

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

周天娟¹, 张铁中^{1*}, 杨 丽¹, 赵金英²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083)

摘 要: 多个草莓在田间经常相互接触。为了便于机器人的自动化采摘, 需将相接触的多个成熟草莓果实分开, 并给出各个草莓的重心坐标。基于数学形态学的方法, 研究了两种针对这种较复杂情况的成熟草莓果实分割的方法, 即聚类快速分割法和分水岭区域分割法。首先对成熟草莓果实和背景使用 BP 神经网络方法进行分割, 然后进行灰度化、二值化、孔洞填充等初步处理, 最后分别利用聚类快速分割法和分水岭区域分割法分割相接触成熟草莓果实图像。两种分割方法可分别得到两个果实区域, 通过对这两个区域计算重心即可为机器人采摘提供重心数据。结果表明, 两种分割方法都能将相接触区域分开, 各有优缺点和适用性。

关键词: 草莓; 图像分割; 数学形态学; 聚类快速分割法; 分水岭区域分割法

中图分类号: S233.4; TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)9-0164-05

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.

Zhou Tianjuan, Zhang Tiezhong, Yang Li, et al. Comparison of two algorithms based on mathematical morphology for segmentation of touching strawberry fruits[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 164-168. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

计算机图像处理技术在生物医学、遥感航天、军事、金融等领域的应用越来越广泛^[1], 在农业工程中利用计算机图像处理技术进行植物种类的鉴别^[2,3]、农产品的等级分选和品质检测^[4-7]、动植物生长情况监测^[8-10]、果蔬采摘^[11,12]等方面也取得了一定的应用。尽管有些研究还停留在算法和方法的可行性探索上, 不过这一技术在农业工程中的应用起到了推动作用。在果蔬采摘方面, 难点问题之一就是复杂情况下的果蔬目标进行的提取和识别。从已有文献看, 关于草莓图像分割的大部分研究还集中在图像与背景的简单分割^[13-17]。对于较复杂情况, 仅见谢志勇用 Hough 变换实现了相接触草莓的识别^[15], 不过误差较大。未见其他关于草莓果实相接触、重叠等复杂情况图像分割的研究报道。

通过对田间生长的草莓观察可以发现, 成熟草莓果实之间的位置关系大致可以分为 4 种情况: (1) 果实相互分离且无遮挡(图 1a), (2) 果实相互接触且无遮挡(图 1b), (3) 果实有部分重叠且无遮挡(图 1c), (4) 果实

被叶子或者其他未成熟果实遮挡(图 1d)。

对于果实相互分离且无遮挡(图 1a)的简单情况, 只需通过图像与背景的分割便可直接确定出成熟草莓果实的区域, 进而通过计算即可获得果实重心。对于图 1c、图 1d, 情况比较复杂, 本文不做研究。本文主要研究第二种, 即果实相互接触且无遮挡的情况, 这在实际环境中是很常见的现象。本文采用了两种基于数学形态学的方法来分割相接触的草莓果实, 并对这两种方法的结果进行了比较和分析。以图 1b 为例进行下面的操作。

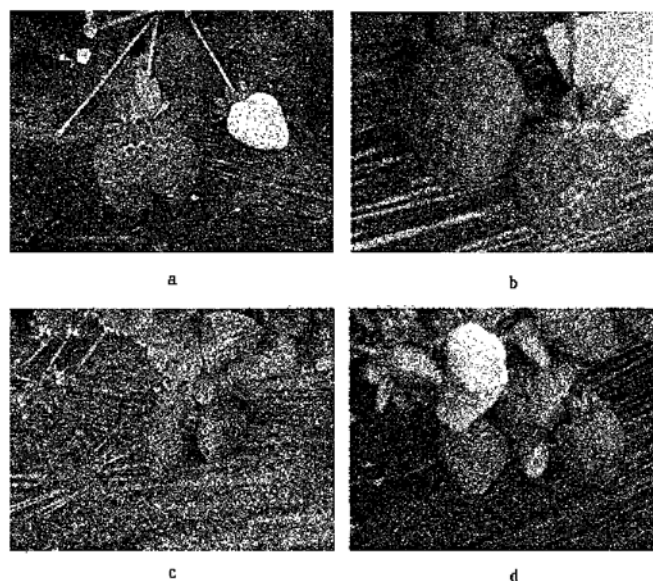


图 1 草莓果实实拍图

Fig. 1 Actual images of strawberry in the field

收稿日期: 2006-01-25 修订日期: 2007-04-11

作者简介: 周天娟(1980-), 博士, 主要从事生物生产机电一体化和生物生产机器人研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。

