DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.06.031

基于立体视觉的水果采摘机器人系统设计*

周　俊　刘　锐　张高阳
(南京农业大学工学院, 南京 210031)

【摘要】 基于立体视觉建立了水果采摘机器人系统。在图像空间利用 Hough 变换检测出果实目标,并利用随机采样目标上均匀分布多个点的三维坐标信息重建果实球模型,进而获得目标质心的空间位置坐标;通过最小二乘法研究了采摘机器人手眼标定;分析了采摘机器人的轨迹规划。实验结果表明,设计的自动采摘系统可以有效地消除遮挡以及立体视觉匹配失效等因素的影响,目标定位误差小于 8 mm,显著地提高了抓取的精度和可靠性。

关键词: 采摘机器人　立体视觉　手眼标定　识别
中图分类号: TP242.6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2010)06-0158-05

Design of Fruit Harvesting Robot Based on Stereo Vision

Zhou Jun　Liu Rui　Zhang Gaoyang
(*College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract

The automatic picking system of fruit harvesting robot was designed based on stereo vision. Firstly, the fruit objects were recognized in image space by using the Hough transform. Some pixels of each object obeying the uniform distribution in the image space were sampled randomly. Then the sphere model of fruit was constructed in 3-D space with these pixels, and the coordinates of the center of each fruit object were obtained directly. Secondly, hand-eye calibration was carried out through the least square method. Finally, the path planning of the harvesting robot was analyzed simply. Experimental results showed that the effects of the partial occlusion and invalidation of stereo matching in the presence of complex scene on the automatic picking system was weakened, and the positioning accuracy of the fruit object was less than 8mm. Therefore the reliability and precision of fruit gripping were improved significantly.

Key words　Fruit harvesting robot, Stereo vision, Hand-eye calibration, Recognition

引言

果蔬采摘作业一直是个亟待解决的问题[1]。德国、荷兰和日本等发达国家研究开发了多种类型的果蔬自动采摘机器人,如苹果、黄瓜和樱桃等自动收获机器人[2~4],但在果实识别率、采摘成功率等方面还存在尚待解决的问题。

国内果蔬采摘机器人的研究工作也较多[5~11],但大多局限在采摘机器人的视觉系统、机械手和末端执行器等单一的功能模块,其中视觉系统的研究大多是在单果无遮挡的理想条件下进行的。

本文基于立体视觉构建一个水果采摘机器人系统,即利用视觉传感器获取环境图像,计算出果实目标相对于机器人坐标系的位置,然后驱动机器人到达目标位置并抓取。重点研究复杂环境下果实目标的可靠识别定位问题,并分析系统的手眼标定与轨迹规划等。

1　果实采摘机器人系统构建

整个果实采摘机器人实验平台主要由机械手、视觉系统、末端执行器和计算机组成,如图 1 所示。

为了减少构建系统的时间,采用了日本安川

收稿日期: 2009-06-08　修回日期: 2009-08-10
* 国家"863"高技术研究发展计划资助项目(2006AA10Z259)
作者简介: 周俊,副教授,主要从事农业机器人、机器视觉与模式识别研究,E-mail: zhoujun@njau.edu.cn

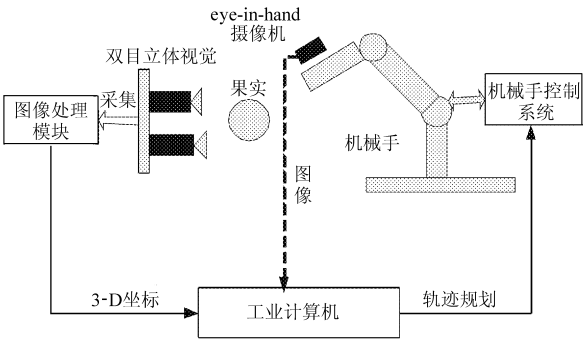

图 1　采摘机器人系统组成

Fig. 1　Framework of fruit harvesting robot

6 自由度通用工业机器人，在计算机的控制下，它既可执行点到点的运动，也可按关节角进行运动。视觉系统采用多摄像机视觉控制技术，应用了 Bumbelee2 立体视觉模块，可以在较大范围内进行采摘目标的搜索与定位，该模块也将用于后续移动式果蔬采摘机器人的视觉导航。同时，还添加了眼在手上（eye-in-hand）固定方式的单目摄像机，它跟随着机械手一起运动，以实现小尺度精确伺服定位，进一步提高采摘成功率和可靠性。末端执行器采用了电动的二指夹持器，其抓取力与给定电流成比例，并可以保持夹持力恒定。

