

学校代码:10363

学 号: 2220110105



Anhui Polytechnic University

题目 基于位姿追踪的工业机器人演示示教系统研究

论文作者 程旭

指 导 教 师 方明 副教授

学科(专业) 机械

研 究 方 向 数字孪生

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：TP242

单位代码：10363

密 级：公 开

学 号：2220110105

基于位姿追踪的工业机器人演示示教系统研究

RESEARCH ON INDUSTRIAL ROBOT DEMONSTRATION AND TEACHING SYSTEM BASED ON POSITION TRACKING

学生姓名	程旭
校内导师	方明 副教授
校外导师	蒋立军
专 业	机械
研究方向	数字孪生

论文答辩日期：2025 年 5 月 9 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：程旭

日期：2025 年 5 月 20 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在_____年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

程旭

指导教师签名：



日期： 2025 年 5 月 20 日

日期： 2025 年 5 月 20 日

基于位姿追踪的工业机器人演示示教系统研究

摘 要

随着工业机器人在提升生产效率、降低人力成本方面优势的日益凸显，其被广泛应用于焊接、装配、搬运、喷涂等多个领域。然而，面对生产任务和环境的不断变化，传统示教方式（如示教器编程和离线编程）逐渐显现出效率低下、对操作者专业技能要求过高等问题，这促使了对更高效、更具交互性示教编程方式的迫切需求。为此，本文提出了一种基于位姿追踪的工业机器人演示示教系统，旨在提高示教编程的效率，降低使用成本，同时确保操作的高精度与安全性。

首先，对工业机器人示教编程的技术难点进行了系统分析，通过对比国内外研究现状，明确了基于位姿追踪的演示示教技术在处理复杂轨迹任务时的独特优势。在此基础上，引入了 HTC VIVE 的 VR 定位技术，该装置在静止状态下的位置抖动误差小于 0.2 mm，姿态误差低于 0.03°，具有高精度和稳定性的特点。针对传统定位技术成本高、精度低的问题，设计了一种枪形示教装置，并结合四基站协同定位方案，有效提升了定位的准确性和可靠性。此外，通过双追踪器异常检测算法的应用，进一步增强了数据的准确性和系统的稳定性。

其次，针对定位系统与机器人基坐标系的空间映射问题，提出了基于四点标定法结合奇异值分解（SVD）的转换矩阵求解方法，并通

过法向迭代最近点（Normal Iterative Closest Point, NICP）算法对转换矩阵进行精度补偿。实验验证表明，NICP 算法优化后线形轨迹平均位置误差由 5.514 mm 降至 2.656 mm，弧形轨迹误差由 5.667 mm 降至 3.149 mm，姿态误差平均降低约 10%。在此过程中，还基于 D-H 参数法建立了机器人的正逆运动学模型，为机器人的精准控制提供了理论基础。

然后，基于 Unity3D 开发了机器人示教系统仿真平台，实现了机器人模型的高精度建模与优化，并通过虚拟场景布置、机器人运动仿真以及与现实机器人的通信连接，构建了一个高效、直观的示教环境。同时，引入了基于包围盒的碰撞检测算法，避免了机器人在仿真过程中的不合理碰撞，提高了仿真的稳定性和可靠性。此外，设计了友好的交互界面，提升了系统的易用性。

最后，设计并搭建机器人演示示教系统实验平台，进行多维度实验验证。实验结果表明，所提系统在不同速度梯度下均能保持较高的轨迹位置和姿态精度，轨迹复现稳定性良好，现场喷涂实验进一步验证了系统的实际应用价值。本研究所开发的基于位姿追踪的工业机器人演示示教系统，有效解决了传统示教方式的弊端，为工业机器人示教提供了一种高效、便捷、高精度的新方法。

关键词：工业机器人，位姿追踪，演示示教，坐标变换，Unity3D 仿真

RESEARCH ON INDUSTRIAL ROBOT DEMONSTRATION AND TEACHING SYSTEM BASED ON POSITION TRACKING

ABSTRACT

With the increasing advantages of industrial robots in improving production efficiency and reducing labor costs, they are widely used in welding, assembly, handling, spraying and other fields. However, in the face of continuous changes in production tasks and environments, traditional teaching methods (such as teaching device programming and offline programming) have gradually shown low efficiency and high requirements for operators' professional skills, which has prompted an urgent need for more efficient and interactive teaching methods. Therefore, this paper proposes a demonstration and teaching system for industrial robots based on pose tracking, which aims to improve the efficiency of teaching and programming, reduce the use cost, and ensure the high precision and safety of operation.

Firstly, the technical difficulties of teaching programming of industrial

robots are systematically analyzed. By comparing the research status at home and abroad, the unique advantages of demonstration and teaching technology based on pose tracking in dealing with complex trajectory tasks are clarified. On this basis, the VR positioning technology of HTC VIVE is introduced. The position jitter error of the device in the static state is less than 0.2 mm, and the attitude error is less than 0.03° , which has the characteristics of high precision and stability. Aiming at the problems of high cost and low precision of traditional positioning technology, a gun-shaped teaching device is designed and combined with the four-base station cooperative positioning scheme, which effectively improves the accuracy and reliability of positioning. In addition, the accuracy of the data and the stability of the system are further enhanced through the application of the anomaly detection algorithm of the dual tracker.

Secondly, aiming at the spatial mapping between the positioning system and the robot base coordinate system, a transformation matrix solution method based on four-point calibration combined with singular value decomposition (SVD) is proposed. Normal Iterative Closest Point (NICP) algorithm is used to compensate for the accuracy of the transformation matrix. The experimental results show that the average position error of linear trajectory is reduced from 5.514 mm to 2.656 mm, the arc trajectory error is reduced from 5.667 mm to 3.149 mm, and the attitude error is reduced by about 10% on average. In this process, the forward and inverse

kinematics model of the robot is also established based on D-H parameter method, which provides a theoretical basis for the precise control of the robot.

Then, based on Unity3D, the simulation platform of robot teaching system was developed to realize high-precision modeling and optimization of robot model, and an efficient and intuitive teaching environment was built through virtual scene layout, robot motion simulation and communication connection with real robots. At the same time, the collision detection algorithm based on the bounding box is introduced to avoid unreasonable collision of the robot in the simulation process and improve the stability and reliability of the simulation. In addition, the friendly interactive interface is designed to improve the ease of use of the system.

Finally, the experimental platform of robot demonstration and teaching system designed and built to carry out multi-dimensional experimental verification. The experimental results show that the proposed system can maintain high trajectory position and attitude accuracy under different velocity gradients, and the trajectory reproduction stability is good. The field spraying experiment further verifies the practical application value of the system. The demonstration and teaching system of industrial robot based on pose tracking developed by this research institute effectively solves the disadvantages of traditional teaching methods, and provides a new method of high efficiency, convenience and high precision for

industrial robot teaching.

KEY WORDS: Industrial robot, Positional tracking, Demonstration teaching, Coordinate transformation, Unity3D simulation

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 机器人离线编程技术国内外研究现状	3
1.2.2 机器人演示示教技术国内外研究现状	6
1.2.3 跟踪定位技术国内外研究现状	8
1.3 课题来源	11
1.4 本文研究内容	11
第 2 章 基于 VR 定位的位姿采集系统设计	13
2.1 位姿采集系统定位原理	13
2.2 追踪器位姿数据采集	17
2.2.1 HTC VIVE Tracker 与 Unity3D 交互	17
2.2.2 位姿采集功能的实现	18
2.3 位姿采集系统定位误差分析	18
2.3.1 位姿误差来源分析	18
2.3.2 抖动误差及其影响因素分析	19
2.4 位姿采集系统的示教装置设计	20
2.5 本章小结	22
第 3 章 演示示教系统坐标变换与机器人运动学求解方法	23
3.1 演示示教系统坐标系建立	23
3.2 演示示教系统坐标变换方法求解	24
3.2.1 基于四点法的示教装置末端位置标定	24
3.2.2 基站坐标系-机器人基坐标系转换矩阵求解	26
3.2.3 基于法向迭代最近点的转换矩阵精度补偿	28
3.3 机器人运动学分析	29
3.3.1 基于 D-H 参数法的机器人运动学建模	29

3.3.2 机器人正运动学求解.....	31
3.3.3 机器人逆运动学求解.....	33
3.4 本章小结.....	37
第 4 章 基于 Unity3D 的机器人示教系统仿真平台构建.....	38
4.1 总体方案规划.....	38
4.2 虚拟场景制作与布置.....	38
4.2.1 模型的制作.....	38
4.2.2 工作场景布置.....	40
4.3 示教系统与现实机器人建立通信.....	41
4.4 基于包围盒的碰撞检测算法.....	43
4.5 示教系统交互界面设计.....	45
4.5.1 UI 组件的选择	45
4.5.2 系统 UI 界面搭建	46
4.6 本章小结.....	49
第 5 章 机器人轨迹示教实验	50
5.1 实验平台搭建.....	50
5.2 示教装置标定.....	50
5.3 NICP 算法优化轨迹精度实验	52
5.3.1 优化轨迹位置精度实验.....	52
5.3.2 优化轨迹姿态精度实验.....	53
5.4 演示示教系统追踪精度实验.....	54
5.4.1 不同速度梯度下位置精度实验.....	54
5.4.2 不同速度梯度下姿态精度实验.....	56
5.5 演示示教系统轨迹复现稳定性实验.....	58
5.6 本章小结.....	59
第 6 章 总结与展望	61
参考文献	63

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

工业机器人是一种能够自动执行任务的机器装置，它可以通过编程控制，模拟人类手臂和手腕的动作，完成各种复杂的操作。工业机器人通常具有多个自由度，能够灵活地在三维空间中移动和操作物体。它们广泛应用于制造业中的焊接、装配、搬运、喷涂等环节，能够提高生产效率、保证产品质量、降低劳动强度和改善劳动条件。根据国际机器人联合会（IFR）发布的《2024 世界机器人报告》，2024 年中国工业机器人市场销量超 29.4 万台，同比 2023 年实现 3.9% 的增幅^[1]。中国已经连续多年成为全球最大的工业机器人消费国，且国产工业机器人厂商市场份额 2024 年已达到 52.3%。



图 1-1 工业机器人加工产线

随着机器人的市场不断扩大，喷涂、焊接、打磨等领域对机器人的示教编程提出了更高要求，以适应不断变化的生产任务和环境。目前主流示教方式有两种，分别为示教器编程示教和离线编程示教^[2]。示教器编程示教是通过示教器（也称为示教盒）直接控制机器人的运动，记录机器人的位姿数据并编写运动指令^[3]。如图 1-1 所示，操作人员通过示教器上的按钮或摇杆控制机器人的末端执行器到达指定的位置和姿态，记录下这些位姿数据，然后编写相应的运动指令，完成机器人在生产作业中的轨迹规划。示教器编程示教是目前使用最广泛的示教方式，能够准确的完成轨迹点定位，但对于复杂的路径需要记录大量位姿点，且编程质量高度依赖于操作者的经验和技能，导致示教效率低下。

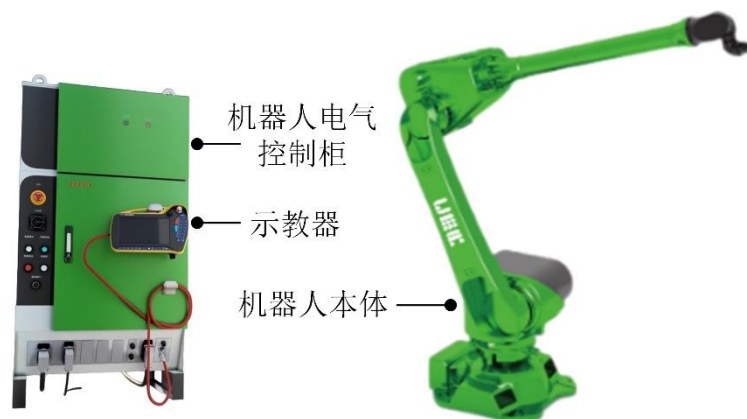


图 1-2 机器人示教器编程

机器人离线编程是操作人员在计算机上对机器人进行编程,然后将程序下载到机器人控制器中执行^[4]。程序员可以在离线环境中编写和调试代码,通过模拟实际设备的运行情况,进行代码的调试和测试,减少了现场调试的时间,且编程人员可以在安全的环境下进行编程。但是,它仍然存在编程效率低、对操作人员专业知识要求、编程复杂度高、环境模拟不准确以及修正率高等问题,同时机器人离线编程软件售价较高,这些问题限制了其在某些应用场景中的使用,并增加了技术门槛和维护的复杂性。

上述机器人常见的两种示教方式都需要操作者具有一定的专业知识和技能,为了快速、便捷生成机器人的运动程序,设计出一种高效、易操作的机器人示教编程方式是目前重要的研究方向。在这些以高效率和简化编程为特点的机器人示教编程系统里,引导示教技术在协作机器人领域得到了极为广泛的应用。根据技术规范 ISO TS 15066^[5],引导示教(Hand Guiding)的定义是:操作员通过一个手动操作的装置(hand-operated device)将运动指令传送给机器人系统。目前,协作机器人常用免力传感器、多维力传感器、关节力矩传感器等传感技术来实现引导示教,但目前这项技术实现难度大、实现成本高,且不适用于大负载工业机器人。

本质上工业机器人的示教编程是一种人机交互技术,这种编程方式存在一定的局限性,尤其是在进行复杂轨迹编程时,需要大量的示教点,这不仅导致编程效率低下,还使得操作过程变得繁琐。机器人演示示教是机器人从人类的演示操作中提取有效信息,并将人类操作映射成机器人控制命令的过程^[6-7]。与传统机器人编程方法相比,它可以大大降低对操作者的专业知识要求,提高示教编程效率,

减少人工操作的风险。

Rüdiger Dillman 等人^[8]将机器人演示示教技术分为技能层面上的 (Symbolic-level) 和轨迹层面上的 (Trajectory-level), 这种分类有助于更好地理解和应用机器人演示示教技术。技能层面上的演示示教主要注重任务的抽象表示和符号化描述, 机器人通过学习和理解任务的高层次概念和规则来执行任务。操作人员可以通过定义任务的符号表示和逻辑规则来编程机器人, 机器人通过符号推理和规划来生成相应的运动轨迹。轨迹层面上的演示示教则关注机器人的运动轨迹, 即机器人在空间中的位置和姿态随时间的变化。机器人通过记录和模仿人类操作者的动作来生成运动轨迹。操作人员可以通过手动引导机器人或使用某种跟踪系统来执行任务, 机器人则通过其传感器和控制系统记录这些动作, 并将其转化为可执行的程序代码。

技能层面上的演示示教目前主要应用于物流搬运、装配等对示教精度要求较低的任务场景。技能层面上的机器人演示编程技术虽然在编程效率上优于传统示教方式, 但由于其普遍依赖于三维视觉和图像处理技术来实现对演示操作的分解和识别, 导致示教精度受到较大影响。因此, 这种技术目前仍主要停留在实验室研究阶段, 尚未广泛应用于实际工业生产环境中。对应轨迹层面上的演示示教通过高精度的位姿追踪技术采集使用者的运动轨迹, 机器人能够精确地复制人类操作者的动作, 适用于需要高精度运动控制的任務, 如喷涂、焊接等。

1.2 国内外研究现状

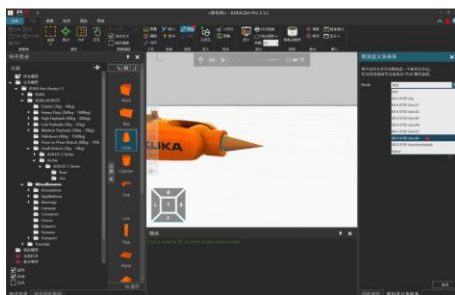
1.2.1 机器人离线编程技术国内外研究现状

机器人离线编程 (OLP) 是指在不直接连接实际机器人的情况下, 利用计算机软件在虚拟环境中进行机器人程序的编写、调试和优化, 通过模拟机器人、工作环境、工具和工件, 预先规划机器人的运动路径、任务流程和操作参数, 最终生成可在实际机器人上执行的程序^[9]。机器人离线编程可以提高编程效率、减少机器人停机时间、对于复杂轨迹可以增强编程的灵活性和精确性, 以及降低对实际生产环境的干扰^[10]。

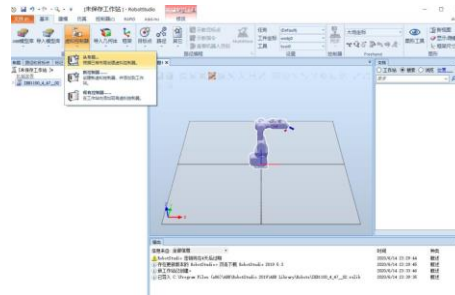
国外对机器人离线编程研究起步较早, 许多离线编程系统已经完成商业化。如图 1-2 (a) 所示, KUKA.Sim^[11]是 KUKA 公司开发的一款专业离线编程与仿

真软件，主要用于在虚拟环境中对 KUKA 工业机器人进行编程、路径规划和任务仿真。它通过高精度的三维模型模拟机器人、工具、工件和工作环境，帮助用户提前验证程序的可行性和优化机器人的运动轨迹。KUKA.Sim 支持复杂任务的多机器人协作、碰撞检测和程序优化，显著减少实际生产中的调试时间和停机时间，可以完成高度精确的仿真。但是软件价格较高，且对计算机硬件性能要求较高，会增加使用成本。

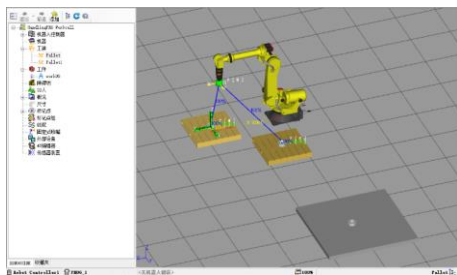
如图 1-2 (b) 所示，Robot Studio^[12]是 ABB 公司开发的一款领先的工业机器人离线编程与仿真软件，专为 ABB 机器人设计。它通过在虚拟环境中构建机器人、工具、工件和工作站的三维模型，支持用户进行机器人程序的编写、路径规划、任务仿真和优化。Robot Studio 提供了强大的功能，如碰撞检测、节拍时间分析和虚拟调试，帮助用户在投入实际生产前验证程序的准确性和效率。但软件价格不菲，且对复杂多机器人系统的支持相对有限。



(a) KUKA.Sim 用户界面



(b) Robot Studio 用户界面



(c) Robo Guide 用户界面



(d) FASTSUITE 用户界面

图 1-3 国外机器人离线编程系统

如图 1-2 (c) 所示，Robo Guide^[13]是 FANUC 公司开发的一款专业离线编程与仿真软件，专为 FANUC 工业机器人设计。其核心功能包括 3D 仿真建模、路径规划、碰撞检测、程序调试及离线编程，支持多种 FANUC 机器人型号，可无缝生成可直接导入实体机器人的代码。但软件授权成本较高，操作复杂需专业培

训。

如图 1-2 (d) 所示, FASTSUITE^[14]是由德国 CENIT 公司开发的工业机器人离线编程与工艺优化软件,实现离线编程并直接生成可执行代码。具有高度灵活的跨平台兼容性,具有对复杂工艺的高效优化能力,对 CAD/CAM 系统可以实现无缝集成,但部分高级功能依赖额外模块且计算资源消耗较大。

除了商业化的离线编程软件,国外众多高校、专家对离线编程技术也做了前瞻性研究。Beomyeong Park 等人^[15]基于 Uinty3D 的机器人管理平台,用户可在 UI 中直接生成机器人臂动作并实时驱动机器人。Gîrbacia F 等人^[16]提出一种利用 VR 技术的工业机器人离线编程方法及原型系统,用户可在真实环境中控制虚拟机器人模型,规划无碰撞路径、生成并模拟程序。Andaluz V H 等人^[17]介绍了一种新开发的 3D 模拟器在机器人领域的应用,该模拟器能够分析不同控制方案在多种环境下的性能,通过 Unity3D 和 MATLAB 的信息交换实现实时控制,并通过自主控制和遥操作方案的实施对模拟器进行了评估。

国内虽然对离线编程系统研究起步较晚,但也取得了不少成果。北京华航唯实设计一款通用型离线编程系统 PQArt^[18],它拥有自主研发的 3D 渲染引擎、几何拓扑、特征驱动、自适应求解算法、多品牌机器人后置、碰撞检测、代码仿真等核心技术,支持多种三维 CAD 模型格式导入,兼容多种工业机器人品牌。但生产线仿真能力不足,对非标产品适应性较差。郑州大学孟少飞课题组^[19]针对六自由度模块化串联工业机器人,采用 MVC 架构设计离线编程系统,通过 D-H 参数法等进行运动学分析,研究关节和笛卡尔空间轨迹插值算法,利用 MFC 和 OpenGL 实现虚拟建模,并开发离线编程及辅助功能模块,经实验验证系统架构稳定、灵活可靠。北京工业大学的盖胜男课题组^[20]基于 Unity3D 引擎搭建焊接机器人工作站,开发了离线编程系统,通过同点异线焊缝识别算法等实现单机器人轨迹规划与多轴联动复杂轨迹规划。哈尔滨理工大学贾飞^[21]课题组以 Unity3D 为开发平台,对 FANUC R2000ic 机器人的运动学建模、轨迹规划、虚拟仿真系统设计及与真实机器人的通信控制展开研究,通过西门子 PLC 实现数据传输,验证了系统的可行性。华中科技大学方伟课题组^[22]基于 OpenGL 设计了一款集成多种功能的工业机器人离线编程及仿真软件,通过分层架构、ZeroMQ 通信、DXF 模型解析、OpenGL 模型加载和轨迹规划等技术实现。

机器人离线编程因智能化、可在线调整等优点被广泛采用,但该技术对工业机器人操作者的专业知识要求较高。为降低编程门槛,学界提出了基于虚拟现实的机器人示教系统、基于计算机视觉的演示编程技术等新兴示教技术,这些技术简化了编程流程,使非专业人员也能轻松上手,为机器人编程领域带来了更便捷、高效的解决方案,推动了机器人技术的普及与发展。

1.2.2 机器人演示示教技术国内外研究现状

机器人演示编程(Robot Programming by Demonstration, RPD),即机器人从人类的演示操作中提取有效信息,并将其转化为可执行程序,以实现自动化任务的技术。国外在机器人演示示教领域已经取得了显著的研究成果。许多研究团队致力于开发先进的算法和系统,以实现机器人能够从人类的演示中快速、准确地学习任务。Mendoza-Garcia 等人^[23]提出了基于 Kinect 深度相机的演示示教方法,并以 MIG 焊接机器人为例进行验证。该方法通过 Kinect 从操作员的一只手臂提取轨迹点的位置和旋转信息,控制机器人生成符合位置和方向约束的轨迹并执行焊接任务。该方法虽然能够快速生成机器人运动轨迹,但由于 Kinect 传感器对 3D 点检测的准确性较低(8-14mm^[24]),导致示教精度达不到工业上的要求。Moe S 等人^[25]也基于 Kinect 深度相机开发了一种利用人类动作控制 5 自由度机器人的系统,通过读取 Kinect 以及智能手机中的加速度数据,生成位姿信号给机器人控制器,实现与机器人的实时交互,但该系统的精度也被 Kinect 传感器所限制。



