

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.001

基于单目视觉与超声检测的振荡果实采摘识别与定位*

李国利^{1,2} 姬长英¹ 顾宝兴¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 金陵科技学院机电工程学院, 南京 211169)

摘要: 针对采摘机器人在果实振荡情况下因难以精确定位影响采摘效率的问题,提出了一种基于单目视觉与超声检测的振荡果实识别与定位方法。首先对采集的振荡果树图像序列进行基于色差 $R-G$ 的 Otsu 阈值分割和形态学处理,接着对图像果实区域进行灰度填充,将处理后的图像序列叠加得到复合图像和目标果实运动区域,求取振荡果实在图像运动区域的二维平衡位置坐标。然后机械手在视觉引导下运动,其末端指向振荡果实二维平衡位置坐标,同时超声传感器检测目标果实深度信息并提取超声回波信号峰峰值进行果实识别,当检测到果实处于适合采摘位置时,机械手爪抓取果实。采摘试验表明,采摘成功率为 86%,验证了所采用方法的有效性,为实现采摘机器人实用化提供了参考。

关键词: 采摘机器人 振荡果实 单目视觉 超声检测 识别 定位

中图分类号: TP242.6⁺2; S122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0001-08

Recognition and Location of Oscillating Fruit Based on Monocular Vision and Ultrasonic Testing

Li Guoli^{1,2} Ji Changying¹ Gu Baoxing¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: In order to solve the problem of low picking efficiency of harvesting robot under the target fruit oscillation condition, a recognition and location method of oscillating fruit based on monocular vision and ultrasonic testing was proposed. Firstly, the acquired sequential images of oscillating fruit were segmented by using Otsu algorithm based on $R-G$ color component; morphological operation was employed to eliminate residual noise; and the region of target fruit was separated from backgrounds. Secondly, the region of target fruit was filled with gray threshold. Thirdly, the processed sequential images were superimposed and a composite image was obtained, and the 2-D centroid coordinates of the oscillating fruit were extracted from the fruit oscillating region in the composite image. Fourthly, the picking manipulator was controlled to move and its end was pointed to 2-D centroid coordinates, at the same time, the depth information of the target fruit was acquired through ultrasonic testing, and the peak-to-peak value of ultrasonic echo signal was extracted for recognition of fruit and tree. Finally, the end-effector of picking manipulator was started to grab the fruit when it was within valid range and the manipulator was stopped motion. The experiments results showed that the success rate of picking can reach 86%. This method is universal and suitable for apple, citrus, pears and other spherical fruits. The research can provide a reference for realization of harvesting robot practicability.

Key words: Harvesting robot Oscillating fruit Monocular vision Ultrasonic testing Recognition Location

收稿日期: 2015-04-01 修回日期: 2015-05-12
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA10Z259)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(KYZ201325)
作者简介: 李国利, 博士生, 金陵科技学院副教授, 主要从事农业机器人和智能化检测技术研究, E-mail: qdliguoli@126.com
通讯作者: 姬长英, 教授, 博士生导师, 主要从事智能化农业装备和土壤-机器系统研究, E-mail: chyji@njau.edu.cn

引言

中国是水果生产大国,发展自动化收获技术、研究开发采摘机器人对降低水果采摘劳动强度、提高劳动生产率、降低生产成本具有重要意义^[1-2]。水果采摘机器人在进行果实采摘作业时,一般由视觉系统完成果实识别与定位,然后采摘机械手实施采摘。目标果实的精确识别定位是采摘机器人成功作业的前提,国内外研究人员在这方面进行了广泛深入的研究^[3-12]。非结构化自然环境条件下的果树及果实一般并非一直处于静止状态,如自然界风力作用或采摘作业过程中果实与果树分离都会引发果实振荡。对于振荡状况下的果实,采摘机器人通常需多次识别定位或等果实基本静止后再识别定位,这势必使单个果实平均采摘周期加长,采摘成功率和采摘效率降低。另外,自然环境条件下机器人视觉系统受光照等条件影响,对目标果实的识别定位经常发生错判,或定位误差较大。

针对振荡果实的识别问题,吕继东等^[13]引入图像帧间差分法和水平最小外接矩形法,提出一种在果实振荡状况下的动态识别方法。王辉等^[14]模拟人类采摘过程,设计了单、双目视觉组合传感器系统,先由双目视觉系统在远处对苹果进行识别和定位,然后由安装在执行机构下端的单目视觉系统,再近距离对目标进行动态实时跟踪与定位。双目视觉在空间定位上一般要求传感器和目标之间距离大于 50 cm^[14],而振荡果实需要近距离识别与定位。采用单目视觉对振荡果实识别与定位需要多次成像,由此延缓了采摘机器人的采摘速度,实时性差且精度不高。近年来,超声技术在测距、障碍物识别等很多领域得到了广泛应用^[15-17]。本文以振荡果实为研究对象,基于单目视觉与超声检测相结合研究果实在振荡状况下的识别与定位方法,由单目视觉引导采摘机械手向振荡果实二维平衡点位置推进,同时超声传感器检测深度信息并进行目标果实辅助识别。

