

文章编号: 0258-7025(2005)02-0257-05

激光全息-散斑法分析腰椎内 固定装置的稳定性

张 之¹, 鲁 阳¹, 全仁夫²

(¹ 浙江大学力学系, 浙江 杭州 310027; ² 杭州萧山中医院, 浙江 杭州 310027)

摘要 介绍了激光全息-散斑法用于人体腰椎损伤后, 内固定装置稳定性生物力学实验。分析了对椎间盘表面位移和变形的测量。对标本制备、加载装置、光路系统、实验方案设计及实验过程均进行了介绍。激光全息-散斑法具有精度高、全场、非接触测量的特点, 实验结果表明, 在模型模拟腰椎生理运动的大变形过程中, 能够测得模型在不同运动位置时椎间盘表面发生的微小三维位移, 并由位移求出椎间盘的变形, 从而为不同内固定方式的稳定性对比分析提供依据。

关键词 全息; 生物力学; 散斑; 椎间盘

中图分类号 O 348.12 **文献标识码** A

Application of Holographical-Speckle Method for Intervertebral Disc Measurement in Orientation of the Lumbar Facet

ZHANG Zhi, LU Yang, QUAN Ren-fu

(¹ Department of Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China
² Xiaoshan Hospital of Traditional Chinese Medicine, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Application experiments of holographical-speckle method for intervertebral disc measurement of offset variable and metamorphosis in orientation of the lumbar surface are performed. The instruction of specimen making, loading device, design of beam path and process of experiment are introduced. The results of experiment indicate that holographical-speckle method can obtain three dimensional (3D) offset variable field of intervertebral disc, and metamorphosis can be got by calculation. This method has high accuracy, full-field and noncontact. The results of experiment offer data for contrasting the stabilization of different spinal fixation method.

Key words holography; biomechanics; speckle; intervertebral disc

1 引 言

人体脊柱在各种姿态的生理运动过程中所发生的位移和变形, 是人体脊柱生物力学研究的基本内容之一, 对于临床医学, 具有十分重要的指导意义。对于骨伤科中的脊柱损伤修复治疗, 则需要知道骨折伤害部位安装不同内固定装置后脊柱的生物力学特性, 即脊柱在压缩、前屈、后伸、左右侧屈、左右旋转等运动过程中各节段的位移和变形, 并由此了解不同固定方式的固定效果。由于脊柱的结构和形状复杂, 其受力变形分析, 必须以实验测量为基础。

目前对于脊柱损伤的生物力学测量, 基本上都是采用应变电测方法^[1], 在脊柱标本的骨质部分表面或内固定器件表面布置电阻应变片, 测定颈椎、胸椎、腰椎以各种姿态运动时, 骨表面或内固定器件表面的变形。然而应变电测法不适合于作为脊柱重要组成部分的椎间盘的变形测量, 因为椎间盘的外层是由蛋白质纤维构成的环形软组织, 叫作纤维环, 表面有薄膜和油脂, 不易清理, 难以粘贴应变片。

由于椎间盘是软组织, 在脊柱的受力变形过程中, 其变形量远大于骨组织。因此, 不论是通过脊柱各环节之间的运动传递关系还是各节段自身的变形

收稿日期: 2004-02-27; 收到修改稿日期: 2004-05-21

作者简介: 张 之(1977—), 男, 浙江大学力学系硕士研究生, 主要从事生物力学研究。E-mail: zdouble@zju.edu.cn

量来分析内固定装置的固定效果,获取椎间盘的变形数据都是十分重要的。实际上,由于骨组织的变形量相对较小,一般可以近似地将其作为刚体看待。此外,由于脊柱是生物体组织,标本的对称性比较差。内固定装置也由于安装手术以及固定方式本身而带有非对称性,因此变形分布必然带有非对称性。通过测量,应该能够准确给出变形分布,反映出不对称程度。而应变电测只能测得一些孤立点的变形,不容易满足这方面的要求。

