

不同负载下飞行员精细操作能力 评估方法与实验研究

蔡黎明^{1,2}, 闫书豪², 董月芳², 朱钧¹, 陈立^{1,3}, 刘斌², 马昕^{1,3}

(1. 复旦大学工程与应用技术研究院, 200433, 上海; 2. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 215163, 江苏苏州; 3. 复旦大学附属华山医院, 200040, 上海)

摘要: 针对目前飞行员选拔中现有精细操作能力评估设备所提供的数据量化程度低的问题, 提出了一种用于上肢精细操作能力评估的方法, 并研制了一种基于伺服电机的可变负载精细操作能力评估装置。开发了面向二自由度摇杆操作的实验装置, 搭建了控制系统平台; 基于伺服电机可变负载的特性, 设计了左右位置精细操作的测试范式; 从实验结果中提取位置数据左右标准差、平均值差、极差等特征值, 对精细操作能力进行评估, 验证了评估方法的有效性。采用所提方法进行分组对照实验验证, 结果表明: 在飞行能力不同的被试组之间, 精细操作能力呈显著性差异, 飞行能力与操作成绩显著相关; 不同负载条件下, 同组内成员的精细操作能力未发现显著性差异。研究所提评估方法及装置能够较好地评测操作者的精细操作能力, 为飞行员的选拔与训练提供量化依据。

关键词: 精细操作; 可变负载; 摇杆; 手眼协调

中图分类号: V19; TP23 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202306005 **文章编号:** 0253-987X(2023)06-0039-08

Evaluation Method and Experimental Study of Pilots' Delicate Operation Capability Under Different Loads

CAI Liming^{1,2}, YAN Shuhao², DONG Yuefang², ZHU Jun¹,

CHEN Li^{1,3}, LIU Bin², MA Xin^{1,3}

(1. Academy for Engineering & Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China; 3. Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China)

Abstract: To address the problem of low quantification degree of the data provided by the existing delicate operation capability evaluation equipment in the pilot selection, an evaluation method for upper limb delicate operation was proposed, and an exemplary evaluation device with variable load based on servo motor was developed. Firstly, the experimental apparatus for 2-DOF joystick operation was designed, and the control system platform was built. Next, the test paradigm of left and right position operation was designed based on the variable load characteristics of the servo motor. Finally, the characteristic values such as standard left-right deviation, mean difference, and range were extracted from the experimental results to evaluate the delicate operation capability and verify the effectiveness of the evaluation method. The proposed method was used

收稿日期: 2022-11-02。 作者简介: 蔡黎明(1985—), 男, 在职博士生, 副研究员; 马昕(通信作者), 男, 教授, 主任医师。

基金项目: 国防科技基础加强计划资助项目(1716317ZT00211104); 江苏省科技计划资助项目(BE2021012-3)。

网络出版时间: 2023-02-03

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230203.1107.001.html>

for verification by grouping the pilot participants. The results showed that the delicate operation capability was significantly different among the groups with varying flying skills. The higher the flying capability level, the better the performance. Under other load conditions, no significant difference was found in the delicate operation capability of the members in the group. It is proved that the evaluation method and device proposed in this study can better evaluate the operator's delicate operation capability and provide a quantitative basis for pilot selection and training.

Keywords: delicate operation; variable load; joystick; hand-eye coordination

精细操作能力^[1-2]作为协调能力之一,在飞行员选拔过程中是必备且首选的能力^[3]。手眼协调是指视神经传导的生理反射快速反映在动作上的能力,视觉系统利用诸多视觉功能的反射与传导将大环境周围观察所得的信息输入大脑中枢,再传导驱动神经肌肉骨骼运动系统并反映在手或脚的精细动作上。人类作为灵长类的一个典型特征是能够用极其灵巧的双手做出快速而准确的移动。当然,许多灵巧的动作都依赖于目标属性的视觉信息,如位置、大小、方向以及任何给定时刻手臂、眼睛和头部等位置的体感信息^[4]。精细操作是手眼协调的具体表现,是指个体用手或用手操作工具进行精细动作或执行精细任务的能力,控制精细动作的肌肉力量和动作的协调性、准确性是感知觉、注意、空间知觉等心理活动的综合反应^[5-9]。

