

分类号:

密 级:

单位代码: 10019

学 号: S02739

中国农业大学

学位论文

基于机器视觉的

柑橘水果外形识别方法研究

Research on the shape identification
of orange based on computer vision technology

研 究 生: 白 菲

指 导 教 师: 孟超英 教授

申请学位门类级别: 工学硕士

专 业 名 称: 计算机应用技术

研 究 方 向: 计算机图形图像技术及应用

所 在 学 院: 信息与电气工程学院

二 零 零 五 年 十 一 月

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本课题所做的任何贡献均在论文中作了明确的说明，并表示了感谢。

研究生签名：

时间：

年 月 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国农业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

研究生签名：

时间：

年 月 日

导师签名：

时间：

年 月 日

摘 要

柑橘产业是我国南方主产区农村经济的一大支柱产业。目前我国的柑橘分级主要依靠人工和机械装置完成，工作效率低。采用机器视觉技术进行柑橘的自动分级能提高商品价值和生产率，是当今国际上水果分级的主要技术。

本文在广泛查阅国内外水果自动分级方面资料和深入了解机器视觉相关知识的基础上，通过对比分析采用了适合在机器视觉技术柑橘自动分级检测系统中使用的预处理和大小、颜色及形状识别方法，并介绍了整个自动分级系统装置。文中描述了图像预处理和分级模式判定的方法。在图像预处理方面本文采用了阈值分割中比较先进而且适用的大津法（OTSU 法）进行背景分割，采用数学形态算子方法去除噪音，采用 Roberts 算子进行边缘检测。在柑橘图像的模式识别中用柑橘的投影面积描述柑橘大小，图像主色调值描述柑橘颜色，提取圆度特征识别柑橘的识别。由于在柑橘的尺寸大小、颜色和形状分级的表达中采用了投影面积法、面积周长比法等算法，提高了分级速度。

本文在 Windows2000 系统上用 Visual C++6.0 初步实现了基于机器视觉技术的柑橘分级软件系统。分级基准和级数可以根据用户的要求或市场的任意调整。通过实验，该分级系统能够进行柑橘的外形分级，实现了预期的设计目标。

关键词： 柑橘，机器视觉，图像处理，自动分级

Abstract

The orange industry is one of the mainstays of rural economy in the major agricultural producing areas of Southern China. At present, the orange grading depends on manpower and machines, which cause slow efficiency.

Applying of computer vision technology, in automatic orange grading can increase the commodity value and productivity. Referring to relative studying on computer vision, this paper introduces an automatic grading system and summarizes a set of arithmetic of online automatic grading according to the size, color and shape of orange with the assistance of computer vision technology. Furthermore, image pretreatment method and the estimative method of grading pattern are presented. Advanced and applicable OTSU method of segmentation is applied to implement background segmentation. Median filter and mathematical morphologic operator are used to eliminate noise. Projective area and picture hue describes the size and color of the orange respectively, which will also be applied to identify the disfigurement of orange. With simple arithmetic being used in identifying the size, color and shape of oranges, the grading speed could be increased.

The technology of online automatic orange grading according to computer vision has been successfully implemented with the application of Visual C++6.0, MFC and other class libraries based on Windows2000 system. The benchmark and level of grading can be adjusted according to the request of client and market. Through some trial applications, the grading system has been proved to be able to meet every requirement of the precision inspection of factories and has reached the anticipated objective.

Key words: orange , computer vision , image processing , automatic grading

目 录

第一章 绪论	1
1.1 本课题的研究意义.....	1
1.2.1 柑橘分级的需求.....	1
1.2.2 我国柑橘分级现状.....	3
1.2.3 机器视觉技术.....	3
1.2 国内外研究现状.....	4
1.2.1 国外研究现状.....	4
1.2.2 国内研究现状.....	6
1.2.3 当前分级技术产品化情况.....	7
1.2.4 存在的问题	8
1.3 课题研究内容	8
第二章 柑橘图像预处理	10
2.1 概述	10
2.2 特征参量选取	10
2.2.1 常用颜色模型.....	10
2.2.2 颜色信息准确性比较.....	12
2.2.3 颜色信息稳定性比较.....	13
2.2.4 RGB 模式与 HSI 模式的转换	14
2.3 背景分割	16
2.3.1 阈值分割算法.....	16
2.3.2 柑橘图像大津法分割结果分析.....	18
2.4 噪音去除	19
2.4.1 中值滤波技术.....	20
2.4.2 数学形态算子.....	21
2.4.3 柑橘图像噪音去除结果比较分析.....	23
2.5 边缘检测	25
2.5.1 边缘检测算子.....	25
2.5.2 柑橘图像边缘检测结果分析.....	27
第三章 柑橘图像识别方法	28
3.1 概述	28
3.2 柑橘的大小识别方法.....	28

3.2.1 最小外接矩形法.....	28
3.2.2 最大果宽（或果轴）法.....	29
3.2.3 果径法	29
3.2.4 投影面积法.....	30
3.2.5 柑橘大小算法检测.....	31
3.3 柑橘的形状识别方法.....	32
3.3.1 特征参数选取.....	32
3.3.2 圆度参量的计算.....	33
3.3.3 柑橘圆度算法检测.....	36
3.4 柑橘的颜色识别方法.....	38
3.4.1 直方图方法	38
3.4.2 平均值	39
3.4.3 主颜色	39
3.3.4 柑橘颜色算法检测.....	40
第四章 基于机器视觉的柑橘分级系统	42
4.1 概述	42
4.2 系统硬件架构	42
4.2.1 系统硬件要求.....	43
4.2.2 实验装置	45
4.3 系统软件设计	45
4.3.1 软件系统菜单描述.....	46
4.3.2 软件系统功能实现.....	47
4.4 系统装置的运行情况.....	49
第五章 结论	50
参考文献	51
致谢	54
附录	55
个人简历	64

第一章 绪论

加入 WTO 后, 我国的农产品能否在稳固国内市场的基础上进入国际市场, 很大程度上取决于产品品质的好坏。农产品品质的提高需要研究新型的品质检测和分级技术, 在已经研究的多种技术中, 机器视觉技术具有非接触、速度快、精度合适、现场抗干扰能力强等突出的优点, 能很好的满足农产品检测分级的需求, 在实践中显示出广阔的应用前景。柑橘是我国的主要果产品, 机器视觉的柑橘分级技术研究是现代计算机技术在农业生产过程中的具体应用, 对于我国柑橘提高品质、增加产值有很重要的现实意义。

1.1 本课题的研究意义

1.2.1 柑橘分级的需求

柑橘是水果第一大家族, 包括橙子、橘子、柚子、葡萄柚、金橘等多个品种。世界有 135 个国家生产柑橘, 年产量 10282.2 万吨, 面积 10730 万亩, 居葡萄、苹果、香蕉之上, 是“四大水果”之首。全世界主产柑橘的国家和地区约 40 个, 其中, 巴西和美国的产量分别占世界总产量的 24% 和 16%。我国是柑橘的原产地和生产大国, 面积居世界第一位, 产量居世界第三位。

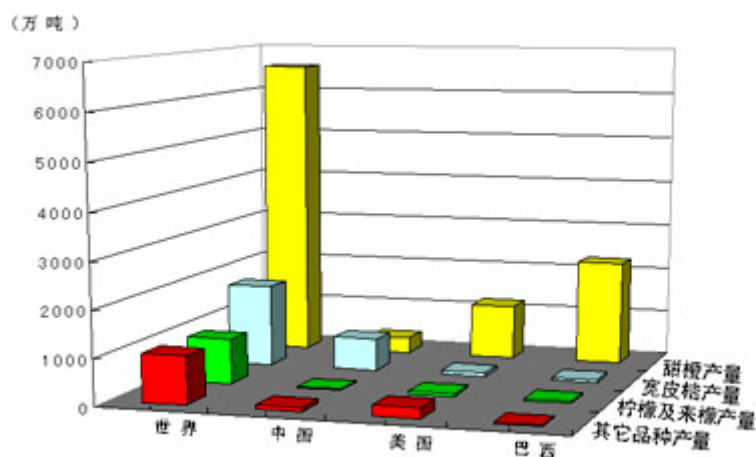


图 1.1 中国、美国和巴西主栽柑橘品种比例

作为世界柑橘重要起源中心, 我国柑橘水果产业迅猛发展, 近 20 年来我国柑橘年产量以 16% 的速度递增。现在已经成为我国南方主产区农村经济的一大支柱产业, 为促进农民增收、扩大城乡居民就业和改善生态环境作出了积极贡献。2004 年全国柑橘产量 1496 万吨^[1], 比 1978 年增长了 38 倍; 人均柑橘产量由 1978 年的 0.4 公斤提高到现在的 9.1 公斤, 增长了 21.5 倍; 柑橘出口量由 1978 年的 7.6 万吨增加到 26.5 万吨, 增长 2.4 倍。我国农业部发布优势农产品区域布局规划 (2003——2007 年) 中, 规划到 2012 年柑橘优势区优果率力争由目前的 35% 提高到 50% 以上, 平均亩产由 700 公斤提高到 1500 公斤以上, 鲜果上市期由 4 个月延长到 8 个月以上。把赣南湘

南桂北柑橘优势区建设成为亚洲最大的优质脐橙生产基地,把浙南闽西粤东柑橘优势区建设成为具有较强竞争力的宽皮柑橘出口基地。

表 1-1 中国柑橘进出口情况

年份	进口量	进口额	出口量	出口额	净出口量	净出口额
1987	29235	10716	97700	45366	68465	38656
1988	41746	21493	103109	63219	67363	31726
1989	50767	28297	99818	48260	49051	20068
1990	29305	15236	91169	42858	61864	28572
1991	24485	11978	72122	38156	47717	26178
1992	33843	18119	87461	45024	53618	27005
1993	32248	16310	111283	49663	79034	33647
1994	41546	19877	156034	65523	114487	65051
1995	49819	22872	162850	68708	113031	45836
1996	49305	22193	183509	73643	134204	51450
1997	13142	3795	209127	71110	195985	67017
1998	5593	1858	135158	18885	169366	47028
1999	29689	11766	176290	41037	146506	29877
2000	61361	88862	260271	46510	138410	17708

虽然我国柑橘的总产量年年增高,我国柑橘市场竞争力与美国、巴西、西班牙等柑橘生产发达国家相比却有很大差距,而且水果价格上国产柑橘也比“洋柑橘”低很多。通过表 1-1 我们可以看出虽然我国柑橘总产量增加很快,但是出口量却增加缓慢,与我国的柑橘产量大国身份很不相称。如我国 2000 年柑橘的总产量为 878 万吨,仅次于巴西和美国的产量,而柑橘的出口 26 万吨,仅占世界总出口量的 2%。根据柑橘产销趋势可以发现,柑橘产值的部分是由产后处理和产后加工创造出来的。因此各地在柑橘销售工作中,都提倡加大产后商品化处理技术的推广力度。

柑橘的产后商品化处理加工主要包括清洗、打蜡、分级几个过程。产后商品化加工可以大大降低柑橘的损失程度。清洗,可除去水果表面尘土及农药残留,降低病原微生物感染;按缺陷、色泽、形状、大小、成熟度甚至影响口感的糖酸比进行分级,可使不同级别的水果在内在和外在品质上更均匀一致;打蜡,可以减少水分蒸发,减缓果品呼吸衰老,改善水果色泽和亮度。通过以上处理,最终达到提高水果外观和内在品质、延长货架寿命、提高商品价值的目的。目前我国国内果品的清洗、打蜡设备已经比较成熟,关键在于分级技术。分级是果品商品化处理的重要环节,它在技术方面发展最快,并且最近几年发生了根本的变化。

1.2.2 我国柑橘分级现状

柑橘的分级有自动分级、机械分级和手工分级几种方式。

采用机器视觉技术进行柑橘的自动分级检测是当今国际上水果分级的主要技术。我国主要靠引进水果分级的自动设备。我国湖南常德、浙江建德等柑橘高产区使用了一些自动分级生产线，多为美国、加拿大、韩国等国家生产的进口设备。由于这种进口设备是针对大农场生产所设计的，价格昂贵，少则数百万元，多则数千万元，一般企业难以负担。引进的进口设备在我国小农户产品的分级检测中并不实用。

目前我国能大量生产的水果分级设备还限于机械分级阶段，主要进行大小、重量的分级。由于技术投入不够，国产设备与国外先进设备差距很大，存在局限性多、不灵活、笨重，设置困难、易产生错误、无法适应现代的质量控制和统计流程控制等方面的弊端。

80年代中期我国开始进行水果大小和重量的分级设备的研究。我国研制的 6GF—1.0 型水果大小分级机，采用先进的辊、带间隙分级原理，工作时分级辊作匀速转动，输送带作直线运动，当果实直径小于分级辊与输送带之间的间隙时，则顺着间隙掉入水果槽实现分级。由于采用机械尺度分级，该设备分级的精度较低。

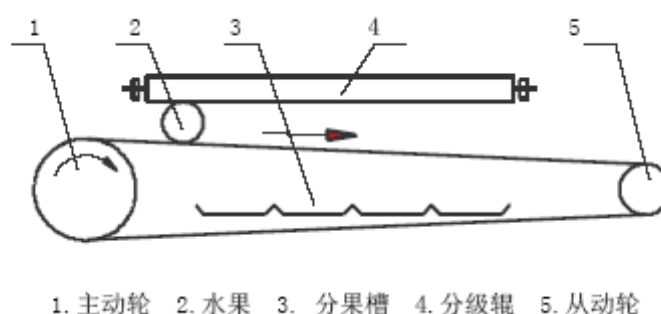


图 1.2 6GF—1.0 型水果大小分级机原理

山东省栖霞茂源机械设备生产的 GXJ-W 系列卧式果蔬分选机是一种将类似球形的水果或蔬菜（例如梨、苹果、柿子、桃子、柠檬、石榴、番茄、柑橘、土豆等）按重量分级的一种自选设备，只能区分水果的大小，不能对水果的颜色、缺陷等进行分级。

由于机械分选只能做到粗选，分选过程中对水果的损伤大、效率低，细分还需人工配合。进口的自动分级设备又很昂贵，所以目前我国的柑橘分级主要依靠人工完成。但是，人工分级有很多弊端，主要包括无法持续保持一致的检测效果，不同的检测者之间存在差异，不能实现实时的流程控制。研究适用于我国国情的机器视觉柑橘生产系统有重要现实的意义。

1.2.3 机器视觉技术

机器视觉是用计算机来分析从摄像头获得的图像的一种方法，主要研究用计算机来模拟人的视觉功能，从客观事物的图像中提取信息，进行和处理并加以理解，最终用于实际测量和控制。机器视觉技术是 20 世纪 70 年代在遥感图像处理和医学图像处理技术成功应用的基础上逐渐兴起的，是图像处理的一个分支学科。目前机器视觉技术已经在许多行业得到了广泛的应用，其中医

学成像、汽车导航、视觉测量、技术诊断等等方向发展的最快。

一个典型的机器视觉应用包括光源、光学系统、图像捕捉系统、图像数字化模块、数字图像处理模块、智能判断决策模块和机械执行模块^[2]。机器视觉识别的过程是首先采用 CCD 摄像头或其它图像拍摄装置将目标转换成图像信号，然后转变成数字化信号传送给专用的图像处理系统，根据像素分布、亮度和颜色等信息，进行各种运算来抽取目标的特征，根据预设条件输出判断结果。机器视觉应用系统如图 1.3 所示。

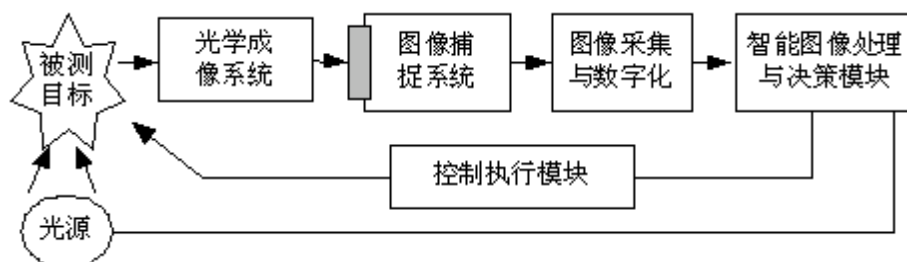


图 1.3 机器视觉应用系统

目前，机器视觉技术在农产品和食品检测方面的应用研究日益增多。农产品的生产过程和食品的加工过程会受到自然和人为等复杂因素的影响，产品品质差异很大，如大小、形状、颜色等都是变化的。机器视觉在检测中具有足够地调节能力来适应这些变化。机器视觉技术可以检测农产品和食品大小、形状、颜色、表面裂纹、表面缺陷及损伤。机器视觉技术的优势在于速度快，信息量大，可一次完成多个品质指标的检测。

1.2 国内外研究现状

柑橘的分级指标包括外部品质和内部品质两个方面^[3]。柑橘外部品质的主要分级指标是柑橘的果形、大小、色泽、表面光洁度等。同一批次等级内的柑橘果形和大小、颜色要有一定的一致性。内部品质指糖度、硬度、酸度、可溶性固形物等指标。利用机器视觉技术实现水果品质检测是目前国际上正在研究的热点课题，目前已经进入实用阶段，部分成果已经商品化。

1.2.1 国外研究现状

国外的水果自动分级方法主要通过 CCD（Charge Couple Device，电荷耦合器件）摄像头采集图像，采用计算机分析处理等手段对水果逐一进行分析判别。除了使用人工神经网络等高效的信息处理技术，水果的质量检测手段还包括近红外线、红外线检验等光学检验方法和高光谱技术、多光谱技术等。

Rehkugler 等^[4]提出采用黑白摄像镜头基于苹果图像灰度值的缺陷检测方法。然而，在苹果等果面为曲面的农产品二维图像中，图像灰度值由果面中心向边缘呈递减趋势，再加上噪声、尺寸及形状的影响，无法使用单一技术（如阈值法或背景相减法）进行缺陷检测，并且无法借助模式识别进行果品质量评判，因而检测精度极低。对此，多年来国际上许多学者做了大量工作，如 Yang^[5]

出了用洪水算法分离块状缺陷(包括碰压伤、腐烂)、花萼和梗的图像方法等。

Shearer^[6]等将RGB值定量转化为HSI三个参数,并基于RGB值构造了8个色调变量,实现了根据颜色和损伤对青椒的分级。Varghese设计出一种利用色调直方图和线形判别式按照颜色对苹果进行分类的机器视觉系统^[7]。Heinemann等^[8]结合形状与HSI 两方面信息进行苹果质量检评,其用色彩的准确率达100%,而用形状评价的准确率达92.3%。Tao^[9]采用线性识别方法对土豆和苹果进行颜色识别,研制系统的识别精度达到90%。

人工神经网络技术是模仿生物大脑结构和功能构成的信息处理技术,在机器视觉系统中应用提高了品质识别的智能性。Kavdir^[10]等使用神经网络算法对柑橘进行分级,把缺陷和物理特征作为神经网络分类器的输入参数,对柚子和橙子的分级准确率为98.5%,对橘子的分级准确率为98.3%。使用神经网络分类,训练好网络后,利用ANN的泛化功能,对橙子的彩色RGB图像,结合颜色和果形分析,获得鲁棒性、实时性的分类结果。

水果的内部品质检测技术中红外线检测占有及其重要的地位。红外线波段是人眼不可视波段,在水果的检测中,有许多优良的性能。比如炭氢化合物(糖、酸、水、维生素等)在近红外波段有不同的吸收峰,可作为检测的依据,在近年来发展起来的内部水果品质检测技术中是极佳的检测手段。Miller^[11-13]采用彩色电视摄像机和近红外线扫描摄像机获得桃子、柑橘等水果图像进行较深入的研究。他对桃子表面的灰度图像进行阴影校正、图像分割和边缘检测,然后用灰度和色度阈值及区域增长法求得损伤表面面积,与人工测得的结果相关系数达0.56。Miller使用近红外技术测量柚子和蜜桔的糖度,并建立了近红外和糖度Brix测度的线性关系。

机器视觉系统数据的提取需要高质量的图像,采用高光谱和多光谱技术可以快速得到高精度的图像。高光谱图像的光谱分辨率相当高,能够精确获得缺陷、污点等的特征光谱段,最近这方面的研究较多;而多光谱利用高光谱的分析结果,能够快速、实时采集信息,降低了软件识别的不确定性。Kim^[10]等使用450~851nm波段的高光谱图像识别苹果表皮的肥料残留物。研究表明,污秽的识别可使用3波段法(绿、红、近红外)或2波段法(近红外区域的两端),前者可用于商业分级设备。高光谱还可用于成熟度分级,波长范围从396~736nm(间隔1.3nm)。用配置多滤光片的多光谱相机(740nm、950nm和可见光段),干涉滤光片放置在光路上产生不同的波长可以对柑橘进行缺陷检测。西班牙的Aleixos使用多光谱相机检测柑橘,图像在两块DSP中并行运算,视觉系统检测的参数为尺寸、颜色、缺陷,检测速度大于5个/秒。柑橘的颜色识别正确率为94%,柠檬和柑橘的缺陷识别正确率分别为93%和94%。

X射线、核磁共振、热红外图像等手段在水果损伤和成熟度检测上也有应用^[14-16]。X射线可用于识别苹果的水芯。实验表明空间特征(面积、灰度)比变换域系数的特征更明显,因此用水果的面积、水果的平均灰度、DCT变换的第10个谐波作为Bayesian分类器的输入量,判断准确率为79%。X射线还可以检测损伤的新旧程度。使用高速单脉冲核磁共振技术作为梨在线分级的工具,通过一个单脉冲NMR获得质子的自衰变测量油梨的成熟度。这种方法测定油梨成熟度快速准确,具有很大发展潜力。由于损伤处和正常处的热辐射不同,用热红外图像对损伤的判别准确率达100%。但热红外图像必须在环境温度变化下才可检测。

1.2.2 国内研究现状

国内的水果自动分级研究起步较晚，主要在水果外在品质检测展开研究。针对柑橘自动分级的研究还比较少。

李庆中^[17]等在实数域分形盒维数计算方法的基础上，提出了双金字塔数据形式的盒维数快速计算方法。对于待识别水果图像的可疑缺陷区，提出用5个分形维数作为描述该区域粗糙度和纹理方向性的特征参数，并用所提出的快速计算方法进行计算，然后利用人工神经网络（BP）作为模式识别器，区分水果表面的缺陷区和梗萼凹陷区，识别的准确率为93%，一个可疑缺陷区的判别时间为4~7ms。李庆中^[18]等还介绍了苹果颜色自动分级系统的硬件组成，确定了苹果颜色特征的提取方法，利用遗传算法实现了多层前馈神经网络识别器的学习设计，实现了苹果颜色的实时分级，并通过实验验证了该方法的有效性。试验结果表明，颜色分级识别准确率在90%以上，分级一个苹果所用的时间为150ms。

籍保平、吴文才^[19]提出了基于机器视觉的苹果缺陷识别的方法。在对苹果图像进行缺陷识别时，首先通过中值滤波和阈值法去除图片中的噪音和背景信息，并转换成二值图像。在对苹果球形表面色度分布及形状缺陷进行识别和修正的过程中，通过复合阈值法提取果面的表面缺陷并进行缺陷转换，采用边缘识别法、欧氏距离法进行表面缺陷的识别和分级，计算苹果表面缺陷的面积。

应义斌、景寒松^[20]等利用机器视觉采集黄花梨图像，研究了不规则果品的形状描述方法，提出在黄花梨的分级过程中采用傅立叶变换与傅立叶反变换来描述果形，开发了基于人工神经网络的果形识别软件。利用红、绿色彩分量在坏损与坏损交界处的突变，求出可疑点，再经区域增长突出整个受损面。研究发现，该傅立叶的前16个谐波的变化特性足以代表梨体的主要形状，采用傅立叶描述与人工神经网络相结合的方法进行果形识别的精确率可达90%，而且傅立叶描述子可以进行平移、旋转和缩放，并具有很强的水果外形重建功能。

应义斌等^[21]利用机器视觉技术对黄花梨的表面缺陷进行检测。黄花梨梨体的正常部分和缺陷部分的光反射率在可见光域内有很大差异，即梨体的正常部分与缺陷部分呈现为不同的颜色，因而在可见光域内可以对果面缺陷进行检测。在检测果面缺陷时，提出利用红（R）、绿（G）色彩分量在坏损交界处的突变，求出可疑点，再经区域增长定出整个受损面积。