为了能够有效地测量椎间盘的变形,本文在人体腰椎爆裂性骨折内固定装置稳定性实验分析中,采用了激光全息干涉测量方法。在全程位移中分点采集微段位移数据的做法,可以用较少的加载分级数获得足够的位移及变形数据。

2 实验方法

2.1 实验光路系统设计

实验光路系统如图 1 所示。主要特点是利用像平面全息将全息法与散斑法结合在一起,既可以拍摄双曝光全息-散斑图,也可以单独拍摄散斑图。像平面法虽然存在受物体表面曲率影响的问题,但由于人体椎间盘的正面比较平坦,因此能够得到较好的拍摄效果。同时,像平面全息可以灵活地调节放大倍数,有利于全息干涉条纹的二次记录,降低采用 CCD 采集全息图获取位移数据的难度。

全息干涉位移测量通常采用双曝光法或实时法。实时法对干版复位精度要求苛刻,而且不能与散斑法结合以实现面内位移的测量。因此,我们采用了既能够记录离面位移,又能够记录面内位移信

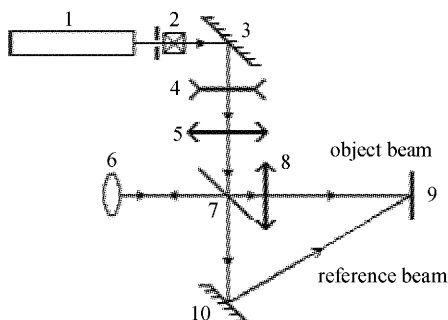


图 1 测量光路

1: 激光器; 2: 光闸; 3, 10: 反射镜; 4: 扩束镜; 5: 准直镜;
6: 脊椎体; 7: 半透射镜; 8: 物镜; 9: 胶片

Fig. 1 Beam path map of measurement system

1: laser; 2: light gate; 3, 10: reflector; 4: extender lens; 5: collimating lens; 6: vertebral body; 7: semireflecting mirror; 8: object lens; 9: film

息的双曝光法。这样可以简化实验光路,减少拍摄全息和散斑照片时的转换时间。

全息干涉位移测量的灵敏度为 $1/2$ 光波长,量程一般在几十微米以下,而散斑法的位移测量灵敏度通常最高只能达到 $8\sim 9\ \mu\text{m}$,量程可以达到 $300\ \mu\text{m}$ 以上。实验采用氩氦激光器,输出功率为 $60\ \text{mW}$ 。全息记录介质为天津 I 型全息干版。

2.2 模型制备及加载装置设计

实验标本包括第 12 胸椎(胸 12)到第一骶骨(骶 1)。其第 3 腰椎骨(腰 3)依据 Panjabi 等直接打击法制作成爆裂性骨折模型^[2]。骶骨用骨水泥固定在一个筒状金属底座上,胸 12 用骨水泥固定在一个筒状金属盘盖上,如图 2 所示。全息和散斑测量要求被测表面具有良好的光散射特性。首先用医用手术工具平整椎间盘正面的外层薄膜,将其表面处理得比较光滑,然后用丙酮擦洗表面清除油脂及其他杂质,最后将 1000 目的铜粉涂敷在椎间盘表面。铜粉颗粒在椎间盘表面的附着性较好,涂层可以做到薄且致密均匀^[3]。实际拍摄效果表明,经过处理的椎间盘表面光学特性良好,能够得到背景亮度均匀的清晰的全息干涉条纹和有较高对比度的杨氏条纹。为了保证椎间盘与椎骨有比较明显的亮度及色调差别,便于观察区分,在椎骨表面涂有一层龙胆紫。龙胆紫涂层不仅可以与铜粉涂层形成明显的亮度差别和色调对比,提高椎骨与椎间盘的界限清晰度,同时具有消毒防腐作用,可以在较长时间内保持生物组织活性。

