

# 变化光照下树上柑橘目标检测与遮挡轮廓恢复技术\*

卢军<sup>1,2</sup> 桑农<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学多谱信息处理技术国防科技重点实验室, 武汉 430074; 2. 华中农业大学理学院, 武汉 430070)

**摘要:** 遮挡是自然场景中普遍存在的问题, 为在变化光照条件下正确检测出自然环境中的树上成熟水果目标, 从而为全天候的机械采摘提供运动参数, 研究了基于彩色信息和目标轮廓整合的树上遮挡柑橘检测方法。在对自然光照条件下的可见光彩色图像进行颜色特征分析的基础上, 建立了利用  $R-B$  色差图融合归一化 RGB 颜色空间的方法, 对树上水果目标区域进行了初分割。然后提取  $R-B$  色差图的主边缘构造边缘片段集, 根据边缘片段长度、弯曲程度以及凹凸性来选择有效边缘片段集, 对每个有效边缘片段进行拟合, 最后根据水果形状知识选择出有效拟合目标椭圆。根据对不同光照条件和遮挡程度的场景处理的结果表明, 所提算法能有效恢复出树上存在遮挡的水果目标, 最后遮挡轮廓恢复结果的相对误差为 5.34%。

**关键词:** 成熟柑橘 变化光照 检测 遮挡轮廓恢复

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0076-06

## 引言

水果种植业的迅速发展提升了果园机械的市场需求, 采摘作业所用劳动力占整个生产过程所用劳动力的 1/3 以上, 利用采摘机器人进行采摘不仅可以提高效率, 而且降低了损伤率、节省了人工成本、提高了果农的经济效益。任何一种水果采摘机器人的正常工作均依赖于对作业对象的正确识别, 国外在此领域已进行了大量研究<sup>[1-5]</sup>, 国内在 2005 年以后已开展较多关于树上柑橘识别的研究<sup>[6-10]</sup>。可见, 现有对于树上成熟柑橘的检测工作大多依赖于颜色特征, 这些方法遇到的最大挑战来自两个方面: 一是自然环境下光照条件的变化问题; 二是自然场景中遮挡现象的普遍存在。

自然环境下光照条件的变化对于树上水果的检测是一个很大的挑战。在自然光照强烈时(如晴朗的中午), 由于柑橘表面油细胞和树叶表面角质层的存在, 使得它们对强光产生漫反射的同时还产生了镜面反射, 镜面反射的存在使得该区域呈现较强的白色, 丢失了漫反射时所应有的颜色信息。在自然光照很弱时(如早晨、傍晚或阴天), 或是由于互遮挡, 导致水果整体或者部分区域形成阴影, 在色彩表现上与正常光照下漫反射区域有很大差异。现有的很多算法在上述高光和阴影存在的情况下, 识别

率会显著下降, 虚警率会迅速上升。

遮挡的存在是目前树上水果检测的另一个重大挑战。自遮挡和互遮挡会使水果目标的某些区域产生阴影, 阴影的存在大大降低了颜色特征的有效性; 另外遮挡会导致球形水果成像后的外轮廓并不是较为完整的圆, 有时甚至造成同一个水果目标被树干或树叶分为几个部分的情况。

本文首先使用  $R-B$  色差信息提取显著目标区域的边缘, 通过边缘分割和标记构造边缘片段集, 利用色差信息和归一化 RGB 颜色空间融合后的初分割结果遴选有效边缘片段集, 最终采用椭圆拟合算法恢复被遮挡的成熟树上柑橘目标轮廓。

## 1 实验系统与图像采集

实验时间为 2012 年 11 ~ 12 月, 实验对象是处于收获期的柑橘, 地点为华中农业大学脱毒中心柑橘果园, 选择了不同天气条件和一天中不同的时间, 以获得在不同光照条件下的树上柑橘场景图像。所使用的相机型号为 Canon EOS 7D, 配备 EF-S 18-135/3.5-5.6 IS 镜头, 图像分辨率为 5 184 像素 × 3 456 像素。实验拍摄了多幅树上柑橘图像作为研究对象, 图像处理时将每幅图像调整为 648 像素 × 432 像素。处理与分析树上柑橘图像的计算机 CPU 为 Intel Core i7 930 2.80 GHz, 内存为 4 GB, 操作系

收稿日期: 2013-06-21 修回日期: 2013-07-22

\* 国家自然科学基金资助项目(31301235)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013QC021)

