

基于激光扫描三维图像的树上苹果识别算法^{*}

冯娟^{1,2} 刘刚¹ 司永胜² 王圣伟¹ 任雯¹ 周薇¹

(1. 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;

2. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001)

摘要: 为消除不同光线和复杂背景的影响,提出了一种自动识别树上苹果的算法。使用激光视觉系统获取果树局部的三维图像,参考设定的场景知识对图像背景进行简化;采用基于平滑频率曲线的自动阈值检测方法实现图像的二值化;通过轮廓跟踪技术记录目标边界的走向,据此计算链码和与链码差,并根据两者在果树各部分的变化规律确立相应的准则,以提取苹果的轮廓像素点;利用随机圆环法获得果实的形状特征完成对苹果的识别。实验结果表明,该算法具有较好的实时性,当枝叶遮挡面积小于40%时,果实的正确识别率高于93.75%,且识别效果不受光照条件与果实表面颜色的影响。

关键词: 苹果 激光扫描 三维图像 识别

中图分类号: TP242.6⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0217-06

Apple Fruit Recognition Algorithm Based on Laser Scanning 3-D Image

Feng Juan^{1,2} Liu Gang¹ Si Yongsheng² Wang Shengwei¹ Ren Wen¹ Zhou Wei¹

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education,

China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Information Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: An algorithm was proposed for recognizing apple fruit on the tree in order to eliminate the effects of different light and complex background. A kind of 3-D image of fruit tree was acquired with laser vision system. Image background was simplified by given scene knowledge. A double threshold detecting method was used for binarize image. Contour tracking technology based on chain code was used to record direction of target's boundary. According to change rules of chain code information, relevant standards were established for extracting contour points of apple. Shape features of fruit were obtained by random circle method. The experimental results under various conditions showed that the algorithm was real-time. Its recognition rate reached to 93.75% while fruit area sheltered was less than 40%, and the whole effect was immune to light conditions and fruit surface color.

Key words: Apple Laser scanning 3-D image Recognition

引言

作为农业机器人的外部传感器,机器视觉是其最主要的信息源^[1]。从现有文献可知,采摘机器人的视觉系统多以 CCD 或 CMOS 摄像机为关键组件,对其拍摄的图像进行分析与处理时,非线性的光照

变化、复杂的环境背景使目标的识别率和定位精度受到了一定限制^[2~5]。与之相比,采用激光视觉系统扫描生成的三维图像对光线变化有强抗干扰性,且易于了解作业对象的大小和形状、所处的外界环境,以及与其他作业对象之间的位置关系^[6]。这为采摘机器人的目标识别提供了一种新的探索模式。

收稿日期: 2012-05-04 修回日期: 2012-06-20

^{*} 国家自然科学基金资助项目(31071333)和保定市科学技术研究与发展计划资助项目(12ZG011)

作者简介: 冯娟,博士生,河北农业大学讲师,主要从事机器视觉和农业机器人研究,E-mail: yurenmatou1011@163.com

通讯作者: 刘刚,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术在农业中的应用研究,E-mail: pac@cau.edu.cn

国外相关研究起步较早,Jiménez 等^[7]使用激光测距传感器采集柑橘树信息,融合颜色和形状因子定位果实,但其处理速度不能满足实时性要求;Tanigaki 等^[8]利用研制的激光视觉系统对树上的樱桃进行检测,但识别方法受果实表面颜色影响,具有一定的局限性。国内刘兆祥等^[9]设计了用于苹果采摘机器人的三维视觉传感器,进行了室内单个果实的测距实验,而未对树上果实的识别作进一步的研究。

