

面向制造现场的工业机器人精度维护 方法研究

Research on Accuracy Maintenance Method for Industrial Robot in Manufacturing Field

学科专业：仪器科学与技术

研 究 生：张楠楠

指导教师：郝继贵 教授

天津大学精密仪器与光电子工程学院

二零一七年十二月

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：张楠楠

签字日期：2017 年 12 月 7 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：张楠楠

导师签名：刘继贵

签字日期：2017 年 12 月 7 日

签字日期：2017 年 12 月 7 日

摘要

工业机器人是高柔性多关节运动平台，已广泛应用于汽车制造过程中焊接、搬运、检测等多个生产环节。但作为一种开环式运动系统，工业机器人重复定位精度容易受到自身因素和环境因素的影响。如在制造现场，工业机器人连续高速运动将导致机器人本体发热，运动学模型参数将会发生缓慢漂移；另外，机器人末端工具的切换以及加工过程中工具与工件发生碰撞会导致工具坐标系位置偏移，影响机器人加工质量。这些因素制约了工业机器人在电子、机车、航空、船舶等高精度智能制造领域的应用和发展。只有解决工业机器人长期重复定位精度问题，才能拓宽工业机器人的应用领域，使其在现代制造向智能制造转变过程中发挥越来越重要的作用。

论文针对机器人温度漂移和末端工具位置偏移两种典型精度维护问题进行研究，并分别提出可应用于制造现场的解决方案。机器人实际工作过程中，两种精度补偿工作交替进行，可达到机器人运动精度实时在线维护的目的。本文的主要研究内容如下：

1.从机器人运动学模型、空间坐标系转换等基础理论入手，深入分析机器人运动学模型建立过程和工业机器人末端工具坐标系的建立过程；分析和总结机器人运动学参数模型和 TCF 坐标系对工业机器人精度维护的影响。

2.分析机器人温度分布特点及温度对运动学参数的影响规律，提出一套完整的补偿参数筛选流程，可筛选出受温度变化影响较大的参数；设计适用于温度误差补偿的视觉测量系统并完成标定，补偿过程满足现场生产节拍要求。

3.研究 TCP 快速自动校准需求和方法，提出一种新的激光测量法，推导工具坐标系建立算法，设计工业机器人运动轨迹，用于工具坐标系快速校准；最后，针对该系统进行系统参数误差分析并设计严格的系统标定流程。

4.对温度误差补偿方法和工具坐标系快速标定方法进行实验验证。针对两部分内容搭建实验系统，通过实验数据分析方法的有效性，并针对实验结果提出进一步的改进方案。

关键词：工业机器人，精度维护，温度误差补偿，工具坐标系标定

ABSTRACT

Industrial robot, as a highly flexible multi-joint motion platform, has been widely used in the process of the automobile manufacture such as welding, handling and detection. However, industrial robot is also an open-loop motion system, whose kinematic accuracy is easily affected by its own factors and environmental factors. For example, at the manufacturing site, the continuous high-speed movement of the industrial robot will cause the robot heating up, so that the kinematic model parameters will drift slowly. In addition, both of the change of the ending tool and the collision between the tool and the workpiece during manufacturing will result in position and orientation error of tool control frame, affecting the processing quality of the robot. Only solving the problem of industrial robot's long-term repeatability can broaden its application field and make it playing an increasingly important role in the transition process from the traditional manufacturing to the advanced intelligent manufacturing.

This paper studies two typical precision maintenance problems of the robot temperature drift and the ending tool position error, and puts forward the solutions that can be applied to the manufacturing site respectively. In the process of robot working, these two accuracy compensation methods are performed alternately, which can achieve the purposes of real-time online accuracy maintenance for industrial robot. In this paper, the study reads as follows:

1. Based on basic theories of robot kinematics model and spatial coordinate system transformations, the establishment process of robot kinematics model and the ending tool coordinate system is analyzed. The effects of kinematics parameters model and TCF coordinate system on accuracy maintenance for industrial robot are analyzed and summarized.

2. After analyzing the reason for the temperature change of the robot and varying pattern of the kinematics parameters affected by the temperature, a complete set of compensation parameters selection process is proposed, which can filter out parameters that are obviously affected by the temperature. A vision measurement system suitable for the thermal error compensation is designed and calibrated. The

consuming time of this compensation process can perfectly meet the requirements of the production cycle.

3. In this paper, methods of quick automatic calibration for TCP are researched. Then a cross-cutting laser measurement method is proposed and a algorithm of establishing a tool control frame is derived. The trajectory of industrial robot is designed and used for rapid calibration of tool control frame. Finally, the parameters error analysis for the system is carried out and a strict system calibration process is designed.

4. Some experiments are performed to verify the methods of thermal error compensation and TCF rapid calibration. Experimental platforms are established for each part of the research about the accuracy maintenance for the robot. The validity of the methods is verified by analyzing experimental data, and some further improvements are proposed according to the experimental results.

KEY WORDS: industrial robot, accuracy maintenance, thermal error compensation, TCF calibration

目 录

摘要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.2 问题描述与分析	2
1.3 国内外研究现状	3
1.3.1 温度误差补偿方法	3
1.3.2 TCF 和 TCP 标定方法	4
1.4 论文章节安排	5
第 2 章 工业机器人正向运动学模型	9
2.1 坐标系及坐标系转换原则	9
2.2 机器人运动学模型	13
2.2.1 DH 模型	13
2.2.2 机器人 DH 模型建立实例	15
2.2.3 MDH 模型	18
2.3 机器人 TCF 坐标系和 TCP 建立过程	20
2.4 运动学模型参数和 TCF 坐标系对精度维护的影响	21
2.5 本章小结	22
第 3 章 温度误差补偿方法	23
3.1 温度误差补偿方法	23
3.2 补偿参数选择方法	26
3.3 系统标定	29
3.4 本章小结	31
第 4 章 TCF 自动校准方法	33
4.1 TCP 校准方法	33
4.1.1 七点法测量原理	33
4.1.2 平行激光法测量原理	35
4.2 TCF 快速自动校准方法	37
4.2.1 TCF 快速自动校准测量基本原理	37
4.2.2 新 TCF 建立算法	39

4.3 测量系统标定与误差分析	43
4.3.1 TCF 快速自动校准传感器坐标系标定	43
4.3.2 β 角的定义和新的坐标系转换公式	46
4.4 本章小结	48
第 5 章 精度维护实验验证	51
5.1 温度补偿实验	51
5.1.1 实验系统搭建及系统标定结果	51
5.1.2 参数筛选结果	53
5.1.3 实验数据及分析	55
5.2 TCF 自动校准实验	56
5.2.1 实验平台搭建	56
5.2.2 TCP 快速自动校准系统标定	57
5.2.3 TCP 快速校准测量系统修正结果及分析	59
5.3 本章小结	61
第 6 章 总结与展望	63
6.1 全文总结	63
6.2 工作展望	64
参考文献	65
参加科研情况说明	69
致 谢	71

第1章 绪论

1.1 课题背景

近年来，制造业正朝着自动化、智能化方向高速发展，随着现代信息技术不断提高，多样化的生产服务需求日益增长，全球各工业大国纷纷提出了将物联网和智能服务引入制造业的战略需求，其中以德国政府提出的“工业 4.0”为典型代表。中国政府也紧随其后，于 2015 年 3 月正式提出“中国制造 2025”的宏伟计划^[1-2]。

工业机器人在“工业 4.0”战略布局中属于硬件技术支撑，能起到连接下层基础设施和承载上层技术的重要作用^[3]。世界上第一台工业机器人诞生在上世纪五十年代末，自此以来工业机器人得到了长足的发展，是未来实现智能制造的主要载体，对国计民生各个领域的建设和发展都起到了关键作用^[4]。目前全球知名的工业机器人公司主要集中在欧洲、日本和美国等国家和地区。我国工业机器人研究起始于上世纪 70 年代初，经过近 40 年的发展，培育了如沈阳新松机器人自动化有限公司、哈尔滨博实自动化股份有限公司、南京埃斯顿自动化有限公司等具有代表性的机器人企业^[5-8]。

工业机器人是一种多关节柔性运动平台，具有灵活性好、重复定位精度高等优点，能够完成如焊接、搬运、装配等重复性高的工作，在汽车制造领域具有广泛的应用。此外，工业机器人开始在机械加工领域发挥越来越重要的作用，如对石材、木材、大型曲面工件进行加工，不但能克服手工加工周期长、效率低的困难，相比于数控加工中心、FMC 等加工设备，工业机器人具有更高的灵活性，因而可以降低生产成本，适应多样化、小批量的现代加工需求^[9-11]。工业机器人正在从单一的重复性作业平台向满足个性化制造需求的加工设备转化。

然而，工业机器人的多关节串联铰接结构导致其绝对定位精度较低、重复定位精度的长期稳定性较差。如何提高机器人长期重复定位精度，关系到机器人作为加工系统的应用程度。目前，已经可以通过机器人本体误差标定的方法提高机器人绝对定位精度，保证机器人在短时间内的定位精度。但是，在长时间运行过程中，环境和机器人自身都会发生变化，如长期运动过程中的关节磨损、温度变化导致机器人本体热胀冷缩或变形、机器人末端工具磨损、末端工具因碰撞发生位姿改变等等。因此即使通过机器人本体标定，使其绝对定位精度提升，但在实

际工作过程中机器人结构参数依然会改变，机器人运动轨迹将偏离规划轨迹，加工质量将无法保证。因此需要研究机器人在线精度维护方法。

1.2 问题描述与分析

工业机器人一个重要特性是重复定位精度高而绝对定位精度低，机器人重复定位精度衡量了机器人末端坐标系准确到达示教位置和姿态的能力，而绝对定位精度反映了机器人末端坐标系到达未示教位置和姿态的能力。以 KUKA 机器人为例，其重复定位精度通常可达到 $\pm 0.05\text{mm}$ ，但绝对定位精度一般只能达到 $2\sim 3\text{mm}$ ^[12-14]。为避免绝对定位精度较低的情况，目前工业制造现场的多数机器人采用示教再现的工作方式，对于焊接、涂胶、喷涂、搬运等重复性任务，工业机器人较高的重复定位精度能够保证其完成这些任务。

不同于传统定义的绝对定位精度和重复定位精度，在长期工作过程中，机器人末端位姿表现出重复定位位姿发生缓慢漂移的情况，论文将这种现象定义为机器人的长期重复定位精度。机器人重复定位精度的长期稳定性难以保证，导致其运动轨迹偏离示教轨迹，限制其在精度要求较高的生产任务中的使用。导致机器人长期重复定位精度下降的原因主要有以下两个方面：

（1）温度效应引起的机器人工具中心位置漂移。

工业机器人作为一种自动化平台，工作环境通常恶劣、多变，即使机器人在开始工作前已经进行几何误差标定和柔性误差建模，但在高速运行过程中，机器人各关节电机发热和各转动关节相互摩擦仍会导致机械臂温度升高。而机械臂的温度变化将引起机器人杆件和关节膨胀变形，工业机器人长期处于发热-稳定-冷却的热循环中，使机器人连杆参数不断发生改变，这将直接影响机器人运动学模型准确性，从而引起明显的工具尖端位置漂移，运动轨迹的长期稳定性很难保证。以臂展为 3100mm 的工业机器人为例，在 3 小时连续高速运动后，测量其末端 TCP（tool center point）位置漂移可达到 0.5mm。由于机器人发热部位主要集中在电机和机器人关节部分，几乎不会影响到末端工具相对于末端法兰坐标系的位姿，因此可判定末端 TCP 位置是跟随机器人末端法兰中心位置变化而变化的。

（2）碰撞导致机器人末端工具位姿改变。

工业机器人经常应用于如打磨、涂胶、弧焊等需要与被加工工件连续接触的场所，如果被加工工件位置发生轻微变化，机器人末端工具将与工件发生碰撞，导致机器人末端 TCP 的轨迹偏离示教轨迹，后续工件的加工质量将不合格。比如，机器人涂胶在现代汽车制造中已大量使用，在生产线上经常发生由于工件位置不一致导致胶枪与被涂工件发生轻微碰撞，后续涂胶质量严重不符要求的情