精细动作控制能力的评价方法有量表法、肌电图法、图形描绘法等。精细运动评价量表要求完成表中各项任务,根据完成时间进行分级,任务较多,且受主观因素影响较大。肌电图法^[10]通过肌电振幅、平均功率等指标反应肌肉的状态,还不能直接反映操作能力,只能作为辅助评价工具。图像描绘法应用较多,可以根据画出图形的轨迹、速度和时间等指标进行评价^[11-12]。目前,针对飞行员精细操作能力测试的理论及方法尚不完善。惠铎铎等^[13]通过商业手柄控制屏幕中小球进行三维方向运动,实现了对应聘者 and 现役飞行员在压力情境下手眼协调能力和情绪稳定性的差异性分析。魏焕成^[14]通过两个商业手柄设计了斯滕博格(Sternberg, STN)双任务测验、人机功能分配等任务,探索了心理运动能力评估在民航飞行员选拔中的应用。Takeda 等^[15-16]以六维力传感器作为交互工具,设计了目标追踪任务,验证了操作准确度与时间的交换关系。唐伟财等^[17]开发了一套用于测试包括航天员在内的操作员手柄精细操作能力的软件,该软件主要包括离散运动控制和连续运动控制两大类,共 5 个精细操作能力测试模块。从这些研究中可以发现,目前飞行类测试常用的交互

方式是以市场化的手柄为主,都无法主动的引入负载作为变量^[18]。但是,飞行员面对的飞行环境复杂多变,需要在各种负载条件下控制手柄,对飞行员在不同负载下的精细操作能力提出了更高要求。

目前,具有负载变化的飞行操纵负荷系统^[19]主要以单自由度为主,更关注操纵负载与经典飞行负载曲线的对比^[20-23]。它们无法针对性地评估精细动作能力,对一些“带力不带杆”的特殊操作也没有合适的评估及研究装置。因此,针对飞行员精细操作与手眼协调性评估的要求,本文首先设计了一套面向摇杆操作的精细操作能力评估装置,并搭建了控制系统,然后提出了基本的测试范式,最后募集了 5 个具有不同飞行经验的实验组进行对比实验,验证了此套装置及评估方法的有效性。

1 装置设计

上肢协调性能力评估系统如图 1 所示,主要由上肢变负载装置、可编程逻辑控制器(PLC)和上位机共 3 部分组成。

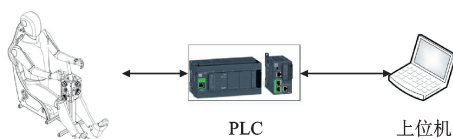


图 1 精细动作能力评估系统

Fig. 1 Fine motor ability assessment system

1.1 结构设计

上肢协调性评估装置主要技术指标如下:操纵杆设计有 X、Y 两个方向自由度,扭矩范围为 0~18 N·m。上肢操纵杆基于力解耦的方式设计,操纵杆作为精细动作评估系统的核心部分,主要模拟飞行手柄的 X/Y 平面内的运动,如图 2 所示。

X 向与 Y 向的负载由伺服电机配合行星减速器通过同步带轮传递至操纵杆核心运动杆,伺服电机为 200 W 的步科电机(额定扭矩 0.69 N·m),行星减速机为湖北科峰公司的 KPL070,速比为 32,同

步带轮为 S5M 的高扭矩系列,同步带齿数为 32, 1:1 传动扭矩,最终可得 $T = 0.69 \times 32 \text{ N} \cdot \text{m} = 22 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的理论扭矩输出。