Email: cathytt@163.com

*通讯作者: 张铁中(1956-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事生物生产机电一体化和生物生产机器人研究。北京 中国农业大学工学院 174#, 100083。Email: zhangtz56@sohu.com

1 试验样本及试验条件

试验用草莓图像为 CCD 摄像机在北京市昌平区兴寿镇草莓种植基地用自然光拍摄。图像处理平台为 PC 机, 配置 Intel Pentium 4 处理器, CPU 主频 1.7 GHz, 内存 256 MB。操作系统为 Red Hat linux 9, 编程语言选用 C/C++ , 编译工具为 g++ , 调试工具为 gdb。

2 图像的初步处理

为了利用计算机视觉系统对田间成熟草莓进行识别并正确定位, 首先要从由 CCD 摄像机拍摄的在自然条件下生长的草莓图像中, 将成熟的草莓果实从复杂的背景图像中提取出来, 即对实际拍摄的彩色图像进行分割。可用多种算法, 本研究采用 BP 神经网络^[18]。

对图 1b, 首先采用 BP 神经网络法将成熟的草莓果实和背景分割开(图 2a), 从分割后的图像可以看出, 果实的轮廓基本完整, 但是图像上有很明显的一个孔洞, 这是由于强光照射在成熟草莓果实的小突起上形成了白色小亮斑, 给 BP 神经网络训练造成了干扰, 从而导致分割后的目标果实图像出现孔洞。用其他分割算法进行图像分割后也存在不同程度的孔洞现象。由于本研究后续的分割算法要采用多次腐蚀、膨胀等数学形态学的算法, 故受孔洞影响较大。针对研究对象的特征, 在不影响处理结果的前提下, 先将分割后的图像转为灰度图(图 2b), 采用最大类间方差法^[19]进行二值化(图 2c), 然后进行孔洞填充处理。对于较小的孔洞, 可以进行先膨胀后腐蚀的闭运算来填充, 但闭运算的次数不易控制。本文采用扫描线法进行填充, 填充的过程更易控制, 效果更好。具体做法另文阐述。填充结果见图 2d。

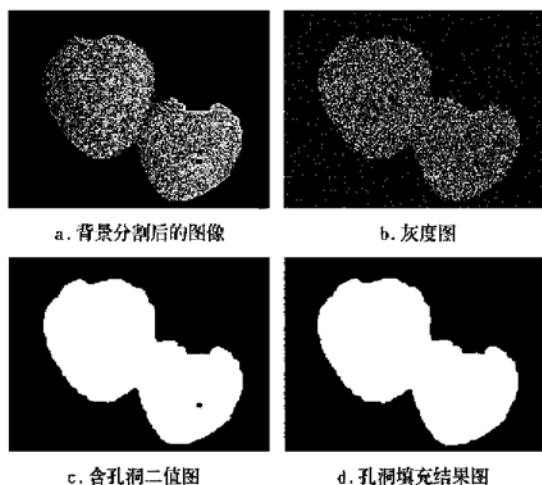


图2 草莓图像初步处理过程

Fig. 2 Initial processing of strawberry images

进行初步处理后, 两个果实的图像区域还是粘连在

一起的, 计算机无法自行将两个果实区域区分开。但本研究的目的是要得到每一个果实的重心位置。所以必须采用一定的算法将相接触的成熟果实区域分割开, 并给出每个果实的重心位置才能为分别进行自动化采摘提供条件。根据草莓果实的形状, 利用数学形态学算法, 将相接触的两个草莓果实区域分割, 并找到两个区域的近似重心, 为机器人下一步的采摘工作做准备。