图 1-4 Kinect 深度相机

目前,基于增强现实技术(Augmented reality, AR)实现机器人演示示教也是热门的研究方向。Lambrecht J 团队^[26]提出了一种利用 AR 和无标记手势识别的工业机器人直观编程系统,利用 3D 运动跟踪系统和手持设备,使操作人员能够通过手势定义适应任务,并通过 VR 技术获得直接视觉反馈,实现对包含多个抓取和放置任务的装配序列的编程,同时开发了统一接口以便将程序传输到任意

工业机器人控制器。Ng C L 等人^[27]提出了一种在 AR 环境中使用激光和摄像头进行机器人工具路径示教的新方法。通过融合摄像头和激光测距仪的信息，设计出一种直观、快速且安全的工业机器人编程方式，如图 1-4 所示，用户只需在 AR 环境中点击工作件图像即可生成工具路径，便可调整虚拟工具方向和模拟工具轨迹。

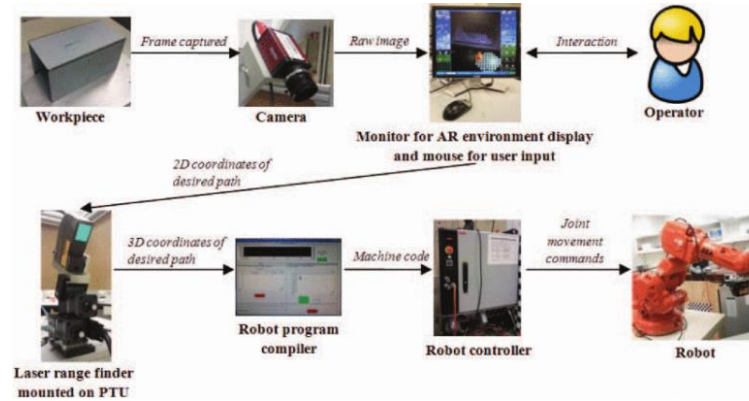


图 1-5 基于 AR 的机器人演示示教系统架构^[28]

Fresnillo P M 等人^[28]提出了一种基于 ROS 标准的演示示教方法，该系统由五个模块组成，其中三个模块负责处理传感器收集的操作数据，并将其从低级转换为高级操作过程，一个模块用于训练系统以生成优化的多阶多元马尔可夫模型，用于操作识别和过程分割，最后一个模块用于系统接口和校准。系统通过数据手套和手部位置追踪器捕获操作员的运动数据，经过四名用户和五种不同物体类型的训练和测试，实现了操作识别、过程分割与分类以及操作位置检测，从而让机器人能够快速和直观地进行编程。

近年来，国内高校和科研机构加大了对机器人演示示教的研究。哈尔滨工业大学的姬一明团队^[29]设计了基于红外激光定位和光学动捕的技术方案作为机器人作业路径的采集模块，实现以 60-90 Hz 的频率在 1 mm 误差以内采集操作者的演示路径。此外，通过滤波后的位置轨迹提取特征点拟合 NURBS 曲线，进行速度规划和等时插值，并基于姿态点拟合四元数样条曲线，生成对应的等时插值点，得到关节运动控制指令，实现受约束环境下的机械臂轨迹演示示教。张宏达团队^[30]提出了一种基于 ROS 平台的机器人轨迹演示编程系统，通过笔形示教装置和机器视觉算法，用户可以直观高效地为机器人编程。系统通过追踪笔形示教装置的位置和方向，获取机器人工作空间中的点云数据，并将其转换为机器人基坐标系下的位姿信息，从而实现演示示教。

青岛理工大学的张浩团队^[31], 开发了基于视觉的机器人抓取与装配演示示教系统, 该系统通过目标识别与中心点定位、示教动作识别和机器人动作生成等模块, 实现了对机器人抓取与装配任务的高效编程和控制, 并以轴孔装配为例进行了实验验证。此外, 论文还提出了基于深度强化学习的机器人自主抓取与装配技能学习方法, 通过抓取与装配先验知识信息提取、机器人抓取和装配深度强化学习网络等模块, 提高了机器人自主抓取与装配的成功率和准确率。

浙江大学的王亚彪团队^[32]针对工业机器人演示示教中的零件识别和位姿估计问题, 提出了多种方法以提高识别精度和适应性。利用 BP 神经网络进行颜色判别, 并融合灰度共生矩阵和 Tamura 粗糙度描述的纹理特征, 通过非线性 SVM 实现不同放置状态的零件识别, 识别正确率达 99.33%。王浩团队^[33]针对工业机器人演示编程中的运动控制问题, 搭建了面向工业装配演示示教的机器人执行单元, 以 ABB IRB120 机器人为基础, 完成了机械人与工作台的标定及运动控制等基础模块的开发, 实现了基于视觉观测的高精度装配任务。

综上所述, 国外在机器人演示示教领域的研究已取得显著进展, 多种基于先进传感器和增强现实技术的方法被提出并验证, 为机器人快速、直观编程提供了新途径, 但部分技术因传感器精度限制, 在工业应用中仍有待完善。国内相关研究近年来也蓬勃发展, 高校与科研机构各团队积极探索适合我国的技术路径, 在轨迹规划、视觉识别、自主学习等方面取得了众多实用成果。然而, 无论国内外, 该领域仍面临一些共性挑战, 如如何进一步提高示教精度、降低系统成本、增强人机交互的自然性与安全性等。

1.2.3 跟踪定位技术国内外研究现状

在机器人演示示教的实现过程中, 示教轨迹的跟踪与定位至关重要。对于跟踪定位技术, 国内外已经发展出多种成熟方案, 例如电磁跟踪、激光跟踪、基于视觉跟踪, 以及基于 VR 的定位技术等。

电磁跟踪技术是指利用电磁场的变化来确定物体的位置, 具有较高的精度和可靠性^[34]。国外电磁跟踪定位技术发展较为成熟, Polhemus、NDI 等企业已经将电磁跟踪系统推向市场, 并且已经构建了完整的产品体系, 其主流产品的性能参数具体见表 1-1。然而, 这类技术成熟且精度高的电磁跟踪系统, 往往价格不菲。

表 1-1 国外电磁跟踪系统参数表

产品名称	测量距离/mm	位置精度/mm	方位精度/deg
Polhemus Patriot	914	1.52	1.0
Polhemus Viper	914	0.76	0.15
NDI Aurora	660	0.70	0.30
NDI 3D Guidance	660	1.40	1.50

国内，华南理工大学王恒团队^[35]提出了一种新型的无线 6 自由度磁性姿态追踪系统，该系统利用固定电磁体作为主磁场源，以及附着在移动目标上的高磁导率软磁体作为敏感元件。通过设计具有三轴不等尺寸的软磁体实现各向异性磁化，从而实现 3 自由度方向跟踪。该系统在同时进行平移和旋转的姿态追踪实验中，位置误差低于 5 mm，方向误差低于 4°。中国科学院大学李志飞团队^[36]针对电磁定位技术在运动跟踪中的优势与不足，深入研究了载流线圈磁场分布模型、6-DoF 求解算法、电磁信号处理及系统参数校准等关键技术。实现了在 15 cm³ 的空间范围内达到 14 mm 的定位精度。



图 1-6 NDI Aurora 电磁跟踪系统组成架构

激光跟踪技术是一种高精度测量技术，它通过激光束的反射或散射来实时监测和确定目标物体的位置及运动轨迹^[37]。该技术在工业制造、航空航天、军事等领域有广泛应用，国外如 Leica 和 API 等公司已经研制了成熟的激光跟踪系统，实现了在 20 m 至 320 m 范围内 0.01 mm 至 0.5 mm 的定位精度^[38]，但其售价非常高。国内，山东科技大学的杨兴建团队^[39]针对大尺寸空间坐标测量中的问题，基于误差椭球理论和加权融合算法，实现了多测站测量数据的高精度融合。文笑雨等人^[40]针对飞机装配中激光跟踪仪的位置优化问题，提出了数字孪生环境下

基于 Q-learning 改进粒子群算法的方法。李海涛等人^[41]提出了一种激光跟踪基站标定方法，该方法基于误差椭球理论和加权融合算法，实现了多测站测量数据的高精度融合。



图 1-7 Leica 激光跟踪仪

基于视觉的跟踪定位技术是一种利用计算机视觉和机器学习等技术，对图像中的物体进行识别、定位和跟踪的技术^[42]。当前，国内外众多学者对视觉跟踪展开大量研究，Cashbaugh J 团队^[43]通过优化移动跟踪站的配置，即使传感器性能不同，也能产生位置估计误差最小的目标位置估计。Kim J 等人^[44]提出了一种基于视觉和 AR 技术的室内导航定位系统，能够自动从拍摄的室内环境图像序列中识别位置，并通过 AR 技术将位置信息叠加到用户的视野中。刘宇晨团队^[45]研究并搭建了基于双目视觉的跟踪定位系统，通过优化立体匹配和目标检测算法，实现了对工作人员的实时监控与安全预警。梅杰^[46]提出了一种结合颜色均衡与 G-B 通道先验融合的水下图像增强算法，并将其与视觉 SLAM 方法相结合，实现了水下图像增强和视觉三维重建。但是，基于视觉的跟踪技术存在诸如遮挡、形变、实时性与精度平衡、多目标跟踪复杂度、对环境敏感、数据依赖、模型更新困难及特征提取限制等多方面缺点，影响其跟踪效果和应用范围。

基于 VR 的定位技术是一种通过红外激光发射器在空间中进行平面扫描，利用红外传感器接收信号并根据扫描时间和角度计算物体空间位置的定位技术，具有成本低、精度高、响应速度快等优点。目前，Valve 公司开发的 LightHouse 定位系统是应用最广的 VR 定位技术。国内外许多学者在此基础上进行了二次开发，Švejda M 等人^[47]基于 VIVE Tracker 提出了一种人机交互示教系统，简化了

喷涂机器人示教编程的流程，但示教误差过大。Weber M 等人^[48]利用 EKF 和 UKF 传感器融合算法，通过对不同基站数量和 VIVE 跟踪的融合进行比较，找到了提升精度最佳的融合方案。国内对 VR 定位的研究较少，孙俊彬团队^[49]设计了一种基于 Steam VR 激光扫描技术的手指位置检测系统，利用 TS4231 芯片获取光学基站发射的激光信号，实现手指在三维空间中相对测量误差低于 2%。卢敬德等人^[50]基于 VIVE Tracker 和 Leap Motion 的混合人体动捕方法，通过局部增强的多 Leap Motion 方案获取稳定、准确的手部姿态。

综上所述，电磁跟踪技术精度高、可靠性强，但设备成本高；激光跟踪技术具有高精度和广泛的应用范围，但成本高且对环境要求高；视觉跟踪技术成本低、灵活性好，但存在遮挡、形变和精度平衡等问题。相比之下，VR 定位技术不仅成本低，而且能提供高精度的定位和姿态追踪，适用于多种环境。

1.3 课题来源

本课题来源于芜湖市“赤铸之光”重大科技项目，“基于大语言模型和虚拟仿真技术的智能机器人设计系统研发及产业化”，项目编号 2023zd10。

1.4 本文研究内容

本课题的目的是开发一种工业机器人演示示教系统，设计实验验证本系统满足效率、精度、安全性和使用方便的要求。针对这些需求，本文主要研究内容如下。

(1) 开发了基于 VR 定位技术的位姿采集系统。该系统利用 HTC VIVE Tracker 的高精度定位特性，设计了一种枪形示教装置，并结合四基站协同定位方案与双追踪器异常检测算法，从而确保位姿数据的准确性和可靠性，以满足复杂作业环境下的示教需求。

(2) 针对定位系统与机器人基坐标系的空间映射问题，提出了基于四点标定法与 SVD 的转换矩阵求解方法，并引入 NICP 算法进行精度补偿，有效提升了位姿变换的精度。此外，基于 D-H 参数法建立了机器人的运动学模型，详细推导了正逆运动学的求解过程，为机器人的精准控制提供了理论基础。

(3) 基于 Unity3D 开发了机器人示教系统仿真平台。在该平台上，实现了机器人模型的高精度建模与优化，构建了虚拟场景，并通过 Socket 通信技术实

现了与现实机器人的数据交互。同时，引入了基于包围盒的碰撞检测算法，确保机器人在仿真过程中的安全性。此外，设计了友好的交互界面，提升了系统的易用性。

（4）搭建了机器人演示示教系统的实验平台，进行了多组实验以验证系统的性能。实验内容包括补偿矩阵优化轨迹位置和姿态精度的测试、不同速度梯度下定位系统的跟踪精度测试，以及轨迹复现稳定性的评估。实验结果表明，所提系统在不同工况下均能保持较高的轨迹位置和姿态精度，且轨迹复现稳定性良好。现场喷涂实验进一步验证了系统的实际应用价值，喷涂轨迹与示教轨迹高度吻合，满足工业喷涂的精度要求。

第2章 基于VR定位的位姿采集系统设计

本章介绍了基于 HTC VR 定位技术的演示示教位姿采集系统，该技术常用于追踪定位领域。HTC VIVE Tracker 是 VR 定位系统中的追踪器，相对传统定位设备价格低廉、小巧轻便，适用于多种生产环境，并且能够集成到各种设备上，提供定位追踪。

2.1 位姿采集系统定位原理

位姿采集系统由定位基站和追踪器 VIVE Tracker 组成，定位基站发射红外光，通过追踪器的多个光敏传感器，根据不同光敏传感器接收到红外光的时间差计算并记录其在定位基站坐标系下的位置和姿态。位姿采集系统使用一个定位基站即可完成定位，追踪定位过程如图 2-1 所示。但是，为了进一步提高定位的可靠性，增大可采集区域的面积，本研究采用四个定位基站结合追踪器进行追踪定位，追踪定位过程如图 2-2 所示。

在基于四基站的 VR 定位系统中，定位基站发出包含六个部分的光信号，具体参数详见表 2-1。

表 2-1 基站发出的信号编码

红外光脉冲启动时间/ μs	脉冲长度/ μs	脉冲基站源	含义
0	65-135	A	同步脉冲信号
400	65-135	B	同步脉冲信号
800	65-135	C	同步脉冲信号
1200	65-135	D	同步脉冲信号
1222-6777	~10	A 或 B 或 C 或 D	平面激光扫描信号
8333	1556		周期结束

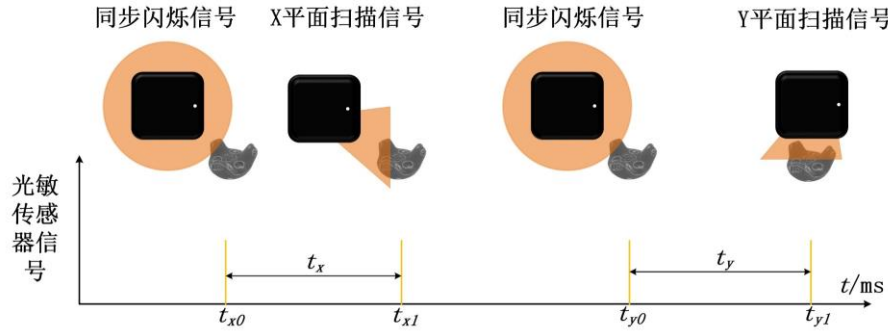


图 2-1 单基站追踪定位过程

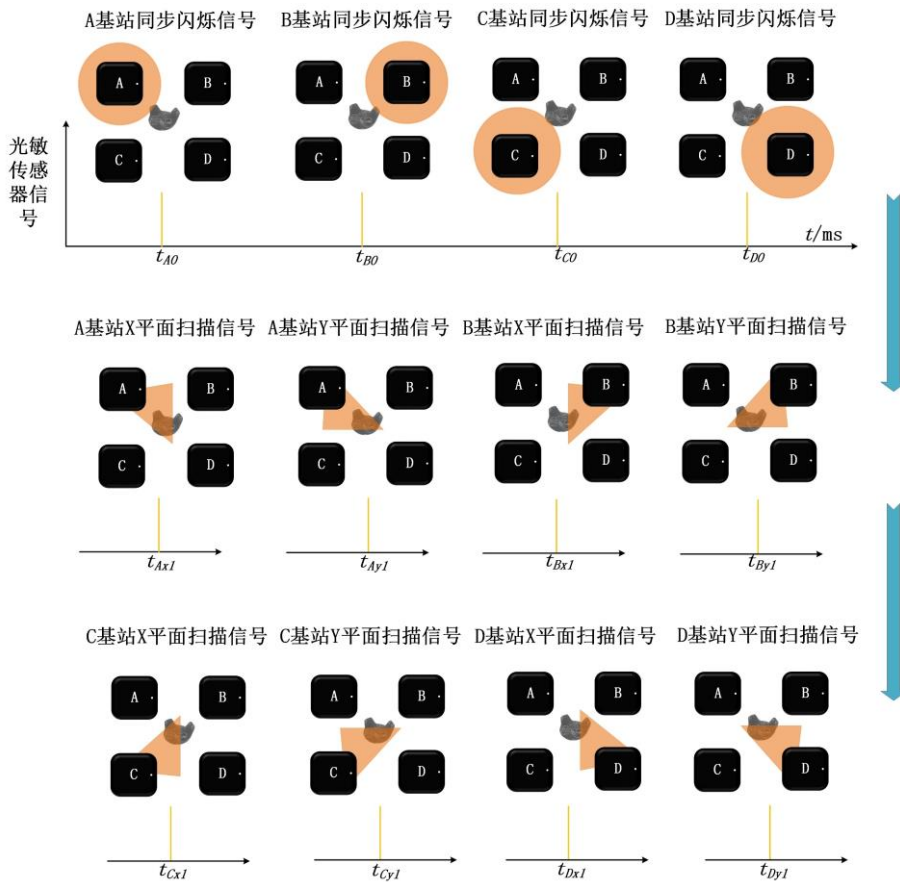


图 2-2 四基站追踪定位过程

系统在每次进行平面激光扫描前，会先由基站 A、B、C、D 发出红外扫描信号，随后产生 X（Y）平面扫描信号（对应图 2-1 中的 t_{x1} 和 t_{y1} ）。激光平面会从上至下扫描追踪器的外表面，如图 2-3 所示。当特定的红外光敏传感器接收到红外同步闪烁时，会发出电信号；当它被平面激光击中时，也会发出电信号。通过两个电信号的时间差，可以计算出该传感器相对于基站的 X（Y）平面的角度。基站发射的平面激光转速为 60rps，激光平面扫描 180° 的空间需要 8.333ms，系统根据以下公式即可计算出光敏传感器相对于基站的水平角度 φ 和垂直角度 ψ 。

$$\varphi = \frac{t_x}{8.333} \pi \quad (2-1)$$

$$\psi = \frac{t_y}{8.333} \pi \quad (2-2)$$

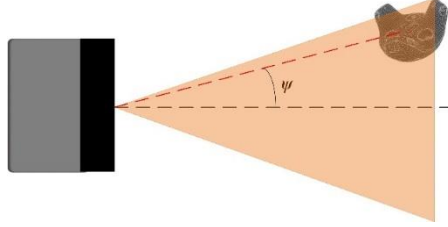


图 2-3 红外激光扫过追踪器

对于追踪器的整体定位，可以通过表面多个传感器相对于基站的角度，结合三角定位算法，确定追踪器相对于基站的位置和姿态。为了求解光敏二极管与基站之间的距离，系统采用三角测量法进行计算。如图 2-4 所示，在一个完整的激光平面扫描周期内，选取追踪器表面的三个光敏传感器 A、B 和 C 作为参考点。这些二极管相对于基站坐标系的方位角 φ 和高度角 ψ 均为已知参数，而它们到定位基站坐标系中心点 O 的距离则是需要求解的未知量。

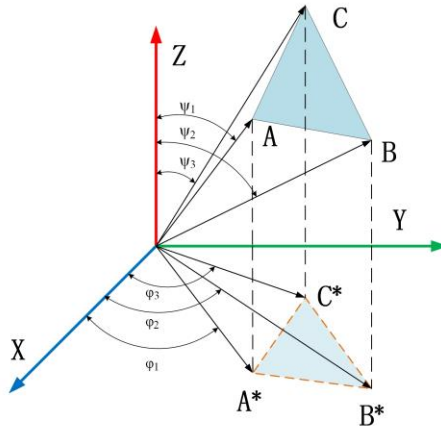


图 2-4 三角测量法原理

在定位基站坐标系下，A、B、C 三点的位置向量可以表示为 $R_A = (x_A, y_A, z_A)$ ， $R_B = (x_B, y_B, z_B)$ ， $R_C = (x_C, y_C, z_C)$ 。以点 A 为例，其直角坐标分量如式 (2-3) 所示。

$$\begin{cases} x_A = |R_A| \sin \psi_1 \cos \phi_1 \\ y_A = |R_A| \sin \psi_1 \sin \phi_1 \\ z_A = |R_A| \cos \psi_1 \end{cases} \quad (2-3)$$

随后将 R_A ， R_B ， R_C 相互进行点乘，如式 (2-4) 所示。

$$\begin{cases} R_A \cdot R_B = |R_A||R_B|\cos \alpha_{AB} \\ R_A \cdot R_C = |R_A||R_C|\cos \alpha_{AC} \\ R_B \cdot R_C = |R_B||R_C|\cos \alpha_{BC} \end{cases} \quad (2-4)$$

式中， α_{AB} 表示 R_A 和 R_B 之间的夹角， α_{AC} 表示 R_A 和 R_C 之间的夹角， α_{BC} 表示 R_B 和 R_C 之间的夹角。在直角坐标系中点乘运算可以表示为：

$$\begin{cases} R_A \cdot R_B = x_A x_B + y_A y_B + z_A z_B \\ R_A \cdot R_C = x_A x_C + y_A y_C + z_A z_C \\ R_B \cdot R_C = x_B x_C + y_B y_C + z_B z_C \end{cases} \quad (2-5)$$

且有：

$$\begin{cases} x_A x_B = |R_A| \sin \psi_1 \cos \phi_1 \cdot |R_B| \sin \psi_2 \cos \phi_2 \\ y_A y_B = |R_A| \sin \psi_1 \sin \phi_1 \cdot |R_B| \sin \psi_2 \sin \phi_2 \\ z_A z_B = |R_A| \cos \psi_1 \cdot |R_B| \cos \psi_2 \end{cases} \quad (2-6)$$

