

基于少数参数表征的西红柿形态三维几何建模

Three-dimensional geometric modeling of tomato morphology based on representation of few parameters

刘莹¹ 王满生² 曲文娟¹ 马海乐¹

LIU Ying¹ WANG Man-sheng² QU Wen-juan¹ MA Hai-le¹

潘忠礼³ 蒋群辉⁴

PAN Zhong-li³ JIANG Qun-hui⁴

(1. 江苏大学食品物理加工研究院, 江苏 镇江 212013; 2. 中国农业科学院麻类研究所,
湖南 长沙 410205; 3. 美国加州大学戴维斯分校生物与农业工程系, 美国 加州 95616;

4. 镇江美博红外科技有限公司, 江苏 镇江 212013)

(1. Institute of Food Physical Processing, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

2. Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changsha, Hunan 410205,

China; 3. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis,

California 95616, USA; 4. Maybo Innovation Co., Ltd., Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

摘要:目的: 实现西红柿形状的三维可视化模拟。方法: 推导了一个新的西红柿形状方程, 该形状方程以半径为函数, 包含尺寸参数和形状描述系数。通过测量西红柿的尺寸参数计算几何模型的形状描述系数(a 、 b 、 c_1 、 c_2), 建立西红柿的三维几何模型, 并建立其与西红柿质量和高度的关联。此外通过质量和表面积的实测值与预测值比较来验证该模型的拟合程度。结果: 根据尺寸参数和形状描述系数建立的西红柿三维几何模型可以精确直观地描述西红柿的茎端局部缩进特征, 计算获得形状描述系数 a 、 b 、 c_1 、 c_2 的范围分别为 21.78~28.58, 30.50~34.54, 0.19~0.53, 0.04~0.31 mm, 提高了模型的适用性。研究发现系数 a 和 b 与西红柿的高度和质量之间具有较高的线性相关性($R^2 > 0.85$), 表明该方程可以用少量的参数迅速描述出西红柿的重要形状特征; 质量和表面积的实测值与模型预测值之间的相对百分误差(E_{RPE})为

5.46%和10.24%, R^2 为 0.85 和 0.81, 表明所建立的模型可准确量化西红柿的质量和表面积等几何属性。结论: 提出的西红柿三维几何建模方法能够直观、迅速且精确地表征西红柿的几何形状, 适用性强, 在西红柿相关的计算机辅助设计和仿真中具有良好的应用潜力。

关键词: 西红柿; 三维几何模型; 形态

Abstract: **Objective:** This study aimed to realizing the three-dimensional visual simulation of the morphological structure of tomatoes. **Methods:** A new tomato shape equation was derived, which took the radius as a function and included size parameters and shape description coefficients. By calculating the geometric model description coefficients (a , b , c_1 , c_2) based on the measured values of the main size parameters of the tomatoes, a three-dimensional geometric model of tomatoes was developed and established their correlation with the weight and height of the tomatoes. Moreover, the accuracy of the model was verified by comparing the measured and predicted values of weight and surface area. **Results:** The three-dimensional geometric model of tomatoes established based on the size parameters and shape description coefficients could accurately and intuitively describe the local indentation characteristics of the stem ends of tomatoes. The ranges of shape description coefficients a , b , c_1 , and c_2 were 21.78~28.58, 30.50~34.54, 0.19~0.53 and 0.04~0.31 mm, respectively, applicability of the model. The study found that coefficients a and b had a high linear correlation with the height and weight of tomatoes ($R^2 > 0.85$), indicating that the equation

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(编号:2017YFE0105300);江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(编号:NY-010);湖南省自然科学基金(编号:2020JJ5640);中央级科研院所基本科研业务费专项(编号:161024202105)

作者简介:刘莹,女,江苏大学在读博士研究生。

共同第一作者:王满生,男,中国农业科学院麻类研究所助理研究员,博士。

通信作者:曲文娟(1980—),女,江苏大学教授,博士。

E-mail: wqu@ujs.edu.cn

收稿日期:2021-06-03

could capture important shape characteristics of tomatoes through simple measurements. The relative percentage error (E_{RPE}) between the measured values and the model predicted values of weight and surface area was 5.46% and 10.24%, and R^2 was 0.85 and 0.81, which indicated that the established equations and models could be used to quantify the geometric properties of tomatoes such as weight and surface area. **Conclusion:** The three-dimensional geometric modeling method of tomatoes proposed in this paper could intuitively, quickly and accurately represent the geometric shape of tomatoes and had strong applicability and exemplary performance in tomato-related computer-aided design and simulation.