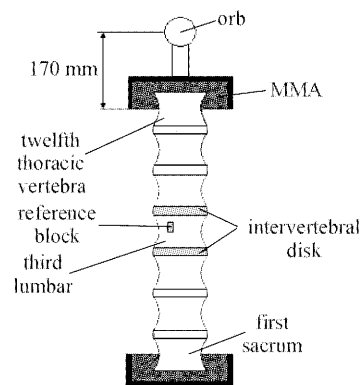


图 2 实验样本

Fig. 2 Specimen for experiment

由全息-散斑法直接测到的物理量是位移。要得到椎间盘的变形,需要将椎间盘总体位移中所包含的刚体位移扣除掉,才能求出纯粹的变形位移。为此,在与被测椎间盘相邻的腰椎(腰 3)表面粘贴

一片金属平板,作为参考块(见图 2),用以测定椎间盘的刚体位移^[4~6]。

对加载装置的基本要求是使模型能够模拟腰椎的生理运动。如图 3 所示,利用滑轮、导向压盘等机构,模拟对人上体的生理重心施加不同方向的力或

力偶,可以使模型实现垂直压缩、左扭转、右扭转、前屈、后伸、左侧屈、右侧屈 7 种方式的运动。加载装置上还设有螺旋测微机构(部件 5)和角度测量机构(部件 1),可以在加载过程中,同时测定球头的位移或转角。

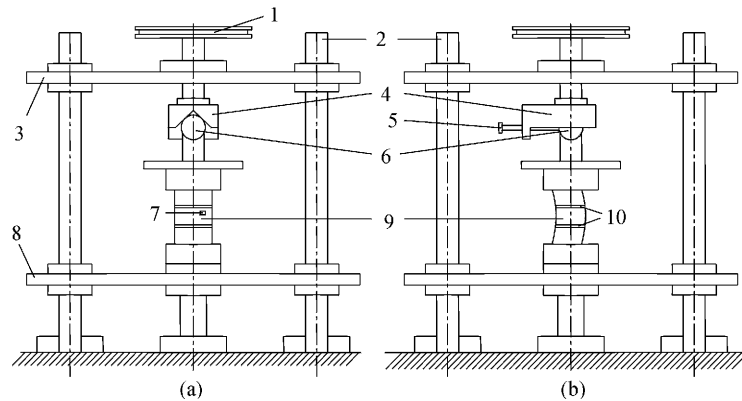


图 3 加载装置((a) 正视图;(b) 左视图)

1:轴承盘(能测定旋转角);2:支架;3:上轴承座;4:V型槽;5:球杆(微米螺纹);
6:球头;7:参考程序块;8:下轴承座;9:第三腰椎骨;10:椎间盘

Fig. 3 Setup of loading ((a) front view; (b) left view)

1: bearing disk (can measure rotation angle); 2: supports; 3: upper bearing block; 4: V-model groove; 5: pole of orb (with spiral micrometer); 6: orb; 7: reference block; 8: lower bearing block; 9: third lumbar; 10: intervertebral disk

表 1 加载方案

Table 1 Loading scheme

Mode	Per-loading	Step number	Loading/step	Perturbation	Max loading
Compress	100 N	5	100 N	No	500 N
Rotation	1.42 N·m	5	2.84 N·m	No	14.2 N·m
Anteflexion	No	5	8 mm	100 μm	40 mm
Backward bend	No	5	5 mm	100 μm	25 mm
Side bend	No	5	5 mm	800 μm	25 mm
Reference column	Exclusion compressing mode, there was 350 N in vertical direction as body weight. Compress mode loading by gravitation, rotation mode by force couple, and other by displacement.				

