

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.003

基于 3D 视觉感知的警务实战训练与评价方法研究

刘涛^{1,2}, 史曙生¹, 刘俊峰², 蒋天宇³, 刘凯³, 姚佳烽³

(1. 南京师范大学 体育科学学院, 江苏 南京 210023;

2. 江苏警官学院, 江苏 南京 210031;

3. 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警务实战训练系统以提高警察体能与技能训练的有效性。通过多模态数据融合技术实时捕捉学员运动特征,建立标准化动作特征库。采用时序对齐算法实现训练动作与标准模板的动态匹配,结合层次化机器学习模型解析动作偏差规律。系统创新集成自适应反馈机制,通过强化学习策略动态优化指导方案,形成“评估—反馈—强化”的闭环训练模式。该技术体系显著提升警务实战训练的科学与适应性,为实战技能智能化培养提供创新解决方案。

关键词:3D 视觉动作捕捉;虚拟现实;多模态数据融合;警务实战训练

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)02-0017-05

Research on Police Actual Combat Training and Evaluation Methods Based on 3D Visual Perception

LIU Tao^{1,2}, SHI Shusheng¹, LIU Junfeng², JIANG Tianyu³, LIU Kai³, YAO Jiafeng³

(1. School of Sports Science and Physical Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu Police Institute, Nanjing 210031, China;

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

Abstract: This paper proposes a police tactical training system integrating 3D visual motion capture and virtual reality technologies to enhance the effectiveness of physical fitness and skill development. The system employs multimodal data fusion technology to acquire trainees' kinematic characteristics in real time, establishing a standardized motion feature database. Dynamic matching between trainee actions and reference templates is achieved with temporal alignment algorithm, and analysis on motion deviation patterns are complemented by hierarchical machine learning models. With the innovative corporation of adaptive feedback mechanism, reinforcement learning strategies are utilized to optimize instructional protocols dynamically, forming a closed-loop training paradigm of "assessment-feedback-reinforcement". The proposed system significantly improves the scientific rigor and adaptability of police tactical training, providing an innovative solution for intelligent training of actual combat competency.

Keywords: 3D visual motion capture; virtual reality; multi-modal data fusion; police combat training

0 引言

随着科学技术的发展和生活方式的不断变化,现代化社会治理对警察执法的规范和效率都提出了新的要求。随着信息技术和人工智能的快速发展,数据分析等技术助力提升警察现场执法、技能训练的水平 and 效果成为必要和可能。把目前已成熟的警察实战训练理论和数字技术相结

合,把先进的技术、动作和警察现场处置流程数字化存储,通过建立基于动作捕捉、虚拟现实(VR)等技术的感知和评价系统,现场对警察执法技能的训练效果给予评估和指导,从而提高警察体能、技能训练的有效性;通过挖掘警察的警务实战训练潜力,促进警察基础体能训练(体育锻炼)和警务实战技能训练的融合。这种通过分析大量数据以充分掌握训练进程并进行训练评价和指导的方

基金项目:2021 年国家社科基金项目(21BTY024);江苏警官学院 2024 年教学改革重点项目(024A01)