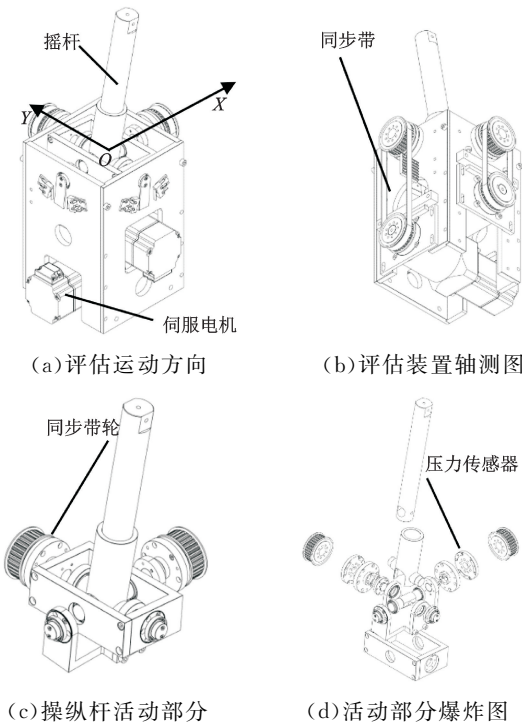


图 2 二自由度操纵杆结构

Fig. 2 Structure of two degrees joystick

操纵杆核心运动部分设计如图 2(c)所示,包含同步带轮、力矩传感器、X 向基座、Y 向基座以及轴承等其他标准件。图 2(d)中力矩传感器(宇立 M2210F,量程为 $-30 \sim 30 \text{ N} \cdot \text{m}$)负责监测负载,并反馈至上位机进行记录。同步带轮与力矩传感器通过螺钉固定连接,与 X/Y 向基座通过 5×5 键传递扭矩,两侧基座由轴承支撑以减小摩擦,X、Y 法向平面内的铰接点处于同一个水平面内,整体结构紧凑、可靠。

1.2 控制系统

控制系统如图 3 所示,由 PLC(Schneider Electric TM241)、力矩传感器、电机驱动器(Kinco, ED124S-CA)、上位机组成,二自由度操纵杆位置信息来自伺服电机内部的光电编码器,由驱动器上传至 PLC,并由上位机采集并记录。根据精细操纵评估

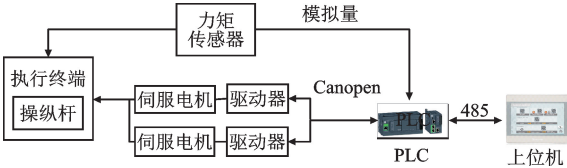


图 3 精细动作能力评估系统控制系统

Fig. 3 Control system of fine motor ability evaluation system

过程中可变负载的要求,上位机通过 PLC 和驱动器设定伺服电机的输出扭矩,并由力矩传感器实时反馈。

肌肉协调性测试时,伺服电机工作模式选择立即速度模式,将速度设定为 0(实际速度会立即达到目标速度),在此条件下修改驱动器输出最大电流,以此达到正反向均有阻抗的效果。

1.3 范式设计

上肢精细操作评估内容包含如图 4 所示的 X 向、Y 向运动。其中,X、Y 方向操作测试的设计范式如表 1 所示,在规定的时间内完成从目标 A 运动至目标 B。此范式主要反映被试者在不同负载情况下精细操作的绩效,涉及人体对速度感知、运动预测及手柄加速度控制(操作量)等的能力。根据电动操纵负荷系统设计^[20]及前期预实验情况,阻抗电流峰值设定为额定电流的 4%、10%、30%。通过实验测得扭矩 0.72、2.16、6 N·m 分别对应表 1 中的低、中、高 3 个难度等级。实验过程中被试者的姿态及 X、Y 方向的定义如图 4 所示。

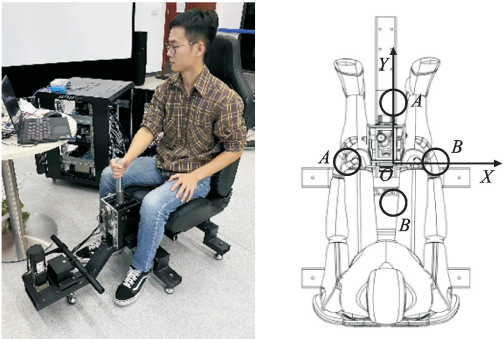


图 4 精细动作能力评估实验装置

Fig. 4 Experimental facility for fine motor ability assessment

表 1 精细动作能力评估范式设计

Table 1 Design of fine motor assessment paradigm

范式	评判标准	负载
精细操作能力 (X、Y)	以蓝色小球在两个黑圈圆心的位置误差作为评判依据,位置误差(平均值、标准差等统计值)越小,则定义为上肢精细操作能力越强	低,中,高

2 实验验证

2.1 实验验证

2.1.1 志愿者

纳入 5 组男性健康被试者共 114 名,分组如表 2 所示。A、C、E 组参加了 X、Y 两个方向精细操作实验,B、D 组参加了 X 向精细操作实验。分组原则是根据组员的飞行及摇杆类操作经验所决定的:学员组 A 为高中生,未接触过飞行训练;学员组 B 为