况。机器人工具发生碰撞后，再次运行示教轨迹，虽然机器人本体重复相同的动作，但 TCP 将偏离所示教的轨迹。此时将末端工具修正到之前标定的位置无疑是十分困难的，因此需要重新标定末端工具的位姿。另外，在某些工业制造场合，一台机器人承担多个作业任务，机器人需要更换末端工具或改变末端工具的状态，此时需要重新标定工具坐标系相对于机器人末端法兰坐标系的位姿。工具坐标系标定是机器人使用过程中需要经常进行的工作，因此，研究一种快速、准确、自动化程度高的工具坐标系标定技术对机器人的精度维护意义重大。

上述问题的解决过程中存在诸多难点，所提出的解决方案不但要满足精度方面的需求，还要满足时间方面的要求。工业机器人工作在制造现场，流水线生产节拍十分快速，任何需要离线维护的技术都将降低生产效率，以上汽通用汽车生产速度为例，平均每小时就有 65 辆车下线，但即使这样仍然赶不上订单的增长速度^[15]，因此机器人精度维护需要在线完成。同时机器人相互配合协同作业，机器人温度误差补偿和 TCP 位姿标定的工作能且只能在机器人有限的作业间隙时间内完成，因此精度维护方案需要能在数秒内完成测量和计算，从而维护机器人长时间范围内的整体运动精度。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 温度误差补偿方法

为提高绝对定位精度，国内外针对机器人标定和补偿方法做过大量研究。Roth 等人^[16]将机器人的标定方法大致分成三个层级：第一个层级为关节标定，目的是为了确定各个关节转角实际转过角度与控制器中输出值之间的对应关系；第二个层级为运动模型标定，目的是为了确定机器人基本的运动学几何参数；第三个层级为非运动学标定，导致末端执行器位置误差的主要因素有关节柔性误差、关节摩擦、关节间隙、机器人热效应等等。除此之外，早期的机器人标定方法研究主要集中在第二个层级，即机器人运动模型的标定，如 Hollerbach 等人^[17]关于机器人运动学模型标定的研究和 Mooring 等人^[18]关于机器人标定模型、标定技术、参数辨识和应用等方面的研究。实验证明，机器人标定后的绝对定位精度有明显改善，甚至可接近其重复定位精度^[19]。

近年来越来越多的研究人员开始关注第三个层级标定，即非运动学误差的识别和补偿方法。Heisel 等人^[20]设计了标准化的实验装置并研究了不同类型机器人的热性能，针对热效应引起的误差提出了补偿建议；Chunhe Gong 等人^[21]重点研究了机器人柔性误差和温度误差等非几何误差，提出了关于几何误差、柔性误

差和温度误差综合补偿的方法,其中机器人参数的温度误差通过机器人不断发热-冷却的工作过程中获取标定数据,使用正交回归分析法建立温度与参数误差之间的模型关系;Lertpiriyasuwat 等人^[22]利用卡尔曼滤波建立了自适应的温度误差估计和补偿模型,首先根据经验构建机器人运动学偏差查表模型,然后将末端执行器上某一固定点的实时测量值送入卡尔曼滤波器,不断更新偏差查表模型;Jorge Santolaria 等人^[23]根据温度传感器不同温度下测定的温度误差统计数据,建立了温度与参数误差之间的经验模型,优点在于温度补偿后仍然可以使用其他的几何误差或者非几何误差补偿模型;王一等人^[24]将基准球安装于工业机器人可工作范围内,通过测量基准球坐标变化对温度效应进行补偿,通过分析机器人运动学模型中参数对坐标的影响,确定受温度影响较大的部分参数进行辨识和补偿,该方法适用于机器人末端携带视觉测头的测量机器人;Rui Li 等人^[25]利用有限元分析建立机器人热传导模型,根据温度改变后主要的误差方向和有限元分析手段判断对误差产生起主要作用的参数。

1.3.2 TCF 和 TCP 标定方法

在实际应用中,标定工业机器人工具坐标系(Tool Control Frame, TCF)相对于末端法兰坐标系的位姿对机器人加工和检测十分重要,尤其是在精密加工制造应用场景中,需要严格标定 TCF 或 TCP 的准确位姿。

朴永杰等人^[26]利用机器人运动学模型和空间中点在坐标系之间的关系求解末端工具的位姿参数,在该方法中利用标准件确定参考坐标系,再用末端工具进行拟合的方式进行工具坐标系的求解。类似的还有宋月娥等人^[27]的研究,标定标准件坐标系相对于机器人基坐标系的转换关系,然后调整 TCP 与标准件坐标系原点重合,将工具姿态调整至适合的角度即可,定义此时工具坐标系与标准件重合,该方法方便准确,不需要重复执行工具参数标定过程。赵娇娇等人^[28-29]采用了七点法对机器人末端工具坐标系进行了标定,这种方法适用于任何工具坐标系可见的工具,机器人的定位精度达到 $\pm 0.5\text{mm}$ 。该方法中前四点用于标定 TCP 的位置,对于只要求标定 TCP 位置的作业任务到此可结束,而后三点用于标定工具的姿态,整个过程都需要人工干预。周祥^[30]提出了基于相机空间操作的工具坐标系标定方法,与手动示教方法不同的是该方法通过双目相机采集工具表面的标志点使工具中心点与固定参考点重合,从而达到 TCP 与参考点对准的目的;刘常杰等人^[31]也使用双目立体视觉对工具末端标记点进行测量,但抛弃了传统方法中与参考点的对齐的方法,直接标定双目传感器坐标系到机器人基坐标系的转换关系,从而对 TCP 点进行测量和计算,测量过程只需要几分钟即可完成。

此外，早在在上个世纪九十年代，由于焊接机器人的大量使用，对 TCP 点的自动化标定需求就显现出来，Henry F.Thorne 就发明了一种快速且精确的工具坐标系自动测量装置。随后不久 ABB 公司利用类似的原理推出了一款著名的 TCP 标定产品——BullsEye，如图 1-1 所示。这款标定系统利用单激光线条测量末端工具的边缘位置来计算其位姿信息，其测量精度依赖于机器人的高重复定位精度。这种测量方法只需要占用机器人的一个输入口，简单实用，因此在工具坐标系标定领域具有广泛的应用。后来 Paananen^[32]对该测量装置进行了改进，利用双激光线条替代单激光线条，测量效率提升为原来的二倍。



图 1-1 ABB 公司 TCP 标定产品 BullsEye

1.4 论文章节安排

论文从维护制造现场工业机器人精度长期稳定性的角度出发，分析了长时间、高速度、重复度较高的工作状态对机器人作业精度造成的影响，总结出造成机器人精度变差的两大关键因素：内部温度变化引起的机器人运动学模型参数漂移和 TCF 相对于机器人末端法兰坐标系的位姿改变。后文将针对各个相对独立的影响因素提出相应解决方案并搭建实验系统进行实验验证。为适应工作现场快速的生产节拍和分工各异的工业机器人精度维护要求，提出的解决方案需要拥有通用、快捷的维护特性，在日趋精密的加工制造和工业检测等领域满足生产需求，从而强化工业机器人生产过程中精度高、重复性好、适合大批量生产的优势地位。

对于在工作过程中工具相对于末端法兰的位姿不容易产生改变的机器人，如携带非接触测头的测量机器人，需要进行在线温度误差补偿，调整机器人运动学参数，从而计算出 TCF 受温度影响产生的轨迹变化。对于在工作过程中工具相对于末端法兰的位姿容易发生变化的机器人，如焊接机器人，除定期对机器人运

动力学模型进行温度误差补偿外，还需要定期对 TCF 位姿进行重新标定。课题研究思路如图 1-2 所示。

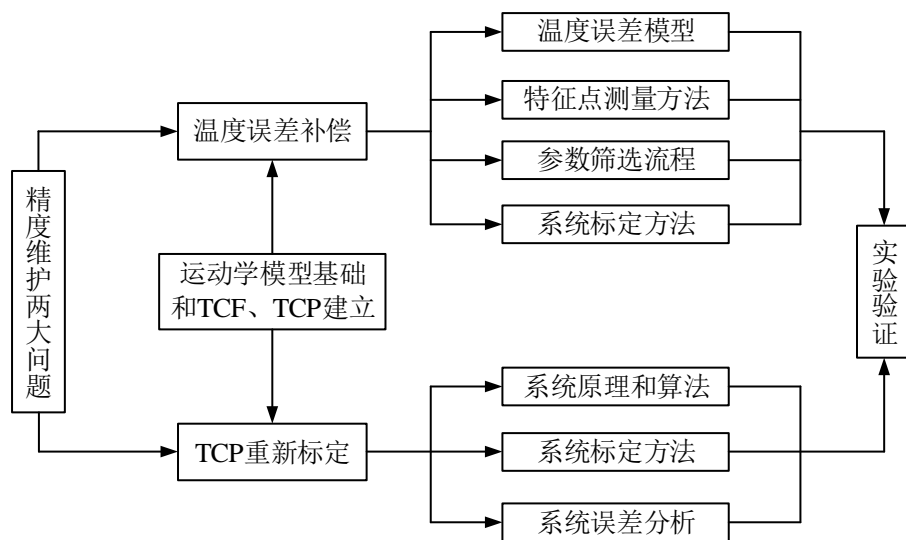


图 1-2 本文研究思路

论文的章节内容概况如下：

第 1 章，绪论。介绍了以“工业 4.0”和“中国制造 2025”为代表的智能制造的发展浪潮下，工业机器人发挥的重要支柱作用及国内外的的发展过程和现状，分析了工业机器人在制造现场精度维护的需求和国内外研究现状，将制造现场工业机器人精度维护问题分解为相对独立的两个问题，并由此展开讨论，明确了课题的研究思路。

第 2 章，工业机器人运动学模型。介绍了机器人运动学模型及机器人运动方式和控制方法，明确机器人各个坐标系的建立准则，阐述了具体型号机器人各关节坐标系方向和运动学模型参数的推导方法，尤其是机器人法兰坐标系和机器人工具末端坐标系的建立方法，最后分析了运动学模型参数变化、机器人法兰坐标系和机器人工具末端坐标系的相对变化对精度维护的影响

第 3 章，温度误差补偿方法。首先研究了机器人自身发热对运动学模型的影响，基于微分运动学和第 2 章机器人正向运动学模型建立温度误差补偿模型；设计了温度误差补偿参数筛选流程，选出显著变化的参数；最后推导了温度误差测量系统的参数标定方法。

第 4 章，TCF 自动校准方法。在总结了较为成熟简单的 TCP 标定方法后，提出了一种十字交叉激光测量方法；介绍了十字交叉激光法的测量原理和步骤；探索十字交叉测量系统中影响测量精度的系统参数和系统误差，在安装该 TCF 校准系统之后，需要对系统进行细致的系统标定以减小测量误差。

第 5 章，精度维护实验验证。在第 3 章和第 4 章系统设计的基础上，搭建相应的实验平台，实验分为两部分，温度误差补偿实验和 TCF 校准实验。温度误差补偿实验根据温度漂移实验数据进行补偿参数筛选和补偿结果分析；TCF 快速自动校准实验对系统参数进行标定，通过实验数据验证系统达到的精度。

