

控制与决策

Control and Decision

基于钢琴触键动作的教育辅助型外骨骼机械手设计

蔡蓉杰, 丁伯慧, 李泽, 丁晨阳

引用本文:

蔡蓉杰, 丁伯慧, 李泽, 等. 基于钢琴触键动作的教育辅助型外骨骼机械手设计[J]. *控制与决策*, 2022, 37(2): 314–322.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1092>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于深度强化学习的机器人运动控制研究进展](#)

Research progress of robot motion control based on deep reinforcement learning
控制与决策. 2022, 37(2): 278–292 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1382>

[基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制](#)

Coordinated impedance control for dual–arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller
控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

[带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制](#)

Prescribed performance adaptive control of flexible–joint manipulators with output constraints
控制与决策. 2021, 36(2): 387–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0974>

[空间机器人捕获航天器操作的避撞柔顺复合自抗扰控制](#)

Collision avoidance and compliant composite active disturbance rejection control of space robot capture spacecraft
控制与决策. 2021, 36(2): 355–362 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0507>

[融合长短时记忆机制的机械臂多场景快速运动规划](#)

Multi–scene rapid motion planning combining with long and short time memory mechanisms for manipulators
控制与决策. 2020, 35(12): 2968–2976 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1387>

基于钢琴触键动作的教育辅助型外骨骼机械手设计

蔡蓉杰, 丁伯慧[†], 李泽, 丁晨阳

(天津大学 机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要: 为了掌握钢琴弹奏技能, 初学者往往需要在教师的帮助下不断重复训练并纠正错误的触键动作. 这种方法训练强度大, 单调乏味, 教学效果与教师的经验相关. 近年来, 用于辅助人手运动的外骨骼机械手研究逐渐增加, 但结构复杂、运动精度较低、缺少反馈与运动评价等问题仍然存在. 针对这些问题, 首先采用 leap motion 建立手指触键动作测量平台, 采集手指触键动作参数值, 获得手指弹琴触键运动曲线; 然后设计一款用于钢琴教学训练的外骨骼钢琴教学机械手. 该机械手采用特有的欠驱动传动方式, 实现远指节 DIP、近指节 PIP 与掌指节 MCP 的耦合运动. 最后, 对钢琴教学机械手进行仿真分析, 以及进行人手穿戴弹奏实验, 验证了钢琴教学机械手结构可靠, 动作还原精度较高, 能够满足钢琴弹奏动作练习要求. 该钢琴教学机械手结构简单、穿戴方便, 可辅助钢琴弹奏初学者自学.

关键词: 钢琴弹奏; 动作分析; 关节转角; 欠驱动; 外骨骼; 绳索传动; 机械手

中图分类号: TP241.3

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1092

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 蔡蓉杰, 丁伯慧, 李泽, 等. 基于钢琴触键动作的教育辅助型外骨骼机械手设计 [J]. 控制与决策, 2022, 37(2): 314-322.

Design of education assisted hand exoskeleton based on piano touching action

CAI Rong-jie, DING Bo-hui[†], LI Ze, DING Chen-yang

(Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin, 300350, China)

Abstract: Piano beginners need a lot of repetitive exercises of raising and dropping fingers and master the correct piano playing actions to master piano skills with the help of teachers and repeat the training. The training intensity of this method is strong and monotonous, and the teaching effect is related to teachers' experience. In recent years, the research of exoskeleton manipulator used to assist human hand has gradually increased. But there are some problems, such as complex structure, low motion accuracy, lack of feedback and motion evaluation. Firstly, leap motion is used to build the measurement platform of finger touching action. And the finger touching action parameters value can be collected and then get the finger touching key motion curve. Then, an exoskeleton piano teaching manipulator is designed. Finally, the simulation analysis and piano playing experiment of the piano teaching manipulator verify that the piano teaching manipulator has reliable structure, high action accuracy and can meet the requirements of piano playing practice. The structure of the manipulator is simple and easy to wear, which can meet the requirements of finger touching piano in teaching process, and assist the beginners to learn by themselves.

Keywords: piano; action analysis; joint angle; underactuated; exoskeleton; rope-drive; manipulator

0 引言

随着我国社会生产力和经济水平日益提高, 更多的益智健体、陶冶情操的项目, 如篮球、乐器等普及到千家万户, 相应的运动教育也得到了更快的发展, 结合运动学习与控制理论的运动学习型教育机器人应

运而生. 钢琴弹奏是一项专业性很强的手部技能, 要想弹奏出饱满、精准的音色, 需要人手的动作、力度和落键速度的巧妙结合^[1]. 钢琴教学大致可以分为 4 个阶段, 识谱阶段、弹奏训练阶段、掌握音乐语言阶段以及技巧结合阶段^[2]. 其中弹奏训练阶段需要学员

收稿日期: 2020-08-07; 录用日期: 2020-12-03.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61877042).

责任编辑: 程龙.

[†]通讯作者. E-mail: dingbaihui@tju.edu.cn.

在教师的指导下反复练习手指触键动作,这个阶段对于形成规范的弹琴动作至关重要.但是,由于练习过程枯燥、持续时间长和学费昂贵等原因,往往令初学者望而却步.

当前可带动手指进行抓取动作的外骨骼康复机械手研究发展迅速,其由驱动器、传递机构、执行机构和控制模块等组成的机电一体化系统^[3],主要应用于医疗上脑中风患者的术后恢复中.根据不同结构类型,外骨骼机械手可分为刚性与柔性结构.刚性结构一般由连杆^[4]或异形件^[5]组成,具有较高的控制精度,能够很好地驱动人手完成某些特定的动作,但仍存在结构复杂、负重较大、人手安全的问题.柔性结构通常采用数据手套^[6]和可变形材料(人工肌肉、柔性塑料^[7]等)来带动手做相应运动,其结构简单、控制灵活、舒适感更好,但运动精度难以保证.

