a) 树枝拟合图 (b) 树枝拟合图与原骨架对比

## 2 树枝三维信息获取

每段树枝两端端点的空间坐标以及端点的半径用于描述树枝的三维信息。根据双目立体视觉原理,计算特征点在世界坐标系中的 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 坐标值,公式<sup>[9-10]</sup>为

$$\begin{cases} X = \frac{x_i d_0}{D} \\ Y = \frac{y_i d_0}{D} \\ Z = \frac{f d_0}{D} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $x_l, y_l$ ——特征点在左图像中的坐标  
 $f$ ——摄像机焦距  
 $d_0$ ——两摄像机的基线距离  
 $D$ ——左、右两幅图像匹配点的视差

将多线段逼近拟合的树枝骨架图像,结合树枝距离图像可以提取树枝骨架特征点的坐标,并通过式(2)提取树枝特征点处半径,每段树枝可以采用  $\{(X_1, Y_1, Z_1), R_1; (X_2, Y_2, Z_2), R_2\}$  表示。树枝端点实际半径

$$R = \frac{0.0075rZ}{f} \quad (2)$$

式中  $r$ ——树枝端点半径(像素),像元尺寸为  $0.0075 \text{ mm/像素}$

提取树枝空间信息的关键在于计算立体图像树枝骨架特征点的视差。常用的匹配方法有特征点匹配法和区域匹配法,由于光线以及树枝纹理的影响,左、右目图像的骨架差异较大,每一段树枝特征点较多,易发生误匹配。基于区域匹配的方法是在图像中以一点  $(r, c)$  为中心选定一个  $(2n+1) \times (2n+1)$  窗口,在另一幅图像中寻找与该区域具有最大相关度的区域,然后将找到的最大相关度区域的中心作为原图像区域中心的对应点,可以得到立体图像的视差图。大部分树枝纹理丰富,区域匹配的准确度较高,所以区域匹配适用于树枝匹配。

最简单的区域匹配法是 SAD(累积绝对灰度差)和 SSD(累积平方灰度差)<sup>[11-12]</sup>,其定义为

$$\text{sad}(r, c, d_0) = \frac{1}{(2n+1)^2} \cdot \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n |I_{\text{right}}(r+i, c+j) - I_{\text{left}}(r+i, c+j+d_0)| \quad (3)$$

$$\text{ssd}(r, c, d_0) = \frac{1}{(2n+1)^2} \cdot \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n (I_{\text{right}}(r+i, c+j) - I_{\text{left}}(r+i, c+j+d_0))^2 \quad (4)$$

SAD 和 SSD 两种相似度量法对光照变化敏感。由于是在非结构化场景采集的图像,应考虑光照变化影响,因此采用对光照变化不敏感的归一化互相关法(normalized cross-correlation, 简称 NCC)<sup>[13]</sup>,定义为

$$\text{ncc}(r, c, d_0) = \frac{1}{(2n+1)^2} \cdot \frac{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n \frac{I_{\text{right}}(r+i, c+j) - m_{\text{right}}(r+i, c+j)}{\sqrt{s_{\text{right}}(r+i, c+j)^2}} \cdot \frac{I_{\text{left}}(r+i, c+j+d_0) - m_{\text{left}}(r+i, c+j+d_0)}{\sqrt{s_{\text{left}}(r+i, c+j+d_0)^2}}}{\quad} \quad (5)$$

式中  $m_{\text{left}}, m_{\text{right}}$ ——左、右图中窗口内灰度均值  
 $s_{\text{left}}, s_{\text{right}}$ ——左、右图中窗口灰度标准差  
 $I_{\text{left}}, I_{\text{right}}$ ——左、右图中对应点灰度

为了找到左图中某一个点的匹配点,在右图中沿外极线计算相似度量。由于点的视差与其深度有关,并随深度的增大而视差减小,无穷远处的视差可视为零。因此根据对象深度范围设置一个较小的视差搜索范围,以提高运算速度<sup>[14]</sup>。设视差  $D \in [D_{\min}, D_{\max}]$ ,式中  $D_{\min}$  和  $D_{\max}$  可以通过对象深度极值计算。研究的果树与相机距离在  $1.0 \sim 2.0 \text{ m}$  之间,通过计算得到视差搜索范围  $D \in [48, 96]$ 。首先将两幅原始图像转换为灰度图像后,设定  $15 \times 15$  的窗口,采用 NCC 法对左、右图像进行匹配。匹配时,设置窗口纹理确认(阈值为 10)和唯一性确认(相似度最高的点),以防止窗口纹理水平产生匹配的像素被视为无效像素,及对多重匹配的像素优选一个最佳匹配,匹配后的视差图如图 4 所示。

