



余江帆, 周龙, 张昭, 蒋祚琛, 李云霞, 芮照钰, 张漫, 李旭, 袁栋栋. 基于苹果朝向的最大横切面直径检测方法[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(05): 125-134.
YU Jiangfan, ZHOU Long, ZHANG Zhao, JIANG Zuochen, LI Yunxia, RUI Zhaoyu, ZHANG Man, LI Xu, YUAN Dongdong. Maximum cross-sectional diameter detection method based on the orientation of apples[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(05): 125-134.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.05.12

基于苹果朝向的最大横切面直径检测方法

余江帆¹ 周龙² 张昭^{1*} 蒋祚琛³ 李云霞¹ 芮照钰¹
张漫¹ 李旭⁴ 袁栋栋⁵

- (1. 中国农业大学 智慧农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 常州大学 计算机与人工智能学院, 江苏 常州 213164;
3. 中国计量大学 机电工程学院, 杭州 310018;
4. 塔里木大学 信息工程学院, 新疆 阿拉尔 843300;
5. 斯味特果业有限公司, 江苏 宿迁 223725)

摘要 为提高运动苹果的采后分选精度, 设计一种基于苹果朝向的最大横切面直径检测方法。采集苹果在传送杆上多位置、多姿态RGB图像, 利用张氏标定法进行图像畸变校正, 通过颜色分割和形态学处理方法提取苹果区域; 基于R通道分量的梯度变化获取苹果果梗/花萼区中心, 通过对称性判断苹果朝向。计算垂直于朝向的最大直径, 将其作为最大横切面直径; 针对相机投影角增大产生的投影失真问题, 构建投影校对方程以校正检测结果。结果表明: 1) 对60个苹果(富士和黄元帅各30个)的720幅图像进行直径检测, 以单张图像检测结果在±5 mm内作为检测准确的判断标准, 所提出的投影校正算法将单张图像的直径检测准确率从65.3%提升至95.3%。2) 对每个苹果的12张图像的直径检测结果求平均值作为最终果径, 准确率达100%, 其中, 86.7%的富士和93.3%的黄元帅检测直径在±2 mm以内, 均方根误差分别为1.5 mm和1.1 mm。总体结果表明, 本研究提出的最大横切面直径检测方法能够精确检测苹果果径, 可为苹果大小分级提供技术支持, 也为近球形的果蔬分选提供了有效参考。

关键词 苹果采后分选; 苹果朝向; 最大横切面直径; 投影校正

中图分类号 S24

文章编号 1007-4333(2024)05-0125-10

文献标志码 A

Maximum cross-sectional diameter detection method based on the orientation of apples

YU Jiangfan¹, ZHOU Long², ZHANG Zhao^{1*}, JIANG Zuochen³, LI Yunxia¹, RUI Zhaoyu¹,
ZHANG Man¹, LI Xu⁴, YUAN Dongdong⁵

- (1. Key Laboratory of Smart Agriculture System Integration of Ministry of Education,
China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. College of Computer and Artificial Intelligence, Changzhou University, Changzhou 213164, China;
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
4. College of Information Engineering, Tarim University, Alar 843300, China;
5. Sweet Fruit Company Limited, Suqian 223725, China)

Abstract To enhance the postharvest sorting precision of moving apples, a method for detecting the maximum cross-section diameter was devised based on the orientation of the apples. The RGB images of

收稿日期: 2023-10-09

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFE0122600); 世界顶尖涉农大学国际合作交流种子基金(15052001)

第一作者: 余江帆(ORCID: 0000-0002-8794-6012), 硕士研究生, E-mail: 871072025@qq.com。

通讯作者: 张昭(ORCID: 0000-0001-6353-4067), 教授, 博士生导师, 主要从事智慧农业研究, E-mail: zhaozhangcau@cau.edu.cn

apples in various positions were captured and their orientations on the conveyor were acquired. Image distortion correction was performed using Zhang's calibration method, and apple areas were isolated through color segmentation and morphological processing. The center of the apple peduncle/calyx region was determined using the gradient change of the R channel component, and apple orientation was assessed based on symmetry. The maximum diameter perpendicular to the orientation was then calculated as the maximum cross-sectional diameter. To address the projection distortion resulting from the increased camera projection angle, a projection correction equation was formulated to rectify the detection outcomes. The results reveal that: 1) Diameter detection was conducted on 720 images of 60 apples (Fuji and Yellow Marshal each have 30). Single image detection accuracy, defined within ± 5 mm, was employed as the criterion. The proposed projection correction algorithm significantly increased the accuracy from 65.3% to 95.3%. 2) The diameter detection results of 12 images per apple were averaged to determine the final fruit diameter, which achieved a 100% accuracy rate. Notably, the 86.7% of Fuji and 93.3% of Yellow Marshal exhibited a detection diameter within ± 2 mm with root mean square errors of 1.5 mm and 1.1 mm, respectively. Overall, the method proposed in this study accurately detects the diameter of apple fruits. It can offer valuable technical support for apple size grading and be used as a pertinent reference for sorting near-spherical fruits and vegetables.

