doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.065

基于骨骼关节识别的拖拉机驾驶室座椅舒适度评价

张开兴[1]　张　斓[1]　杨　刚[1]　赵秀艳[2]　刘贤喜[1,3]　李姣姣[4]

(1.山东农业大学机械与电子工程学院,泰安 271018;2.山东农业大学信息科学与工程学院,泰安 271018;
3.山东省农业装备智能化工程实验室,泰安 271018;4.陕西省计量科学研究院,西安 710065)

摘要:为优化拖拉机驾驶室座椅设计,减轻驾驶员作业负担,提高作业效率,解决我国拖拉机在驾驶室座椅舒适性方面技术基础研究不足的问题,提出一种基于骨骼关节识别的拖拉机驾驶室座椅舒适度评价方法。首先,在对拖拉机座椅舒适性影响因素分析的基础上选取人体坐姿关节角为研究因素,在配备不同座椅的两种拖拉机上利用消费级深度相机 Kinect v2 进行 8 组驾驶动作捕捉试验,获得了在不同驾驶动作下精确度为 0.01°的关节角信息;然后,将关节角数据导入人体建模仿真分析软件 Jack 中得到人体模型,根据不同的驾驶动作进行了关节力矩仿真及下背部受力仿真,分析得到人体舒适度结果;最后,基于层次分析法构建了拖拉机座椅舒适度评价指标层次结构模型,确定各指标权重并进行一致性检验,对涉及的所有指标的原始数据进行处理并计算得到座椅舒适度的综合评价结果。仿真结果表明,相比于普通座椅的拖拉机,在配备基于人机工程学座椅的拖拉机上作业时,人体模型动作完成能力增加 10 个百分点且无关节不适的情况,其腰部关节处的压力在驾驶姿势下可以有效减少 80 N,在扭转姿势下可以有效减少 370 N,并且腰部所受的侧向剪力也有所减小,证明了人体模型在此拖拉机座椅上的舒适度更高。通过分析座椅舒适度评价矩阵,可以得到根据人机工程学设计的座椅舒适度优于普通座椅。依据骨骼关节识别方法的评价结果与根据层次分析法分析的结果一致,证明了基于骨骼关节识别的拖拉机驾驶室座椅舒适度评价方法的可行性与有效性。该评价方法可为拖拉机驾驶室座椅人机工程学研究及准确高效地优化拖拉机座椅设计提供参考依据与指导对策。

关键词:人机工程;拖拉机座椅;骨骼关节提取;舒适度评价

中图分类号:S219.01　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)S2-0521-09

Evaluation of Seat Comfort in Tractor Cab Based on Bone Joint Recognition

ZHANG Kaixing[1]　ZHANG Lan[1]　YANG Gang[1]　ZHAO Xiuyan[2]　LIU Xianxi[1,3]　LI Jiaojiao[4]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *College of Information Science and Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
3. *Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence*, *Taian* 271018, *China*
4. *Shanxi Institute of Metrology Science*, *Xi'an* 710065, *China*)

Abstract: In order to optimize the design of tractor cab seat, reduce the workload of the driver, improve work efficiency, and solve the problem of insufficient technical basic research on the comfort of cab seat of Chinese tractors, evaluation method for seat comfort of tractor cab based on bone joint recognition was proposed. Firstly, based on the analysis of factors affecting the comfort of tractor seat, the human sitting joint angle was selected as the research factor. The consumer-grade depth camera Kinect v2 was used to conduct eight driving motion capture experiments on two tractors equipped with different seats. The joint angle information with an accuracy of 0.01° under different driving actions was obtained; then, the joint angle data was imported into the human body modeling simulation analysis software Jack to obtain the human body model, and the joint torque simulation and lower back force were carried out according to different driving actions simulation and analysis to obtain the results of human comfort; finally, based on the analytic hierarchy process, a hierarchical model of the tractor seat comfort evaluation index was

收稿日期:2020-08-01　修回日期:2020-09-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0700100)、山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ011)和山东省重点研发计划项目(2019GNC106120)

作者简介:张开兴(1984—),男,副教授,博士,主要从事农业机械化与信息化研究,E-mail:kaixingzhang@139.com

通信作者:赵秀艳(1977—),女,副教授,博士,主要从事农业机械化与信息化研究,E-mail:zhaoxy@sdau.edu.cn

constructed, the weight of each index was determined and the consistency test was performed, and the original data of all the indicators involved were processed and calculated to obtain the comprehensive evaluation result of seat comfort. The simulation results showed that compared with tractors with ordinary seats, when working on tractors equipped with ergonomic seats, the ability of digital humans to complete actions was increased by 10 percentage points, and there was no joint discomfort. The pressure can be effectively reduced by 80 N in the driving posture and 370 N in the twisting posture, and the lateral shear on the waist was also reduced, proving that the digital human was more comfortable on this tractor seat. By analyzing the seat comfort evaluation matrix, it can be obtained that the seat comfort designed according to ergonomics was better than ordinary seats. The evaluation results based on the bone joint recognition method were consistent with the results analyzed based on the analytic hierarchy process, which proved the feasibility and effectiveness of the tractor cab seat comfort evaluation method based on bone joint recognition. This evaluation method can provide certain reference basis and guiding countermeasures for the ergonomics research of tractor cab seat and the accurate and efficient optimization of tractor seat design.

Key words: ergonomics; tractor seat; bone joint acquisition; comfort evaluation

0 引言

拖拉机作为一种常用的农用机械,在日常生产生活中越来越重要,但是,我国大型拖拉机在驾驶室座椅舒适性方面的技术基础研究不足,忽略了座椅舒适性的要求,造成驾驶员舒适性很差,影响了田间作业效率和驾驶员的身体健康,因此,实现对拖拉机驾驶室座椅舒适度的评价对拖拉机座椅优化设计意义重大[1]。

国外对座椅舒适度的研究起步较早,BAZIL 等[2]提出“总体乘坐值法”,该方法将人体分为 12 个自由度,最终发现不同的振动频率对人体各部位影响不同,即 SEAT 法;BASHIRI 等[3]通过研究发现,人体在不同的坐姿状态下,腰背部肌肉和骨骼系统受力情况不尽相同,从而会进一步影响到人体对座椅舒适度的评价。国内,杨飞等[4]对拖拉机驾驶室座椅的舒适性进行分析,建立了人体和拖拉机驾驶室座椅的简化模型,通过仿真分析得出了最优的座椅设计方案;霍笑[5]选用美国 Motion Annalvsi 鹰数字系统,利用 EVART 软件获取了 40 名被测试者相关关键点在空间中的位置数据,比较两个座位之间的数据差异以此来判断座椅的舒适程度。