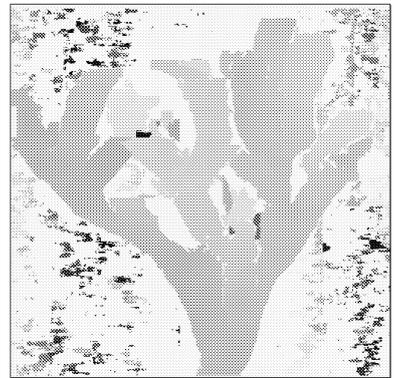


图 4 基于区域匹配的视差图像

Fig. 4 Disparity image using area-based matching

为了检验匹配的准确性,采用横向精度(树枝位置及直径)及纵向精度(树枝长度)进行度量。将多线段逼近的骨架与原始图像叠加,根据叠加图上拟合线段找到实际果树对应树枝段,用游标卡尺测量每段树枝两端点直径,并用卷尺测量树枝段长度的实际值,并与双目测量的结果进行对比。双目相机从距离果树  $1 \text{ m}$  处开始,每隔  $0.05 \text{ m}$  测量一次,直至  $2 \text{ m}$  处,测量后将果树从  $0^\circ \sim 360^\circ$  自转,步长为  $45^\circ$ ,共转动 8 次,由此得到立体图像为 168 对。测量结果如图 5 所示。

树枝直径测量的真实值在  $8 \sim 24 \text{ mm}$  范围内,拍摄距离为  $1 \sim 1.5 \text{ m}$  时,绝对误差在  $1.6 \sim 2.0 \text{ mm}$ ,相对误差在  $15\% \sim 20\%$  之间,拍摄距离为  $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$  时误差有所增加,总体上绝对误差在  $2.5 \text{ mm}$  以内,相对误差在  $25\%$  以内,由于树枝直径较细,双目测量相对误差稍大,但仍满足避障要求。树枝长度测量,拍摄距离为  $1 \sim 1.7 \text{ m}$  时,绝对误差

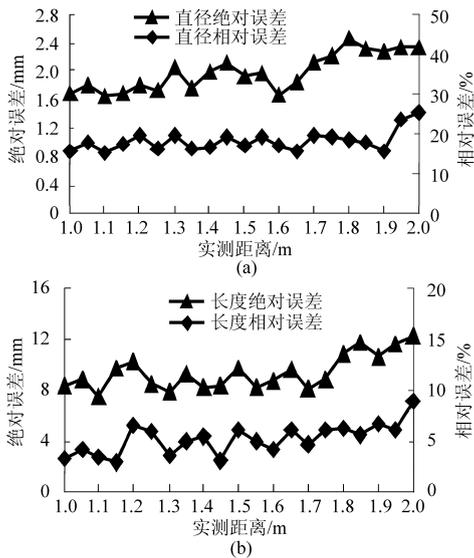


图5 树枝直径和长度的测量精度

Fig.5 Measurement accuracy of the branch diameter and length

(a) 直径测量精度 (b) 长度测量精度

在 8.0 ~ 10.0 mm; 拍摄距离为 1.7 ~ 2.0 m 时误差有所增加, 总体上绝对误差在 12 mm 以内, 相对误差在 10% 以内。

### 3 果树三维模型重构

多线段拟合后得到的每段树枝用  $\{(X_1, Y_1, Z_1), R_1; (X_2, Y_2, Z_2), R_2\}$  格式存储。其中  $(X_1, Y_1, Z_1)$ 、 $(X_2, Y_2, Z_2)$  为树枝两端点的空间坐标,  $R_1$ 、 $R_2$  为端点的半径。模型构建在 VC 平台下使用 OpenGL 建模。每段树枝采用 12 棱柱法于空间坐标系原点处构建单元模块<sup>[15]</sup>。根据空间位姿变换定律, 单元模型通过仿射变换重现树枝原有位姿。各段树枝模型采用上述空间变换后, 便可得到如图 6 所示的三维果树重构图。

在重建的模型中, 存在部分枝干构建紊乱和树枝信息丢失等现象。其原因有: ①树冠区域细枝较多, 树枝部分被遮挡, 出现误匹配, 重建出现紊乱。②部分树枝纹理不足, 未能找到匹配像素, 导致部分

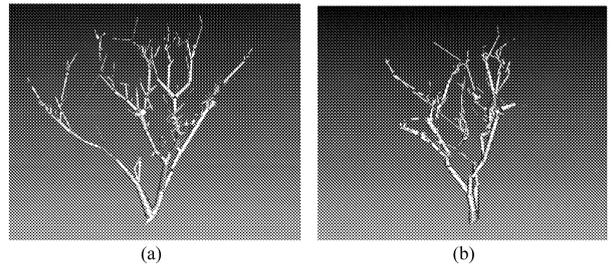


图6 虚拟重建的场景模型

Fig.6 Scene model of virtual reconstruction

(a) 主视图 (b) 侧视图

树枝丢失。

采用的工业用计算机为 910 A, Intel Pentium 4 处理器, 2.8 GHz 主频, 1 GB 内存, Windows XP 操作系统, 开发平台为 Visual Studio 2008, 完成所有步骤需要时间如表 1 所示。

