

文章编号:1004-7220(2011)03-0269-05

前牙唇面微观纹理的测量技术研究

吴佳^{1,2}, 仲琳³, 于海洋³, 张东升^{1,4}

(1. 上海市力学在能源工程中的应用重点实验室, 上海 200072; 2. 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072;
3. 四川大学华西口腔医院 口腔疾病研究国家重点实验室, 成都 610041; 4. 上海大学 力学系, 上海 200444)

摘要: 目的 开发小尺度三维形貌测试系统, 测量前牙唇面的天然纹理特征, 为个性化牙齿修复技术提供实用数据。方法 结合体视显微镜及三维数字图像相关方法, 研制适用于小尺度物体三维形貌测量的测试系统及软件, 评价系统测量精度, 测量人体上颌左侧侧切牙唇面的三维形貌特征。结果 在 17 mm × 12 mm 的视野范围下, 测试系统的精度在面内为 0.6 μm, 离面为 5.4 μm。测得牙列唇面两条横纹的物理尺寸, 其中, 长横纹深度 83 μm, 长度 5.28 mm; 短横纹深度 41 μm, 长度 4.24 mm, 两条横纹的间距 2.85 mm。结论 小尺度三维形貌测试系统可以精确测量牙唇面的微观纹理特征。

关键词: 前牙; 三维形貌; 数字图像相关; 测量; 显微镜; 牙齿修复
中图分类号: R 3 文献标志码: A

Study on measuring method for surface micromorphology of human incisor

WU Jia^{1,2}, ZHONG Lin³, YU Hai-yang³, ZHANG Dong-sheng^{1,4} (1. Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai 200072, China; 3. State Key Laboratory of Oral Disease, West China College of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 4. Department of Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Objective To develop a microscopic 3D morphology testing system used for measuring the natural texture of human incisor, and provide practical data for the individualized technique used in dental restoration. **Methods** Based on microscope and digital image correlation (DIC), a microscopic 3D morphology testing system with its software was developed. The precision of this system was then evaluated, and the characterization of the 3D surface morphology for human incisor was measured by the system. **Results** Within the field of view (FOV) of 17 mm × 12 mm, the accuracy of in-plane displacement was estimated as 0.6 μm, while that of out-of-plane displacement was 5.4 μm. The dimension of horizontal grooves on the labial surface of incisor was determined, where the depth and length for the long groove were 83 μm and 5.28 mm, respectively; the depth and length for the short groove were 40 μm and 4.24 mm, respectively, and the space between the two grooves was 2.85 mm. **Conclusions** The microscopic 3D morphology testing system is an effective instrument for measuring the surface morphology of human incisors accurately.

Key words: Incisor; 3D morphology; Digital image correlation (DIC); Measurements; Microscopes; Dental restoration

收稿日期:2011-03-10; 修回日期:2011-03-29

基金项目:上海市重点学科建设项目(S30106)、上海市科委基金(10410701900), 口腔疾病研究国家重点实验室(四川大学)开放课题(SK-LDSCU2009KF03)。

通讯作者:张东升, Tel: (021)66135258; E-mail: donzhang@staff.shu.edu.cn。

牙科修复技术在注重功能修复的同时也逐渐开始重视美观治疗。为使修复体达到与天然牙齿之间的自然和谐,义齿需尽量与真牙保持相同的形态。目前在义齿制作中,对于牙体唇面纹路细节的描述,多是基于牙科技师的经验,随意刻画而来,缺少量化和个性化描述。而对牙唇面微观纹理特征的定量测量,可以为技师的义齿仿真修复制提供帮助,具有一定的指导意义。

结合立体视觉技术的数字图像相关法^[1-2]是一种非接触性、全场的三维测量技术,受环境影响较小^[3],一直以来都是测量物体形貌特征的有效测量手段^[4-7],但目前主要用于宏观物体的测量。为更好地对牙唇面纹理进行测量,本文提出了结合光学体式显微镜的双相机系统,开发适用于小尺度材料三维轮廓测量的测试系统及软件。考虑到人体牙体表面的典型尺寸约为 $10\text{ mm} \times 8\text{ mm}$,系统的测量视野范围设定为 $17\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 。本文将通过介绍小尺度三维数字图像相关法测试系统的构成,简单阐述三维形貌测量的原理及步骤;然后通过实验来评价测试系统的精度;最后使用该系统对人体上颌左侧侧切牙唇面上两条横纹的物理尺寸进行测量。