Keywords apple postharvest sorting; apple orientation; maximum cross-sectional diameter; projection correction

苹果采后分级处理是将苹果按大小、颜色、形状、缺陷等特征进行不同等级的划分,依据分级结果售卖能够达到收益最大化^[1-3]。目前国内通常以大小为主要分级标准,以人工测量苹果果径为主要分级方法。在实际生产中,人工测量方法存在成本高、主观性强等缺点^[4-5],因此,开发苹果果径的自动检测算法具有重要现实意义^[6-8]。

目前,苹果果径自动检测常用的方法主要通过提取苹果的不同外部参数估计苹果果径。赵丹丹等^[9]提取苹果轮廓中两点间距离最长的线作为苹果果径,对500个苹果的果径进行检测发现,其误差率控制在0.7%以下,准确率满足自动分拣装置的需求。张恩宇^[10]基于苹果轮廓拟合区域的最小外接圆,以圆的直径乘上一个比例系数代替果径,其果径测量值的最大绝对误差为1.4 mm。王浩云等^[11]提出了一种基于局部点云的苹果尺寸估计方法,利用粒子群算法将点云数据和苹果模型空间匹配,并基于遗传算法寻找模型最优参数,从而计算苹果外形尺寸,该方法直径估测的平均误差小于2.4 mm。Sofu等^[12]通过分割苹果的4张图像,分别计算苹果区域的长和宽,选取最大值作为苹果的果径。然而以上方法并不能准确表示苹果的果径,且大多只考虑苹果以正放姿态拍摄的情况。在实际分级过程中,运动苹果的姿态随机,不会一直正放于相机的视野中心^[13],加上苹果果形的不规则性,上述方法

会产生较大的误差。

根据GB/T10651—2008《鲜苹果》^[14]的内容,苹果果径指的是最大横切面直径,即垂直于苹果果梗/花萼轴的最大直径。对于苹果最大横切面直径检测,陈艳军等^[15]通过建立苹果最大直径和最大横切面直径的多元线性回归模型,得出基于最大直径计算最大横切面直径的拟合函数,准确率为87.1%。Mizushima等^[16]提出了一种估计苹果最大横切面直径的方法,通过建立半径函数确定果梗/花萼连接线轴向,并求出垂直于此方向的最大直径作为苹果果径。该方法被用于4个苹果品种的果径估计,结果表明误差在 ± 5 mm内的苹果达到98.9%,能够满足分级要求;但该方法需要依靠苹果果梗来确定朝向,而国内许多苹果采摘后果梗较短,从图像上难以观察,该方法并不适用。

对以上研究进行分析可知,目前基于机器视觉的苹果果径检测方法存在2个问题:一是大部分方法未使用国标内容中规定的最大横切面直径作为苹果果径,所提出的方法抗干扰能力差,不适用于实际分级过程。二是现有方法都忽略了投影失真问题^[17-18],即机器视觉获取到的图像都是三维物体的二维平面投影。在苹果正对摄像机中心时,其投影和苹果果径实际值相符。然而,实际应用下苹果通常处于运动状态,不会静置于图像中心^[13]。运动过程中若投影角变大,苹果果径将会与实际值不符。

本研究拟采用机器视觉技术,研究一种苹果多位置、多姿态的最大横切面直径检测方法;简化直径检测步骤,解决投影角度变大引起的投影失真问题,实现苹果果径检测精度和鲁棒性的综合提高,以期苹果分级提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 数据采集

数据采集于田间分级装备平台图像采集室,拍摄对象为新鲜富士苹果和黄元帅苹果,苹果直径为75~105 mm。将苹果以多种姿态置于传送杆不同位置,相机(海康威视MV-CB013-A0UM-C)固定至距传送杆平面465 mm高度进行拍摄,相机覆盖范围400 mm×530 mm。为提高图像质量,保证分割精度,选用2个LED光源进行补光。共对30个富士和30个黄元帅苹果进行采集,每个苹果放在相机视场左侧、中心和右侧各拍4张不同姿态的图像,共12张。60个苹果一共采集图像720张。

1.2 图像畸变校正

相机在成像过程中,由于透镜制造工艺的不完善会使图像产生畸变。透镜畸变中最常见的是径向畸变,其对图像质量影响也最大^[19-20]。物体越远离相机中心畸变程度越严重,对于苹果的大小检测而言会使最终的检测结果产生较大的误差。因此,关于机器视觉技术的研究中,首要工作就是对相机

畸变进行校正。

张氏标定法^[21]利用多张棋盘格图像进行相机校正,该方法的本质是建立真实世界上的物点与二维成像平面上的像点之间的对应关系。相比于其他标定方法,张氏标定法操作简单,精度高,可以满足大部分场合的相机校正。它通过预设棋盘格的尺寸和个数,利用角点检测匹配每一个棋盘格交点的三维点坐标与二维点坐标,最终可以完成从世界坐标系到像素坐标系的单应性变换。本研究采用张氏标定法完成对相机的畸变校正,具体过程如下:棋盘格规格为9×7,格子边长24 mm。相机位置固定不动,通过多次调整棋盘格位置和角度,拍摄20张照片。将棋盘格图像输入至MATLAB相机标定程序中,计算相机的内外参矩阵,利用最小二乘法计算相机畸变系数。最后综合内参矩阵和畸变系数,重新对后续获取到的图像进行校正处理。图像校正前后对比见图1。图像校正后,拍摄棋盘格在相机边缘处和中心处的图像,左中右共3幅。分别利用棋盘格的实际长度 L_R 和像素长度 L_I 求得单位像素长度 P ,取三者平均值得最终的单位像素长度为0.37 mm。单位像素长度的计算公式为:

$$P = \frac{L_R}{L_I} \quad (1)$$

式中: P 为单位像素长度,mm/像素; L_R 为棋盘格实际长度,mm; L_I 为图像中棋盘格的像素长度,像素。



(a) 校正前 Before correction



(b) 校正后 After correction

图1 校正前后的图像

Fig. 1 Images before and after correction

1.3 基于苹果朝向的最大横切面直径测量方法

1.3.1 图像预处理

本研究的关注对象仅为苹果,因此在进行最大横切面直径检测前,首先利用图像分割技术对背景进行过滤并提取感兴趣区域。分级场景下背景的

颜色干扰较小,主要干扰来自于空间内的光照不均匀。由于传送杆上的部分材质较为光滑,光线照射在其表面易发生镜面反射,表面产生强烈白光导致颜色失真。而HSV(Hue, Saturation, Value)的V通道对亮度很敏感,因此被选择作为图像处理的颜色

