

文章编号:1004-7220(2019)01-0047-11

基于 LabVIEW 与 6 轴机械臂的脊柱生物力学测试系统构建及初步可靠性研究

晏怡果, 谢勇, 王程, 姚女兆, 薛静波, 欧阳智华, 谭菁华, 浣溢帆, 齐蔚霖, 王文军
(南华大学附属第一医院 脊柱外科, 湖南 衡阳 421001)

摘要:目的 构建基于 LabVIEW 与 6 轴机械臂的新型离体脊柱生物力学测试系统,进行初步的可靠性研究,为下一步耦合运动测试研究做准备。方法 通过 LabVIEW 平台编程,用以太网及 Profibus 通讯的方式,将机械臂的数据实时与计算机进行通讯,实现位移控制、载荷控制,实时读取机械臂末端位置和旋转角度,通过力/扭矩传感器和数据采集卡实现数据采集、处理、储存等功能;使用数显千分表和特制固定夹具完成 6 个方向平移精度测试,并对数据进行分析;使用该平台对羊脊柱标本进行屈伸、侧屈和旋转测试,绘制出载荷-位移曲线,分析对比并获得实验结果,验证该生物力学平台的有效性。结果 开发并建立了一套基于 LabVIEW 与 6 轴机械臂的高精度离体脊柱生物力学测试系统,其平均平移精度为 $8.1 \mu\text{m}$,平均平移准确度为 $56.7 \mu\text{m}$ 。编写相关机械臂控制及数据采集、处理、储存程序,并有效完成羊脊柱生物力学测试。结论 该基于 LabVIEW 与 6 轴机械臂的脊柱生物力学测试系统能高精度地完成常规的脊柱三维运动测试,可用于下一步开展耦合运动测试研究。

关键词: 脊柱; 机械臂; 载荷/位移控制; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2019.01.008

Construction of Spine Biomechanical Test System Based on LabVIEW and Six-Axis Robot Arm and Preliminary Reliability Study

YAN Yiguo, XIE Yong, WANG Cheng, YAO Nüzha, XUE Jingbo, OUYANG Zhihua, TAN Jinghua, HUAN Yifan, QI Weilin, WANG Wenjun

(Department of Spinal Surgery, the First Affiliated Hospital of University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China)

Abstract: Objective To construct a new biomechanical testing system of *in vitro* spine based on LabVIEW and six-axis robot arm and conduct preliminary reliability studies, so as to make preparation for further studies on coupled motion testing. **Methods** By programming on LabVIEW platform, using Ethernet and Profibus to communicate the data of the robot arm with PC in real time, the displacement control and load control were realized, and the end position and rotation angle of the robot arm were read in real time. Through the force/torque sensor and data acquisition (DAQ), board DAQ, processing, storage and other functions were acquired. Using the digital micrometer and special stationary fixture, the 6-direction translation accuracy test was completed, and the data were analyzed. The flexion, extension, lateral flexion and rotation were applied on sheep spine specimen to draw the load-displacement curve, analyze and compare the experimental result, and verify the effectiveness of the bi-

收稿日期:2018-02-22; 修回日期:2018-05-07

基金项目:湖南省技术创新引导计划临床医疗技术创新引导项目(2017SK50201),衡阳市骨科内植物研发重点实验室(2018KJ115)

通信作者:王文军,主任医师,E-mail:wwj1202@hotmail.com

omechanical platform. **Results** A biomechanical test system with high precision for spine *in vitro* based on LabVIEW and 6-axis robot arm was developed and established, of which the average translational precision was 8.1 μm and the average translational accuracy was 56.7 μm . The program of control, data acquisition, data processing and storage were written, and the biomechanical test of the sheep spine was completed effectively. **Conclusions** This biomechanical test system based on Labview and 6-axis robot arm could complete the conventional three-dimensional spinal motion test with high precision and be used to conduct coupled motion test research in the next step.

Key words: spine; robot arm; load/displacement control; biomechanics

脊柱生物力学测试是骨关节生物力学测试中相对比较复杂的部分。脊柱作为一个柔性负载体,在三维空间内运动多样复杂,每相邻两个节段的椎体是处在冠状轴、矢状轴及垂直轴上三维空间力和力矩的作用下,有6个自由度的生理功能运动状态,受载后不仅会产生节段间的角度位移变化,还表现有各运动间的耦合运动变化。因此,如何精确模拟加载及描述脊柱的运动状态一直是脊柱外科研究的难点。目前骨科生物力学测试装置包括基于滑轮与线缆的脊柱生物力学测试机、材料试验机 (mechanical testing system, MTS) 及自主研发的多种测试系统等。因为硬件的可扩展性及软件的可编写性等优点,基于机器人的生物力学测试系统能够智能模拟复杂的关节运动,例如:多维度耦合运动以及动态运动速度、力控制等。6轴串联机器人相比并联机器人而言,具有更大的工作范围与灵活性;同时,相比C语言等其他语言而言,基于图形化编程语言 LabVIEW 软件是开发测量与控制系统的理想选择。本实验室基于 LabVIEW 与 6 轴机械臂构建了一套离体脊柱生物力学测试系统,首先对其进行可靠性验证,为下一步多维度耦合运动测试等更复杂的测试做准备。

1 离体脊柱生物力学平台搭建

1.1 硬件设施

该生物力学平台主要包括:① 6轴机械臂(KR 210 R2700 EXTRA, KUKA 公司,德国):由控制柜、机械手和示教器(编程器)组成,有效载荷 210 kg,最远可达距离 2.696 m,位置重复度达 $\pm 60 \mu\text{m}$;② 6 自由度力/扭矩传感器(Delta SI-660-6, ATI 公司,美国):采用高强度航空铝精密加工,最高单轴过载为额度量程的 4.1~18.8 倍;高信噪比;硅应变