2　果实识别定位

果实目标的辨识和定位是果实收获机器人的首要任务，是影响果实抓取成功率的关键因素。采摘过程中，机器人末端执行器的工作位置不仅由果实目标位置决定，也受采摘方式的影响。目前常见的果蔬采摘方式有手指抓取采摘[6]、纯气吸采摘[2]和气吸与手指相结合采摘[4]等。本文采用了先让电动夹持器夹持住果实，再结合拧断果柄的方式来实现采摘，这就要求末端执行器的工作中心与果实质心基本重合，因此，果实定位需要确定果实的质心位置。

在双目立体视觉技术中，存在着多种因素影响果实定位的精度和可靠性。由于环境光照、果实形状等不可控因素，使得立体视觉匹配过程中难免会出现部分随机分布的无效匹配点，进而无法获得深度信息而导致采摘失效。运用的立体视觉模块将所有无法匹配的点的深度值均设为 0.376 926 m。

果实不可避免地会存在被叶片等物体遮挡的情况，如果利用目标果实的形心来进行定位，那么该形心在图像平面上就有可能落在遮挡物上。结果立体视觉匹配后得到的空间位置就是遮挡物的位置而不是真正的采摘目标的空间位置，从而造成抓取可能失败。即使在无遮挡等相对理想条件下立体匹配过程不会出现前述情况，但由于图像噪声、图像处理误差以及标定误差等原因，立体信息的精度也同样难以保证，所以，如果单纯依靠形心等少数点来决定果实空间位置则可能存在较大误差。

果实中球形类果实约占 70%，为了克服上述立体视觉技术中存在的几个问题，将利用目标上多个点的三维位置信息重建出果实球模型，然后基于最小二乘法计算果实质心位置。

果实球模型为

$$(x-a)^2+(y-b)^2+(z-c)^2=R^2 \tag{1}$$

其中（a, b, c）为球心在相机坐标系中的坐标。式（1）也可以写成

$$2ax+2by+2cz+R^2-(a^2+b^2+c^2)=x^2+y^2+z^2 \tag{2}$$

对于 n 个点，式（2）可用矩阵的形式表达，即

$$\begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 2z_1 & 1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 2z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2x_n & 2y_n & 2z_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ R^2-(a^2+b^2+c^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2+y_1^2+z_1^2 & x_2^2+y_2^2+z_2^2 & \cdots & x_n^2+y_n^2+z_n^2 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式（3）可以简写成

$$\boldsymbol{Am}=\boldsymbol{B} \tag{4}$$

利用最小二乘法，可以解得

$$\boldsymbol{m}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B} \tag{5}$$

从而获得球心坐标。

兼顾算法的精度和效率，利用了目标上 8 个点进行目标位置的求解。具体方法是：先以圆形来近似描述果实形状，由 Hough 变换可以得到各个果实在图像平面上的圆心坐标（i,j）和半径 R，这种方法计算简单，果实形心识别准确[12]；然后可方便地得到该果实圆的外接矩形，该矩形左上点的坐标为（$x_{\min}$, $y_{\min}$），右下点的坐标为（$x_{\max}$, $y_{\max}$）；最后将在此矩形区域内随机找出一个点（x,y），坐标为

$$\begin{cases} x=x_{\min}+\mathrm{rand}()\%(x_{\max}-x_{\min}) \\ y=y_{\min}+\mathrm{rand}()\%(y_{\max}-y_{\min}) \end{cases} \tag{6}$$

其中，rand() 是 C ++ 标准函数库提供一个生成均匀分布随机数的函数，返回 0 ~ 32 767 间均匀分布的伪随机整数；% 表示求余数。这样可以避免这些点过于集中，以提高最小二乘法的精度。

当然，这些点（x,y）还必须在果实目标上，而不是遮挡物上，同时这些点处的立体匹配应该符合有效性检验。这样直到找到 8 个点为止，它们的三维坐标将用来拟合出一个球，进而求出目标的质心位置。整个果实识别程序流程如图 2 所示。