1 振荡果实识别定位系统

1.1 试验系统设计

本文建立的试验系统由上位机、单目视觉传感器、机械手控制系统、超声测距与超声回波信号采集系统等组成,如图 1 所示。单目视觉传感器和超声收发换能器安装于机械手末端。单目视觉传感器采集目标物图像通过 USB 接口传给上位机处理。单片机系统由软件产生 40 kHz 脉冲通过 I/O 口输出放大后驱动超声换能器探头发射超声波。经目标物反射回的超声信号经超声换能器探头接收,回波信

号幅值较小,并混杂很多干扰噪声。回波信号经过前置放大与带通滤波器滤波后,一方面进行脉冲整形得到标准方波信号,通过单片机系统进行测距;另一方面由高速数据采集卡进入上位机,通过软件进行信号降噪、解调处理,获取回波信号并提取信号特征。

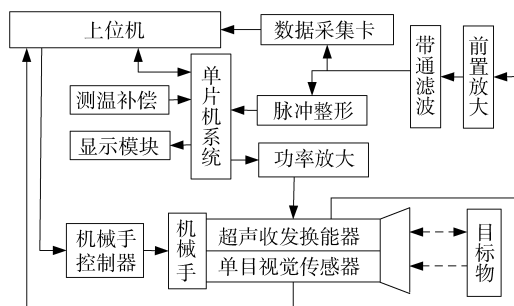


图 1 试验系统结构图

Fig. 1 Block diagram of experimental system

1.2 系统工作原理

首先单目视觉传感器拍摄振荡目标果实序列图像并传送给上位机。上位机将采集的图像序列进行数字图像处理获取振荡果实在图像中的运动区域,并计算果实运动平衡点的二维坐标。然后调整机械手末端使其对准二维平衡点并向前推进,通过超声传感器不断测距获取振荡果实深度信息,同时提取超声回波信号特征进行果实识别,当超声传感器检测到振荡果实位于机械手前端并进入机械手爪有效作业范围内时,机械手爪抓取果实。

2 振荡果实视觉识别与定位

2.1 静态果实视觉识别与定位

取实验室环境下单目视觉拍摄的一组苹果果树图像,进行不同颜色系统对比试验,发现基于 RGB 颜色系统的色差 $R-G$ 和 $2R-G-B$ 都能较好地将目标果实从背景中分割出来,如图 2a~2c 所示。从图中可以看出,基于色差 $R-G$ 分割效果更好一些,并且计算量较小。Otsu 最大类间方差法^[18]是一种性能良好的自适应阈值分割方法,在图像灰度直方图基础上,通过计算图像中目标类和背景类的类内方差最小、类间方差最大进行自动阈值求取。图 2d 为基于色差 $R-G$ 的 Otsu 阈值分割效果图。分割后的图像常存在孤立的点、小孔洞和毛刺,为此需要运用数学形态学方法进行图像消噪处理。首先选用 3×3 正方形结构元素对分割后的图像进行 2 次腐蚀运算,目的是消除边界点、使边界向内收缩,从而消除颗粒噪声。然后再用区域标记去除像素面积小于最大像素面积 $1/5$ 的噪声点,其作用是去除较大的孔洞噪声。接着选用 3×3 正方形结构元素对图像进行 2 次膨胀运算,将与目标接触的所有背景点

合并到该目标中,同时消除目标区域内孔洞。图 2e 为形态学运算后图像。最后求取图像果实区域的二维质心坐标,见图 2f,计算公式为

$$\left\{ \begin{aligned} x &= \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n ig(i,j)}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n g(i,j)} \\ y &= \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n jg(i,j)}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n g(i,j)} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中 $i、j$ ——图像像素的横、纵坐标
 $m、n$ ——图像一行、一列像素数量
 $g(i,j)$ ——图像 (i,j) 处灰度