2.3 实验方案

当脊柱作某一姿态运动时,椎间盘会同时产生刚体位移和变形位移。其中刚体位移远大于变形位移,在运动全程中一般为毫米量级,大大超出常规全息和散斑测量的量程。如果采用分级加载的方法,把全位移划分为若干个全息或散斑量程内的子位移,先逐级测出各个子位移,然后将子位移相加,就可以得到全位移。但是这样做需要拍摄的全息散斑图数量可能会很多,实验成本高。而且加载分级数多,累积误差会随之增大。从研究的腰椎模型来看,对于压缩和扭转,采用分级加载时,利用散斑干涉,可以用较少的加载分级连续测出椎间盘在各级载荷

下产生的面内位移。而对于前屈和左、右侧屈,即使是用散斑法,分级数至少也要达到 30。显然,找到一种既能够获取足够的位移数据又可以减少拍摄数量的实验方案是十分必要的^[7]。

对于不同内固定方式稳定性的对比分析来讲,关键是要知道不同内固定方式的模型在整体运动度相同的情况下,被内固定器件固定的椎间盘变形量的差别,而模型的整体运动度是容易控制的^[8,9]。由此,对于前屈、后伸、左侧屈、右侧屈 4 种姿态的运动,设计了位移控制大跨度分级加载与等量“微扰动”测定微段位移相结合的测量方案。设加载点即球头的最大位移为 D ,将 D 等分为 n 段,每一段的长

度为 d , 以 d 为增量对模型分级加载。每一级加载又分为两步进行, 先在起点处给定球头一个小位移 s , 即微扰动。在微扰动下, 椎间盘发生的位移刚好控制在全息法或散斑法的量程内, 在微扰动前后做双曝光全息或散斑记录, 然后再使球头位移达到增量值 d 。这样逐级完成加载, 可以得到椎间盘变形全过程中若干阶段的位移。同一对比组的模型均按同一加载方案测量位移及变形, 就可以将各个模型相对应的变形数据用于稳定性分析。“微扰动”的大小, 很容易根据标本固定基座的位置、加载部位、不同运动姿态下椎间盘的运动轨迹以及测点之间的几何关系来确定。具体加载方案如表 1。

3 实验过程

实验按照加载方案进行。在每一种运动姿态的分级加载过程中, 对每个微扰动, 用同一块全息干版于扰动之前和扰动之后各曝光一次, 得到双曝光全息-散斑图。在实验光路系统中, 合适的单次曝光时间为 5~10 s。椎间盘及整个脊柱具有蠕变特性, 而且在载荷改变后的最初几分钟内, 蠕变速率较大, 这对全息-散斑图的质量有很大影响。在实验中, 每次加载后都必须等到蠕变速率衰减到足够小, 才能让干版曝光。在曝光时间内, 一般应控制蠕变位移量最大不超过记录光波长的 $1/10$, 最好是小于 $1/20$ 波长。在对不同运动姿态下的蠕变过程进行的观测中, 发现不同运动姿态的蠕变速率变化有较大差异。前屈运动蠕变时间最长, 要经过 2 min 蠕变速率才衰减到每分钟几个微米, 后伸运动蠕变衰减最快, 5 s 之后就基本达到稳定。其余几个运动姿态的蠕变衰减时间都在 1 min 以内。

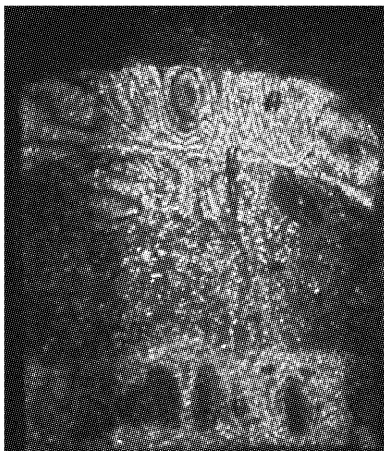


图 4 第三腰椎全息图

Fig. 4 Holograph of the third lumbar

为了保证实验数据的可靠性, 对每一种运动姿态的加载和拍摄都进行 3 次, 得到 3 组双曝光全息-散斑图或散斑图。全息干版按冲洗工艺处理后, 分别进行全息再现和散斑场逐点分析, 得到全息干涉条纹和杨氏条纹, 进而求出椎间盘的离面位移和面内位移。图 4 是后伸运动中腰 3 的一幅全息再现照片, 可以看到椎间盘及腰椎上的干涉条纹。由于可以将腰椎近似看作刚体, 实验中利用参考块上的全息条纹, 可以测出椎间盘的离面相对刚体位移(即刚体转动)和变形位移; 利用参考块上的杨氏条纹, 则可以将椎间盘的面内相对刚体位移(包括平动和转动)与变形位移分离出来。