何东健等^[22]以机器视觉自动检测果实表面着色度并进行分级为目的，建立了室内机器视觉系统获取苹果果实的彩色图像，并将RGB值转换成HSI值；在分析苹果颜色特性的基础上，确定了用适当色相值下累计着色面积百分比进行颜色分级的方法。试验表明，利用建立的准则和方法，机器视觉分级与人工分级的一致度在88%以上。何东健等^[23]在分析果实表面颜色色相分布特性的基础上，又提出将果实色相分布曲线作为模式处理，用人工神经网络技术进行果实表面颜色分级。结果表明，用人工神经网络技术分级与人工分级的一致度在94%以上。

冯斌^[24]通过对不同着色等级的水果分析，以各色度在水果表面分布的分形维数为特征进行分级，该特征值不仅考虑了各色度点的累计特性，而且考虑了色度点空间分布特性，使颜色分级更符合实际情况。将各色度域分形维数作为模式处理，建立了人工神经网络识别模型。学习后的模

型分级正确率为95%。

赵静^[25]等在综合分析果形的基础上,提出用半径指标、连续性指标等6个特征参数表示果形。首次将参考形状分析法用于果形判别,并利用人工神经网络对果形进行识别和分级。结果表明,用提取的特征参数和果形识别技术,机器视觉与人工分级的平均一致率在93%以上。

应义斌、饶秀勤^[26,29]等以表面色泽与固酸比为柑橘成熟度指标,建立了用于柑橘成熟度检测的机器视觉系统,确定了适宜的背景颜色,进行了柑橘的分光反射试验,发现绿色柑橘表面与桔黄色表面的反射率在700nm时反射率相差最大,约达53%,且各自的反射率都较大,700nm是获得高质量的柑橘图像的较佳中心波长。建立了利用协方差矩阵和样本属于桔黄色和绿色的概率来判断柑橘成熟度的判别分析法,并以实测的固酸比值作为对照,对72个柑橘样本进行了试验,柑橘成熟度的判别准确率达到91.67%。这表明柑橘果实的表皮颜色与成熟度之间具有相关性。

李公平^[27]等利用核磁共振原理测甜菜含糖量,通过大量实验,在借用对甜菜含糖量折光计分析法的基础上,建立了核磁共振方法中甜菜的含糖量模型。原理适用于所有水果含糖量测定的研究。

付峰、应义斌^[28]针对图像采集过程中由于水果形状产生的失真,研究了球体的大小、表面颜色和图像采集位置等因素对球体图像灰度失真的影响,并分别建立了位于摄像视区中心的球体图像的灰度校正模型和偏离摄像视区中心的球体图像的灰度校正模型,采用该模型在MATLAB软件平台上构建了柑桔图像的灰度校正算法。

张聪^[29]用非接触式的测量光幕用于高速连续的单个水果分级。测量光幕是相互分离相对放置的发射器和收光器组成的。当物体进入光幕区域时,阻挡光线,通过控制器识别被阻挡的首束光线的编号,然后依次由下往上计算被阻光线总数,直到最后被阻挡光线为止,累加数值,从而得出物体的被测方向尺寸。

1.2.3 当前分级技术产品化情况

国外公司较早开始对果品自动分级的研究进行产品化,目前国外已经有较为成熟的机器视觉水果分选设备。

1995年美国研制成功的Merling高速高频机器视觉水果分级系统,用于苹果、梨、桃等的水果的分等定级和品质监测,生产率约为40t/h,美国每年有50%以上的苹果经过该设备处理。^[30-31]

美国Penwalt公司Decco型分级机是按重量分级的果实分级机,利用杠杆原理进行工作,采用最新电子仪器测定重量,可按需选择准确的分级基准,分级精度高。具有速度快、性能好、通用性强的特点。

日本开发了可见光和近红外线测定梨、苹果成熟度的传感器,又研制了快速判别水果成熟度和色泽的选果装置,并将此技术用于自动化选果线上,把成熟度、色彩传感器与自动化分级、包装线连在一起,率先实现了高度自动化的无损伤检测选果。日本三菱电器公司研制的水果成熟度分级机,就是利用传感器综合测出梨的表面颜色、对特定光的透光率、形状和大小,并与事先贮存在计算机中的优良梨的数据进行对比,推算出成熟度和糖份。

美国俄勒冈州的Alle Electronics公司的研制成果能够分选果实、蔬菜、果仁及各种小食品的“Inspecttronic”装置。该装置采用高晰像度的CCD摄像头，能识别以每分钟580英尺速度在传送带上移动的产品的仅1mm 大小的变色部分和缺陷部分。该分选装置能按产品的色泽或大小进行分选，并能将特定产品分选内容参数编成程序预先储存在存储器内。^[32]

美国Autoline公司的水果分级设备在世界上处于领先地位，其产品已经系列化（5 个型号），能够按照重量、颜色、形状分级，传送通道可以多达9道，分级出口可达60个，每道的最高传送速率为12个/秒，其传输系统可以容纳不同尺寸的水果，Model6型机器视觉水果分级机采用双CCD，其中一个装有RGB颜色传感器，另一个装有近红外传感器，可以同时进行形状、尺寸大小、体积、颜色和缺陷分级。其所有的控制可以通过台式中央计算机控制完成，操作员可对设备进行分级、选择，可以根据用户需要进行定量包装、统计。^[10]

韩国 SEHAN—TECH 株式会社是生产果蔬分选机的专业生产厂家。主要生产中小型和大型水果分选设备，产品包括多通道分选机、单通道分选机和小型分选机等。能够进行重量、大小、颜色、缺陷和含糖量的分选。其中多通道分选机拥有 8 通道预选线，计算机分析系统能够提供水果分选的各种信息，包括大小的比例情况，每小时的处理量，水果的优质度等。在我国江苏、深圳、湖北等地都有厂家使用它的产品进行柑橘的分级生产。

1.2.4 存在的问题

目前国内应用机器视觉对水果品质的研究，大都针对苹果、梨等水果进行检测和分级。苹果等水果的花萼、果梗部分明显，比较容易确定果轴。而柑橘在外形、颜色上自身的特点比较突出，果形接近球形，果蒂果脐一般不突出，果轴方向不明显。目前只有学者对柑橘表面颜色和成熟度的关联进行了研究，在外形分级上针对柑橘的特性进行深入探讨的比较少。

另外，由于国内对水果品质检测及自动分级研究时间短，虽然有一些成功的研究，但还谈不上大规模推广应用，研究讨论的不少是新方法的应用，考虑实际的生产效率需求不够。特别是以前对水果研究主要的是单渠道单指标的分级，对柑橘的多个品质指标进行检测时，处理数据量大、速度较慢，距实际应用还有很大距离。

对柑橘品质进行快速、全量检测和分级，多渠道同时并行，还是国内学者需要继续研究与攻克的难题之一。

1.3 课题研究内容

本课题是根据农业部“引进国际先进农业科学技术”专项基金项目（948 项目）“机器视觉水果分级技术与设备”的需要设定的。本课题的研究目标是在国内外水果果面分级检测研究的基础上，以柑橘为原料，结合机器视觉技术，进行柑橘的外部品质自动检测分级的初步研究，为柑橘的外部品质准确分级和商品化加工处理提供理论依据与技术支持。

柑橘的自动分级涉及图像处理、自动控制、机器视觉等多个领域。本文作为课题研究的一部

分，主要是在现有硬件系统基础上快速分析柑橘图像、输出分级处理结果，使研究的成果具有产业化的意义，为柑橘的动态检测奠定基础。主要完成以下工作：

（1）图像的获取和预处理

比较研究阈值分割、边缘检测、中值滤波等图像处理算法，采用合适的方法进行图像的背景分割、去除随机噪音和边缘检测等预处理；

（2）实现柑橘的分级

研究柑橘外形特征，在研究现有技术的基础上总结和提出适合描述柑橘大小、颜色和外形特征参数以及检测方法，进行水果级别的判断决策。

本文在 Windows2000 系统上用 Visual C++6.0、MFC 以及其他类库开发完成。通过实验室检测，该分级系统可以实现大小、颜色和形状的分级检测目标。

第二章 柑橘图像预处理

2.1 概述

机器视觉柑橘分级系统采集到的柑橘图像除了包含柑橘果面图像外，还包含输送装置、机架等背景信息，甚至还包含一些随机噪音。为了分离出完整清晰的柑橘果面图像，去除与柑橘分级无关的信息，便于之后的水果外部品质检测分析，必须首先对柑橘图像进行预处理。

图像预处理的目的是消除与柑橘图像无关的信息，获取与柑橘的有关信息，最大限度简化数据，从而提高图像识别分析的准确性和速度。图像的预处理是机器视觉应用系统非常重要的环节。图像的预处理一般包括背景分割、平滑噪音、边缘检测等等。

2.2 特征参量选取

本课题研究的柑橘自动分级系统需要实现对柑橘的大小、颜色和形状的分级。为了能在实际生产环境中使用机器视觉技术进行柑橘的分级，首先我们需要确定系统采用的颜色模型和图像处理选用的特征参量。

常用的模型有 RGB 模型、CMY 模型、XYZ 模型、HSI 模型等。在图像处理中常见的是 RGB 模型和 HSI 模型。

2.2.1 常用颜色模型

1. RGB 模型

在多媒体计算机技术中，用的最多的是 RGB 模型表示。原理是采用 R、G、B 相加混色的原理，通过发射出三种不同强度的电子束，使屏幕内侧覆盖的红、绿、蓝磷光材料发光而产生颜色。RGB 是一个加色立方体模型，光源的亮度、色度、纯度混合在 R、G、B 3 个参数中。RGB 模型里面任意色光 F 都可以用 R、G、B 三色不同分量的相加混合而成：

$$F=r[R]+g[G]+b[B]$$

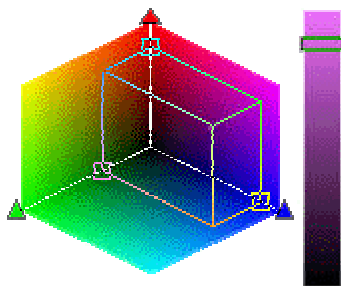


图 2.1 RGB 颜色模型

RGB 模型采用物理三基色表示,因而物理意义很清楚,适合彩色显像管工作,显示器和扫描仪都采用 RGB 模型。然而这一体制并不适应人的视觉特点。这种模型从感知来说是不均匀的,并依赖于硬件设备。RGB 模型的缺点有:(1) RGB 模型用红、绿、蓝三原色的混合比例定义不同的色彩,使色彩难以用准确的数值来表示,并进行定量分析;(2)在 RGB 模型中,由于彩色合成图像通道之间相关性很高,使合成图像的饱和度偏低,色调变化不大,图像视觉效果差;(3)人眼不能直接感觉红、绿、蓝三色的比例,而只能通过感知颜色的亮度、色调以及饱和度来区分物体,而色调和饱和度与红、绿、蓝的关系是非线性的,因此,难以在 RGB 模型中对图像进行直接处理。

2. HSI 模型

HSI 模型^[33]是基于视觉原理的一个系统,定义了三个互不相关,容易预测的颜色心理属性,即色调(H)、亮度(I)和饱和度(S)。其中,H 是表面呈现近似红、黄、绿、蓝等颜色的一种或几种的目视感知属性;I 是物体表面相对明暗特性;S 是颜色具有“白光”的程度。HSI 模型属极坐标空间定义,它的三维表示是从 RGB 立方体演变过来的,用一个圆锥空间模型来描述。图 2.2 所示为 HSI 模型的三维表示。

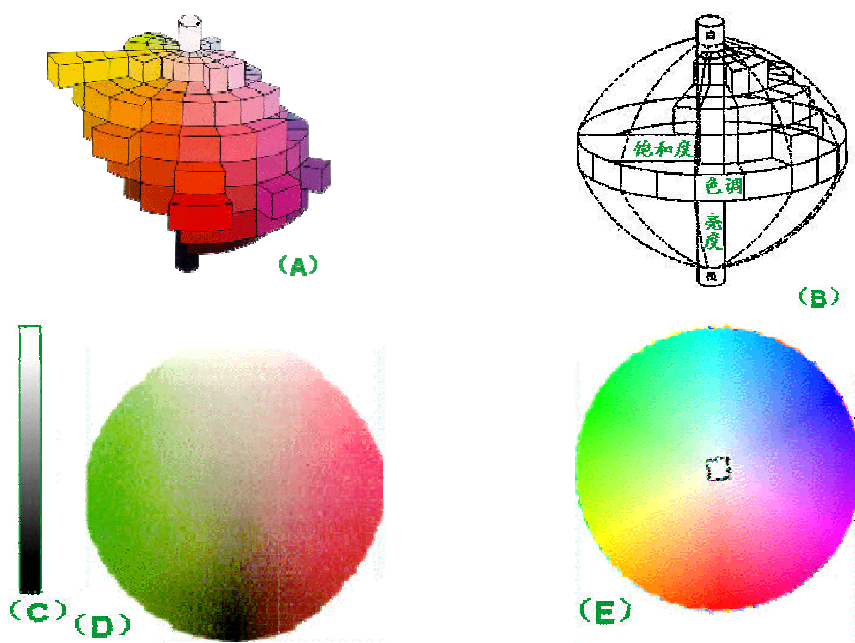


图 2.2 HSI 模型

其中:图(A)是 HSI 圆锥空间模型;(B)为线条示意图:体现了圆锥上亮度、色度和饱和度的关系;(C)表示亮度 I,亮度值是沿着圆锥的轴线度量的,沿着圆锥轴线上的点表示完全不饱和的颜色,按照不同的灰度等级,最亮点为纯白色、最暗点为纯黑色;(D)是圆锥纵切面,描述了同一色调的不同亮度和饱和度 S 关系。(E)是圆锥横切面:色调 H 为绕圆锥截面度量的角度,它用角度 $0 \sim 360^\circ$ 度量;圆周上的颜色为完全饱和的纯色。

由于人的视觉对亮度的敏感程度远强于对颜色浓淡的敏感程度,为了便于颜色处理和识别,

人的视觉系统经常采用 HSI 颜色空间，它比 RGB 颜色空间更符合人的视觉特性。在图像处理和机器视觉中大量算法都可在 HSI 颜色空间中方便地使用。

由于在柑橘的分级生产线上，输送装置等背景为深色，柑橘果面和背景的 RGB 值和 H 值相差都比较明显，所以使用 HSI 模式和 RGB 模式都可以进行大小和形状的认识。但是本课题中柑橘外形识别包括大小、形状和颜色三个方面，RGB 模式和 HSI 模式哪个更适合颜色的识别，这里主要从描述颜色信息的准确性和稳定性两个方面进行讨论，以便选取适合柑橘分级的颜色模型。

2.2.2 颜色信息准确性比较

在 HSI 颜色模型中，HSI 颜色模型将光强信息(I)与颜色信息(H、S)分离表示，I 值不受颜色信息的影响。

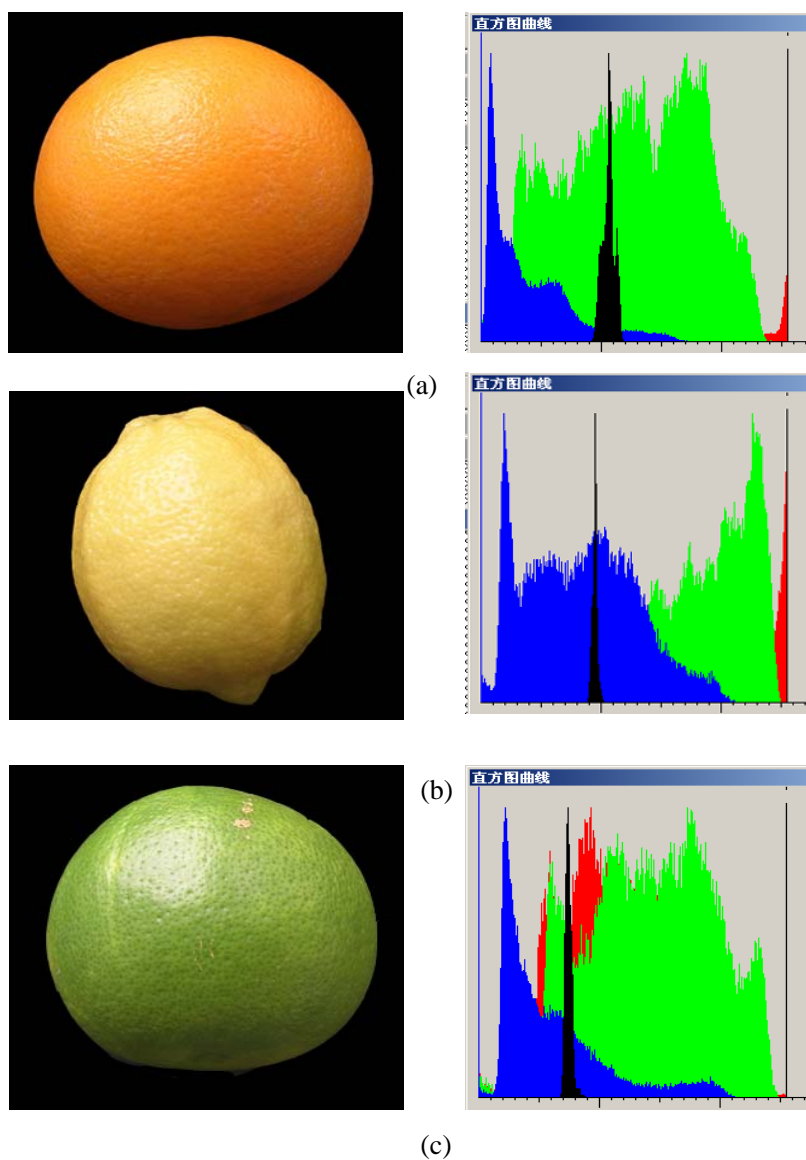


图 2.3 不同颜色的水果的色调值、RGB 值直方图

响也不能表示颜色，摄像室内光源是确定的，所以 S 信号也是确定的。而色调值 H 则随采集到柑橘的颜色不同而有不同的取值，可以直观、定量、准确地描述柑橘果面图像颜色信息。这里我们对色调值 H 和 RSB 值进行讨论。

图 2.3 是三个不同颜色的柑橘的色调值直方图和 RGB 直方图。红绿蓝三色直方图分别表示 RGB 值，黑色直方图表示 H 值。

从色调值直方图中我们可以直观地了解到果面图像的颜色情况，三个果面颜色在色调值直方图中被清楚地表达为三个色调值区域，并且从橙到绿，色调值取值依次减小。相比之下，三个果面的 RGB 模式中颜色是由 RGB 值混合而成，任何一个分量都不能单独准确体现水果颜色的变换。这是由于色调值 H 能综合体现的 RGB 系统中三个分量的颜色信息，所以能够准确的体现的颜色信息。因此，用色调值来定量描述柑橘图像颜色信息是准确的。

2.2.3 颜色信息稳定性比较

由于生产环境的不稳定和光源的能量衰减，分级系统中光线强弱不可能保持一个恒定值。HSI 颜色模型将光强信息与颜色信息分离表示，即用 I 值表示光强，用 H 色调值表示颜色。我们知道人眼对光线强弱的变化要比对颜色的变化更敏感，这也说明了 H 色调值在表达颜色识别方面的稳定性。

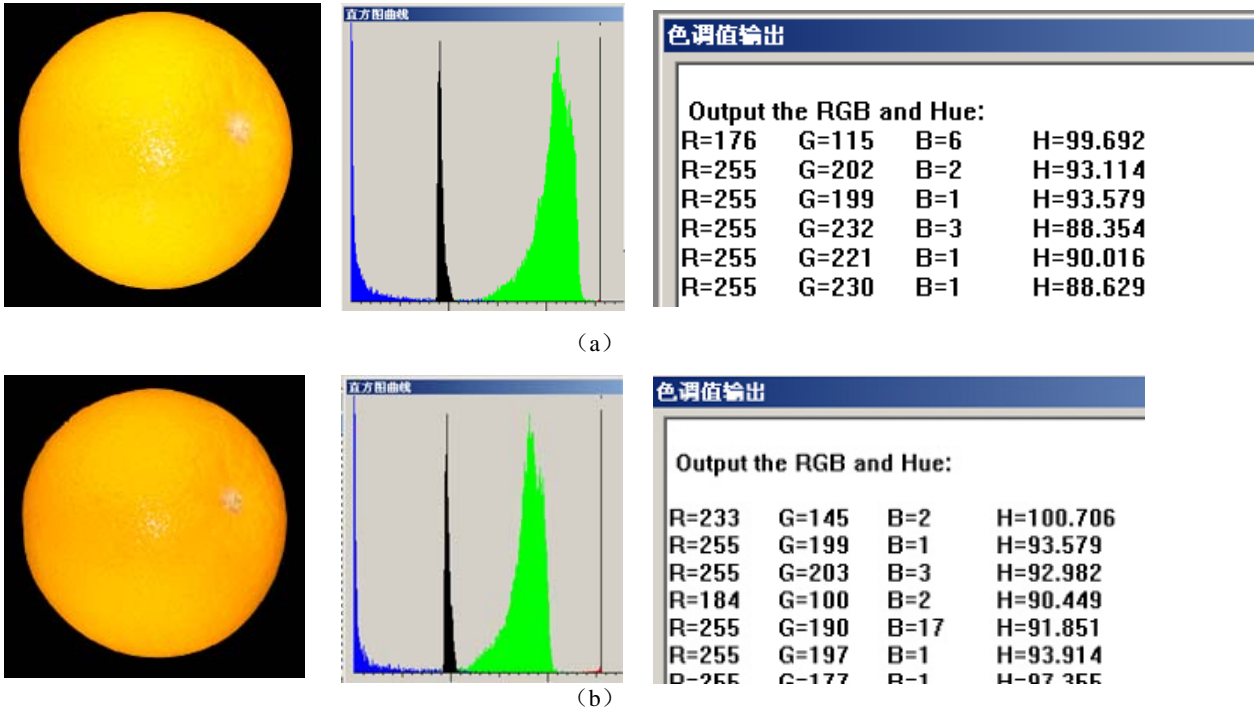


图 2.4 光线强度对色调值和 RGB 值的影响

图 2.4 所示为同一柑橘图像在不同光线下色调值直方图和 RGB 直方图的情况。图 a 为正常周围光线强度下的柑橘图像，图 b 为周围环境光线增强到 120%。从两图中的 RGB 和 H 直方图分布情况可见，RGB 值随着周围光线强度的变化而发生明显的改变，但色调值 H 却保持稳定，这说明色调值 H 对周围环境光线强弱不敏感。

光线梯度不均时在视觉上会产生色彩差异。如图 2.5 所示为同一果面区域在不同摄像角度下的 RGB 和 H 值变化情况,可以发现,RGB 值在不同光线梯度下取值变化较大,但色调值 H 却几乎没有变化。这是由于色调值 H 对周围环境光线强弱变化不敏感,由曲面引起的柑橘果面上的光线梯度变化对 H 值影响较小。