第一作者简介:刘涛(1976—),男,山东临朐人,副教授,博士研究生,研究方向为警察健康教育与促进,liutao@jspi.cn。

通信作者简介: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。

法,越来越受到研究人员和参训人员的关注。

YANG 等^[1]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。CASERMAN 等^[2]为警察队伍开发了一个多人虚拟现实模拟训练系统,使警察在危险和紧张的情况下练习特定技能,从中发现与只捕捉了头部和手部位置的情况对比,对全身动作进行捕捉会引起更高的压力水平,表明了多人 VR 中全身重建对警察训练的重要性和益处。ZHANG 等^[3]提出了一种基于微机电系统(MEMS)传感器的运动辅助训练系统。通过提取人体运动轨迹特征,并结合卡尔曼滤波法来计算训练者手臂的运动姿势角度,设计了姿势估计算法,最终完成了系统的软件设计,完善了整个运动辅助训练系统的构建。实验结果表明:基于 MEMS 传感器的警用体能辅助训练系统能够丰富训练方式,提升教练的训练效率,从而显著提高了警用体能辅助训练系统的整体性能。曾友美等^[4]针对体能训练中训练效果不佳、误差考虑不足等问题,设计了一种基于机器视觉技术的体能训练系统。首先,进行信息采集,根据体能训练过程中的视频和图像,获取身体运动轨迹;然后,根据该运动轨迹和误差检测方法,对训练者的训练模式进行分析,通过设置智能评估模块,对训练者的反应速度、准确性、稳定性进行综合评估并提出更合理的建议,以提高训练效果;最后,通过仿真与其他系统进行对比,得出所设计的系统训练反应时间更快、动作控制精度更高、效果更好的结论。徐卫伟等^[5]开发了一种提高教练水平的辅助训练系统,同时利用虚拟现实技术和 Kinect 对训练场地进行虚拟建模,采用冷冻匹配引擎技术绘制训练场景,并通过 Kinect 对训练者的动作和位置进行识别,实时更新最终识别结果,提高训练者的学习效率。

1 学术价值与实践意义

本研究将三维动作捕捉技术、虚拟现实交互系统及生物力学数据分析模块进行整合并应用于警务实战教学体系,构建了基于多模态数据融合的战术训练量化评估系统,其能够显著提升课程的科学性、实战性和个性化教学效果^[6]。

1) 高精度运动参数捕捉与生物力学分析

基于惯性传感与计算机视觉的动作捕捉技术能够实时、精确地采集学员训练过程中的三维运动学数据(包括关节角度、角速度、运动轨迹等生

物力学特征),构建人体动作数字化模型。通过这些高精度的动作数据,可以全面分析学员在出拳、踢腿、摔技等动作中的表现,解决了传统教学中依赖教练主观判断的局限性,为学员的动作质量提供了客观、量化的评价标准。

2) 多模态虚拟现实对抗

依托 VR/MR 技术构建动态执法场景仿真平台,让学员在安全的虚拟环境中进行对抗训练。例如,通过 VR 模拟复杂的执法环境、突发暴力事件或多人围攻的情景,学员可以通过 VR 头盔和动作捕捉设备进行全身互动,进行逼真的训练体验。VR 技术的引入不仅提升了训练的实战性和情境模拟能力,还可以让学员体验各种复杂和高危的场景而无需实际面对风险。这种训练方式提高了学员的应急反应能力和心理抗压能力,有助于培养学员在实际执法中的临场决策能力,缩短从训练到实战的适应期。

3) 智能评估与自适应训练优化

通过数据分析技术,系统能够实时分析学员的表现并生成详细的反馈报告。该报告不仅包含每个动作的具体数据,还可以通过学员实际动作与理想动作的对比分析,指出学员动作中的不足之处,并提出改进建议。数据驱动的个性化反馈可以帮助教练制定针对每个学员的个性化训练计划,避免“一刀切”的教学方式。这种个性化指导能有效地提升教学效果,促进学员在短时间内取得显著进步。

4) 线上线下结合的智能化训练体系

动作捕捉和 VR 技术的引入使得线上和线下的训练得以有效结合。学员可以在教室内或远程环境中完成部分训练任务;而数据分析结果可以实时同步到系统中,供教练随时查看和调整训练内容。这种线上线下结合的教学模式,使训练更加灵活高效,尤其是在应对大规模培训或地理分散的情况下,可以提高培训覆盖面和效率。同时,这种模式打破了传统教学的时间和空间限制,使警务实战训练可以在更多场景下展开,为学员提供更加持续的学习和反馈机会。

