Stress Analysis of Wild Boar Teeth under Tiny External Forces

Lizhi Yang¹, Gang He², Lang Yu¹

¹School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan ²School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan Email: swust2018vl@163.com

Received: Mar. 4th, 2019; accepted: Mar. 19th, 2019; published: Mar. 27th, 2019

Abstract

In this paper, the displacement field and strain field of biomaterial-wild pig teeth are analyzed by MATLAB'S 2D digital image correlation program Ncorr. Through the high-definition camera, the digital image of the wild boar teeth before being subjected to external force and subjected to a small external force was obtained. The displacement of the center points of the two sets of digital images was determined by Newton-Rapshon algorithm, and the displacement changes and stress strains of the wild boar teeth under the action of tiny external forces were analyzed. Finally, through the analysis of the numerical calculation results, the displacement and stress changes at some specific positions are given, which provides a theoretical basis for the study of wild boar teeth.

Keywords

Wild Boar Tooth, Newton-Rapshon Algorithm, Strain Analysis

野猪牙齿在微小外力下的应力分析

杨枥智1,何 刚2,于 浪1

¹西南科技大学理学院,四川 绵阳 ²西南科技大学计算机科学与技术学院,四川 绵阳 Email: swust2018yl@163.com

收稿日期: 2019年3月4日; 录用日期: 2019年3月19日; 发布日期: 2019年3月27日

摘要

本文利用MATLAB的2D数字图像相关程序Ncorr对生物材料一一野猪牙齿的位移场和应变场进行了分析。

文章引用:杨枥智,何刚,于浪.野猪牙齿在微小外力下的应力分析[J].力学研究,2019,8(1):81-89. DOI:10.12677/ijm.2019.81010 通过高清摄像头,拍摄获取了野猪牙齿在受外力前、受微小外力作用后的数字图像。通过 Newton-Rapshon算法确定两组数字图像中心点的位移情况,并对野猪牙齿在微小外力作用下的位移变 化和应力应变进行了分析。最后,通过对数值计算结果的分析,给出了某些具体位置上的位移和应力变 化情况,为研究野猪牙齿提供了有关理论依据。

关键词

野猪牙齿,Newton-Rapshon算法,应变分析

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC O Open Access

1. 引言

数字图像相关方法是一种基于现代数字图像处理和分析技术的新型非接触式光测技术,它通过对物体 表面散斑在变形前后的图像进行相关运算、处理来确定物体的位移,再用得到的位移场计算得出相应的 应变场。在数字图像相关方法的应用方面,自上世纪 80 年代由美国南卡罗来纳州大学的 Peter 教授和 Ranson 教授[1]提出以来,国内外均开展了大量的工作。Corr 等人[2]利用这一方法研究了纤维复合材料与 混凝土界面的粘结强度。与传统研究方法相比较,数字图像相关方法给出了更为精确的表面变形场。随 后,Desai 等人[3]利用数字图像相关方法讨论双材料界面裂纹应力强度因子,并将试验结果与理论结果、 有限元结果进行对比,结果表明实验结果与理论结果吻合得很好。Chasiotis 与 Knauss [4] [5]将数字图像 相关方法与 STM 和 AFM 结合应用于微纳观尺度下 MEMS 的力学参数与断裂强度的测量。由于数字图像 相关方法在复合材料、生物医学、电子器件、航空航天等一系列新型材料中的广泛应用,吸引了一大批 国内学者进行研究。如清华大学金观昌教授、姚学峰教授等。清华大学的潘兵教授利用数字图像相关方 法测量试样的全场变形[6]。上海大学的张东升将数字图像相关方法成功地应用于生物组织和材料的力学 测试中,如骨头和牙齿等硬组织的疲劳及断裂特性[7]。

近年来有大量文献对数字图像相关方法的核心算法提出改进,其中以 Ncorr 为代表的开源 2D 数字图像 相关软件包融合了文献[8] [9]中提出的现代算法,并在其基础上做出大量改进和优化[10]。Ncorr 因其灵活 高效、可信度高而被广泛接受并使用。印度的 R. Harilal 教授, M. Ramji 教授利用开源二维 DIC 软件 Ncorr 实现在固体力学领域的成功应用[11], Ncorr 在多次实验中被证实是十分可靠的,本文便是基于 Ncorr 中的 算法计算被测物体的形变量与应变场。在数字图像相关方法计算中,相关匹配运算是该方法的核心。清华 大学潘兵等人曾提出图像的灰度插值方法对数字图像相关方法的位移测量结果存在显著的影响[12]。