3 数学形态学分割方法的应用

数学形态学是一门新兴的学科, 其基本理论和方法在图像处理、计算机视觉、医学图像分析等诸多领域成功应用。例如, 应用在医学图像处理领域来分离粘连或重叠的细胞^[20, 21]。常见的分割图像中相接触目标的数学形态学方法有两种^[22, 23]: 分水岭(水线, watershed)区域分割法和聚类快速分割法(CFS)。

2.1 聚类快速分割法

简要介绍该方法涉及数学形态学中的几个概念。

1) 最终腐蚀: 反复腐蚀一个目标直到它消失, 此时保留这之前最后一步的结果(这个结果也称为目标的种子)。用结构元素 B 迭代的腐蚀原始图像 A , 即:

$$A_k = A \ominus kB \text{ 对 } k = 1, \dots, m \text{ 其中 } \{m: A_m \neq \emptyset\} \quad (1)$$

2) 条件膨胀: 在条件 X (X 可视为限定集合) 的情况下用结构元素 B 来膨胀集合 A , 记为 $A \oplus B; X$, 并定义为:

$$A \oplus B; X = (A \oplus B) \cap X \quad (2)$$

3) 反复条件膨胀: 是条件膨胀的扩展, 记为 $A \oplus \{B\}; X$ (这里 $\{B\}$ 代表迭代地用 B 膨胀 A 直到不再有变化), 定义为:

$$A \oplus \{B\}; X = [(((A \oplus B) \cap X) \oplus B) \cap X] \oplus BL \quad (3)$$

对含有凸边界目标图像的聚类快速分割包括 3 个步骤: (1) 迭代腐蚀原始图像 A , 使之产生最终腐蚀图; (2) 确定最终腐蚀了的集合 Y_k ; (3) 从最终腐蚀产生的各个种子出发通过反复条件膨胀恢复原来区域。

3.2 分水岭区域分割法

分水岭算法有多种定义和对应的算法^[24], 一种经典直观的定义就是文献[25]中提出的沉浸算法定义。

通常, 分水岭算法采用数学形态学运算来实现^[28], 本文采用文献[23]中的方法来实现, 可分三个步骤:

1) 产生距离图

距离图是其中各个像素值与该像素到一个目标之距离成比例的图, 与地理学上的等高线类似, 可以称之为距离等高线。形态学中, 可迭代地腐蚀经过初步处理的二值图, 每次操作后, 将剩下的像素值加 1 来产生距离图, 最终腐蚀部分表示为灰度值最高的区域。这与聚类快速分割方法的第一步一致。

从拓扑的角度来看,距离图中的最大值对应山峰而最小值对应山谷,这些山谷就是分水岭。

2) 标记各区域种子,即计算出最终腐蚀集合 Y_k

这里的种子就是对应于距离最大值的山峰区域。

3) 生长各个种子并避免区域相连

这里要使用条件粗化算法。采用初始化和迭代计算两个步骤,公式为:

$$W_m = Y_m \quad (4)$$

$$\text{Do } n = m - 1 \text{ to } n = 0$$

$$W_n = Y_n \cup W_{n+1}$$

$$W_n = W_n \oplus \{B_k\}; A_m \quad (5)$$

$$n = n - 1$$

其中 $n = 1$ 时, W_n 为分水岭分割的结果, m 为第一步中腐蚀的次数, $\{B_k\}$ 为结构元素集合,可使用如图 3 所示的 12 个结构元素来控制粗化过程以防止目标连接。

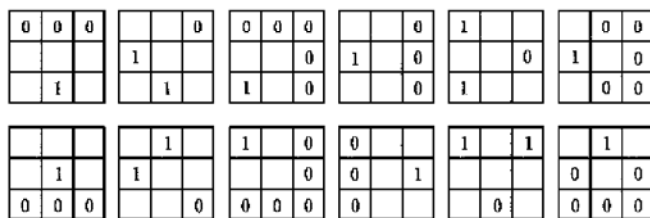


图 3 用于分水岭区域分割算法的结构元素

Fig. 3 Structural elements used for watershed region segmentation

4 特征参数

为了对上述两种方法得到的分割图像进行评价,也是为了后续处理,要进行目标果实图像几何特征的提取。特征包括面积、周长、重心、圆形度等。这里要用到面积和重心,根据文献[27]中的方法来进行计算。