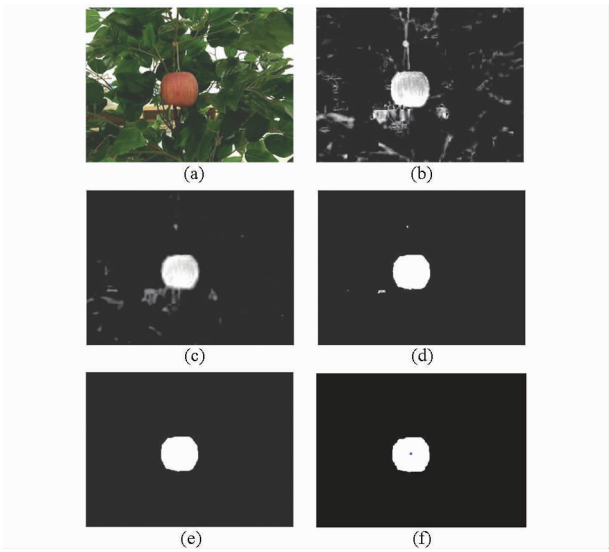


图 2 静态苹果图像及处理结果

Fig.2 Static apple image and processing results

(a) 原始图像 (b) 2R-G-B 色差模型 (c) R-G 色差模型
(d) Otsu 分割 (e) 形态学运算 (f) 定位

2.2 振荡果实二维平衡位置确定试验

自然界风力作用或采摘作业过程中果实与果树分离引发的果实运动可近似为阻尼振荡。由于引发振荡的外力大小和作用时间等因素无法精确估计,因此果实振荡的振幅、频率也很难准确计算。但振荡果实一般会以静态时位置为平衡点并围绕平衡点运动,并且运动过程中果实会多次经过平衡点。基于振荡果实的以上运动特点,本文研究通过数字图像处理技术获取运动果实的二维平衡点位置。首先拍摄运动果实的图像序列并对图像序列每帧图像进行分割、去噪等运算处理将果实从背景中分离出来,然后对每帧处理后的图像果实区域进行灰度填充,接着对灰度填充后的图像序列叠加得到复合图像,计算复合图像中果实运动区域的质心坐标便可获取果实在二维图像中平衡点位置。

试验在实验室环境下进行,果树为仿真苹果树,果实为红色富士实物苹果。果树图像采集的单目摄像头型号为 D881HD720P,帧率最大为 60 帧/s。采集图像大小设定为 320 像素 × 240 像素。试验中首先拍摄静态果树图像并按照 2.1 节中所述图像处理方法获取目标果实的质心坐标。然后给仿真果树一个斜拉力使果实产生振荡,并拍摄振荡果实图像序列,连续采集 28 帧图像,图像采集时间间隔为 0.1 s。图 3a、3b 分别为采集的第 $k、k+1$ 帧图像。图像序列的采集频率和采集帧数根据振荡果实的运动速度确定。对于运动速度较快的果实,需要选取较小的图像采集时间间隔。

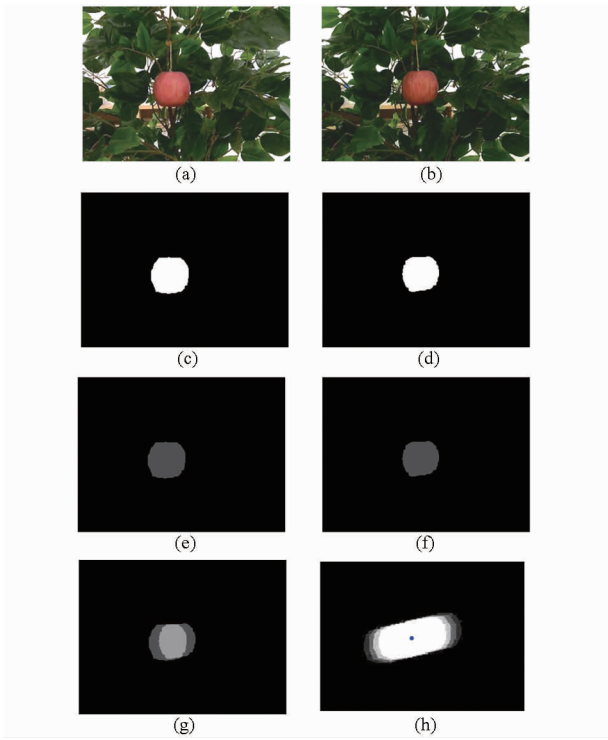


图 3 振荡苹果图像及处理结果

Fig.3 Oscillating apple image and processing results

(a) 第 k 帧原始图像 (b) 第 $k+1$ 帧原始图像
(c) 第 k 帧图像处理后 (d) 第 $k+1$ 帧图像处理后
(e) 第 k 帧图像处理后灰度填充
(f) 第 $k+1$ 帧图像处理后灰度填充
(g) 第 k 帧与 $k+1$ 帧图像灰度填充后合成
(h) 图像序列灰度填充后合成

对采集图像序列的每帧图像按照 2.1 节中图像分割、形态学运算等方法进行处理,图 3c、3d 分别为第 $k、k+1$ 帧图像处理后效果。然后对处理后的每帧图像中果实区域进行灰度填充,第 $k、k+1$ 帧图像灰度填充后效果分别如图 3e、3f 所示。接着将灰度填充后的各帧图像叠加,图 3g 为第 $k、k+1$ 帧图像灰度填充后叠加图像,图 3h 为图像序列灰度填充后叠加图像。每帧图像果实区域填充灰度的选取,以

使得叠加后图像的果实振荡区域亮度具有层次感为宜,从而也能很好地反映果实的运动轨迹。最后按照式(1)求取叠加图像的果实振荡区域二维质心坐标。进行多次试验并将目标果实振荡区域二维质心坐标与目标果实静态二维质心坐标进行比较,如表 1 所示。计算目标果实的静态质心坐标与振荡区域质心坐标的距离,计算公式为

$$d = \sqrt{(x_0 - x_d)^2 + (y_0 - y_d)^2} \tag{2}$$

式中 x_0, y_0 ——果实静态质心横、纵坐标
 x_d, y_d ——果实振荡区域质心横、纵坐标

表 1 目标果实静态质心与振荡区域质心比较

Tab.1 Centroids of static apple and oscillating region

序号	振荡			静态	
	振荡区域质心坐标/像素	动静态质心距离/像素	误差 /%	质心坐标/像素	果实直径/像素
1	(128.651 5, 143.547 6)	2.567 5	4.94	(126.548 4, 145.020 4)	52
2	(127.784 8, 144.459 5)	1.357 7	2.61		
3	(129.395 6, 143.362 8)	3.294 6	6.34		
4	(127.991 2, 142.291 6)	3.086 7	5.94		

