

文章编号 1004-924X(2014)09-2329-08

用于提琴琴弦三维振动测量的高速摄影系统

张承忠^{1,2}, 叶邦彦^{1*}, 赵学智¹, 胡习之¹

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640;

2. 华南师范大学软件学院, 广东 佛山 528225)

摘要:分析了琴弦的亥姆霍兹运动,设计了一个基于高速摄影的非接触式光学测量系统,用于测量真实小提琴上琴弦的振动。通过特殊的光路设计和在琴弦上设置标定点,以7 000 frame/s的速度和336×480的图像分辨率拍摄了拉弦和拨弦时琴弦上标定点的三维振动形态。采用圆形霍夫变换图像处理算法、奇异值分解算法和自动批处理,对记录的大量序列图像进行处理,提取了弦振动的位移和轨迹等数据。实验结果表明,该测量系统能够精确跟踪小提琴琴弦的振动状态和包络轨迹,振动位移曲线的图像处理精确度达到0.03 mm。该系统为进一步研究提琴琴弦的振动机理和建立精确的琴弦振动理论模型提供了一种有效的实验方法。

关键词:小提琴;琴弦振动测量;三维高速摄影;Helmholtz运动;霍夫变换;亚像素分辨率

中图分类号: TB853.17; TS953.33 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2329

High-speed photographic system for 3D vibration measurement of violin string

ZHANG Cheng-zhong^{1,2}, YE Bang-yan^{1*}, ZHAO Xue-zhi¹, HU Xi-zhi¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering,

South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. School of Software Engineering, South China Normal University, Foshan 528225, China)

* Corresponding author, E-mail: byye@scut.edu.cn

Abstract: The ‘Helmholtz movement’ of a bowed string was analyzed, and a non-contact optical measurement system based on high-speed photography was designed to measure the vibration of string of a violin. By designing a special path and setting a marked point on the string, the three dimensional vibration state of the marked point on string was measured on plucking and bowing the violin string with a high speed shooting rate of 7 000 frame/s and image resolution of 336×480. On the imaging processing algorithm based on the circular Hough transform, singular value decomposition algorithm and an automatic batch program, a large number of sequential images recorded were processed and the displacement and trajectory were extracted. The experimental results show that the proposed measurement system accurately tracks the motion and trajectory of the violin string, and the data processing accuracy of vibration displacement is 0.03 mm. The designed measurement system and image processing algorithm provide a valid experimental method for studying the mechanism of violin

收稿日期:2013-11-29;修订日期:2014-01-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50875086)

string vibration and developing an accurate theoretical model for string motion.

Key words: violin; violin string vibration measurement; 3D high-speed photography; Helmholtz motion; Hough transform; sub-pixel resolution

1 引言

作为最重要的弓弦乐器,小提琴是人类智慧的结晶。17 世纪前后,意大利著名制琴大师如斯特拉迪瓦里和瓜奈里制造的提琴,声音华丽、纯净、浑厚,至今无人能超越,其价值已高达上千万美元。为了制作出媲美意大利古琴的提琴,科学家们一直尝试通过各种科学实验来探索小提琴的奥秘,寻求制作优秀提琴的规律,但迄今为止,对提琴这个“科学迷宫”尚有不少机理不甚明确。

琴弦是小提琴的发声源泉,琴弦的振动特性直接影响小提琴的声学品质。现代关于弓拉弦的物理学研究是由亥姆霍兹开始的,他提出了“亥姆霍兹运动”。其后,诺贝尔物理奖获得者拉曼研究了“亥姆霍兹运动”^[1],并在其专著中给出了简化的弦振动模型^[2]。此后,很多学者相继对提琴弓弦的作用机理进行了研究,并提出了多种弓弦摩擦振动模型^[3-5]。由于弓拉弦有许多复杂的振动模式,因此难以通过实验直接测量琴弓与琴弦的相互作用^[5],也鲜有这样的研究报道。为了检测琴弦的运动状态,文献^[3]将磁铁固定在琴体上,根据运动导线切割磁场原理检测弦的运动速度。其不足之处是不能直接得到弦振动的形态,而且磁铁的安装会影响金属琴弦的振动。

