

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.005

# 机器人制孔系统自主镜像运动规划研究

杨帆<sup>1</sup>, 田威<sup>2</sup>, 戴家隆<sup>2,3</sup>

(1. 陕西飞机工业有限责任公司, 陕西 汉中 723213;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

3. 江苏航鼎智能装备有限公司, 江苏 南京 211153)

**摘要:** 针对机器人镜像制孔的运动规划问题, 通过 DH 参数法建立机器人的运动学方程, 利用蒙特卡罗法求解机器人的工作空间, 为机器人镜像制孔的运动规划奠定基础。基于运动学理论设计一种机器人镜像制孔运动规划算法, 针对不同的机器人加工轨迹参考任意平面生成镜像机器人制孔加工点的位姿, 实现机器人镜像制孔的自动运动规划。在 RobotStudio 中建立机器人镜像制孔工作站, 验证镜像运动规划的可行性, 极大地提高了机器人制孔的效率和质量。

**关键词:** 制孔机器人; 运动学分析; 自动制孔; 镜像运动规划; 离线编程

**中图分类号:** TP242    **文献标志码:** B    **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0027-05

## Research on Autonomous Mirror Motion Planning of Robot Drilling System

YANG Fan<sup>1</sup>, TIAN Wei<sup>2</sup>, DAI Jialong<sup>2,3</sup>

(1. Shanxi Aircraft Industry Company Limited, Hanzhong 723213, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Jiangsu Hangding Intelligent Equipment Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

**Abstract:** Focusing on the motion planning of robot mirror drilling, the kinematic equation of the robot was established by the DH parameter method, and the Monte Carlo method was applied to calculate the robot's workspace, laying the foundation for the motion planning of robot mirror hole making. A robot motion planning algorithm of mirror drilling was designed based on kinematic theory, generating the pose of mirror robot drilling points for different robot machining trajectories by referencing any plane, thus the automatic motion planning for robot mirror drilling being achieved. A robot mirror drilling workstation was completed in RobotStudio, which verifies the feasibility of image motion planning and greatly improves the efficiency and quality of robot drilling.

**Keywords:** drilling robot; kinematic analysis; automatic drilling; mirror motion planning; off-line programming

## 0 引言

随着工业 4.0 的推出, 制造业对先进的机器人自动制孔技术需求逐渐增大。在制孔领域尤其是航空航天结构件中存在大量的连接孔和铆接孔, 采用传统的人工钻铆等制孔方式, 效率低且极度依赖经验, 制孔的质量也难以保证<sup>[1-2]</sup>。这些问题会严重影响飞机的整体装配水平且在加工过程中存在较大的安全隐患, 已难以满足越来越高的制造工艺需求。而通过机器人自动制孔技术, 能够减少编程工作量从而较大地缩短生产周期, 同时减小人工操作误差以减少应力集中, 提高飞机结构件的抗疲劳性能及寿命<sup>[3]</sup>。

目前国外的机器人自动制孔技术相对成熟,

如为各大飞机制造公司提供自动钻铆设备的美国 GEMCOR 公司和早在 2009 年便研制出集制孔、送钉和铆接功能于一体的机器人自动钻铆系统的德国 BROETJE 公司<sup>[4]</sup>。国内针对机器人自动制孔系统的研究起步较晚, 近年来沈飞、哈飞等研究所以及一些拥有航空航天背景的院校对机器人制孔技术进行了深入研究, 取得了相对显著的成果<sup>[5-7]</sup>。然而目前机器人自动制孔仍存在编程效率低的问题。因此本文提出了一种双机器人镜像制孔的运动规划方法, 旨在避免重复的机器人编程操作从而提高生产效率。本文首先分析并建立机器人的运动学方程, 然后基于运动学的矩阵变换将工件一侧的点位对称生成镜像面机器人制孔点的位姿, 实现机器人镜像制孔的自动运动规划。