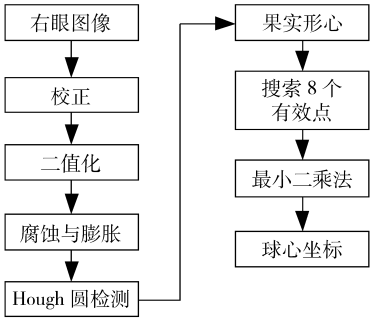

图 2 果实识别定位流程图

Fig. 2 Flow chart of the recognition and positioning of fruits

在实验室中,使用 3 个橙子模型进行实验,如图 3 所示。用 $R-B$ 对原图进行处理后并二值化;然后对图像进行结构元素大小为 3×3 的腐蚀与膨胀,结果如图 3b 所示;对图像基于 Hough 变换检测圆,得到准确的果实形心,把检测出的果实圆轮廓叠加到图 3b 上后得到图 3c。同时,立体视觉模块提供的视差图如图 3d 所示,若已知图像上的点(i,j),可求出其在相机坐标系中对应的三维坐标(x,y,z)。

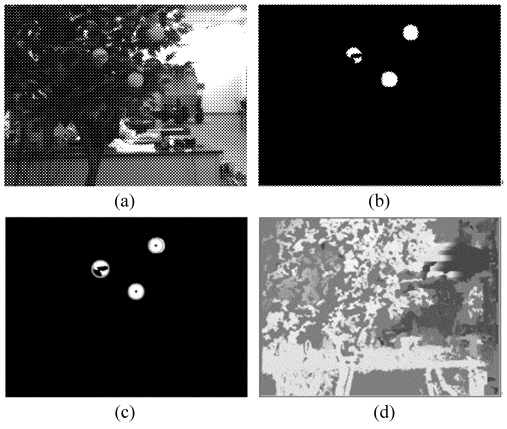

图 3 果实识别定位

Fig. 3 Recognition and positioning of fruits

(a) 右眼校正图像 (b) 二值图 (c) Hough 变换图 (d) 深度图

由图 3c 可以看出,左边的果实被叶片遮挡,其在图像平面上的形心位于叶子上,使用通常的基于形心特征等匹配方法将无法得到准确的果实空间位置。应用提出的方法识别出目标位置,通过机器人示教数据,结合下面描述的坐标变换测量出深度信息,结果如表 1 所示。可见,该方法能够较为准确地获得目标果实的质心位置,有效地消除了遮挡以及匹配失效等对抓取成功率的影响,提高了抓取的精度和可靠性。

表 1 果实定位实验结果

Tab. 1 Experimental results of fruit positioning

果实位置	果实质心位置			Z 测量值/mm
	X/mm	Y/mm	Z/mm	
左边	-137.5	-227.3	1 434.3	1 441.6
中间	-51.3	-354.7	1 459.1	1 452.5
右边	96.9	-345.8	1 566.6	1 564.2

3 手眼标定

手眼标定就是找到相机坐标系与机器人坐标系之间的约束关系,以便实现果实目标在机器人坐标系中的定位。

由于立体视觉模块可以给出果实在相机坐标系下的三维坐标,则该系统标定简化为求解相机坐标系与机器人基座坐标之间的映射矩阵。一般,坐标系$\{A\}$和$\{B\}$之间的映射矩阵为

$$\begin{bmatrix} {}^{A}\boldsymbol{P} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{A}_{B}\boldsymbol{R} & {}^{A}\boldsymbol{P}_{B} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{B}\boldsymbol{P} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中 ${}^{A}_{B}\boldsymbol{R}$——旋转矩阵 ${}^{A}\boldsymbol{P}_{B}$——平移矩阵

${}^{A}\boldsymbol{P}$——点在坐标系$\{A\}$中的坐标向量

${}^{B}\boldsymbol{P}$——点在坐标系$\{B\}$中的坐标向量

由式(7)又可以将机器人与相机坐标之间映射矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & P_x \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & P_y \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中 X_r、Y_r、Z_r——点在机器人坐标系中的各坐标分量

X_c、Y_c、Z_c——点在相机坐标系中的各坐标分量

其中 $\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$是一个单位正交矩阵,$[P_x \quad P_y \quad P_z]^{\mathrm{T}}$是平移矩阵。

系统标定中,通过将机器人示教到相机坐标系的原点处,记录机器人末端运动距离可得到某一配置下的平移矩阵为

$$[P_x \quad P_y \quad P_z]^{\mathrm{T}} = [-400.575 \quad 719.619 \quad 342.532]^{\mathrm{T}}$$

对于旋转矩阵,先在机器人的工作范围内随机选取 n 个目标点,这些点在相机坐标系中的位置由立体视觉模块提供,在机器人坐标系中的坐标值可以测量获得,具体方法与前面测量相机坐标系原点的方法类似。然后把这些点代入式(8),于是可以得到一个由 $3n$ 个方程构成的方程组。实验中,选取了 10 个标定点,利用最小二乘法计算出的相机坐标系相对于机器人的映射矩阵 $\boldsymbol{T}$ 为