近年来,高速摄影检测技术在国内外快速发展。它综合利用光电子学、计算机视觉和图像处理及数据压缩、存贮等技术^[6],其曝光时间可短至几十万分之一秒,具有非接触、精度高、速度快、信息量多等优点,能够记录高速运动过程的某一瞬时和全部历程,目前已广泛应用于航空航天、军事和工业等领域。文献^[7]应用高速摄影技术检测平面内琴弦的运动,虽然拍摄的全景图像分辨率较高;但实际的跟踪分辨率并不高,而且弦上没有设置标定点,从而影响了图像处理的精度。

本文将高速摄影检测技术应用于小提琴弦的振动研究,通过光路设计拍摄琴弦上各特征点的三维振动形态,对视频图片序列采用圆形霍夫变

换和数据奇异值分解等计算机图像处理方法,提取琴弦的振动特性参数,包括位移和运动轨迹等,进而对琴弦的三维运动进行研究。

2 弓拉弦的亥姆霍兹运动

亥姆霍兹用振动显微镜观察琴弦的振动并将其描述成一个尖角沿着抛物线轨道进行来回运动的周期运动,如图 1 左图所示。根据亥姆霍兹的分析^[1],琴弦上任意固定点的横向运动随时间的位移曲线是锯齿三角波,如图 1 右图所示。这个固定点的振动周期分为正程和逆程两个阶段^[3]遵从:

$$t_- / T = X_c / L, \quad (1)$$

式中: t_- 是下降时间, T 是振动周期, X_c 是琴码到观察点的距离,而 L 是弦的长度。式(1)描述了弦上不同点位移的周期特征。

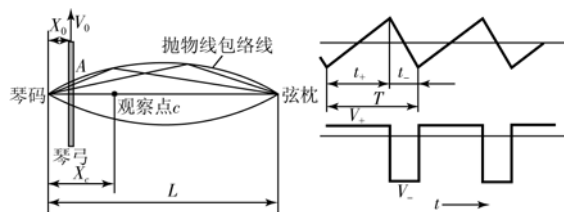


图 1 亥姆霍兹运动原理

Fig. 1 Principle of Helmholtz movement

弓拉弦的运动可看作摩擦振动问题。通常琴弦的横向位移 $y(x, t)$ 描述为:

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = f(x, t), \quad (2)$$

其中: ρ 是琴弦密度, A 是弦的横截面积, F 为弦受到的轴向张力, $f(x, t)$ 是作用在弦线上且垂直于弦的外部激励力。

3 高速摄影系统设计与工作原理

3.1 基于高速摄影的光学测量系统的组成

非接触式光学测量系统构建在三坐标测量机

的大理石平台上。它包括光源系统、光路反射镜、高速摄像机、小提琴拉弦系统及计算机图像采集、处理系统(双核 CPU, 2.0 GHz)等部分,如图 2 所示。

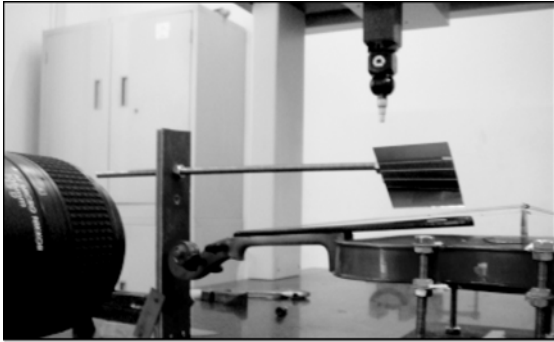


图 2 非接触式光学测量系统

Fig. 2 Non-contact optical measuring system

3.2 高速摄影测量系统的工作原理

为了测量小提琴拨弦和拉弦过程中弦的三维振动情况,首先在弦上用红漆涂上标定点。本文中三维高速摄影系统的坐标系定义为: X 轴是沿水平面弦的轴向, Y 轴垂直于弦的方向, Z 轴垂直于面板。为了使高速摄影机能同时拍摄到琴弦在两个方向的运动,本文通过反射镜将 X-Y 平面的琴弦振动图像同时传到摄像机,其原理见图 3。根据图 3 的光路设计,摄像机可以直接拍摄到琴弦上的红色标定点 A 在 X-Z 平面内的振动(摄像头中点 a'),而标定点 A 在 X-Y 平面的振动则通过光路转换传递到摄像头中的点 a'' 并被同时记录。通过调整平面镜的位置可以使摄像头中的点 a' 与通过光路反射的点 a'' 分隔开来,采用自动聚焦判别函数对两点进行精确聚焦,即可以同时拍摄到 A 点在两个平面内的振动情况。

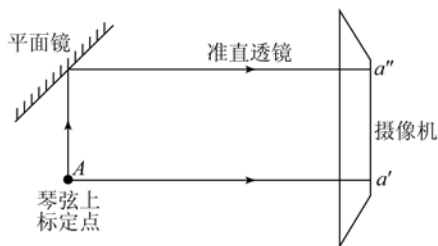


图 3 测量系统光路设计

Fig. 3 Optical path of measuring system

本文的高速摄影测量系统的特性参数与其他测量系统的对比情况见表 1。

表 1 测量系统的特性参数比较

Tab. 1 Comparison of performance among different measurement techniques

	本研究	文献[3]	文献[12]
测量方法	3D 高速摄影	磁传感器	高速摄影
类型	非接触式	接触式	非接触式
被测物类型	不限	金属导体	不限
检测目标	标定点	全弦	无标定点
拍摄帧速率/(frame · s ⁻¹)	7 000	—	6 250
测量范围	局部与全景	局部	全景
跟踪分辨率	高	—	中
测量物理量	位移	速度	位移

3.3 测量系统的实验过程

实验采用彼岸科仪有限公司的 HiSpec LTR 高速数位成像仪,提琴琴弦采用德国 Pirastro 钢丝琴弦, G, D, A, E 4 条弦的有效弦长均为 328 mm,空弦频率分别为 196, 294, 440 和 660 Hz。实验包括全景和局部显微放大拍摄,通过调整摄像机的视场和放大倍数实现。采用无频闪的光源,通过调整光源距离使拍摄到的琴弦上的红色标定点能清楚显现。通过在测试物上贴比例尺,然后根据照片上比例尺的长度来标定图的比例。

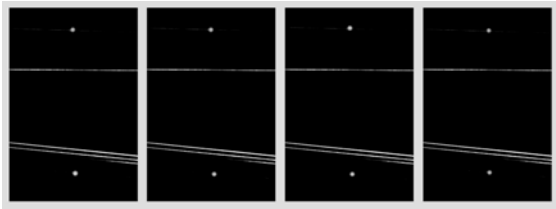
拍摄前先调整平面镜的位置,使镜头内能同时出现标记红点的实像和经过平面镜反射而成的虚像,实验获得的示例图片见图 4。其拍摄参数为:全景拍摄速度 4 000 frame/s,图片分辨率 1 504 × 192(图 4(a));放大拍摄速度 7 000 frame/s,图片分辨率 336 × 480,见图 4(b),它是拉 E 弦时视频记录中的 4 幅图例。其上部显示的是标记点在 X-Y 平面的振动状况,下部则是标记点在 X-Z 平面的运动。