本文开展基于激光扫描三维图像的树上苹果识别研究,为果蔬采摘的自动化与机械化提供新方法。

1 激光视觉系统

为满足实验要求,构建了激光视觉系统(图 1),包括激光测距仪、步进电动机驱动的直线传动机构、单元控制器和上位机等。

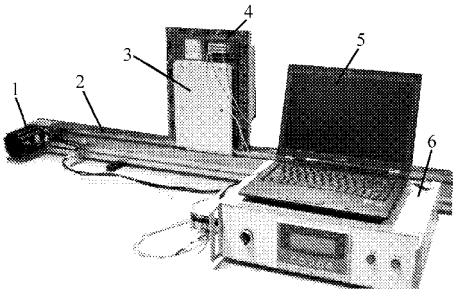


图 1 激光视觉系统实物图
Fig.1 Laser vision system

1. 步进电动机 2. 直线运动单元 3. 滑台 4. 激光测距仪
5. 上位机 6. 单元控制器

1.1 系统硬件

选用德国 SICK 公司生产的 LMS211 型激光测距仪。该测距仪基于飞行时间测量原理,通过内部的旋转镜改变入射光的角度,来检测存在于二维扇形面内物体的距离信息,其测量结果不受物体本身的形状、颜色及表面结构影响。发射的激光波长为 905 nm,在此波长下,植物各部分的反射率比可见光区的更高,而且果实的反射率要明显高于叶子及树枝,可有效提高目标数据的可靠性。根据果实识别的数据采集需要,设置测距仪的扫描角度分辨率为 0.25°,扫描角度为 40°~140°;选用毫米级测量模式,相应的分辨率和精度分别为 10 mm 和 ±15 mm,最大测量距离为 8 m。测距仪每条报文输出采集扫描数据 401 组,每组数据包包含点对点距离 R 和扫描角度 θ 2 个参数,通过 RS-232 传输到上位机。

采摘机器人的工作环境为三维空间,将激光测距仪沿垂直于扫描扇面的方向移动,便可得到扫描范围内树冠的轮廓信息。考虑 LMS211 型激光测距仪质量较大(9.0 kg),研制了水平直线运动的传动

机构,将其逆时针旋转 90°固定在运动单元的滑台上,通过单元控制器调整滑台的运动速度和移动范围。该直线传动机构的重复定位精度为 ±0.1 mm,行程范围为 0.15~1 200 mm,有连续运动和间歇运动 2 种工作模式。

1.2 系统软件

开发了基于 VC++6.0 的数据采集与处理软件,通过 USB 口向单元控制器发送启停命令,设置数据采样周期,并通过 RS-232 总线接收来自 LMS211 的实时测量数据,对数据进行处理后保存在 txt 文件中。Matlab 图像处理软件,用于三维图像生成、预处理和果实识别。

2 三维图像生成与预处理

2.1 三维图像生成

通过激光视觉系统测量得到的点云数据,可看作是一个离散二次曲面,其表达式为

$$F(x,y) = [x,y,d(x,y)]^T \tag{1}$$

式中 $F(x,y)$ ——二次曲面 $d(x,y)$ ——距离

为了更好地显示点云数据间的拓扑关系,按照约定的转换规则:即离扫描位置最近点的灰度为 0,离扫描位置最远点的灰度为 255,位于两者之间的点的灰度公式为

$$g(x,y) = 255 \frac{d(x,y) - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \tag{2}$$

式中 $d_{\max}$ 、 $d_{\min}$ ——最大、最小距离

$g(x,y)$ ——点 (x,y) 的灰度

将所有获得的点云数据转换为标记场景远近特征的三维图像。图 2 为实验室环境中相机拍摄与激光扫描果树局部的效果图。

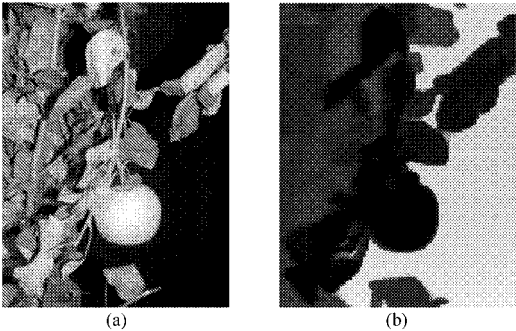


图 2 不同方式获得的富士苹果树局部效果图

Fig.2 Local result of Fuji apple tree
acquired by different methods

(a) 相机拍摄图像 (b) 激光扫描生成的三维图像

2.2 图像预处理

自然条件下生长的果树形态各异,机械臂在实施采摘动作时为了避免与枝干发生碰撞,多从表层果实开始抓起^[10]。由图 2b 图像灰度的变化特点可

知,果实与部分枝叶处于前景位置。为了简化图像的复杂背景,引入场景知识进行约束以提高后面的处理速度。考虑机械臂的伸展空间及树上果实相对激光视觉系统的位置范围,设定的场景知识包括扫描中心到果实的理想距离 d_{exp} (60 ~ 100 cm),扫描果实的角度 θ_f (80° ~ 140°),图中果实半径 r_f (13 ~ 20 像素)。图 2b 已满足 θ_f 的条件,取 d_{exp} 中某一值替代式(2)中的 d_{max} 可得到图 3a。由于受各种离散和随机噪声的干扰,使得生成的三维图像质量降低。为了兼顾平滑噪声与保留细节两方面,这里采用了中值滤波技术,通过 3×3 的像素窗口对图像进行滤波处理,结果如图 3b 所示。