设试验时获取静态图像中目标果实的直径为 D 。当 $d \leq D$ 时,分别以 (x_0, y_0) 和 (x_d, y_d) 为圆心、以 D 为直径的圆相交或相切,否则相离。定义 $\delta = \frac{d}{D} \times 100\%$ 为目标果实振荡区域质心坐标测量相对误差。由表 1 可见,果实振荡区域质心坐标与静态质心坐标比较接近。误差产生的原因是多方面的,振荡果实的运动轨迹具有不确定性,因此通过研究运动轨迹很难精确计算平衡点位置;图像序列的采集时间间隔、帧数以及图像处理算法等也会影响结果的精确度。采集的图像序列帧数越多越能准确反映振荡目标果实运动规律,但图像采集与处理的时间会越长,从而会延长果实采摘周期。

3 果实的超声检测

3.1 超声回波信号数学建模

超声信号经空气介质入射到目标物界面时发生透射与反射现象。当超声信号到达目标物的入射角为 θ 时,超声反射信号的振幅为^[19]

$$A(x) = A_0 C_r \frac{e^{-2\alpha x}}{2x} e^{-4\theta^2/\theta_0^2} \tag{3}$$

式中 A_0 ——超声发射信号振幅
 x ——超声射程,即超声发射接收换能器与目标物的距离
 α ——超声信号在空气介质中的衰减系数
 C_r ——空气与目标物界面超声反射系数,大小与空气及目标物声阻抗、目标物界面形状、光滑度等特性有关

θ_0 ——回波幅值约为 $0.02A_{\max}$ 时的入射角
随着入射角 θ 增大,相应的回波幅值变小,当入射角 θ 为 0 时,回波幅值最大,记作 $A_{\max}$ 。因此,超声回波信号振幅除了与发射信号振幅有关外,还与超声射程 x 、目标物材料、形状等有关。通过检测超声射程与回波信号,并对回波信号进行分析便可获取目标物特性,从而可实现目标物的识别。

在超声检测中,超声回波信号通常是一个被探头中心频率调制的宽带信号,其数学模型为^[20]

$$f(t) = A(x) a(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \tag{4}$$

式中 $a(t)$ ——信号包络
 f_0 ——探头中心频率
 φ ——初相位,一般为零

超声脉冲回波信号包络的经验模型主要有高斯脉冲模型^[21]和混合指数模型^[22-23]。高斯脉冲模型用于描述时域波形为单峰对称的超声信号。在超声定位系统中,对于前沿相对较陡、后沿较缓的低频超声信号则采用混合指数模型,其数学表达式为

$$r(t) = R(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi) = At^{m_1} e^{-t/h} \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \tag{5}$$

其中 $R(t) = At^{m_1} e^{-t/h}$
式中 A ——信号幅度增益
 m_1 ——整数,一般取值 1~3
 h ——超声波换能器特性参数

图 4 所示为一基于混合指数模型的超声回波信号及其信号包络。通常用信号包络的幅值 A 、峰峰值 A_{pp} 和上升时间 t_r 等来描述包络信号脉冲特征。上升时间 t_r 是包络信号自 0 上升到 100% 所需的时间。

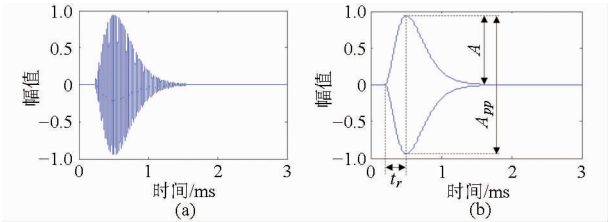


图 4 混合指数模型超声回波信号及包络
Fig.4 Ultrasound echo signal and envelope based on hybrid exponential model
(a) 超声回波信号 (b) 超声回波信号包络

含噪声的混合指数模型超声回波信号为
$$s(t) = r(t) + n(t) = At^m e^{-t/h} \cos(2\pi f_0 t + \varphi) + n(t) \tag{6}$$

式中 $n(t)$ ——加性高斯白噪声
含时沿离散观测信号为
$$s(t_i - \tau) = r(t_i - \tau) + n(t_i) \tag{7}$$