海航班高中学生,有 7~8 h 的陪同飞行经验;学员组 C 为已通过选拔的大学生,有相应的体能训练及一定的飞行经验;专家组 D 为现役舰载飞行人员;专家组 E 为飞行教官(考虑到飞行难度和身体因素,将专家组 D 的飞行能力排在专家组 E 之前)。实验过程中要求每位受试者在座椅上保持坐姿,上肢实验装置固定于座椅前方(见图 4),实验装置在水平面内具有 X、Y 两个方向自由度,本研究要求受试者在 X、Y 向进行实验。实验目标是考察上肢操作能力,涉及肌群主要有三角肌后束、小圆肌、冈下肌以及三角肌前束、胸大肌等。

表 2 精细操作测试志愿者分组

Table 2 Manipulation test groups of volunteers

实验组	年龄/岁	人数	飞行能力等级
学员组 A	18~19	30	1
学员组 B	18~19	24	2
学员组 C	19~21	23	3
专家组 D	25~35	16	5
专家组 E	50~60	21	4

注:飞行能力按 5、4、3、2、1 依次降低。

2.1.2 实验范式

软件交互界面如图 5 所示。蓝色小球初始位置为中间,两侧对称,要求被试者控制蓝色小球运动到黑色圆圈中心。实验过程中要求被试者肘部与大腿保持间距,仅上肢发力,蓝色小球在黑色圆圈之间往复运动,在保证准确性的前提下越快越好。操纵杆负载设置 3 个等级,每组往复 15 次,然后休息 1 min,再做下一组。

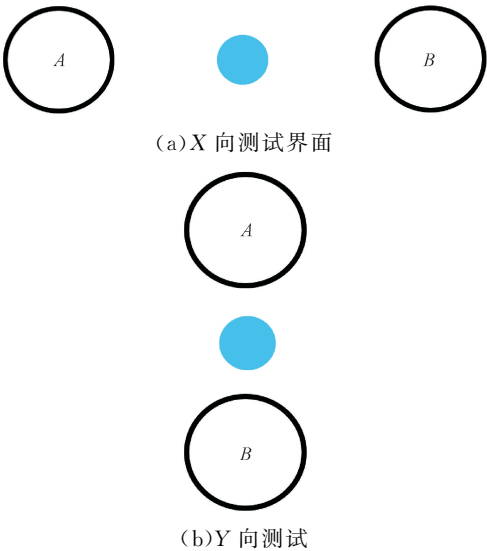


图 5 精细动作能力评估系统软件界面
Fig. 5 Software interface of fine motor ability evaluation system

2.2 数据处理

分析精细动作所需的计算值,包括图 5 中 A、B 位置均值、标准差、极差等。采集数据的分析方法如下。

- (1)对原始数据进行取绝对值和归一化处理,以便检测阈值的设定。
- (2)对步骤(1)得到的数据进行中值滤波,滤除噪声(异常毛刺)干扰。
- (3)分析数据,设定检测阈值,获得大于此阈值数据的位置索引,取位置索引的最大最小值得到有效数据段的起始和结束位置索引。

(4)根据步骤(3)中的检测结果计算获取原始数据中的有效数据,并计算其均值、标准差和极限差。在 X 向精细动作中共有 6 个特征值:左侧位置标准差(STD-L)、左侧位置平均值差(MD-L)、左侧位置极值差(ED-L)、右侧位置标准差(STD-R)、右侧位置平均值差(MD-R)、右侧位置极值差(ED-R)。在 X 向精细动作中共有 6 个特征值:上位置标准差(STD-U)、上位置平均值差(MD-U)、上位置极值差(ED-U)、下位置标准差(STD-D)、下位置平均值差(MD-D)、下位置极值差(ED-D)。数据对比分析时,将负值取绝对值,单次测量结果如图 6(a)所示,平均值误差与极限值误差如图 6(b)所示。