4 实验数据处理与分析

4.1 位移数据处理的基本方法及系统误差

通过全息再现分析和散斑逐点分析, 可以分别测出椎间盘观测区域内各点及参考物的离面位移和面内位移, 由此得到三维位移场。腰椎作为刚体看待, 因此固定在腰 3 上的参考物, 其位移直接代表腰 3 的刚体位移。椎间盘与腰 3 是紧密连结的, 认为腰 3 的位移就是椎间盘的刚体位移。从椎间盘的位移中扣除刚体位移, 就得到了变形位移。由变形位移, 可以求出椎间盘表面的应变以及形貌变化。人体椎间盘正面中央区域的曲率比较小, 接近于平面, 可以直接用面内位移数据计算这一部分的应变。

根据误差分析, 以及采用金属弯曲测量检验, 位移测量及变形计算的系统误差小于 5%。

4.2 面内位移

选定相距 1 mm 的两个测量点 A, B (见图 5), 分别测得每一点的位移, 再利用参考块扣除刚体位移, 即得到面内变形位移。设 AB 在 x 方向长为 L , 加载后 A, B 运动到 A', B' , x 方向长度变为 L' , 则 x 方向的线应变为 $\epsilon_x = (L - L')/L$ 。以前后路固定左侧屈为例, 测得的位移和变形数据如表 2。

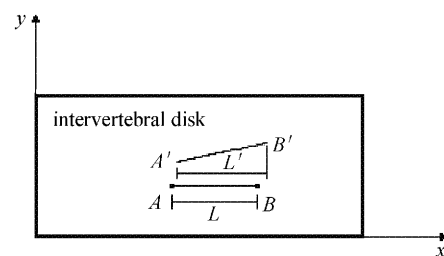


图 5 面内位移测量示意图

Fig. 5 Displacement measurement in the plane

4.3 离面位移

以椎间盘下边沿为零级, 计数椎间盘中轴线上的全息条纹, 并利用参考块扣除刚体转动, 即得到离面位移。具体说, 每一级条纹代表半个波长大小的离面位移, 用椎间盘上测得的离面位移减去由参考块上测得的离面位移即得到变形位移。刚体转角通过三角关系计算(见图 6)。D 为椎间盘高度, d 为参考块高度, L 为以椎间盘上条纹计数的离面位移, l 为参考块上条纹计数的离面位移。变形位移则为 $L - Dl/d$, 刚体转角即为 $\arctan(l/d)$ 。以前后路固定前屈运动为例, 测得椎间盘上边缘与中轴线交点的离面位移数据如表 3。

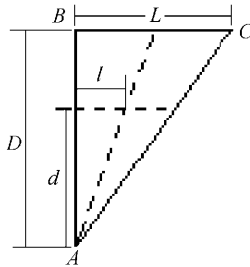


图 6 离面位移测量示意图

Fig. 6 Displacement measurement out the plane

表 2 面内位移测量

Table 2 Displacements measurement in the plane

Loading step	$L / \mu\text{m}$	$L' / \mu\text{m}$	$\epsilon_x / \mu\epsilon$
1	1000	999.4	600
2	1000	997.3	2700
3	1000	999.0	1000
4	1000	998.6	1400
5	1000	1001.3	-1300

表 3 离面位移测量

Table 3 Displacements measurement out plane

Loading step	Number of stripe on intervertebral disc	Intervetral disc deforming displacement / μm	Rotation angle / $\times 10^{-5}$ rad
1	26	-0.12	66
2	17	0.06	42
3	11	0.42	24
4	12	0.72	24
5	12	0.00	30

