网络出版时间:2017-10-09 09:39 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.11.018
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20171009.0939.036.html

枝条遮挡下单个苹果目标识别与重建方法的研究

孙飒爽[1],吴 倩[1],谭建昌[2],龙 燕[1],宋怀波[1]
(1 西北农林科技大学 机械与电子工程学院,陕西 杨凌 712100;2 四川大学 电子信息学院,四川 成都 610065)

[摘 要] 【目的】研究枝条遮挡情况下单个苹果目标的识别,为复杂生长环境下苹果目标的准确识别与定位及实现自动采摘提供支持。【方法】针对果实目标受枝条遮挡影响被分割成几个部分,从而严重影响果实目标准确识别的现状,以枝条遮挡下的苹果目标为研究对象,选用基于 Lab 颜色空间的 K-means 聚类算法对苹果目标进行分割,再通过数学形态学方法对目标苹果轮廓进行提取,然后根据最小外接矩形法去除目标苹果的伪轮廓,最后利用轮廓的曲率特征对目标苹果进行重建,并对分割与重建结果进行了方法验证。【结果】利用基于 Lab 颜色空间下的 K-means 聚类算法和最小外接矩形法可有效提取出苹果目标的真实轮廓,能够与苹果目标边缘线达到高度重合,同时可获得较准确的重建结果。对 10 幅枝条遮挡果实目标的识别、定位与重建的验证结果表明,该方法对目标苹果进行分割与重建的平均分割误差为 13.83%,平均重叠系数为 88.08%,假阳性率和假阴性率分别为 1.22%和 11.92%,目标苹果重建准确率均在 84.00%以上,平均重建时间为 24.40 s。【结论】应用本研究中的方法可对枝条遮挡下的苹果目标进行准确识别、定位与重建,有效缩短重建时间。

[关键词] 苹果;自动采摘;枝条遮挡;识别与定位;K-means 聚类算法;轮廓曲率
[中图分类号] TP391.41 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2017)11-0138-09

Recognition and reconstruction of single apple occluded by branches

SUN Sashuang[1], WU Qian[1], TAN Jianchang[2], LONG Yan[1], SONG Huaibo[1]
(1 *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2 *School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan* 610065, *China*)

Abstract: 【Objective】 The identification of a single apple target occluded by branches was studied to provide support for the identification, localization and automatic picking of apples in complex growing environments. 【Method】 The fruit targets occluded by branches are often divided into several parts, which affects the accurate identification of fruit targets seriously. In this study, the K-means clustering algorithm based on Lab color space was used to segment apple targets, then the contours were extracted by mathematical morphology method. After the false contours of target apple were removed according to the minimum external rectangle method, the targets were reconstructed by the curvature features of the contours, and the results were verified. 【Result】 The above method could effectively extract the real contours of apple targets and achieve high coincidence with the edge lines of targets based on K-means clustering algorithm in Lab color space and minimum external rectangle method. More accurate reconstruction results were also obtained. A total of 10 experimental target fruit images occluded by branches were tested for

[收稿日期] 2016-10-14
[基金项目] 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA10230402);陕西省农业科技创新与攻关项目(2016NY-157);中央高校基本科研业务费项目(2452016077)
[作者简介] 孙飒爽(1994—),女(满族),黑龙江哈尔滨人,在读硕士,主要从事农业智能化检测研究。
E-mail:18291875610@163.com
[通信作者] 宋怀波(1980—),男,山东济宁人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事数字图像处理研究。
E-mail:songyangfeifei@163.com

identifying, locating and reconstructing. The average division error was 13.83%, the average overlapping coefficient was 88.08%, and the false positive and false negative rates were 1.22% and 11.92%, respectively. The reconstruction accuracy rate of target apples was above 84.00%, and the average construction time was 24.40 s.【Conclusion】 The methods developed in this study could be used for accurate identification, location and reconstruction of apples occluded by branches, which could shorten the time of reconstruction effectively.

Key words: apple; automatic picking; branch occlusion; identification and location; K-means clustering algorithm; contour curvature

中国是世界上最大的苹果生产国，2010 年苹果总产量已远超欧洲、美洲、非洲和大洋洲之和[1]。随着我国农业结构的不断调整以及生产布局的逐步优化，苹果的生长环境得以改善，生产效益有了较大提高，但与国际先进水平相比，仍存在明显差距，尤其在机械化与设施农业发展方面进展缓慢，成为阻碍我国苹果产业持续健康发展的主要原因之一[2]。