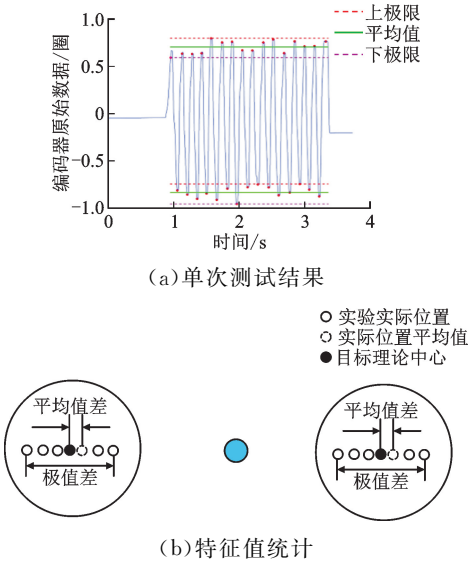


图 6 单次精细动作测试结果
Fig. 6 Single fine motor test results

2.3 X 向精细动作实验结果分析

2.3.1 组间差异分析

5 组人员共 114 人完成了 2.1.2 小节中的实验,对各组数据分布进行单因素标准差分析并进行

多重比较,组间两两比较,采用 SNK 检验,组间差异性 P 值如表 3 所示。

表 3 X 向特征值组间两两比较

Table 3 Pair comparison of eigenvalues between groups in X axis

特征值	负载	P			
		A-B	B-C	C-D	D-E
左侧位置标准差	低	0.005 *	0.340	0.170	0.010 *
右侧位置标准差		0.001 *	0.050 *	0.826	0.015 *
左侧位置平均值差		0.000 *	0.013 *	0.840	0.003 *
右侧位置平均值差		0.080	0.684	0.745	0.051
左侧位置极值差		0.028 *	0.130	0.518	0.005 *
右侧位置极值差		0.002 *	0.114	0.640	0.080
左侧位置标准差	中	0.282	0.001 *	0.824	0.011 *
右侧位置标准差		0.000 *	0.133	0.207	0.000 *
左侧位置平均值差		0.020	0.001 *	0.812	0.002 *
右侧位置平均值差		0.000 *	0.021 *	0.811	0.305
左侧位置极值差		0.367	0.002 *	0.770	0.010 *
右侧位置极值差		0.000 *	0.215	0.228	0.000 *
左侧位置标准差	高	0.119	0.002 *	0.934	0.075
右侧位置标准差		0.001 *	0.000 *	0.510	0.000 *
左侧位置平均值差		0.580	0.000 *	0.948	0.129
右侧位置平均值差		0.000 *	0.003 *	0.993	0.105
左侧位置极值差		0.164	0.000 *	0.918	0.045 *
右侧位置极值差		0.034 *	0.000 *	0.758	0.000 *

注: * 表示 $P<0.05$,有显著性差异。

从表 3 可以看出,A-B、B-C、D-E 组之间数据分布存在显著差异性,而 C-D 之间数据差异性并不明显。各分组测量的特征平均值结果如图 7 所示。

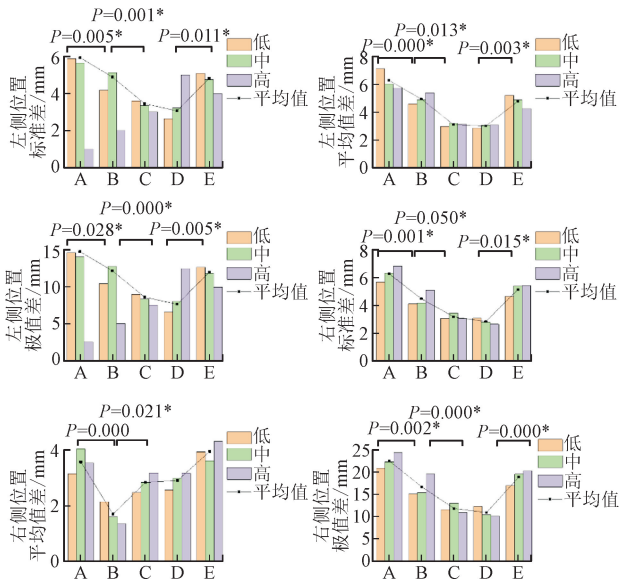


图 7 X 向特征值平均值

Fig. 7 Eigenvalue average results in X axis

从图 7 可以看出,精细操作能力与飞行能力等级呈负相关,飞行能力等级越高,操作误差越小,精细操作能力越好,但 E 组与其他组存在年龄差距,所以其不具有显著相关性。

2.3.2 组内分析

在各小组内采用单因素方差分析,比较低、中、高 3 种负载对各组 6 个操作特征值的影响,其中有显著性差异的结果如表 4、图 8 所示,表中特征值数据以“平均值±标准差”形式列出。

