

双臂协作机器人技术的发展与应用综述

季云峰¹, 方丽辉¹, 章子瑶¹, 吕鸿赢¹, 蒋纯国²

(1. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 上海出版印刷高等专科学校 基础教学部, 上海 200093)

摘要: 双臂协作机器人旨在通过类人化的双机械臂构型与协同控制策略, 实现复杂环境下的精细化、协同化作业。为系统梳理该领域研究进展与技术挑战, 对双臂协作机器人的关键技术与发展趋势进行了全面综述。首先, 概述了双臂协作机器人的发展历程、核心特点及典型应用场景; 随后, 重点围绕机械结构设计、驱动系统、运动轨迹规划、多模态感知、人机交互与控制系统6个关键技术领域, 深入分析现有方法的优势与局限; 最后, 进一步结合智能化与通用化两大发展趋势, 梳理了当前研究的主要发展方向。综述为双臂协作机器人的技术研究与系统开发提供了理论参考, 有助于推动其在智能制造、医疗康复及家庭服务等领域的落地应用。

关键词: 双臂协作机器人; 正逆运动学; 运动轨迹规划; 机器人控制系统; 机械结构设计
中图分类号: TP 242 **文献标志码:** A

Review on the development and application of dual-arm collaborative robot technology

Ji Yunfeng¹, Fang Lihui¹, Zhang Ziyao¹, Lü Hongying¹, Jiang Chunguo²

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Department of Foundational Teaching, Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

Abstract: Dual-arm collaborative robots are designed to achieve refined and cooperative operations in complex environments through human-like dual-manipulator configuration and collaborative control strategies. To systematically sort out the research progress and technical challenges in this field, a comprehensive overview of the key technologies and development trends of dual-arm collaborative robots was conducted. First, the development history, core characteristics and typical application scenarios of dual-arm collaborative robots were summarized. Then, focusing on six key technical fields, namely mechanical structure design, actuation system, motion trajectory planning, multimodal

收稿日期: 2025-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62403319)

第一作者: 季云峰(1990—), 男, 副教授。研究方向: 乒乓球机器人。E-mail: ji_yunfeng@usst.edu.cn

通信作者: 蒋纯国(1967—), 男, 讲师。研究方向: 体育机器人。E-mail: jiangcg@usst.edu.cn

引文格式: 季云峰, 方丽辉, 章子瑶, 等. 双臂协作机器人技术的发展与应用综述[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(4): 391-406.

Citation: Ji Yunfeng, Fang Lihui, Zhang Ziyao, et al. Review on the development and application of dual-arm collaborative robot technology[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(4): 391-406.

perception, human-robot interaction and control system, the advantages and limitations of existing methods for these technologies were analyzed in depth. Finally, combined with the two major development trends of intelligence and generalization, the main research directions were sorted out. This review provided a systematic theoretical reference for the technical research and system development of dual-arm collaborative robots, and helps promote their practical applications in intelligent manufacturing, medical rehabilitation, home services and other fields.

Keywords: *dual-arm collaborative robots; forward and inverse kinematics; motion trajectory planning; robot control system; mechanical structure design*

随着计算机技术、电子技术、控制技术和机械技术等领域的飞速发展，机器人技术在近十几年取得了显著进步。特别是在工业制造业领域，各类机器人的广泛应用推动了工业自动化生产的革新，大幅提高了生产效率和工作质量。这些先进的机器人系统能够在复杂多变的任务环境中保持高精度操作，且有效减少了人为操作的失误^[1]。此外，随着生活水平的提高，服务类机器人的需求也在不断增长，机器人技术在医疗康复、娱乐教育以及家庭日常服务等方面展现出巨大潜力^[2]。双臂协作机器人作为一种新型的机器人系统，近年来受到了广泛关注。这种机器人结合了传统工业机器人的高效性和服务机器人的灵活性，具有广阔的应用前景^[3-5]。然而，尽管双臂协作机器人技术研究已取得一定成果，但在双臂协调控制、环境感知及人机交互体验等方面仍面临诸多技术难题，这些问题限制了双臂协作机器人的实际应用范围和发展速度^[6-7]。

本论文旨在深入探讨双臂协作机器人技术的现状，分析现有技术面临的挑战，并展望未来的发展趋势。具体来说，本文将重点研究双臂协作机器人的关键技术，包括机械结构、驱动系统、运动规划、感知系统、交互系统和控制系统等。希望通过对现有研究成果的总结和分析，能够提出新的研究思路和实现路径，为双臂机器人领域的进一步发展提供有益的参考。

1 双臂协作机器人概述

1.1 双臂协作机器人的发展历程

自 1959 年，“工业机器人先驱”乔治·德沃尔和“机器人之父”约瑟夫·恩格尔伯格研发出世界上第一台机器人 UNIMATE 以来^[8]，经过 60 多年

的发展后，机器人的应用领域已经远远超出了最初的工业制造范围，扩展到了军事、医疗、教育和服务等领域。并且机器人的形态从最初的单臂设计逐步演变为更为复杂和多样化的形式，包括双臂机器人、轮式机器人、四足机器人和人形机器人等^[9-10]。

20 世纪 70 年代起，随着机器人技术的快速发展，研究人员开始探索多臂机器人的可能性。双臂协作机器人是一种配备有两个机械臂的机器人系统，能够通过协同控制完成复杂的任务。双臂协作机器人的概念最初源于对人类双臂协作方式的研究，目的是通过模仿人类双臂协作的原理来完成各种工作^[11]。与传统的单臂机器人相比，双臂协作机器人在灵活性和任务执行能力方面展现出显著的优势，能同时进行多任务操作，适应复杂多变的工作环境，并高效完成精细和复杂的作业^[12-13]。早期的双臂协作机器人研究主要集中在机械结构设计、运动学建模和控制算法开发等方面，研究人员通过模拟实验和理论分析，验证了双臂协作机器人的可行性和潜在优势^[14]。图 1 清晰地展示了双臂协作机器人的发展历程。

进入 21 世纪后，随着自动化需求的增加，以及传感器技术、处理器计算能力和控制算法的大幅提升，双臂协作机器人开始从理论走向实践。研究人员开发了一系列关键技术，如力反馈控制、多传感器融合和实时运动规划等，这些技术的进步使得双臂协作机器人能够更加精确地执行任务，并与人类操作员安全地协同工作^[15-16]。美国 Rethink Robotics 公司在 2012 年公开的 Baxter^[17]、瑞士 ABB 公司在 2015 年推出的 YuMi^[18]、日本川崎公司在 2015 年发布的 duAro^[19]，这些都是双臂协作机器人领域的典型代表，在各自的领域展示



图 1 双臂协作机器人发展历程

Fig. 1 Development history of dual-arm collaborative robots

出双臂机器人的巨大潜力和应用价值。

1.2 双臂协作机器人的特点及优势

双臂协作机器人采用了仿生学的设计思想, 每条机械臂有多个自由度, 能够模仿人类手臂的动作。这种设计方式极大地提升了机器人的灵活性, 使其能够完成单臂机器人难以实现的复杂任务^[20]。此外, 双臂机器人集成了先进的传感器和高精度的运动控制算法, 能够实现对环境的精确感知和实时响应, 保证了机器人在执行任务时能够达到毫米级甚至亚毫米级的控制精度, 使得机器人能够流利完成更为复杂的任务^[21]。

在工业领域, 双臂协作机器人的应用显著提升了生产线的操作速度, 缩短了产品生产周期, 提高了产出率。在降低人工成本的同时, 能够确保产品质量的统一和可靠性。正因机器人带来的这些优势, 机器人将逐渐替代单调、重复且有害的工作岗位, 在保护员工健康的同时, 推动产业

结构的转型^[22]。

在非工业领域, 双臂协作机器人也拥有极大的优势。医疗领域中, 辅助医生进行手术操作, 助力患者的康复治疗^[23]; 教育领域中, 模拟真实场景, 增强学习体验, 为老师和学生提供理论与实践相结合的平台^[24]; 科研实验中, 执行复杂任务, 提高研究效率等^[25]。

表 1 总结了双臂协作机器人的主要特点及优势, 展示了其不同领域的广泛应用和卓越性能。凭借优秀的灵活性、高精度和高效的协作能力, 双臂协作机器人在工业制造和非工业领域均发挥着日益重要的作用, 并有望在未来进一步拓展其应用范围。

1.3 双臂协作机器人应用现状

双臂协作机器人已广泛应用于工业生产、教育娱乐、医疗康复和家庭服务等领域。在工业生产领域, 双臂协作机器人常用于装配、焊接、搬

表 1 双臂协作机器人特点及优势分析

Tab. 1 Analysis of characteristics and advantages of dual-arm collaborative robots

