

Fourier变换形状测试法测量关节面形状

张 政 续伯钦 何世平 田青业*
(中国科技大学5系 *第三军医大学)

【摘要】 本文应用富里叶变换形状测试技术(FTP), 针对人体关节面进行了测试研究, 并从实际应用角度分析了FTP技术的误差及其改进方法, 通过对标准平板和标准圆柱面的测定结果表明, 精度可以达到0.05mm以上。

关键词 富里叶变换 投影栅线 形状检测

人体关节面的形状, 与关节的灵活性、稳固性等性质密切相关, 因而成为生物医学研究的重要内容。精确测量关节面的形状, 对关节各性能的解析、其力学性质的分析、以及人造关节的制造等方面, 有着重要的意义。本文研究的就是精确测量关节面形状的实用技术。

目前, 很多成熟的形状测试技术, 主要是光测技术, 如云纹法, 干涉法(包括全息干涉, 散斑干涉等), 投影栅线法, 结构光法, 以及立体照相等。这些技术各有各的特点和优势, 本文根据关节面的情况, 从实用易操作并且精度高的角度出发, 采用了M.Takeda提出的通过对投影栅线进行富氏变换的位相解调技术(FTP)^[1-3]。

FTP技术一个很大优点是只须拍下一幅栅线图即可自动进行位相解调, 从而得出高度分布。由于关节面是曲率变化不大的光滑曲面, 位相是连续的, 非常适合于这种技术, 精度很高。本文对该技术进行了细致的应用性研究, 采取了一些改进措施, 进行了误差分析。最后编制了自动处理软件, 进行了大量实验测量, 给出了部分结果。

测量原理和步骤

FTP(Fourier Transform Profilometry)通过投影均匀等间隔的正弦栅于待测表面, 用摄像机拍下受物面高度调制的畸变栅, 经富里叶变换位相解调, 即可得出物面高度分布。下面简单介绍一下大致原理, 详细说明参见文献^[4]。

投影在物面上的正弦畸变栅强度分布可表示为

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(h)] \quad (1)$$

其中, $a(x, y)$ 为背景光强, $b(x, y)$ 为光栅对比度与背景光的积, 它们都是低频项, f_0 为正弦栅的基频, $\varphi(h)$ 为物面高度 h 所产生的位相。经富氏变换, $g(x, y)$ 的频谱分成三个间隔为 f_0 的谱包, 滤出 +1 级谱项 $g_1 = 0.5be^{i(2\pi f_0 x + \varphi)}$ 并将该谱平移 f_0 到原来零级谱位置, 经富氏反变换, 得

$$g_1(x, y) = 0.5be^{i\varphi} \quad (2)$$

$$\varphi = \arctg\{\text{Im}[g_1]/\text{Re}[g_1]\} \quad (3)$$

式中, Im 、 Re 分别表示虚部和实部。由(3)式计算出位相后, 经去包络处理, 即可得到完整连续的位相 $\varphi(h)$ 。

为了由位相 $\varphi(h)$ 得出物面高度 h , 我们用图1所示的交叉光轴系统, 先在 $h=0$ 平面上放一参考平板, 得到一幅标准正弦栅线图(可能含有像畸变), 及其初位相 $\varphi(0)$, 且由于标准正弦栅的频谱三个明显的尖峰, 可以由计算机自动找出来, 从而可得出栅线基频 f_0 , 以便后面的位相解调。然

后, 放上待测物表面, 拍下畸变栅, 得出位相 $\varphi(h)$ 。于是, 由下式可得出物面高度 h 。令 $\Delta\varphi = \varphi(h) - \varphi(0)$, 则

$$h = \frac{L \cdot \Delta\varphi}{\Delta\varphi - d f_0} \quad (4)$$

式中, L 为 $h=0$ 平面到摄像机前焦点距离, d 为投影仪前焦点到摄像机前焦点的距离 (图 1)。(4) 式中用 $\Delta\varphi$, 可以消除投影仪非远心系统造成栅畸变产生的影响。

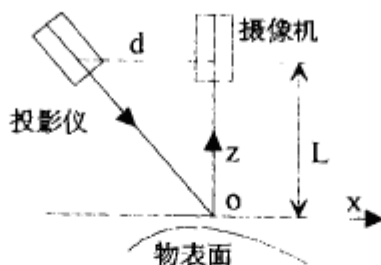


图1 交叉光轴系统

误差分析和改进

富里叶变换位相解调技术精度非常高, 对于好的干涉条纹图, M.Kujawinska 等人证实, 位相结果达到 1% 的精度^[9]。误差的主要来源是光栅的非正弦性, 随机噪声, 环境振动、光照不均等因素造成的栅线畸变, 还有光路参数的测量误差。这些因素如果不采取适当措施加以控制并削弱其影响, 将大大降低系统的整体精度。因此, 我们必须采取相应的改进措施。