**作者简介:** 卢军, 博士生, 华中农业大学讲师, 主要从事机器视觉检测技术研究, E-mail: lujun5918@163.com

**通讯作者:** 桑农, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理和模式识别研究, E-mail: nsang@hust.edu.cn

统为 Microsoft Windows XP，图像处理软件采用 Matlab 7.1。

## 2 实验方案设计

图 1 为一幅自然光照条件下的树上柑橘图像，命名为样本 1。由图可见，树上水果目标的上部被强烈光照直射而出现镜面反射呈现高光而偏白色，底部由于自身和树叶的遮挡出现阴影。利用  $R - B$  通道的色差信号和自适应阈值的方法来分割树上柑橘<sup>[6-7]</sup>，分割结果如图 2a 所示；利用  $2R - G - B$  色差分量，通过 Ostu 自适应阈值算法进行分割<sup>[9-10]</sup>，结果如图 2b 所示。由图 2 可知，通常简单的利用色差信号来分割树上成熟水果目标的做法，无法较好的自适应复杂的自然光照条件，特别是当出现遮挡时，常会将一个水果目标分割为多个目标，因此对于自然光照条件下的树上水果目标检测问题，需要更好的算法来解决变化的光照和遮挡问题。



图 1 树上柑橘光照变化与遮挡样本

Fig. 1 An example of on-tree citrus fruits with highlight

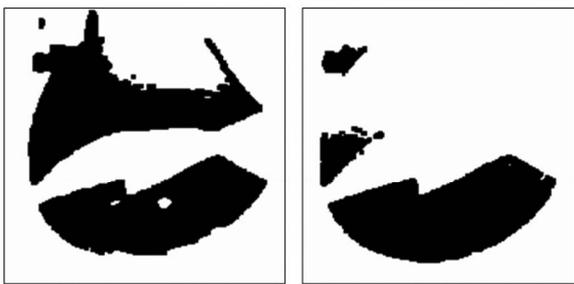


图 2 现有算法分割结果

Fig. 2 Segmentation results by existing algorithm

(a)  $R - B$  色差分量的分割 (b)  $2R - G - B$  色差分量的分割

通过观察图 2 的分割结果可以发现，利用色差信号可以较好的检测到图像当中照度较好、正常漫反射的水果目标区域，而对于高光和阴影区域的检测结果很不理想。鉴于柑橘目标形状为偏心率很小的椭圆（接近圆形），所以可以通过提取利用色差信号检测到的部分目标区域的有效轮廓片段，在目标

形状知识的指导下，通过拟合的方法恢复出完整的目标轮廓。本文方法的主要流程图如图 3 所示。

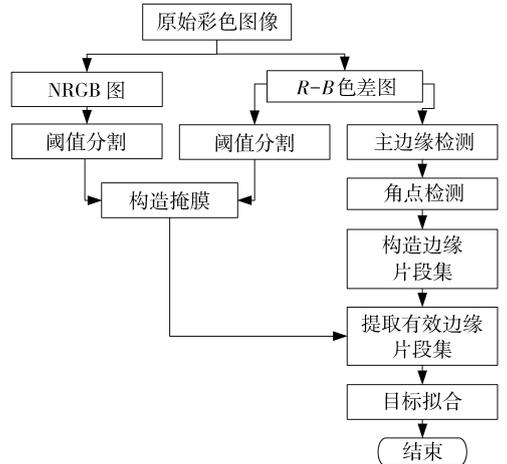


图 3 变化光照下树上柑橘检测与遮挡恢复算法流程图

Fig. 3 Flowchart of citrus fruits detection

### 2.1 主边缘检测

通过文献[6-8]以及大量实验发现，利用  $R - B$  色差信号可以较好地检测到图像中照度较好、正常漫反射的水果目标区域，且检测出来的目标区域置信度很高，虚警率较小，因此本文利用  $R - B$  色差分量图来提取树上水果目标中最显著的边缘。图 4a 为图 1 对应的  $R$  通道和  $B$  通道的色差图，可见  $R - B$  色差图较好地保存了成熟水果目标区域的轮廓。本文选择了 Canny 检测算子来检测边缘，该算子的阈值参数设置非常关键，设置的阈值上限若过高，可能会漏掉重要边缘；阈值下限过低，则会检测出过多的细节信息。为了有效地检测出树上水果目标的主要轮廓，经过对各种光照条件下的树上水