在苹果生产作业中，果实的采摘占整个作业量的 40%～50%，是整个作业中最耗时耗力的部分，并且采摘作业质量的好坏直接影响到苹果的储藏、加工和销售，从而最终影响其市场价格和经济效益，因此实现果实的自动采摘势在必行，而其关键在于如何利用机器视觉技术实现果实的准确识别与精确定位。在果实目标识别和分割研究方面，国内外众多学者均取得了一定的研究成果。如司永胜等[3]针对颜色和背景相近的绿色苹果，提出了一种基于 K-均值聚类的苹果图像分割算法，识别率达 81%；胡婵莉[4]以重叠苹果目标为测试对象，综合利用色差法与 Otsu 分割方法提取苹果目标轮廓，并分别利用 Hough 变换法、极值法、迭代腐蚀法、分水岭与最小二乘拟合相结合方法进行试验，对比发现通过分水岭与最小二乘拟合结合算法获得的拟合效果更优，能够更好地实现重叠苹果目标的定位，实时性较高；荀一等[5]通过建立 BP 神经网络，并将图像中的苹果目标按形状和位置分为 5 类，利用不同的圆拟合方法对苹果目标及其果柄进行精确定位；Shebiah[6]将果实的颜色与纹理特征进行了有效融合，通过基于小波变换统计特性的最小距离分类来完成对不同果实的识别，并证明了该方法对多种果实识别的有效性；李昕等[7]在类圆随机 Hough 变换算法的基础上，添加了边缘预检测、快速定位圆心等模块，以提高算法对遮挡环境下油茶果实的识别率；陶云[8]采用基于对比度受限自适应直方图均衡化的果树树枝迭代阈值分割法完成树枝障碍的识别，通过提取树枝骨架及其端点和分支点进行立体匹配，根据三角测量原理进行苹果树枝障碍的定位；宋怀波等[9]针对果树枝叶遮挡、果实间相互遮挡的现象，提出了一种基于凸壳理论的遮挡苹果目标识别与定位方法，定位精度显著提高。现如今，对于遮挡下的果实目标识别与定位，国内还未见较为完善的研究成果，为达到高识别度与精准定位的目标，往往需要选取大量具有代表性的候选点，但由于系统处理数据量大、工作效率低，因此不能满足实时定位的需求。

在自然场景下，苹果的生长姿态受土地、季节、天气等自然条件的影响而存在较大的差异[10]，果实被枝条遮挡现象较为普遍。受枝条遮挡的影响，果实在识别过程中往往被分割成几个部分，常规算法会将其误认为多个独立的果实，严重影响果实的准确识别、采摘点的精确定位和采摘行为的执行。鉴于上述原因，本研究拟提出一种枝条遮挡下的苹果目标识别与重建方法，通过苹果目标的分割、目标轮廓的提取、伪轮廓与孔洞的去除等过程实现苹果的识别与重建，以期获得枝条遮挡下果实目标的准确分割与重建，为果实自动采摘技术的发展提供借鉴。

1　研究对象的选取及处理

试验选用 SONY W730 型号相机进行果实目标的拍摄，相机像素为 4 608×3 546，JPG 图像存储格式。试验以被枝条遮挡下的红色苹果为研究对象，由于雨、雾、霾等天气都会对图像质量产生较大的影响，所以试验中用到的所有图像均为晴天拍摄。在实际采摘过程中，顺光和逆光也会对苹果图像的颜色造成一定影响，为了保证试验结果的可靠性，拍摄图像既有顺光角度，也有逆光角度，用以验证不同光照条件下苹果的定位效果。试验图像均于 2015 年 9 月 20 日至 25 日在杨凌高新农业示范区园艺学院试验场采集。拍摄的枝条遮挡下的苹果目标如图 1 所示。由图 1 可以发现，受枝条遮挡的影响，果实目标被分割为 2 个完全独立的部分，采用常规图像分割方法进行处理后，完整的苹果目标会被误分为 2

个独立的果实目标,导致目标被错误识别。本试验中识别果实目标的过程在 2.30 GHz 处理器、3.89 Gb 内存的 PC 机上开发完成,试验程序在 MATLAB R2010a 环境下编写及运行。

图 1 枝条遮挡下的苹果目标

Fig. 1 Target apple occluded by branches

2 颜色空间转换及分割处理方法

2.1 颜色空间转换

常见的 RGB 空间中所有颜色都能够看作红、绿、蓝三基色的组合,每种颜色都可用其 R、G、B 三分量进行表示,但由于三分量之间存在很强的相关性,因此不适用于直接基于三个分量独立运算的图像分割[11]。而 Lab 颜色空间是目前最均匀的颜色空间,且与设备无关,更适用于接近自然光照的场合[12],所以本试验选取 Lab 颜色空间开展研究,满足了后续对苹果目标进行分割、识别、定位与重建的需求[13]。

Lab 颜色空间是基于 XYZ 空间作为中间模式间接转换的色彩模型[14],由亮度特征 L 及有关色彩的 a、b 分量 3 个要素组成。其中,a、b 分量的取值为−128～127,a 分量数值的增加表示颜色由绿到红的递变,b 表示由蓝至黄的过渡过程。RGB 颜色空间到 XYZ 颜色空间的转换关系如下式所示:

$$\begin{cases} X=0.49\times R+0.31\times G+0.2\times B, \\ Y=0.177\times R+0.812\times G+0.011\times B, \\ Z=0.01\times G+0.99\times B。 \end{cases} \quad (1)$$