空间。在初步颜色分割后,利用小面积区域去除、闭运算、孔洞填充等形态学处理方法提取苹果区域(图2)。

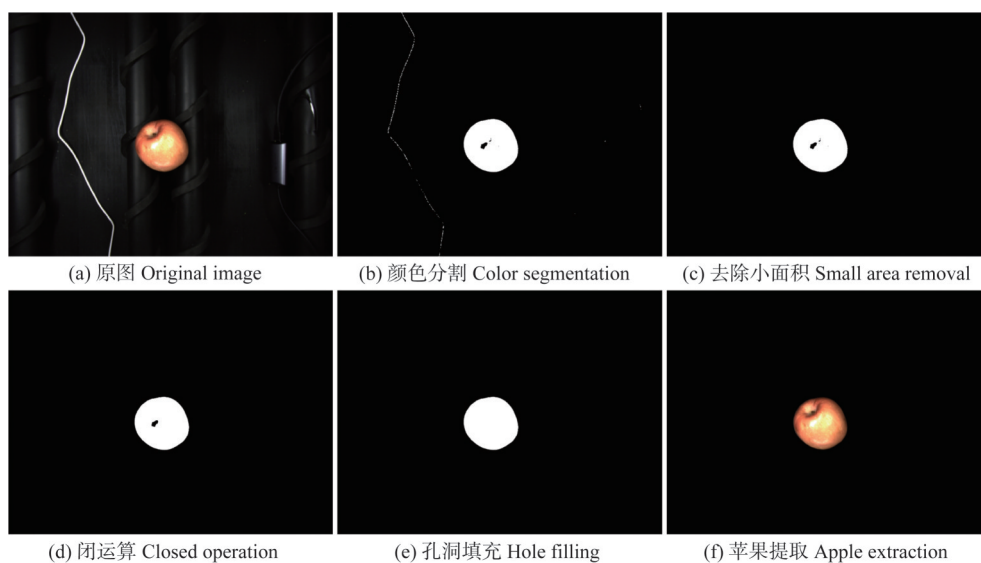


图2 基于颜色分割结合形态学处理提取苹果区域过程

Fig. 2 The process of extracting apple regions based on color segmentation combined with morphological processing

1.3.2 苹果朝向确定

苹果的朝向与其果梗/花萼连接轴的轴向一致,然而在图像中果梗和花萼区域很难同时出现,无法直接找出果梗/花萼区域。根据苹果的近似球体特性,果梗/花萼连接轴近似通过球体中心,具有对称轴的性质,可以将苹果划分成较为对称的两半。因此,苹果朝向可利用对称性来判断。Mizushima等^[15]将苹果轮廓一分为二,计算两段曲线函数的自相关性,满足自相关性最大的一组曲线的两个端点连线即为苹果朝向。然而,由于苹果的不规则性,该方法找出的使其对称性最佳的对称轴并不一定是果梗/花萼轴,即找出的对称轴不一定经过果梗和花萼区域,这直接影响了最大横切面直径的计算。因此,在求取苹果朝向时需要考虑所选取的对称轴是否经过果梗/花萼区中心。本研究提出的判断方法分为2步:1)确定果梗/花萼区中心;2)利用对称性求解苹果朝向。

果梗和花萼区域具有凹陷的特点,其图像的像素强度通常较低,凹陷区域中心强度一般最低。颜色分割、边缘检测等方法易受苹果表面污点、缺陷的影响,导致果梗/花萼区误提取。进一步分析苹果表面像素值分布规律发现,果梗、花萼区域与污点、缺陷的不同之处在于:果梗/花萼区的 R 值和 G 值呈现从区域边缘向区域中心逐渐减小的趋势。由于苹果表面为红色和黄色,为了提高对比度选择

R 通道进行下一步处理。将 R 通道可视化后可以看出,表面大部分区域 $R > 200$,边缘处由于光线较暗 R 值降低(图3(a))。此外,表面存在一块由红色到绿色的渐变区域, R 值相应的由250渐变到50,其中绿色处由于 R 值最小,为果梗/花萼区域中心。根据这一特点,果梗/花萼区中心点的确定可以转换成二维曲面求极小值的问题。此问题可以通过求解多个一维数组的极小值解决,通过对二维图像行遍历和列遍历,得到多个一维数组。针对每个一维数组,求取其中的波谷坐标(图3(b))。最后,计算所有一维数组波谷坐标的平均值作为果梗/花萼区中心,求解出的果梗区域中心坐标见图3(c)。

中心确定后,寻找合适的对称轴作为苹果朝向。对于一个对称物体,其对称轴左右两部分的面积应相等。因此,区域面积也可以作为判断一条轴线是否是对称轴的指标。确定对称轴的具体方法如下:

1)首先提取苹果轮廓的所有点坐标,以 n 的值确定轮廓的遍历起始点(A 点),过 A 点与果梗/花萼区中心点(C 点)做直线 L ,计算公式为:

$$L: \frac{y - y_c}{y_A - y_c} = \frac{x - x_c}{x_A - x_c} \quad (2)$$

式中: x_A, y_A 为点 A 的横坐标和纵坐标; x_c, y_c 为点 C 的横坐标和纵坐标。

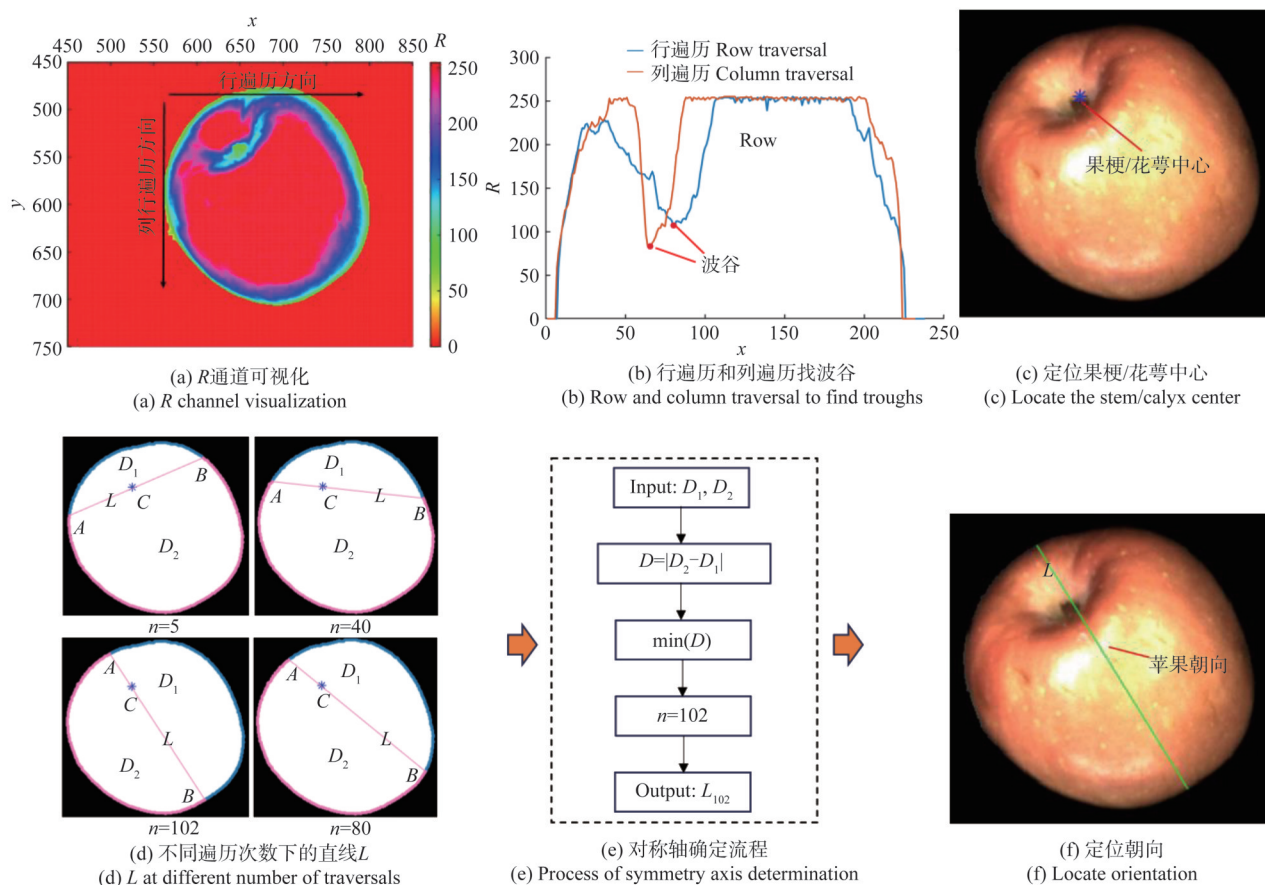
2)直线 L 会经过苹果轮廓点集中的另一个点

(B点), 线段 AB 将苹果划分为 2 个部分: D_1 和 D_2 , 见图 3(d)。分别计算 2 部分的面积并做差, 差值为 D 。

3) 重复上述步骤, 每重复 1 次会产生一组点 A 、 B , 直线 L 以及差值 D 。所有轮廓点遍历结束后, 找

到满足 D 最小的那条直线 L 即为苹果的朝向, 流程见图 3(e)。

本例中当 $n=102$ 时, 即遍历至第 102 个轮廓点时, 求出的直线 L 将苹果划分成两部分的效果最好, 定位的苹果朝向见图 3(f)。



A 和 C 为遍历起始点和果梗/花萼中心; L 为过点 A 和 C 的直线; B 为 L 与苹果轮廓的交点; D_1 和 D_2 为被 L 划分的苹果 2 部分区域面积; D 为 D_1 和 D_2 最小面积差; n 为遍历次数。

A and C are the starting point of traversal and stem/calyx center; L is the line crossing A and C ; B is the intersection of L and apple contour; D_1 and D_2 are the area of the two-part of the apple divided by L ; D is minimum area differences between D_1 and D_2 ; n is number of traversals.

