

基于机器视觉的橡胶材料有限元快速建模方法研究

罗宁新, 童佳鹏, 李 竞, 贾晨焱, 胡小玲

湘潭大学机械工程与力学学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年3月13日; 录用日期: 2026年4月5日; 发布日期: 2026年4月13日

摘 要

针对橡胶材料几何形状复杂、传统建模效率低、参数获取困难等问题, 提出了一种基于机器视觉的橡胶材料有限元快速建模方法。该方法以橡胶哑铃试件为研究对象, 通过图像采集、去除背景、OpenCV轮廓识别、比例尺自动标定、提取试件的轮廓像素坐标并转换为实际尺寸, 最后利用Python脚本驱动Abaqus实现自动建模与有限元分析。结果表明, 该方法在几秒内就可以完成建模, 效率较传统的软件建模提升上十倍; 与传统软件建立的模型相比, 基于机器视觉建立的模型几何尺寸误差小于2.75%; 相同工况下应力分析结果与传统模型最大误差为3.37%。该方法效率高且可靠, 可推广应用于各类复杂橡胶制品的快速建模与仿真分析。

关键词

机器视觉, 橡胶材料, 有限元建模, Abaqus二次开发

Research on Rapid Finite Element Modeling Method of Rubber Materials Based on Machine Vision

Ningxin Luo, Jiapeng Tong, Jing Li, Chenyan Jia, Xiaoling Hu

School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan Hunan

Received: March 13, 2026; accepted: April 5, 2026; published: April 13, 2026

Abstract

Due to the problems of complex geometry, low efficiency of traditional modeling and difficulty in

文章引用: 罗宁新, 童佳鹏, 李竞, 贾晨焱, 胡小玲. 基于机器视觉的橡胶材料有限元快速建模方法研究[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(2): 206-212. DOI: 10.12677/met.2026.152022

parameter acquisition for rubber materials, a rapid finite element modeling method for rubber materials based on machine vision is proposed. Taking rubber dumbbell specimens as the research object, the method adopts image acquisition, background removal, OpenCV contour recognition, automatic scale calibration, extracts the contour pixel coordinates of specimens and converts them into actual dimensions. Finally, Python script is driven to realize automatic modeling and finite element analysis. The results show that the proposed method can complete the modeling within a few seconds, and the efficiency is ten times higher than that of the traditional software modeling method. Compared with the model established by traditional software, the geometric dimension error of the model established based on machine vision is less than 2.75%. Under the same working conditions, the maximum error of stress analysis results compared with the traditional model is 3.37%. The method is efficient and reliable, and can be widely applied to the rapid modeling and simulation analysis of various complex rubber products.

Keywords

Machine Vision, Rubber Materials, Finite Element Modeling, Abaqus Secondary Development

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

橡胶材料作为一种具备良好弹性和阻尼性能的材料, 现已被广泛应用于减振元件、密封件和轮胎等机械设计工业生产领域。在对橡胶产品分析其力学性能和作安全评估时, 通常需要建立有限元模型利用工程软件进行分析和模拟。

对于结构简单、形状规则的产品, 可以采用测量技术获取产品的尺寸、形态、几何特征等信息, 使用建模软件以手动绘制的方式创建二维或三维模型。但是对于结构复杂的产品, 这一人工方法用时长难度大, 且某些情况下并不能准确反映实际情况, 不利于产品的改进和创新[1]。因此, 有必要研究快速、准确的建模方法。

近年来, 机器视觉技术作为一种处理图像和视频数据并进行分析与理解的新兴技术, 已经凭借其高效、经济、灵活等优点在微小结构建模、大型结构建模、复杂结构建模、异形曲面建模等方面得到较好的应用[2]-[4]。熊筱[3]使用红外扫描零件得到准确的轮廓特征, 使用相机拍摄得到零件的图像, 通过机器视觉算法提取表面轮廓的信息, 通过对比得到的轮廓的误差值。曹金凤等[5]将计算机视觉技术应用于齿轮结构的快速建模, 验证了该方法在复杂结构建模中的可行性。李策[6]在此基础上进一步扩展, 提出了针对二维复杂断面和三维复杂结构的快速建模方法。