第 6 章，总结与展望。针对本文提出的方法及实验结果进行总结，对未来可能的研究方法和制造现场机器人精度维护发展方向进行展望。

第2章 工业机器人正向运动学模型

机器人正向运动学模型解释了如何通过控制器输入各个关节角度信息控制机器人末端执行器的位置和姿态，它是机器人运动的基础，是分析温度误差来源与长期定位精度的根本。机器人末端执行器相对于机器人基础坐标系的位姿转换关系 T 需要通过机器人的几何结构参数 q 和关节转动变量 θ 进行计算，这就是机器人的正向运动学模型，其数学表达式为：

$$T = f(q, \theta) \quad (2-1)$$

机器人正向运动模型不仅是精度维护过程中温度误差补偿模型推导的基础，而且在 TCF 自动校准方法中也发挥基础作用。

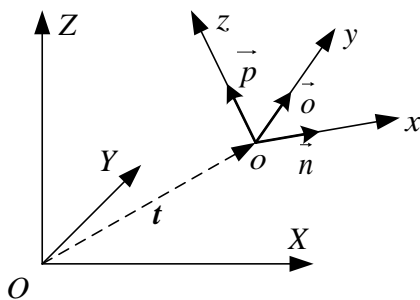
2.1 坐标系及坐标系转换原则

在研究机器人运动学模型和机器人加工、检测时，经常会遇到坐标及坐标系转换的概念。如两个坐标系之间的旋转矩阵和平移矩阵如何得到；什么是齐次变换矩阵；一个坐标系经过一系列变换得到另外一个坐标系时，变换矩阵应该依次左乘还是右乘，两者有何区别；同一点在两个坐标系中的坐标应该如何转换。本节不过多探讨线性代数中的理论知识，而是更加偏重实际应用中的结论，以及规定某些概念对应的实际物理意义。论文其他章节将遵循这一节中的规定。

首先给出一个结论性结果^[33]，如图 2-1 所示，有两个坐标系 $OXYZ$ 和 $oxyz$ ，其中 $oxyz$ 坐标原点 o 在坐标系 $OXYZ$ 中的坐标向量为 $t = (t_x, t_y, t_z)^T$ ， x 轴、 y 轴和 z 轴正方向的单位向量 \vec{n} 、 \vec{o} 、 \vec{p} 在坐标系 $OXYZ$ 中的坐标分别为 $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)^T$ 、 $\vec{o} = (o_x, o_y, o_z)^T$ 和 $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)^T$ ，则坐标系 $OXYZ$ 到坐标系 $oxyz$ 的齐次变换矩阵 T 为：

$$T = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & p_x & t_x \\ n_y & o_y & p_y & t_y \\ n_z & o_z & p_z & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

其中 $\mathbf{R} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为旋转子矩阵， \mathbf{t} 为平移子矩阵， $\mathbf{0} = [0 \ 0 \ 0]$ ，下同。需要注意，“到”这个字具有方向指向性，式(2-2)严格对应“坐标系 $OXYZ$ 到坐标系 $oxyz$ 的齐次变换矩阵”；有些参考文献中会使用“坐标系 $OXYZ$ 和坐标系 $oxyz$ 之间的变换矩阵”的表述，其含义则应视上下文而定。

图 2-1 坐标系 $OXYZ$ 到坐标系 $oxyz$ 的变换

空间一点 P 在坐标系 $OXYZ$ 和坐标系 $oxyz$ 中的坐标分别为 (X, Y, Z) 和 (x, y, z) ，则两个坐标的转换关系为：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & p_x & t_x \\ n_y & o_y & p_y & t_y \\ n_z & o_z & p_z & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

针对式(2-3)举一个特殊的例子：令 $\mathbf{t} = (0, 0, 0)^T$ ，即原点 O 与原点 o 重合；点 P 在坐标系 $oxyz$ 中的坐标为 $(1, 0, 0)$ ，该位置恰好是 x 轴单位向量 \vec{n} 的终点。将 $\mathbf{t} = (0, 0, 0)^T$ 和 $(1, 0, 0)$ 带入式(2-3)中将得到 P 在坐标系 $OXYZ$ 中的坐标 (X, Y, Z) 为：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & p_x & 0 \\ n_y & o_y & p_y & 0 \\ n_z & o_z & p_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

(X, Y, Z) 的结果恰好为单位向量 \vec{n} 在坐标系 $OXYZ$ 中坐标。

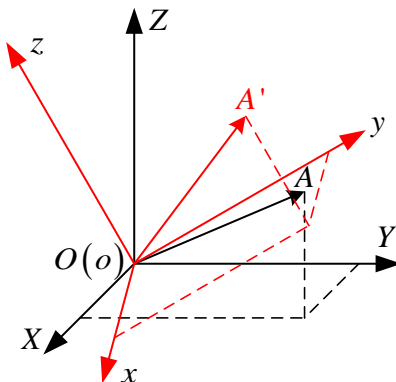
式(2-3)为空间某一固定点在两个坐标系下对应的两个坐标之间的转换关系，利用该式可以推导向量随坐标系旋转前后两个位置在转动前坐标系 $OXYZ$ 中两个坐标之间的转换关系，具体描述和分析如下：

考虑坐标系 $OXYZ$ 中任意向量 \vec{OA} ，向量 \vec{OA} 随坐标系旋转而旋转，当坐标系旋转至坐标系 $oxyz$ 时，向量 \vec{OA} 旋转至 $\vec{OA'}$ ，如图 2-2 所示。点 A 在坐标系 $OXYZ$ 中的坐标 (X_A, Y_A, Z_A) 即为向量 \vec{OA} 在坐标系 $OXYZ$ 中的坐标，点 A' 在坐标系 $oxyz$ 中的坐标 $(x_{A'}, y_{A'}, z_{A'})$ 即为向量 $\vec{OA'}$ 在坐标系 $oxyz$ 中的坐标，由于向量随坐标系转动，易得：

$$(X_A, Y_A, Z_A) = (x_{A'}, y_{A'}, z_{A'}) \quad (2-5)$$

而点 A' 在坐标系 $OXYZ$ 中的坐标 $(X_{A'}, Y_{A'}, Z_{A'})$ 可通过式(2-3)得到，再结合式(2-5)可得：

$$\begin{bmatrix} X_{A'} \\ Y_{A'} \\ Z_{A'} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} x_{A'} \\ y_{A'} \\ z_{A'} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} \quad (2-6)$$


 图 2-2 向量随坐标系转动前后在转动前坐标系 $OXYZ$ 中的坐标变换

式(2-6)即为 \overline{OA} 和 $\overline{OA'}$ 在旋转前坐标系 $OXYZ$ 中坐标变换公式。

下面介绍坐标系绕坐标轴进行单一步骤旋转的坐标转换^[34]。

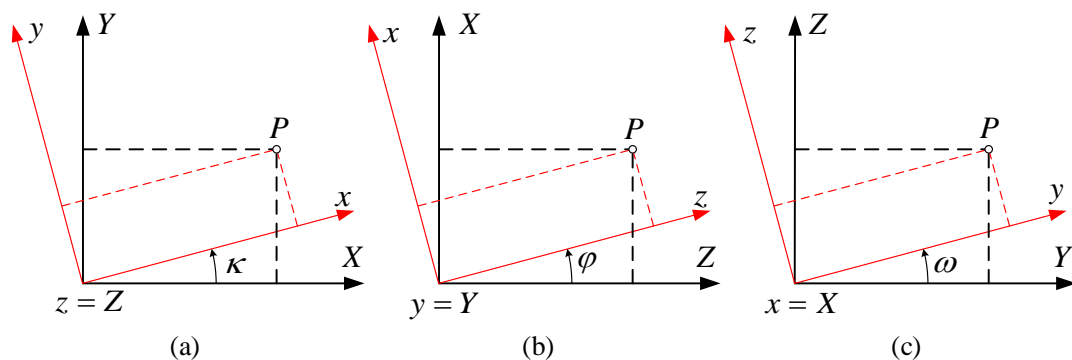
如图 2-3(a)图所示,坐标系 $OXYZ$ 绕自身 Z 轴逆时针(右手定则,逆时针为正)旋角度 κ ,得到坐标系 $oxyz$, z 轴与 Z 轴重合,点 P 在坐标系 $OXYZ$ 和坐标系 $oxyz$ 中的坐标分别为 (X, Y, Z) 和 (x, y, z) , 其转换关系为:

$$\begin{cases} X = x \cdot \cos \kappa - y \cdot \sin \kappa \\ Y = x \cdot \sin \kappa + y \cdot \cos \kappa \\ Z = z \end{cases} \quad (2-7)$$

式(2-7)的旋转矩阵形式为:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\kappa \cdot \mathbf{x} \quad (2-8)$$

其中 \mathbf{R}_κ 每一列仍然对应坐标系 $oxyz$ 各坐标轴单位向量,与式(2-3)相符。


 图 2-3 坐标系 $OXYZ$ 绕单一轴旋转得到坐标系 $oxyz$

类似的, 根据图 2-3(b)图和(c)图可分别得到绕 Y 轴和 X 轴旋转的旋转矩阵 \mathbf{R}_φ 和 \mathbf{R}_ω 为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{x} \quad (2-9)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{x} \quad (2-10)$$

最后根据式(2-2)以及式(2-8)~(2-10)可推导连续旋转过程中旋转矩阵 \mathbf{R}_κ 、 \mathbf{R}_φ 和 \mathbf{R}_ω 左乘和右乘的试用情况。

在连续三次旋转过程中, 旋转所围绕的轴有两种情况:

(1) 第一种情况为始终绕最初的坐标系 $OXYZ$ 的坐标轴旋转, 顺序依次是绕 Z 轴、 Y 轴、 X 轴进行旋转, 旋转角度依次为 κ 、 φ 、 ω , 旋转得到的坐标系依次为 $o_1x_1y_1z_1$ 、 $o_2x_2y_2z_2$ 、 $o_3x_3y_3z_3$, 由于没有平移, 原点 O 、 o_1 、 o_2 、 o_3 均重合, 最终确定坐标系 $o_3x_3y_3z_3$ 三个轴单位向量 \vec{n}_3 、 \vec{o}_3 、 \vec{p}_3 在坐标系 $OXYZ$ 下的坐标即可, 根据式(2-2)得到两坐标系 $OXYZ$ 到 $o_3x_3y_3z_3$ 的旋转子矩阵 \mathbf{R} 。分析过程如下:

首先转过角度 κ , 得到坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 的单位向量 \vec{n}_1 、 \vec{o}_1 、 \vec{p}_1 , 根据式(2-3)可得这三个向量终点在坐标系 $OXYZ$ 和 $o_1x_1y_1z_1$ 下的坐标关系为:

$$\begin{bmatrix} n_{1x} & o_{1x} & p_{1x} \\ n_{1y} & o_{1y} & p_{1y} \\ n_{1z} & o_{1z} & p_{1z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\kappa \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\kappa \quad (2-11)$$

然后再转过角度 φ , 得到坐标系 $o_2x_2y_2z_2$, 单位向量 \vec{n}_1 、 \vec{o}_1 、 \vec{p}_1 也跟着旋转变为单位向量 \vec{n}_2 、 \vec{o}_2 、 \vec{p}_2 , 根据向量坐标系转换公式(2-6)可得:

$$\begin{bmatrix} n_{2x} & o_{2x} & p_{2x} \\ n_{2y} & o_{2y} & p_{2y} \\ n_{2z} & o_{2z} & p_{2z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\varphi \cdot \begin{bmatrix} n_{1x} & o_{1x} & p_{1x} \\ n_{1y} & o_{1y} & p_{1y} \\ n_{1z} & o_{1z} & p_{1z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\kappa \quad (2-12)$$

同理, 最后转过角度 ω , 得到坐标系 $o_3x_3y_3z_3$, 单位向量 \vec{n}_2 、 \vec{o}_2 、 \vec{p}_2 跟着旋转变为单位向量 \vec{n}_3 、 \vec{o}_3 、 \vec{p}_3 , 在坐标系 $OXYZ$ 下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} n_{3x} & o_{3x} & p_{3x} \\ n_{3y} & o_{3y} & p_{3y} \\ n_{3z} & o_{3z} & p_{3z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\omega \cdot \begin{bmatrix} n_{2x} & o_{2x} & p_{2x} \\ n_{2y} & o_{2y} & p_{2y} \\ n_{2z} & o_{2z} & p_{2z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\kappa \quad (2-13)$$

