

农业机器人视觉传感系统的实现与应用研究进展

胥 芳, 张立彬, 计时鸣, 万跃华, 张 宪, 张 利  
(浙江工业大学)

摘 要: 论述了农业机器人视觉传感系统的主要实现技术和当前的应用现状, 包括基于视觉传感原理的距离检测技术, 基于视觉传感原理的工作对象特征识别技术和基于视觉传感原理的运动导航技术。基于双目立体视觉的测距方法可应用于葡萄和番茄采摘机器人, 配备激光光源和红外光源的测距系统可在室外有效抵抗日光变化对检测结果的影响。几何形状、灰度级、颜色, 尤其是农产品表面的反射光谱特性, 可以用于农业机器人识别操作对象。人工路标方法是实现农业机器人视觉导航的简单方法, 另外, 直接基于田间作物在空间排列的特征也可实现农业机器人的视觉导航。最后讨论了农业机器人视觉传感系统的未来发展趋势。

关键词: 农业机器人; 视觉; 距离检测; 特征识别; 导航

中图分类号: TP242 3 文献标识码: A 文章编号: 100226819(2002)0420180206

计算机视觉是机器人获取工作环境状况、工作对象和机器人自身位置等信息的最基本技术手段。相对于工业机器人而言, 应用于农产品生产领域的农业机器人其工作环境和工作对象更加复杂, 需要更加高级的计算机视觉传感系统与之相匹配。农业机器人视觉传感系统的主要任务包括: 1) 确定机器人或其执行机构与工作对象(植物或动物)之间的相对距离; 2) 确定工作对象的品质、形状和尺寸; 3) 机器人行走运动的视觉导航。本文将讨论完成该任务的农业机器人视觉传感系统的基本实现技术, 介绍其当前的应用现状, 并讨论未来的发展趋势。

1 基于视觉传感原理的距离检测技术

用于农产品采摘的农业机器人需要具备在适当空间范围、光照条件和枝叶遮挡情况下寻找被采摘物体和确定被采摘物体空间位置的能力。首先, 准确地检测机器人与被采摘物体之间的距离是十分重要的, 视觉传感技术是距离检测的一种有效方法。

基于视觉传感原理的距离检测方法中最常用的方法是双目立体视觉方法<sup>[1]</sup>。通过双目视觉传感器所获得的两幅图像, 便可计算出物体在三维空间中的位置。其基本原理如图 1 所示。在图 1 中,

$$X = ZX_1 \text{ } \ddot{o} f \tag{1}$$

$$X - d = ZX_r \text{ } \ddot{o} f \tag{2}$$

其中  $d$ ——两个安装在机器人上的 CCD 摄像机之间的距离;  $f$ ——摄像机的焦距, 由式(1)、(2)可以得到机器人上的摄像机距被采摘对象  $P$  的距离值

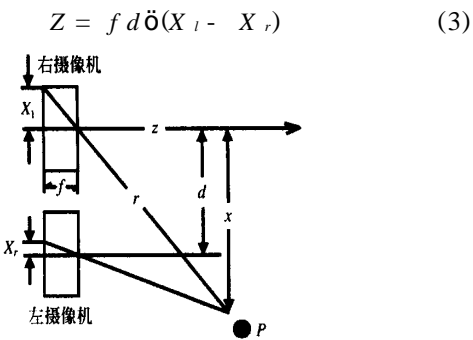


图 1 双目视觉测距原理图

Fig. 1 Principle of binocular telemeter based on vision

CCD 摄像机一般用彩色摄像机, 而直接使用 PSD (Position Sensitive Device) 三维视觉传感器则效果更佳。

摄像机一般应该安装在机器人的执行器(例如机械手)的末端, 从而可以与执行器一起移动并接近物体, 当执行器向物体方向移动时, 代表被采摘对象的像素数量是逐渐增加的, 因此有利于充分利用摄像机的像素数量提高检测精度, 在需要的时候可以有效避开在被采摘对象前的障碍物。

