

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.040

基于机器视觉的育苗穴盘定位与检测系统*

杨扬¹ 曹其新¹ 盛国栋¹ 夏春风²

(1. 上海交通大学机器人研究所, 上海 200240; 2. 苏州农业职业技术学院信息与机电工程系, 苏州 215008)

摘要: 针对嫁接苗自动移栽机器人, 提出了一种基于机器视觉的育苗穴盘定位与检测系统。该系统不仅能够确定育苗穴盘在传送带上的位置, 而且能够获得各穴孔内的基质深度和三维形状信息。其方法是利用彩色图像与深度图像的注册, 从彩色图像中检测穴盘轮廓, 结合穴盘规格, 实现深度图像中穴盘各穴孔的分割; 利用分割后的深度图像对每个穴孔生成三维点云, 结合最近邻算法与主成分分析算法计算各点的法向量, 基于该法向量实现穴孔侧壁与穴底基质的分割, 进而获得基质的深度。试验表明, 该系统能够有效定位穴盘并检测基质深度, 平均定位误差为 3.5 mm, 深度检测误差为 4.9 mm, 满足嫁接苗自动移栽机器人的控制要求。

关键词: 育苗 移栽 穴盘定位 机器视觉 深度检测

中图分类号: TP391.41; S223.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0232-04

Plug Tray Localization and Detection System Based on Machine Vision

Yang Yang¹ Cao Qixin¹ Sheng Guodong¹ Xia Chunfeng²

(1. Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

2. Department of Information and Electromechanics, Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture, Suzhou 215008, China)

Abstract: A machine vision based plug tray localization and detection system for automatic transplanting robot was proposed. This system could not only get the plug tray's position on the conveyor belt, but also obtain the depth and the 3-D shape of the substrate inside each cave. Based on the registration of the color image and depth image, the contour of the plug tray was detected from the color image. Combined with the plug tray's dimension, each cave was segmented from the depth image and the 3-D point cloud was generated. With K-nearest-neighbor (KNN) algorithm and principle component analysis (PCA) algorithm, the normal vector for each point was calculated. Based on the normal vector, the cave's side wall was segmented from the substrate and the depth of the substrate was computed. The experiment result showed that this system could effectively localize and detect the plug tray with a localization error of 3.5 mm and a depth detection error of 4.9 mm which met the control requirement of the automatic transplanting robot for grafting seedlings.

Key words: Seedling Transplant Plug tray localization Machine vision Depth detection

引言

随着农业机械自动化技术的发展, 自动嫁接育苗机器人获得了研究者的广泛关注^[1-4]。自动嫁接育苗机器人一般由输送机构、搬运机构、砧木苗、接穗苗处理机构、嫁接机构和嫁接苗移栽机构组

成^[5]。其中, 嫁接苗移栽机构是由机器人将嫁接好的秧苗移栽到填充过基质的穴盘中, 该过程不仅要保证将嫁接苗准确栽植到各穴孔中, 而且往往对扦插深度有一定要求。例如, 多数以瓜科作物作为砧木的移栽系统, 要求扦插深度在 3 cm 左右^[6]。这就要求传感系统不仅能够检测穴盘在传送带上的位

收稿日期: 2012-12-09 修回日期: 2013-01-08

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA10A506)

作者简介: 杨扬, 博士生, 主要从事机器视觉研究, E-mail: yangyangcv@gmail.com

通讯作者: 曹其新, 教授, 博士生导师, 主要从事机器视觉和机器人研究, E-mail: qxcao@sju.edu.cn

置,还要检测穴盘各穴孔中育苗基质的深度,以反馈给机器人确定垂直方向的行程。当前多数研究者利用 CCD 或光电传感器检测穴盘^[7],只能确定穴盘的位置。为此,提出一种基于机器视觉的穴盘定位与检测系统,该系统不仅能够确定穴盘位置,还能检测出穴盘各穴孔中基质的深度,从而为嫁接苗自动移栽机器人提供更为全面的信息。

