

采摘机器人振荡果实动态识别*

吕继东 赵德安 姬伟 陈玉 沈惠良 张颖

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 提出一种采摘机器人在果实振荡状况下的动态识别方法,解决由于果实振荡影响采摘机器人识别定位时间,进而影响采摘速度和效率的问题。首先对所采集的振荡果实图像进行图像分割,将其分为果实和背景两部分;其次引入帧间差分法、水平最小外接矩形法等对分割图像进行振荡果实动态区域的区域标识,然后对其振荡果实进行识别,当图像中有多个振荡果实时,以距离图像中心最近原则确定采摘振荡目标果实。试验结果表明对实际采摘环境下遇到的多数情况,所提算法都能很好地识别出振荡果实,识别时间少于0.5 s。

关键词: 采摘机器人 振荡 图像分割 动态识别

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0173-06

Dynamic Recognition of Oscillating Fruit for Harvesting Robot

Lü Jidong Zhao Dean Ji Wei Chen Yu Shen Huiliang Zhang Ying

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

A kind of dynamic recognition method under the fruit oscillation condition for the harvesting robot was researched in order to resolve the problem of fruit oscillation influence to its recognition and orientation, and further influence to the harvest efficiency of harvesting robot. Firstly, the acquired oscillation fruit was segmented into two parts: fruit image and background image; secondly, the inter-frame difference method and the minimum enclosing rectangle method in horizontal direction were introduced to label dynamic region of the oscillation fruit for the segmented image; thirdly, the oscillation fruit was identified and located. The harvesting oscillation fruit was selected based on the principle of the nearest to the image center when the image had a lot of oscillation fruits. The test result showed that the oscillating fruit was nicely recognized and the recognition time was less than 0.5 s for the most cases under the actual harvesting environment.

Key words Harvesting robot, Oscillation, Image segmentation, Dynamic recognition

引言

采摘机器人在进行果实采摘时,不管采用切断方式还是扭断方式将果实与果枝分离,都会引起果树上其他果实的振荡,此外自然界风力的作用也会导致果实振荡。对振荡状况下的果实,以往采摘机器人为准确识别定位通常是等待其停止振荡或频繁识别定位。这势必使采摘时间加长,影响整体采摘

效率。究其原因,是因为上述过程中所采用的果实识别方法是静态的,即视频传感器单帧捕获后随即图像分割、目标识别定位。这种果实静态识别方法^[1-5]在果园现场采摘环境中,不能获得振荡果实的动态特性,从而采摘机器人无法在果实振荡过程中进行果实的准确抓取采摘。显然,果实静态识别方法对于振荡状况下的果实采摘,已不能满足采摘机器人快速采摘作业的要求。为此,本文以振荡状

收稿日期:2011-08-15 修回日期:2011-10-17

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA10Z254)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20093227120013)、江苏高校优势学科建设工程资助项目和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11_0573)

作者简介:吕继东,博士生,主要从事机器视觉与图像处理、机器人控制与避障研究,E-mail: vveaglevv@163.com

况下的苹果为对象,在以往果实静态识别方法研究的基础上,进行果实动态识别方法的研究。

1 果实动态识别方法

不同于果实静态识别方法,果实动态识别方法首先是基于图像序列而不仅仅基于单帧图像,其目的是为了获得振荡果实的动态特性,以便进行后续运动状态预估,使得采摘机器人能够在果实振荡的状况下,仍能对其进行采摘,从而加快机器人的采摘速度,提高采摘效率。

动态图像(即图像序列)的目标识别考虑所采集图像序列的帧间相关性和差异性等信息,也包括各个单帧图像的信息处理。本文所研究的果实动态识别方法是在借鉴以往果实静态识别方法的基础上,引入其他领域所采用的动态图像目标识别方法,综合考虑后设计出的一种适合采摘机器人对振荡果实采摘的识别方法,具体过程如图1所示。其中视频传感器可以选用工业摄像机,也可以选用普通的USB视频摄像头,具体以所研制的采摘机器人设计要求而定;动态图像的采集频率及采集帧数根据果实实际振荡频率范围以及后续所采用的运动状态预估方法来定;图像分割是对动态图像中的各帧进行分割,以筛选出图像中的果实;动态区域标识完成对相邻帧分割图像中振荡果实运动区域的标识;动态目标识别实现各帧分割图像中振荡果实的识别,并确定所要进行采摘的振荡目标果实,同时求取其质心坐标。