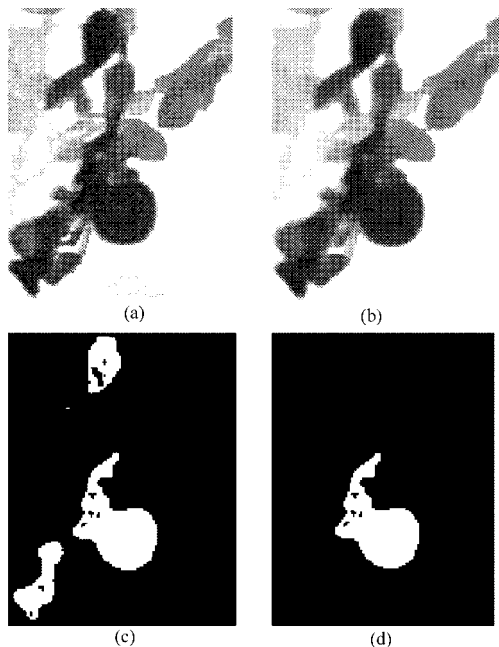


图3 图像预处理

Fig. 3 Image preprocessing

(a) 简化背景图像 (b) 滤波图像
(c) 二值化图像 (d) 小面积去除图像

为了凸显感兴趣的目标轮廓并减少计算的数据量,对图 3b 进行了二值化处理。通常情况下,当目标和背景之间的灰度分布具有明显差别时,表现在直方图上就是 2 个峰值,选取明显的波谷位置即可得到满意的阈值。而绘制的直方图如图 4 参差不齐,且存在多个不明显的波谷,使用常规方法较难得到合理的图像分割阈值。本文提出一种基于平滑频率曲线的自动阈值检测方法,达到了理想的分割效果。步骤如下:

(1) 设图像大小为 $M \times N$, g 为图像上点 (x, y) 处的灰度。

(2) 统计图中各灰度出现次数 $N(g)$, $g = 0, 1, \dots, 255$; 绘制频率分布曲线如图 5 所示。

(3) 采用移动平均滤波器(步长为 5)平滑曲线(图 5); 各灰度出现次数变为 $N'(g)$ 。

(4) 搜索 $g \leq g_T$ (g_T 为灰度搜索范围的最大值)灰度区内曲线 $N'(g)$ 最大峰对应的位置 g_{max} (一方面扫描距离决定了果实区域的灰度偏小; 另一方面果实区域的面积大于零散枝叶的面积, 对应的频率最大)。取 $g_T = 100$ 。

(5) 以 g_{max} 为起点, 搜索分布曲线位于最大峰两侧的最低点位置, 如图 5 中的 a_1 和 b_1 。果实区域的双阈值分别为

$$\begin{cases} \frac{N'(a_1 + 1) - N'(a_1)}{N'(a_1) - N'(a_1 - 1)} \leq 0 \\ (a_1 = g_{\text{max}} + 1, g_{\text{max}} + 2, \dots, 100) \\ \frac{N'(b_1 - 1) - N'(b_1)}{N'(b_1) - N'(b_1 + 1)} \leq 0 \\ (b_1 = g_{\text{max}} - 1, g_{\text{max}} - 2, \dots, 0) \end{cases} \quad (3)$$

这里 $a_1 = 58, b_1 = 20$ 。

(6) 二值化图像(图 3c)分割公式为

$$g'(x, y) = \begin{cases} 255 & (b_1 \leq g(x, y) \leq a_1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (4)$$

$(x = 1, 2, \dots, N; y = 1, 2, \dots, M)$

式中 $g'(x, y)$ ——二值图像中点 (x, y) 的灰度

由于部分枝叶区域灰度与果实接近, 被保留到二值图像中, 与包含果实的连通区相比, 面积较小, 可作为噪声去除。首先对分割后的二值图像进行区域标记, 并计算各个区域面积, 然后去除小于最大面积的区域, 结果如图 3d 所示。