本文借助数字图像相关法对生物材料——野猪牙齿的应力集中问题进行了研究,并探究数字图像相关方 法在高精度测量固体形变的应用效果。首先,完成了数字图像摄像系统搭建、喷洒散斑、样本调试等基本操 作。其次,利用高清工业相机采集实验所需的数字图像,并对图像进行处理以满足实验需求。再次,利用 2D 数字图像相关软件 Ncorr 对处理后的图像进行计算,给出野猪牙齿的应变场在微小外力水平下的变化趋势。

2. 数字图像的基本原理

2.1. 形函数

数字图像相关法是一种通过对被测物体表面变形前后图像的灰度信息进行比较分析而实现的一种非

接触式测量技术。我们分别称形变处理前与处理后的图像为"参考图像",变形后的图像为"目标图像", 其中参考图像的灰度记为 f(x,y),目标图像的灰度记为g(x',y')。首先,取某待求点 p(x₀,y₀)为中心的 (2M+1)×(2M+1)像素大小的正方形为参考图像子区。其次,在变形前后的图像中通过一定的搜索方法 计算相关函数的值,找到相关系数数值矩阵中最大或者最小值对应的点 q(x₁,y₁),从而确定目标图像子区 的中心点。最后,通过两中心点确定参考图像子区中心点的 x 轴和 y 轴方向的位移分量 u 和 v 的大小,具 体如图 1 所示。



Figure 1. Relation diagram of reference sub-region and deformation sub-region 图 1. 参考子区与变形子区关系图

通过变形处理后的图像子区,不仅其中心位置会发生变化,而且形状也可能发生一定的变化。因此,通过"形函数"和待定参数矢量 $P = \left(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}\right)$ 将变形前后图像子区中对应点的坐标(x, y)和(x', y')联系起来,如下所示:

$$\begin{cases} x' = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ y' = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{cases}$$
(1)

进一步地,由矩阵计算理论可得下式:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + u_x & u_y & u \\ v_x & 1 + v_y & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$
(2)

其中, $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial y}$, $\frac{\partial v}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial y}$ 分别为图像子区的位移梯度, (u_x, v_y) 表示图像子区的伸缩变形, (u_y, v_x) 表示图像子区的剪切 Δx , Δy 分别为点 (x, y) 横纵坐标到参考图像子区中心点 (x_0, y_0) 的距离。

2.2. 相关准则

数字图像相关方法主要以相关准则作为判断依据,通过对变形处理后的图像进行搜索,得到与变形处 理前图像子区的相关函数达到极值的子区。在本文中,采用归一化最小平方距离函数作为判断依据,其 表达式为:

$$C_{f,g}(\boldsymbol{P}) = \sum_{x=-M}^{M} \sum_{y=-M}^{M} \left[\frac{f(x,y)}{\sqrt{\sum_{x=-M}^{M} \sum_{y=-M}^{M} \left[f(x,y) \right]^{2}}} - \frac{g(x',y')}{\sqrt{\sum_{x=-M}^{M} \sum_{y=-M}^{M} \left[g(x',y') \right]^{2}}} \right]^{2}$$
(3)

式中,*M*为计算子区表征值,图像子区大小为2*M*+1。 f_m , g_m 分别为变形前后子集灰度值。参考图像子区灰 度平均值为 $f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^{M} \sum_{y=-M}^{M} f(x,y)$,变形后图像子区灰度平均值为 $g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^{M} \sum_{y=-M}^{M} g(x',y')$ 。 在归一化最小平方距离函数中,相关系数越接近于0,则相关性越强,进而接近度越高。