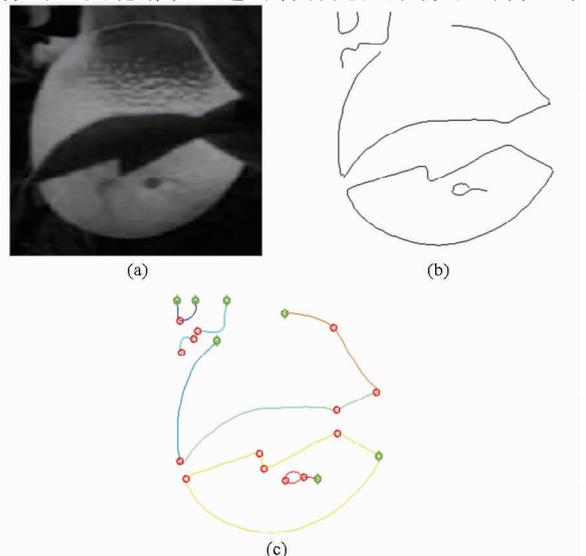


图 4  $R - B$  通道色差图的显著边缘检测及角点检测

Fig. 4 Significant edge detection and corner detection

(a)  $R - B$  色差分量图 (b) 边缘检测结果

(c) 角点及顶点检测结果

果目标场景进行大量实验,最后选择固定的阈值 $[0.1, 0.5]$ ,高斯滤波器设定为2。在这个参数设置下,对于树上水果目标,均能够较好检出图像中最显著的边缘轮廓,图4b即为图4a的主边缘检测结果。

## 2.2 构造边缘片段集

通常树上水果目标的轮廓应该为光滑的曲线,但是由于树叶、树干或其他水果遮挡,以及高光和阴影的存在,均会导致从 $R-B$ 色差图中提取到的显著边缘并非光滑的曲线(图4b)。要从这幅边缘图中提取出属于树上水果目标的外边缘轮廓,首先应该将检测到的主边缘分割为连续光滑的边缘片段集,然后从边缘片段集中根据一定的规则遴选出有效的目标边缘片段。

为此,参照文献[11]提出的基于自适应直线拟合的角点检测方法,检测出主边缘的角点集合 $\Omega_c$ 。然后参照文献[12]提出的边界跟踪算法对主边缘图像进行轮廓标记,检测每个标号的轮廓片段的端点构成端点集合 $\Omega_e$ 。对于距离过近的角点和端点合并为一个顶点,最终由角点集合和端点集合构成顶点集 $\Omega_T$ ,即

$$\Omega_T = \Omega_c \cup \Omega_e \quad (1)$$

然后遍历每一个标号的边缘片段,将同一个标号边缘片段上两个相邻顶点之间的边缘片段标记为一个新的边缘片段。当遍历完成以后,所有的主边缘就会被分解为连续光滑的边缘片段集 $\Omega_s$ (图4c),它由 $N$ 个边缘片段 $\Omega_i (i \in [1, N])$ 组成,即

$$\Omega_s = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_i, \dots, \Omega_N\} \quad (2)$$

## 2.3 图像初分割

由于遮挡的存在,使得在树上水果目标区域内部出现了遮挡边界,而且多数情况下目标的遮挡物为树叶,而树叶的边缘通常也是光滑的曲线。因此在2.2节中构造边缘片段集后,对于其中光滑的曲线需要区分其为目标的外轮廓还是遮挡产生的边缘。由图4b可见,目标的外轮廓是凸的,而遮挡产生的光滑边缘是凹的,根据边缘片段的凹凸性可以区分该片段是否为目标外轮廓。但凹凸性的区分首先需要场景进行分割,因此在这一小节中讨论如何对场景中最显著的目标区域进行初分割。

采用RGB颜色模型中的 $R-B$ 色差信号来提取正常漫反射的柑橘区域,采用了基本全局门限迭代算法获取分割阈值<sup>[13-14]</sup>,图5a为图1的 $R-B$ 两个彩色通道的色差图,利用迭代全局门限方法的分割结果如图5c所示。由于采用 $R-B$ 色差图的方法难以有效地检测出水果目标的阴影区域,经过大量实验在这里利用了RGB颜色空间的归一化 $R$ 分量(图5b)来检测柑橘的阴影部分,图5d为采用

最大类间方差法<sup>[15]</sup>对图5b进行自适应分割后的结果。图5e为图5c和图5d两类分割结果的或,可见通过 $R-B$ 色差图和 $nr$ 图分割结果的逻辑或操作,可以较好地分割出树上水果目标中正常水果区域和阴影区域。目前此处所提的初分割方法可以有效地检测出树上水果目标的漫反射区域和阴影区域,对于水果目标上的高光区域却无法有效检测,在图5e分割结果的右上部出现了较大的缺口,但目前的初分割结果对于判断边缘片段集中每个轮廓片段的凹凸性已经足够了。