Keywords: tomato; three-dimensional geometric model; morphology

西红柿是中国主要农作物之一,产量和消费量逐年上升,其加工产品种类也越来越多。但目前对于西红柿果实几何建模的研究相对薄弱,其精深加工程度远远落后于世界先进水平,产品附加值低。

近年来,随着农业基础知识的拓宽和计算机图像处理技术的不断发展,农作物几何建模技术应运而生,目前国内外学者已经开发了一些几何模型用以模拟农业材料,例如简化几何模型^[1]、三维重建模型^[2-3]以及参数化建模方法^[4]等。其中,参数化建模技术^[5]是目前最常用的建模方法,它是用参数来构造产品的几何形态,能够对产品进行快速建模,为产品的快速可视化提供了基础。但是目前参数化几何建模方法在西红柿形状表征方面的应用依然具有较大的挑战:首先,西红柿精准的几何模型还没有完全发展起来。西红柿呈较扁的椭圆形^[6-8],茎花轴向尺寸均匀,特别是,西红柿茎端(茎部疤痕)的缩进特征是其一个重要的局部形状特征^[6-9],直接影响其剥皮、分选、质检等一系列加工操作^[10-12],但目前未见有对西红柿茎端局部缩进特征进行精确描述的相关研究报道,现有研究^[13-14]报道的曲面和自由曲线的参数化建模方法通常是建立在物体近似曲面的几何形态基础上的,不能准确表征西红柿茎端局部缩进的特征,因此无法应用于西红柿相关的计算机辅助设计和仿真中。而且曲面和自由曲线几何模型的表征参数较多,不仅有位置参数,还有积分参数和微分参数^[5],包含了大量的数字化数据,数据处理复杂。

研究拟通过建立少数参数表征的三维几何模型快速且直观地构造出西红柿的真实几何形状,准确捕捉其重要的茎端局部缩进特征,为西红柿相关的计算机辅助设计、仿真以及剥皮、分选、质检等一系列加工提供基础数据,为其产业精深加工提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验原料

西红柿:无机械和虫咬等伤害,市售。

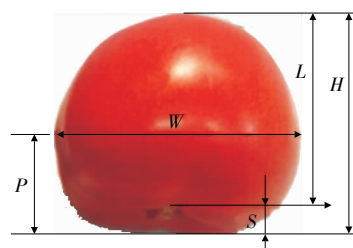
1.2 主要仪器与设备

电子天平:SQP 型,北京赛多利斯科技有限公司;

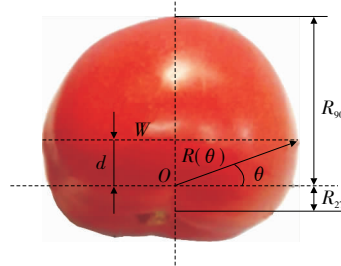
游标卡尺:MNT-150 型,上海美耐特实业有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 西红柿尺寸的测量和几何关系建立 表征西红柿形态属性的主要参数包括总高度(H)、最大直径到底部的垂直位置(P)、最大直径(W)、肩高(S)、花端曲率半径(R_{90})和茎端曲率半径(R_{270})(见图 1)。使用精度 0.1 mm 的游标卡尺来测量上述参数。



(a) 基于实际的西红柿形态属性参数图



(b) 基于极坐标的西红柿形态属性参数图

图 1 西红柿的形态属性参数

Figure 1 Morphological attribute parameters of tomato

由图 1 可知,各参数之间存在如下关系:

$$L = H - S, \quad (1)$$

$$L = R_{90} + R_{270}, \quad (2)$$

式中:

L ——西红柿长度,mm;

R_{90} ——花端曲率半径,mm;

R_{270} ——茎端曲率半径,mm;

H ——西红柿总高度,mm;

S ——西红柿肩高,mm。

根据所选取西红柿的形态特征,由于其最大直径(W)并不等于果实高度中点所对应的直径,而是位于其水平轴的下方,因此 d 表示为:

$$d = H - (P + R_{90}). \quad (3)$$

1.3.2 西红柿几何模型的构建 先采用正弦幂级数的三次项^[15]来描述西红柿的曲面形状,再通过引入 4 个形状描述系数(a 、 b 、 c_1 、 c_2)来精确表征西红柿的茎端局部缩进特征,具体几何模型的表达式为:

$$R(\theta) = \frac{1 + c_1 \sin(\theta) + c_2 \sin^3(\theta)}{\sqrt{\left[\frac{\cos(\theta)}{b}\right]^2 + \left[\frac{\sin(\theta)}{a}\right]^2}}, \quad (4)$$

式中:

$R(\theta)$ ——坐标原点(O)到西红柿表面不同位置的径向距离, mm;

θ ——极坐标的角度;

a, b, c_1 和 c_2 ——形状描述系数。

1.3.3 西红柿几何模型描述系数的计算 为定量描述西红柿形状,需要确定 4 个形状描述系数(a, b, c_1, c_2),按照如下步骤计算:

(1) 确定系数“ a ”:当 $\theta = -\pi/2$ 和 $\pi/2$ 时,式(4)可以简化为式(5)和式(6):

$$R_{90} = a(1 + c_1 + c_2), \quad (5)$$

$$R_{270} = a(1 - c_1 - c_2). \quad (6)$$

通过将式(5)和式(6)相加合并得:

$$a = \frac{R_{90} + R_{270}}{2}. \quad (7)$$

由于 R_{90} 和 R_{270} 还满足式(1)和式(2)的关系,因此代入式(7), a 可以表示为:

$$a = \frac{H - S}{2}. \quad (8)$$

(2) 确定系数“ b ”:西红柿果实在不同位置上的直径 $W(\theta)$ 可通过 θ 来表示,其函数:

$$W(\theta) = 2R(\theta)\cos(\theta). \quad (9)$$

根据泰勒级数展开式^[16-17],通过消除正弦函数[即 $\sin(\theta) \cong \theta$]的二阶和更高阶项以及余弦函数[即 $\cos(\theta) \cong 1 - \frac{\theta^2}{2}$]的三阶和更高阶项,对式(9)进行合理简化,其一阶导数可简化为:

$$\frac{dW(\theta)}{d\theta} = 2bc_1\cos(\theta) - \frac{2b^3}{a^2} \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)}. \quad (10)$$