由重心的计算公式可知,虽然区域内各点的坐标总是整数,但区域重心的坐标常常不为整数。对本文中的草莓图像而言,区域本身的尺寸远远大于像素单位尺寸,所以在求出重心坐标之后将其取整,就可以得到一个非常近似重心的点。这对于下一步的处理不会产生太大的精度方面的影响。

5 试验结果和比较分析

5.1 结果

图 4a、4b 是聚类快速分割法对草莓的分割过程。首先对图 2d 进行迭代腐蚀,直到再腐蚀一次其中一个草莓区域就要消失为止,这时得到的就认为是最终腐蚀图,图中剩下的就是各个果实区域的种子(如图 4a);将得到的最终腐蚀图进行关于图 2d 的反复条件膨胀,直

到再膨胀一次两个区域就要重新变成一个区域为止(图 4b)。第一步和第二步都要根据区域标记的结果来判断区域个数。区域的标记经常采用的有两种算法,游程标记算法和像素标记算法^[28]。本文采用像素标记法。膨胀和腐蚀采用的是 3×3 的方形结构元。



图 4 草莓图像的聚类快速分割法分割过程

Fig. 4 Clustering fast segmentation processes of strawberry image



图 5 草莓图像的分水岭区域分割法分割过程

Fig. 5 Watershed region segmentation processes of strawberry image

图 5a、5b 是分水岭区域分割法对草莓的分割过程。其中,第一步与聚类快速分割法的第一步相同,产生距离图,图 5a 是对图 2d 进行距离变换的距离等高线图,得到的最终腐蚀图也是图 4a;然后从最终腐蚀图出发,用对应的腐蚀集合去条件粗化最终腐蚀了的集合,并控制粗化过程以防止目标连接,这是与聚类快速分割法的主要区别,得到的结果是图 5b。

从两种方法的处理结果图 4b、5b 可以看出,两种方法都能区分开相接触的草莓果实区域,分水岭区域分割法能较好地保持目标的原始形状,在目标间加入的分界比较清晰合理,利用该结果求得的重心可以作为近似的实际重心。而聚类快速分割法不能很好地保持目标的整体原始形状,利用其结果求得的重心是否可以满足后续处理的要求还有待考证。

分别利用图 4b 和图 5b 求出两个果实区域在图像中的重心,为了更直观,将得到的两个果实图像重心在原始图像的相同坐标位置上标记出来,如图 6 所示。其中,“ \cdot ”表示用分水岭区域分割法得到的重心,“ \times ”表

示用聚类快速分割法(CFS)处理得到的重心。

从图6可以直观地看出,与果实区域的面积相比,两种方法得到的果实区域重心相差不大,都能满足后续处理需要近似重心的要求。



图6 草莓图像两种分割方法结果比较

Fig. 6 Comparison of the results by two methods for strawberry image segmentation

为了科学评估这两种方法,随机选取7幅图像进行处理,图像大小为 400×300 pix,经过上述两种算法分割得到两个成熟草莓果实的区域,分别计算重心,进行比较。数据列于表1。经人工分割得到的果实区域面积也列在表中,作为两种方法重心之差大小的参照。

表1 聚类快速分割法(CFS)和分水岭区域分割法的试验结果比较

Table 1 Comparison of the test results between clustering fast segmentation and watershed region segmentation