特点/优势	具体描述	应用场景
灵活性 ^[26]	支持快速重新配置和编程, 执行多种复杂动作与姿态	药物生产制造装配、电子产品的精密组装
安全性 ^[27]	具备碰撞检测、速度限制和力矩限制等, 确保设备安全稳定	食品加工中的切割和分拣任务、医疗手术辅助
精准度 ^[28]	配备高分辨率传感器和高精度控制算法	半导体制造中的芯片封装、医疗手术、物流分拣
适应性 ^[29]	可根据任务需求和环境变化进行快速调整和优化	工业制造中的多工位任务、教育培训辅助工具
可靠性 ^[30]	容错处理, 能长时间稳定运行, 减少故障和维护成本	产品加工时的物料搬运、自动化仓储
协作能力 ^[31]	与人类和其他设备有效配合, 优化任务处理	货物分拣、装载和卸载等, 家庭日常服务

运和检测等复杂的操作任务；在教育娱乐领域，不仅可以利用机器人进行编程教学、机械控制演示以及协同操作练习，激发学生的动手能力和创造力，还能让机器人进行舞台节目表演等；在医疗康复领域，双臂协作机器人用来辅助医生进行

精密的外科手术，或帮助病人进行康复训练；在家庭服务领域，双臂协作机器人不仅可以执行日常家务和照顾老人小孩，还能协助残障人士衣食住行等场景^[32]。表2对双臂协作机器人的典型应用场景案例进行了分析总结。

表 2 双臂协作机器人典型应用现状分析

Tab. 2 Analysis of typical applications of dual-arm collaborative robots

应用	工作图片	关键技术	主要优势	面临挑战
工业生产 ^[33-34]		力控技术、机器视觉、路径规划	提高生产效率、增强安全性、降低人工成本	技术成本高、维护难度大
教育娱乐 ^[35-36]		人机交互、语音识别、动作捕捉	增强学习体验、提高互动性、激发学生兴趣	缺乏教学内容标准、用户体验需不断改进
医疗康复 ^[37-39]		精密控制、远程操控、柔顺控制、力学建模	减轻医护负担、提高治疗效果、实现个性化治疗	监管标准待完善、患者接受度有待提高、伦理问题
家庭服务 ^[40-41]		自主导航、物体识别、情感理解、健康监测	改善生活质量、提供个性化服务、增强安全性	成本高昂、隐私保护、人机情感交流

2 双臂协作机器人关键技术

双臂协作机器人系统并非单一的独立单元，而是一个高度复杂的集成体系，由多个相互协作的子系统共同构成，以协同完成预定任务。图2为双臂协作机器人系统基础框架，图中的子系统包括但不限于机械结构、驱动系统、轨迹规划、感知系统、控制系统以及人机交互系统。机械结构将独立的硬件单元组装成一个功能完备的双臂机器人整体；驱动系统为双臂机器人的控制提供动力来源；运动轨迹规划实现机器人从起始到目标位置的最优路径选择；感知系统作为双臂机器人的感觉器官，实时捕捉并反馈外部环境信息；控制系统扮演着双臂机器人大脑的角色，负责协调各个组件的运作，特别是双臂之间的协调控制；人机交互系统则是双臂机器人与人类进行沟

通和协作的桥梁^[42]。

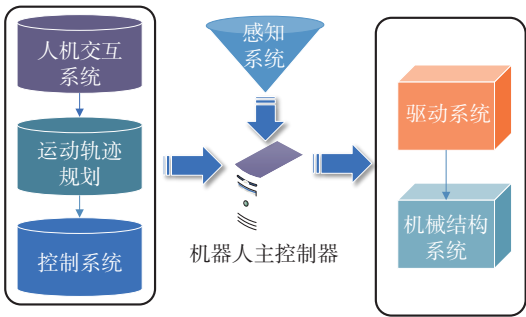


图 2 双臂协作机器人系统框架

Fig. 2 Framework of dual-arm collaborative robot system

2.1 机械结构设计

双臂协作机器人的机械机构是机器人系统的基本组成部分，其作用类似于人体的骨骼和肌肉，为机器人提供支撑并实现运动。从机械结构的角度来看，双臂协作机器人可以分为基于串联

臂设计、基于并联臂设计和串并混联设计^[43]。串联臂的特点是每个关节的运动都会影响后续关节的位置, 即一个关节轴的运动改变其他关节轴的原点; 而并联臂采用并联结构, 使得各关节的运动相互独立, 一个关节轴的运动不会影响其他关节轴的原点^[44]。

在对机器人的机械结构设计时, 需根据机器人的目标工作场景和任务需要对其正逆运动学及其他因素进行计算分析, 从而确定具体的结构形态和关节类型及长度等参数。正运动学是指已知各关节的角度或位移参数, 求解末端执行器在笛卡尔坐标系下的位置和姿态。解决这个问题的经典方法是使用 Denavit-Hartenberg (D-H) 参数法, 该方法为后续的正逆运动学分析提供了理论基础^[45]。通过定义一系列坐标系来描述每个连杆相对于前一个连杆的位置和方向, 并建立相应的转换矩阵^[46]。对于第*i*个关节到第*i*+1个关节的变换, 可以用以下4×4的齐次变换矩阵表示:

$$T_i^{(i-1)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \sin \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \sin \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: θ_i 是围绕当前坐标系*z*轴旋转的角度; d_i 是沿着当前坐标系*z*轴移动的距离; a_i 是沿着当前坐标系*x*轴移动的距离; α_i 是围绕当前坐标系*x*轴旋转的角度。依次计算每个关节间的变换矩阵并相乘, 即可获得基座到末端执行器的总变换矩阵。

通过欧拉角表示的姿态, 用如下齐次变换矩阵描述为

$$T_{\text{Euler}}(\phi, \theta, \psi) = T \quad (2)$$

$$T_{\text{Euler}}(\phi, \theta, \psi) = R_z(\phi) \times R_y(\theta) \times R_z(\psi) \quad (3)$$

$$T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $T_{\text{Euler}}(\phi, \theta, \psi)$ 是由欧拉角 (ϕ, θ, ψ) 表示的末端执行器姿态对应的齐次变换矩阵; T 表示在基坐标系下的总齐次变换矩阵; $R_m(n)$ 是绕*m*轴旋转角度*n*的旋转矩阵, $m \in \{x, y, z\}$; $r_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$ 为末端执行器在基坐标系下旋转矩阵的方向余弦元素。

根据旋转关系, 可以推导出:

$$\begin{cases} \theta = \arcsin(-r_{31}) \\ \phi = \arctan^2(r_{21}, r_{11}) \\ \psi = \arctan^2(r_{32}, r_{33}) \end{cases} \quad (5)$$

通过上述公式, 在已知矩阵*T*各元素的情况下, 即可求解出其欧拉角 θ 、 ϕ 和 ψ 的值, 通过欧拉角表示, 可以直观地描述末端执行器的姿态。

然而, D-H方法依赖坐标系且可能存在奇异性的问题, 为了更加直观地表示多自由度的双臂机器人连杆和关节的运动关系, 在机器人的正运动计算中, 通过基于李群(Lie group)和李代数(Lie algebra)理论的 PoE (product of exponentials) 方法可以很好地处理这个情况^[47]。它的核心思想是将机器人关节的运动表示为多个指数变换的乘积, 从而计算末端执行器的位姿。

在 PoE 方法中, 机器人的正运动学关系可表示为

$$T(\theta) = e^{\hat{\xi}_1 \theta_1} e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} \dots e^{\hat{\xi}_n \theta_n} M \quad (6)$$

式中: $T(\theta)$ 为末端执行器在基坐标系中的位姿矩阵(即三维空间中刚体的齐次变换矩阵); M 为初始位姿矩阵; $e^{\hat{\xi}_i \theta_i}$ 表示关节*i*处的运动; $\hat{\xi}_i$ 是关节*i*的旋量坐标, 可以用6维向量 $\xi_i = (\omega_i, v_i)$ 表示:

$$\xi_i = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_i & v_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: ω_i 为关节的旋转轴; v_i 为关节线速度; $\hat{\omega}_i$ 是 ω_i 对应的反对称矩阵, 计算公式为

$$\hat{\omega}_i = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

运动学求解方面, 串联臂的正运动学较为简单, 但逆运动学的求解复杂度较高; 相反, 并联臂的正运动学计算较为困难, 而逆运动学求解相对简单。

在某些需要高精度和高刚性的特定工作场景中, 并联臂设计的双臂协作机器人更具优势。图3展示的是 Yang 等^[48]采用并联双臂技术设计的机器人, 该机器人专为 3C 产品装配而打造。与串联双臂机器人相比, 该设计有效克服了对精密电子设备加工时的局限性, 提供了更高的操作精度和灵活性。然而, 在实际应用中, 由于串联臂设计在灵活性和扩展性方面表现出色, 能够适应更为广泛的应用场景, 因此, 当前主流的双臂协作机器人的研究和发展主要倾向于采用类人型的串联臂设计^[49-51]。