钢琴教学机械手的结构设计受到外骨骼康复机械手设计思路的启发,通过采集钢琴弹奏触键动作的运动参数,分析钢琴弹奏动作关节转角范围、角位移曲线,从而拟合手指运动曲线方程;并以此为基础进行外骨骼钢琴教学机械手结构设计,利用ADAMS进行结构仿真并进行弹奏试验,验证机械手结构模型正确性与控制精度.本文提出了特有的欠驱动传动方式,进一步简化带有绳索传动的机构.所设计钢琴教学机械手可增加钢琴教学过程中的趣味性,提高教学质量,减少钢琴教师的工作量.机械手结构设计和实验方法也可给其他有高精度动作要求的运动学习型外骨骼机械手设计提供思路.

1 手指动作采集

在钢琴弹奏训练阶段,初学者需要不断练习来掌握正确弹琴动作.由于不同的人手指比例、动作习惯等不一致,每个人的钢琴触键动作轨迹也各不相同.为了更好地进行机械手设计和后期评价工作,需要采集并分析手指触键动作信息.

1.1 人手结构分析

人手灵巧而复杂,共有27块骨骼^[8],拇指具有2块指骨,其余手指分别有3块指骨.形成人手的3个指节:远指节DIP、近指节PIP以及掌指节MCP,掌指关节(MCPJ)与掌骨节(MIP)相连,进而通过掌腕关节(HCJ)与腕骨相连.人手结构如图1所示.

单指(非拇指)一般可简化成具有3个转动副的开式链连杆机构,并将3个关节转角作为控制参数^[9].如图2所示,建立单指(非拇指)的极坐标系,其中选取掌指关节(MCPJ)、近指关节(PIPJ)和远指关节

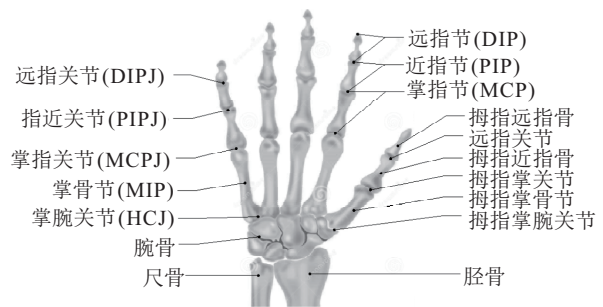


图1 人手部结构

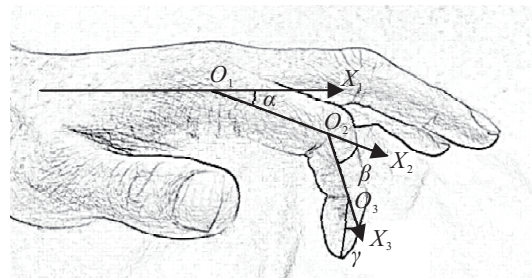


图2 单指(非拇指)极坐标系

(DIPJ)的中心点 O_1 、 O_2 、 O_3 为极坐标原点; X_1 、 X_2 、 X_3 分别为3个指关节的极轴; α 、 β 和 γ 分别表示掌指关节(MCPJ)、近指关节(PIPJ)和远指关节(DIPJ)的转角(顺时针为正).

1.2 手指动作采集方法

手部运动数据采集方法常分为接触式测量和非接触式测量.接触式测量通常采用霍尔传感器^[10]获取手指弯曲和伸展时的运动数据,或者让测试者穿戴数据手套来获取手部运动数据.数据手套带有位移和速度传感器^[11],测量精度较高.但接触式测量会阻碍手指的弹琴动作,同时远指端的运动参数难以获取,因此考虑采用非接触式测量.非接触式测量通常采用激光动态测量仪^[12]或慢动作相机来对特征点进行识别和采集.通过在手指关节特征处固定识别贴片,再使用激光动态测量仪等设备进行测量.该方法精度较高,但是由于激光测量有方向性要求,只能采集平面运动参数值.

近年来,机器视觉在测量方面的发展日益成熟并在体感设备中应用广泛.leap motion^[13]是2013年推出的一种体感传感器设备,精度可达到0.01 mm.值得一提的是该设备系统是开源的,允许研究人员对测量数据进行提取和处理^[14-15],利用leap motion可以较高精度测得手指空间运动参数.

本文采用leap motion搭建手指弹琴触键动作采集平台,测量界面如图3所示;设定采集频率为60 Hz,采集并记录食指在每个采集频率内的位置坐标.数据采集流程如图4所示.

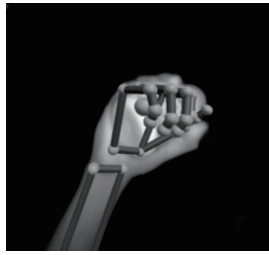


图3 测量界面

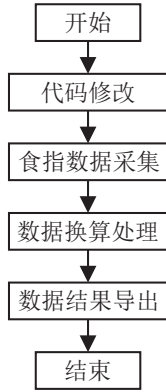


图4 leap motion数据采集流程

2 手指动作分析

课题组分别对8位受试者进行手指触键动作数据采集,这8位受试者都参加过5年以上的钢琴专业训练.考虑到除拇指外的其余4指骨骼结构相同,在弹琴时除拇指外的4指的触键动作相似,因此仅采集食指弹琴动作,获取掌指关节(MCPJ)、近指关节(PIPJ)和远指关节(DIPJ)的旋转角度.

2.1 手指运动范围分析

每位受试者接受30次动作测量,其中落指和抬指动作记为1次.通过Matlab对测量的数据进行转化、去噪、滤波,最终获得掌指关节(MCPJ)、近指关节(PIPJ)、远指关节(DIPJ)的旋转角度位移图(见图5~图7).其中,横坐标为测量时间,纵坐标为各关节转角数值.可以发现,专业钢琴弹奏者的角位移曲线具有明显的规律性,说明通过一定的动作训练可以形成规范的弹琴触键动作.为了与钢琴弹奏时的手指触键动作对比,课题组采集并分析了抓握动作和精准抓取动作的食指各关节转角范围,如表1所示.