片信号强于传统应变片 75 倍,信号放大后,可到达接近零噪声失真(见表 1);③ 工控机(中国研华科技 IPC-610H):采用 14 槽底板扩展性强,兼容更多数据采集卡,能抗冲击,振荡,并且能在高温下稳定工作;④ 数据采集卡(PCI-6220, NI 公司,美国):该采集卡 16 位, 250 kS/s, 16 路模拟输入,是一款多功能 M 系列数据采集 (data acquisition, DAQ) 板卡,经优化适用于需要控制成本的应用;⑤ 夹具配套设施等设备:实验夹具等配套设施使用 CAD 软件进行设计图绘制,由泰州市德亚金属制品有限公司进行加工,零件加工精度:尺寸公差 $\pm 10 \mu\text{m}$, 一次性加工同心度 $5 \mu\text{m}$, 一次性加工平行度 $5 \mu\text{m}$, 单边垂直度 $5 \mu\text{m}$, 符合本实验室设备制作要求(见图 1)。

表 1 测量范围(\pm)、分辨率和测量误差(95%的置信水平下,满载荷的百分比)

Tab.1 Calibrated ranges (\pm), sharpness of separation and measurement uncertainty

参数	F/N			T/(N·m)		
	F_x	F_y	F_z	T_x	T_y	T_z
测量范围	660	660	1 980	60	60	60
分辨率	1/8	1/8	1/4	10/1333	10/1333	10/1333
测量误差/%	1.25	1.25	1.50	1.00	1.25	1.75

注:上述测量误差值是以满量程负载的百分比表示的每个轴的最大误差量

1.2 LabVIEW 程序

采用 LabVIEW 作为开发通信的平台,利用 LabVIEW 中基于以太网的控件编程,实现 xml 文件的实时传输,LabVIEW 中利用 xml 解析器,使得整个设计的网络应用程序具有良好的移植性,可以平滑地运行在各平台各系统中。系统控制测试采用全闭环控制,传感器将采集到的数据传送给计算机,计算机根据采集的数据,控制机械臂运动,机械臂运动过程中将位置角度等数据传输给计算机。

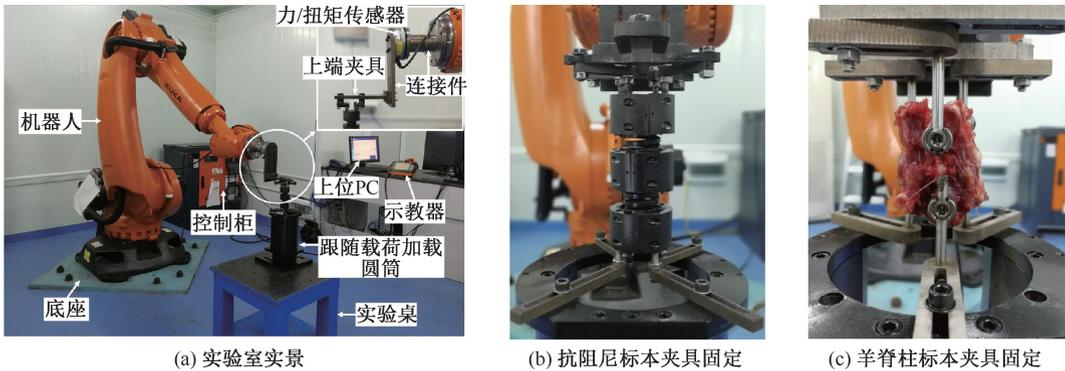
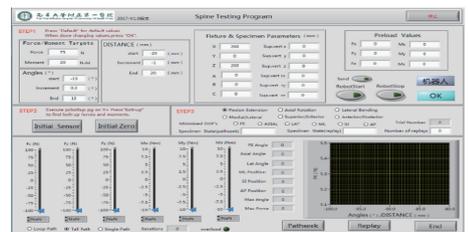


图 1 实验室布置实景及各配套设施

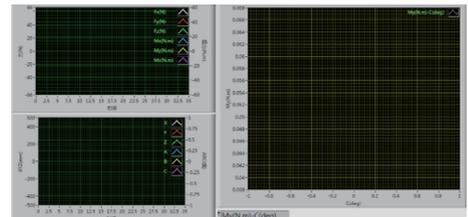
Fig.1 Laboratory layout and supporting facilities (a) Realistic picture of the laboratory, (b) Anti-damping specimen fixture, (c) Sheep spine specimen fixture

1.2.1 LabVIEW 程序控制界面 系统控制界面包括载荷控制、位移控制(角度和平移)、加载范围、加载速率、旋转中心设定、数据清零、运动方向、运动方式(双向往复运动、单向往复运动、单向运动)、循环次数、实时力/力矩数据采集、滤波显示等,实验员填写数据后,可实现屈伸、左右侧屈、轴向旋转及各方向平移运动[见图 2(a)]。该程序可以根据不同测试项目的不同需求进行相应的修改调整,具有很强的可拓展性。

1.2.2 LabVIEW 程序数据采集界面 数据采集界面包括角度-力矩、角度/平移-时间、力/力矩-时间 3 个显示界面,能实时采集机械臂反馈的数据,采集频率为 200 Hz,以波形的形式显示,通过右上角不同颜色曲线的选择,可在示波器上显示需观察的指标,并将实验数据以表格形式导出[见图 2(b)]。



(a) 控制界面



(b) 数据采集界面

图 2 LabVIEW 程序控制界面和数据采集界面

Fig.2 LabVIEW program control interface and program data acquisition interface (a) Control interface, (b) Data acquisition interface

2 生物力学平台平移精度测试

2.1 测试工具

本实验采用电子数显千分表(精度 $1 \mu\text{m}$, 成都成量工具集团有限公司),是利用光栅的光学原理工作的测量反馈装置。光栅尺经常应用于数控机床的闭环伺服系统中,可用作直线位移或者角位移的检测,其测量输出的信号为数字脉冲,具有检测范围大、检测精度高、响应速度快的特点。本实验组定制千分表固定器,该固定器用于将千分表固定于力/扭矩传感器连接件上,使千分表测量杆方向与机械臂法兰盘平行或者垂直,并能分别固定于 6 个不同的方向,实现 6 个不同方向的平移测量。

2.2 测试方法

将千分表安放于固定器中,并固定于传感器连接件上,千分表测量杆前端与挡板接触,手动调零千分表,通过上位计算机中 LabVIEW 程序控制机械臂沿基坐标轴做上、下、左、右、前、后平移运动(以机械臂自身为标准)(见图 3),每个方向进行 5、10、15 mm 3 种位移量测试,每次动作完成后,记录数据,然后机械臂复位,调零千分表,进行下一次测试,如此反复。每组动作重复 10 次,汇总数据,并计算精密度和准确度,并通过统计学分析研究不同平移运动方向和不同平移量对机械臂平移精度是否有影响,计算机机械臂平均精密度和准确度。

