

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.041

基于音乐节奏的身体协调训练结合 3D 视觉评价方法研究

段冀州¹, 蒋天宇², 张强¹, 刘凯², 姚佳烽²

(1. 南京特殊教育师范学院 音乐与舞蹈学院, 江苏 南京 210038;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:提出一种基于 3D 视觉动作捕捉和虚拟现实技术的音乐节奏与身体协调训练系统,旨在提高训练者在节奏感知与动作执行同步性方面的训练效果。通过高精度的 3D 视觉动作捕捉技术,实时记录训练者在训练中的关节角度、运动轨迹和速度数据,并建立标准动作模型,结合动态时间规整算法进行动作匹配与评估。利用机器学习算法优化动作识别模型,并通过强化学习动态调整训练策略,为训练者提供个性化的指导与反馈。该系统优化了音乐节奏协调训练的效果,不仅提升了训练者的身体协调能力和运动控制能力,还能在多样化的节奏训练中为训练者提供量化的评估标准。该方法具有广阔的应用前景和推广价值,能够为不同层次的训练者提供个性化的训练方案,促进其在复杂节奏环境中的快速进步。

关键词:3D 视觉动作捕捉;虚拟现实;动态调整;音乐节奏协调训练

中图分类号:TP391.4 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)01-0197-05

Research on Body Coordination Training Based on Music Rhythm Combined with 3D Visual Evaluation Method

DUAN Jizhou¹, JIANG Tianyu², ZHANG Qiang¹, LIU Kai², YAO Jiafeng²

(1. School of Music and Dance, Nanjing Normal University of Special Education, Nanjing 210038, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:This paper proposes a music rhythm and body coordination training system based on 3D visual motion capture and virtual reality technology, aiming at improving the training effect of rhythm perception and movement execution synchronization. With high-precision 3D visual motion capture technology, the joint angle, movement trajectory and speed data of the trainer during training are recorded in real time, the standard motion model is established, and the motion matching and evaluation is carried out by the dynamic time regulation algorithm. The machine learning algorithm is used to optimize the action recognition model, and the training strategy is dynamically adjusted by reinforcement learning to provide personalized guidance and feedback for trainers. The system optimizes the effect of rhythm coordination training, which not only improves the physical coordination ability and motor control ability of the trainer, but also provides a quantitative evaluation standard for trainers in diversified rhythm trainings. The system has broad application prospects and promotion value, providing personalized training programs for trainers on different levels and promoting the rapid progress by trainers in complex rhythm.

Keywords:3D visual motion capture; virtual reality; dynamic adjustment; music rhythm coordination training

0 引言

近年来,在运动训练中的音乐节奏应用受到了越来越多的关注。研究表明:音乐节奏不仅能够激发运动员的情感动能,还能够有效地调节运动节奏、提高运动同步性^[1],尤其是在步态训练、体操及舞蹈等领域,音乐节奏已经被广泛用于协调性训练中。音乐节奏通过听觉-运动整合机制,

可以促进大脑对运动指令的处理,提高身体动作的响应速度、准确性和流畅性^[2]。然而,现有的研究大多集中在音乐与运动节奏的匹配上,对于如何精准评估音乐节奏对身体协调性的具体影响则缺乏深入探讨。另一方面,随着计算机视觉技术的不断发展,3D 视觉系统已逐渐成为运动科学领域中的重要工具。YANG 等^[3]基于计算机视觉动作捕捉技术,构建了一套动作矫正系统,通过分析

第一作者简介:段冀州(1986—),男,江苏徐州人,博士研究生,研究方向为音乐治疗康复,djz@njts.edu.cn。

通讯作者简介:姚佳烽(1984—),男,河南巩义人,副教授,博士,主持国家自然科学基金项目 3 项,国家重点研发计划课题 1 项,获得省部级奖项 4 项,共发表学术论文 100 余篇,日文专著章节 1 部,英文专著章节 1 部,发明专利 40 余项,转化 4 项,获批二类医疗器械注册证 2 项,jiaf.yao@nuaa.edu.cn。