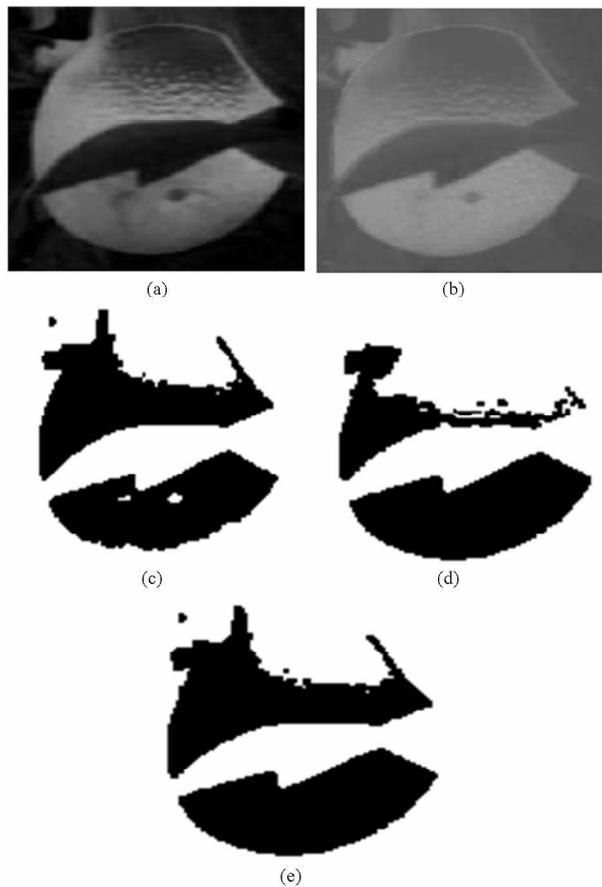


图5 场景的初分割

Fig. 5 Preliminary separation of scene

- (a)  $R-B$  色差分量图 (b) 归一化 $R$ 分量图  
(c)  $R-B$  色差分量图的分割结果  
(d) 归一化 $R$ 分量图的分割结果  
(e) 分割结果的融合

## 2.4 提取有效边缘片段集

在2.2节已经通过边缘检测算法和角点检测算法提取出了 $R-B$ 色差图的显著边缘片段集 $\Omega_s$ ,图4c中任意连接同一个标号的两个相邻顶点的边缘片段为边缘片段集 $\Omega_s$ 中的一个元素。分析集合 $\Omega_s$ 中的每个元素可见,这些边缘片段均出现在目标区域附近,可以将其分为两部分:一部分称之为重要边缘,它们长度较长,为长直线或曲线;另外一部分为次要边缘,它们长度很短,这一类边缘对于目标检

测并不重要,可以将其从集合中直接删除。对于重要边缘,其中一部分为目标的外轮廓,另外还有一部分是由于遮挡形成的边缘,它们要么是凹的曲线,要么为直线。根据以上分析,最终根据以下3条判据从边缘片段集  $\Omega_s$  中提取有效片段集  $\Omega_t$ 。

$$\begin{cases} f_1(\Omega_i) > T_1 \\ f_1(\Omega_i) = \sum_{P_i^j \in \Omega_i} 1 \quad (\Omega_i \in \Omega_s) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} f_2(\Omega_i) > T_2 \\ f_2(\Omega_i) = \sum_{P_i^j \in \Omega_i} d(P_i^j, l_{\Omega_i}) / \sum_{P_i^j \in \Omega_i} 1 \quad (\Omega_i \in \Omega_s) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} f_3(\Omega_i) > T_3 \\ f_3(\Omega_i) = \sum_{Q_i^j \in l_{\Omega_i}} \delta_{j1} / \sum_{Q_i^j \in l_{\Omega_i}} 1 \quad (\Omega_i \in \Omega_s) \end{cases} \quad (5)$$

判据1:如式(3)所示,该判据用来限制边缘片段的长度,若边缘片段长度过短则认为其显著性低,从边缘片段集中删除。针对实验对象和任务,阈值  $T_1$  取为边缘片段集中最长边缘片段长度的10%。

判据2:如式(4)所示,该判据用来检测边缘片段的平直性。式中  $l_{\Omega_i}$  为连接边缘片段  $\Omega_i$  两个端点的弦,  $d(P_i^j, l_{\Omega_i})$  为边缘片段  $\Omega_i$  中每个像素点到弦  $l_{\Omega_i}$  的距离,  $f_2(\Omega_i)$  统计的是  $\Omega_i$  中像素点到弦  $l_{\Omega_i}$  的平均距离,阈值  $T_2$  根据大量实验结论取值为1.5。

判据3:如式(5)所示,该判据用来检测边缘片段的凸性。图6a为边缘片段的分布与前景的分割结果,  $Q_i^j$  为边缘片段  $\Omega_i$  对应的弦  $l_{\Omega_i}$  上各点,实验时若  $Q_i^j$  落在图6a所示的预分割结果的前景区域内则  $\delta_{j1}$  取值为1,否则取值为0。  $f_3(\Omega_i)$  统计的是弦  $l_{\Omega_i}$  上各点落在初分割结果的前景区域的概率,阈值  $T_3$  根据实验取值为0.5。