本文借鉴已有研究成果, 提出了一种适用于橡胶材料的快速建模方法。该方法以橡胶哑铃试件作为研究对象, 通过图像采集、预处理、边缘识别、比例尺标定等步骤自动提取轮廓特征, 利用 Python 脚本驱动 Abaqus 实现自动建模与有限元分析, 最后对建模精度和仿真结果进行验证。

2. 机器视觉技术

机器视觉是一门融合光学成像、图像处理、模式识别与人工智能的交叉学科技术[7]。它通过工业相机、光学系统等硬件设备获取目标物体的图像信息, 利用计算机算法对图像进行预处理、特征提取与分析理解, 实现对目标的自动检测、识别、测量、定位与判断, 从而替代或辅助人眼完成高精度、高效率、

高稳定性的视觉感知与决策任务。

2.1. OpenCV 视觉库

OpenCV 是一款开源、跨平台的计算机视觉与图像处理库，该数据库内置超过两千种经过优化的图像处理与计算机视觉算法、涵盖图像预处理、特征提取、目标检测、视频分析、相机标定、三维重建以及深度学习推理等功能模块。凭借完善的算法体系、友好的开发接口以及宽松的 Apache 2.0 开源协议，OpenCV 已经成为学术界和工业界开展计算机视觉研究及工程应用的主流工具，广泛应用于目标检测、图像分割、人脸识别、工业检测、智能驾驶、医学影像分析等领域。

2.2. 图像处理技术

图像处理技术指的是对图像进行各种操作，如提高图像质量和清晰度、去除噪声的图像增强操作和提取关键特征的图像分割操作[8]，大体流程如下：

- (1) 使用相机等设备获取图像并存储在硬盘上；
- (2) 读取图像数据在内存中，并转换成 numpy、ndarray 等数据结构；
- (3) 对图像进行转换、操作和增强，如灰度图转换、滤波、去噪等；
- (4) 使用边缘检测、自适应阈值分割、霍夫变换等各种方法提取图像中感兴趣的对象或区域；
- (5) 将图像用图像轮廓特征的数组、通过人工或深度学习计算出来的特征描述符等其他形式进行表示；
- (6) 对图像进行分类、特征标识、目标跟踪等操作。

2.3. 边缘识别

图像的边缘指的是图像中位置和方向具有明显变化或跳跃的地方，通常可以由两个区域之间像素值的差异来判断。边缘分为阶跃变化和屋顶变化两种，对于阶跃变化的像素点可以通过计算一阶微分值来找到最大值或者通过计算二阶微分值是否为 0 来确定其是否为边缘点；对于具有屋顶变化的像素点则可以通过计算一阶微分是否为 0 或者二阶微分值是否为边缘点。

Canny 边缘检测算法综合考虑多种一阶边缘检测算子和二阶边缘检测算子的机制与优缺点，能将所有可能是边缘的像素点全部标识为边缘，对边缘定位的精确度较高[9]-[12]。

3. 基于机器视觉的橡胶材料有限元快速建模

3.1. 图像采集与预处理

为避免橡胶试样拉伸过程产生应力集中，哑铃试样夹持段到测试段采用两段曲面过渡，这给传统建模方法带来了一定的困难。基于机器视觉建模方法，通过图像识别、轮廓提取和 Python 语言编程，可建立包含复杂曲线结构的快速建模方法。本文选取的橡胶哑铃试样如图 1(a)所示，采用相机拍摄获取。

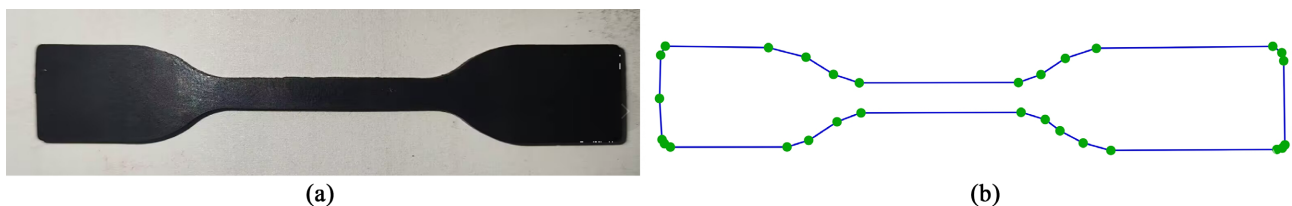


Figure 1. Image acquisition and processing result diagram. (a) Rubber specimen diagram; (b) Sample contour plot
图 1. 图像采集和处理结果图。(a) 橡胶试样图；(b) 试样轮廓图