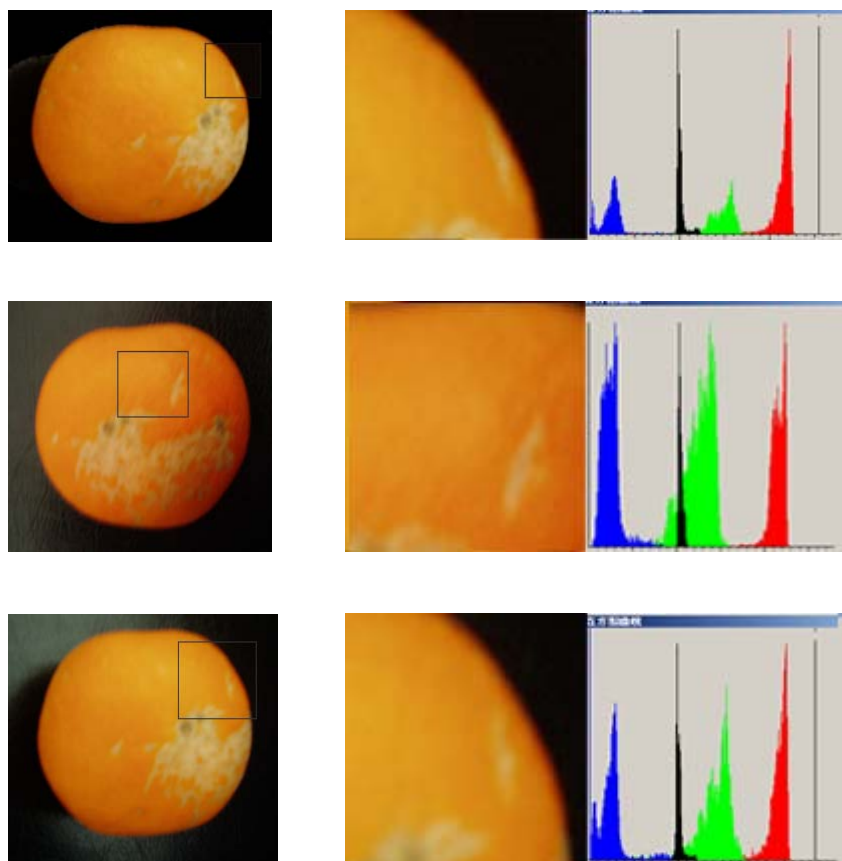


图 2.5 光线梯度对色调值和 RGB 值的影响

因此,色调值 H 来描述柑橘的图像颜色信息较为稳定。

由于 H 值能准确、稳定的表示颜色,便于进行颜色识别和背景分割等操作。使用 H 值相对 R、G、B 三个分量的计算量减少了 $2/3$,有利于简化运算。所以,选用 H 值为颜色识别的特征参量可以加快图像的处理速度,减少数量处理量。根据前面的讨论,我们统一采用 H 值进行图像的背景分割、边缘检测等预处理,以及柑橘的大小、形状和颜色的识别处理。

2.2.4 RGB 模式与 HSI 模式的转换

由于彩色 CCD 摄像头输出的是 RGB 数据,在处理中首先要进行图像 RGB 模式到 HSI 模式的转换。

HSI 模式和 RGB 模式只是同一物理量的不同表示法,将 RGB 转换到 HSI 的变换称为 HSI 变换,将 HSI 转换到 RGB 的变换称作 RGB 变换。采用不同的坐标系可以得到不同的彩色空间变换模型,如 Raines 提出的柱面坐标系模型、六角锥模型、色度坐标模型等等。从简便灵活,实用

的角度出发，依据柑橘表面的色泽特征，这里采用色度坐标模型进行 HSI 变换。图 2.6 为色度坐标三角形。

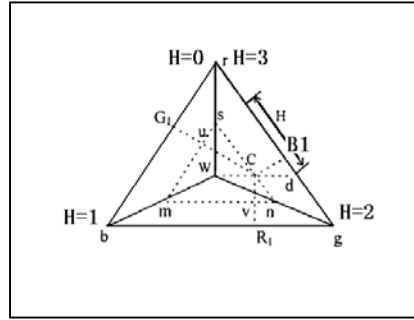


图 2.6 色度坐标三角形

HSI 转换的公式如下：

$$H = \begin{cases} \arccos \left\{ \frac{[(R - G) + (R - B)] / 2}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\} & G \geq B \\ 360^\circ - \arccos \left\{ \frac{[(R - G) + (R - B)] / 2}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\} & G < B \end{cases} \quad (2-1)$$

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} \min(R, G, B) \quad (2-2)$$

$$I = (R + G + B) / 3 \quad (2-3)$$

实际计算中，还需对 H 值进行进一步的简化。根据 (2-3) 式可得：

$$\cos(H) = \frac{[(R - G) + (R - B)]}{2[(R - G)^2 + (R - G)(R + B)]^{1/2}} \quad (2-4)$$

$$\sin(H) = \frac{x}{2[(R - G)^2 + (R - G)(R + B)]^{1/2}} \quad (2-5)$$

其中 x 待定。由直角三角形三边关系，有：

$$x^2 + (2R - G - B)^2 = 4[(R - G)^2 + (R - G)(R + B)] \quad (2-6)$$

简化得：

$$x^2 = 3(G - B)^2 \quad (2-7)$$

$$\operatorname{tg}(H) = \frac{\sqrt{3}(G - B)}{(2R - G - B)} \quad (2-8)$$

可得 H 值的转换公式如下：

$$H = \begin{cases} 90^\circ + \tan^{-1} \left(\frac{2R - G - B}{\sqrt{3}(G - B)} \right) & G > B \\ 270^\circ + \tan^{-1} \left(\frac{2R - G - B}{\sqrt{3}(G - B)} \right) & G < B \\ 255 & B = G \neq 0 \\ 0 & G = B = 0 \end{cases} \quad (2-9)$$

2.3 背景分割

采集到的柑橘图像中包括柑橘和背景两部分，本系统是对图像中柑橘进行外形上的检测识别，必须准确的确定目标与背景。因此首先要将采集到的柑橘图片进行背景分割。

图像分割（image segmentation）是数字图像处理领域中一类非常重要的图像分析技术，主要是根据图像在各个区域的不同特性，而对其进行边界或区域上的分割，并从中提取出所关心的目标^[34]。

由于柑橘的自动分级系统最终要应用于实际的生产线上，采用单一分量进行背景分割速度快，有利于生产效率的提高；同时，本系统的水果传送装置为黑色，背景和柑橘图像的交界处色调值表现出很大的变易性，适合采用阈值法进行分割。因此，本系统采用阈值法对图像的色调值分割处理柑橘图像的背景。

2.3.1 阈值分割算法

阈值分割算法是通过阈值来定义图像中不同目标的区域归属，在阈值确定后，通过阈值分割出的结果直接给出图像的不同区域分布。阈值分割算法基本的处理方式是：先在图像的灰度取值范围中选择一灰度阈值，并对图像全部像素点应用该阈值。一般说来，经由此阈值分割的两部分像素点分属图像中的不同区域，这也就使利用阈值对图像进行区域分割成为了可能。

对于图像 $f(x, y)$ ，对其取 K 个阈值后，图像可用式 2-10 表示：

$$\text{当 } T_{k-1} < f(x, y) < T_k \text{ 时, } g(x, y) = k (k = 0, 1, \Lambda, K) \quad (2-10)$$

阈值选择的恰当与否对分割的效果起着决定性的作用。经过阈值化分割算法近 40 年的发展，已经摸索出了不少阈值的优选算法。经典的阈值选取方法有以下 4 种：极小值点阈值选取方法，最优阈值搜寻方法、迭代阈值选取方法以及大津法（OTSU 法）。通过这 4 种方法中的一种或几种，在一般情况下能够选择出合适的阈值点，进而可以对图像进行准确有效的分割。

1. 极小值点阈值选取方法

如果将直方图的包络看作一条曲线，则选取直方图的谷可借助求曲线极小值的方法。设用 $h(x)$ 代表直方图，那么极小值点应同时满足：

$$\begin{cases} \frac{\partial h(x)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial^2 h(x)}{\partial x^2} > 0 \end{cases} \quad (2-11)$$

和这些极小值点对应的灰度值就可用作分割阈值。

由于实际的柑橘图像的直方图由于图像噪声等原因经常有很多起伏，使得 2-11 式计算出的极小值点有可能对应虚假的谷，导致错误的分割。

2. 最优阈值搜寻方法

最优阈值指能使误分割最小的分割阈值。图像的直方图可看成像素灰度值的概率分布密度函

数的一个近似，设一幅图像仅包含两类主要的灰度值区域（目标和背景），那么其直方图所代表的像素灰度值概率分布密度函数实际上是对应目标和背景的两个单峰分布密度函数之和。如果已知密度函数的形式，那么就有可能计算出一个最优阈值，用它可把图像分成两类区域而使误分割率最小（图 2.7）。

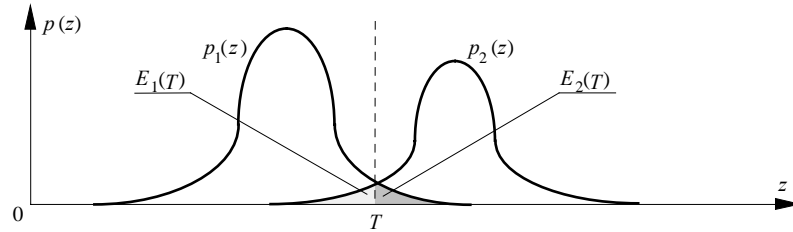


图 2.7 最优阈值选取示例

通过分析，发现最优阈值分析图像的假定图像中物体和背景的灰度分布都服从正态分布。但是柑橘分选系统图像中的柑橘和背景的灰度分布都不一定服从正态分布，因此不适合用最优阈值分析法来确定阈值。

3. 迭代阈值选取方法

迭代阈值选取法是基于逼近的思想，其步骤如下：

1. 求出图象的最大灰度值和最小灰度值，分别记为 Z_{MAX} 和 Z_{MIN} ，令初始阈值 $T_0 = (Z_{MAX} + Z_{MIN})/2$ ；
2. 根据阈值 T_k 将图象分割为前景和背景，分别求出两者的平均灰度值 Z_O 和 Z_B ；
3. 求出新阈值 $T_{k+1} = (Z_O + Z_B)/2$ ；
4. 若 $T_k = T_{k+1}$ ，则所得即为阈值；否则转 2。

$$T_{i+1} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{k=0}^{T_i} h_k \cdot k}{\sum_{k=0}^{T_i} h_k} + \frac{\sum_{k=T_i+1}^{L-1} h_k \cdot k}{\sum_{k=T_i+1}^{L-1} h_k} \right) \quad (2-12)$$

其中 h_k 是灰度为 k 值的像素个数，迭代一直进行到 $T_{i+1} = T_i$ 结束，取结束时的 T_i 为分割阈值。从直方图上直观地看，上述方法得到的阈值处在与两个灰度区域的重心成反比的位置，所以从路径规划的角度看也是一种最优阈值。

从公式可以看出，迭代选择阈值搜寻需要多次计算才能确定阈值，因此计算量较大，不太适合需要快速计算的柑橘分级生产线。

4. 大津法（OTSU 法）^[35]

大津法也称为类别方差自动门限法，原理是：如果选取阈值使图像物体与背景部分灰度分布方差越大，那么图像物体与背景分离的准确性就越大。用 C_0 表示物体图像，用 C_1 表示背景，则 C_0 和 C_1 类的方差分别是：

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=t+1}^{L-1} (i - \mu_1)^2 p_i / \omega_1 \quad (2-13)$$

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=0}^t (i - \mu_0)^2 p_i / \omega_0 \quad (2-14)$$

其中: t 为阈值; $\omega_0, \omega_1, \mu_0, \mu_1$ 分别是 C_0 和 C_1 类出现概率和均值; L 为灰度级。

C_0 和 C_1 类的类间方差为

$$\sigma_{\omega}^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2 \quad (2-15)$$

C_0 和 C_1 类的类内方差为

$$\sigma_B^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (2-16)$$

t 的等价判决准则

$$\eta(t) = \sigma_B^2 / \sigma_{\omega}^2 \quad (2-17)$$

则最佳阈值就是

$$t^* = \underset{t \in [0, L-1]}{\text{Arg max}} \eta(t) \quad (2-18)$$

我们经过实验测试发现: 大津法选取出来的阈值比较理想, 对各种情况的表现较为良好。虽然它可能不是最佳的分割, 但分割质量通常都有一定的保障, 可以说是最稳定的分割。

柑橘自动分级系统中柑橘处于运动状态, 采集的图像本身有一定模糊, 所以系统对背景分割的精度要求不是很高。大津法能够快速稳定的选取出理想的背景分割阈值, 故本系统采用大津法对柑橘图像进行背景分割。

2.3.2 柑橘图像大津法分割结果分析

采用大津法计算柑橘图像的背景分割阈值, 具体通过以下方法得到:

对于柑橘图像, 记 t 为前景与背景的分割阈值, $b(i,j)$ 是像素点 (i,j) 的灰度值。设图像的灰度级别为 m , $p(k)$ 为图像灰度值为 k 的频率, 则:

$$p(k) = \{ (i,j) \mid b(i,j) = k \} \text{ 的元素个数} \quad (2-19)$$

如果以灰度值 t 为阈值分割出柑橘和背景, 背景为 $\{ (i,j) \mid b(i,j) > t \}$, 柑橘部分为 $\{ (i,j) \mid b(i,j) \leq t \}$ 。设柑橘果面的像素点数为 W_0 , 平均灰度为 U_0 ; 背景点数 W_1 , 平均灰度为 U_1 。那么:

$$W_0 = \sum_{i=0}^t p(i) \quad (2-20)$$

$$W_1 = \sum_{i=t+1}^{m-1} p(i) \quad (2-21)$$

$$U_0 = \sum_{i=0}^t \frac{i \times p(i)}{W_0} \quad (2-22)$$

$$U_1 = \sum_{i=t+1}^{m-1} \frac{i \times p(i)}{W_1} \quad (2-23)$$

图像的总平均灰度为:

$$U = \frac{W_0 \times U_0 + W_1 \times U_1}{W_0 + W_1} \quad (2-24)$$

从最小灰度值到最大灰度值遍历 t ，当 t 使得值 g

$$g = W_0 \times (U_0 - U)^2 + W_1 \times (U_1 - U)^2 \quad (2-25)$$

最大时 t 即为大津法分割得到的阈值。

由于使用公式 2-25 计算量比较大，在实现时采用了等价的公式：

$$g = w_0 \times w_1 \times (u_0 - u_1)^2 \quad (2-26)$$

图 2.8 (a) 为采集到的生产线上的柑橘图像，图像中有明显的输送带等背景信息。通过大津法计算，当分割阈值为 148 时，色调值大于阈值的部分是背景，色调值在阈值之内的像素是柑橘果面像素。分割处理的图像效果见图 2.8(b)。可见，在背景和柑橘的色度差比较明显的时候，大津法的效果良好。

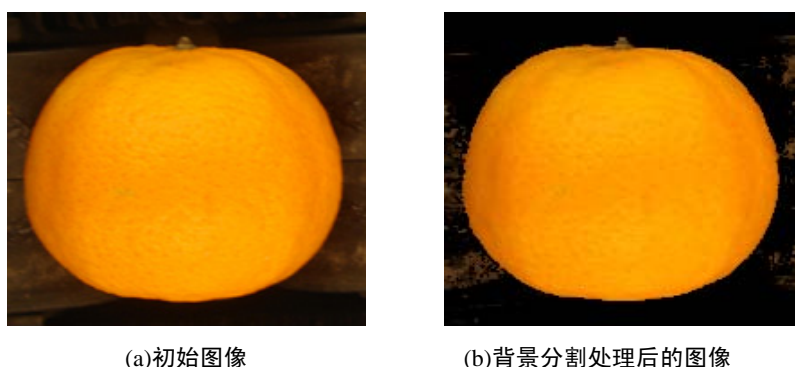


图 2.8 采用大津法进行背景分割

为了提高运算效率，分割阈值没有从最小色度值 0 遍历到最大色度值 360。通过试验统计柑橘的橙色色调取值范围在：131~152，绿色色调取值范围为：97~123；根据实验经验，分割阈值可以从 80 到 180 之间计算。

2.4 噪音去除

基于机器视觉的柑橘分级系统是一个涉及到光、电子、计算机和机械等多种器件的复杂系统，其各个环节都可能产生影响系统图像清晰程度的污染。柑橘图像的采集、输入若伴有较大噪声，会使图像的精度受影响，从而降低图像质量。这必然影响到识别处理全过程及结果输出，甚至可能因此做出错误的识别。所以在对柑橘图像进行模式识别之前，必须要对图像质量加以改善，平滑噪声同时尽量保持图像细节。噪音去除处理可以有效的抑制噪音，同时能够增加图像的对比度，有利于图像识别处理阶段提取图像特征。

中值滤波和数学形态算子方法是常用的噪音去除方法。中值滤波具有抑制噪声和很好的保护图像的边界信息等优点；而图像数学形态学算子具有消除细小物体、在纤细点处分离物体、和平滑较大物体的边界时又不明显改变其面积的作用。

2.4.1 中值滤波技术

中值滤波是基于排序统计理论的一种能有效抑制噪声的非线性信号处理技术。1971 年 Tukey 在进行一维信号处理技术时间序列分析时提出中值滤波器的概念, 后来人们又将之引入二维图像处理中。这种滤波器的优点是运算简单而且速度较快, 在一定条件下, 可以克服线性滤波器所带来的图像细节模糊, 在消除叠加白噪声、长尾叠加噪声、图像的椒盐噪声、脉冲噪声等方面显示了较好的性能。中值滤波器在滤除噪声的同时, 能很好的保护图像的边界信息, 如边缘、锐角等, 但有时会失掉图像中的细线和小块的目标区域。

1、中值滤波原理

中值滤波的变换原则是: 图像中滤波后某像素的输出等于该像素邻域中各像素灰度值的中值。中值滤波就是一个含有奇数点的滑动窗口, 将窗口正中的那点值用窗口内各点灰度的中值代替。我们用符号 $M(i_1, i_2, i_3, \dots, i_n)$ 来表示中值。邻域的大小决定在多少个数值中求中值, 窗口的形状决定在什么样的几何空间中取元素计算中值。^[36]

设有一个一维序列 f_1, f_2, \dots, f_n 。取窗口长度为 m (m 为奇数), 对此一维序列进行中值滤波, 就是从输入序列中相继抽出 m 个数 $f_{i-v}, \dots, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, \dots, f_{i+v}$; 其中 f_i 为窗口中心点值, $v = \frac{m-1}{2}$ 再将这 m 个点值按其数值大小排序, 取其序号为正中间那个数作为滤波输出。用数学公式表示为:

$$Y_{i,j} = M\{f_{i-v}, \dots, f_i, \dots, f_{i+v}\} \quad i \in n, \quad v = \frac{m-1}{2} \quad (2-27)$$

对于二维序列 $\{X_{ij}\}$ 进行中值滤波时, 滤波窗口也是二维的。其尺寸为 $N = (2k+1)(2k+1)$, 则二维中值滤波器由下式定义:

$$Y_{i,j} = M\{x_{i+r, j+s}, (r,s) \in A\} \quad A \text{ 为滤波窗口} \quad (2-28)$$

二维中值滤波用于图像处理是这样进行的, 将滤波窗口 A 移遍图像序列上的每一个点, 并用窗口内各原始值的中值来代替窗口的中心点的值。以滤波窗口为 3×3 为例, 窗口 A 内有 9 个像素灰度值, 这 9 个数值按大小顺序排序求出中值, 从而计算出二维中值。

由于实际的柑橘图像比较复杂, 某些细节信息比如细小缺陷有可能被窗口较大的中值滤波破坏掉。为了减少这种破坏作用, 进一步提高滤波效果, 需要采用具有边缘保持的二维中值滤波器。根据中值滤波的性质可知, 对某些特定的输入信号, 如在窗口 $2n+1$ 内单调增加或单调减少的序列, 中值滤波输出信号仍保持输入信号不变, 即

$$f_{i-n} \leq \dots \leq f_i \leq \dots \leq f_{i+n} \quad \text{或} \quad f_{i-n} \geq \dots \geq f_i \geq \dots \geq f_{i+n}$$

$$\text{则 } \{Y_i\} = \{f_i\} \quad (2-29)$$

二维中值滤波的不变性不但与输入信号有关，而且还与窗口形状有关。图 2.9 列出几种二维窗口及与之对应的最小尺寸的不变输入图形。

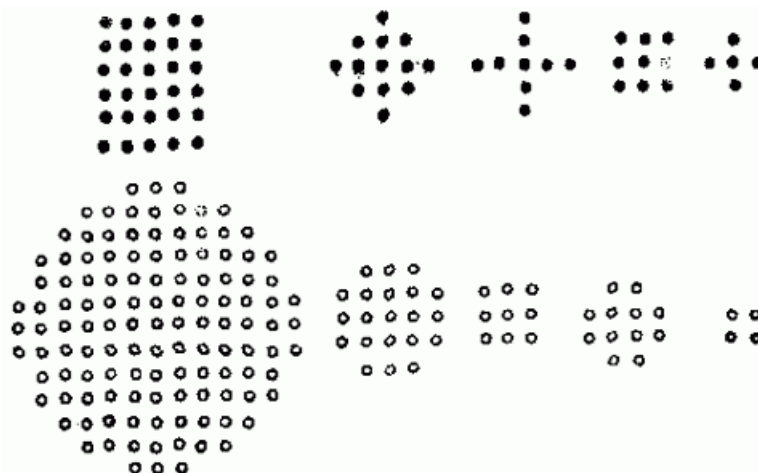


图 2.9 二维窗口及与之对应的最小尺寸的不变输入图形

二维中值滤波的窗口形状的尺寸设计对滤波效果影响很大。不同的图像内容和不同的应用要求，往往采用不同的窗口形状和尺寸。常用的二维中值滤波窗口形状有线状、方形、圆形、十字形以及圆环形等。就一般经验来讲，对于有缓变的较长轮廓线物体的图像，采用方形或圆形窗口为宜。对于包含有尖顶角物体的图像，适宜用十字形窗口。而窗口大小则以不超过图像中最小有效物体的尺寸为宜。

2.4.2 数学形态算子

数学形态学是研究数字影像形态结构特征与快速并行处理方法的理论，它是以图像的形态特征为研究对象，主要内容是设计一整套概念、变换和算法，用来描述图像的基本特征和基本结构。目前国内一些图像处理系统，例如车辆牌照、医学影像的识别系统中，就运用了基于数学形态学方法。数学形态学算子基本思想如图 2.10 所示。

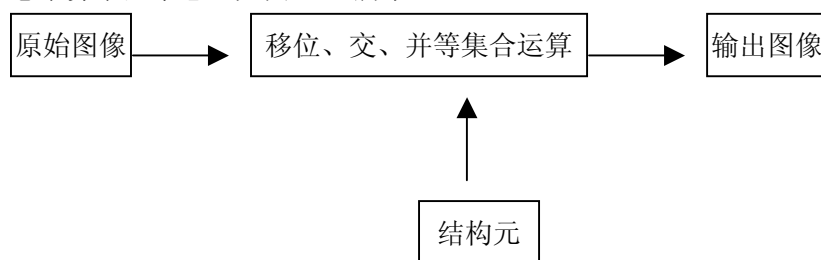


图 2.10 数学形态学算子的方法

最基本的形态算子有：腐蚀(erosion)，膨胀(expand)，开(Opening)和闭(closing)。用这些运算符及其组合可以用来进行图像分割，特征抽取，边界检测，图像滤波，图像增强和恢复等等方面的工作。形态学具有完备的数学基础，这为其应用于图像分析和处理奠定了坚实的基础，特别是形态学的分析处理算法都可以并行的实现，从而大大地提高了图像分析和处理的速度。^[37]

1、腐蚀

腐蚀的算符为 \ominus ，A 用 B 来腐蚀写成 $A \ominus B$ ，其定义为

$$A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\} \text{ 或 } A \ominus B = \{x : B + x \subseteq A\} \quad (2-30)$$

上式中 $(B)_x$ 或 $B+x$ 均表示将 B 沿矢量 x 平移一段距离，腐蚀的结果是所有 x 的集合，其中 B 平移 x 后仍在 A 中。如果将 B 看作模板，那么 $A \ominus B$ 则出在平移模板过程中，所有可以填入 A 内部的模板的原点组成。

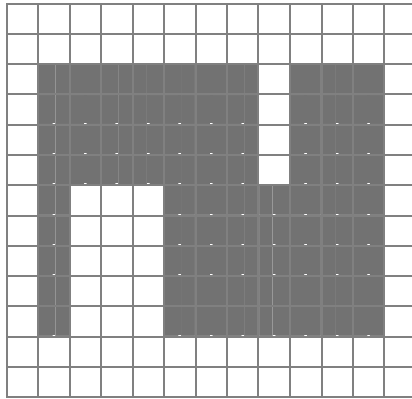
腐蚀则对图像内部做滤波处理，简单的腐蚀是消除物体的所有边界点的一种过程，其结果使剩下的物体沿其周边比原物小一个像素的面积。如果圆的物体采用 3×3 结构元进行腐蚀，它的直径在每次腐蚀后将减少 2 个像素。如果物体任一点的宽度少于三个像素，那么它在该点将变为非连通的（变为两个物体）。在任何方向的宽度不大于 2 个像素的物体将被除去。腐蚀对从一幅分割图像中去除小且无意义的物体来说是很有用的。

