

马正华, 申根荣, 吕继东. 基于极限腐蚀的重叠苹果果实分割方法[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(6): 1372-1378.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2017.06.025

基于极限腐蚀的重叠苹果果实分割方法

马正华, 申根荣, 吕继东

(常州大学信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 针对采摘机器人无法对重叠苹果准确分割的问题, 提出了一种基于改进极限腐蚀和控制标记符分水岭分割苹果图像的方法。首先, 利用果实色差分量的关系, 采取 R-G 颜色分量作为颜色特征向量对图像进行初分割, 然后采用 OTSU 方法分割、孔洞填充、去除小面积等方法获得完整果实二值图像, 对二值图像通过改进极限腐蚀的方法来获取种子点, 即局部最小区域, 通过获得图像的内外标记符使用控制标记符分水岭算法, 形成最终的分割图像并标记出分割线。结果表明: 这种方法能够很好地改善传统方法出现错误分割的问题, 找出清晰的分割线, 正确分割率能够达到 96.5%, 较传统分水岭法和快速聚类分割算法分别提高了 7.8 个百分点和 4.9 个百分点, 能够满足采摘机器人对重叠苹果图像的分割要求。

关键词: 色差分割; 极限腐蚀; OTSU 分割; 分水岭分割法

中图分类号: S233.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)06-1372-07

Study on the method of separating apple fruits based on limiting corrosion

MA Zheng-hua, SHEN Gen-rong, LYU Ji-dong

(School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: As picking robot can not segment the overlapped apples accurately, a new algorithm is proposed by improved limit corrosion and control segmenting apple image. R-G color component was taken as color features to segment image. After being segmented by OTSU method, holes filling and small area removing, the complete fruit binary image was obtained. Seed point could be obtained by improving the limit corrosion method for binary image, which was the minimum area. Segmentation image and the marked segmentation line were obtained by using the watershed algorithm. The results showed that the proposed method could solve the problem of error segmentation and find clear dividing lines. The correct segmentation rate reached 96.5%, which improved by 7.8% and 4.9% than that of traditional watershed algorithm and fast clustering algorithm.

Key words: chromatic aberration segmentation; limit corrosion; OTSU segmentation; watershed segmentation

收稿日期: 2017-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61640211); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20140266); 江苏省高等学校自然科学研究项目(17KJB416002); 常州市科技计划资助项目(CJ20179057)

作者简介: 马正华(1962-), 男, 江苏昆山人, 本科, 教授, CCF 会员, 主要研究方向: 机器视觉、嵌入式系统设计及应用。
(E-mail) m150619@163.com

通讯作者: 吕继东, (E-mail) vveaglevv@163.com

重叠苹果目标的识别和定位是苹果采摘机器人视觉系统的关键环节^[1-3], 而苹果目标的识别与定位的准确性往往取决于果实图像分割的结果。

国内外众多研究者在果实采摘机器人视觉领域以及重叠粘连图像分离领域做了大量的研究, 并取得了一定的成果^[4-7]。韩海梅等^[8]提出了融合 K-means 和 GVF(Gradient vector flow) Snake 模型的纤维图像分割算法, 有效解决了传统方法存在虚假边

缘和不连续等问题。Reis 等^[9]提出了基于机器视觉的葡萄分割技术,但其分割难度相对较大;张志强等^[10]通过训练建立 BP 神经网络,并将颜色、形状特征作为输入,建立绿色苹果分割模型,分割绿色果实;曾庆兵等^[11]利用数学形态学方法实现了重叠葡萄果实直径的测量;崔永杰等^[12]提出综合应用果实颜色和形状特征,采用 OTSU 方法分割阈值,从而识别出自然环境中的猕猴桃果实。司永胜等^[13]提出利用归一化的红绿色差 $(R-G)/(R+G)$,采用随机圆环法进行苹果果实的圆心、半径提取,通过求得半径圆形来实现重叠果实的分离;蒋焕煜等^[14]使用基于形态学的分水岭算法实现了穴盘幼苗叶片的边缘分割。张辉等^[15]使用标记分水岭与改进型 Li 模型的组合图像分割算法实现了重叠细胞的分割,该算法有效解决了曲线单向演化等问题。于丹丹等^[16]提出了一种融合 K-means 与 N-cut 的双重叠苹果分割方法,但该算法无法对有枝叶遮挡的重叠果实进行目标分割与重建,算法通用性不高。