实时运动数据和人体运动姿态,实现三维可视化实时教学动作矫正的训练目标。MOURA 等^[4]采用4种视觉显示对观察者在两种表现条件下对音乐表演感知的影响。FENG 等^[5]提出了一种基于虚拟现实技术的音乐教学系统,以 HTC Vive 套件和固定在头盔上的 Leap Motion 传感器为硬件平台,以 Unity3D、相关 SteamVR 插件和 Leap Motion 插件为软件平台,开发出虚拟钢琴,然后提出并实现一种手势识别算法,并使用机器学习(ML)理论实现。该系统具有广泛的推广和应用价值。VERA-JIMÉNEZ 等^[6]通过在人体上配备的19个惯性传感器收集数据,并运用人体工程学分析软件包进行生物特征参数评价,如躯干正面和矢状面角度、手臂、前臂、手腕和腿部角度等。此外还测定了其他动态参数,如L5盆骨交界处的关节接触力和峭壁力、不对称(角度和系数)以及肌肉力量。SCHLAGENHAUF 等^[7]运用商业设备 Kinect 追踪人体关节运动,双 Kinect 系统能对多个复杂的上半身运动进行稳健而准确的跟踪。它消除了标记设置烦琐和受试者准备时间长的缺点,具有低成本、无标记、易便携等优势。

通过精确捕捉和分析人体运动的三维数据,3D视觉技术能够对运动过程中的各类细节进行全面评估,包括关节角度、动作轨迹和身体姿态等。结合音乐节奏与3D视觉技术,能够实现对身体协调训练过程的实时监控与评估,进而为个体提供更加个性化的训练方案。因此,本研究旨在探讨基于音乐节奏的身体协调训练方法,并通过3D视觉技术对训练效果进行量化评估,为运动科学、康复医学以及智能健身领域提供新的研究思路和技术支持。

1 研究意义

将动作捕捉、虚拟现实(VR)、数据分析等现代科技手段引入音乐节奏的身体协调训练中,能够显著提升训练的可靠性和有效性。

1) 精确的身体动作捕捉与数据分析。身体协调训练中的动作捕捉技术能够实时、精确地记录训练者在训练中的每一个细节动作,特别是关节角度、运动轨迹、速度等具体的运动数据。通过这些高精度的动作数据,可以全面分析训练者在协调性训练中的表现,尤其是在步伐、手臂挥动、扭转等运动中的动作同步性和精确性。与传统的依赖教练主观判断的方式不同,动作捕捉为训练者提供了客观、量化的评价标准,使训练效果更具科

学性与可重复性。

2) 音乐节奏驱动的协调性训练。音乐节奏能够调动训练者的运动神经系统,帮助其在运动过程中更好地同步身体的各个部分。通过结合节奏的动作训练,训练者可以在音乐的引导下进行步伐、姿态和手脚的协调训练。这种训练方式能够提高运动的节奏感和协调性,尤其在步态训练、舞蹈和体操等领域应用广泛。通过3D视觉技术对动作的精确捕捉与分析,训练者可以及时了解到与节奏的匹配情况,并根据数据反馈进行调整和改进,从而有效提升协调训练的效果和实用性。

3) 数据驱动的教学反馈与个性化指导。通过3D视觉技术与数据分析的结合,系统能够实时采集训练者的动作数据,并生成详细的反馈报告。这些报告不仅包含每个动作的具体数据,还通过与理想动作的对比分析,指出训练者在协调性和节奏感上的不足之处,并提出改进建议。数据驱动的个性化反馈使得教练能够为每个训练者量身定制训练计划,避免传统“一刀切”的教学方式。个性化的训练指导可以有效提升训练者在协调性、节奏性方面的表现,帮助他们在较短时间内取得显著进步。

综上所述,基于音乐节奏的身体协调训练结合3D视觉评价方法的研究有着广阔前景。然而,要实现这些前景,仍需克服技术困难,建立标准数据库,进行充分的实际测试并需要专家的参与。

2 研究方法

2.1 3D视觉动作捕捉系统的开发与应用

系统利用多台红外深度摄像头从不同角度进行动作捕捉,覆盖训练场地的多个角度,确保在捕捉训练者的动作时不会因为遮挡或复杂运动轨迹而造成数据丢失。开发用于实时采集摄像头数据的模块,确保系统能够以高帧率捕捉训练者的每个动作。使用时钟同步和空间校准算法^[8],将不同摄像头的的数据同步到同一时间轴并进行坐标转换,确保所有数据在同一参考框架中进行融合和分析^[9]。通过卡尔曼滤波(Kalman filtering)等数据融合算法,优化各类传感器的数据整合,以提高数据的精准度和可靠性^[10]。

项目将通过采集训练者体态视频样本的方式,搭建专有数据集以便针对性地对现有模型进行强化学习。私有数据集中将志愿者的基本信息和运动学视频作为输入项,受试者运动中的时空