初始边缘片段集  $\Omega_s$  经过以上3个判据检验后有效的边缘片段集为最终有效片段集合  $\Omega_t$ ,图4c所对应的有效边缘片段集合  $\Omega_t$  如图6b中粗线所示,这是目标对应的有效外轮廓。

## 2.5 目标拟合

对于由2.4节检测到的每一个边缘片段,本文参照文献[16]提出的椭圆拟合算法进行椭圆拟合。该算法基于投影变换原理,经过不同比例变换得到椭圆的各项参数,克服了奇异矩阵和矩阵求逆时在数值计算上遇到的问题,能在各种情况下比较稳定的给出拟合椭圆的各参数。对于由多个边缘片段拟合出同一个目标的问题,如图6b所示两个有效边缘片段对应一个目标。此时设有效片段集合  $\Omega_t$  中有  $M$  个元素,第  $i$  个片段拟合出来的目标参数为  $C_i = \{x_i, y_i, a_i, b_i, \theta_i\}$  ( $i \in [1, M]$ ),分别对应中心  $x$  坐

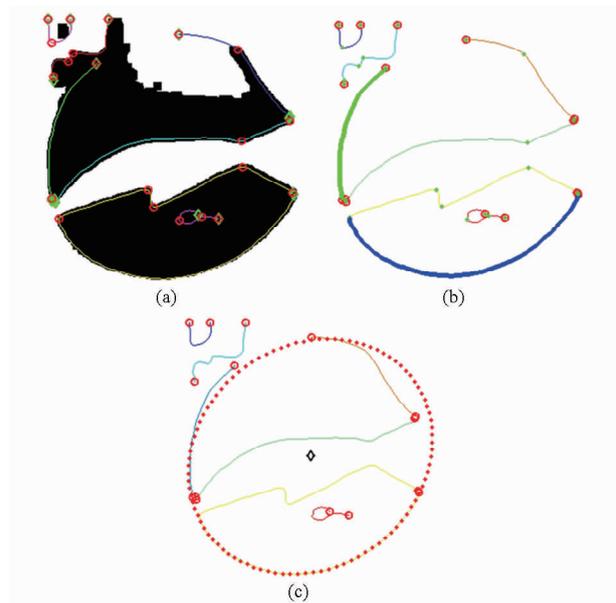


图6 有效边缘提取与目标拟合

Fig. 6 Extrication of effective edge and target fitting  
(a) 分割结果、边缘和角点分布 (b) 有效边缘片段(粗线所示)  
(c) 目标恢复结果

标、中心  $y$  坐标、长轴、短轴、倾角,去除无效椭圆计算式为

$$\begin{aligned} e_i = c_i/a_i = \sqrt{a_i^2 - b_i^2}/a_i < T_4 \quad (i \in [1, M]) \quad (6) \\ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} > \min(b_i, b_j)/2 \\ (i, j \in [1, M], i \neq j) \quad (7) \end{aligned}$$

由式(6)可见有效椭圆的离心率必须足够小,也就是说拟合的椭圆要接近圆形,因为水果目标的形状接近圆形。经过对100个柑橘水果目标形状的学习,此处的阈值  $T_4$  取值为0.35。由式(7)可见任意两个椭圆的中心距离应大于两个椭圆中较小的短轴的一半,否则这两个椭圆中较小的椭圆将被视为无效椭圆。经过以上方法处理后的有效椭圆如图6c所示。

## 3 检测结果与分析

为了验证本文所提算法的有效性,处理了自然光照条件下的多幅图像,实验结果表明该算法能适应各种复杂的自然光照条件,而且能较好地处理树上水果目标检测中普遍存在的遮挡问题。图7是部分实验结果,由上至下依次为4个光照及遮挡程度不同的样本,分别为样本2~5。图7b中黑色部分为前景目标区域;图7c中粗实线描述的是经过2.4节处理以后得到的有效主边缘。通过对比可见,实验处理的4幅图像均存在不同程度的遮挡,其中后2幅图像还存在着高光和阴影,因此在初分割的时候这些因素导致现有算法无法有效的检测出全部目标区域。通过本文所述算法,能够有效的提取