上述文献中提出的很多方法对重叠果实的分割有着一定的效果,但普遍存在着算法实现难度较高的问题,而且由于果实生长环境的多样性和生长环境的复杂性,上述方法对重叠果实的分割还不够准确,不能精确地找出重叠果实的分割线,影响后续果实的识别精度。鉴于此,本研究提出了一种基于改进极限腐蚀和控制标记符分水岭的重叠苹果分割方法。将色差法分割出的苹果目标进行 OTSU 分割,小面积去除,孔洞提取出重叠果实区域二值图像,并利用改进的腐蚀方法求得重叠果实中每个果实的局部最小值,利用求得的局部最小值结合控制标记符分水岭方法来实现果实的分割,并得出最终清晰的分割线,以此来实现重叠果实的分割。

1 材料与方法

数码相机型号为 Canon DIGITAL IXUS 200 IS,果实品种为徐州红富士苹果,拍摄距离 20~80 cm,试验所用到的图像均在自然环境下拍摄;为了便于研究,分辨率统一调整像素为 640×480,图像试验软件平台为 Matlab R2010b,计算机处理器为 Inter(R) Core(TM)2 Duo CPU E6400@ 2.40 Ghz,内存为 2 G。

改进极限腐蚀和控制标记符分水岭结合的重叠苹果图像分割算法流程图如图 1 所示:

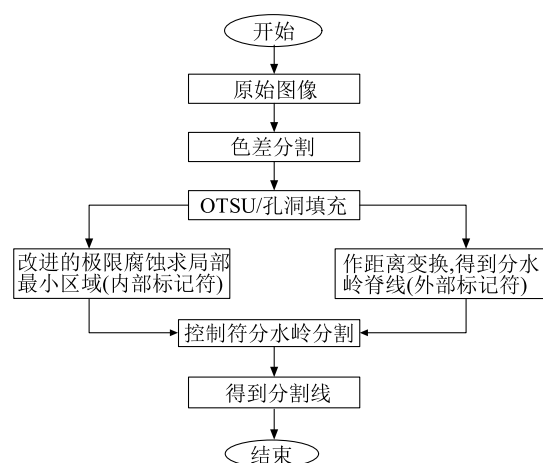


图 1 本研究算法

Fig.1 Flow chart of algorithm

2 结果与分析

2.1 图像的初步处理

为了后续对重叠苹果果实分离,首先对苹果图像进行预分割以获取图像中的果实区域。

2.1.1 颜色特征选取 由于果实和树枝、树叶以及天空等背景颜色差异较大,所以在获得苹果果实原始图像的时候根据图像的颜色分量关系来选取合适的颜色特征作为图像运算子进行分割,在 RGB 空间下苹果图像的 R 分量图、G 分量图及 B 分量图如图 2 所示:

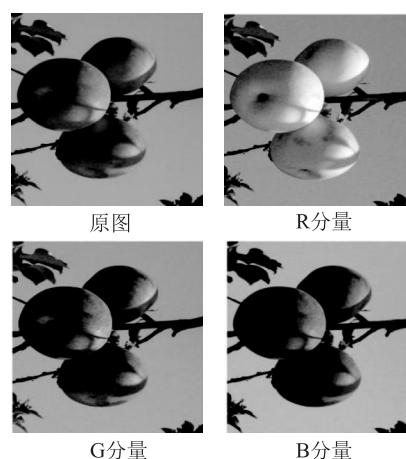


图 2 RGB 空间苹果图像各颜色分量

Fig.2 Chromatic aberration component of apple image

通过颜色分布特征和多次试验观察 R-G, R-B (图 3) 发现,在 R-G 的图像中,其色差灰度图像的直

方图具有明显双峰特性,即果实与背景之间差异明显,故基于 R-G 色差特征能够把苹果果实从诸多背景中初步分割出来,并成功地将彩色图像转化为一维的图像问题,为后续的进一步分割识别打下基础。

