

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205359

拇指弹琴触键动作测量与分析*

陈番兴 丁伯慧 李 铮 林家洛

(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: 拇指弹琴触键是一项涉及多因素的复杂空间运动,其量化分析对于钢琴教学的科学指导和教学效果的量化评价至关重要。针对钢琴教学早期阶段拇指高抬指触键动作训练,提出了一种测量与分析方法。首先采用 Leap Motion 传感器搭建测量平台,进行人手弹琴触键动作数据采集。其次建立手部关节坐标系,设定表征拇指弹琴触键运动的角度参数。然后利用最小二乘法获得拇指弹琴触键的运动回归方程。最后依据回归方程预测拇指在弹琴触键过程中各关节角度参数的变化规律。该研究可为不同拇指长度的人提供拇指弹琴触键运动预测曲线,为钢琴弹奏和学习效果评价提供科学指导,并为后续的钢琴教学机械手设计提供理论依据。

关键词: 拇指弹琴触键; Leap Motion; 运动回归方程; 触键动作预测

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Measurement and analysis of thumb key-touching

Chen Panxing Ding Bohui Li Zheng Lin Jialuo

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

Abstract: The thumb key-touching is a complex spatial movement which involves many factors. Its quantitative analysis is very important for the scientific guidance of piano teaching and the quantitative evaluation of teaching effect. This paper puts forward a measurement and analysis method for the training of thumb key-touching in the early stage of piano teaching. Firstly, the Leap Motion is used to build the measurement platform to collect the motion data of key-touching. Secondly, the hand joint coordinate systems are established, and the angle parameters representing the movement of thumb key-touching are set. Then the least square method is used to obtain the motion regression equation of the thumb key-touching. Finally, according to the regression equation, the change law of joints' angle parameters in the process of thumb key-touching is predicted. This study can provide prediction curves of thumb key-touching motion for people with different thumb lengths, provide scientific guidance for piano playing and learning effect evaluation, and provide a theoretical basis for the follow-up design of piano teaching manipulator.

Keywords: thumb key-touching; Leap Motion; motion regression equation; key-touching motion prediction

0 引言

随着社会的进步与发展,越来越多的人选择学习钢琴弹奏,培养自己的兴趣爱好。作为一项专业的手部运动技能^[1],钢琴弹奏对手的姿态、手指触键速度和力度等都有着严格的要求^[2],需要初学者投入大量的时间和精力。目前钢琴教学普遍由教师进行一对一辅导,教学效

果缺乏定量的指导和评价。为了提高钢琴教学的效率和质量,需要对弹琴触键动作进行测量和分析,进而掌握运动学习的规律。目前课题组已完成食指弹琴触键动作的测量和规律分析^[3-4]。然而,在钢琴弹奏过程中,拇指除了要完成弹琴触键动作外,还需要帮助其余四指完成不间断演奏的键盘转移任务,具有不可替代的作用。因此本文针对钢琴训练早期阶段拇指高抬指触键动作进行了测量与分析。

收稿日期: 2022-04-07 Received Date: 2022-04-07

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61877042)资助

目前对人手动作的测量主要可分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量多采用外骨骼或数据手套采集人手关节运动信息^[5-7],测量直接可靠。但该方法需要人手佩戴外部设备,并根据不同人手尺寸进行设备的调整,测量繁琐且会影响正常手部动作,造成测量数据偏离真实动作数据。非接触测量则采用多相机或一些基于视觉的 3D 传感设备(如 Kinect 和 Leap Motion)进行人手动作的识别^[8-10],其不需要人手佩戴外部设备,使动作更加真实自然,但测量过程中会存在遮挡问题,因此需要搭建相应的动作测量平台。相比于多相机和 Kinect, Leap Motion 是专门针对人手动作捕捉所研发的 3D 体感设备,可直接识别人手关节和指尖点的位置信息,且精度可达 0.01 mm,在手势识别等方面得到了普遍的应用^[11-13]。

因此,针对拇指的弹琴触键动作,本文采用 Leap Motion 传感器进行拇指弹琴触键动作测量。通过对运动数据进行回归分析,进而得出表征拇指弹琴触键动作的角度变化曲线与方程,为钢琴教学提供理论指导和评价依据。