表 4 负载对 X 向操作成绩有显著性差异的影响

Table 4 The effect of load on performance in X axis with significant difference

特征值	组别	(平均值±标准差)/mm			F	P
		负载为低	负载为中	负载为高		
左侧位置标准差	B	4.19±1.40	5.12±1.93	5.34±1.43	3.473	0.037 *
右侧位置标准差		4.12±1.00	4.19±1.33	5.12±2.02	3.226	0.046 *
右侧位置极值差		15.07±4.23	15.37±4.92	19.52±8.94	3.661	0.031 *
左侧位置标准差	D	2.62±0.74	3.22±1.71	3.34±1.68	3.325	0.041 *

注: * 表示 $P<0.05$,有显著性差异。

从表 4 可以看出,B 组在左侧位置标准差($P=0.037<0.05$)、右侧位置标准差($P=0.046<0.05$)、右侧位置极值差($P=0.031<0.05$)存在显著性差异,D 组在左侧位置标准差($P=0.031<0.05$)存在显著性差异。

0.05)存在显著性差异。A、C、E 组在不同负载情况下 6 个特征值没有呈现显著性差异,负载与操作绩效的 6 个特征值没有显著相关性。

2.4 Y 向精细动作实验结果分析

2.4.1 组间差异分析

3 组(A、C、E)人员共计 74 人完成了图 5(b)中的实验,对各组数据分布进行单因素标准差分析,比较同一负载下,各组间操作特征值的差异性,其中有显著性差异的结果如表 5 所示,表中特征值数据以“平均值±标准差”形式列出。

表 5 Y 向各负载条件下有显著性差异的组间差异性分析

Table 5 Analysis of differences between groups under different load conditions in Y axis with statistical difference

特征值	负载	(平均值±标准差)/mm			F	P
		A 组	C 组	E 组		
下位置平均值差	低	2.40±1.61	1.60±1.79	1.69±1.21	7.264	0.001*
下位置极值差		14.85±5.78	11.80±4.27	13.99±9.73	3.362	0.040*
下位置平均值差	中	7.86±8.13	1.89±3.04	4.24±6.94	6.745	0.002*
下位置标准差	高	5.26±1.43	4.74±1.44	4.00±2.32	3.421	0.038*
上位置标准差		4.48±1.45	3.66±1.08	3.69±2.24	2.450	0.093
下位置平均值差		8.04±8.66	1.52±1.36	4.38±6.69	7.970	0.001*

根据表 5 可知,低负载时,3 个小组之间的下位置平均值差有显著性差异 $P=0.001<0.05$,其余特征值未发现显著性差异。中负载时,3 个小组之间的下位置平均值差有显著性差异 $P=0.002<0.05$,其余特征值未发现显著性差异。高负载时,下位置平均值差有显著差异 $P=0.0038<0.05$,下位置标准差有显著差异 $P=0.001<0.05$,其余特征值未发现显著性差异。在各负载条件下,3 个小组的下位置平均值差这个特征值都能呈现显著性差异。Y 向特征值平均值如图 9 所示。

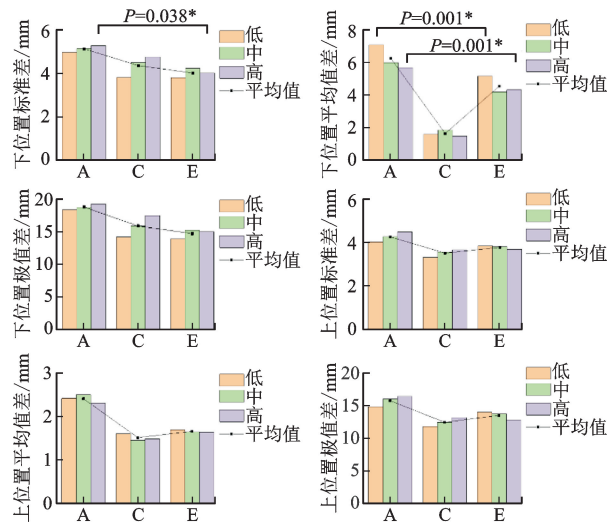


图 9 Y 向特征值平均值

Fig. 9 Eigenvalue average results in Y axis

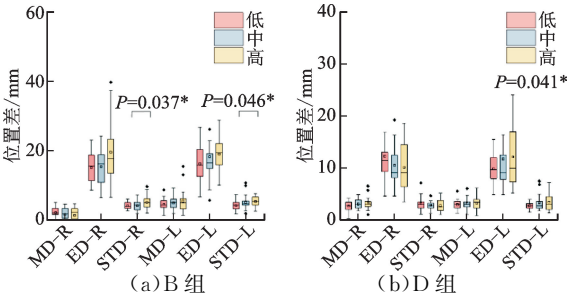


图 8 不同负载下 X 向操作结果

Fig. 8 Result of operation in X axis under different load in each group

从图 9 可以看出,C、E 两组的 Y 向精细操作能力优于 A 组。各组精细操作能力相关的 6 个特征值中,有 4 个特征值与飞行能力等级呈负相关,飞行能力等级越高,操作误差越小,精细操作能力越好。