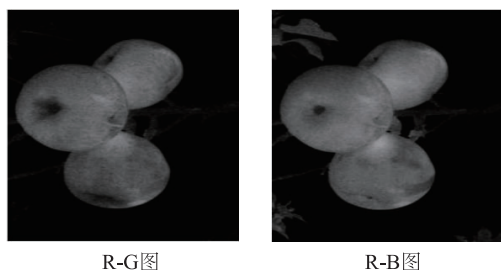


图3 苹果图像的色差分割图

Fig.3 Chromatic aberration segmentation of apple image

2.1.2 完整果实的区域获取 基于 R-G 色差图利用最大类间方差法 (OTSU) 来获取图像中果实区域的二值图像。最大类间方差法又称 OTSU 算法,它是一种通过计算图像中目标类和背景类的类间方差最大而进行的动态阈值求取算法^[17]。在具体灰度图像中,总像素为 N ,令其灰度级为 L ,灰度值集合 $G = \{0, 1, \dots, L-1\}$,与某灰度值 g 相对应的像素个数为 n_g ,那么有某灰度值 g 相对应的像素出现的概率 w_g 为:

$$w_g = \frac{n_g}{N} \quad (1)$$

假设图像二值化分割阈值为 T ,灰度级处于 $[0, T-1]$ 区间的所有像素记为背景区域 R_0 ,灰度级处于 $[T, L-1]$ 区间的所有像素记为目标区域 R_1 ,则所有背景区域像素出现的概率 ω_0 和平均灰度 μ_0 分别为:

$$w_0 = \sum_{g=0}^{T-1} w_g \quad (2)$$

$$\mu_0 = \frac{\sum_{g=0}^{T-1} g w_g}{w_0} \quad (3)$$

所有目标区域像素出现的概率 ω_1 和平均灰度 μ_1 分别为:

$$w_1 = \sum_{g=T}^{L-1} w_g \quad (4)$$

$$\mu_1 = \frac{\sum_{g=T}^{L-1} g w_g}{w_1} \quad (5)$$

图像所有像素总的平均灰度 μ_i 为:

$$\mu_i = \sum_{g=0}^{L-1} g w_g \quad (6)$$

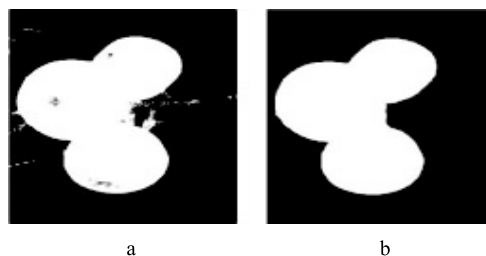
由此可知,背景区域 R_0 和目标区域 R_1 的类间方差 σ^2 为:

$$\sigma^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu_i)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu_i)^2 \quad (7)$$

当公式 (7) 中的类间方差值 σ^2 达到最大时,可将图像中背景与目标有效地分离,取得较好的目标分割效果,由于该算法本身的计算量比较大,本研究结合公式 (2)、公式 (3) 和公式 (7) 采用等价公式

$$\sigma^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2 \quad (8)$$

图 4a 为果实 OTSU 分割图像,从分割出的目标二值图像中可以看出该图不仅含有目标果实,通常还存在光斑、枝叶等噪声,果实还略带孔洞,为了达到更好的试验目的,需对图像进行孔洞填充,在四连通区域下利用小面积去除法将图像中面积小于 565 像素的小区域去除,经过如上处理后获得完整的果实区域二值图 (图 4b)。