1 硬件系统结构

嫁接苗自动移栽机器人由机器视觉系统、机械臂、穴盘传送带与计算机构成。其中,机器视觉系统由彩色 CMOS 传感器、红外 CMOS 传感器与光栅发射器 3 部分构成,安置在传送带上方 60 cm 处,传感器成像平面平行于传送带平面。图 1 为系统结构示意图。机械臂有 6 个自由度,从嫁接机上夹取处理好的嫁接苗,利用视觉系统提供的穴盘位置与基质深度信息,将嫁接苗栽植到穴盘各穴孔中。

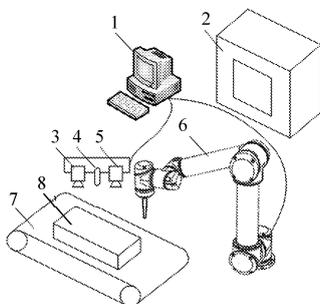


图 1 硬件系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of hardware system

1. 计算机 2. 嫁接机 3. 彩色 CMOS 传感器 4. 光栅发射器
5. 红外 CMOS 传感器 6. 机械臂 7. 传送带 8. 穴盘

彩色 CMOS 传感器能够检测波长 380 ~ 760 nm 的自然光,分为红、绿、蓝 3 个通道,分辨率为 640 像素 × 480 像素;光栅发射器向外发送经调制的红外光栅,波长为 830 nm;红外 CMOS 传感器的红外滤镜可透过波长 820 ~ 840 nm 的红外光,分辨率为 640 像素 × 480 像素。光栅发射器与红外 CMOS 构成一组深度传感器,可感应 45 ~ 300 cm 内的深度信息。经过标定,可将彩色 CMOS 获取的彩色图像 I_{rgb} 与红外 CMOS 获取的深度图像 I_d 注册在一起,并获得彩色图像各点 $p = (u, v) \in I_{rgb}$ 所对应的空间三维坐标

$$\begin{cases} z = I_d(u, v) \\ x = \frac{(u - c_x)z}{f_x} \\ y = \frac{(v - c_y)z}{f_y} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $I_d(u, v)$ ——红外 CMOS 传感器获取的深度图像在坐标 (u, v) 处的像素值

c_x, c_y ——彩色 CMOS 传感器光心坐标
 f_x, f_y ——彩色 CMOS 传感器焦距
 c_x, c_y, f_x 和 f_y 均可通过摄像机标定获取。

2 软件系统结构

软件系统以彩色 CMOS 传感器获取的彩色图像与红外 CMOS 传感器获取的深度图像为输入,经过离线标定将两图像注册在一起。根据穴盘与传送带颜色的区别,从彩色图像中检测穴盘轮廓;结合检测到的穴盘轮廓与穴盘规格,实现各穴孔的分割;再利用分割后的深度图像,为每个穴孔生成三维点云,根据最近邻算法与主成分分析算法计算各点的法向量,利用法向量的方向,实现穴孔侧壁与穴底基质的分割,最终计算基质的深度。图 2 为软件系统流程图,其中,虚线箭头表示离线检测所获得信息的流向。

