

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902510

基于 Leap motion 的钢琴弹奏手指运动曲线的测量与分析*

李 泽 丁伯慧 何改云 蔡蓉杰

(天津大学 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:针对建立手指触键运动自适应曲线的完整描述,提出了一种基于 Leap motion 空间 3D 体感传感器的新型测量方法。首先引入手指运动偏角的概念,建立手指触键运动模型并分布对齐坐标系;然后,根据新型测量方法,进行手指触键动作捕捉与运动特征点选取;最后运用不同的拟合模式在置信区间为 95% 的条件下处理手指触键动作数据,建立手指触键运动特征描述自适应函数。该函数针对不同长度的人手可为其提供准确的钢琴弹奏触键运动曲线。该研究为钢琴弹奏教育服务型机器人教学平台中的手指触键运动曲线自适应判别系统的建立提供理论支持。

关键词: Leap motion 传感器;手指触键动作;手指偏角;曲线拟合

中图分类号: TN 98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Measurement and analysis of finger motion curves of piano playing based on Leap motion

Li Ze Ding Bohui He Gaiyun Cai Rongjie

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

Abstract: Aiming at the establishment of a complete description of the adaptive motion curve of finger touching keys, a measurement method based on a Leap motion 3D sensor is proposed. According to capturing characteristics of the measurement method, firstly finger touch kinematics model is established before coordinate system is aligned step by step. Then the motion capture and the selection of motion feature points are carried out. The deviation angle is first introduced to transform the finger motion model from two-dimensional space to three-dimensional space. Finally, different fitting models are used to process the motion data of piano finger with 95% confidence bounds, and an adaptive function is established to describe the motion characteristics of finger playing. The adaptive function proves that the calibration of human hand fitting with different lengths can provide correct initial posture for the robot, which provides theoretical support for the adaptive identification system of finger touch motion curve in the teaching platform of piano playing education service robot.

Keywords: Leap motion sensor; finger key-touching motion; finger deviation angle; curve fitting

0 引言

学习钢琴弹奏一直是在音乐教学方面的热门,而且弹奏钢琴需要一定的专业手部技能,如手指的姿态摆放,灵活程度均有严格的规范^[1]。钢琴弹奏的初期指法练习是形成规范动作的关键时期,初学者不仅需要正确的手指触键动作,还需要大量的重复性练习形成肌肉记忆。

目前教师一对一式的辅助教学存在教师工作量大,重复性工作多,学生练习枯燥乏味等问题^[2],并且钢琴弹奏技巧训练方法都是根据传统教学由老师总结经验然后传承下去,缺乏一定的科学性依据性。因此,把钢琴弹奏手指运动曲线的特性描述,运动学习和控制理论,机械手结构设计与控制,钢琴教学的过程设计和学习效果量化评价相结合起来,建立一个初期钢琴弹奏的教育服务机器人教学平台。一方面,教学平台外骨骼的结构设计要基于

手指触键特征曲线,教学平台的控制特性与控制模式也受手指触键特征曲线的指导,所以手指触键运动特征的描述是钢琴弹奏教育服务机器人教学平台建立的基础。另一方面,钢琴弹奏的教学不仅针对于弹奏初学者,还针对于具有手部运动功能恢复要求的手部运动障碍者。研究表明经过一段时间的钢琴弹奏的训练可以提高由脑损伤导致的手运动功能障碍者的手部灵活性和躯体感觉,其在康复方面也具有一定研究价值^[3-4]。

手部运动参数测量方法大致分为两种。第1种是穿戴检测手套,通过传感器获取手指弯曲和伸展时的运动数据^[5-6]。其穿戴式测量对手指的自然弯曲和伸展有一定的阻碍作用,测得的姿态数据相比不带手套的姿态会有一定的误差,并且在穿戴和更换测量设备时会因为穿戴的角度不同也造成一定误差。第2种是在手指关节特征处固定识别贴片,然后通过红外线检测仪或慢动作相机来对特征点进行识别和采集^[7-8]。该测量方法对手指的自然弯曲和伸展的阻碍作用较小,但是当被测手指所在平面和检测红外线不垂直时,测得的数据会是与红外线测量仪器平面所平行平面的投影数据,距离真实值偏差较大。两种测量方法仅适合单一平面内手指运动数据的测量,皆无法考虑到手指左右偏角的摆动,所以其手指运动模型的建立和手指运动特征参数的拟合都会不完善,故在后续结构设计和控制方面也忽略了手指摆动这一重要特征信息,导致整个项目的不完整。其次,之前对手指运动曲线的测量研究皆是把所有实验者的手部位置姿态共同拟合,不仅没有考虑上述手指的偏角,也没有考虑到不同手指长度对运动曲线的影响,拟合过于笼统。

