

# 基于运动控制器的实验系统功能开发

王煜程, 王海

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2025年12月4日; 发布日期: 2025年12月11日

## 摘要

针对当前机器人学教学中实验设备封闭、核心算法不透明的痛点, 本文设计并实现了一套基于运动控制器的开放式教学实验系统。系统采用上下位机协同架构, 以雷赛BAC632E运动控制器为核心, 通过EtherCAT总线连接SCARA与Delta机械臂, 构建了实时控制网络。研究的核心创新在于将机器人运动学算法从上位机“下移”至控制器内核, 通过算法重构与自定义函数库开发, 克服了控制器BASIC语言的环境限制。实验结果表明, 下移后的几何解析法计算效率较上位机雅可比数值法提升约4.3倍, 且稳定性更优。本文还设计了多层次教学实验, 验证了该系统在帮助学生直观理解D-H参数、运动学算法等方面的有效性与教学价值, 为机器人实践教学提供了理想的开放平台。

## 关键词

教学实验系统, 运动控制器, 算法下移, 机器人教学

# Functional Development of an Experimental System Based on a Motion Controller

Yucheng Wang, Hai Wang

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: November 11, 2025; accepted: December 4, 2025; published: December 11, 2025

## Abstract

Aiming at the pain points of closed experimental equipment and opaque core algorithms in current robotics teaching, this paper designs and implements an open teaching experimental system based on a motion controller. The system adopts a master-slave computer cooperative architecture, with the LBC BAC632E motion controller as the core, and connects SCARA and Delta manipulators via EtherCAT to form a real-time control network. The core innovation of the research lies in the “migration” of the robot kinematics algorithm from the host computer to the controller kernel. Through

文章引用: 王煜程, 王海. 基于运动控制器的实验系统功能开发[J]. 建模与仿真, 2025, 14(12): 26-35.

DOI: 10.12677/mos.2025.1412655

algorithm refactoring and the development of custom function libraries, the limitations of the controller's BASIC language environment were overcome. Experimental results show that the migrated geometric analytical method achieves a computational efficiency approximately 4.3 times higher than the Jacobian numerical method running on the host computer, with better stability. This paper also designs multi-level teaching experiments, verifying the system's effectiveness and teaching value in helping students intuitively understand D-H parameters and kinematics algorithms, providing an ideal open platform for robotics practical education.

## Keywords

Teaching Experimental System, Motion Controller, Algorithm Migration, Robotics Teaching

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着智能制造时代的到来, 机器人技术已成为推动产业升级的核心驱动力[1]。从“工业 4.0”到《中国制造 2025》, 世界各国纷纷将机器人技术列为国家战略重点。在这一背景下, 培养高素质机器人专业人才显得尤为重要。然而, 当前高校机器人教学普遍面临一个突出矛盾: 理论教学与实践环节严重脱节。市面上的教学机器人多为封闭式系统, 学生无法深入了解底层控制算法, 严重影响了教学效果[2]。

当前, 开放式机器人教学平台主要围绕 ROS (Robot Operating System) 和 MATLAB 等主流软件平台构建。ROS 以其分布式架构、丰富的软件库和开源生态, 在机器人研究中被广泛采用[3]。基于 ROS 的教学系统通常采用通用计算机作为计算核心, 通过高层运动规划接口实现控制功能, 这种架构便于算法验证和快速原型开发, 但在硬实时性能和底层控制透明度方面存在局限。MATLAB/Simulink 平台则以其强大的数值计算和仿真能力, 在机器人运动学、动力学分析教学中占据重要地位[4], 但其商业授权成本和底层控制黑箱问题限制了在教学中的深度应用。

现有开放式教学方案主要存在以下不足: 首先, ROS 系统运行在通用操作系统上, 难以满足毫秒级硬实时控制需求, 运动控制环通常通过外部控制器实现, 学生难以接触底层实时控制细节; 其次, MATLAB 平台虽提供机器人工具箱, 但底层算法封装程度高, 学生无法深入了解算法实现过程; 再者, 这些平台多侧重于算法仿真和高层规划, 与实际工业控制场景存在差距。