式中:R、G、B 分别表示红、绿、蓝三颜色通道的色彩分量值,X、Y、Z 即为过渡空间下对应的转换值。XYZ 颜色空间到 Lab 颜色空间的转换关系如式(2)所示:

$$\begin{cases} L=116\times f(Y/Y_n)-16, \\ a=500\times[f(X/X_n)-f(Y/Y_n)], \\ b=200\times[f(Y/Y_n)-f(Z/Z_n)]。 \end{cases} \quad (2)$$

式中,$f(t)=\begin{cases} t^{1/3} & t>0.008\ 856; \\ 7.787\times t+0.138 & t\leqslant 0.008\ 856。 \end{cases}$ (3)

式中:L 表示图像的亮度分量,a、b 代表图像的 2 个彩色分量值,X_n、Y_n、Z_n 为可见光下的三刺激值,f 表示校正函数,t 为校正变量。待处理图像的 Lab 颜色空间转换结果如图 2 所示,其中图 2(a)为 Lab 颜色空间图像,图 2(b)为待处理图像的亮度分量图像,图 2(c)、图 2(d)分别表示对应的彩色分量。由于红色苹果目标与背景枝叶颜色差别较大,因此只需提取 Lab 颜色空间下的 a、b 彩色分量即可满足后续对苹果目标进行分割的需要。

(a) Lab颜色空间图像 (a) Lab color space image
(b) L分量图像 (b) L component image
(c) a分量图像 (c) a component image
(d) b分量图像 (d) b component image

图 2 遮挡苹果目标的 Lab 颜色空间转换结果

Fig. 2 Conversion of Lab color space for occluded apple target

2.2 基于 K-means 聚类算法的苹果目标分割

K-means 聚类算法是一种基于样本间相似性度量的间接聚类算法,属于无监督学习算法[15],可实现图像分割的直观性、高效性,是应用较为广泛的聚类分析方法之一[16]。该算法通过迭代满足簇内相似度最高、簇间相似度最低的要求,以完成待分割空间的数据划分[17]。K-means 聚类算法的实现步骤如下:

(1)确定聚类数目 k,将目标图像聚成 k 类,选取 k 类的初始聚类中心分别为 z_1,z_2,…,z_3。

(2)根据公式 $d=|p_j-z_i|$ 计算样本集中每个待处理数据点 p_j 到 k 个簇中心的距离 $d(p_j,z_i)$,其

中，$i=1,2,\cdots,k$；$j=1,2,\cdots,m$，m 为待处理数据点个数。

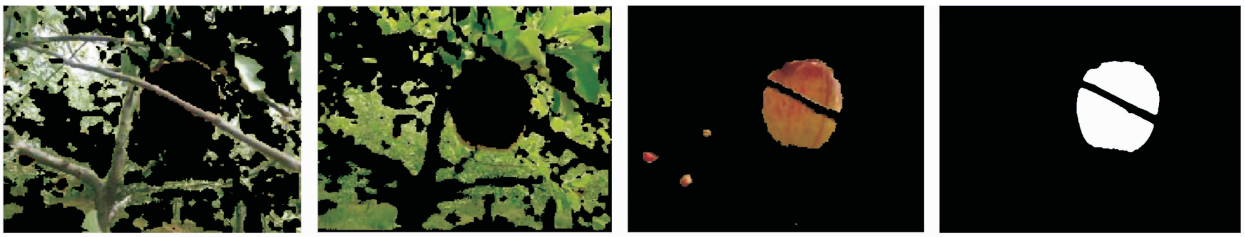
(3)寻找最小距离 d 下对应的样本点 p，将其归入至与 z_i 相同的簇中。

(4)按照公式 $z_i^* = (\sum p_i)/N$ 计算每个簇中所有样本点的均值作为新的簇中心，其中 N 表示当前簇中包含的数据点数。

(5)重复步骤(2)、(3)和(4)直至每个簇不再发生变化为止。

将图 1 中待分割枝条遮挡下的苹果图像作为测试对象，利用 K-means 聚类算法进行苹果目标分割后的结果如图 3 所示。由图 3 可以看出，原图像中存在较多的叶片、枝条等背景信息，此时设定分类数 $k=3$，将图像分为果实、树叶和枝条 3 类，采用上述方法对图像聚类后的结果如图 3(a)、(b)、(c)所示。图 3(a)为分割后的枝条子图像，由于在背景中存在与枝条较为接近的其他目标，因此枝条分割结果会存在一定的干扰。图 3(b)为经过聚类分割后的叶片子图像。图 3(c)为最终得到的苹果目标子图像，在该图像中，遮挡的苹果目标被枝条分割为 2 部分，同时背景中的苹果目标均能够完好地提取。最后对图 3(c)中苹果目标聚类结果进行二值化、孔洞填充及开运算等预处理操作，处理结果如图 3(d)所示，可见图像背景区域中多个苹果目标与图像噪声均得以去除，同时目标苹果边缘也更加平滑。

试验结果表明，K-means 聚类算法能够很好地分割出目标苹果区域，经过多次测试，目标苹果的分割准确度可达 85%以上，具有很好的分割效果，能够达到对苹果目标准确识别的要求，为进行枝条遮挡下果实目标的定位与重建奠定了基础。