2.4.2 组内分析

在各小组内采用单因素方差分析,比较低、中、高 3 种情况下各组对 6 个操作特征值的影响,其中有显著性差异的结果如表 6 所示,表中特征值数据以“平均值±标准差”形式列出。

表 6 负载对 Y 向操作成绩有显著性差异的影响

Table 6 The effect of load on performance in Y axis with significant difference

特征值	组别	(平均值±标准差)/mm			F	P
		低	中	高		
下位置	C	3.80±	4.49±	4.74±	3.325	0.041*
标准差		1.40	1.49	1.44		

根据表 6 可知,只有 C 组的下位置标准差在不同载荷条件下的结果有显著性差异 $P=0.041<0.05$,其他小组的特征值均未发现不同负载条件下的显著性差异。

3 结 论

本研究利用上肢协调性评估装置实现上肢变负载条件下精细操作能力评估,并在相关的范式中进行

行了相关实验,为上部协调性评估提供了量化数据支撑。本研究中的精细操作能力测试范式能够较好地评测操作者的精细操作能力,对相关人员的选拔有较好的参考意义。不同负载下各实验组的操作绩效少见显著性差异,但可变负载以及时变负载可以作为过度训练的有效手段,对相关人员的训练仍具有较好的实际意义。

下一步可以采集不同人群进行对照实验,利用本项目中的上部协调性评估装置配合肌电采集设备进行EMG分析,以精细操作结果作为绩效,寻找特定及专项协调能力的肌肉协同方式^[24-25],为特种人群评估选拔及训练提供理论基础。

参考文献:

- [1] 朱淑佩,唐伟财,王笃明,等. 基本认知与操作能力对机械臂精细对接任务绩效及人误的影响[J]. 载人航天, 2022, 28(1): 47-54.
ZHU Shupai, TANG Weicai, WANG Duming, et al. Influence of basic cognition and operation abilities on performance and human error in manipulator fine docking [J]. Manned Spaceflight, 2022, 28(1): 47-54.
- [2] 赵后雨,沈兴华. 美国海军舰载机飞行员心理选拔对我国海军的启示[J]. 职业与健康, 2019, 35(7): 990-994.
ZHAO Houyu, SHEN Xinghua. Inspiration of psychological selection of US navy carrier aircraft pilots to Chinese Navy [J]. Occupation and Health, 2019, 35(7): 990-994.
- [3] 徐海亮,吴海平,张绍勇. 海军舰载战斗机飞行员舰飞与着舰专项身体素质需求分析及专项体能训练对策研究[J]. 中国体育科技, 2019, 55(8): 26-29.
XU Hailiang, WU Haiping, ZHANG Shaoyong. Research on the analysis of specific physical quality demand and physical fitness training countermeasures of shipboard fighter pilots taking-off and landing [J]. China Sport Science and Technology, 2019, 55(8): 26-29.
- [4] CAREY D P. Eye-hand coordination: eye to hand or hand to eye? [J]. Current Biology, 2000, 10(11): R416-R419.
- [5] TANG Weicai, XIAO Yi, XU Fenggang, et al. Development and application of test software of fine operation ability of directional motion [C]//Man-Machine-Environment System Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2019: 339-346.
- [6] 李蓓蕾,林磊,董奇,等. 儿童精细动作能力的发展及与其学业成绩的关系[J]. 心理学报, 2002, 34(5): 494-499.
- LI Beilei, LIN Lei, DONG Qi, et al. The development of fine motors and their relations to children's academic achievement [J]. Acta Psychologica Sinica, 2002, 34(5): 494-499.
- [7] 唐伟财,肖毅,徐风刚,等. 精细操作能力测试方法设计与应用[J]. 载人航天, 2021, 27(2): 227-233.
TANG Weicai, XIAO Yi, XU Fenggang, et al. Design and application of fine operation ability test [J]. Manned Spaceflight, 2021, 27(2): 227-233.
- [8] FITTS P M. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement [J]. Journal of Experimental Psychology, 1954, 47(6): 381-391.
- [9] 于雪纯. 基于 Fitts 实验的眼动、指压及准确性的相关性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [10] 魏鹏娜,马鹏程,张进华,等. 基于双向长短时记忆神经网络的步态时空参数脑肌电解码方法[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(9): 142-150.
WEI Pengna, MA Pengcheng, ZHANG Jinhua, et al. EEG and sEMG decoding of gait spatiotemporal parameters based on bidirectional long short-term memory neural network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(9): 142-150.
- [11] 赵王芳. 老年人手部精细动作控制能力研究进展[J]. 中国老年学杂志, 2012, 32(15): 3348-3349.
ZHAO Wangfang. Research progress of fine motor control in the elderly [J]. Chinese Journal of Gerontology, 2012, 32(15): 3348-3349.
- [12] 李睿敏. 基于视觉数据的人体动作精细分类及评估方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2020.
- [13] 惠铎铎,李晓京,治洪,等. 心理运动能力测评系统的开发应用[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(12): 180-182, 187.
HUI Duoduo, LI Xiaojing, ZHI Hong, et al. Development and application of psychomotor ability test system [J]. Computer Technology and Development, 2014, 24(12): 180-182, 187.
- [14] 魏焕成. 心理运动能力在民航飞行员选拔中的应用研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2013.
- [15] SANO T, TAKEDA M, NAMBU I, et al. Relations between speed-accuracy trade-off and muscle synergy in isometric contraction tasks [C]//2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 4803-4806.
- [16] KOJIMA S, TAKEDA M, NAMBU I, et al. Rela-