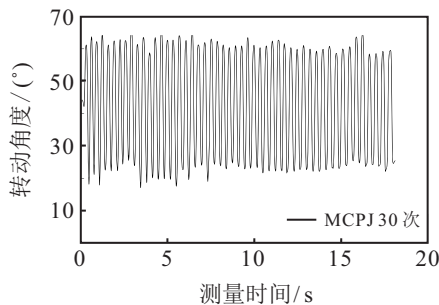


图5 食指MCPJ动作测量30次角位移

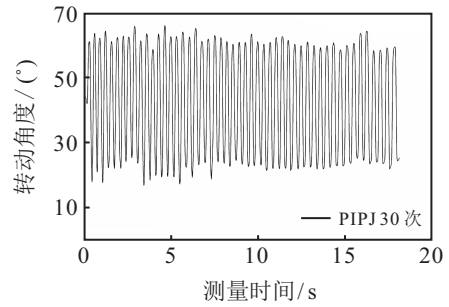


图6 食指PIPJ动作测量30次角位移

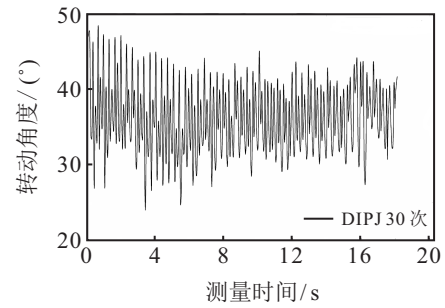


图7 食指DIPJ动作测量30次角位移

表1 食指运动关节转角范围 (°)

动作类型	MCPJ角度(α)	PIPJ角度(β)	DIPJ角度(γ)
抓握动作	-5~70	10~95	18~70
精准抓握	5~45	25~70	0~25
钢琴弹奏动作	-24~25	20~65	27~45

在抓握动作中,食指的掌指关节(MCPJ)转角范围较大,介于 $-5^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 之间;在精准抓握动作中,食指的掌指关节(MCPJ)转角范围较小,介于 $5^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间.相比之下,钢琴弹奏动作的食指的掌指关节(MCPJ)转角介于 $-24^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 之间,其范围大小与精准抓握动作相当,但是由于目标动作不同,故角度分布在不一样的位置.如图5所示,当转角 $\theta = 20^{\circ}$ 左右时,食指落到最低点准备抬起,MCPJ顺时针弯曲到最大处;当转角 $\theta = -22^{\circ}$ 时,表示食指抬到最高点准备下落,MCP关节逆时针转到抬指最大处.角度越大,手指弯曲动作越明显.根据运动范围设计钢琴教学机械手,既可以确定动作初值,简化机械手的结构,也可以规范使用者的手指动作.

2.2 手指运动曲线分析

为分析手指触键动作规律,本文整合8位受试者食指弹琴触键运动参数,获得食指单次动作各关节角位移图(见图8~图10).

使用Matlab输出食指触键各关节转角拟合曲线,横坐标为测量时间,纵坐标为各关节转角数值.一个完整的食指触键动作可分为最高点悬停、落指、最低点触键、抬指和返回最高点5个阶段.划分阶段如图8~图10所示,实线表示手指位移曲线,虚线为拟合

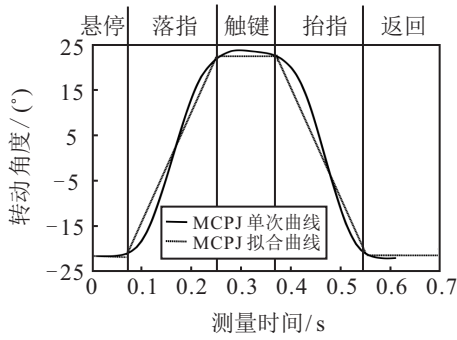


图8 食指MCPJ转角曲线分段拟合

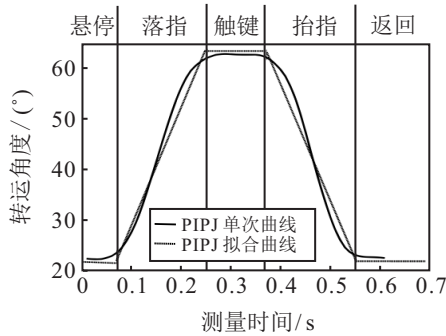


图9 食指PIPJ转角曲线分段拟合

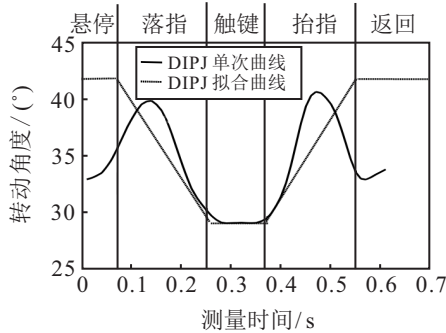


图10 食指DIPJ转角曲线分段拟合

曲线. 通过计算, 得到食指触键MCPJ转角运动方程

$$\begin{cases} y = -22.2, & 0 < x \leq 0.08; \\ y = 270x - 43.8, & 0.08 < x \leq 0.25; \\ y = 23.7, & 0.25 < x \leq 0.38; \\ y = -270x + 126.3, & 0.38 < x \leq 0.55; \\ y = -22.2, & 0.55 < x \leq 0.6. \end{cases} \quad (1)$$

得到食指触键PIPJ转角运动方程

$$\begin{cases} y = 22.5, & 0 < x \leq 0.08; \\ y = 230x + 4.1, & 0.08 < x \leq 0.25; \\ y = 61.6, & 0.25 < x \leq 0.38; \\ y = -230x + 149, & 0.38 < x \leq 0.55; \\ y = -22.5, & 0.55 < x \leq 0.6. \end{cases} \quad (2)$$

其中测量时间为自变量, 关节转角为因变量.