目前现有的研究主要集中在定性分析和主观评价上,忽略了拖拉机驾驶员在驾驶过程中驾驶动作的变化带来的人体骨骼关节角度的改变以及对舒适度的影响,难以对目前的拖拉机座椅舒适度进行定量描述和综合评价。基于此,本文提出一种基于骨骼关节识别的拖拉机驾驶室座椅舒适度评价方法,以人体坐姿关节角度为研究依据,基于消费级深度相机 Kinect v2 进行人体骨骼关节识别,在设计驾驶动作捕捉试验的基础上进行人机仿真,并运用层次分析法进行座椅舒适度综合评价,以提高拖拉机驾驶员坐椅的舒适性。

1 座椅舒适度与人体的关系

在拖拉机作业过程中,驾驶员长期保持坐姿工作状态,不舒适的拖拉机座椅设计很容易影响驾驶员的身体健康,工作时的坐姿状态最能反映其舒适程度。驾驶员在驾驶过程时的坐姿受力[6]简图如图 1 所示。

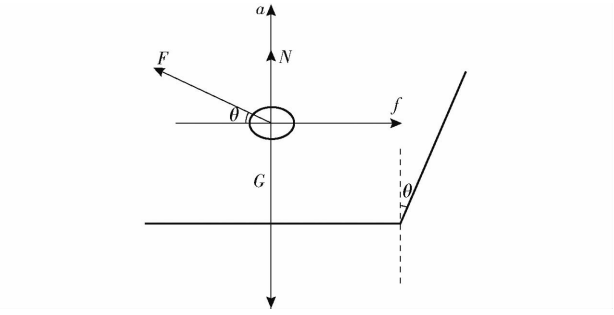


图 1 驾驶员驾驶过程中坐姿受力简图

Fig. 1 Schematic of driver's sitting position during driving

在此过程中人体臀压分布计算如下:

座椅的支撑力为

$$N + F\sin\theta - G = \frac{Ga}{g} \tag{1}$$

$$N = G\left(1 + \frac{a}{g}\right) - F\sin\theta \tag{2}$$

驾驶员臀部压强为

$$P = \frac{N}{S} = \frac{G\left(1 + \frac{a}{g}\right) - F\sin\theta}{S} \tag{3}$$

式中 F——座椅靠背对驾驶员的支撑力,N

N——座椅座垫对驾驶员的支撑力,N

G——座垫支撑驾驶员部分受到的重力,N

a——振动加速度,m/s^2

S——驾驶员坐在座椅上时驾驶员臀部与座

椅的接触面积，m^2

P——臀部受到的压强，Pa

θ——支撑力与座椅的水平夹角，(°)

由此可知，在驾驶过程中臀部受到的压强将变大，大腿和臀部更容易产生酸麻感，驾驶员容易产生疲惫感。

驾驶员处于工作状态时，腰部需要承受上半部分躯干的几乎全部重力及其受到的载荷[7]，所以驾驶员进行作业时，臀部、肩部、背部以及腰部都会受到不同程度的损害，针对此问题提出一种拖拉机驾驶室座椅舒适度评价方法，通过基于消费级深度相机的人体骨骼关节识别方法，从坐姿角度进行舒适度分析并做出评价。

2　基于消费级深度相机的人体骨骼关节识别

现代消费级深度(RGB－D)相机价格低廉、帧速率高，可以提供密集的深度估算[8]，本文采用微软的 Kinect v2 型相机。利用 Kinect v2 相机获取人体深度图，经配准与降噪处理得到人体 RGB 深度图，通过 Kinect v2 相机开发并实现一种骨骼关节位置监测工具来确定人体关节空间位置。

2.1　深度图像的获取与配准

Kinect v2 相机的深度信息获取采用光飞行法，原理如图 2 所示，Kinect v2 相机通过从红外投影机发射一束红外光来获取深度信息，红外光经散射被分成许多光束，这些光束聚集形成光斑。红外摄像头捕获散射光斑，并与存储在内部的参考模式进行比较，参考模式是通过捕捉已知距离的分散光点获得的。当红外摄像头捕获光斑的距离与参考的距离不同时，光斑将会沿着基准线移动，然后通过测量所有光斑的移动范围，形成一幅视差图像[9]。

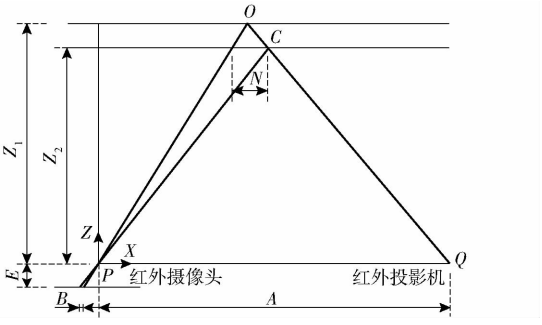


图 2　深度图像获取原理图

Fig. 2　Depth image acquisition schematic

由于目标分辨率会随着距离的增加而下降，所以 Kinect 相机获得的深度图像的分辨率也有所不同，因此深度图像中的坐标点(i,j)与实际空间中的坐标点(x,y)在水平和垂直方向上的坐标也不是简单的线性对应关系[10]。

通过 3D 三维投影关系得到表达式

$$\begin{cases} x = (i - c_x + \delta_x)\, d/f_x \\ y = (j - c_y + \delta_y)\, d/f_y \end{cases} \tag{4}$$