a: OTSU 分割图; b: 小面积去噪图。

图4 完整果实区域图像提取

Fig.4 Extracting fruit area from images

2.2 重叠果实分离

2.2.1 改进极限腐蚀 图像中腐蚀是通过合适大小结构元素 b 平移到图像 f 中所有的位置,在每个平移后的位置,结构元素值会减去图像的像素值,所得值是最小值,腐蚀的操作可以用于图像的平滑处理,去除图像中一些不必要的像素,腐蚀公式如公式 (9):

$$(f \ominus b)(x, y) = \min \{f(x+x', y+y') \mid (x+x') \in D_b\} \quad (9)$$

而极限腐蚀则是对图像的一个连续腐蚀的过程,但不是把图像不断腐蚀直到一片黑为止,而是连续腐蚀过程中连通子区域消失前所有剩余部分的合并。传统的极限腐蚀方法先对原图像使用距离变换,然后求区域极值,在腐蚀的过程中导致不断地出现新的连通区域,但同时也会导致一些已经存在的连通区域消失,这就会造成种子点的流失,区域极值

的大小不确定。

针对这个问题,本研究是对二值化苹果图像进行交替腐蚀,即不是采用单一的圆形结构元素或者对图像进行迭代腐蚀,而是采用4邻域结构元素和8邻域结构元素对图像进行交替腐蚀,这样的目的是为了能够更好地保留图像中较小的凹陷信息,对一些粘连较紧而使得粘连处凹陷不显著的粘连图像区不会因为多次腐蚀而消失^[18],算法实现的具体步骤如下:

1) 对完整的苹果二值图像进行连通区域标记,对标记后的图像使用 $r=3$ 的4邻域和8邻域结构元素进行交替腐蚀,每完成1次交替腐蚀,都要对腐蚀后的图重新标记连通区域。

2) 每腐蚀并且标记1次之后,跟上一轮的连通区域比较,检查腐蚀后的图像是否有哪一个标记的区域消失了,如果消失了,那么就把消失这一区域的最后一次出现的区域恢复。

3) 直到下次腐蚀标记后的连通区域和这次腐蚀结果一样。

上述果实二值图像采用传统的极限腐蚀方法和采用本研究提出方法得到的果实种子图,如图5a和5b所示,可见经过改善后的腐蚀方法得到果实种子点并没有因为腐蚀的控制不当而消失,为后续果实的正确分割提供有力保障。



a: 传统极限腐蚀; b: 4邻域和8邻域交替腐蚀。

图5 果实种子比较图(局部最小值)

Fig.5 Comparison chart of fruit and seed

2.2.2 控制标记符分水岭算法 分水岭变换直接用于梯度图像时,噪声和梯度的局部不规则性常常会导致过分割,如果在图像中对前景对象和背景对象进行标注区别,再应用分水岭算法会取得较好的分割效果^[19]。基于标记控制的分水岭分割方法有以下基本步骤:

1) 计算分割函数,将图像的梯度幅值作为分割

函数。

2) 计算前景标记(内部标记符),即每个对象内部连接的斑点像素,具体则是指果实二值图像的局部最小区域(图5)。

3) 计算背景标记(外部标记符),不属于任何对象的像素,属于背景的像素(图6);

4) 分水岭分割,得到分割线。

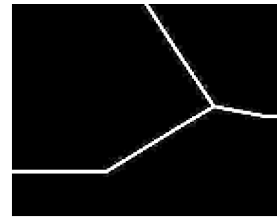


图6 分水岭脊线

Fig.6 Watershed ridge line

2.2.3 改进极限腐蚀与控制标记符分水岭算法结合 考虑到传统形态学腐蚀在对果实图像逐步腐蚀的过程中不能很好的对应标记种子点,对于过分粘连的果实,即使在连续腐蚀的过程中,由于单一的腐蚀结构元素,使其不能产生最终分类,甚至产生种子点的丢失。为了提高传统方法的鲁棒性,采用本研究改进的极限腐蚀方法,使用不同的结构元素对果实二值图交替腐蚀,并且在每一步的腐蚀过程中都会对图像的连通区域进行标记、检测和复原,减少每一步的误差从而达到减少整体误差的目的,获得完整内部标记符后,利用获得的内外标记符使用分水岭算法分割图像,从而获得果实分割边界。