1. 消除边界影响。在进行富氏变换前应进行数据外插, 并有 Hamming 窗处理^[9], 或者用 Gerchberg 迭代技术^[9], 可大降低边界误差 (约 1 倍)。

2. 消除非正弦性影响。投在物面上的光栅不一定是正弦分布, 常使位相产生随栅线波浪起伏的误差。因此, 在调节光路时, 可预先计算投在参考平面上的栅的位相, 同时调节投影仪的焦距, 直到位相分布最接近直线为止。

3. 消除背景光影响。由于物表面为曲面, 光栅的背景一般不均匀, 如果其频有些部分位于 +1 级谱同, 就会对位相产生一定影响, 这时, 就需要将数据先进行校正后, 再进行位相解调^[9]。一种方法是先用富氏变换, 滤去 ± 1 级谱, 反变换后得到背景分布 $a(x, y)$, 再将原图数据 $g(x, y)$ 除去 $a(x, y)$, 即得到校正后的数据 $g(x, y)/a(x, y)$ 。

4. 消除随机噪声和环境振动的影响。这些因素产生的一般是随机误差, 除了增加系统稳定性以外, 可采用多帧平均的方法加以消除。一方面, 在拍摄光栅图时, 进行多帧平均, 通常取 10 幅以上, 从而基本上消除电噪声及环境随机振动产生的影响; 另一方面, 可进行多次测量测出位相后再进行平均, 如果每次测量时将投影仪内的光栅改变一下位置, 那样还能进一步消除此母栅的畸变产生的误差, 使测出的结果平均后更精确。

5. 系统参数误差。计算 h 时, 公式 (4) 中的参数 L, d 无法测准, 从而给测量结果带来很大误差。因此, 这些参数最好用标准试件标定出来。一种做法是用一个精密平台, 将 $h=0$ 参考平板沿高度方向做 $n (\geq 2)$ 次平移, 每次平移至 H_i 高度 ($i=1, 2, \dots, n$), 测出位相差 $\Delta\varphi(x, y)$, 然后令 $d'=df_0$, 将 (4) 式代为

$$H_i \cdot \Delta\varphi(x, y) = L \cdot \Delta\varphi(x, y) + d' \cdot H_i \quad (5)$$

把所有点的 $\Delta\varphi(x, y)$ 代入上式中,由最小二乘法,可求出参数 L, d' ,于是,就可以用下式比较精确地进行计算了。

$$h = \frac{L \cdot \Delta\varphi}{\Delta\varphi - d'} \quad (6)$$

标准平板和圆柱面的标定实验

为了估计一下FTP技术实际测量误差大小,本文对一经过精密加工的平板和圆柱面进行了测试,图2为平板测量结果,高度的最大误差为0.05mm,均方差为0.03mm(3次数据平滑)。图3为圆柱面的测量结果,其中,图3(a)为圆柱剖面的高度分布,图3(b)为测量结果与根据实际圆柱参数算出的理论值的差值分布。从图3(b)可以看出,误差基本上在0.06mm,均方根差为0.045mm(3次数据平滑)。以上结果是用10帧平均(即对同一幅图连续采集10次,再将10次的结果取平均值),4次测量结果平均后得出的。因为存在一定的随机噪声,对数据进行平滑处理是必要的。上述测量结果,如果不进行数据平滑,平板的最大误差为0.13mm,均方根差为0.05mm;圆柱面的最大误差为0.12mm,均方根差为0.06mm。对于待测物表面为光滑面的试件,完全可以通过数据的平滑处理来提高测量精度。但若测量粗糙表面的细节分布时,不允许进行平滑处理,则测量误差可能大一倍。此外,如果增加测量次数,也可以使误差更小。