1 拇指弹琴触键动作采集

人手生理结构与手指关节自由度如图 1 所示,与其余四指不同,人手拇指由 1 根骨节(掌骨节)、两根指节(近指节、远指节)和 3 个关节(腕掌关节 CMC、掌指关节 MCP、指间关节 IP)组成^[14]。其中 MCP 和 IP 关节可视各有 1 个自由度,实现关节的屈曲/伸展(F/E)运动;CMC 关节有 3 个自由度,实现关节的屈曲/伸展(F/E)、内收/外展(Ad/Ab)及绕掌骨节的旋前/旋后(S/P)运动^[7,15-16]。

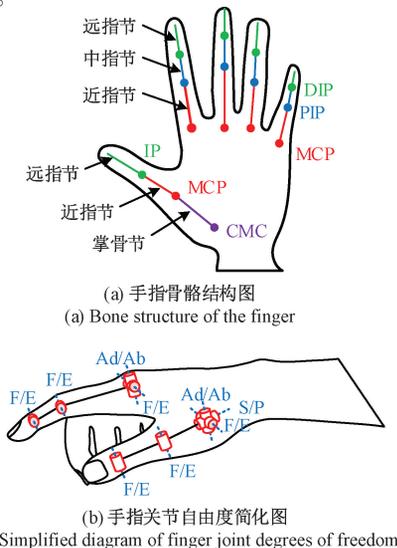


图 1 人手生理结构与关节自由度

Fig. 1 Physiological structure and joint freedom of human hand

拇指弹琴触键动作测量平台包括上平台玻璃面、限位结构和 Leap Motion 传感器等,如图 2 所示。其中,上平台玻璃面与限位结构之间的垂直距离为 9.5 mm,为标准钢琴下键深度。测量时,首先志愿者将拇指放置在限位结构上,其余四指放置在上平台玻璃面对应琴键位置处进行定位。在弹琴触键过程中,志愿者需要保持正确的手型:手心如同空握鸡蛋,四指远指节垂直于琴键。然后,拇指重复多次做高抬指弹琴触键动作。同时 Leap Motion 传感器采集中指特征点(中指 MCP 和 PIP 关节点)及拇指特征点(拇指各关节点和指尖点)的位置信息。

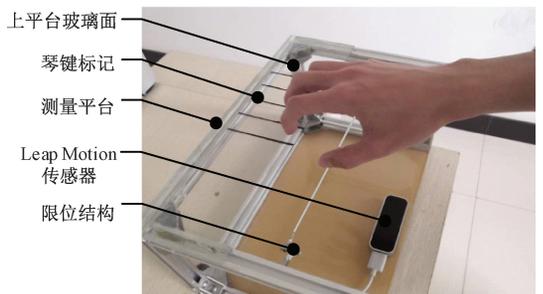


图 2 拇指弹琴触键动作采集实验

Fig. 2 Experiment of thumb key-touching action acquisition

本文对 11 位具有 5 年以上钢琴弹奏经验的志愿者进行了高抬指触键动作的测量,志愿者的拇指长度介于 93.23~98.75 mm 之间。实验一共采集了 48 组数据,每组数据采集志愿者连续 25 次高抬指动作的中指和拇指特征点的位置信息。根据数据分析发现,拇指弹琴触键动作会受到拇指长度以及人手弹琴姿态的影响,从而呈现出特有的运动规律。

2 拇指弹琴触键动作分析

2.1 手部关节坐标系的建立

为了将 Leap Motion 输出坐标系 $\{L\}$ 中的位置数据转化为手部关节运动数据,需要在手部建立两个固定坐标系 $\{M\}$ 和 $\{T\}$,如图 3 所示。

首先,在中指 MCP 关节处建立固定坐标系 $\{M\}$,坐标系原点 O_M 与中指的 MCP 关节点重合。坐标轴 Z_M 竖直向上,坐标轴 Y_M 为中指近指节指向的水平投影,坐标轴 X_M 由右手定则确定。在坐标系 $\{M\}$ 中, θ 为中指近指节与 Y_M 轴的夹角(顺时针为正),用来表示手掌拱起的变化情况。

然后,在拇指 CMC 关节建立固定坐标系 $\{T\}$ 。坐标系原点 O_T 与拇指的 CMC 关节点重合,且各坐标轴方向与坐标系 $\{M\}$ 相同。在坐标系 $\{T\}$ 中, α (逆时针为正)为拇指的掌骨节矢量 G 在平面 $X_T Y_T$ 内的投影与坐标