2.3 结果比较

为了科学地验证本研究提出的算法对重叠果实图像分割的效果,以自然光照下的红色苹果果实为例,采用 Matlab2010b 进行编程仿真,进行果实图像的分割试验,并且将本研究算法与传统算法以及文献[20]中快速聚类分割法(CFS)进行比较验证。

图7是自然场景下的重叠果实图像,本研究主要研究相互重叠情况下的果实,这在实际环境中是很常见的现象,针对这类果实使用了本研究方法和其他几种常见方法所得结果进行了比较和分析。

图8是对苹果图像直接应用分水岭算法进行分割的结果,由于没有进行 R-G 处理,图像除了苹果以外还有树枝,树叶等背景,不能清晰地分割出苹果

图像,这种方法对噪声敏感,因此分割效果不理想。

图 9 是对处理后的果实二值图像进行传统的分水岭分割算法,分割前需求得图像的梯度图和果实目标的距离图,根据这些参数使用分水岭算法,由图可知虽然能够找出清晰的分割线,但分割线的位置存在着误差,分割出来的并不是一个完整的果实,存在误分割的问题。

图 10 是在进行了一次分水岭变换的基础上再用一次梯度的分水岭变换,目的是减少传统分水岭的误分割现象,试验结果证明这种方法虽然解决了过分割,但多做一次变换增加了算法的时间,影响整体试验过程的时效性,而且由图可知找出的果实分割线不是很精确,甚至产生了错分割,另外,分水岭次数使用越多,错分割现象越严重,算法的随机性比较大,故不再选择进行 3 次甚至更多次的分水岭变换。

图 11 是对图像采用聚类快速 (CFS) 算法,该算法是通过不断对苹果图像腐蚀,直到再腐蚀 1 次最后一个苹果就要消失为止,以最后留下的区域作为种子区域,然后对这些种子区域经过反复的条件膨胀直到再膨胀 1 次 2 个甚至 3 个区域就要重新变成一个区域为止,这时区域的临界点即为分割线,膨胀和腐蚀使用的都是 3×3 的圆形结构元。由于腐蚀和膨胀并不是一对可逆运算,多次反复使用腐蚀膨胀,虽能大致找出分割边界并在二值图中画出分割线,但是不能很好地保持目标的整体原始形状,不符合分割的要求,影响后续识别的精度。

图 12 是利用本研究算法对图像进行处理的分割图,该方法在对重叠果实分割之前可以判断出重叠果实的个数,给后续分割试验提供了一定的考量标准,保证了试验的准确性和可靠性,另外试验采用 4 邻域和 8 邻域结构元素进行交替循环腐蚀,解决了过度腐蚀和腐蚀不到位问题,很好地保留了原始图像信息,以此作为控制标记符分水岭的内部标记符,避免了分割时产生的错误分割。试验结果表明,本算法分割结果符合苹果果实的特征,目标间分界比较清晰合理,既保持了果实原有的形状特征,又没有出现错分割的情况,分割效果理想,符合苹果采摘机器人的采摘需求。