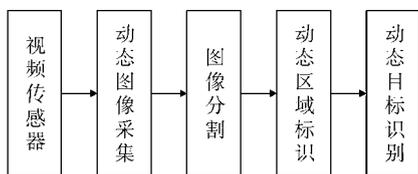


图1 果实图像采集及动态识别方法流程图

Fig. 1 Flowchart of fruit image capture and dynamic recognition method

2 图像分割

由于苹果果实与其背景之间具有较大的颜色差别,为此本文选择基于颜色特征的图像分割方法。

取自然环境下果园拍摄的一组图片,选择苹果果实与背景(树枝、树叶、天空)区域,对其 R 、 G 、 B 颜色因子的值进行统计,并分别对其色差 $R-G$ 、 $(R-G)/(R+G)$ 、 $2R-G-B$ 进行绘图描述,如图2所示。结果发现 $R-G$ 、 $2R-G-B$ 都能够较好地苹果果实从背景中分割开来,而 $(R-G)/(R+G)$ 则难以将苹果果实与枝干分割干净。从图2a、2c中确

定分割阈值,基于 $R-G$ 、 $2R-G-B$ 进行苹果图像的固定阈值分割,结果如图3所示。从图3可以看出,基于 $2R-G-B$ 进行的固定阈值分割不如 $R-G$ 固定阈值分割效果好。

固定阈值分割法固然能够将苹果果实与图像背景分割开来,但其适应性不强,特别是对于背景比较复杂的苹果图像来说,某个固定阈值对于强光拍摄下的图像分割可能效果很好,而对于弱光条件下拍摄的图像就可能会出现过分割现象,反之可能出现欠分割现象。为此,通过以上分析采用一种基于色差 $R-G$ 的动态阈值分割方法——大津法。大津法也就是Otsu法^[5-6],是一种性能良好的动态阈值分割方法,通过计算图像中目标类和背景类的类内方差最小、类间方差最大进行动态阈值求取。方差 σ^2 是灰度分布均匀性的一种度量,方差值越大,说明构成图像的两部分差别越大,当部分前景错分为背景或部分背景错分为前景时,都会导致两部分差别变小,因此,使用类间方差最大的分割意味着错分概率最小。具体对于图像 I 来说,记 T 为前景与背景的分割阈值,前景占整个图像的比例为 w_0 ,平均灰度为 u_0 ;背景占整个图像的比例为 w_1 ,平均灰度为 u_1 。图像的总平均灰度为 $u_T = w_0 u_0 + w_1 u_1$ 。从最小灰度值到最大灰度值遍历 T ,当 T 使得方差 $\sigma^2 = w_0(u_0 - u_T)^2 + w_1(u_1 - u_T)^2$ 最大时, T 即为分割的最佳阈值。通常直接应用大津法计算量较大,因此在实现时方差值采用改进等价公式 $\sigma^2 = w_0 w_1 (u_0 - u_1)^2$ 。

图4为基于色差 $R-G$ 的固定阈值和大津动态阈值分割图。图4b的分割阈值与图3b相同,但出现了明显的过分割现象,显然没有图3b的分割效果好;图4c是基于 $R-G$ 的大津动态阈值分割,分割效果明显好于图4b。从而验证了上述固定阈值分割方法适应性不强的观点,而动态阈值分割方法能够适应复杂背景的苹果图像分割。

图像分割完成后,图像中常有孤立的小点、毛刺和小孔洞,为了减少这些噪声对后续识别工作的影响,采取腐蚀-去除-膨胀的方法来消除噪声。首先对分割后的图像采用 2×2 正方形结构元素进行腐蚀运算,其作用是消除目标边界点,使边界向内部收缩;然后通过8邻域标记法对图像中连通区域进行标记,将不同连通区域标记为不同的值,统计每个连通区域的像素总数,将像素总数小于500的图像块进行清除,主要是清除没有分割干净的枝叶噪声和比较小的果实,这里的阈值500是统计的结果,应根据不同视觉系统的工作距离调整;接着对图像采用 2×2 正方形结构元素膨胀运算,对目标边界点进行