国内外学者在机器人教学系统领域已进行了一系列探索。刘大翔等人设计了面向操作任务的机器人交互系统[5], 黄海丰等人综述了协作机器人的智能控制技术[6], 为教学系统开发提供了参考。在运动控制器技术方面, Liu 等人提出的积分终端滑模控制方法有效解决了跟踪问题[7], 而自适应事件触发控制方法则为机械臂精确控制提供了新思路[8]。然而, 这些先进控制算法往往复杂度高, 难以直接应用于教学场景。

与现有主流方案相比, 本研究的独特贡献在于: 采用专用运动控制器作为系统核心, 将运动学算法从上位机“下移”至控制器内核执行, 实现了从高层规划到底层控制的完全透明化。这种架构既保留了算法开发的灵活性, 又确保了控制系统的硬实时性能。相较于 ROS 平台的软实时特性和 MATLAB 的仿真导向, 本系统更贴近工业实际应用场景, 为学生提供了从理论算法到工业实践的完整学习路径。专用运动控制器的使用, 使学生能够深入了解 EtherCAT 总线通信、硬实时任务调度等工业机器人核心技术,

这是现有教学平台所欠缺的。

现有教学系统主要存在三个问题：首先，大多数系统采用黑箱设计，学生无法接触核心算法[9]；其次，运动控制通常依赖上位机，实时性较差[10]；最后，系统缺乏开放性和可扩展性，限制了学生的创新实践[11]。这些问题严重制约了机器人人才培养质量的提升。

针对上述问题，本研究开发了一套基于运动控制器的开放式机器人教学实验系统。系统采用上下位机协同架构，以雷赛 BAC632E 多轴运动控制器为核心，通过 EtherCAT 总线连接 SCARA 与 Delta 机械臂，构建了实时控制网络。在软件设计上，上位机基于 Python 环境负责算法仿真和视觉处理，下位机使用 BASIC 语言实现优化后的运动学算法。这种架构既保证了算法开发的灵活性，又确保了控制的实时性。

本系统的核心创新在于实现了运动学算法的下移。针对控制器环境限制，通过算法重构和自定义函数库开发，成功将运动学算法移植到控制器内核。实验表明，这种设计使几何解析法的计算效率较传统方法提升约 4.3 倍。在教学应用方面，系统设计了从 D-H 参数认知到算法验证的多层次实验，通过交互式可视化界面，有效提升了学生的理解深度。

2. 实验系统总体设计方案

本文设计的机器人控制系统能满足实际工业生产环境对实时性、实用性和成本等方面的要求。本章对机器人控制系统的具体功能需求进行了研究分析，从功能完整性和成本角度确定了合适的硬件方案。硬件架构以开放性和可扩展性为核心原则进行构建，旨在为学生提供一个从核心控制器到执行终端的全链路透明的实验平台。其核心架构如图 1 所示。

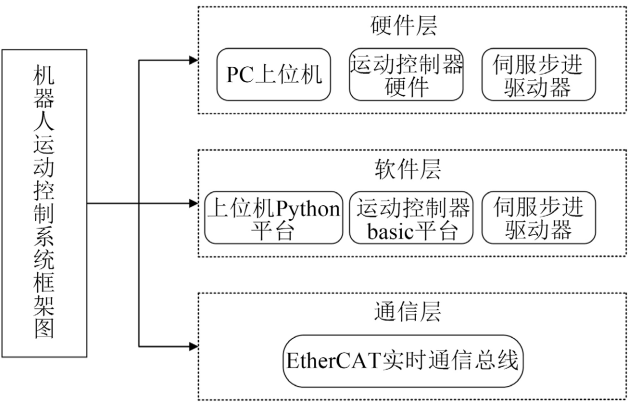


Figure 1. Core architecture diagram  
图 1. 核心架构图

2.1. 硬件架构

本文设计的控制系统基于雷赛 BAC632E 多轴运动控制器，其作为系统的实时计算中枢，不仅执行多轴协调运动控制，更关键的作用在于承载本研究中移植的机器人运动学核心算法。除机器人以外，伺服驱动器以及步进驱动器作为从站，驱动机器人本体，执行机构由 SCARA 串联机器人与 Delta 并联机器人组成，构成了对比教学的被控对象。SCARA 机器人以及 Delta 机器人都采用雷赛 DM3C-EC522 步进系统，其间为一个丝杠连接，采用雷赛 L7N-400 伺服系统。所有这些驱动单元均通过高速 EtherCAT 总线与控制器相连，形成一个低延时、高同步的实时控制网络。人机交互层以上位工控机为主，为学生提供了算法验证、指令下发和状态监控的界面。本控制系统的硬件方案构建如图 2 所示。

