

基于Kinect的康复训练辅助系统设计

华中师范大学计算机学院 陈炫婷
华中师范大学计算机学院 大数据与智慧学习湖北省重点实验室 彭 熙
华中师范大学计算机学院 杨巧蓉 马秀月 蒋昌跃

针对运动功能障碍患者的康复训练需求,设计一种基于Kinect的康复训练辅助系统。该系统利用Kinect骨骼追踪技术,获取人体骨骼节点坐标,计算骨骼向量,提取动作特征,并结合DTW(Dynamic Time Warping)算法,将患者训练动作与标准动作进行匹配,根据匹配结果对患者动作进行评估和矫正。同时设计基于SSM(Spring、SpringMVC、MyBatis)框架的训练数据管理系统,对患者训练数据进行整理分析,给出可视化展示,便于跟踪患者训练状况,使康复训练更加科学高效。

随着人口老龄化,高血压、脑卒中的患病率日益增长,运动功能障碍的人数逐年上升。医学研究表明,科学的康复训练是治疗的关键环节之一。在医疗康复领域,传统的康复训练需要穿戴复杂的设备,并且专业的康复医师较少,整体康复医疗资源比较缺乏。随着科技的发展,人机交互技术步入人们的视线。作为人机交互领域的研究热点,体感交互技术开发出的康复训练系统所需设备廉价、小型轻便,能实现康复训练的家庭化,有效弥补了传统康复训练方法的缺陷。因此,本文设计一套基于Kinect的康复训练辅助系统,为广大患者在社区和家庭更有效地得到康复治疗提供帮助。

1 系统总体结构设计

系统以Kinect骨骼追踪技术为基础,主要由四个模块组成:标准动作生成模块、患者动作匹配模块、训练评估与矫正模块和训练数据管理模块。图1给出了系统结构设计图。

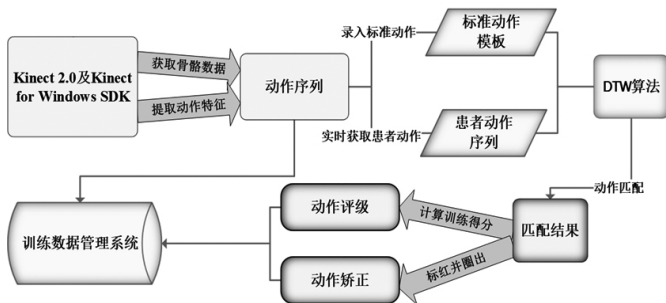


图1 系统结构设计图

(1) 标准动作生成模块。由多人录入康复医师设计的标准训练动作,利用Kinect采集动作的骨骼数据,进行特征提取,将多人的动作特征整合后,得到该标准动作的模板特征并存入数据库。

(2) 患者动作匹配模块。通过读取患者的实时骨骼节点数据,提取动作特征,获得患者训练动作序列,再用DTW算法计算其与标准动作库中样本序列的匹配程度,得到动作匹配结果。

(3) 训练评估与矫正模块。系统根据患者所有动作的匹配结果计算训练得分,给出动作评级;系统会将患者动作不规范的地方标红并圈出,以达到动作矫正的效果。

(4) 训练数据管理模块。该模块用于记录、编辑、查询、统计训练信息,并将患者训练数据进行整理分析,给出表格、统计图等可视化展示,作为确定下一步治疗方案的依据。

2 系统功能实现

2.1 Kinect骨骼追踪及特征提取

(1) Kinect骨骼追踪

Kinect for Windows SDK提供了骨骼跟踪功能,首先对Kinect设备采集的深度图像数据流进行过滤,接着对每一个像素进行概率推测,将它们的特征变量进行分类,匹配出它是人体的哪一部位。根据分类情况在逻辑上相邻的每两个小部分之间生成关节球,将这些虚拟关节球的球心位置作为用户骨骼节点位置,将各个节点的位置信息保存在各自的Position属性中,并以Kinect摄像头为原点,摄像头朝向的方向为Z轴,竖直向上方向为Y轴,垂直于Y轴和Z轴的方向为X轴,输出关节位置。

(2) 特征提取

Kinect骨骼追踪技术可以获取25个人体关节节点的坐标(如图2所示),为了减少计算量,本文对关节节点进行筛选,丢弃对动作描述没有作用以及对特征建立没有贡献的关节数据,比如左右手拇指(Thumb)、左右手指尖(HandTip)、左右手(Hand)以及左右脚(Foot)等8个关节节点的数据,计算特征时只对剩下的17个关节节点数据进行处理即可,大大减少了数据量,方便了计算。