针对以上存在的测量问题,本文采用3D体感传感器设备,其无穿戴的测量方式能够获得更加真实自然的手指触键运动曲线,且三维测量可以考虑到新引入的手指偏角,满足测量需求。市面上普遍应用的3D体感传感器设备有 Kinect、RealSense 和 Leap motion。其中 Kinect 侧重于捕捉全身的位姿,精度不高^[9]。刘策等^[10]利用 RealSense 建立人机交互系统多应用于手势识别。Leap motion 则是 2013 年推出的新型体感传感器设备,侧重于跟踪手部的位姿,且识别率高,其测量精度为 0.01 mm,更加符合本课题的测量需求^[11]。Leap motion 的工作原理是通过 2 个摄像头和 3 个红外 LED 灯作为深度传感器,依据立体视觉原理进行捕捉识别,其工作范围为 61 cm²^[12]。当前对于 Leap motion 的开发大多应用于手部姿态识别,通过不同关键点的提取和不同手势的分类方法,获取手部数据并进行处理,最后输出到实体执行器或虚拟应用软件^[13]。Chuan 等^[14]利用 Leap motion 3D 传感器对美国手语进行识别;Danied 等^[15]提出了利用 Leap motion 协助用户选择任务的新型操作模式,并对比鼠标操作证明其可整体提升工作效率。根据本项目需求和

Leap motion 的应用情况,采用 Leap motion 并结合对其的二次开发对钢琴弹奏手指触键动作进行捕捉。因此,围绕如何描述钢琴弹奏手指触键运动特征,展开了研究。

1 手指(非拇指)触键运动模型

本文首先建立手指触键运动模型,并根据模型指导接下来的 Leap motion 捕捉的特征点和运动曲线要拟合的特征信息。钢琴弹奏是十分精细的手指运动,所以该手指触键模型不仅包括常规的手指转角,还包括新引入的手指偏角,这使得运动模型的表达更加精准完善。

根据人体解剖学,单只人手具有 27 块骨头,其中食指、中指、无名指、小指的骨骼结构相似,拇指的结构更加复杂^[16]。手指关节的灵活度受骨骼,韧带提供的静态张力和肌腱提供的动态张力等原因所限制。本文对手部的一些特征进行假设与简化:1)手腕固定不动;2)远端指间关节(DIP)和近端指间关节(PIP)只能做屈伸运动,故简化为各具有一个自由度的转动副;3)掌指关节(MCP)不仅可以做屈伸运动,还可以做左右的摆动,故简化为具有两个自由度的转动副。根据以上假设和简化,建立单指(非拇指)触键运动模型(图1)。其中, $P_i(i=0,1,2,3)$ 分别表示掌指关节 MCP、近端指间关节 PIP、远端指间关节 DIP 和指尖点 TIP 的中心点。 $\overrightarrow{P_0P_1}$ 、 $\overrightarrow{P_1P_2}$ 、 $\overrightarrow{P_2P_3}$ 分别为近节指骨、中节指骨、远节指骨,长度分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 。以掌指关节 MCP 的中心点 P_0 为坐标原点,建立基础坐标系 $X_0Y_0Z_0$, Z_0 轴正方向垂直向内。图1中,用双点划线绘制的平面为手指所在的平面,该平面通过 Y_0 轴垂直于 $X_0P_0Z_0$ 平面,与 Z_0 轴的夹角为 β ,该夹角称为手指的偏角。在此平面内,近节指骨 $\overrightarrow{P_0P_1}$ 与 Y_0P_0 的夹角 θ_1 表示 MCP 的旋转角度,近节指骨 $\overrightarrow{P_0P_1}$ 与中节指骨 $\overrightarrow{P_1P_2}$ 的夹角 θ_2 表示 PIP 的旋转角度,中节指骨 $\overrightarrow{P_1P_2}$ 与远节指骨 $\overrightarrow{P_2P_3}$ 的夹角 θ_3 表示 DIP 的旋转角度,则根据 DH 参数法可建立单指(非拇指)触键运动学模型,如式(1)~(4)。在 DH 参数法中,关节1(Joint1)为摆动,Joint2、Joint3、Joint4 为转动,DH 参数如表1所示。