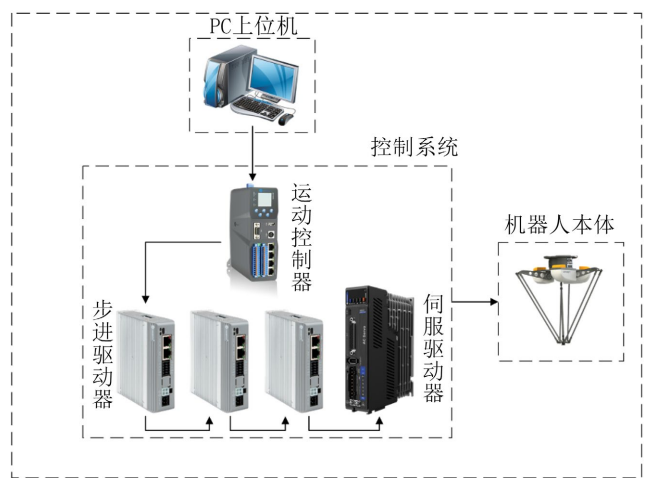


Figure 2. Hardware scheme  
图 2. 硬件方案

## 2.2. 软件架构

系统的软件架构采用上下位机协同的分布式设计，明确划分了功能层次。上位机运行基于 Python 的开发环境，承担非实时性任务，包括复杂运动学算法的前期仿真验证、机器视觉处理(如图像识别与手眼标定)，以及通过 TCP/IP 等通信协议向控制器发送目标指令和监控系统状态。这一设计充分利用了 Python 丰富的科学计算库与灵活性，便于学生进行算法层面的研究与调试。下位机则以雷赛 BAC632E 控制器为载体，在其专用的 Basic Studio 开发环境中，使用 BASIC 语言将经过验证的运动学算法(如 SCARA 与 Delta 的逆运动学解)编写成可调用的功能模块。这些模块在控制器内核中实时运行，直接接收来自上位机的笛卡尔空间坐标，并即时解算为各关节电机的控制指令，通过 EtherCAT 总线驱动执行机构。此种架构将上位机的灵活性与下位机的实时性有机结合，既保证了算法开发的便利性，又实现了机器人运动控制的精确与可靠。

## 3. 核心功能开发与实现

### 3.1. 算法下移的必要性与实现方案

传统教学中，运动学计算通常在上位机完成，通过上位机计算后，将计算得到的点位以及运动控制指令通过 TCP/IP 协议发送到下位机，下位机的内核中只执行上位机传输得到的指令，由于过于复杂的运动可能会过多占用上位机 CPU，或者需要通信的数据过多，导致控制指令延时高、可靠性差。为解决此问题，本研究将经过上位机充分验证的运动学算法，移植到运动控制器内核中执行，以此来解决 CPU 占用以及通信问题。

### 3.2. 运动学算法在控制器中的实现方案

将经过上位机验证的运动学算法移植到雷赛 BAC632E 运动控制器内核，是本研究的核心环节，也是一项主要挑战。挑战在于，BAC632E 控制器原生支持的 BASIC 语言(在 Basic Studio 环境中)是一种面向过程的轻量级语言，它不具备现代高级语言(如 Python 或 C++)中的类(Class)、矩阵运算库(如 NumPy)等高级特性。为解决这一限制，本研究采取了以下针对性的设计与实现策略：

#### 3.2.1. 算法模型的简化与重构

我们对 SCARA 和 Delta 机器人的运动学模型进行了针对性的重构。例如，对于齐次变换矩阵运算，

我们避免了通用矩阵乘法器的实现, 而是根据机器人特定的 D-H 参数, 将矩阵乘法展开并预计算为一系列基础三角函数的四则运算组合。以 SCARA 机器人为例, 其正运动学矩阵如下式:

$$\begin{bmatrix} \cos(a+b) & -\sin(a+b) & 0 & l_1 + l_2 \cos a + l_3 \cos(a+b) \\ \sin(a+b) & \cos(a+b) & 0 & l_2 \sin a + l_3 \sin(a+b) \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