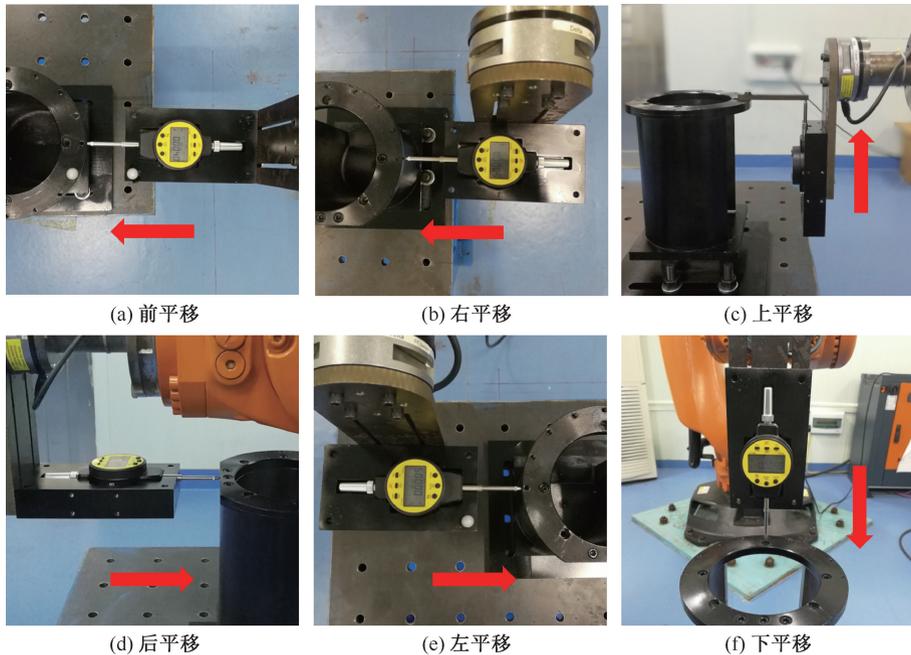


图3 机械臂平移精度测试

Fig.3 Translational precision and accuracy test on robot arm (a) Front, (b) Right, (c) Top, (d) Back, (e) Left, (f) Bottom

数据采用 SPSS 18.0 进行统计学分析,方法为单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较法(Tukey test)。 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

精密性(precision)表示相同情况下进行测量的重复性。在静态精密性测试统计分析中,可用每组测量值标准差表示,其计算公式为:

$$P_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

准确度(accuracy)描述测量值与真实值的偏差。本实验以千分尺显示值为真实值,用均方根误差(root mean square error, RMSE)表示准确度,其计算公式为:

$$A_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_j)^2} \quad (2)$$

式中: x_i 为上位机设定运动值; x_j 为电子数显千分表读取数值。

2.3 实验结果

整个实验过程均在同一运动坐标系同一运动速度下完成,均是通过正向推动千分表完成数据测量,挡板均牢靠固定。

2.3.1 不同平移方向对机械臂平移精准确度的影响 上、下、左、右、前、后方向上的平均平移精密

度分别为 2.8、7.2、3.8、30.4、3.0、1.1 μm , 平均平移准确度分别为 74.0、74.0、35.3、101.1、53.7、2.2 μm (见表 2)。通过箱图对不同方向平移平均精密性、平均准确度进行对比[见图 4(a)、(b)],进行单因素方差分析和多重比较分析,结果显示:① 机械臂做向上、向下、向左、向前、向后的平移运动都比机械臂做向右的平移运动具有更小的平移精密性;② 当机械臂做向后的平移运动时,比机械臂做向上、向下、向左、向右、向前具有更小的平移准确度;③ 当机械臂做向左的平移运动时,比机械臂做向上、向下、向右具有更小的平移准确度;④ 当机械臂做向前的平移运动时,比机械臂做向右具有更小的平移准确度(见表 3)。

2.3.2 不同平移量对机械臂平移精准确度的影响 位移量为 5、10、15 mm 的平均平移精密性分别为 2.4、12.9、9.0 μm , 平均平移准确度分别为 58.9、58.3、53.0 μm 。通过箱图对不同平移量平均精密性进行对比[见图 4(c)],进行单因素方差分析,结果显示,不同位移量的实验测试会对机械臂平移精密性影响不显著($P > 0.05$)。通过箱图对不同平移量平均准确度进行对比[见图 4(d)],进行单因素方差分析,结果表明,不同位移量对机械臂平移准

表 2 机械臂不同平移方向平移测试数据分析 (* $P < 0.05$)

Tab.2 Translation test data of robot arm in different translational directions

方向	位移量/mm	平均值/mm	精密度/ μm	平均精密度/ μm	准确度/ μm	平均准确度/ μm
上	5	4.954 9	3.3		45.2	
	10	9.922 1	3.1	2.8	78.0	74.0
	15	14.901 0	1.9		99.0	
下	5	4.932 5	3.7		67.6	
	10	9.913 7	14.6	7.2	87.4	74.0
	15	14.933 0	3.3		67.1	
左	5	4.932 0	1.8		68.0	
	10	9.968 6	7.1	3.8	32.1	35.3
	15	14.994 8	2.7		5.7	
右	5	4.886 3	2.1		113.7	
	10	9.915 6	47.4	30.4	95.6	101.1
	15	14.915 0	42.0		93.9	
前	5	4.944 3	1.3		55.7	
	10	9.945 0	4.4	3.0	55.1	53.7
	15	14.949 6	3.2		50.5	
后	5	4.997 2	2.0		3.3	
	10	9.998 9	0.7	1.1	1.4	2.2
	15	14.998 4	0.7		1.7	
<i>P</i>			0.039 *		0.000 *	