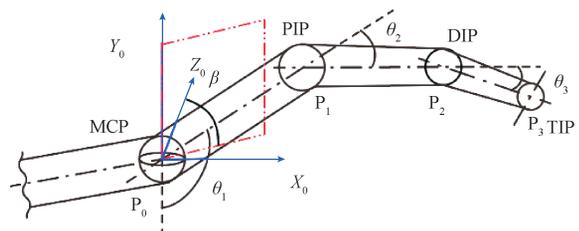


图1 手指(非拇指)触键运动模型

Fig.1 Finger (non-thumb) key-touch motion model

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} C\beta & 0 & S\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\beta & 0 & C\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} C\alpha_1 & -S\alpha_1 & 0 & 0 \\ S\alpha_1 & C\alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_0^4 = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4$$

$$T_0^4 = \begin{bmatrix} C\beta C(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) & -C\beta S(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) & S\beta & d_2 C(\alpha_1 + \alpha_2) C\beta + d_1 C\alpha_1 C\beta \\ S(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) & C(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) & 0 & d_2 S(\alpha_1 + \alpha_2) + d_1 S\alpha_1 \\ -C\beta C(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) & S\beta S(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) & C\beta & -d_2 C(\alpha_1 + \alpha_2) S\beta - d_1 C\alpha_1 S\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

T_j^i 表示从坐标系 i 到坐标系 j 的变换矩阵。最后手指指尖中心点 P_3 的位置 0t 为:

$${}^0t =$$

$$\begin{bmatrix} d_3 C\beta C(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + d_2 C(\alpha_1 + \alpha_2) C\beta + d_1 C\alpha_1 C\beta \\ d_3 S(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + d_2 S(\alpha_1 + \alpha_2) + d_1 S\alpha_1 \\ -d_3 C\beta C(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) - d_2 C(\alpha_1 + \alpha_2) S\beta - d_1 C\alpha_1 S\beta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

DH 参数如表 1 所示, DH 参数法中每一个 Joint i 都会有一个坐标系 $X_i Y_i Z_i, Z_{i-1}$ 的确定为旋转轴线方向或移动副的移动方向, X_{i-1} 的确定为 $X_{i-1} = Z_{i-1} \times Z_i, Y_{i-1}$ 根据右手定则确定, α_i 表示绕 X_i 方向从 Z_{i-1} 到 Z_i 的旋转角度, a_i 表示沿 X_i 方向从 Z_{i-1} 到 Z_i 的位移, j_i 表示沿 Z_{i-1} 方向 X_{i-1} 到 X_i 的位移, θ_i 表示绕 Z_{i-1} 方向从 X_{i-1} 到 X_i 的旋转角度。

表 1 DH 参数表

Table 1 DH parameter table

Joint i	α_i	a_i	j_i	θ_i
2	0	0	0	α_1
3	0	d_1	0	α_2
4	0	d_2	0	α_3

2 实验台建立与二次开发

本文需要把建立好的运动模型植入到 Leap motion 中,并且根据模型指导 Leap motion 捕捉特征点,获取需要拟合的特征信息。所以首先需要搭建实验平台,再对 Leap motion 进行开发,植入模型,坐标系对齐,捕捉特征点。

2.1 测量平台搭建

首先搭建测量平台,该平台长 300 mm,宽 200 mm,

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} C\alpha_2 & -S\alpha_2 & 0 & d_1 \\ S\alpha_2 & C\alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^4 = \begin{bmatrix} C\alpha_3 & -S\alpha_3 & 0 & d_2 \\ S\alpha_3 & C\alpha_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2)

高 130 mm(图 2)。测量平台整体采用双层玻璃平台设计,上层平台放置手掌,下层平台放置 Leap motion 3D 体感传感器。两层平台的高度位于 Leap motion 3D 体感控制器的最佳工作区间。考虑到玻璃对 Leap motion 发射的红外线会产生反射和折射,影响测量精度,故测量平台的上层玻璃宽度尺寸为 2 mm,用于支撑手掌;5 个手指则位于 Leap motion 控制器上方,中间没有玻璃隔开。测量时,将手掌根部放置在上层玻璃平台上,此时腕部固定不动。平台的搭建是为了固定手腕,使手部有着力点,这可以简化掉由手掌旋动带来的旋角变量,且每次放置在相同工作区间的最佳位置,可减少误差。

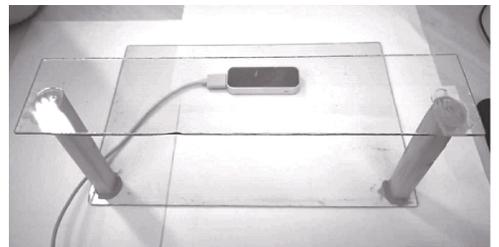


图 2 实验平台

Fig.2 Experiment platform

2.2 Leap motion 的二次开发

Leap motion 商业化的使用功能并不能满足以上对于测量的需求,所以本文根据 Leap motion 官方提供的 Leap motion 开源 SDK,使用 processing 软件对 Leap motion 进行二次开发,目的是把建立的手指运动模型和坐标系分布对齐的概念植入到 Leap motion 中。