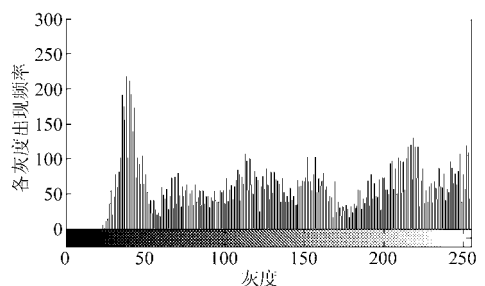


图4 直方图

Fig. 4 Histogram

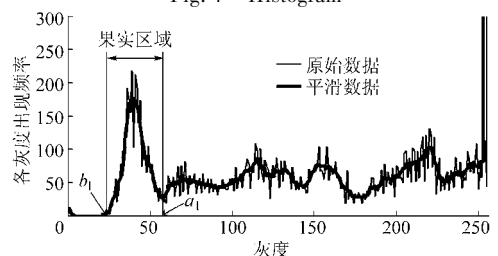


图5 灰度频率分布曲线

Fig. 5 Frequency of each gray level

3 识别算法

3.1 果实轮廓像素点提取

考虑到图像中果实呈类圆形、枝干近似直线状、

树叶呈圆弧状,可通过这些边界特征对候选果实区域进一步过滤,便于后期快速、准确地果实识别。对边界的表达有一些对应的描述参数,如斜率表示边界上各点的指向,曲率是斜率的改变率,用以描述边界上各点沿边界方向变化的情况。本文使用斜率、曲率 2 个特征参数作为提取果实轮廓点的基础。

3.1.1 边界特征的链码表达

链码是对图像边界点的一种编码形式,也是获得图像几何特征的重要方法。对其概念加以扩展,可用于表示曲线的斜率和曲率等^[11]。通过对二值化去噪图像进行八方向链码的轮廓跟踪,可得到目标边界的链码序列。为了提高边界描述的精度,引入平均链码概念,它近似表示直线的方向,当计算的点数固定时,常用链码和代替。由于边界的一个局部可以近似看作直线,所以边界上连续 N 个链码和可近似地表示该处的斜率。在数字化边界上找到某一点曲率的可靠量度是困难的,链码差是指离开与进入某点的 N 个链码和之差,是一个与曲率呈正比的量,能较精确地反映边界的走向。链码和与链码差的计算公式参照文献[12]。

3.1.2 基于链码表达的轮廓点提取方法

以果实轮廓的左切点为起始点,按顺时针方向将其边界走向以链码方式 $\{C(i)\}_n$ 记录下来,其中 i 表示像素的索引值, $C(i)$ 是像素 i 指向 $i+1$ 的方向链码, n 表示链码序列的个数(等同于图中连通域的个数);取步长 $N_a=3$,计算链码和 $S_3(i)$ 与链码差 $D_3(i)$,得到相应的曲线如图 6 所示;根据两者在果树各部分的变化规律,确定如下准则进行果实轮廓点的精准提取:

(1) 标准圆的曲率为恒值,但受果实边界类圆形和离散性的影响,算得的链码差在一定范围内波动变化。设置一定的阈值区间 $D_{\min} \leq D_3(i) \leq D_{\max}$,认为位于该区间的链码序列对应的像素点为候选苹果轮廓点。

(2) 树叶边界也存在圆弧状,对应的链码差可能位于 $D_{\min} \leq D_3(i) \leq D_{\max}$ 内,但相对果实的边界而

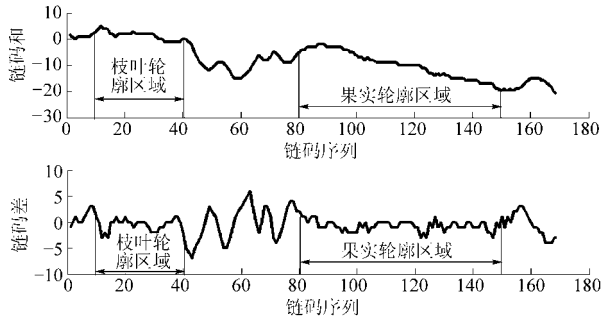


图 6 链码和与链码差曲线

Fig. 6 Graph of chain code sum and chain code difference

言,其满足不等式的链码序列长度较短(图 6)(树叶边界的链码序列长度为 32,果实边界的链码序列长度为 69)。设置一个统计阈值 L_T ,当位于上述区间的链码序列长度超过该值时,对应像素点属于苹果轮廓。