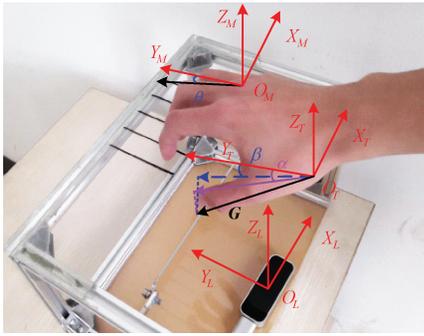


图 3 固定坐标系的建立

Fig. 3 Establishment of the fixed coordinate system

轴 Y_T 的夹角,其反映了拇指 CMC 关节内收/外展 (Ad/Ab) 的运动情况; β 为拇指掌骨节在平面 $Y_T Z_T$ 内的投影与坐标轴 Y_T 的夹角 (顺时针为正),其反映了拇指 CMC 关节屈曲/伸展 (F/E) 的运动情况。

因此, Leap Motion 输出坐标系 $\{L\}$ 的数据在坐标系 $\{T\}$ 中表示为式 (1)。

$${}^T P_i = {}^L R^{-1} \cdot ({}^L P_i - {}^L O_T) \quad (1)$$

式中: ${}^T P_i$ 、 ${}^L P_i$ 分别为拇指特征点 P_i 在坐标系 $\{T\}$ 和坐标系 $\{L\}$ 中的位置矢量; ${}^L O_T$ 为点 O_T 在坐标系 $\{L\}$ 中的位置矢量; ${}^L R^{-1}$ 为坐标系 $\{L\}$ 相对于坐标系 $\{T\}$ 的旋转矩阵。

另外,在拇指 CMC 关节处建立动坐标系 $\{D\}$,坐标系原点 O_D 与 O_T 重合,如图 4 所示,坐标轴 Y_D 与拇指的掌骨节重合且指向拇指 MCP 关节,坐标轴 $X_D = Y_D \times Z_T$,坐标轴 $Z_D = X_D \times Y_D$ 。在坐标系 $\{D\}$ 中, F 为拇指所在平面的法向量,其与坐标轴 Z_D 的夹角 γ (顺时针为正) 表示拇指 CMC 关节旋前/旋后 (S/P) 的运动角度。 σ 和 ϕ 分别表示拇指 MCP 和 IP 关节屈曲/伸展 (F/E) 的运动角度。

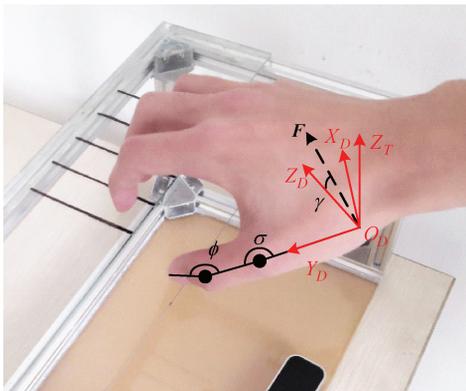


图 4 运动坐标系的建立

Fig. 4 Establishment of motion coordinate system

因此,坐标系 $\{L\}$ 的数据在坐标系 $\{D\}$ 中表示为式

(2)。

$${}^D P_i = {}^L R^{-1} \cdot ({}^L P_i - {}^L O_D) \quad (2)$$

式中: ${}^D P_i$ 、 ${}^L P_i$ 分别为拇指特征点 P_i 在坐标系 $\{D\}$ 和坐标系 $\{L\}$ 中的位置矢量; ${}^L O_D$ 为点 O_D 在坐标系 $\{L\}$ 中的位置矢量; ${}^L R^{-1}$ 为坐标系 $\{L\}$ 相对于坐标系 $\{D\}$ 的旋转矩阵。

从而,通过 θ 、 α 、 β 、 γ 、 σ 及 ϕ 角度参数可以表征拇指弹琴触键的运动特征。

2.2 拇指弹琴触键角度分析

对数据进行滤波处理后,拇指弹琴触键过程中各角度变化情况如图 5 所示。在每个弹琴触键周期中,各夹角在相应的转动范围内呈现规律的周期性变化。在弹琴触键动作采集过程中,志愿者因拇指长度和手掌拱起程度等的不同,各角度变化范围也有所差异,总体上各角度的变化范围如表 1 所示。

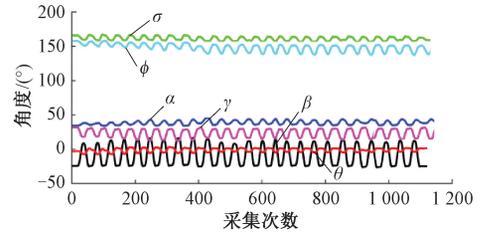


图 5 拇指弹琴触键角度变化曲线

Fig. 5 The curve of angles during thumb key-touching

表 1 拇指弹琴触键各角度变化范围
Table 1 Variation range of each angle of thumb key-touching

角度	转角范围/(°)	角度	转角范围/(°)
θ	-4.2~2.5	α	32.3~45.9
β	-31.2~14.7	γ	13.0~31.7
σ	148.4~165.8	ϕ	131.9~160.3