模型的植入,是为了指导命令 Leap motion 根据模型进行捕捉特征点。坐标系的对齐是把 Leap motion 的初始坐标系与手指触键运动模型坐标系进行对齐,可以更好表达手指在运动时的姿态并避免出现引言提到的测量值为投影值的问题,提高测量精度。在坐标系对齐部分,

首先进行坐标系的旋转,使 Leap motion 坐标系初始的 XY 平面旋转至食指在准备阶段的所在平面(图 1 双点划线区域),然后坐标系方向作为标定固定不动。其次为了避免 MCP 微小的颤动,把 Leap motion 坐标系原点始终移动到 MCP 的位置且实验全程与 MCP 重合。手指模型坐标原点 O_0 为图 1MCP 中心 P_0 的位置,Leap motion 的坐标原点为图 3 所示原点处。

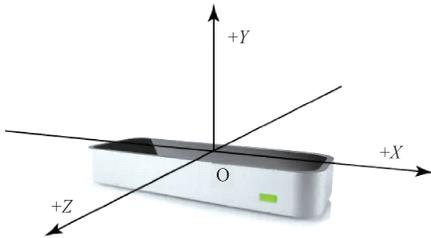


图 3 Leap motion 坐标原点
Fig.3 Leap motion coordinate origin

手部在 Leap motion 测量中的显示模型如图 4 所示。本文的程序可以在 processing 中对手部模型进行简化并显示手部的特征描述,图 5 所示为手部不同姿态时的实时动态显示。processing 程序结构框架如图 6。当手部进入工作区时,在 processing 下运行的 Leap motion 捕捉到

人手并显示模型,在 5 根手指中捕捉到食指,然后根据需求捕捉特征点并输出数据信息。接下来是坐标系对齐的程序说明,其中当程序运行按 up 键时,坐标原点位置一直跟随食指 MCP 的位置。坐标的偏转为食指所在垂直平面与 Leap motion 初始 YZ 平面的偏转 β 。手部在工作区域准备好时,程序按 down 键,坐标系的方向偏角不变,原点仍随 MCP 移动,开始进行数据的采集。最后按下 enter 键,关闭并输出数据。