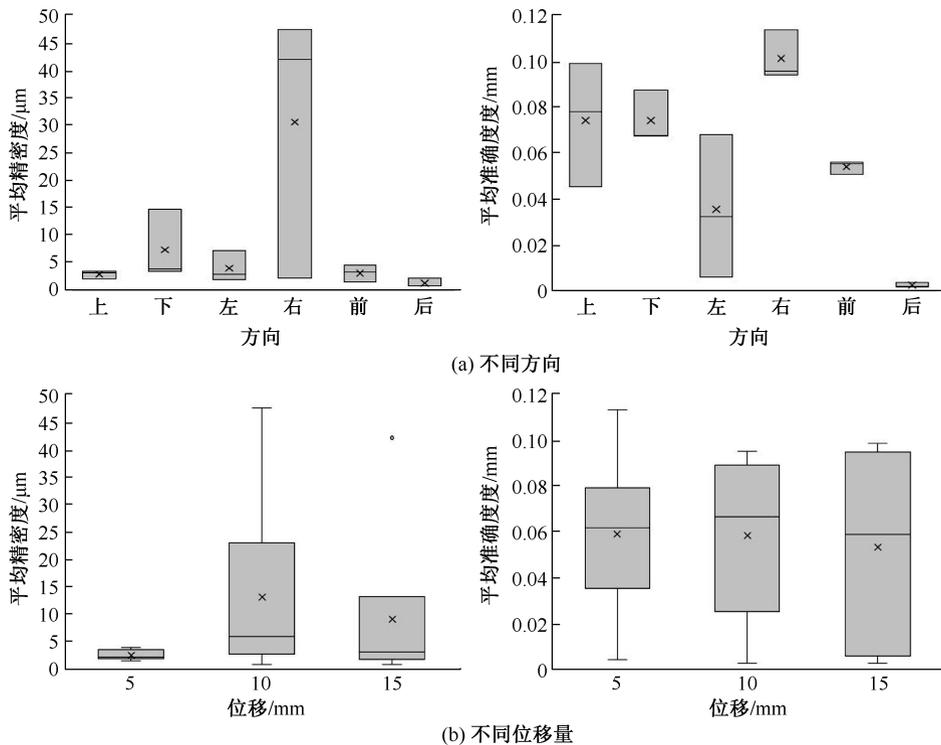


图 4 平移平均精密度、准确度箱型对比图

Fig.4 Box-type comparison chart of the average translational precision and accuracy (a) In different directions, (b) At different displacement

表3 机械臂不同平移方向平移精度多重比较 P 值 (* $P < 0.05$)Tab.3 Multiple P value of translational precision and accuracy for robot arm in different translational directions

方向	精密度/mm	准确度/mm	
上	下	0.615	0.998
	左	0.900	0.023*
	右	0.007*	0.093
	前	0.982	0.196
	后	0.852	0.000*
下	左	0.705	0.023*
	右	0.019*	0.093
	前	0.631	0.197
	后	0.494	0.000*
左	右	0.009*	0.001*
	前	0.918	0.236
	后	0.756	0.045*
右	前	0.008*	0.008*
	后	0.005*	0.000*
前	后	0.835	0.005

表4 机械臂不同平移量精度测试数据

Tab.4 Translational precision and accuracy data of robot arm at different translational displacement

位移/mm	方向	平均值/mm	精密度/ μm	平均精密度/ μm	准确度/ μm	平均准确度/ μm
5	上	4.954 9	3.3		45.2	
	下	4.932 5	3.7		67.6	
	左	4.932 0	1.8	2.4	68.0	58.9
	右	4.886 3	2.0		113.7	
	前	4.944 3	1.3		55.7	
	后	4.997 2	2.0		3.3	
10	上	9.922 1	3.1		78.0	
	下	9.913 7	14.6		87.4	
	左	9.968 6	7.1	12.9	32.1	58.3
	右	9.915 6	47.4		95.6	
	前	9.945 0	4.4		55.1	
	后	9.998 9	0.7		1.4	
15	上	14.901 0	1.9		99.0	
	下	14.933 0	3.3		67.1	
	左	14.994 8	2.7	9.0	5.7	53.0
	右	14.915 0	42.0		93.9	
	前	14.949 6	3.2		50.5	
	后	14.998 4	0.7		1.7	
P			0.431		0.957	

3.1.2 实验内容 ① 将抗阻尼模拟标本通过螺钉牢固安装在夹具上[见图 1(b)]; ② 通过示教器控制机械臂, 根据力/扭矩传感器传输回的数据, 调整机械臂位置, 使抗阻尼标本处于中立位, 通过上位计算机中 LabVIEW 程序调零各方向力/扭矩; ③ 将刚

确定的抗阻尼标本中立位设为“home”位置, 以弹簧模拟标本几何中心点为瞬时旋转中心。设置加载速率为 $0.2^\circ/\text{s}$, 角度加载范围 $\pm 5^\circ$, 扭矩加载范围为 $\pm 5 \text{ N}\cdot\text{m}_0$ 。通过上位计算机中 LabVIEW 程序控制模拟标本做屈伸, 左右侧屈和左右旋转运动, 每组动作

确度的影响不显著 ($P > 0.05$), 见表 4。
通过以上数据分析, 本实验室机械臂平均平移精密度为 $8.1 \mu\text{m}$, 平均平移准确度为 $56.7 \mu\text{m}$ 。

3 抗阻尼模拟标本和羊脊柱标本生物力学测试

3.1 抗阻尼模拟标本测试

3.1.1 抗阻尼模拟标本设计与制作 系统控制程序需不断调试和完善, 因为动物标本在调试过程中易损坏且获取途径有限, 价格昂贵。基于此, 需要制作模拟标本, 但须满足下列条件: ① 便于制作且便于安装调试; ② 能提供稳定的阻尼; ③ 不易损坏; ④ 结构与人体脊柱相似。本研究设计和制作了用于调试工作的抗阻尼模拟标本, 由 3 个定制夹具和 1 根弹簧组成, 将弹簧夹具固定于弹簧上, 两弹簧夹具间距为 1 cm , 弹簧夹具高 3 cm , 主要用于系统程序研制和调试过程中校正系统。