**第一作者简介:** 杨帆(1987—), 男, 陕西宝鸡人, 工程师, 硕士, 研究方向为飞机数字化装配, yangfan0016@163.com。

## 1 机器人运动学分析

### 1.1 建立运动学方程

对制孔机器人进行运动规划,首先要建立机器人的运动学模型。IRB6700 机器人为 6 自由度串联结构,如图 1 所示。采用改进 DH 参数法建立机器人运动学方程<sup>[8]</sup>,其中关节转角  $\theta$ ,相邻关节间距  $d$ ,连杆长度  $a$ ,连杆扭角  $\alpha$  和关节范围参数如表 1 所示。

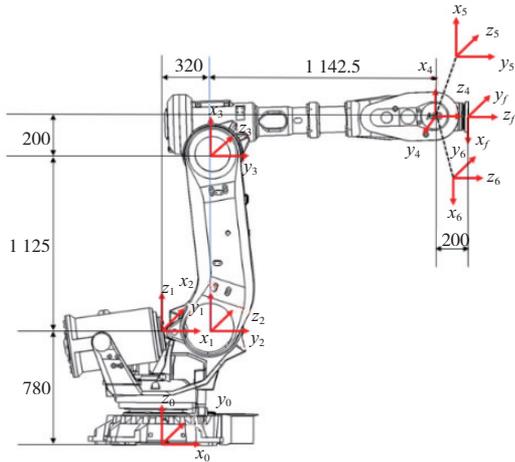


图 1 IRB6700 机器人坐标系标定

关节	$\theta/(\circ)$	$d/\text{mm}$	$a/\text{mm}$	$\alpha/(\circ)$	关节范围/ $(\circ)$
1	0	780.0	0	0	-170~170
2	-90	0	320	-90	-65~85
3	0	0	1 125	0	-180~70
4	0	1 142.5	200	-90	-300~300
5	0	0	0	90	-130~130
6	-180	0	0	-90	-360~360

机器人的正运动学是在已知机器人关节空间各轴角度的情况下来求解机器人末端的位姿,即将关节空间的关节变量转换为笛卡儿空间坐标系中机器人的末端位姿。DH 参数标定后,通过相邻坐标系之间的逐级齐次变换<sup>[9-10]</sup>,即将各相邻关节的齐次变换矩阵连乘,来建立机器人的正运动学方程:

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & w_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & w_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & w_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

由于机器人 6 轴的坐标系标定在腕部,用  ${}^F_6T$  表示机器人 6 轴到法兰的齐次变换矩阵,  ${}^F_{TCP}T$  表示法兰到制孔末端执行器的齐次变换矩阵,则制孔机器人末端执行器在基坐标系下的位姿即可通过如下矩阵变换求得:

$${}^0_{TCP}T = {}^0_6T {}^F_6T {}^F_{TCP}T = {}^0_6T \begin{pmatrix} \cos(\pi/2) & 0 & \sin(\pi/2) & 148.234 \\ 0 & 1 & 0 & -0.210 \\ -\sin(\pi/2) & 0 & \cos(\pi/2) & 164.500 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

### 1.2 工作空间求解

在进行制孔机器人的运动规划时需要考虑机器人的工作空间,以保证机器人合理的姿态调节和可达性。

在建立运动学正解方程后使用蒙特卡罗法求解工作空间,在机器人的各个关节限制范围内随机取值,每随机取值一个关节角度,即可得到一个表示末端的空点,当取值数量足够大时就能得到代表近似机器人工作空间的点云。根据各关节运动限制范围取值,采用蒙特卡罗法在 Matlab 中编辑程序,定义采样数量为 100 000,调用绘图命令 plot 函数随机输出这些正解得到的点位,运行程序进行仿真得到机器人的工作点云空间如图 2 所示。可以看出在  $xOy$ 、 $yOz$ 、 $xOz$  以及三维空间中