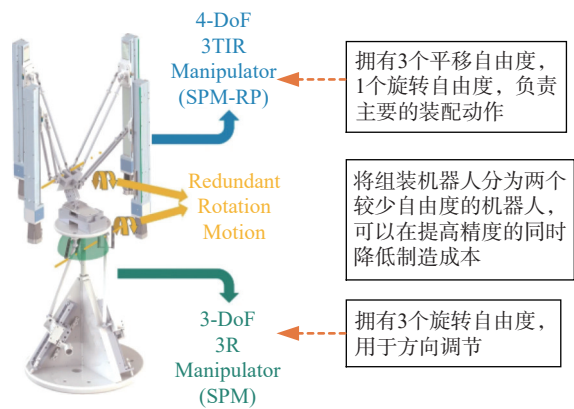


图3 并联双臂机器人^[48]

Fig. 3 Dual-arm parallel robot^[48]

在双臂协作机器人的机械设计中，除了上述的整体结构布局外，驱动关节和减速器等关键部件的选择与设计同样是重要的因素。现代双臂协作机器人的机械臂通常采用多关节设计，这种设计能够提供更大的自由度和灵活性^[52-53]。当前主流

的关节设计方案是将减速器、电机、传感器以及控制电路等组件集成在关节内部，形成一体式的模块化关节。这种集成设计不仅简化了装配过程，还提高了系统的可靠性和维护便利性^[54]。

双臂协作机器人的性能高度依赖于机械臂的设计方式、关节结构和减速器等关键部件的选择。合理的结构设计和关键部件的优化配置，对于实现高效、灵活且可靠的双臂协作至关重要。通过精心设计和选型，双臂协作机器人可以在各种复杂的工作环境中展现出卓越的性能，满足不同行业的需求。

2.2 驱动系统技术

双臂协作机器人的驱动系统，按动力源主要分为液压驱动、气压驱动和电动驱动3大类。根据实际的需求，这些基本驱动方式可以组合成复合式驱动系统^[55-56]。表3展示了这3种驱动方式的对比分析。

表3 机器人驱动方式比较

Tab. 3 Comparison of robot driving modes

类型	优势	不足	应用场景
液压驱动 ^[57-58]	功率密度高、响应快速、控制精度高、输出力矩大	系统复杂、维护成本高、噪声大、能源效率低	重型机械设备、军事装备
气动驱动 ^[59-60]	结构简单、维护方便、无污染、安全性高、成本较低	控制精度低、输出力较小、能源效率低、动态响应慢	包装和装配流水线
电动驱动 ^[61-62]	能源效率高、控制精度高、低噪声、维护成本低	功率较低、输出力较小、依赖电力供应	自动化生产线、精密仪器

波士顿动力的Atlas机器人早期采用了液压驱动系统，因液压驱动能够提供强大的功率输出、精确的运动控制以及良好的负载能力，使得Atlas能够执行复杂的动作，如跑步、跳跃和翻转等，以及在不平坦的地形上保持动态平衡^[63]。然而，由于液压驱动存在的种种弊端，且电机技术和控制算法的不断进步，电动驱动的性能和应用范围显著扩大，波士顿动力Atlas机器人也逐渐转向电动驱动系统^[64-65]。电动驱动相比液压驱动具有更高的能效、更低的噪音和更简化的系统结构，逐渐成为现代机器人设计中的主流选择^[66]。

2.3 运动轨迹规划

机械臂运动轨迹规划是双臂协作机器人中的核心技术之一，其主要功能是实现机械臂从起始位置平滑、稳定地运动到目标位置。并且在机械臂的运动过程中，不断优化臂的速度和加速度等参数^[67]，在规避双臂自身碰撞和外界障碍物的同时，找到降低损耗的最优路径^[68]，以实现双臂高效、准确的执行任务。

笛卡尔空间规划、关节空间规划和快速探索随机树是机械臂中常见的轨迹规划策略。笛卡尔空间规划需要将轨迹上的每一个点都从笛卡尔空间转换到关节空间，这涉及大量的逆运动学计算。而关节空间轨迹规划只需将起始点、路径点和终止点进行逆运动学求解^[69]。

2.3.1 关节空间规划

在关节空间规划中，路径的定义和规划是基于机械臂的关节角度，而非末端执行器在任务空间中的位置。关节空间规划通过直接设定从起始点到终点的关节角度变化序列来实现，无需详细考虑机械臂在工作空间内的具体路径形状，计算较为高效，适合路径精度要求不高、以速度和效率为主的任务^[70-71]。然而，由于规划过程中不直接考虑末端执行器在任务空间中的路径形状，关节空间规划在路径平滑性和避障能力方面存在一定的局限性^[72]。

五次多项式规划是机械臂关节空间规划中的经典方法之一，特别适用于需要平滑起停运动的

场景。通过设计五次多项式, 可以精确控制机械臂关节的位移、速度和加速度, 从而确保运动的平滑性和连续性^[73]。这在双臂协作机器人执行高精度任务时至关重要, 例如在精密装配场景中, 关节运动的平滑性可以有效减少机械臂振动和误差。

五次多项式规划的一般形式为

$$q(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 + c_5 t^5 \quad (9)$$

式中: t 为时间; $q(t)$ 为关节实时位置; c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 为五次多项式恒定系数, 由运动起始与终止时刻的位置、速度、加速度边界条件联立求解获得。

矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & t_s & t_s^2 & t_s^3 & t_s^4 & t_s^5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2t_s & 3t_s^2 & 4t_s^3 & 5t_s^4 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_s & 12t_s^2 & 20t_s^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q(0) \\ q(t_s) \\ q'(0) \\ q'(t_s) \\ q''(0) \\ q''(t_s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: t_s 为整个运动的时间; $q(0)$ 为起始位置; $q(t_s)$ 为目标位置; $q'(0)$ 为起始速度; $q'(t_s)$ 为目标速度; $q''(0)$ 为起始加速度; $q''(t_s)$ 为目标加速度。

通过求解五次多项式矩阵, 即可得到多项式的所有系数 c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 。利用这些系数, 根据初始与终端的位移、速度和加速度条件即可生成符合要求的平滑轨迹。

2.3.2 笛卡尔空间规划

笛卡尔规划主要在工作空间内规划末端执行器的运动路径。与关节空间规划不同, 笛卡尔规划可以直接对双臂机器人末端执行器的位置和姿态控制。这种方法特别适用于要求机器人末端能够精确追踪预定路径的任务, 例如弧焊、搬运以及抓取作业^[74]。

在双臂协作机器人中, 为了确保两臂之间的相对运动协调, 并且末端执行器能够同步执行复杂任务, 笛卡尔规划能够有效减少末端路径的误差, 提升执行精度^[75]。虽然笛卡尔规划在末端执行器的轨迹生成上具备精确控制的优势, 但笛卡尔规划可能导致机器人进入奇异点, 即末端执行器的某些方向的运动能力变得极其有限, 可能导致控制失效或关节运动速度异常。并且, 笛卡尔规划不能保证关节空间中的每个关节运动也是平滑的, 在一些复杂的任务中, 可能会出现关节角度剧烈变化等情况^[76-77]。

如图4所示, 当机械臂从笛卡尔坐标系的点

$p_0(x_0, y_0, z_0)$ 向点 $p_1(x_f, y_f, z_f)$ 运动时, 设沿直线运动速度为 v , 插补时间间隔为 t , 采用定时插补策略实现直线规划。

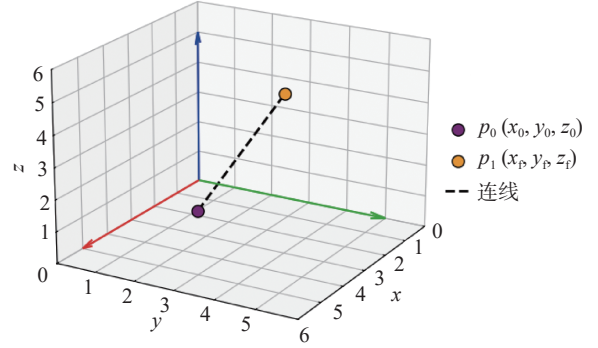


图4 笛卡尔空间目标点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of target points in Cartesian space

图4中, p_0 到 p_1 间的直线长度 L 可通过两点坐标差计算:

$$L = \sqrt{(x_f - x_0)^2 + (y_f - y_0)^2 + (z_f - z_0)^2} \quad (11)$$

对于每个时间间隔 t , 机械臂的运动距离 d 可以通过速度 v 和时间参数 t 计算获得:

$$d = vt \quad (12)$$

通过前面得到的直线长度 L 和运动距离 d , 插补步数计算如下:

$$N = \frac{L}{d} + 1 \quad (13)$$

相邻插补点增量:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{x_f - x_0}{N} \\ \Delta y = \frac{y_f - y_0}{N} \\ \Delta z = \frac{z_f - z_0}{N} \end{cases} \quad (14)$$

插补点坐标:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + i\Delta x \\ y_{i+1} = y_i + i\Delta y \\ z_{i+1} = z_i + i\Delta z \end{cases}, i = 0, 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

