doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.013

基于差速传送与表面累积着色率的苹果田间分选表面信息采集方法

张俊宁[1]　张　越[1]　胡　欢[1]　吕树盛[2]　张德松[3]　孙　姗[2]　汤　聪[1]
(1.北京信息科技大学机电工程学院，北京 100192；2.中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；
3.昆仑数智科技有限责任公司，北京 100007)

摘要：针对苹果田间现场分选过程中因传送带长度有限而使果实完整表面信息获取难的问题，提出了一种基于颜色分割的苹果表面累积着色率计算方法，实现苹果在线分选过程中果实旋转运动的量化分析。设计了差速式平带传送苹果田间分选装置，基于对苹果在传送带分选过程的运动学分析，推算出了传送带的最优速度差与速度增益积区间，采用三等分涂色法采集苹果运动图像，以苹果运动图像总像素面积与苹果总表面积的比值作为苹果表面累积着色率，从而量化苹果旋转圈数，明确了速度大小、果径大小与苹果旋转运动的关系。通过设置不同传送带速度、不同果径大小的对比试验，得出了两侧传送带速度差在 0.23 ~ 0.57 m/s 范围内且速度增益积在 0.04 ~ 0.13 m^2/s^2 内时，单个苹果至少完整旋转一周；随着速度增益积逐渐增加，苹果表面累积着色率降低不超过 38%，对应的果实旋转圈数仍维持一圈以上，可确保装置获取苹果完整表面信息；相同速度增益积下不同果径的苹果表面累积着色率相差不超过 8 个百分点，对应的旋转圈数未出现明显差异，表明果径大小对苹果旋转运动的影响较小。基于差速传送的田间分选装置和表面累积着色率的苹果旋转圈数计算方法可实现运动果实完整表面信息在线采集和量化分析，为苹果田间现场分选提供有效的技术和装备支持。

关键词：苹果分选；差速传送；累积着色率
中图分类号：S24　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)23-0143-08　　**OSID**：

Surface Information Acquisition Method of Apples in Field Sorting Using Differential-speed Conveying and Cumulative Surface Coloration Rate

Zhang Junning[1]　Zhang Yue[1]　Hu Huan[1]　Lü Shusheng[2]　Zhang Desong[3]　Sun Shan[2]　Tang Cong[1]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing* 100192, *China*
2. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
3. *Kunlun Digital Technology Co., Ltd., Beijing* 100007, *China*)

Abstract: Aiming to address the challenge of acquiring complete surface information of apples during the sorting proces, a method for calculating the cumulative surface coloration rate was proposed based on color segmentation, enabling the quantitative analysis of apple rotational motion during online sorting. The research further seeked to design a differential-speed apple sorting device suitable for field operations in orchards. A kinematic analysis of apples on the conveyor was conducted to determine the optimal speed difference range and the speed gain product interval for the conveyors. The three-section coloring method was employed to capture sequential images of apples in motion. The cumulative surface coloration rate was defined as the ratio of total pixel area from image sequence to apple's total surface area. This metric was used to quantify the number of effective rotations and to clarify the relationships among apple diameter, conveyor speed, and rotational behavior. Comparative experiments were carried out with varying conveyor speeds and apple sizes. Experimental results demonstrated that when the speed difference between the two side conveyors was within 0.23 m/s to 0.57 m/s and the speed gain product fell between 0.04 m^2/s^2 and 0.13 m^2/s^2, individual apples completed at least one full rotation. This condition effectively ensured the acquisition of complete surface information. Additionally, when apples of different diameters were processed under identical conveyor speed settings, the variation in their

收稿日期：2026-02-08　修回日期：2026-02-26
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFE0122600-5)
作者简介：张俊宁(1980—)，男，教授，博士，主要从事智能农机测控技术研究，E-mail：zhangjunning@bistu.edu.cn

cumulative surface coloration rates did not exceed eight percentage points. As the speed gain product was increased, the cumulative surface coloration rate was decreased by no more than 38%, confirming that the device could still obtain comprehensive surface information across different operational parameters. The differential-speed mechanism successfully facilitated stable apple flipping and reliable image capture throughout the tests. The proposed method for calculating cumulative surface coloration rate and the corresponding differential-speed field sorting device effectively addressed the problem of incomplete surface information acquisition during apple sorting. By ensuring complete apple rotation and enabling quantitative analysis of rotational motion, the system achieved stable performance across varying apple sizes and operational speeds. This approach met the practical requirements for efficient and reliable on-site apple grading and sorting in orchard environments.

Key words: apple sorting; differential-speed conveying; cumulative coloration rate

0 引言

随着水果产量增加和对水果品质的要求越来越高,水果检测技术发展迅速,机器视觉技术与水果分级相结合已经成为一种趋势[1-2],在众多的水果分级设备中都有应用。但是目前水果检测与分级主要围绕车间分级开展,存在成本高、运输时间长等问题[3-4]。在产地化、高通量[5-6]的分级需求下,果园田间分选设备可用于解决田间现场采摘水果分级的问题[7]。果园田间分选设备通过传送装置对水果稳定输送并获取水果完整表面信息,能够有效提高果实现场分选准确性,满足现代果园采摘作业智能化的需求[8-9]。

为了保证机器视觉系统能完整采集到水果的表面图像信息[10-12],海内外学者研究了多种水果传送装置。李卫等[13]研制的变螺距式马铃薯分级装置由环形链条与滚筒组成,通过对马铃薯在分级装置内的动力学和运动学分析确定了其关键结构参数,解决了马铃薯分级装置结构较大、传动复杂、易伤薯的问题,在最优解参数下分级装置平均分级准确率大于 89%,提升了分级准确率。赵小霞等[14]利用滚筒式输送带通过图像处理对水果进行在线监测,并能使水果在摄像机前移动式旋转,检测水果全部表面信息,试验结果表明系统能够对水果按照等级进行分拣,系统最高精度为 98%。Sofu 等[15]研究的苹果自动分拣系统由滚轮、运输机与传送带构成,第 1 条输送带旋转并沿两条通道移动苹果,第 2 条输送带会在对应级别位置翻转托盘使苹果滑落。平均每秒可通过两个通道实时筛选 15 个苹果,平均分选准确率为 73% ~96%,考虑到水果分级传送装置的产地化与高通量的分级需求,本文采用差速式、多通道的带式传送机构,并对苹果传送分选过程进行旋转运动分析。