食指DIPJ的转角位移曲线在完整的触键动作中是一条介于27° ~ 40°之间的二次曲线. 考虑到食指

触键时, 指尖与钢琴键盘面应尽量保持垂直, 因此食指DIP关节触键时的姿态更为重要. 在其他区间, 只需保持在人手运动范围之内, 不伤及人手即可.

综上所述, 取最低点作为触键动作终点, 按照同样的方法对远指关节转角位移曲线进行拟合, 令 $y_{DIPJ_{min}} = 27, y_{DIPJ_{max}} = 42$. 得食指触键DIPJ转角运动方程

$$\begin{cases} y = 42, & 0 < x \leq 0.08; \\ y = -88.23x + 49.06, & 0.08 < x \leq 0.25; \\ y = 27, & 0.25 < x \leq 0.38; \\ y = -88.23x - 6.53, & 0.38 < x \leq 0.55; \\ y = -42, & 0.55 < x \leq 0.6. \end{cases} \quad (3)$$

通过以上方程, 可以得到3个关节之间落指阶段转角关系方程

$$y_{PIPJ} = 0.8518y_{MCPJ} + 41.41, \quad (4)$$

$$y_{DIPJ} = -0.3768y_{MCPJ} + 34.75. \quad (5)$$

该方程为一次方程, 说明以此方法拟合曲线得到3关节转角呈一次线性关系, 简化驱动要求. 为获得3个指关节(掌指节、近指节和远指节)传动关系, 对所拟合角位移曲线相应运动阶段方程进行求导求出相应角速度值, 并以传动比的形式给出. 机械手各关节采用一级传动, 所得传动比即为各关节转动轴半径之反比, 即

$$i_{MCPJ-PIPJ} = \frac{\omega_{MCPJ}}{\omega_{PIPJ}} = \frac{230}{270} = \frac{R_{PIPJ}}{R_{MCPJ}}, \quad (6)$$

$$i_{MCPJ-DIPJ} = \frac{\omega_{MCPJ}}{\omega_{DIPJ}} = -\frac{88.23}{270} = \frac{R_{DIPJ}}{R_{MCPJ}}. \quad (7)$$

由于拟合曲线与真实值存在误差, 结构的动作精度相对应有所降低. 为验证精度要求, 需要对拟合方法进行误差评价. 均方根误差(RMSE)对一组测量中的极大或极小误差反映敏感, 其能够很好地反映出测量的精密性^[16], 可以更好地评价拟合曲线误差. 均方根误差越小表明拟合精度越高, 计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (8)$$

其中: SSE为误差平方和; n为拟合点个数; y_i 为拟合值; \hat{y}_i 为真实值.

由于对远指关节DIPJ转角位移的拟合方式的特殊性, 其拟合误差没什么价值, 只需计算掌指关节MCPJ与近指关节PIPJ的均方根误差, 计算结果如表2所示. 计算得拟合曲线的均方根误差均小于3, 即所拟合曲线与实际角位移曲线之差平方后开根的期望值均小于3度, 贴合人手真实运动曲线.

表2 均方根误差计算结果

动作阶段	RMSE _{MCPJ}	RMSE _{PIPJ}
下落阶段	2.6106	2.9467
抬起阶段	2.9885	2.8207

该拟合方式可获得食指触键各关节转角较为简单的运动方程,大大简化结构设计与控制要求,为钢琴教学机械手结构设计奠定基础,同时为欠驱动方案可行性提供理论依据。

3 机械手结构设计

3.1 设计要求

钢琴教学机械手结构设计要求:

- 1) 能辅助手指实现弹琴弹奏触键运动曲线;
- 2) 穿戴方便,可由不同手指长度进行相应调节;
- 3) 结构简单,低负重,采用欠驱动方式传动;
- 4) 防止刚性冲击,应配有缓冲装置等安全结构。

3.2 钢琴教学机械手结构设计

结合设计要求,采用CATIA进行钢琴教学机械手的结构建模,结构采用半包式结构,转动中心位于手指两侧。装配关系如图11和表3所示。

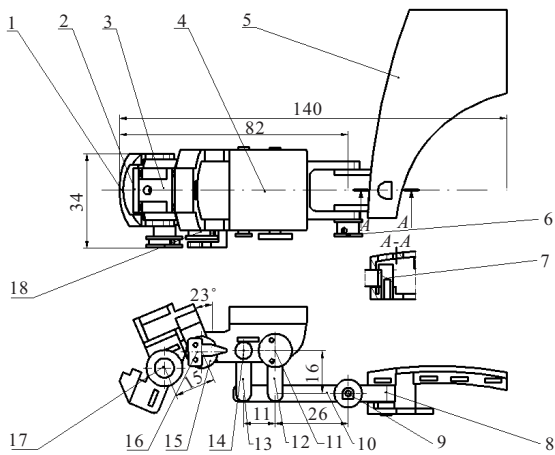


图11 钢琴教学机械手结构

表3 结构明细

序号	名称	序号	名称
1	远指节DIP结构	10	MCP转动曲柄
2	近指节PIP结构(上)	11	MCPJ-PIPJ固定板
3	近指节PIP结构(下)	12	MCP转动连杆2
4	掌指节MCP结构	13	MCP转动连杆1
5	掌心固定板	14	销轴盖
6	掌指关节MCPJ转动轮	15	近指关节PIPJ转动轮
7	周转机构旋转轴	16	PIPJ-DIPJ固定板
8	周转机构转动板	17	远指关节DIPJ转动轮
9	掌指关节MCPJ转动轴	18	近指关节PIPJ转动轴