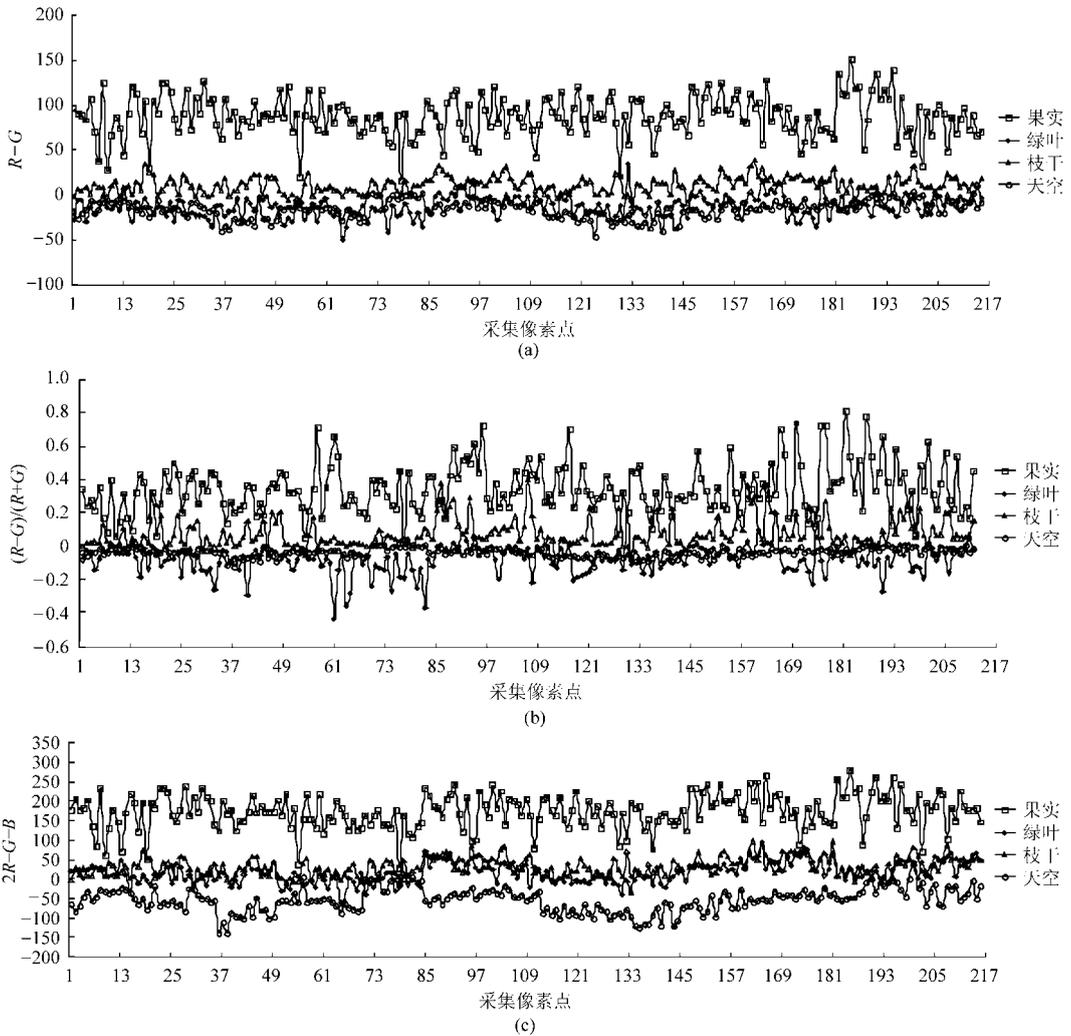


图 2 苹果图像色差曲线

Fig. 2 Color different graph of apple image

(a) $R - G$ (b) $(R - G) / (R + G)$ (c) $2R - G - B$

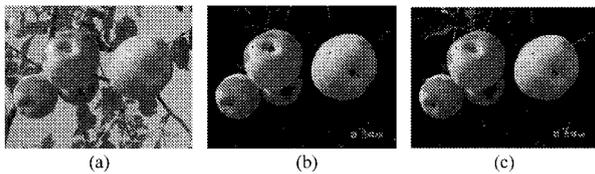


图 3 苹果图像分割图

Fig. 3 Apple segmentation image

(a) 原始图像 (b) $R - G$ 分割结果 (c) $2R - G - B$ 分割结果

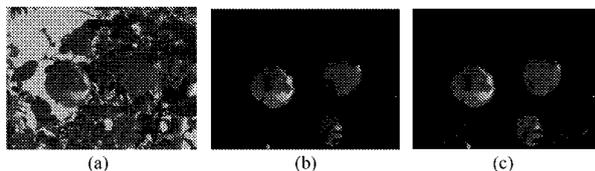


图 4 苹果图像动态阈值分割图

Fig. 4 Apple segmentation image

(a) 原始图像 (b) 固定阈值分割结果 (c) 大津动态阈值分割结果

3 动态区域标识

动态区域标识的目的就是把上述处理好的相邻帧图像中所有振荡果实的运动区域标识出来,以便进行下一步的动态目标识别。

首先采用帧间差分法对上述处理好的相邻帧图像进行差分处理。传统的帧间差分法^[7-10]是一种通过对视频图像序列中的连续两帧或几帧作差分运算来获得运动目标轮廓的方法,能够检测出相邻帧间发生变化的区域。这个变化区域对于本研究来说就是振荡果实前一帧所覆盖的区域 P 在当前帧中所覆盖的区域以及振荡果实本身 Q 除去它们相交的部分,如图 5 所示。其计算过程^[7]如图 6 所示,计算第 k 帧图像与第 $k + 1$ 帧图像之间的差分,得到差分后的图像 D_k ,然后对差分后的图像 D_k 进行二值化,当差分图像中某一像素的值大于某一给定阈值时,该像素为目标像素,反之则认为是背景像素。

$$D_k(x, y) = |f_k(x, y) - f_{k+1}(x, y)| \quad (1)$$

扩充,将与目标接触的所有点合并到该目标中,最后将图像划分为果实和背景两部分。

$$R_k(x, y) = \begin{cases} 1 & (D_k(x, y) > T) \\ 0 & (D_k(x, y) \leq T) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $R_k(x, y)$ ——二值化后的相邻帧差图

由于上述处理好的相邻帧图像已为二值图像,所以可以直接将二值图像进行差分,而不必差分过后再进行二值化。