循环加载 3 次后,记录第 4 次运动数据,绘制各方向角度-力矩曲线。

3.1.3 实验结果及分析 由抗阻尼模拟标本角度-扭矩曲线可知,曲线光滑,呈线性(见图 5)。弹簧扭力计算公式为:

$$F = \frac{(E \cdot d^4)\psi}{(3 \ 670nD)L}$$

式中: E 为弹簧弹性模量; d 为线径; ψ 为扭动角度; n 为有效圈数; D 为中径; L 为扭臂长度。可知弹簧扭力与扭转角度呈正比,即线性关系,本实验所得角度-扭矩曲线与该公式相符合。系统根据设定值(角度加载范围为 $\pm 5^\circ$,扭矩加载范围为 $\pm 5 \text{ N}\cdot\text{m}$),在运行至 $\pm 5^\circ$ 时实现反转,数据存在一定波动,与机械臂运动惯性有关。角度及扭矩曲线存在有规律的波动,跟机械臂运动方式有关,通过减小运动加载速率可以减少上述波动。抗阻尼标本在左右侧屈运动中扭矩不对等,且曲线略弯曲,可能与弹簧位置和抗阻尼标本各方向弹性不一致(弹簧与弹簧夹具焊接位置不对称所致)有关。

3.2 羊颈椎标本生物力学测试

3.2.1 羊脊柱标本制作 已有文献表明,羊脊柱生物力学特性与人类相似^[1-2]。取羊颈椎(C6~7)节段,标本摄正侧位 X 片,排除病变和畸形标本,小心剔除标本上的肌肉组织,保留完整的韧带、关节囊和骨性组织。然后用塑料袋将羊颈椎标本密封并储存在 -20°C 冰箱中,制备和测试之前,将羊颈椎标本从冰箱中取出,并在 4°C 冷房中进行 12 h 的解冻。

3.2.2 实验内容 ① 在上下端椎各应用 3~4 枚临床应用的椎弓根钉,其中两枚置于双侧椎弓根,另外 1~2 枚置于椎体前方,然后标本上下两端各连接于定制夹具上[见图 1(c)]。标本固定后用 0.9% 生理盐水浸湿纱布包裹,并周期性喷洒 0.9% 生理盐水避免标本干燥,而影响生物力学标本的生物力学特性。② 通过示教器控制机械臂,根据力/扭矩传感器传输回的数据,调整机械臂位置,使羊脊柱标本处于中立位,通过上位计算机中 LabVIEW 程序调零各方向力/扭矩。③ 瞬时旋转中心的确定^[3]:通过将羊脊柱标本拍摄动力位 X 片,将过伸

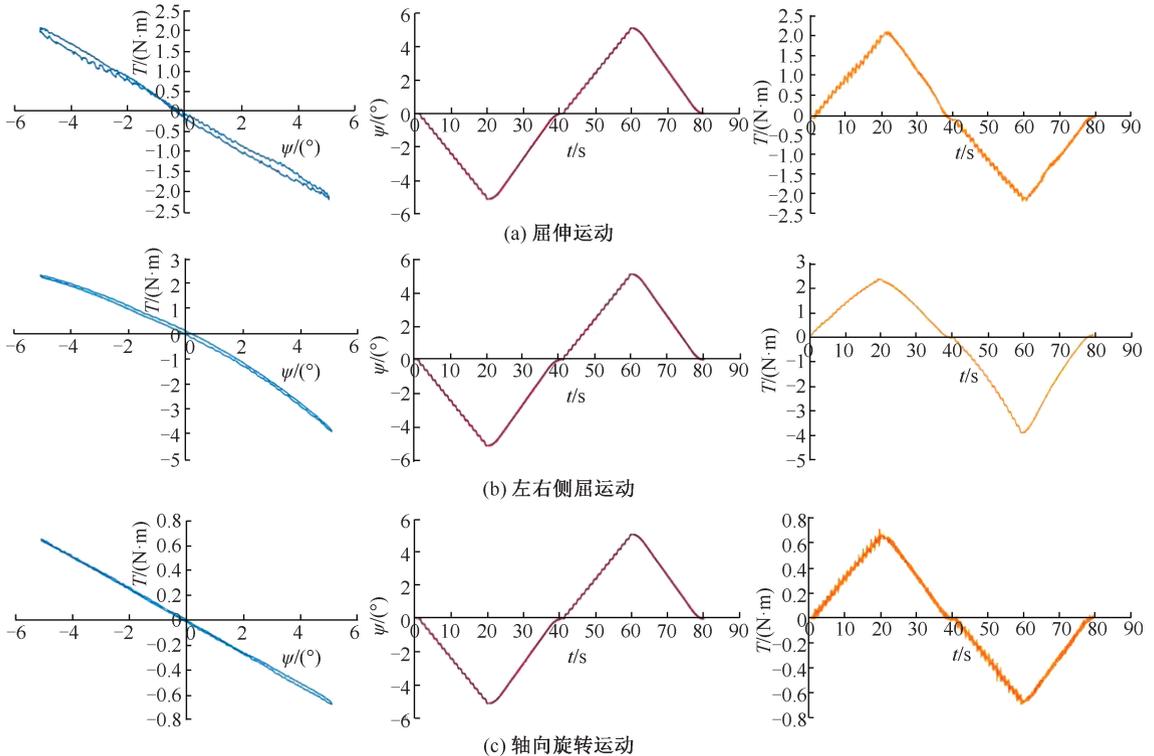


图 5 抗阻尼模拟标本运动载荷-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curves of specimens by anti-damping simulation (a) Flexion and extension, (b) Lateral bending, (c) Axial rotation

位和过屈位片中的 C7 部分重叠,分别作 C6 椎体后上角连线和前下角连线的垂直平分线,两条垂直平分线的交点即为 C6~7 节段活动的瞬时旋转中心。④ 将刚确定的羊脊柱标本中立位设为“home”位置,根据上述瞬时旋转中心位置设置旋转圆心。设置加载速率为 $0.2^\circ/\text{s}$,角度加载范围 $\pm 5^\circ$,扭矩加载范围为 $\pm 5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。通过上位机控制加

载 3 次后,记录第 4 次运动数据,绘制各方向角度-力扭矩曲线。

3.2.3 实验结果及分析 由羊脊柱标本角度-扭矩曲线,呈典型的“S”型曲线,即在中性区,小的载荷即能产生大的角度变化;而在弹性区,小的角度变化需要大的载荷改变(见图 6),与以往文献研究结果相似^[2,4-5]。