根据最大直径 $W(\theta)$ 在闭区间 $[0, 2\pi]$ 范围内的求导结果等于零,得出式(10)中 θ 应满足以下条件:

$$c_1\cos(\theta_w) - \frac{b^2}{a^2}\tan(\theta_w) = 0. \quad (11)$$

此外,由于函数 $W(\theta)$ 的最大值是在端点处或临界点处得出的,从几何角度看,如果仅观察最大直径的一半

$$c_1 = \frac{4(H - P - R_{90})^4 \cos^2\left[\arctan\left(\frac{2d}{W}\right)\right] + (H - P - R_{90})^2 W^2 \cos^2\left[\arctan\left(\frac{2d}{W}\right)\right]}{\left(\frac{H - S}{2}\right)^2 W^2 \sin\left[\arctan\left(\frac{2d}{W}\right)\right]}. \quad (20)$$

上述西红柿形状描述系数的具体计算数学方程详见表 1,此外还给出了 4 个系数计算时需要用到的实际测量尺寸参数。

1.3.4 西红柿质量和表面积的预测值计算和实测值测定

假设西红柿是围绕其茎花对称轴旋转的固体,可以根据帕普斯第一定理^[19],推导出西红柿体积的计算公式:

$$V = \frac{2\pi}{3} \int_{\theta_1}^{\theta_2} R^3(\theta) \cos(\theta) d\theta, \quad (21)$$

式中:

$(W/2), \theta_w$ 也应满足直角三角[如图 1(b)所示]的关系:

$$\theta_w = \arctan\left(\frac{2d}{W}\right). \quad (12)$$

将式(12)代入式(11),求解系数“ b ”为:

$$b = \frac{aW}{2d} \sqrt{c_1 \sin\left[\arctan\left(\frac{2d}{W}\right)\right]}. \quad (13)$$

(3) 确定系数“ c_2 ”:通过 R_{90} 除以 R_{270} ,根据式(5)和式(6),系数“ c_1 ”和“ c_2 ”之间的关系可以表示为:

$$\frac{R_{90}}{R_{270}} = \frac{1 + c_1 + c_2}{1 - c_1 - c_2}, \quad (14)$$

或

$$c_1 + c_2 = \frac{R_{90} - R_{270}}{R_{90} + R_{270}}. \quad (15)$$

将式(14)、式(15)和式(2)重新整合, c_2 可以用 c_1 表示为:

$$c_2 = \left| \frac{2R_{90}}{L} - c_1 - 1 \right|. \quad (16)$$

(4) 确定系数“ c_1 ”:另一个直角三角[如图 1(b)所示]关系:

$$R^2(\theta_w) = d^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2. \quad (17)$$

将式(17)的左侧以式(4)的形式展开,将式(8)、式(13)、式(16)中的系数 a, b, c_2 代入式(17)中得到:

$$\frac{\left[1 + c_1 \sin(\theta_w) + \left| \frac{2R_{90}}{L} - 1 - c_1 \right| \sin^3(\theta_w) \right]^2}{\left\{ \frac{\cos(\theta_w)}{\frac{aW}{2d} \sqrt{c_1 + \sin\left[\arctan\left(\frac{2d}{W}\right)\right]}} \right\}^2 + \left[\frac{\sin(\theta_w)}{\left(\frac{H-S}{2}\right)} \right]^2} = d^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2. \quad (18)$$

此外, c_1 可以通过假设二阶或更高阶的 $\sin(\theta_w)$ 来表示,函数的阶次越高,收敛性和计算精度越高^[18],式(18)可变为:

$$c_1 = \frac{4d^4 \cos^2(\theta_w)}{a^2 W^2 \sin(\theta_w)} + \frac{d^2 \cos^2(\theta_w)}{a^2 \sin(\theta_w)}. \quad (19)$$

将式(3)、式(8)、式(12)代入式(19),由此得出 c_1 为:

V ——西红柿体积, mm³;

θ_1 ——角积分下限;

θ_2 ——角积分上限。

假设西红柿果实密度为常数,可以用式(22)计算西红柿质量(m)。

$$m = \frac{2\pi\rho}{3} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{[1 + c_1 + \sin(\theta) + c_2 \sin^3(\theta)]^3}{\sqrt{\left[\frac{\cos(\theta)}{b}\right]^2 + \left[\frac{\sin(\theta)}{a}\right]^2}} \cos(\theta) d\theta. \quad (22)$$

表 1 西红柿形状系数的数学方程及与西红柿实际尺寸参数的关联

Table 1 The mathematical equation of the shape coefficient of tomato and its correlation with the actual size parameters of tomato