对小提琴的琴弦进行拉弦和拨弦实验,拉弦实验条件为:弓速 0.25 ~ 0.5 m/s,弓压 1.5 ~ 3 N,弓弦接触位置离琴码 30 mm。



(a) 全景拍摄的实验图片

(a) Experimental picture by full shot



(b) 放大拍摄的 4 幅实验图片

(b) Four pictures by enlarged shots

图 4 高速摄影图片示例

Fig. 4 Images by high-speed photography

4 高速摄影图像数据处理

4.1 图像采集与预处理

琴弦振动高速摄像实验测量的难点在于弦的振动频率较高,振动幅度细微,要获得精确的动态图像数据比较困难。本文使用的高速摄影机尽管最高帧速率达到 30 000 frame/s,但在高速时其图像分辨率的设置却很低。如图像分辨率设置为最大时,记录速度就降到 500 frame/s。因此,合理设置帧速率和图像分辨率是图像采集的关键,这对提高实验数据的精度具有重要意义。帧速率是对弦运动时间域的采样频率,如果帧速率为 7 000 frame/s,对于 G 空弦(196 Hz),记录弦运动一个振动周期有 36 幅图像,因此有足够精度描述一个锯齿波形。图像分辨率则决定弦运动空间域的采样精度。如果图像分辨率太低,将不能分辨标定点的微小位移变化。由于高速摄像机的帧速率受图像分辨率的限制,为了获得高精度的弦振动图像,必须在足够大的图像分辨率的前提下提高帧速率,这就需要在帧速率和图像分辨率之间取一个最优的平衡。此外,对于一个给定的总图像像素值,恰当分配图像横向和纵向的分辨率也很重要。本文为了提高图像的检测精度,采用

局部放大拍摄。在获得的放大图像中(见图 4(b)),琴弦标定点的主要运动方向是沿图像的纵向,为了精确跟踪其运动变化,需要设置较大的纵向分辨率。显然同样的总像素值,图像分辨率 336×480 比 $1\,280 \times 126$ 更合适。经反复实验,本文取局部放大拍摄的帧速率为 7 000 frame/s,图像分辨率为 336×480 ,可以得到较好的拍摄效果。

图像分析之前要进行预处理。图像预处理包括 3 个步骤:图像分割,图像阈值处理和图像平滑与增强。首先对图 4(b)所示的图像进行图像分割处理,得到两幅裁剪图像。每幅图像包含一个感兴趣的区域(Region of Interest, ROI),即一个标记图像,如图 5 所示。

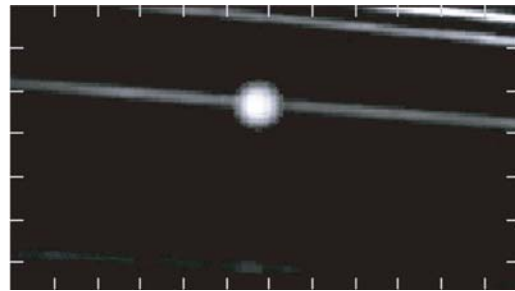


图 5 经图像裁剪的标记

Fig. 5 Cropped image

然后应用公式(3)对每个裁剪得到的图像 $I_C(x, y)$ 进行图像阈值处理:

$$I_M(x, y) = \begin{cases} 0, & |I_C(x, y)| < M \\ I_C(x, y), & |I_C(x, y)| \geq M \end{cases}, \quad (3)$$

其中:阈值 M 由经验设定。阈值处理的目的是消除图像的背景噪音和图像中除标定点以外的其它圆形结构。因为后续的圆形霍夫变换(Circle Hough Transform, CHT)将提取图像中所有圆形结构的几何中心位置坐标。其它圆形结构越少,后续识别和跟踪标定点的位置越容易。最后,对阈值操作后得到的图像 $I_M(x, y)$ 再进行平滑过滤。常用的平滑方法有中值法,局部求平均法和

k 近邻平均法。此外,也可以采用奇异值分解处理数据,因为图像本身就是一个矩阵,对此矩阵进行奇异值分解,并采用前面的几个奇异值进行重构,可以消除测量噪声干扰,具体过程参照文献[8]和[9]。如果记录的图像对比度不高,还可进行直方图均衡化操作,以进一步提高图像数据的提取或识别效果。