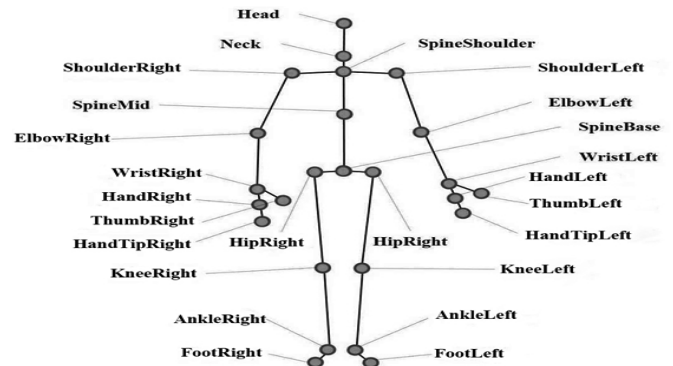


图2 Kinect识别人体关节点结构示意图

由于Kinect实时获取的各关节节点的坐标数据受个体差异影响较大,本文选取关节旋转角度作为动作特征,如肘关节(Elbow)及膝关节(Knee)分别对应一个角度特征,肩关节(Shoulder)及胯关节(Hip)分别对应两个角度特征,即XOY平面上和YOZ平面上的两个角度特征,从筛选后的17个关节节点坐标中获取18个角度特征。

下面以左臂为例,介绍角度特征的计算方法。

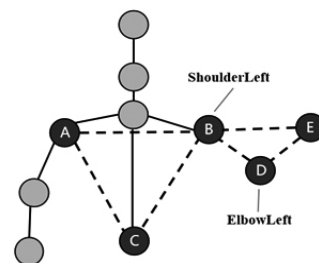


图3 ElbowLeft及ShoudeLeft角度特征示意图

(1) 左臂肘关节(ElbowLeft)的角度特征如图3 $\angle BDE$ 所示。计算该角度特征需构造该夹角两边所在的一组向量, 并根据关节角度计算公式可得:

$$\angle BDE = \arccos \frac{\overrightarrow{DB} \cdot \overrightarrow{DE}}{|\overrightarrow{DB}| |\overrightarrow{DE}|}$$

(2) 左臂肩关节(ShouderLeft)在YOZ平面上的角度特征, 如图3所示, 为平面ABC和平面BDE的夹角, 根据空间平面夹角计算公式可得:

$$\angle S = \arccos \frac{|\overrightarrow{M_1} \cdot \overrightarrow{M_2}|}{|\overrightarrow{M_1}| |\overrightarrow{M_2}|}$$

其中, $\overrightarrow{M_1}, \overrightarrow{M_2}$ 分别为平面ABC、平面BDE的法向量:

$$\overrightarrow{M_1} = \overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC} = \det \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ AB_x & AB_y & AB_z \\ AC_x & AC_y & AC_z \end{bmatrix}, \quad \overrightarrow{M_2} = \overrightarrow{BD} \times \overrightarrow{BE} = \det \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ BD_x & BD_y & BD_z \\ BE_x & BE_y & BE_z \end{bmatrix}$$

最后将所有角度特征放入一个集合D中, 用来确定唯一的动作, $D = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 。

2.2 标准动作录入与动作库的建立

本训练系统支持康复医师根据患者情况设计不同的康复训练动作, 为了使系统录入的模板动作尽可能地标准化, 每套动作采用多人录入, 根据2.1中的方法, 获得多人的动作特征集合, 并做均值处理后, 作为最后该动作的模板特征。

在完成所有动作的采集工作后, 将得到的模板动作特征集合按照动作顺序连接成一个字符串存入数据库。由于每个动作特征集合的维度是固定的18维, 因此当需要调用模板序列的时候, 很容易实现动作字符串的切分。

2.3 患者训练动作匹配

Kinect产生骨骼数据的速率约为30帧/s, 生成的动作序列是由多帧的骨骼数据集合构成的, 因此, 本文采用帧匹配的方法, 通过计算所有对应帧相似度的平均值作为两个动作的相似度, 将患者训练动作和标准动作进行匹配。