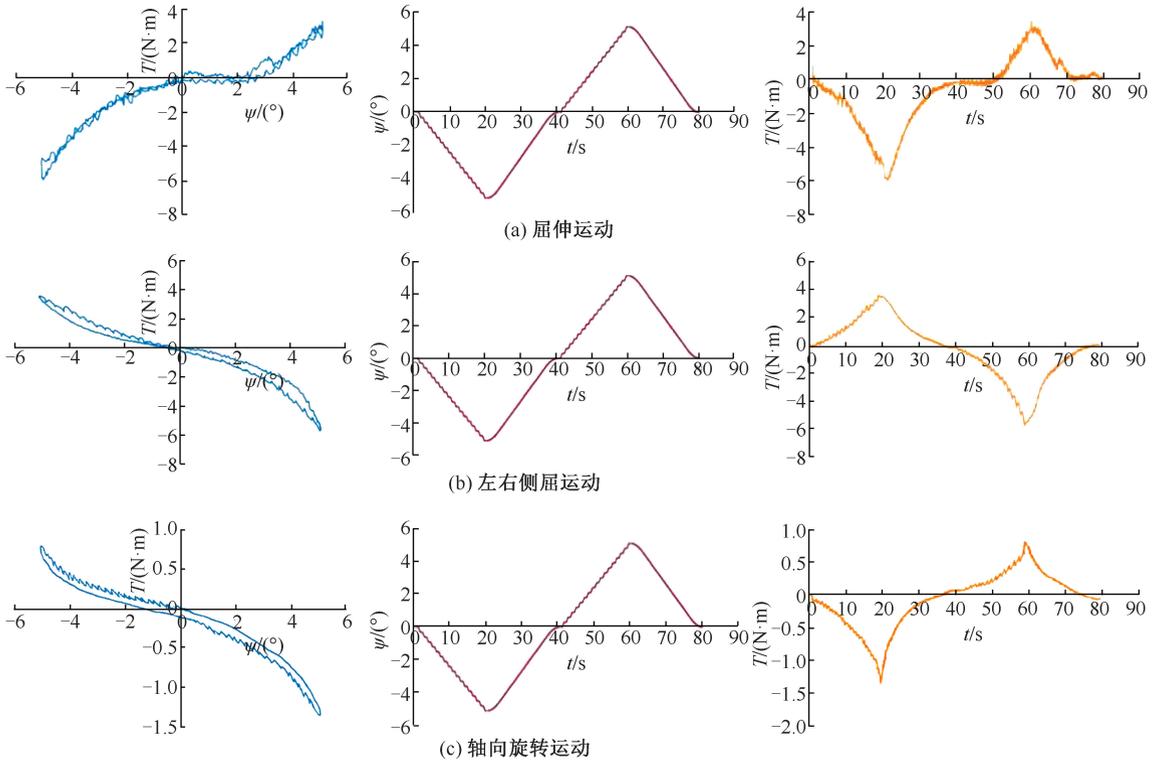


图 6 羊脊柱标本运动载荷-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves of sheep spine specimens (a) Flexion and extension, (b) Lateral bending, (c) Axial rotation

4 讨论

4.1 理想的脊柱生物力学测试系统

脊柱作为一个柔性负载体,其运动形式是多样复杂的,受载后不仅会产生节段间的角度位移变化,还表现有各运动间的耦合运动变化。Wilke 等^[6]早在 1998 年指出,脊柱运动加载装置应满足下列要求:① 标本能在所有 6 个自由度上自由运动;② 加载装置能够分别加载 6 个负载分量;③ 提供所有可能的加载方式;④ 允许连续或逐步进行;⑤ 标本在正反方向上连续装载,以获得整个运动周期的载荷-位移曲线。季伟等^[7]研究表明,脊柱三维运动实验加载设计应更为科学、更精确、加载测量

更多样的加载平台和控制模块;要更好地模拟在体的加载方式,进一步研究加载途径,以得到更接近临床实际情况的数据。目前的脊柱生物力学测试系统基本只能完成一维的旋转运动测试,无法完成复杂的多维耦合运动。因此,对目前的测试系统提出了更加智能化的要求。

4.2 测试硬件

目前已有的离体脊柱加载装置包括:基于滑轮和线缆的加载装置^[8-9]、基于材料试验机(MTS)的加载装置^[10-11]、基于笛卡尔系统的加载装置^[12]、基于钟摆系统的加载装置^[13]、基于并联机器人的加载装置^[14-15]、基于串联机器人的加载装置、基于关节臂的加载装置^[16]和基于 6 轴机器人的加载装

置^[17,19-21]。基于滑轮和线缆加载装置的主要问题有:① 手动操作,精度不高;② 不能实现动态连续加载,只适合于静态加载;③ 不能进行运动加载位置的快速转换。经过不断改进和创新,上述问题虽然得到解决,但由于装置自身存在较大的摩擦力,可能会影响最终的测试结果。基于 MTS 的加载装置是研究较早且目前依然在脊柱生物力学领域应用广泛的一种装置,其主要加载运动方式是轴向伸缩和轴向旋转,依靠配合其他固定夹具,可以实现多自由度的脊柱运动,但依然很难实现脊柱标本在 6 自由度的耦合运动和连续加载。基于笛卡尔系统的加载装置通过编程具有级联控制算法的定制 6 自由度,也能实现高精确度的运动加载和载荷控制,但其主要缺点在于:① 控制程序复杂,校准难度大;② 装置体积大,且适用范围较窄。基于钟摆系统的加载装置是一种针对相对简单生物力学测试要求实验而设计的一种装置,该装置只能完成屈伸运动,而无法实现侧曲、轴向旋转等运动加载,且施加的压缩载荷会限制脊柱节段的运动,且无法实现精准的纯力矩加载。基于并联机器人的加载装置是基于 Stewart 平台构建的脊柱生物力学测试装置,来完成脊柱标本 6 自由度的运动,具有很强的刚度、精度和强度,而它的局限性包括工作空间小而复杂,其校准程序、控制方法和运动方法也相对复杂。基于关节臂的脊柱运动加载装置在国内也常有用到,该装置优点在于能够施加更接近生理负载的连续负载,从而减小摩擦力和惯性效应,但其依然是使用悬挂砝码对脊柱标本施加轴向载荷,影响了加载装置的精确度,且进行标本不同方向运动加载时需要改变关节臂的位置才能实现,增加了实验工作量。基于 6 轴机器人的加载装置是目前研究较多且测试效果良好的装置,能有效模拟 6 自由度上的运动,并能完成多轴联合的复杂运动,同时采用混合控制方法,能满足不同要求的测试^[18]。国外已有多个实验室使用基于 6 轴机械臂的实验平台进行离体脊柱生物力学测试^[19-21],并取得了满意的实验结果。邓国勇等^[17]设计了一套基于计算机控制的 6 自由度机械臂全新实验装置,采用合力/位移控制方法对实验对象进行加载,并将其使用在离体脊柱生物力学测试中。