综上所述,基于 3D 视觉的警务实战教学改革有着广阔前景。然而,要实现这些目标,仍需克服技术困难、建立标准数据库以及进行充分的实际测试和专家的参与。

2 多模态智能训练系统构建

2.1 3D 视觉动作捕捉系统的开发与应用

本系统采用多台红外深度摄像头构建多视角

同步采集阵列,通过空间拓扑优化布局实现训练场域 360°覆盖,有效规避因肢体遮挡导致的运动数据缺失问题。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学员的每个动作。使用时钟同步和空间校准算法^[7],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^[8]。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^[9]。为保证捕捉细节,使用高频率的数据采样技术,尤其在动作捕捉中采用超过 60 帧/s 的采样率,捕捉动作的瞬时变化。采用压缩感知(compressed sensing)算法在数据传输与存储时降低冗余,减少带宽压力,并同时保持数据的关键特征信息,以便后续高效分析^[10]。

在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,将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。

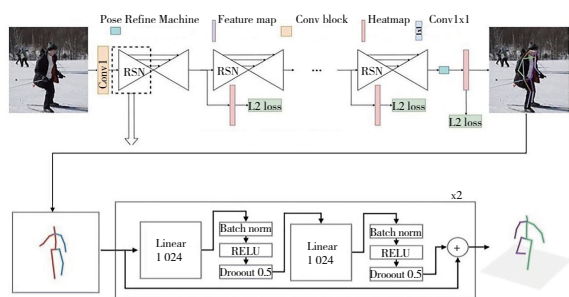


图 1 3D 人体动态姿势识别关键点提取算法

在算法训练过程中,团队还会将算法同时学习 2D 和 3D 关键点,这样一方面可以为 2D 升 3D 网络引入来自于原始图像的信息,另一方面也为 2D/3D 数据集混合训练提供了可能,进一步提升算法的泛化能力。上述算法调优过程产生的准确率及性能最优的算法模型将被运用于前述项目自行采集的私有测试集中进行测试,模型测试目标设定为人体关键点识别准确率达 95% 以上。利用 MediaPipe 算法对人体各关节点进行自动识别^[11],并生成基于人体骨架的 3D 模型。该模型将用于实时追踪每一个动作中的关节变化、肢体

姿势和动作轨迹。

通过 OpenGL 三维可视化引擎实现运动数据的动态呈现。原型系统可根据特定训练动作动态调用预设评估模型,通过特征编码匹配机制自动选择最优参数组合,实现战术动作的在线量化评估与即时反馈,形成“数据采集—特征解析—决策输出”的闭环处理流程。

2.2 动作评价模型的构建

本研究构建标准动作数据库时,采用基于专家示范的三维运动学数据采集方法。由资深实战教官执行标准化战术动作演示,通过 3D 动作捕捉系统对专家进行多维度运动数据采集。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。

针对高维运动数据集的特征优化问题,本研究采用多阶段数据压缩与特征增强策略。首先通过主成分分析(PCA)对原始动作捕捉数据进行协方差矩阵特征值分解,提取解释 90% 以上方差的主运动模式特征向量,有效消除关节运动相关性带来的维度冗余。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。这些特征将作为评价学员动作的参考基准,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学员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。这些数据包括学员的关节角度、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^[12],该算法用于匹配学员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,找到学员动作与标准动作之间的相似性与差异。根据动作匹配结果,计算学员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。

通过系统对数据进行实时处理,在学员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学员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,提示学员需要改进的地方,如图 2 所示。