3.2 超声回波信号处理

对超声回波信号首先要进行消噪处理。信号消噪的目的是从 $s(t_i - \tau)$ 中剔除 $n(t_i)$, 恢复 $r(t_i - \tau)$ 。小波分析以其时频分析局部化的特点对于处理超声回波信号有着独特的优势。由小波变换的线性性质, 含噪声的超声回波信号的小波变换系数 $W_s(j, k)$ 为

$$W_s(j, k) = W_r(j, k) + W_n(j, k) \tag{8}$$

式中 $W_r(j, k)$ ——无噪声超声回波原信号的小波变换系数

$W_n(j, k)$ ——噪声的小波变换系数

白噪声的小波变换 $|W_n(j, k)|^2$ 的方差为

$$E[|W_n(j, k)|^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E[n(u)n(v)] \psi_j(t-u) \cdot \psi_j(t-v) du dv = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma^2 \psi_j(t-u) du = \frac{\|\psi\|}{j} \sigma^2 \tag{9}$$

由式(9)可知, 随着尺度增加, $E[|W_n(j, k)|^2]$ 的值在减小, 而原信号小波变换的极大值随尺度的增加而增加, 因此可以根据两者的区别进行消噪^[24]。

小波阈值消噪法计算快速、实现容易、去噪效果好, 是目前应用最为广泛、最为有效的方法, 其实现步骤为^[25]:

- (1) 选择小波并确定分解层次 N , 对含噪信号 $s(t_i - \tau)$ 进行小波分解, 得到一组小波系数 $W_s(j, k)$ 。
- (2) 选取合适的阈值对 $W_s(j, k)$ 进行量化处理, 得到估计小波系数 $\hat{W}(j, k)$ 。
- (3) 利用估计小波系数进行小波逆变换, 得到

估计信号 $\hat{r}(t_i - \tau)$, 即为消噪后的信号。

对消噪后的信号进行包络提取以获得幅值、脉宽等信号特征信息。Hilbert 变换平方解调是一种较常用的调幅信号解调分析方法。对给定的一个实值函数 $x(t)$, 其 Hilbert 变换为

$$H[x(t)] = \hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \tag{10}$$

对于式(5)描述的超声回波信号, 其 Hilbert 变换为

$$\hat{r}(t) = R(t) \sin(2\pi f_0 t + \varphi) \tag{11}$$

则其解析信号 $q(t) = r(t) + i\hat{r}(t)$ 的模为

$$|R(t)| = \sqrt{r^2(t) + \hat{r}^2(t)} \tag{12}$$

式中 $|R(t)|$ ——超声回波信号的包络

3.3 超声测量试验

试验目标物为红色富士苹果和苹果树枝叶, 各选 3 组样品, 苹果样品直径 6.0 cm 左右。试验系统如图 1 所示, 超声波模块 HC-SR04 的中心频率为 40 kHz, 测距盲区为 20 mm, 由单片机系统完成目标物的测距及显示, 测距采用渡越时间法 (TOF)^[26], 即 $x = ct/2$, 式中 t 为超声波从发射到返回的时间间隔, c 为超声波在空气介质中的传播速度。 c 与空气温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 有关, 系统通过测温模块进行温度补偿, 试验中取近似公式 $c = 331.45 + 0.607T^{[26]}$ 。数据采集卡采样率为 1.2 MHz, 上位机对采集到的超声回波信号进行小波降噪、Hilbert 解调处理。根据超声回波信号特点, 本试验小波消噪选取 Sym8 作为小波基、分解层次为 9, 并采用 rigrsure 阈值准则、软阈值处理方法。上位机系统采集到的超声回波信号及消噪、解调处理后的信号如图 5 所示。

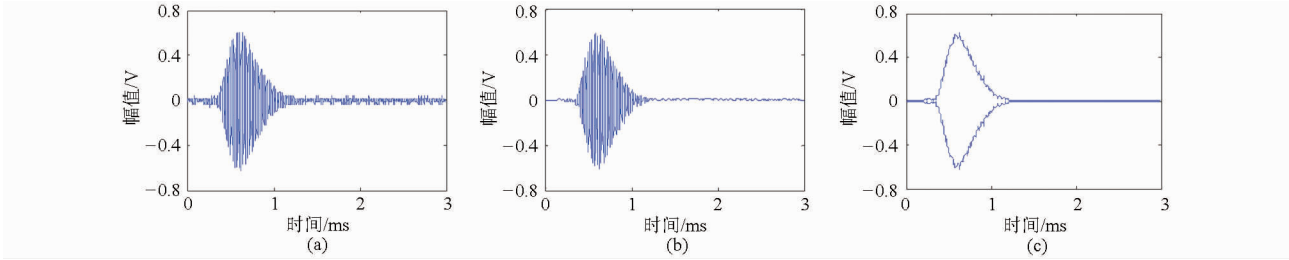


图 5 超声回波信号及处理结果

Fig.5 Ultrasound echo signal and processing results

(a) 超声回波信号 (b) 消噪后超声回波信号 (c) 超声回波信号包络

在超声传感器测距盲区范围外且目标物位于传感器正前方的情况下, 测试不同距离下苹果和果树枝叶超声回波信号的峰峰值 A_{pp} , 结果如图 6 所示。可见, 两种目标物的超声回波信号峰峰值随距离的增大呈非线性减小; 相同距离情况下, 目标物苹果的超声回波峰峰值明显大于果树枝叶。因此, 超声回波信号的峰峰值能较好地反映目标物的材料、形状等特性。根据以上试验结果及分析, 在进行苹果与