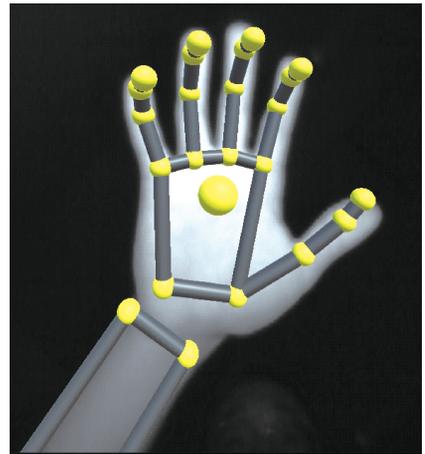


图 4 Leap motion 手部模型
Fig.4 Leap motion hand model

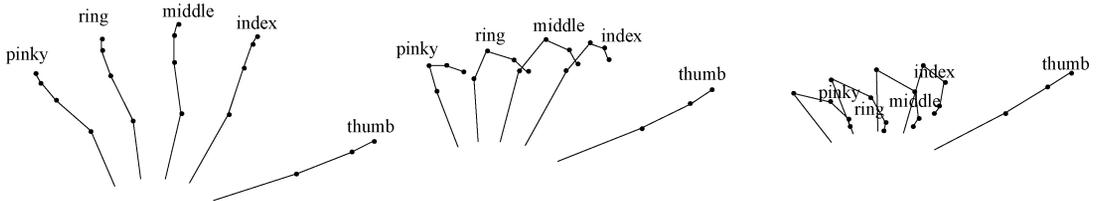


图 5 手部姿态动态显示
Fig.5 Dynamic display of hand posture

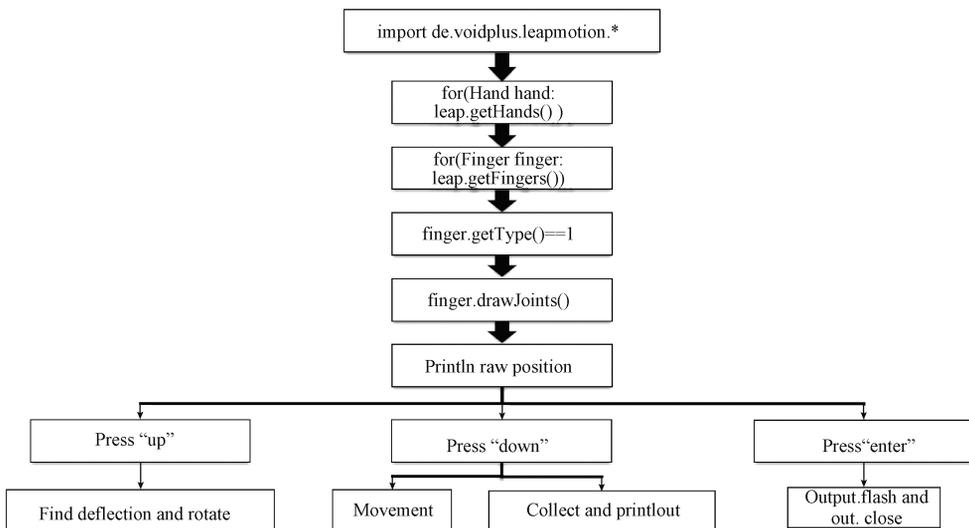


图 6 程序结构框架
Fig.6 Program structure framework

式(5)、(6)为旋转和平移的坐标系转换,其中 XYZ 为 Leap motion 的坐标系,UVW 为转换后手指触键运动模型的坐标系, β_0 为坐标系最后固定的方向偏角, (x_0, y_0, z_0) 是 MCP 的初始位置, **Rot** 为旋转矩阵。

$$\text{Rot}(y, \beta_0) = \begin{bmatrix} C\beta_0 & 0 & S\beta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ S\beta_0 & 0 & C\beta_0 \end{bmatrix}, \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (5)$$

所以,有:

$$\begin{cases} u = C\beta_0(x - x_0) - S\beta_0(z - z_0) \\ v = y - y_0 \\ w = S\beta_0(x - x_0) + C\beta_0(z - z_0) \end{cases} \quad (6)$$

3 手指运动采集与特征分析

3.1 采集特征点

首先使钢琴弹奏专业人士和非专业人士模拟弹钢琴手指触键运动,每人收集 30~50 次手指触键往复运动。测量结果显示,钢琴弹奏专业人士的手指触键动作具有一定规律性,多次弹琴触键动作的稳定性更好,如图 7 所示。相比较而言,钢琴弹奏非专业人士的手指触键动作杂乱无章,无明显规律,且多次弹琴触键动作的稳定性差,如图 8 所示。可见专业的钢琴弹奏动作训练能够明显地提高触键动作的稳定性。

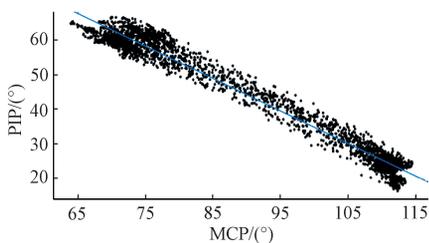


图 7 专业人士手指触键运动时 θ_1 与 θ_2 的关系

Fig.7 The relationship between θ_1 and θ_2 in the finger-touch motion of professionals

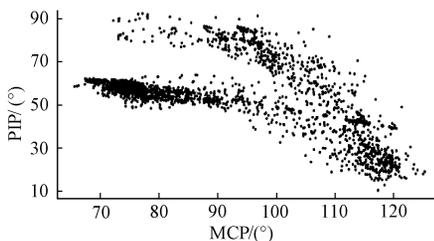


图 8 非专业人士手指触键运动时 θ_1 与 θ_2 的关系

Fig.8 The relationship between θ_1 and θ_2 in the finger-touch motion of non-professionals

本文挑选并采集了 8 位具有不同手指长度 (64~82 mm) 的钢琴弹奏专业人士的手指触键动作。通过采集到的信息,分析 MCP 的旋转角度 θ_1 与 PIP 的旋转角度 θ_2 、DIP 的旋转角度 θ_3 和手指偏角 β 之间的关系。

3.2 MCP 与 PIP, 偏角和 DIP 的变化关系

测量长度为 68 mm 的食指,其 MCP 的旋转角度 θ_1 与 DIP 的旋转角度 θ_2 变化关系如图 7 所示。当置信区间为 95% 时,遵循拟合完全且拟合最简原则,我们选择一维多项式函数,对数据进行拟合,拟合结果如式(7)。

$$\begin{aligned} f(x) &= p1 \cdot x + p2 \\ \begin{cases} p1 = -0.93 \\ p2 = 128.7(123.7 \sim 133.7) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 x 为 MCP 的角度 θ_1 ; $f(x)$ 为 PIP 的角度 θ_2 ; $p1$ 和 $p2$ 为拟合因子。

为了验证手指下落和抬起运动是否存在明显差异,本文分别拟合了手指下落和手指抬起两条运动曲线如图 9 所示,其中叉点和圆点分别为下落和回弹的数据点,虚线和实线分别为下落和回弹的拟合曲线。