4.2 图像识别算法

为了检测标定点的运动,本文通过计算机图像处理方法自动提取每个图像标定点的几何中心位置的坐标变化。在识别预处理后的图像时,首先必须判断图元的类型。利用图像的特征点可进行图元识别、目标描述和图像匹配等操作。目前有许多选择特征点的算法,这些算法各有利弊^[10-11]。本系统由于要处理高速摄影的大量序列图像,如果应用神经网络进行检测,在训练时间和收敛性方面会存在一些问题,故本文采用基于梯度的 CHT 提取标定点的几何中心位置。霍夫变换根据待识别目标的形状函数定义从图像点到累加器空间(霍夫空间)的一个映射^[12]。对于圆形目标,圆的方程和 HT 映射根据下式进行运算:

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=r^2, \quad (5)$$

$$x_0=x-r\cos\theta, y_0=y-r\sin\theta, \quad (6)$$

其中: (x, y) 表示一个点的位置坐标, (x_0, y_0) 表示圆的原点, r 是圆半径, θ 是圆形角。在进行 CHT 变换之前,首先用方程(7)计算预处理图像的梯度场。

$$\nabla I_M(x, y) = \frac{\partial I_M(x, y)}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial I_M(x, y)}{\partial y} \mathbf{j}, \quad (7)$$

其中: $\nabla I_M(x, y)$ 是两个变量 (x, y) 的梯度函数, \mathbf{i} 是 x 轴的矢量, \mathbf{j} 是 y 轴的单位矢量。然后对预处理图像 $I_M(x, y)$ 进行基于梯度的 CHT 变换,直接输出图像中所有圆形目标的几何中心位置坐标和半径。在 CHT 变换中需要设置很多参数,例如目标的半径等。通过前面的预处理和参数设置,通常可以让 CHT 变换只找到这个标定点。如

果 CHT 变化也输出其它结构的位置坐标和半径,则通过标定点的估计位置来搜索到标定点中心的位置坐标。图 6 显示了由此算法检测到的标定点。

本研究感兴趣的是标定点的几何中心位置,并不关心标定点的半径。需要指出的是,CHT 可以检测出标定点的几何中心位置,并达到亚像素分辨率,这是因为标定点的几何中心位置是通过检测标定点的边缘计算出来的。

本系统的图像处理算法在 Matlab 中编程实现,并对记录的序列图像进行自动批处理。经测试,每帧图像的平均处理时间为 0.000 148 s。

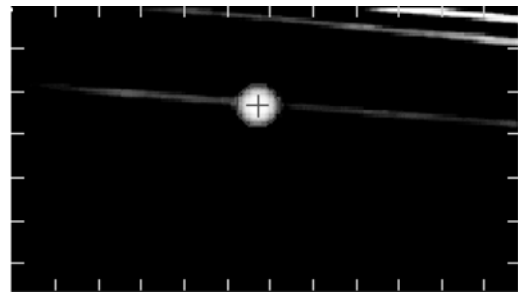


图 6 检测到的点

Fig. 6 Raw image with circles detected (center positions and radii marked)