形状系数	数学方程	尺寸参数
a	$a = \frac{H - S}{2}$	H, S
b	$b = \frac{aW}{2d} \sqrt{c_1 \sin \left[\arctan \left(\frac{2d}{W} \right) \right]}$	W, P, S, R_{90}
c_1	$c_1 = \frac{4(H - P - R_{90})^4 \cos^2 \left[\arctan \left(\frac{2d}{W} \right) \right] + (H - P - R_{90})^2 W^2 \cos^2 \left[\arctan \left(\frac{2d}{W} \right) \right]}{\left(\frac{H - S}{2} \right)^2 W^2 \sin \left[\arctan \left(\frac{2d}{W} \right) \right]}$	H, W, P, S, R_{90}
c_2	$c_2 = \left \frac{2R_{90}}{L} - c_1 - 1 \right $	R_{90}, H, S

根据帕普斯第二定理^[19]和辛普森公式^[20]计算西红柿表面积(S_A),其计算公式如下:

$$S_A = 2\pi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} R(\theta) \cos(\theta) \sqrt{R^2(\theta) + \left(\frac{dR}{d\theta}\right)^2} d\theta. \quad (23)$$

通过式(22)和式(23)计算获得西红柿质量和表面积的预测值。此外,根据阿基米德原理,采用 0.2 g/mL 蔗糖溶液体积置换法测定西红柿的密度^[21]。使用电子天平测定西红柿质量的实测值。采用圆台法^[22]测定西红柿表面积的实测值。

分别以相对百分误差(E_{RPE})、均方根误差(E_{RMSE})和确定系数(R^2)来反映预测值与实测值之间拟合度的优劣,其中 E_{RPE} 和 E_{RMSE} 计算公式:

$$E_{RPE} = \frac{|P_V - M_V|}{|M_V|} \times 100, \quad (24)$$

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_V - M_V)^2}. \quad (25)$$

式中:

M_V ——实测值;

P_V ——预测值;

n ——样本量。

2 结果与讨论

2.1 西红柿几何模型中描述系数的计算

取超市购买的 75 个西红柿为样本,测定其实际尺寸

参数,实测结果如表 2 所示。由表 2 可知,将实测值代入表 1 中的数学方程计算获得几何模型中的 4 个描述系数,描述系数 a 和 b 的平均值(24.50, 32.82 mm)非常接近实测果实高度($H = 54.97$ mm)和最大直径($W = 65.09$ mm)的一半,表明二者描述系数的数值大小与西红柿实测尺寸参数直接相关,可以由 H 和 W 直接计算获得。此外由表 1 的计算方程还发现,描述系数 c_1 和 c_2 (0.33, 0.11 mm)也与西红柿实测尺寸参数 H 、 W 、 P 、 S 、 R_{90} 直接相关。同样地, Narushin 等^[23]采用参数方程描述禽蛋的形状时也发现几何模型的描述参数与实测样品的尺寸密切相关。综上所述,研究建立的西红柿形状几何模型中的 4 个系数均与西红柿实际尺寸参数密切相关,具有实际物理意义,可以全面表征西红柿曲面形状以及重要的茎端局部缩进特征,可在西红柿相关的计算机辅助设计、仿真等相关工程应用中发挥重要作用。

2.2 西红柿几何模型系数与质量和高度关系的分析

西红柿形状变化的预测受果实质量和大小的约束,如果能将西红柿质量和高度一起整合到西红柿几何模型中,对用少量的参数快速表征西红柿真实的几何形状具有重要意义。章文英等^[24]在对苹果的形状进行研究时发现高度对于苹果形状的表征起到了关键性的作用。因此研究分析西红柿形状描述系数(a 、 b 、 c_1 、 c_2)与其实际质量(m)和高度(H)的关系,结果见图 2 和图 3。根据图 2 中建立的两个回归方程发现,回归相关系数 R^2 均

表 2 西红柿实测尺寸参数与几何模型计算系数的统计描述

Table 2 Statistical description of the measured tomato size parameters and the computed coefficients of tomato geometric model

项目	尺寸参数					计算系数			
	H	W	S	R_{90}	P	a	b	c_1	c_2
平均值±标准偏差	54.97±2.17	65.09±1.86	5.97±1.06	32.95±1.52	16.16±2.34	24.50±1.40	32.82±0.87	0.33±0.08	0.11±0.05
范围	51.61~62.66	59.38~68.75	2.17~8.06	30.93~34.71	10.75~26.85	21.78~28.58	30.50~34.54	0.19~0.53	0.04~0.31

在 0.85 以上,表明西红柿质量(m)与系数 b 、西红柿高度(H)与系数 a 之间存在显著的线性相关性,因此,西红柿描述系数 a 和 b 可以通过直接测量西红柿实际高度和质量来获得,见表 1 中通过测量 W 、 H 、 P 、 S 和 R_{90} 来获得更为简便和快速,表明研究所建几何模型可以实现以少量参数对西红柿真实几何形态的快速表征。同样地, Rashidi 等^[25]的研究报道也得出可以通过参数简化几何模型进而准确描述猕猴桃的几何形状。

图 3 为系数 c_1 和 c_2 与西红柿质量(m)和高度(H)的关联结果,研究发现,系数 c_1 和 c_2 与西红柿质量和高度均无良好的线性相关性,其数值的计算仍需通过西红柿 5 个

尺寸参数(H 、 S 、 R_{90} 、 W 和 P)的测量来获得,这是因为 c_1 和 c_2 的数值大小反映了西红柿茎端缩进特征的局部细节变化,决定了其形状的均匀性和同质性^[26],而不是西红柿整体大小的变化,因此其与质量和高度的相关性较低。