(3) 树枝边界呈直线状,其曲率近似为零,对应的链码差曲线也保持一定长度的连通性,需结合链码和曲线的变化规律对其进行剔除。直线的斜率是恒定不变的,而标准圆的斜率是线性递减的,同样受边界离散性的影响,实际值会出现一定范围的变化。采用线性回归法拟合满足准则(2)所对应的链码和曲线,表达式为 $S_3(i_L) = KC(i_L) + B$,其中 i_L 为连通链码序列号, K 表示拟合直线的斜率, B 表示拟合直线的截距。设置一定的阈值区间 $K \leq K_L < 0$,认为满足该区间要求的链码序列对应点属于果实轮廓。

以上各阈值的选定与扫描中心到果实的距离有关(即与三维图像中果实大小有关),可通过多次轮廓点提取的效果对比获得。文中对应的 $D_{\min} = -3$, $D_{\max} = 2$, $L_T = 60$, $K_L = -0.2$,果实轮廓点提取效果如图 7 所示。

3.2 果实形状特征提取

苹果属于球形果实,反映在二维图像中为圆形,因此,对苹果果实的形状特征提取可简化为果实图像圆心和半径的提取。常用拟合圆的方法有 Hough 变换(HT)和遗传算法等。考虑到 HT 运行速度慢,需要很大的存储空间,遗传算法编程较复杂,本文采用了随机圆环法^[13],其基本思想:三点为一组确定一个圆,在果实轮廓像素上任取若干组获得多个候选圆,利用场景知识中的半径约束判断候选圆;若不满足约束条件,舍去该圆;若满足约束条件,设定范围偏移量,统计果实轮廓上其他的像素点到圆心的距离在半径加或减偏移量范围内的个数,选择个数最多的圆作为最终拟合果实轮廓的圆;其圆心 (x_0, y_0) 为果实的形心,半径 r_0 为果实的半径。图 8 显示图 2b 中果实的拟合轮廓及形状特征参数。

4 实验与结果分析

在北京市昌平区香堂村建立的苹果采摘机器人实验基地进行了果实识别实验。过程中,直线运动单元置于离地面高度为 87 cm 的实验桌上,激光测距仪到目标果实的扫描距离 80 cm,滑台的运行速度 60 mm/s,行程 240 mm,采用连续工作模式;图像处理所用上位机主频 3.2 GHz,内存 1.96 GB,设定的数据采样周期 0.05 s;获得的果实形心坐标和距离信息输入给事先标定好的机械臂,抓取结果可直观地验证识别的准确性。利用该视觉系统共生成

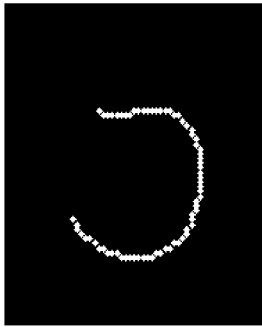


图 7 提取的轮廓点
Fig. 7 Contour points
extraction

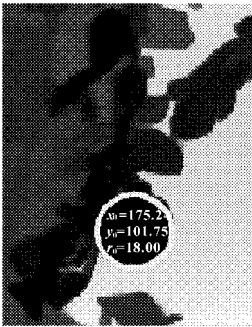


图 8 果实特征提取
Fig. 8 Feature extraction
of fruit

100 幅苹果树的三维图像,其中富士苹果树图像 62 幅,金冠苹果树图像 38 幅;顺光图像 55 幅,逆光图像 45 幅;果实被枝叶遮挡面积小于 40% 的 71 幅。图 9 为实验现场。