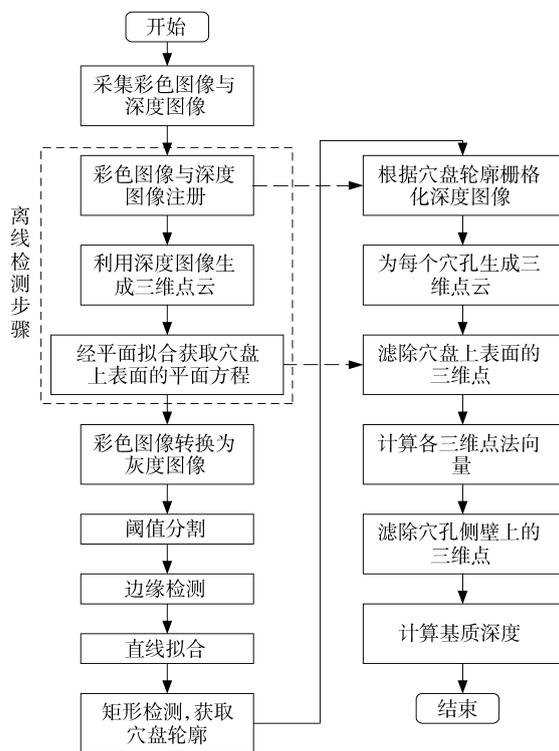


图 2 软件系统流程图

Fig. 2 Flow chart of software system

2.1 穴盘轮廓检测

常用穴盘一般为灰色或黑色,经试验发现,在普通光照下(500 ~ 1 000 lx),穴盘平均灰度小于 80 (以 256 灰度阶为例),为了有效区分穴盘,使用白色传送带,其平均灰度大于 100。首先,将彩色图像 I_{rgb} 转换为灰度图像 I_g ;根据设定阈值,将灰度图像 I_g 转换为二值图像 I_{bw} ;用 Canny 算法^[8]检测二值图像上的边缘;再用 Hough 算法对检测到的边缘进行直线拟合;由于典型穴盘一般为矩形,在直线拟合基

础上进一步作矩形检测,具体方法为:若有直线段 $\overline{AB}, \overline{BC}$,各端点坐标 $A = (x_a, y_a), B = (x_b, y_b), C = (x_c, y_c)$,则两线段夹角 θ 的余弦为

$$\cos\theta = \frac{(x_a - x_b)(x_c - x_b) + (y_a - y_b)(y_c - y_b)}{\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2}}$$

对检测到的直线,若存在长的4条直线段,且满足相邻线段夹角的余弦绝对值 $|\cos\theta_i| < \zeta (i = 1, 2, 3, 4)$,其中 ζ 为近似等于零的正数,则可推断这4条直线构成一个矩形。获得轮廓后,根据穴盘规格,很容易分割各穴孔。图3显示了上述检测过程中获得的图像,白色粗线条标示了检测到的矩形轮廓与根据轮廓生成的穴孔栅格。

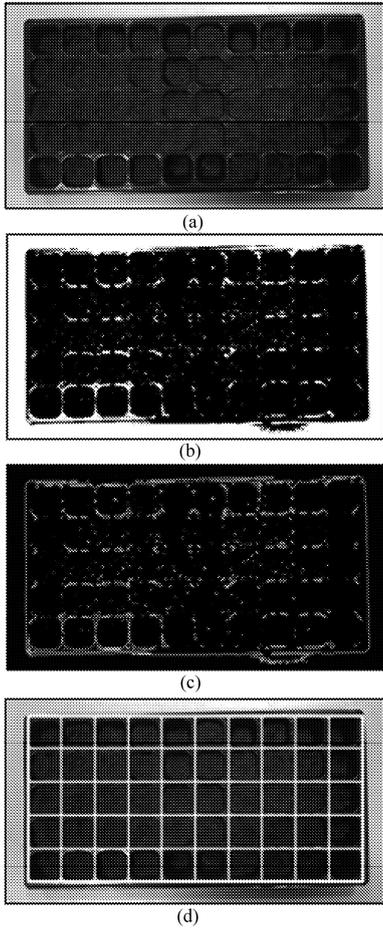


图3 穴盘轮廓检测过程图像

Fig. 3 Images in plug tray contour detection process

(a) 灰度图像 (b) 二值图像 (c) 边缘图像
(d) 矩形轮廓与根据轮廓生成的穴孔栅格

2.2 基质深度检测

为了避免穴盘上表面影响基质深度检测,先通过平面拟合^[9],获取穴盘上表面所构成平面的方程,具体方法为:给定三维空间中不共线3点的齐次坐标 $X_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T (i = 1, 2, 3)$,若由这3点所确定的平面表达式为 $P = [a, b, c, d]^T$,则有 $X_i^T P = 0$,对3个点有

$$[X_1^T \ X_2^T \ X_3^T]^T P = 0 \quad (2)$$

记 $A = [X_1^T \ X_2^T \ X_3^T]^T$,由于平面上任意不共线的两矢量可构成该平面的一组基,显然矩阵 A 不满秩,且其右零空间维数为1,即对应平面的表达式 P ,因此可通过求 A 的右零空间来求 P 。对于根据深度图像获取的点云 C ,其所包含的三维点数远大于3,除了穴盘上表面的点所构成的主平面,还包含不同深度基质表面的三维点,因此需要应用随机抽样一致性算法^[10]来拟合平面方程,其流程为:

(1) 初始化 $N_{\max} = 0$ 。从点云 C 中随机取3点 $X_i (i = 1, 2, 3)$,若3点不共线,则用式(2)通过求 A 的右零空间来求 P ,并将 P 正归化使 $\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} = 1$ 。

(2) 对 $\forall X_k \in C$,若 $|X_k^T P| < \zeta$ (ζ 为近似等于零的正数),则表明该点位于平面上,称该点为内点,遍历 C 中的所有点,统计内点数目 N ,若 $N > N_{\max}$,则更新 $N_{\max} = N$ 。

(3) 重复步骤(1)、(2)直到设定循环数或 N_{\max} 大于设定阈值,则拥有最多内点数的 P 即为拟合后的平面方程。由于深度传感器与穴盘上表面在检测过程中相对静止,该方程只需离线求取一次。

得到穴盘上表面所在平面的方程后,可得栅格化后的每一格深度图像 $I_{\text{grid}} = \{p(u, v) : u_{\text{low}} \leq u < u_{\text{up}}, v_{\text{low}} \leq v < v_{\text{up}}\}$,其中 $u_{\text{low}}, v_{\text{low}}, u_{\text{up}}, v_{\text{up}}$ 分别为该栅格左上角与右下角的图像坐标,根据式(1)生成点云 C_{grid} ,对 $\forall X_k \in C_{\text{grid}}$,若满足 $|X_k^T P| < \zeta$,则表明该点位于穴盘上表面,如果 C_{grid} 中大部分点都位于穴盘上表面,则说明该穴孔中充满基质。将不处于穴盘上表面的点另存为点云 $C_e = \{X_k : |X_k^T P| \geq \zeta\}$, C_e 中不仅包含了基质的三维点,还包含了该穴孔侧壁的三维点,因此需要进一步滤掉穴孔侧壁的三维点。考虑到穴孔中基质表面的法向量与穴孔侧壁表面的法向量方向明显不同,对 $\forall X_i \in C_e$,计算其在该点的法向量 N_i 。具体方法为:利用最近邻算法^[11]搜索 X_i 附近的 k 个欧氏距离最近点,应用主成分分析算法,计算这 $k+1$ 个点的三维坐标构成的协方差矩阵 $M_{\text{cov}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})^T$,其中 \bar{X} 为 $k+1$ 个点的质心,则由主成分分析算法可知 M_{cov} 对应最小特征值的特征向量即为该点的法向量 N_i ^[12]。由于深度传感器成像平面平行于穴盘上表面,垂直于各穴孔侧壁,因此得到各点法向量后,若 $|N_i^T N_d| < \zeta$,则该点属于侧壁,其中 N_d 为深度传感器成像平面的法向量。从 C_e 中滤掉穴孔侧壁点后,该穴孔中基质的平均深度为