3.2. 轮廓提取与坐标获取

图像预处理与去噪(图 2(a)): 首先将原始图像转换为灰度图, 并利用 Otsu 自适应阈值法进行二值化。针对二值化后可能残留的噪声及内部纹理(如剖面线), 引入了形态学闭运算(Morphological Closing), 通过先膨胀后腐蚀的操作有效填充了内部空洞, 重建了平滑且连续的实心掩膜(如图 2(b))。

轮廓提取(图 2(b)): 将处理后的掩膜输入 `cv2.findContours()` 函数, 采用 `cv2.RETR_EXTERNAL` 模式忽略内部嵌套轮廓, 仅提取零件的最外层边界。

智能重采样与优化(图 2(c)): 为防止冗余点导致有限元建模失败或计算开销过大, 算法采用 Douglas-Peucker 算法对原始轮廓进行几何拟合与抽稀。通过设定精度阈值 ϵ (取轮廓周长的 0.1%), 在保留关键特征(如圆弧、直角点)的同时大幅减少了节点数量(如图 2(c)中的绿色标记点, 减少节点数可以让 ABAQUS 脚本建模时模型更顺滑流畅减少图像识别时的误差积累), 从而生成高质量的参数化坐标点集。

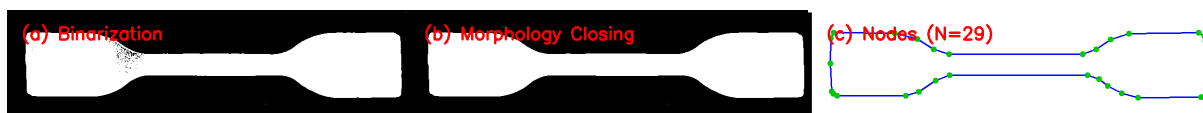


Figure 2. Image processing workflow

图 2. 图像处理流程

提取的轮廓点以列表形式返回, 每个轮廓由一系列像素坐标点组成。图 1(b)展示了提取的轮廓, 部分像素坐标数据信息如图 3。

39.0, 56.0
38.0, 109.0
41.0, 167.0
...
183.0, 48.0
45.0, 46.0
41.0, 49.0

Figure 3. Partial pixel coordinate information

图 3. 部分像素点坐标信息

3.3. 比例尺标定与坐标转换

以上坐标全由像素标定, 为了后续的建模工作需要转换为实际物理尺寸。本文基于此开发了利用橡胶哑铃总长度作为基准的自动标定方法。

样品实际长度为 75 mm, 通过算法自动寻找轮廓中高度最小的两点(即哑铃橡胶总长度), 计算像素距离。实际长度为 $L_{real} = 75$ mm, 像素长度为 $L_{pixel} = 784$ px, 得比例尺为: $s = L_{real}/L_{pixel}$ 。本实例中比例尺约为 $s = 0.095663$ mm/pixel, 将每个像素坐标乘以比例尺得到实际坐标。

图像坐标系与 Abaqus 草图坐标系存在方向差异: 图像原点位于左上角, y 轴向下; Abaqus 草图原点位于左下角, y 轴向上。因此需对 y 坐标进行翻转处理: $y_{Abaqus} = (H_{image} - y_{pixel}) \times s$, 其中 H_{image} 为图像高度对应的实际尺寸(可由比例尺换算)。修正后的模型实际坐标数据信息如图 4 (单位: mm)。

3.7309, 15.5931
 3.6352, 10.5230
 3.9222, 4.9745
 ...
 17.5064, 16.3584
 4.3048, 16.5497
 3.9222, 16.2628