因此坐标系 $OXYZ$ 到坐标系 $o_3x_3y_3z_3$ 的旋转矩阵 \mathbf{R} 为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} n_{3x} & o_{3x} & p_{3x} \\ n_{3y} & o_{3y} & p_{3y} \\ n_{3z} & o_{3z} & p_{3z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\kappa \quad (2-14)$$

因为该种情况下按照角度 κ 、 φ 、 ω 依次旋转，而对应的旋转矩阵依次左乘，因此记坐标系 $OXYZ$ 到坐标系 $o_3x_3y_3z_3$ 的旋转矩阵为 \mathbf{R}_{left} 。

(2) 第二种情况为始终绕新得到的坐标系的轴进行旋转：坐标系 $OXYZ$ 绕 Z 轴旋转角度 κ 得到坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ ， $z_1 = Z$ ；然后坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 绕 y_1 轴旋转角度 φ 得到坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ ， $y_2 = y_1$ ；最后坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ 绕 x_2 轴旋转角度 ω 得到坐标系 $o_3x_3y_3z_3$ ， $x_3 = x_2$ 。与第一种情况不同，此时坐标系 $OXYZ$ 到坐标系 $o_3x_3y_3z_3$ 的旋转矩阵为 $\mathbf{R}_{\text{right}} = \mathbf{R}_\kappa \cdot \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\omega$ ，分析过程如下：

空间一固定点 P 在上述四个坐标系中的坐标分别为 (X, Y, Z) 、 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 、 (x_3, y_3, z_3) 根据式(2-8)~(2-10)可得：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\kappa \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\kappa \cdot \mathbf{R}_\varphi \cdot \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\kappa \cdot \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\omega \cdot \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{\text{right}} \cdot \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

这两种情况中，如果角度 κ 、 φ 、 ω 对应相等，得到的旋转矩阵 \mathbf{R}_{left} 和 $\mathbf{R}_{\text{right}}$ 一般不等价。论文后续章节旋转矩阵均使用 $\mathbf{R}_{\text{right}}$ ，坐标系旋转情况为第二种情况。

2.2 机器人运动学模型

2.2.1 DH 模型

笛卡尔直角坐标系由三个两两相互垂直的轴构成： X 轴、 Y 轴和 Z 轴。因此一个笛卡尔直角坐标系有六个自由度，分别为沿 X 、 Y 、 Z 轴的平移自由度和绕 X 、 Y 、 Z 轴的旋转自由度。根据机器人学中的最小线性表示约定，直角坐标变换最少需要 4 个参数来描述^[35]。机器人运动学模型中大多为直角坐标系，而在众多的模型中，最早由 Denavit 和 Hartenberg 提出的 DH 模型^[36]目前应用也最为广泛，该 DH 模型就使用 4 个参数构成相邻坐标系转换矩阵：相邻连杆距离 d_i 、相邻连杆夹角 θ_i 、连杆长度 a_i 和关节扭角 α_i ，如图 2-4 所示，对于六自由度串联机器人 $i=1, 2, \dots, 6$ ，无特殊说明论文涉及到的机器人均为六关节机器人。

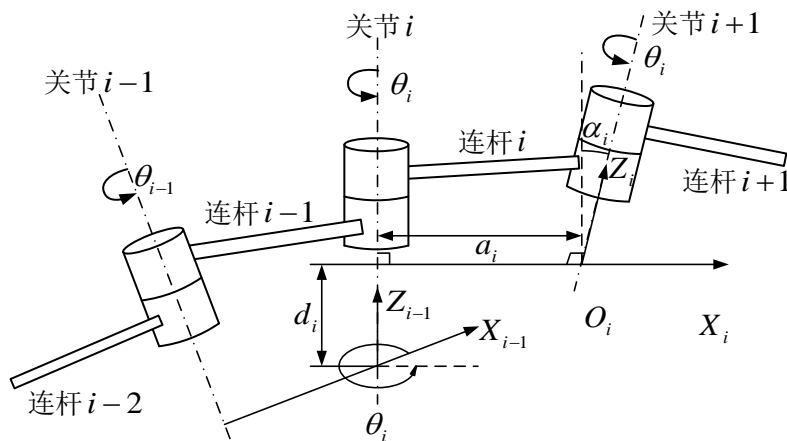


图 2-4 DH 模型参数及坐标系定义

如图 2-4 所示, 根据机器人初始状态建立各个关节 $i+1$ 处坐标系 $O_iX_iY_iZ_i$, 并确定模型参数值。首先介绍坐标系的建立方法:

(1) 以关节 $i+1$ 的轴线位置作为 Z_i 轴的位置, Z_i 轴正方向则根据机器人关节 $i+1$ 输入角度正负和实际机器人关节旋转方向确定;

(2) 根据机器人理想结构, 当 Z_{i-1} 轴和 Z_i 轴为异面直线时, 两者存在唯一公垂线, 此公垂线与 Z_i 轴的交点作为关节坐标系原点 O_i , 以 Z_{i-1} 与 Z_i 公垂线位置作为 X_i 轴位置, 该公垂线段即为连杆 i 的广义连杆, X_i 轴方向由 Z_{i-1} 轴指向 Z_i 轴; 当 Z_{i-1} 轴和 Z_i 轴平行时, 过 O_{i-1} 向 Z_i 轴做垂线, 垂足即为 O_i , 垂线即为 X_i 轴位置, X_i 轴方向由 Z_{i-1} 轴指向 Z_i 轴; 当 Z_{i-1} 轴和 Z_i 轴相交时, 交点即为 O_i , X_i 轴方向为 $X_i = \pm Z_{i-1} \times Z_i$, 正负根据需要确定, 一般让尽可能多的 X 轴方向一致。

(3) 根据右手定则确定 Y_i 轴的方向, 即 $Y_i = Z_i \times X_i$ 。

根据以上方法可建立各个关节坐标系, 得到坐标系 $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ 和 $O_iX_iY_iZ_i$ 后, 再确定模型几何参数值 (几何参数亦有正负之分) 和坐标系 $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ 到 $O_iX_iY_iZ_i$ 的转换关系:

(1) 将坐标系 $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ 沿 Z_{i-1} 轴移动, 使 X_{i-1} 轴与 X_i 轴所在直线相交或重合, 移动的距离即为广义连杆距离, 简称连杆距离 d_i , 沿 Z_{i-1} 轴正方向移动即为正, 沿 Z_{i-1} 轴负方向移动即为负;

(2) 继续将移动后的坐标系 $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ 绕 Z_{i-1} 轴旋转, 使 X_{i-1} 轴与 X_i 轴所在直线重合且正方向一致, 所转过的角度即为连杆夹角 θ_i , 绕 Z_{i-1} 轴逆时针旋转即为正, 绕 Z_{i-1} 轴顺时针旋转即为负;

(3) 继续将旋转后的坐标系 $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ 沿 X_i 轴 (或 X_{i-1} 轴) 移动, 使 X_{i-1} 轴与 X_i 轴完全重合, 移动距离即为连杆长度 a_i , 沿 X_i 轴正方向移动即为正, 沿 X_i 轴负方向移动即为负;

(4) 继续将移动后的坐标系 $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ 绕 X_i 轴 (或 X_{i-1} 轴) 旋转, 使 Z_{i-1} 轴与 Z_i 完全重合, 所转过的角度即为关节扭角 α_i , 绕 X_i 轴逆时针旋转即为正, 绕 X_i 轴顺时针旋转即为负;

上述坐标系 $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ 到 $O_iX_iY_iZ_i$ 的转换过程符合 2.1 节坐标系右乘情况, 因此可得相邻关节坐标系 $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ 到 $O_iX_iY_iZ_i$ 的齐次转换关系为:

$$\begin{aligned} T_i^{i-1} &= Trans(Z_{i-1}, d_i) * Rot(Z_{i-1}, \theta_i) * Trans(X_i, a_i) * Rot(X_i, \alpha_i) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-15)$$

对于串联结构机器人, 连杆距离 d_i 、连杆长度 a_i 和关节扭角 α_i 均取决于机器人本体结构, 在一定条件下可认为是常量。但连杆夹角 θ_i 则分为变量部分 θ_{in} 和常量部分 θ_{i0} , θ_{in} 可通过机器人控制器输入值来确定, θ_{i0} 只与机器人初始姿态相关, 三者关系为:

$$\theta_i = \theta_{in} + \theta_{i0} \quad (2-16)$$

下文 2.2.2 节模型参数确定针对的是常量部分 θ_{i0} 。

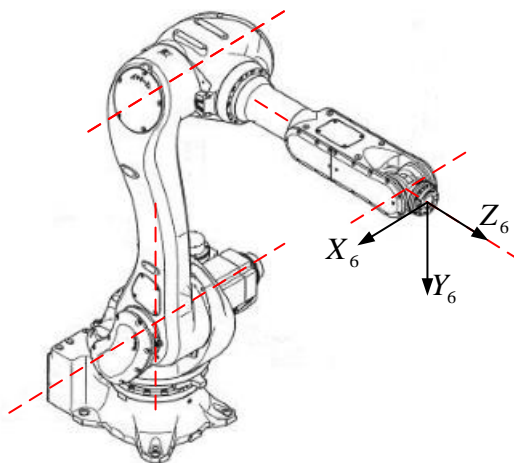
2.2.2 机器人 DH 模型建立实例

机器人第一个关节处的坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 即为机器人基坐标系 $O_bX_bY_bZ_b$, 其位姿相对于安装位置固定不变。以机器人末端法兰中心位置为原点建立坐标系 $O_6X_6Y_6Z_6$ (也表示为 $O_eX_eY_eZ_e$)。根据 DH 模型可建立坐标系 $O_bX_bY_bZ_b$ 到 $O_eX_eY_eZ_e$ 的变换关系:

$$T_e^b = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4 \cdot T_6^5 \quad (2-17)$$

式(2-17)即为机器人正向运动学模型, 需要逐一确定变换关系 T_1^0 至 T_6^5 中的 4 个参数, 因此 DH 模型共 24 个参数。下面以川崎 BX200L 机器人为例, 介绍如何确定各个坐标系坐标轴的方向和坐标系转换中的参数。

如图 2-4 所示为川崎 BX200L 机器人初始状态及六轴所在轴线方向, 坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0 \sim O_5X_5Y_5Z_5$ 的 Z 轴所在直线与虚线分别重合。根据数据手册可知坐标系 $O_6X_6Y_6Z_6$ 的方向如图 2-4 所示。接下来需要确定坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0 \sim O_5X_5Y_5Z_5$ 的 Z 轴和 X 轴的正方向以及 X 轴位置。

图 2-4 BX200L 机器人初始状态六关节轴线方向和坐标系 $O_6X_6Y_6Z_6$ 位姿

当控制器输入六轴角度为 $(90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 时，对应机器人姿态如图 2-5 所示，控制器输出末端法兰中心 O_6 坐标为 $(1675.749, -0.650, 1918.024)$ ，根据 O_6 坐标可确定 Z_0 轴向上， X_0 和 Y_0 轴方向也如图 2-5 所示。如此建立坐标系后，需要注意的是 1 轴输入角度为正 90° ，但机器人实际绕 Z_0 轴转了负 90° 。为了解决该矛盾，模型中 θ_1 的变量部分 θ_{1in} 应该取控制器中输入值的相反数。

图 2-5 BX200L 机器人 1 轴转过 90° 姿态

控制器输入六轴角度为 $(0^\circ, 42^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 时，对应机器人姿态如图 2-6 所示。根据该姿态和机器人初始状态对比，输入角度为正 42° ，利用右手定则可知 Z_1 轴正方向如图 2-6 所示；由于 Z_0 轴和 Z_1 轴不相交，所以 X_1 轴方向由 Z_0 轴指向 Z_1 轴，因此 X_1 轴正方向和位置如图 2-6 所示。若 Z_{i-1} 轴和 Z_i 轴相交，则 X_i 轴方向通过 $X_i = Z_i \times Z_{i-1}$ 确定方向。用此方法再依次确定坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 至坐标系 $O_5X_5Y_5Z_5$ 的 Z 轴和 X 轴方向和位置， Y 轴方向通过右手定则确定，结果如图 2-7 所示。