参数、关键点坐标变化等运动学分析指标作为输出项,充分提升人体运动特有关键点的识别精度。3D 人体关键点检测主要分为直接检测和 2D 升 3D 两种路径。本项目将综合运用这两种方法,使

用私有训练集进行目标算法模型训练和参数调优,以取得实战训练中关键点识别和运动分析的最优算法,如图 1 所示。

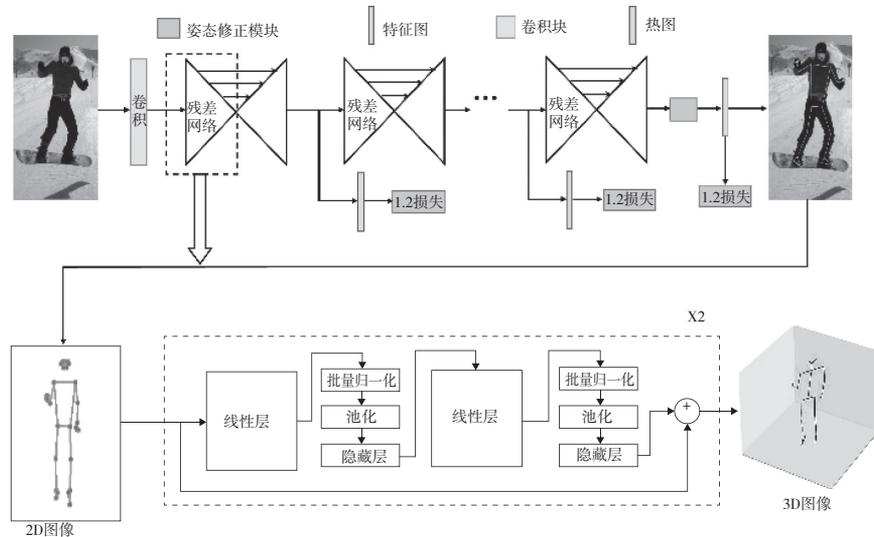


图 1 3D 人体动态姿势识别关键点提取算法

数据采集功能将通过驱动软件控制视觉采集系统进行实时采集图像数据。图像采集功能将以 OpenCV 为基础,编写摄像头的控制功能。元器件控制功能将以 python 语言编写相应的功能(变焦、自动对焦、滤光片切换等)。数据处理软件包含关键点识别、关键参数计算、实时图像展示和数据存储等。原型软件将根据具体的评估和训练动作调用相应的关键点识别模型和关键参数进行实时计算。

2.2 动作评价模型的构建

在构建标准数据库时,使用 3D 动作捕捉系统对训练者的动作进行精确捕捉,包括动作结构、身体动作、同伴位置关系等。捕捉的重点是动作的关键点(如轨迹、速度、加速度、角度等)以及整体动作的轨迹和时序。

为了减少高维数据的冗余信息,同时保留关键特征,使用主成分分析法(PCA)对动作数据进行降维处理,提取最具代表性的运动模式特征。此外,使用线性判别分析(LDA)在分类任务中进一步优化特征选择,确保动作分类和行为识别的准确性。在根据不同的场地信息和不同身形进行标准化和归一化处理后,通过动态时间规整(DTW)、傅里叶变换(FFT)等时序分析技术,提取动作在时间和空间维度上的特征。特别是对复杂

的实战动作,需提取动作中的加速度峰值、关节旋转幅度、力量输出路径等多维度时空特征。这些特征将作为评价训练者动作的参考基准,构成标准动作库中的核心数据。

使用 3D 视觉动作捕捉系统对训练者的动作进行实时采集,生成与标准动作模型一致的三维数据。这些数据包括训练者的关节角度、动作轨迹、速度和力量输出等。构建一个基于动态时间规整(DTW)或相似算法的动作匹配系统^[11]。该算法用于匹配训练者的动作轨迹与标准动作的对应关系。通过比对动作的时间序列和空间序列,找到训练者动作与标准动作之间的相似性与差异。根据动作匹配结果,计算训练者动作与标准动作之间的误差。误差的类型主要包括关节角度误差、速度和加速度误差以及运动轨迹误差。

结合多个维度进行综合评分,根据动作的实际需求和教练的建议,为每个评价指标分配权重。将训练者的每个动作表现通过多项指标进行评分,并依据权重汇总为一个综合评分。通过系统的实时数据处理能力,在训练者训练时即时显示其动作的评分和不足之处。系统可以通过图形化界面向训练者展示其三维动作模型,并用不同颜色或符号标出动作中的偏差点,提示训练者需要改进的地方,如图 2 所示。