出上述各种因素影响下的树上水果目标,结果如 表1所示。

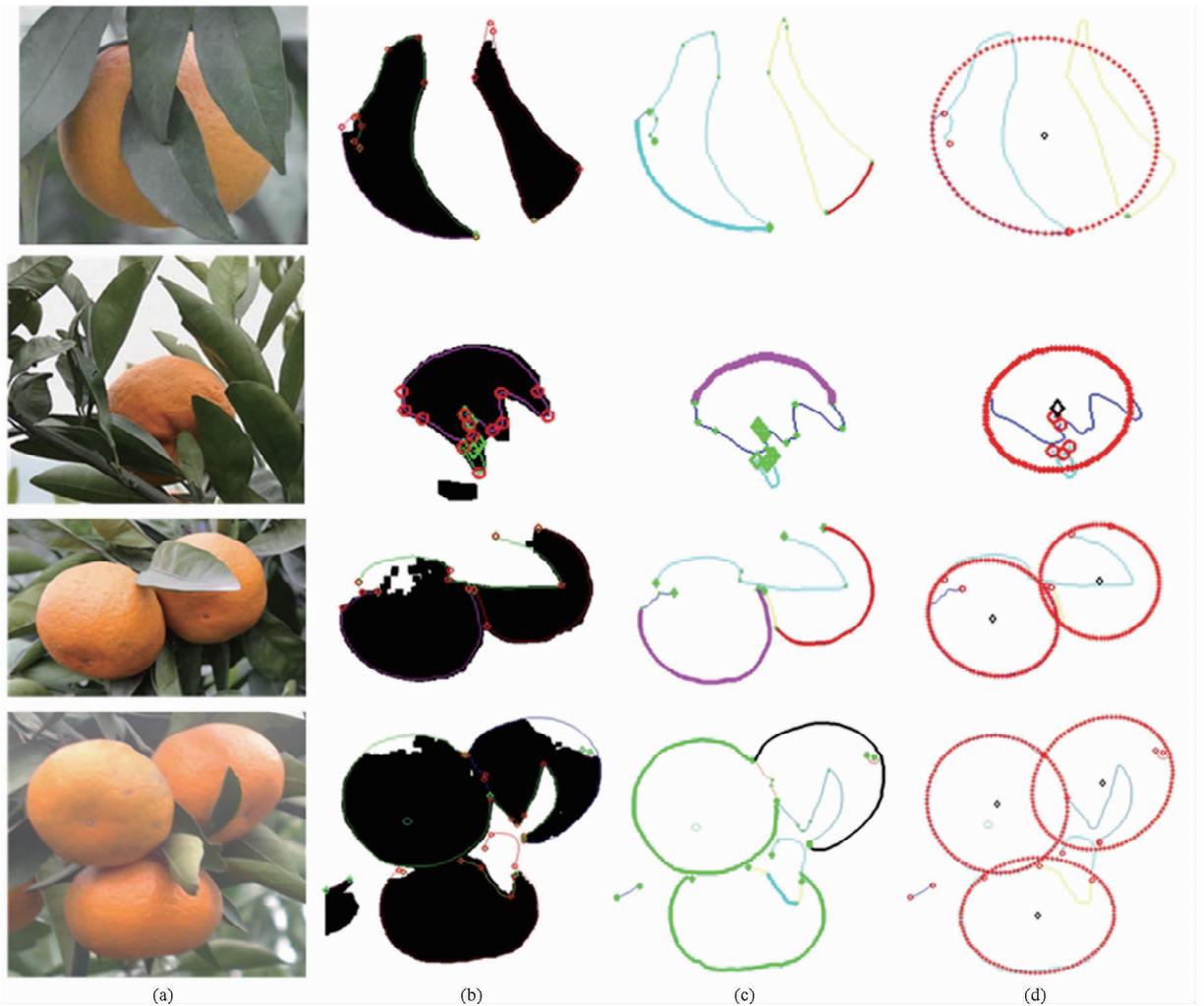


图7 实验处理图像及结果

Fig.7 Luminance map and its histogram

(a) 原始彩色图 (b) 边缘检测及分割结果 (c) 有效边缘片段 (d) 目标恢复结果

表1 本文算法检测结果

Tab.1 Detection results comparison of different methods

图像	圆心 X 坐标	圆心 Y 坐标	长轴长/像素	短轴长/像素	倾角/(°)	拟合误差/像素	轴平均长/像素	相对误差/%
样本 1	165.76	151.06	146.31	124.73	-0.55	6.06	135.52	4.47
样本 2	226.31	217.91	162.81	146.97	0.26	9.86	154.89	6.36
样本 3	126.45	126.39	49.33	41.28	-0.24	2.34	45.30	5.16
样本 4	129.48	152.89	91.98	79.17	0.39	6.29	85.57	7.35
	278.34	101.04	82.99	78.79	0.30	2.37	80.89	2.93
样本 5	144.99	171.12	120.19	114.31	1.03	2.28	117.25	1.94
	211.72	362.99	126.70	99.04	-0.06	18.41	112.87	16.31
	318.79	135.37	123.67	106.42	-0.76	1.39	115.04	1.21
平均						5.95	106.71	5.34