的点云分布均匀,机器人末端制孔执行器能够到达的区域与点云空间尺寸对应,方便后续为机器人镜像制孔进行运动规划。

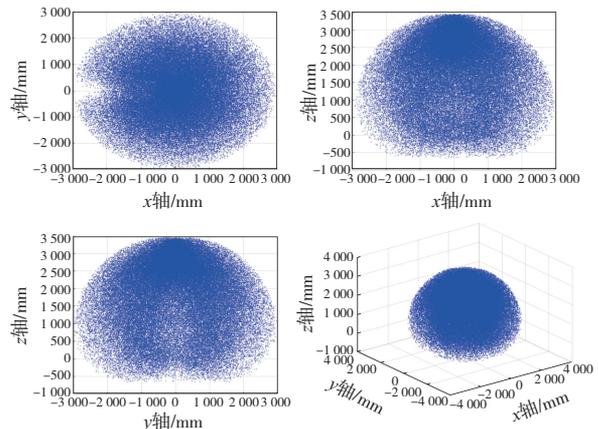


图 2 机器人工作空间点云图

## 2 双机器人镜像运动规划

前文求解了机器人的运动学模型和工作空间,以便于根据实际的制孔任务对机器人进行运动规划。在不同的制孔加工任务中,考虑到机器人基座和工件坐标系的相对位姿不固定,实际加工过程中两机器人在工件坐标系下可能呈非镜像对称状态。因此在每次制孔加工时两机器人基坐标系相对位姿发生改变的情况下,针对机器人制孔任务进行镜像运动规划。建立在镜像约束下的双机器人制孔加工运动规划模型,如图3所示。制孔点位相对于加工平面镜像对称,两机器人的基坐标系和镜像平面在每次加工任务开始前重新进行标定。

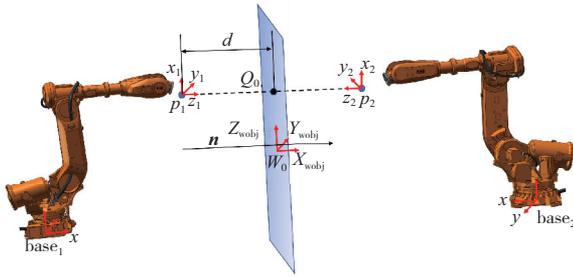


图3 双机器人镜像运动规划

$p_1$ 和 $p_2$ 为关于镜像平面对称的加工点位, $base_1$ 和 $base_2$ 分别为两机器人的基坐标系, $W_0$ 为工件坐标系, $Q_0$ 为加工孔位在镜像平面的投影。则 $p_1$ 在基坐标系 $base_1$ 下的位姿矩阵可以用 ${}^{base_1}T_{p_1}$ 表示,工件坐标系 $wobj$ 在基坐标系 $base_1$ 下的位姿矩阵可以用 ${}^{base_1}T_{wobj}$ 表示,可以得到如下运动学方程:

$${}^{base_1}T_{p_1} {}^{p_1}T_{p_2} = {}^{base_1}T_{base_2} {}^{base_2}T_{p_2} \rightarrow {}^{base_2}T_{p_2} = ({}^{base_1}T_{base_2})^{-1} \cdot {}^{base_1}T_{p_1} {}^{p_1}T_{p_2} \quad (3)$$

目前已知两机器人底座的相对位姿 ${}^{base_1}T_{base_2}$ , $p_1$ 点的位姿矩阵 ${}^{base_1}T_{p_1}$ 可以通过机器人1示教获得,工件坐标系的齐次变换矩阵 ${}^{base_1}T_{wobj}$ 通过标定得到。因此仅需求解 $p_2$ 点在 $base_1$ 下的齐次变换矩阵 ${}^{base_1}T_{p_2}$ ,即可得到制孔点相对于任意平面镜像后机器人2的加工目标点 ${}^{base_2}T_{p_2}$ 。

### 2.1 镜像点位置求解

工件坐标系 $wobj$ 在基坐标系 $base_1$ 下的位姿矩阵可以表示为

$${}^{base_1}T_{wobj} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & x_0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & y_0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

标定工件坐标系的 $x$ 轴与镜像平面垂直, $z$ 轴与平面平行,则镜像平面的法向量为 $n = x_{wobj} = (a_{11} \ a_{21} \ a_{31})^T$ ,工件坐标系原点 $W_0(x_0, y_0, z_0)$ 为平面上一点,得到空间镜像平面的方程式为

$$a_{11}(x-x_0) + a_{21}(y-y_0) + a_{31}(z-z_0) = 0 \quad (5)$$

由法向量和平面方程可以求得点 $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 到镜像平面点 $Q_0$ 的垂直距离:

$$d = (a_{11}x_1 + a_{21}y_1 + a_{31}z_1 - a_{11}x_0 - a_{21}y_0 - a_{31}z_0) / \sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2 + a_{31}^2} \quad (6)$$