5 琴弦振动高速摄影实验结果

5.1 拨弦运动的处理结果

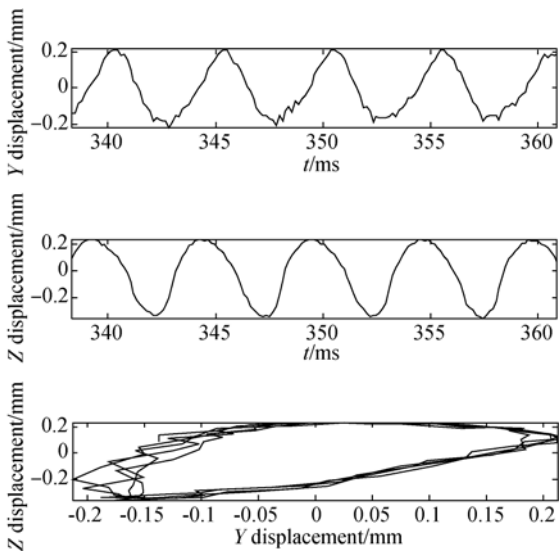
实验测量的拨空弦 G 弦时标定点的运动如图 7 所示。标定点距离琴码 64 mm。位移数据是使用上述图像处理算法从 5 395 幅连续图像中提取出来的,图 7(a)显示了 Y 和 Z 方向的位移曲线和相应的运动轨迹。根据标定点的位移数据通过微分操作可推导出速度波形。为了消除数值噪声,在速度波形的推导中应用了三点中值滤波。图 7(b)为处理后得到的速度波形。

5.2 拉弦运动的处理结果

拉空弦 G 时标定点的运动如图 8 所示。这是采用上述图像处理方法从记录的 7 101 幅序列图像得到的。由图 8(a)可见,拉弦时弦上点的位

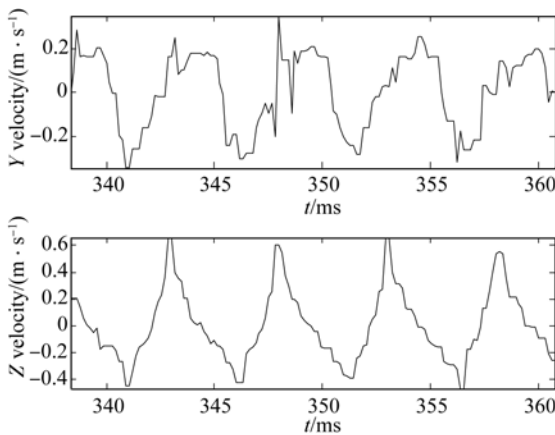
移曲线是锯齿波,与亥姆霍兹预示的运动一致。从图中标定点的空间运动轨迹可知,拉弦时弦上点的运动轨迹是一直线,属于平面运动,与拨弦的轨迹(椭圆)不同。这是采用三维拍摄得到的重要发现。此外,在 X 轴方向存在微小的位移,该位移波形是通过亚像素边缘检测图像处理算法得到的。