1 测试系统及三维数字图像相关测量原理

1.1 测试系统

本文建立了如图1所示的小尺度三维测试系统。Nikon smz1000 体视显微镜(E),具备2个标准光学输出接口,对接2台逐行扫描相机 JAI cv-a1 (C)实现对微观结构表面的图像采集(A),位于显微镜的正下方的升降载物台(D)用于放置被测物件或标定板,白光照明设备(B)用于增强图像质量。摄像机靶面物理尺寸为 $6.35\text{ mm} \times 4.81\text{ mm}$,像素尺寸为 $1\ 392 \times 1\ 040$,相机标定用正交网格板的空间频率为1线/mm。本文中测试系统的放大倍数始终为0.4倍,视野范围为 $17\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 。

1.2 三维数字图像相关测量原理及步骤

本文采用双目立体视觉的三维数字图像相关法。双目立体视觉是利用两个相机从不同角度拍摄物体表面,对两个相机拍摄的图像中的重叠区域进行相关匹配,并使用相机的标定参数计算重叠区域物体表面各点的三维世界坐标,实现对物体表面三

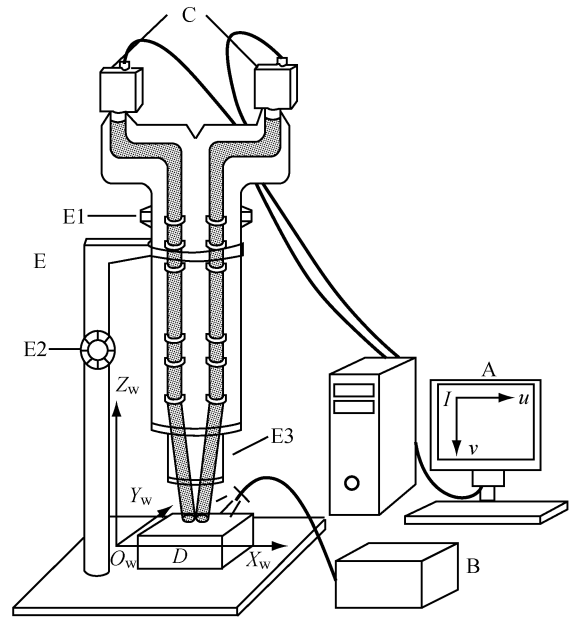


图1 三维测量系统示意图

Fig.1 The schematics of the system for 3D measurement

维形貌的测量。这一过程中有3个主要步骤:相机标定、图像匹配及三维重建。

一般相机标定需要确定的参数包括:内部参数: s -不确定系数, f -焦距, C_x -主点横坐标, C_y -主点纵坐标;外部参数: R -旋转矩阵和 T -平移矩阵。通过这些参数建立像素坐标系 $I-uv$ 与世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 的函数关系。其中像素坐标系 $I-uv$ 是指相机采集的图像所在的平面坐标系,如图1所示。世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 是指被测物体所在的三维坐标系,世界坐标 X_w 方向与图像像素坐标 u 方向相同, Y_w 方向与图像像素坐标 v 方向相反, Z_w 方向垂直载物平台竖直向上。

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s \cdot f/d_x & 0 & C_x & 0 \\ 0 & f/d_y & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

相机参数标定:本文提出通过升降平台,采用正交网格板,在相机景深范围内上下平动的方式进行图像标定的方法。具体步骤如下:将1线/mm的正交网格板水平放置在升降平台上,调节旋钮(E2)使显微镜聚焦将栅板板图像清晰地显示在计算机屏

幕上。精确控制平台沿 Z_w 正方向移动,每移动 $100\ \mu\text{m}$ 使用左、右两个相机采集 1 对图像,在相机景深范围内共采集 6~10 对标定图像用于相机参数标定。利用图像处理提取左、通过相关匹配右相机采集的各对图像中网格节点的像素坐标;通过像素坐标及其相对应的世界坐标的函数关系(式 1),并考虑一阶径向畸变,运用 Tsai 标定法^[8],计算两个相机的内外参数。