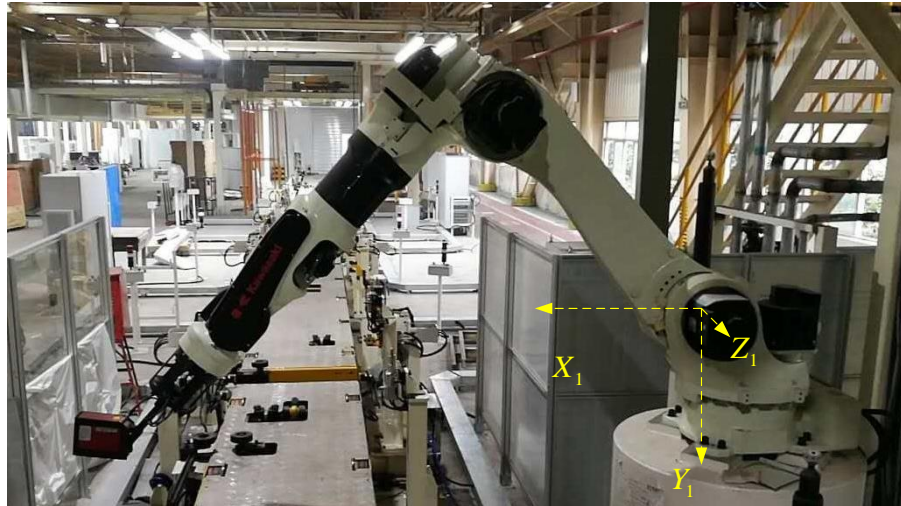
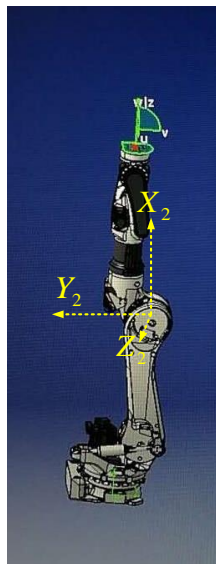
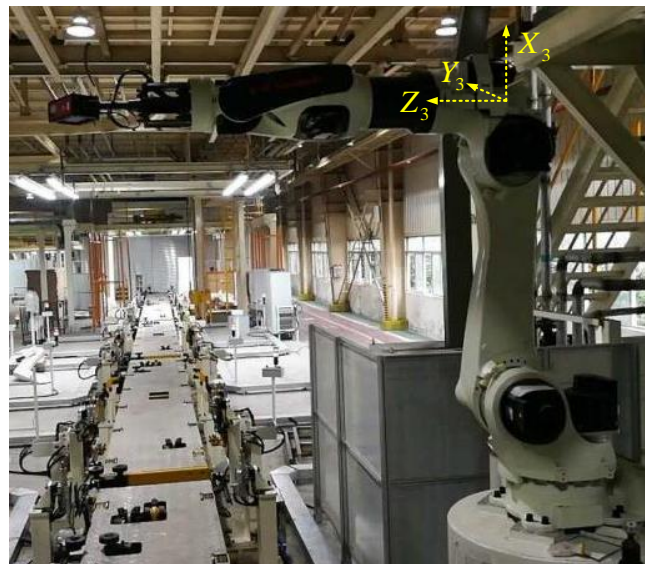


图 2-6 BX200L 机器人 2 轴转过 42° 姿态



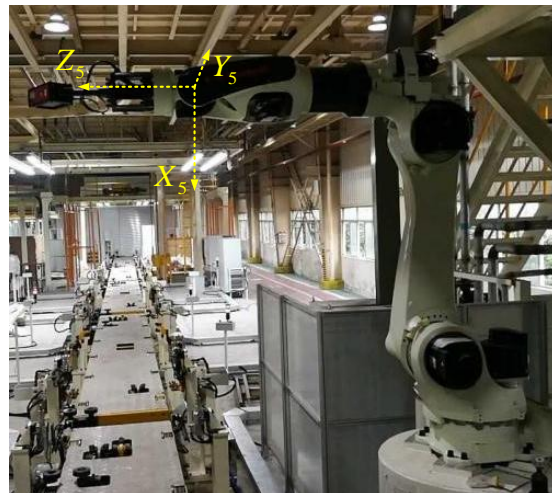
(a)



(b)



(c)



(d)

图 2-7 (a)~(d)分别为 BX200L 机器人 3~6 轴分别转过 90° 对应的姿态

因此可得 BX200L 机器人初始状态各个关节坐标系的状态,如图 2-8 所示,机器人本体用粗实线表示,结合该机器人数据手册中机器人的尺寸,即可得机器人 24 个参数,如表 2-1 所示。

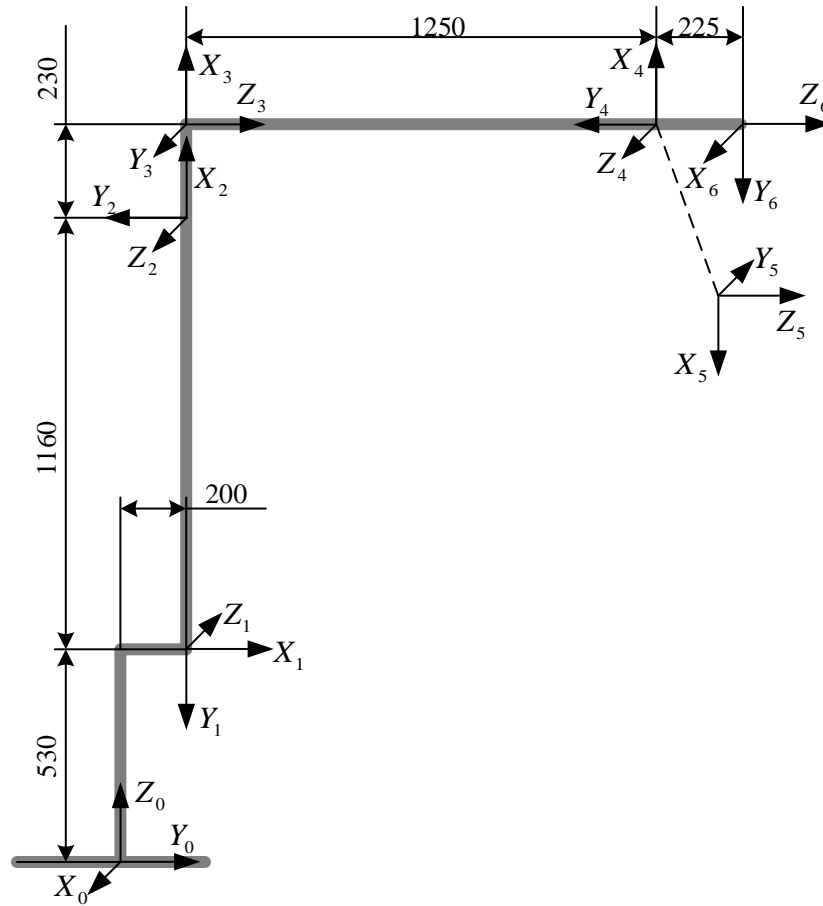


图 2-8 川崎 BX200L 机器人尺寸及初始状态坐标系位姿

表 2-1 川崎 BX200L 机器人 24 个参数

i	$d_i (mm)$	$\theta_{i0} (^\circ)$	$a_i (mm)$	$\alpha_i (^\circ)$
1	530	90	200	-90
2	0	-90	1160	180
3	0	0	230	90
4	1250	0	0	-90
5	0	180	0	-90
6	225	-90	0	0

2.2.3 MDH 模型

DH 模型参数少、建立过程简单,因此应用也最为广泛。通过 2.2.2 节 DH 模型建立过程可知,连杆距离 d_i 通过相邻关节坐标系位置和机器人几何参数确

定。当相邻关节轴线 Z_{i-1} 和 Z_i 平行时，连杆距离 d_i 为 0，如图 2-9 中坐标系 $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$ 与坐标系 $O_iX_iY_iZ_i$ 所示。但由于负载或者温度变化等原因，导致机器人结构发生微小变化，使得 Z_i 轴产生微小偏转，如图 2-9 中虚线所示，轴 Z_{i-1} 和 Z'_i 不再平行，它们的公垂线距离机器人本体偏离很远，如图 2-9 中公垂线所示，此时的连杆距离 d_i 和矩阵 T_i^{i-1} 接近无穷大，出现矩阵病态，新的坐标系 $O'_iX'_iY'_iZ'_i$ 位置与 $O_iX_iY_iZ_i$ 产生较大偏移，这种现象在参数识别时将导致 d_i 出现巨大变化。另外，关节扭角 α_i (平行状态下为 0) 也会受到一定程度的影响。

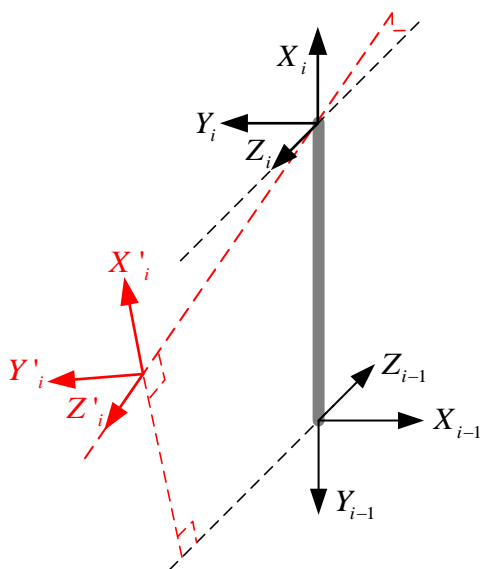


图 2-9 平行轴发生微小变化时对 d_i 的影响

为解决此类问题，许多研究学者提出了修正的 DH 模型——MDH (Modified Denavit-Hartenberg) 模型。论文采用了一种具有 5 种参数的 MDH 模型^[37]作为机器人的运动学模型，该模型只在原 DH 模型的基础上稍作修正。当相邻关节轴线 Z_{i-1} 和 Z_i 理论位置平行时，首先定义连杆距离 d_i 恒等于 0， O_i 位置为平面 $X_{i-1}O_{i-1}Y_{i-1}$ 与轴线 Z_i 的交点。通过引入绕 Y_i 轴的微小旋转量 β_i ，在 DH 模型相邻关节坐标系间的齐次转换关系的基础上再旋转一个微小量 β_i ：

$$\begin{aligned}
T_i^{i-1} &= Trans(Z_{i-1}, d_i) * Rot(Z_{i-1}, \theta_i) * Trans(X_i, a_i) * Rot(X_i, \alpha_i) * Rot(Y_i, \beta_i) \\
&= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta_i & 0 & s\beta_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\beta_i & 0 & c\beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} c\theta_i c\beta_i - s\alpha_i s\theta_i s\beta_i & -s\theta_i c\alpha_i & c\theta_i s\beta_i + s\alpha_i s\theta_i c\beta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i c\beta_i + s\alpha_i c\theta_i s\beta_i & c\alpha_i \theta_i c & s\theta_i s\beta_i - c\theta_i s\alpha_i c\beta_i & a_i s\theta_i \\ -c\alpha_i s\beta_i & s\alpha_i & c\alpha_i c\beta_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2-18}$$

其中 c 和 s 分别代表三角函数运算 \sin 和 \cos 。绕 Y_i 轴微小旋转角 β_i 也取决于机器人本体结构，一般情况下 β_i 取值较小。KUKA 公司 KR150R3100 机器人修正后的 MDH 模型参数如表 2-2。