式中　(δ_x,δ_y)——Kinect v2 相机的镜头畸变

(c_x,c_y)——图像中心点坐标

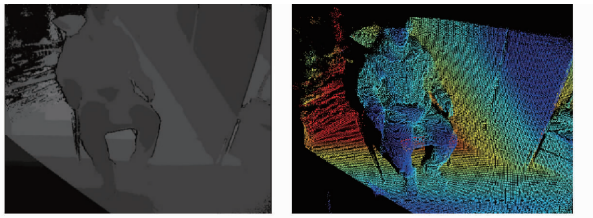
f_x、f_y——比例参数

d——空间点与 Kinect v2 相机传感器实际距离

到 3D 空间坐标的转换拟合式为

$$\begin{cases} x = (i - 339.307\,8)\, d/594.214\,3 \\ y = (j - 242.739\,1)\, d/591.040\,5 \end{cases} \tag{5}$$

根据上述算法，将深度图像的每个像素转换成三维坐标，以便关节角计算。通过 Kinect v2 相机拍摄的以灰度图表示的分辨率为 512 像素×424 像素二维深度图，如图 3a 所示，利用式(5)得到的人体三维坐标点云图，如图 3b 所示。在人体三维坐标点云图中，点的颜色越红，说明这个点到坐标原点的距离越远。



(a) 人体深度图　　(b) 人体三维坐标点云图

图 3　人体深度图及三维坐标点云图

Fig. 3　Depth map of human body and 3D coordinate point cloud map

Kinect v2 相机中 RGB 摄像头与深度传感器所处位置不同，导致深度图像和彩色图像不相匹配，在提取人体特征之前，需要完成二者的配准，才能实现对目标的跟踪[11－12]。通过 RGB 摄像头获取的 RGB 图是三维空间点在图像平面的投影，因此仅考虑旋转、平移变换，故可采用投影变换公式进行计算，坐标变换关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \boldsymbol{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \boldsymbol{T} \tag{6}$$

式中　$\boldsymbol{R}$——旋转矩阵　　$\boldsymbol{T}$——平移矩阵

(x,y,z)——RGB 摄像头坐标系对应点的坐标

(X,Y,Z)——深度图像坐标系对应点的坐标

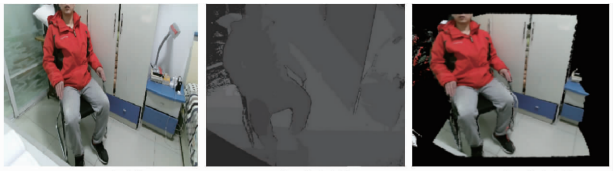
对应 RGB 图像点的坐标为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x x/z \\ f_y x/z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中　(u,v)——RGB 图像点的坐标

Kinect v2 相机传感器通过结构光来获取人体的深度图像信息，理论上，由于红外光会被物体散射以及 Kinect v2 相机传感器附近存在的物体会造成阴影，导致在获取深度图像时会产生噪声数

据[13-14]。选择改进的基于中值滤波图像平滑算法来处理深度图像,使得骨骼信息更加稳定、准确[15]。通过 Kinect v2 深度相机对被测试人员直接拍摄得到的 RGB 图像和以灰度图形式表示的深度图像分别如图 4a、4b 所示,经配准得到的 RGB 深度图像如图 4c 所示。



(a) RGB图像 (b) 深度图像 (c) RGB深度图像

图 4 人体深度图像到 RGB 图像的配准图

Fig. 4 Human depth image to RGB image registration

2.2 人体骨骼关节识别

通过关节角评价座椅舒适性需要获得人体骨骼关节空间位置,因此利用 Kinect v2 相机开发并实现了一种骨骼关节位置检测工具来提取人体关节空间位置。通过骨骼追踪技术处理景深数据建立人体各个骨骼关节点的坐标[16-17]。人体骨骼关节点空间位置如图 5 所示。

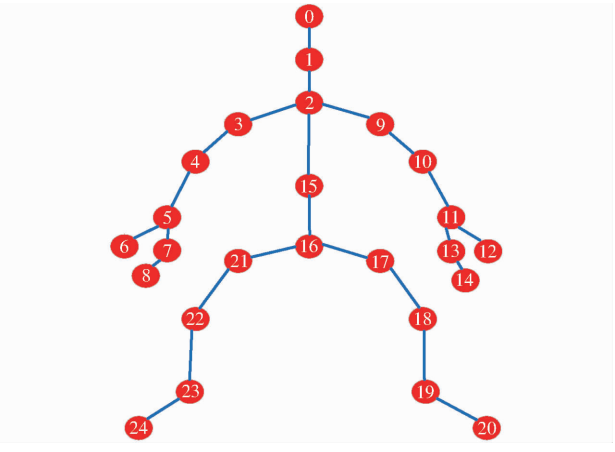


图 5 检测到的骨骼关节点及其位置表示

Fig. 5 Detected bone joint and its position representation

0. 头部 1. 颈部 2. 肩膀中部 3. 左肩 4. 左肘 5. 左腕 6. 左拇指 7. 左手 8. 左手尖 9. 右肩 10. 右肘 11. 右腕 12. 右拇指 13. 右手 14. 右手尖 15. 脊柱中部 16. 臀部中部 17. 右臀 18. 右膝 19. 右脚踝 20. 右脚 21. 左臀 22. 左膝 23. 左脚踝 24. 左脚

为了更加准确快速地获取目标,对图 5 中除关节 21 ~ 24 外的 21 个关节点进行标记。获得的目标人体骨骼图像以及各骨骼关节三维坐标数据如图 6 所示。

3 驾驶员动作捕捉试验与仿真分析

利用 Kinect v2 相机作为动作捕捉的信息采集设备,设计驾驶动作捕捉试验,获取多组驾驶员驾驶动作的人体骨骼三维数据,分析计算得到关节角。基于 Jack 软件进行人机建模仿真,对不同拖拉机座椅舒适度进行评价。



图 6 骨骼图像及骨骼关节三维数据坐标图

Fig. 6 Bone image and bone point 3D data coordinate diagram

3.1 驾驶员动作捕捉试验

3.1.1 试验设计

根据规定拖拉机驾驶员必须年满 18 周岁,不满 60 周岁,身高不低于 155 cm[18-19],故采用国标中[20]第 5 百分位(身高为 1 591 mm)和第 95 百分位(身高为 1 789 mm)的中国男性身高进行分析,以便让试验满足 90 %的人群。在驾驶动作研究试验中,采用 Kinect v2 相机捕捉驾驶员的驾驶动作,选择了 20 名男性为测试对象,基本参数如表 1 所示。