图像匹配:在左相机采集的图像上选择目标区域,右相机采集的图像上找到此目标区域,目标区域的选择必须是两台相机所采集图像的重叠部分。匹配时,采用数字图像相关法,以目标计算点为中心选择一定大小的子区域搜索窗口,通过相关算法与亚像素插值在右相机的图像上搜索到与之相关系数最高的子区域窗口,此子区域窗口的中心点便是目标点的匹配点。本文使用的相关算法是标准化协方差相关函数,对灰度线性变化具有不变性。亚像素插值选用双 3 次插值法,具有很好的连续性及光滑性。匹配算法为牛顿拉夫逊迭代法^[9],具有精度高、速

度快的优势。相关匹配的精度理论上可以达到 0.01 个像素。

三维重建:将式(1)展开,可以建立 4 个像素坐标 (u, v) 与世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 的等式,其中像素坐标及相机参数都为已知参数,这 4 个等式组成了 1 个关于世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 超静定方程组,通过最小二乘法求解方程组,得到物体表面各点在上述系统中世界坐标系中的三维坐标。

2 测量系统的误差分析

三维数字图像相关测量的误差与其测量的视野范围有关。在本文所使用的相机分辨率下,系统的估计误差在面内估计是 $D/10\ 000$,离面是 $Z/50\ 000$,其中 D 是视野的物理尺寸, Z 是物体表面到摄像机光心的距离^[1]。由 Tsai 标定计算得到左右相机参数见表 1。经计算得面内误差约为 $1.7\ \mu\text{m}$;根据相机标定结果,相机标定参数中 T_z 即物体表面到摄像机光心的距离 Z 约为 $270\ \text{mm}$,于是,离面误差约为 $5.4\ \mu\text{m}$ 。

表 1 左右相机标定参数

Tab.1 The calibration parameters of the left and right cameras

	左相机			右相机		
f/mm	103.96			102.43		
k	-6.1E-05			-9.2E-05		
T_x/mm	-18.72			-12.66		
T_y/mm	14.38			15.50		
T_z/mm	269.74			264.90		
R	0.998 291	-0.004 22	-0.058 28	0.999 62	-0.004 72	0.027 162
	-0.006 03	-0.999 5	-0.030 95	-0.003 81	-0.999 44	-0.033 23
	-0.058 12	0.031 246	-0.997 82	0.027 304	0.033 11	-0.999 08
$C_x(\text{pixel})$	869.22			540.74		
$C_y(\text{pixel})$	534.00			492.31		
s	1.001 055			1.001 006		

2.1 误差分析实验设计

采用对同一物体进行多次测量的方式考察系统的测量重复性。在标定摄像机系统后,将一具有自然纹理的金属块水平放置于测量平台上,连续拍摄 11 组图像。分别计算这 11 组图像中物体表面的三维坐标,并以第 1 组的结果作为基准。各组的三维坐标与基准图像所得三维坐标的均方差如表 2 所示。

2.2 误差分析

实验结果(见表 2)表明小尺度三维数字图像相关测试系统在视野范围 $17\ \text{mm} \times 12\ \text{mm}$ 下的面内误差为 $0.6\ \mu\text{m}$,比估计误差 $1.7\ \mu\text{m}$ 要小一半以上,离面误差为 $5.4\ \mu\text{m}$,约为面内误差的 9 倍,与估计误差一致。考虑到前牙唇面发育沟起伏在 $20\ \mu\text{m}$ 以上,整体的测量精度可以满足实验测量要求。