2、膨胀

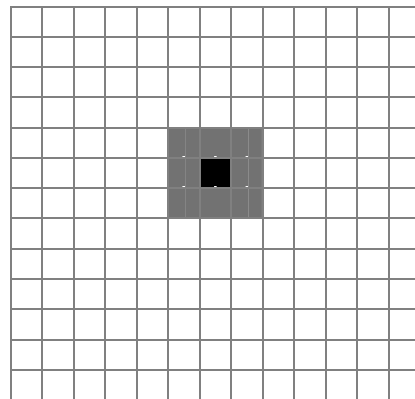
膨胀的运算符为 \oplus ， A 用 B 来膨胀写作 $A \oplus B$ ，其定义为：

$$A \oplus B = \{x | (B)_A \cap A \neq \phi\} \quad (2-31)$$

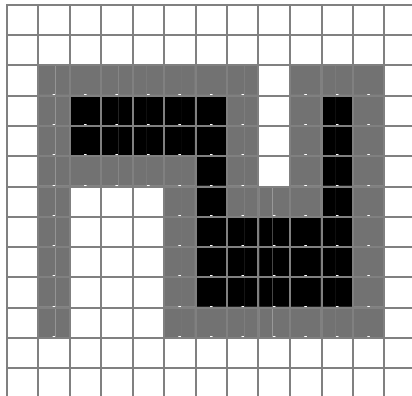
用 B 膨胀 A 的过程是先对 B 做关于原点的映射（即将 B 相对原点旋转 180 度得到 $-B$ ），再将其映象的交集非零。即用 B 来膨胀 A 得到的集合是 B 的映象的位移与 A 至少有一个非零元素相交时 B 的原点位置的集合。



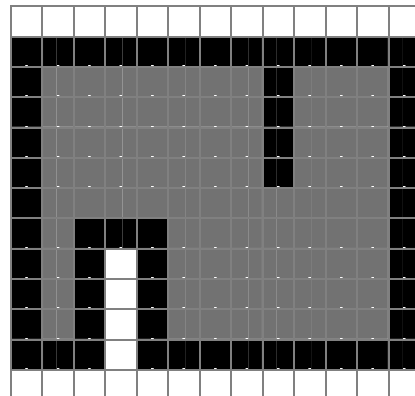
(a) 原测试图像



(b) 3×3 结构元素



(c) 原图与 3×3 结构元素腐蚀



(d) 原图与 3×3 结构元素膨胀

图 2.11 图像膨胀腐蚀运算示例

膨胀是将与某物体接触的所有背景点合并到该物体中的过程。过程的结果是使物体的面积增大了相应数量的点。由于利用结构元素对图像补集进行了填充，因而它对图像外部作滤波处理。如果圆的物体采用 3×3 结构元进行膨胀，它的直径在每次膨胀后增大两个像素。如果两个物体在某一点相隔少于三个像素，它们将在该点连通起来（合并成一个物体）。膨胀在填补分割后物体中的空洞很有用。

图像的腐蚀和膨胀运算是与结构元素相关的，不同形状的结构元素对图像的腐蚀、膨胀结果也不同。

3. 开运算和闭运算

对图像先进行腐蚀再膨胀为开运算，对图像先进行膨胀再腐蚀为闭运算。开运算和闭运算可以用来平滑图像的边界并能消除噪声。

开运算具有消除细小物体、在纤细点处分离物体、平滑较大物体的边界时又不明显改变其面积的作用。闭运算具有填充物体内部细小空洞、连接邻近物体、对图像的外部作滤波，在不明显改变物体面积的情况下平滑其边界的作用。

通常，当有噪声的图像用门限二值化时，所得的边界往往是很不平滑的，物体区域具有一些错判的孔，背景区域上则散布着一些小的噪声物体。连续的开和闭运算可以显著地改善这种情况。有时连续几次腐蚀迭代后，加上相同次数的膨胀，才可以产生所期望的效果。

2.4.3 柑橘图像噪音去除结果比较分析

我们分别对进行背景分割后的柑橘图像图 2.12(a)进行中值滤波处理和数学形态算子的处理。图 2.12(b)为经过中值滤波的图像。图 2.13 为经过数学形态算子运算处理的图像。处理窗为 3×3 大小。

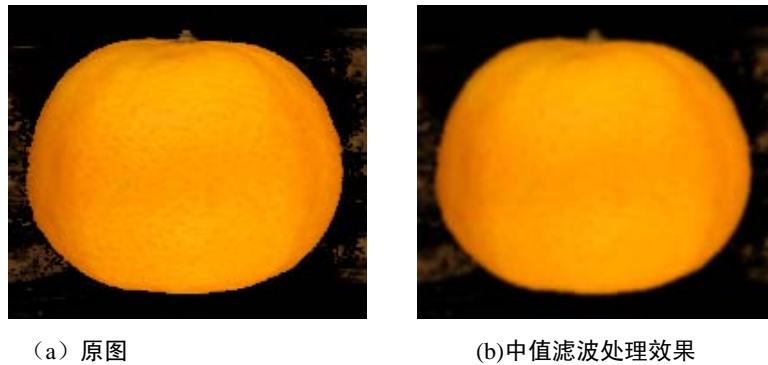


图 2.12 中值滤波效果

从中值滤波的处理结果可以看出，中值滤波能很好地消除小的噪音，但噪音块大于处理窗时，中值滤波就无能为力了。我们可以对随机性质的噪声输入进行数学分析，对于零均值正态分布的噪声输入，中值滤波输出的噪声方差近似为：

$$\sigma_m^2 = \frac{1}{4mf^2(m)} \approx \frac{\sigma_i^2}{m + \frac{\pi}{2} - 1} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (2-32)$$

其中 σ_i^2 为输入噪声功率（方差）； m 为均值滤波窗口长度， \bar{m} 为输入噪声均值， $f^2(\bar{m})$ 为输入噪声密度函数。从式 2-32 可以看出均值滤波输出与输入噪声的密度分布有关。当噪音块过大时，只能加大处理窗才能提高滤波质量，但会大幅度增加处理时间。

观察均值滤波的处理结果，我们还会发现柑橘表面的颜色发生了模糊，这是因为均值滤波方法改变了处理窗中心像素的原有颜色值，从而导致整体图像颜色失真。处理窗越大，对原有柑橘表面的颜色破坏就越大。

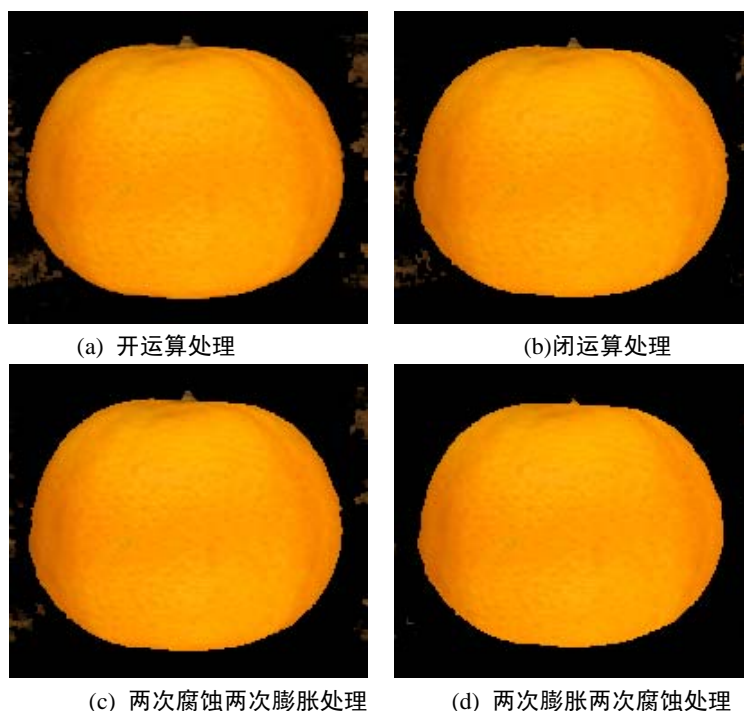


图 2.13 数学算子运算处理结果

图 2.13 是对柑橘图像采用 3×3 的结构进行数学算子的处理结果，(a) 为初始图像（图 2.12 a）经过开运算的结果；其消除背景噪音效果比均值滤波的效果要好，但拓宽了柑橘边缘上的裂口。

(b) 为闭运算的结果；它缝合了柑橘上的大部分裂口，但对大块的噪音还是效果不大。(c) 为先两次腐蚀运算后两次膨胀运算的结果；它还是遗留了一些噪音块没有处理。(d) 是先两次膨胀运算后两次腐蚀运算的结果；它能基本消除噪音，同时平滑柑橘的边缘，在柑橘的边缘形成了清晰的边界。

比较均值滤波和数学形态算子的处理结果可以发现，对于相同大小的处理窗，数学形态算子运算消除噪音的效果要比均值滤波的效果好，而且不会影响柑橘果面的颜色分布。采用膨胀和腐蚀进行去除噪音，时间也比较短。而且 400×350 图像采用 3×3 的处理窗，均值滤波处理时间为：179.73ms。而腐蚀处理时间为：22.09 ms，膨胀处理时间为：11.03 ms。采用先两次膨胀运算后两次腐蚀运算的处理时间为 66.24 ms，比均值滤波的时间要短的多。因此，在本系统中选用先两次膨胀运算后两次腐蚀运算的数学形态算子方法来消除噪音。根据采集的柑橘图像的特征，采用大小为 3×3 像素的处理窗。

2.5 边缘检测

为了对柑橘形状进行检测，确定柑橘的外形轮廓曲线，需要检测出图片中柑橘的边缘。经过图像背景分割和去除噪音的处理，柑橘轮廓两侧的灰度相对均匀，只是在轮廓曲线上灰度发生突变。边缘是指周围灰度强度有反差变化的那些像素的集合，是纹理分析和图像识别的重要基础。灰度边缘是灰度值不连续（或突变）的结果，这种不连续常可利用求导数方便的检测到。一般常采用一阶和二阶导数来检测边缘。导数可用微分算子来计算，实际上数字图像中求导数是利用差分近似微分来进行的。

常用的微分算子有以下几种：Roberts 算子、Laplacian 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Kirsch 算子、Nevitia 算子、Marr-Hildreth 算子、LoG 算子、Canny 算子、综合正交算子、Robinson 算子等。^[36, 42]下面对主要的算子进行介绍。

2.5.1 边缘检测算子

1. 梯度算子

梯度算子是一阶导数算子。对 1 个连续函数 $f(x, y)$, 它在位置 (x, y) 的梯度可表示为 1 个矢量, 这个矢量的幅度和方向角分别为:

$$\nabla f(x, y) = \begin{bmatrix} G_x & G_y \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}^T \quad (2-33)$$

$$\text{mag}(\nabla f) = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \quad (2-34)$$

$$\phi(x, y) = \arctan(G_v/G_x) \quad (2-35)$$

以上 3 式中的偏导数需对每个象素位置计算, 在实际中常用小区域模板卷积来近似计算。对水平方向和坚直方向和各用 1 个模板, 同时检测两个方向的边缘。2 个模板组合起来以构成 1 个梯度算子。算子运算时采取类似卷积的方式, 将模板在图像上移动并在每个位置计算对应中心象素的梯度值, 对 1 幅灰度图求梯度所得的结果是 1 幅梯度图。在边缘灰度值过渡比较尖锐且图像中噪声比较小时, 梯度算子工作效果较好。

根据模板的大小，其中元素值的不同，人们已提出了许多种不同的算子。常用的梯度算子是罗伯特（Roberts）算子、蒲瑞维特（Prewitt）和索贝尔（Sobel）算子，具体见图 2.14。

1	
	-1

	1
-1	

-1		1
-1		1
-1		1

1	1	1
-1	-1	-1

-1		1
-2		2
-1		1

1	2	1
-1	-2	-1

1) 罗伯特算子

(2) 蒲瑞维特算子

(3) 索贝尔算子

图 2.14 梯度算子

Roberts 算子是 2×2 算子，对具有陡峭的低噪声图像响应最好。其它两个算子，都 3×3 算

子，对灰度渐变和噪声较多的图像处理得较好。经过去除噪音和背景分割的柑橘图像，背景和柑橘灰度值有明显的变化，噪音少，采用 Roberts 算子会有比较好的效果。

使用两个掩模板组成边缘检测器时，通常取较大的幅度作为输出值。这使得它们对边缘的走向有些敏感。取它们的平方和的开方可以获得性能更一致的全方位响应。边缘检测后得到灰度图像 $G(x,y)$ 即边缘图像。该图像包含边缘幅值信息。如果边缘检测器输出值较大，则对应于局部边缘；如果输出值较小，则对应于无边缘的区域。

2. Krisch 边缘算子

图 2.15 所示的 8 个卷积核组成了 Krisch 边缘检测算子。图像中的每个点都用 8 个掩膜进行卷积，每个掩膜都对某个特定边缘方向作出最大响应，所有 8 个方向中的最大值作为边缘幅度图像的输出。最大响应掩膜的序号构成了边缘方向的编码。

Krisch 边缘检测算子也是 3×3 算子，而且每点都要取 8 个方向的卷积，计算量比较大。考虑生产效率，本系统不采用这种算子。

+5	+5	+5
-3	0	-3
-3	-3	-3

-3	+5	+5
-3	0	+5
-3	-3	-3

-3	-3	-3
-3	0	-3
+5	+5	+5

-3	-3	-3
+5	0	-3
+5	+5	-3

| | | | | | | | | | | | |

-3	-3	+5
-3	0	+5
-3	-3	+5

-3	-3	-3
-3	0	+5
-3	+5	+5

+5	-3	-3
+5	0	-3
+5	-3	-3

+5	+5	-3
+5	0	-3
-3	-3	-3

图 2.15 Krisch 算子八方向模板

3. 拉普拉斯算子

拉普拉斯 (Laplacian) 算子是一种二阶导数算子，对一个连续函数 $f(x,y)$ ，它在位置 (x,y) 的拉普拉斯值定义如下：

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (2-36)$$

计算 Laplacian 算子里对应中心像素的系数应是正的，而对应中心像素邻近像素的系数应是负的，且它们的和应该是零。常用的 2 种模板分别见下两图。

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

图 2.16 实现拉普拉斯运算的模板

Laplacian 算子是一种二阶导数算子，它将在边缘处产生一个陡峭的零交叉，所以对图像中噪声的影响相当敏感。另外它常产生双像素宽的边缘，且也不能提供边缘方向的信息。由于以上

原因, Laplacian 算子很少直接用于检测边缘, 而主要用于已知边缘像素后确定该像素是在图像的暗区还是明区。实际中需要将图象与如下高斯函数的拉普拉斯相卷积, 才能较好的去除噪声。

$$h(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2-37)$$

其中 σ 是高斯分布的均方差。

2.5.2 柑橘图像边缘检测结果分析

下图是运用 Roberts 边缘检测算子和 Laplacian 算子对图 2.13 (d) 柑橘图片边缘检测及二值化并经过反相后的图像。

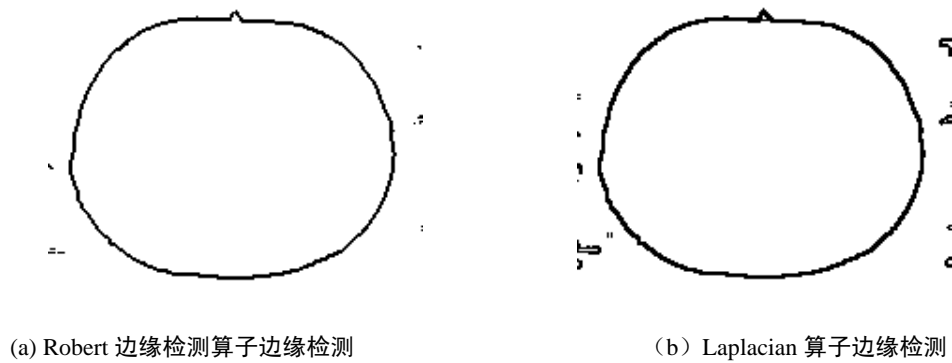


图 2.17 边缘检测对比效果

通过实验可以看出, Laplacian 算子由于是二阶算子, 对噪声敏感, 虽然在边缘检测前做了一定的图像增强, 但是图像上还是有些噪音。所以处理效果显然不如 Roberts 算子。Roberts 算子检测的柑橘边缘效果比较清晰, 而且检测后的边缘比 Laplacian 算子检测后的边缘细。

Roberts 边缘检测算子简单有效, 因此本系统采用 Roberts 算子进行边缘检测。其算法描述为:

G_x , G_y 为点 (x, y) 处的一阶微分算子

$$G_x = f(x, y) - f(x+1, y+1) \quad (2-38)$$

$$G_y = f(x, y+1) - f(x+1, y) \quad (2-39)$$

各点的梯度幅值 $G(x, y)$

$$G(x, y) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2-40)$$

第三章 柑橘图像识别方法

3.1 概述

通过预处理我们得到了适合进行模式识别的柑橘果面图像，可以进入柑橘外形检测环节。柑橘的外形特征包括形状、大小、颜色等方面。分级处理后同一等级的柑橘的外形和大小、颜色要有一定的一致性。为了对柑橘的外观进行准确的描述和识别，需要针对柑橘的外观特征采用适当的特征参量和识别方法。

3.2 柑橘的大小识别方法

大小是水果的重要外形特征，柑橘的大小一般指水果果实赤道部位的横径大小。在我国脐橙国标的征求意见稿中规定脐橙大小级别依据果实横径为分 4L、3L、2L、L、M、S、2S 七级，大于 4L 或小于 2S 级均视为等外品（见表 3-1）。

表 3-1 大小分级

项目	级别						
	4L	3L	2L	L	M	S	2S
横径（mm）	90—100	85—90	80—85	75—80	70—75	65—70	60—50

在传统的机械分级中，大小分级是一个主要的内容，大多采用使果实沿着具有不同尺寸的网格或缝隙的分级筛选移动达到分级目的。目前应用机器视觉技术的水果分级技术中，对水果的大小检测也有较多的研究。

目前水果的大小检测识别方法主要分为两类。一类是利用水果的宽度、高度生成的最小外接矩形来近似判断柑橘的大小。另一类是对水果边缘信息进行快速傅立叶变换，得到代表水果形状和尺寸的傅立叶系数用来作为分级的依据。现有的水果大小识别方法主要有以下几种：

3.2.1 最小外接矩形法

为了适应在线随机状态下水果的果径测量，使用用水果的最小外接矩形表示水果的大小^[39]（如图 3.1）。其基本思想是先确定水果的形心，然后将水果边缘绕形心旋转，每次旋转 3° ，求取此状态下水果边界的外接矩形。旋转一周后，在所有外接矩形中，找出面积最小的矩形即为最小外接矩形。而最小外接矩形的最大边长即为水果的果径。

由于对每个水果都要求取 120 个外接矩形，这种方法较为费时，不适合实时处理的生产线，所以在柑橘的大小识别不采用这种方法。

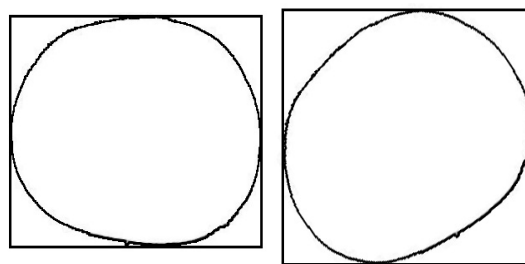


图 3.1 最小外接矩形表示水果大小

3.2.2 最大果宽（或果轴）法

柑橘大小可以根据柑橘直径来确定，因此可以通过求取最大果宽（或果轴）长度来估测水果最大果径^[38]。果轴指连接果梗与花萼的直线，果宽是垂直于果轴的直线与边缘的两交点的距离（如图 3.2）。其果梗和花萼的位置是通过求水果图像内的最小灰度值而确定的。这种方法最早应用在对苹果的大小评估上。通过求取最大果宽或果轴长度估测苹果最大果径，相关系数分别为 0.96 和 0.95。

经过改进，最大果宽的采集方法可以按照如下方法进行：将果轴等分为几份，过等分点求垂直于果轴的果宽，取最大的宽度值为最大果宽。

用这种方法求取的果宽或果轴长度确实能估测水果的大小。但当果轴不在竖直位置时，求取果宽比较困难，从而不能正确地估测水果的大小。生产线上的柑橘不一定会竖直排列的通过摄像头，果轴方向也不突出，所以这种方法不适合柑橘的大小识别。

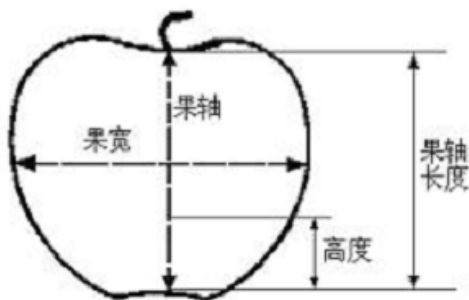


图 3.2 最大果宽（果轴）法表示水果大小

3.2.3 果径法

柑橘是个近似的球体，可以用果径的大小表示出水果的大小。先对图像进行边缘提取和细化处理，确定水果的形心点，将通过果梗与水果交界点和形心两点的连线定为果轴，用过形心与果轴垂直的直径来代表果径（如图 3.3）^[39]。水果表面是一条封闭曲面，形心的位置坐标由下式表达：

$$x_0 = \frac{\iint_{x,y \in object} x dx dy}{\iint_{x,y \in object} dx dy} \quad (3-1)$$

$$y_0 = \frac{\iint_{x,y \in object} y dx dy}{\iint_{x,y \in object} dx dy} \quad (3-2)$$

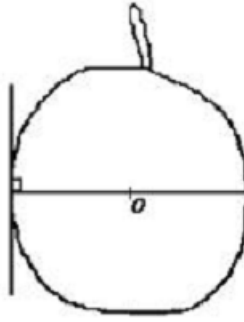


图 3.3 果径法表示水果大小

这种方法最早用来检测黄花梨的形状。用这种方法检测黄花梨尺寸时，两者的相关系数为 0.96。这种方法求得的形心位置比较准确，但是用这种方法需要了解整个果面的信息，计算量太大。而且柑橘与梨不同，梨的果梗处是凸出来的，而柑橘果梗处不明显，不易检测。应用这种方法确定柑橘果轴比较难，不适合柑橘生产线上的大小识别。

为了能在生产线上运用果径法检测柑橘大小，需要对算法做改进。首先对柑橘形心点位置的算法加以简化。柑橘的边缘像素点开始是以直角坐标存储在数组中，以柑橘的形心为原点转化成极坐标后，其极径即为该处柑橘的半径值。形心 O 直角坐标 (x_o, y_o) 的计算公式如下：

$$x_o = \frac{1}{N} \sum x_{ij} \quad y_o = \frac{1}{N} \sum y_{ij} \quad (3-3)$$

即形心坐标为所有柑橘像素点坐标的平均值。形心确定后，各边缘点的极坐标也就可以确定了。这样，根据形心求出柑橘边缘像素点的半径平均值作为判别尺寸的依据。

3.2.4 投影面积法

CCD 摄像头拍摄的柑橘图像是二维的平面图，柑橘的投影面积 S_1 通过计算能够近似反映柑橘表面积 S 的大小。

$$S_1 = \pi r^2 \quad (3-4)$$

$$S = 4\pi r^2 = 4S_1 \quad (3-5)$$

柑橘的投影面积在图像中通过统计柑橘的像素点数来计算。由于这样得到的投影面积是以像素数为单位的，其数值比较大，不便于比较，而且在柑橘鲜果的国家标准讨论稿中大小是用赤道位置的果径来表示的，因此通过下面的公式将其数值缩小：

$$r = \sqrt{S_1 / \pi} \quad (3-6)$$

S_1 为柑橘的投影面积, r 为半径, 即将柑橘的投影近似为圆形, 用它的近似半径代替面积来判别柑橘的尺寸大小。

改进的果径法和投影面积法的算法都很简单易实现, 都可以应用在柑橘的大小分级中。

3.2.5 柑橘大小算法检测

运用改进的果径法和投影面积法, 对图 3.4 中的测试柑橘计算大小。通过试验测得的柑橘平均半径值和通过投影面积而计算得到的图 3-9 中柑橘的近似半径值列在表 3-2 中。