将式 (2-4)、(2-5) 和 (2-6) 联立，可以消去 $|R_A| \cdot |R_B|$ ， $|R_A| \cdot |R_C|$ 和 $|R_B| \cdot |R_C|$ ，得到以下式子：

$$\begin{cases} \cos \alpha_{AB} = \sin \psi_1 \cos \phi_1 \sin \psi_2 \cos \phi_2 \\ + \sin \psi_1 \sin \phi_1 \sin \psi_2 \sin \phi_2 + \cos \psi_1 \cos \psi_2 \\ \cos \alpha_{AC} = \sin \psi_1 \cos \phi_1 \sin \psi_3 \cos \phi_3 \\ + \sin \psi_1 \sin \phi_1 \sin \psi_3 \sin \phi_3 + \cos \psi_1 \cos \psi_3 \\ \cos \alpha_{BC} = \sin \psi_2 \cos \phi_2 \sin \psi_3 \cos \phi_3 \\ + \sin \psi_2 \sin \phi_2 \sin \psi_3 \sin \phi_3 + \cos \psi_2 \cos \psi_3 \end{cases} \quad (2-7)$$

利用余弦定理结合式 (2-7) 可得式 (2-8)

$$\begin{cases} \sin \psi_1 \cos \phi_1 \sin \psi_2 \cos \phi_2 + \sin \psi_1 \sin \phi_1 \sin \psi_2 \sin \phi_2 \\ + \cos \psi_1 \cos \psi_2 = \frac{|R_A|^2 + |R_B|^2 - \bar{AB}^2}{2|R_A||R_B|} \\ \sin \psi_1 \cos \phi_1 \sin \psi_2 \cos \phi_2 + \sin \psi_1 \sin \phi_1 \sin \psi_2 \sin \phi_2 \\ + \cos \psi_1 \cos \psi_2 = \frac{|R_A|^2 + |R_B|^2 - \bar{AB}^2}{2|R_A||R_B|} \\ \sin \psi_2 \cos \phi_2 \sin \psi_3 \cos \phi_3 + \sin \psi_2 \sin \phi_2 \sin \psi_3 \sin \phi_3 \\ + \cos \psi_2 \cos \psi_3 = \frac{|R_B|^2 + |R_C|^2 - \bar{BC}^2}{2|R_B||R_C|} \end{cases} \quad (2-8)$$

式中 $\bar{AB}$ ， $\bar{AC}$ 和 $\bar{BC}$ 表示三个点之间的距离，均是已知量。通过求解式 (2-8) 即可得到 A、B、C 三点与原点 O 之间的距离。综上可以得到在定位基站坐标系下三点所代表物体的位姿信息。从功能上看，单个定位基站配合一个追踪器即可实现位姿追踪，追踪器仅需三个有效的光敏传感器即可完成位姿解算。而本系统采用四个定位基站，且 HTC VIVE Tracker 配备了 23 个红外光敏传感器，这有效解决了遮挡问题，提高了追踪的准确性。

2.2 追踪器位姿数据采集

2.2.1 HTC VIVE Tracker 与 Unity3D 交互

本研究计划在 Unity3D 上开发一个基于 HTC VIVE Tracker 的轨迹追踪系统，实现对 HTC VIVE Tracker 的位姿数据进行实时采集和处理。Unity3D 是一款功能强大的跨平台实时内容开发工具，广泛用于创建 2D、3D、VR 和 AR 应用程序。它提供了丰富的图形渲染、物理模拟、动画系统和脚本支持，使开发者能够高效地构建交互式体验。

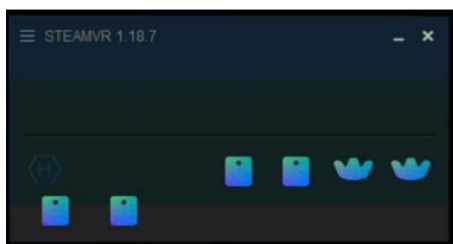


图 2-5 SteamVR 设备管理

HTC VIVE 定位系统需要在 SteamVR 的环境下才能运行，且通常需要连接头显才能使用。为了使系统能够在不连接 VR 头显的情况下运行，需要对 SteamVR 的配置文件（default.vrsettings）进行修改，将“requiredHmd”项设置为 false，从而绕过头显的检测，直接加载追踪器的驱动。如图 2-5 所示，当设备连接成功后通过 SteamVR 选中的设备管理器可以检测和浏览已连接的设备。

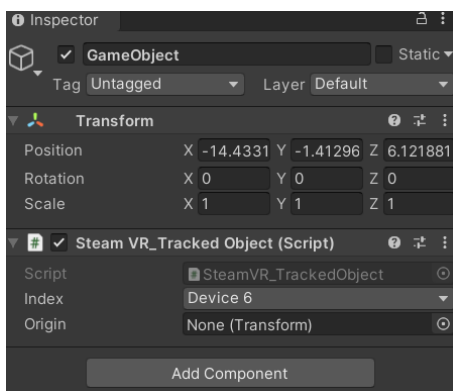


图 2-6 脚本挂载

为了获取追踪器的位姿信息，需要在 Unity3D 中导入 SteamVR Plugin 插件，用于 Unity3D 与 SteamVR 进行交互，如图 2-6 所示。随后，在 Unity3D 中创建一个空物体，并给它挂载 SteamVR_Tracked Object 脚本，用于追踪与 SteamVR 关联的追踪器。当脚本绑定 Tracker 对应的索引后，在现实世界移动 Tracker 追

踪器时，Unity3D 中对应的对象也会相应地移动，实现物体的跟踪和位置同步。

2.2.2 位姿采集功能的实现

绑定完成后，为了获取追踪器的位姿信息，可以通过 Unity3D 将位姿信息打印。首先使用 Stream Writer 类创建一个日志文件，以固定时间间隔（可通过 log Interval 参数调整）采集并存储目标物体的位置和旋转信息。在每一帧更新时，脚本通过 tracked Object 获取目标物体的三维位置坐标和欧拉角旋转数据，并将其格式化为六位小数精度。同时，系统记录当前时间戳，以确保数据的时序准确性。在脚本结束运行后时，调用 On Destroy 方法关闭文件流，确保数据的完整性和持久化存储。如图 2-7 所示，A 方框为追踪器绑定完成后的 Unity3D 界面，B 方框为打印的位姿脚本，C 方框是通过控制台输出的追踪器位姿信息。

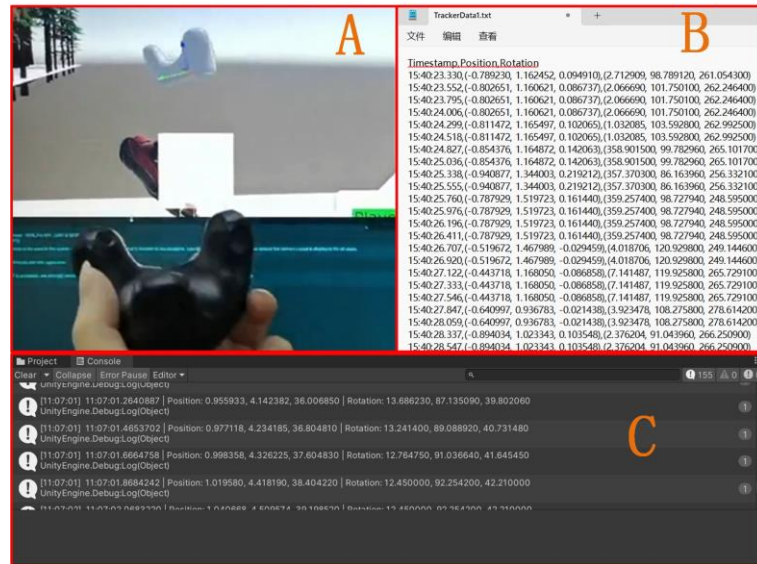


图 2-7 位姿数据采集

2.3 位姿采集系统定位误差分析

2.3.1 位姿误差来源分析

HTC VIVE Tracker 的误差主要来源于硬件和环境因素。在硬件方面，惯性测量单元（IMU）是主要的误差来源之一，其加速度计和陀螺仪存在零偏、刻度因子、非线性及随机噪声等误差。零偏误差使传感器静止时仍有非零输出，随时间导致姿态和位置数据漂移；刻度因子误差造成输出与实际物理量比例偏差，影响测量精度；非线性误差使传感器在快速或大范围运动时输出不一致。此外，Tracker

的机械结构设计与制造公差也会引入误差，如传感器安装偏差导致的交叉轴误差，以及机械振动、冲击对测量稳定性的影响。电池电压波动或电量不足也会导致数据采集可靠性下降，采样频率和信号质量变差。电路设计和元器件老化同样会影响硬件精度，如电路噪声导致信号失真，元器件性能退化降低系统精度。这些硬件误差共同作用，会显著影响 Tracker 的定位和姿态估计性能，需在设计和校准中加以补偿。

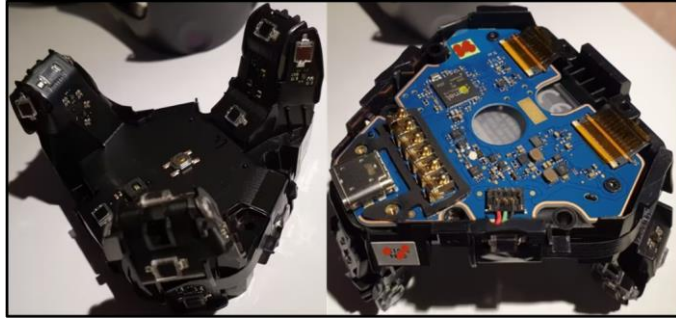


图 2-8 Tracker 拆解图

环境误差主要表现为光学遮挡和多路径效应。当 Tracker 与基站间视线被阻断或受反射表面干扰时，激光定位系统精度下降，位置解算误差增大。同时，外部电磁干扰会增加传感器数据噪声，降低系统性能。

为减少误差，Valve 通过 SteamVR 平台提供校准工具和方法。其内置校准工具可调整追踪器的位置、旋转和比例，减少硬件误差引起的定位问题。光学校准流程通过调整镜头和追踪器，确保准确捕捉基站发出的红外光，减少光学误差。系统会定期校准传感器，补偿漂移和不准确性，并发布固件更新，修正硬件误差，改进校准算法。此外，Valve 还提供用户校准指南，帮助用户手动调整设备，优化基站位置、校准追踪器和调整设置。这些措施有效降低了 HTC VIVE Tracker 的误差，提升了定位精度和稳定性。

2.3.2 抖动误差及其影响因素分析

尽管上一节已对误差来源进行了全面分析，但抖动误差具有独特的影响机制，值得单独探讨。HTC VIVE Tracker 的抖动误差成因复杂。在硬件层面，时间同步误差（源于基站时钟漂移，致使信号解算不同步）与传感器噪声（光敏元件受热噪声影响及 ADC 量化误差）共同作用，产生了基础测量偏差。环境干扰方面，红外光污染与多路径反射问题突出，且当高频运动超越采样率奈奎斯特极限时，信号混叠效应被触发，进一步放大了空间定位噪声。在系统层面，滤波算法

参数失配，如卡尔曼滤波出现过补偿，会加剧数据波动。这些因素最终在时频域中共同表现为 10-50 Hz 的高频位姿抖动。

为了探究 Tracker 的抖动误差的大小，将其保持静止，以 10 Hz 的频率连续采集其位姿，获取 Tracker 位置和姿态的抖动误差如图 2-9 所示。

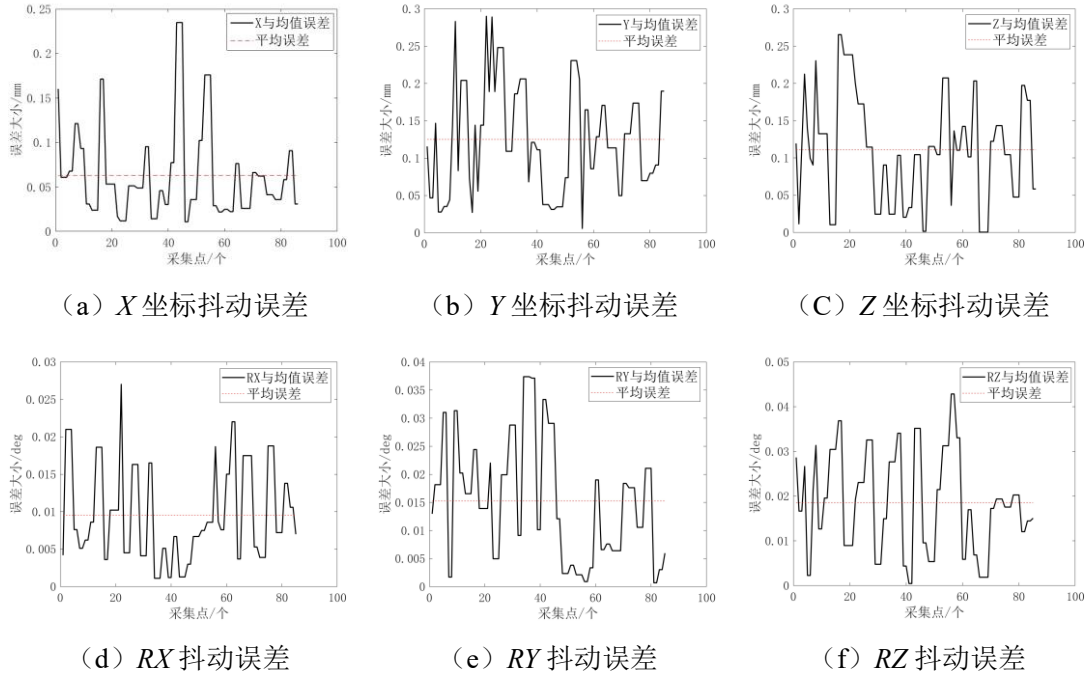


图 2-9 Tracker 位姿抖动误差

结果表明，在静止状态下，定位系统存在小于 0.2 mm 的抖动误差，以及小于 0.03 ° 的姿态角不稳定误差。在基站部署优化中，可以采用防震隔离（如橡胶减震垫）和冗余覆盖的多基站布局（相邻基站夹角 $\leq 120^\circ$ 、基站俯角 30-45°）；传感器校准与维护则需通过定期酒精清洁 Tracker 光敏面、升级固件启用动态激光功率调节，以及切换至 240 Hz 连续扫描模式，共同提升信噪比并降低环境噪声与信号混叠的耦合误差，从而实现稳定的亚毫米级定位。

2.4 位姿采集系统的示教装置设计

为了适应喷涂、涂胶、打磨等多种作业需求，本研究设计了一种枪形示教装置。如图 2-10 所示，示教装置由枪身、示教笔尖以及两个追踪器构成。



图 2-10 示教装置三维设计图

示教装置采用冗余数据采集的结构设计，两个追踪器固定在示教装置的两端，并以同时记录它们的位姿数据，在采集过程中设定相同的频率获取同时获取两个追踪器的数据。在记录数据点结束时，使用双追踪器协同定位算法优化采集的位姿信息，算法流程如图 2-11 所示。

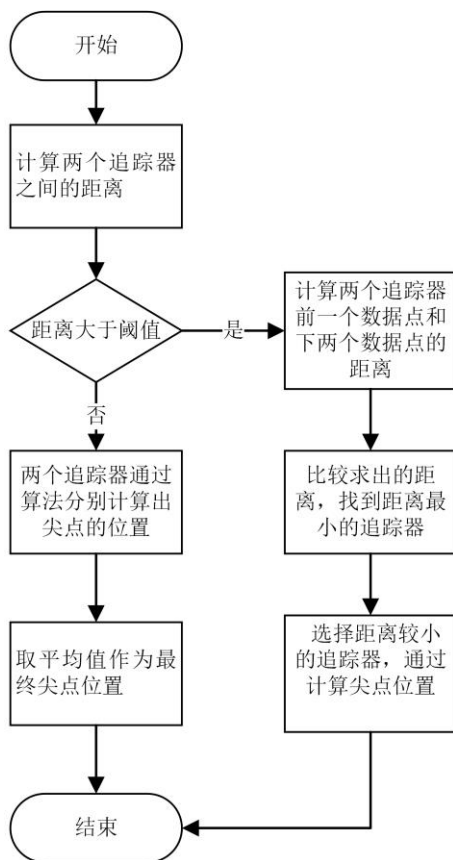


图 2-11 双追踪器协同定位算法流程图

数据采集完成后，首先检测两个追踪器之间的距离，如果两个追踪器之间的

距离超过预先定义的阈值，即距离异常较大，则认为采集数据发生异常。然后，计算出异常点 P_i 与前一个数据点 P_{i-1} 和后两个数据点 (P_{i+1} , P_{i+2}) 的最大欧式距离，如式 (2-9) 所示。

$$\begin{cases} d(P_{i-1}, P_i) = \sqrt{(x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2 + (z_{i-1} - z_i)^2} \\ d(P_{i+1}, P_i) = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \\ d(P_{i+2}, P_i) = \sqrt{(x_{i+2} - x_i)^2 + (y_{i+2} - y_i)^2 + (z_{i+2} - z_i)^2} \end{cases} \quad (2-9)$$

最后，通过比较两个追踪器最大距离大小，选择具有最小距离的追踪器来定义尖点的位置，如式 (2-10) 所示。

$$\min[\max\{d_1(P_{i-1}, P_i), d_1(P_{i+1}, P_i), d_1(P_{i+2}, P_i)\}, \{d_2(P_{i-1}, P_i), d_2(P_{i+1}, P_i), d_2(P_{i+2}, P_i)\}] \quad (2-10)$$

2.5 本章小结

本章详细介绍了基于 HTC VIVE 定位技术的轨迹位姿采集系统，包括其定位原理、数据采集方法、误差分析及示教装置设计。系统通过四基站协同的红外激光平面扫描技术，结合三角测量法实现高精度位姿解算，并通过 Unity3D 与 SteamVR 插件实现数据采集与处理。针对硬件与环境误差，提出了校准与布局优化方案，有效降低了抖动误差。此外，设计的枪形示教装置通过冗余数据采集与双追踪器协同定位算法，进一步提升了系统可靠性与适用性，为后续工作中的轨迹示教提供了高效解决方案。

第 3 章 演示示教系统坐标变换与机器人运动学求解方法

本章详细推导了演示示教系统中坐标变换与机器人运动学求解的关键技术，阐述了从坐标系建立、转换矩阵求解与精度补偿，到基于标准 D-H 参数法的机器人运动学建模与正逆运动学求解的全过程，为后续实现机器人精准示教与运动控制奠定了理论基础。

3.1 演示示教系统坐标系建立

演示示教过程中，操作人员使用示教装置示教运动轨迹，定位基站发射红外光，示教装置上的追踪器有多个光敏传感器，能够根据不同光敏传感器接收到红外光的时间差计算并记录其在定位基站坐标系下的位置和姿态，随后将 VIVE Tracker 采集到的位姿完成转换后发送给机器人，生成机器人运动指令，完成轨迹复现。

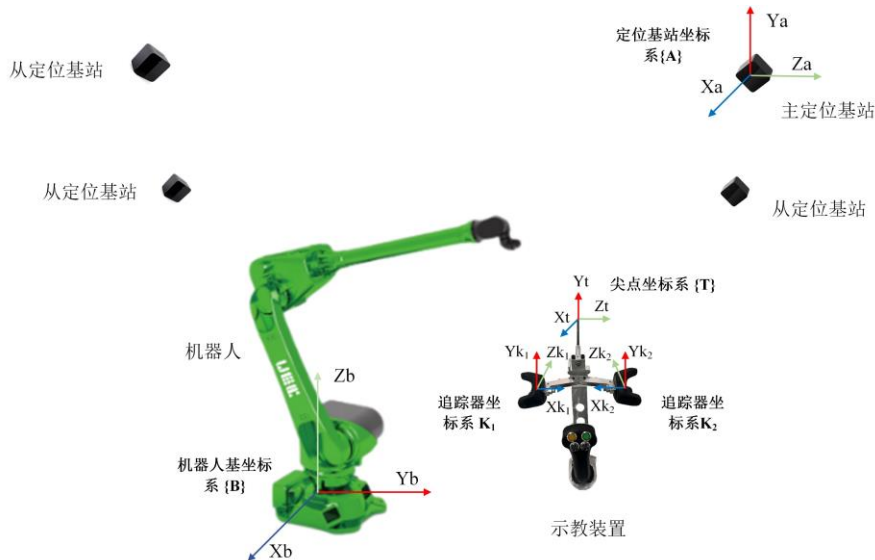


图 3-1 演示示教系统整体示意图

如图 3-1 所示，演示示教系统由四个定位基站、示教装置和机器人三个部分组成。对三个部分分别建立定位基站坐标系 $\{A\}$ 、机器人基坐标系 $\{B\}$ 、追踪器坐标系 $\{K_1\}$ 和 $\{K_2\}$ 、示教装置末端尖点坐标系 $\{T\}$ 。

为了将基站坐标系下采集的点需要转换到机器人基坐标系下，需要确定演示示教系统定位基站坐标系 $\{A\}$ 、机器人基坐标系 $\{B\}$ 、追踪器坐标系 $\{K_1\}$ 和 $\{K_2\}$ 与示教装置末端尖点坐标系 $\{T\}$ 之间的矩阵转换关系，如式 (3-1) 所示。

$${}^B T_A = {}^A T_K \cdot {}^K T_T \cdot {}^B T_T \quad (3-1)$$

式中： ${}^A T_K$ 表示位姿追踪器坐标系{K}相对于定位基站坐标系{A}的变换关系； ${}^K T_T$ 表示示教装置尖点坐标系{T}相对追踪器坐标系{K}的变换关系。 ${}^A T_T$ 表示示教装置尖点坐标系{T}相对与基站坐标系{A}下的变换关系； ${}^B T_T$ 表示示教装置尖点坐标系{T}相对于机器人基坐标系{B}下的变换关系； ${}^B T_A$ 表示定位基站坐标系{A}相对于机器人基坐标系{B}的变换关系。

3.2 演示示教系统坐标变换方法求解

3.2.1 基于四点法的示教装置末端位置标定

为了计算示教装置末端尖点在基站坐标系{A}下的位置矢量，需要将示教装置安装到机器人末端，保持尖点位置不变，姿态间隔约 90° 移动示教装置，获取追踪器在四个标定位置下的位姿。最后，采用四点标定法^[51]得到尖点在基站坐标系{A}下的位置矢量。



图 3-2 四点标定示意图

追踪器坐标系{K}、示教装置尖点坐标系{T}与基站坐标系{A}，三者的转换关系为：

$${}^A T_K \cdot {}^K T_T = {}^A T_T \quad (3-2)$$

式（3-2）中的变换矩阵 T ，由旋转矩阵 R 和位置矢量 P 组成。对式（3-2）以各自的分块形式展开，得到：

$$\begin{bmatrix} {}^A R_{Ki} & {}^A P_{Ki} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^K R_T & {}^K P_T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A R_{Ti} & {}^A P_T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