则点 $p_2$ 相对于基坐标系 $base_1$ 的位置为

$${}^{base_1}P_{p_2} = (x_1 + 2a_{11}d, y_1 + 2a_{21}d, z_1 + 2a_{31}d) \quad (7)$$

### 2.2 镜像点姿态求解

ABB机器人目标点的姿态通过四元数的形式表示,四元数由1个实数单位和3个虚数单位构成,能够用来表示四维空间,解决了欧拉角的万向锁问题<sup>[11]</sup>。然而为了方便坐标系之间的换算,计算过程中机器人的姿态一般由旋转矩阵表示。因此在进行齐次变换前首先将点 $p_1$ 处机器人的姿态四元数 $(q_0, q_1, q_2, q_3)$ 转换为旋转矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} 1-2q_2^2-2q_3^2 & 2q_1q_2+2q_0q_3 & 2q_1q_3-2q_0q_2 \\ 2q_1q_2-2q_0q_3 & 1-2q_1^2-2q_3^2 & 2q_2q_3+2q_0q_1 \\ 2q_1q_3+2q_0q_2 & 2q_2q_3-2q_0q_1 & 1-2q_1^2-2q_2^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

通过机器人示教可以获得在坐标系 $base_1$ 下 $p_1$ 点的姿态,而在进行镜像运动规划时点 $p_1$ 的姿态是通过工件坐标系镜像的,因此应将 $p_1$ 的姿态旋转矩阵参考工件坐标系 $wobj$ 来表示:

$${}^{wobj}R_{p_1} = ({}^{base_1}R_{p_1})^{-1} {}^{base_1}R_{p_1} = ({}^{base_1}R_{wobj})^{-1} {}^{base_1}R_{p_1} {}^{wobj}R_{p_1} \quad (9)$$

然后将 $p_1$ 绕固定工件坐标系 $z_{wobj}$ 方向旋转 $\theta = \pi$ 可得

$${}^{wobj}R_{p_2} = R(Z, \theta) {}^{wobj}R_{p_1} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} {}^{wobj}R_{p_1} \quad (10)$$

将旋转矩阵 ${}^{wobj}R_{p_2}$ 进行正变换得到 $p_2$ 点在坐标系 $base_1$ 下的姿态矩阵:

$${}^{base_1}R_{p_2} = {}^{base_1}R_{wobj} {}^{wobj}R_{p_2} \quad (11)$$

最终得到 $p_2$ 点相对于机器人坐标系 $base_1$ 的齐次变换矩阵为

$${}^{base_1}T_{p_2} = \begin{pmatrix} {}^{base_1}R_{p_2} & {}^{base_1}P_{p_2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

将式(12)代入式(3)中即可求得 $p_2$ 相对于机器人坐标系 $base_2$ 的相对位姿,从而实现机器人制

孔点位的镜像。

根据前面求得的机器人运动学模型可以得到式(13),表示令机器人制孔执行器末端运动到物体坐标系下的*i*点位姿:

$${}^{base_2}_i T = {}^{base_2}_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_6 T {}^6_F T {}^F_{Tep} T \quad (13)$$

将位姿矩阵 ${}^{base_2}_{p_2} T$ 代入 ${}^{base_2}_i T$ ,由下式即可得到机器人执行器末端制孔时对应逆运动学求解的六轴位姿矩阵,从而求得关节空间下制孔目标点对应的机器人各关节角度。

$${}^{base_2}_6 T = {}^{base_2}_i T ({}^6_F T {}^F_{Tep} T)^{-1} \quad (14)$$

### 2.3 镜像仿真验证

为了验证本文双机器人镜像制孔运动规划算法的有效性,依据机器人运动学分析的参数标定并参考机器人工作空间,在 RobotStudio 中搭建机器人镜像制孔工作站,以对制孔的镜像运动规划算法进行验证,该镜像制孔工作站包括两台 IRB6700 型号机器人、制孔末端执行器、镜像平面等。