(a) 枝条子图像 (a) Branches sub-image　(b) 树叶子图像 (b) Leaves sub-image　(c) 苹果子图像 (c) Apples sub-image　(d) 预处理图像 (d) Preprocessing image

图 3　基于 K-means 聚类算法对遮挡苹果目标的处理结果

Fig. 3　Processing results based on K-means clustering algorithm for occluded apple target

3　苹果目标伪轮廓去除及轮廓提取

3.1　伪轮廓的去除

由于遮挡苹果目标的枝条会对苹果目标轮廓的提取产生较大干扰，因此需去除苹果枝干形成的伪轮廓。为了得到较为真实、可靠的目标苹果轮廓线，试验根据苹果目标轮廓线及其最小外接矩形交点情况将图像中枝条形成的伪轮廓予以去除，方法如下：

1)画出图中各个区域的最小外接矩形。

(1)选取轮廓图像中边缘横坐标或者纵坐标最小的点作为起始点；

(2)以起始点为端点做水平直线，逆时针旋转至与边缘线相交，连接起始点与相交点即可获得第一条边；

(3)将步骤(2)得到的相交点作为下一个起始点，依次重复步骤(2)，直至闭合。

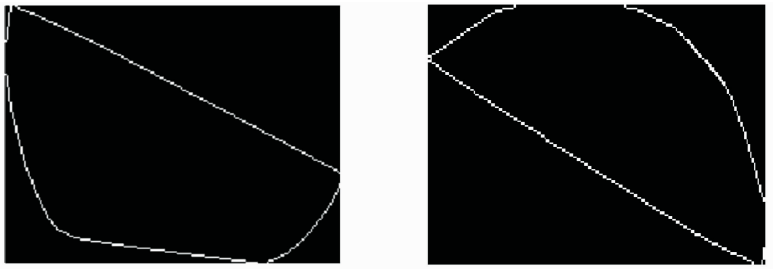
2)根据各部分图像与其最小外接矩形的交点情况确定这一段轮廓是否为伪轮廓。

(1)寻找凸集顶点相对应轮廓线上的点；

(2)确定各个顶点在跟踪后的轮廓点序列中的位次，并由此计算出两相邻顶点间的像素距离；

(3)利用该距离自适应设定合理的阈值，将大于此阈值的伪轮廓段剔除。

不难看出，苹果目标均会被果树枝条分割成不同的 2 个部分，这 2 个区域的最小外接矩形如图 4 所示。对于圆弧区域，由于该区域可以无限趋近于 n 边形，因此其对应的凸集区域顶点相对密集。而对于非圆弧区域，其对应的凸多边形的顶点相对稀疏，所对应的轮廓边界区域必然像素点长度加长。试验中近圆形苹果目标真实轮廓线应为圆滑弧线，对应的外接矩形上顶点较为密集，若最小外接矩形相邻两顶点间直线距离过大，该轮廓段可认定为枝条形成的伪轮廓或者是错误轮廓段，故而可以利用这一特点确定合适的轮廓段阈值，将该区域轮廓线剔除。



(a) 左下方区域
(a) The lower left area

(b) 右上方区域
(b) The upper right area

图 4 目标苹果 2 个区域的最小外接矩形

Fig. 4 Minimum external rectangles of the two apple regions

3.2 目标轮廓的提取

试验选取伪轮廓去除阈值 $T=15$ 像素,将目标苹果区域最小外接矩形顶点距离大于 15 像素的轮廓段予以去除。在对图像中的相应伪轮廓进行去除后,得到了目标苹果的边缘如图 5 中白色实线所示。由图 5 可以看出,提取出的苹果目标轮廓共包含左下及右上 2 部分区域,并且每部分的区域轮廓都是不连续的,剔除非真实的轮廓线后,所保留的轮廓线基本可以表示苹果目标的真实区域。

为了验证去除伪轮廓方法的有效性及苹果目标定位的准确性,将获得的苹果目标真实轮廓与原始图像进行对比,如图 6 所示,可见苹果目标轮廓段与其边缘线能够较好重合。由于枝条遮挡下的苹果目标为非理想球体,因此可以利用保留下来的苹果目标真实轮廓线求取拟合模型的圆心和半径,完成对苹果目标的重建。试验结果表明,利用上述方法能够有效地提取出目标苹果轮廓,对枝条遮挡下的苹果目标能够获得较精确的定位结果,为后续的轮廓曲率拟合创造了良好的条件。