式中： ${}^A R_{Ki}$ 是追踪器坐标系相对基站坐标系的旋转矩阵（ $i=1, 2, 3, 4$ ）； ${}^A P_{Ki}$ 是追踪器坐标系相对基站坐标系的的位置矢量（ $i=1, 2, 3, 4$ ）； ${}^K R_T$ 是尖点坐标系相对追踪器坐标系的旋转矩阵； ${}^K P_T$ 是尖点坐标系相对追踪器坐标系的位置矢量； ${}^A R_{Ti}$ 是尖点坐标系相对基站坐标系的旋转矩阵（ $i=1, 2, 3, 4$ ）； ${}^A P_{Ti}$ 是尖点坐标系相对基站坐标系的位置矢量

对式（3-3）利用矩阵运算可以得到计算示教装置尖点在基站坐标系下的位置的通式：

$$[{}^A R_{Ki}] \cdot [{}^K P_T] + [{}^A P_{Ki}] = [{}^A P_T] \quad (3-4)$$

展开式（3-4）得到式（3-5）：

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^K P_{Tx} \\ {}^K P_{Ty} \\ {}^K P_{Tz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^A P_{Kx} \\ {}^A P_{Ky} \\ {}^A P_{Kz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A P_{Tx} \\ {}^A P_{Ty} \\ {}^A P_{Tz} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

在标定过程中示教装置尖点位置在基站坐标系的位置不变，即 ${}^A p_{Tx}$ 、 ${}^A p_{Ty}$ 、 ${}^A p_{Tz}$ 为定值。此外，追踪器与示教装置尖点的相对位置固定不变，所以 ${}^K R_T$ 与 ${}^K P_T$ 也为定值。为了消去 ${}^A P_T$ 方便计算，使用 P_2 点的位姿数据减去 P_1 的位姿数据 ${}^A P_T$ 有：

$$[{}^A R_{K1} - {}^A R_{K2}] \cdot {}^K p_T = [{}^A p_{K2} - {}^A p_{K1}] \quad (3-6)$$

将式（3-6）展开得：

$$[{}^A R_{K1} - {}^A R_{K2}] \cdot \begin{bmatrix} {}^K p_{Tx} \\ {}^K p_{Ty} \\ {}^K p_{Tz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A p_{Kx2} - {}^A p_{Kx1} \\ {}^A p_{Ky2} - {}^A p_{Ky1} \\ {}^A p_{Kz2} - {}^A p_{Kz1} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

为了找到 ${}^K P_T$ 的唯一解，继续使用 P_3 点的位姿数据减去 P_2 的位姿数据， P_4 点的位姿数据减去 P_3 的位姿数据，可得式（3-8）。

$$\begin{bmatrix} {}^A R_{K1} - {}^A R_{K2} \\ {}^A R_{K2} - {}^A R_{K3} \\ {}^A R_{K3} - {}^A R_{K4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^K p_{Tx} \\ {}^K p_{Ty} \\ {}^K p_{Tz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A p_{Kx2} - {}^A p_{Kx1} \\ {}^A p_{Ky2} - {}^A p_{Ky1} \\ {}^A p_{Kz2} - {}^A p_{Kz1} \\ {}^A p_{Kx3} - {}^A p_{Kx2} \\ \vdots \\ {}^A p_{Kz4} - {}^A p_{Kz3} \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

式（3-8）中系数为 9×3 的矩阵，且包含 ${}^K p_{Tx}$ 、 ${}^K p_{Ty}$ 、 ${}^K p_{Tz}$ 三个未知量，为不相容方程组，所以不能采用 solve 求解或非齐次线性方程组求解的方法。本文采用最小二乘法的矩阵形式，因其系数矩阵不是方阵，不可直接求逆，因此使用广

义逆。奇异值分解是求解矩阵广义逆的常用方法，如式(3-9)所示。

$$\begin{bmatrix} {}^A R_{K1} - {}^A R_{K2} \\ {}^A R_{K2} - {}^A R_{K3} \\ {}^A R_{K3} - {}^A R_{K4} \end{bmatrix} = U \Sigma V^T \quad (3-9)$$

式中： U 是一个 $m \times m$ 的正交矩阵； Σ 是一个 $m \times n$ 的对角矩阵，对角线上的元素是奇异值 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$ （按降序排列），其余元素为零； V 是一个 $n \times n$ 的正交矩阵。

其广义逆可以构造为：

$$\begin{bmatrix} {}^A R_{K1} - {}^A R_{K2} \\ {}^A R_{K2} - {}^A R_{K3} \\ {}^A R_{K3} - {}^A R_{K4} \end{bmatrix}^+ = U \Sigma^+ V^T \quad (3-10)$$

其中 Σ^+ 为：

$$\Sigma^+ = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_r} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

最后通过高斯消元法得到位置矢量 ${}^K P_T$ ：

$$\begin{bmatrix} {}^K p_{Tx} \\ {}^K p_{Ty} \\ {}^K p_{Tz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A R_{K1} - {}^A R_{K2} \\ {}^A R_{K2} - {}^A R_{K3} \\ {}^A R_{K3} - {}^A R_{K4} \end{bmatrix}^+ \cdot \begin{bmatrix} {}^A p_{Kx2} - {}^A p_{Kx1} \\ {}^A p_{Ky2} - {}^A p_{Ky1} \\ {}^A p_{Kz2} - {}^A p_{Kz1} \\ {}^A p_{Kx3} - {}^A p_{Kx2} \\ \vdots \\ {}^A p_{Kz4} - {}^A p_{Kz3} \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

将求出的 ${}^K P_T$ 带入式 (3-4)，即可得到在基站坐标系下尖点的位置 ${}^A P_T$ 。

3.2.2 基站坐标系-机器人基坐标系转换矩阵求解

在完成示教装置尖点位置标定后，本研究基于 SVD 分解^[52]的转换矩阵求解方法获取基站坐标系-机器人基坐标系的转换矩阵。此方法因其在处理线性最小二乘问题时的高效性和稳定性而被广泛应用。将基站坐标系下的获取示教装置末

端尖点位置看作源点集 a ，示教装置末端尖点在机器人基坐标系下的坐标看作目标点集 b ，其中源点集 a 通过四点标定法获得，目标点集 b 通过将示教装置安装在机器人末端使用机器人 TCP 标定获得。在进行奇异值分解之前需要计算两个点集坐标的平均值，并对其进行归一化处理。

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}, \bar{b} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n} \quad (3-13)$$

$$x_i = a_i - \bar{a}, y_i = b_i - \bar{b} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-14)$$

随后计算 $d \times d$ 维协方差矩阵 S ，其中 $C=[x_1, x_2, \dots, x_n], D=[y_1, y_2, \dots, y_n]$ ，均是由 d 维列向量组成的 $d \times n$ 维的矩阵。

$$S = CD^T \quad (3-15)$$

对协方差矩阵 S 进行 SVD 分解，得到旋转矩阵 R ：

$$R = VU^T \quad (3-16)$$

如果 $\det(R) < 0$ ，则让 $V = V^T$ ，并将 V^T 的第三列乘以 -1，此时 R 即为：

$$R = -V^T U^T \quad (3-17)$$

平移向量 t 为：

$$t = \bar{a} - R\bar{b} \quad (3-18)$$

最后即可构造出变换矩阵 ${}^B T_A$

$${}^B T_A = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

变换矩阵 ${}^B T_A$ 描述了将定位基站坐标系下的点集变换到机器人基坐标系的空间位置，变换矩阵包含了旋转和平移的信息。使用此方法求解坐标系之间的映射关系，至少需要三组不共线的点。

示教装置末端尖点在基站坐标系下的位姿矩阵为 ${}^A T_T$ ，通过基站坐标系-机器人基坐标系的变换矩阵 ${}^B T_A$ ，就可以得到 ${}^B T_T$ ，如式（3-20）所示。

$${}^B T_A \cdot {}^A T_T = {}^B T_T \quad (3-20)$$

将式（3-20）以各自的分块形式展开，得到：

$$\begin{bmatrix} {}^B R_A & {}^B P_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^A R_T & {}^A P_T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B R_T & {}^B P_T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

式中示教装置尖点在机器人基坐标系下的位置矢量 ${}^B P_T$ 和旋转矩阵 ${}^B R_T$ 通过机器人 TCP 标定获得，进一步可以通过矩阵运算求出示教装置尖点坐标系 $\{T\}$ 相对基站坐标系 $\{A\}$ 的变换关系 ${}^A T_T$ 与机器人基坐标系 $\{B\}$ 相对基站坐标系 $\{A\}$ 的变

换关系 ${}^A T_B$ 。

3.2.3 基于法向迭代最近点的转换矩阵精度补偿

考虑基于奇异值分解转求出的换矩阵的精度与用于选取的位姿数据的数量、机械臂姿态的等因素有关, 矩阵转换求解的转换矩阵精度难以满足机器人示教的要求。在完成初步的矩阵转换后, 本研究采用 NICP 算法^[53]进一步提升标定精度。

NICP 算法通过给定的参考点云 $P_r = \{p_{r1}, p_{r2}, \dots, p_{rn}\}$ 与当前点云 $P_c = \{p_{c1}, p_{c2}, \dots, p_{cn}\}$ 使两个点云之间的距离最小化。

首先对两个点云的每个点 p_i 计算周围的表面法线 n_i 和曲率 σ_i , 通过计算点的协方差矩阵 Σ_s^i 来近似局部表面, 并从中提取法线和曲率, 建立对应关系找到具有兼容法线和曲率的对应点对。

每一组对应点 $[p_{ci}, p_{rj}]$ 需要计算一个 6 维的误差向量 $e_{ij}(T)$:

$$\begin{aligned} e_{ij}(T) &= \tilde{p}_{ci} - T \oplus \tilde{p}_{rj} = \begin{bmatrix} p_{ci} \\ n_{ci} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R p_{rj} + t \\ R n_{rj} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} p_{ci} - R p_{rj} - t \\ n_{ci} - R n_{rj} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-22)$$

式中: $\tilde{p}_{ci}$ 表示点云 p_c 中第 i 个点的扩展, 包含点的坐标和法线; $\tilde{p}_{ri}$ 表示点云 p_r 中第 j 个点的扩展, 包含点的坐标和法线; $T \oplus \tilde{p}_{rj}$ 表示将变换矩阵 T 应用到点 $\tilde{p}_{rj}$ 上。

随后通过阻尼高斯-牛顿算法迭代优化 T , 如果结果收敛或达到最大迭代次数则会输出最终变换矩阵 T^* , 使得两个点云之间距离最小化:

$$T^* = \arg \min_T \sum_{\langle i, j \rangle \in C} \| \tilde{p}_{ci} - T \oplus \tilde{p}_{rj} \|_{\Omega_{ij}}^2 \quad (3-23)$$

式中: T 表示当前估计的变换, 它将参考点云 P_r 映射到当前点云 P_c 的坐标系中; p_{ci} 是点集 P_c 中的第 i 个点, p_{rj} 是点集 P_r 中第 j 个点; 下标 Ω_{ij} 是一个 6 维的信息矩阵, 用于加权误差项。

最后将计算得到的补偿矩阵与 ${}^B T_A$ 相乘即可得到一个精度更高的转换矩阵 ${}^B T_A^*$ 如式 (3-24) 所示。

$${}^B T_A^* = T^* {}^B T_A \quad (3-24)$$

3.3 机器人运动学分析

Denavit 与 Hartenberg 在 20 世纪中期联合提出的 D-H 参数法(D-H Parametric Method), 为机器人运动学分析提供了一套系统化的建模方法。该方法通过四个关键参数构建相邻关节坐标系的空间转换关系, 进而实现机械系统运动特性的数学描述。在运动学研究中, 正向求解指通过关节驱动参数推导末端执行器的空间位姿, 而逆向求解则需根据目标位姿反推各关节的运动参数^[54]。相较于其他建模方式, D-H 方法具有显著的工程适用性优势: 仅需满足基本坐标系设定准则即可构建运动学模型, 其建模过程虽涉及复杂的坐标变换计算, 但凭借清晰的参数化表达逻辑, 已成为工业机器人领域主流的建模工具。本节基于该理论框架, 将针对埃夫特 GR680-2700 六轴工业机器人建立完整的正逆运动学数学模型。

3.3.1 基于 D-H 参数法的机器人运动学建模

图 3-3 为 GR680-2700 工业机器人模型。该设备采用六轴全旋转关节构型, 通过基座式安装结构与作业平台建立刚性连接。其运动系统由腰部回转机构、大臂俯仰组件、小臂联动装置、腕部三轴执行单元构成完整串联运动链, 末端执行器最大工作半径达 2715 mm。该结构配置使机械臂具备六维空间运动能力, 各关节均采用伺服电机直驱技术实现精准定位控制。

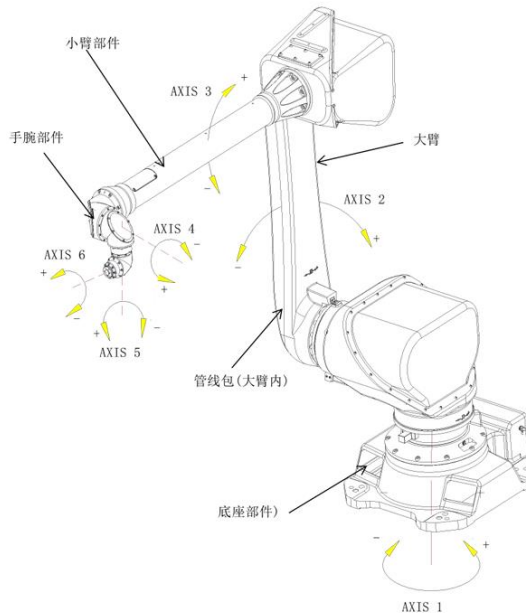


图 3-3 GR680-2700 机器人模型

基于 D-H 参数法建模规范, 对 GR680-2700 工业机器人实施标准坐标系配置

流程。在六组运动连杆的起始端分别定义对应连杆坐标系 $\{i\}$ ($i=1-6$)，同时分别在基座和末端执行器位置配置基础坐标系 $\{0\}$ 与工具坐标系 $\{n\}$ 。建立的坐标系方法如图 3-4 所示。

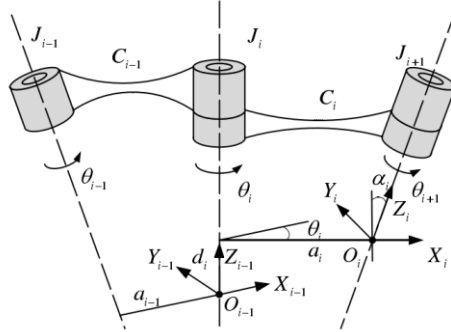


图 3-4 机器人连杆坐标系示意图

D-H 参数法用 a_i 与 d_i 来描述连杆位置参数，用 α_i 和 θ_i 描述两连杆之间的位置关系，四个参数的具体意义如下：

连杆扭角 α_i ：为从 Z_{i-1} 轴到 Z_i 轴的转角，绕 X_{i-1} 轴正向转动为正。

连杆长度 a_i ：为从 Z_{i-1} 轴到 Z_i 轴的距离，沿 X_{i-1} 轴指向为正。

连杆偏置 d_i ：从 X_{i-1} 轴到 X 轴的距离，沿 Z_i 轴指向为正。

关节转角 θ_i ：为从 X_{i-1} 轴到 X_i 轴的转角，绕 Z_i 轴正向转动为正。

随后利用 D-H 参数法结合机器人的工作空间，建立机器人 D-H 模型，如图 3-6 所示。

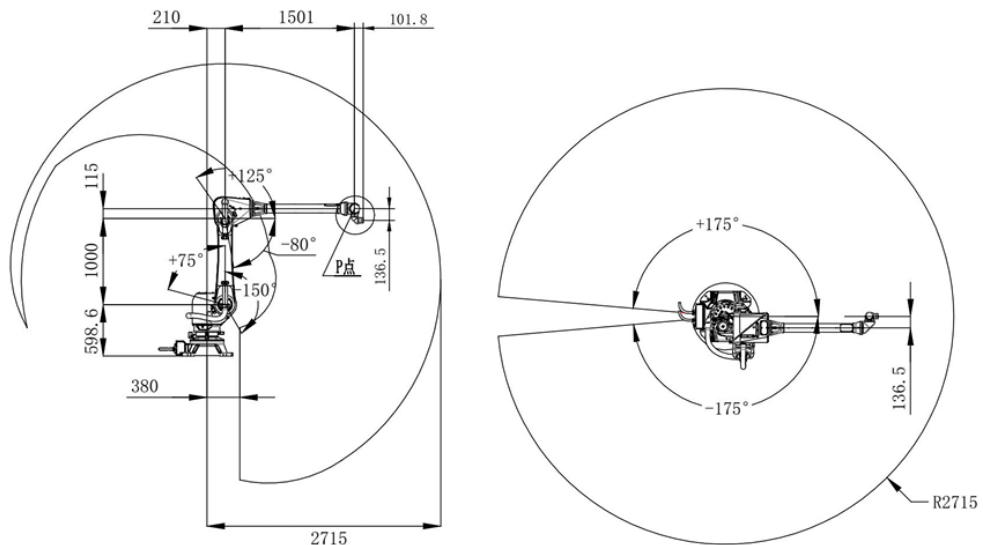


图 3-5 GR680-2700 机器人工作空间

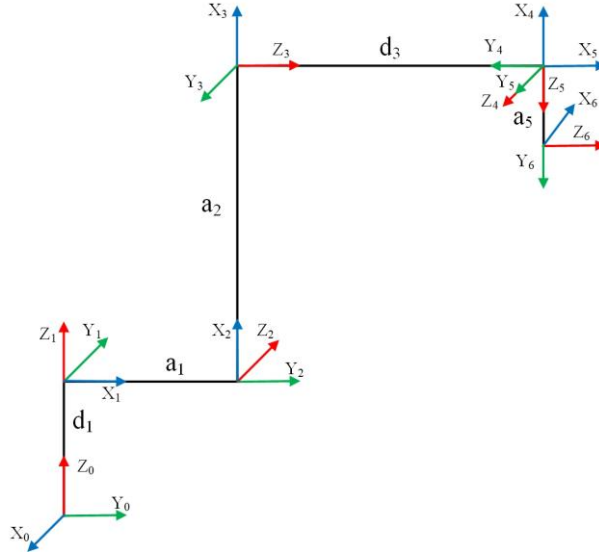


图 3-6 GR680-2700 机器人 D-H 模型图

当机器人处于初始位置时，机器人 D-H 参数如表 3-1 所示。

表 3-1 GR680-2700 机器人 D-H 参数

连杆序号	$a_i/(\text{mm})$	$\alpha_i/(^{\circ})$	$d_i/(\text{mm})$	$\theta_i/(^{\circ})$
1	210	90	598.6	θ_1
2	1115	90	0	θ_2
3	0	90	1501	θ_3
4	0	90	0	θ_4
5	136.5	90	0	θ_5
6	0	0	0	θ_6

3.3.2 机器人正运动学求解

机器人正运动学主要是研究是机器人从关节角度到末端执行器位置和姿态的转换过程。根据上文求出的 GR680-2700 机器人 D-H 参数表，可以计算出坐标系 $\{i-1\}$ 与坐标系 $\{i\}$ 之间的转换矩阵 ${}^{i-1}T_i$ ($i = 1, 2, \dots, 6$)。为了使公式，更便于表达、更简洁,在此设 $s_i = \sin\theta_i$, $c_i = \cos\theta_i$, $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$, $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, 即:

$$\begin{aligned}
 {}^{i-1}T_i &= \text{Rot}(Z_i, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) \text{Trans}(a_i, 0, 0) \text{Rot}(X_i, \alpha_i) \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-25)
 \end{aligned}$$

以此类推可以求出：

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad (3-26)$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & s\theta_1 & a_1 c\theta_1 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & -c\theta_1 & a_1 s\theta_1 \\ 0 & 1 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & 0 & s\theta_2 & a_2 c\theta_2 \\ s\theta_2 & 0 & -c\theta_2 & a_2 s\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & s\theta_3 & 0 \\ s\theta_3 & 0 & -c\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-30)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & 0 & s\theta_5 & a_5 c\theta_5 \\ s\theta_5 & 0 & -c\theta_5 & 5s\theta_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-31)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-32)$$

可得机器人末端轴 6 相对于基座轴 0 的坐标转换关系为：

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

式中：

$[n_x \ n_y \ n_z]$ 表示机器人末端相对于机器人基座的 X 轴向量参数；

$[o_x \ o_y \ o_z]$ 表示机器人末端相对于机器人基座的 Y 轴向量参数；

$[a_x \ a_y \ a_z]$ 表示机器人末端相对于机器人基座的 Z 轴向量参数；

$[p_x \ p_y \ p_z]$ 表示机器人末端相对于机器人基座的位置参数。

计算出 GR680-2700 机器人的运动学正解如下所示：

(1) 机器人末端位置方程为：

$$\begin{cases} p_x = c_1(a_3c_{23} + a_2c_2 + a_1 - d_4s_{23}) \\ p_y = s_1(a_3c_{23} + a_2c_2 + a_1 - d_4s_{23}) \\ p_z = -d_4 - a_3s_{23} - a_2s_2 \end{cases} \quad (3-34)$$

(2) 机器人末端姿态方程为:

$$\begin{cases} n_x = c_1[c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] + s_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6)n_y \\ n_y = s_1[c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] - c_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6)n_z \\ n_z = -s_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6o_x \end{cases} \quad (3-35)$$

$$\begin{cases} o_x = c_1[c_{23}(-s_4s_6 - c_4c_5c_6) + s_{23}s_5c_6] + s_1(-s_4c_5c_6 + c_4s_6) \\ o_y = s_1[c_{23}(-s_4s_6 - c_4c_5c_6) + s_{23}s_5c_6] - c_1(-s_4c_5c_6 + c_4s_6) \\ o_z = s_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) + c_{23}s_5c_6 \end{cases} \quad (3-36)$$

$$\begin{cases} a_x = -c_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) - s_1s_4s_5 \\ a_y = -c_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) - s_1s_4s_5 \\ a_z = c_4s_5s_{23} - c_{23}c_5 \end{cases} \quad (3-37)$$

为了使后续对机器人进行逆运动学求解会更方便, 现计算各连杆变换的中间结果, 具体步骤如下:

$$\begin{aligned} {}^1T_3 &= {}^1T_2 {}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_{23} & -s_{23} & 0 & c_2a_2 + a_1 \\ 0 & 0 & -c_{23} & d_2 \\ -s_{23} & -c_{23} & 0 & -s_2a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^4T_6 &= {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} c_5c_6 & -c_5s_6 & -s_5 & 0 \\ s_5c_6 & -s_5s_6 & c_5 & 0 \\ s_5c_6 & -s_5s_6 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^3T_6 &= {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -c_4c_5c_6 & -s_4c_5 & a_3 \\ s_5s_6 & -c_5s_6 & c_5 & d_4 \\ -s_4c_5c_6 - c_4s_6 & s_4c_5c_6 & -c_4s_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^1T_6 &= \begin{bmatrix} 1r_{11} & 1r_{12} & 1r_{13} & 1p_x \\ 1r_{21} & 1r_{22} & 1r_{23} & 1p_y \\ 1r_{31} & 1r_{32} & 1r_{33} & 1p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-38)$$