表 1 被测试者基本参数

Tab. 1 Basic parameters of subject

性别	人数/人	年龄/岁	身高/mm	质量/kg	膝盖高/mm
男	20	24 ± 1.0	1 688 ± 56	65.3 ± 5.1	406 ± 23

试验选取东方红 LF954 和雷沃 M350 两种不同型号的拖拉机作为研究对象,为方便试验记录将两种拖拉机分别标记为 A 和 B。A 型号拖拉机座椅为普通的日常座椅,B 型号拖拉机座椅为基于人机工程学设计的座椅。拖拉机实物图如图 7 所示。



(a) 东方红LF954型 (b) 雷沃M350型

图 7 试验拖拉机实物图

Fig. 7 Actual drawing of test tractor

记 A 型号拖拉机驾驶室座椅的后端(背部紧贴座椅)为 ATB,前端(背部离开座椅)为 ATF,记 B 型号拖拉机驾驶室座椅的后端为 BTB,前端为 BTF。整个试验过程在外部光线较弱且空旷的环境中进行,保证 Kinect 相机镜头可以准确地捕捉到人体。

测试对象分别在两个拖拉机座椅的前、后端按照设计的 8 组驾驶动作进行关节数据的采集。8 组

动作分别为静止坐在座椅上(动作 1)、双手操作方向盘(动作 2)、身体向一侧倾斜(动作 3)、身体向一侧扭转(动作 4)、双手系安全带(动作 5)、身体向前倾斜控制面板(动作 6)、控制驾驶杆(动作 7)、踩油门离合(动作 8),最终得到驾驶员动作图如图 8 所示。

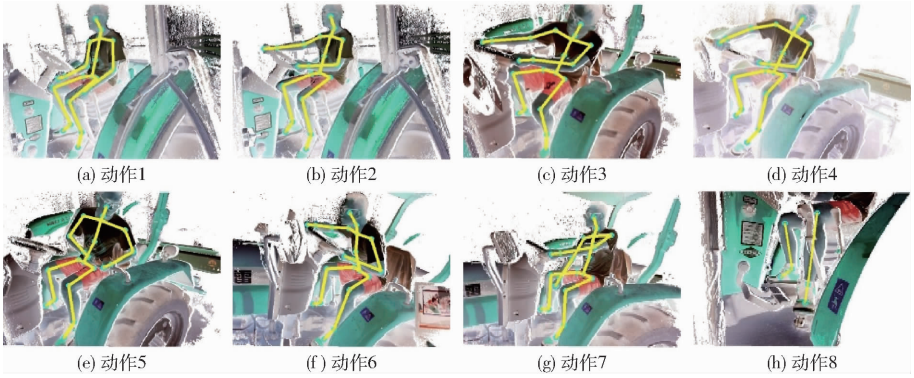


图 8　驾驶员驾驶动作图

Fig. 8　Pilot action chart

3.1.2　关节角计算

通过动作捕捉试验获得了人体骨骼关节点三维坐标,根据解剖学对人体关节角的定义方法,参考国外对人体关节角的相关资料[21-22],选定一种基于基准轴和基准面的关节角计算方法[5]。通过获得的关节数据,用有关相邻关节点来确定基准轴和基准面。关节角主要根据动作任务所涉及的主要关节所构成的骨骼之间的移动,选取主要骨骼之间在空间中的夹角。

将试验获得的驾驶员关节空间数据根据上述方法利用 Matlab 自主编程进行角度计算,得到测试对象在 A、B 型号拖拉机驾驶室座椅上执行 8 个动作时的关节角。其中发生动作 2 时的部分关节角数据如表 2、3 所示。

表 2　A 型号拖拉机驾驶室座椅执行动作 2 的关节角

Tab. 2　Joint angle data of A tractor cab seat execution action 2　(°)

驾驶员动作	后端				前端			
	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差
躯干屈伸	168.92	176.00	159.61	8.26	165.93	177.72	158.22	9.16
肩外展左	130.54	143.61	116.09	10.96	105.39	127.48	89.45	12.47
肩外展右	100.52	121.29	85.08	13.92	104.87	125.76	90.24	16.51
肩屈伸左	141.51	156.63	123.24	7.37	130.47	139.00	120.87	8.16
肩屈伸右	104.89	121.00	92.99	12.87	75.22	88.00	65.17	18.93
大腿左侧	130.40	143.01	112.73	9.07	120.94	133.29	109.44	6.45
大腿右侧	119.03	127.82	105.23	10.22	112.81	123.72	98.22	14.59
膝盖左侧	94.26	98.59	90.31	2.51	94.46	96.11	89.19	3.65
膝盖右侧	87.19	88.56	86.86	0.54	81.75	86.14	79.01	1.45

表 3　B 型号拖拉机驾驶室座椅执行动作 2 的关节角

Tab. 3　Joint angle data of B tractor cab seat execution action 2　(°)

驾驶员动作	后端				前端			
	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差
躯干屈伸	165.46	172.00	159.61	8.26	163.62	167.72	156.22	9.16
肩外展左	105.85	113.61	96.09	7.96	126.09	137.48	119.45	12.47
肩外展右	107.75	131.29	95.08	5.92	112.23	135.76	92.24	13.51
肩屈伸左	158.97	176.63	149.24	7.37	141.10	159.00	125.87	12.16
肩屈伸右	105.43	123.00	92.99	14.87	94.86	108.00	85.17	18.93
大腿左侧	137.28	143.01	122.73	8.07	115.39	123.29	106.44	6.45
大腿右侧	104.81	127.82	95.23	6.22	105.63	117.72	98.22	7.59
膝盖左侧	99.54	103.59	96.31	0.51	97.46	100.11	95.19	0.65
膝盖右侧	87.68	88.56	86.86	0.54	82.64	86.14	81.01	1.45

分析表 2、3 可以看出,此骨骼关节识别方法可以获取到精确度为 0.01°的关节角信息。在两个不同型号拖拉机座椅上进行试验时,测试对象各个部位的关节角数据都存在明显差异,其中平均关节角最能反映测试对象在完成动作任务时的坐姿情况,在动作 2 中,测试对象双手操作方向盘,座椅 B 提供了更大的肩关节活动范围,这表明两种座椅样本在设计上的区别可以直接影响驾驶员作业过程中的舒适程度,更加突显出座椅舒适度研究的重要性。