Figure 4. Actual coordinate data for some models
图 4. 部分模型实际坐标数据

3.4. Abaqus 脚本自动建模

为实现自动化建模，本研究基于 Python 语言编写 Abaqus 脚本。先调用 Constrained Sketch 创建草图对象并设置尺寸，将转换后的坐标点按顺序连接，使用 Line 函数和 Spline 函数绘制直线，曲线段。因轮廓点密集，通过直接连接可以近似还原曲线形状。随后对封闭的草图进行拉伸，生成三维实体模型。将常见的 Neo-Hookean 模型参数代入。根据常见超弹性材料参数表(如 WELSIM 仿真材料指南)，剪切模量在 0.3~0.5 MPa 范围内的材料通常被归类为超软橡胶(Extra-Soft Rubber)。本案例选用的 $C_{10} = 0.2$ 对应的剪切模量为 0.4 MPa，符合该类材料的物理特征，考虑到橡胶材料不可压缩，取 $D1 = 10^{-6}$ 。根据拉伸试验工况设置一端固定另一端施加 10 mm 位移载荷的边界条件，采用 C3D8RH 单元(八节点六面体单元，减缩积分，杂交单元)，网格尺寸控制为 1 mm，最后提交计算并提取结果。**图 5** 展示了由脚本生成的草图，**图 6** 为快速建模在单轴拉伸 10 mm 后的应力云图，**图 7** 为传统软件建立的模型在相同工况下的应力云图。

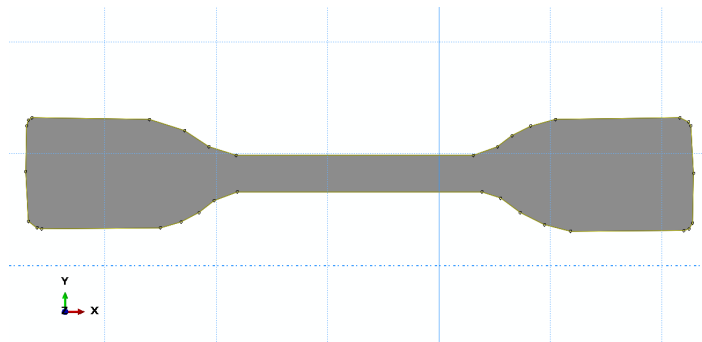


Figure 5. Image recognition-based sketch construction
图 5. 图像识别构建草图

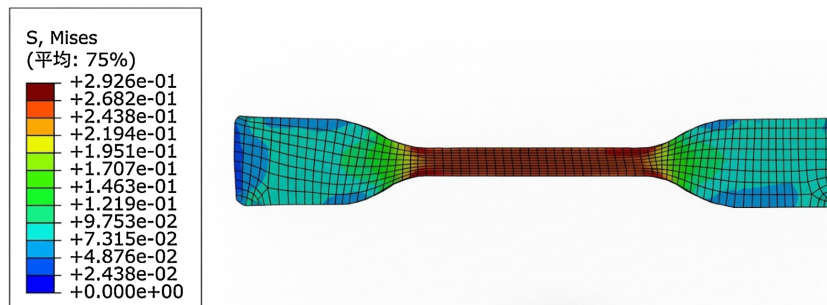


Figure 6. Rapid modeling of 10 mm uniaxial tensile cloud diagram
图 6. 快速建模单轴拉伸 10 mm 云图

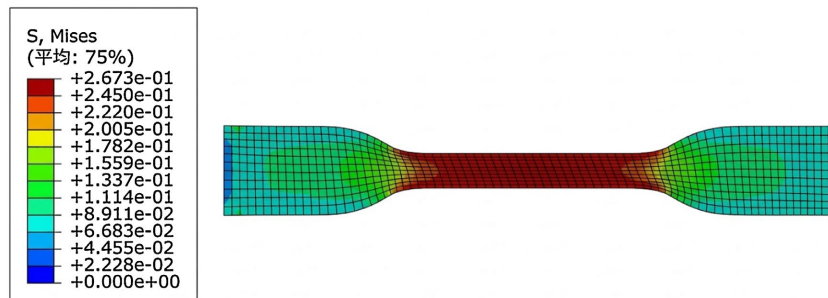


Figure 7. Traditional model stretched 10 mm cloud map
图 7. 传统模型拉伸 10 mm 云图

4. 实验与结果分析

4.1. 建模效率

基于机器视觉的橡胶哑铃试样建模耗时约 8.5 秒，而传统软件建模方法(包括测量、绘图、拉伸等)通常需要 120 s 以上。基于机器视觉的建模方法效率提升约 14 倍。