对于球形水果,传送过程中的运动规律分析是实现精准分选的关键环节[16-17]。研究者通过建立水果运动学模型,分析并优化分选装置的各项工作参数,旨在确保装置的视觉系统能够完整采集果实表面图像,进而提升品质检测与评估的准确性和可靠性。Liu 等[18]设计了集成分离、输送与旋转功能于一体的变螺距螺旋辊传送装置,得出了设备较优转速。Kumar 等[19]设计的柑橘分级分选装置,结合柑橘的形态与运动特征优化了装置的分级结构,能够实现柑橘品质的精准区分。Pothula 等[20]将苹果四等分并涂色,根据各颜色占比对苹果的表面信息进行采集。目前水果分选装置在采集水果表面信息方面已取得一些进展,然而,针对水果在分选过程中运动不规则、不稳定的情况,仍缺乏能够确保采集到水果完整图像的方法,相关的研究仍有不足。由于水果本身运动的动态变化与田间复杂环境干扰[21],分选时存在同一部分信息多次被采集而其他区域未被采集的情况,造成水果表面信息采集不准确[22]。

针对上述问题,本文设计差速式苹果传送装置,并提出一种基于颜色分割的苹果表面累积着色率计算方法。通过对苹果在分选过程进行运动分析,以表面累积着色率量化苹果旋转角度,结合旋转矩阵法计算出苹果实际旋转角度,实现苹果在线分选过程中果实旋转运动的量化分析,以期为高效苹果田间分选装置开发提供技术和装备支持。

1 材料与方法

1.1 差速式平带传送苹果田间分选装置

1.1.1 装置结构与工作原理

差速式平带传送苹果田间分选装置的核心设计在于能够通过调节相邻传送带之间的线性速度差,主动驱动苹果发生旋转运动,以便于果实完整表面信息的采集。差速式平带传送苹果田间分选装置主体结构如图 1 所示,包括机架、驱动机构和运输机构,整个苹果运输机构由电机通过齿轮与链条带动 5 条平行等距的传送带运动。为使苹果在传送带上运动的同时进行旋转,装置上相邻传送带之间需要

产生线性速度差，以此来检测苹果的完整表面，因此整个装置由两套直流电机控制，每个电机的转速由其配备的调速箱独立控制，当两个电机速度不同时，各自对应的传动轴与传动轮就会产生转速差，进而影响传动轮上传送带的运行速度，使相邻传送带之间产生线性速度差，而传送带之间的速度差提供的摩擦力矩可以驱动苹果旋转。

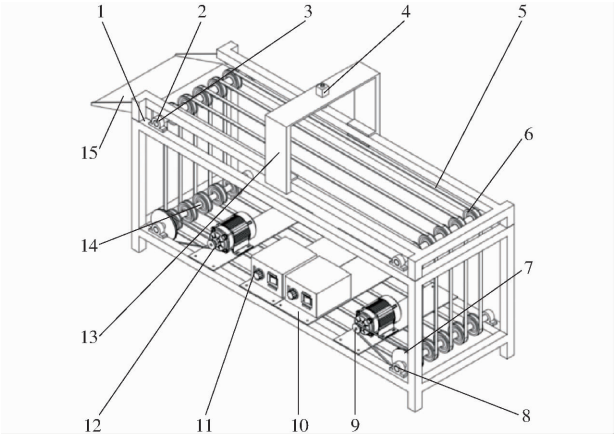

图 1　苹果传送装置示意图

Fig. 1　Schematic of apple conveying device

1. 机架　2. 支撑轴　3. 支撑环　4. 工业相机　5. 传送带　6. 带轮　7. 大齿轮　8. 链条　9. 小齿轮　10. 安装板　11. 调速箱　12. 直流电机　13. 支撑架　14. 定位环　15. 物料板

为了确保苹果在田间分选期间平稳运输并且没有磕碰损伤，选择弹性橡胶作为传送带材质，而橡胶提供的摩擦力可以带动苹果运动；在传送过程中要求苹果在两侧传送带之间稳定运动且不会掉落。因此，传送带间距应小于苹果的最小果径。而在苹果运动过程中，垂直于其运动方向的支持力相互抵消，苹果不会滚落到其他通道。通过对市面上常见的果径 70 ~ 90 mm 苹果进行传送试验，得到较佳间距为 60 mm。对于果径小于 60 mm 的苹果，可以通过更换两带轮之间的定位环来减小传送带间距，保证苹果不会掉落。

1.1.2　苹果旋转的运动学分析

由于苹果在输送过程中至少需要完整旋转一周才能保证相机检测到苹果的完整表面，对苹果输送过程进行运动学分析，将苹果看作均质球形刚体，且不考虑空气等对苹果阻碍作用，苹果的运动可视为纯滚动。苹果随着传送带向前输送的同时，在摩擦作用下开始翻转滚动。将苹果放置在两条传送带之间，其运动方向与旋转方向如图 2 所示，设定黄色传送带速度为 v_1，橙色传送带速度为 v_2，且 $v_1 < v_2$（$v_1 > v_2$时仅苹果旋转方向不同），苹果质量 0.224 kg，苹果直径 0.08 m。在选果机上运动的路程为 1.26 m，两根传送带间隔为 0.06 m。苹果在传送带上受传送带的支持力，其支撑点和苹果重心的连线与水平方向的夹角为 φ，根据三角形关系进而可以求出苹果受每条传送带的支持力 F。