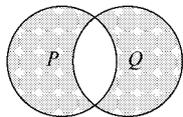


图5 变化区域示意图

Fig. 5 Sketch map of change region

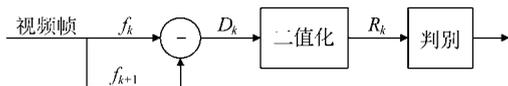


图6 帧间差分法流程图

Fig. 6 Flow chart of frame difference method

帧间差分法的优点是算法实现简单,程序设计复杂度低;对光线等场景变化不太敏感,能够适应各种动态环境,稳定性较好。其缺点是不能提取出对象的完整区域,只能提取出边界;依赖于选择的帧间时间间隔。对快速运动的物体,需要选择较小的时间间隔,如果选择不合适,当物体在前后两帧中没有重叠时,会被检测为两个分开的物体;而对慢速运动的物体,应该选择较大的时间差,如果此时选择不适当,当物体在前后两帧中几乎完全重叠时,则检测不到物体。帧间差分法的上述缺点对于本研究不产生影响,因为在这一阶段只是对相邻帧振荡果实的运动区域进行标识,而不必提取出振荡果实的完整轮廓,且发生两帧完全重叠检测不到物体的情况可能性很小,反之即使相邻两帧中没有重叠,检测到的两个分开的物体也能满足要求,仍能进行下一步的动态目标识别,这将在后面试验结果中得到验证。

由于苹果并不是规则的球形,且在振荡的过程中可能会发生自身的偏转,所以在所采集的图像中,相邻帧之间相应果实的形状已经微变,在经过帧间差分运算之后其图像仍然会存在噪声,为此仍需采用腐蚀-去除-膨胀的方法来消除噪声。这里腐蚀膨胀仍然采用 2×2 正方形结构元素运算,而去除则是对像素小于 30 的图像块进行清除,主要是差分后留下的果实边缘。这个阈值针对具体的采摘机器人系统,与选择振幅多大可识别为振荡果实有关,需要在实际当中来调整。

帧间差分图像在经过上述去噪之后,进行图像中振荡果实的动态区域标识,即将图像中的振荡果实运动区域用水平最小外接矩形框定(相邻帧没有重叠,差分图中两个分开的同一振荡果实单独框

定),并求出其各个顶点的坐标,步骤如下:

(1) 采用 8 邻域标记法对图像中的连通区域进行标记,并将不同连通区域标记为不同的值。

(2) 计算不同标记区域水平、垂直方向上像素数的最大值。

(3) 在不同标记区域以像素数最多的行列作为长度和宽度画矩形,此矩形为最小外接矩形,并计算矩形各个顶点的坐标。

4 动态目标识别

经过上述动态目标标识之后,对图像中的动态目标标识区域全部进行区域填充,使之与背景色相同,然后分割后的原始帧二值图像再与区域填充后的二值图像做相减运算,从而识别出图像中所有的振荡果实。