图 2 实时反馈图形化界面

基于音乐节奏与 3D 视觉评价结果,系统可以生成个性化的训练改进建议。例如,系统能够分析训练者在不同节奏下的动作协调性,评估哪些动作与音乐节奏的同步性存在问题,哪些关节在与节奏匹配时存在灵活性不足的情况,或哪些肢体部位在动作执行时未能与节奏有效衔接。针对这些问题,系统可以提出建议,如某些关节需要增加柔韧性训练、步伐和挥动的速度、如何与音乐节奏相匹配、手脚动作的协调性如何提高等。教练可以根据这些基于数据的建议,制定个性化的训练计划,帮助训练者在不同节奏复杂度下更好地适应动作与音乐的协调要求。

2.3 虚拟现实 (VR) 技术在实战训练的应用

图 3 显示了基于 VR 技术的实战训练系统,选择 HTC Vive Pro、Oculus Rift S、Meta Quest Pro 等先进的 VR 头显设备,确保训练者在 VR 场景中的每个动作都能被准确反映。采用 3D 视觉动作捕捉系统,通过多摄像头设置或可穿戴传感器,对训练者全身动作进行实时捕捉。



图 3 VR 系统

虚拟场景是整个音乐节奏协调训练系统的核心组成部分,它能够高度沉浸的训练环境,帮助训练者在拟真场景中进行节奏协调训练。使用专业的 3D 建模引擎(如 unity 或 unreal engine),可以构建复杂且逼真的虚拟训练场景。场景设计应涵盖各种音乐节奏训练情境,如舞蹈练习空间、

体操训练场、日常动作协调训练等。

在训练结束后,系统基于捕捉到的动作数据、虚拟环境活动情况等,自动生成训练者的综合评估报告。评估维度包括训练者的动作表现(如精确度、力量、反应时间)以及心理状态(如应对压力的反应能力)。评估报告通过图表、热图、时序图等可视化工具来展示数据,让训练者与教练可以直观地了解训练者的训练效果和进展。

2.4 数据驱动的个性化训练与反馈机制

本项目基于采集的训练者训练数据,通过系统化分析,生成针对每个训练者的个性化训练计划和反馈,如图 4 所示。

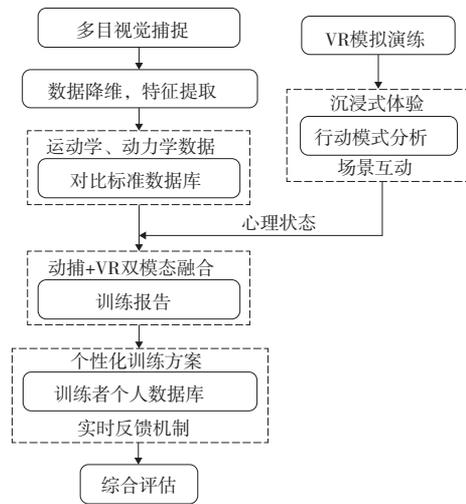


图 4 动捕+VR 训练系统示意图

通过数据采集模块记录训练者的训练过程,包括每个动作的时间点、完成度、与目标的差距等,确保采集的数据涵盖整个训练周期。针对不同训练者个体差异大的情况,通过 K-means 聚类算法对训练者的训练数据进行分类,将训练者的表现划分为不同的模式类别^[12]。使用支持向量机 SVM 分类算法建立训练者表现分类模型。通过对训练者训练中的生理数据的长期分析,判断其体能消耗和恢复情况,建立训练者的体能管理模型,帮助教练根据训练者体态状况调整训练方法和内容。

在训练过程中,通过强化学习(reinforcement learning, RL)算法,系统可以根据训练者的表现实时调整反馈策略^[13]。设计合理的奖励函数,将训练者的每一个动作表现映射为反馈信号。RL 算法通过奖励信号,为训练者提供个性化的提示和纠正建议,动态优化训练策略。结合模糊逻辑算法,根据训练者动作的非精确性(如微小偏差)动态生成反馈。模糊逻辑系统可以更好地处理动