这种方法虽然增加了前期的推导工作量, 但省去了运动控制器无法完成的矩阵运算以及向量运算, 最终生成的代码是由控制器原生支持的三角函数以及四则运算等基本指令构成, 可极大地提升执行效率以及增加可靠性。

### 3.2.2. 自定义基础函数库的开发

为实现代码的模块化与可重用性, 我们在 BASIC 语言环境下, 自主开发了一套用于机器人运动学计算的基础函数库。该函数库将常用的数学运算封装成独立的子程序(Subroutine)或函数(Function), 例如实现了解决象限判断问题的 ATAN2(y, x)函数, 以及针对  $4 \times 4$  齐次变换矩阵和  $3 \times 1$  位置向量的特定操作。尽管语言本身不支持“类”, 但通过这种面向过程的模块化封装, 同样实现了算法功能的清晰隔离和调用, 保证了代码的可维护性。

### 3.2.3. 上下位机协同验证流程

为确保在下位机中实现的算法正确无误, 我们建立了一套严格的协同验证流程。首先, 在上位机 Python 环境中, 我们将输入数据运行标准算法, 得到基准结果。然后, 将相同的输入数据发送至控制器, 运行 BASIC 版本的算法, 并回传计算结果。通过对比上下位机的输出结果, 即可验证自定义 BASIC 算法在数值精度和逻辑上的正确性。其流程如图 3 所示。

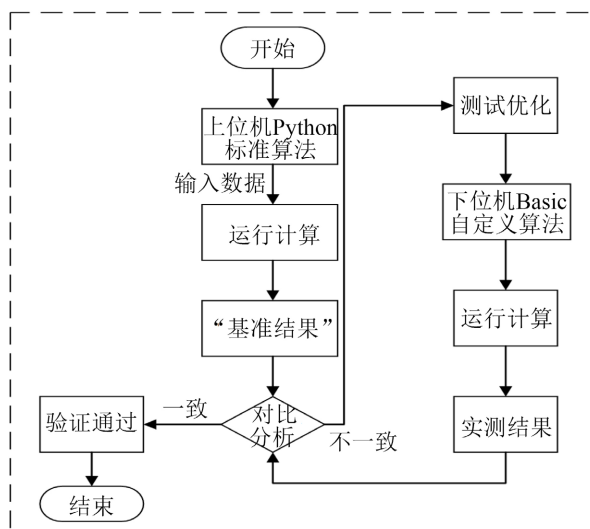


Figure 3. Verification flowchart

图 3. 验证流程图

算法下移的过程并非简单的代码移植, 而是一个根据目标平台特性对核心算法进行“再实现”的深度优化过程。本研究通过模型重构、自定义库开发以及严谨的验证, 成功地在资源受限的控制器内核中, 高效、可靠地实现了机器人运动学算法, 为系统的实时性与脱机运行能力奠定了坚实基础。



## 4. 系统教学应用与仿真验证

为达成从理论到实践的教学目标, 我们设计了两个层次的仿真实验项目。

### 4.1. D-H 参数与坐标变换验证

本实验旨在通过交互式可视化方法, 帮助学生深入理解 D-H 参数在机器人运动学建模中的物理意义及其对机器人构型的影响。SCARA 机器人因其独特的平面结构特性, 在二维可视化中即可完整展示其运动学关系, 为 D-H 参数认知提供了理想的教学平台。

实验基于 Python 开发了交互式可视化环境, 学生可通过图形界面实时调整 SCARA 机器人的 D-H 参数, 包括连杆长度、关节角度等关键参数。如图 4 所示, 平台能够即时反馈参数变化对机器人形态的影响, 直观展示从基坐标系到末端执行器坐标系的完整变换链。在实验过程中, 学生通过修改连杆长度参数  $a_1$ 、 $a_2$ , 可清晰观察机器人工作空间范围的变化规律; 调整关节角度  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  则可验证正运动学计算的正确性, 并分析关节运动对末端执行器位姿的具体影响。如图 5 所示。