表 2-2 KR150R3100 机器人 MDH 模型参数

关节序号	模型参数	关节序号	模型参数
1	$d_1, \theta_1, a_1, \alpha_1$	4	$d_4, \theta_4, a_4, \alpha_4$
2	$\beta_2, \theta_2, a_2, \alpha_2$	5	$d_5, \theta_5, a_5, \alpha_5$
3	$d_3, \theta_3, a_3, \alpha_3$	6	$d_6, \theta_6, a_6, \alpha_6$

2.3 机器人 TCF 坐标系和 TCP 建立过程

在工业现场，机器人末端携带各种工具，如焊枪、胶枪、切削刀具等，完成焊接、胶接、制孔、打磨等各项生产任务，因此需要在工具某一点处建立一个坐标系，该坐标系用于控制工具工作点的位置和工具整体姿态，因此称为末端执行器控制坐标系(Tool Control Frame, TCF)，简称末端工具坐标系^[38]。为了控制机器人所携带工具的位置和姿态，保证加工和检测精度，需要标定 TCF 相对于机器人末端法兰坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 的位姿关系。TCF 坐标系的原点即为 TCP(Tool Center Point)，其在末端法兰坐标系下的位置为 P_e^{tcp} ，在基坐标系下的位置为 P_b^{tcp} ，再结合机器人运动学模型可得：

$$T_e^b P_e^{tcp} = P_b^{tcp} \tag{2-19}$$

可通过测量机器人在多个姿态下 TCP 点在基坐标系下的位置对式(2-19)中的 P_e^{tcp} 进行解算。

TCF 坐标系建立方法如下：首先 TCF 坐标系的原点 TCP 一般选在工具末端，如对于激光位移传感器选在激光出射点^[39]，对于焊枪、胶枪也都选在末端尖点处。然后选定 TCF 坐标系的 Z 轴方向为工具的有效方向，一般选为与工具中心轴方

向一致，该方向只与工具的形位有关，而不一定是由末端法兰中心 O_e 指向 TCP 点的方向，如图 2-10 所示。最后需要根据工具的需求确定 TCF 坐标系 X 轴和 Y 轴的方向，对于某些形状为回转体的工具，或无论绕自身 Z 轴如何旋转都不影响加工或测量的工具来说，如激光位移传感器为 1 维传感器，其坐标系的 X 轴和 Y 轴方向没有严格定义，可以是任何方向，只需要满足右手定则即可，因此一般会选定 X 轴(或 Y 轴)方向与末端法兰坐标系的 X 轴(或 Y 轴)方向相同，再根据右手定则确定 TCF 坐标的第三个轴的方向；而对于某些非回转体工具，其 X 轴和 Y 轴方向会影响加工精度和测量准确性，此时就要严格按照规定方向进行定义和标定，至少需要标定出两个轴的轴向。

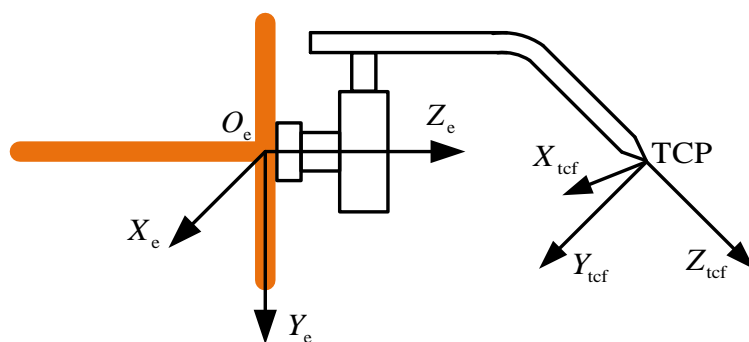


图 2-10 工具坐标系方向示意图

2.4 运动学模型参数和 TCF 坐标系对精度维护的影响

机器人在制造现场工作时运行的轨迹大多是通过离线编程或示教编程^[40]的方式产生的，但无论用何种方式生成轨迹，每条预定轨迹都对应一种机器人的初始状态，包括生成轨迹时机器人运动学模型参数和标定的 TCF 坐标系初始位姿参数。假设在某一时刻机器人状态与轨迹生成时的初始状态相同，此时运行预定轨迹，机器人工具末端到达的实际位姿应该在重复定位精度范围内与预设位姿重合。基于这样的假设，机器人在制造现场完成一系列重复性高的加工和检测任务。

但实际情况是，随着机器人运行时间的延长，机器人运行状态会逐渐发生改变甚至突变。最为普遍的就是机器人连续运转造成内部电机发热，导致机器人局部关节和连杆变形、膨胀的现象，此时机器人运动学模型参数已经与初始状态不同，运行的轨迹就与预定轨迹不再重合。另外，机器人携带某些接触式工具进行工作时，工具长时间与工件发生挤压、摩擦和小型碰撞，会导致工具位姿偏离轨迹规划时的标定位姿，这也会导致工具工作端运行的轨迹与预定轨迹发生偏离。

这些效应在加工和检测精度要求较高的场合表现的尤为明显,无法满足制造现场的精度需求。

因此研究在线温度误差补偿方法和 TCF 重新校准的方法对机器人的精度维护起到了至关重要的作用。

2.5 本章小结

本章在介绍了坐标系转换相关的平移、旋转、左乘和右乘相关知识后,利用坐标系右乘关系建立了机器人 DH 运动学模型,并以川崎 BX200L 机器人为例,说明了 DH 模型参数初值建立方法。通过分析 DH 模型存在的固有缺陷,引入修正的 DH 模型——带参数 β 的 MDH 模型,建立更加完善的机器人运动学模型。随后介绍了机器人末端工具坐标系 TCF 和机器人末端工具中心点 TCP 的标定类型。最后分析了运动学模型参数变化和 TCF 位姿变化对制造现场机器人精度维护的影响。

第3章 温度误差补偿方法

工业机器人作为一种自动化平台，工作环境通常恶劣、多变，加之机器人连续高速运行状态下，各关节电机发热、各转动关节相互摩擦将导致机器人本体温度上升，工业机器人长期处于发热-稳定-冷却的热循环中。机器人本体的温度变化将引起机器人某些杆件膨胀和关节的变形，运动学模型参数将会发生改变，进而引起明显的末端位置漂移，运动轨迹的长期稳定性很难保证。以臂展为3100mm的工业机器人为例，在3小时连续高速运动后，其末端TCP位置漂移可达到0.5mm。如图3-1所示，(a)图为红外摄像机下机器人长时间运动后的热分布图片，热量多集中在机器人的关节2、3、4处；(b)图为机器人连续运行3小时过程中，对汽车白车身某点进行90组坐标测量的坐标漂移结果，三个方向的坐标漂移量在0.1mm到0.5mm之间。这样的漂移量导致的轨迹误差已无法满足如精密制孔、打磨、切削等高精度应用场合的需求。因此，机器人实时温度补偿是维持生产工艺稳定、保证产品质量必须面对的问题。

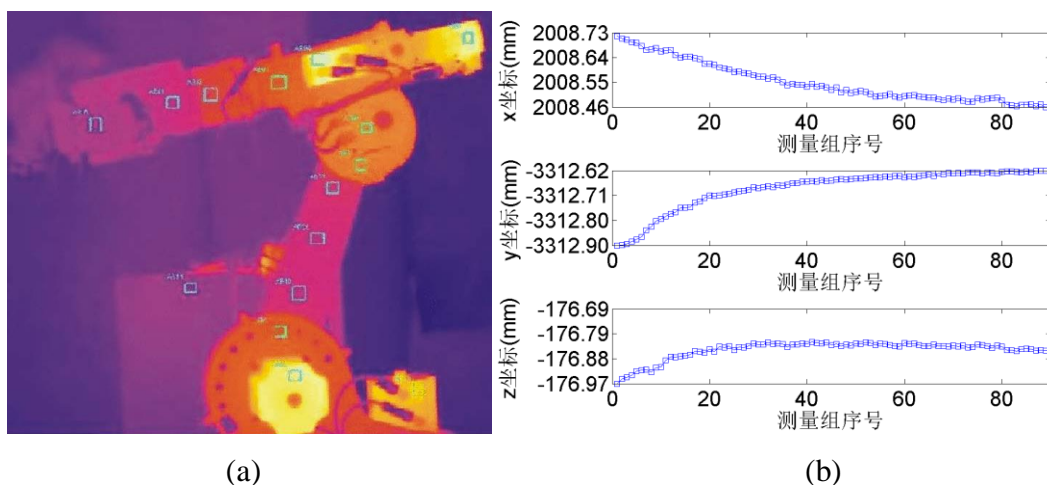


图 3-1 机器人温度效应图：(a)机器人长时间工作后热分布图；(b)坐标漂移结果

3.1 温度误差补偿方法

为解决机械臂温度升高，从而严重影响机器人运动重复定位精度的问题，本节将建立一种面向通用工业机器人的温度误差补偿模型。如图3-2所示，温度误差补偿系统由三部分组成：工业机器人、机器人末端基准球、校准视觉测量系统。机器人可携带基准球改变位姿，校准视觉测量系统则固定不动。

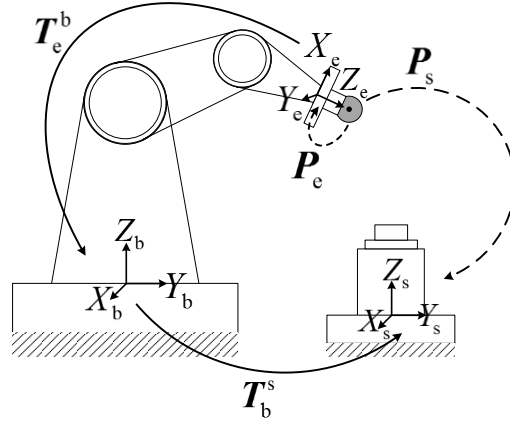


图 3-2 温度误差补偿系统组成和坐标系定义

如图 3-2 所示，系统坐标系包含机器人末端法兰坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 、机器人基坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 和校准视觉传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 。将基准球球心作为校准视觉传感器测量的特征点，假设 $P_e \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为球心在机器人末端法兰坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 下的三维坐标向量， $P_s \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为该点在校准传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 下的三维坐标向量，根据齐次坐标转换关系可以得到：

$$\begin{bmatrix} P_s \\ 1 \end{bmatrix} = T_b^s \cdot T_e^b \cdot \begin{bmatrix} P_e \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

其中 $T_b^s \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 和 $T_e^b \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 分别为坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 到坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 和坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 到坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 的齐次转换矩阵。如 2.2.2 节所述，对于六自由度串联机器人， T_e^b 可表示为：

$$T_e^b = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4 \cdot T_6^5 \quad (3-2)$$

其中， $T_i^{i-1} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 为相邻关节 $i-1$ 到关节 i 的坐标系转换矩阵。

当机器人以高速连续工作若干小时后，机械臂温度升高，机器人杆件受热膨胀，从而导致末端法兰位置发生漂移。对于图 3-2 所示的机器人系统，由于校准视觉传感器固定不动，若机器人携带基准球运动至校准视觉传感器上方某一固定位置进行测量，可以发现在机器人连续高速运动过程中，基准球球心的测量结果将发生远大于机器人重复定位精度的漂移，且漂移方向基本固定，这种漂移现象就是由机器人温度误差引起的。

工业机器人冷态下（机器人尚未经过长时间高速运动），根据式(3-1)可得特征点在传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 下的三维坐标向量 $P_{\text{scool}} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为：

$$\begin{bmatrix} P_{\text{scool}} \\ 1 \end{bmatrix} = T_b^s \cdot T_e^b \cdot \begin{bmatrix} P_e \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

工业机器人热态下（机器人连续高速运动后），机器人本体发热引起其关节参数发生变化，即末端法兰姿态 T_e^b 发生变化，根据文[41]中运动学误差模型的表述，特征点在校准传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 下的三维坐标 $P_{\text{swarm}} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 可表示为：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{swarm}} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_b^s \cdot (\mathbf{T}_e^b + d\mathbf{T}_e^b) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P}_e \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