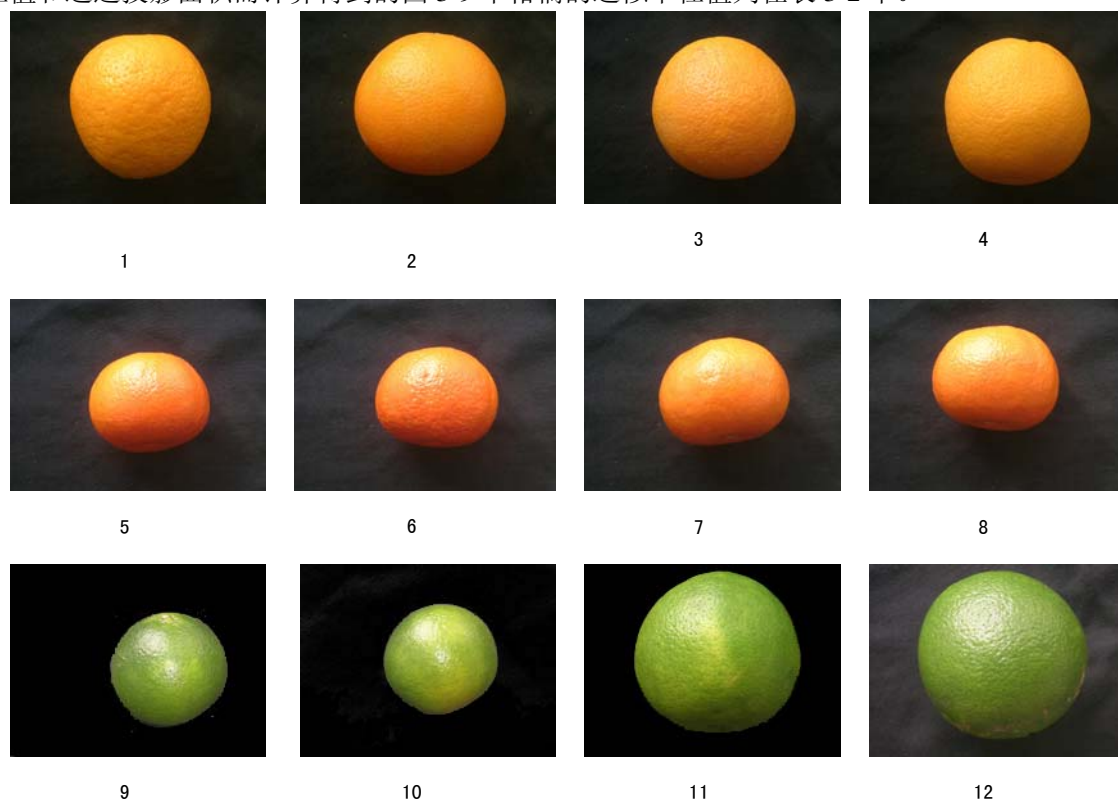


图 3.4 一组不同大小的柑橘图像

表 3-2 柑橘的测试半径值

柑橘编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均半径	167.8	171.1	164.6	170.6	138.3	130.2	139.1	136.7	132	128.2	192.3	195.1
近似半径	168.1	172	165.9	171.5	139.7	131.4	140.7	137.8	132.8	128.2	193.6	196.6

观察柑橘图像及对应的半径值可以得出结论: 近似半径值比平均半径值略大一点, 但是边缘像素点的平均半径值和近似半径反映柑橘的尺寸与实际观察到的柑橘大小是一致的。

利用投影面积法选用总像素数判别柑橘尺寸，方法更简便些，而且相对精度较高，故本系统直接选定投影面积法来确定柑橘的大小。在实际的应用中首先统计柑橘图像的像素点总数目得到柑橘的投影面积，再将柑橘投影近似为圆而计算得到的半径值来描述柑橘的尺寸大小。通过统计实际柑橘周长和试验测定的近似半径的关系，计算出柑橘图像一个像素长度可以对应实际柑橘边缘的 4.1mm。采用投影面积法对附录中的黄岩蜜桔图像进行大小检测，测得黄岩蜜桔的平均半径 18.3mm~26.4mm，与实际黄岩蜜桔的大小误差不超过 3%。

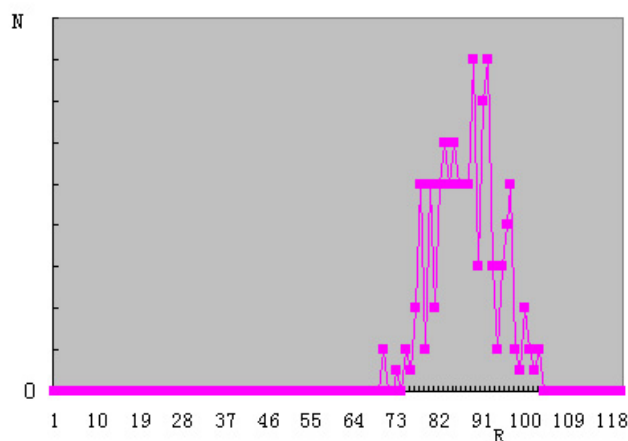


图 3.5 黄岩蜜桔的大小

3.3 柑橘的形状识别方法

水果的外形是分级的重要特征。许多人都对这一问题进行过研究。如苹果的果梗和花萼的识别^[40]，用曲线拟合的方法来描述不规则水果的形状^[41]等。柑橘外形美观，是比较典型的球形水果，目前针对这类规则的球形水果进行外形分级的研究还很少。柑橘的形状接近球形，但又因品种不同有一定的差异。谚语中“高身橙，光身橘，扁身柑”，形象地说明了橙、橘、柑的形状差异。对柑橘的形状分级的进行研究，提出适用于实时生产的分级特征参数，为实现柑橘水果的机器视觉分级提供依据，具有重要的理论价值和现实意义。

3.3.1 特征参数选取

柑橘分级系统是通过获取的二维图像进行分析提取分级特征参数。分级特征参数的特征参数可以选取长宽比、曲率、圆度、最大宽度、最小宽度等，通过统计法或人工神经网络学习产生识别模型。

柑橘是球形水果，其外形和标准球的接近程度是一个基本的形状特征。根据分级系统的生产特性和国际柑橘鲜果标准，提出采用圆度作为形状的特征参数，以此来对柑橘的外形做出准确的定义。圆度参量这个概念参考了机械零件的行位误差项目。国家标准中圆度误差的概念是这样定义的：指轮廓误差曲线上离圆心最远一点到圆心的距离与离圆心最近一点到圆心的距离之差^[42]。^[43]由于机器视觉系统识别的是采集到的柑橘图像，外形和标准球的近似程度体现在二维空间即

为柑橘投影图像和标准圆的近似程度。本系统采用圆度参量作为特征参数描述柑橘的投影面积与标准圆的差异度。

3.3.2 圆度参量的计算

在机械零件的形位误差计算中圆度通常采用以下几种方法进行计算^[44]：

1. 最小二乘圆法

最小二乘圆也称平均圆。当轮廓误差曲线上各点到某一圆的距离平方和为最小时，该圆即为最小二乘圆。设曲线上某点到该圆心的最大距离为 R_{\max} ，另一点到圆心的最小距离为 R_{\min} 其最小二乘圆圆心至轮廓的最大距离之差即为圆度误差 $R_{\max} - R_{\min}$ 。被测实际轮廓上各点至最小二乘圆圆心的距离可以通过下面的算法求得：

如图 3.6 所示最小二乘圆是实际轮廓上各点到该圆距离的平方和为最小的圆。用 x_i 和 y_i 表示实际廓线上的点，设实际廓线上的原点为 O' ，最小二乘法圆的中心为 O ，其坐标为 (a_i, b_i) ；半径为 R ，由几何关系和公式推导可得：

$$a_i = 2/n \sum x_i, \quad (i=1-n) \quad (3-7)$$

$$b_i = 2/n \sum y_i, \quad (i=1-n) \quad (3-8)$$

$$R = 1/n \sum r_i \quad (i=1-n) \quad (3-9)$$

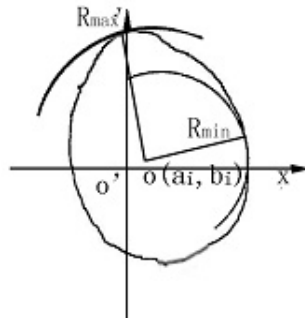


图 3.6 最小二乘圆

式中 r_i 是被测实际轮廓上各点至坐标原点 O' 的距离。被测实际轮廓上各点至最小二乘圆圆心的距离为：

$$R_i = r_i - (a_i \cos \theta_i + b_i \sin \theta_i) \quad (3-10)$$

国家标准中有一条关于形位误差的规定，要求被测实际要素对其理想要素的最大变动量为最小，即最小条件。最小二乘圆方法不符合最小条件评定准则，不能满足高精度评定要求，所以本系统中没有采用这种方法测定圆度。

2. 最小外接圆法

最小外接圆是指包容实际轮廓时，即包容轮廓曲线的最小圆。最小外接圆法是以与实际轮廓相接触的最小外接圆作为圆度误差的评定基准，其圆度误差值 f_2 为外接圆半径 R 与实际轮廓上各点至最小外接圆中心的最小半径 R_{\min} 之差，即

$$f_2 = R - R_{\min} \quad (3-11)$$

最小外接圆圆心坐标可以这样来求：①求出轮廓误差曲线上任意两点间距离最大的两点；②求出这两点的中心坐标；③求出到中心坐标距离最远的点（不包括第一步求出的两个点）；④如果该点到中心坐标的距离小于或等于前面两点间距离的一半，则中心坐标就是最小外接圆的圆心坐标；否则，以该点及前面两点所组成的三角形的外接圆圆心坐标即为所求。

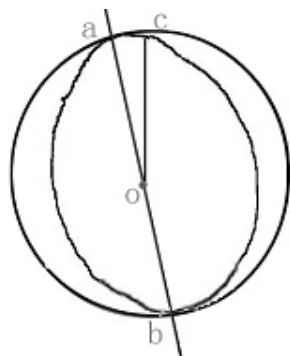


图 3.7 两点接触

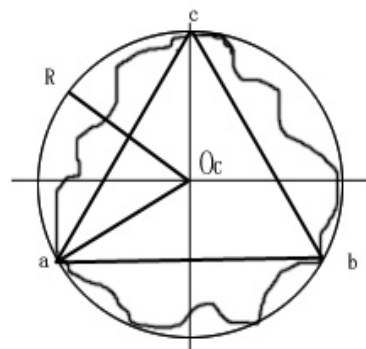


图 3.8 三点接触

柑橘生产线是实时生产线，要保证一定的生产率，所以要在系统精度许可的范围内采用快速的分级算法。最小二乘圆方法计算复杂、速度慢，不适用于本系统。

3. 最大内切圆法：

最大内切圆是指内切于被测实际轮廓，或内切于轮廓误差曲线，且半径为最大的圆。误差曲线上某点到该圆的最大距离即为被测轮廓的圆度误差。该方法主要用于评定内表面的圆度误差。我们系统中需要判定的是外表面的圆度，所以此方法并不适用。

4. 最小区域法

最小区域法是用两个同心圆所组成的圆环包容实际轮廓。包容时，至少应有内外交替四点接触，这样两同心圆的半径差为最小，该半径差即为此轮廓的圆度误差。如图 3.9 所示，圆度误差最小区域的判别方法为：两同心包容圆至少应与被测实际轮廓成内外交替的四点接触。即：最小包容圆上的两接触点的连线与最大包容圆上两接触点的连线相交^[45]。

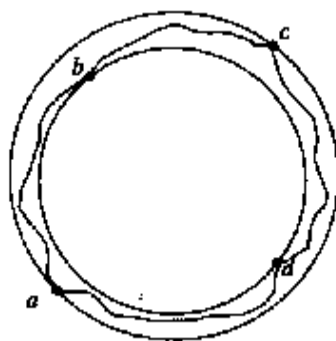


图 3.9 最小区域法

最小区域法圆心坐标通过以下方法求得：①求出在最小外接圆上的轮廓误差曲线上的两点；②在这两点的左边和右边各找出到圆心距离最近的一点；③则第一步求出的两点所确定的线段的垂直平分线与第二步求出的两点所确定的线段的垂直平分线的交点，即为最小区域法圆心的坐

标。

圆心到轮廓线最近的距离是同心圆的内圆半径 R_2 ，外圆半径为最小外接圆的半径 R_1 ，最小区域法圆度误差为：

$$f_2 = R_1 - R_2 \quad (3-12)$$

根据定义可以看出，最小区域法是最符合国家标准中关于最小条件的规定的圆度评价方法，评定的形状误差值是最小值。但是最小区域法也要求取圆心，计算量也很大。如果用在柑橘分级系统中采用这种方法，虽然能够保证精度，但是会大大的降低分级的生产率。

根据柑橘分级系统的特点，我们可以采用如下两个方法计算圆度：

(1) 形心法。

传统的圆度计算方法在圆心的确定上需要投入大量的计算，为了越过这些计算，我们用形心位置来代替圆心的位置。用形心点到边界点的距离的均方差与形心点到边界点的平均距离的比表示圆度。形心位置采用质点法计算

$$x_o = \frac{1}{N} \sum x_{ij} \quad y_o = \frac{1}{N} \sum y_{ij} \quad (3-13)$$

形心点到边界点的平均距离

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |(x_i, y_i) - (c_x, c_y)| \quad (3-14)$$

形心点到边界点的距离的均方差

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} [| (x_i, y_i) - (c_x, c_y) | - \bar{r}]^2 \quad (3-15)$$

圆度表达为：

$$f_2 = \frac{d}{\bar{r}} \quad (3-16)$$

采用形心法计算圆度，大小不同的水果能够用一个数值比表示和标准圆的接近程度：水果越趋向圆形，圆度越趋向 0；水果越不规则，圆度值越大。

为了进一步简化计算，可以将直角坐标系转换为极坐标，以柑橘的形心为原点转化成极坐标后，其极径即为该处柑橘的半径值。这样形心点到边界的平均距离就是各边界点的平均极半径，形心点到边界点的距离的均方差就是边界点极半径与平均极半径的均方差。如果在柑橘的大小识别中采用了果径法，在圆度的识别时可以采用这种方法进行计算。

(2) 面积周长比

在相同面积条件下，柑橘图像的边界越光滑，形状越接近圆形，周长越短。反之则周长越长。根据这个原理，可以用面积周长比来作为柑橘的圆度描述特征参数 f_2 。

$$f_2 = \frac{S}{C} \quad (3-17)$$

面积周长比是一个比较常用的概念，但是如果直接用柑橘的面积和周长相比，结果会受到柑橘大小的影响。为了消除尺寸大小对圆度的影响，用改进的面积周长比法计算圆度：

根据圆的面积和周长公式：

$$S = \pi r^2 \tag{3-18}$$

$$C = 2\pi r \tag{3-19}$$

对圆度如下定义：

$$f_2 = \frac{4\pi S}{C^2} \tag{3-20}$$

投影面积周长比表示圆度，圆度值的范围只能在[1, 0) 之间取得，更有利于用户分级操作。根据面积周长比的圆度定义，柑橘的投影形状为圆形时， f_2 值可取最大值 1；柑橘形状越偏离圆形， f_2 越小。我们在求取大小时选用了投影面积法，这里面积直接使用柑橘大小时获得的总像素数；柑橘周长为边缘序列点集 (x_i, y_i) ，的总点数。采用这种方法通过简单的统计和计算就可以得出圆度的结果，能够大大提高运算速度，有利于生产效率的提高。

3.3.3 柑橘圆度算法检测

传统的圆度测量方法都是通过水果的半径来描述圆度的。由于最小区域法是误差最小的圆度描述方法，这里我们首先选取选择使用最小区域法对柑橘的圆度进行评估。表 3-3 为采用最小区域法对图 3.10 中柑橘进行圆度测算的结果。

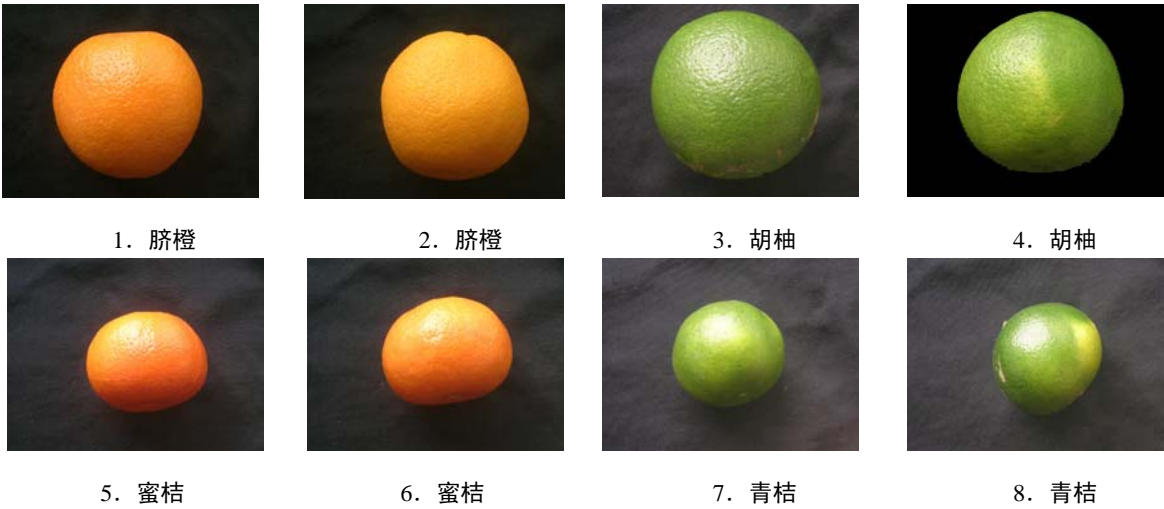


图 3.10 测试柑橘水果图像

表 3-3 采用最小区域法计算的柑橘水果圆度

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
圆度	14	10	11	12	21	21	9	15

通过试验检测发现，虽然最小区域这类经典的方法能够体现柑橘水果的圆度，但是都先需求取投影面积的圆心和轮廓到圆心的距离，计算量很大。同时获得的圆度数据为距离值，数值的大

小不能直观的反映水果的形状。采用这类方法，水果的大小对圆度数值有很大影响。大小不同的水果如果圆度值相同，可能形状相差很远；反之即使圆度数值相同，水果的形状会因大小不同而不同。所以，单纯依靠水果的半径差描述圆度是不准确的。

表 3-4 是采用形心法对图 3.10 中测试水果进行圆度测算的结果。观察测算结果和测试水果的实际形状，可以看出越接近圆形的水果的圆度越小，形状越偏离圆形，圆度值越大。测试结果基本可以反映客观事实。

表 3-4 采用形心法计算的柑橘水果圆度

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
\bar{r}	172. 2	170. 6	194. 1	197. 6	138. 3	132. 4	125. 9	127. 9
d	82	38	33	36	102	83	29	26
f_2	0. 47	0. 22	0. 17	0. 18	0. 74	0. 70	0. 23	0. 20

采用面积周长比方法对测试柑橘计算圆度，得到的结果如表 3-5。通过试验结果，可以看出使用面积周长比表述的圆度，能够直观的体现出柑橘的形状特征，不受其他因素干扰。而且算法简单，计算速度快。

表 3-5 采用面积周长比法计算的柑橘水果圆度

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
S	93167	91394	118320	122623	60117	55043	53761	51387
C	1567	1433	1541	1534	1275	1218	1170	1017
f_2	0. 48	0. 56	0. 63	0. 65	0. 46	0. 46	0. 49	0. 62

通过实验检测，形心法和面积周长法都比较适合在柑橘的圆度实时分级检测。如果在大小检测中，采用了果径法，柑橘的圆度也可以采用形心法计算。由于本系统在柑橘自动分级系统中采用了投影面积法计算水果的大小，所以这里我们采用面积周长法来描述柑橘圆度，能够减少数据的处理，简化运算，提高柑橘的识别速度。

我们使用面积周长法计算对 200 多个黄岩蜜桔（部分见附录）的圆度进行了测算，采用这种方法计算的显示黄岩蜜桔的圆度一般在 0.46~0.65 之间。在采用面积周长法对 180 个正常果形、25 个畸形果的圆度检测中，正常果形的蜜桔有 5 个错误判断为畸形果，畸形果有 2 个错误判断为正常果，识别的准确率可以达到 96%。

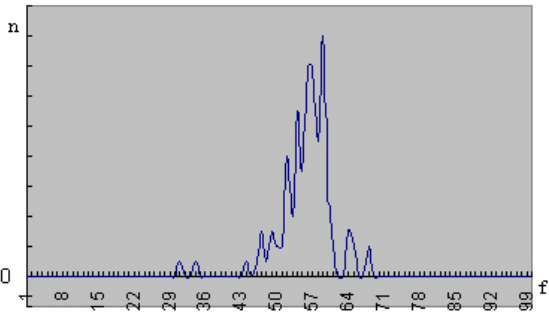


图 3.11 黄岩蜜桔圆度计算统计

3.4 柑橘的颜色识别方法

颜色是水果的外在品质的重要指标。高品质的柑橘一般着色均匀而且色泽好。在欧盟柑橘鲜果标准中规定，柑橘表面不得少于 1/3 面积具有其成熟后的固有颜色，柑橘表面允许有不得多于 1/5 的淡绿色。颜色还能反应水果的成熟程度，成熟的柑橘，果面本品种固有颜色的着色度应该大于 95%。研究证明，柑橘表面颜色和水果的糖度、固酸比值有一定的关联性。根据不同品种固有的颜色特点，按果实的不同用途，以果皮的着色程度为主要依据，可以确定采收适期^[46]。例如就地鲜销果，以果皮正常着色面达到 90%左右，果肉由硬开始变软时采果。外运鲜销果，以果面正常着色 85% 左右采摘为宜。

因此，颜色是水果分级中必须重点考察的指标，国内外学者在水果的颜色检测方面做了大量研究工作。但是由于不同水果果面颜色分布不同，加上硬件和算法的局限性，目前国内机器视觉的柑橘颜色分级系统还很不完善。而机械分级系统又不能识别颜色，因此颜色的识别主要还是依靠人工完成。

根据第二章对 HSI 模型和 RGB 模型等颜色模型的讨论，本系统采用 HSI 模型中的 H 值作为特征参数来描述柑橘的颜色。颜色特征可以采用以下几种方法确定：

3.4.1 直方图方法

直方图是用颜色直方图的累加值表示颜色的方法，是最常用的灰度计算方法。

Stricker^[47]认为图像中最有意义的区域是位于图像的中心部分，因而将图像固定分为 5 块，如图 1 所示，对每个区域求其颜色直方图的前三阶矩 M_i^1 , M_i^2 , M_i^3 , $i=1,2,\dots,5$ ，构造特征向量为 $f=(M_1^1, M_1^2, \dots, M_5^2, M_5^3)$ ，以此表示图像的颜色特征。

Drawsearch^[48]检索系统首先将图像分为 48 块，计算每块的平均颜色值，得到由 48 个特征值组成的特征向量。

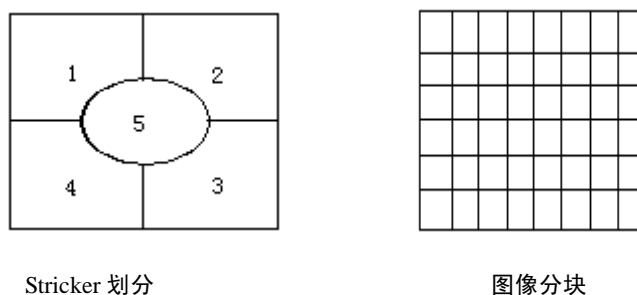


图 3.12 图像区域的划分

颜色直方图采用以下方法构造：

- (1) 统计图像中各颜色的概率分布。
- (2) 用聚类方法确定最佳的 K 个代表颜色集。
- (3) 用直方图的颜色集量化输入图像，得到量化图像。
- (4) 在量化后图像上统计颜色直方图 H，作为图像的颜色信息的表示。