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} 0.018\,1 & 0.003\,9 & 0.991\,8 & -400.575 \\ -0.991\,8 & 0.029\,4 & 0.049\,7 & 719.619 \\ -0.000\,9 & -0.984\,6 & 0.011\,3 & 342.532 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

应用上述标定方法，通过将机械手的末端示教到每个目标点的位置而获得三维坐标的实测值，目标点在机器人坐标系中位置计算值与实测值之间的差值为标定误差，如图 4 所示。

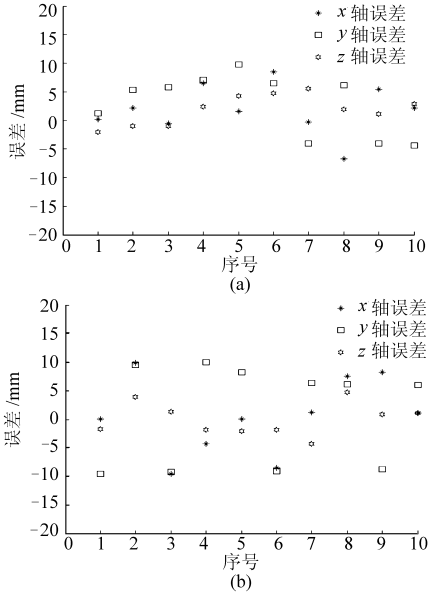

图 4　手眼标定误差

Fig. 4　Error of hand-eye calibration

（a）参与标定的 10 个点　（b）任意选取的 10 个测试点

由实验结果可见，目标点在机器人坐标系中位置坐标的各个分量上最大标定误差小于 10 mm。实际上，此误差是一综合误差，它把立体视觉模块自身等环节的测量误差也包含其中。根据本文的采摘方案，该精度能够满足自动采摘任务的需求。当然，在后续抓取研究中还将用眼在手上的视觉伺服控制技术进一步改善定位精度。总之，该标定算法操作简单、无需昂贵的实验设备，适合现场标定。

4　采摘机器人的轨迹规划

轨迹规划就是根据作业任务要求，确定轨迹参数并实时计算和生成运动轨迹，它是果实收获机器人运动控制的依据。对于果蔬收获机器人来说，一般只要求保证末端执行器到达目标点时满足规定的位姿要求，而如空间避障等问题可以结合果蔬的栽培模式调整，得到一定程度的简化，如文献[2]就提出通过修剪果树枝条的办法使得果实容易识别和采摘。

针对设计的自动采摘机器人实验系统，考虑球形果实的采摘要求，这里给出了分段路径规划实现机器人的运动控制，如图 5 所示。根据果实生长的姿态调整机器人末端执行器处于适当的采摘姿态，实验中暂采用了水平姿态。利用计算出的果实目标 G 在机器人坐标系 xOy 平面内的投影点 G'，控制机器人的 S 关节使得末端执行器旋转到与 x 轴夹角为 α 处

$$\alpha=\arctan(Y/X) \tag{9}$$

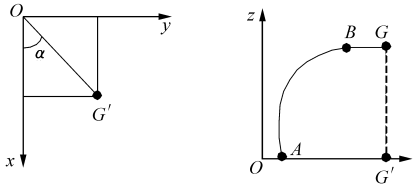

图 5　采摘机器人轨迹规划示意图

Fig. 5　Schematic diagram of robot path planning

机器人将在直线 OG' 与机器人 z 轴组成的平面内运动，从 A 点到 B 点通过点到点的圆弧插补方式运动，运动过程中末端姿态保持不变。B 点的坐标为

$$\begin{cases} X_B=\dfrac{X(\sqrt{X^2+Y^2}-L_{BG})}{\sqrt{X^2+Y^2}} \\ Y_B=\dfrac{Y(\sqrt{X^2+Y^2}-L_{BG})}{\sqrt{X^2+Y^2}} \\ Z_B=Z \end{cases} \tag{10}$$

式中　L_{BG}——线段 BG 的长度

由 B 点直线插补到果实 G 位置，以水平姿态抓住果实，通过旋转末端执行器使得果实与果梗分离，完成一次采摘任务。在整个轨迹规划中，由于末端执行器的姿态保持不变，只是在 $G'Oz$ 平面内作平移运动，简化了机器人求运动学逆解的过程。同时，相应的果实采摘区所需空间小，末端执行器遇到障碍的可能性也会减小。