基于动作评价结果,系统可以生成个性化的

训练改进建议,如哪些关节需要加强柔韧性训练,出拳的速度和力度如何调整等。教练可以根据这些建议,制定针对性的训练计划。

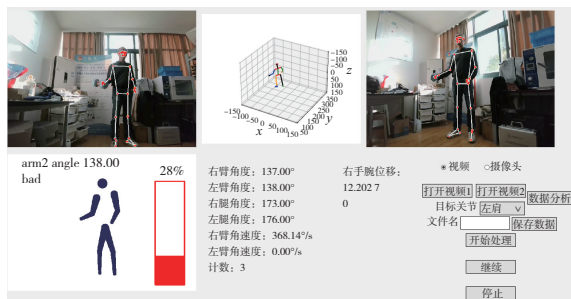


图2 实时反馈图形化界面

2.3 多模态虚拟现实对抗

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。这些设备不仅支持高分辨率显示和低延迟的虚拟体验,还能够捕捉学员头部和手部的精确运动。这些设备通常配备高精度的位置追踪系统,如从内向外追踪 (inside-out tracking) 和从外向内追踪 (outside-in tracking),确保学员在 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 (如 OptiTrack、Vicon 系统或基于 IMU 的惯性捕捉设备),通过多摄像头设置或可穿戴传感器,对学员全身动作进行实时捕捉。特别是在高动态的实战场景中,需要使用高采样率 (大于 120 Hz) 的捕捉系统,以保证学员的动作细节 (如肢体旋转、关节弯曲等) 能够被准确捕获。



图3 VR系统

系统架构设计需要实现 3D 动作捕捉设备与 VR 场景的无缝集成。通过基于网络或本地计算的高效数据传输协议 (如 UDP、TCP/IP) 确保学员的动作数据能够实时传输到 VR 系统并与虚拟角色的动作同步。采用低延迟的网络传输机制 (低

于 20 ms), 避免延迟对训练体验的影响。

虚拟场景是整个训练系统的核心组成部分,能够提供逼真的执法情境模拟,帮助学员在高拟真环境下进行训练。场景涵盖实际执法可能遇到的各种情境,如城市街区、室内办公场所、车内狭小空间等。为了确保高度沉浸感,场景需使用高分辨率的纹理贴图,并加入动态光影效果、环境声效等细节,进一步增强逼真度。通过整合物理引擎 (如 Havok 或 PhysX),模拟真实的物理效果,包括物体的重力、碰撞、弹性和摩擦力等。

智能虚拟对手是 VR 训练中极为关键的一部分,虚拟对手不仅需要具备复杂的行为模式,还要能够根据学员的动作做出动态反应。为虚拟对手开发基于人工智能的行为模型,通过机器学习 (如强化学习 RL、深度强化学习 DRL) 和行为树 (behavior trees) 算法,让虚拟对手能够实时学习并适应学员的实战模式。在训练过程中,虚拟对手可以分析学员的攻击模式、动作轨迹和反应时间,调整其战术策略,使对抗更加灵活多变。AI 系统能够根据学员的表现进行动态难度调节。通过使用基于贝叶斯优化或强化学习的调节算法,系统可以实时调整虚拟对手的攻击频率、防御反应和战术变化。

在训练结束后,系统基于捕捉到的动作数据、虚拟对手对抗情况等,自动生成学员的综合评估报告。评估维度包括学员的动作表现 (如精确度、力量、反应时间)、对抗表现 (如成功防御率、进攻得分) 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展示数据,让学员与教练可以直观地了解学员的训练效果和进展。