3.2 座椅人机仿真分析

通过驾驶员动作捕捉试验获得人体关节三维数据,将计算得到的关节角导入 Jack 软件,对基本人体模型进行建模仿真。最终得到 8 组动作人体模型如图 9 所示。

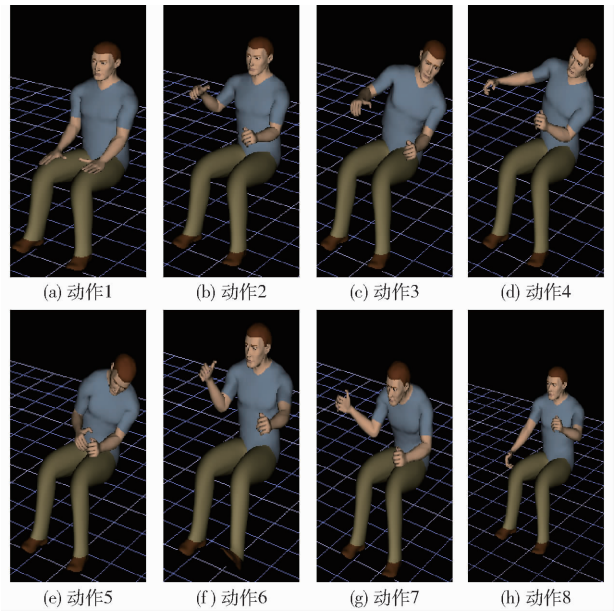


图 9 人体模型动作图

Fig. 9 Mannequin action figure

根据研究需要,选取驾驶姿势和扭转姿势设置 4 组仿真。仿真分组情况如表 4 所示。

表 4 人机仿真分组

Tab. 4 Group of man-machine simulation

座椅型号	驾驶姿势	扭转姿势
A	仿真组 1	仿真组 2
B	仿真组 3	仿真组 4

3.2.1 关节力矩仿真

利用 ForceSolver 工具对各仿真组人体模型进行关节力矩及可完成百分比进行分析。在进行仿真时,给人体模型双手分别施加 20 N 竖直向下的力,模拟人体模型操作方向盘时的受力情况。仿真结果如图 10 所示。

在图 10 仿真结果表格中,第 2 列为在当前姿势下受力时,人体模型动作完成能力的百分比。可以看出,当人体模型在 A 型号拖拉机座椅上执行驾驶动作时存在膝关节与踝关节不舒适的问题,其他关节无明显不适的情况,而 B 型号拖拉机座椅明显改善了这一情况,且动作完成能力增加 10 个百分点,证明了人体模型在 B 型号拖拉机座椅上的舒适度更高。

3.2.2 下背部受力分析

利用 Lower Back Analysis 工具对各组人体模型进行下背部受力分析。用该工具给出的数值来判断仿真的驾驶动作任务是否会增加模拟人体的下背部受伤概率。仿真结果如图 11 所示。

仿真结果显示腰部 L4/L5 处关节受力、L4/L5 处关节瞬时受力及方向、下背部局部肌肉受力、肌肉力矩分布。从仿真结果可以看出,在 B 型号拖拉机上作业时,人体模型腰部关节处的压力在驾驶姿势

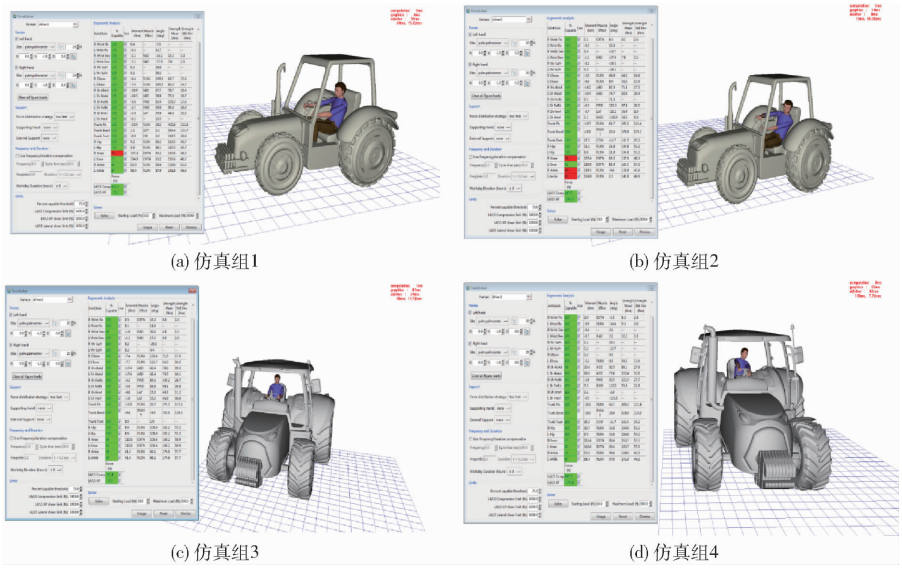
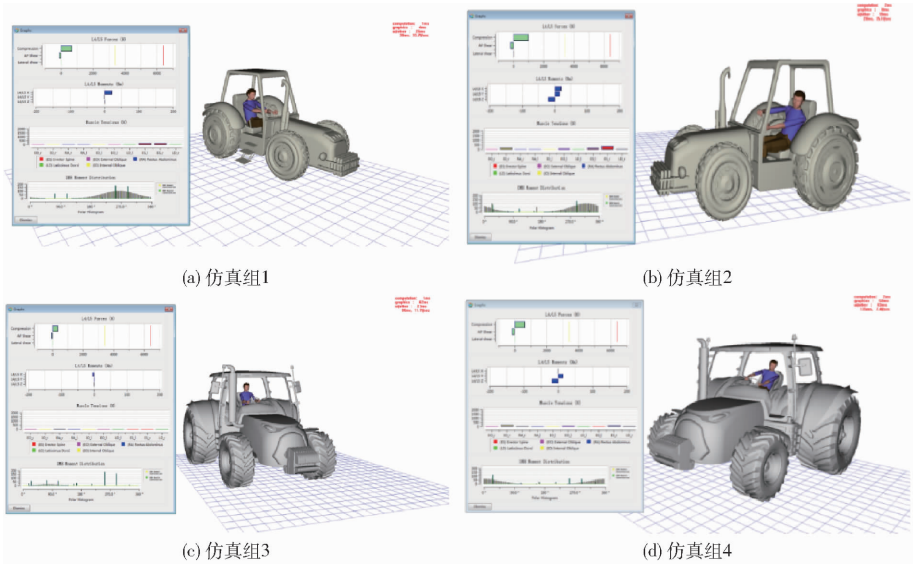