从表 1 可知,在弹琴触键过程中,拇指竖直倾角 β 的变化范围最大。通过分析各角度参数之间的关系,发现各关节角度参数与 β 之间存在着很深的耦合关系。

根据拇指弹琴触键的动作特点分析,角度参数 θ 与 β 密切相关。当拇指抬指时, θ 值会逐渐变小,手掌拱起程度增大,此时 β 值随之变大,为后期落指提供较大的挥动空间。当拇指落指时, θ 值会逐渐变大,手掌拱起程度减小,此时 β 值随之变小,拇指触键蓄力时间增加,进而触键力可以更好地传递到拇指指侧。

在动作测量过程中,由于志愿者并不能保证每次弹琴触键动作的完全一致性,角度 θ 值的变化范围会有一些的波动,进而会引起其余角度值变化范围的波动。为了解决该问题,需要对每时刻各角度值之间的关系进行分析。以拇指长度为 94.9 mm 人士的一组弹琴数据为

例,其每时刻中指倾角 θ 与拇指竖直倾角 β 的关系曲线如图 6 所示。

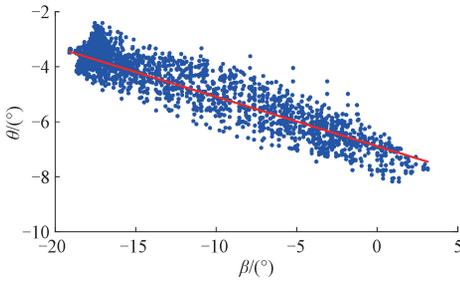


图 6 中指竖直倾角 θ 与拇指竖直倾角 β 关系

Fig. 6 Relationship between middle finger vertical inclination θ and thumb vertical inclination β

针对角度间的线性关系 ($y = ax + b$),采用最小二乘法^[17-18]对拇指的运动进行回归分析,从而得到角度回归方程。回归系数 a 、 b 的求解如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: n 为采集的数据点的数量, x_i 、 y_i 为第 i 点的测量值。

拟合结果的好坏用拟合优度 R^2 来表征,如式(4)所示。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

式中: \hat{y}_i 为第 i 点处的拟合值, \bar{y} 为测量数据的均值。从而由式(4)可看出 $R^2 \in [0, 1]$,且越接近于 1 拟合度越好。

对 θ 和 β 的散点数据进行线性回归分析^[19-21],其角度关系式及拟合优度如式(5)所示。

$$\theta = q_1\beta + q_2 \quad R^2 = 0.860 \quad (5)$$

式中: q_1 、 q_2 为拟合系数。该角度回归方程的拟合优度为 0.860,表明该方程式能够较准确地描述 θ 与 β 之间的关系。

在研究其余角度与角度 β 关系时,考虑到角度 θ 对 β 的影响,因此分别将每时刻的 $\theta \cdot \alpha$ 、 $\theta \cdot \gamma$ 、 $\theta \cdot \sigma$ 与 $\theta \cdot \phi$ 作为整体参数对 β 进行分析拟合,如图 7 所示。角度回归方程及拟合优度值如式(6)所示。

$$\begin{aligned} \theta \cdot \alpha &= s_1\beta + s_2 & R^2 &= 0.865 \\ \theta \cdot \gamma &= n_1\beta + n_2 & R^2 &= 0.831 \\ \theta \cdot \sigma &= p_1\beta + p_2 & R^2 &= 0.837 \\ \theta \cdot \phi &= m_1\beta + m_2 & R^2 &= 0.845 \end{aligned} \quad (6)$$