2.3 西红柿三维几何模型的构建

在建立的二维几何模型基础上,将西红柿剖面绕茎花对称轴旋转,得到其三维几何的转换,并将数学方程[式(4)]以及 4 个描述系数(a 、 b 、 c_1 、 c_2)的平均值代入 MATLAB 算法中创建西红柿的三维几何模型,结果见图 4。由图 4 可知,该模型直观准确地描述了西红柿茎端局部缩进的特征,增强了模型的真实感,强化了模型的可

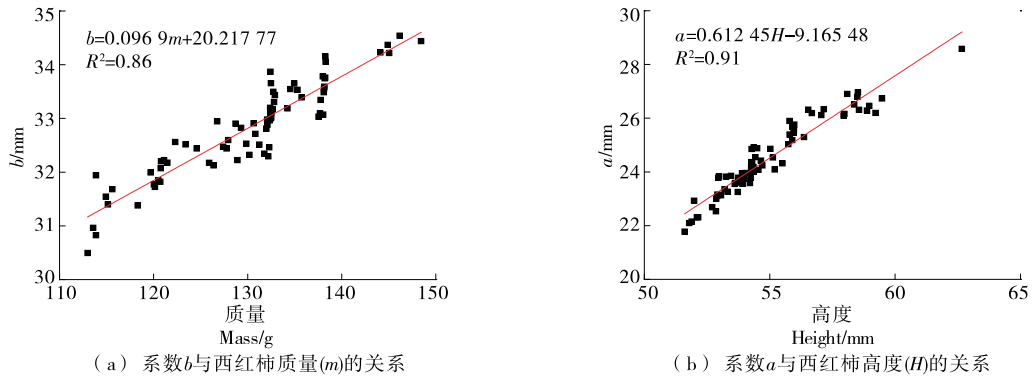


图 2 系数 b 和 a 与西红柿质量(m)和高度(H)的关系

Figure 2 Relationship between coefficients b and a and tomato weight (m) and height (H)

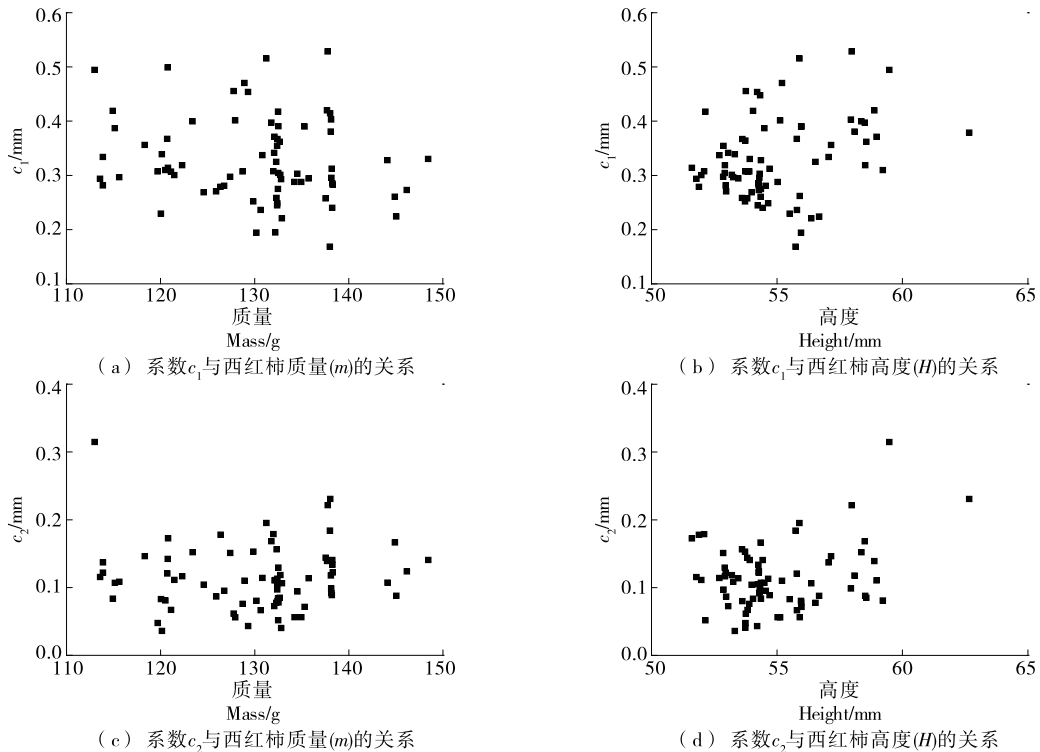


图 3 系数 c_1 和 c_2 与西红柿质量(m)和高度(H)的关系

Figure 3 Relationship between coefficients c_1 and c_2 and tomato weight (m) and height (H)