2.3.3 最优快速扩展随机树

快速探索随机树 (rapidly-exploring random tree, RRT) 是一种通过快速探索自由空间来构建树结构的算法。它通过不断扩展树来覆盖空间, 直到找到一条使双臂协作机器人能从起始点到目标点的路径^[78]。RRT* 是 RRT 的一个变种, 它通过在树的扩展过程中引入路径优化, 旨在生成更短且更平滑的路径。RRT* 的基本思路是在扩展树的过程中, 不仅寻找最近邻节点进行扩展, 而且不断优化路

径,通过“重新连接”来改进已有路径,从而最终收敛到最优路径^[79-80]。

在RRT*方法中,首先需要指定一个节点为 q_{start} ,加入到树 K 中,并初始化起点累计路径代价 $J(q_{\text{start}}) = 0$ 。设定一个最大迭代次数,并设搜索半径为 r 、目标区域阈值为 δ 。定义采样函数 $S(\cdot)$,用于在配置空间 C_{free} 中随机生成一个点 q_{rand} :

$$q_{\text{rand}} = S(C_{\text{free}}) \quad (16)$$

在树 K 中找到离 q_{rand} 最近的点 q_{near} ,通过距离度量 $d(q_1, q_2)$ 来确定近邻:

$$q_{\text{near}} = \arg \min_{q \in K} d(q, q_{\text{rand}}) \quad (17)$$

沿着 q_{near} 到 q_{rand} 的方向,扩展一个步长为 λ 的新节点 q_{new} 到树 K 中:

$$q_{\text{new}} = q_{\text{near}} + \frac{q_{\text{rand}} - q_{\text{near}}}{\|q_{\text{rand}} - q_{\text{near}}\|} \times \lambda \quad (18)$$

对新节点 q_{new} ,在已存在节点中搜索与其距离小于 r 的节点集合 Q_{near} :

$$Q_{\text{near}} = \{q \in K | d(q, q_{\text{new}}) < r\} \quad (19)$$

然后为 q_{new} 选择最优父节点 q_{parent} ,使得从起点到 q_{new} 的路径代价 $J(q)$ 最小:

$$q_{\text{parent}} = \arg \min_{q \in Q_{\text{near}}} (J(q) + d(q, q_{\text{new}})) \quad (20)$$

式中: $J(q)$ 为起点到节点 q 的累计路径代价; $d(q, q_{\text{new}})$ 为节点 q 到 q_{new} 的运动代价。

完成父节点选择后,需对 Q_{near} 中的所有节点进行路径重连优化。若以 q_{new} 为父节点,能使累计路径代价 $J(q)$ 更小,则更新父节点为 q_{new} ,并更新其累计代价。重连操作保证了RRT*在迭代过程中持续优化已有路径,最终收敛到全局最优。

判断是否找到可行路径时,若新节点 q_{new} 与目标点 q_{goal} 的距离小于阈值 δ ,说明已到达目标区域,可回溯完整路径:

$$d(q_{\text{new}}, q_{\text{goal}}) \leq \delta \quad (21)$$

即可通过从目标点回溯到起点,沿着树 K 中的父节点,最终生成完整的路径。

在上述的轨迹规划方法中,关节空间规划的计算直接在关节角度空间进行,无需复杂变换,计算量小,速度快。但其末端执行器的精度较低,末端轨迹易不可控,无法避障。笛卡尔空间规划的末端轨迹精确可控,易于与人机交互任务

结合,但计算复杂,且可能存在奇异位形、关节运动可能不平滑的问题。RRT*在高维空间中有强大的避障能力和概率完备性,但其计算速度慢,生成的轨迹路径并非最优,且不平滑。

双臂协作机器人轨迹规划涉及多种技术与方法,除五次多项式规划、笛卡尔空间规划和采样基路径规划外,还包括任务空间轨迹规划和动态规划等策略^[81]。在实际应用中,双臂协作机器人的轨迹规划应紧密围绕具体的作业场景和工作任务展开分析。

2.4 感知技术

双臂协作机器人的感知系统是整体机器人中的重要组成部分,对于维持机器人高效、精确操作起着至关重要的作用。感知系统通过传感器获取外界环境和机器人自身状态,确保机器人在执行复杂任务时能够精确感知环境变化并作出调整。双臂协作机器人感知系统主要包括视觉、触觉和听觉等多种感知技术^[82-84]。

2.4.1 视觉感知技术

通过摄像头和深度传感器等设备,结合计算机视觉技术,不仅能够构建双臂协作机器人工作环境的三维模型,还能精准识别物体的形状、位置和姿态。基于视觉感知技术,双臂协作机器人还能够实时调整运动轨迹,适应动态变化的工作环境。视觉系统由于具备诸多优势,在双臂协作机器人系统中得到了广泛应用。图5(a)所示为Lee等^[85]基于视觉感知技术设计的一款双臂协作机器人。然而,视觉系统的效果易受环境光的影响,在复杂或遮挡环境中,物体的识别和定位变得困难,且算法和硬件的性能也会限制视觉感知的广度和深度^[86]。

2.4.2 触觉感知技术

触觉感知技术的核心是将压力、温度和力距等传感器获取的数据融合计算,使机器人能精确识别出物体的表面特性、接触力及环境状态相关的数据。触觉感知对于实现精密操作、物体识别和人机交互等任务至关重要。如图5(b)所示的是Turlapati等^[87]研发的一款基于触觉感知技术的双臂协作机器人。但触觉感知系统的维护成本较高,受传感器的灵敏度和分辨率影响较大,在不同情况下可能出现波动,表现不稳定^[88]。

基于上述单一技术方案的局限性,为提升双臂机器人系统在复杂环境中的稳定性和任务执行

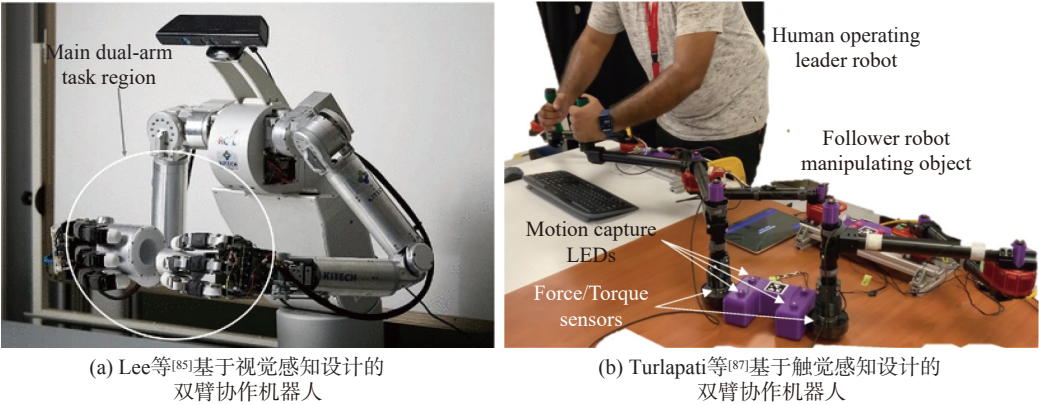


图 5 双臂协作机器人感知技术的应用

Fig. 5 Application of sensing technology for dual-arm collaborative robots

的精度与可靠性，在实际的感知系统中，常采用多传感器协同感知技术。在双臂协作机器人系统中集成多种传感器，如视觉、触觉、速度和位置等传感器，并结合特定算法对数据融合计算，实现机器人全面感知环境，从而克服单一感知单元的局限性，显著增强系统的稳定性和任务适应能力^[89]。

2.5 人机交互技术

双臂协作机器人的交互系统是实现高效人机协作的关键组件。该系统不仅支持双臂协作机器人与操作人员之间的直观沟通，还确保了机器人能够安全、有效地与其他设备及周围环境进行交互。通过高效自然的交互方式，双臂协作机器人能够更精准地理解任务需求，从而增强其自主性和适应能力。这使得双臂协作机器人能够在复杂的工作环境中，与人类及其他设备实现无缝协作^[90]。

双臂协作机器人的交互技术逐渐多元化，国内外针对该项技术提出了诸多的可行方法，包括语音交互、肢体动作交互、触控交互和视觉交互等^[91]。

语音交互是最为自然的人机交互方式之一，双臂协作机器人通过语音识别技术接收控制命令，并通过语音合成技术向用户反馈，这种交互方式特别适用于需要远程操控的场景^[92]。

肢体动作交互则需要依靠摄像头或触觉等传感器，并结合特定的程序处理算法，使得机器人能够准确辨识并理解用户的肢体动作，从而调整其控制方式。图 6 所示为 Chen 等^[93]使用可穿戴的腕戴式相机传感器识别手部轨迹手势并与 YuMi 机器人协作进行文本撰写。