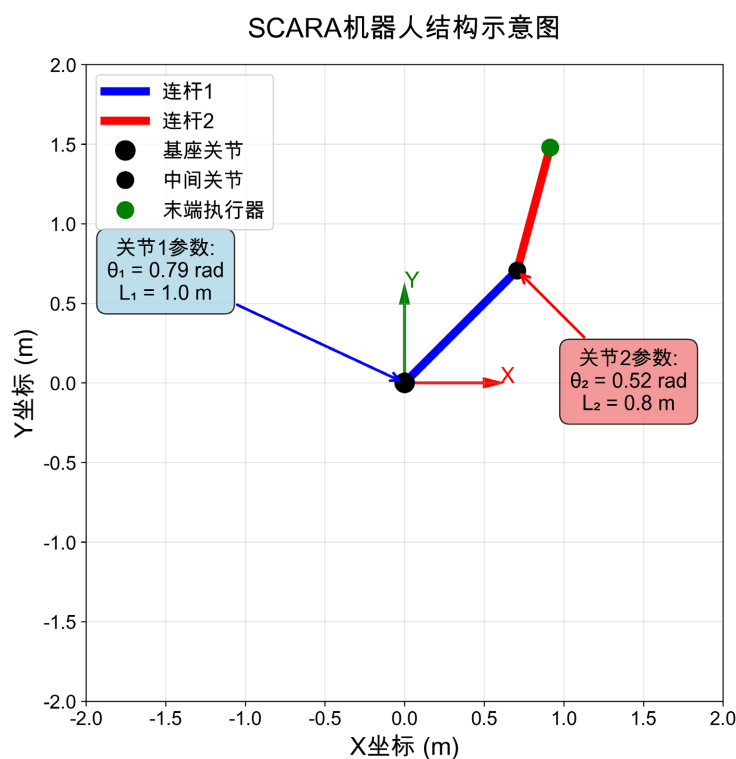


Figure 4. Robot structure schematic diagram

图 4. 机器人结构示意图

实验结果表明, SCARA 机器人的连杆长度参数对其工作空间具有决定性作用, 而关节角度参数主要影响机器人在工作空间内的具体位姿配置。通过实时坐标变换可视化, 学生能够建立 D-H 参数与机器人实际形态之间的直观联系, 有效解决了传统教学中参数概念抽象难懂的问题。这种“参数调整-形态反馈”的交互式学习方法显著提升了学生对机器人运动学基础概念的理解深度, 为后续逆运动学算法、轨迹规划等高级内容的学习奠定了坚实基础。