机器人制孔点位镜像流程如图 4 所示。首先在离线编程软件中标定两机器人的基坐标系  $base_1$ 、 $base_2$  及工件坐标系  $wobj$  的位姿,以确定各坐标系间的齐次变换矩阵和镜像平面的法向量,然后在笛卡儿空间坐标系下使用机器人 1 示教多个不同位姿的制孔加工点位。加工点在  $base_1$  坐标系下的位姿、两机器人基坐标系和工件坐标系的位姿如表 2 所示。将示教的目标点依据上述镜像运动规划算法参考镜像平面进行对称。由 Matlab 计算求解镜像目标点的位置和姿态四元数,然后赋值给 RobotStudio 中机器人 2 的运动指令,将 RAPID 指令同步到机器人镜像工作站生成制孔点及加工轨迹,如图 5 所示。

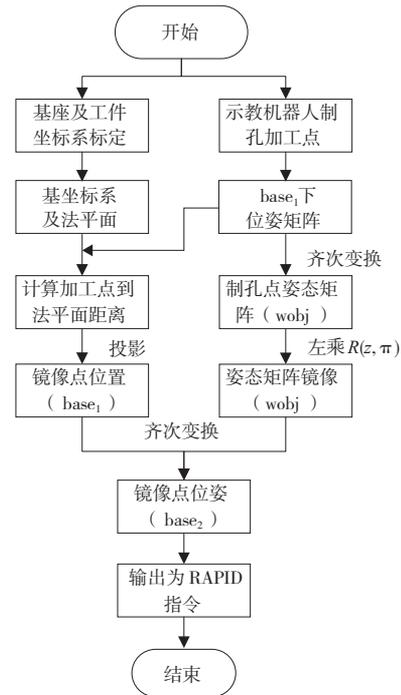


图 4 点位镜像流程

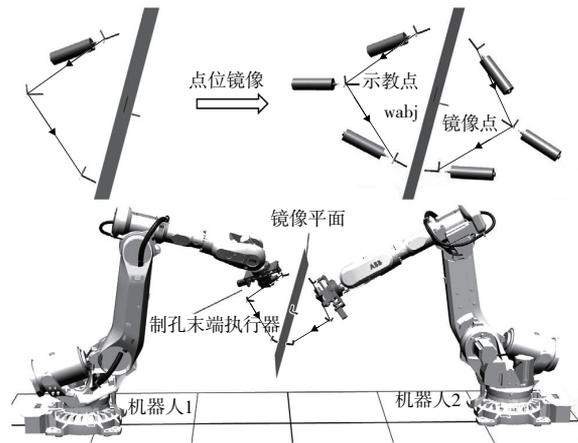


图 5 制孔加工镜像实现

表 2 镜像工作站加工点位姿

目标点	x/mm	y/mm	z/mm	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	参考坐标系
加工点 1	2 024.0	211.0	1 524.8	0.016 5	-0.533 7	0.196 5	-0.822 4	base <sub>1</sub>
加工点 2	1 659.3	211.0	1 267.2	0.008 7	-0.676 0	0.180 8	-0.714 3	
加工点 3	1 901.9	33.9	904.1	0.055 2	-0.837 9	0.172 4	-0.515 0	
wobj	2 100.0	0	1 200.0	0.991 4	0	0.130 5	0	world
base <sub>1</sub>	-2 100.0	0	0	1	0	0	0	
base <sub>2</sub>	2 300.0	200.0	0	0	0	0	1	
镜像点 1	2 071.7	-11.0	1 443.3	0.034 9	0.302 6	-0.194 0	0.932 5	base <sub>2</sub>
镜像点 2	1 884.7	-11.0	1 037.9	0.038 4	0.468 1	-0.176 9	0.864 9	
镜像点 3	2 276.3	166.1	844.7	-0.008 7	0.676 0	-0.180 8	0.714 3	

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