为了对本文所提算法的性能进行量化描述,采用了人工对本文列出的5幅图像进行标注,对标注结果进行了多数投票,根据投票结果产生最终的人工分割结果。以手动标注结果为理想分割结果,提取人工分割结果中对应目标区域的外轮廓片段,记人工分割后提取的目标外轮廓片段构成集合 $\Omega_a$ ,它由 $R$ 个边缘片段构成。记拟合出来的有效椭圆集

为 $C$ ,它由 $W$ 个有效椭圆构成,则有

$$\Omega_a = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_i, \dots, \Omega_R\} \quad (8)$$

$$\begin{cases} C = \{C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_W\} \\ C_i = \{x_i, y_i, a_i, b_i, \theta_i\} \quad (i \in [1, W]) \end{cases} \quad (9)$$

$$\alpha_i = \sum_{P_i \in \Omega_i} \frac{d(P_i, C_i)}{\inf} \bigg/ \sum_{P_i \in \Omega_i} 1 \quad (\Omega_i \in \Omega_a) \quad (10)$$

$$\beta_i = 2\alpha_i / (a_i + b_i) \quad (\Omega_i \in \Omega_a) \quad (11)$$

式(10)为人工提取边缘片段集  $\Omega_a$  中第  $i$  个片段上每个像素点距离对应的有效拟合椭圆  $C_i$  的最短距离的平均值,式(11)为  $\Omega_a$  集合中第  $i$  个片段对应的相对拟合误差,定义为拟合误差  $\alpha_i$  除以对应拟合椭圆长短轴的均值。由于椭圆假设与水果实际形状有差距,导致部分水果目标恢复时的相对误差较大,总体拟合误差为 5.34%。

## 4 结束语

主要讨论了在变化的光照条件下检测自然环境中的树上成熟水果目标并恢复遮挡目标的轮廓,研

究了基于彩色信息和目标轮廓拟合的树上遮挡柑橘检测方法,为全天候的机械采摘提供运动参数。在对自然光照条件下的可见光彩色图像进行颜色特征分析的基础上,建立了利用  $R-B$  色差指标提取边缘片段集,并通过融合归一化 RGB 颜色空间的方法,对树上水果目标区域进行初分割。根据边缘片段长度、弯曲程度以及凹凸性来选择有效边缘片段集,对每个有效边缘片段进行拟合,最后根据水果形状知识选择出有效目标椭圆。根据不同光照条件和遮挡程度场景处理的结果表明,本文算法能有效地恢复出自然光照条件下树上存在遮挡的水果目标,最后遮挡轮廓恢复结果的相对误差为 5.34%。

## 参 考 文 献

- 1 Harrell R C, Slaughter D C, Adsit P D. A fruit-tracking system for robotic harvesting[J]. Machine Vision and Applications, 1989, 2(2): 69-80.
- 2 Slaughter D C, Harrell R C. Discriminating fruit for robotic harvest using color in natural outdoor scenes[J]. Trans. of the ASAE, 1989, 32(2): 757-763.
- 3 Ness Y A. Computer vision system for all orange harvesting robot[D]. Israel: Israel Institute of Technology, 1989.
- 4 Moct E, Pla F, Juste F. Vision system for the location of citrus fruit in a tree canopy[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1992, 52(2): 101-110.
- 5 Jimnez A R, Ceres R, Pons J L. Automatic fruit recognition: a survey and new results using range attenuation images[J]. Pattern Recognition, 1999, 32(10): 1719-1736.
- 6 徐惠荣, 叶尊忠, 应义斌. 基于彩色信息的树上柑橘识别研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 98-101.  
Xu Huirong, Ye Zunzhong, Ying Yibin. Identification of citrus fruit in a tree canopy using color information[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 98-101. (in Chinese)
- 7 张亚静, 邓烈, 李民赞, 等. 基于图像处理的柑橘测产方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 97-99.  
Zhang Yajing, Deng Lie, Li Minzan, et al. Estimation of citrus yield based on image processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 97-99. (in Chinese)
- 8 王建黑, 欧阳琴, 陈全胜, 等. 自然场景下不同成熟度柑橘的自适应识别[J]. 光学与光电技术, 2009, 7(5): 56-58, 62.  
Wang Jianhei, Ouyang Qin, Chen Quansheng, et al. Adaptive recognition of different maturity citrus in natural scene[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2009, 7(5): 56-58, 62. (in Chinese)
- 9 蔡健荣, 李玉良, 范军, 等. 成熟柑橘的图像识别及空间定位研究[J]. 微计算机信息, 2007, 23(12): 224-225.  
Cai Jianrong, Li Yuliang, Fang Jun, et al. Image recognition and three-dimensional location of mature oranges from nature scene[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(12): 224-225. (in Chinese)
- 10 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)
- 11 乔宇, 黄席樾, 柴毅. 基于自适应直线拟合的角点检测[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2003, 26(2): 29-31.  
Qiao Yu, Huang Xiyue, Chai Yi, et al. Corner point detection based on adaptive line approximation[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2003, 26(2): 29-31. (in Chinese)
- 12 Haralick Robert M, Linda G. Shapiro, computer and robot vision (volume I) [M]. Addison-Wesley, 1992: 28-48.
- 13 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 2版. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 485-486.
- 14 Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. 图像处理、分析与机器视觉[M]. 3版. 艾海舟, 苏延超, 译. 北京: 清华大学出版社, 2011: 487-488.
- 15 景晓军, 蔡安妮, 孙景鳌. 一种基于二维最大类间方差的图像分割算法[J]. 通信学报, 2001, 22(4): 71-76.  
Jing Xiaojun, Cai Anni, Sun Jing'ao. Image segmentation based on 2D maximum between-cluster variance[J]. Journal of China Institute of Communications, 2001, 22(4): 71-76. (in Chinese)
- 16 陈基伟. 椭圆直接拟合算法研究[J]. 工程勘察, 2007(6): 49-51.  
Chen Jiwei. The direct research of ellipse fit algorithm[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2007(6): 49-51. (in Chinese)