果树枝叶超声测距的同时, 通过提取并比较超声回波信号峰峰值的大小可实现苹果与果树枝叶的识别。

4 采摘试验及结果分析

采摘试验系统如图 1 所示, 单目摄像头与超声传感器安装于自行研制的机械手末端, 如图 7 所示。试验主要测试系统能否根据单目视觉与超声检测实

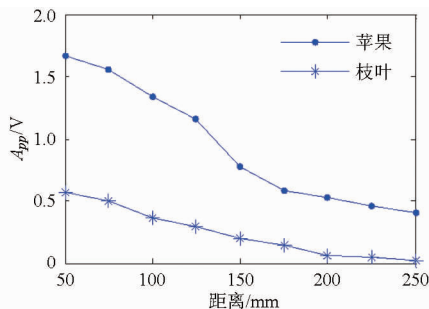


图6 超声回波信号峰峰值随距离变化曲线

Fig. 6 Peak-to-peak value and range of ultrasound echo signal

现目标果实振荡状态下的识别与成功抓取,图8为试验流程图。根据试验用的手爪尺寸和果实直径,当果实位于机械手前方距离手爪根部中心位置60 mm范围内时,手爪闭合可获取果实。试验在实验室环境下进行,采摘对象为固定于仿真苹果树上的红色富士实物苹果,通过给苹果树施加斜拉力,使其带动苹果振荡。试验时机械手爪根部中心位置与果树的初始距离大于600 mm。摄像头分辨率设为320像素×240像素,图像采集时间间隔为0.1 s,帧数为28,采用2.2节中所述振荡图像处理方法获取振荡果实平衡点二维坐标。



图7 水果采摘试验

Fig. 7 Experiment of fruit picking

调整机械手使其末端中心指向振荡果实平衡点二维坐标并向前推进机械手,通过超声传感器不断测距,所测距离大于20 mm且小于60 mm时继续推进机械手,在测距同时检测超声回波信号的峰峰值,当信号峰峰值大于设定的阈值1.0 V时确定目标物为苹果,手爪闭合抓取果实,机械手停止运动。当所测距离为20 mm且尚未检测到果实时,机械手停止运动,继续检测超声信号峰峰值,若在一定时间(试验中取3 s)内检测到果实,手爪抓取果实,则采摘成功;否则采摘失败。采摘试验进行了50次,有43次能成功抓取苹果,试验成功率为86%。采摘失败的主要原因是:在机械手进入有效采摘距离60 mm内未检测到目标果实或目标果实未处于手爪适合采摘位置而造成抓取失败。从试验过程及结果看,本研究能实现目标果实运动状态下的识别与抓取,而且

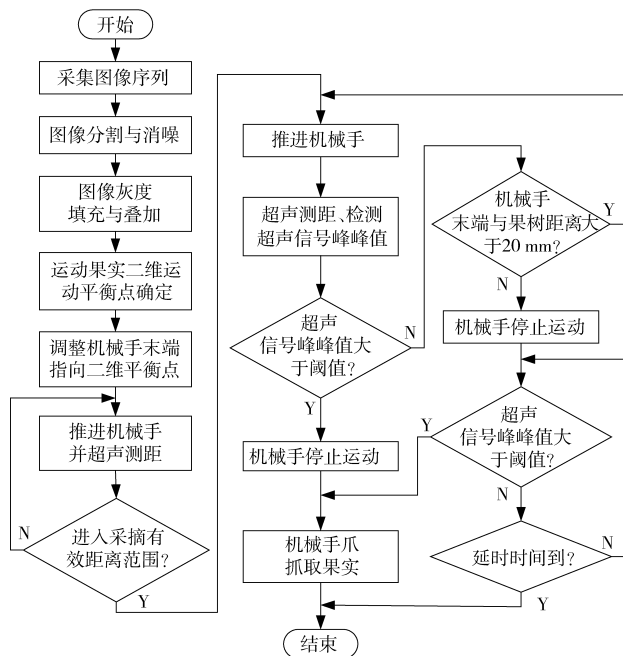


图8 采摘试验流程

Fig. 8 Flow chart of picking experiment

抓取成功率较高。

5 结论

(1)单目视觉拍摄振荡苹果果树图像序列,采用基于色差 $R-G$ 的Otsu阈值分割和形态学处理方法将每帧图像中目标果实与背景分离开来,然后对每帧图像果实区域进行灰度填充并将图像序列叠加得到复合图像,通过求取复合图像中果实运动区域的质心获得运动果实在图像中的二维平衡位置,该平衡位置与果实静止状态下位置比较接近。

(2)采用超声波传感器对苹果果树和果实目标物测距的同时,提取超声回波信号并进行小波消噪和Hilbert变换获取信号包络和信号峰峰值,通过比较峰峰值的大小可较好地实现目标物苹果果实和果树枝叶的识别。