触控交互技术为用户提供了一种直观的途径，通过触控显示设备为机器人设置工作任务、

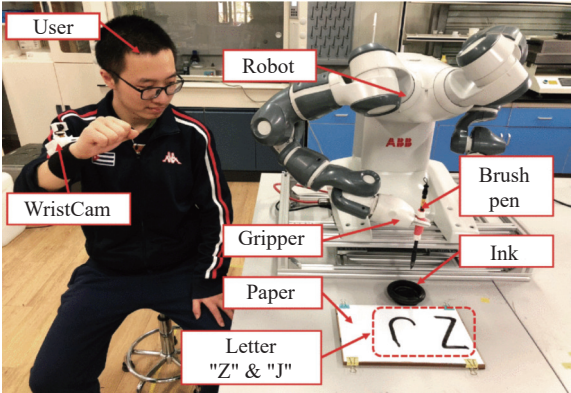


图 6 人机交互控制双臂机器人^[93]

Fig. 6 Dual-arm robot with human-machine interactive control^[93]

调整各项参数，监控机器人的运行状态。系统通过图像、灯光或屏幕显示，将机器人的当前任务状态、操作进度或潜在问题直观地反馈给用户。因触控交互可以快速准确地为双臂机器人设定任务和配置，故而广泛应用于工业生产中^[94]。

在双臂协作机器人中，交互系统的设计还需考虑多机器人的协同工作。此外，人机交互的安全性也是交互系统设计中的重要考量。双臂协作机器人通常与人类共同工作，交互系统需实时检测并响应人类行为，确保工作环境的安全。结合力反馈传感器和视觉感知，机器人能准确识别人类动作，从而自动调整其运动轨迹，避免碰撞^[95]。

2.6 控制系统技术

双臂协作机器人控制系统的核心任务是管理和协调机器人的所有子系统，确保其高效、准确地完成任务。双臂协作机器人比单臂机器人面临更多的控制挑战，特别是双臂协同工作时，须确保两臂之间的运动同步性和协调性^[96]。为此，控制系统必须有效地管理两臂的运动参数，包括位

置、速度、加速度等，保证在复杂任务中的一致性。机器人控制系统主要有集中控制、主从控制、分布式控制3种^[97-98]，表4为3种控制系统的分析总结。

表 4 机器人控制系统分析
Tab. 4 Analysis of robot control system

控制系统类型	优势	不足	应用场景
集中控制 ^[99-100]	结构简单、适合小规模操作、资源集中、维护管理方便	单点故障风险高、扩展性差、整体性能受限于中央处理器	小型机器人系统,工作任务固定的机器人,如焊接机器人
主从控制 ^[101-102]	灵活性与扩展性、集中决策、多机协调、任务分级处理	主控单元负担重、主控失效影响全局、故障诊断和恢复较难	中型机器人系统,多机协调操作场景,如装配机器人
分布式控制 ^[103-104]	模块化设计、易于扩展、支持并行处理、系统健壮性强、故障隔离	网络要求高、成本高、系统复杂、管理难度大	大型机器人系统,如人形机器人、无人机集群

针对拟人化机械臂在复杂环境下的高精度、稳定性和灵活性操作需求，Yang等^[105]设计了一款基于传感器融合技术的遥操作控制系统，旨在提升机械臂的操作效能和可靠性。该系统采用主从控制系统架构设计，设计框图如图7(a)所示，系统分为两个主要层级：上层由先进的嵌入式处理器组成，负责解析操作者的意图并处理来自多种传感器(如摄像头、数据手套、力传感器)的数据；下层则由具体的执行机构构成，包括拟人化的机械臂和灵巧手，它们根据上层传来的指令进行精准的动作执行。在这一架构中，通过使用卡尔曼滤波算法对传感器数据进行预处理，有效地减少了噪声干扰，提升了姿态估计的准确性。该系统特别适用于需要精细操作的应用场景，如工业制造、医疗辅助服务等。

Weng等^[106]设计了一种基于模块化分解与分层控制策略的双臂机器人控制系统。系统架构如

图7(b)所示，该设计借鉴了分布式架构的思想，将复杂的人机交互任务分解为多个独立子系统：感知层(手势识别、多模态感知、视觉跟踪)、决策层(意图分析与任务调度)和执行层(导航与双臂控制)，各模块通过层级化数据流协同工作。系统采用中心协调式调度(HRI模型为核心)，通过标准化接口实现模块间松耦合，支持功能灵活扩展(如新增交互模态或替换视觉算法)，既降低了子系统间的直接依赖，又保障了复杂任务下的全局响应效率。这一设计在保证实时性的同时，为服务机器人功能定制提供了可扩展的架构基础。

控制系统作为双臂协作机器人的中枢神经系统，负责整个机器人的资源调度。为了充分发挥系统的最大性能，设计一个高效、可靠的控制系统至关重要。通过集成多模态感知技术、优化实时任务调度和实现双臂协调控制，并且开发先进的路径规划与避障算法、建立故障检测与恢复机

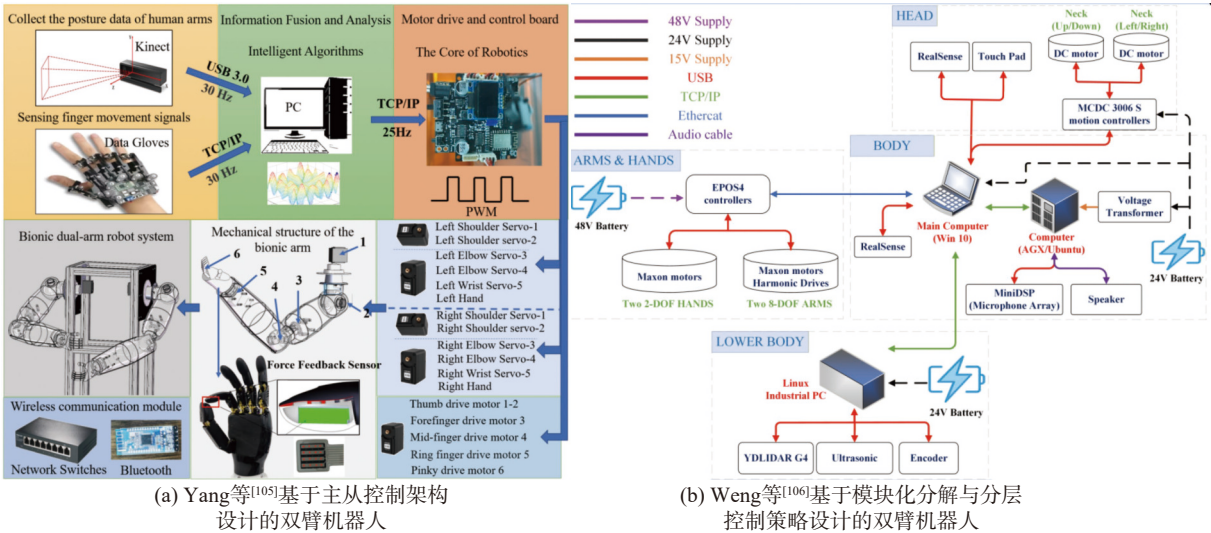


图 7 双臂协作机器人控制系统设计框图

Fig. 7 Block diagram of control system design for dual-arm collaborative robots

制以及提供用户友好的接口等，能够构建一个高效、可靠、灵活的控制系統。这不仅能够显著提高机器人的任务执行效率和精度，还能确保其在复杂环境中的稳定运行，最终实现双臂协作机器人在工业、医疗、服务等领域的广泛应用。

3 双臂协作机器人技术发展趋势

3.1 智能化发展

近年来，强化学习和机器学习等人工智能技术成为研究热点并应用到机器人领域，双臂协作机器人技术也迎来了智能化发展的新阶段。双臂协作机器人在智能化方面的表现可以总结为 3 个方面。

a. 深度学习与强化学习的融合^[107-109]。通过深度学习算法和强化学习技术的融合，双臂协作机器人能够更高效地学习和优化其自身行为模式。这种能力使机器人能够更快速地适应新环境和新任务，且无需大量的手动编程和调试，提高了机器人的自主性和适应性。

b. 自然语言处理与人机交互^[110-111]。自然语言处理技术帮助机器人与人类更加高效、直观地交互。这使得机器人的情绪识别和表达能力更进一步得到提升，能更好地理解 and 适应人类的情感需求，提升用户体验。

c. 自主导航与避障^[112]。通过集成先进的传感器和算法，机器人能够在复杂环境中自主移动，并实时感知和规避障碍物，确保工作任务的顺利进行。这极大提高了机器人的安全性和可靠性。

3.2 通用化发展

当前，机器人行业正朝着通用化的方向发展，这一趋势体现在越来越多的机器人厂商和研究机构致力于开发能够满足多样化应用场景的通用机器人^[113-114]。通用化的发展能提高机器人的适应性和利用率，同时也为用户带来了更高的灵活性和经济价值^[115]。以下是双臂协作机器人在通用化方面的 3 个重要体现：

a. 模块化设计^[116-118]。模块化设计允许用户根据需要更换或升级机器人的功能模块，以适应不同的工作任务和场景。例如，通过更换不同的末端执行器，机器人实现执行抓取、搬运、装配等多种任务，从而提高了机器人的灵活性和适应性。

b. 可重构性和扩展性^[119-120]。机器人能根据不同的工作任务与场景需求，灵活地调整其结构与功能。此外，还可以通过增加新的功能模块或算

法，扩展机器人的功能与性能，从而满足更广泛的实际应用需求。

c. 标准化与互操作性^[113, 121]。通过制定统一的标准和协议，不同厂商和研究机构开发的双臂协作机器人将能实现互操作和数据共享。这有助于降低用户的使用成本，提升机器人的利用效率，并且推动机器人的发展和应用。