其中:

$$\begin{cases} {}^1p_x = c_{23}a_3 - s_{23}d_4 + c_2a_2 + a_2 \\ {}^1p_y = d_2 \\ {}^1p_z = -s_{23}a_3 - c_{23}d_4 - s_2a_2 \end{cases} \quad (3-39)$$

3.3.3 机器人逆运动学求解

机器人逆运动学是指根据末端执行器在空间中的目标位姿, 反向计算机器人各关节参数的过程。其核心是通过求解由正向运动学方程构成的非线性方程组, 确定满足末端位姿约束的关节变量组合。由于机器人自由度、构型以及工作空间

的复杂性，逆解可能存在多解、无解或奇异解的情况，可通过反变换法^[55]、几何法^[56]、封闭解法^[57]等方法进行求解。本节使用反变换法求解，具体过程如下所示：

(1) 求解关节角 θ_1

令式 (3-26) 等式两边同时左乘 ${}^0T_1^{-1}$ 得：

$$({}^0T_1)^{-1} {}^0T_6 = {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad (3-40)$$

即：

$$\begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & -a_1 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ s_1 & -c_1 & 1 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_x & o_x & a_x & p_y \\ n_x & o_x & a_x & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^1T_6 \quad (3-41)$$

由式 (3-34) 中左右两侧位置为 (2,4) 的对应元素相等可得：

$$-s_1 p_x + c_1 p_y = d_2 \quad (3-42)$$

根据求出的 D-H 参数表，可以得到 d_2 为 0。为了方便表示，规定： $p_x = \rho \cos \varphi$ ， $p_y = \rho \sin \varphi$ ，其中 $\rho = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ ， $\varphi = \text{atan2}(p_x, p_y)$ ，继续求解可得：

$$\begin{cases} \theta_{11} = \text{atan2}(p_y, p_x) - \text{atan2}(d_3, \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_3^2}) \\ \theta_{12} = \text{atan2}(d_3, -\sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_3^2}) \end{cases} \quad (3-43)$$

由此可以得到，关节角 θ_1 有两个解。

(2) 求解关节角 θ_3

由式 (3-34) 左右两侧位置为 (1,4) 和 (3,4) 的对应元素相等，可得：

$$\begin{cases} c_1 p_x + s_1 p_y = a_3 c_{23} + a_2 c_2 - d_4 s_{23} + a_1 \\ p_z = -s_{23} a_3 - c_{23} d_4 - s_2 a_2 \end{cases} \quad (3-44)$$

由关系等式 $(1,4)_R^2 + (3,4)_R^2 = (1,4)_L^2 + (3,4)_L^2$ 可得：

$$-d_4 s_3 + a_3 c_3 = k \quad (3-45)$$

其中： $k = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + a_1^2 - 2a_1(c_1 p_x + s_1 p_y) - d_3^2 - d_4^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2}$ ，可以求出关节角 θ_3 的两个

解：

$$\begin{cases} \theta_{31} = \text{atan2}(a_3, d_4) - \text{atan2}(k, \sqrt{d_4^2 + a_3^2 - k^2}) \\ \theta_{32} = \text{atan2}(a_3, d_4) - \text{atan2}(k, -\sqrt{d_4^2 + a_3^2 - k^2}) \end{cases} \quad (3-46)$$

(3) 求解关节角 θ_2

令式 (3-26) 等号两边同时左乘 ${}^0T_3^{-1}$, 其中 ${}^0T_3^{-1} = [{}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3]^{-1}$, 可以得到:

$${}^0T_3^{-1} {}^0T_6 = {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad (3-47)$$

即:

$${}^3T_6 = \begin{bmatrix} c_1c_{23} & s_1c_{23} & -s_{23} & -a_2c_3 - a_1c_{23} \\ -c_1s_{23} & -s_1s_{23} & -c_{23} & a_2s_3 + a_1s_{23} \\ -s_1 & c_1 & 0 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_x & o_x & a_x & p_y \\ n_x & o_x & a_x & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-48)$$

令式 (3-43) 左右两侧位置为 (1,4) 和 (2,4) 的对应元素相等, 可得:

$$\begin{cases} c_1c_{23}p_x + s_1c_{23}p_y - s_{23}p_z - a_2c_3 - a_1c_{23} - a_3 = 0 \\ c_1s_{23}p_x + s_1s_{23}p_y + c_{23}p_z - a_2s_3 - a_1s_{23} + d_4 = 0 \end{cases} \quad (3-49)$$

通过联立上述方程可得:

$$\begin{cases} s_{23} = \frac{(a_2s_3 - d_4)(c_1p_x + s_1p_y - a_1) - p_z(a_2c_3 + a_3)}{(c_1p_x + s_1p_y - a_1)^2 + p_z^2} \\ c_{23} = \frac{(a_2c_3 + a_3)(c_1p_x + s_1p_y - a_1) + p_z(a_2s_3 - d_4)}{(c_1p_x + s_1p_y - a_1)^2 + p_z^2} \end{cases} \quad (3-50)$$

解得:

$$\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3 = \text{atan}[(a_2s_3 - d_4)(c_1p_x + s_1p_y - a_1) - p_z(a_2c_3 + a_3) + a_3)(c_1p_x + s_1p_y - a_1) + p_z(a_2s_3 - d_4)] \quad (3-51)$$

$$\begin{cases} \theta_{21} = \text{atan2}(k_1, k_2) - \theta_{31} \\ \theta_{22} = \text{atan2}(k_1, k_2) - \theta_{32} \end{cases} \quad (3-52)$$

式中:

$$\begin{cases} k_1 = (a_2s_3 - d_4)(c_1p_x + s_1p_y - a_1) - p_z(a_2c_3 + a_3) \\ k_2 = (a_2c_3 + a_3)(c_1p_x + s_1p_y - a_1) + p_z(a_2s_3 - d_4) \end{cases} \quad (3-53)$$

(4) 求解关节角 θ_4

令式 (3-45) 左右两侧位置为 (1,3) 和 (3,3) 的对应元素相等, 可得:

$$\begin{cases} c_1c_{23}a_x + s_1c_{23}a_y - s_{23}a_z + c_4s_5 = 0 \\ c_1a_y - s_1a_z - s_4s_5 = 0 \end{cases} \quad (3-54)$$

解得:

$$\begin{cases} \theta_{41} = \text{atan2}(k_3, k_4) \\ \theta_{42} = \text{atan2}(-k_3, -k_4) \end{cases} \quad (3-55)$$

其中:

$$\begin{cases} k_3 = c_1 c_{23} a_x + s_1 c_{23} a_y - s_{23} a_z \\ k_4 = c_1 a_y - s_1 a_z \end{cases} \quad (3-56)$$

(5) 求解关节角 θ_5

令式 (3-26) 等号两边同时左乘 ${}^0T_4^{-1}$, 其中 ${}^0T_4^{-1} = [{}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4]^{-1}$, 可以得到:

$${}^0T_4^{-1} {}^0T_6 = {}^4T_5 {}^5T_6 \quad (3-57)$$

令上述式中左右两侧位置为 (1,3) 和 (3,3) 的对应元素相等, 可得:

$$\begin{cases} -a_x(c_1 c_4 c_{23} + s_1 s_4) - a_y(s_1 c_4 c_{23} + c_1 s_4) + a_z s_{23} c_4 - s_5 = 0 \\ -a_x c_1 s_{23} - a_y s_{23} s_1 - a_z c_{23} - c_5 = 0 \end{cases} \quad (3-58)$$

解得:

$$\theta_5 = \text{atan2}(k_5, k_6) \quad (3-59)$$

其中:

$$\begin{cases} k_5 = -a_x(c_1 c_4 c_{23} + s_1 s_4) - a_y(s_1 c_4 c_{23} + c_1 s_4) + a_z s_{23} c_4 \\ k_6 = -a_x c_1 s_{23} - a_y s_{23} s_1 - a_z c_{23} \end{cases} \quad (3-60)$$

(6) 求解关节角 θ_6

令式 (3-26) 等号两边同时左乘 ${}^0T_5^{-1}$, 其中 ${}^0T_5^{-1} = [{}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5]^{-1}$, 可以得到:

$${}^0T_5^{-1} {}^0T_6 = {}^5T_6 \quad (3-61)$$

令上述式中左右两侧位置为 (1,1) 和 (3,1) 的对应元素相等, 可得:

$$\begin{cases} -n_x(c_1 s_4 c_{23} - s_1 c_4) - n_y(s_4 s_1 c_{23} + c_1 s_4) + n_z s_{23} s_4 - s_6 = 0 \\ n_x(c_1 c_4 c_5 c_{23} + s_1 s_4 c_5 - c_1 s_5 s_{23}) + n_y(c_4 s_1 c_5 c_{23} - s_1 s_5 s_{23} - s_4 c_1 c_5) \\ \quad + n_z(s_5 c_{23} + c_4 s_5 s_{23}) - c_6 = 0 \end{cases} \quad (3-62)$$

解得:

$$\theta_6 = \text{atan2}(k_7, k_8) \quad (3-63)$$

其中:

$$\begin{cases} k_7 = -n_x(c_1 s_4 c_{23} - s_1 c_4) - n_y(s_4 s_1 c_{23} + c_1 s_4) + n_z s_{23} s_4 \\ k_8 = n_x(c_1 c_4 c_5 c_{23} + s_1 s_4 c_5 - c_1 s_5 s_{23}) \\ \quad + n_y(c_4 s_1 c_5 c_{23} - s_1 s_5 s_{23} - s_4 c_1 c_5) \\ \quad + n_z(s_5 c_{23} + c_4 s_5 s_{23}) \end{cases} \quad (3-64)$$

基于反变换法对六自由度关节进行逆运动学解算时, 关节变量 θ_i 的二元性特征会导致系统产生八组可行逆解组合。从数学完备性角度分析, 给定末端执行器的目标位姿参数时, 所有解集均能满足空间定位需求。然而不同构型对应的关节运动量存在显著差异, 后续将依据"运动量最小化"准则进行优化筛选^[58-59]。

3.4 本章小结

本章主要介绍了演示示教系统中坐标变换与机器人运动学求解的关键技术。首先，建立了系统中各坐标系的关系，并通过四点标定法确定了示教装置末端尖点的位置。接着，利用 SVD 求解了基站坐标系与机器人基坐标系之间的转换矩阵，并通过 NICP 算法对其精度进行了补偿。最后，基于 D-H 参数法对机器人运动学进行了建模，并详细推导了正运动学和逆运动学的求解过程，为机器人的精准示教与运动控制提供了理论基础。

第 4 章 基于 Unity3D 的机器人示教系统仿真平台构建

4.1 总体方案规划

本章以 GR680-2700 机器人为原型，搭建交互式机器人示教系统。该系统通过高精度位姿采集模块实现示教轨迹位姿点的采集与转换，同时完成机器人运动学仿真建模与通信协议的集成。为优化示教过程，还需要设计人性化的交互方式。通过上述对仿真平台的需求分析，可对平台整体需求与模块进行规划，如图 4-1 所示。

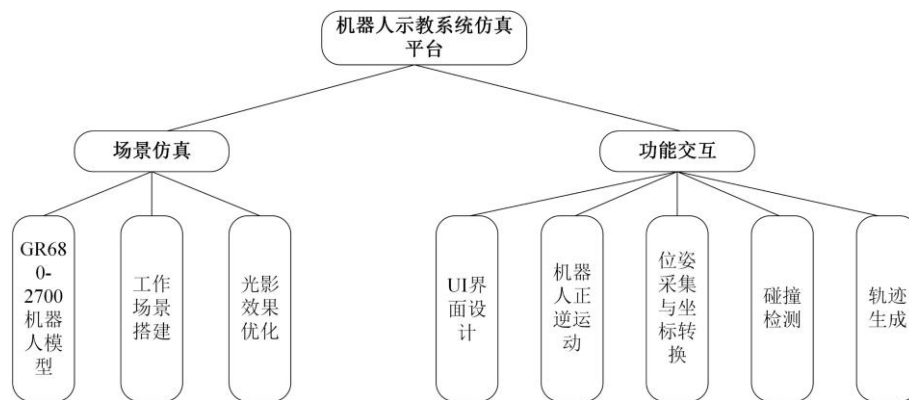


图 4-1 仿真平台设计方案

4.2 虚拟场景制作与布置

4.2.1 模型的制作

Unity3D 的建模工具较为基础，仅提供立方体、球体、胶囊体等基础参数化几何体生成功能，难以满足复杂工业机器人的建模需求。因此，本研究采用多软件协同建模方案：通过 SolidWorks 完成机械结构的高精度建模，但 SolidWorks 无法直接导出 Unity3D 兼容的格式（如 FBX/OBJ），需将模型文件经 Blender 进行格式转换与二次优化处理，包括轴心校准、网格优化等预处理，最后将模型导出成 FBX 格式导入 Unity3D 中，具体流程如图 4-2 所示。

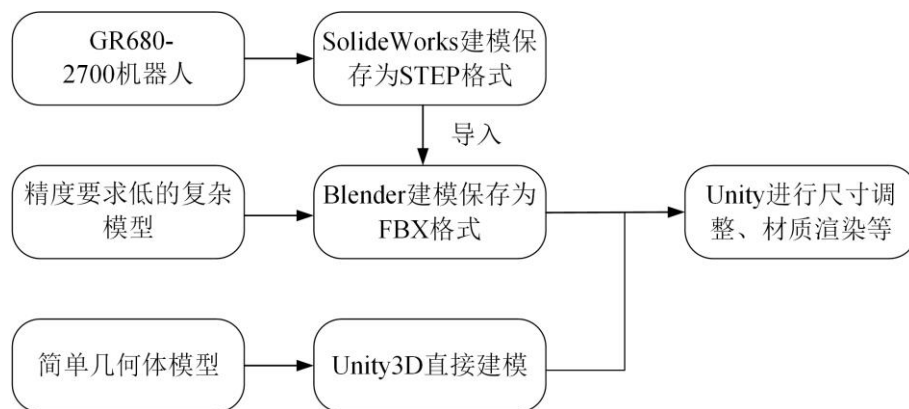
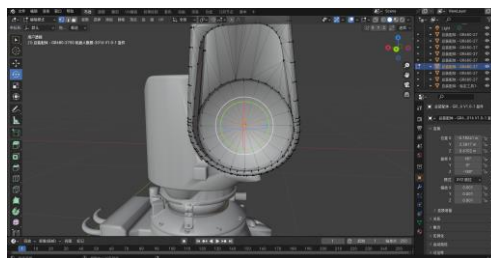


图 4-2 Unity3D 场景模型创建流程图

在 Blender 中，调整机器人的旋转中心需进入编辑模式，选中关节顶点，通过移动工具将几何中心对齐至物理旋转轴位置，返回物体模式后选择“设置原点”至“原点至几何中心”；简化模型顶点则需为模型添加“Decimate”修改器，调整比率（如 0.3-0.6）并应用修改器。由于 Unity3D 采用左手坐标系（Y 轴向上，Z 轴向后），而 Blender 默认使用右手坐标系（Y 轴向上，Z 轴向前），直接导出会导致模型方向错误。因此，导出 FBX 时需手动设置轴向为 Y 向前/Z 向上，通过坐标系映射将 Blender 的 Z 轴正向对齐 Unity3D 的 Z 轴负向，确保模型正面和骨骼旋转方向在 Unity3D 中保持一致。



(a) 使用 blender 简化模型



(b) 调整关节旋转中心

图 4-3 使用 Blender 优化模型并调整旋转轴

在将机器人模型导入 Unity3D 之后，为了符合现实中机器人的运动逻辑（如关节 2 独立旋转时，关节 1 保持静止，关节 3-6 同步跟随），需要在 Hierarchy 窗口调整机器人各个关节轴之间的父子层级关系。把机器人的六个关节轴分别命名为 J1、J2、J3、J4、J5、J6，其父子关系如图 4-4 所示。

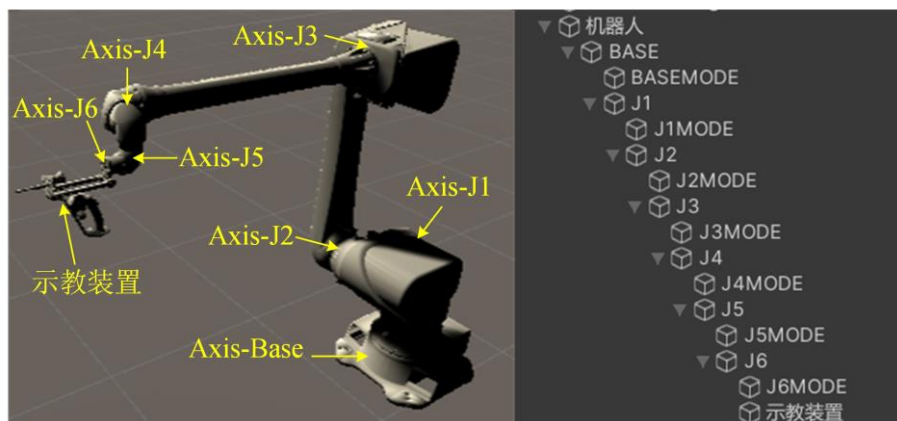


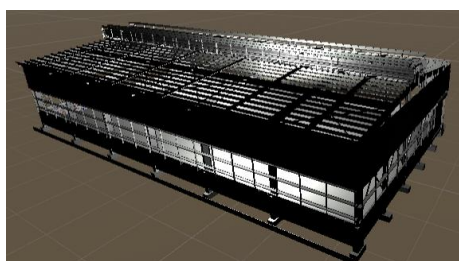
图 4-4 Unity3D 中机器人模型及其父子关系

4.2.2 工作场景布置

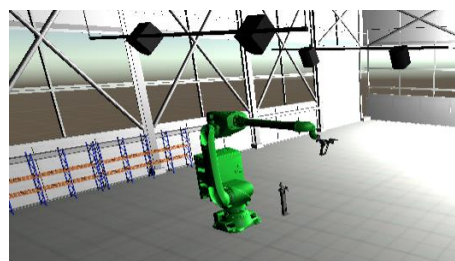
根据现实场景布置机器人虚拟工作环境，将创建好的厂房、围栏、货架等模型导入 Unity3D 中搭建工作场景，并对模型表面进行贴图，如图 4-6 所示。



图 4-5 工作场景模型文件



(a) 整体环境



(b) 内部环境

图 4-6 机器人工作场景

为提升场景的空间层次与材质真实感，需结合 Unity3D 的方向光 (Directional Light) 与区域光 (Area Light) 协同优化：方向光模拟自然日光，为场景提供均匀基础照明；区域光则围绕关键模型（如机械关节、精密部件）针对性布置，通过可控的光照衰减与柔化边缘，强化局部体积细节与高光反射，同时避免方向光

导致的平面化缺陷。通过调节两类光源的强度、色温及覆盖范围，最终使金属、玻璃等复杂材质的物理光影表现更贴合真实世界规律。

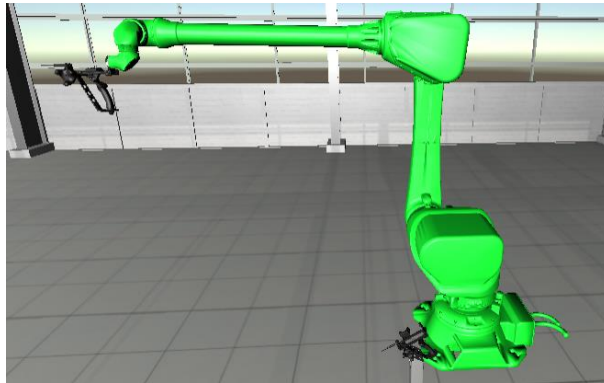


图 4-7 增加光影效果后的机器人模型

4.3 示教系统与现实机器人建立通信

在示教系统中对虚拟模型完成示教点仿真后，需要将采集的轨迹点位姿信息发送给现实机器人，完成虚实联动，实现流程如图 4-8 所示。

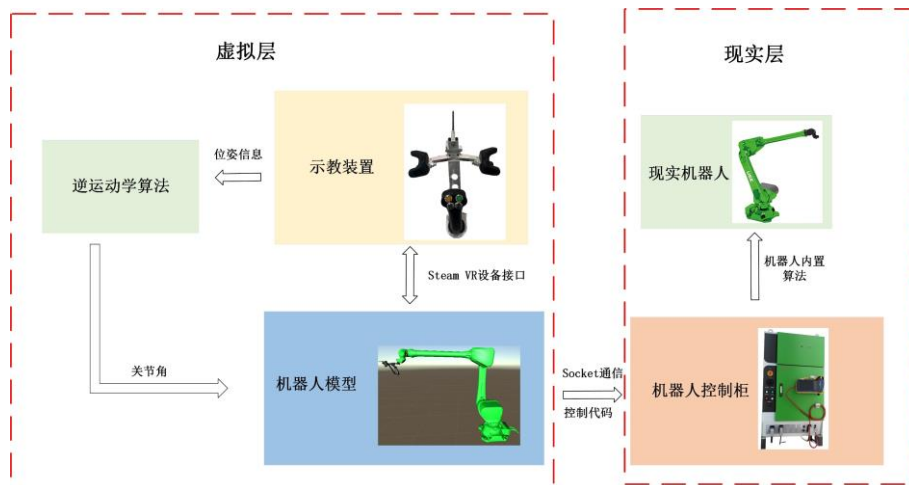


图 4-8 虚实联动过程示意图

Socket 通信是一种网络通信方式，允许不同设备之间通过网络进行数据传输。它基于 TCP 协议（面向连接，可靠）或 UDP 协议（无连接，快速），可实现程序间、设备间的数据交互。其中，UDP 协议快速但不可靠，不保证数据到达或顺序，适合对实时性要求高但对数据准确性要求较低的场景。TCP 协议可以确保数据按顺序、无差错传输，适用于需要稳定数据流的场景（如远程控制）。因此，本文基于 TCP/IP 协议的网络通信方式，通过客户端-服务器架构实现设备之间的数据交换。

在 Unity3D 平台中，可以通过编写 C#脚本实现 Socket 通信的客户端。如机器人控制器作为服务器端，Unity3D 客户端通过使用 Socket 类建立连接（Connect）、收发数据（Send/Receive），通过 IPEndPoint 绑定服务器 IP 和端口。连接成功后，Unity3D 与物理设备之间可以通过 Socket 通道进行数据的发送和接收。为了提高效率，通常会在子线程中处理数据的传输任务，通过后台线程（Thread）异步执行 Received 和 SendMessage 方法，避免主线程阻塞，确保主线程的流畅运行。最后，通过 try-catch 处理网络连接和收发异常，防止程序崩溃。这种方式不仅提高了数据传输的效率，还增强了系统的稳定性和可靠性，广泛应用于工业自动化和机器人控制领域。通信系统设计如图 4-9 所示。