其中 $d\mathbf{T}_e^b \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 为机器人末端姿态的变化量。热态与冷态下特征点的测量值偏差为：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{swarm}} - \mathbf{P}_{\text{scool}} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_b^s \cdot d\mathbf{T}_e^b \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P}_e \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

微分运动学是机器人运动学误差建模的基础理论^[42]，论文基于微分运动学建立了机器人温度误差补偿模型。根据文[43-45]可得到机器人基坐标系到末端法兰坐标系的转换矩阵 \mathbf{T}_e^b 的微分变换 $d\mathbf{T}_e^b$ 为：

$$\begin{aligned} d\mathbf{T}_e^b &= \mathbf{T}_1^0 \mathbf{A}_{d1} \mathbf{T}_6^1 dd_1 + \cdots + \mathbf{T}_1^0 \mathbf{A}_{\beta 1} \mathbf{T}_6^1 d\beta_1 \\ &+ \cdots + \\ &\mathbf{T}_i^0 \mathbf{A}_{di} \mathbf{T}_6^i dd_i + \cdots + \mathbf{T}_i^0 \mathbf{A}_{\beta i} \mathbf{T}_6^i d\beta_i \\ &+ \cdots + \\ &\mathbf{T}_6^0 \mathbf{A}_{d6} dd_6 + \cdots + \mathbf{T}_6^0 \mathbf{A}_{\beta 6} d\beta_6 \\ &= \sum_{i=1}^6 \sum_{q=d}^{\beta} \mathbf{T}_i^0 \mathbf{A}_{qi} \mathbf{T}_6^i dq_i \end{aligned} \quad (3-6)$$

其中 $\mathbf{A}_{qi} = (\mathbf{T}_i^{i-1})^{-1} \cdot \frac{\partial \mathbf{T}_i^{i-1}}{\partial q_i}$ ， dq_i 为机器人 MDH 模型中 30 个参数的变化量（其中 β_1 、 d_2 、 $\beta_3 \sim \beta_6$ 6 个参数恒为零）。值得注意的是 \mathbf{T}_i^{i-1} 第四行行向量均为 $[0 \ 0 \ 0 \ 1]$ ， \mathbf{T}_i^{i-1} 对 q_i 求导后第四行变为 $[0 \ 0 \ 0 \ 0]$ ，因此 \mathbf{A}_{qi} 第四行也为 $[0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。将式(3-6)带入式(3-5)中得：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{swarm}} - \mathbf{P}_{\text{scool}} \\ 0 \end{bmatrix} &= \sum_{i=1}^6 \sum_{q=d}^{\beta} \mathbf{T}_b^s \mathbf{T}_i^0 \mathbf{A}_{qi} \mathbf{T}_6^i \mathbf{P}_e dq_i \\ &= \sum \sum \mathbf{k}_{qi} dq_i = \mathbf{M} \cdot \Delta \mathbf{X} \end{aligned} \quad (3-7)$$

其中， $\mathbf{k}_{qi} = \mathbf{T}_b^s \mathbf{T}_i^0 \mathbf{A}_{qi} \mathbf{T}_6^i \mathbf{P}_e$ ， $\mathbf{k}_{qi} \in \mathbf{R}^{4 \times 1}$ ，系数矩阵 $\mathbf{M} = [\mathbf{k}_{d1} \ \mathbf{k}_{d2} \ \mathbf{k}_{d3} \ \cdots \ \mathbf{k}_{\beta 4} \ \mathbf{k}_{\beta 5} \ \mathbf{k}_{\beta 6}]$ ， $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{4 \times 30}$ ，参数变化向量 $\Delta \mathbf{X} = [dd_1 \ dd_2 \ dd_3 \ \cdots \ d\beta_4 \ d\beta_5 \ d\beta_6]^T$ ， $\Delta \mathbf{X} \in \mathbf{R}^{30 \times 1}$ 。式(3-7)等号右侧由于 \mathbf{k}_{qi} 中存在 \mathbf{A}_{qi} ，使得 \mathbf{k}_{qi} 向量第四个元素为 0，代入计算易得等号右侧最后一个元素恒等于 0，因此式(3-7)等号两侧最后一个元素均为 0，对求解 $\Delta \mathbf{X}$ 不起作用，式(3-7)仅提供三个等式。机器人携带基准球以 m 个不同的测量姿态在校准视觉测量系统下进行测量，记第 i 个测量姿态末端定位误差为 $\mathbf{Y}_i = \mathbf{P}_{\text{swarmi}} - \mathbf{P}_{\text{scooli}}$ ，对应系数矩阵为 $\mathbf{M}_i = \mathbf{M}_{(1:3,:)}$ ，则 m 个测量姿态组成的方程组为：

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_i \\ \vdots \\ Y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_i \\ \vdots \\ M_m \end{bmatrix} \cdot \Delta X = A \cdot \Delta X \quad (3-8)$$

利用 SVD 分解法对式(3-8)中机器人关节参数 ΔX 中的部分或全部元素进行求解。式(3-8)中系数矩阵 $A \in \mathbf{R}^{3m \times 30}$ 的 SVD 分解式为:

$$A = U \cdot S \cdot V^T \quad (3-9)$$

其中, $U \in \mathbf{R}^{3m \times 3m}$ 、 $V \in \mathbf{R}^{30 \times 30}$ 为方阵 AA^T 和 $A^T A$ 的单位特征向量构成的矩阵, $S \in \mathbf{R}^{3m \times 30}$ 为 A 的奇异值矩阵, 因此有:

$$\Delta X = V \cdot S^{-1} \cdot U^T \cdot Y \quad (3-10)$$

根据式(3-10)求解关节参数向量 ΔX 。

根据式(3-10)可得到受温度效应影响后的机器人关节参数变化量, 与冷态相比, 此时机器人末端法兰坐标系位姿已经发生改变, 需要对轨迹重新规划。参考文献[46], 文中方法结合机器人逆运动学原理和迭代数值方法给出了合理的机器人关节角度计算方法, 迭代次数不超过三次, 计算快速准确, 控制机器人按照重新计算的关节角度运动, 可以精准控制机器人末端法兰坐标系位姿, 即实现机器人运动轨迹误差补偿。

3.2 补偿参数选择方法

MDH 模型中虽然规定每个关节包含 5 个参数, 6 自由度机器人共包含 30 个参数, 但 β_1 、 d_2 、 $\beta_3 \sim \beta_6$ 这 6 个参数恒为 0, 因此只有 24 个参数可随温度的变化产生漂移, 如表 2-2 为 KUKA 公司 KR150R3100 机器人可辨识的全部 24 个参数。然而, 对于实际生产线上工作的机器人, 基准球测量通常是在生产线输送工件期间进行。由于生产节拍的限制, 可用于基准球测量的时间非常有限, 机器人通常只能运动 6 个左右位姿。由式(3-8)可知, 机器人从 6 个不同姿态测量基准球时, 最多只能建立 18 个方程, 因此无法对表 2-2 中的 24 个参数进行辨识。一方面为了提高参数辨识的准确性, 通常使方程个数是参数个数的 2~3 倍; 另一方面, 机器人电机发热引起机器人局部温度变化, 确实只影响机器人部分参数发生较大变化。因此需要从表 2-2 中的 24 个参数中筛选出 6~9 个主要变化参数进行补偿, 通过只补偿这几个主要参数来达到机器人温度补偿的目的。传统的机器人温度补偿方法认为温度变化只影响模型中非零长度参数^[47], 对于 KR150R3100 机器人, d_1 、 d_4 、 d_6 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为非零长度参数, 传统方法只补偿这 6 个参数。考虑

到内部热源对连杆参数和结构参数影响的复杂性,论文使用的新的参数筛选方法中,使长度和角度关节参数均作为温度误差补偿候选参数。

通过总结因温度变化而显著变化的参数的变化规律,据此对机器人结构参数进行筛选。机器人从冷态变化到热态过程中,显著变化参数应呈现出与机器人末端 TCP 近似的变化曲线,如图 3-3 所示,这样的参数为非平稳变化参数;如果参数数值围绕 0 点上下波动,如图 3-4 所示,则为平稳变化参数,不作为最终的补偿参数。

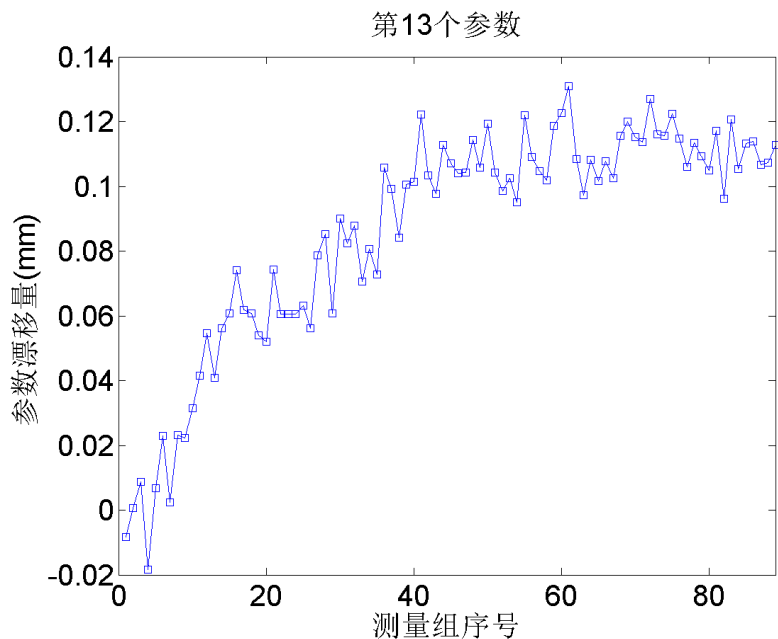


图 3-3 非平稳参数变化趋势

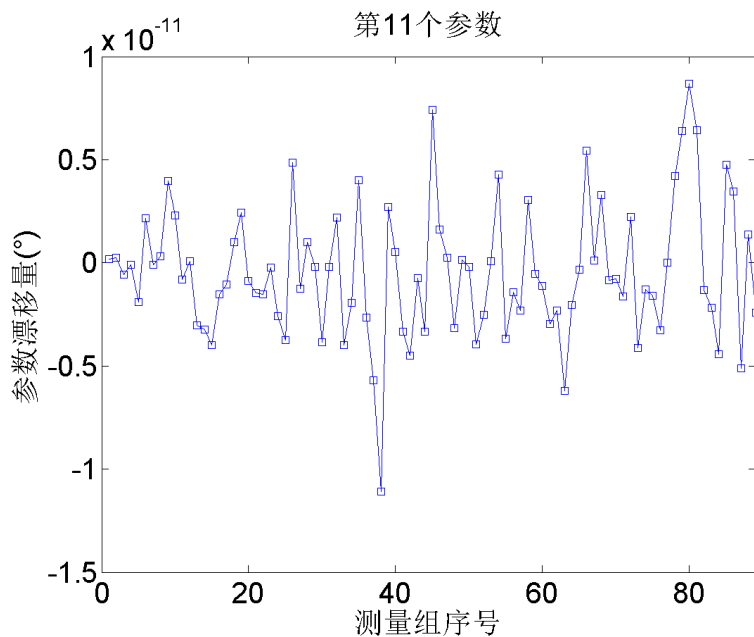


图 3-4 平稳参数变化趋势

王一^[44]采用了多元线性回归分析中常见的“最佳”预测量子集的方法确定显著变化参数，为降低计算量，该方法前期通过轴动温度误差实验，并依据机器人结构和对运动学模型的经验判断出可能变化的模型参数，缩小遍历子集的范围，从而大大降低了计算工作量。但该方法初始遍历的参数范围受经验判断影响，轴动温度误差实验设计难，耗时长，对于不同型号的机器人设计的实验可能不同；选择的统计量为马罗(Mallow)的 C_p 统计量，是补偿部分参数对应的残差平方和与补偿全部参数对应的残差的方差的比例关系，是数据整体的补偿效果，不排除部分测点补偿效果较差的情况。因此在工业现场的应用受到限制。