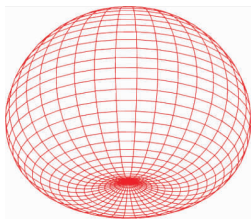
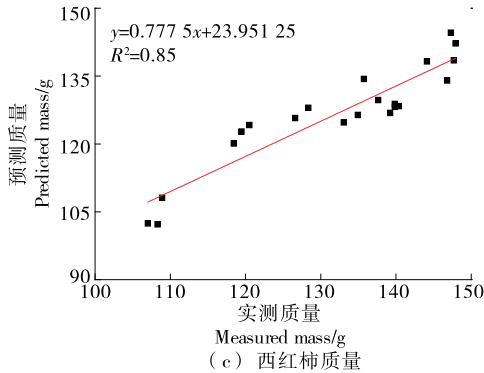


图 4 西红柿的三维几何模型
Figure 4 Three-dimensional geometric model of tomatoes

视化功能,可以作为计算机模拟西红柿几何形状的一种直观准确的计算工具^[27]。纪平等^[28]也利用番茄的半径等参数采用 MATLAB 算法获得了果实的轮廓图像,但是其采用的 MATLAB 算法操作步骤较为复杂,且识别率不高,并不是一种快速表征西红柿几何形状的好方法。

2.4 西红柿几何模型的验证

几何模型可以用于计算西红柿的一些几何属性,如



质量^[29]、体积^[23,30]、表面积^[28]、曲率半径^[29]、圆周长^[23]等。因此,研究也应用所建立的几何模型对西红柿质量和表面积等几何属性进行预测,并通过分析预测值与实测值来验证模型的准确性和可靠性。从图 5 发现,质量和表面积的实测值与预测值之间均存在良好的线性相关性。由表 3 可知,质量实测值与预测值之间的 E_{RMSE} 值为 10.11, E_{RPE} 为 5.46%, R^2 为 0.85,由已有报道^[31]得知,该模型误差在可接受的范围内,表明质量实测值与理论预测值之间存在良好的线性相关性;表面积实测值与预测值之间的 E_{RMSE} 值为 44.75, E_{RPE} 为 10.24%, R^2 为 0.81,主要是由于西红柿个体差异较大造成的,但总体而言,表面积实测值与预测值之间具有较高的拟合精度。这与王浩云等^[30]研究发现苹果的外形指标与真实值之间具有较高相关性的结论一致。由此得出,研究所建西红柿三维几何模型可以用于量化西红柿的质量和表面积几何属性,是一种快速、准确表征西红柿几何形状的新型方法。

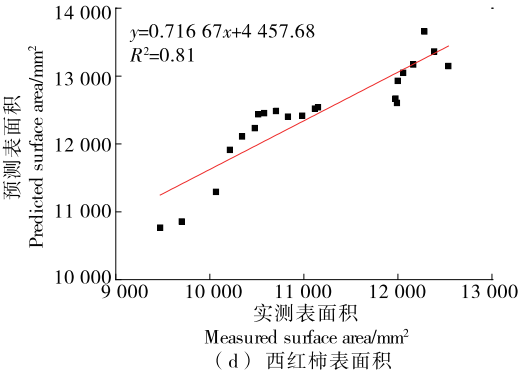


图 5 西红柿质量和表面积的预测值与实测值的比较
Figure 5 Comparison of predicted and measured values of tomato weight and surface area

表 3 西红柿几何模型的拟合度检验结果
Table 3 Fitting test results of tomato geometric model

指标	单位	预测值	实测值	R^2	E_{RMSE}	$E_{RPE}/\%$
质量	g	102.43~141.91	107.03~148.7	0.85	10.11	5.46±4.96
表面积	mm ²	10 763.59~12 826.52	9 472.185~13 298.26	0.81	44.75	10.24±5.35

理想状况下是通过测定西红柿边界上每个点的曲率半径来捕获西红柿形状的所有特征,然而,这种方法测量效率低且计算复杂。为解决这些问题,研究构建了一个以少数参数表征西红柿形状的三维几何模型,实现了对西红柿真实几何形状的直观、精准且快速表征。此外, Datta 等^[32]认为几何建模的最终目的是应用于实际加工中。因此研究又将建立模型应用于西红柿质量和表面积等几何属性的预测,可为西红柿相关加工产业的科学合理设计提供便利^[33],可将其作为原料模型用于脱皮热处理过程中的传热模拟以及设备加热均匀性优化的依据,

还可为西红柿其他加工工程应用推荐合适的参数,例如,在水果连续化加工作业中可以通过原料模型快速地估计水果形状和大小,实现对质量检验对象的准确定位等^[34]。综上,西红柿几何形态的定量描述满足了其形态表征设计需求,可适用于各种西红柿加工技术和相关机械装备的设计,因此研究建立的几何模型具有良好的实用价值。

3 结论

研究根据尺寸参数和形状描述系数精确地描述了西红柿的茎端局部缩进特征,计算获得形态描述系数 a 、 b 、 c_1 、 c_2 的适用范围分别为 21.78~28.58, 30.50~34.54,

0.19~0.53, 0.04~0.31 mm, 具有较宽的适用性。研究发现描述系数 a 和 b 与西红柿实际高度和质量高度线性相关 ($R^2 > 0.85$), 说明该几何模型可以实现以少量的参数快速表征西红柿真实几何形态的目的。实际应用中, 质量和表面积实测值与预测值之间的预测效果良好, 表明该模型可以用于量化西红柿质量和表面积等几何属性。研究建立的西红柿模型能够直观、迅速且精确地表征西红柿的几何形状, 可以满足西红柿形态表征设计的需求, 在西红柿相关的计算机辅助设计和仿真中具有良好的应用潜力。西红柿几何模型中的形态描述系数与实际样品尺寸参数之间具有线性相关性的原因主要体现于原料的自身特性, 遗传育种能够保持产品尺寸与整体形状的相对稳定。但是, 西红柿品种的不同依旧会导致形状特征的差异。因此, 有必要对不同品种的西红柿形状描述系数展开深入研究, 进一步完善几何模型, 拓宽其适用性。