图 3 苹果朝向确定过程

Fig. 3 Process of apple orientation determination

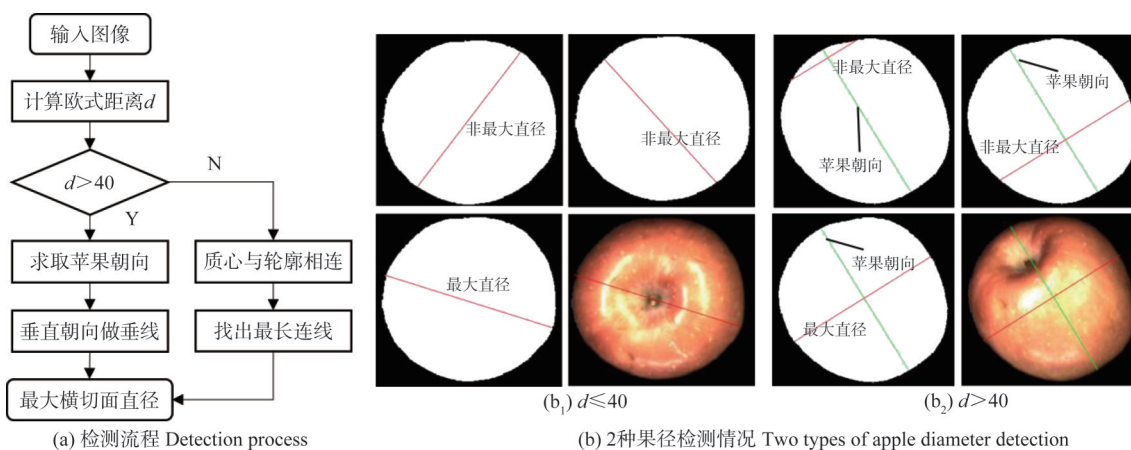
1.3.3 最大横切面直径测量方法

苹果的最大横切面直径检测依据果梗/花萼区位置的不同分为 2 种情况: 1) 当果梗/花萼区中心与苹果质心的欧氏距离 ≤ 40 像素, 认为苹果的果梗/花萼轴的轴向与相机光轴平行, 即苹果正放在相机下方。此时最大横切面直径是苹果区域的最大直径, 可由连接苹果质心点和轮廓点的最长线段求出; 2) 若两者的欧氏距离 > 40 像素, 认为苹果未正放在相机下方。结合已确定的苹果朝向, 从 A 点到

B 点做垂直于苹果朝向的垂线, 垂线段最长的那一条为最大横切面直径。图 4 示出检测流程和 2 种果径检测情况。

1.3.4 投影校正

相机拍摄的图像都是三维物体的二维投影, 图 5 示出其投影失真原理。当苹果位于相机正下方时, 投影角 (φ_1) 较小, 苹果直径在图像上的投影与真实值相近; 当苹果远离相机中心时, 投影角 (φ_2) 较大, 苹果直径在图像上的投影大于真实值。在分级



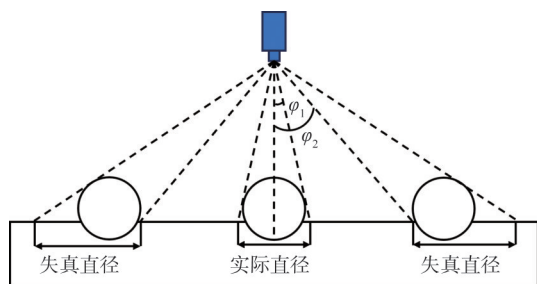
d 为果梗/花萼中心与苹果质心的欧式距离,像素。

d is the Euclidean distance between the center of stem/calyx and the apple centroid, pixel.

图4 检测流程和2种果径检测情况

Fig. 4 Detection process and two types of apple diameter detection

过程中,苹果的位置不断变化,存在多张图像投影角很大的情况,从而影响检测结果。为了解决这一问题,将检测到的最大横切面直径与投影角之间建立联系,构建投影方程以实现直径检测值的校正。



φ_1 和 φ_2 为苹果在不同位置下的投影角。

φ_1 and φ_2 are the projection angles of the apple in different positions.

图5 投影失真原理

Fig. 5 Projection distortion principle

投影方程由成像过程的正视图和侧视图中相机、苹果与传送杆之间的几何关系得出。为了便于分析,本研究使用球体来模拟苹果的成像模式。成像示意图及校正原理见图6,其中,棋盘格标定板所在平面作为成像平面,球体的实际半径为 r 。

依据图6(b)中的已知量结合勾股定理,求出球心到传送杆中心平面距离 $O'C$:

$$O'C = \sqrt{(r+24)^2 - 45^2} \quad (3)$$

式中: r 为待求苹果果径,mm。

由三角形相似等理论可得:

$$\beta = \arctan \frac{OA}{h_1} \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan \frac{OB}{h_1} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\beta + \varphi}{2} \quad (6)$$

式中: O 为相机中心到成像平面的映射点; OA 为球体投影左边界点到映射点的距离,mm; h_1 为相机至成像平面的距离,mm; OB 为球体投影右边界点到映射点的距离,mm; β 、 φ 和 α 分别为相机光轴与 MA 、 MO' 、 MB 的夹角,°。

联立式(3)~(6)求 r :