对图像中检测出来的振荡目标果实求取果实的二维质心坐标

$$\begin{cases} x = \sum_{i,j \in \Omega} \frac{i}{n} \\ y = \sum_{i,j \in \Omega} \frac{j}{n} \end{cases} \quad (3)$$

式中 i, j ——果实图像的横、纵坐标像素数

n ——果实图像的总像素数

Ω ——属于同一果实图像的像素集合

单机械手采摘机器人在进行果实采摘时,只能逐次单个采摘,因此当图像中有多个振荡果实时,必须确定出即将进行采摘的振荡目标果实。本研究基于与图像中心最近原则来确定振荡目标果实。距离计算式为

$$d = \sqrt{(x_o - x_c)^2 + (y_o - y_c)^2} \quad (4)$$

式中 x_o, y_o ——振荡目标果实的质心坐标

x_c, y_c ——图像中心坐标

5 试验

针对单个果实、多个果实的情况通过试验验证算法设计的可行性和有效性,而多个果实又分为多种状况,总的来说多个果实情况中振荡果实与静止果实有数目多寡的区别、振荡果实有振荡幅度大小的区别。试验软件由 Matlab R2010b 编程开发,试验用计算机配置为:处理器 Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU E7300 @ 2.66 GHz,内存 2 GB,硬盘 320 GB。试验中所用的植株为仿真苹果树,图像序列采集使用的是北京环宇飞扬科技有限公司生产的环宇飞扬 2008 型视频摄像头,帧率为 30 帧/s,隔帧捕获,捕获图像大小设定为 320 像素 \times 240 像素。采摘机器人在进行果实采摘时,不管切断方式还是扭断方式,

抑或自然界风力,都是树枝带动果实振荡,为此在现有试验条件下给仿真苹果树枝一个斜向力,让其带动果实振荡。图 7~12 为动态识别方法的试验结果,其中 t 为识别时间。

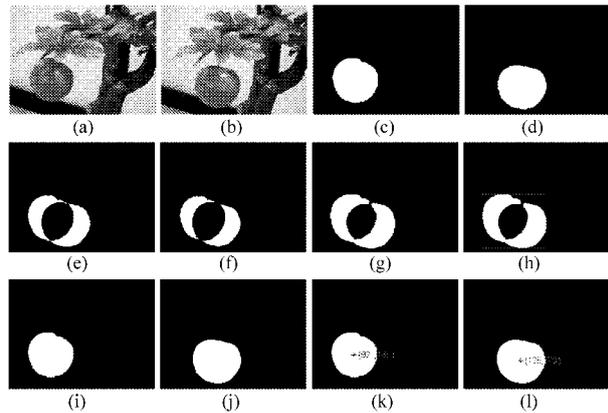


图 7 单个振荡果实 ($t=0.44$ s)

Fig. 7 One oscillating fruit ($t=0.44$ s)

(a) 第 k 帧 (b) 第 $k+1$ 帧 (c) 第 k 帧(分割后) (d) 第 $k+1$ 帧(分割后) (e) 差分 (f) 腐蚀移除 (g) 膨胀 (h) 标识 (i) 第 k 帧(振荡目标识别后) (j) 第 $k+1$ 帧(振荡目标识别后) (k) 第 k 帧(定位) (l) 第 $k+1$ 帧(定位)

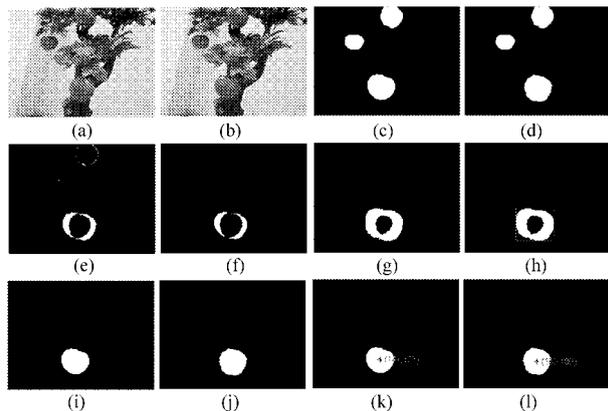


图 8 两个静态果实与一个振幅较小振荡果实 ($t=0.28$ s)

Fig. 8 Two static fruits and one smaller amplitude oscillating fruit ($t=0.28$ s)