3.3 本课题组的工作

随着技术水平的迅速发展，机器人逐渐从实验室走入日常生活中。然而，国内外仍有大量人群未能直接体验机器人技术的应用。因此，未来具有高度互动性和功能多样性的双臂协作机器人有望在教育领域中成为主流。

在这一背景下，本课题组研发了一款创新的双臂抛接球机器人，旨在探索双臂协作机器人在教育中的应用。该机器人结合了先进的运动控制技术和实时响应能力，通过趣味性的活动激发学生对科学、技术、工程和数学领域的兴趣。

如图 8 所示，这款机器人由多个关键组件构成，整体设计目标是实现高效、精准的抛接球操作。系统包括支撑骨架、抛接球机构、视觉传感器、发球装置和主控制器等核心部分。支撑骨架为机器人提供了稳固的平台，确保在执行复杂动作时的稳定性，并考虑到机械臂的空间需求，以保证灵活性和安全性。

抛接球机构是机器人最为显著的特性之一，包含左右镜像对称的仿生类人手臂。每条机械臂的设计参考了人类手臂的自然动作模式，旨在实现类人化的运动轨迹与操作精度。机械臂末端配置特制的碗状容器作为执行器，旨在提高抓取与释放球体的准确性和可靠性。

视觉传感器通过实时捕捉和分析目标球体的位置与运动轨迹，为控制系统提供必要数据，使其能够快速调整机械臂动作，完成精确的抛接任务。发球机构的自动化设计使机器人能够持续进行抛接球训练，提高效率并提供稳定、可重复的训练环境。主控制器利用图像处理算法处理视觉数据，通过内置的控制算法协调机械臂与发球机构的协作，确保机器人在动态环境中的稳定高效运行。

通过对上述双臂抛接球机器人进行硬件层面的优化与软件算法设计后，单球抛接实验成功率达 90%(球体速度小于等于 3 m/s)，多球抛接成功率可达 85%。

未来，随着智能交互技术的发展，教育用双

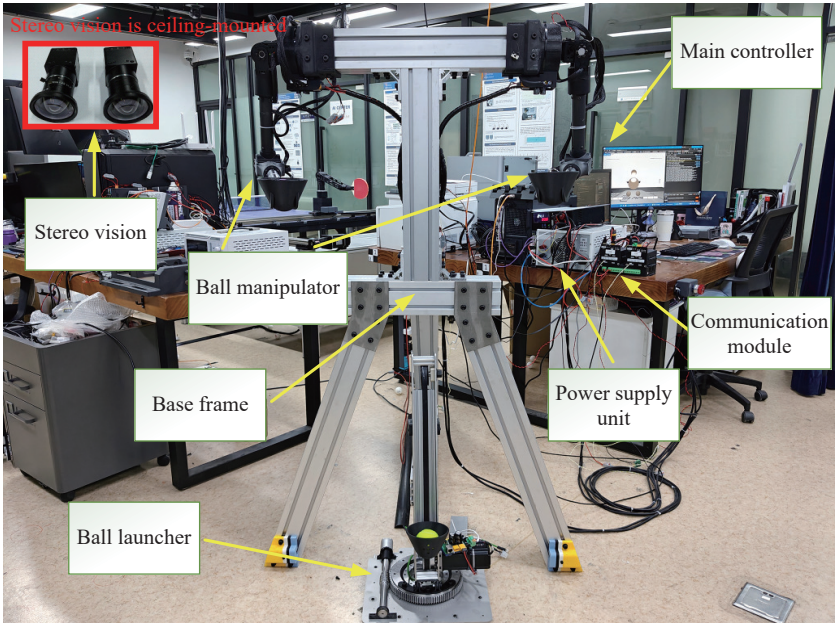


图 8 本课题组的双臂协作机器人

Fig. 8 Dual-arm collaborative robot of our research group

臂机器人将进一步向低门槛化、安全化和云端协同方向演进，成为普及机器人教育的重要工具。

4 结 论

本文基于当前双臂协作机器人领域的技术前沿与应用需求，系统梳理了其发展现状、关键技术和未来研究趋势。首先，回顾了双臂协作机器人的发展路线，总结了其区别于单臂机器人的核心特点与独特优势；其次，全面分析了双臂协作机器人在工业生产、娱乐教育、医疗健康及家庭服务等多个领域的实际应用场景，通过典型案例验证了其在提升生产效率、减轻人员负担、改进生活服务体验等方面的实用价值与应用潜力。

在关键技术研究层面，本文聚焦双臂协作机器人的核心技术体系，对机械结构设计、驱动系统、运动规划、感知技术、交互技术及控制系统 6 大核心模块进行了深度剖析，既明确了各技术模块的现有优势和应用成果，也指出了当前技术发展中存在的瓶颈与挑战。研究表明，上述关键技术的协同突破与持续迭代，是推动双臂协作机器人性能提升、功能拓展及场景适配能力升级的核心动力。

针对未来发展方向，本文明确提出了智能化与通用化是双臂协作机器人技术的两大核心发展主线。智能化发展将推动机器人突破传统控制模

式，获得更强的自主学习、环境感知与动态决策能力，实现对复杂多变工作场景的快速适配。通用化发展则聚焦打破行业与任务壁垒，通过模块化、可重构扩展及标准化建设，提升机器人适配性与利用率，降低定制成本，加速其规模化推广与产业化落地。基于上述发展趋势，本课题组针对性地开展研究，设计开发了面向教育领域的双臂抛接球机器人，为双臂协作机器人在教育场景的落地应用提供了新的实践思路与技术参考。

综上，双臂协作机器人技术的持续突破与产业化落地应用，能够有效提升生产效率、优化服务品质，助力人机协同模式的深度发展，在学术研究与工程实践领域均具有重要的应用价值与推广意义。

参考文献：

[1] Moran M E. Evolution of robotic arms[J]. *Journal of Robotic Surgery*, 2007, 1(2): 103–111.

[2] 马南峰, 姚锡凡, 陈飞翔, 等. 面向工业 5.0 的人本智造[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(18): 88–102.

[3] Gonzalez-Aguirre J A, Osorio-Oliveros R, Rodríguez-Hernández K L, et al. Service robots: trends and technology[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(22): 10702.

[4] Makris S. Cooperating robots for flexible manufacturing[M]. Cham: Springer, 2021.

[5] Krüger J, Schreck G, Surdilovic D. Dual arm robot for flexible and cooperative assembly[J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(1): 5–8.