(3)通过单目视觉拍摄振荡果树图像序列并处理,获取果实平衡点二维坐标,视觉引导机械手末端指向果实二维平衡点,在推进机械手的同时不断通过超声传感器测距,并提取超声回波信号峰峰值特征进行果实识别,当果实处于适合采摘位置时,机械手爪抓取果实,实现了目标果实在运动状态下的识别与抓取。进行了采摘试验,果实抓取成功率为86%。相对于等果实基本静止后采摘的识别与定位方法,该方法提高了采摘效率,增强了机器人的实用性。

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 项荣, 应义斌, 蒋焕煜. 田间环境下果蔬采摘快速识别与定位方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 208 – 223.
Xiang Rong, Ying Yibin, Jiang Huanyu. Development of real-time recognition and localization methods for fruits and vegetables in field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 208 – 223. (in Chinese)
- 3 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)
- 4 Bulanon D M, Burks T F, Alchanatis V. A multispectral imaging analysis for enhancing cirtrus detection[J]. Environment Control Biology, 2010, 48(2): 81 – 91.
- 5 冯娟, 刘刚, 司永胜, 等. 基于激光扫描三维图像的树上苹果识别算法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 65 – 72.
Feng Juan, Liu Gang, Si Yongsheng, et al. Apple fruit recognition algorithm based on laser scanning 3-D image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 65 – 72. (in Chinese)
- 6 Linker R, Cohen O, Naor A. Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 81: 45 – 57.
- 7 Ji W, Zhao D A, Cheng F Y, et al. Automatic recognition vision system guided for apple harvesting robot[J]. Computers and Electrical Engineering, 2012, 38(5): 1186 – 1195.
- 8 张春龙, 张揖, 张俊雄, 等. 近色背景中树上绿色苹果识别方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 277 – 281.
Zhang Chunlong, Zhang Ji, Zhang Junxiong, et al. Recognition of green apple in similar backgroud[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 277 – 281. (in Chinese)
- 9 Patel H N, Jain R K, Joshi M V. Fruit detection using improved multiple features based algorithm[J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 13(2): 1 – 5.
- 10 马晓丹, 刘刚, 周薇, 等. 基于量子遗传模糊神经网络的苹果果实识别[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 227 – 232.
Ma Xiaodan, Liu Gang, Zhou Wei, et al. Apple recognition based on fuzzy neural network and quantum genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 227 – 232. (in Chinese)
- 11 Bulanon D M, Kataoka T, Ota Y, et al. A segmentation algorithm for the automatic recognition of Fuji apples at harvest [J]. Biosystems Engineering, 2002, 83(4): 405 – 412.
- 12 宁志刚, 程辉, 杨恒, 等. 采摘机器人扰动状态下柑橘动态识别[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2015, 36(1): 53 – 58.
Ning Zhigang, Cheng Hui, Yang Heng, et al. Dynamic recognition of oscillating orange for harvesting robot[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2015, 36(1): 53 – 58. (in Chinese)
- 13 吕继东, 赵德安, 姬伟, 等. 采摘机器人振荡果实动态识别[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 173 – 196.
Lü Jidong, Zhao Dean, Ji Wei, et al. Dynamic recognition of oscillating fruit for harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 173 – 196. (in Chinese)
- 14 王辉, 毛文华, 刘刚, 等. 基于视觉组合的苹果作业机器人识别与定位[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 165 – 170.
Wang Hui, Mao Wenhua, Liu Gang, et al. Identification and location system of multi-operation apple robot based on vision combination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 165 – 170. (in Chinese)
- 15 Jongkyu Park, Yub Je, Haksue Lee, et al. Design of an ultrasonic sensor for measuring distance and detecting obstacles[J]. Ultrasonics, 2010, 50(3): 340 – 346.
- 16 杨东鹤, 刘喜昂. 智能移动机器人的超声避障研究[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(15): 3659 – 3660.
Yang Donghe, Liu Xi'ang. Research of intelligent mobile robot's obstacle avoidance based on ultrasonic sensor[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(15): 3659 – 3660. (in Chinese)
- 17 Zhong S Lim, Soon T Kwon, Moon G Joo. Multi-object identification for mobile robot using ultrasonic sensors[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2012, 10(3): 589 – 593.
- 18 吕强, 蔡健荣, 赵杰文, 等. 自然场景下树上柑橘实时识别技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 185 – 188, 170.
Lü Qiang, Cai Jianrong, Zhao Jiewen, et al. Real-time recognition of citrus on trees in natural scene[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 185 – 188, 170. (in Chinese)
- 19 Ginés Benet, Milagros Martínez, Francisco Blanes, et al. Differentiating walls from corners using the amplitude of ultrasonic echoes[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 50(1): 13 – 25.
- 20 赵慎, 杨俊, 乔纯捷, 等. 超声信号拉盖尔模型及在渡越时间测量中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 797 – 802.
Zhao Shen, Yang Jun, Qiao Chunjie, et al. Laguerre model of ultrasonic signal and its application in ToF measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4): 797 – 802. (in Chinese)
- 21 Demirli R, Sanjie J. Model-based estimation of ultrasonic echoes Part I: analysis and algorithms[J]. IEEE Transactions on

- Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2001, 48(3):787–802.
- 22 卢振坤. 参数化的超声回波模型及其参数估计[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
Lu Zhenkun. Parameterized ultrasonic echo model and parameters estimation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 23 Raya R, Frizera A, Ceres R, et al. Design and evaluation of a fast model-based algorithm for ultrasonic range measurements [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 148(1):335–341.
- 24 李书, 陈益. 超声探测弱信号提取方法[J]. 振动、测试与诊断, 2006, 26(1):33–36.
Li Shu, Chen Yi. Study on weak signal extraction in ultrasonic detection [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2006, 26(1):33–36. (in Chinese)
- 25 吴光文, 王昌明, 包建东, 等. 基于自适应阈值函数的小波阈值去噪方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6):1340–1347.
Wu Guangwen, Wang Changming, Bao Jiandong, et al. A wavelet threshold denoising algorithm based on adaptive threshold function [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(6):1340–1347. (in Chinese)
- 26 卜英勇, 王纪婵, 赵海鸣. 基于单片机的高精度超声波测距系统[J]. 仪表技术与传感器, 2007(3):66–68.
Bu Yingyong, Wang Jichan, Zhao Haiming. Ultrasonic distance measure system with high precision based on single-chip microcomputer [J]. Instrument Technique and Sensor, 2007(3):66–68. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 35 页)

- 10 王辰星, 何瑞银. 基于图像处理的水稻育秧播种质量检测方法的研究[J]. 云南农业大学学报, 2010, 25(2):153–158.
Wang Chenxing, He Ruiyin. Study on seeding quality detection ways for nursing seedlings of rice based on digital image processing [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2010, 25(2):153–158. (in Chinese)
- 11 谭穗妍, 马旭, 吴露露, 等. 基于机器视觉和 BP 神经网络的超级杂交稻穴播量检测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21):201–206.
Tan Suiyan, Ma Xu, Wu Lulu, et al. Estimation on hole seeding quantity of super hybrid rice based on machine vision and BP neural network [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21):201–206. (in Chinese)
- 12 Zhang G, Jayas D S, White N D G. Separation of touching grain kernels in an image by ellipse fitting algorithm [J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(2):135–142.
- 13 孙敬飞, 杨红卫. 形态学分水岭算法在粘连大米图像分割中的应用[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2009, 30(6):84–87.
Sun Jingfei, Yang Hongwei. Application of morphological watershed algorithm in image segmentation of adhering rice [J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 30(6):84–87. (in Chinese)
- 14 Tong J H, Jiang B, Jiang H Y. Machine vision techniques for the evaluation of seedling quality based on leaf area [J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(3):369–379.
- 15 Duan Lingfeng, Yang Wanneng, Bi Kun, et al. Fast discrimination and counting of filled/unfilled rice spikelets based on bi-modal imaging [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 75(1):196–203.
- 16 Huang Chenglong, Yang Wanneng, Duan Lingfeng, et al. Rice panicle length measuring system based on dual-camera imaging [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98:158–165.
- 17 李世武, 陈志, 杨敏丽. 农机农艺结合问题研究[J]. 中国农机化, 2011(4):10–13.
Li Shiwu, Chen Zhi, Yang Minli. Research on combination of agricultural machinery and agronomy [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(4):10–13. (in Chinese)
- 18 程洪, 史智兴, 尹辉娟, 等. 基于机器视觉的多个玉米籽粒胚部特征检测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19):145–151.
Cheng Hong, Shi Zhixing, Yin Huijuan, et al. Detection of multi-corn kernel embryos characteristic using machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19):145–151. (in Chinese)
- 19 吴文周, 李利番, 王结臣. 平面点集凸包 Graham 算法的改进[J]. 测绘科学, 2010, 35(6):123–125.
Wu Wenzhou, Li Lifan, Wang Jiechen. An improved Graham algorithm for determining the convex hull of planar points set [J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(6):123–125. (in Chinese)
- 20 王丰元, 周一鸣. 种子形状参数检测的计算机图像处理技术[J]. 农业机械学报, 1995, 26(2):52–57.
Wang Fengyuan, Zhou Yiming. Seed shape detection and measurement with computer image processing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995, 26(2):52–57. (in Chinese)
- 21 王勇, 杨公训, 路迈西. 图像识别中颗粒形状表征方法的研究[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2005, 25(1):27–29.
Wang Yong, Yang Gongxun, Lu Maixi. The study on the method of signifying the shape coefficient of grain in image recognition [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2005, 25(1):27–29. (in Chinese)
- 22 刘光蓉, 周红, 管庶安. 颗粒形混合农产品的图像检测与分类[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11):344–348.
Liu Guangrong, Zhou Hong, Guan Shu'an. Image detection and classification of particle-shape mixed agricultural products [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11):344–348. (in Chinese)