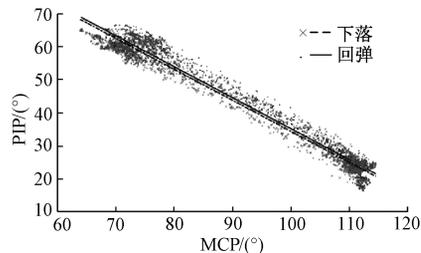


图 9 下落与回弹时 MCP 与 PIP 角度关系

Fig.9 The relationship between MCP and PIP angle when falling and bouncing back

由图 9 可知,两条拟合线的偏移量小于 1° ,说明手指在下落和回弹时的位姿一致。因此,本文在后面的讨论中,将手指下落和抬起的数据进行整体拟合,不做单独分析。

然后测量 8 位钢琴弹奏专业人士的手指长度,并采集每人手指触键反复运动 30~50 次,再分别进行一次函数拟合,最终得到参数 $p1$ 和 $p2$ 的不同取值(表 2)。

进一步分析发现,参数 $p1$ 和 $p2$ 与手指长度 l 存在以下函数关系:

$$\begin{cases} p1 = -0.042l + 1.94 \\ p2 = 3.2l - 96.2(\pm 7) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $p2$ 中的 ± 7 的取值满足 95% 的数据点位于拟合区间内,如图 10 所示。

同样,采集数据并分析 MCP 的旋转角度 θ_1 与手指偏角 β 的关系,如图 11 所示。虽然图里直观感受拟合程度一般,但因为纵坐标量程偏小,且图中偏离程度最大的左侧上端数据和拟合存在的偏差不大于 2° ,所以符合拟合

表 2 不同手指长度拟合参数 $p1$ 和 $p2$
Table 2 Different finger length fitting parameters $p1$ and $p2$

手指长度/mm	64	66.5	68	71.4	75.6	78.4	81.4	82.3
$p1$	-0.75	-0.83	-0.93	-1.1	-1.25	-1.297	-1.453	-1.57
$p2$	114	123	128.7	136.2	149.3	153.4	171.2	180

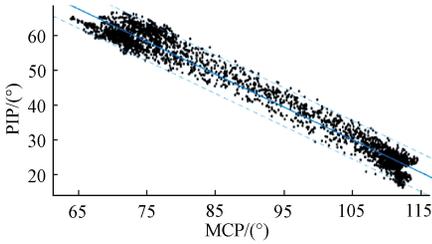


图 10 在 95%置信区间下的拟合区间

Fig.10 Fitting interval at 95% confidence interval

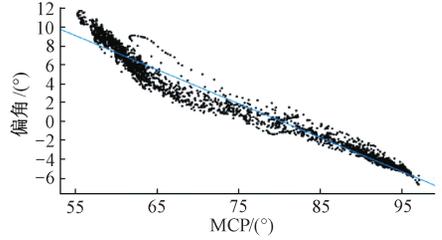


图 11 MCP 的旋转角度 θ_1 与手指偏角 β 的关系

Fig.11 The relationship between MCP rotation angle θ_1 and finger deviation angle β

要求。

一次曲线拟合的拟合函数为 $g(x) = s1 \cdot x + s2$, 手指长度和一次曲线拟合参数 $s1$ 、 $s2$ 的数据如表 3 所示。

表 3 不同手指长度拟合参数 $s1$ 和 $s2$
Table 3 Different finger length fitting parameters $s1$ and $s2$

手指长度/mm	64	66.5	68	71.4	75.6	78.4	81.4	82.3
$s1$	-0.37	-0.32	-0.29	-0.35	-0.36	-0.36	-0.33	-0.32
$s2$	29.3	30.4	31.5	27.5	26.4	28.9	29.5	30.2

由表 3 可以看出,手指 MCP 的旋转角度 θ_1 与手指偏角 β 拟合后的 $s1$ 和 $s2$ 与手指长度关系不大,所以对采集到的所有数据进行全部整体的拟合,在置信区间为 95% 的条件下,可以得到

$$g(x) = s1 \cdot x + s2$$

$$\begin{cases} s1 = -0.335 \\ s2 = 29.2(26 \sim 32.5) \end{cases} \quad (9)$$

最后分析 MCP 的旋转角度 θ_1 和 DIP 的旋转角度 θ_3 的变化关系。由图 12 所示可见,数据点在左右两端分布集中,中间分布散乱。这是因为在弹琴时手指下落和抬起的终点位置相对固定,而在手指下落和抬起的过程中,不同手指的灵活性和动作习惯导致的。因此本文给出较宽的可行性区间。根据数据点的分布,进行曲线拟合,考虑到拟合公式最简和拟合效果,最终选取 3 次多项式拟合,在 95% 的置信区间下曲线拟合公式为式 (10)。

$$h(x) = c1 \cdot x^3 + c2 \cdot x^2 + c3 \cdot x + c4$$

$$\begin{cases} c1 = -0.003262 \\ c2 = 0.8383 \\ c3 = -70.21 \\ c4 = 1967(1959.1 \sim 1974.9) \end{cases} \quad (10)$$