远指节DIP结构(1)与近指节PIP结构上(2)通过远指节DIP转动轮(17)连接,可实现远指节和近指节

的相对转动。近指节PIP结构下(3)与近指节PIP结构上(2)采用滑块滑槽方式装配,通过两者的相对滑动来调整结构长度以适应人手穿戴。近指节PIP结构下(3)与掌指节MCP结构(4)通过近指关节转动轴(18)和近指关节转动轮(15)连接,可实现近指节与掌指节的相对转动。掌指节MCP结构(4)、MCP转动曲柄(10)以及MCP转动连杆(12,13)通过铰链连接,构成一个平行四边形结构。MCP转动曲柄(10)、掌指关节MCPJ转动轮(6)和转动板(8)通过转动轴(9)连接,形成掌指节与手掌的相对转动。PIPJ-DIPJ固定板(16)和MCPJ-PIPJ固定板(11)分别与掌指节MCP结构(4)和MCP转动连杆2(12)固联。手掌通过皮带固定在掌心固定板(5)上,周转机构旋转轴(7)与转动板(8)固联,允许手指存在左右微小摆动。

由于无法直接在掌指关节的侧边设置转动中心,现将转动中心进行平移,利用平行双曲柄机构主从动件运动相同原理将掌指节转动中心平移至可控处,添加虚约束来使得手掌转动中心A与驱动轮D距离不变,从而保证AB与CD两杆运动一致,如图12所示。

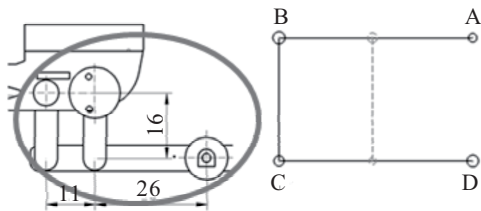


图12 掌指节平行四边形结构

为适应不同长度的手指穿戴,将近指节PIP结构分为上、下两部分(2和3),采用滑块滑槽方式装配。为保证结构装配可靠,滑槽和滑块采用燕尾形。另外,近指节PIP结构上方开设一对用于安装弹簧的小孔,依靠弹簧力实现结构复位。中间开设螺纹孔,使用紧定螺钉来实现对长度的固定,如图13所示。PIP结构装配调节顺序为:先进行PIP部分长度调节,随后上紧螺钉固定长度。连接皮套与各部分半圆形结构实现手指与结构紧密贴合,从而保证结构各轴线与关节轴线达到重合位置。

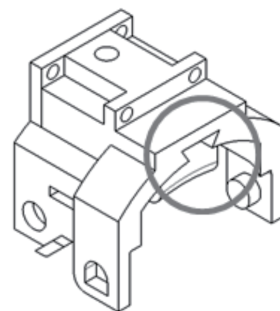


图13 近指节滑道结构

为防止电机反转等原因误伤手指,远指节、近指节与掌指节均设立限位结构. 当远、近关节运动到一定角度,图14所圈的斜面将与指节结构接触,阻挡结构继续转动,防止出现负角度运动,落指姿态不会伤及人手从而不进行限制. 掌指关节在抬指阶段转动连杆1为顺时针旋转,斜面结构挡住转动连杆1,限制掌指节继续抬指运动,落指阶段掌指结构运动到一定角度,两个连杆合在一起,限制结构继续向下的落指运动,实现结构限位. 根据动作分析限制各个关节限制的角度为掌指节 $-25^{\circ} \sim 24^{\circ}$,近指节限制到 62° ,远指节限制到 27° .

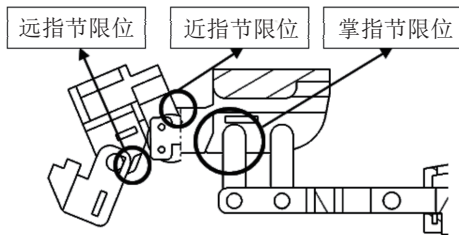


图14 各指节结构限位

3.3 控制与传动

控制与传动方式的选择影响结构的舒适性、准确性以及整体结构的便携性^[17]. 现阶段控制方式大致上有气动控制、液压控制以及电机控制. 气动控制简单方便,整体安全上韧性较好,可达到抓握的基本要求,但需外接气动装置,结构繁重复杂. 液压控制精度较高,手部细小零件较多,但需设计相应液压元件,便携性较差^[18]. 电机控制的控制精度较高,同时具有过载保护的功能,结构简单轻便^[19]. 本结构选用电机参数如表4所示,减速箱采用60:1型.

表4 电机参数

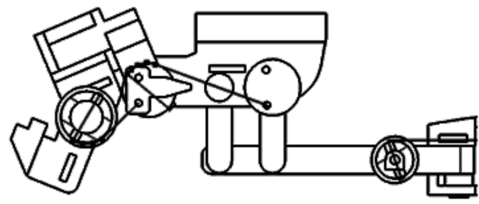
标准电压	额定转速	额定功率	额定扭矩	端电阻
12 V	6 510 rpm	4.32 W	0.2 N·m	33 Ω

近年欠驱动传动在机械手研究中应用广泛,其中采用绳索传动实现欠驱动方法较为简便^[20],可以实现长距离传动同时传动过程柔顺性好. 但是大部分机械手的绳索传动采用多线输入输出控制^[21],为减少绳索输入输出端数目,实现单绳索输入与输出控制,本文提出一种特有的欠驱动传动方式,原理如下.

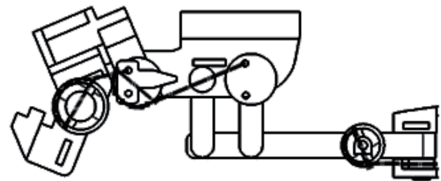
对于远指关节DIPJ转动轮(17)的控制,在近指节PIP结构设置一固定点,与远指节转动轮以绳索连接,当近指节发生转动时,其上的固定点与远指节转动轮距离改变,利用绳索拖拽作用实现对两个转动轮的控制,利用刚体反转法可得到该连接方式传动比,等于固定点到结构转动中心距离与所需驱动的转动轮

半径反比. 对于近指关节PIPJ转动轮(15)的控制,由于平行四边形机构中,各铰链的相对运动相同,均为同向等角速度转动,铰链处与近指关节PIPJ转动轮(15)相对速度为同样的转动. 故选用MCP转动连杆2(12)与掌指节MCP结构(4)连接铰链处设立MCPJ-PIPJ固定板(11),当掌指节转动时,平行四边形结构运动,利用相对转动实现对近指关节PIPJ转动轮(15)进行控制.