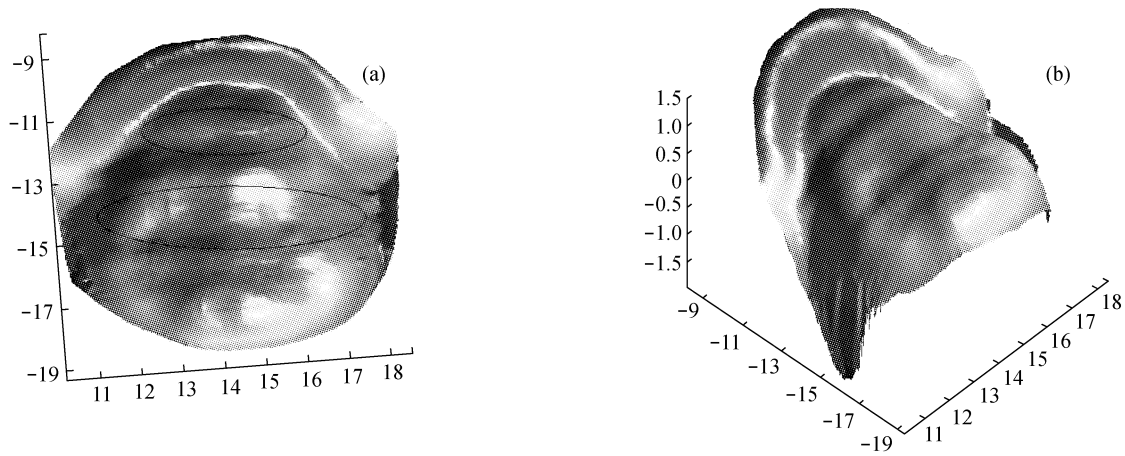


图2 牙唇面三维形貌特征 (a)牙唇面三维形貌特征正面(圆圈处为两条牙唇面横纹), (b)牙唇面三维形貌特征侧面

Fig.2 The 3D surface morphology of the incisor (a)3D frontal topography of the incisor (two horizontal grooves were circled), (b) 3D lateral topography of the incisor

表2 10组表面坐标测量结果与基准的均方差

Tab.2 The standard deviation between the fiducial displacement and measurement

	实验组号										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$X_w/\mu\text{m}$	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2
$Y_w/\mu\text{m}$	0.2	0.7	0.2	0.8	0.3	0.9	0.4	1.0	0.6	1.1	0.6
$Z_w/\mu\text{m}$	4.7	5.0	4.2	6.3	3.6	6.4	4.5	6.7	4.8	7.6	5.4

3 牙唇面微观纹理的测量

3.1 实验材料制备

本文测量的石膏牙模型由四川大学华西口腔医学院制作。该模型是用硅橡胶取人体上颌左侧侧切牙为列,并用超硬石膏灌制模型,其唇面可见两条明显的横纹。牙列表面大小约为 $8\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,适用于本文所描述的系统进行形貌测量。

3.2 实验步骤

首先在石膏牙唇面制备均匀的黑色散斑,以增加牙面颜色的对比度,提高图像匹配的速度及精度。然后将模型放置在测量系统下。调节显微镜使其在牙唇面聚焦,当图像清晰显示时,左、右相机同时拍下牙唇面的图像。

相关匹配时,以左相机拍摄到的牙表面的图像为基准图像,沿牙齿边界选出目标匹配区域。匹配子区域窗口选择为 41×41 ,计算步长为 10,单位为像素,共计算目标点 4 818 个。结合摄像机的标定参数和左、右相机中牙唇面的图像像素坐标计算牙

唇面各点在世界坐标系下的三维坐标。

3.3 实验结果

对离散的牙唇面三维物理坐标插值获得连续的牙唇面形貌特征(见图2)。测得此牙列唇面的长横纹深度 $83\ \mu\text{m}$,长度 5.28 mm ,短横纹深度 $41\ \mu\text{m}$,长度 4.24 mm ,两条横纹间的距离 2.85 mm 。

4 讨论

本文结合体式显微镜与数字图像相关方法对小尺度形貌测量技术进行了研究,开发了适用于视野范围 $17\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的小尺度三维形貌测试系统及测试软件。系统的面内和离面测量精度分别为 $0.6\ \mu\text{m}$ 和 $5.4\ \mu\text{m}$ 。本测试系统有如下特点:首先,系统采用白光照明,受周围环境影响小;其次,测量系统一经标定,可重复多次使用,标定过程已实现自动化;最后,图像匹配采用双 3 次亚像素插值及标准化的协方差相关函数,其匹配精度可以达到 0.01 像素;匹配算法选用牛顿拉夫逊迭代法,精度高且速度快。