2.4 智能评估与自适应训练优化

本项目基于采集的学员训练数据,通过系统化分析,生成针对每个学员的个性化训练计划和反馈。如图4所示。

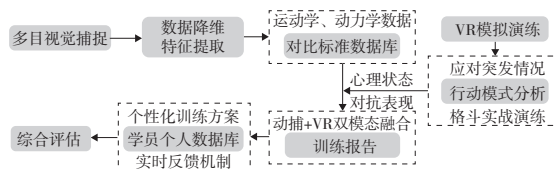


图4 动捕+VR训练系统示意图

通过构建多维度数据采集体系,完整记录训练全周期内的动作时序特征,完成量化指标及战术空间关系等关键参数。针对受训者个体差

异,采用改进型 K-means 聚类算法^[13]对多源训练数据进行时空特征提取与模式划分,通过特征空间映射将学员表现归类至不同能力层级。该方法有效识别动作执行中的共性规律与个体特异性,结合动态阈值判定机制建立个性化训练档案,为差异化教学策略制定提供数据支撑。采用支持向量机(SVM)算法构建学员表现分类模型,通过解析多周期训练数据中的行为特征,构建多维能力评估框架,实现战术动作效能的分项量化评估。基于核函数映射与超平面优化,系统可识别不同场景下学员的技术优势与薄弱环节并生成针对性改进策略。同时,通过生理信号时序分析,构建基于生理反馈的自适应调控模型,揭示体能储备与训练应激的关联机制。该模型可动态追踪学员的生理适应进程,为训练方案的强度梯度设计与内容适配提供决策依据,实现训练负荷的精准化调控。

构建基于强化学习(reinforcement learning, RL)的动态反馈调控体系^[14],通过设计多维奖励函数将战术动作要素转化为可量化的激励信号,驱动策略网络持续优化教学指导方案。RL 算法通过奖励信号(如出拳精确度、连击成功率等),为学员提供个性化的提示和纠正建议,动态优化训练策略。在强化学习框架基础上,结合模糊逻辑算法对训练过程中的持续小误差进行分析。模糊逻辑系统可以更好地处理动作中的不确定性,为学员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学员的表现数据,在训练过程中持续跟踪学员的表现数据,通过分析历史训练效果与当前状态的关联性,自动寻找最适合学员的训练强度和组合^[15]。系统能够根据学员的长期训练反馈,逐步调整训练计划,使训练效果持续提升。同时,通过建立长期跟踪模型,系统可分析学员能力的变化趋势,预测未来可能遇到的训练瓶颈并提前发现训练过程中的不稳定因素。基于这些分析结果,系统可动态优化训练计划,帮助学员突破能力瓶颈,确保训练进程的科学性与安全性。

训练结束后,系统根据训练中的动作数据、生理数据和虚拟对抗表现生成综合评估报告。报告将以图表、数据汇总等形式展示学员的表现,包括动作精确度、力量输出、反应速度、对抗成功率等指标。评估报告通过可视化工具展示学员的训练表现,教练和学员可以直观地看到学员的进步趋

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)技术的警务实战训练系统,其能够有效提升警察体能与实战技能训练的科学性和有效性。研究结论如下:

1)通过开发相应的机器学习算法,来实时、精确地捕捉学员的动作细节并为教练和学员提供客观、量化的互动训练评估;

2)开发了 3D 视觉与 VR 技术的融合方法,构建高度仿真的训练场景,使学员能够在安全环境中进行高强度对抗训练,提高了训练效率与灵活性。

参考文献:

- [1] YANG Y Z, MENG L F. Physical education motion correction system based on virtual reality technology [J]. International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET), 2019, 14(13): 105.
- [2] CASERMAN P, SCHMIDT P, GÖBEL T, et al. Impact of full-body avatars in immersive multiplayer virtual reality training for police forces [J]. IEEE Transactions on Games, 2022, 14(4): 706-714.
- [3] ZHANG F, LI Y, DUAN Y, et al. Research on MEMS sensor-based police physical fitness assistance training system [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Digital Technology in Education. Hangzhou, China: ACM, 2023: 78-83.
- [4] 曾友美, 宋英. 基于机器视觉技术的运动训练系统设计[J]. 现代电子技术, 2020, 43(5): 150-154.
- [5] 徐卫伟, 程鹏, 李艳君. 基于 Kinect 和虚拟现实康复训练系统设计与实现[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(4): 619-622.
- [6] DONALEK C, DJORGOVSKI S G, CIOC A, et al. Immersive and collaborative data visualization using virtual reality platforms [C]//2014 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Washington, DC, USA: IEEE, 2014: 609-614.
- [7] 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, 2022, 23(11): 22278-22289.
- [8] 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.