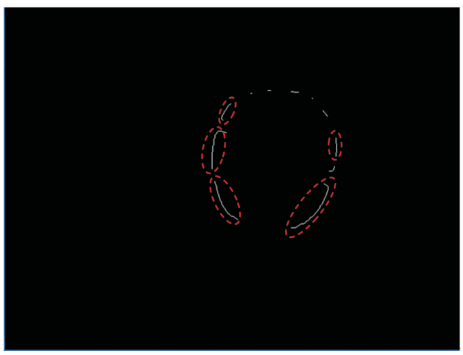


图 5 去除伪轮廓后的苹果目标边缘

Fig. 5 Target apple edges after removing false outline

图 6 苹果目标定位结果

Fig. 6 Recognition of target apple

4 基于轮廓曲率特征的苹果目标重建

由于苹果目标在果实、花萼与果柄连线两侧区域轮廓较为平滑,轮廓曲率变化较小,而果实、花萼及轮廓非平滑区域曲率变化较大,因此可通过判断其曲率特征变化寻找其合适的轮廓段以进行苹果目标的定位。该方法具有抗干扰性好、运算简单、定位准确等优点。曲率变化反映了轮廓线的变化,通过计算曲率即可实现对苹果目标轮廓线的识别,并将其看作圆弧进行圆拟合。需遵循的规则如下:

(1)舍去目标轮廓线上采样点较少的一段或多段圆弧;

(2)若仅有一段圆弧,根据 $R=1/\bar{c}$ 求取圆弧所在圆的半径,其中,$\bar{c}$ 为圆弧上采样点的平均曲率。再利用切线性质获取圆心位置,确定拟合圆;

(3)若轮廓线包含多段圆弧,对所有圆弧按照步骤(2)逐一处理,选取包含目标像素点个数最多的圆作为拟合圆。

为保证其重建结果的可靠性,对于图 5 所示的苹果目标真实轮廓,应剔除过短轮廓线并在其余圆弧段上随机选点。试验选用图 5 中红色虚线区域轮廓段,分别对 5 段圆弧多次选取同一真实轮廓段上 3 个重建候选点,利用曲率公式求取曲率半径,再通过作出苹果目标轮廓点切线的垂直直线大致确定拟

合圆圆心所在区域，利用三点定圆法对图像中 3 个不同的特征点进行组合，求其圆心坐标平均值，得到由这 3 个点确定的拟合圆的圆心，做出拟合圆完成对目标苹果的重建。图 7 为采用该方法得到的目标苹果重建结果，图中蓝色点为拟合圆圆心，白色圆为拟合苹果目标的区域，由于苹果目标的纵截面不是绝对的正圆形，所以相对于真实的苹果目标，拟合结果会存在一定的误差，但针对枝条遮挡下的苹果目标，基于此方法的拟合效果较好，能够有效地完成苹果目标的重建。

图 7　基于轮廓曲率特征的目标苹果重建结果

Fig. 7　Reconstruction of target apple based on contour curvature feature

5　苹果目标识别与重建结果分析

为了更好地探究重建效果，本试验分别利用分割误差、假阳性率、假阴性率及重叠系数 4 个指标[18]进行了分析，并根据苹果目标的重建时间对算法性能加以评估。其中苹果目标的真实区域是通过 Photoshop 软件处理后得到的，利用 Photoshop 软件中的抠图工具将包含遮挡区域的苹果目标从复杂背景中分割出来，获得该苹果目标的真实面积。

(1)分割误差(A_f)。分割误差主要体现了 K-means 聚类算法对枝条遮挡下的苹果目标的分割效果，其值越小表明分割效果越好。计算方法为：

$$A_f=|A_G-A_F|/A_G\times100\%。\tag{4}$$

式中：A_G 为苹果目标的真实面积，包含的像素点即为真实像素点，图像的其余像素点可被认为是背景像素点；A_F 为 K-means 聚类算法分割后的苹果目标面积，该区域包含的像素点即为目标像素点。

(2)假阳性率(FPR)。假阳性率即实际属于背景的像素点被误判为目标像素点的百分比，FPR 值越低表明苹果目标提取精度越高。其计算公式为：

$$FPR=|A_F-(A_F-A_G)|/|C_u(A_G)|\times100\%。\tag{5}$$

式中：C_u 表示目标区域在样本空间中的补集。

(3)假阴性率(FNR)。假阴性率则为实际属于目标的像素点被误判为背景像素点的百分比，该值的大小反映了苹果目标的提取精度，该值越大表明提取精度越低。其计算公式为：

$$FNR=|A_G-(A_G\cap A_F)|/A_G\times100\%。\tag{6}$$

(4)重叠系数(O_I)。重叠系数指实际属于目标或背景的像素点在分割中也被分为目标或背景的像素点的百分比，表示对果实目标拟合重建的准确程度。O_I 值越高，表明苹果目标的提取精度越高，拟合结果越准确。其计算公式为：

$$O_I=|A_F\cap A_G|/|A_F\cup A_G|\times100\%。\tag{7}$$

选用图 8 所示的 10 幅枝条遮挡下的苹果目标图像进行测试，其中图(b)、(c)、(g)、(h)、(i)5 幅图像均于顺光条件下拍摄，而其余 5 幅均为逆光下的苹果目标图像。