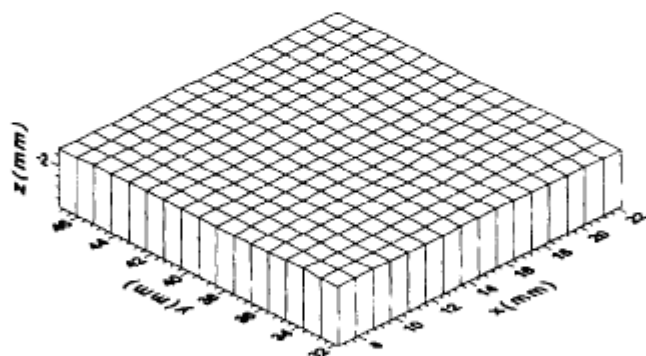
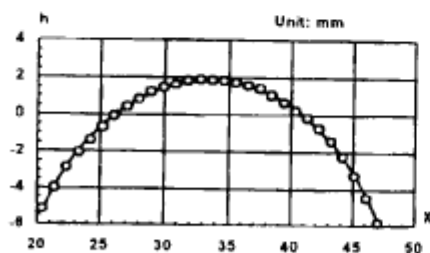
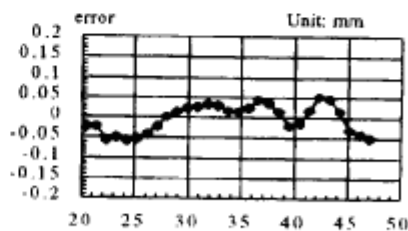


图2 平板高度分布(误差最大为0.05mm,均方根差为0.03mm)



(a)高度分布(实线为理论分布,°为测量值)



(b) 误差分布

图3 圆柱面测量结果

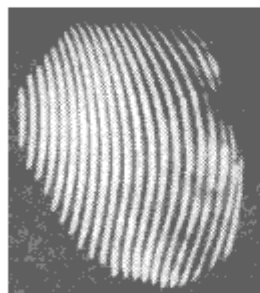
人体关节面的测量

本文应用上述FTP技术,编制了相应软件,实现了从栅线图到高度分布结果输出的全自动

处理,从而进行了大量关节面的测试工作,测量过程主要分为以下三大部分:

1. 标定工作:按照调整好光路后,放上参考平板,进行聚焦,验证光栅正交性以及参数 L , d 的标定等工作。

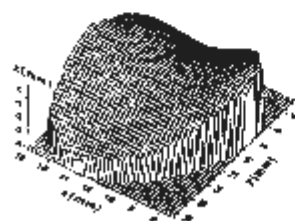
2. 边界提取:由于关节面边界不太规则(见图4),必须在不连续边界上进行特别处理后才能进行Fourier变换,因此,在处理等高线图之前必须将叶片边界提取出来。物体边界的提取,除了人工方法外,还可以应用数字图像分析技术进行边界跟踪,以便自动或半自动地完成边界的提取。为了自动进行边界提取,可以拍下一幅没有投影时的关节面的图像,然后对此图像进行边界跟踪。我们采用的边界提取方法是最佳路径搜索跟踪法,它是分步进行的,首先选一起始点(可以由计算机自动选取,也可透过人机对话选取),然后从起始点出发,根据灰度梯度最大的原则(即认为亮度变化最大的点为最有可能的边界点),搜索出长度为所选步长的三条最佳路径,对这三条路径又从其端部继续向前各搜索出三条最佳路径,再根据沿途各点灰度梯度之和最大为原则,从这九条路径中选出最佳的三条,即完成了第一步,搜索路径也向前走一步,然后从这一步所得的三条路径端部继续向前搜索、选择,如此一步步向前搜索,直到最后得到整个物体边界的最佳路径为止。这种方法比较可靠,速度也比较快,边界提取后面进行数据外插并计算表面积必不可少的。



(a) 栅线图



(b) 位相图(未去包络)



(c) 三维等高图



(d) 等高线图

图4 大猩猩CMC关节面测量结果

3. 测量高度分布和曲率分布等:将光栅投在关节面上,然后由计算机自动处理,直到输出

高度分布结果。同时,还可以有选择地输出关节面表面积,曲率分布结果。其中曲率以最大曲率,最小曲率给出,是根据高度分布,经多项式全场拟合后(对关节面一般取6-7次多项式最好),计算得出的

图4为大拇指CMC关节的一个面的测量结果,图4(a)为栅线图,图4(b)为Fourier变换后得出的位相图,图4(c)为测出的关节面三维轮廓图,图4(d)为相应的等高线图。图5为该关节面的曲率分布。经分析,该关节面的高度测试结果的精度大约在0.06mm。关节面的表面积可根据其高度分布和提取出的边界,通过数值积分计算出来,其计算结果为125mm²。