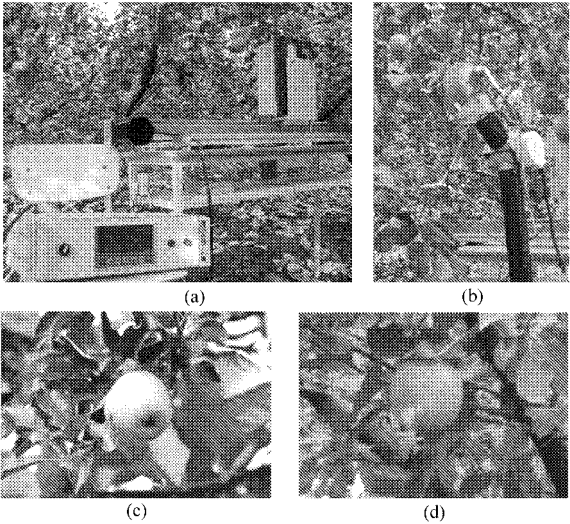


图 9 实验现场图
Fig. 9 Testing spot

(a) 激光视觉系统扫描图 (b) 机械臂抓取果实图
(c) 金冠苹果图 (d) 富士苹果图

以下对其中有代表性的一幅图像的处理过程进行分析。对比图 10a 与图 10b 可以看出,变化的光线对扫描获得的果实轮廓影响不大。这是由于激光测距仪自带光源,且在发射端对激光进行一定频率的脉冲调制,接收端对信号进行同步解调,可以有效抑制自然光对扫描数据的影响。图像的背景较为复杂,但利用场景知识对数据进行约束后,得到了显著简化(图 10c)。通过自动阈值检测法与小面积去除法获得的图 10d,凸显感兴趣的果实区域,具有较好的鲁棒性。由图 10e 可知,利用轮廓点提取算法可有效检测到大部分的果实轮廓点,为后续处理减少运算量、快速获得果实的形状特征提供技术支持。图 10f 显示了识别果实的形心坐标、半径及拟合轮廓圆。处理过程中各步骤的用时情况如表 1 所示。

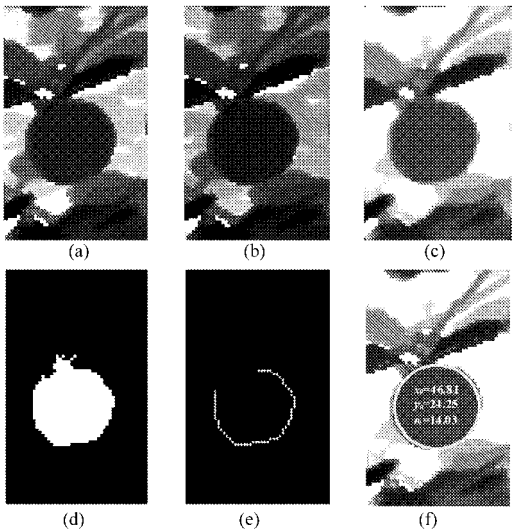


图 10 自然场景中金冠苹果的识别过程
Fig. 10 Golden Delicious apple recognition in
natural environment

(a) 顺光三维图像 (b) 逆光三维图像
(c) 简化背景滤波图像 (d) 二值化去噪图像
(e) 轮廓点提取图 (f) 轮廓拟合与形状特征提取

表 1 算法中各步骤用时

Tab. 1 Runing time of algorithm ms			
处理步骤	运行时间	处理步骤	运行时间
三维图像生成	127. 11	小面积去除	57. 18
简化背景	4. 43	轮廓点提取	226. 16
平滑图像	7. 40	形状特征提取	10. 41
图像二值化	380. 93	总时间	813. 62

为了科学评价本算法识别果实的准确性,引入了一种新的评价指标——特征参数准确提取率 RRC。该指标综合考虑了图像处理后获得的果实半径和形心坐标,计算式为

$$N_{RRC} = [1 - (r_d w_1 + c_d w_2)] \times 100\% \tag{5}$$

其中
$$r_d = \left| \frac{r_m - r_0}{r_m} \right| \times 100\% \tag{6}$$

式
$$c_d = \left(\left| \frac{c_{mx} - x_0}{2c_{mx}} \right| + \left| \frac{c_{my} - y_0}{2c_{my}} \right| \right) \times 100\% \tag{7}$$

式中 r_d ——半径偏差率,%
 r_m ——人工获取的半径
 c_d ——坐标偏差率,%
 c_{mx} 、 c_{my} ——人工获取的 x 、 y 轴坐标值
 w_1 、 w_2 ——半径偏差的权重,取值范围 0 ~ 1,
取 $w_1 = 0. 5$, $w_2 = 0. 5$

将 RRC 大于 90% 作为判断一幅图像中果实准确识别的依据。多幅图像的果实正确识别率计算式为

$$R_A = \frac{N_t - N_{RRC90}}{N_t} \times 100\% \tag{8}$$

式中 N_t ——图像的总数

N_{RRC90} ——RRC 大于 90% 的图像个数

采用本文算法对生成的不同情况的 100 幅三维图像进行了处理,由表 2 中的结果对比可知:不同颜色苹果(富士和金冠)的识别效果无显著差别,具有较好的一致性;遮挡面积成为影响算法识别准确性的主要因素。