农业机器人视觉系统需要解决一些特殊的问题, 例如对水果位置的检测, 就涉及一些复杂因素。水果具有不同的外形、大小和颜色, 尤其是其在果树上出现的位置是随机的, 而对于果树来说, 又有不同的高度、排列和树形结构, 同时采摘动作和风的作用会使水果和树枝产生不断的晃动, 另外, 雨、灰尘、湿度和光照等环境因素的影响, 树叶和树枝的遮挡等等因素都会对水果的位置的检测带来很大困难<sup>[2, 3]</sup>。Parrish 和 Goksel 在用计算机视觉去识别和定位树上的水果方面的研究取得了一定的成功<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2001207219  
作者简介: 胥 芳 (1964- ), 女, 副教授, 硕士, 研究方向: 机电控制及自动化。杭州市 浙江工业大学机电工程学院, 310014  
© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

在日本和许多欧美国家, 视觉测距方法已被成功地应用于农产品的位置检测。例如, 在一种葡萄采摘机器人上, 采用双目立体视觉测量机械手与葡萄之间的距离。为了配合葡萄采摘机器人的运作, 对葡萄的种植模式进行了专门的设计, 葡萄架为水平形式, 葡萄长在葡萄架下面, 而枝叶基本长在葡萄架上面, 葡萄被枝叶遮住的可能性较小。基于视觉检测结果, 机器人指挥其 5 自由度极坐标型机械手在葡萄架下的运动, 机械手的终端执行器配有手指和剪刀, 采摘时, 用手指抓住果房, 用剪刀剪断穗柄。为便于机器人采摘, 番茄的种植也采用了类似的原理, 图 2 表示在温室中采用果实向下方式种植的番茄<sup>[1]</sup>。

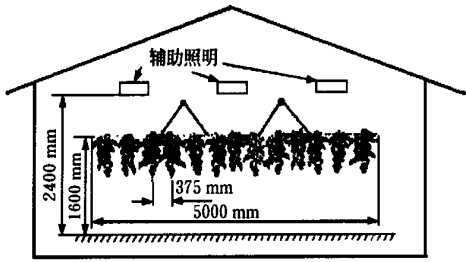


图 2 便于机器人采摘的番茄种植方法

Fig 2 Planting method of tomato for convenience of robot picking

仔细选择视觉距离测量系统的照明光源十分重要, 因为对在野外或温室内工作的机器人而言, 变化的阳光对图像摄取的影响是非常巨大的。因此, 选择配备激光光源和红外光源的测距系统, 可有效抵抗日光变化对检测结果的影响, 从而获得更加准确的测量结果。对于选用普通光源的视觉距离测量系统, 则应使用基于特定反射光谱的滤光器去除阳光的影响。另外, 激光、红外、声学、射频信号也可作为辅助信号帮助检测物体间的距离, 此时为了确定水果在树上位置的 3 个坐标参数, 只需要二维照片即可<sup>[3]</sup>。

水果确切位置的确定由水果中心的坐标决定。在目前的研究成果中, 一些研究者获得了错误率不超过 5%。确定水果中心坐标可以通过 Hough 变换得到, 该变换用于检测图像中的直线和曲线, 对于在噪声图像中确定水果中心也有同样的效果<sup>[5]</sup>。

2 基于视觉传感原理的对象特征识别技术

基于视觉传感原理获取的视觉图像, 可以从中提取农产品外表的光学特征和形状信息, 进而区分被采摘的果实与附近的枝叶, 判定果实的生长期、成熟度和品质。因此, 视觉传感方法被广泛应用于农业机器人领域, 用以对工作对象的识别和分类。

辨识树上水果的最基本方法是检测其几何形

状、灰度级及颜色。用于形状识别的特征很多, 如面积、周长、Feret 直径、矩、分形数、横断面等。一般而言, 识别物体的几何形状只需处理黑白图像即可, 但在自然界中, 果实和树叶、果实和果实之间通常会有重叠, 因此, 还需要对临近区域作灰度级分析。基于灰度级的阈值来区分物体, 需要图像中的物体和背景有不同的灰度等级, 此类操作可通过硬件实现, 速度可以很快。仅根据灰度, 在果园中区分水果和背景很困难, 在太阳下, 水果看起来会比树叶亮得多; 而在阴影中, 树叶可能会显得比水果亮。有时从灰度图像中提取的纹理特征也非常有用, 如角度二阶矩、对比度、逆差分矩和相关性等<sup>[6]</sup>。