由图 8(a)推导的速度波形如图 8(b)所示,这些结果与亥姆霍兹预测的结果非常一致。



(a) 位移曲线

(a) Displacement curves

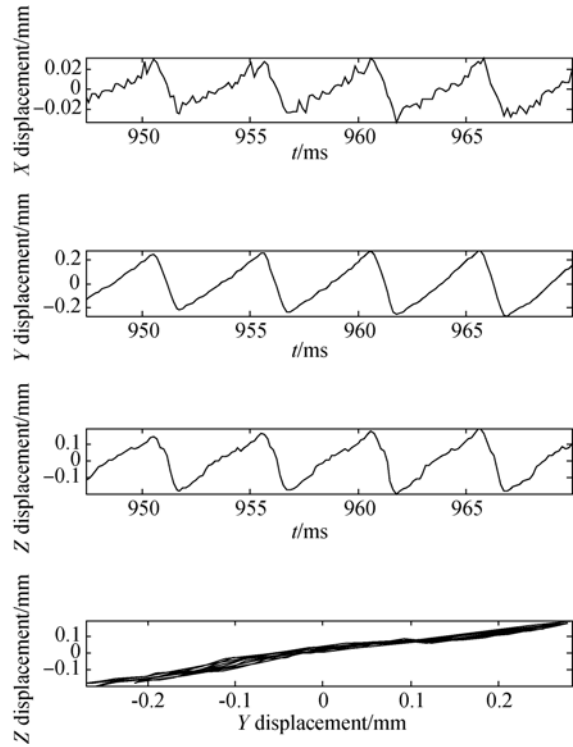


(b) 速度曲线

(b) Velocity curves

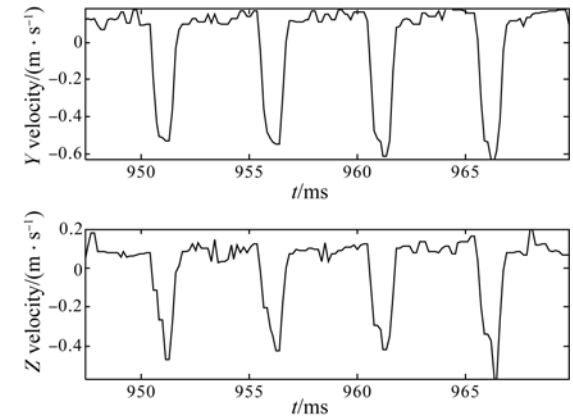
图 7 拨 G 弦时标定点的振动曲线

Fig. 7 Vibration curves of marked points with plucking G-string



(a) 位移曲线

(a) Displacement curves



(b) 速度曲线

(b) Velocity curves

图 8 拉 G 弦时标定点的振动曲线

Fig. 8 Vibration curves of marked points with bowing G-string

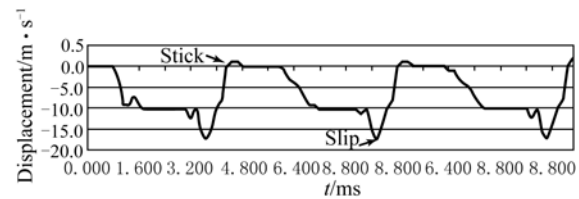


图 9 高速摄影拍摄处理的位移波形^[7]

Fig. 9 Vibration of violin string from Ref. [7]

图9为文献[7]采用高速摄影拍摄后得到的位移波形。由图可以看到,位移曲线中出现了连续水平段,这意味着弦上点在该时刻没有运动,这显然不符合实际情况。误差估计是由于全景拍摄的实际跟踪分辨率不高和对异常数据没有作处理造成的。相比之下,本文的实验曲线更为精确合理。同时利用横向和垂直两个方向的测量数据可以绘出弦振动的空间轨迹,这有助于分析弦振动的机理。此外,还可根据运弓轨迹线的倾斜程度补偿因摄像头与运弓平面不垂直而产生的位移幅度误差。

弦振动位移锯齿波的正、逆程时间比对声音频谱有很大影响,它与弓弦接触位置等因素有关。表2为实验得到的G弦各点位移曲线正、逆程时间,与亥姆霍兹提出的式(1)非常接近。

表2 弦上各点位移曲线的周期变化

Tab. 2 Vibration periods of different point positions on G-string

实验	G弦点	实验结果 (t_+/T)	公式 1(X_c/L)	准确率 /%
高速 摄影	1	2.5/22=0.113 6	40/328=0.122	93
	2	3.5/22=0.159	53/328=0.16	99.4
	3	4.5/22=0.204 5	67/328=0.204	99.8
	4	7.5/22=0.340 9	107/328=0.326	95.6
	5	10/22=0.454 5	146/328=0.445	97.9
	6	11/22=0.5	164/328=0.5	100
	7	12.5/22=0.568	187/328=0.57	99.6

参考文献:

- [1] RAMAN C V. The dynamical theory of the motion of bowed strings [J]. *Bull. Indian Assoc. Cultiv. Sci.*, 1914:43-52.
- [2] RAMAN C V. On the mechanical theory of bowed strings and of musical instruments of the violin family, with experimental verification of the results [J]. *Proc. Ind. Ass. Sci.*, 1918:15.
- [3] KOHUT J, MATHEWS M V. Study of motion of a bowed violin string [J]. *J. Acoust Soc. Am.*,