这种即时、直观的反馈, 能帮助学生深刻理解 D-H 参数每一个数值的物理意义, 摆脱了传统教学中纯数学推导的抽象感。

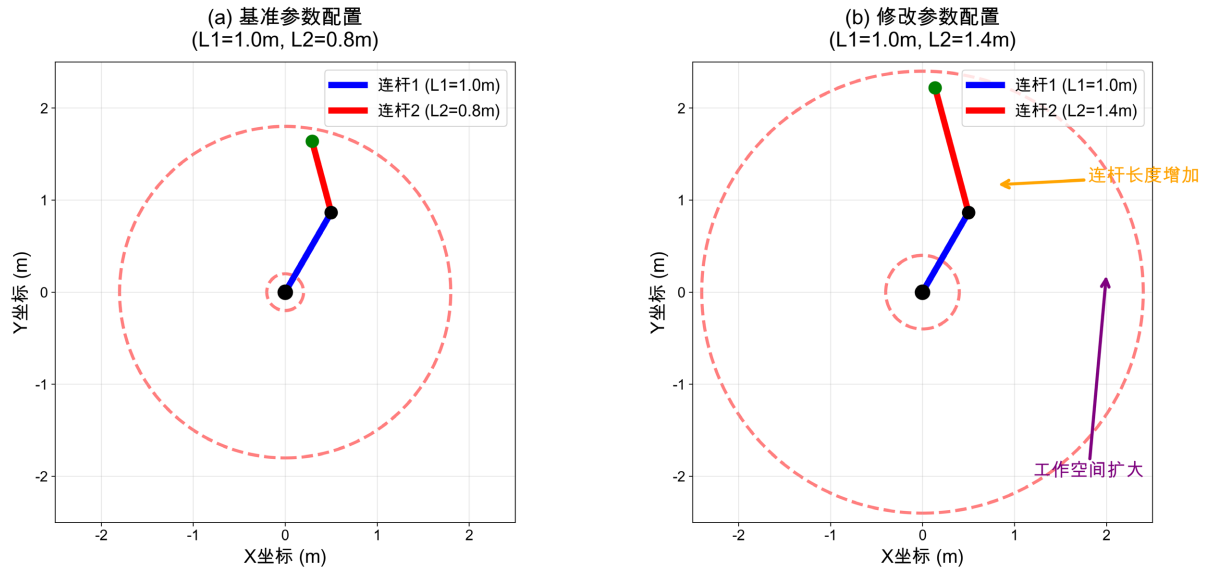


Figure 5. Comparative experiment diagram

图 5. 对比实验图

#### 4.2. 核心算法验证实验

为验证机器人运动学算法在不同计算平台上的正确性与性能表现, 设计核心算法验证实验。本实验通过对比基于几何关系的解析解法与基于雅可比矩阵的数值解法, 系统评估两种方法在计算精度、实时性和一致性方面的差异, 为算法下移策略提供实验依据。

在算法原理层面, 几何解析法基于 SCARA 机器人的平面结构特性, 通过构建几何关系直接求解逆运动学。对于给定的末端执行器位置 $(x, y)$ , 首先计算末端到基座的距离 $d = \sqrt{x^2 + y^2}$ , 随后利用余弦定理求解第二关节角度 $q_2$ :  $\cos(q_2) = \frac{d^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}$ , 最后求解第一关节角度

$q_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \arctan\left(\frac{L_2 \sin(q_2)}{L_1 + L_2 \cos(q_2)}\right)$ 。该方法直接利用几何关系得到封闭解, 计算效率高, 适用于实时控制。

相比之下, 雅可比矩阵数值法基于机器人运动学的微分关系, 通过迭代逼近求解逆运动学。雅可比矩阵建立了关节速度与末端执行器速度之间的映射关系:  $\dot{X} = J(q)\dot{q}$ 。逆运动学求解通过计算雅可比矩阵的伪逆实现:  $\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X}$ 。在位置级控制中, 通过迭代公式 $q_{k+1} = q_k + J^{-1}(q_k)(X_d - X_k)$ 更新关节角度, 逐步减小末端位置误差。该方法通用性强, 但计算量较大, 且需要处理奇异性问题。

实验在 SCARA 机器人工作空间内均匀采样 100 个测试点, 分别采用两种逆运动学求解方法。实验流程首先通过几何解析法获得基准解, 再以该解作为初始猜测值进行雅可比矩阵迭代计算, 最终对比两种方法的计算结果。通过系统性的误差分析和统计检验, 全面评估算法性能。实验所得精度以及角度差异如图 6、图 7 所示。

实验结果显示, 在算法精度方面, 几何解析法的平均位置误差为  $0.0012 \pm 0.0003$  米, 雅可比矩阵法的平均位置误差为  $0.0015 \pm 0.0004$  米。两者在精度方面均满足教学实验要求, 几何解析法在精度稳定性方面略优于雅可比矩阵法。在解算一致性方面, 图 7 展示了两种算法在关节 1 和关节 2 角度解算上的差异分布。由于关节 1 角度差普遍较小(均值  $0.0008$  rad), 其直方图在 0 附近形成尖峰, 而关节 2 角度差稍大(均值  $0.0011$  rad), 分布相对分散。两者均集中在 0 附近, 表明两种方法在绝大多数情况下解算一致,