5 结 论

用激光全息-散斑法测定在脊柱变形过程中椎间盘表面的三维位移场, 成功拍摄到同时记录有离面位移和面内位移信息的全息-散斑图, 并获得了比

较清晰的全息干涉条纹和杨氏条纹。借助参考块, 可以由位移量计算椎间盘的变形量。观察椎间盘的多幅全息干涉条纹图可以看到, 全息条纹形态多样。一些局部区域的条纹十分密集, 说明椎间盘的变形情况比较复杂。通过全息观测, 不仅可以了解椎间盘表面的全场变形分布情况, 而且可以观察条纹的细节, 分析局部变形的特点。这些实验结果表明, 在适当控制位移量的情况下, 全息-散斑法能够有效地用于椎间盘的变形分析, 可以作为脊椎损伤修复以及椎间盘病变等医学问题研究的一种实验方法。另一方面, 全息法及散斑法不仅具有非接触、全场测量及灵敏度高特点, 而且实验结果比较直观, 便于医学等非力学专业工作者理解和分析问题。

参 考 文 献

- 1 Yue Cheng, Tong Jingwei, Li Linan *et al.*. An experimental study on the biomechanical characteristics of a new type of fixation used in treatment of tibia fractures [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, **18**(3):371~377
岳 澄, 佟景伟, 李林安 等. 新型固定器治疗胫骨骨折的生物力学特性实验研究[J]. *实验力学*, 2003, **18**(3):371~377
- 2 M. M. Panjabi, Thomas R Oxland, Masao Kifune *et al.*. Validity of the three-Column theory of thoracolumbar Fractures [J]. *Spinal*, 1995, **20**(10):1122~1127
- 3 Ma Shaopeng, Jin Guanchang, Pan Yishan. Study on the white light DSCM method for deformation measurement of rock materials [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, **17**(1):10~16
马少鹏, 金观昌, 潘一山. 白光 DSCM 方法用于岩石变形观测的研究[J]. *实验力学*, 2002, **17**(1):10~16
- 4 Lu Yang, Cao Hongsheng. A research of measuring instantaneous 3D displacements by interference method of imageholography [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1991, **6**(supplement):154~159
鲁 阳, 曹鸿生. 激光全息在测量三维瞬态位移方面的应用研究[J]. *实验力学*, 1991, **6**(增刊):154~159
- 5 Chen Fang, Yun Dazen. Identification and division of fringe orders in speckle method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1987, **7**(5):405~409
陈 方, 云大真. 散斑法中的干涉条纹级数判别及细分方法[J]. *光学学报*, 1987, **7**(5):405~409
- 6 Zhao Zhimin, Yu Hongmin, Lin Youyi. The use of multiple holographic interferometry in realizing the holographic real time-double exposure (time average) interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(2):153~156
赵志敏, 俞洪敏, 林有义. 利用多重全息实现实时-双曝光(时间平均)的全息干涉[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(2):153~156
- 7 Wang Yunshan, Liu Yehou, Wang Mingji *et al.*. Laser measurement of rock elasticity parameters [J]. *Chinese J. Lasers*, 1993, **20**(8):572~576
王云山, 刘业厚, 王明吉 等. 岩石弹性参数测量的激光实验研究[J]. *中国激光*, 1993, **20**(8):572~576
- 8 Dai Xianwen, Wang Quanping, Ouyang Jun *et al.*. The influence of posterior approaches on stability of the lumbar spine following surgery with the posterior approach [J]. *China J. Orthop. & Trauma*, 2002, **15**(11):650~651
戴先文, 王全平, 欧阳均 等. 腰椎后路手术对其稳定性的影响[J]. *中国骨伤*, 2002, **15**(11):650~651
- 9 Zhou Dong, Xu Nanwei, Zhang Yunkun *et al.*. A biomechanical study of four kinds of spinal fixation in thoracolumbar fracture [J]. *Orthop. J. China*, 2002, **9**(7):691~693
周 栋, 徐南伟, 张云坤 等. 胸腰椎骨折四种不同内固定的生物力学测试与比较[J]. *中国矫形外科杂志*, 2002, **9**(7):691~693