这种方法能够表达柑橘表面的颜色特征，但是存在聚类维数和精度的矛盾，平衡起来比较复杂。柑橘的颜色级别是根据水果品种不同而划定的一个颜色范围，不需要太多的特征值。区域划分的方法在柑橘的表面颜色中加入了空间信息。当柑橘在生产线上传输时是不断旋转滚动的，加入空间信息反而增加了识别的难度。

3.4.2 平均值

用图像中柑橘的色调平均值表示水果的颜色。柑橘区域 S 的色调平均值可以用以下方法定义：

$$\overline{DC(S)} = \frac{\sum_i \sum_j Rx(i, j) C(i, j)}{\sum_i \sum_j Rx(i, j)} \quad (3-21)$$

其中 $C(i, j)$ 表示像素 (i, j) 点的色调值

$$Rx(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{像素}(i, j) \text{点属于柑橘区域} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3-22)$$

根据色调平均值在哪个颜色级别内，可以判断出水果属于哪个颜色级别。平均值法算法简便，但是由于对颜色进行了平均，所以不能突出的表示水果的颜色特征。

3.4.3 主颜色

人类视觉系统可以通过图像的主要颜色来识别和理解整个图像颜色，经过实验分析，少数的几种颜色就已经足以特征化一个图像区域的颜色信息，据此可以采用主颜色（Dominant Color）作为颜色级别识别的特征参数^[49]。主颜色是在视觉上起支配作用的颜色，也就是在图像中出现次数最多的颜色。即

$$DC(A) = \max (f(c_i)) \quad (3-23)$$

其中 $f(c_i)$ 是色调 c_i 出现的次数。

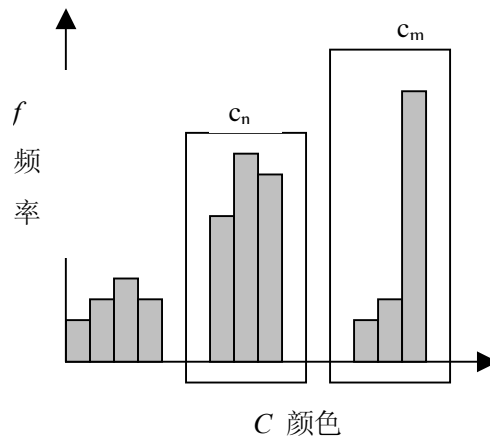


图 3.13 主颜色的计算

主颜色能够直观的体现人的视觉感受，算法简单，所以在本系统中我们选用主色调进行水果的颜色模式识别。预先确定的水果色调级别，就可以根据主颜色色调值确定柑橘的颜色级别了。

3.3.4 柑橘颜色算法检测

通过实验发现，按照公式 3-23 选取的主颜色并不是总是与人的视觉感知相符。如图 3.13 给出的直方图，按照公式 3-23 计算出的主颜色应该是 c_m ，但是 c_{n-1} 、 c_n 、 c_{n+1} 这三种颜色在视觉上是相似的，而且它们出现的频率和最多。可见把 c_n 定为主颜色更符合人的视觉感受。

基于以上考虑，可以采用以下方法对主颜色法进行优化：

- 1) 设定颜色区域窗口的宽度 L ；
- 2) 窗口初始位置为直方图左边，计算窗口内颜色总频数；
- 3) 窗口向右移动一位，计算窗口内颜色总频数；
- 4) 重复第 3 步，直至窗口达到直方图最右边；
- 5) 得到总频数最大的窗口位置。此窗口内的平均值即为图像的主颜色。

采用平均颜色法和改进的主颜色方法，我们对图 3.14 中的测试水果进行色调的测试，结果可以参见表 3-6。

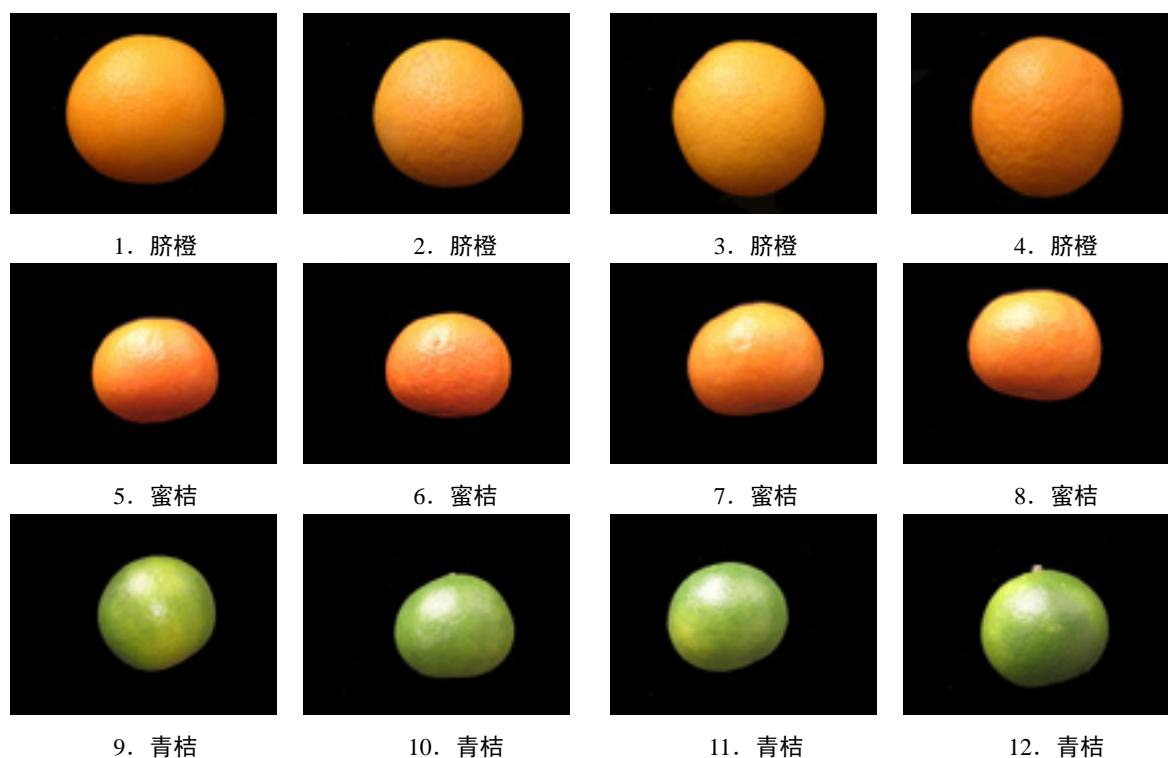


图 3.14 颜色测试水果

表 3-6 测试水果的平均色调和主色调值

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均色调	151	148	144	150	148	148	144	144	112	106	109	99
主色调	152	150	144	154	169	165	158	160	110	107	107	109

比较实验测得的数据和观察到的柑橘实际颜色，我们可以看出主色调值和平均色调值都能反应水果的颜色特征，绿色的柑橘色调值较低，橙色的柑橘色调值较高。相对而言，主色调不但能突出水果表面的视觉特征，而且更符合人的视觉感受。因此，本系统采用主色调作为水果颜色分级的特征参数。

具体进行颜色分级时，需要预先确定水果的颜色级别的 H 值范围。不同种类的柑橘的分级标准是不同的。通过试验统计柑橘的橙色色调取值范围在：131~152，绿色色调值取值范围为：97~123。测试用部分柑橘见附录。采用主颜色法对 120 个橙色柑橘和 80 个绿色柑橘进行颜色的识别，准确率可以达到 96%。

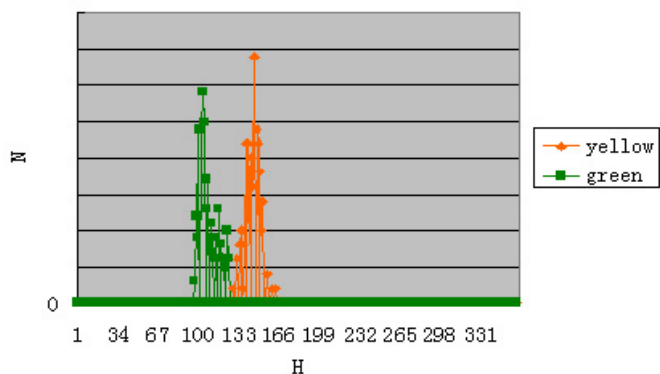


图 3.15 柑橘颜色取值范围

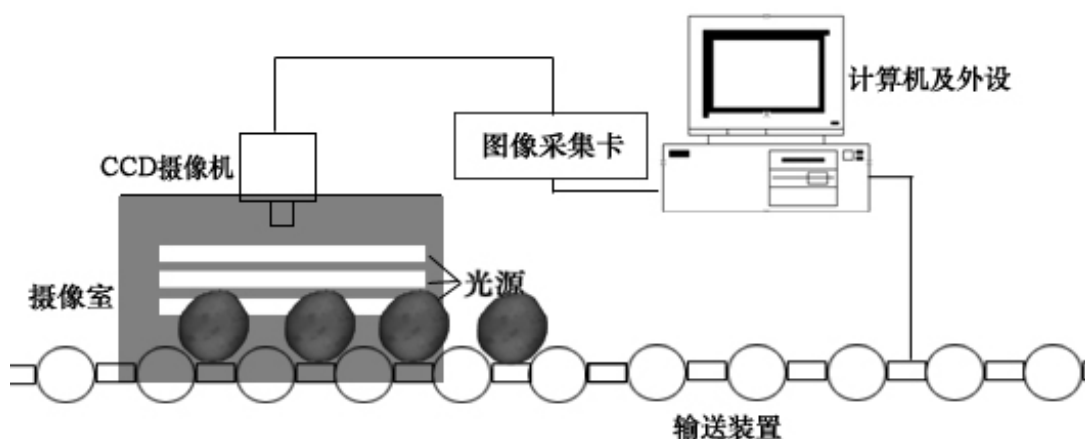
第四章 基于机器视觉的柑橘分级系统

4.1 概述

柑橘分级生产线由清洗、烘干、打蜡、分级、包装五个部分组成。其中分级系统主要由图像采集系统、计算机及其外设、照明系统、喂料机构及分级装置等几部分组成。具体工作过程是：经过清洗打蜡的水果通过传送装置输送到摄像室，摄像头对水果进行摄像，摄像所得的水果图像经图像采集卡读入计算机。计算机首先对水果图像应用图像处理方法进行背景分割、去除噪音、边缘检测等预处理，然后对预处理后的图像进行数据处理，将处理结果与用户制定的大小、颜色和形状的标准数学模型进行比较分析，确定各个水果的等级，将计算结果传送给分级装置实现分级。最后实现的等级是综合考虑大小级别、颜色级别和形状级别而得到的。本章概要介绍基于机器视觉的柑橘分级系统的硬件架构和软件系统流程。

4.2 系统硬件架构

柑橘分级装置需要对输送装置上送来的柑橘的表面进行实时检测，整个系统要能快速地采集图像、准确地识别出水果的果面信息，通过分级标准的数学模型进行分级。硬件系统的设计应有助于简化图像处理，提高分级装置的处理速度；同时应满足通用、市场量大、技术支持好、性能价格比高的要求；此外还要利于通过软件的编写开发，及时接收分析的结果并能按要求实现反馈；某个硬件的升级更换要能很方便的通过模块化的软件设计来保证其正常的工作。



4.1 柑橘分级系统简图

基于机器视觉的柑橘分级系统设备是机械、电子、视觉技术、图像处理技术以及计算机技术等相融合的系统。其主要设备由图像采集系统、计算机系统、照明系统、输送装置等几部分组成。其中 CCD 摄像头、光源安装在摄像室内，图像采集卡固定在计算机内部。柑橘分级系统的简图

见图 4.1。

4.2.1 系统硬件要求

系统主要硬件要求及功能如下：

1. CCD 摄像头：

常用的 CCD 摄像头制式有 RS-170, CCIR, RGB 彩色, NTSC 和 PAL 等。摄像头制式包含的信息主要有：一帧图像由多少线组成、每线的像素数、行频率以及每线的像素数、单色的还是彩色、是否使用隔行扫描的方式等。另外选择摄像头考虑的还有是选择线阵 CCD 还是面阵 CCD。线阵 CCD 精度较高，主要用于精密光学测量等领域。

根据系统需要，实验室采用 JVG TK-C1381EG 彩色摄像头，其主要性能指标为：单片像素 44 万，采用 1/2 英寸 IT CCD 光电图像转换器件，水平分辨率为 470 线，为在低照度环境使用而采用专用图像处理器，最低照度可达 0.95lux，宽范围的自动电子快门，保证了高质量地将图像转换为视频图信号。可进行隔行扫描，减少数据处理量。摄像头为面阵 CCD，输出经过 A/D 转换的数字信号，数字信号输出摄像头时是串行的数据。由于输出的串行数据的通信协议遵循 Channel Link 通信规范，故只有遵循 Channel Link 的通信规范的图像采集卡才能和该摄像头相连。

2. 图像采集卡：

图像采集卡完成的主要功能是把摄像头模拟的视频信号转换为离散的数字量。由于不同的摄像头可以产生不同制式的视频信号，为了能够图像采集卡正确地识别摄像头的视频信号，必须按照摄像头信号的制式选用图像采集卡。

本系统需要动态采集彩色图像，根据选定的摄像头制式及通讯规范采用 OK_C30S 基于 PCI 总线的高速彩色/黑白图像采集卡，可将 CCD 摄像头视频图像信号量化后采集到彩色图像存储体中，并配以相应的支撑软件进行预处理，支持某些图像处理算法的硬件处理。

该图像采集卡主要技术性能及指标为：实时采集彩色和黑白图像；视频输入可为标准 PAL、NTSC 或 SECAM 制信号；六路复合视频输入选择或三路 Y/C 输入选择；亮度、对比度、色度、饱和度软件可调；图像采集显示分辨率最大 768×576；具有图形位屏蔽功能，可开窗采集；硬件完成输入图像比例缩小；具有硬件镜像反转功能；支持 RGB32、RGB24、RGB16、RGB15、RGB8、YUV16、YUV12、YUV9、黑白图像 GRAY8 等图像格式；视频 A/D 为 8bits；可采集单场、单帧、间隔几帧、连续相邻帧的图像，精确到一路辅监输出。

3. 计算机系统：

计算机系统包括计算机及其外设，其主要功能是对采集获得的数字图像进行预处理和模式识别。经预处理的图像在一定程度上图像的分辨质量得到改善，突出了与柑橘果面检测相关的特征信息，进而进行识别运算，将处理结果与制定的大小、颜色和缺陷的标准数学模型进行比较分析，确定各个柑橘的质量级别，最后将分级信号传出完成分级操作。

4. 照明系统：

照明系统由光源及摄像室组成。为了减少照明系统给图像带来的误差,需要 CCD 摄像头视区内光照要均匀,尽量避免镜面反射;成像背景应一致且与柑橘图像有较大的对比度。由于环境光能够改变光源照射到物体上的总光能,使输出的图像数据存在噪声,照明系统需要采用建立摄像室的方法,使得采集图像受天气和周围环境的影响较小。光源的光谱范围、辐射能量、显色性应满足摄像系统的要求。

通过试验,建立箱式摄像室。摄像室基本封闭,输送装置自摄像室下部穿过。摄像头安装在摄像室顶部,摄像头安装位置应能够保证准确、完整、清晰地摄取柑橘的图像。为简化图像背景处理,摄像室内部和输送装置为黑色。

根据机械总体工艺结构和机器视觉系统的要求,光源选择直管形荧光灯。荧光灯的选用关键是要与摄像头相匹配,选定合适的色温。另外荧光灯的长度还要跟机械部分匹配,可以根据摄像室的具体情况综合考虑。本系统选择选定飞利浦公司 30w 的 830 型 T8 灯,灯管色温为 3000,颜色为偏暖白色,长度为 90 厘米。



图 4.2 摄像室

在对光源、滤镜的选择做了比较研究后,发现漫色光环境是增强表面特征、消阴影,并且获得良好边界的必要条件^[50]。故在光源前安装一块毛玻璃。光线透过毛玻璃射出,可保证光线呈漫散射状态,光线柔和。

5. 输送装置等

用于传送柑橘的输送装置为电机—链轮传动下辊轮输送机构。柑橘在进入辊轮输送机构前已完成清洗、烘干、打蜡等操作。柑橘在进入摄像室前在辊轮上由托架托着向前传输。当柑橘进入摄像室时,辊轮托架下沉,柑橘与转辊相接触从而开始旋转。基于机器视觉柑橘分级系统对输送装置要求较高,主要有以下几点需要注意:首先要保证生产效率,需要较快的输送速度外;其次要尽量保持平稳,微小的振动可能造成图像的变形,甚至会使测量区域偏离摄像范围;另外,选择使用黑色辊轮,是由于摄像头所获得的柑橘图像是以输送装置等为背景,要求输送装置的颜色与柑橘的颜色能明显分开,以便于后续分级处理。

输送装置还要执行定位和分级动作。计算机按照辊轮位置对柑橘进行定位。当计算机对柑橘完成分级计算、发出分级信号后，辊轮上的托架将相应位置的柑橘按级别标记弹入合适的收集槽中，并能根据生产要求灵活变换级别数目和级别排列次序。



图 4.3 输送装置

4.2.2 实验装置

由于不具备传送机构等动态环境，实验中采用了 JVG TK-C1381EG 彩色摄像头、OK_C30S 图像采集卡、箱式摄像室以及 Pentium4 计算机系统等搭建的硬件系统。本系统能够实现柑橘样本的自动分级的功能，但是采集的样本还是静态图像，只能在一定程度上模拟在线检测的要求。

4.3 系统软件设计

本课题开发的基于机器视觉的柑橘分级系统可运行于 Windows 2000 和 Windows XP，开发工具为 Microsoft Visual C++ 6.0。

Windows 操作系统是一个多任务、图形化用户界面的平台。它采用了一系列的措施来提高内存的利用率，从而保证了用较少的内存来运行较大的程序。从编程的角度看，它有许多资源可以利用，而分段式的编程方法，事件驱动的应用程序以及消息循环都可以使编程大大简化。本课题我们选用 Windows 2000 操作系统作为程序运行和软件开发的平台。

Visual C++ 是 Microsoft 公司推出面向对象的可视化集成编程系统。它不但具有程序框架自动生成，灵活方便的类管理，代码编写和界面设计集成交互操作，可以开发多种程序（应用程序、动态链接库、ActiveX 控件等）等优点，而且通过简单的设置就可以使其生成的程序框架支持数据库接口、OLE 2、WinSock 网络、3D 控件界面。因此，我们选用了 Visual C++ 作为开发工具。

柑橘自动分级系统充分利用了 C++ 语言的面向对象的特性以及 MFC 类库，具有良好的可扩展性、稳定性。软件系统由系统软件和图像检测分析系统两部分组成，其中系统软件包括图像采集卡接口软件；图像检测分析软件实现了柑橘图像预处理、柑橘大小颜色和形状的分析识别。本软件是一项独立的软件，全部内容自含。

4.3.1 软件系统菜单描述

本软件的目标对已采集的的柑橘的图像进行分析处理，输出分级处理结果。系统软件最终用户应为生产分级的操作人员。系统应该是全中文操作界面，系统操作简单易学，方便用户使用。

主界面如图 4.4 所示：

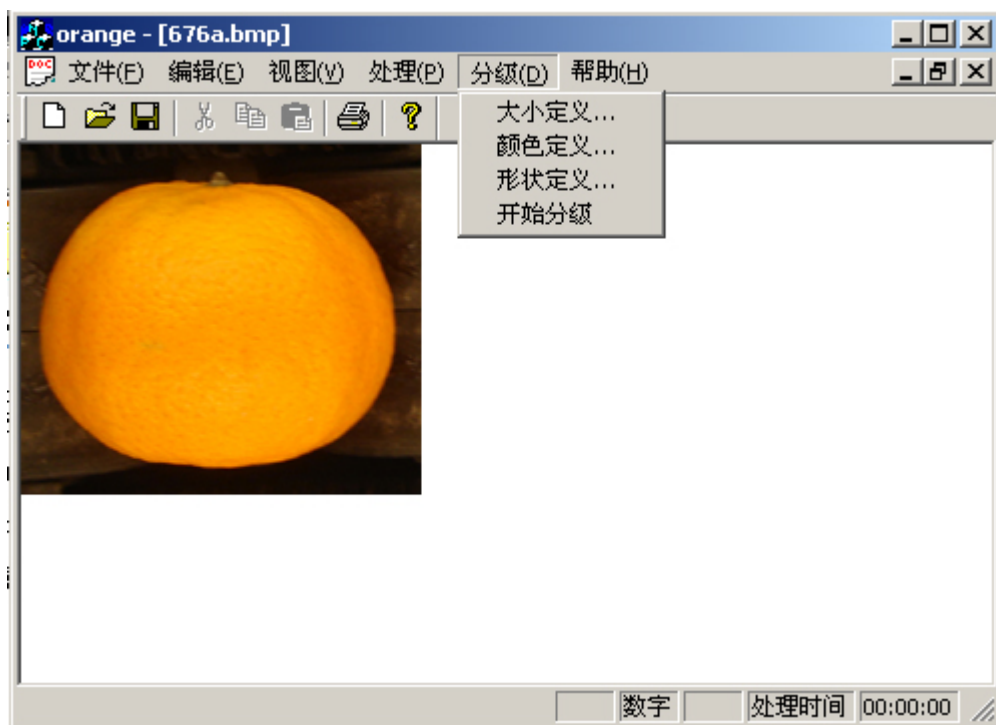


图 4.4 柑橘自动分级系统主界面

主菜单有六个，分别是：文件、编辑、视图、处理、分级、帮助。柑橘自动分级系统的主要功能在处理和分级菜单里。由图中可以看出，本系统通过以下命令实现对柑橘的预处理和分级：

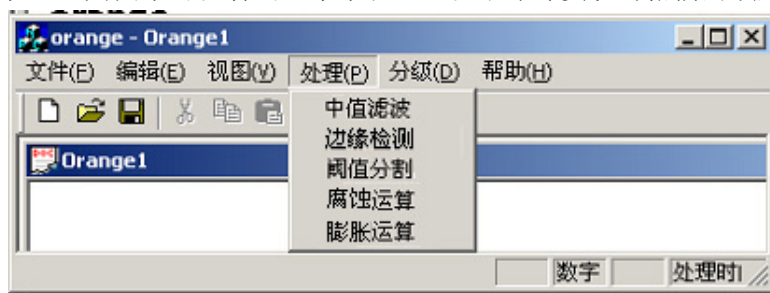


图 4.5 柑橘自动分级系统预处理菜单

一、图像预处理部分，包括：

- ◆ 中值滤波：对图片噪声进行平滑处理；
- ◆ 边缘检测：对经过平滑噪声处理的图片进行边缘检测。
- ◆ 阈值分割：用来做背景分割。输入 R、G、B 值或 H、S、I 值范围，操作后只保留范围内的像素（用于背景分割）；
- ◆ 膨胀运算、腐蚀运算：柑橘和背景像素区的噪音；

二、柑橘分级部分，是对柑橘按照用户定义的级别进行模式匹配，判断出柑橘的级别

- ◆ 大小定义：用户输入柑橘大小各级别的像素数
- ◆ 颜色定义：用户输入柑橘颜色各级别的色度值
- ◆ 形状定义：用户输入柑橘形状各级别的圆度值；
- ◆ 开始分级：定义好各个级别后，点击“开始分级”输出水果的大小、颜色、形状级别

4.3.2 软件系统功能实现

本系统能够连续、稳定、可靠地工作，各项设计功能基本实现，主要完成了对由 CCD 摄像头捕获的柑橘图像进行预处理，对与水果的大小、颜色及形状有关的特征参数进行分析，最后输出柑橘级别。由图像预处理、级别定义、分级处理几个模块组成，具体结构如图 4.4 所示：