钢琴教学外骨骼机械手结构采用电机传动,绳索连接,连接方式如图15所示. 其中上、下分别为抬指、落指阶段绳索连接示意图,绳索连接原理如图16所示.



(a) 抬指阶段绳索连接



(b) 落指阶段绳索连接

图15 绳索传动连接

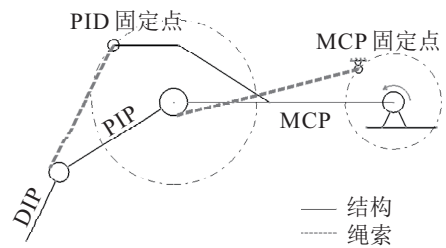


图16 绳索传动连接原理

欠驱动传动可减少电机数量,简化结构. 利用3关节角位移关系进行耦合控制,实现以单电机控制单个手指进行(3自由度)特定高精度运动.

钢琴教学机械手的工作原理为: 电机转动,拖拽绳索带动掌指关节转动轮和转动曲柄转动,通过平行四边形机构带动掌指关节部分同步转动. 对于远指关节和近指关节的转动,利用特有的欠驱动传动方式. 当掌指关节发生转动时,远指关节与近指关节会进行相应转动,从而完成手指弯曲动作.

4 仿真分析

ADAMS(automatic dynamic analysis of mechanical systems)软件是现阶段运用最为广泛的

机械系统仿真软件,具有强大的仿真模块以及分析工具,可以准确计算模型的各项运动参数,用于评定模型的可行性研究,也可以利用ADAMS后处理模块求得各关节角度参数,从而优化自身结构^[22].

依据食指触键各关节转角运动方程(1)~(3),采用ADAMS进行钢琴教学机械手运动仿真分析,采集频率为60 Hz.控制函数如下.

1)落指阶段驱动方程:

$$\text{掌指关节: } 270^\circ \cdot t - 43.8^\circ;$$

$$\text{近指关节: } 230^\circ \cdot t + 4.1^\circ;$$

$$\text{远指关节: } -88.23^\circ \cdot t + 49.06^\circ.$$

2)抬起阶段驱动方程:

$$\text{掌指关节: } -270^\circ \cdot t + 126.3^\circ;$$

$$\text{近指关节: } -230^\circ \cdot t + 149^\circ;$$

$$\text{远指关节: } 88.23^\circ \cdot t - 6.53^\circ.$$

其中 t 为仿真时间(s).

为保证电机可以提供足够驱动力矩,需要考虑到结构惯性力以及手指阻力综合作用下所需要的驱动力矩.对于手部痉挛的患者而言,近指节到远指节手指阻力分别为10 N、6 N、3 N^[23],正常人的阻力约为痉挛患者的1/4^[24],即 $FMCP = 2.5 \text{ N}$, $FPIP = 1.5 \text{ N}$, $FDIP = 0.75 \text{ N}$,结果如图17所示,横坐标为时间,纵坐标为驱动力矩值.得出掌指关节(MCPJ)所需最大驱动力为0.186 N·m,所选电机0.2 N·m,可满足驱动力要求.

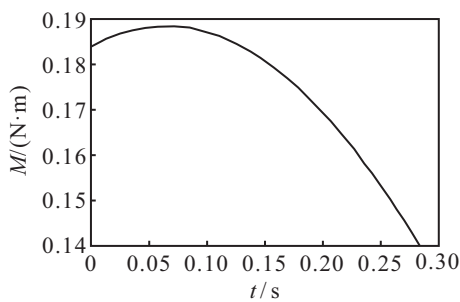


图17 MCPJ驱动力矩

通过计算,抬起与落下运动时间段均为0.283 s, MCPJ与手掌部分固联,无需测量,故仅采集指尖点、DIPJ和PIPJ三点位置信息.图18为结构仿真中指尖

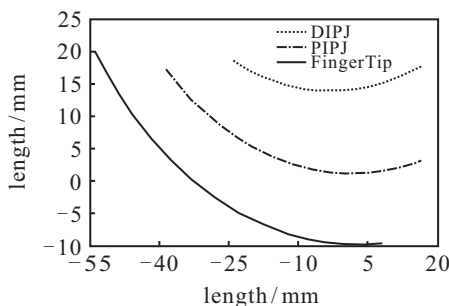


图18 结构仿真中3个特征点的位移

点、DIPJ和PIPJ三点位移轨迹.其中虚线、实线和点划线分别为指尖点位移、远指关节点位移以及近指关节点位移.

由图18可发现,所测位移曲线平滑,不存在运动奇异点,整体运动呈现稳定.为验证结构运动精度,将“食指运动分析”部分中8位受试者指尖点、DIPJ和PIPJ三点位移轨迹信息输出,如图19所示.

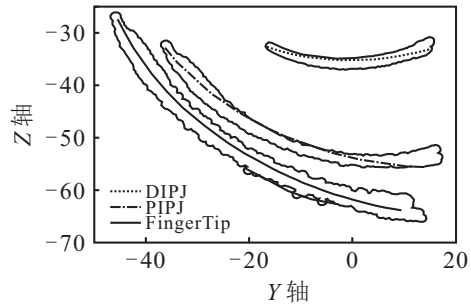


图19 食指三特征点位移范围与结构对比

结构仿真所得指尖点、DIPJ和PIPJ三点位移轨迹均在所测食指对应3个特征点位移的分布范围内.由于不同人手3个指节长度不同,以特征点位移曲线曲率变化作为动作评判标准.结构与食指对应点的位移轨迹趋势基本吻合,表明所设计结构带动食指进行弹奏动作与标准动作相近,动作精度较高,可以完成钢琴弹奏动作姿态辅助教学.