参考文献

- [1] GIELIS J. A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes[J]. American Journal of Botany, 2003, 90(3): 333-338.
- [2] WEN Wei-liang, ZHAO Chun-jiang, GUO Xin-yu, et al. Construction method of three-dimensional model of maize colony based on t-distribution function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 192-200.
- [3] HE J Q, HARRISON R J, LI Bo. A novel 3D imaging system for strawberry phenotyping[J]. Plant Methods, 2017, 13(1): 1-8.
- [4] 周敏建, 董枫, 汪大海, 等. 基于参数化的日用陶瓷几何建模方法[J]. 陶瓷学报, 2021, 42(1): 150-154.
ZHOU Min-jian, DONG Feng, WANG Da-hai, et al. Geometric modeling method of domestic ceramics based on parameterization[J]. Journal of Ceramics, 2021, 42(1): 150-154.
- [5] NOWACKI H, LU Xin-min. Fairing composite polynomial curves with constraints[J]. Computer Aided Geometric Design, 1994, 11(1): 1-15.
- [6] ELISABET H, GARCIA A, DIAN E, et al. Evaluation of processing tomatoes from two consecutive growing seasons: Quality attributes, peelability and yield [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2006, 30(1): 20-36.
- [7] BREWER M T, MOYSEENKO J B, MONFORTE A J, et al. Morphological variation in tomato: A comprehensive study of quantitative trait loci controlling fruit shape and development[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(6): 1 339-1 349.
- [8] PASCUAL M J G, BREWER M T, ANDERSON C, et al. Tomato fruit shape analysis using morphometric and morphology attributes implemented in tomato analyzer software program[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2009, 134(1): 77-87.
- [9] CECCARELLI M, FIGLIOLINI G, OTTAVIANO E. Designing a robotic gripper for harvesting horticulture products[J]. Robotica, 2000, 18(1): 105-111.
- [10] LAYKIN S, ALCHANATIS V, FALLIK E, et al. Image-processing algorithms for tomato classification[J]. Transactions of the Asae, 2002, 45(3): 851-858.
- [11] ARAZURI S, JAREN C, ARANA J I, et al. Influence of mechanical harvest on the physical properties of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* mill.)[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(1): 190-198.
- [12] PAN Zhong-li, LI Xuan, BINGOL G, et al. Technical note: Development of infrared radiation heating method for sustainable tomato peeling[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(6): 935-941.
- [13] 何坤金, 冯贵波, 陈正鸣, 等. 一种以特征线为中心的曲面特征表示方法[J]. 中国科学(信息科学), 2013, 43(3): 374-385.
HE Kun-jin, FENG Gui-bo, CHEN Zheng-ming, et al. A surface feature representation method based on feature line[J]. Scientia Sinica (Informationals), 2013, 43(3): 374-385.
- [14] FU L T, KARA L B, SHIMADA K. Feature, design intention and constraint preservation for direct modeling of 3D freeform surfaces[J]. 3D Research, 2012, 3(2): 1-18.
- [15] LI Xuan. A study of infrared heating technology for tomato peeling: Process characterization and modeling [D]. Davis: University of California, 2012: 192-203.
- [16] 王从徐. 基于泰勒级数展开及其应用探讨[J]. 红河学院学报, 2021, 19(2): 154-156.
WANG Cong-xu. Taylor series expansion and its application[J]. Journal of Honghe University, 2021, 19(2): 154-156.
- [17] 曹倩倩. 泰勒级数的若干展开方法[J]. 阴山学刊(自然科学版), 2016, 30(3): 20-22, 32.
CAO Qian-qian. Some expansion methods of Taylor series[J]. Yin-shan Academic Journal (Natural Science Edition), 2016, 30(3): 20-22, 32.
- [18] 薛亚强, 靳国永, 叶天贵, 等. 三维声腔模态的等几何计算分析[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报. [2021-04-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20210426.0959.006.html>.
XUE Ya-qiang, JIN Guo-yong, YE Tian-gui, et al. Modal analysis of three-dimensional acoustic cavity using isogeometric approach[J/OL]. Journal of Harbin Engineering University. [2021-04-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20210426.0959.006.html>.
- [19] BAINS R. Calculus and analytic geometry[J]. Advances in Engineering Software and Workstations, 1991, 13(2): 261-262.
- [20] 刘智颖, 王向公, 任威龙, 等. 辛普森公式的推广形式及应用[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2014(1): 33-35.
LIU Zhi-ying, WANG Xiang-gong, REN Wei-long, et al. The deducing forms of simpson formula and its application[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2014(1): 33-35.