基于水果表面的反射光谱有利于识别水果果实、树叶和树枝。大量研究表明, 根据水果表面反射光谱的不同, 可分为两类, 一类在 700~ 1 100 nm 波段比叶子具有更高的反射系数, 而另一类则比叶子的反射系数要低。造成这种差别的原因是由于水果表面水分量的差异, 后者大都是多汁水果, 如图 3。

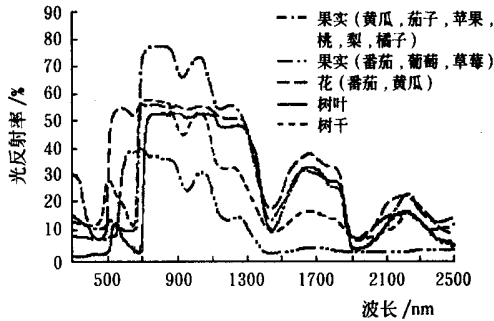


图 3 水果果实、花、叶和树干的光谱特性

Fig 3 Spectra of fruit, bloom, leaf and bole

柑橘类水果、苹果、西红柿等, 其果实和叶子的反射光谱特性的差异是显而易见的, 因此, 可以使用彩色 CCD 摄像机来进行的识别。彩色 CCD 摄像机可以同时获取  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三个分量的二维灰度级图像, 并根据被识别对象外表的光学特征, 选择其中一个、两个或三个分量的图像作为特征识别的信号来源。例如, 通过比较  $R$  分量图像和  $G$  分量图像, 就可正确区分出成熟的西红柿果实和叶子。而当要把未成熟的西红柿果实从绿色的叶子和茎杆中区分出来时, 需要通过 670 nm 和 970 nm 的干涉滤光器摄取图像, 试验表明, 550 nm 和 850 nm 的干涉滤光器对于区分黄瓜的果实是有效的, 这里 670 nm 是叶绿素吸收带, 970 nm 是水吸收带, 550 nm 是绿光波长的中心, 850 nm 是果实和叶子之间的反射率有较大差别的波长。这些波长是非常重要的, 即使是绿颜色的果实, 也能有效地与图像中的其它物体区分开<sup>[7, 8]</sup>。

利用光谱特性分割果实与叶子是一种有效的方

法,但必须找到一组能够进行有效分割的色彩特征。色彩在一副很亮或者很暗图像上很难辨别,因此,必须设计受光照影响较少的系统才实用。

照度对采用三原色  $R、G、B$  模型的图像,有很大的影响,如果进行适当变换,得到色度模型,就可以忽略,因此,色度模型可以克服照度变化的问题。 $R、G、B$  模型与色度模型的关系如下

$$r = R \div Y \tag{4}$$

$$g = G \div Y \tag{5}$$

$$b = B \div Y \tag{6}$$

其中  $Y$  是 3 种单色总和。处理色度模型需要花费更长的时间,因为需要将  $R、G、B$  模型中的数据转换到色度模型中。

根据反射光谱的差异,可以将图像分割成几个有意义且有区别的区域,同一区域包含的像素都具有相类似的属性,而几个不同区域之间则在属性上有较明显差别。实现这样的分割可以通过以下技术

完成: 1) 寻找在属性上不连续的像素(比如灰度级的跳变),组合边缘像素以获得独立的区域; 2) 寻找在统计特性上相似的像素(比如灰度级的直方图)。

研究表明,通过夜间获取的图像,避开阳光的干扰,可以获得很高的水果识别效率。水果识别问题的研究已经取得了非常重大的进展<sup>[9]</sup>,但是,实验室结果与果园中获得的结果仍存在很大差异。目前,在桔园中,最多只有 75% 的桔子能够被正确识别(苹果园中也类似),需要做更多的工作来降低识别的错误率,同时也应使得对于不同的水果及作物的识别具有更多的灵活性,对于部分水果从树外看不见,当机械手穿过树枝时,必须能够对其作出快速辨识。用于图像处理的时间也是一个关键的因素,对于一幅典型的水果图像的处理,需要的时间为 200~ 300 ms。因此,需要有快速的算法和并行处理技术才能使机器视觉系统可以和手工采摘竞争。图 4 和图 5 给出了两种分别用于采摘桔子和黄瓜的机器人。