3. 试验测量与分析

3.1. 数字图像测量系统和试验材料介绍

本实验搭建的实验平台如图 2,实验所用 CCD 相机分辨率为 4324 × 3288 pix,图像中一个像素点代表 0.01773 mm,即1 mm 代表 56.4 个像素点。CCD 相机与样本表面垂直,以消除离面位移对测量的影响。 获取的数字图像通过 CCD 相机与随机软件 usbVideo 存入计算机,并保存为 jpg 格式,以后的运算直接提取 jpg 格式的图像进行运算。



Figure 2. Digital image experiment platform 图 2. 数字图像实验平台

无论是肉食性动物还是草食性动物,牙齿都是必不可少的。野猪属于杂食性动物,无论是在捕食或是 在自卫的情况下,它的尖牙都是至关重要的。因此,本实验采用野猪尖牙的一小部分进行研究。其宽度 *W* = 23.30 mm,长度 *H* = 39.42 mm,厚度 *T* = 5.80 mm,裂纹长度 *L* = 30.64 mm。具体示意图如图 3 所示。

3.2. 实验具体过程

1) 人工散斑: 在实验开始前需要对样本喷洒人工散斑,具体做法为在试样表面喷上一薄层白色油漆 作为底色,然后再喷上黑色油漆,从而得到黑白人工散斑。

2) 固定样本:实验中矩形框,即野猪牙齿,固定端四点固定在卷交机上,距离平台前端 40 mm,并 在矩形梁自由端施加 1 kg 的砝码,同时采集图像。



Figure 3. Schematic diagram of wild boar's fangs 图 3. 野猪尖牙示意图

为了消除边缘对数字图像计算过程带来的影响, 裁剪出 695 × 526 pix 大小的图像, 没加载负荷前的 图像(参考图像)见图 4, 加载负荷后的图像(目标图像)见图 5。

3) 实验参数设置:利用 Ncorr 软件对位移场和应变场进行分析。利用 Ncorr 软件计算应变场时,从参考图像中选择一个子集,并在变形图像中跟踪其相应位置。



Figure 4. Image before loading (reference image) 图 4. 加载负荷前的图像(参考图像)



Figure 5. Image after loading (target image) 图 5. 加载负荷后的图像(目标图像)

3.3. 测量结果与分析

本小节在图 2 的数字图像测量平台上对野猪牙齿在 Ncorr 软件下进行应变分析,给出应变场的等高线图和 应力变化趋势图。仿真模拟过程为:以野猪牙齿固定端的左下角为坐标原点,水平向右为 y 轴,竖直向上为 x 轴,朝里为 z 轴,建立空间直角坐标系。在野猪牙齿上方梁的自由端施加 1 kg 的外力,利用 Ncorr 进行分析。

图 6~图 7 给出了野猪牙齿在受外力作用下的位移变化情况,图 8~图 9 给出了相应的应力变化情况。 从位移图像可以看出,牙齿的上部和底部的位移比中间的要大,两边的横向位移也要比中间的大一些, 这与实际情况是很吻合的。从牙齿的受力图形,很难看出具体的规律性,受力的变换没有特别的规律呈 现出来,这可能是由于材料结构所导致的。



Figure 6. Lateral displacement of material under external force



Figure 7. Longitudinal displacement of material under external forces

图 7. 材料在外力作用下的纵向位移



 Figure 8. Transverse stress variation of material under external force

 图 8. 材料在外力作用下的横向应力变化情况



Figure 9. Longitudinal stress change of material under external force 图 9. 材料在外力作用下的纵向应力变化情况

进一步,为了更加清晰的认识位移和应力的变化情况,我们对计算得到的数据进行了提出,展示某一部分上面的变化情况。从图 10 左图可看出,在感兴趣区域(ROI)的左边和右边,位移的变化幅度明显比中间的大,而且左右的变换趋势具有一定的对称性。类似的情形在右图中也可以看到。关于纵向位移的变化情况,图 11 的作图看得出 ROI 的左边和右边部分的变换范围较大,右图的这种反应就更加的明确了,ROI 的上端和底部的位移变化相当的大,这在图 7 中也体现了出来。另一方面,看材料的受力变换情况,图 12 的左图看出在 ROI 左边和右边部分的受力明显要大于中间部分,且具有很好的对称性。这与实际情况是很吻合的,当物体受到外力的时候,从横向的角度来看,两边的材料受到力的作用使得材料向两边位移。在图 13 中,对其进行纵向的受力分析,可以看出 ROI 的右边和底部的纵向受力变化比较的大,尤其在边界的地方。