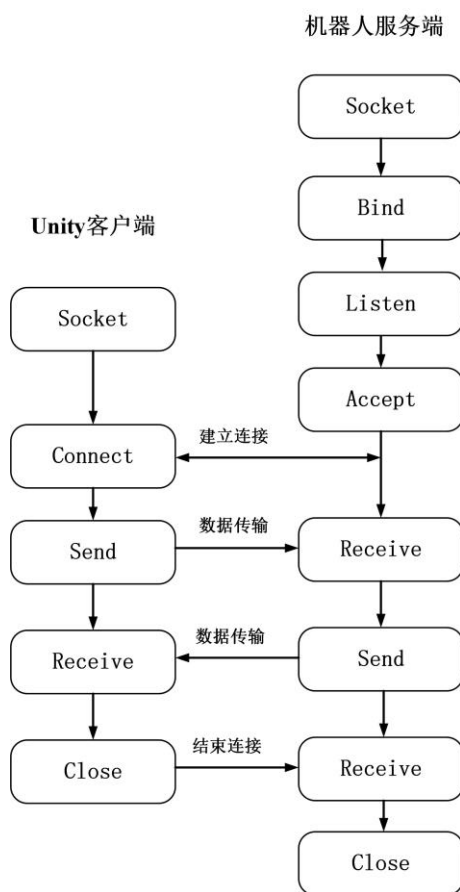


图 4-9 Socket 通信系统设计

为了现实机器人对示教装置采集的位姿信息进行轨迹复现，在 Unity3D 客户端搭建完成后，根据埃夫特 GR 系列机器人使用手册，需要进入机器人示教器的 TCP/IP 设置界面，配置服务端参数，包括选择协议类型为“服务器”，设置套接字号，填写端口号（如 8899），并设置超时时间。保存参数后，机器人开始监听客户端的连接请求。在 Unity3D 中设置为客户端模式，填写机器人控制器的 IP

地址和端口号，建立与机器人服务端的连接。然后，定义位姿信息的发送格式为“START[X, Y, Z, A, B, C]END”，并依次发送多组位置信息。机器人控制器接收到来自客户端的数据后，使用字符串处理指令解析数据，提取出位置信息，生成运动指令。

表 4-1 机器人服务端程序伪代码

机器人服务端程序伪代码
打开套接字 1
设置套接字 1 为监听模式
当 套接字 1 没有客户端连接时
等待客户端连接
当 客户端连接后
循环执行
接收来自套接字 1 的数据，并存储到变量 str_recv
如果 str_recv 不为空字符串 则
去除 str_recv 的首尾引号字符
分析并解析字符串，提取 X、Y、Z、A、B、C 值
根据提取的坐标值生成运动指令
控制机器人按照运动指令移动
结束如果
结束循环

4.4 基于包围盒的碰撞检测算法

碰撞检测算法的主要目的是确保物体之间的交互符合物理规律，从而增强虚拟环境的真实感和可预测性。在 Unity3D 的机器人运动仿真中如果没有碰撞检测，机器人可能直接穿过障碍物或自身关节，导致运动轨迹失真。所以在 Unity3D 的机器人仿真中引入碰撞检测算法可以避免机器人在仿真过程中发生不合理的碰撞或穿模现象，从而提高仿真的稳定性和可靠性^[60]。碰撞检测算法还可以帮助机器人规划安全的路径，避免与障碍物发生碰撞。

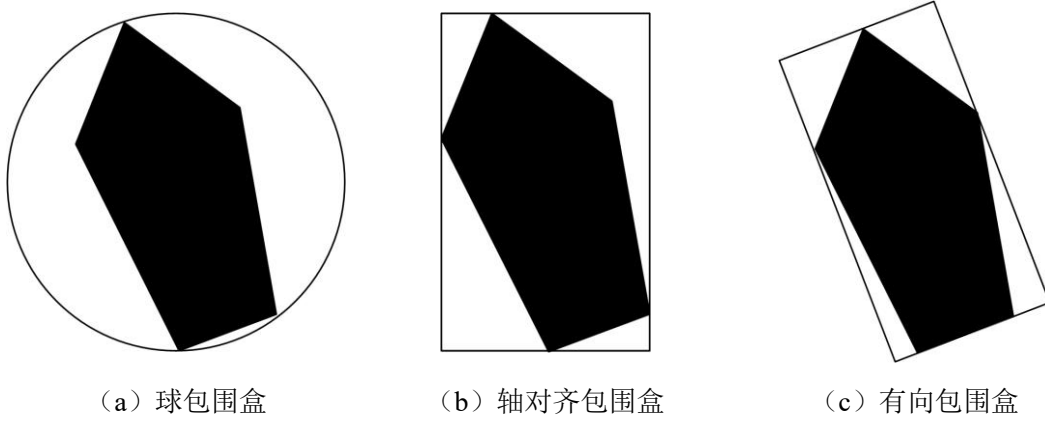


图 4-10 包围盒算法结构图

如图 4-10 所示，球包围盒（Sphere）、轴对齐包围盒(AABB)和有向包围盒(OBB)是三种最常用的包围盒碰撞检测算法。

球包围盒是最简单的碰撞检测几何体，通过一个中心点和半径定义^[61]。其空间有效范围 R_B 数学表达式为：

$$R_B = \{(x, y, z) \mid (x - C_x)^2 + (y - C_y)^2 + (z - C_z)^2 \leq r_B^2\} \quad (5-1)$$

其中， C_x 、 C_y 、 C_z 分别为球心在局部坐标系 x 、 y 、 z 上的分量， r_B 为包围球的半径象所有顶点坐标的平均值确定，半径由球心到几何对象所有顶点的最大距离确定。由于球体的对称性，其体积不会随着几何对象的旋转而发生改变，因此，在进行碰撞检测时，只需要比较两个包围球球心距离与两个包围球半径之和的大小即可。若两球球心距离小于两球半径之和，则可判定发生碰撞，反之，则未发生碰撞。Sphere 适用于快速检测球形或近似球形的物体，计算相交时仅需比较两球心距离与半径之和，效率极高。但由于其形状固定，对非球形物体（如长方体）的包裹精度较低，可能导致过度宽松的碰撞判定，常用于动态物体的初步筛选或简化模型。

轴对齐包围盒是一种与坐标轴对齐的立方体包围盒，通过物体的最小和最大顶点坐标定义。其空间有效范围 R_B 可表示为：

$$R_B = \{(x, y, z) \mid x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y \leq y_{\max}, z_{\min} \leq z \leq z_{\max}\} \quad (5-2)$$

其中， $x_{\min}$ 、 $y_{\min}$ 、 $z_{\min}$ 分别为几何对象所有顶点在 x 、 y 、 z 三个坐标轴上投影的最小值， $x_{\max}$ 、 $y_{\max}$ 、 $z_{\max}$ 分别为几何对象所有顶点在 x 、 y 、 z 三个坐标轴上投影的最大值。使用 AABB 包围盒进行碰撞检测时，只需要比较两个包围盒在 x 、 y 、 z 三个坐标轴上的投影范围是否全部相交，若全部相交，则发生碰撞，

若没有全部相交，则未发生碰撞。AABB 包围盒在 Unity3D 中广泛用于 Broad Phase 检测，因无需考虑旋转，仅需更新顶点坐标即可快速计算包围盒重叠，性能极优。然而，AABB 对旋转物体的适应性差——物体旋转后需重新计算包围盒，可能导致体积膨胀，降低检测精度。通常用于静态物体或需要快速剔除无关碰撞的场景。

定向包围盒是一种边平行于被包围对象局部坐标系方向的六面体，用于紧密包裹几何对象。其空间有效范围 R_B 的表达式为：

$$R_B = \{C + ar_1\vec{v}_1 + br_2\vec{v}_2 + cr_3\vec{v}_3 \mid a, b, c \in (-1, 1)\} \quad (5-3)$$

其中， C 为 OBB 包围盒中心， v_1 、 v_2 、 v_3 为三组互相垂直的空间向量，构成被包围对象的局部坐标系方向， r_1 、 r_2 、 r_3 为包围盒各边长度，分别与 v_1 、 v_2 、 v_3 平行。OBB 包围盒具有方向上的任意性，可跟随物体一起旋转，且在包裹对象时紧密性高，更贴近模型，能有效保证碰撞检测的精确性。然而，其相交测试复杂且耗时，占用计算机内存较多。

Unity3D 通过 Collider（碰撞体）组件和 Rigidbody（刚体）组件来模拟碰撞效果。根据机器人模型各部分的结构形状，为其添加相应的碰撞体。对机器人模型基座以及各个关节添加 AABB 包围盒，对末端示教装置添加 OBB，最终包裹状态如图 4-11 所示。

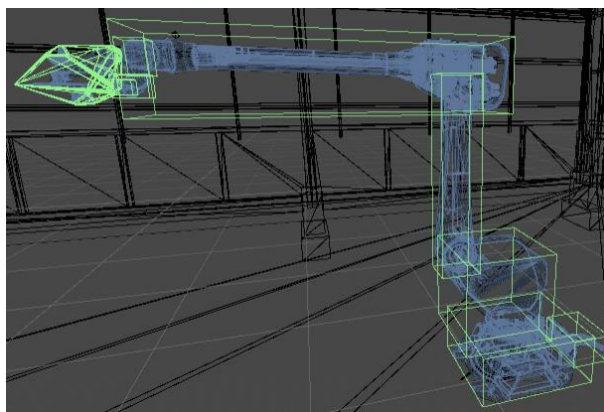


图 4-11 机器人模型添加包围盒

4.5 示教系统交互界面设计

4.5.1 UI 组件的选择

Unity3D 针对交互界面设计提供了三种搭建 UI 的方式，分别是 GUI、NGUI

和 UGUI。GUI 是 Unity3D 早期提供的交互系统，基于代码驱动的即时模式，适合开发者调试工具或简单界面，但性能差且难以制作复杂的 UI；NGUI 作为第三方插件曾是主流解决方案，支持可视化编辑与图集管理，但依赖插件且学习成本较高。UGUI 作为 Unity3D 官方从 4.6 版本推出的内置系统，融合了 NGUI 的优点并优化了工作流程，原生支持可视化编辑与布局工具（如锚点、RectTransform），内置事件系统与多分辨率适配（Canvas Scaler），且完全免费集成于引擎，降低了开发门槛与维护成本。因此，选择 Unity3D 引擎内置的 UGUI 组件设计 UI 界面。

UGUI 组件的元素需置于 Canvas 画布层级下。当场景中未检测到 Canvas 时，开发者无需手动创建，只需添加任意 UI 对象（如按钮或文本），系统将自动生成关联的 Canvas 及 EventSystem。UGUI 提供了完整的 UI 组件库，包含基础控件如图像组件（Image）、文本组件（Text）、面板容器（Panel）、交互按钮（Button）、滚动条（ScrollBar）、状态切换组件（Toggle）、数值调节滑块（Slider）等，如图 4-12 所示。

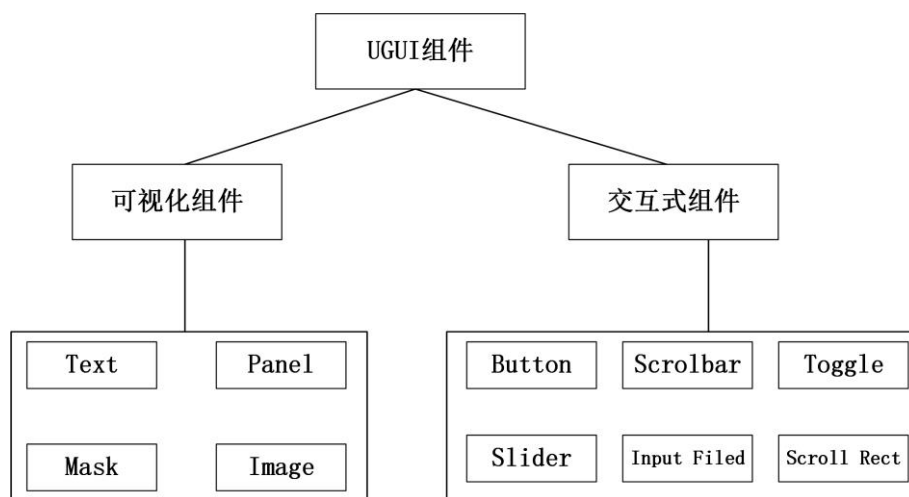


图 4-12 UGUI 组件

4.5.2 系统 UI 界面搭建

针对演示示教系统的需求，利用 UGUI 组件搭建了交互界面，如图 4-13 所示。接下来将详细介绍各个功能模块的具体实现与作用。

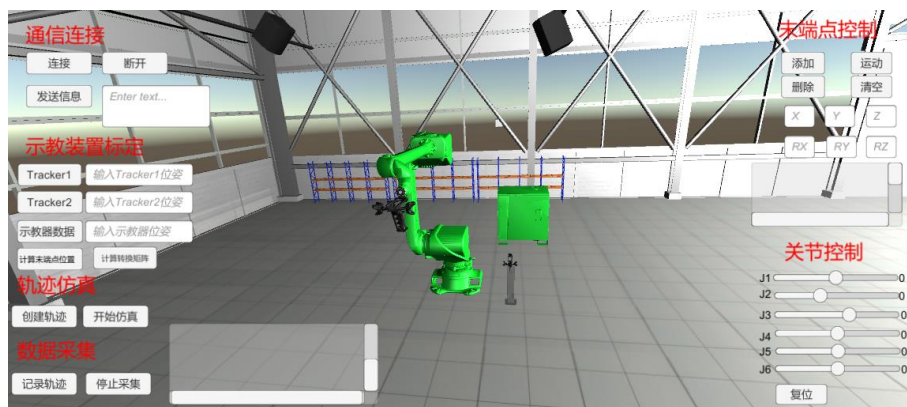


图 4-13 示教系统 UI 界面

(1) 示教装置标定模块：针对第三章提出的矩阵转换方法，在演示示教之前需要对系统进行标定，在 Unity3D 中无法直接使用 SVD 分解，所以通过导入 Math.NET Numerics 数学库进行运算。在分别输入两个追踪器以及机器人示教器的位姿数据后，即可完成计算，如图 4-14 所示。

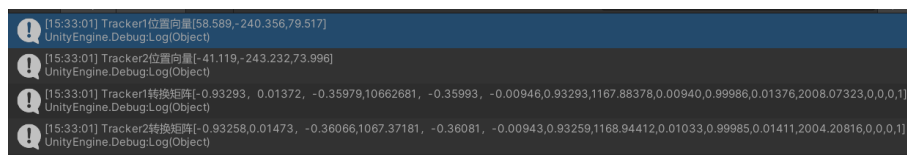


图 4-14 示教装置标定数据

(2) 关节控制模块：在绑定完成机器人各个关节的父子关系之后，利用 3.3.1 中 DH 参数建立机器人的运动学模型，可以计算出机器人末端位姿。并且，通过 Slider 滑条组件结合 Text 文本可将角度可视化。同时，如图 4-15 所示，在滑条的 Inspector 面板中应设置各个关节的转动范围，避免各关节的旋超出机器人结构的限制。最后，增加了复位按钮，使机器人各关节能快速恢复初始角度。

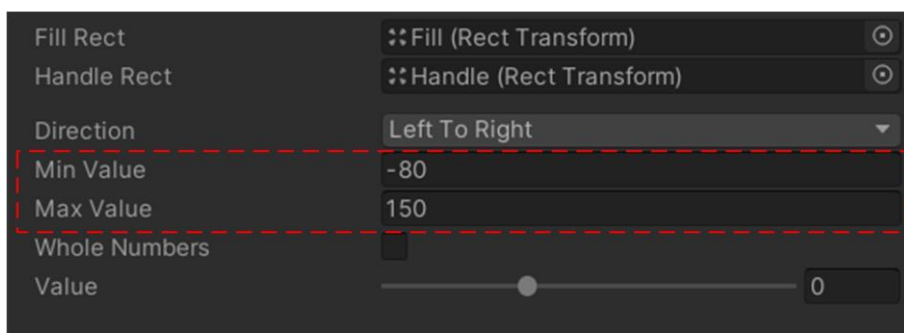


图 4-15 设置关节转动范围

(3) 末端点控制模块：根据 3.3.3 推导的逆运动学公式，编写运动学算法脚本，按照定义的数学模型逐逆解各关节角度，从而实现对机器人逆运动控制。通过输入末端位姿的 X 、 Y 、 Z 、 RX 、 RY 、 RZ 生成目标点，控制机器人模型末端沿

着目标点运动。

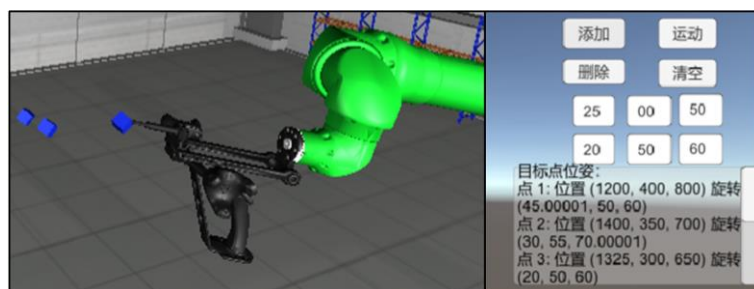


图 4-16 控制末端移向目标点

(4) 数据采集模块：在操作人员演示示教过程中，能够将 Tracker 采集到的位姿数据采集并记录。在 Project/Asset 界面生成两个 Tracker 的原始位姿 Text 文件，以及矩阵转换后示教装置尖点坐标系{T}在机器人基坐标系{B}与定位基站坐标系{A}的示教位姿 Text 文件。

(5) 轨迹仿真模块：根据采集的运动轨迹点，在 Unity3D 中对机器人进行运动仿真。根据拖入记录位姿的 Text 文件生成运动轨迹，点击轨迹生成按钮生成运动轨迹，避免现实机器人进行轨迹复现时出现问题。

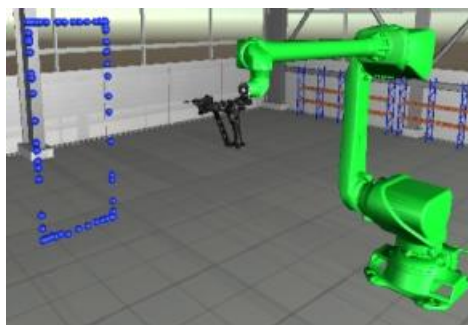


图 4-17 运动轨迹点

(6) 通信连接模块：通信模块采用 CS 架构，Unity3D 作客户端，机器人控制器作服务端，通过通信模块可以建立 Unity3D 与机器人的 TCP 通讯。在 Unity3D 场景中可以通过 InputField 组件输入目标位姿，目标位姿通过客户端发送给服务端，然后机器人控制器识别到目标位姿，驱动机械臂运动，实现虚实结合。

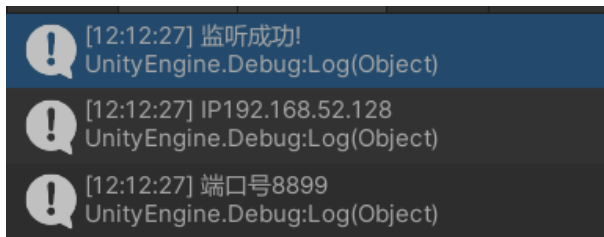


图 4-18 Unity3D 与机器人建立通讯

4.6 本章小结

本章详细阐述了基于 Unity3D 的机器人示教系统仿真平台的搭建过程。通过多软件协同建模，创建并优化了机器人模型，使其符合实际运动逻辑，布置了工作场景，增加了光影效果，提升了场景的真实感。通过 Socket 通信技术，建立了示教系统与现实机器人之间的通信，实现了虚实联动。最后，利用了 UGUI 组件，搭建了完整交互界面，提升了系统的易用性与操作性。

第5章 机器人轨迹示教实验

本章通过设计机器人轨迹复现实验来验证演示示教系统的有效性。首先针对所提出的 NICP 位姿优化算法进行验证。其次，对定位系统的跟踪精度进行测试，包括物体运动速度对跟踪位置和姿态精度的影响，然后，对示教装置复现轨迹的稳定性进行分析。最后，进行现场喷涂轨迹复现实验。

5.1 实验平台搭建

本研究设计并搭建了一套机器人演示示教系统。该系统包括四个 HTC VIVE 定位基站、两个固定支架、一个示教装置、一个 GR680-2700 机器人和一台计算机，HTC VIVE 基站固定在支架上，并与机器人的工作区域对齐，如图 5-1 所示。

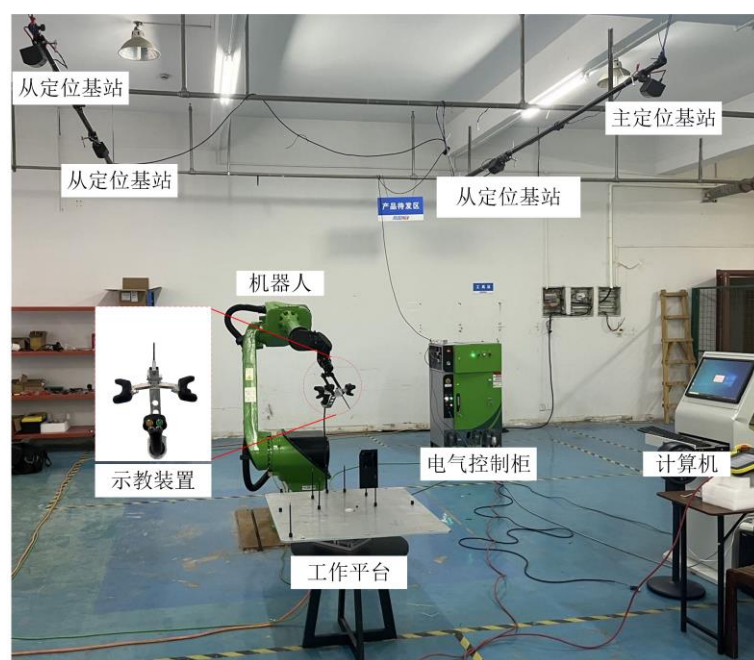


图 5-1 机器人演示示教系统

5.2 示教装置标定

为了确保示教轨迹的准确性，使用示教装置前必须进行标定。首先将示教装置安装在机器人末端，使用第三章所提出的四点标定法，在保持尖点位置不变的前提下，选择四个不同的标定位置，且每个位置的姿态间隔约为 90° 。