4.2. 几何精度验证

将快速建模模型的几何尺寸与实测值进行对比，结果如表 1 所示。关键尺寸误差均控制在 3% 以内，满足工程分析要求。

Table 1. Comparison of model geometric dimensions

表 1. 模型几何尺寸对比

尺寸	实测值/mm	模型值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
中部宽度	4	4.11	0.11	2.75
总长度	75	74.9	0.1	0.13
端部宽度	12.5	12.44	0.06	0.48

4.3. 有限元分析对比

在单轴拉伸 10 mm 的相同工况下，提取了快速建模模型与传统建模模型相同位置下三个节点的应力值进行有限元分析结果对比，节点 1 位于过渡圆弧应力集中区域，节点 2 位于中部平行段，节点 3 位于端部夹持区域。三者应力误差均小于 3.5%，验证了方法的有效性(表 2)。

Table 2. Comparison of node stress

表 2. 节点应力对比

节点号	传统建模应力/MPa	快速建模应力/MPa	绝对误差/MPa	相对误差/%
1	0.252068	0.259835	0.007767	3.08
2	0.260466	0.264797	0.004331	1.66
3	0.257048	0.2657	0.008652	3.37

5. 结论

本文提出了一种基于机器视觉的橡胶材料有限元快速建模方法，并以橡胶哑铃试件为例进行了验证，

得到了如下结论:

(1) 基于 Abaqus 软件的 Python 二次开发接口, 对橡胶工件轮廓特征像素坐标自动连线建模, 可在 8.5 秒内完成从图像到有限元模型的全过程, 效率是传统手工建模的 14 倍以上。

(2) 对比相同工况、相同设置、相同网格尺寸下的有限元分析, 基于机器视觉建立的橡胶哑铃试件模型与传统方法建立的模型节点应力误差小于 3.5%, 验证了方法的可靠性与适用性。

(3) 基于机器视觉的快速建模技术能够快速精确提取橡胶工件, 具备采集设备简单、精度高、实现方便的优势, 可推广应用于密封圈、减震垫、轮胎断面等其他复杂橡胶制品的快速建模与仿真分析, 具有广阔的工程应用前景。

(4) 但此方法也有一定局限性, 对于有复杂多变的曲线或者没有一定对称性的模型, 需要拆分识别重新组装, 仅通过图像数值识别轮廓标记坐标的误差仍然很大, 且对图片要求较高。这将导致脚本建模需要有更多的针对性。

参考文献

- [1] 胡炳中. 数字化测量技术在工程测量中的应用[J]. 自动化应用, 2022(6): 129-131.
- [2] 胡春华, 宋泽明, 张陵, 等. 基于机器视觉的角钢塔螺母识别定位方法研究[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(2): 53-59.
- [3] 熊筱. 基于激光扫描的线轮廓度误差检测与评定[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2020.
- [4] Gunatilake, A., Piyathilaka, L., Kodagoda, S., Barclay, S. and Vitanage, D. (2019) Real-Time 3D Profiling with RGB-D Mapping in Pipelines Using Stereo Camera Vision and Structured IR Laser Ring. 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Xi'an, 19-21 June 2019, 916-921. <https://doi.org/10.1109/iciea.2019.8834089>
- [5] 曹金凤, 李策, 刘鹏, 等. 计算机视觉技术在齿轮结构快速建模中的应用[J]. 机械设计与制造, 2025(10): 164-169.
- [6] 李策. 基于计算机视觉的复杂结构快速建模方法研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.
- [7] 朱云, 凌志刚, 张雨强. 机器视觉技术研究进展及展望[J]. 图学学报, 2020, 41(6): 871-890.
- [8] 陈汗青, 万艳玲, 王国刚. 数字图像处理技术研究进展[J]. 工业控制计算机, 2013, 26(1): 72-74.
- [9] Canny, J. (1986) A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8, 679-698. <https://doi.org/10.1109/tpami.1986.4767851>
- [10] 宋人杰, 刘超, 王保军. 一种自适应的 Canny 边缘检测算法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2018, 38(3): 72-76.
- [11] 肖庆追, 李捷, 陈鹤峰, 等. 基于改进 Canny 算子的图像边缘检测方法[J]. 数学的实践与认识, 2022, 52(7): 77-87.
- [12] 黄一静, 胡小平, 彭向前, 等. 一种改进 Canny 算子的图像边缘检测新算法[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(10): 1589-1595.