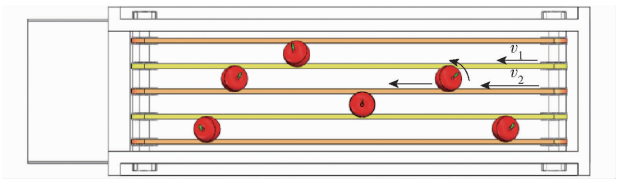

图 2　苹果运动示意图

Fig. 2　Apple motion schematic

苹果在传送带上的运动过程分为两个阶段：加速阶段与旋转阶段，在加速阶段中，苹果速度会由零开始增加到与速度较低的黄色传送带相同的速度；在旋转阶段中，苹果向前运动的同时自身开始旋转。

在加速阶段中，苹果放入传送带上时初速度为零，因此两侧传送带提供的滑动摩擦力为动力，由于苹果两侧传送带的速度不同，因此其所受摩擦力为滑动摩擦力且动摩擦因数不同，速度较快的传送带提供的滑动摩擦力较大，黄色传送带动摩擦因数为 μ_1，提供的摩擦力为 f_1，橙色传送带动摩擦因数为 μ_2，提供的摩擦力为 f_2，传送带所用橡胶与苹果表面的动摩擦因数通常为 0.4 ~ 0.6。取 $\mu_1 = 0.45$，$\mu_2 = 0.55$，由于苹果同时与两根传送带接触，并且与传送带同向移动，如图 3 所示。在两条传送带对苹果摩擦力 f_1 与 f_2 作用下，苹果最终加速到与黄色传送带速度 v_1 相同的速度。可以由总摩擦力计算出此时苹果的加速度，再得出加速阶段的运动时间 t_1 公式为

$$(\mu_1 + \mu_2) F = m \frac{v_1}{t_1} \tag{1}$$

式中　m——苹果平均质量

求出 $t_1 = 0.021$ s，由于此过程时间较短，在不考虑各种物理因素的情况下可以认为苹果在这个阶段没有发生转动。

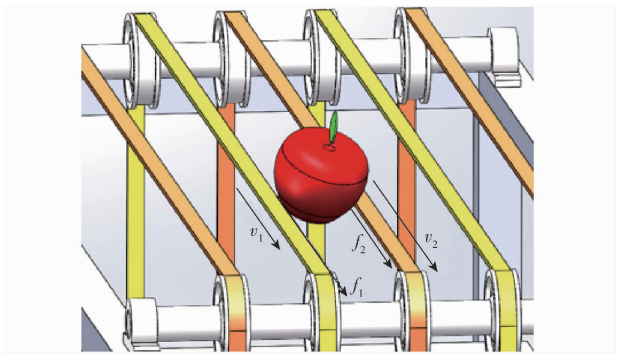

图 3　苹果加速阶段示意图

Fig. 3　Diagram of apple acceleration stage

在旋转阶段中，苹果的速度加速到与左侧黄色传送带速度 v_1 相同时，其对苹果的摩擦力将减小到零，因为两者之间没有相对运动或相对运动趋势。

然而,右侧橙色传送带仍然以更快的速度移动,因此它将对苹果施加一个向前的摩擦力,试图使苹果加速到与其相同的速度,则左侧黄色传送带将对苹果施加一个向后的摩擦力,而苹果将继续向前加速,如图 4 所示。

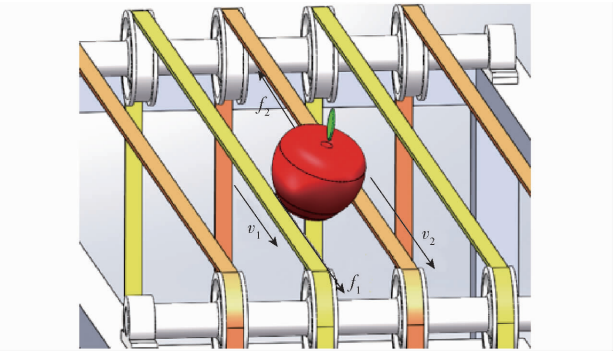

图 4 苹果旋转阶段示意图

Fig. 4 Diagram of apple rotation stage

假设将苹果加速直到与右侧橙色传送带速度 v_2 相同,此时苹果运动时间 t_2 满足公式

$$(\mu_2 - \mu_1) F = 2m \frac{v_2 - v_1}{t_2} \tag{2}$$

在旋转阶段,苹果两侧受到的摩擦力不能相互抵消,苹果开始自转,而苹果加速到与右侧传送带速度相同时,苹果受到的摩擦力方向又会同向,则苹果会停止旋转,苹果自转时间 t_3 应该小于苹果运动时间 t_2。因此,t_3 等于 t_2 时,传送带的速度是苹果可以完整旋转一周的临界速度,且传送带的总长度 L 应大于苹果在输送过程中的位移,苹果转动的切向加速度 a_t 与加速阶段加速度相同,则自转时间 t_3 计算公式为

$$t_3 = \frac{v}{a_t} = \frac{2\pi r}{a_2 t_2} \tag{3}$$

$$L > \frac{1}{2} a_1 t_1^2 + v_1 t_2 + \frac{1}{2} a_2 t_2^2 \tag{4}$$

式中 r——苹果半径

a_1、a_2——苹果加速、旋转阶段的加速度

联立式(2)~(4),苹果完整旋转一周时,传送带速度 v_1、v_2 需要满足

$$\begin{cases} |v_2 - v_1| > 0.218 \text{ m/s} \\ v_1 |v_2 - v_1| < 0.475 \text{ m}^2/\text{s}^2 \end{cases} \tag{5}$$