表1 完成所有步骤需要时间

Tab.1 Running time for all the steps

处理环节	运行时间/ms
图像采集	56
树枝骨架提取	58
多线段逼近	124
NCC 区域匹配	362
计算三维信息	33
场景重构	243
总时间	876

### 4 结束语

提出了一种基于双目立体视觉的树枝识别、定位、三维重建方法。采用区域匹配方法获得视差图像, 结合二维图像中树枝的特征点坐标, 利用三角测距原理计算树枝特征点的空间坐标和半径信息。在空间坐标系原点采用 12 棱柱构建各段树枝模块, 通过仿射变换将三维模块以正确的位姿与其他模块组合成果树模型。通过试验优化树枝的匹配算法, 可提高匹配率, 有效提取树枝空间信息。

### 参 考 文 献

- 1 蒋焕煜, 彭永石, 应义斌. 双目立体视觉技术在果蔬采摘机器人中的应用[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2008, 29(5): 377 ~ 380.  
Jiang Huanyu, Peng Yongshi, Ying Yibin. Binocular stereo vision applied to harvesting robot [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(5): 377 ~ 380. (in Chinese)
- 2 Shlyakhter I, Rozenoer M, Dorsey J, et al. Reconstructing 3D tree models from instrumented photographs [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(3): 53 ~ 61.
- 3 Teng C H, Chen Y S, Hsu W H. Constructing a 3D trunk model from two images [J]. Graphical Models, 2007, 69(1): 33 ~ 56.
- 4 王春华, 杨克俭, 韩栋. 基于分枝类型和空间点的三维树木建模方法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(4): 1 591 ~ 1 593.

- Wang Chunhua, Yang Kejian, Han Dong. Trees' 3D modeling based on branching type and space points [J]. Application Research of Computers, 2009, 26(4): 1591~1593. (in Chinese)
- 5 徐奕, 周军, 周源华. 立体匹配技术[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(15): 1~5.  
Xu Yi, Zhou Jun, Zhou Yuanhua. On stereo matching technology [J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 39(15): 1~5. (in Chinese)
- 6 贾云得. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- 7 Zimmer Y, Tepper R, Akselrod S. An improved method to compute the convex hull of a shape in a binary image [J]. Pattern Recognition, 1997, 30(3): 397~402.
- 8 章毓晋. 图像工程(中)——图像分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 9 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学技术出版社, 1998: 72~78.
- 10 蔡健荣, 周小军, 王锋, 等. 柑橘采摘机器人障碍物识别技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 171~175.  
Cai Jianrong, Zhou Xiaojun, Wang Feng, et al. Obstacle identification of citrus harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 171~175. (in Chinese)
- 11 Mühlmann K, Maier D, Hesser J, et al. Calculating dense disparity maps from color stereo images, an efficient implementation [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1~3): 79~88.
- 12 Hirschmüller H, Innocent P R, Garibaldi J M. Real-time correlation-based stereo vision with reduced border errors [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1~3): 229~246.
- 13 Kim T, Im Y. Automatic satellite image registration by combination of stereo matching and random sample consensus [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2003, 41(5): 1111~1117.
- 14 Steger C, Ulrich M, Wiedemann C. Machine vision algorithms and applications [M]. Berlin: Wiley-VCH, 2008: 241~257.
- 15 Zhang Wenli, Li Yongping. Real-time tree model reconstructing for fruit harvesting robot system [C]//Proceedings of the 9th International Conference on CAID&CD, 2008: 580~585.

(上接第 145 页)

- 5 Menges H O, Ertekin C. Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(1): 119~125.
- 6 Azzouz S, Guizani A, Jomaa W, et al. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(4): 323~330.
- 7 张建军, 马永昌, 王海霞, 等. 辣椒热风干燥的工艺优化试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 223~224.
- 8 刘珂, 朱文学. 牡丹压花热风干燥特性及动力学模型研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(11): 188~192.  
Liu Ke, Zhu Wenxue. Study on hot-air drying characteristic of pressed peony and dynamic model [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(11): 188~192. (in Chinese)
- 9 张喜梅, 吴雪辉, 李昌宝, 等. 油茶籽的热风干燥特性及数学描述[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(8): 116~120.  
Zhang Ximei, Wu Xuehui, Li Changbao, et al. Characteristics and mathematical description of hot-air drying of camellia oleifera seed [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(8): 116~120. (in Chinese)
- 10 明道绪. 高级生物统计[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 270~285.
- 11 易军鹏, 朱文学, 马海乐, 等. 牡丹籽油超声波辅助提取工艺的响应面法优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 103~110.  
Yi Junpeng, Zhu Wenxue, Ma Haile, et al. Optimization on ultrasonic-assisted extraction technology of oil from *Paeonia suffruticosa* Andr. seeds with response surface analysis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 103~110. (in Chinese)
- 12 Funda Kahraman. The use of response surface methodology for prediction and analysis of surface roughness of AISI 4140 steel [J]. Materials and Technology, 2009, 43(5): 267~270.