- tions between required accuracy and muscle synergy in isometric contraction tasks [C]//2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1191-1195.
- [17] 唐伟财, 肖毅, 徐凤刚, 等. 精细操作能力测试方法设计与应用 [J]. 载人航天, 2021, 27(2): 227-233.
TANG Weicai, XIAO Yi, XU Fenggang, et al. Design and application of fine operation ability test [J]. Manned Spaceflight, 2021, 27(2): 227-233.
- [18] 都承斐, 王丽珍, 柳松杨, 等. 机动飞行过载时操纵杆位置对飞行员操控影响的生物力学研究 [J]. 航天医学与医学工程, 2014, 27(4): 286-290.
DU Chengfei, WANG Lizhen, LIU Songyang, et al. A biomechanical study on impact of position of flight control stick on operation efficiency in flight maneuvering acceleration [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2014, 27(4): 286-290.
- [19] 赵劲松, 叶正茂, 沈刚, 等. 飞行模拟器操纵负荷系统内回路的逆模型控制 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(4): 38-44.
ZHAO Jinsong, YE Zhengmao, SHEN Gang, et al. Inverse model control for inner loop of control loading system on flight simulator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(4): 38-44.
- [20] 莫凡. 飞行模拟器操纵负荷控制系统机械装置研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2015.
- [21] 姚文坤. 电动操纵负荷系统结构优化及力感模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [22] 陈珍, 杨海宽, 姜南, 等. 直升机飞行模拟器通用型操纵负荷系统设计 [J]. 系统仿真学报, 2019, 31(11): 2408-2412.
CHEN Zhen, YANG Haikuan, JIANG Nan, et al. Design of universal control load system of helicopter flight simulator [J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2408-2412.
- [23] 雷寰宇, 吕创, 张学民. 飞行任务中分心物的速度与数量变化对手眼协调追踪绩效的影响 [J]. 航天医学与医学工程, 2016, 29(5): 372-375.
LEI Huanyu, LÜ Chuang, ZHANG Xuemin. Influence of speed and amount of distractors on eye-hand coordination in a flying task [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2016, 29(5): 372-375.
- [24] ZHAO Kunkun, WEN Haiying, ZHANG Zhisheng, et al. Evaluation of methods for the extraction of spatial muscle synergies [J]. Frontiers in Neuroscience, 2022, 16: 732156.
- [25] 王海, 陶庆, 苏娜, 等. 采用表面肌电信号的手指关节角度精确感知方法 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(8): 160-167.
WANG Hai, TAO Qing, SU Na, et al. Method for accurate sensing of finger joint angles using surface electromyography signals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(8): 160-167.

(编辑 陶晴 杜秀杰)