$$O'F = \frac{r}{\cos \varphi} \quad (7)$$

$$DB = OA + AB - h_1 \times \tan \alpha \quad (8)$$

$$OM = h_1 \quad (9)$$

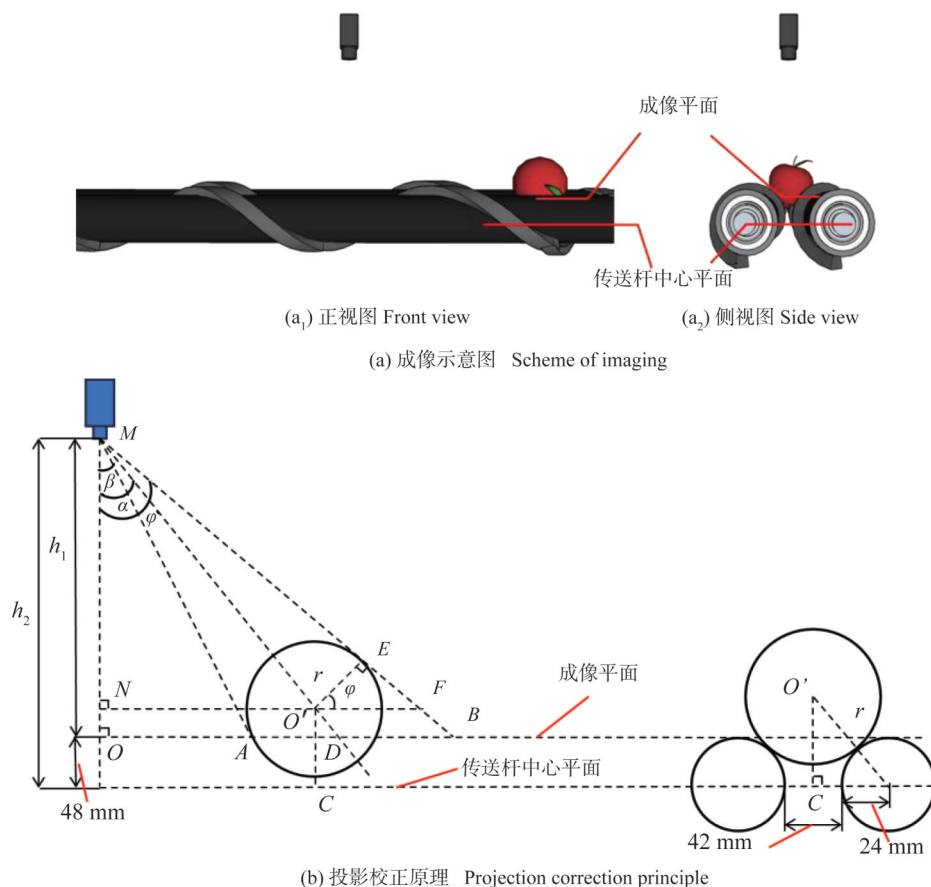
$$MN = h_1 - (O'C - 48) \quad (10)$$

式中: $O'F$ 为球体中心到球体投影右切线的水平距离,mm; AB 为投影左边界点到投影右边界点的距离,即为最大横切面直径检测值,mm; MN 为相机中心到球体中心的距离,mm。

由相似理论可得:

$$\frac{O'F}{DB} = \frac{MN}{OM} \quad (11)$$

结合式(7)~(10)建立实际半径 r 与检测直径 AB 之间的方程:



h_1 和 h_2 分别为相机至成像平面和传送杆中心平面的距离,mm; M 为相机中心; N 为 M 在球体中心平面的映射点; O 为 M 在成像平面的映射点; O' 为球体中心; A 和 B 为球体投影左、右边界点; r 为待求苹果果径,mm; β 、 φ 和 α 分别为相机光轴与 MA 、 MO' 、 MB 的夹角,°; E 、 F 分别为 MB 与球体表面和中心平面的交点; D 为 MO' 延长线与成像平面的交点; C 为 O' 在传送杆中心平面的映射点。

h_1 和 h_2 are the distances from the camera to the imaging plane and the center plane of the conveyor, mm; M is the center of the camera; N is the mapping point of M in the center plane of the sphere; O is the mapping point of M in the imaging plane; O' is the center of the sphere; A and B are the left and right boundary points of the sphere projection; r is the diameter of the apple to be sought, mm; β , φ and α are the angles between the camera's optical axis and MA , MO' and MB , °; E and F are the intersection points between MB and the surface and central plane of the sphere, respectively. D is the intersection point of the MO' extension line and the imaging plane; C is the mapping point of O' in the center plane of the conveyor.

图6 成像示意图及投影校正原理

Fig. 6 Scheme of imaging and projection correction principle

$$r = \frac{[h_1 - (O'C - 48)] \times \cos \varphi \times (OA + AB - h_1 \times \tan \alpha)}{h_1} \quad (12)$$

式中,未知量为 r 和 $O'C$,其余参数均为固定值或可检测值,据式(3)知 $O'C$ 可由 r 求出,因此结合式(3)与式(12)可求出实际半径 r 。

2 结果与讨论

2.1 最大横切面直径检测结果

苹果的果径由人工使用游标卡尺测量作为真

值,参照GB/T10651—2008《鲜苹果》的内容,垂直苹果果梗/花萼轴的轴向每隔36°测量1次,每个苹果共测量10次,取其中最大值为最大横切面直径。60个苹果的真实果径分布在75~105 mm,涵盖了市面上富士和黄元帅常见的大小。对于每个苹果,计算机采集到12张不同姿态和位置的图像。利用提出的最大横切面直径检测方法对每张图像进行检测,最后对12个结果取平均值作为苹果最终的最大横切面直径。

算法检测的最大横切面直径与真实值误差均

在 $\pm 5\text{ mm}$ 之内,其中86.7%的富士和93.3%的黄元帅果径检测误差在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内。结果表明,所提出的方法具有较高的检测精度,可满足实际分级的精度要求。

2.2 投影校正前后结果对比

由每个苹果的12张图像检测结果(图7(a)和(c))可以明显看出投影校正后的结果更加趋于实际直径,校正前检测结果在 $\pm 5\text{ mm}$ 以内的图像占65.3%,而校正后达到95.3%。

将每个苹果的12张图像的直径检测结果取平均值作为最终果径,校正前后的果径检测结果见图7(b)和图7(d)。对于富士苹果,校正前所计算出的果径与真实值之间偏差较大,均方根误差为4.6 mm;而校正后的结果明显更靠近真实值,误差均在 $\pm 5\text{ mm}$ 以内,86.7%的苹果检测误差在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内,均方根误差为1.5 mm。对于黄元帅苹果,校正前所计算的果径与真实值之间偏差较小,均方根误差为3.3 mm;校正后误差均在 $\pm 5\text{ mm}$ 以内,

93.3%的苹果检测误差在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内,均方根误差为1.1 mm。黄元帅的检测效果优于富士,这可能是由于深色背景下,黄元帅的颜色对比度较强,有较好的分割效果。此外,黄元帅的果形相对富士较规则,最大横切面直径的检测效果好。

校正前苹果的检测果径基本都大于真实值,造成这一现象的原因与苹果位置有关:当苹果远离相机中心时,相机投影角较大,从而检测到的果径会大于实际值。所提出的投影校正方法能够缩小检测结果使其趋近于真实值,并且将检测结果误差校正至 $\pm 2\text{ mm}$ 以内,满足实际分级需求。此外,由于苹果的姿态不同,在图像上呈现的面也各不相同,基于单一面所求的最大横切面直径会存在差别。图7(a)和图7(c)已经表明即使经过投影校正,同一苹果的不同图像的检测结果也会存在波动,并不会紧密的分布在真实值附近。在实际分级过程中,苹果从分级入口到出口需要一定时间,该时间段内相