(a) 第 k 帧 (b) 第 $k+1$ 帧 (c) 第 k 帧(分割后) (d) 第 $k+1$ 帧(分割后) (e) 差分 (f) 腐蚀移除 (g) 膨胀 (h) 标识 (i) 第 k 帧(振荡目标识别后) (j) 第 $k+1$ 帧(振荡目标识别后) (k) 第 k 帧(定位) (l) 第 $k+1$ 帧(定位)

图 7~12 中包括了实际采摘环境中所遇到的多数情况,试验结果表明,本研究所设计的动态识别方法是可行的、有效的,且识别时间少于 0.5 s。通过以上方法识别出所有图像序列中的同一振荡果实后,就可以分析其振荡规律,建立其运动状态模型,实现其状态轨迹的准确预估,从而使采摘机器人在果实振荡状态下仍然能进行采摘作业。但有以下问题需要说明。

(1) 本研究基于与图像中心最近原则确定振荡

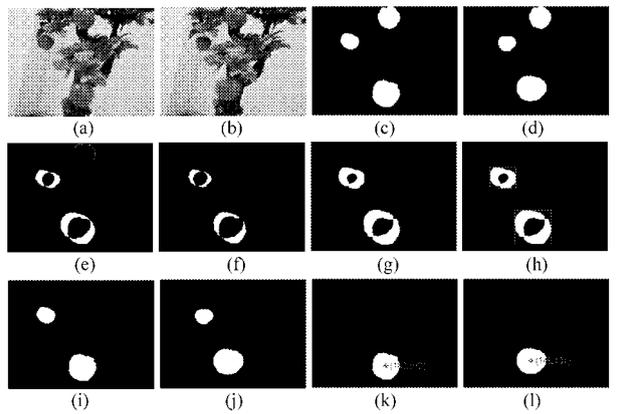


图 9 两个振幅较小的振荡果实 ($t=0.48$ s)

Fig. 9 Two smaller amplitude oscillating fruits ($t=0.48$ s)

(a) 第 k 帧 (b) 第 $k+1$ 帧 (c) 第 k 帧(分割后) (d) 第 $k+1$ 帧(分割后) (e) 差分 (f) 腐蚀移除 (g) 膨胀 (h) 标识 (i) 第 k 帧(振荡目标识别后) (j) 第 $k+1$ 帧(振荡目标识别后) (k) 第 k 帧(定位) (l) 第 $k+1$ 帧(定位)

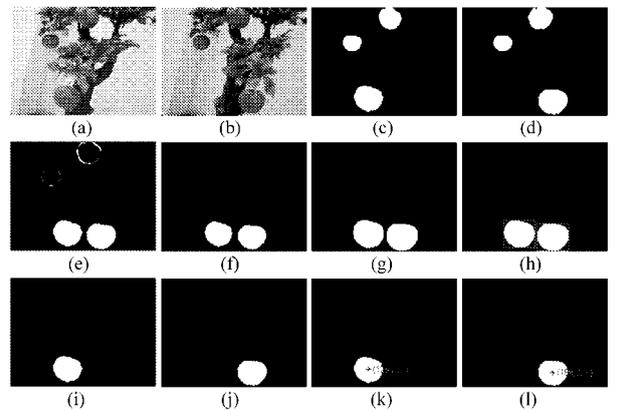


图 10 两个静态果实与一个振幅较大的振荡果实 ($t=0.33$ s)

Fig. 10 Two static fruits and one larger amplitude oscillating fruit ($t=0.33$ s)

(a) 第 k 帧 (b) 第 $k+1$ 帧 (c) 第 k 帧(分割后) (d) 第 $k+1$ 帧(分割后) (e) 差分 (f) 腐蚀移除 (g) 膨胀 (h) 标识 (i) 第 k 帧(振荡目标识别后) (j) 第 $k+1$ 帧(振荡目标识别后) (k) 第 k 帧(定位) (l) 第 $k+1$ 帧(定位)

目标果实,这种方法沿用了以往静态识别有多个果实需要选择采摘时采用的方法,在动态识别多个振荡果实选择采摘时,这种方法也是可行的(图 7c、7e、7f),但有可能出现差错,比如当两果实相距较近时,果实的振荡会改变其与图像中心的距离,基于图像中心最近原则识别可能会出现识别的不是同一个果实的情形,下一步将会引入其他方法进行研究,如目标跟踪方法。

(2) 众多文献中对实际作业环境下分离果实的识别研究较多,而对重叠果实和被遮挡果实的静态识别较少,特别是严重遮挡的果实(果实被遮挡 1/2 以上以及被枝叶分为多块)静态识别方法目前文献