定义 $\Delta v = |v_2 - v_1|$ 为速度差、$\Pi = v_1 |v_2 - v_1|$ 为速度增益积。则式(5)可写为

$$\begin{cases} \Delta v > 0.218 \text{ m/s} \\ \Pi < 0.475 \text{ m}^2/\text{s}^2 \end{cases} \tag{6}$$

Flemmer 等[23]对苹果随机旋转行为的量化研究,表明苹果在输送过程中的三维旋转具有显著的不确定性,且旋转受驱动条件影响。本研究提出的速度增益积 $\Pi = v_1 |v_2 - v_1|$ 正是针对上述问题构建的合成运动参数,苹果的旋转源于两侧传送带的速度差 $\Delta v = |v_2 - v_1|$ 产生的摩擦力矩。Δv 越大,苹果与传送带间的滑动摩擦力形成的力矩越大;而传送带速度 v_1 直接决定苹果在相机视野内的停留时间。若 v_1 过小,停留时间长但分选效率低下,不符合田间高通量分选需求,若 v_1 过大,苹果停留时间过短,可能因旋转未完成就脱离检测区域,导致表面信息缺失。速度增益积 Π 将旋转动力 Δv 与输送效率约束 v_1 耦合,既需保证 Δv 提供足够力矩驱动旋转,又需通过 v_1 控制激励的作用时间,以确保苹果在高效输送过程中完成稳定自转。

1.2 样品准备与数据采集

1.2.1 样品准备

本文参考 GB/T 10651—2026《鲜苹果》,以产地山东烟台的红富士苹果为样品,选择表面完好无缺陷的苹果,以便于对苹果均匀涂色并覆盖原苹果表面。红富士苹果的平均果径为 70 ~ 90 mm,因此,分别以果径(90 ± 0.5) mm、(80 ± 0.5) mm、(70 ± 0.5) mm 的苹果代表大、中、小 3 种不同规格的苹果,共选取 30 个苹果,分为 5 组,每组大、中、小 3 种不同规格的苹果各选 2 个,共计 6 个苹果。利用三等分涂色法对苹果涂色:将苹果表面沿竖直方向等分为 3 个区域,并使用红、蓝、绿 3 种颜料均匀涂色,使其完全覆盖原苹果表面颜色,以形成标准化颜色分区。3 种果径苹果涂色后的实物如图 5 所示。

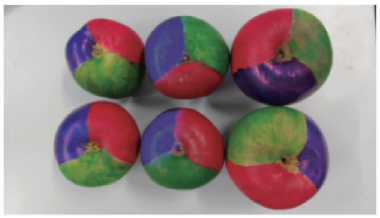

图 5 苹果样品图

Fig. 5 Apple sample images

1.2.2 苹果图像采集方案

将工业相机固定于距传送带平面 400 mm 处,采用的相机型号为海康威视 MV - CB013 - A0UM - C,相机视野覆盖完整的传送带平面。根据式(6)中的条件,由于装置速度挡位的设置与调速箱调整精度的限制,得到可以满足速度差与速度增益积取值范围的传送带速度组合共 9 组。因此可以进一步确定速度差与速度增益积的区间:速度差 Δv:0.23 ~ 0.76 m/s;速度增益积 Π:0.04 ~ 0.37 m^2/s^2。如表 1 所示。

将涂色苹果依次置于传送带起点,每组涂色苹果分别进行 1 次传送。为避免采集到重复的颜色信

表 1　9 组传送带速度组合

Tab. 1　Nine conveyor speed combinations

组别	左侧速度 v_1/(m·s^{-1})	右侧速度 v_2/(m·s^{-1})	速度差 Δv/(m·s^{-1})	速度增益积 Π/(m^2·s^{-2})
1	0.16	0.39	0.23	0.04
2	0.16	0.48	0.32	0.05
3	0.16	0.73	0.57	0.09
4	0.21	0.48	0.27	0.06
5	0.21	0.73	0.52	0.11
6	0.39	0.73	0.34	0.13
7	0.48	0.73	0.25	0.12
8	0.48	1.24	0.76	0.36
9	0.73	1.24	0.51	0.37

息，需确保每次采集的苹果图像与上一幅图像中的苹果区域无重叠。为此，将传送装置的速度调整为最小速度组合，并相应调节相机采集帧率，以保证相邻两幅图像中的苹果不存在重合部分。最终确定相机采集帧率为 5 f/s，共采集彩色图像 1 140 幅。对原始图像进行统一裁剪，使其像素尺寸均为 1 080 像素 ×1 920 像素。从中获取相邻的 5 幅图像作为苹果连续运动样本，苹果在裁剪后的连续运动图像如图 6 所示。



图 6　经过裁剪后的苹果运动图像

Fig. 6　Cropped apple motion images

1.2.3　苹果实际表面积采集

由于苹果的实际三维表面积难以直接精确测量，而通过相机采集到的苹果图像为二维平面信息，因此采用基于二维图像的颜色面积采集方法进行近似计算。具体操作时，将苹果依次放置于传送装置正下方，通过相机采集能够完整呈现苹果表面的图像。随后，采用基于深度学习的图像分割方法对采集到的苹果图像进行语义分割，将分割后的结果进一步转换为黑白二值图像，图像分割转换效果如图 7 所示；使用 Matlab 对分割后的二值图像进行像素面积计算，从而准确计算出每一颜色对应的像素面积。最终，将 3 种颜色的像素面积累加，作为该苹果在二维图像中的总表面积估计值。