5　结论

（1）构建了一个果实采摘机器人系统，在实验室条件下实现了球形果实的自主采摘。

（2）运用果实球模型研究了多果有遮挡条件下的果实识别定位，有效地消除了遮挡以及匹配失效等因素的影响，提高了抓取的精度和可靠性。

（3）使用了最小二乘法进行了采摘机器人手眼精确标定，各坐标分量的标定误差都在 10 mm 以内，能够满足果实抓取的需要。

（4）采用分段路径方法实现了采摘机器人的轨迹规划，所需采摘空间较小，可以减小遇到枝叶等障碍的概率。

参 考 文 献

1 宋健,张铁中,徐丽明,等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2006,37(5):158~162.
Song Jian, Zhang Tiezhong, Xu Liming, et al. Research actuality and prospect of picking robot for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5):158~162. (in Chinese)

2 Baeten J, Donne K, Boedrij S, et al. Autonomous fruit picking machine: a robotic apple harvester[M]. Springer Tracts in Advanced Robotics (STAR), 2008, 42: 531~539.

3 Van Henten E J, Van't Slot D A, Hol C W J, et al. Optimal manipulator design for a cucumber harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(2):247~257.

4 Tanigaki K, Fujiura T, Akase A, et al. Cherry-harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 65~72.

5 张铁中,陈利兵,宋健. 草莓采摘机器人的研究:Ⅱ. 基于图像的草莓重心位置和采摘点的确定[J]. 中国农业大学学报,2005,10(1): 48~51.
Zhang Tiezhong, Chen Libing, Song Jian. Study on strawberry harvesting robot :Ⅱ. images based identifications of strawberry barycenter and plucking position[J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(1):48~51. (in Chinese)

6 宋健,孙学岩,张铁中, 等. 开放式茄子采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(1):143~147.
Song Jian, Sun Xueyan, Zhang Tiezhong, et al. Design and experiment of opening picking robot for eggplant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1):143~147. (in Chinese)

7 赵庆波,赵德安,姬伟,等. 采摘机器人视觉伺服控制系统设计[J]. 农业机械学报,2009, 40(1):152~156.
Zhao Qingbo, Zhao Dean, Ji Wei, et al. Vision servoing control system of fruit harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1):152~156. (in Chinese)

8 张志勇,何东健,张建,等. 苹果采摘机器人手臂控制研究[J]. 中国农业大学学报,2008,13(2):78~82.
Zhang Zhiyong, He Dongjian, Zhang Jian, et al. Research on controlled system of apple picking robot arm[J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(2):78~82. (in Chinese)

9 蒋焕煜,彭永石,申川,等. 基于双目立体视觉技术的成熟番茄识别与定位[J]. 农业工程学报,2008,24(8):279~283.
Jiang Huanyu, Peng Yongshi, Shen Chuan, et al. Recognizing and locating ripe tomatoes based on binocular stereo vision technology[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8):279~283. (in Chinese)

10 刘继展,李萍萍,李智国. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计[J]. 农业机械学报,2008,39(3):109~112.
Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo. Hardware design of the end-effector for tomato-harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):109~112. (in Chinese)

11 李秦川,胡挺,武传宇,等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述[J]. 农业机械学报,2008,39(3):175~179.
Li Qinchuan, Hu Ting, Wu Chuanyu, et al. Review of end-effectors in fruit and vegetable harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):175~179. (in Chinese)

12 谢志勇,张铁中,赵金英. 基于 Hough 变换的成熟草莓识别技术[J]. 农业机械学报,2007,38(3):106~109.
Xie Zhiyong, Zhang Tiezhong, Zhao Jinying. Ripened strawberry recognition based on Hough transform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3):106~109. (in Chinese)

(上接第 117 页)

11 王光辉, 宁国鹏, 王德成,等. 一种牧草干燥与茎叶分离装置: 中国, 200810227636.4[P]. 2009-04-29.

12 ASAE Standards. S358.2 Dec 99—2000. Determination of forage moisture content[S]. St. Joseph, MI USA: ASAE. 2004.

13 Bilanski W K, Graham W D, Mowat D N, et al. Separation of alfalfa silage into stem and leaf fractions in a horizontal air stream[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5): 1 684~1 690.

14 Chrisman J, Kohler G O, Mottola A C, et al. High and low protein fractions by separation milling of alfalfa[M]. Agricultural Research Services, USDA, 1971: 74~75.

15 茆诗松. 回归分析及其试验设计[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1986.