图 10 关节力矩仿真结果

Fig. 10 Simulation results of joint torque



(a) 仿真组1　(b) 仿真组2　(c) 仿真组3　(d) 仿真组4

图 11　下背部受力分析仿真结果

Fig. 11　Simulation results of lower back stress analysis

下可以有效减少 80 N，在扭转姿势下可以有效减少 370 N，并且腰部所受的侧向剪力也有所减小。两种人机仿真结果都证明了 B 型号拖拉机座椅比 A 型号更加舒适。

4　拖拉机驾驶室座椅舒适度综合评价

完成人体模型建立以及仿真分析后，为进一步对拖拉机驾驶室座椅的舒适程度进行定量分析，本文基于层次分析法对座椅舒适度作出综合评价。首先确定舒适度评价指标并构建评价指标模型，然后对每一级的指标重要度进行两两对比，进行一致性检验并确定各指标权重，最后对所得数据进行综合分析后得到评价结果。

4.1　指标层次模型建立

层次分析法(AHP)是将半定性、半定量问题转换为定量问题的有效途径，它对各种因素进行分层，逐层比较每种相关因素，为分析和预测事物的发展提供可靠的定量依据[23]。第一步是建立评价指标层次模型，建立的拖拉机座椅舒适性评价指标的层次结构模型如表 5 所示。

表 5　拖拉机座椅舒适度评价指标层次结构模型

Tab. 5　Hierarchical structure model of evaluation index of tractor seat comfort

目标层	一级指标	二级指标	三级指标
座椅舒适度(M)	关节参数(M_1)	关节角(M_{11})	肩部(M_{111}、M_{121}、M_{131}) 腰部(M_{112}、M_{122}、M_{132})
		关节力矩(M_{12})	臀部(M_{113}、M_{123}、M_{133})
		关节强度(M_{13})	大腿(M_{114}、M_{124}、M_{134})
	背部参数(M_2)	L4/L5 压力(M_{21})	
		L4/L5 力矩(M_{22})	
		肌肉力(M_{23})	

设拖拉机座椅舒适度评价的影响因素集为 M，影响因素划分为一级指标关节参数以及背部参数，记作：$M=\{M_1,M_2\}$，M_i表示第 i 个影响因素子集。

第二层指标包括关节角指标、关节力矩指标、关节强度指标以及 L4/L5 压力指标、L4/L5 力矩指标、肌肉力指标共 6 个二级指标，记作：$M_1=\{M_{11},M_{12},M_{13}\}$；$M_2=\{M_{21},M_{22},M_{23}\}$。

第三层指标是由肩部、腰部、臀部、大腿共 4 个三级指标构成，记作：$M_{11}=\{M_{111},M_{112},M_{113},M_{114}\}$；$M_{12}=\{M_{121},M_{122},M_{123},M_{124}\}$；$M_{13}=\{M_{131},M_{132},M_{133},M_{134}\}$。

4.2　判断矩阵构造与计算

构造比较判断矩阵，需要按照统一的原则对同一类型的指标进行比较，明确同一层中两个不同要素之间的重要性，再通过赋值法进行对比。当两两比较的因素太多时，人的判断力会受到很大的影响。一般来说，因素为 7 ± 2 个的范围比较合适。如果它被限制为 9 个时，1 ~ 9 的尺度能适当表明它们之间的差异。在比较时，需要进行 $n(n-1)/2$ 的两两判断，以便提供更多的信息，并通过各方面的反复比较

得到合理的排序。

每个判断矩阵的特征值和特征向量计算式为

$$\boldsymbol{AW}=\lambda_{\max}\boldsymbol{W} \tag{8}$$

式中 $\boldsymbol{A}$——判断矩阵 $\boldsymbol{W}$——特征向量

$\lambda_{\max}$——判断矩阵的最大特征值

组成特征向量的每一个元素 w_i 即为所要求的层次单排序的权重。求判断矩阵的特征向量 $\boldsymbol{W}$ 和最大特征值 $\lambda_{\max}$ 可以使用和法、根法和幂法。

由于专家成对比较因素时可能会出现自相矛盾的现象,因此有必要对其一致性进行检验,以避免这种现象的发生。检验的步骤如下:

(1)计算一致性指标

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{9}$$

式中 n——判断矩阵的阶数

(2)定义随机一致性指标均值 RI

对 n 为 3 ~ 9 阶时,分别计算得到它们的 RI,考虑到 1、2 阶判断矩阵总是完全一致的,RI 自然为 0。因此,1 ~ 9 阶的判断矩阵的 RI 如表 6 所示。

表 6 矩阵阶数为 1 ~ 9 的 *RI* 取值

Tab. 6 *RI* value when matrix order was 1 ~ 9

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

(3)计算一致性比率

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{10}$$

对于 $n>3$ 的判断矩阵 $\boldsymbol{A}$,将计算得到的 CI 与同阶(指 n 相同)的 RI 相比,比值即为 CR,当 $CR\leqslant 0.10$ 时,认为 $\boldsymbol{A}$ 的不一致程度在被允许的范围之内,可以通过检验;反之则没有通过检验,需要对判断矩阵进行适当的修正,并继续检验,直至通过。

根据拖拉机座椅舒适度评价指标层次结构模型,利用上述标度法,通过问卷调查,分别对各个指标的重要性进行打分评定,对打分的最终结果再进行内部的讨论和总结,得到各个指标的判断矩阵。最终经计算得到的各指标权重如表 7 所示。

表 7 拖拉机座椅舒适度评价指标权重

Tab. 7 Tractor seat comfort evaluation index weight

一级指标	权重	二级指标	权重	三级指标	权重
M_1	0.666 7	M_{11}	0.136 5	M_{111}、M_{121}、M_{131}	0.506 8
		M_{12}	0.238 5	M_{112}、M_{122}、M_{132}	0.264 1
		M_{13}	0.625 0	M_{113}、M_{123}、M_{133}	0.142 8
				M_{114}、M_{124}、M_{134}	0.086 3
M_2	0.333 3	M_{21}	0.229 7		
		M_{22}	0.122 0		
		M_{23}	0.648 3		