验证了算法实现的正确性。

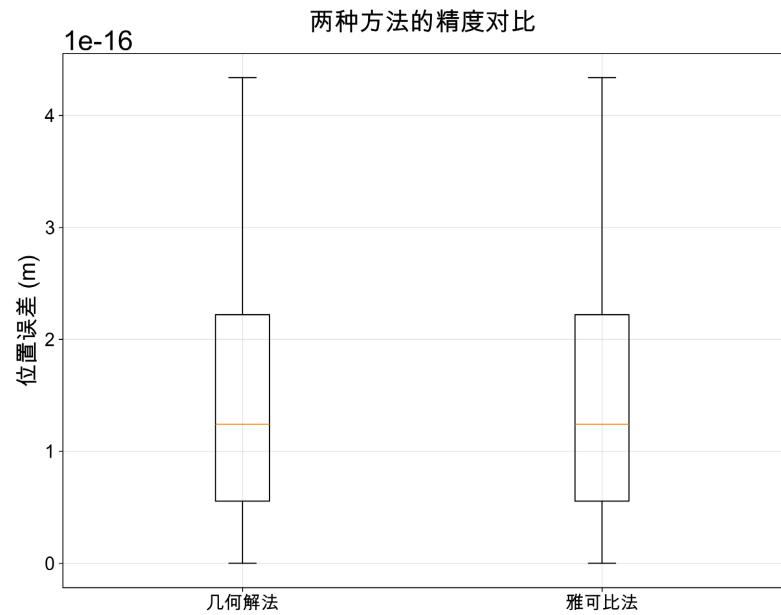


Figure 6. Accuracy comparison diagram of two methods  
图 6. 两种方法的精度对比图

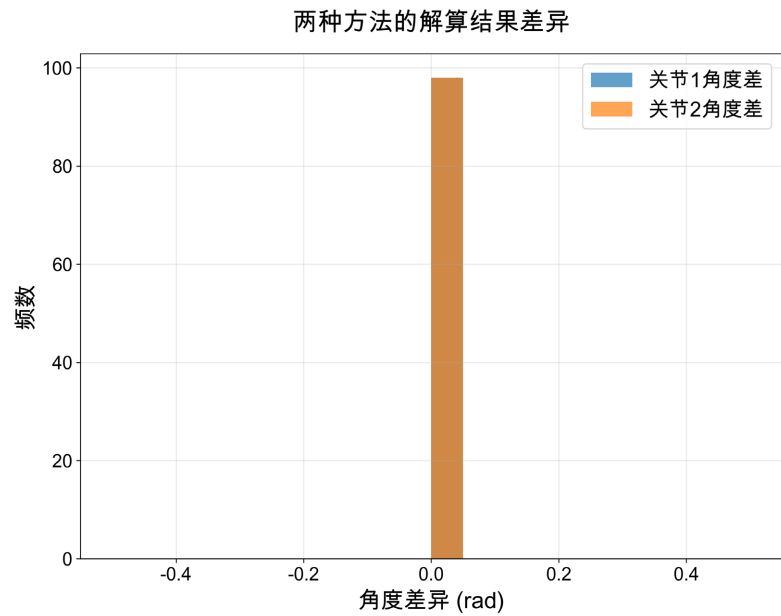


Figure 7. Angle difference diagram  
图 7. 角度差异图

计算效率如图 8 评估显示，几何解析法的平均计算时间为  $0.12 \pm 0.02$  毫秒，雅可比矩阵法为  $0.52 \pm 0.08$  毫秒。几何解析法的计算效率显著高于雅可比矩阵法，相差约 4.3 倍，这为算法下移至实时控制器提供了重要依据。图 9 表明，两种方法在机器人工作空间中心区域误差较小，边缘区域误差略有增加，几何解析法在整个工作空间内误差分布更加均匀，体现了其良好的稳定性。