图 4 采摘桔子的机器人

Fig 4 Robot for picking orange



图 5 采摘黄瓜的机器人

Fig 5 Robot for picking cucumber

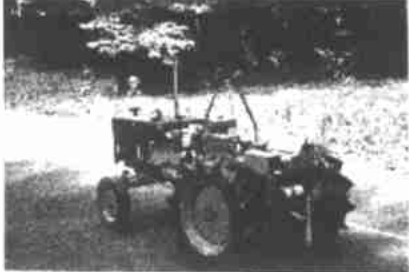


图 6 视觉导航拖拉机式的机器人

Fig 6 Robotized tractor with vision navigation function

3 基于视觉传感原理的运动导航技术

农业机器人在空间的自主行走运动需要导航系统的指挥,基于视觉传感原理的视觉导航技术是农业机器人导航方式中研究较为深入的一种。所谓视觉导航,就是机器人基于 CCD 摄像机获取到的反映周边环境信息的图像,作出行动路径规划,并指挥机器人在无人干涉情况下,自主移动到预定的目标。视觉导航具有信息探测范围宽,目标信息完整的优点。

在用于农业机器人的视觉导航方法中,最简单的方法是类似于在工业机器人领域广泛采用的人工路标方法。该方法采用白色标记线作为路标,敷设于机器人行走的地面上,机器人的视觉传感系统在行走过程中不断监测标记线,并随时控制机器人的转向机构调整机器人的移动方向。一般采用两只视觉传感器,检测机器人相对基准线的角度和距离,以保证机器人与标记线的距离偏差为最小,最终在标记线的引导下到达指定的目标。这种方法具有路径标

识简单,可靠,成本低,柔性好,图像处理易于实现的优点,但对机器人的作业环境有很高要求,一般用于地面条件良好的温室<sup>[10]</sup>,图 6 是日本产的名为“Pochi”的具备视觉导航功能的拖拉机式的机器人。

基于田间作物在空间排列的特征进行视觉导航的农业机器人已经问世<sup>[11~ 14]</sup>,此类机器人可以根据田间作物的图像判断作物排列行与机器人的相对位置,规划出行走基准线,通过图像中央向左右两边巡查的方式查出边界点,利用两条道路边界平行的特点,求得图像上无限远处的点和机器人的自身位置及行走方向,此类机器人已被用于喷洒除草剂和施肥。图 7 是视觉导航系统拍摄的的图像及其  $HS$  (色调,色饱和度 and 亮度)变换的结果。

视觉导航系统必须具有实时性和鲁棒性<sup>[15]</sup>。农业机器人需要在具有复杂景物的环境中工作,视觉导航系统必须具备实时地将障碍物与背景分开的功能,因此,高速的图像处理硬件和合理的处理算法是保证实时性的基础。一种直线阵列型的视觉传感器

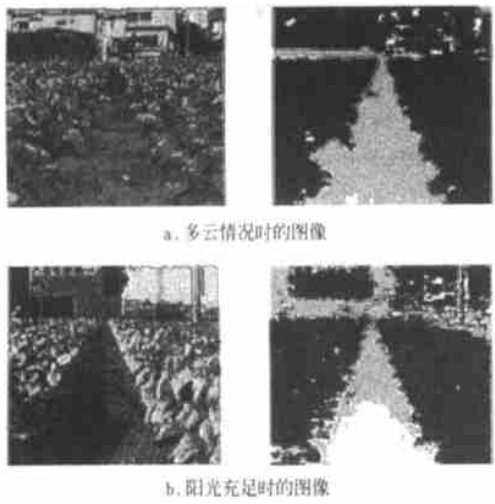


图 7 视觉导航图像及其 H IS 变换结果  
Fig 7 Images for vision navigation and their H IS transform s