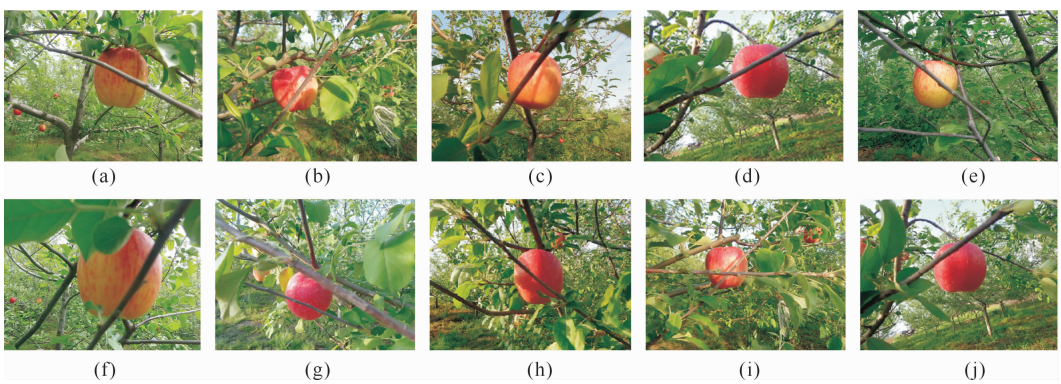


图 8　10 幅枝条遮挡下的苹果目标图像

Fig. 8　Apple images occluded by 10 branches

对图 8 中的 10 幅图像分别进行 K-means 聚类算法分割获得相应的苹果目标二值化图像，同时对目标苹果进行拟合重建，得到的处理结果如图 9、10 所示。其中，图 9(i)中苹果目标被交叉枝条分割成 4 个独立部分，选用合适的轮廓段阈值就能够将伪轮廓有效去除并加以重建。可见，枝条遮挡下的苹

果目标区域块数量不会对分割结果造成较大的影响,同时对于枝条遮挡情况较轻的苹果目标能够进行精确地识别,且重建效果较好。而对于图(f)与(g)所示的枝条遮挡较为严重或者有果树叶片干扰的苹果目标,也可基本完成重建,但重建误差相对较大。

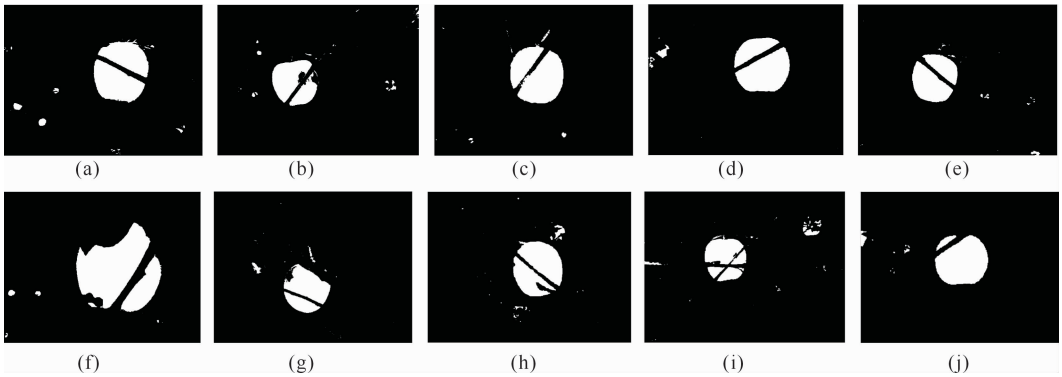


图 9 基于 K-means 聚类算法对 10 幅苹果目标图像的二值化分割结果

Fig. 9 Binary segmentation results of 10 apple target images based on K-means clustering algorithm

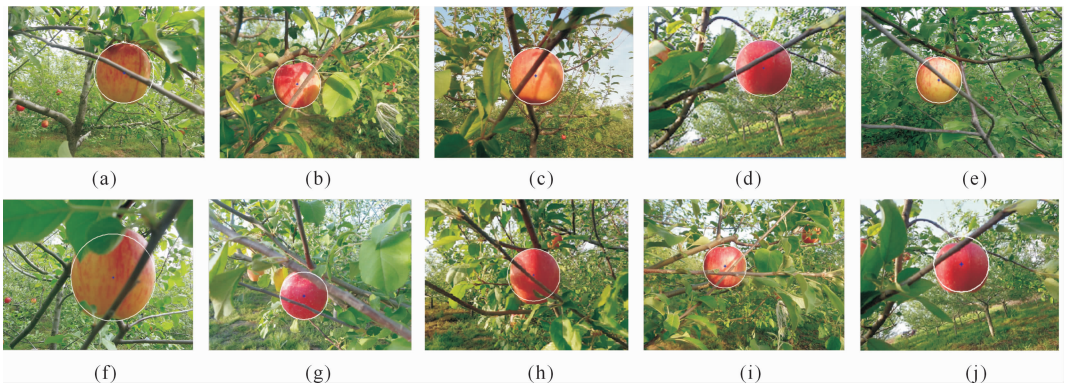


图 10 基于轮廓曲率特征对 10 幅苹果目标图像的重建结果

Fig. 10 Reconstruction results of 10 apple target images based on contour curvature feature