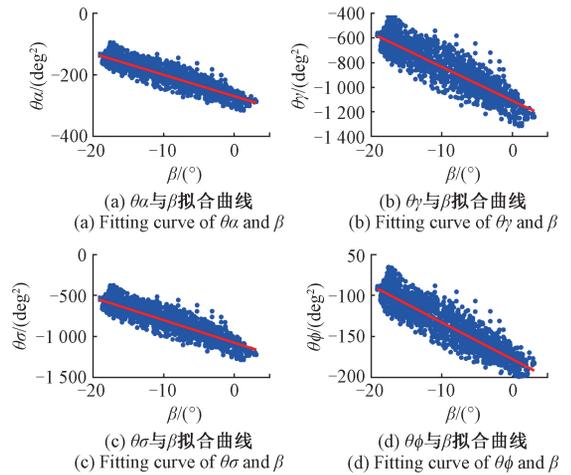


图 7 角度关系的拟合

Fig. 7 Fitting of angular relationship

式中: s_1 、 s_2 、 n_1 、 n_2 、 p_1 、 p_2 及 m_1 、 m_2 均为拟合系数。

2.3 拇指运动拟合系数分析

在对拇指弹琴触键角度关系的量化分析中发现,角度回归方程的系数在各组测量中有所不同。对个体而言,在不同组动作测量中,角度 θ 会有所不同,从而影响角度回归方程的系数。对群体而言,不同弹琴人士拇指长度 H 有所不同,从而会影响角度间耦合运动关系。综合考虑两方面的影响,将人手拇指长度与中指平均倾角的乘积 $H\bar{\theta}$ 作为整体参数,分析其与角度回归方程系数之间的关系。

如图 8 所示为系数 q_2 、 $q_1 - q_2$ 与 $H\bar{\theta}$ 的关系拟合情况。系数回归方程与拟合优度如式(7)所示,其拟合优度均大于 0.9,表明具有较高的拟合精度。

$$\begin{aligned} q_2 &= 0.014H\bar{\theta} - 0.885 & R^2 &= 0.936 \\ q_1 - q_2 &= -0.014H\bar{\theta} + 0.723 & R^2 &= 0.934 \end{aligned} \quad (7)$$

同理,对拇指其余角度回归方程的拟合系数与 $H\bar{\theta}$ 的关系进行拟合,如图 9 所示,系数回归方程及拟合优度如式(8)所示。

$$\begin{aligned} s_2 &= 0.471H\bar{\theta} - 54.631 & R^2 &= 0.884 \\ s_1 - s_2 &= -0.473H\bar{\theta} + 47.969 & R^2 &= 0.883 \\ n_2 &= 0.281H\bar{\theta} - 37.900 & R^2 &= 0.901 \\ n_1 - n_2 &= -0.278H\bar{\theta} + 34.430 & R^2 &= 0.897 \\ p_2 &= 2.128H\bar{\theta} - 118.920 & R^2 &= 0.936 \\ p_1 - p_2 &= -2.128H\bar{\theta} + 94.240 & R^2 &= 0.935 \\ m_2 &= 2.054H\bar{\theta} - 97.145 & R^2 &= 0.939 \\ m_1 - m_2 &= -2.054H\bar{\theta} + 79.931 & R^2 &= 0.938 \end{aligned} \quad (8)$$

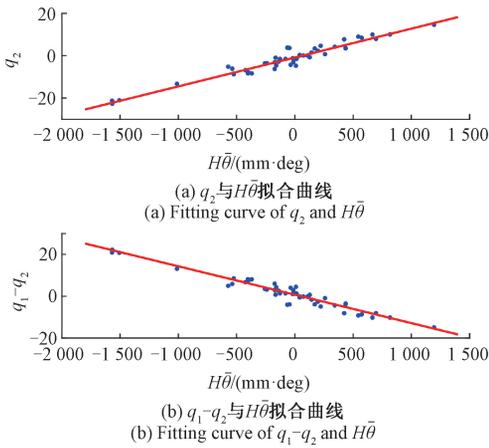


图 8 拟合系数 q_2 及 $q_1 - q_2$ 与参数 $H\bar{\theta}$ 关系
 Fig. 8 Relationship between fitting coefficients $q_2, q_1 - q_2$ and parameter $H\bar{\theta}$