可以用于农作物行与列的检测,其工作原理是基于农作物与农田在纹理方面的差异实现特征的快速提取<sup>[16]</sup>,在机器人以 0.25 m/s 速度运动时,其导航控制精度可达到 0.02 m。基于 DSP (digital signal processing) 芯片技术的高速图像处理卡可以大幅度提高图像处理的速度,它可以直接在图像处理卡上完成图像的采集、数字化、分析和处理等全部功能。

农田景物图像受光照条件、图像噪声、摄取角度和距离等多因素的影响,如图 7 所示,很难获得非常清晰的图像,另外,图像中的田埂和农作物等可能丧失细节轮廓特征,边缘也不理想,因此,一般的边缘检测算子很难求得准确的轮廓边缘。由于纹理特征对光照条件和图像噪声不敏感,因此,基于纹理特征的分析方法可以有效提高轮廓边缘检测的鲁棒性。提高导航系统的鲁棒性的另一有效方法是采用多传感器信息融合的技术,使用这种方法检测的环境信息,具有冗余性、互补性。对于图像中环境的不确定因素的处理,则需要借助模糊逻辑和神经网络技术。

4 农业机器人视觉传感系统的发展趋势

信息传感技术是农业机器人发展的一个技术关键,而视觉传感是信息传感技术中最令人感兴趣的方法之一。鉴于农业机器人的工作环境和对象较工业机器人要复杂得多,因此,视觉传感所面临的困难也比在工业领域要大得多。在未来,值得关注的技术发展可能涉及以下几个方面:

1) 农业机器人用视觉传感器件的技术水平将得到提高。CCD 图像传感器是农业机器人使用的主要的视觉传感器件,经过近 30 年的发展,目前已

经从最初简单的 8 像元移位寄存器发展至具有数百万至上千万像元的集成器件。目前 CCD 像元数已从 100 万像元提高到 2 000 万像元以上,5120 × 5120 像元帧转移 CCD 已经问世,荷兰飞利浦成像技术公司研制成功了 7000 × 9000 像元的 CCD,16000 × 16000 像元的 CCD 有望在 2001 年问世,日本采用拼接技术开发成功 16384 × 12288 像元即 (4096 × 3072) × 4 像元的 CCD 图像阵列传感器。视觉传感器件的技术的发展将为农业机器人准确识别所面对的复杂环境和工作对象奠定基础。

2) 以视觉信息传感与非视觉信息传感相结合的计算机泛视觉系统将在农业机器人上得到广泛应用。计算机泛视觉理论的特点在于其所处理和利用的信息资源和智能资源的广泛性,侧重于研究以多类信息资源(视觉与其它非视觉信息)综合集成方法和人机智能综合集成方法解决工程中的信息感知问题。鉴于在农业机器人视觉感知过程中,二维图像的处理必然会涉及视觉不适定问题的求解,而引入非视觉信息的辅助支持是不适定问题求解的有力手段,通过非视觉感知与视觉感知的优势互补机制,可大大提高农业机器人的感知功能,如将视觉传感与声纳技术结合,可实现机器人更加精确的定位。

3) 基于主动光源的视觉信息传感技术将得到发展。目前绝大多数的农业机器人借助普通照明光源或日光照明,但是由于工作照明对象的复杂性和日光强度的不稳定性,导致获取图像质量的不稳定,采用主动光源(即由机器人根据视觉传感器采集图像的需要而自行发出的具有特定特征的光源)照明可有效改善图像质量、为图像附加更加多的信息并有效防止自然光的干扰。例如阵列式裂隙光照明,激光扫描照明,远红外光源照明都可取得好的效果,甚至可通过单幅图像获得三维信息。