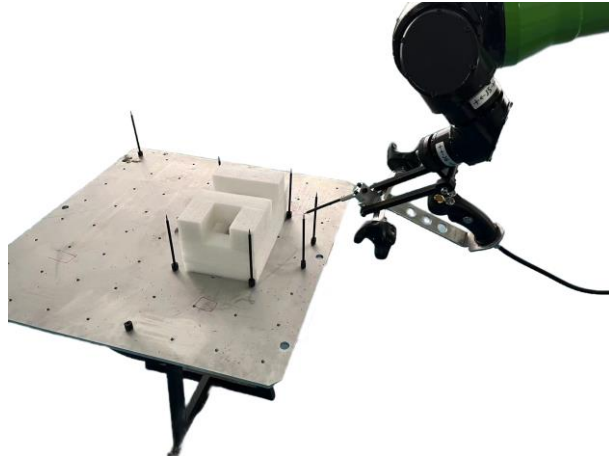


图 5-2 示教装置标定

在标定位置下，获取两个追踪器在定位基站坐标系下的位姿数据，如表 5-1、5-2 所示。若尖点位置发生变化或所选的标定位置姿态间隔过小，将导致计算结果的误差增大，从而影响标定的精度。

表 5-1 Tracker1 在定位基站坐标系的位姿 (P_{11} - P_{14})

<i>Point</i>	<i>X/mm</i>	<i>Y/mm</i>	<i>Z/mm</i>	<i>RX/deg</i>	<i>RY/deg</i>	<i>RZ/deg</i>
P_{11}	-57.612	-1613.581	-1092.419	-156.349	14.248	-166.348
P_{12}	-68.815	-1547.421	-1175.319	166.590	34.593	-155.946
P_{13}	18.560	-1614.917	-1157.719	166.088	22.281	-133.932
P_{14}	-14.692	-1677.436	-1076.742	-154.531	22.0696	-148.043

表 5-2 Tracker1 在定位基站坐标系的位姿 (P_{11} - P_{14})

<i>Point</i>	<i>X/mm</i>	<i>Y/mm</i>	<i>Z/mm</i>	<i>RX/deg</i>	<i>RY/deg</i>	<i>RZ/deg</i>
P_{21}	-18.344	-1549.503	-1223.203	24.058	-15.160	-18.870
P_{22}	19.115	-1571.620	-1292.197	-13.265	-35.467	-28.998
P_{23}	77.910	-1646.002	-1291.273	-14.045	-23.290	-51.339
P_{24}	44.562	-1618.439	-1204.738	25.784	-23.232	-37.170

获取位姿数据后，通过四点法计算得到示教装置末端尖点坐标系相对追踪器坐标系的位置矢量 ${}^{K1}P_T$, ${}^{K2}P_T$ 。

$${}^{K1}P_T = [58.589 \quad -240.356 \quad 79.517]^T \quad (5.1)$$

$${}^{K2}P_T = [-41.119 \quad -243.232 \quad 73.996]^T \quad (5.2)$$

随后运行机器人标定程序，机器人运动到预设的 10 个位置，同时获取追踪器与机器人的位姿信息，利用奇异值分解计算出基站坐标系到机器人基坐标系之

间的转换矩阵 ${}^B T_{1A}$, ${}^B T_{2A}$ 完成初步转换矩阵的标定。

机器人继续运动到 10 个新的预设位置，利用得到的初步转换矩阵将位置点进行转换，并在机器人示教器记录这些点的坐标。将记录的坐标导入到 NICP 算法中，迭代获取高精度的转换，如图 5-3、5-4 所示。

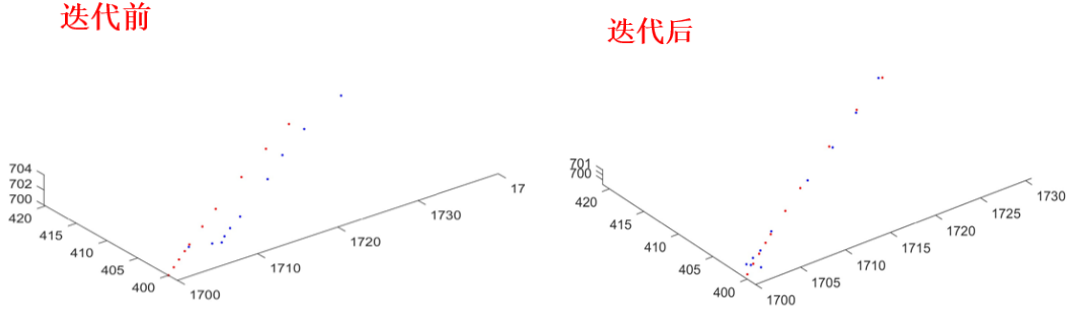


图 5-3 NICP 算法迭代点云图

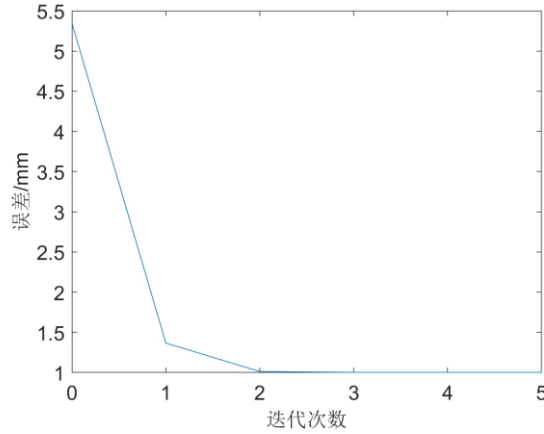


图 5-4 NICP 算法迭代误差图

最终根据两个追踪器的位置，可求出两个高精度转换矩阵 ${}^B T_{1A}^*$ 、 ${}^B T_{2A}^*$

$${}^B T_{1A}^* = \begin{bmatrix} -0.93293 & 0.01372 & -0.35979 & 1066.26801 \\ -0.35993 & -0.00946 & 0.93293 & 1167.88378 \\ 0.00940 & 0.99986 & 0.01376 & 2008.07323 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$${}^B T_{2A}^* = \begin{bmatrix} -0.93258 & 0.01473 & -0.36066 & 1067.37181 \\ -0.36081 & -0.00943 & 0.93259 & 1168.94412 \\ 0.01033 & 0.99985 & 0.01411 & 2004.20816 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

5.3 NICP 算法优化轨迹精度实验

5.3.1 优化轨迹位置精度实验

为了验证基于 NICP 算法的补偿矩阵方法对示教位置精度的影响，在 0.3 m/s 的速度下进行了线形轨迹与弧形轨迹的对比实验。实验中，使用示教装置和机器

人示教器分别获取多个机器人路径点的三维坐标,采用两个追踪器转换后的平均位姿作为示教装置采集位姿。在此基础上,以机器人示教器获取的三维坐标作为基准,对比分析示教装置获取的三维坐标与基准坐标之间的差异。这一差异,即示教误差,通过计算得出,并用于评估补偿矩阵方法对提高轨迹示教精度的实际效果。

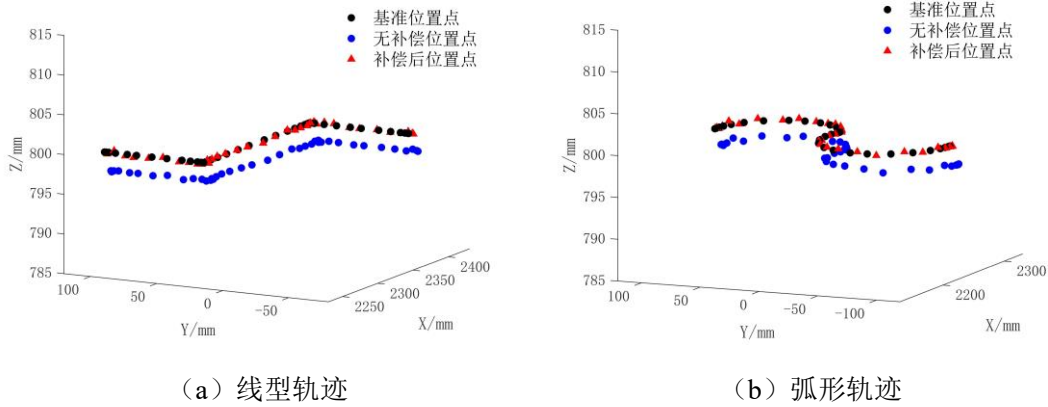


图 5-5 运动轨迹三维坐标图

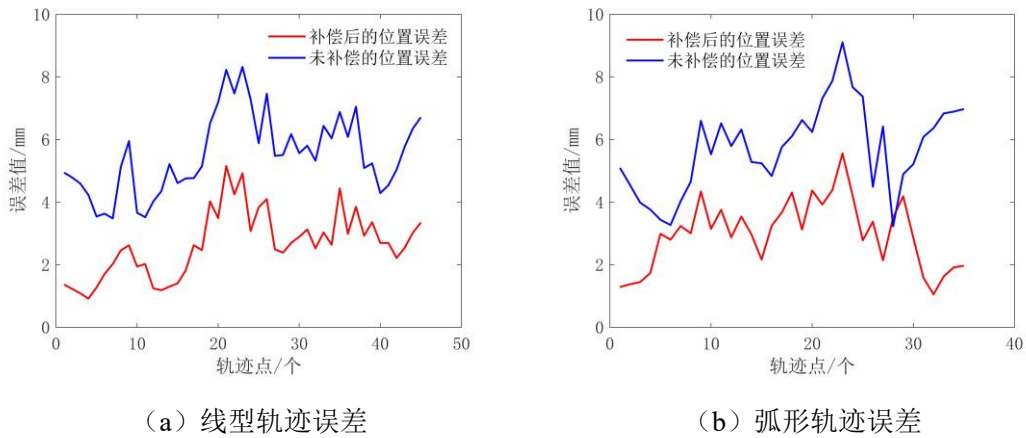


图 5-6 运动轨迹位置误差

在未使用补偿矩阵的情况下,线形轨迹的平均误差为 5.514 mm,最大误差达到了 8.323 mm;而弧形轨迹的平均误差为 5.667 mm,最大误差为 9.107 mm。当引入了补偿矩阵后,示教精度得到了显著提升。线形轨迹的平均误差降低到了 2.656 mm,最大误差也降至 5.155 mm;弧形轨迹的平均误差降至 3.149 mm,最大误差降至 5.561 mm。证明基于 NICP 算法对提高轨迹复现位置精度是有效的。

5.3.2 优化轨迹姿态精度实验

为了验证基于 NICP 算法的补偿矩阵方法对示教姿态精度的影响,将示教装

置安装在机器人末端，围绕一个固定位置进行转动。因为围绕一个固定位置转动机器人三个轴 RX 、 RY 、 RZ 的转速是不固定的，故选取机器人速度倍率为 30%（ $RX 10.52^\circ/s$ 、 $RY 7.83^\circ/s$ 、 $RZ 13.91^\circ/s$ ）进行测试。以机器人示教器获取的欧拉角作为基准，对比分析示教装置获取的欧拉角与基准坐标之间的差值。

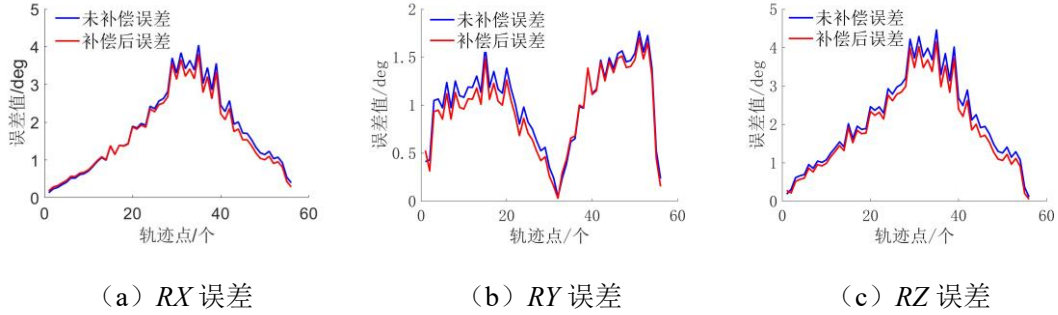


图 5-7 运动轨迹姿态误差

在未使用补偿矩阵的情况下，姿态（ RX 、 RY 、 RZ ）的平均误差为 1.761° 、 1.036° 、 2.085° ，最大误差为 4.044° 、 1.769° 、 4.459° ，补偿后姿态（ RX 、 RY 、 RZ ）的平均误差为 1.669° 、 0.962° 、 1.908° ，最大误差为 3.806° 、 1.699° 、 4.146° 。实验结果表明，基于 NICP 算法对提高轨迹复现姿态精度是有效的。

5.4 演示示教系统追踪精度实验

5.4.1 不同速度梯度下位置精度实验

为研究不同速度梯度下演示示教方法的轨迹位置精度，本研究选取 0.15 m/s 、 0.3 m/s 和 0.5 m/s 三个具有代表性的速度点，涵盖了机器人日常作业中的低速、中速和高速工况。实验过程中，分别对机器人进行了线性轨迹和弧形轨迹的示教操作，全面评估速度对轨迹精度的影响。通过示教装置和机器人示教器获取了多个机器人基坐标系下的路径点的三维坐标，以机器人示教器获取机器人基坐标系的路径点的三维坐标为基准，计算基于示教装置获取的三维坐标与基准之间的差值。

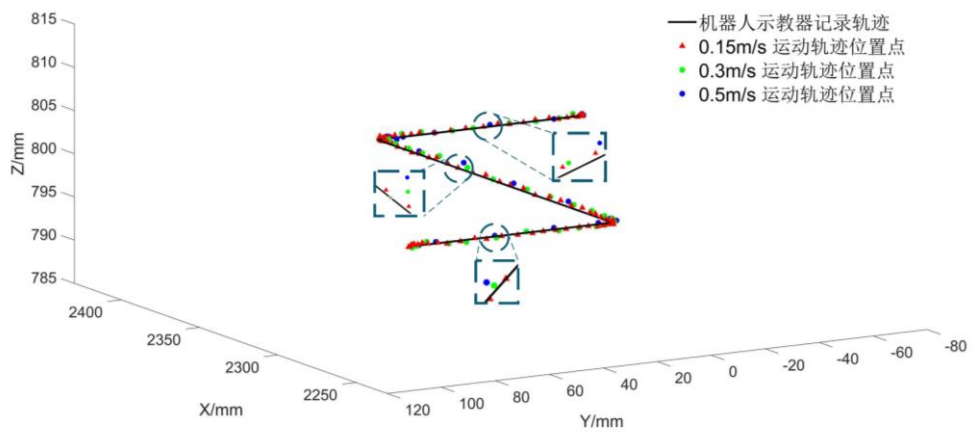


图 5-8 不同速度下线形轨迹三维坐标图

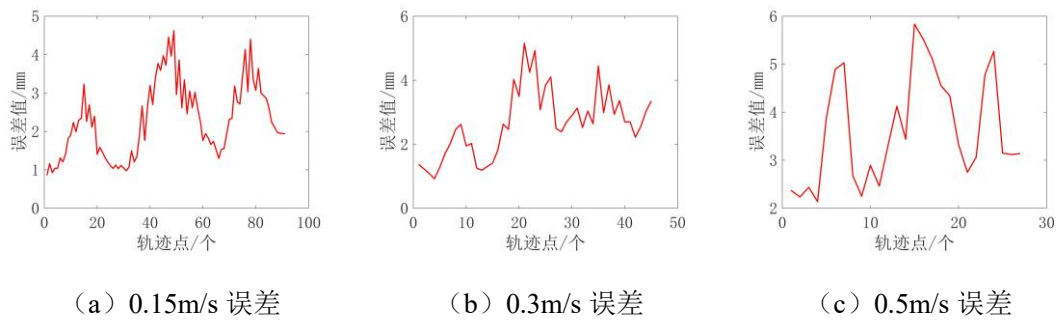


图 5-9 不同速度下线形轨迹误差

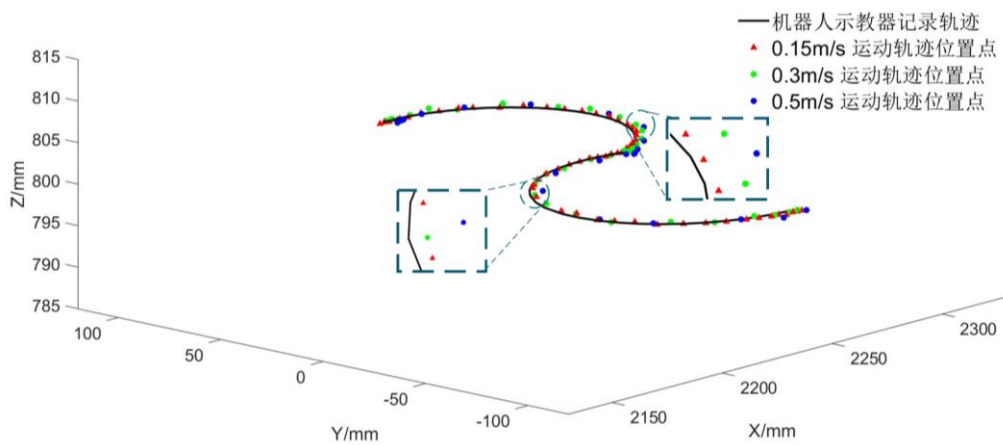


图 5-10 不同速度下弧形轨迹三维坐标图

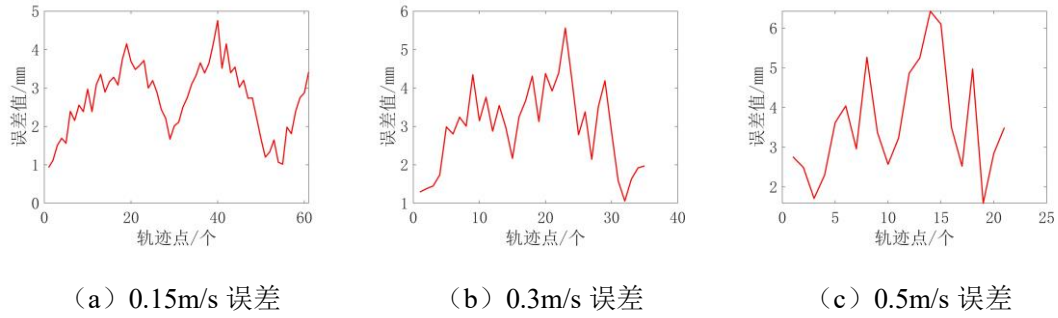


图 5-11 不同速度下弧形轨迹误差

在 0.15 m/s 的速度下，线形轨迹的平均误差为 2.281 mm，最大误差为 4.623 mm，标准差为 0.894 mm，偏度为 0.2814。弧形轨迹的平均误差为 2.801 mm，最大误差为 4.987 mm，标准差为 0.955 mm，偏度:0.3013。当速度提升至 0.3 m/s 时，线型轨迹的平均误差增加到 2.656 mm，最大误差为 5.155 mm，标准差为 1.049 mm，偏度为 0.3738。弧形轨迹的平均误差为 3.149 mm，最大误差为 5.561 mm，标准差为 1.1913，偏度为 0.4696。在 0.5 m/s 的最高速度下，线形轨迹的平均误差进一步增加到 3.627 mm，最大误差达到 5.861 mm，标准差为 1.140 mm，偏度为 0.4429。弧形轨迹的平均误差为 3.818 mm，最大误差为 6.427 mm，标准差为 1.379 mm，偏度为 0.5969。机器人运动一段轨迹是加速-匀速-减速的过程，通过分析轨迹误差数据发现在机器人运动速度最大时产生误差峰值，VIVE Tracker 的位置数据是通过 IMU 测量的加速度进行双积分计算得到的。在高速运动时，即使是微小的加速度测量误差也会在双积分过程中被放大，会导致位置数据的误差随着速度的增加而增加。此外，高速运动还可能引入其他因素，如机械臂的动态响应特性、传感器的采样频率和数据处理算法的实时性等，这些因素也可能会对误差产生影响。

5.4.2 不同速度梯度下姿态精度实验

为测试在不同速度下示教方法的示教轨迹姿态精度，本次实验分别在速度倍率 10% ($RX 3.32^\circ/s$ 、 $RY 2.62^\circ/s$ 、 $RZ 4.53^\circ/s$)、速度倍率 20% ($RX 7.02^\circ/s$ 、 $RY 5.17^\circ/s$ 、 $RZ 9.41^\circ/s$)、速度倍率 30% ($RX 10.52^\circ/s$ 、 $RY 7.83^\circ/s$ 、 $RZ 13.91^\circ/s$)、速度倍率 40% ($RX 13.98^\circ/s$ 、 $RY 10.39^\circ/s$ 、 $RZ 18.53^\circ/s$) 四个速度下，让机器人围绕一个固定位置转动。以机器人示教器获取机器人基坐标系的欧拉角为基准，计算基于示教装置获取的欧拉角与基准之间的差值。

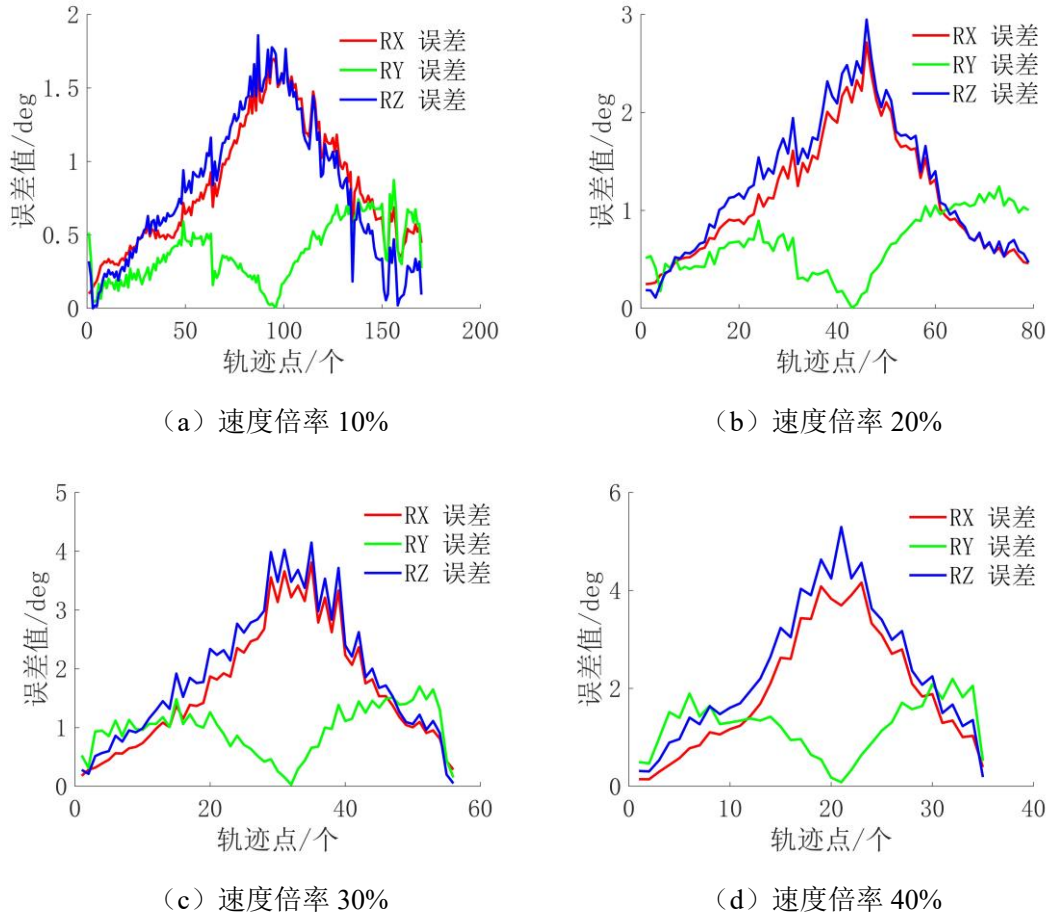


图 5-12 不同速度下运动轨迹姿态误差

通过对比实验可以得到：速度倍率为 10% 时，姿态 (RX , RY , RZ) 的平均误差为 0.829° 、 0.378° 、 0.799° ，最大误差为 1.758° 、 0.873° 、 1.858° ，标准差为 0.426° 、 0.202° 、 0.492° ，偏度为 0.3401 、 0.2086 、 0.2544 ；速度倍率为 20% 时，姿态的平均误差为 1.146° 、 0.719° 、 1.443° ，最大误差为 2.713° 、 1.243° 、 2.946° ，标准差为 0.618° 、 0.281° 、 0.564° ，偏度为 0.4166 、 0.2765 、 0.3456 ；速度倍率为 30% 时，姿态的平均误差为 1.669° 、 0.962° 、 1.908° ，最大误差为 3.806° 、 1.699° 、 4.146° ，标准差为 0.662° 、 0.336° 、 0.635° ，偏度为 0.4762 、 0.3224 、 0.3766 ；速度倍率为 40% 时，姿态的平均误差为 1.931° 、 1.206° 、 2.340° ，最大误差为 4.159° 、 2.196° 、 5.293° ，标准差为 0.726° 、 0.384° 、 0.715° ，偏度为 0.5282 、 0.3615 、 0.4353 。实验结果表明，在不同速度下的示教轨迹姿态精度测试中，示教轨迹姿态的误差会随着速度的增加而增加。