2.4 算法评价

为了定量地分析算法的分割结果,本研究从拍摄的自然光照下的苹果图像中选取不同程度的重叠果实图像进行试验,本研究使用正确分割率 A_s , 过

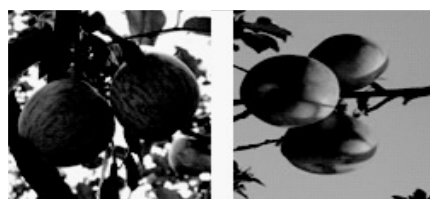


图 7 苹果原始图像图

Fig.7 Original image of apple

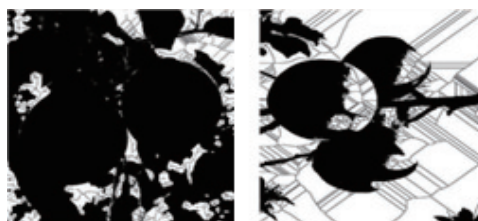


图 8 原图像进行分水岭分割

Fig.8 Watershed segmentation of original image

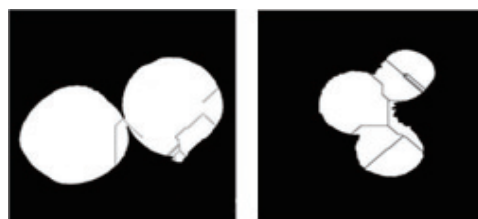


图 9 分水岭分割后的图像

Fig.9 Image segmented by watershed

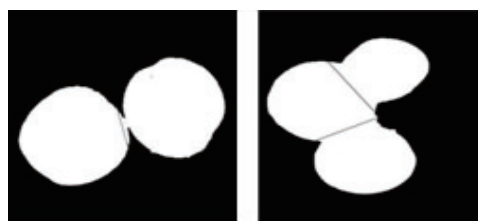


图 10 使用 2 次分水岭分割后的图像

Fig.10 Image segmented twice by watershed

分割率 O_s 和欠分割率 U_s 这 3 个指标来分析比较。

$$A_s = A_2 / A_1 \times 100\% \quad (10)$$

$$O_s = \frac{|A_2 - (A_2 \cap A_1)|}{\bar{A}_1} \times 100\% \quad (11)$$

$$U_s = \frac{|A_1 - (A_1 \cap A_2)|}{A_1} \times 100\% \quad (12)$$

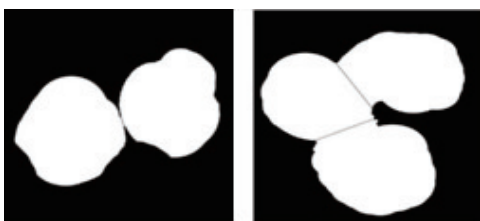


图 11 聚类快速分割后的图像

Fig.11 Image segmented by clustering fast segmentation

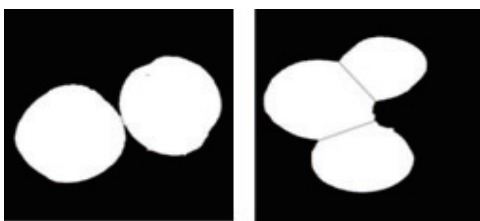


图 12 本研究算法分割后的图像

Fig.12 Image segmented by the algorithm used in this study

A_1 表示果实的真实面积; A_2 表示试验所分割得到的果实面积; \bar{A}_1 为 A_1 的补集。 A_s 表示试验所分割到的果实面积与果实真实面积的比值; O_s 表示背景的像素被误分割为果实像素的百分比; U_s 表示算法分割属于果实的像素被误分割为背景像素的百分比。 A_s 值越大, O_s 与 U_s 这2个值越小,说明算法的精度越高,分割效果越好。

由表1可知对图像直接采用一次分水岭法的效果最差,不仅正确分割率最低,而且出现了严重的过分割现象。本研究设计的方法在正确分割率均值上较其他3类算法分别提高了21.2、7.8、4.9个百分点,在过分割方面也有所改善。通过对比分割结果图和评价指标的定量分析,说明本研究所设计的方法能够有效减少错误分割,更能准确地分割出果实,找出分割边界。

3 结 论

针对自然光照下的苹果果实重叠图像,由于背景复杂,所以根据果实的颜色特征对图像使用OSTU方法来有效去除图像中的无关背景,对获得果实图像进行孔洞填充等预处理来获得完整果实二值图,最后使用本研究改进的极限腐蚀方法求得的局部极小值结合控制标记符分水岭方法获得最终的果