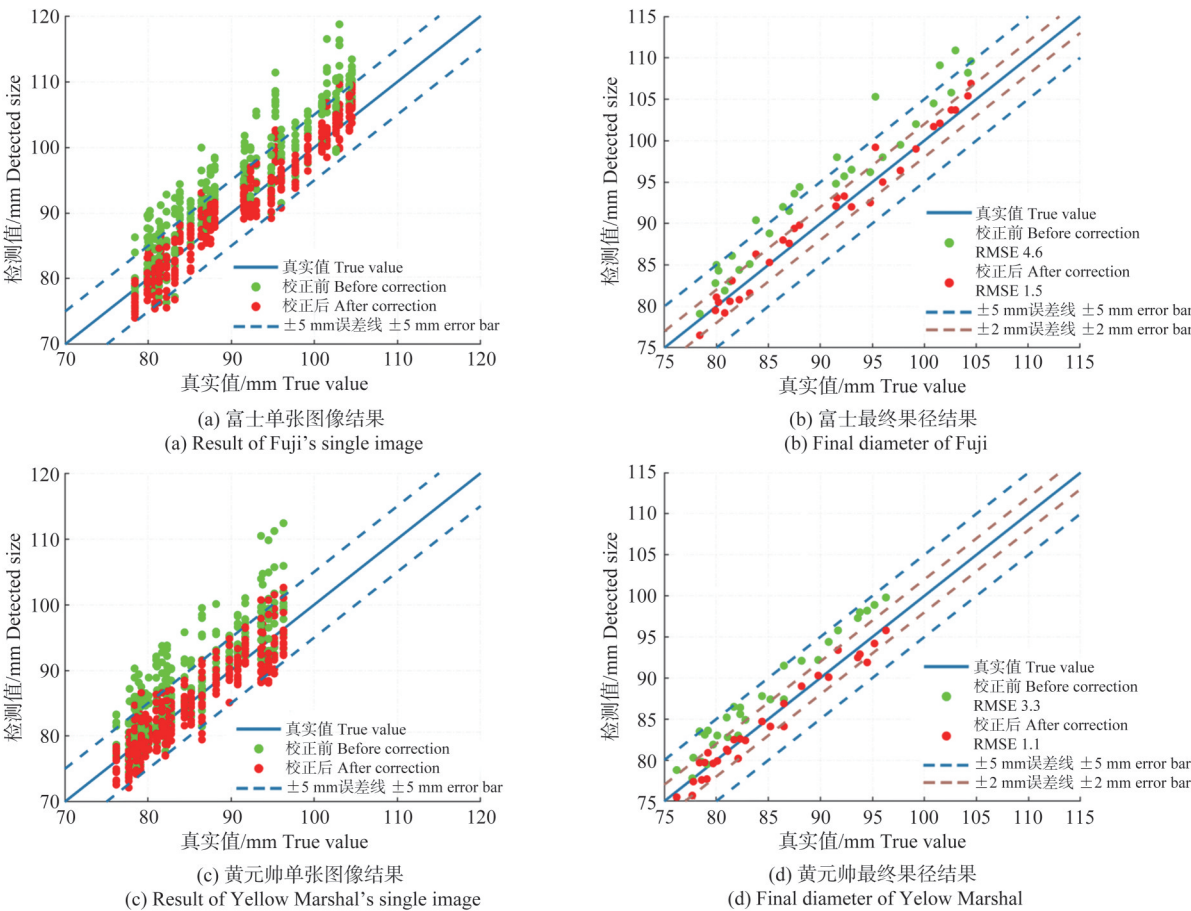


图7 苹果图像校正前后果径检测结果对比

Fig. 7 Comparison of diameter detection results before and after correction for apple image

机可以捕获多张图像。因此,取12个校正结果的平均值作为最终检测直径能提高检测精度且符合实际应用。

3 结束语

本研究以苹果分级中的大小检测为切入点,针对运动苹果姿态和位置多变及投影失真问题,研究了一种基于苹果朝向的最大横切面直径检测方法,并开发了投影校正算法解决了投影角增大引起的果径失真问题。采集了富士和黄元帅的多姿态多位置图像,并进行了算法性能试验研究,主要结论如下:

1)单张图像的试验结果表明:60个苹果的720幅图像中,检测误差在 ± 5 mm以内的图像达到95.3%。投影校正算法将单张图像的检测结果精确度从65.3%提升至95.3%,表现出了优异的性能。

2)苹果果径检测的试验结果表明:所提出的果径检测方法的检测误差均在 ± 5 mm以内,其中86.7%的富士和93.3%的黄元帅检测结果误差在 ± 2 mm以内,均方根误差分别为1.5 mm和1.1 mm。该果径检测方法解决了实际分级中,苹果的姿态和位置多变导致检测精度不高的问题和投影角增大对检测结果造成的失真问题。采用最大横切面直径作为检测参数符合GB/T10651—2008《鲜苹果》对苹果果径的定义,能够应用于实际大小分级过程。

当前研究仍存在一定不足,未来的工作将从以下几个方面展开:

1)人为摆放的苹果姿态不足以涵盖真实运动过程中的所有姿态,拟采集苹果在传送杆上的运动视频,分帧检测苹果果径,以进一步提高算法鲁棒性;

2)基于不同果实位置的单位像素长度不同,探究二者之间的非线性关系,以提高果径检测精度;