作中的不确定性,为训练者提供个性化的细化建议,帮助其逐步提升动作精度。通过贝叶斯优化方法,在训练计划调整过程中不断评估训练者的表现数据,探索并优化训练强度和内容的变化路径^[14]。该方法可以结合训练者长期训练中的反馈,动态调整个性化训练方案,逐步提升训练效果。在长期跟踪过程中,使用动态贝叶斯网络(DBN)分析训练者表现的变化模式,预测未来训练中的潜在问题和瓶颈。通过动态贝叶斯网络,可以提前识别出训练过程中的不稳定因素,并调整训练策略。

训练结束后,系统根据训练中的动作数据和生理数据,生成综合评估报告。报告将以图表、数据汇总等形式展示训练者的表现,包括动作精确度、力量输出、反应速度、动作执行同步性等指标。评估报告通过可视化工具展示训练者的训练表现,教练和训练者可以直观地看到进步趋势、问题区域和体能变化等。

3 结语

本文提出了一种基于3D视觉动作捕捉和虚拟现实(VR)技术的音乐节奏与身体协调训练系统,旨在提升训练者在节奏感知与动作执行同步性方面的能力,增强其身体协调性与运动控制能力。研究表明:系统能够实时、精确地捕捉训练者在不同音乐节奏下的运动细节,并利用先进的数据分析方法和机器学习算法,为训练者提供客观、量化的训练评价和个性化指导。通过整合3D视觉和VR技术,系统成功地构建了高度沉浸的训练场景,使训练者能够在多样化、变化丰富的节奏环境中进行高强度的协调性训练,显著提升了训练者对节奏的感知能力和动作执行的同步性。该训练系统不仅优化了传统训练方法,还为训练者提供了灵活的个性化学习路径,有助于其在复杂和动态的节奏训练环境中提高协调性与反应能力。

参考文献:

- [1] LI C Y, JIN C J, ZHANG Z Y, et al. Music recharges people: synchronized music during aerobic exercise leads to better self-regulation performance [J]. *PLoS One*, 2022, 17(12): e0278062.
- [2] BRAUN JANZEN T, KOSHIMORI Y, RICHARD N M, et al. Rhythm and music-based interventions in motor rehabilitation: current evidence and future perspectives [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2022, 15: 789467.
- [3] YANG Y Z, MENGL F. Physical education motion

- correction system based on virtual reality technology [J]. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, 2019, 14(13): 105.
- [4] MOURA N, FONSECA P, GOETHEL M, et al. The impact of visual display of human motion on observers' perception of music performance [J]. *PLoS One*, 2023, 18(3): e0281755.
- [5] FENG Y. Design and research of music teaching system based on virtual reality system in the context of education informatization [J]. *PLoS One*, 2023, 18(10): e0285331.
- [6] VERA-JIMÉNEZ J C, MELÉNDEZ-SÁNCHEZ F L, ÁLVAREZ J A, et al. An analysis of biomechanical parameters in OTP police physical intervention techniques for occupational risk prevention [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(11): 6615.
- [7] SCHLAGENHAUF F, SAHOO P P, SINGHOSE W. Comparison of single-kinect and dual-kinect motion capture of upper-body joint tracking [C]//2017 11th Asian Control Conference (ASCC). GoldCoast, QLD. IEEE, 2017: 256-261.
- [8] DU Y C, QIN B H, ZHAO C, et al. A novel spatio-temporal synchronization method of roadside asynchronous MMW radar-camera for sensor fusion [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 23(11): 22278-22289.
- [9] DI GENNARO T M, WALDMANN J. Sensor fusion with asynchronous decentralized processing for 3D target tracking with a wireless camera network [J]. *Sensors*, 2023, 23(3): 1194.
- [10] BÉZENAC E, RANGAPURAM S S, BENIDIS K, et al. Normalizing kalman filters for multivariate time series analysis [C]//2020 34th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020), Vancouver, Canada, 2020: 1-13.
- [11] SU C X. Application of DTW attitude matching algorithm in sports training trajectory data [C]//2024 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Autonomous Robot Systems (AIARS). Bristol, United Kingdom; IEEE, 2024: 870-874.
- [12] LI X Y, ZHANG Y, CHENG H M, et al. An unsupervised ensemble clustering approach for the analysis of student behavioral patterns [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 7076-7091.
- [13] AMIN S, UDDIN M I, ALAROOD A A, et al. Smart E-learning framework for personalized adaptive learning and sequential path recommendations using reinforcement learning [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 89769-89790.
- [14] WANG X L, JIN Y C, SCHMITT S, et al. Recent advances in Bayesian optimization [J]. *ACM Computing Surveys*, 2023, 55(13): 1-36.

收稿日期: 2024-12-20