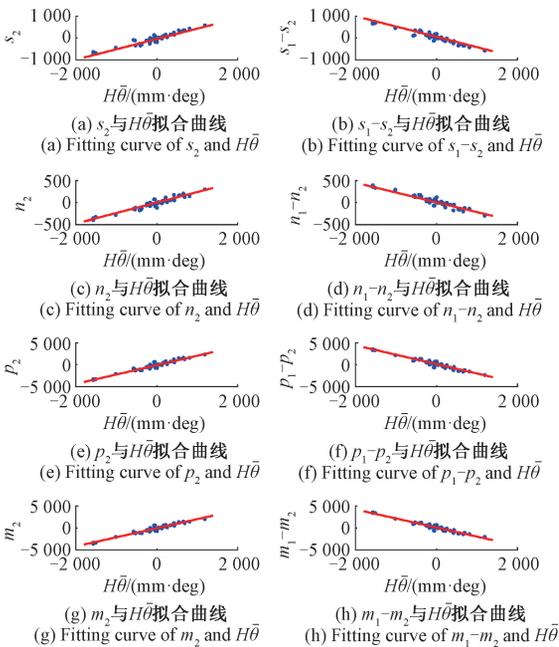


图 9 拟合系数与参数 $H\bar{\theta}$ 关系

Fig. 9 Relationship between fitting coefficients and parameter $H\bar{\theta}$

通过图 6~9 及式 (5)~(8) 可知, 对一个钢琴初学者, 在测得其拇指长度 H 的条件下, 通过测量其中指倾角 θ 的变化情况, 求出中指平均倾角 $\bar{\theta}$, 即可预测出其余角度的变化情况。将各角度的预测曲线与初学者实际角度曲线做比较, 可为初学者拇指弹琴触键动作训练效果提供评价依据, 并为初学者提供直观科学的动作指导与动作纠正。

3 拇指弹琴触键角度变化曲线预测

为了方便后期将拇指弹琴触键动作测量结果与钢琴教学机械手的设计相结合, 利用拇指外骨骼实现拇指弹琴触键动作的教学, 还需制定角度 θ 的标准变化曲线。通过对样本数据的分析发现, 角度 θ 的变化较为灵活, 因此在剔除手部动作变形引起的奇异值后, 将单个周期的拇指弹琴触键动作划分为悬停、落指、触键、抬指 4 个阶段, 并取悬停和触键时刻 θ 的平均值来制定角度 θ 的标准变化曲线, 如图 10 所示。 θ 的表达式如式 (9) 所示。在单个弹琴触键周期中, 中指平均倾角 $\bar{\theta} = -1.31^\circ$ 。

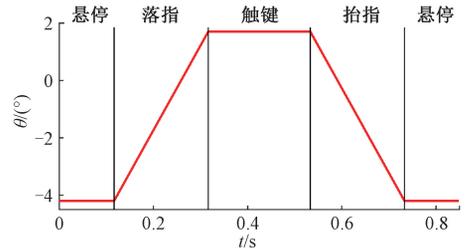


图 10 中指倾角 θ 的标准曲线

Fig. 10 Standard curve of middle finger inclination angle θ

$$\theta = \begin{cases} \theta = -4.2 & 0 \leq t \leq 0.1167 \\ \theta = 29.5t - 7.64 & 0.1167 < t \leq 0.3167 \\ \theta = 1.7 & 0.3167 < t \leq 0.5333 \\ \theta = -29.5t + 17.43 & 0.5333 < t \leq 0.7333 \\ \theta = -4.2 & 0.7333 < t \leq 0.85 \end{cases} \quad (9)$$

由于高抬指在抬落指过程中需要做匀速运动, 因此可通过式 (5)~(8) 预测拇指悬停和触键时刻各角度值, 然后按照匀速运动进行抬落指阶段的运动设定。

针对拇指长度 $H = 93 \sim 100$ mm 的人士, 通过式 (5) 和 (7) 对两种极端拇指长度下悬停和触键时刻 β 角进行预测计算, 结果如表 2 所示。对两个极端拇指长度, 悬停和触键时角度 β 值相差很小, 不超过 0.8° , 从而取其均值作为拇指长度 $H = 93 \sim 100$ mm 人士悬停和触键时刻的标准值, 进而得到拇指倾角 β 的预测曲线, 如图 11 所示。

表 2 悬停和触键阶段角度 β 预测值

Table 2 Predicted value of angle β in hover and touch phases

弹琴阶段	$H = 93$ mm 角度/ $^\circ$	$H = 100$ mm 角度/ $^\circ$	角度均值/ $^\circ$
悬停	10.2	9.4	9.8
触键	-26.1	-26.8	-26.5

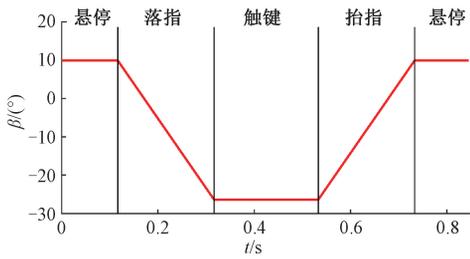


图 11 拇指竖直面内倾斜角 β 的预测

Fig. 11 Forecast of the middle finger tilt angle β

同理,按照式(6)和(8)对两种极端拇指长度下其余转角进行悬停和触键阶段的预测计算,结果如表 3 所示。两种极端拇指长度下各角度偏差均不超过 0.6° ,因此取其均值作为 93~100 mm 长度拇指的弹琴触键预测角度,并绘制角度变化预测曲线,如图 12 所示。