实分割图像,找出分割线并取得了较好的效果,但本研究的不足之处是相对于聚类快速分割法时间稍长,算法的鲁棒性、时效性有待提高。

表 1 不同算法分割性能的比较

Table 1 Comparison of segmentation performance of different algorithms

方 法	正确分割率 (A_s)	过分割率 (O_s)	欠分割率 (U_s)
一次分水岭法	75.3	47.4	5.4
二次分水岭法	88.7	10.7	2.3
聚类快速分割法(CFS)	91.6	5.8	2.7
本研究方法(均值)	96.5	1.3	3.6

参考文献:

- [1] BULANON D M, KATAOKA T, OTA Y, et al. A color model for recognition of apples by a robotic harvesting system[J]. Journal of the Jsam, 2002, 64(5): 123-133.
- [2] STAJNKO D, CMELIK Z. Modeling of apple fruit growth by application of image analysis[J]. Agriculturli Conspectus Scientifics, 2005, 70(2): 59-64.
- [3] ZHAO J, TOW J, KATUPITIYA J. On-tree fruit recognition using texture properties and color data [M]. New York: IEEE Press, 2005: 3993-3998.
- [4] 宋怀波, 张卫园, 张欣欣, 等. 基于模糊集理论的苹果表面阴影去除方法[J]. 农业工程学报, 2014, 10(3): 135-141.
- [5] 李 斌, 汪懋华. 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.
- [6] 钱建平, 杨信廷, 吴晓明, 等. 自然场景下基于混合颜色空间的成熟期苹果识别方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 137-142.
- [7] 宋怀波, 何东健, 潘景朋. 基于凸壳理论的遮挡苹果目标识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 174-180.
- [8] 韩海梅, 姚 砺, 万 燕. 基于 K-means 和 GVF Snake 模型的纤维图像分割[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2011, 37(1): 66-71.
- [9] REIS M, MORAIS R, PEREIRA C, et al. A low-cost system to detect bunches of grapes in natural environment from color images [J]. Advances Concepts for Intelligent Vision Systems, 2011, 50(8): 92-102.
- [10] 张志强, 张惠莉. 基于神经网络和图像颜色形状特征的绿色苹果图像分割[J]. 农业网络信息, 2013(10): 20-23.
- [11] 曾庆兵, 刘成良, 苗玉彬, 等. 基于形态学图像处理的重叠葡萄果径无损测量[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 356-360.
- [12] 崔永杰, 苏 帅, 王霞霞, 等. 基于机器视觉的自然环境中猕猴桃识别与特征提取[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 247-252.
- [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.
- [14] 蒋焕煜,施经挥,任 烨,等. 机器视觉在幼苗自动移钵作业中的应用[J]. 农业工程学报,2009,25(5):127-131.
- [15] 张 辉,朱家明,陈 静,等. 结合分水岭算法的水平集医学图像分割方法[J]. 计算机科学,2016,(S2):193-196.
- [16] 于丹丹,徐 越,宋怀波,等.融合 k-means 与 N-cut 算法的无遮挡双重叠苹果目标分割与重建[J].农业工程学报,2015,31(10):227-234.
- [17] 戚晓伟,陈秀宏. 改进的 Otsu 方法的双边滤波边缘检测算法[J]. 计算机工程与应用,2012,48(31): 150-155.
- [18] 王 鑫,胡洋洋,杨慧中. 基于迭代腐蚀的粘连细胞图像分割研究[J]. 南京理工大学学报,2016,40(3):285-289.
- [19] 周燕琴,吕绪洋. 基于改进 K-均值与分水岭算法的医学图像分割[J]. 软件导刊,2016,15(3):172-174.
- [20] 周天娟,张铁中,杨 丽,等. 基于数学形态学的相接触草莓果实的分割方法及比较研究[J]. 农业工程学报,2007,23(9):164-168.

(责任编辑:陈海霞)