根据上述方法对 10 幅苹果目标图像进行拟合重建,得到拟合重建的苹果目标半径、真实面积、重叠系数、假阳性率、假阴性率及分割误差等相关数据如表 1 所示。

表 1 枝条遮挡下的 10 个苹果目标图像的重建结果

Table 1 Reconstruction results of 10 apple targets occluded by branches

苹果序号 No.	半径 Radius	真实面积(像素) Actual area	重叠系数/% Overlap coefficient	假阳性率/% False positive rate	假阴性率/% False negative rate	分割误差/% Segmentation error
1	109.45	44 748	89.27	1.83	10.73	9.72
2	94.26	43 124	92.67	2.29	7.33	14.05
3	87.53	41 728	90.11	0.91	9.89	9.50
4	74.56	32 465	89.92	0.47	10.08	10.21
5	100.49	55 016	84.78	0.21	15.22	10.60
6	105.25	59 235	84.93	0.54	15.07	32.21
7	151.90	109 284	84.64	1.02	15.36	24.19
8	58.93	23 417	86.71	1.17	13.29	8.90
9	71.96	30 635	88.24	1.27	11.76	8.25
10	29.85	9 367	89.54	2.52	10.46	10.67
平均值 Average	—	—	88.08	1.22	11.92	13.83

由表 1 可以看出,利用本研究提出的苹果目标识别、定位与重建方法对枝条遮挡下的苹果目标进行分割的平均分割误差小于 14.00%,最小分割误差为 8.25%;对于 6 号和 7 号苹果目标(即枝叶遮挡较严重的苹果目标),其分割误差相对较大,分别为 32.21%和 24.19%,可见图像中树叶及枝条的遮

挡情况会对分割结果造成很大影响，干扰情况愈严重分割效果愈不理想；分割与重建后的重叠系数均在 84.00%以上，平均重叠系数可达 88.08%，在 10 幅图像中，2 号苹果的重叠系数达 92.67%，其分割效果最好；除去枝叶遮挡这一因素，顺光条件下苹果目标拟合重建的重叠系数较逆光条件高，表明光照强度及照射角度会对分割结果造成轻微影响，顺光条件拍摄的苹果目标能够获得较好的处理效果；10 个苹果目标分割重建的假阳性率与假阴性率分别为 1.22%和 11.92%，表明重建结果相对准确。枝条遮挡下的苹果目标重建用时如表 2 所示。由表 2 可知，10 幅图像中苹果目标重建用时最短仅为 6.77 s，平均重建时间为 24.40 s，能够满足实时重建的要求，表明苹果目标的重建效果总体较好。

表 2　枝条遮挡下苹果目标的重建用时

Table 2　Reconstruction time of apple target occluded by branches　　s

苹果序号 No.	重建时间 Reconstruction time	苹果序号 No.	重建时间 Reconstruction time	苹果序号 No.	重建时间 Reconstruction time	苹果序号 No.	重建时间 Reconstruction time
1	18.27	4	21.02	7	58.10	10	6.77
2	29.93	5	38.34	8	15.53	平均值 Average	24.40
3	18.43	6	13.96	9	23.61		

6　结论与讨论

为了解决枝条遮挡对果实识别定位的影响及采摘点的确定问题，本研究在 Lab 颜色空间下利用 K-means 聚类算法进行目标的有效分割，在进行孔洞填充、目标平滑、伪轮廓去除等步骤后，利用基于轮廓曲率特征的三点定圆法，对苹果目标拟合得到遮挡果实的重建结果。研究发现：①经过平滑边缘处理操作后提取出目标苹果边缘，去除边缘的伪轮廓，获得枝条遮挡后的 2 部分不连续边缘。试验结果表明，该方法能够有效、可靠地提取出被枝条遮挡的苹果图像轮廓，为目标苹果的拟合重建创造了良好的条件。

②利用 K-means 聚类算法进行目标图像分割、伪轮廓去除、目标轮廓提取，通过基于轮廓曲率特征的三点定圆法对目标苹果拟合处理，结果表明对该条件下苹果目标的识别与重建方法是有效的，整个重建过程平均时耗为 24.40 s，重建准确率可达到 84.00%以上，重建结果符合预计要求。

③本试验中所涉及的苹果目标识别与重建方法，对被枝条严重遮挡及被大量叶片遮挡的苹果目标的识别效果仍不理想，同时在误差分析中对苹果目标真实面积的获取还需进行人工干预。因此，如何提高算法的精确性，及如何实现计算机对所需目标区域的自动选取，仍需更加深入的研究。

自然环境下果实目标被枝条遮挡的现象普遍存在，这加大了果实采摘机器人的作业难度，作业效率也会显著降低。本研究讨论的枝条遮挡下的苹果目标识别与定位算法，耗时短、定位精度相对较高，可作为果实采摘机器人视觉系统的一部分，有效提高该视觉系统对枝条遮挡情况的感知能力。通过在采摘机器人上加装另一摄像机，在完成目标重建与定位的基础上即可实现目标的三维定位，得到其在世界坐标系中的三维位置，即可控制机械手实现其自动采摘。

[参考文献]

[1] 陈瑞剑，杨　易. 我国苹果生产的国际地位与差距分析 [J]. 中国食物与营养，2012，18(12)：22-25.
Chen R J，Yang Y. International status and gap of China's apple production [J]. Food and Nutrition of China，2012，18(12)：22-25.