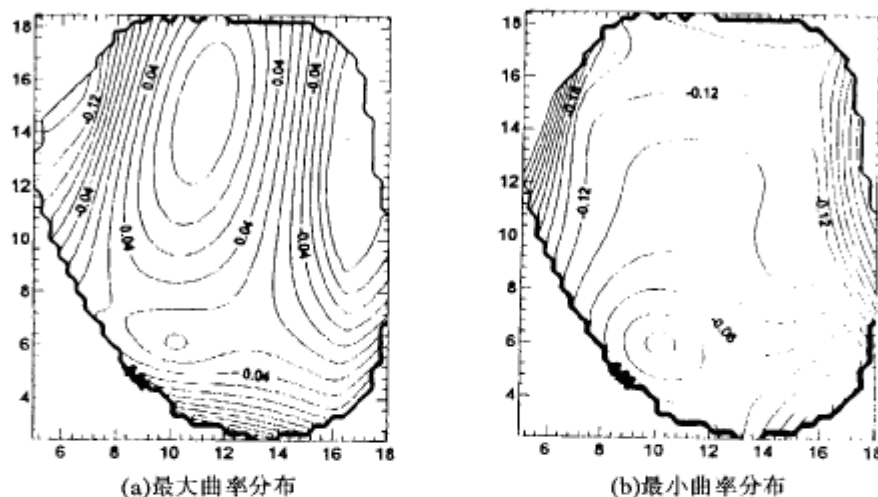


图5 关节面曲率分布结果(单位: mm⁻¹)

由于采用一维快速富氏变换,整个测量过程在486微机上只须1~2分钟,中间一般不须人工干预。经过大量测试工作,整个系统已基本实现仪器化。

讨 论

本文研究了FTP技术在人体关节面上的应用,分析了测量中的误差及改进方法,并用标准平板和圆柱面进行了验证,结果表明对一般尺寸为厘米量级的光滑曲面,可将误差控制在0.05mm以下。当然,在边界附近仍然有较大的误差,虽然还有各种办法进行进一步消除,但将会以增大工作量为代价。

关节面的边界提取,是很重要的一环,它直接影响Fourier变换的边界误差和关节面表面积的精度。为了提高边界提取的准确度,首先要选择好光照度和CCD拍摄角度,以尽可能地使边界明显(至少人眼要能分辨出)。这样,边界上的点基本上亮度变化最大,在进行边界跟踪时就能准确地搜索出它们。于是,对一幅大小为512×512像素的图,边界点搜索误差为1个像素左右,因此,边界相对误差可达: $1/512 \approx 0.2\%$ 。当然,由于噪声的存在,边界点搜索误差可能会大一点,但要控制在1%并不难。至于关节面的表面积,由于用数值积分算出,误差会进一步减少。(注:图4(c)、(d)中的粗糙边界,并不是实际提取的完整连界,而是为了便计算机画图所取的数十根网格线与实际边界的交点之连线)

由于光学方法的局限,本技术要求关节面曝露在外才能测量,因此它主要用来进行离体测量。如要活体测量,必须先对关节进行解剖,使之露出。

(下转第178页)

THE MECHANICAL BEHAVIOR OF CERVICAL, THORACIC AND LUMBAR SPINE UNDER AXIAL COMPRESSION

Yuan Lin, Wu Zhen Hui, Zhu Qing An, et al

(Medical biomechanics Laboratory of PLA, The First Military Medical University, Guangzhou 510515)

In order to get the data for the use of design an new type of Artificial verterbral Body(AVB), twelve fresh spinal specimens obtained from five human male cadavers (aged from 20 to 30 years) were tested in axial compression. Load-deformation curves of the specimens showed non-linear mechanical behavior, and could be divided into three regions: Creep region, elastic region and rigid region. The elastic range and the segalation height of AVB were accorded with the elastic region and creep region of the specimens respectively.

Key words Spinal elastic range, Artificial vertebral body, Biomechanics

参考文献

1. Takeda M, Ina H. Kobayashi. S Rourier-transform method of fringe-patternanalysis for computer-based topography and interferometry J Opt Soc Am 1982; 72(1): 156.
2. Takeda M, Mutch K. Fouier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. Appl Opt 1983; 22(24).
3. Roddier C, Roddier F. Interferogram analysis using Fourier transform technique. Appl Opt 1987; 26(9): 1668.
4. Kujawinska M, Wojciak J. High Accuracy Fouier Transform Fringe Pattern Analysis. Opt Lasers in Eng1991; 14: 325.

SHAPE MEASUREMENT OF JOINTS SURFACE BY FOURIER TRANSFORM

Zhang Zheng, Xu Boqin, He Shiping, et al

(Department 5, USTC, Hefei, Anhui, No.3 Military Medical University)

An experimental research on the shape of joints surface is conducted, suing the Fourier Tranform Profilometry (FTP). The errors associated with the practical application of FTP technique are analyzed and the corresponding refinements are presented. The results of the experiments on the standard flat and cylindrical surfaces respectively show that FTP technique has an accuracy of th least 0.05mm.

Key Words Fourier Transform, Grating projection, Shape measurement

(Original article on page 151)