1.3　基于颜色分割的苹果表面累积着色率计算方法

1.3.1　表面累积着色率计算流程

基于颜色分割、形态学去噪和空洞填充等方法的苹果表面累积着色率计算流程为：首先采集涂色苹果的原始 RGB 运动图像与表面图像，再转化为

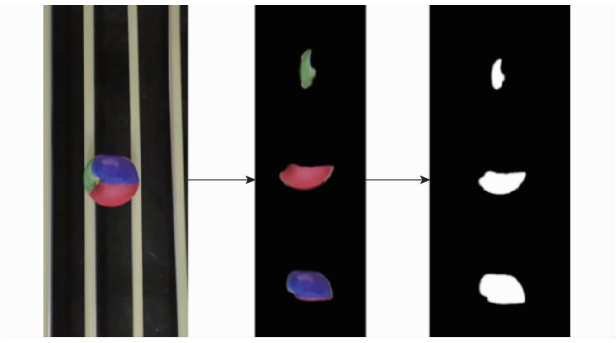

图 7　苹果图像分割图

Fig. 7　Apple image segmentation results

HSV 空间，根据各颜色掩码的阈值进行分割，使用 Matlab 计算分割后不规则图像的面积，最后得出其表面累积着色率，如图 8 所示。通过表面累积着色率量化苹果旋转圈数，苹果表面累积着色率为 100% 时，表示苹果完整旋转一周。

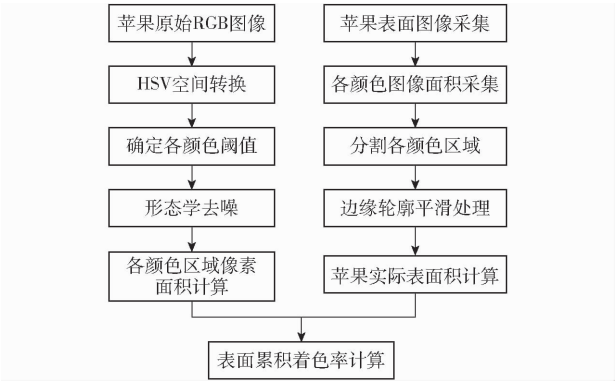

图 8　苹果表面累积着色率计算方法流程图

Fig. 8　Flowchart of cumulative surface coloration rate calculation for apples

1.3.2　苹果表面累积着色率计算

苹果表面累积着色率可以表示各个颜色随时间变化的累积效应，能够直观地展现苹果在传送带上旋转的圈数，并表明整个苹果是否以较为均匀的状态进行旋转。因此，苹果的旋转圈数可通过表面累积着色率进行量化，定义苹果表面累积着色率为 P，其计算公式为

$$P=\frac{\sum_{i=1}^{n} S_1}{\sum_{k=1}^{3} S_0}\times 100\% \tag{7}$$

式中　n——运动过程中提取的颜色区域数量

k——颜色数量

$\sum_{i=1}^{n} S_1$——单个苹果各颜色像素面积之和

$\sum_{k=1}^{3} S_0$——单个苹果的总像素表面积

1.3.3　旋转矩阵验证法

为分析苹果分选过程中在传送带上的实际旋转

角度,可以利用旋转矩阵法验证其旋转角度。旋转矩阵法是描述三维空间中物体旋转的一种数学方法。通过旋转矩阵,可以精确计算物体在三维空间中的旋转。将苹果运动分解为绕 2 个相互垂直轴的旋转;定义苹果的水平运动方向为 y 轴,对应旋转角度为 α;竖直方向为 x 轴,旋转角度为 β,则绕 y 轴与 x 轴的旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_y(\alpha)$、$\boldsymbol{R}_x(\alpha)$ 分别为

$$\boldsymbol{R}_y(\alpha)=\begin{bmatrix}\cos\alpha & 0 & \sin\alpha\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha\end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{R}_x(\alpha)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta\\ 0 & \sin\beta & \cos\beta\end{bmatrix} \tag{9}$$

合成旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}_x\boldsymbol{R}_y \tag{10}$$

总旋转角度 θ 为

$$\theta=\arccos\left(\left(\cos\alpha+\cos\beta+\cos(\alpha-\beta)-1\right)/2\right) \tag{11}$$

该角度 θ 反映了苹果在分选过程中实际旋转的角度,由于苹果完整旋转一周对应的理论旋转角度为 360°,因此,通过将计算得到的 θ 与 360°进行比较,就可以直观地得到苹果在传送带上实际的旋转圈数。

2 结果与分析

2.1 相机视角下的苹果旋转运动分析

2.1.1 苹果图像采集数量分析

为量化传送带运动速度对苹果图像采集效果的影响,将大、中、小 3 种果径的苹果依次置于传送带上料端,在表 1 所列的 9 组速度组合下运行传送带,相机在苹果运动时开始拍摄,采集到的有效苹果样本图像数量如图 9 所示。

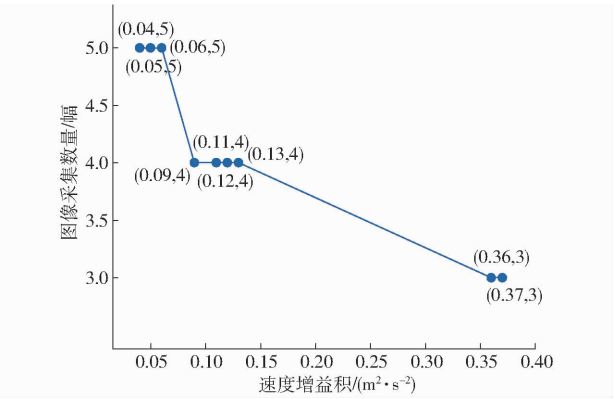

图 9 苹果运动图像采集数量

Fig. 9 Number of acquired apple motion images

当速度增益积 Π 在 0.04 ~ 0.06 m^2/s^2 时,每一次传送过程相机获取的图像数量为 5 幅;随着速度增益积不断增加到 0.37 m^2/s^2,传送带速度提高,采集的图像数量由 5 幅逐渐下降到 3 幅;表明苹果运动速度增加,在相机下的停留时间缩短,而相机的拍摄频率不变,导致可捕捉到的有效图像数量减少。因此,苹果运动速度越快,采集到的有效信息越少,而且图像采集数量在不同果径的条件下保持一致,说明果径变化对图像采集数量没有明显影响。