- [21] LANG A, THORPE M R. Xylem, phloem and transpiration flows in a grape: Application of a technique for measuring the volume of attached fruits to high resolution using archimedes' principle[J]. Journal of Experimental Botany, 1989, 30: 1 069-1 078.
- [22] 辛淑亮, 林振海, 王永章. 苹果、梨果实表面积的测定方法研究[J]. 莱阳农学院学报, 1985(1): 67-74.
- XIN Shu-liang, LIN Zhen-hai, WANG Yong-zhang. Study on the determination method of fruit surface area of apple and pear[J]. Journal of Laiyang Agricultural College, 1985(1): 67-74.
- [23] NARUSHIN V G. The Avian egg: Geometrical description and calculation of parameters[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 68(3): 201-205.
- [24] 章文英, 应义斌. 苹果图像的预处理及尺寸检测[J]. 金华职业技术学院学报, 2001(1): 23-25.
- ZHANG Wen-ying, YING Yi-bin. Apple image processing and size detecting[J]. Journal of Jinhua Polytechnic, 2001(1): 23-25.
- [25] RASHIDI M, GHOLAMI M. Classification of fruit shape in kiwifruit using the analysis of geometrical attributes[J]. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 2008, 3: 258-263.
- [26] BREWER M T, LANG L, FUJIMURA K, et al. Development of a controlled vocabulary and software application to analyze fruit shape variation in tomato and other plant species[J]. Plant Physiology, 2006, 141(1): 15-25.
- [27] 温维亮, 郭新宇, 陆声链, 等. 曲面建模方法在数字植物中的应用与展望[J]. 中国农业科学, 2011, 44(7): 1 338-1 345.
- WEN Wei-liang, GUO Xin-yu, LU Sheng-lian, et al. Applications and prospects of surface modeling method in digital plant[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(7): 1 338-1 345.
- [28] 纪平, 王俊, 陈鹤碧. 基于图像的番茄识别与几何尺寸测量[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(33): 16 426-16 428, 16 434.
- JI Ping, WANG Jun, CHEN He-bi. The tomato identification and geometric size measurement based on image[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(33): 16 426-16 428, 16 434.
- [29] LI Xuan, PAN Zhong-li, UPADHYAYA S K, et al. Three-dimensional geometric modeling of processing tomatoes[J]. Transactions of the Asabe, 2011, 54(6): 2 287-2 296.
- [30] 王浩云, 闫茹琪, 周小莉, 等. 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 Hao-yun, YAN Ru-qi, ZHOU Xiao-li, et al. Apple shape index estimation method based on local point cloud [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 205-213.
- [31] NYALALA I, OKINDA C, NYALALA L, et al. Tomato volume and mass estimation using computer vision and machine learning algorithms: Cherry tomato model[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 263: 288-298.
- [32] DATTA A K, HALDER A. Status of food process modeling and where do we go from here (synthesis of the outcome from brainstorming)[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2008, 7(1): 117-120.
- [33] LI Xuan, PAN Zhong-li, ATUNGULU G G, et al. Peeling of tomatoes using novel infrared radiation heating technology[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 21: 123-130.
- [34] SEYEDABADI E, KHOJASTEHPOUR M, SADRNIYA H, et al. Mass modeling of cantaloupe based on geometric attributes: A case study for tile magasi and tile shahri[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 130(1): 54-59.
- (上接第 14 页)
- [57] 聂明, 杨水平, 姚小华, 等. 不同加工方式对油茶籽油理化性质及营养成分的影响[J]. 林业科学研究, 2010(2): 165-169.
- NIE Ming, YANG Shui-ping, YAO Xiao-hua, et al. Effects of process methods on physicochemical property and nutrient content of tea oil[J]. Forest Research, 2010(2): 165-169.
- [58] 刘肖丽, 吴雪辉. 不同提取方法对茶油品质的影响. 食品工业科技, 2012(24): 307-310.
- LIU Xiao-li, WU Xue-hui. Analysis of the camellia oil by various extraction process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012(24): 307-310.
- [59] 沈建福, 陈中海, 肖仁显, 等. 不同加工方式对浙江红花油茶茶油品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(6): 56-60.
- SHEN Jian-fu, CHEN Zhong-hai, XIAO Ren-xian, et al. Effects of different processing methods on the quality of oil-tea of Camellia Cheklangleosa Hu[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(6): 56-60.
- [60] 邓龙, 邓泽元, 胡蒋宁, 等. 油茶籽油加工过程中理化性质和营养品质的变化[J]. 食品科学, 2015, 36(23): 111-115.
- DENG Long, DENG Ze-yuan, HU Jiang-ning, et al. physical-chemical properties and nutrients of oil-tea camellia seed oil in different refining stages[J]. Food Science, 2015, 36(23): 111-115.
- [61] 张智敏, 吴苏喜, 刘瑞兴. 制油工艺对油茶籽油营养品质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(11): 268-272.
- ZHANG Zhi-min, WU Su-xi, LIU Rui-xing, et al. Effect of production process on nutritional quality of camellia seed oil[J]. Food Science, 2013, 34(11): 268-272.
- [62] 杨辉. 茶油提取新工艺及其品质的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012: 58.
- YANG Hui. Study on new extraction processes and quality of camellia oil[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012: 58.
- [63] 孙永燕. 注射用茶籽油制备工艺研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018: 39.
- SUN Yong-yan. Preparation of camellia oil for injection purpose[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018: 39.