5.5 演示示教系统轨迹复现稳定性实验

为了评估示教装置复现轨迹的稳定性，操作人员使用示教装置演示一段轨迹，如图 5-13 所示。记录示教的轨迹的位置信息，并上传给机器人。



图 5-13 示教轨迹

机器人根据运动数据复现轨迹，同时采集其末端位置数据。以初始示教轨迹位置为基准，通过比较机器人复现时采集的数据点到初始示教轨迹的距离分析轨迹复现的稳定性。

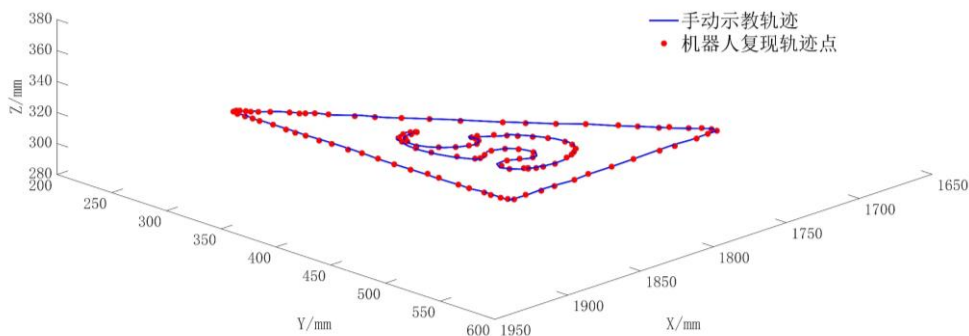


图 5-14 初始示教轨迹与复现位置点

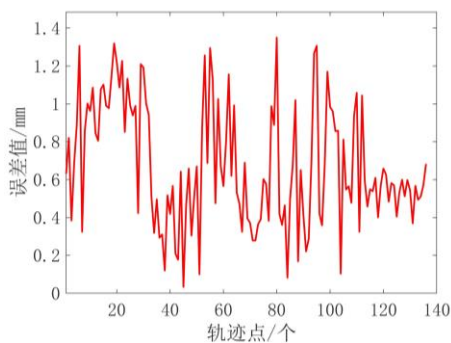


图 5-15 复现轨迹与初始轨迹误差

实验结果表明，复现位置点相对于初始轨迹的平均距离误差相对较小，平均

误差 0.675 mm，最大误差 1.350 mm，整体上轨迹复现的准确性是可接受的。

为了进一步验证所提出的基于位姿追踪的工业机器人演示示教系统在实际工业环境中的有效性和实用性，本文设计并实施了现场喷涂轨迹复现实验，如图 5-16 所示。实验结果表明，基于位姿追踪的演示示教系统能够高效、准确地完成轨迹的示教与复现。



(a) 人工演示示教



(b) 机器人复现



(c) 人工示教喷涂轨迹



(d) 机器人复现喷涂轨迹

图 5-16 现场喷涂示教实验

5.6 本章小结

本章通过搭建实验平台，进行多维度实验，验证了演示示教系统的性能与可靠性。实验表明，基于 NICP 算法的补偿矩阵显著提升了轨迹位置和姿态精度，线形轨迹平均误差由 5.514 mm 降至 2.656 mm，弧形轨迹平均误差由 5.667 mm 降至 3.149 mm，姿态误差平均降低约 10%。不同速度梯度测试中，0.5 m/s 高速运动时位置误差最大为 6.427 mm，姿态误差随速度增大但整体可控。轨迹复现稳定性实验显示，复现轨迹与初始轨迹平均距离误差仅为 0.675 mm，最大误差

1.350 mm, 验证了系统的高精度与稳定性。现场喷涂轨迹复现实验进一步验证了系统的实际应用价值, 喷涂轨迹与示教轨迹高度吻合, 满足工业喷涂的精度要求。实验结果证明, 所提方法在工业场景中具备实用价值, 可为复杂任务示教提供有效解决方案。

第 6 章 总结与展望

本文针对工业机器人轨迹示教需求,提出了一种基于高精度位姿追踪的演示示教系统,通过融合虚拟现实定位技术、坐标变换优化算法与机器人运动学建模,显著提升了示教效率与轨迹复现精度。以下是本文的主要研究内容和成果:

(1) 系统需求分析与方案设计。深入分析了工业机器人示教编程的技术难点和需求,对比国内外研究现状,明确了基于位姿追踪的演示示教技术的优势。设计了轨迹演示示教系统的整体软硬件实现方案。

(2) 位姿采集系统设计。基于 HTC VIVE Tracker 定位技术,设计了高精度的位姿采集系统。通过四基站协同的红外激光平面扫描技术,结合三角测量法实现高精度位姿解算,并通过 Unity3D 与 SteamVR 插件实现数据采集与处理。针对硬件与环境误差,提出了校准与布局优化方案,有效降低了抖动误差。此外,设计的枪形示教装置通过冗余数据采集与双追踪器协同定位算法,进一步提升了系统可靠性与适用性。

(3) 坐标变换与机器人运动学求解。建立了演示示教系统中各坐标系的关系,通过四点标定法确定了示教装置末端尖点的位置。利用 SVD 求解了基站坐标系与机器人基坐标系之间的转换矩阵,并通过 NICP 算法对其精度进行了补偿。基于 D-H 参数法对机器人运动学进行了建模,并详细推导了正运动学和逆运动学的求解过程,为机器人的精准示教与运动控制提供了理论基础。

(4) 仿真平台搭建。以真实的 GR680-2700 机器人为原型,基于 Unity3D 搭建了交互式机器人示教系统仿真平台。通过多软件协同建模,创建并优化了机器人模型,使其符合实际运动逻辑,布置了工作场景,增加了光影效果,提升了场景的真实感。通过 Socket 通信技术,建立了示教系统与现实机器人之间的通信,实现了虚实联动。利用 UGUI 组件,搭建了完整交互界面,提升了系统的易用性与操作性。

(5) 实验验证与结果分析。设计并搭建了机器人演示示教系统实验平台,进行了多组实验验证。实验结果表明,基于 NICP 算法的补偿矩阵显著提升了轨迹位置和姿态精度,线形轨迹平均误差由 5.514 mm 降至 2.656 mm,弧形轨迹平均误差由 5.667 mm 降至 3.149 mm,姿态误差平均降低约 10%。不同速度梯度测

试中, 0.5 m/s 高速运动时位置误差最大为 6.427 mm, 姿态误差随速度增大但整体可控。轨迹复现稳定性实验显示, 复现轨迹与初始轨迹平均距离误差仅为 0.675 mm, 最大误差 1.350 mm, 验证了系统的高精度与稳定性。此外, 现场喷涂实验进一步验证了系统的实际应用价值, 证明了所提系统在实际工业环境中能够显著提高喷涂作业的效率, 降低对操作人员的专业技能要求。

综上所述, 本文所提出的基于位姿追踪的工业机器人演示示教系统为工业机器人提供了一种高效、直观的示教解决方案, 特别适用于复杂曲面物体表面轨迹的示教工作, 为智能制造中的人机协同作业提供了技术支撑。

尽管本研究在提高工业机器人轨迹示教的效率和精度方面取得了一定成果, 但仍存在一些局限性和未来可改进的方向:

(1) 多传感器融合: 可以考虑融合其他传感器, 如力传感器、视觉传感器等, 以进一步提高示教系统的精度和鲁棒性。例如, 通过力传感器反馈的信息, 可以实现对机器人操作力度的控制, 避免对工件造成损伤; 视觉传感器可以用于实时监测机器人的操作环境, 实现更智能的避障和路径规划。

(2) 智能化示教算法: 研究更先进的机器学习算法, 如深度强化学习, 使机器人能够从少量的演示数据中快速学习, 并具备一定的泛化能力, 能够适应不同任务场景下的示教需求。

(3) 喷涂实验定量分析: 本文的喷涂实验仅从定性角度验证了轨迹复现效果。未来研究将引入定量分析, 通过测量喷涂轨迹的均匀性(如涂层厚度标准差)和覆盖率(如目标区域喷涂面积占比), 更全面地评估系统性能。同时, 结合激光扫描仪和视觉传感器采集数据, 对比机器人复现喷涂轨迹与人工示教喷涂轨迹的偏差, 进一步优化系统的精度和稳定性。

参考文献

- [1] Molfino R, Cepolina F E, Cepolina E, et al. Robots trends and megatrends: artificial intelligence and the society[J]. Industrial Robot: the international journal of robotics research and application, 2024, 51(1): 117-124.
- [2] Zhang H D, Liu S B, Lei Q J, et al. Robot programming by demonstration: A novel system for robot trajectory programming based on robot operating system[J]. Advances in Manufacturing, 2020, 8: 216-229.
- [3] Arents J, Greitans M. Smart industrial robot control trends, challenges and opportunities within manufacturing[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 937.
- [4] Ong S K, Yew A W W, Thanigaivel N K, et al. Augmented reality-assisted robot programming system for industrial applications[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101820.
- [5] Rosenstrauch M J, Krüger J. Safe human-robot-collaboration-introduction and experiment using ISO/TS 15066[C]//2017 3rd International conference on control, automation and robotics (ICCAR). Nagoya: IEEE, 2017: 740-744.
- [6] PELLOI R, BRÜLS O. An inertial human upper limb motion tracking method for robot programming by demonstration[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 156: 104201.
- [7] Zhang H, Lv X, Leng W, et al. Recent advances on vision-based robot learning by demonstration[J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2018, 11(4): 269-284.
- [8] Dillmann R, Asfour T, Do M, et al. Advances in Robot Programming by Demonstration[J]. KI - Künstliche Intelligenz, 2010, 24(4): 295-303.
- [9] 许郢. 虚拟仿真技术在工业机器人智能制造中的应用[J]. 电气传动自动化, 2023, 45(4): 50-53.
- [10] Pan Z, Polden J, Larkin N, et al. Recent progress on programming methods for industrial robots[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(2): 87-94.
- [11] Duško L, Miljana M. Simulation of a Pick-and-Place Cube Robot by Means of the Simulation Software Kuka Sim Pro[J]. Electronics ETF, 2018, 21(2): 95-95.
- [12] V B, M B, V V T, et al. Simulation of manipulation task using iRVision aided robot control in Fanuc RoboGuide software[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1199(1).
- [13] 诸葛琰, 卓雪艳, 廖小平, 等. OTC 弧焊机器人离线编程系统开发[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015, (11): 91-94.
- [14] Cole J. Digital Factory Simulator Mirrors Real Production Environment[J]. Modern Machine

- Shop, 2016, 89(5): 147-148.
- [15] Beomyeong P, Jimin L, et al. New media content platform using 6-DOF industrial robot and 3D game engine[J]. Journal of Robotics, 2009(1): 10-16.
- [16] Gîrbacia F, Duguleana M, Stavar A. Off-line programming of industrial robots using co-located environments[J]. Advanced Materials Research, 2012, 463: 1654-1657.
- [17] Andaluz V H, Chicaiza F A, Gallardo C, et al. Unity3D-MatLab simulator in real time for robotics applications[C]//Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics: Third International Conference, AVR 2016, Lecce, Italy, June 15-18, 2016. Proceedings, Part I 3. Cham: Springer, 2016: 246-263.
- [18] 庄鑫, 高艳, 彭如意等. 基于 PQART 的玻璃窗组装生产线虚拟仿真平台设计[J]. 电子技术与软件工程, 2021, (14): 39-40.
- [19] 孟少飞. 工业机器人离线编程系统的研究与设计[D]. 郑州大学, 2020.
- [20] 盖胜男, 王玉, 王凯, 等. 基于虚拟现实的焊接机器人工作站离线编程系统[J]. 电焊机, 2023, 53 (09): 14-21.
- [21] 贲飞. 基于虚拟现实的工业机器人运动仿真与控制研究[D]. 哈尔滨理工大学, 2019.
- [22] 方伟. 工业机器人离线编程与仿真软件开发[D]. 华中科技大学, 2019.
- [23] Mendoza-Garcia R, Landa-Hurtado L, Mamani-Macaya F, et al. Kinect-based trajectory teaching for industrial robots[C]//Pan-American Congress of Applied Mechanics. Santiago: PACAM, 2014: 116-124.
- [24] Zhang X, Zhou H, Cheng H, et al. Teaching-playback of robot manipulator based on human gesture recognition and motion tracking[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Zhuhai: IEEE, 2015: 1183-1188.
- [25] Moe S, Schjølberg I. Real-time hand guiding of industrial manipulator in 5 DOF using Microsoft Kinect and accelerometer[C]//2013 IEEE RO-MAN. Gyeongju: IEEE, 2013: 644-649.
- [26] Lambrecht J, Kleinsorge M, Rosenstrauch M, et al. Spatial programming for industrial robots through task demonstration[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(5): 254.
- [27] Ng C L, Ng T C, Nguyen T A N, et al. Intuitive robot tool path teaching using laser and camera in augmented reality environment[C]//2010 11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision. Singapore: IEEE, 2010: 114-119.
- [28] Fresnillo P M, Vasudevan S, Mohammed W M, et al. A method for understanding and digitizing manipulation activities using programming by demonstration in robotic applications[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2023, 170: 104556.
- [29] 姬一明. 基于光学定位的机器人轨迹演示示教系统研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2022.

- [30]张宏达. 基于球杆示教笔的机器人轨迹演示编程系统研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.
- [31]张浩. 基于演示示教和自主学习的机器人抓取与装配研究[D]. 青岛理工大学, 2023.
- [32]王亚彪. 面向工业装配演示编程的零件识别与位姿估计[D]. 浙江大学, 2016.
- [33]王浩. 面向工业装配演示编程的机械臂运动控制[D]. 浙江大学, 2018.
- [34]李雷, 周峰峰, 王团结,等. 电磁法技术在海底电缆故障定位中的应用[J]. 电线电缆, 2025, 68 (01): 18-24.
- [35]Liu S, Wang H. A Wireless 6-DoF Pose Tracking System Using a Triaxially Anisotropic Soft Magnet[J/OL]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10599514>, 2025-01-24.
- [36]李志飞. 面向运动跟踪的电磁定位技术研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院深圳先进技术研究院), 2018.
- [37]陈静, 张拥军, 杨璐, 等. 基于激光跟踪仪对北斗远程位移测量系统校准方法的研究[J]. 中国检验检测, 2024, 32(06): 40-43+30.
- [38]朱磊, 赵菲, 王宏昌. 基于 Leica CityMapper 混合数据的地形级地理场景构建[J]. 测绘通报, 2023, (12): 178-180.
- [39]杨兴建. 激光跟踪仪测量误差解析与多测站坐标转换及融合方法研究[D]. 山东科技大学, 2020.
- [40]文笑雨, 张昊, 张玉彦, 等. 数字孪生环境下飞机装配过程中激光跟踪仪位置优化方法研究[J/OL]. 中国机械工程, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20250314.1006.002.html>, 2025-01-26.
- [41]李海涛, 徐曙磊, 王雅雯, 等. 基于外部实物标准的激光跟踪仪基站标定原理及方法研究[J/OL]. 中国机械工程, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20241212.1627.026.html>, 2025-01-26.
- [42]Wells G, Venaille C, Torras C. Vision-based robot positioning using neural networks[J]. Image and vision computing, 1996, 14(10): 715-732.
- [43]Cashbaugh J, Kitts C. Vision-based object tracking using an optimally positioned cluster of mobile tracking stations[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 12(2): 1423-1434.
- [44]Kim J, Jun H. Vision-based location positioning using augmented reality for indoor navigation[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(3): 954-962.
- [45]刘宇晨. 面向动车检修的双目视觉跟踪定位系统关键技术研究[D]. 盐城工学院, 2024.
- [46]梅杰, 覃嘉锐, 陈定方, 等. 基于视觉同时定位与地图构建的水下图像增强式视觉三维重建方法 [J]. 中国机械工程, 2024, 35 (02): 268-279.
- [47]Švejda M, Goubelj M, Jáger A, et al. Affordable motion tracking system for intuitive programming of industrial robots[J]. Sensors, 2022, 22(13): 4962.
- [48]Weber M, Hartl R, Zäh M F, et al. Dynamic pose tracking accuracy improvement via fusing

- HTC vive trackers and inertia measurement units[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2023, 24(9): 1661-1674.
- [49]孙俊彬, 陆熊, 潘覃毅, 等. 基于 SteamVR 激光扫描的手指位置检测系统设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(15): 154-157.
- [50]卢敬德, 曹宪, 杨东浩, 等. 基于便携式穿戴设备的混合现实飞行仿真平台[J]. 计算机仿真, 2024, 41(12): 48-52.
- [51]Weber M, Hartl R, Zäh M F, et al. Dynamic Pose Tracking Accuracy Improvement via Fusing HTC Vive Trackers and Inertia Measurement Units[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2023, 24(9): 1661-1674.
- [52]Arikawa K. Analysis of Instantaneous Kinematic Properties Regarding the Shape of Robotic Mechanisms[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2024, 16(12): 121013.
- [53]Serafin J, Grisetti G. NICP: Dense normal based point cloud registration[C]// 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg: IEEE, 2015: 742-749.
- [54]冯慧娟, 苗青, 樊胜秋, 等.工业机器人机械结构模块化参数化设计[J]. 机床与液压, 2019, 47(21): 60-63.
- [55]Tejomurtula S, Kak S. Inverse kinematics in robotics using neural networks[J]. Information sciences, 1999, 116(2-4): 147-164.
- [56]Boby R A, Klimchik A. Combination of geometric and parametric approaches for kinematic identification of an industrial robot[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 71: 102142.
- [57]Colomé A, Torras C. Closed-loop inverse kinematics for redundant robots: Comparative assessment and two enhancements[J]. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, 2014, 20(2): 944-955.
- [58]王战中, 杨长建, 刘超颖, 等. MATLAB 环境下六自由度焊接机器人运动学逆解及优化[J]. 机械设计与制造, 2013(7): 182-184.
- [59]周国义, 谢明红, 孙友生, 等. 6 自由度解耦机器人运动学逆解优化的研究[J]. 机电产品开发与创新, 2009, 22(5): 21-23
- [60]李吉锋. 基于 3DS MAX 及 UNITY 3D 的虚拟校园系统的设计与实现[D]. 华侨大学, 2016.
- [61]林菲, 邹玲, 张聪. 基于混合层次包围盒的快速碰撞检测算法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(09): 454-457.

攻读硕士期间的主要成果

- [1] 程旭, 方明, 王俊龙, 等. 基于位姿追踪的喷涂机器人演示示教方法[J]. 安徽工程大学学报 (已录用)

致 谢

回首硕士求学生涯，一路走来，诸多温暖与力量交织，成就了今日的我。此刻，心中满是感恩，想要向那些给予我帮助与支持的人们表达敬意与谢意。

首先，要将最诚挚的感谢送给我的导师方明。从论文的选题构思，到大纲搭建，再到逐字逐句的斟酌修改，每一个环节都离不开您的悉心指导。您严谨的治学态度、渊博的专业知识以及高瞻远瞩的学术视野，为我指明了研究方向，在我迷茫困惑时，总能一语中的，让我豁然开朗。

同门王俊龙、侯亮亮在我的硕士生活中扮演着亦师亦友的角色。日常相处间，我们相互切磋学术难题，思维碰撞出的火花点燃了许多灵感，那些挑灯夜战、为一个实验数据反复讨论的日子，如今想来弥足珍贵。你们在我遭遇瓶颈时，笔无保留地分享经验，用陪伴与鼓励为我蓄力，让我得以跨越重重难关。

学弟马申奥、张普杰的出现，给我的科研旅程平添不少活力与乐趣。你们对新事物的好奇与热情感染着我，让我时刻保持学习的敏锐度，不至于在学术浪潮中迷失。你们协助我处理一些基础的实验工作，凭借敏锐的洞察力提出不少独到见解，为我攻克论文难关出谋划策，这份后辈情谊我将倍加珍视。

埃夫特智能机器人股份有限公司，你们为我的研究提供了坚实的实践基础。在与公司团队交流合作的日子，我接触到行业前沿的技术与理念，熟悉了实际生产环境中的种种挑战与需求。你们开放的资源、专业的支持，让我得以将理论知识与实践紧密结合，使论文成果更具现实意义与应用价值。

感谢家人长期以来的默默付出，你们的理解与包容是我最坚实的后盾;感谢朋友的陪伴与鼓励，那些欢声笑语缓解了我学业的诸多压力;还要感谢学校给予的优质学术平台，让我的梦想得以在这里生根发芽。

未来之路已然开启，我知晓科研之路荆棘密布，但过往的经历赋予我勇气与力量。愿以感恩之心为灯，照亮前路;以所学为笔，书写新篇，不负众望，砥砺前行。

尚德敏学 唯实惟新