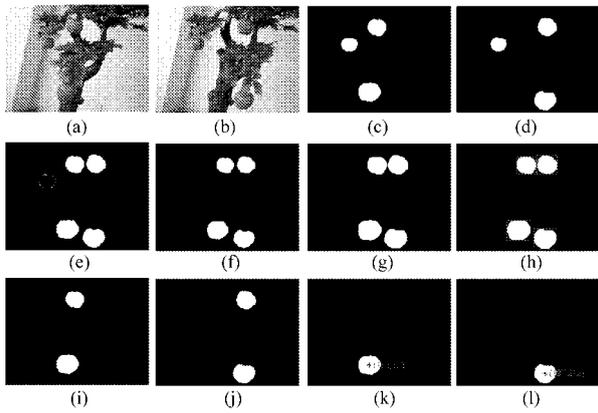


图 11 两个振幅较大的振荡果实 ($t=0.39\text{ s}$)

Fig. 11 Two larger amplitude oscillating fruits ($t=0.39\text{ s}$)

(a) 第 k 帧 (b) 第 $k+1$ 帧 (c) 第 k 帧(分割后) (d) 第 $k+1$ 帧(分割后) (e) 差分 (f) 腐蚀移除 (g) 膨胀 (h) 标识 (i) 第 k 帧(振荡目标识别后) (j) 第 $k+1$ 帧(振荡目标识别后) (k) 第 k 帧(定位) (l) 第 $k+1$ 帧(定位)

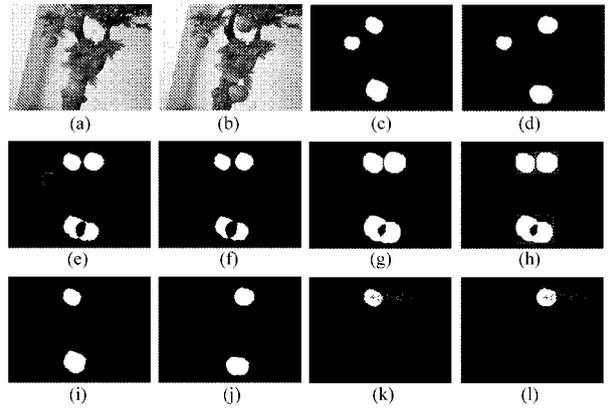


图 12 一个振幅较小和一个振幅较大的振荡果实

($t=0.40\text{ s}$)

Fig. 12 One smaller amplitude oscillating fruit and One larger amplitude oscillating fruit ($t=0.40\text{ s}$)

(a) 第 k 帧 (b) 第 $k+1$ 帧 (c) 第 k 帧(分割后) (d) 第 $k+1$ 帧(分割后) (e) 差分 (f) 腐蚀移除 (g) 膨胀 (h) 标识 (i) 第 k 帧(振荡目标识别后) (j) 第 $k+1$ 帧(振荡目标识别后) (k) 第 k 帧(定位) (l) 第 $k+1$ 帧(定位)

中没有提及过。上述动态识别方法是在以往静态识别方法上对分离无遮挡状态的果实进行研究的,对于重叠果实和被遮挡果实,如果以往采用的静态识别方法能够完好地识别出重叠果实和被遮挡果实,那么该动态识别方法相信也同样适用于重叠果实和被遮挡果实的动态识别,只是重叠果实和被遮挡果实振荡过程中,情况会更加复杂。

6 结束语

针对采摘机器人将果实分离果枝时导致其他果实振荡以及由于自然界风力作用引起果实振荡的情况,进行了振荡果实动态识别方法的研究。首先通过分析比较确定了基于 $R-G$ 颜色特征的大津动态

阈值分割方法,并对分割后的苹果图像进行噪声去除;其次采用帧间差分法、水平最小外接矩形法等对分割后的图像进行振荡果实动态区域的区域标识,将图像中的动态目标标识区域全部进行与背景色相同的区域填充后,再对分割后的原始帧二值图像与区域填充后的二值图像做相减运算,从而识别出图像中所有的振荡果实;然后求取振荡果实质心,基于与图像中心最近原则来确定振荡采摘目标果实;最后进行了试验验证,对实际采摘环境下所遇到的多数情况,本文算法都能很好地识别出振荡果实,识别时间少于 0.5 s 。