5 钢琴教学机械手弹奏训练实验

基于上述对钢琴教学机械手的结构设计与分析,进行弹奏训练实验来验证所设计机械手结构精度以及可用性.

机械手结构采用3D打印方式加工,材料选择8200未来工厂树脂,电机选择标准电压12 V驱动,固定于实验平台之上,减速箱传动比为60:1,额定扭矩为0.2 N·m,电机输出轴与掌指节MCP转动轮通过鲍登线相连接.使用MIDI键盘与MPU-6050动态角度传感器来测量机械手结构的触键力度与转动姿态,用以评价结构运动精度,实验平台及上位机显示界面如图20和图21所示.

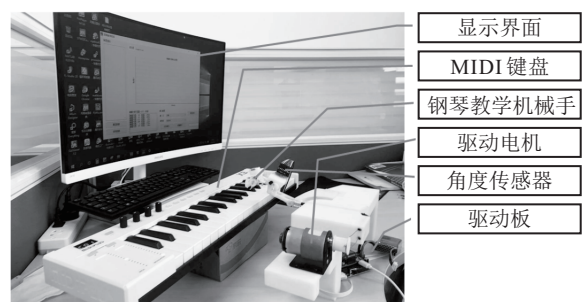


图20 实验平台

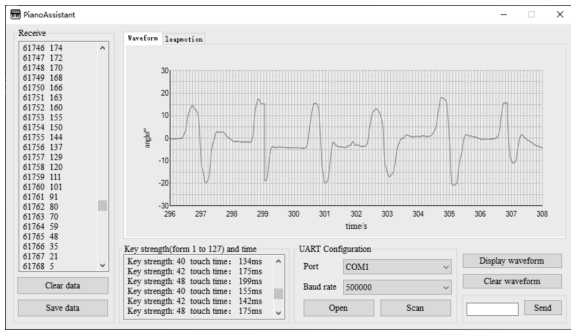


图 21 上位机显示界面

实验内容为受试者穿戴钢琴教学机械手进行触键动作弹奏30次,并采集力度与转角信息。

在图22中,角位移曲线在运动阶段平滑且分布范围达到正确钢琴触键动作所期望的角度,即结构驱动范围与触键动作吻合。为了验证结构安全性,设定掌指关节抬指角度偏大10°左右,图22中掌指关节到达手指运动范围极限制位结构触发,限制角度在-25°~24°之间,表明限制效果可靠。

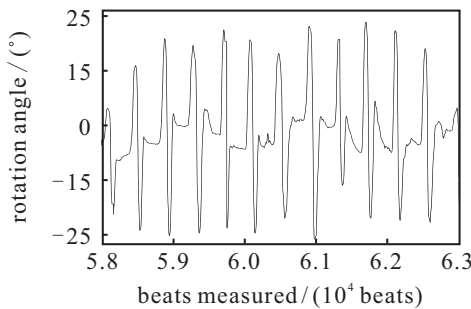


图 22 CP结构转角位移

由于音色是相对参数,其与力度值之间的关系很难评定。MIDI键盘可以输出力度来评价音色质量,其范围为0~127。在正确配置情况下,中等强度的标准力度等级为50左右。在图23中,由于装配、控制和手指阻抗力变化的影响,无法保证触键力等级为一个恒定值。一个没有经过弹奏训练的初学者,进行触键动作的力度等级离散范围可达到60以上,而钢琴教学机械手带动手进行触键动作的力度分布集中在40~60,最大离散范围有20,属于可控范围之内。

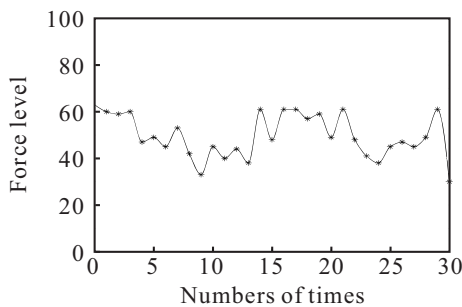


图 23 指尖触键力度等级

在弹奏实验中,所设计钢琴教学外骨骼机械手显示出良好的运动特性,可以很好地带动食指进行钢琴弹奏,与正确弹奏动作贴合程度较高,手部不适感或奇异感较低,结构对手运动实现较高精度控制(力度与姿态)。结构整体质量约为180g,便携性好。实验结果表明,钢琴教学机械手可满足以较高精度带动手进行正确钢琴弹奏动作练习。

6 结论

本文首先建立测量平台采集食指标准钢琴触键动作参数,分析触键动作特性。所设计结构运动以标准触键动作分析为基础,动作精度较高,舒适性好。结构简单,提出仅有一端的输入输出而控制3个自由度的欠驱动耦合运动传动方式,整体重量轻便;当抬指动作幅度过大时相应限位机构实现限位,安全可靠;对所设计结构进行仿真来验证结构模型的正确性,通过3D打印做出结构并进行弹奏训练试验,结构性能满足要求。

由于个人学术素养和课题研究时间有限,所设计的钢琴教学机械手还存在以下几个问题:结构手指宽度是34mm,若用于其他教学动作可能产生干涉;结构与人手皮套固定有弹性,影响精度,需要改进;结构装配性差,需要进一步标准化设计;该结构还是不能避免刚性外骨骼机械手“僵硬”的缺点,控制上需添加反馈实现闭环控制,提高教育效率和质量。接下来需要针对钢琴教学机械手结构作进一步优化改良,将单指结构拓展出可用于多指协同功能的多指外骨骼机械手结构。

总之,外骨骼机械手的结构设计日趋成熟,面对不同的工作对象有着不同的工作要求。合理且全面地对所要求的动作进行分析,不仅可以提高控制精度,也可以更好地贴近人手真实的运动,减少装置给人手带来的不适感,也可以为结构验证方面提供依据。