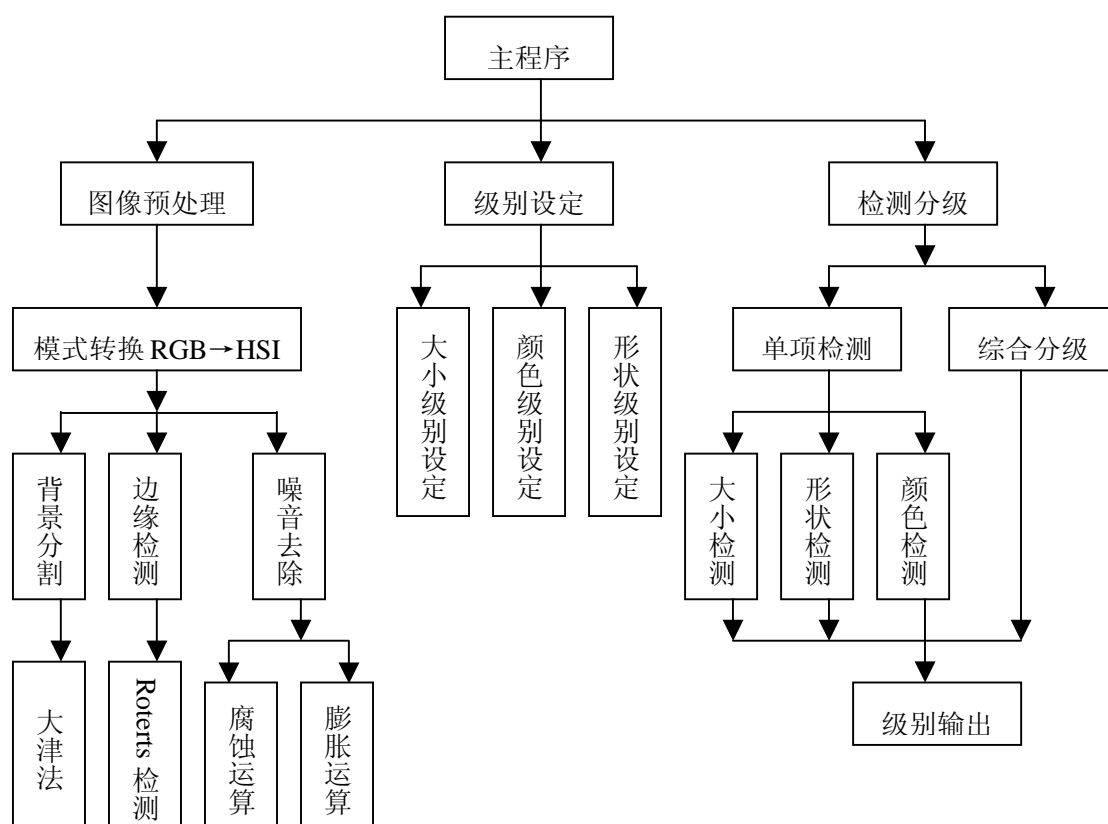


图 4.4 系统软件结构图

图像预处理是该软件系统的关键，其分析结果直接影响到分级准确率和生产效率，其面临的主要问题有：采集到图片颜色数字化和人眼的视觉感观效果之间的差异；背景信息对图像的干扰；三维实物和二维投影图像的对应等。鉴于以上几点，柑橘分级系统预处理按照由粗到细的优先关系进行处理，具体处理步骤如下：

(1) 模式转换。将采集到的图片进行颜色模式转换，采用简化方法将 RGB 模式转化为 HSI 模式。

(2) 噪音去除。采用 3×3 结构元使用两次膨胀运算和两次腐蚀运算结合的数学形态学方法，去除图像的噪音。

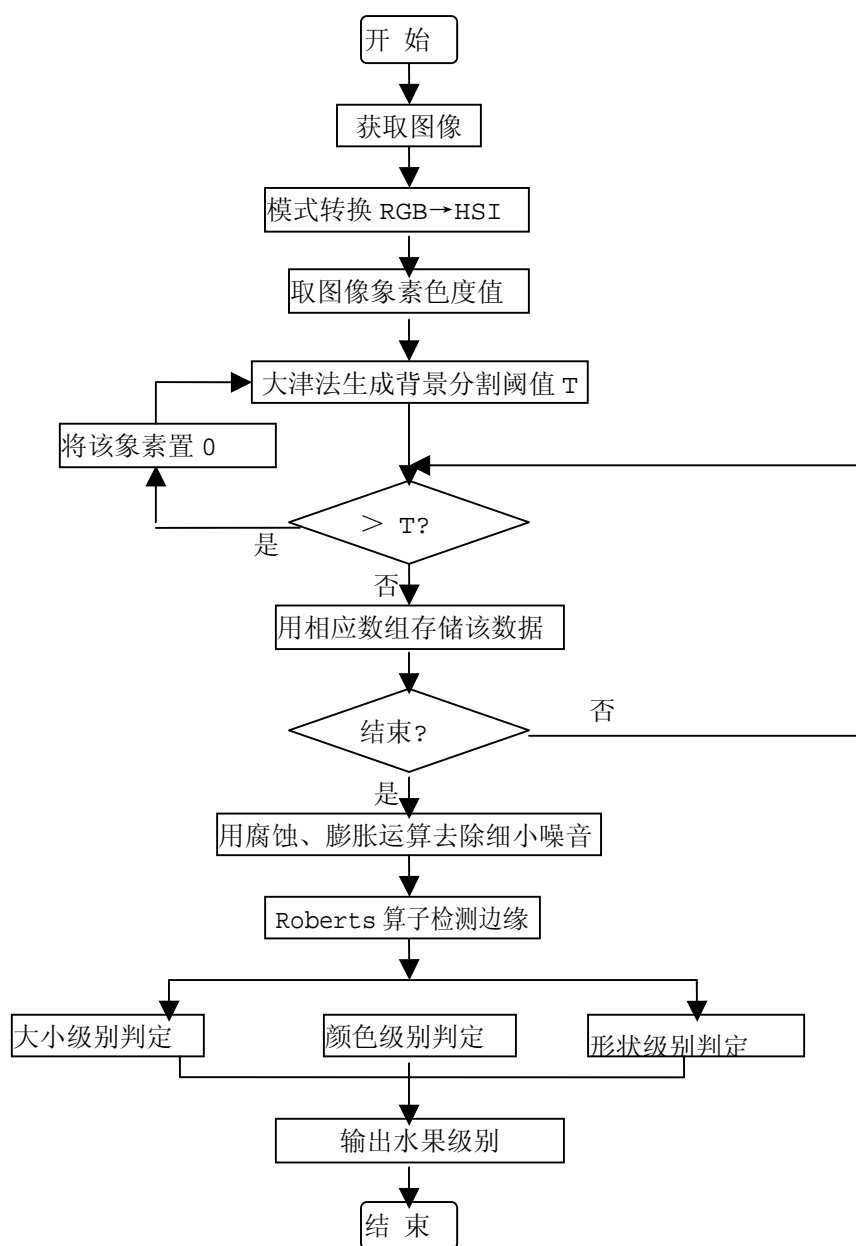
(3) 背景分割。选用大津法确定背景分割的阈值，在阈值之上的像素为背景像素，而在阈值之下的像素为柑橘果面的像素。

(4) 边缘检测。根据背景分割和图像增强后柑橘图像前景和背景的灰度梯度比较大的特点，采用 Roberts 算子进行边缘检测。

(5) 柑橘的大小识别。首先统计柑橘图像的像素点总数目得到柑橘的投影面积，再将柑橘投影近似为圆而计算得到的半径值能够真实描述柑橘的尺寸大小。

(6) 柑橘的形状识别：取预处理处理后的柑橘水果图像的边缘像素数，结合柑橘投影面积的总像素，计算其与标准圆接近的程度。

(7) 柑橘的颜色识别：转换颜色模式后图像为 HSI 颜色系统，提取柑橘的主色调值判定其颜色级别。



4.5 软件系统流程图

本系统中柑橘的级别标准由用户根据具体的生产标准自行确定。

系统软件的流程图见图 4.5

4.4 系统装置的运行情况

本系统能够稳定、可靠地工作，各项设计功能基本实现，具体体现在以下几个方面：

- （1）能对采集的图像进行背景分割、去除噪音、边缘提取等操作。
- （2）能显示图像的 RGB、HSI 颜色直方图。
- （3）能对水果的大小、颜色、形状进行级别的设定。
- （4）能根据用户设定的水果大小、颜色、形状级别进行模式匹配，输出柑橘的级别。

第五章 结论

本课题所研究的基于机器视觉的柑橘自动分级系统，可以对柑橘的尺寸大小、颜色、形状进行全面的检测和快速准确的分级。在柑橘外部形态的描述中采用了面积周长比描述圆度、主色调值描述颜色、投影面积表示大小等方法，提高了分级速度和准确性。分级基准和级数可以根据用户的要求或市场的需要任意调整。该分级系统通过实验检测，可实现分级目的，实现了预期的设计目标。

本课题的主要研究内容和结论体现在以下几个方面：

(1) 经过大量实验数据测算验证，针对实验获得的柑橘图像，采用大津法、腐蚀和膨胀相结合、Roberts 算子几种图像处理方法对采集到的柑橘图像进行背景分割、噪音去除和边缘检测等柑橘图像预处理。

(2) 比较和分析研究国内外水果外部品质检测技术，根据柑橘分级系统的生产特性和国际柑橘鲜果标准，采用像素数、色调值、圆度为特征向量组描述柑橘的大小、颜色、形状这三个外形特征。

(3) 分别通过投影面积法、面积周长比和主颜色法几种算法求取获得外形级别。在柑橘的形状识别上，采用改进的面积周长比的算法计算圆度，根据圆的面积和周长的关系进行了归一化处理，把圆度值规范在 $[1, 0]$ 之间，避免了柑橘大小对水果外形的影响，能够准确直观的表现圆度。方法简单有效，利于生产效率的提高。在颜色识别上，采用改进的主颜色法，不但能突出水果表面的视觉特征，而且更符合人的视觉感受。在大小识别上，采用投影面积法计算柑橘尺寸，快速有效，达到了预期的目标。

但是，基于机器视觉的柑橘分级系统的开发与研究是一个相当复杂和具有一定难度的研究课题，由于本人能力有限，建议在如下几个方面进行改进：

(1) 由于人力、物力等因素所限，本系统只在实验室环境进行了检测，工作环境比生产车间简单很多，还不能适应实际的生产环境。在生产线上的动态环境中柑橘的位置有很大的随机性，对形状的判别会造成一定的困难。而且生产线环境下难免产生很多不稳定的噪声，在试验阶段很难发现，所以还需要在系统的设计和软件设计作进一步分析和改进。

(2) 柑橘的外形级别判断应该基于柑橘整个表面。由于实验条件不足，没有对水果表面进行球形变换，需对此进行进一步的修改和完善。

(3) 缺陷是水果的外部品质的重要特征。由于精力和能力有限，本系统未进行研究。今后还需针对柑橘缺陷特征的识别进行研究。

参考文献

1. 中国统计年鉴编辑部. 中国统计年鉴 2004(中英文) [M]. 中国统计出版社. 2004.
2. 段峰. 王耀南. 雷晓峰. 等. 机器视觉技术及其应用综述[J]. 自动化博览, 2002(3): 59~62.
3. 中国标准出版社总编室. 中国国家标准汇编[M]. 中国标准出版社, 1998.
4. Rehugler G E. Throop J A. Apple sorting with machine vision[J]. Transactions of ASAE. 1985. 29(5) : 1388~1395.
5. Yang Q. An approach to apple surface feature detection by machine vision[J]. Comput. Electron Agric, 1994(11) : 249~264.
6. Shearer SA. Payne FA. Machine vision sorting with bell peppers[J]. In Proc. of the 1990 Conf. on Food Processing and Automation, 1990 : 289~300.
7. 李少昆. 王崇桃. 图象及机器视觉技术在作物科学中的应用进展[J]. 石河子大学学报(自然科学版) 2002, 6(1): 79~86.
8. Heinemann D Z. Varghess Z A. Morrow C T. et al. Machine vision inspection of golden delicious apples[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1995, 11(6): 910~906.
9. Tao Y. Method and apparatus for sorting objects including stable color transformation[J]. U.S. Patent No. 1996(5): 533~628.
10. 张方明. 应义斌. 水果分级机器人关键技术的研究和发展[J]. 机器人技术与应用, 2004(1): 34~37.
11. Miller B K Delwiche M J. A color vision system for peach grading[J]. Transaction of the ASAE. 1989, 32(4): 1484~1490.
12. Miller B K et al. Special analysis of peach surface defects[J]. Transaction of the ASAE. 1991, 34(6): 2588~2597.
13. Miller B K et al. Peach defect detection with machine vision[J]. Transaction of the ASAE. 1991, 34(6): 2509~2615.
14. Slaughter D C. Nondestructive determination of internal quality in peaches and nectarines[J]. Transaction of the ASAE. 1995, 38(2): 617~623.
15. Slaughter D C et al. Nondestructive determination of soluble solids in tomatoes using near infrared spectroscopy[J]. Food Sci. 1996, 61: 695~697.
16. Chen P et al. Development of a high speed NMR technique for sensing maturity of avocados[J]. Transaction of the ASAE. 1996, 39(6): 2205~2209.
17. 李庆中. 汪懋华. 基于分形特征的水果缺陷快速识别方法[J]. 中国图像图形学学报, 2000, 5(2): 144~148.
18. 李庆中. 张漫. 汪懋华. 基于遗传神经网络的苹果颜色实时分级方法[J]. 中国图像图形学学报, 2000, 5(9): 779~784.

19. 籍保平.吴文才.计算机视觉苹果分级系统[J].农业机械学报, 2000, 31(6): 118~121.
20. 应义斌.景寒松等. 黄花梨果形的机器视觉识别方法研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 192~196.
21. 应义斌.景寒松等. 机器视觉技术在黄花梨尺寸和果面缺陷检测中的应用[J].农业工程学报, 1999, 15(1): 197~200.
22. 何东健.杨青.薛少平.等. 果实表面颜色计算机视觉分级技术研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(3): 202~205.
23. 何东健. 用人工神经网络进行果实颜色分级技术研究[J]. 西北农业大学学报, 1998, 16(6): 109~112.
24. 冯斌.汪懋华. 基于颜色分形的水果计算机视觉分级技术[J]. 农业工程学报, 2002, 20(2): 144~147.
25. 赵静.何东健. 果实形状的计算机识别方法研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 165~167.
26. 应义斌.饶秀勤.马俊福. 柑橘成熟度机器视觉无损检测方法研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 144~147.
27. 李公平.柳纪虎.施援平. 等. 用核磁共振原理测甜菜含糖量探讨[J]. 甘肃科技, 2000(3): 33.
28. 付峰 应义斌. 球体图像灰度变换模型及其在柑桔图像校正中的应用[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 117~120.
29. 张聪. 测量光幕于水果分级设备中的应用研究[J]. 包装工程, 2002, 23(6): 35~38.
30. Tao Y. Morrow CT. Heinemann PH. Technique for shape grading of potatoes using machine vision [J]. Transactions of the ASAE, 1995: 1555~1561.
31. Tao Y. Chance L. Barren L. Full scale fruit vision sorting system design -factors and considerations[J].Proceedings of the FPAC IVConference, 1995, Chicago, Illinois: 14~22 .
32. 高海生.李汉臣.张红新. 果实采后分级处理的自动化技术[J]. 粮油加工与食品机械, 2002(2): 34~35.
33. 周水琴.应义斌. 颜色模型在农产品颜色检测与分级中的应用[J].浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003, 29(6): 684~688.
34. 杨发权.李武钢.李玉祥.不同色度空间的颜色分离方法[J]. 广西梧州师范高等专科学校学报, 2000,16(2): 72~76.
35. Otsu .N.A threshold selection method form gray-level histograms[J].IEEE Transactions on SMC, 1979, 9(1): 62~66.
36. 吕凤军 数字图像处理编程入门——作一个自己的 photoshop.清华大学出版社 43~47
37. Linda G.Shapiro. George C.Stockman 著. 赵清杰.钱芳.蔡利栋译.计算机视觉[M]. 机械工业出版社, 2005.
38. J.A.Throop.D.J.Aneshansley.B.L.Upchuch. B.Anger. Apple orientation on two conveyors : performance and predictability based on fruit shape characteristics [J].Transactions of the ASAE. 2001,44(1): 99~109.

39. 章文英. 应义斌. 苹果图象的低层处理及尺寸检测[J]. 浙江农业学报, 2001, 13(4): 214~217.
40. 徐娟, 汪懋华. 图像形态学在苹果自动分级视觉信息处理中果梗判别与边缘检测中的应用. [J]. 农业工程学报, 2002, 15 (2) : 177~180
41. 应义斌. 水果性状的傅立叶描述子研究[J]. 生物数学学报, 2001, 16(2), 234~240
42. 国家机械工业委员会. 机电一体化技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
43. 国家机械工业委员会. 形状和位置误差检查与测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
44. 李岚, 周大帅. 圆度误差测量的数学模型及数据处理 [J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2002, 20(2), 244~246
45. 郑鹏, 侯伯杰, 曹智军. 圆度误差置换算法的研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(4), 107~109
46. 应义斌, 饶秀勤, 马俊福. 柑橘成熟度机器视觉无损检测方法研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2) : 144~147
47. Stricker M A, Orengo M. Similarity of color image[J]. Proc of SPIE: Storage and Retrieval for Image and Video Databases III, San Jose, CA, 1995, 2420: 381~392.
48. Stricker M, Dimai A. color indexing with weak spatial constraints[J]. SPIE Proceedings, 1996, 2670: 29~40.
49. 施智平, 高光来, 赵晓春, 苏林英. 一个基于颜色特征的图像检索系统[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2003, 34(2) : 226~230
50. Paulsen M R. McClure W F. Illumination for computer vision systems [J]. Trans of the ASAE. 1986, 29(5): 1389~404.
51. 郎锐. 数字图像处理学 Visual C++实现[M]. 北京: 希望电子出版社, 2003.
52. 张远鹏 等. 计算机图像处理技术基础[M]. 北京大学出版社, 1996.

致谢

三年的硕士研究生学习生活即将结束，回首这段难忘的时光，我所取得的每一份成绩，都离不开我的亲人及诸多良师益友的鼓励和帮助。我要向他们表示最衷心的感谢。

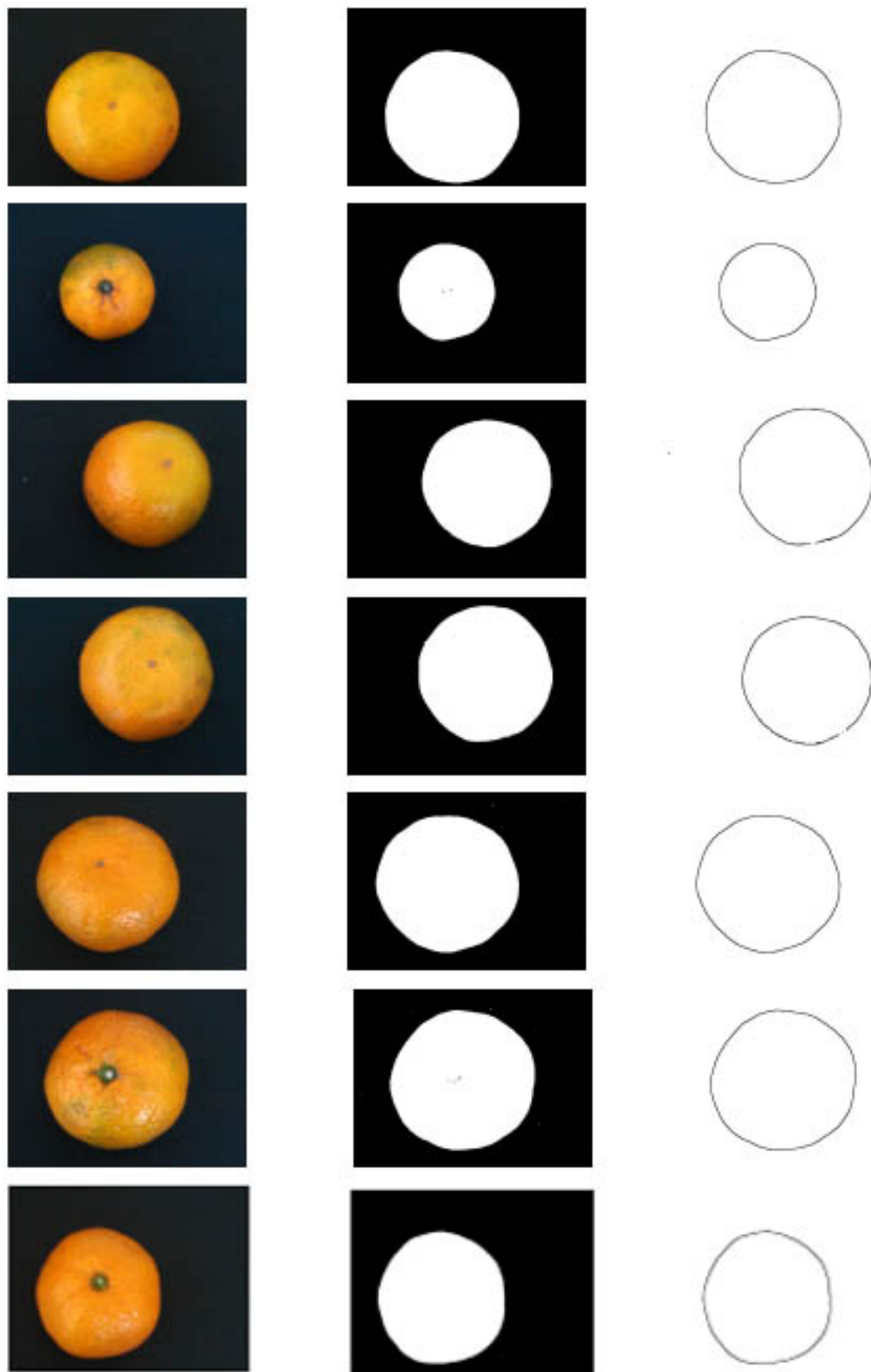
首先衷心感谢我的导师孟超英教授。两年多来，无论从生活上还是学习上，孟老师都给了我无微不至的关心和帮助。本文的完成更离不开孟老师的热心关怀和悉心指导。如果没有孟超英教授的谆谆教诲和关键技术方面的指点，本论文的完成就不会如此顺利。

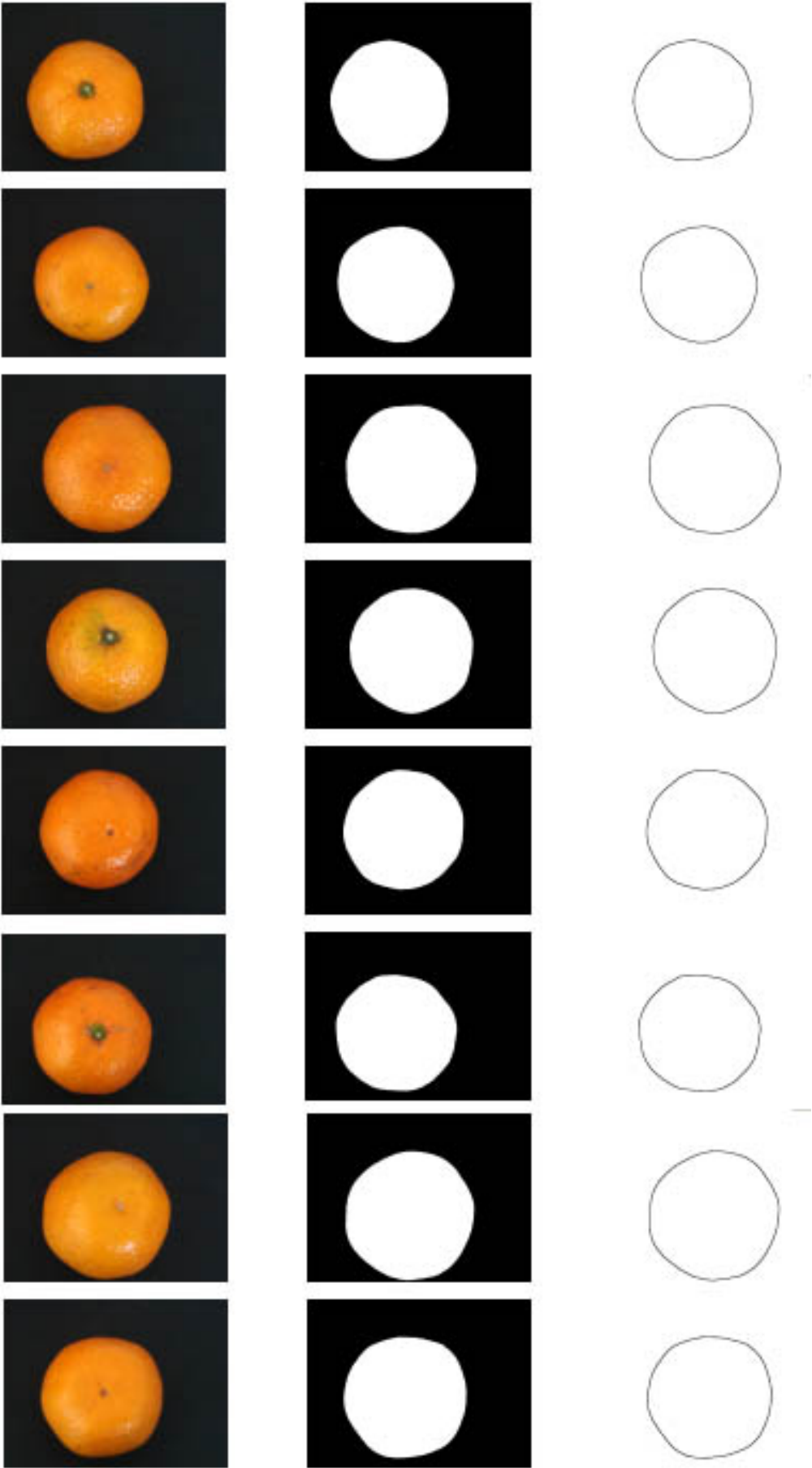
我还要特别感谢籍保平教授，在本论文的完成过程中，得到了籍老师的悉心指导和大力支持，并对论文材料做了细致的审核。他渊博的学识和严谨的治学态度对我的论文完成起到了很好的导向作用。在此向籍老师表示诚挚的谢意！