参 考 文 献

- 1 Zhao Dean, Lü Jidong, Ji Wei, et al. Design and control of an apple harvesting robot[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 112 ~ 122.
- 2 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)
- 3 李斌, Wang Ning, 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, Wang Ning, Wang Maohua, et al. In-field pineapple recognition based on monocular vision [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 345 ~ 349. (in Chinese)
- 4 Bulanon D M, Kataoka T, Ota Y, et al. Segmentation algorithm for the automatic recognition of Fuji apples at harvest [J]. Biosystems Engineering, 2002, 83(4): 405 ~ 412.
- 5 蔡健荣, 周小军, 李玉良, 等. 基于机器视觉自然场景下成熟柑橘识别[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 175 ~ 178.
Cai Jianrong, Zhou Xiaojun, Li Yuliang, et al. Recognition of mature oranges in natural scene based on machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 175 ~ 178. (in Chinese)
- 6 张德丰. 详解 MATLAB 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.
- 7 Anderson C, Bert P, Vander Wal G. Change detection and tracking using pyramids transformation techniques [C] // Proc. SPIE Conference on Intelligent Robots and Computer Vision, Cambridge, MA, 1985, 579: 72 ~ 128.

- Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(2): 192 ~ 196. (in Chinese)
- 4 王兴松, 王湘江, 毛燕. 基于超磁致伸缩材料的折弯型压曲放大机构设计、分析与控制[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 27 ~ 33.
Wang Xingsong, Wang Xiangjiang, Mao Yan. Design, analysis and control of novel pressing and bending magnifying mechanism driven by giant magnetostrictive material [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 27 ~ 33. (in Chinese)
- 5 Bi Jie. A study of magnetostrictive mini-actuators [D]. Maryland, USA: University of Maryland, 1997.
- 6 聂毓琴, 孟广伟. 材料力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 34 ~ 79.
- 7 王以真. 磁路设计原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 45 ~ 96.
- 8 徐峰, 张虎, 蒋成保, 等. 超磁致伸缩材料作动器的研制及特性分析[J]. 航空学报, 2002, 23(6): 552 ~ 555.
Xu Feng, Zhang Hu, Jiang Chengbao, et al. Designing and performance research of giant magnetostrictive actuator [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2002, 23(6): 552 ~ 555. (in Chinese)
- 9 于萍. 工程流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 65 ~ 87.
- 10 Sarkar D, Modak J M. Pareto-optimal solutions for multi-objective optimization of fed-batch bioreactors using nondominated sorting genetic algorithm [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(2): 481 ~ 492.
- 11 Michielssen E, Sajer J M, Ranjithan S, et al. Design of lightweight, broad band microwave absorbers using genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(6 ~ 7): 1 024 ~ 1 031.
- 12 Kishalay Mitra, Ravi Gopinathb. Multiobjective optimization of an industrial grinding operation using elitist nondominated sorting genetic algorithm [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(2): 385 ~ 396.
- 13 Carlos A C, Alan D C, Arturo H. Using a new GA-based multiobjective optimization technique for the design of robot arms [J]. Robotica, 1998, 16(4): 401 ~ 414.
- 14 赵章荣, 隋晓梅, 邹义杰, 等. 超磁致伸缩执行器全耦合非线性动态有限元模型[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 123 ~ 126.
Zhao Zhangrong, Sui Xiaomei, Wu Yijie, et al. Coupling nonlinear dynamic finite element model of giant magnetostrictive actuator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 123 ~ 126. (in Chinese)

(上接第 178 页)

- 8 Lipton A, Fujiyoshi H, Patil R. Moving target classification and tracking from real-time video [C] // Proc. IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, Princeton, NJ, 1998: 8 ~ 14.
- 9 赵文哲, 秦世引. 视频运动目标检测方法的对比分析[J]. 科技导报, 2009, 27(10): 64 ~ 70.
Zhao Wenzhe, Qin Shiyin. Comparative study on detection methods for video motion targets [J]. Science & Technology Review, 2009, 27(10): 64 ~ 70. (in Chinese)
- 10 李刚, 邱尚斌, 林凌, 等. 基于背景差法和帧间差法的运动目标检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(8): 961 ~ 964.
Li Gang, Qiu Shangbin, Lin Ling, et al. New moving target detection method based on background differencing and cotermious frames differencing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(8): 961 ~ 964. (in Chinese)
- 11 周俊, 张高阳, 刘锐, 等. 基于粒子滤波的苹果采摘机器人目标姿态估算[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 161 ~ 165.
Zhou Jun, Zhang Gaoyang, Liu Rui, et al. Apple attitude estimation based on particle filter for harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 161 ~ 165. (in Chinese)