2.1.2 苹果旋转圈数的评估与验证

为评估苹果在分选过程中的旋转圈数,可以引入表面累积着色率来量化苹果的旋转圈数。选择苹果旋转效果较好的两组速度组合进行分析,由表 2 中表面累积着色率可以看出,当 v_1 保持为 0.16 m/s、v_2 为 0.39 m/s 时,大、中、小型苹果的表面累积着色率分别为 196%、195%、199%,表明苹果在此速度组合下旋转圈数均接近完整的两圈,对应苹果表面有效信息被完整检测到两次;当 v_2 为 0.73 m/s 时,大、中、小苹果的总表面累积着色率分别为 155%、147%、154%,对应旋转圈数约为 1.5 圈。这说明虽然速度提升后苹果仍能维持超过一圈的旋转,但其表面有效信息获取的完整性有所下降;在有效的速度增益积范围内,仍能确保苹果完整表面信息的获取。

表 2 苹果表面累积着色率

Tab. 2 Apple surface cumulative coloration rate

左侧速度	右侧速度	速度增益积	苹果表面累积着色率 P/%		
v_1/(m·s⁻¹)	v_2/(m·s⁻¹)	Π/(m²·s⁻²)	大果	中果	小果
0.16	0.39	0.04	196	195	199
0.16	0.73	0.09	155	147	154

因此,采用旋转矩阵法对苹果的旋转角度进行验证,对比由苹果表面累积着色率所对应的旋转圈数与利用旋转矩阵法求出的总旋转角度所对应的旋转圈数,就可以验证苹果实际是否旋转了对应的圈数,如表 3 所示。v_2 为 0.39 m/s 时,大、中、小型苹果的旋转角度为 680°、685°、695°,对应的旋转圈数分别为 1.89、1.90、1.93,对比表面累积着色率同样接近 2 圈;在 v_2 提高至 0.73 m/s 时,3 类苹果的旋转角度分别为 507°、489°和 516°,计算所得旋转圈数为 1.41、1.36 和 1.43,该结果也与基于表面累积着色率获得的数据较为接近。说明在试验设定的有效速度范围内,该装置能够确保对苹果完整表面信息的稳定获取。

表 3 苹果总旋转角度

Tab. 3 Total rotation angle of apple

左侧速度	右侧速度	速度增益积	总旋转角度 θ/(°)		
v_1/(m·s⁻¹)	v_2/(m·s⁻¹)	Π/(m²·s⁻²)	大果	中果	小果
0.16	0.39	0.04	680	685	695
0.16	0.73	0.09	507	489	516

2.2　基于表面累积着色率的苹果旋转分析

2.2.1　速度大小与苹果旋转关系

为了进一步分析苹果的旋转运动规律，观察基于不同传送速度以及不同果径对苹果运动的影响，需要分析更多不同的速度组合下苹果的运动状态。固定 $v_1=0.16$ m/s，逐步增加 v_2，并对 3 种果径苹果在不同速度下其表面各颜色区域的成像占比进行了统计分析，结果如图 10 所示。分析发现，当两侧传送带的速度差 Δv 处于合理范围内（0.23 m/s≤Δv≤0.57 m/s）时，所有苹果样本表面各颜色在图像中的面积占比均稳定集中在 30% ~36% 区间内。3 种颜色面积累计占比均匀分布表明苹果旋转平稳，分选装置可获取果实完整的表面有效信息。然而，当传送带两侧的速度差超出合理范围，例如将 Δv 进一步提升至 1.08 m/s 时（$v_1=0.16$ m/s、$v_2=1.24$ m/s），苹果在旋转过程中出现了明显的打滑现象。这直接导致其表面不同颜色区域的成像占比变得不均匀，某些颜色区域可能被过度采集，而另一些区域则采集不足。该结果表示，过高的传送带速度会破坏苹果旋转的稳定性，导致表面信息采集的完整性受损。

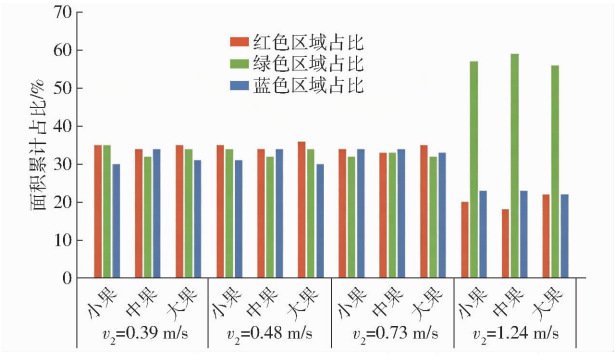

图 10　3 种果径苹果在不同速度下各颜色面积累计占比

Fig. 10　Cumulative proportion of each color for three apple diameters at different speeds

苹果田间现场分选过程中，受传送带长度的制约，需将传送带速度，尤其是传送带两侧速度差 Δv，控制在上述合理的区间之内，使得苹果均匀、稳定地传送旋转，以获取良好的果实图像采集效果。

2.2.2　果径大小对苹果旋转影响

为明确苹果果径大小是否为其旋转行为的影响因素，本研究对比了在多种不同速度组合下，大、中、小 3 种果径苹果的表面累积着色率，详细数据如表 4 所示。通过对同一速度差、速度增益积下不同果径苹果的累积着色率进行比较分析，经过计算发现：无论是大果、中果还是小果，在满足速度差与速度增益积的条件下，各果径的苹果旋转圈数均大于一圈，且表面累积着色率相差不超过 8 个百分点，能确保获取苹果完整表面信息，其表面累积着色率所反映出的旋转程度均未表现出明显的差异。