4.3 测试软件

以美国匹兹堡医学中心骨科 Ferguson 实验室为代表的团队采用的是基于 Matlab 软件进行的编程设计,该测试系统的编程非常复杂,过多变量的使用、传递及程序调用等影响了程序的稳定性,导致测试过程中容易出错;且其运行效率低,过长时间的测试影响了标本的质量与数据的可靠性。但就目前而言,该系统运行可靠,且有可观的文献发表的。国内团队采用 C++ 语言进行编写,目前所发表的相关文献不多,缺少深入研究与应用。美国克利夫兰诊所 BioRobotics 实验室的测试软件是基于 LabVIEW 软件编写,从文献描述来看,该实验室基于 LabVIEW 自主编写的软件能良好地应用于骨与关节的生物力学测试。目前基于机械臂测试系统的软件基本均依托以上 3 种软件编写。因为平台差异,无法对不同软件平台进行对比分析。LabVIEW 软件是一种用图标代替文本行创建应用程序的图形化编程语言,由美国国家仪器(NI)公司研制开发,不但具有控制程序的设计功能,同时还兼具信号采集和数据测试与分析等功能,能方便地调用 C 语言与 Matlab 程序,利用软件编程,不但操作简单,而且现实功能强大,又不失灵活性。同时该软件系统能非常方便地根据不同测试需求进行调整,控制扩展设备或读取各种仪器的相关数据,能满足不同测试的个性化需求。基于生物力学测试需求的多样性及测试稳定性、可扩展性及效率等方面考虑,LabVIEW 在生物力学测试控制测量系统的开发上应该更具优势。

4.4 系统可靠性

本实验装置结合 LabVIEW 和 6 轴机械臂,搭建离体脊柱生物力学平台,实现对离体脊柱标本屈伸、左右侧屈、轴向旋转及沿 X、Y、Z 轴的平移运动加载,通过 6 轴力/扭矩传感器实时反馈力/扭矩值,并能以曲线形式实时显示载荷与位移的关系,能基本满足常规离体脊柱生物力学测试。本实验室采用的德国 KUKA 工业机械臂(KR 210 R2700 EXTRA),有效载荷达到 210 kg,最远可达距离 2.696 m,意味着该平台能实现高载荷、大活动度的生物力学实验,但通常高载荷、高活动度的加载设备,往往在精准度方面会有更大的误差。本实验通过平移精准度测试发现,机械臂平均平移精密度的

8.1 μm ,平均准确度为56.7 μm ,通过测试可知该本实验平台具有很高的精度,能满足离体脊柱生物力学实验。不同方向机械臂平移精度存在差异,推测原因如下:①每个运动方向所需参加运动的机械臂轴数不同,可能导致各方向存在精度差异;②电动机的正转与反转可能存在差异,从而导致各方向存在精度差异。本实验不同位移量机械臂平移精度无明显差异,可能与实验设置组间间距较小所致,但因电子数显千分表最大量程为20 mm,目前只能进行上述测量。利用该实验平台对不同标本进行加载,验证该实验平台的可靠性和稳定性,通过抗阻尼标本实验,可知本实验平台能有效实现各方向的角度运动且能稳定传输回力/扭矩数据,使用羊脊柱标本对实验平台进行进一步验证,得到羊脊柱屈伸、左右侧屈和轴向旋转的载荷-位移曲线,结果显示所得曲线与标本的生理特征一致,验证了该实验平台的有效性。

5 结语

本实验室建立了一套基于 LabVIEW 与 6 轴机械臂的离体脊柱生物力学测试系统,采用力/位移控制方法对实验对象进行高精度加载,有效模拟脊柱各自由度运动及负载情况,并能实时记录脊柱功能单元的位置变化和受力情况,能满足目前常规的脊柱生物力学测试要求。本实验平台下一步将进行耦合运动测试等相关研究评估其是否满足更多更复杂的骨关节生物力学测试。

致谢:美国匹兹堡医学中心 Ferguson 实验室的 6 轴机器人生物力学测试系统构建经验以及对本实验室的无私帮助。

参考文献:

[1] WILKE HJ, KETTLER A, CLAES LE. Are sheep spines a valid biomechanical model for human spines? [J]. Spine, 1997, 22(20): 2365-2374.

[2] WILKE HJ, KRISCHAK ST, WENGER KH, *et al.* Load-displacement properties of the thoracolumbar calf spine: Experimental results and comparison to known human data [J]. Eur Spine J, 1997, 6(2): 129-137.

[3] 王志钢. 羊腰椎后路全椎板减压椎弓根钉内固定与否的力学性质研究[D],天津:天津医科大学,2010.

[4] PFLUGMACHER R, SCHLEICHER P, GUMNIOR S, *et al.* Biomechanical comparison of bioabsorbable cervical spine interbody fusion cages [J]. Spine, 2004, 29(16): 1717-1722.

[5] GOEL VK, WILDER DG, POPE MH, *et al.* Biomechanical testing of the spine. Load-controlled versus displacement-controlled analysis [J]. Spine (Phila Pa 1976), 1995, 20(21): 2354-2357.

[6] WILKE HJ, WENGER K, CLAES L. Testing criteria for spinal implants: Recommendations for the standardization of *in vitro* stability testing of spinal implants [J]. Eur Spine J, 1998, 7(2): 148-154.

[7] 季伟,王向阳. 脊柱离体运动加载方法研究进展 [J]. 医用生物力学, 2012, 27(4): 464-469.

Jl W, WANG XY. Advances on loading methods for spinal movement *in vitro* [J]. J Med Biomech, 2012, 27(4): 464-469.