5 结 语

从总体上来说,农业机器人技术远不如工业机器人技术发展得成熟,由于农业机器人在技术和经济方面的特殊性,目前还没有普及,但随着农业生产向规模化、多样化、精确化发展,以及逐步出现的农业劳动力不足的问题,可以预计,随着信息技术向农业领域的渗透,农业现代化技术的发展,农业工程技术的日趋成熟,农业机器人将越来越多地进入农业生产过程中。本文所介绍各类视觉传感技术对于促进农业机器人进入生产实际均会发挥重要作用,它们也会随着农业机器人的普及得到发展。

## [参 考 文 献]

- [1] Kondo N, Ting K C. Robotics for plant production [J]. Artificial Intelligence Review, 1998 (12): 227~243
- [2] Slaughter D C, Harrell R C. Color vision in robotic fruit harvesting [J]. Trans of the ASAE, 1987, 30 (4): 1144~ 1148
- [3] Sarig Y. Robotics of fruit harvesting: a state-of-the-art review [J]. J of Agric Engng Res, 1993, 54: 265~280
- [4] Parrish E A, Goksel A K. Pictorial pattern recognition applied to fruit harvesting [J]. Trans of the ASAE, 1977, 20: 822~ 827.
- [5] Whittaker A D, Miles G E, Mitchell O R. Fruit location in a partially occluded image [J]. Trans of the ASAE, 1987, 30: 591~ 597.
- [6] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I. Textural features for image classification [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1973, 3 (6): 610~ 621.
- [7] Endo S. Visual sensor for recognizing fruit (Part I) [J]. J of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1987, 49(6): 563~ 570
- [8] Kondo N, Nakamura H, Monta M, et al. Visual sensor for cucumber harvesting robot [J]. Acta Horticultura, 1994, 399: 239~ 245
- [9] Takoi K, Hamrita, Tollner E W, Robert L. Schafer. Toward fulfilling the robotic farming vision: advances in sensors and controllers for agricultural applications [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2000, 36 (4): 1026~ 1032
- [10] Nohsoh K. A real time highway image white line detection system based on vanishing point estimation [J]. T IEE Japan, 1993, 113C (2): 139~ 148
- [11] Marchant J. Tracking of row structure in three crops using image analysis [J]. Computer and Electronics in Agriculture, Japan, 1996, 15: 161~ 179
- [12] Torii T, Kitani O, Inou N. Analysis of crop row for agricultural mobile robot (part 1) [J]. J of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1995, 57 (6): 53~ 59
- [13] Torii T, Kitade S, Teshima T. Crop row tracking by an autonomous vehicle using machine vision (part 1) [J]. J of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2000, 62(2): 41~ 48
- [14] Kanuma T, Torii T. Image analysis of crop row and position identification [J]. J of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1997, 59(2): 57~ 63
- [15] 沈明霞, 姬长英. 农业机器人视觉导航技术发展展望 [J]. 农业机械学报, 2001, 32(1): 109~ 111
- [16] Hata S. Crop row detector equipped with one dimensional image sensor [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1992, 54(1): 81~ 88
- [17] Reid J F, Searcy S W. An algorithm for separating guidance information from row crop images [J]. Trans of the ASAE, 1988, 31(6): 1642~ 1633

## Advances in Realization and Application of Vision Sensing System of Agricultural Robot

Xu Fang, Zhang Libin, Ji Shiming, Wan Yuehua, Zhang Xian, Zhang Li

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The realization techniques and current development of vision sensing system of agricultural robot are discussed, which include techniques of distance inspection, characteristic recognition of agricultural production and movement navigation of agricultural robot based on vision sensing. The distance inspection method based on binocular telemeter was used for picking grape or tomato by robots. The distance inspection system with laser or infrared beam lights were proved which can help to counteract disturbance of sunlight and obtain accurate results. The geometrical shape, gray level, color, and reflected spectrum especially of farm production, can be used for agricultural robots to recognize the operated objects. The navigation method based on artificial guide line is a simple one for agricultural robot navigation, and the array characteristics of plant are also used for agricultural robot navigation. The future development trend of vision sensing system of agricultural robot is also discussed.

**Key words:** agricultural robot; vision; distance inspection; characteristic recognition; navigation