4. 结论

本文针对如何利用数字图像相关方法测量野猪牙齿周围的应变这一问题进行了研究。文中通过利用 MATLAB 的 2D 数字图像相关软件 Ncorr,实现了对野猪牙齿周围的应变场的相关计算。纵向与横向分析 是有一定的差异的,但是单个分析却是具有一定的规律,纵向材料分析具有一定的结构对称性,横向

















DOI: 10.12677/ijm.2019.81010

材料分析具有一定的层次递进性。在今后的研究中,可将本文的研究思路与方法应用在材料学、医学等 方面,也可为以后野猪的相关研究提供有关理论依据。

基金项目

西南科技大学大学生创新基金项目"基于数字图像相关法的生物材料应力集中研究"(项目编号: cx18-059),主持人:杨枥智;西南科技大学理学院创新基金项目"基于数字图像相关法生物材料圆孔的 极坐标化应力集中分析"(项目编号:LXCX-18),主持人:杨枥智。

参考文献

- Peter, W.H. and Ranson, W.F. (1982) Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis. Optical Engineering, 21, 427-431. <u>https://doi.org/10.1117/12.7972925</u>
- [2] Corr, D. and Accardim Graham, B. (2007) Digital Image Correlation Analysis of Interfacial Debonding Properties and Fracture Behavior in Concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 74, 109-121. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.01.035
- [3] Desaic, K., Basu, S. and Parameswa, R. (2012) Determination of Complex Stress Intensity Factor for a Crack in a Bimaterial Interface Using Digital Image Correlation. *Optics & Lasers in Engineering*, 50, 1423-1430. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.05.003
- [4] Knauss, W.G., Chasiotis, I. and Huang, Y. (2003) Mechanical Measurements at the Micron and Nanometer Scales. *Mechanics of Materials*, 35, 217-231. <u>https://doi.org/10.1016/S0167-6636(02)00271-5</u>
- [5] Chasiotis, I. and Knauss, W.G. (2002) A New Microtensile Tester for the Study of MEMS Materials with the Aid of Atomic Force Microscopy. *Experimental Mechanics*, 42, 51-57. <u>https://doi.org/10.1007/BF02411051</u>
- [6] 潘兵,谢惠民,续伯钦,等.应用数字图像相关方法测量含缺陷试样的全场变形[J]. 实验力学, 2007, 22(3-4): 379-384.
- Zhang, D.S. and Arola, D.D. (2004) Applications Tissues of Digital Image Correlation to Biological. *Journal of Bio*medical Optics, 9, 691-699. <u>https://doi.org/10.1117/1.1753270</u>
- [8] Pan, B., Wang, Z. and Lu, Z. (2010) Genuine Full-Field Deformation Measurement of an Object with Complex Shape Using Reliability-Guided Digital Image Correlation. *Optics Express*, 18, 1011-1023. <u>https://doi.org/10.1364/OE.18.001011</u>
- [9] Pan, B. (2009) Reliability-Guided Digital Image Correlation for Image Deformation Measurement. *Applied Optics*, **48**, 1535-1542.
- [10] Blaber, J., Adair, B. and Antoniou, E. (2015) Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Experimental Mechanics*, 55, 1105-1122. <u>https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1</u>
- [11] Harilal, R. and Ramji, M. (2014) Adaptation of Open Source 2D DIC Software Ncorr for Solid Mechanics Applications. *The 9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics*, New Delhi, India, 2014.
- [12] 潘兵, 谢惠民, 戴福隆. 数字图像相关中亚像素位移测量算法的研究[J]. 力学学报, 2007, 39(2): 245-252.



知网检索的两种方式:

- 打开知网页面 <u>http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD</u> 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-498X,即可查询
- 打开知网首页 <u>http://cnki.net/</u> 左侧"国际文献总库"进入,输入文章标题,即可查询

投稿请点击: <u>http://www.hanspub.org/Submission.aspx</u>

期刊邮箱: <u>ijm@hanspub.org</u>