在牙唇面纹理结构测量环节,本测试系统取得

了令人满意的结果。首先,系统的测量范围是 17 mm × 12 mm,而人体牙体表面大小一般为 8 mm × 10 mm,这样可以保证牙列表面在左右相机拍摄的图像中都处于视野的中间部分,减少图像畸变。其次,牙唇面的纹路深度一般在 40 ~ 80 μm,所以在 5.4 μm 的系统离面精度下可以准确的测量,而纹路长度在 0.6 μm 的系统面内精度下完全可以精确测量。本文提出的测量技术完美重现了牙唇面的三维形貌特征,精确刻画了唇面的纹理结构并测量了纹理尺寸的真实物理值。虽然其他三维测量技术^[10](如云纹法)也可以对牙面进行形貌测量,但本文研制的系统的精度较高。

测试系统本身存在一定的不稳定性,主要来源于相机标定误差及相关匹配误差。在标定过程中,网格点的位置坐标提取精度和升降台的平移精度会引起相机标定参数的变化,且后者的影响尤为显著。因此,为了提高测量精度,需要配置精密的移动平台。在图像相关匹配运算中,有研究表明:当相关窗口较小时,在相关匹配算法中容易引起算法的不稳定,而窗口太大,又会造成计算速度减慢^[11-12]。因此有必要选择适当的相关匹配窗口,文献[13]中认为子区域窗口大小取 41 × 41 ~ 61 × 61 较好。

5 结论

本文提出的结合体式显微镜的三维形貌测量系统可以精确重现牙唇面的形貌特征并测量其纹路深度与长度,为技师的义齿仿真修复制作提供准确有用的物理尺寸值。这种测试系统的结构简单,操作方便,测量精度高,可广泛应用于小尺度材料的三维形貌及变形测量。

参考文献:

- [1] Sutton MA, McNeill SR, Helm JD, *et al.* Advances in two-dimensional and three dimensional computer vision [J]. Top Appl Phys, 2000, 77: 323-372.
- [2] Luo PF, Chao YJ, Sutton MA, *et al.* Accurate measurement of three-dimensional displacement in deformable bodies using computer vision [J]. Exp Mech, 1993, 33(2): 123-132.
- [3] Lichtenberger R, Schreier H. Non-contacting measurement technology for component safety assessment [C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Sophisticated Occupant Safety Systems. Karlsruhe: [s. n.], 2002.
- [4] Vikrant Tiwari, Sutton MA, McNeill SR, *et al.* Application of 3D image correlation for full-field transient plate deformation measurements during blast loading [J]. Int J Impact Eng, 2009, 36(6): 862-874.
- [5] Yan JH, Sutton MA, Deng X, *et al.* Mixed-mode crack growth in ductile thin-sheet materials under combined in-plane and out-of-plane loading [J]. Int J Fract, 2009, 160: 169-188.
- [6] Siebert T, Splithof K. Vibration analysis using 3D image correlation technique [C]//14th International Conference on Experimental Mechanics. Poitiers: [s. n.], 1999.
- [7] Daniel Caduff, Jan GM Van Mier. Analysis of compressive fracture of three different concretes by means of 3D-digital image correlation and vacuum impregnation [J]. Cement Concrete Comp, 2010, 32(4): 281-290.
- [8] Tsai RY. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE J Robot Autom, 1987, 3(4): 323-344.
- [9] Bruck HA, McNeill SR, Sutton MA, *et al.* Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction [J]. Exp Mech, 1989, 29(3): 261-267.
- [10] 王丰, 李凯, 张东升. 基于时域位相分析的云纹法形貌测量技术研究 [J]. 实验力学, 2009, 24(5): 479-485.
- [11] Zhang J, Jin GC, Ma SP. Application of an improved sub-pixel registration algorithm on digital speckle correlation measurement [J]. Opt Laser Technol, 2003, 35(7): 533-542.
- [12] Lecompte D, Smits A, Bossuyt S, *et al.* Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation [J]. Opt Lasers Eng, 2006, 44(11): 1132-1145.
- [13] 潘兵, 续伯钦, 陈丁, 等. 数字图像相关中亚像素位移测量的曲面拟合法 [J]. 计量学报, 2005, 26(02): 128-134.