4.3 综合评价模型构建

在拖拉机座椅舒适度综合评价中,应当保证参数量纲的同一性,需要对各个因素的原始数据进行标准化处理,使得各个数据的量纲相同以便综合分析。

$$B=\begin{cases}\dfrac{A_i}{\overline{A}_i} & \text{(数值越大舒适度越高)}\\[2ex] \dfrac{\overline{A}_i}{A_i} & \text{(数值越小舒适度越高)}\end{cases} \tag{11}$$

式中 A_i——原始数据的各项参数

$\overline{A}_i$——各项参数的平均值

得到其数据矩阵为

$$\boldsymbol{B}=(B_{ij})_{m\times n} \tag{12}$$

标准化处理后将各评价指标进行无量纲化,得到标准值 C_i,各评价指标综合分值 D_i 为所对应权重 w_i 与标准值 C_i 的乘积。第三层所有指标进行加总,将综合分值反馈到第二层,然后对该层指标进行计算,并将得出的数值反馈到第一层,最终得到评价指标综合分值。根据上述计算方法,得到各级指标评价矩阵如下:

三级指标评价矩阵为

$$\boldsymbol{D}_{11}=w_{11}C_{11}=[0.465\quad 0.538\quad 0.463\quad 0.526]$$

$$\boldsymbol{D}_{12}=w_{12}C_{12}=[0.512\quad 0.483\quad 0.418\quad 0.534]$$

$$\boldsymbol{D}_{13}=w_{13}C_{13}=[0.365\quad 0.438\quad 0.468\quad 0.446]$$

二级指标评价矩阵为

$$\boldsymbol{D}_1=w_1C_1=[0.455\quad 0.493\quad 0.461\quad 0.513]$$

$$\boldsymbol{D}_2=w_2C_2=[0.352\quad 0.291\quad 0.374\quad 0.328]$$

一级指标评价矩阵为

$$\boldsymbol{D}=\boldsymbol{wC}=[0.398\quad 0.406\quad 0.418\quad 0.423]$$

由评价矩阵 $\boldsymbol{D}$ 可知,两种拖拉机座椅舒适度等级由小到大依次为:ATF、ATB、BTF、BTB,该综合评价方法表明 B 型号拖拉机座椅的舒适度高于 A 型号,与 Jack 软件的仿真分析结果相吻合,证明了基于人体坐姿骨骼关节角评价座椅舒适度的可行性。该评价方法可为拖拉机驾驶室座椅人机工程学研究及准确高效地优化拖拉机座椅设计提供参考依据与指导对策,并对今后拖拉机座椅舒适度评价提供合理化建议具有重要意义。

5 结论

(1)通过 Kinect v2 相机的骨骼识别与提取技术对测试对象进行了 8 组驾驶动作的捕捉试验,不同座椅在各个部位的关节角都有明显差异;该骨骼关节识别方法可以获取精确度为 0.01°的关节角信息。

(2)利用 Jack 软件建立了仿真环境,对不同拖

拉机两组驾驶姿势进行关节力矩、下背部受力仿真分析，通过仿真结果得知，不同型号的拖拉机座椅设计对于驾驶员的舒适度有较大影响，为座椅舒适度的评价提供了依据。

(3)基于层次分析法对所得数据进行了综合评价验证，建立评价指标层次结构模型，计算权重并进行一致性检验。对涉及的所有指标的原始数据进行处理，计算出座椅的舒适度评价结果，舒适度等级由大到小依次为 ATF、ATB、BTF、BTB，最终得到基于人机工程学设计的拖拉机座椅的舒适度高于普通座椅，与 Jack 仿真分析结果相吻合，证明了基于骨骼关节识别评价座椅舒适度的可行性。

参 考 文 献

[1] 王金武，王余锐，李晓书，等. 联合收割机驾驶室驾驶舒适性的人机工程设计[J]. 东北农业大学学报，2014，45(3)：97－103.
WANG Jinwu, WANG Yurui, LI Xiaoshu, et al. Design of driving adaptability of combine harvester cab based on ergonomics [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 45(3): 97－103. (in Chinese)

[2] BAZIL B, MICHAEL J G. The application of SEAT values for predicting how compliant seats with backrests influence vibration discomfort[J]. Applied Ergonomics, 2014, 45(6): 1461－1474.

[3] BASHIRI B, MANN D. Automation and the situation awareness of drivers in agricultural semi-autonomous vehicles[J]. Biosystems Engineering, 2014, 124(6): 8－15.

[4] 杨飞，史庆春，万小玲，等. 基于 Pro/E Manikin 的拖拉机驾驶室人机工程评价方法[J]. 农业工程学报，2013，29(9)：32－38.
YANG Fei, SHI Qingchun, WAN Xiaoling, et al. Ergonomics evaluation method of tractor cab based on Pro/E Manikin[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9): 32－38. (in Chinese)

[5] 霍笑. 基于坐姿分析的座椅舒适度评价方法研究[D]. 乌鲁木齐：新疆大学，2018.
HUO Xiao. Research on seat comfort evaluation method based on sitting posture analysis[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018. (in Chinese)

[6] 杨洋，李宛骏，李延凯，等. 基于生物力学模型的拖拉机离合踏板人机工程设计[J]. 农业工程学报，2019，35(3)：82－91.
YANG Yang, LI Wanjun, LI Yankai, et al. Ergonomics design of tractor clutch pedal based on biomechanical model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 82－91. (in Chinese)

[7] 王建伟，张建敏. 基于 Jack 的农机驾驶室人机工程学分析及仿真[J]. 农机化研究，2018，40(6)：246－251.
WANG Jianwei, ZHANG Jianmin. Analysis and simulation of ergonomics of agricultural machinery cab based on Jack[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6): 246－251. (in Chinese)

[8] 劳彩莲，杨瀚，李鹏，等. 基于消费级深度相机的玉米植株三维重建[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(7)：222－228.
LAO Cailian, YANG Han, LI Peng, et al. 3D reconstruction of maize plants based on consumer depth camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 222－228. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190724&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.024. (in Chinese)