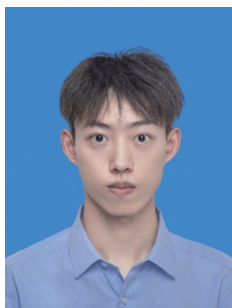
3)针对单通道分级效率受限的问题,开发多通道的苹果最大横切面直径算法以提高吞吐量,改善分级系统的性能。

参考文献 References

- [1] Zhang Z, Lu Y, Lu R. Development and evaluation of an apple infield grading and sorting system [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 180: 111588
- [2] Abbaspour-Gilandeh Y, Aghabara A, Davari M, Maja J M. Feasibility of using computer vision and artificial intelligence techniques in detection of some apple pests and diseases [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(2): 906
- [3] Fan S X, Liang X T, Huang W Q, Zhang V J L, Pang Q, He X, Li L J, Zhang C. Real-time defects detection for apple sorting using NIR cameras with pruning-based YOLOV4 network [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 193: 106715
- [4] Bhargava A, Bansal A. Fruits and vegetables quality evaluation using computer vision: A review [J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2021, 33(3): 243-257
- [5] Lu R, Zhang Z, Pothula A. Innovative technology for enhancing apple harvest and postharvest handling efficiency [J]. *Fruit Q*, 2017, 25(2): 11-14
- [6] 黄辰, 费继友. 基于图像特征融合的苹果在线分级方法 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 285-291
Huang C, Fei J Y. Online apple grading based on decision fusion of image features [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering*, 2017, 33(1): 285-291 (in Chinese)
- [7] 沈宝国, 魏新华, 尹建军. 基于最小外接圆法的苹果直径检测技术 [J]. 农机化研究, 2011, 33(12): 131-134
Shen B G, Wei X H, Yin J J. Apple Diameter Detection Based on Minimum Circumcircle Method [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(12): 131-134 (in Chinese)
- [8] 岳琳茜, 李文宽, 杨晓峰, 李海芳, 杨其晟. 基于改进YOLOv4的苹果检测与果径估测方法 [J]. 激光杂志, 2022, 43(2): 58-65
Yue L X, Li W K, Yang X F, Li H F, Yang Q S. Apple detection and fruit diameter estimation method based on improved YOLOv4 [J]. *Laser Journal*, 2022, 43(2): 58-65 (in Chinese)
- [9] 赵丹丹, 艾医. 基于计算机视觉的苹果大小检测方法研究 [J]. 农机化研究, 2022, 44(07): 206-209, 214
Zhao D D, Ai Y. Research on apple size detection method based on computer vision [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(7): 206-209, 214 (in Chinese)
- [10] 张恩宇. 苹果田间分级关键技术研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020
Zhang E Y. Research on key technologies of apple field grading [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020 (in Chinese)
- [11] 王浩宇, 闫茹琪, 周小莉, 马仕航, 胡皓翔, 徐焕良. 基于局部点云的苹果外形指标估测方法 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 205-213
Wang H Y, Yan R Q, Zhou X L, Ma S H, Hu H X, Xu H L. Apple shape index estimation method based on local point cloud [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 205-213 (in Chinese)
- [12] Sofu M M, Er O, Kayacan M C, Cetisli B. Design of an automatic apple sorting system using machine vision [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 127: 395-405
- [13] 冯斌, 汪懋华. 基于计算机视觉的水果大小检测方法 [J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 73-75
Feng B, Wang M H. Detecting method of fruit size based on computer vision [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2003, 34(1): 73-75 (in Chinese)
- [14] GB/T 10651—2008 鲜苹果 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
GB/T 10651—2008 Fresh apple [S]. Beijing: China Standard Press, 2008 (in Chinese)
- [15] 陈艳军, 张俊雄, 李伟, 任永新, 谭豫之. 基于机器视觉的苹果最大横切面直径分级方法 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 284-288
Chen Y J, Zhang J X, Li W, Ren Y X, Tan Y Z. Grading method of apple by maximum cross-sectional diameter based on computer vision [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(2): 284-288 (in Chinese)

- [16] Mizushima A, Lu R. A low-cost color vision system for automatic estimation of apple fruit orientation and maximum equatorial diameter [J]. *Transactions of the ASABE*, 2013, 56(3): 813-827
- [17] 何东健, 杨青, 薛少平, 赵静. 果实缺陷面积的计算机视觉测定研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(4): 161-165
- He D J, Yang Q, Xue S P, Zhao J. Computer vision method for measuring defect area of sphere-fruits [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1997, 13(4): 161-165 (in Chinese)
- [18] 刘婷, 芮成杰, 李海涛, 张绍英. 球形水果表面斑块成像失真度控制与实验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 221-228
- Liu T, Rui C J, Li H T, Zhang S Y. Image distortion control and experiment of spherical fruit surface plaque [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 221-228 (in Chinese)
- [19] Duane C B. Close-range camera calibration [J]. *Photogramm. Engng.*, 1971, 37(8): 855-866
- [20] Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344
- [21] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]. In: *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. Kerkyra: IEEE, 1999: 666-673

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 余江帆,男,硕士研究生,本科毕业于江西理工大学自动化专业,现就读于中国农业大学信息与电气工程学院农业电气化与自动化专业,获校级二等奖学金1项。



通讯作者简介: 张昭,男,博士,中国农业大学信息与电气工程学院教授,中国农业大学“杰出人才”,中国科协海智计划特聘专家, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 副主编,《农业工程学报》海外编委,《智慧农业》青年编委, *Information Process in Agriculture* 编委。主要从事无人农场自主作业机器人的研发与应用,主持、在研课题6项。获美国农业与生物工程师协会“雨鸟奖”,“宿迁英才”雄鹰计划。在相关领域出版英文学术专著3部,授权美国专利1项,近年发表SCI/EI收录论文40余篇。