(下转第 31 页)

从图5可以看出:加工点和镜像点的机器人制孔末端执行器位置相对于镜像平面对称,同时镜像得到的机器人目标点框架的末端法向量关于参考平面对称,即实际镜像机器人的制孔工艺角度与期望一致。因此通过本文提出的机器人镜像制孔运动规划算法,能够适用于在两机器人底座和参考工件坐标系位置和方向均发生变化的情况下,仅对两机器人 base 和镜像平面法向量进行标定,即可求解并生成镜像机器人的制孔加工轨迹,避免了镜像端机器人的重复示教过程,极大地提高了机器人的编程效率。

3 结语

本文针对 IRB6700 机器人通过 DH 参数法建立了运动学方程,进而利用蒙特卡罗法求解了机器人的工作空间。通过分析建立双机器人镜像制孔的运动学模型,完成了制孔点位姿的镜像运动规划,实现了针对不同机器人位姿,参考任意平面生成镜像制孔机器人的运动轨迹。搭建了双机器人镜像制孔工作站,对镜像运动规划算法进行了验证。结果表明:机器人的镜像运动规划算法准确可靠,能够满足机器人镜像制孔的需求,较大地提高了机器人自动制孔作业的效率 and 精度。

参考文献:

- [1] 刘艳梅,吕笛. 飞机装配机器人制孔路径规划与算法研究实现[J]. 机电工程技术,2022,51(10):61-64.
- [2] 董松,郑侃,孟丹,等. 大型复杂构件机器人制孔技术研究进展[J]. 航空学报,2022,43(5):2,31-48.
- [3] SUN L F, LIANG F Y, FANG L J. Design and

performance analysis of an industrial robot arm for robotic drilling process [J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application,2019,46(1):7-16.

- [4] FROMMKNECHT A, KUEHNLE J, EFFENBERGER I, et al. Multi - sensor measurement system for robotic drilling[J]. Robotics and Computer - Integrated Manufacturing,2017,47:4-10.
- [5] BI Y B, LI Y C, JIANG Y H, et al. An industrial robot based drilling system for aircraft structures[J]. Applied Mechanics and Materials,2013(433/434/435):151-157.
- [6] 王龙飞. 飞机结构机器人自动制孔的误差补偿技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
- [7] MEI B, ZHU W D. Accurate positioning of a drilling and riveting cell for aircraft assembly [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2021,69:102112.
- [8] GAO G B, SUN G Q, NA J, et al. Structural parameter identification for 6 DOF industrial robots[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2018,113:145-155.
- [9] RAZA K, KHAN T A, ABBAS N. Kinematic analysis and geometrical improvement of an industrial robotic arm[J]. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 2018,30(3):218-223.
- [10] 颜双权,胥建成. 工业机器人复杂 B 样条曲线轨迹控制精度补偿[J]. 机械制造与自动化,2023,52(5):32-35.
- [11] 鹿珂珂,刘陵顺,唐大全. 旋转四元数表达约定判别方法及应用探讨[J]. 北京理工大学学报,2023,43(6):657-664.

收稿日期:2024-01-15

(上接第21页)

- [9] BÉZENAC E, RANGAPURAM S S, BENIDIS K, et al. Normalizing kalman filters for multivariate time series analysis[J]. Advances in Neural Information Processing Systems,2020,33:2995-3007.
- [10] TAGNE E F, KAMDJOU H M, EL AMRAOUI A, et al. A lossless distributed data compression and aggregation methods for low resources wireless sensors platforms[J]. Wireless Personal Communications, 2023, 128(1):621-643.
- [11] LIN Y Q, JIAO X Y, ZHAO L. Detection of 3D human posture based on improved mediapipe[J]. Journal of Computer and Communications,2023,11(2):102-121.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] ALI ASAD RIZVI S, LIN Z L. Reinforcement learning-based linear quadratic regulation of continuous-time systems using dynamic output feedback [J]. IEEE Transactions on Cybernetics,2020,50(11):4670-4679.
- [15] SAPOUNTZI A. Automatically assessing student mastery and designing optimal stopping policies [D]. [S.I.]:VU E-Publishing,2024.

收稿日期:2025-02-11