根据不同长度手指, MCP 区间变化的不同,对以上的拟合进行调整,其中 l 为手指长度, $c1$ 、 $c2$ 、 $c3$ 和 $c4$ 为拟合参数。

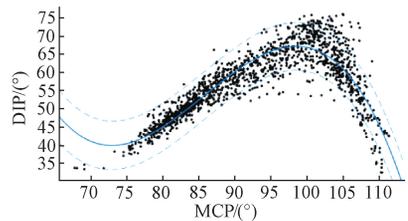


图 12 MCP 的旋转角度 θ_1 和 DIP 的旋转角度 θ_3 关系

Fig.12 The relationship between MCP rotation angle θ_1 and DIP rotation angle θ_3

$$h(x) = c1 \cdot \left(\frac{-0.82l + 162.48}{110}x\right)^3 + c2 \cdot \left(\frac{-0.82l + 162.48}{110}x\right)^2 + c3 \cdot \left(\frac{-0.82l + 162.48}{110}x\right) + c4$$

$$\begin{cases} c1 = -0.003262 \\ c2 = 0.8383 \\ c3 = -70.21 \\ c4 = 1967(1959.1 \sim 1974.9) \end{cases} \quad (11)$$

3.3 手指运动曲线函数

通过以上分析,把特征信息进行整合,得到手指触键运动函数:

$$\begin{cases}
 f(x) = p_1 \cdot x + p_2 \\
 g(x) = s_1 \cdot x + s_2 \\
 h(x) = c_1 \cdot (ax)^3 + c_2 \cdot (ax)^2 + c_3 \cdot (ax) + c_4 \\
 p_1 = -0.042l + 1.94 \\
 p_2 = 3.2l - 96.2 (\pm 7) \\
 s_1 = -0.335 \\
 s_2 = 29.2 (26 \sim 32.5) \\
 a = \frac{-0.82l + 162.48}{110} \\
 c_1 = -0.003262 \\
 c_2 = 0.8383 \\
 c_3 = -70.21 \\
 c_4 = 1967 (1959.1 \sim 1974.9)
 \end{cases} \quad (12)$$

其中 x 为 MCP 的旋转角度 θ_1 , 范围是 $60^\circ \sim 120^\circ$;

$f(x)$ 、 $g(x)$ 、 $h(x)$ 分别为 θ_2 、 β 、 θ_3 ; l 为手指长度; p_1 、 p_2 、 s_1 、 s_2 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 均是拟合参数; a 为调整参数。

最终可以根据手指触键运动函数, 在手指触键全过程中, 适应不同手指长度 l , 获得获得专业人士弹奏时手指各关节的位姿, 也就是手指的位置信息和角度变化的信息。

4 结 论

本文提出的基于 Leap motion 二次开发的型测量方法可以更精确地对人手弹钢琴时单指(非拇指)触键动作进行运动捕捉, 其中的坐标系分步对齐提高了测量精度。且在建立单指(非拇指)触键运动三维模型中首次引入手指偏角的概念使手指模型运动维度由 2D 变为 3D, 最终建立的手指触键运动函数也更加完整。最后, 通过采集 8 位钢琴弹奏专业人士的手指触键动作信息, 证明了钢琴弹奏专业人士比非专业人士在弹奏时手指更加稳定精确, 且手指在弹奏时下落与回弹的姿态一致, 并在置信区间 95% 条件下, 拟合出手指(非拇指)触键运动曲线特征函数。本文的落脚点着重于新型 3D 体感测量方法, 新引入的模型偏角完善模型特征信息和对单指触键动作的标定。完成了钢琴弹奏教育型机器人平台的初步探索, 拓展了新的采集方法和设定了曲线拟合新的标定形式, 为全手指触键运动曲线自适应判别系统得建立的供理论依据与实验参考。并对于日后单指大跨度弹奏, 多手指联合弹奏曲线的采集与拟合, 和弹奏练习时的标定与纠正的研究具有重大意义。

参考文献

- [1] 蔡扬. 钢琴技巧训练中手部的肌能损伤的避免[J]. 黄钟(武汉音乐学院学报), 2013(1):181-186.
CAI Y. How to avoid injury of the hand muscle in piano skill training [J]. Huangzhong (Journal of Wuhan

Conservatory of Music), 2013 (1):181-186.