[9] 黄玲涛，王彬，倪涛，等. 基于 Kinect 的机器人抓取系统研究[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(1)：390－399.
HUANG Lingtao, WANG Bin, NI Tao, et al. Research on robotic grasping system based on Kinect camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 390－399. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190145&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.045. (in Chinese)

[10] 麦春艳，郑立华，孙红，等. 基于 RGB－D 相机的果树三维重构与果实识别定位[J/OL]. 农业机械报，2015，46(增刊)：35－40.
MAI Chunyan, ZHENG Lihua, SUN Hong, et al. Research on 3D reconstruction of fruit tree and fruit recognition and location method based on RGB－D camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 35－40. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2015S006&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.006. (in Chinese)

[11] 郑立华，麦春艳，廖崴，等. 基于 Kinect 相机的苹果树三维点云配准[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(5)：9－14.
ZHENG Lihua, MAI Chunyan, LIAO Wei, et al. 3D point cloud registration for apple tree based on Kinect camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 9－14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160502&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.002. (in Chinese)

[12] 沈跃，朱嘉慧，刘慧，等. 基于深度和彩色双信息特征源的 Kinect 植物图像拼接[J]. 农业工程学报，2018，34(5)：176－182.
SHEN Yue, ZHU Jiahui, LIU Hui, et al. Plant image mosaic based on depth and color dual information feature source from Kinect[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 176－182. (in Chinese)

[13] 王滨，陈子啸，傅隆生，等. 基于 Kinect 传感器的猕猴桃果实空间坐标获取方法[J]. 农机化研究，2016，38(5)：232－236.
WANG Bin, CHEN Zixiao, FU Longsheng, et al. A method of acquiring kiwi fruit coordinate in space based on Kinect[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(5): 232－236. (in Chinese)

[14] 司永胜，安露露，刘刚，等. 基于 Kinect 相机的猪体理想姿态检测与体尺测量[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(1)：58－65.
SI Yongsheng, AN Lulu, LIU Gang, et al. Ideal posture detection and body size measurement of pig based on Kinect[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 58－65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.006. (in Chinese)

(下转第 543 页)

[J]. IEEE Trans. Control Syst. Technol., 2015,65(6): 4459 – 4470.
[21] DU Yongchang, ZHAO Yue, WANG Qinpu, et al. Trip-oriented stochastic optimal energy management strategy for plug-in hybrid electric bus [J]. Energy, 2016, 115:1259 – 1271.
[22] 秦斐燕. 基于随机动态规划的混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 深圳:中国科学院深圳先进技术研究院, 2018.
QIN Feiyan. Research on stochastic dynamic programming based energy management strategy of hybrid vehicles [D]. Shenzhen: Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
[23] ARIYUR K B, KRSTIC M. Real-time optimization by extremum-seeking control [M]. Wiley-Interscience, Hoboken, 2003.
[24] ZHANG Chunlei, ORDÓÑEZ R. Extremum-seeking control and applications: a numerical optimization-based approach [M]. Springer, 2012.
[25] BIN Yang, LI Yaoyu, FENG Nenglian. Nonlinear dynamic battery model with boundary and scanning hysteresis[C]// ASME 2009 Dynamic Systems and Control Conference, 2009: 245 – 251.
[26] WINDARKO N A, CHOI J. SOC estimation based on OCV for NiMH batteries using an improved takacs model [J]. Journal of Power Electronics, 2010, 10(2): 181 – 186.
[27] LIN C C, KIM M J, PENG H, et al. System-level model and stochastic optimal control for a PEM fuel cell hybrid vehicle [J]. ASME: J. Dyn. Syst. Meas. Control, 2006, 128(4): 878 – 890.
[28] 张松明, 吴湘淦. 农业机械运用原理[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1990.
[29] 周一鸣. 汽车拖拉机学:汽车拖拉机理论[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000.
[30] 胡雷. 基于有限元技术的旋耕机设计与工作部件仿真研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
HU Lei. Based on finite element technology of rotary cultivator design and working parts simulation research [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

(上接第 529 页)

[15] 何东健,邵小宁,王丹,等. Kinect 获取植物三维点云数据的去噪方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):331 – 336.
HE Dongjian, SHAO Xiaoning, WANG Dan, et al. Denoising method of 3-D point cloud data of plants obtained by Kinect[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(1):331 – 336. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160145&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.045. (in Chinese)
[16] 倪涛,赵泳嘉,张红彦,等. 基于 Kinect 动态手势识别的机械臂实时位姿控制系统[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10):417 – 423.
NI Tao, ZHAO Yongjia, ZHANG Hongyan, et al. Real-time mechanical arm position and pose control system by dynamic hand gesture recognition based on Kinect device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):417 – 423. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171053&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.053. (in Chinese)
[17] 蔡诗琦. 基于 Kinect 的人体骨架提取与坐姿识别研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.
CAI Shiqi. Research on human skeleton extraction and sitting activity recognition based on Kinect[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2018. (in Chinese)
[18] 徐立友,吴依伟,周志立. 基于人体测量学的拖拉机驾驶员工作空间设计[J]. 农业工程学报, 2016,32(11):124 – 129.
XU Liyou, WU Yiwei, ZHOU Zhili. Design of workplace for tractor operator based on anthropometry[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(11):124 – 129. (in Chinese)
[19] GB/T 13547—1992 工作空间人体尺寸[S]. 1992.
[20] GB/T 10000—1988 中国成年人人体尺寸[S]. 1998.
[21] SEOKHEE N, SUNGHYUN L, HWA-SOON C, et al. Evaluation of driver's discomfort and postural change using dynamic body pressure distribution[J]. International Journal of Industrial Ergonomics,2005,35(12):1085 – 1096.
[22] LILIANA L P, MARCO L C. 3D skeleton-based human action classification: a survey[J]. Pattern Recognition,2016,53: 130 – 147.
[23] 吴燕. 基于层次分析法的重卡企业大客户价值与商机分析研究[D]. 济南:山东大学,2019.
WU Yan. Based on analytic hierarchy process analysis and research the value of large customer and business opportunity of heavy truck enterprise[D]. Ji'nan: Shandong University,2019. (in Chinese)