表 4　不同速度下苹果表面累积着色率

Tab. 4　Apple cumulative coloration rate at different speeds

速度差 Δv/（m·s^{-1}）	速度增益积 Π/（m^2·s^{-2}）	苹果表面累积着色率/%		
		大果	中果	小果
0.23	0.04	196	195	199
0.32	0.05	161	167	168
0.57	0.09	155	147	154
0.27	0.06	150	152	156
0.52	0.11	148	147	145
0.34	0.13	135	137	140
0.25	0.12	122	126	129
0.76	0.36	72	75	78
0.51	0.37	64	67	66

例如，在速度增益积 $\Pi=0.04$ m^2/s^2 时，三者着色率极为接近；在速度增益积 $\Pi=0.12$ m^2/s^2 时，三者表面累积着色率同样以相近的幅度下降至 120% ~130% 的区间。这一系列数据一致地表明，在本试验所采用的传送带结构与速度控制方式下，苹果的果径大小并非影响其旋转运动的关键因素。

在表中可以进一步得出两侧传送带的最优速度差与速度增益积区间：速度差 Δv 在 0.23 ~0.57 m/s 区间且速度增益积 Π 在 0.04 ~0.13 m^2/s^2 内时，苹果表面累积着色率维持在 100% 以上，且随着速度增益积的增加，苹果表面累积着色率降低不超过 38%，说明在最优区间内苹果至少能够完整旋转一圈。速度增益积 Π 超过 0.36 m^2/s^2 时，两侧传送带的速度过快，会出现打滑现象，导致苹果表面有效信息采集不完整。在苹果田间现场分选工况条件下，由于地形不平整，速度差与速度增益积过大会直接引发设备振动加剧，从而影响苹果在传送过程中的旋转稳定性。可进一步优化速度差和速度增益积的取值范围并在机架底部增加可调式支撑脚或减震垫，以适应不平地面。传送带材质宜选用耐磨、防滑、易清洁的弹性橡胶，防止振动对果实表皮的损伤。而在最优速度差与速度增益积区间内，3 种果径的苹果都能至少旋转一圈，可以保证表面信息的完整获取。这一结论对于面向多尺寸规格水果的自动化分选设备设计具有积极意义，意味着在合理的机械与控制系统设计下，可以不必针对水果尺寸的差异对旋转机构进行复杂的调整，有利于简化设备、提高通用性。

3　结论

（1）提出了一种基于颜色分割的苹果表面累积着色率计算方法，采用三等分涂色法对苹果进行涂

色并采集运动图像,以苹果运动图像总像素面积与苹果总表面积的比值作为苹果表面累积着色率,从而量化苹果旋转圈数。

(2)采用旋转矩阵法验证苹果实际旋转角度,两侧传送带速度差在 0.23 ~ 0.57 m/s 范围内且速度增益积在 0.04 ~ 0.13 m^2/s^2 内时,单个苹果至少能够完整旋转一圈,表明分选过程能有效获取苹果完整表面信息。当速度增益积超过上述范围时会出现打滑现象,导致苹果表面信息采集不完整。

(3)当速度增益积逐渐增加时,相机捕捉到的苹果图像数量会逐渐减少,表明采集到的苹果表面有效信息减少,苹果旋转圈数降低不超过 38%,但旋转圈数仍维持一圈以上,可获取苹果完整表面信息;在相同的速度增益积条件下,不同果径苹果的表面累积着色率差异不超过 8 个百分点,且对应的旋转圈数相近。这说明果径大小对苹果旋转运动的影响整体上较小。

(4)整体而言,本文针对苹果田间分选过程中果实完整表面信息获取难题,设计了差速式苹果分选装置,提出了基于苹果表面累积着色率的旋转运动量化方法,通过运动学分析与试验验证明确了装置最优运行参数区间,可实现运动果实完整表面信息在线采集和量化分析,为苹果田间现场分选提供有效的技术手段和装备支持。

参 考 文 献

[1] 苗荣慧, 李港澳, 黄宗宝, 等. 基于 YOLO v7 - ST - ASFF 的复杂果园环境下苹果成熟度检测方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 219 - 228.
Miao Ronghui, Li Gang'ao, Huang Zongbao, et al. Maturity detection of apple in complex orchard environment based on YOLO v7 - ST - ASFF[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 219 - 228. (in Chinese)

[2] 李翠明, 杨柯, 申涛, 等. 基于改进 Faster R - CNN 的苹果采摘视觉定位与检测方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 47 - 54.
Li Cuiming, Yang Ke, Shen Tao, et al. Vision detection method for picking robots based on improved Faster R - CNN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 47 - 54. (in Chinese)

[3] 邵志明, 王怀彬, 董志城, 等. 基于近红外相机成像和阈值分割的苹果早期损伤检测[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊 1): 134 - 139.
Shao Zhiming, Wang Huaibin, Dong Zhicheng, et al. Early bruises detection method of apple surface based on near infrared camera imaging technology and image threshold segmentation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(S1): 134 - 139. (in Chinese)

[4] 何进荣, 石延新, 刘斌, 等. 基于 DXNet 模型的富士苹果外部品质分级方法研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 379 - 385.
He Jinrong, Shi Yanxin, Liu Bin, et al. External quality grading method of Fuji apple based on deep learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 379 - 385. (in Chinese)

[5] Xu B, Cui X, Ji W, et al. Apple grading method design and implementation for automatic grader based on improved YOLOv5[J]. Agriculture, 2023, 13(1): 124.

[6] James C. Deep learning continues growth in machine vision[J]. Vision Systems Design, 2020, 25(2): 20.

[7] Yu J F, Zhang Z, Li Y F, et al. In-field grading and sorting technology of apples: a state-of-the-art review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109383.

[8] Wang Y F, Jin X Y, Zheng J, et al. An energy-efficient classification system for peach ripeness using YOLOv4 and flexible piezoelectric sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 210: 107909.