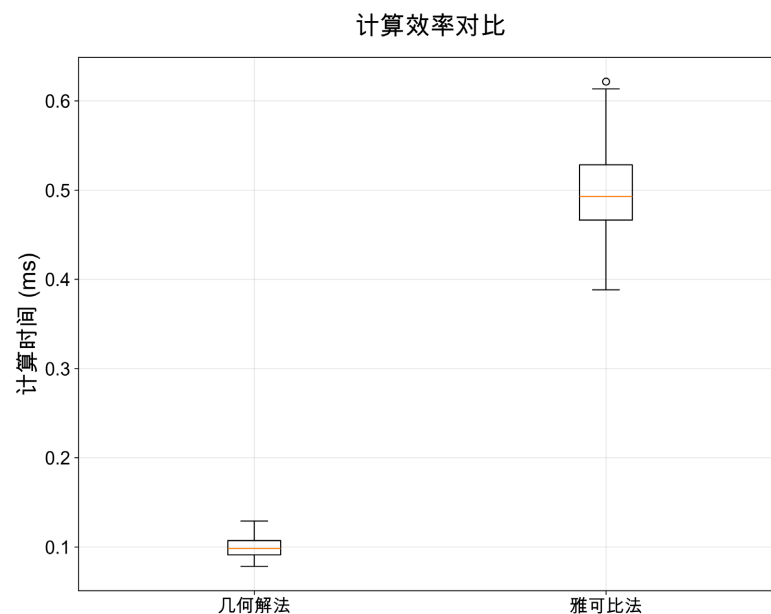


Figure 8. Computational efficiency comparison diagram

图 8. 计算效率对比图

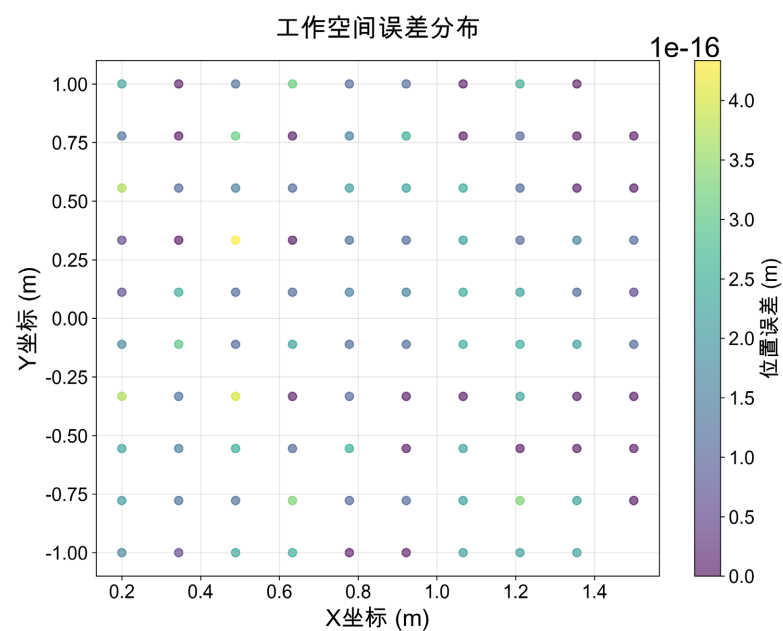


Figure 9. Workspace error analysis diagram

图 9. 工作空间误差分析图

## 5. 结论与展望

本文成功研制了一套开放式机器人教学实验系统，通过创新的上下位机协同架构与算法下移策略，有效解决了传统教学设备存在的算法黑箱问题。系统基于雷赛 BAC632E 运动控制器构建了实时控制平台，支持 SCARA 与 Delta 机器人的对比教学。通过将运动学算法优化移植至控制器内核，显著提升了系统实时性，实验表明几何解析法较雅可比数值法计算效率提升约 4.3 倍，且具有更好的稳定性。

系统设计了从 D-H 参数认知到算法验证的多层次实验, 通过交互式可视化界面使学生直观理解运动学原理。教学实践表明, 该系统能有效加深学生对机器人学核心概念的理解, 培养工程实践能力。

未来研究将从三方面深入: 一是扩展系统功能, 增加六轴关节臂等更多构型, 开发数字孪生模块; 二是优化技术实现, 将基础函数库标准化, 提升系统易用性; 三是完善教学体系, 开发配套课程并开展大规模教学效果评估。本系统为机器人学教学提供了先进平台, 也为工程教育改革提供了有益借鉴。

## 参考文献

- [1] 王耀南, 江一鸣, 姜娇, 等. 机器人感知与控制关键技术及其智能制造应用[J]. 自动化学报, 2023, 49(3): 494-513.
- [2] Quigley, M., Gerkey, B., Conley, K., *et al.* (2009) ROS: An Open-Source Robot Operating System. ICRA Workshop on Open Source Software.
- [3] Corke, P. (2017) Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB. Springer.
- [4] Bischoff, R., Kurth, J., Schreiber, G., *et al.* (2010) The KUKA-DLR Lightweight Robot Arm—A New Reference Platform for Robotics Research and Education. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Munich, 7-9 June 2010, 1-8.
- [5] 刘大翔. 面向操作任务的机器人交互系统研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [6] 黄海丰, 刘培森, 李擎, 于欣波. 协作机器人智能控制研究综述[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 780-791.
- [7] Liu, Y.J., Zhu, T.Y., Li, Q.D., *et al.* (2025) Integral Terminal Sliding Mode Control of Mobile Manipulators. *Control Theory and Technology*, **23**, 193-206.
- [8] Wang, Q., Xu, W. and Leng, Z. (2025) Adaptive Event-Triggered Anti-Windup Trajectory Tracking Control for Robotic Manipulator. *ISA Transactions*, **167**, 1137-1146. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2025.10.020>
- [9] 王军政. 机器人控制系统设计与 MATLAB 仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [10] Colgate, J.E., Wannasuphoprasit, W. and Peshkin, M.A. (1996) Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Atlanta, 17-22 November 1996, 1-7.
- [11] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.