- [6] Buhl J F, Grønhøj R, Jørgensen J K, et al. A dual-arm collaborative robot system for the smart factories of the future[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 38: 333–340.
- [7] Smith C, Karayiannidis Y, Nalpantidis L, et al. Dual arm manipulation—a survey[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(10): 1340–1353.
- [8] 吴其林, 赵韩, 陈晓飞, 等. 多臂协作机器人技术与应用现状及发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(15): 1–16.
- [9] Gasparetto A, Scalera L. A brief history of industrial robotics in the 20th century[J]. *Advances in Historical Studies*, 2019, 8(1): 24–35.
- [10] Wu Q, Liu Y J, Wu C S. An overview of current situations of robot industry development[J]. *ITM Web of Conferences*, 2018, 17: 03019.
- [11] Garcia E, Jimenez M A, De Santos P G, et al. The evolution of robotics research[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2007, 14(1): 90–103.
- [12] Basile F, Caccavale F, Chiacchio P, et al. Task-oriented motion planning for multi-arm robotic systems[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, 28(5): 569–582.
- [13] 周骥平, 颜景平, 陈文家. 双臂机器人研究的现状与思考[J]. *机器人*, 2001, 23(2): 175–177.
- [14] Qu J D, Zhang F H, Wang Y, et al. Human-like coordination motion learning for a redundant dual-arm robot[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 57: 379–390.
- [15] Eppinger S, Seering W. Introduction to dynamic models for robot force control[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1987, 7(2): 48–52.
- [16] Al Hage J, El Najjar M E, Pomorski D. Multi-sensor fusion approach with fault detection and exclusion based on the Kullback-Leibler Divergence: application on collaborative multi-robot system[J]. *Information Fusion*, 2017, 37: 61–76.
- [17] Hauser K. On responsiveness, safety, and completeness in real-time motion planning[J]. *Autonomous Robots*, 2012, 32(1): 35–48.
- [18] Seaborn K, Kotani H, Pennafather P. From “made in” to Mukokuseki: exploring the visual perception of national identity in robots[J]. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*, 2025, 14(1): 4.
- [19] Michalik R, Janota A, Gregor M, et al. Human-robot motion control application with artificial intelligence for a cooperating YuMi robot[J]. *Electronics*, 2021, 10(16): 1976.
- [20] Wilson A D, Schultz J A, Ansari A R, et al. Dynamic task execution using active parameter identification with the Baxter research robot[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, 14(1): 391–397.
- [21] Wang W J, Hu J T, Yang X F, et al. Development of a novel dual-arm robot via modular actuator[C]//2021 6th IEEE International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM). Chongqing: IEEE, 2021: 598–603.
- [22] Park C H, Park K T, Gweon D G. Development of industrial dual arm robot for precision assembly of mechanical parts for automobiles[C]//2006 SICE-ICASE International Joint Conference. Busan: IEEE, 2006: 3059–3062.
- [23] Vysocky A, Novak P. Human-robot collaboration in industry[J]. *MM Science Journal*, 2016, 9(2): 903–906.
- [24] Canh T N, Duc S T, The H N, et al. Optimal design and fabrication of frame structure for dual-arm service robots: an effective approach for human-robot interaction[J]. *Engineering Science and Technology, An International Journal*, 2024, 56: 101763.
- [25] He J, Yang R, Zhang W, et al. A multifunctional dual-arm edurobot[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 25(11): 1211–1217.
- [26] Fleischer H, Drews R R, Janson J, et al. Application of a dual-arm robot in complex sample preparation and measurement processes[J]. *SLAS Technology*, 2016, 21(5): 671–681.
- [27] Michalos G, Kousi N, Karagiannis P, et al. Seamless human robot collaborative assembly—an automotive case study[J]. *Mechatronics*, 2018, 55: 194–211.
- [28] Talasaz A, Luisa Trejos A, Perreault S, et al. A dual-arm 7-degrees-of-freedom haptics-enabled teleoperation test bed for minimally invasive surgery[J]. *Journal of Medical Devices*, 2014, 8(4): 041004.
- [29] Jiang D Q, Wang H, Lu Y Z. Mastering the complex assembly task with a dual-arm robot: a novel reinforcement learning method[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2023, 30(2): 57–66.
- [30] Huo S Z, Wang F Y, Hu L Y, et al. A dual-arm collaborative framework for dexterous manipulation in unstructured environments with contrastive planning [EB/OL]. (2022-09-13). <https://arxiv.org/abs/2209.05756>
- [31] Song X G, Xu P, Xu W F, et al. Skill acquisition framework in multi-robot precision assembly based on cooperative compliant control[J]. *ISA Transactions*, 2024, 155: 319–336.
- [32] Proia S, Carli R, Cavone G, et al. Control techniques for safe, ergonomic, and efficient human-robot collaboration in the digital industry: a survey[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(3): 1798–1819.
- [33] Abbas M, Narayan J, Dwivedy S K. A systematic review on cooperative dual-arm manipulators: modeling, planning, control, and vision strategies[J]. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2023, 7(4): 683–707.

- [34] He H L, Lu C L, Saunders G, et al. Fast and accurate relative motion tracking for dual industrial robots[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(11): 10153–10160.
- [35] Kornmaneesang W, Chen S L, Boonto S. Contouring control of an innovative manufacturing system based on dual-arm robot[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(3): 2042–2053.
- [36] Mitnik R, Nussbaum M, Soto A. An autonomous educational mobile robot mediator[J]. *Autonomous Robots*, 2008, 25(4): 367–382.
- [37] Naranjo-Campos F J, Victores J G, Balaguer C. Method for bottle opening with a dual-arm robot[J]. *Biomimetics*, 2024, 9(9): 577.
- [38] Zhang C C, Yan H, Wei J, et al. Research on the safety design and trajectory planning for a new dual upper limb rehabilitation robot[J]. *Actuators*, 2024, 13(9): 364.
- [39] Yang X L, Sun Q, Guo S. Research on mirror-assisted rehabilitation training method based on dual-arm robots[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2025, 22(2): 670–683.
- [40] Zhou H Y, Yang G, Lyu H H, et al. IoT-enabled dual-arm motion capture and mapping for telerobotics in home care[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2020, 24(6): 1541–1549.
- [41] Kim J, Kang T, Song D, et al. Development of dual-arm human companion robots that can dance[J]. *Sensors*, 2024, 24(20): 6704.
- [42] Niku S B. Introduction to robotics: analysis, control, applications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2020.
- [43] Pandilov Z, Dukovski V. Comparison of the characteristics between serial and parallel robots[J]. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, 2014, 7(1): 143–160.
- [44] Tsai L W. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [45] Spong M W, Hutchinson S, Vidyasagar M. Robot modeling and control[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [46] Appin Knowledge Solutions. Robotics[M]. Hingham: Infinity Science Press LLC, 2008.
- [47] He R B, Zhao Y J, Yang S N, et al. Kinematic-parameter identification for serial-robot calibration based on POE formula[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, 26(3): 411–423.
- [48] Yang X S, Zou Z Y, Zhang J M, et al. Design and kinematic analysis of a novel 7-DoF dual-arm parallel manipulator for 3C products assembly[C]//14th International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Yantai: Springer, 2021: 290–301.
- [49] Briot S, Bonev I A. Are parallel robots more accurate than serial robots?[J]. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2007, 31(4): 445–455.
- [50] Matheson E, Minto R, Zampieri E G G, et al. Human-robot collaboration in manufacturing applications: a review[J]. *Robotics*, 2019, 8(4): 100.
- [51] 黄海丰, 刘培森, 李擎, 等. 协作机器人智能控制与人机交互研究综述 [J]. *工程科学学报*, 2022, 44(4): 780–791.
- [52] Chen W H, Tsai Y H, Lin C Y. Development of a dual-joint harmonic drive actuator robotic arms system for compliant motion control[J]. *International Journal of iRobotics*, 2024, 7(2): 1–10.
- [53] Choi H S, Kim T H, Moon W J, et al. Study on a ultra-light dual revolute manipulator with high joint torque[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009, 10(4): 49–56.
- [54] 金力, 王成军, 夏科睿. 驱控一体化机器人关节的研制及应用 [J]. *机床与液压*, 2021, 49(21): 62–66.
- [55] Bekey G A. Springer handbook of robotics (B. Siciliano and O. Khatib; 2008) [Book Review][J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2008, 15(3): 110.
- [56] 张珺仪. 机器人驱动的现状与发展趋势 [J]. *工业控制计算机*, 2023, 36(10): 7–9.
- [57] 刘松, 柴汇, 李贻斌, 等. 电动力液压驱动四足双臂机器人的设计与实现 [J]. *机器人*, 2022, 44(6): 649–659.
- [58] Qi J H, Li X, Tao Z G, et al. Design and control of a hydraulic driven robotic gripper[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Sanya: IEEE, 2021: 398–404.
- [59] 杨玉贵, 彭光正, 王毅枫. 气动人工肌肉驱动的双臂机器人及其协调控制研究进展 [J]. *机床与液压*, 2008, 36(4): 181–184.
- [60] Pršić D, Nedić N, Stojanović V. A nature inspired optimal control of pneumatic-driven parallel robot platform[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(1): 59–71.
- [61] 史婷娜, 徐奕扬, 谭本慷, 等. 机器人关节用伺服电机关键技术及展望 [J]. *电工技术学报*, 2025, 40(19): 6192–6212.
- [62] Brassitos E, Jalili N. Design and development of a compact high-torque robotic actuator for space mechanisms[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2017, 9(6): 061002.
- [63] Kuindersma S, Deits R, Fallon M, et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot[J]. *Autonomous Robots*, 2016, 40(3): 429–455.
- [64] Meng F, Huang Q, Yu Z G, et al. Explosive electric actuator and control for legged robots[J]. *Engineering*, 2022, 12: 39–47.
- [65] Koolen T, Bertrand S, Thomas G, et al. Design of a