5 结 论

本文设计的非接触式光学测量系统可在不干扰弓和弦运动的状态下测量真实小提琴上琴弦的振动。通过特殊的光路设计和在琴弦上设置标定点,实现了使用一台高速摄像机对琴弦上标定点的三维振动实时摄影,克服了二维拍摄难保证摄像机聚焦轴与拍摄平面垂直的问题。相比二维测量,琴弦的三维运动测量能够提供更多信息,如弦上点拨弦与拉弦振动轨迹的不同,有助于深入研究弦运动的特性。

本文开发的基于圆形霍夫变换的图像处理算法可自动和有效地处理记录的上万幅视频序列图像,并以亚像素分辨率提取标定点的瞬态几何中心的位置坐标。通过跟踪这些标定点的瞬态运动位置变化,可获得小提琴琴弦上点的振动位移曲线和三维空间运动轨迹。

本文通过高速摄影局部放大拍摄,采用7 000 frame/s的拍摄速度和 336×480 像素的图像分辨率,测量了小提琴拨弦和拉弦过程中琴弦的振动形态。实验结果表明,该测量系统处理的位移精度达到0.03 mm。弦的振动形态满足小提琴弦振动的“亥姆霍兹运动”理论。本研究为进一步深入研究琴弦振动机理和建立精确的琴弦振动理论模型提供了一种有效的实验手段。

1971, 49(2):532-537.

- [4] GUETTLER K, THELIN H. Bowed-string multiphonics analyzed by use of impulse response and the Poisson summation formula [J]. *J. Acoust Soc. Am.*, 2012, 131(1):766-772.
- [5] DEBUT V, DELAUNE X, ANTUNES J. Identification of the nonlinear excitation force acting on a bowed string using the dynamical responses at remote locations [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2010, 52:1419-1436.
- [6] 张舞杰,杨义禄,李迪,等.自动影像测量系统的设

- 计[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(2):294-301.
- ZHANG W J, YANG Y L, LI D, *et al.*. Design of automatic image measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (2): 294-301. (in Chinese)
- [7] KARSEN C V, BOUMAN T, GWALTNEY G. Operating deflection shapes of a violin string via high speed/high resolution videography [C]. *Topics in Modal Analysis, Volume 7: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2013, 45:637-644.
- [8] 赵学智, 叶邦彦, 陈统坚. 大型矩阵奇异值分解的多次分割双向收缩 QR 算法[J]. 华南理工大学学报, 2010, 38(1):1-8.
- ZHAO X ZH, YE B Y, CHEN T J. Multi-partition and double-direction shrink QR algorithm for singular value decomposition of large-scale matrix [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2010, 38(1):1-8. (in Chinese)
- [9] ZHAO X ZH, YE B Y. Selection of effective singular values using difference spectrum and its application to fault diagnosis of headstock [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(5):1617-1631.
- [10] 杨勇, 熊伟, 叶擎昊, 等. 空间外差光谱仪系统平场波长定标实验设计与数据处理[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(10):2508-2512.
- YANG Y, XIONG W, YE Q H, *et al.*. Experimental design and data processing for flat-filed wavelength calibration of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (10):2508-2512. (in Chinese)
- [11] 王会峰, 刘上乾, 汪大宝, 等. 基于序列图像特征配准的摄像机旋转补偿算法[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(7):1330-1334.
- WANG H F, LIU SH Q, WANG D B, *et al.*. Video camera rotation compensation algorithm based on feature matching of sequence image frames [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (7): 1330-1334. (in Chinese)
- [12] NIXON M, AGUADO A S. *Feature Extraction & Image Processing* [M]. Oxford:Newnes, 2002.

作者简介:



张承忠(1968—),女,湖南常德人,博士,讲师,2004年,2014年于华南理工大学分别获得硕士、博士学位,主要研究方向为机械振动与控制、计算机图像处理技术。E-mail:zcz_505@163.com

通讯作者:



叶邦彦(1949—),男,广东四会人,博士,教授,博士生导师,1985年,1989年于华南理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事先进制造技术、机械振动和信号处理等研究。E-mail:byye@scut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)