[8] 卢海俊,黄继锋,吴增辉. 一种脊柱运动的加载装置和测量方法 [J]. 中国临床解剖学杂志, 1993, 9(2): 147-148.

[9] TANG JA, SCHEER JK, AMES CP, *et al.* Pure moment testing for spinal biomechanics applications: Fixed versus 3D floating ring cable-driven test designs [J]. J Biomech, 2012, 45(4): 706-710.

[10] ZHU Q, LANE C, CHING RP, *et al.* Translational constraint influences dynamic spinal canal occlusion of the thoracic spine: An *in vitro* experimental study [J]. J Biomech, 2008, 41(1): 171-179.

[11] TAI CL, HSIEH PH, CHEN WP, *et al.* Biomechanical comparison of lumbar spine instability between laminectomy and bilateral laminotomy for spinal stenosis syndrome: An experimental study in porcine model [J]. BMC Musculoskelet Disord, 2008, 9(1): 84-84.

[12] BENNETT CR, KELLY BP. Robotic application of a dynamic resultant force vector using real-time load-control: Simulation of an ideal follower load on Cadaveric L4-L5 segments [J]. J Biomech, 2013, 46(12): 2087-2092.

[13] CRISCO JJ, FUJITA L, SPENCINER DB. The dynamic flexion/extension properties of the lumbar spine *in vitro* using a novel pendulum system [J]. J Biomech, 2007, 40(12): 2767-2773.

[14] STOKES IA, GARDNER-MORSE M, CHURCHILL D, *et al.* Measurement of a spinal motion segment stiffness matrix [J]. J Biomech, 2002, 35(4): 517-521.

[15] 裴毅东,裴葆青,李慧,等. 基于6-DOF 并联机器人医疗器械道路运输模拟平台的关键技术及实现[J]. 中国医疗器械杂志, 2013, 37(1): 44-48.

[16] 方发炎. 基于 LabVIEW 的脊柱三维运动试验机控制系统研制[D]. 广州:华南理工大学,2012.

[17] 邓国勇,田联房,陈艺,等. 基于关节机器人的人体脊柱生

- 物力学试验装置设计 [J]. 医用生物力学, 2008, 23(6): 446-453.
- DENG GY, TIAN LF, CHEN Y, et al. Joint-robotics-based design of biomechanics testing device on human spine [J]. J Med Biomech, 2008, 23(6): 446-453.
- [18] 谢勇, 晏怡果. 离体脊柱生物力学测试的加载方法研究进展 [J]. 医用生物力学, 2018, 33(2): 174-180.
- XIE Y, YAN YG. Advances in loading methods of *in vitro* spinal biomechanical test [J]. J Med Biomech, 2018, 33(2): 174-180.
- [19] NOBLE LD, COLBRUNN RW, LEE DG, et al. Design and validation of a general purpose robotic testing system for musculoskeletal applications [J]. J Biomech Eng, 2010, 132(2): 1-25.
- [20] SCHULZE M, HARTENSUER R, GEHWEILER D, et al. Evaluation of a robot-assisted testing system for multisegmental spine specimens [J]. J Biomech, 2012, 45(8): 1457-1462.
- [21] YAN Y, BELL KM, HARTMAN RA, et al. *In vitro* evaluation of translating and rotating plates using a robot testing system under follower load [J]. Eur Spine J, 2017, 26(1): 189-199.

《医用生物力学》2016 年度“最高被引论文”结果公示

为鼓励作者将创新性、高质量的学术论文发表在《医用生物力学》杂志上,促进学术交流,提高学术水平,本刊从 2012 年起开展了《医用生物力学》优秀论文评选活动。2018 年 12 月底,本刊编辑部委托中国科学院上海科技查新咨询中心对本刊 2016 年发表的 63 篇论著文章进行检索,检索的数据库为中国学术文献网络出版总库(CNKI)、中国科学引文库(CSCD)、万方数据知识服务平台、Science Citation Index Expanded(SCI-E)。本刊编委会评审专家小组根据检索报告出具的单篇论文被引频次排序,通过综合评定,评选出 6 篇优秀论文。现对拟获奖论文进行公示。公示无异议后,编辑部将对 6 篇论文予以表彰,授予“《医用生物力学》2016 年度最高被引论文奖”,获奖作者将获得编辑部颁发的证书及奖金 1500 元。

若有异议,请在公示之日起 15 日内向本刊编辑部反映。欢迎本刊广大读者、作者就上述论文的任何问题提出反馈意见。电话:(021)23315397,电子邮箱:shengwulixue@163.com

本刊编辑部
2019 年 01 月 14 日

附《医用生物力学》2016 年度“最高被引论文奖”名单(*为通讯作者)

题名:坐骨神经痛患者的步态特征

作者:郑陈帆,刘艳成,闫松华,夏群,苗军,白剑强,张宽*

单位:首都医科大学;天津市天津医院

来源:医用生物力学, 2016, 31(1): 73-77

题名:TGF- β 1 对大鼠肩袖损伤修复术后腱-骨愈合的影响

作者:张冲*,李莉

单位:河北省中医院;河北医科大学

来源:医用生物力学, 2016, 31(2): 167-170

题名:6 岁儿童全颈有限元模型的构建及验证

作者:吕文乐,阮世捷*,李海岩,崔世海,贺丽娟,王春祥

单位:天津科技大学;天津市儿童医院

来源:医用生物力学, 2016, 31(2): 95-101

题名:microRNA-133b 在低切应力诱导血管内皮细胞影响血管平滑肌细胞增殖中的作用

作者:马英英,王璐,包晗,韩悦*,齐颖新*

单位:上海交通大学

来源:医用生物力学, 2016, 31(5): 408-415

题名:3 种不同后路内固定方式及其横连治疗胸腰段骨折的力学性能比较

作者:余伟波,梁德*,叶林强,江晓兵,黄学成,姚珍松

单位:广州中医药大学

来源:医用生物力学, 2016, 31(2): 142-147

题名:个性化扁平足矫形鞋垫的生物力学研究

作者:苏宏伦,郭俊超,莫中军,樊瑜波*

单位:北京航空航天大学;国家康复辅具研究中心

来源:医用生物力学, 2016, 31(6): 490-494