[9] 张立杰, 周舒骅, 李娜, 等. 基于改进 SSD 卷积神经网络的苹果定位与分级方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 223 - 232.
Zhang Lijie, Zhou Shuhua, Li Na, et al. Apple location and classification based on improved SSD convolutional neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 223 - 232. (in Chinese)

[10] Rezaei P, Hemmat A, Shahpari N, et al. Machine vision-based algorithms to detect sunburn pomegranate for use in a sorting machine[J]. Measurement, 2024, 232: 114682.

[11] Olorunfemi O B, Nwulu I N, Adebo A O, et al. Advancements in machine visions for fruit sorting and grading: a bibliometric analysis, systematic review, and future research directions[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 16: 101154.

[12] Han B, Zhang J J, Almodfer R, et al. Research on innovative apple grading technology driven by intelligent vision and machine learning[J]. Foods, 2025, 14(2): 258.

[13] 李卫, 赵文杰, 朱恒旭, 等. 基于 DEM - MBD 的变螺距式马铃薯分级装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 94 - 104.
Li Wei, Zhao Wenjie, Zhu Hengxu, et al. Design and experiment of variable pitch potato grading devices based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 94 - 104. (in Chinese)

(下转第 328 页)

Computers, 2018, 35(7): 1921 - 1928,1936. (in Chinese)
[17] 吴艳霞,梁楷,刘颖,等.深度学习 FPGA 加速器的进展与趋势[J].计算机学报,2019,42(11):2461 - 2480.
Wu Yanxia, Liang Kai, Liu Ying, et al. Progress and trends of deep learning FPGA accelerators[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(11): 2461 - 2480. (in Chinese)
[18] 段瑞枫,陈艳,洪凯,等.基于 PCIe 级联网口的农业监测视频高速传输系统研究[J].农业机械学报,2024,55(3):203 - 212.
Duan Ruifeng, Chen Yan, Hong Kai, et al. Research on high-speed transmission system for agricultural monitoring video based on PCIe-level network interface[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 203 - 212. (in Chinese)
[19] Howard A G, Zhu M, Chen B, et al. Mobilenets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications[PP/OL]. V1. arXiv(2017 - 04 - 17)[2026 - 09 - 20]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861.
[20] Hinton G E, Vinyals O, Dean J. Distilling the knowledge in a neural network[PP/OL]. V1. arXiv (2015 - 03 - 09)[2026 - 09 - 20]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.02531.
[21] 卢冶,陈瑶,李涛,等.面向边缘计算的嵌入式 FPGA 卷积神经网络构建方法[J].计算机研究与发展,2018,55(3):551 - 562.
Lu Ye, Chen Yao, Li Tao, et al. A method for constructing embedded fpga convolutional neural networks for edge computing [J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(3): 551 - 562. (in Chinese)
[22] 高杨,曹仰杰,段鹏松.神经网络模型轻量化方法综述[J].计算机科学,2024,51(增刊 1):23 - 33.
Gao Yang, Cao Yangjie, Duan Pengsong. A review of neural network model lightweight methods[J]. Computer Science, 2024, 51(S1): 23 - 33. (in Chinese)
[23] 余子健,马德,严晓浪,等.基于 FPGA 的卷积神经网络加速器[J].计算机工程,2017,43(1):109 - 114,119.
Yu Zijian, Ma De, Yan Xiaolang, et al. FPGA-based convolutional neural network accelerator[J]. Computer Engineering, 2017, 43(1): 109 - 114,119. (in Chinese)
[24] Huang G, Liu Z, Van DerMaaten L, et al. Densely connected convolutional networks[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 4700 - 4708.
[25] He K, Zhang X, Ren S, et al. Deep residual learning for image recognition[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 770 - 778.
[26] Sandler M, Howard A, Zhu M, et al. Mobilenetv2: inverted residuals and linear bottlenecks[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 4510 - 4520.
[27] Zhang X, Zhou X, Lin M, et al. An extremely efficient convolutional neural network for mobile devices[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018:6848 - 6856.

(上接第 150 页)

[14] 赵小霞, 李志强. 基于 PLC 和机器视觉的水果自动分级系统研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(8): 75 - 79.
Zhao Xiaoxia, Li Zhiqiang. Research on fruit automatic grading system based on PLC and machine vision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(8): 75 - 79. (in Chinese)
[15] Sofu M M, Er O, Kayacan M C, et al. Design of an automatic apple sorting system using machine vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 395 - 405.
[16] 熊玮, 周礼辰, 余豪, 等. 薄皮果蔬分选技术与设备研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8): 665 - 683.
Xiong Wei, Zhou Lichen, Yu Hao, et al. Review of sorting technologies and equipment for thin-skinned fruits and vegetables [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 665 - 683. (in Chinese)
[17] Lu Y Z, Lu R F. Using composite sinusoidal patterns in structured-illumination reflectance imaging (SIRI) for enhanced detection of apple bruise[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 199: 54 - 64.
[18] Liu X H, Zhang Z, Yu J F, et al. Design, integration, and evaluation of a low-cost system for automatic apple picking and infield sorting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 239: 110933.
[19] Kumar C S, Subeesh A, Dubey K, et al. Development of an optimally designed real-time automatic citrus fruit grading-sorting machine leveraging computer vision-based adaptive deep learning model [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 120: 105826.
[20] Pothula A K, Zhang Z, Lu R F. Evaluation of a new apple in-field sorting system for fruit singulation, rotation and imaging [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 208: 107789.
[21] Mizushima A, Lu R F. Cost benefits analysis of in-field presorting for the apple industry[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(1): 33 - 40.
[22] Zhang Z, Pothula A K, Lu R F. Development and preliminary evaluation of a new bin filler for apple harvesting and in-field sorting machine[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(6): 1839 - 1849.
[23] Flemmer C, Bakker H, Flemmer R. Analysis of the stochastic excursions of tumbling apples[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188: 106362.