图号	果实号	果实区域面积	CFS 算法测得重心 (X_0, Y_0)	分水岭算法测得重心 (X_1, Y_1)	重心距离
1	1	25385	(147, 140)	(140, 133)	9.899
	2	19109	(271, 227)	(276, 218)	10.296
2	3	14611	(288, 162)	(292, 163)	4.123
	4	17449	(166, 174)	(158, 175)	8.062
3	5	13877	(160, 155)	(155, 149)	7.810
	6	10438	(251, 217)	(256, 212)	7.071
4	7	10530	(269, 97)	(263, 94)	6.708
	8	14013	(205, 190)	(199, 195)	7.810
5	9	7856	(166, 153)	(165, 154)	1.414
	10	6857	(254, 177)	(255, 178)	1.414
6	11	21150	(301, 155)	(304, 153)	3.606
	12	28155	(120, 180)	(124, 173)	8.062
7	13	13946	(110, 154)	(105, 149)	7.071
	14	10445	(202, 218)	(206, 212)	7.211

注: 重心距离代表两种方法测得的草莓重心位置的距离, 计算公式为 $\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}$ 。

由表1数据可以看出,相对于果实区域的面积来说,通过两种算法分割找到的草莓果实图像重心之差很小,都能够满足采摘时需要近似重心的要求。

5.2 分析

1) 上述两种方法的全过程都是自动完成的,不需人工干预,基本过程都是①连续腐蚀二值图像,②确定最

终腐蚀的集合,③从种子开始生长并恢复原来尺寸但不使各区域相连。两种方法的前两个步骤基本相同,分水岭区域分割法通过条件粗化来实现③,聚类快速分割法则用连续的条件膨胀来实现③。

2) 从处理结果来看,两种方法都能将相接触草莓分开,得到的两个果实的心之差很小,都能给下一步操作提供比较可靠的数据。分水岭区域分割法分离的准确度更高,在目标间加入的分界比较清晰合理,能很好地保持目标的原始形状。聚类快速分割多次使用腐蚀和膨胀运算,这两种运算并不是一对可逆运算,因此,经过若干次腐蚀再膨胀并不能完全恢复为原图像,有一定误差,误差的大小与结构元的大小和形状有关,也与二值边界的凹凸性有关,故该方法不能很好地保持目标的整体原始形状,但受错误分割的影响较小。

3) 从算法效率来看,分水岭区域分割法要跟踪所有腐蚀的运算过程,计算量较大,效率较低,对计算机软硬件的要求较高^[29]。聚类快速分割法不需要跟踪腐蚀的过程,只要根据腐蚀的结果进行膨胀即可,运算速度较快,效率相对较高。

4) 聚类快速分割法第一步的最终腐蚀过程可选用大的结构元以进一步提高分割运算速度,第二步的反复条件膨胀的结构元可小一点以保证重建精度。

6 结 论

通过分析田间草莓的实际生长情况,提出了两种基于数学形态学的方法来进行相接触草莓果实的图像分割,即聚类快速分割法和分水岭区域分割法。试验表明,两种方法都能有效的完成分割任务,各有优缺点和适用性,应该根据不同的情况和目的选择不同的方法。

致谢: 本文作者非常感谢《农业工程学报》副主编、北京大学博士王应宽先生对本研究的关注及在论文写作和修改过程中所给予的热情而有益的帮助。

[参 考 文 献]

- [1] 容观澳. 计算机图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [2] Guyer D E, Miles G E, Schreiber M M, et al. Machine vision and image processing for plant identification[J]. Trans of the ASAE, 1986, 29(6): 1500- 1507.
- [3] Berlage A G, Cooper T M, Aristazabal J F. Machine vision identification of diploid and tetraploid ryegrass seed [J]. Trans of the ASAE, 1988, 31(1): 24- 27.
- [4] Miller B K, Delwiche M J. A color vision system for peach grading[J]. Trans of the ASAE, 1989, 32(4): 1484 - 1490.
- [5] Gunasekaran S, Cooper T M, Berlage A G, et al. Image processing for stress cracks in corn kernels[J]. Trans of