表 3 悬停和触键阶段拇指各角度预测值

Table 3 Predicted values of thumb angles in hover and touch phases

角度	$H=93\text{ mm}$ 角度 (悬停~触键)/ $(^\circ)$	$H=100\text{ mm}$ 角度 (悬停~触键)/ $(^\circ)$	角度均值 (悬停~触键)/ $(^\circ)$
α	42.5~34.0	42.3~34.2	42.4~34.1
γ	26.4~16.0	26.4~16.6	26.4~16.3
σ	149.9~156.1	150.1~155.7	150.1~155.9
ϕ	139.0~151.7	139.3~151.1	139.2~151.4

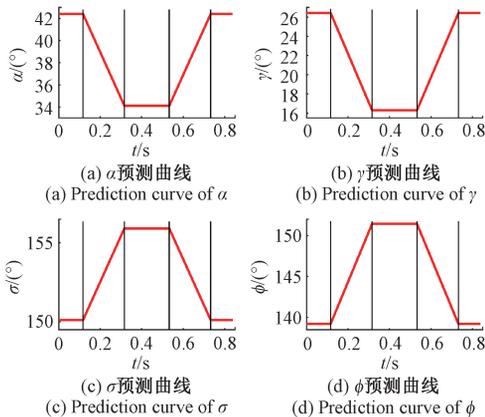


图 12 拇指关节转角预测曲线

Fig. 12 Prediction curves of thumb joint angles

根据图 10~12,在钢琴教学的教学效果评估中,通过测量初学者中指倾斜角 θ 的变化曲线,可以预测出其余角度的变化曲线,将预测曲线与初学者实际角度曲线做对比,可为初学者提供科学直观的动作指导与错误纠正,提高学习效率。而在利用拇指外骨骼进行钢琴

教学中,可根据所制定的 θ 标准运动曲线制定出 93~100 mm 长度拇指其余角度的标准运动曲线,为将来钢琴教学机械手的结构和控制系统设计提供关节运动理想曲线。

4 结 论

本文针对钢琴教学早期阶段的拇指高抬指触键动作提出了测量与分析方法。通过搭建的动作测量平台采集了 11 名具有 5 年以上弹琴经验志愿者的拇指弹琴触键动作信息,在手部关节坐标系下设定 $\theta, \alpha, \beta, \gamma, \sigma$ 及 ϕ 角度参数表征拇指复杂的三维弹琴触键运动,根据弹琴触键动作特点分析各角度之间的耦合关系,并建立了角度之间的线性回归方程。该方程包含了不同人手长度、不同手掌拱起度、不同角度转动范围等信息,具有广泛的适用性。另外,针对拇指长度为 93~100 mm 的人群设定了标准的 θ 角变化曲线,结合该曲线可进一步制定其余角度的标准变化曲线,为后续钢琴教学机械手的设计提供设计依据。

综上所述,本文所提出的拇指弹琴触键动作测量和分析方法可以对拇指复杂的三维空间运动进行量化分析,为后期多指协同弹琴触键动作的测量分析提供很好的借鉴。同时本文所建立各角度之间的线性回归方程可以为拇指弹琴触键动作训练提供评估依据和错误纠正,提高钢琴学习效率,并为接下来钢琴教学机械手的设计提供理想运动曲线,为钢琴教学机械手的发展提供理论基础。

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(中国. 武汉音乐学院学报), 2013(1): 181-186. CAI Y. Avoidance of hand muscle energy injury in piano skill training [J]. Huangzhong (China. Journal of Wuhan Conservatory of Music), 2013 (1): 181-186.

[2] FURUYA S, FLANDERS M, SOECHTING J F. Hand kinematics of piano playing [J]. Journal of Neurophysiology, 2011, 106(6): 2849-2864.

[3] 李泽, 丁伯慧, 何改云, 等. 基于 Leap motion 的钢琴弹奏手指运动曲线的测量与分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 58-65. LI Z, DING B H, HE G Y, et al. Measurement and analysis of finger motion curves of piano playing based on Leap motion [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 58-65.