对于同一个动作, 由于个体的差异, 做动作的速率会产生快慢之分, 导致动作序列在时间轴上出现差异, 采用动态时间规整算法(Dynamic Time Warping, DTW)可以找到两个序列最佳的对齐方式。DTW算法的主要思想是通过时间序列的伸缩对测试序列和模板序列进行规整, 计算序列间的匹配程度, 找到最短路径, 即相似度最高的路径, 该路径上的点就是两个序列的最佳对应关系。

把患者训练动作序列和标准动作序列定义为 $Q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ 和 $C(c_1, c_2, \dots, c_m)$, 长度分别是 n 和 m , 序列中的每个点的值为动作序列中每一帧的特征值。

序列Q	(1,m)	(2,m)	...	(n,m)

	(1,2)	(2,2)	...	(n,2)
	(1,1)	(2,1)	...	(n,1)
序列C				

图4 矩阵网格

利用动态规划(Dynamic Programming)算法求解最短路径可以大幅减少计算量。构造一个 $n \times m$ 的矩阵网格, 如图4所示, 矩阵元素 (i, j) 表示 q_i 和 c_j 两个点的欧式距离: $d(q_i, c_j) = (q_i - c_j)^2$, 最优规整路径就是此网格中从(1,1)

到 (m, n) 具有最小累计距离的路径, 累积距离 $\beta(i, j)$ 的状态转移方程为: $\beta(i, j) = d(q_i, c_j) + \min\{\beta(i-1, j-1), \beta(i-1, j), \beta(i, j-1)\}$ 。记最小累计距离为 $D(Q, C)$, 路径长度为 K , 则路径平均相似度为: $DTW(Q, C) = D(Q, C)/K$, 当相似度小于系统设定的标准阈值时, 两动作序列匹配成功。

2.4 训练评估与矫正

DTW距离可以反映患者动作和标准动作的相似度, 本文设计一套基于DTW算法的动作评估与矫正体系, 选取包含人体运动信息较多的部位, 左右对称的四部分(肩部, 肘部、髋部和膝部), 共包含12个角度特征。每个角度特征的评分为: $S_p = S_T - (D - D_m) \times L_p$, 其中, S_T 为总分, 本系统设定总分为10; D 为 DTW 距离值, D_m 为 DTW距离有效值区间中的最小值; L_p 为动作的损失参数, 不同骨骼节点对应不同的损失参数。每个动作最终得分 S 为 12 个角度特征的分数的平均值: $S = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n S_p$ 。

为了对动作的评估更加直观和简洁, 系统最终根据分数给出“A、A-、B、B-、C”5个评价等级。同时将各角度特征的得分和平均分进行比较, 找出得分较低的骨骼节点, 在屏幕中标红并圈出相应的点, 以达到矫正动作的效果。

3 系统测试

为了测试系统的稳定性和可靠性, 首先录入6个动作作为模板, 按照2.2节的方法, 每个模板动作采集5次, 完成模板库的建立。在测试环节, 选取10名健康受试者按照随机次序、不同程度做出6个动作, 每个动作做10次, 共进行600次识别评价操作。从数据管理系统导出600次测试评分记录, 与系统录制的受试者测试过程进行对比, 根据系统识别到的动作编号判定其动作正确识别率, 根据系统给出的评分等级及矫正信息判定其评价准确率。

结果表明, 针对此实验样本, 本系统的平均动作正确识别率达95.67%, 系统在识别到动作后均给出了评分等级及矫正信息, 正确评价率达94.50%。

4 结束语

本文设计了一套小型轻便、价格低廉、操作简便的康复训练辅助系统, 利用Kinect设备实现对患者动作的实时识别, 通过和标准动作数据进行比较, 得到患者动作的匹配程度, 对动作给予评价和矫正, 并对训练结果进行整理分析和可视化展示, 以达到指导和辅助患者康复训练的效果。实验结果表明, 本系统动作识别率达95.67%, 正确评价率达到94.50%, 有良好的稳定性和可靠性。

基金项目:

华中师范大学教学研究项目: 新工科与人工智能教育背景下, 机器人教育助力计算机类专业学生创新能力培养模式的探索与实践(项目编号: 201909)。

华中师范大学大学生创新创业训练计划国家级项目: 基于Kinect与树莓派的机器人无线体感调试系统(项目编号: 105112019010021)。

作者简介:

陈炫婷(1999—), 女, 山西临汾人, 华中师范大学计算机学院2017级本科生, 研究方向: 计算机科学与技术。

彭熙(1978—), 男, 湖北武汉人, 华中师范大学计算机学院、大数据与智慧学习湖北省重点实验室讲师, 研究方向: 物联网与机器人。