- the ASAE, 1988, 31(1): 257– 263.
- [6] 赵杰文, 刘木华, 张海东. 基于数学形态学的牛肉图像中背长肌分割和大理石纹提取技术研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 144– 146.
- [7] 杨福增, 王 峥, 韩文霆, 等. 基于小波变换的红枣裂沟的多尺度边缘检测[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 92– 95.
- [8] Ling P P, Cheng Z, Musacchio D J. Quantification of xomatic coffee embryo growth using machine vision[J]. Trans of the ASAE, 1995, 38(6): 1911– 1917.
- [9] Das K, Evans M D. Detecting fertility of hatching eggs using machine vision II: Neural network classifiers[J]. Trans of the ASAE, 1992b, 35(6): 2035– 2041.
- [10] Das K, Evans M D. Detecting fertility of hatching eggs using machine vision I: Histogram characterization method[J]. Trans of the ASAE, 1992, 35(4): 1335– 1341.
- [11] 张瑞合, 姬长英, 沈明霞, 等. 计算机视觉技术在番茄收获中的应用[J]. 农业机械学报, 2001, 32(1): 50– 52.
- [12] 应义斌, 章文英, 蒋亦元, 等. 机器视觉技术在农产品收获和加工自动化中的应用[J]. 农业机械学报, 2000, 31(3): 112– 115.
- [13] 高 锐. 草莓收获机器人的初步研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [14] 张铁中, 陈利兵, 宋 健. 草莓采摘机器人的研究: II. 基于图像的草莓重心位置和采摘点的确定[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(1): 48– 51.
- [15] 谢志勇, 张铁中. 基于 RGB 彩色模型的草莓图像色调分割算法[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(1): 84– 86.
- [16] 徐丽明. 草莓收获机器人系统的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- [17] 近藤, 久枝, 吉田, 等. 高设栽培イチゴ用收获ロボットの試作[J]. 农业机械学会关西支部报, 1999, 86: 73– 74.
- [18] 张铁中, 周天娟. 草莓采摘机器人的研究: I. 基于 BP 神经网络的草莓图像分割[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(4): 65– 68.
- [19] Otsu N. Discriminant and least square threshold selection[A]. Proc 4IJCPR[C]. 1978: 592– 596.
- [20] 陆振晔, 范影乐, 庞 全. 基于数学形态学的重叠细胞分离方法及比较研究[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(6): 57– 60.
- [21] 马 东, 曹培杰. 分割重叠细胞核的方法及比较研究[J]. 北京生物医学工程, 1999, 9: 142– 147.
- [22] 章毓晋. 图象分割[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [23] 章毓晋. 图象工程下册: 图象理解与计算机视觉[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [24] Roerdink J, Meijster A. The watershed transform: definitions, algorithms and parallelization strategies[J]. Fundamenta Informaticae, IOS Press, 2001, 41: 187– 228.
- [25] Vincent L, Soille L. Watersheds in digital space: An efficient algorithm based on immersion simulations[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(6): 583– 598.
- [26] 陆宗骥. C/C++ 图像处理编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [27] 章毓晋. 图象工程上册: 图象处理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [28] Jain A K. Fundamentals of Digital Image Processing [M]. Prentice-Hall, 1989.
- [29] Barre F, Lopez J. Watershed lines and catchment basins: a new 3D-motif method[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 1171– 1184.

Comparison of two algorithms based on mathematical morphology for segmentation of touching strawberry fruits

Zhou Tianjuan¹, Zhang Tiezhong^{1*}, Yang Li¹, Zhao Jinying²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: More than two strawberry fruits always contact with each other in the natural condition. The touching mature strawberry fruits have to be separated and their centers of gravity have to be found in order to be picked automatically by robot. Based on the mathematical morphological algorithm, two methods to solve this complexity were proposed, namely, Clustering Fast Segmentation and Watershed Region Segmentation. First, BP neural network algorithm was used to separate the strawberry fruits from the background. Second, several initial processes were applied to prepare for the following operation, including graying, threshold and holes filling. In the end, the close fruits were separated by these two methods, and then the gravity centers of the fruits were calculated. According to the comparison and analysis of the results of the two methods, it is proved that both methods can successfully separate the touching fruits and both of them have their own advantages and disadvantages, and they can be applied in different areas.

Key words: strawberry; image segmentation; mathematical morphology; Clustering Fast Segmentation; Watershed Region Segmentation