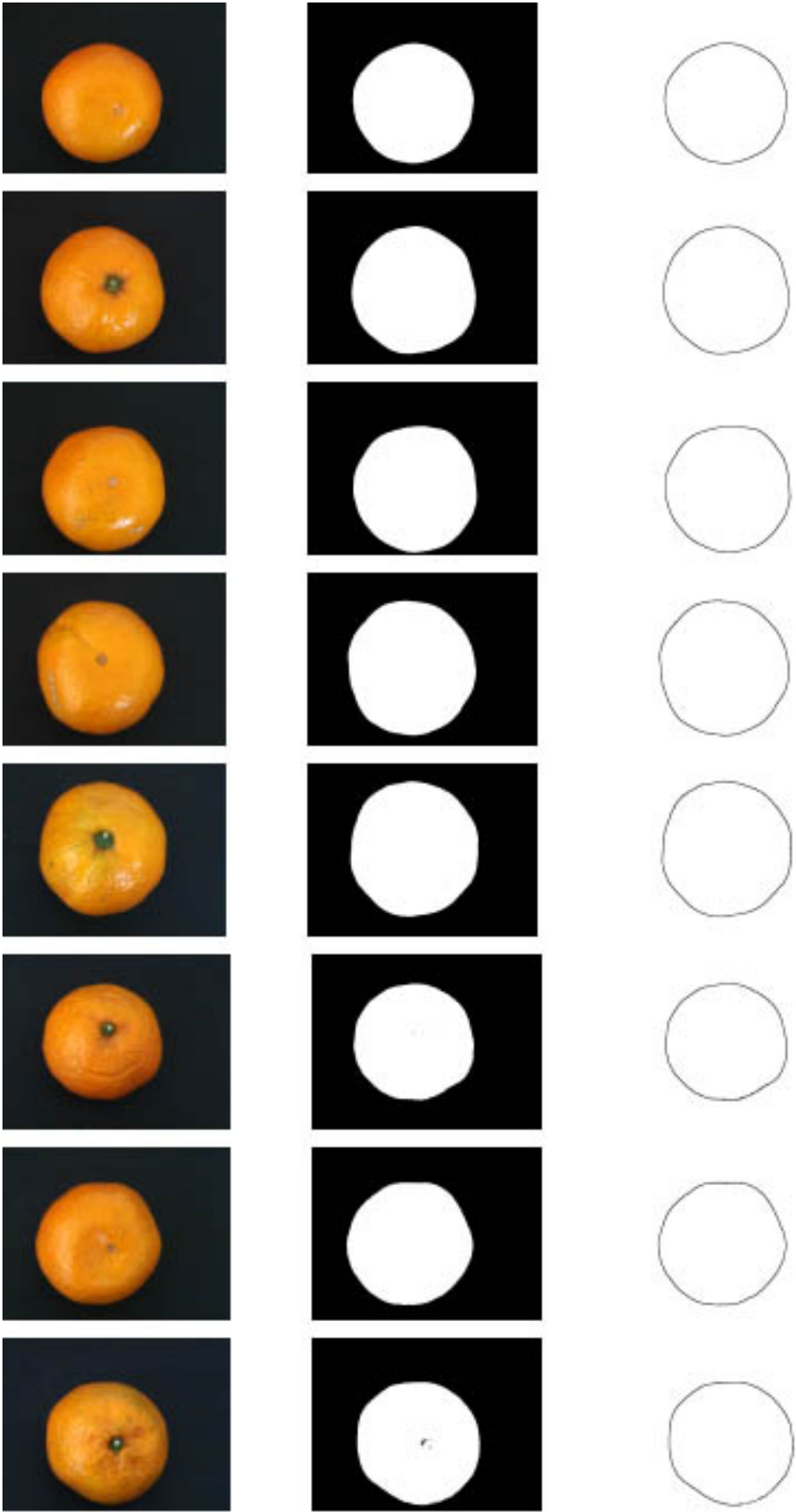
在本人课题研究期间，得到了李琼飞等老师和杨东平、陈芝慧、柏流芳、韩文博、郭玉华、庆兆坤、朱大洲、史波林等同学的热情帮助，在此谨表谢意。此外，我还要感谢我的父母和爱人，在我的求学过程中他们始终给予无尽的关怀、支持与理解，使我能够顺利完成学业。

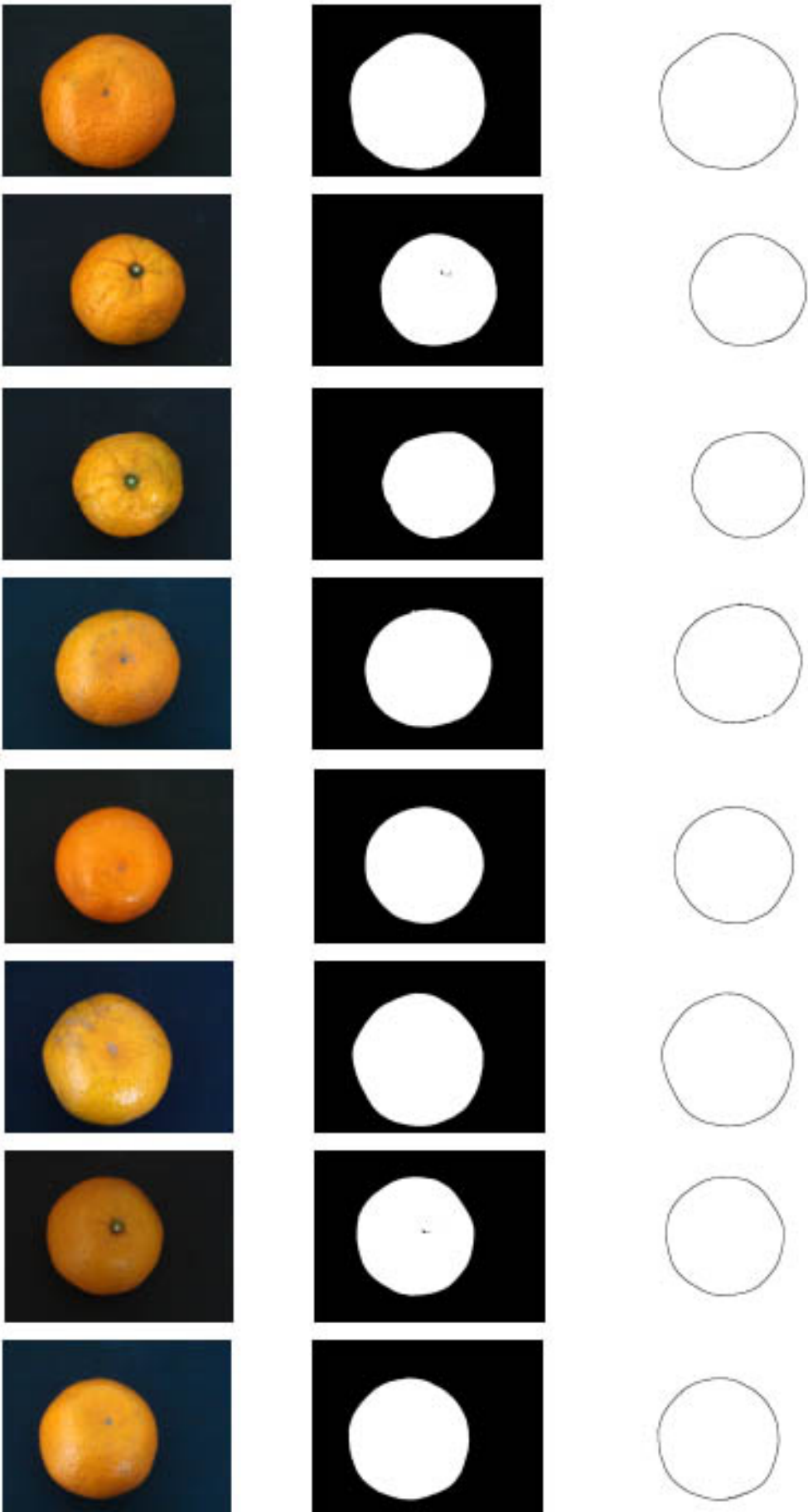
附录

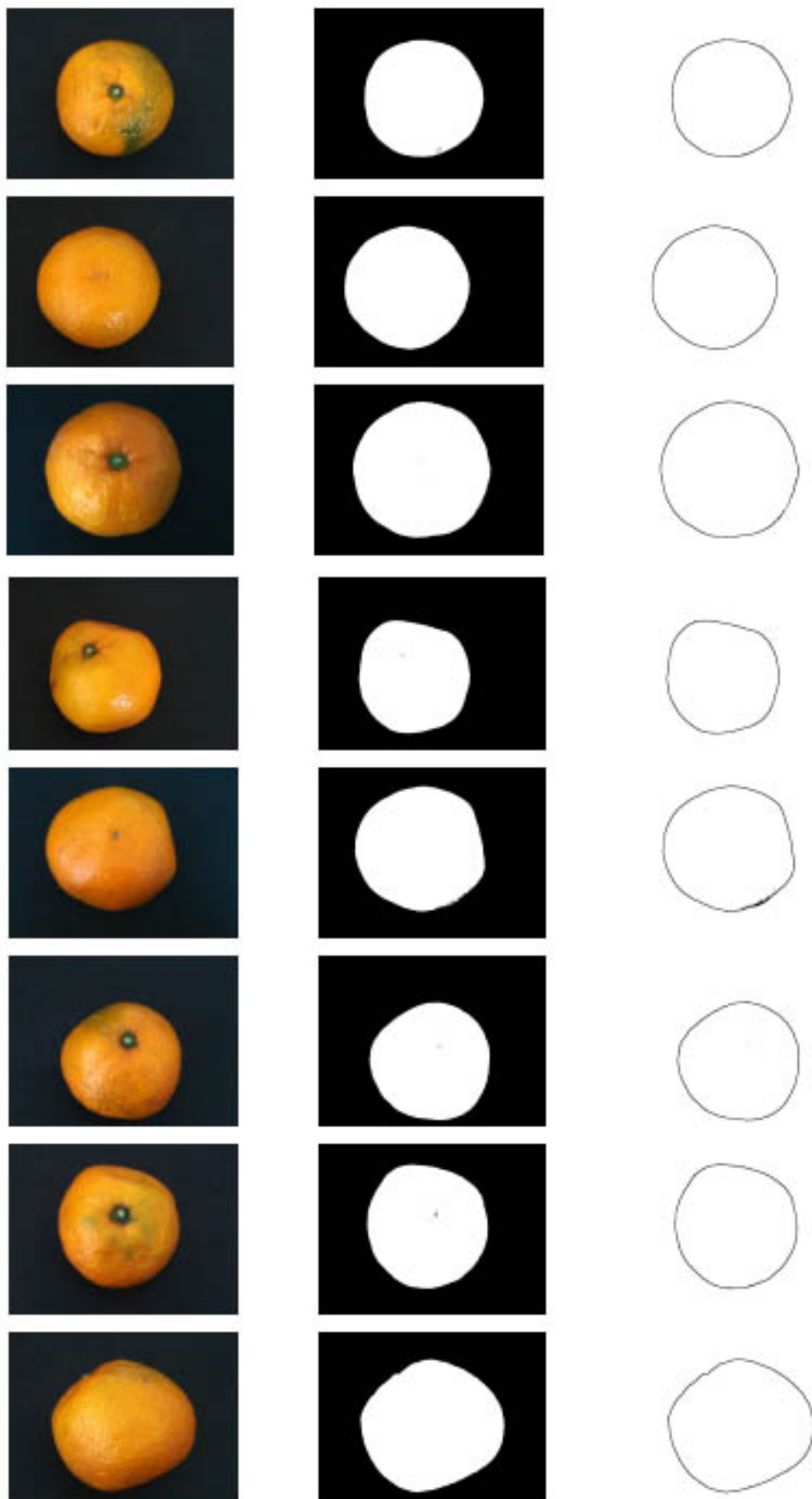
1、柑橘大小、形状识别中涉及的部分测试图像(原图、投影面积图、边缘图)





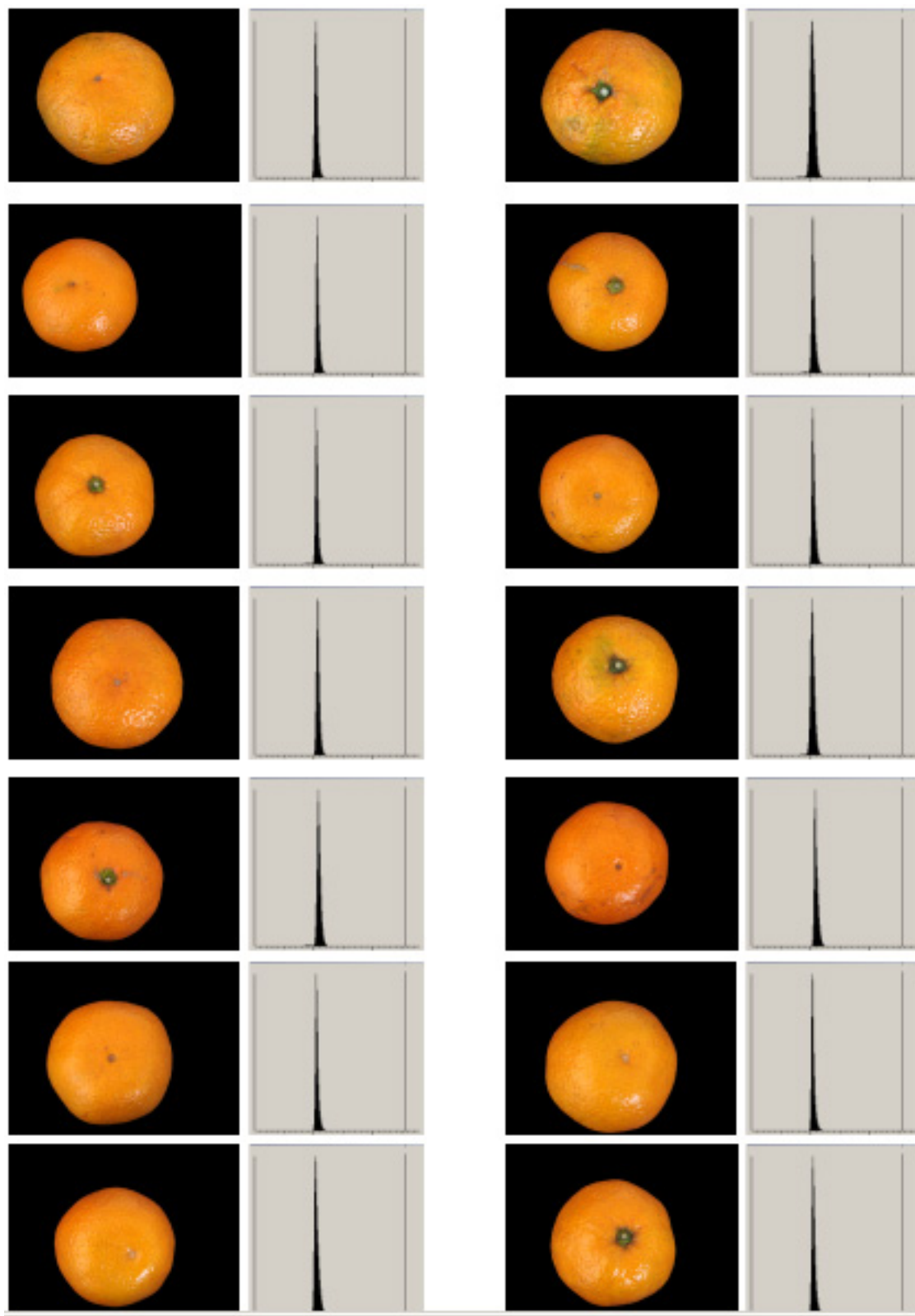


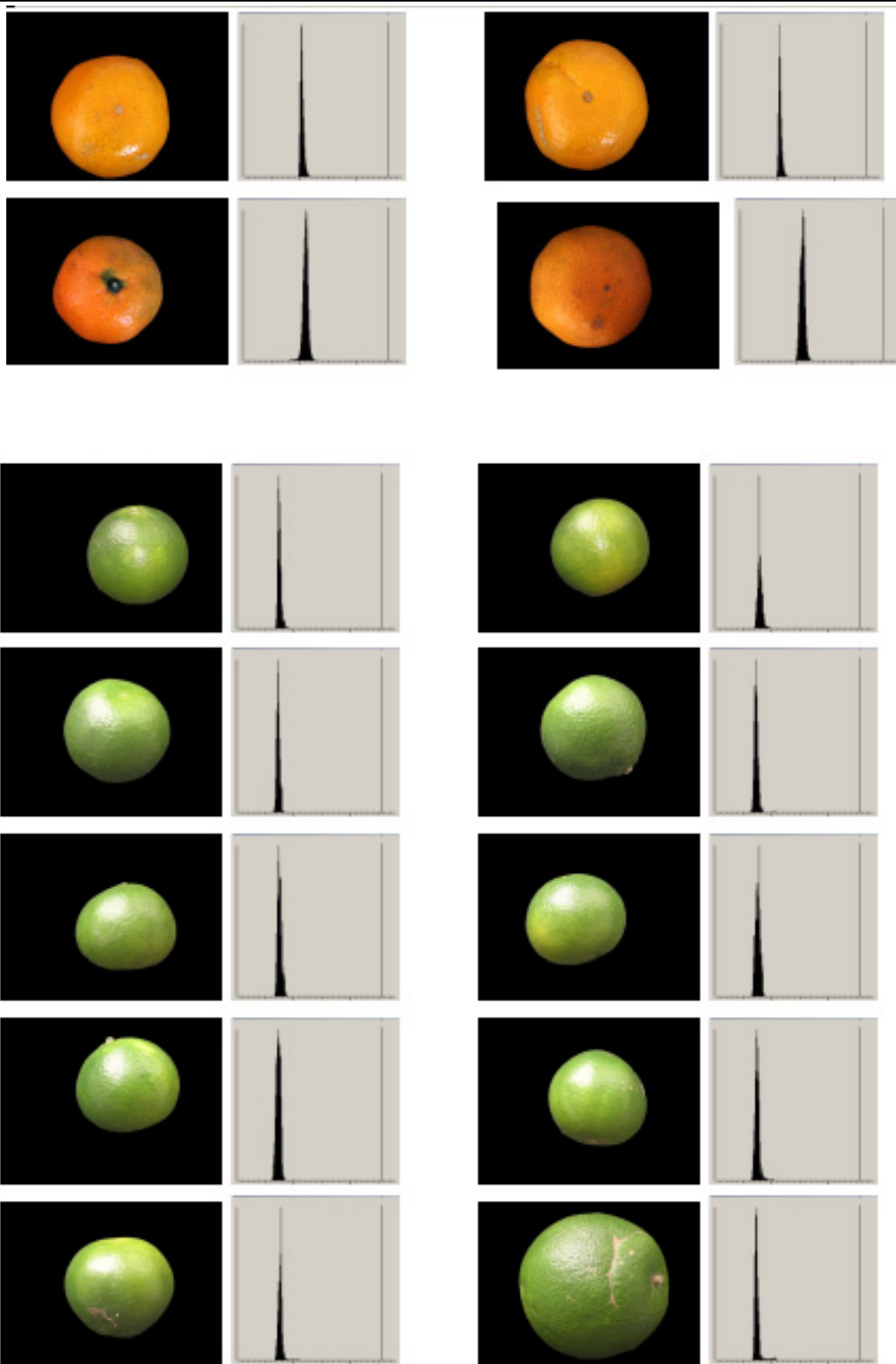


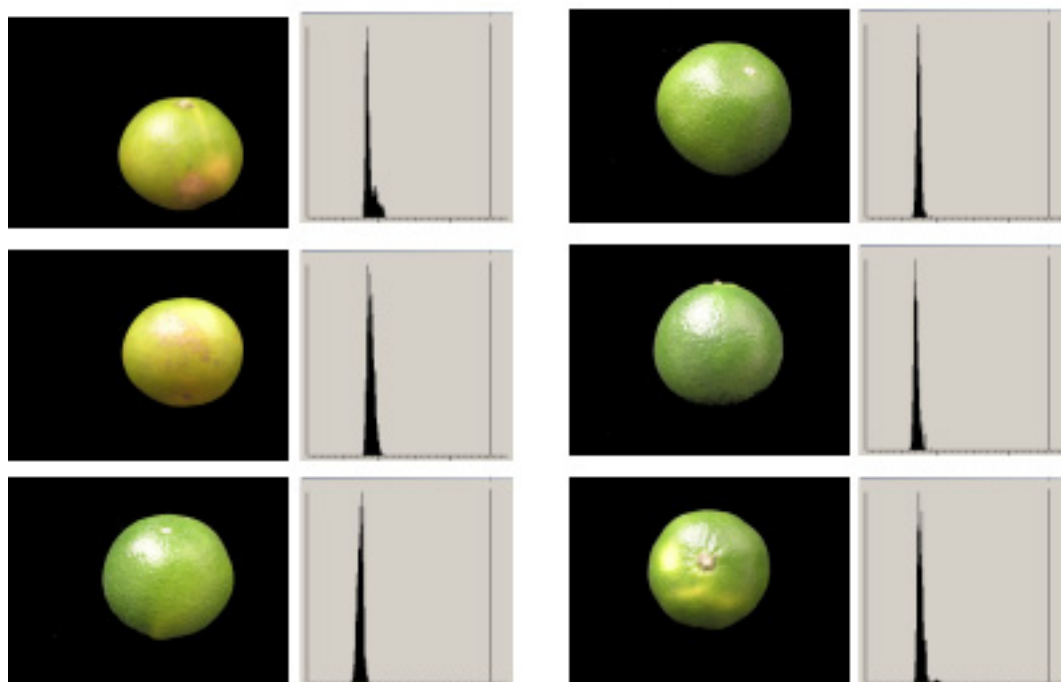




2、柑橘颜色识别涉及的部分测试图像（预处理后图像及直方图）







个人简历

白菲，女，1976 年 4 月出生，大学本科（学士），毕业于哈尔滨工业大学计算机科学与技术专业。

工作经历：1998 年 7 月至今：中国农业大学从事教育管理

发表的论文：数据挖掘技术在高校人才引进中的应用，太原大学学报，2005 年第 4 期

水果自动分级技术的现状与发展，食品科学，2005 年增刊

基于 DSP 水果分级系统的一种新苹果检测方法，食品科学，2005 年增刊