[4] 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.
- CAI R J, DING B H, LI Z, et al. Design of education assisted hand exoskeleton based on piano touching action[J]. Control and Decision, 2022, 37(2): 314-322.
- [5] CONNOLLY J, CONDELL J, CURRAN K, et al. Improving data glove accuracy and usability using a neural network when measuring finger joint range of motion[J]. Sensors, 2022, 22(6): 2228.
- [6] LI Y, DI H, XIN Y, et al. Optical fiber data glove for hand posture capture[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2021, 233: 166603.
- [7] PARK Y, BAE J. A three-dimensional finger motion measurement system of a thumb and an index finger without a calibration process [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(3): 1-16.
- [8] HAN S C, LIU B B, WANG R, et al. Online optical marker-based hand tracking with deep labels[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(4): 1-10.
- [9] HUANG Y, YANG J Y. A multi-scale descriptor for real time RGB-D hand gesture recognition [J]. Pattern Recognition Letters, 2020, 144(10): 97-104.
- [10] TRAN D S, HO N H, YANG H J, et al. Real-time virtual mouse system using RGB-D images and fingertip detection[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 80: 10473-10490.
- [11] 程淑红, 程彦龙, 杨镇豪. 基于手势多特征融合及优化 Multiclass-SVC 的手势识别[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 225-232.
- CHENG SH H, CHENG Y L, YANG ZH H. Hand gesture recognition based on multi-feature fusion and improved multiclass-SVC [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 225-232.
- [12] CHEN C, CHEN L, ZHOU X F, et al. Controlling a robot using leap motion [C]. 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). Shanghai: IEEE, 2017: 48-51.
- [13] AURELIJUS V, MANTAS T, TOMAS B, et al. Recognition of American sign language gestures in a virtual reality using leap motion[J]. Applied Sciences, 2019, 9(3): 445.
- [14] DU PLESSIS T, DJOUANI K, OOSTHUIZEN C. A review of active hand exoskeletons for rehabilitation and assistance[J]. Robotics, 2021, 10(1): 1-42.
- [15] CERVERI P, MOMI E. D, MARCHENTE M, et al. In vivo validation of a realistic kinematic model for the trapezio-metacarpal joint using an optoelectronic system[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2008, 36 (7): 1268-1280.
- [16] DIPIETRO L, SABATINI A M, DARIO P. A survey of glove-based systems and their applications [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C, 2008, 38(4): 461-482.
- [17] 姜鑫, 陈武雄, 朱明, 等. 基于实时递推最小二乘的多目标编批研究 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(2): 59-64.
- JIANG X, CHEN W X, ZHU M, et al. Research on multi-target serial-number based on least square principle in real-time recursively [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(2): 59-64.
- [18] 刘卫玲, 刘畅, 张耀尹, 等. LabVIEW 环境下基于 Kinect 的人体姿态识别中手臂动作辨识的探究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(23): 153-157.
- LIU W L, LIU CH, ZHANG Y Y, et al. Research on arm motion recognition in human gesture recognition based on kinect in labview environment[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(23): 153-157.
- [19] XIAO J C, LIN F, LI Y, et al. On the kinematics of forelimb landing of frog *Rana rugulosa* [J]. Journal of Biomechanics, 2021, 121: 110417.
- [20] COLLINGS A J, PORRO L B, HILL C, et al. The impact of pelvic lateral rotation on hindlimb kinematics and stride length in the red-legged running frog, *Kassina maculata* [J]. Royal Society Open Science, 2019, 6(5): 190060.
- [21] JANNEKE S M, FREYMILLER G A, CLARK R W, et al. How to stick the landing: Kangaroo rats use their tails to reorient during evasive jumps away from predators[J]. Integrative and Comparative Biology, 2021, 61(2): 442-454.

作者简介



陈番兴, 2020 年于燕山大学获得学士学位, 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拇指钢琴教学机械手设计理论与方法。

E-mail: px_chen7392@163.com

Chen Panxing received his B. Sc. degree from Yanshan University in 2020. Now he is a M. Sc. candidate at Tianjin University. His main research interest includes the design theory and method of thumb piano teaching manipulator 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 the educational robot.



李铮, 2021 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腕部外骨骼设计理论与方法。

E-mail: lzhappy9812@gmail.com

Li Zheng received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2021. Now he is a M. Sc. candidate at Tianjin University. His main research interest includes the design theory and method of wrist exoskeleton in piano teaching based on motor-learning and control.



林家洛, 2021 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为钢琴教学多指协同控制理论与方法。

E-mail: linjialuo@126.com

Lin Jialuo received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2021. Now he is a M. Sc. candidate at Tianjin University. His main research interest includes the theory and method of multi-finger cooperative control in piano teaching.