[2] 陈亚东，孟宪学，赵瑞雪，等. 我国苹果产业科学数据建设初探 [J]. 果树学报，2016，33(6)：719-726.
Chen Y D，Meng X X，Zhao R X，et al. A preliminary exploration on the construction of a scientific data resource system for apple industry in China [J]. Journal of Fruit Science，2016，33(6)：719-726.

[3] 司永胜，刘　刚，高　瑞. 基于 K-均值聚类的绿色苹果识别技术 [J]. 农业机械学报，2009，40(S1)：100-104.
Si Y S，Liu G，Gao R. Segmentation algorithm for green apples recognition based on K-means algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery，2009，40(S1)：100-104.

[4] 胡婵莉. 苹果采摘机器人的重叠果实定位方法研究 [D]. 浙江镇江：江苏大学，2015.
Hu C L. Research on localization method of overlapped fruit for the apple-picking robot [D]. Zhenjiang，Zhejiang：Jiangsu University，2015.

[5] 荀　一，陈　晓，李　伟，等. 基于轮廓曲率的树上苹果自动识别 [J]. 江苏大学学报(自然科学版)，2007，28(6)：461-464.
Xun Y，Chen X，Li W，et al. Automatic recognition of on-tree apples based on contour curvature [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)，2007，28(6)：461-464.

[6] Shebiah R N. Fruit recognition using color and texture features [J]. Journal of Emerging Trends in Computing & Information Sciences，2010，1(2)：90-94.

[7] 李 昕,李立君,高自成,等.改进类圆随机Hough变换及其在油茶果实遮挡识别中的应用[J].农业工程学报,2013,29(1):164-170.
Li X,Li L J,Gao Z C,et al. Revised quasi-circular randomized hough transform and its application in camellia-fruit recognition [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(1):164-170.

[8] 陶 云.苹果采摘机器人树枝障碍识别及定位研究[D].浙江镇江:江苏大学,2015.
Tao Y. Research on branch obstacle recognition and location of apple picking robot [D]. Zhenjiang,Zhejiang:Jiangsu University,2015.

[9] 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.
Song H B,He D J,Pan J P. Recognition and localization methods of occluded apples based on convex hull theory [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(22):174-180.

[10] 许志强.中国苹果生产成本效益分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
Xu Z Q. Cost and profits of apple production in China [D]. Yangling,Shaanxi:Northwest A&F University,2015.

[11] 杨 璟,朱 雷.基于RGB颜色空间的彩色图像分割方法[J].计算机与现代化,2010,26(8):147-149,171.
Yang J,Zhu L. Color image segmentation method based on RGB color space [J]. Computer and Modernization,2010,26(8):147-149,171.

[12] 任洪娥,白杰云.Lab颜色空间中基于动态聚类的颜色分级[J].计算机工程,2013,39(6):231-235.
Ren H E,Bai J Y. Color grading based on dynamic clustering in Lab color space [J]. Computer Engineering,2013,39(6):231-235.

[13] Soleimanizadeh S,Mohamad D,Saba T,et al. Recognition of partially occluded objects based on the three different color spaces (RGB,YCbCr,HSV) [J]. 3D Research,2015,6(3):1-10.

[14] 庞晓敏,闵子建,阚江明.基于HSI和LAB颜色空间的彩色图像分割[J].广西大学学报(自然科学版),2011,36(6):976-980.
Pang X M,Min Z J,Kan J M. Color image segmentation based on HSI and LAB color space [J]. Journal of Guangxi University(Nature Science Edition),2011,36(6):976-980.

[15] Rozanda N E,Ismail M,Permana I. Segmentation google earth imagery using K-means clustering and normalized RGB color space [M]// Jain L C,Behera H S,Mandal J K,et al. Computational intelligence in data mining (Volume 1). New Delhi:Springer India,2015:375-386.

[16] Kuo R J,Suryani E,Yasid A. Automatic clustering combining differential evolution algorithm and K-means algorithm [C]// Lin Y K,Tsao Y C,Lin S W. Institute of industrial engineers Asian conference 2013. Singapore:Springer Singapore,2013:1207-1215.

[17] 邹秋霞,杨林楠,彭 琳,等.基于Lab空间和K-Means聚类的叶片分割算法研究[J].农机化研究,2015,37(9):222-226.
Zou Q X,Yang L N,Peng L,et al. Segmentation algorithm based on blade Lab space and K-Means clustering [J]. Journal of Agriculture Mechanization Research,2015,37(9):222-226.

[18] 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,2014,30(3):135-141.
Song H B,Zhang W Y,Zhang X X,et al. Shadow removal method of apples based on fuzzy set theory [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(3):135-141.