$$d = \frac{\sum_{k=1}^n z_k}{n} \quad (3)$$

式中 z_k ——滤掉穴孔侧壁后 C_e 中各点的深度
 n ——滤掉穴孔侧壁后 C_e 中的点数

图4分别显示了原始点云、滤掉穴盘上表面的点云与滤掉穴孔侧壁的点云。

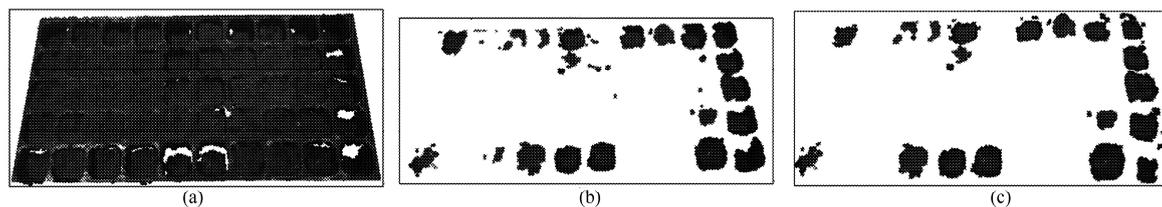


图4 基质深度检测过程各点云

Fig.4 Point clouds in substrate depth detection process

(a) 原始点云 (b) 滤掉穴盘上表面的点云 (c) 滤掉穴孔侧壁的点云

3 试验

应用上述方法,对规格为 5×10 的穴盘进行了测试,穴盘盘体长 54 cm,宽 28 cm,口径 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,穴深 50 mm,异构机器视觉传感系统距离穴盘上表面 55 cm。所使用的基质为淮安市绿土地基质肥厂生产的禾丰牌有机土基质。对于填充了不同深度基质的穴盘进行了 100 次检测,穴盘轮廓检测成功率为 100%,平均定位误差为 3.5 mm,标准差为 1.7 mm。穴孔基质深度检测的平均误差为 4.9 mm,标准差为 1.9 mm。软件系统使用 C++ 语言编写,运行平台为 Windows7 32 位,计算机配置为 Intel

Core i5-2400 3.1 GHz CPU, 4 GB 内存,每次检测平均用时 79.5 ms,能够满足嫁接苗自动移栽机器人的准确性和实时性要求。

4 结束语

提出了一种面向嫁接苗自动移栽机器人的机器视觉育苗穴盘定位与检测系统,将彩色图像与深度图像注册后,从彩色图像中检测穴盘轮廓,从深度图像中检测各穴孔中基质的深度,可同时获取穴盘在传送带上的位置与各穴孔中基质深度,为嫁接苗自动移栽机器人提供更为全面的信息。

参 考 文 献

- 刘成良,王红永,曹其新,等. 秧苗嫁接机器人视觉与识别的研究[J]. 农业机械学报,2001,32(4):38~41.
Liu Chengliang, Wang Hongyong, Cao Qixin, et al. Study on robot vision and judgement system for seedling grafting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4):38~41. (in Chinese)
- Kumara G V P, Rahemanb H. Vegetable transplanters for use in developing countries—a review [J]. International Journal of Vegetable Science, 2008, 14(3):232~255.
- Kumara G V P, Rahemanb H. Automatic feeding mechanism of a vegetable transplanter [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2012, 5(2):20~27.
- Chen S, Chiu Y C, Chang Y C, et al. Development of a tubing-grafting robotic system for fruit-bearing vegetable seedlings [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2010, 26(4):707~714.
- 姜凯,辜松,郑文刚,等. 瓜科全自动嫁接机设计与试验[J]. 农机化研究,2010,32(12):129~132.
Jiang Kai, Gu Song, Zheng Wen'gang, et al. Design and experiment of automatic grafting machine of cucurbits [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(12):129~132. (in Chinese)
- 孙国祥,汪小岳,何国敏,等. 穴盘苗移栽机末端执行器设计与虚拟样机分析[J]. 农业机械学报,2010,41(10):48~53.
Sun Guoxiang, Wang Xiaochan, He Guomin, et al. Design of the end-effector for plug seedlings transplanter and analysis on virtual prototype [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10):48~53. (in Chinese)
- 田素博,王荣华,邱立春. 温室穴盘苗自动移栽输送系统设计[J]. 沈阳农业大学学报,2009,40(5):620~622.
Tian Subo, Wang Ronghua, Qiu Lichun. Design on conveyor system of automatic transplanting for plug seedling in greenhouse [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(5):620~622. (in Chinese)
- Bao P. Canny edge detection enhancement by scale multiplication [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(9):1485~1490.
- Kenmochi Y, Buzer L, Sugimoto A, et al. Discrete plane segmentation and estimation from a point cloud using local geometric patterns [J]. International Journal of Automation and Computing, 2008, 5(3):246~256.
- 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):391~395.
- Nene S A, Nayar S K. A simple algorithm for nearest neighbor search in high dimensions [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(9):989~1003.
- Berkmann J, Caelli T. Computation of surface geometry and segmentation using covariance techniques [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(11):1114~1116.