参考文献(References)

- [1] Furuya S, Flanders M, Soechting J F. Hand kinematics of piano playing[J]. Journal of Neurophysiology, 2011, 106(6): 2849-2864.
- [2] 苗俊. 关于钢琴教学中的几个重要阶段[J]. 黄钟(武汉音乐学院学报), 2006(S1): 188-190. (Miao J. Several important stages in piano teaching[J]. Huang Zhong (Journal of Wuhan Conservatory of Music), 2006 (S1): 188-190.)
- [3] 陈宏伟. 外骨骼式手部康复机器人控制系统与策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. (Chen H W. Control system and strategy research of exoskeleton hand rehabilitation robot[D]. Harbin: Harbin

- Institute of Technology, 2013.)
- [4] Refour E M, Sebastian B, Chauhan R J, et al. A general purpose robotic hand exoskeleton with series elastic actuation[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2019, 11(6): 1-25.
- [5] Sale P, Stellin G, Masiero S, et al. FEX a fingers extending exoskeleton for rehabilitation and regaining Mobility[C]. *International Conference on Robotics in Alpe-adria Danube Region*. Turin, 2018: 813-824.
- [6] Yap H K, Lim J H, Nasrallah F, et al. A soft exoskeleton for hand assistive and rehabilitation application using pneumatic actuators with variable stiffness[C]. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Seattle, 2015: 119-129.
- [7] Rose C G, O'Malley M K. Hybrid rigid-soft hand exoskeleton to assist functional dexterity[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(1): 73-80.
- [8] 刘博, 张玉茹, 任大伟, 等. 人手食指运动学建模[J]. *机器人*, 2007, 29(3): 214-218.
(Liu B, Zhang Y R, Ren D W, et al. Kinematic modeling of human index finger[J]. *Robot*, 2007, 29(3): 214-218.)
- [9] Wilmes E, Ruiters C J D, Bastiaansen B J C, et al. Inertial sensor-based motion tracking in football with movement intensity quantification[J]. *Sensors*, 2020, 20(9): 2527.
- [10] Hazman M A W, Aimi I N, Noh F H M, et al. IMU sensor-based data glove for finger joint measurement[J]. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2020, 20(1): 82-88.
- [11] 陈楠. 穿戴式康复机械手的设计与研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
(Chen N. Design and research of wearable rehabilitation manipulator[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.)
- [12] Filatov Y V, Nikolaev M S, Pavlov P A, et al. Noncontact measurement of angular position and angular movement by means of laser goniometer[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(5): 054103.
- [13] Conn M A, Sharma S. Immersive telerobotics using the oculus rift and the 5DT ultra data glove[C]. *International Conference on Collaboration Technologies & Systems*. Orlando, 2016: 387-391.
- [14] Marin G, Dominio F, Zanuttigh P. Hand gesture recognition with Leap motion and kinect devices[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*. Paris, 2014: 1565-1569.
- [15] Marin G, Dominio F, Zanuttigh P. Hand gesture recognition with jointly calibrated Leap motion and depth sensor[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, 75(22): 1-25.
- [16] Chai T, Draxler R R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)[J]. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2014, 7(3): 1247-1250.
- [17] Devi M A, Udupa G, Sreedharan P. A novel underactuated multi-fingered soft robotic hand for prosthetic application[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 100: 267-277.
- [18] 罗高生, 陈家旺, 顾临怡. 基于双螺旋副传动的七功能液压机械手肘关节[J]. *机器人*, 2014(1): 36-42.
(Luo G S, Chen J W, Gu L Y. Hydraulic mechanical elbow joint with seven functions based on double screw transmission [J]. *Robot*, 2014 (1): 36-42.)
- [19] Chiri A, Vitiello N, Giovacchini F, et al. Mechatronic design and characterization of the index finger module of a hand exoskeleton for post-stroke rehabilitation[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(5): 884-894.
- [20] Wang Q, Quan Q, Deng Z, et al. An underactuated robotic arm based on differential gears for capturing moving targets: Analysis and design[J]. *Journal of Mechanisms & Robotics Transactions of the Asme*, 2016, 8(4): 1942-4310.
- [21] Chiri A, Giovacchini F, Vitiello N, et al. HANDEXOS: Towards an exoskeleton device for the rehabilitation of the hand[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. St. Louis, 2009: 1106-1111.
- [22] 史小华, 王洪波, 孙利, 等. 外骨骼型下肢康复机器人结构设计与动力学分析[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(3): 41-48.
(Shi X H, Wang H B, Sun L, et al. Structural design and dynamic analysis of exoskeleton type lower limb rehabilitation robot[J]. *Chinese Journal of mechanical Engineering*, 2014, 50(3): 41-48.)
- [23] Kamper D G, Rymer W Z. Quantitative features of the stretch response of extrinsic finger muscles in hemiparetic stroke[J]. *Muscle & Nerve*, 2000, 23(6): 954-961.
- [24] Kleiner, Rozin A F, Pacifici, et al. Slip avoidance strategies in children with bilateral spastic cerebral palsy and crouch gait[J]. *Clinical Biomechanics*, 2018, 55: 36-39.

作者简介

蔡蓉杰 (1995—), 男, 硕士生, 从事钢琴教学机械手结构设计理论与方法的研究, E-mail: RJcai@tju.edu.cn;

丁伯慧 (1976—), 女, 副教授, 博士, 从事教育机器人理论方法等研究, E-mail: dingbaihui@tju.edu.cn;

李泽 (1994—), 男, 硕士生, 从事基于钢琴教学运动学习与控制理论与方法的研究, E-mail: Lizeworld@sina.com;

丁晨阳 (1997—), 男, 硕士生, 从事钢琴教学机械手控制系统设计的研究, E-mail: 576560315@qq.com.

(责任编辑: 孙艺红)