- momentum-based control framework and application to the humanoid robot atlas[J]. [International Journal of Humanoid Robotics](#), 2016, 13(1): 1650007.
- [66] Sakama S, Tanaka Y, Kamimura A. Characteristics of hydraulic and electric servo motors[J]. [Actuators](#), 2022, 11(1): 11.
- [67] Gasparetto A, Zanotto V. A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators[J]. [Mechanism and Machine Theory](#), 2007, 42(4): 455–471.
- [68] Xu J J, Tao L, Pei Y H, et al. Collision-free trajectory planning optimization algorithms for two-arm cascade combination system[J]. [Mathematics](#), 2024, 12(14): 2245.
- [69] Rubio F, Abu-Dakka F J, Valero F, et al. Comparing the efficiency of five algorithms applied to path planning for industrial robots[J]. [Industrial Robot: An International Journal](#), 2012, 39(6): 580–591.
- [70] Mohamad H, Ozgoli S, Kazemi J. Optimization of joint space trajectories for assistive lower limb exoskeleton robots: real-time and flexible gait patterns[J]. [Journal of Intelligent & Robotic Systems](#), 2024, 110(3): 122.
- [71] Chen Y D, Li L, Ji X D. Smooth and accurate trajectory planning for industrial robots[J]. [Advances in Mechanical Engineering](#), 2014, 6: 342137.
- [72] Biagiotti L, Melchiorri C. Trajectory planning for automatic machines and robots[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [73] Boryga M, Graboś A. Planning of manipulator motion trajectory with higher-degree polynomials use[J]. [Mechanism and Machine Theory](#), 2009, 44(7): 1400–1419.
- [74] Mann M P, Rubinstein D, Shmulevich I, et al. Motion planning of a mobile Cartesian manipulator for optimal harvesting of 2-D crops[J]. [Transactions of the ASABE](#), 2014, 57(1): 283–295.
- [75] Wittmann J, Ochsenfarth F, Sonnevile V, et al. Centralized vs. decoupled dual-arm planning taking into account path quality[J]. [Journal of Intelligent & Robotic Systems](#), 2024, 110(4): 141.
- [76] Shrivastava A, Dalla V K. Strategy of smooth motion planning of multi-axes space manipulator avoiding dynamic singularity in Cartesian space[J]. [Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering](#), 2022, 44(7): 278.
- [77] Li S Q, Li X, Han K, et al. Path planning and optimization of humanoid manipulator in Cartesian space[J]. [Journal of Shanghai Jiaotong University \(Science\)](#), 2022, 27(5): 614–620.
- [78] Xu T. Recent advances in Rapidly-exploring random tree: a review[J]. [Heliyon](#), 2024, 10(11): e32451.
- [79] Qureshi A H, Ayaz Y. Intelligent bidirectional rapidly-exploring random trees for optimal motion planning in complex cluttered environments[J]. [Robotics and Autonomous Systems](#), 2015, 68: 1–11.
- [80] Alam M M, Nishi T, Liu Z A, et al. A novel sampling-based optimal motion planning algorithm for energy-efficient robotic pick and place[J]. [Energies](#), 2023, 16(19): 6910.
- [81] Kim J, Jin M L, Park S H, et al. Task space trajectory planning for robot manipulators to follow 3-D curved contours[J]. [Electronics](#), 2020, 9(9): 1424.
- [82] Wang Z W, Gan Y H, Dai X Z. An environment state perception method based on knowledge representation in dual-arm robot assembly tasks[J]. [International Journal of Intelligent Robotics and Applications](#), 2020, 4(2): 177–190.
- [83] Saleem Z, Gustafsson F, Furey E, et al. A review of external sensors for human detection in a human robot collaborative environment[J]. [Journal of Intelligent Manufacturing](#), 2025, 36(4): 2255–2279.
- [84] Gursoy E, Navarro B, Cosgun A, et al. Towards vision-based dual arm robotic fruit harvesting[C]//2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Auckland: IEEE, 2023: 1–6.
- [85] Lee D H, Park H, Park J H, et al. Design of an anthropomorphic dual-arm robot with biologically inspired 8-DOF arms[J]. [Intelligent Service Robotics](#), 2017, 10(2): 137–148.
- [86] Thotakuri A, Kalyani T, Vucha M, et al. Survey on robot vision: techniques, tools and methodologies[J]. [International Journal of Applied Engineering Research](#), 2017, 12(17): 6887–6896.
- [87] Turlapati S H, Campolo D. Towards haptic-based dual-arm manipulation[J]. [Sensors](#), 2022, 23(1): 376.
- [88] Li Q, Kroemer O, Su Z, et al. A review of tactile information: perception and action through touch[J]. [IEEE Transactions on Robotics](#), 2020, 36(6): 1619–1634.
- [89] Ren Y, Zhou Z H, Xu Z W, et al. Enabling versatility and dexterity of the dual-arm manipulators: a general framework toward universal cooperative manipulation[J]. [IEEE Transactions on Robotics](#), 2024, 40: 2024–2045.
- [90] Sheridan T B. Human-robot interaction: status and challenges[J]. [Human Factors](#), 2016, 58(4): 525–532.
- [91] Stiefelhagen R, Ekenel H K, Fugen C, et al. Enabling multimodal human-robot interaction for the Karlsruhe humanoid robot[J]. [IEEE Transactions on Robotics](#), 2007, 23(5): 840–851.
- [92] Grasse L, Boutros S J, Tata M S. Speech interaction to control a hands-free delivery robot for high-risk health care scenarios[J]. [Frontiers in Robotics and AI](#), 2021, 8: 612750.
- [93] Chen F Y, Lyu H, Pang Z B, et al. WristCam: a wearable sensor for hand trajectory gesture recognition and intelligent human-robot interaction[J]. [IEEE Sensors Journal](#), 2019, 19(19): 8441–8451.

- [94] Micire M, Drury J L, Keyes B, et al. Multi-touch interaction for robot control[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Intelligent User Interfaces. Sanibel Island: ACM, 2009: 425–428.
- [95] Zhao X W, Zhang Y H, Ding W Z, et al. A dual-arm robot cooperation framework based on a nonlinear model predictive cooperative control[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024, 29(5): 3993–4005.
- [96] Ren Y, Chen Z S, Liu Y C, et al. Adaptive hybrid position/force control of dual-arm cooperative manipulators with uncertain dynamics and closed-chain kinematics[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2017, 354(17): 7767–7793.
- [97] 王兴川. 双臂机器人嵌入式控制系统硬件设计与实现 [D]. 北京: 北方工业大学, 2011.
- [98] 招绍坤. 轻型机械臂模块化设计与运动控制的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [99] 宋连喜, 刘波. 煤矿主运输智能集中控制系统设计 [J]. *工矿自动化*, 2021, 47(S1): 58–63.
- [100] Milutinović D, Lima P. Modeling and optimal centralized control of a large-size robotic population[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(6): 1280–1285.
- [101] 陈铮, 王晨麟, 夏华磊, 等. 基于主从力反馈的同构主手设计与研究 [J]. *机械设计与研究*, 2024, 40(1): 63–68.
- [102] Barbieri L, Bruno F, Gallo A, et al. Design, prototyping and testing of a modular small-sized underwater robotic arm controlled through a Master-Slave approach[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 158: 253–262.
- [103] Basile F, Caccavale F, Chiacchio P, et al. A decentralized kinematic control architecture for collaborative and cooperative multi-arm systems[J]. *Mechatronics*, 2013, 23(8): 1100–1112.
- [104] 张霖, 谢开鑫, 郑显华, 等. 多机器人系统感知能力和控制体系结构综述 [J]. *智能系统学报*, 2024, 19(4): 767–790.
- [105] Yang X L, Chen F R, Wang F L, et al. Sensor fusion-based teleoperation control of anthropomorphic robotic arm[J]. *Biomimetics*, 2023, 8(2): 169.
- [106] Weng W T, Huang H P, Zhao Y L, et al. Development of a visual perception system on a dual-arm mobile robot for human-robot interaction[J]. *Sensors*, 2022, 22(23): 9545.
- [107] Akalin N, Loutfi A. Reinforcement learning approaches in social robotics[J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1292.
- [108] Morales E F, Murrieta-Cid R, Becerra I, et al. A survey on deep learning and deep reinforcement learning in robotics with a tutorial on deep reinforcement learning[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2021, 14(5): 773–805.
- [109] Kober J, Bagnell J A, Peters J. Reinforcement learning in robotics: a survey[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, 32(11): 1238–1274.
- [110] Poria S, Cambria E, Bajpai R, et al. A review of affective computing: from unimodal analysis to multimodal fusion[J]. *Information Fusion*, 2017, 37: 98–125.
- [111] Barros P, Wermter S. Developing crossmodal expression recognition based on a deep neural model[J]. *Adaptive Behavior*, 2016, 24(5): 373–396.
- [112] Cadena C, Carlone L, Carrillo H, et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: toward the robust-perception age[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(6): 1309–1332.
- [113] Bi Z M, Miao Z H, Zhang B, et al. The state of the art of testing standards for integrated robotic systems[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 63: 101893.
- [114] Hu Y F, Xie Q T, Jain V, et al. Toward general-purpose robots via foundation models: a survey and meta-analysis [EB/OL]. (2023-12-14). <https://arxiv.org/abs/2312.08782>
- [115] Urrea C, Kern J. Recent advances and challenges in industrial robotics: a systematic review of technological trends and emerging applications[J]. *Processes*, 2025, 13(3): 832.
- [116] 张彦俊. 机器人模块化体系与关键技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [117] 戴野, 张启昊, 高语斐, 等. 自重构模块化机器人模块设计综述 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2021, 26(5): 34–43.
- [118] Alattas R J, Patel S, Sobh T M. Evolutionary modular robotics: survey and analysis[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, 95(3/4): 815–828.
- [119] Brunete A, Ranganath A, Segovia S, et al. Current trends in reconfigurable modular robots design[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017, 14(3): 1–21.
- [120] 赵思恺, 李长乐, 张宗伟, 等. 模块化可重构外肢体机器人 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4): 218–227.
- [121] Zou Y B, Kim D, Norman P, et al. Towards robot modularity —a review of international modularity standardization for service robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2022, 148: 103943.

(编辑: 丁红艺)