表 2 不同情况的果实识别结果对比

Tab.2 Comparison of fruit recognition under different conditions

不同遮挡面积的 果实图像个数/幅	不同品种的 果实图像个数/幅	平均半径 偏差/%	平均坐标 偏差/%	平均 RRC/%	正确 识别率/%
71(遮挡面积小于 40%)	48(富士苹果)	6.12	5.85	94.01	93.75
	23(金冠苹果)	5.94	5.68	94.19	91.30
29(遮挡面积大于等于 40%)	14(富士苹果)	13.43	12.09	87.24	71.43
	15(金冠苹果)	11.27	10.67	89.02	73.33

5 结论

(1) 采用基于主动成像方式的激光视觉系统扫描果树,获得的数据不受光线变化和果实品种的影响。根据扫描的场景知识,对生成的三维图像进行背景简化,可使分析过程更具鲁棒性。

(2) 提出了一种基于平滑频率曲线的自动阈值

检测方法,用以解决直方图无明显两峰的图像分割问题,实验结果凸显感兴趣的目标区域。

(3) 用链码和与链码差来表示果实的边界特征,根据两者的变化规律设定了提取准则,以实现果实轮廓点的准确提取,结合随机圆环法快速地完成对果实形状特征的识别。

参 考 文 献

1 近藤直,门田充司,野口伸. 农业机器人[M]. 乔军,陈兵旗,孙明,等,译. 北京:中国农业大学出版社,2009.

2 司永胜,乔军,刘刚,等. 基于机器视觉的苹果识别和形状特征提取[J]. 农业机械学报,2009,40(8):161~165,173.
Si Yongsheng, Qiao Jun, Liu Gang, et al. Recognition and shape features extraction of apples based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(8):161~165,173. (in Chinese)

3 李斌,Ning Wang,汪懋华,等. 基于单目视觉的田间菠萝果实识别[J]. 农业工程学报,2010,26(10):345~349.
Li Bin, Ning Wang, Wang Maohua, et al. In-field pineapple recognition based oil monocular vision[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(10):345~349. (in Chinese)

4 熊俊涛,邹湘军,陈丽娟,等. 基于机器视觉的自然环境中成熟荔枝识别[J]. 农业机械学报,2011,42(9):162~166.
Xiong Juntao, Zou Xiangjun, Chen Lijuan, et al. Recognition of mature litchi in natural environment based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(9):162~166. (in Chinese)

5 孙俊,芦兵,毛罕平. 基于双目识别技术的复杂背景中果实识别试验[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2011,32(4):423~427.
Sun Jun, Lu Bing, Mao Hanping. Fruits recognition in complex background using binocular stereovision[J]. Journal of Jiangsu University:Natural Science Edition,2011,32(4):423~427. (in Chinese)

6 吕宏明,姬长英. 视觉技术在农业采摘机器人中的应用及发展[J]. 江西农业学报,2008,20(2):79~80.
Lü Hongming, Ji Changying. Application and development of visual technology in agricultural picking robot[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2008,20(2):79~80. (in Chinese)

7 Jiménez A R, Ceres R, Pons J L. A vision system based on a laser range-finder applied to robotic fruit harvesting[J]. Machine Vision and Applications,2000,11(6):321~329.

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

9 刘兆祥,刘刚,乔军. 苹果采摘机器人三维视觉传感器设计[J]. 农业机械学报,2010,41(2):171~175.
Liu Zhaoxiang, Liu Gang, Qiao Jun. Development of a 3-dimension vision sensor in apple harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(2):171~175. (in Chinese)

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 谭建豪,章兢. 基于链码差的边界凸凹性判别[J]. 科学技术与工程,2007,7(5):769~772.
Tan Jianhao, Zhang Jing. Identifying for the convexo-concave of peripherals based on chain code difference[J]. Science Technology and Engineering,2007,7(5):769~772. (in Chinese)

12 Feng J, Wang S W, Liu G, et al. A separating method of adjacent apples based on machine vision and chain code information [J]. Computer and Computing Technologies in Agriculture V—IFIP Advances in Information and Commnuication Technology, 2012,368:258~267.

13 司永胜,乔军,刘刚,等. 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, et al. Recognition and location of fruits for apple harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(9):148~153. (in Chinese)