- [2] BENITTI F B V. Exploring the educational potential of robotics in schools: A systematic review[J]. Computers & Education, 2012, 58(3):0-988.
- [3] LAMPE R, THIENEL A, MITTERNACHT J, et al. Piano training in youths with hand motor impairments after damage to the developing brain [J]. Neuropsychiatric Disease and Treatment, 2015 (11): 1929-1938.
- [4] ALVES-PINTO A, EHRlich S, CHENG G, et al. Effects of short-term piano training on measures of finger tapping, somatosensory perception and motor-related brain activity in patients with cerebral palsy [J]. Neuropsychiatric Disease and Treatment, 2017 (13): 2705-2718.
- [5] 叶素芬, 赖际舟, 吕品, 等. 穿戴式钢琴弹奏手套智能感知与手势识别技术[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5):187-194.
YE S F, LAI J ZH, LV P, et al. An intelligent perception and gesture recognition technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 187-194.
- [6] 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 study of a wearable rehabilitation manipulator [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [7] CONTI R, MELI E, RIDOLFI A. A novel kinematic architecture for portable hand exoskeletons [J]. Mechatronics, 2016(35):192-207.
- [8] 朱圣晨, 李敏, 徐光华, 等. 多段连续结构的外骨骼手指功能康复机器人[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(6): 22-27, 126.
ZHU SH CH, LI M, XU G H, et al. Finger exoskeleton for rehabilitation of finger extension and flexion by multi-segment mechanism [J]. Journal of XI' AN Jiaotong University, 2018, 52(6):22-27, 126.
- [9] LAN Y, LI J, JU Z. Data fusion-based real-time hand gesture recognition with Kinect V2 [C]. International Conference on Human System Interactions, IEEE, 2016.
- [10] 刘策, 刘小峰. 助老服务机器人多模式友好交互系统设计及实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 177-182.
LIU C, LIU X F. Design and implementation of multi-mode friendly interactive system for elderly assistance robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(1):177-182.
- [11] WEICHERT F, BACHMANN D, RUDAK B, et al.

Analysis of the accuracy and robustness of the leap motion controller[J]. *Sensors*, 2013, 13(5):6380-6393.

- [12] GUNA J, JAKUS G, et al. An analysis of the precision and reliability of the leap motion sensor and its suitability for static and dynamic tracking [J]. *Sensors*, 2014, 14(2):3702-3720.
- [13] SMERAGLIUOLO A H, HILL N J, DISLA L, et al. Validation of the leap motion controller using marked motion capture technology[J]. *Journal of Biomechanics*, 2016, 49(9):1742-1750.
- [14] CHUAN C H, REGINA E, GUARDINO C. American sign language recognition using leap motion sensor[C] 13th International Conference on Machine Learning and Applications, IEEE, 2014.
- [15] DANIEL B, FRANK W, GERHARD R. Evaluation of the leap motion controller as a new contact-free pointing device[J]. *Sensors*, 2014, 15(1):214-233.
- [16] 李超, 袁锐波, 丘世因, 等. 外骨骼康复机械手的结构设计及仿真分析[J]. *机械与电子*, 2016(2):16-19.
LI CH, YUAN R B, QIU SH Y, et al. Design and kinematical analysis of exoskeleton rehabilitation robot hand[J]. *Machinery & Electronics*, 2016(2):16-19.

作者简介



李泽, 2016年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为基于运动学习与控制的钢琴教学机械手设计理论与方法。

E-mail: lizeworld@sina.com

Li Ze received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2016. Now he is a M. Sc. candidate at

Tianjin university. His main research interests include design theory and method of robotic hand for piano teaching based on motor learning and control.



丁伯慧(通信作者), 2008年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学副教授, 主要研究方向为教育机器人。

E-mail: dingbaihui@tju.edu.cn

Ding Bohui (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2008. Now she is an associate professor at Tianjin University. Her main research interest includes educational robot.



何改云, 2006年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学教授, 主要研究方向为现代质量控制。

E-mail: hegaiyun@tju.edu.cn

He Gaiyun received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2006. Now she is a professor at Tianjin University. Her main research interest includes modern quality control.



蔡蓉杰, 2018年于西北农林科技大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为钢琴教学机械手结构设计理论与方法。

E-mail: RJCai@tju.edu.cn

Cai Rongjie received his B. Sc. degree from Northwest Agricultural and Forestry University in 2018. Now he is a M.Sc. candidate at Tianjin University. His main research interests include theory and method of structural design of piano teaching manipulator.