- [J]. Robot, 2011, 33(3): 265 – 272. (in Chinese)
- 10 Gonzalez M, Fiacchini T, Alamo, et al. Adaptive control for a mobile robot under slip conditions using an LMI-based approach [C] // Proceedings of the European Control Conference 2009, 2009: 23 – 26.
- 11 Jwo Dahjing, Lai Chunnan. Unscented Kalman filter with nonlinear dynamic process modeling for GPS navigation [J]. GPS Solutions, 2008, 9(12): 249 – 260.
- 12 Low C B, Wang D. GPS-based tracking control for a car-like wheeled mobile robot with skidding and slipping [J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2008, 13(4): 480 – 484.
- 13 Chan Gook Park, Kwangjin Kim, Woo Yong Kang. UKF based in-flight alignment using low cost IMU [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2006(4): 2637 – 2648.
- 14 Quan Wei, Fang Jiancheng, Xu Fan, et al. Hybrid simulation system study of SINS/CNS integrated navigation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronicsystems, 2008, 23(2): 17 – 24.
- 15 Julier S J, Uhlmann J K. Unscented filtering and nonlinear estimation [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(3): 401 – 422.

## Estimating Sliding Parameters of Agricultural Tracked Robot Based on UKF

Jiao Jun<sup>1</sup> Wang Hongxi<sup>2</sup> Chen Yiqiong<sup>1</sup> Chu Gangxiu<sup>1</sup> Xiao Guang<sup>3</sup> Lu Lin<sup>1</sup>

(1. College of Information and Computer, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

3. Institute of Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to real-time achieve accurate sliding parameters between tracks of a agricultural tracked robot and ground and improve control accuracy, a dynamics equation and nonlinear measurement equation of agricultural tracked robot were deduced by analyzing working principle of an agricultural tracked robot and using dynamics principle. Then an estimation system based on the unscented Kalman filter (UKF) was designed to estimate the precision pose parameters of agricultural tracked robot. Through this estimation the system sliding parameters might be reconstructed relying on kinematics analysis, which couldn't be directly measured before. The simulation and experimental results suggested that with careful modeling of agricultural tracked robot, the estimation system was able to provide reliable and high update rate sliding parameters, which were taken as the basis for accurate control.

**Key words:** Agricultural tracked robot Unscented Kalman filter Sliding parameters

(上接第 81 页)

## Detection of Citrus Fruits within Tree Canopy and Recovery of Occlusion Contour in Variable Illumination

Lu Jun<sup>1,2</sup> Sang Nong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Science and Technology on Multi-spectral Information Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. College of Science, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** A method based on color information and contour fragments was developed to identify citrus fruits in variable illumination conditions in the tree canopy, in order to guide the robots for harvesting citrus fruits. The color properties of target objects within natural citrus-grove scenes under various light conditions were analyzed, and a preliminary segmentation was put forward by fusing the Chromatic aberration information and normalized RGB model. The set of contour fragments was constructed via detecting the significant edge of Chromatic aberration map of *R* and *B* channels. The valid subset was selected by three parameters of the fragment: length, bending degree and concavo-convex geometry characteristic. The ellipse fitting procedure was done to every fragment, and the valid ones were chosen by the knowledge of fruit shape. The results showed that the occlusion contour were effectively recovered under various light conditions using the proposed method, and the relative error of occlusion recovery was 5.34%.

**Key words:** Matured citrus Variable illumination Detection Occlusion contour recovery