本文则根据补偿后测量结果整体残差小于某一阈值的监测方向数量占总监测方向数量的百分比 λ 作为补偿效果优劣的评估标准，并据此进行参数筛选，用 λ 这一指标评价筛选结果的好坏，保证更多的测点补偿后残差小于阈值，从而控制整体的补偿效果，满足工业现场的精度要求；筛选的计算复杂度也为备选参数个数的多项式复杂度，计算量远小于“最佳”预测量子集的方法。由于筛选过程并不需要机器人在线工作期间完成，因此为完成筛选过程，在筛选阶段应不限制机器人携带基准球测量的姿态数。由于参数筛选初期为 24 个参数，所以最少选取 8 个姿态进行测量，为达到较好的补偿效果，本文参数筛选过程中选取的测量姿态数为 20 个。论文设计了如图 3-5 所示的补偿参数筛选流程图，筛选步骤如下：

(1) 开始，初始待选参数集合 $\Delta\mathbf{X}_0$ 为全部 24 个参数， $\Delta\mathbf{X}_0$ 中元素个数记作 $\text{card}(\Delta\mathbf{X}_0)$ ，设置欲留参数个数 n ，本文为 8；

(2) 按式(3-8)解算 $\Delta\mathbf{X}_0$ 中所有参数，计算补偿结果对应的 λ 值，获取 $\Delta\mathbf{X}_0$ 中每个参数类似于图 3-3 或图 3-4 的变化趋势曲线；

(3) 对 (2) 中获取的变化趋势曲线进行评估，评估方法为计算样本自相关函数，并对该函数中的值进行区间检验，选出集合 $\Delta\mathbf{X}_0$ 中变化趋势平稳或相对平稳的参数放入集合 S 中， S 中元素个数记作 $\text{card}(S)$ ；

(4) 逐个选出集合 S 中元素 s_i ， $i=1,2,3,\dots,\text{card}(S)$ ，令 $\Delta\mathbf{X}_i = \Delta\mathbf{X}_0 - s_i$ ，按式(3-8)解算 $\Delta\mathbf{X}_i$ 中所有参数，计算补偿结果对应的 λ_i 值，如果 $\lambda_i < \lambda$ ，补偿效果变差，则重复步骤 (4)；如果 $\lambda_i \geq \lambda$ ，补偿效果变好，令 $\lambda = \lambda_i$ ， $\Delta\mathbf{X}_0 = \Delta\mathbf{X}_i$ ；如果对于任意 λ_i 均满足 $\lambda_i < \lambda$ ，则令 $\lambda = \max_{i=1,2,\dots,\text{card}(S)} \{\lambda_i\}$ ， $\Delta\mathbf{X}_0$ 等于对应的 $\Delta\mathbf{X}_i$ ；

(5) 如果 $\text{card}(\Delta\mathbf{X}_0) > n$ ，重复步骤 (2) ~ (4)；如果 $\text{card}(\Delta\mathbf{X}_0) \leq n$ ，筛选结束。

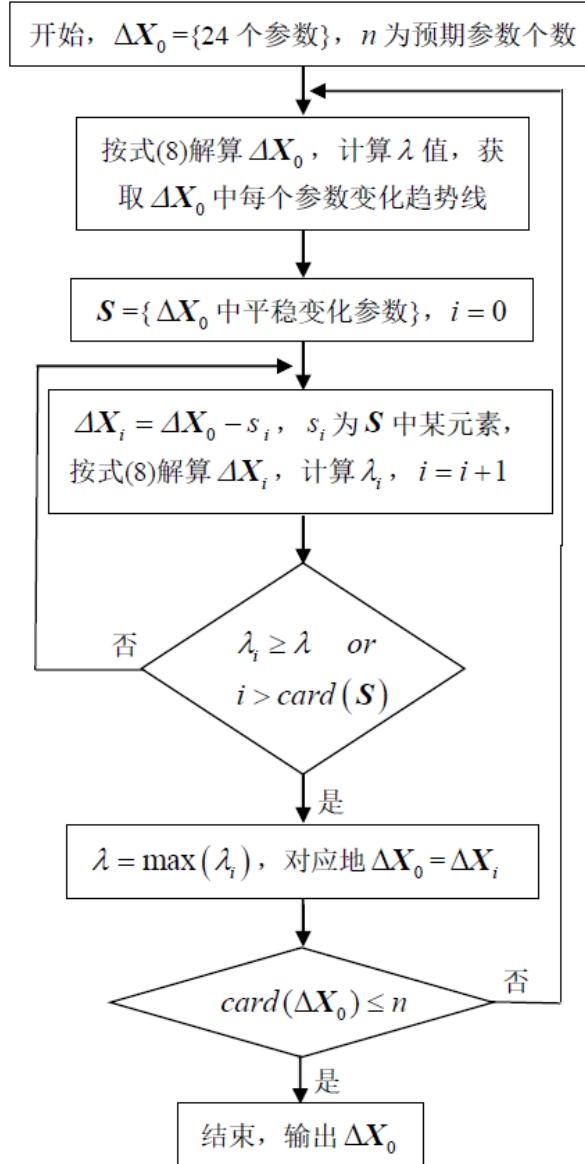


图 3-5 参数筛选流程图

3.3 系统标定

3.1 节所述的温度补偿模型中需要利用 T_b^s 和 P_e 进行计算, 因此在温度误差补偿前需要对这两个系统参数进行精确标定。本节系统标定借鉴机器人手眼标定方法原理^[45, 48], 不同的是本节中的视觉系统固定安装在机器人基座附近, 需要标定校准视觉传感器坐标系相对于机器人基坐标系的转换关系 T_b^s 。同时, 该系统标定方法可对 T_b^s 和 P_e 同时进行标定, 标定效率较高。

设基准点在机器人末端法兰坐标系和传感器坐标系下的坐标向量分别为 $P_e = [x_e \ y_e \ z_e]^T$ 和 $P_s = [x_s \ y_s \ z_s]^T$, 根据式(3-1)可得:

$$\begin{bmatrix} P_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & t_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_e \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

其中 $R_s \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 和 $t_s \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 待标定，分别为校准传感器坐标系到机器人基坐标系转换关系 T_b^s 的旋转子矩阵和平移子矩阵； $R \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 和 $t \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为机器人基坐标系到末端法兰坐标系的旋转子矩阵和平移子矩阵，可通过机器人运动学模型(3-2)获取； P_e 也为待标定参数。化简式(3-11)得：

$$P_s = R_s R P_e + R_s t + t_s \quad (3-12)$$

控制机器人运动，使校准视觉测量系统测量两个不同机器人位姿下基准点坐标：

$$\begin{cases} P_{s1} = R_s R_1 P_e + R_s t_1 + t_s \\ P_{s2} = R_s R_2 P_e + R_s t_2 + t_s \end{cases} \quad (3-13)$$

(3-13)式中两式相减并化简得：

$$R_s^T (P_{s1} - P_{s2}) - (R_1 - R_2) P_e = t_1 - t_2 \quad (3-14)$$

$$\text{记： } R_s^T = \begin{bmatrix} r_{s11} & r_{s12} & r_{s13} \\ r_{s21} & r_{s22} & r_{s23} \\ r_{s31} & r_{s32} & r_{s33} \end{bmatrix}, \quad R_1 - R_2 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad P_{s1} - P_{s2} = \begin{bmatrix} \Delta P_{sx} \\ \Delta P_{sy} \\ \Delta P_{sz} \end{bmatrix}, \quad P_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix},$$

$$t_1 - t_2 = \begin{bmatrix} \Delta t_x \\ \Delta t_y \\ \Delta t_z \end{bmatrix}, \text{ 则式(3-14)可等价地改写为:}$$

$$B \cdot \Delta K = b \quad (3-15)$$

$$\text{其中, } B = \begin{bmatrix} \Delta P_{sx} & \Delta P_{sy} & \Delta P_{sz} & 0 & 0 & r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ 0 & \Delta P_{sx} & \Delta P_{sy} & \Delta P_{sz} & 0 & r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ 0 & 0 & \Delta P_{sx} & \Delta P_{sy} & \Delta P_{sz} & r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3 \times 12}, \quad b = [\Delta t_x \quad \Delta t_y \quad \Delta t_z]^T,$$

$\Delta K = [r_{s11} \quad r_{s12} \quad r_{s13} \quad \cdots \quad r_{s33} \quad x_e \quad y_e \quad z_e]^T \in \mathbf{R}^{12 \times 1}$ ，两个不同位姿即可得到如式(3-15)的三个方程。

实验过程中机器人携带基准球运动 $n+1$ 个不同的位姿进行测量，使用第 1 个运动姿态和第 $i+1$ ($i=1,2,3,\dots,n$) 个运动姿态测量数据，通过式(3-15)中 B 和 b 的定义，可计算这两个位姿对应的 B_i 和 b_i ，因此 $n+1$ 次测量可得 n 组方程组，共计 $3n$ 个方程：

$$B' \cdot \Delta K = b' \quad (3-16)$$

其中 $\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{B}_n \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3n \times 12}, \mathbf{b}' = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_n \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3n \times 1}$ 。 $\Delta \mathbf{K}$ 中有 12 个待求量，方程数量应不少

于待求量个数，即 $3n \geq 12$ ，因此系统标定时至少进行 5 次测量。另外，求解式(3-16)的过程中， \mathbf{R}_s^T 需满足旋转矩阵的正交性约束，即：

$$\begin{cases} f_1 = r_{s11}^2 + r_{s12}^2 + r_{s13}^2 - 1 = 0 \\ f_2 = r_{s21}^2 + r_{s22}^2 + r_{s23}^2 - 1 = 0 \\ f_3 = r_{s31}^2 + r_{s32}^2 + r_{s33}^2 - 1 = 0 \\ f_4 = r_{s11}r_{s21} + r_{s12}r_{s22} + r_{s13}r_{s23} = 0 \\ f_5 = r_{s11}r_{s31} + r_{s12}r_{s32} + r_{s13}r_{s33} = 0 \\ f_6 = r_{s21}r_{s31} + r_{s22}r_{s32} + r_{s23}r_{s33} = 0 \end{cases} \quad (3-17)$$

由此构造优化目标函数如下：

$$\min (\mathbf{B}' \cdot \Delta \mathbf{K} - \mathbf{b}')^T (\mathbf{B}' \cdot \Delta \mathbf{K} - \mathbf{b}') + M \sum_{i=1}^6 f_i^2 \quad (3-18)$$

其中， M 为罚因子。采用 L-M 优化算法对式(3-18)求最优解，求得 \mathbf{R}_s^T 和 \mathbf{P}_e 后代入到第 i 次测量得到的式(3-12)中，求解 \mathbf{t}_{si} ，对所有 \mathbf{t}_{si} 求均值：

$$\mathbf{t}_s = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{t}_{si} \quad (3-19)$$

至此， \mathbf{T}_b^s 和 \mathbf{P}_e 在冷态下的精确值标定完成。

3.4 本章小结

本章针对制造现场环境下通用工业机器人温度误差补偿的问题，建立了一套完整的在线温度误差补偿系统和温度误差补偿数学模型。为提高特征点测量精度、增加测量姿态多样性、降低 SVD 求解噪声。为简化温度误差补偿模型、改善补偿效果、适应生产线工作节拍，提出了新的关节参数选取方法，考虑到内部热源对连杆参数和结构参数影响的复杂性，使长度和角度关节参数均作为温度误差补偿候选参数。

第4章 TCF 自动校准方法

传统的 TCP 校准方法需要人工参与，效率较低，精度也受操作人员熟练度和人眼分辨率的限制。为了提高末端工具定位精度的维护效率，设计了在线 TCF 快速自动校准系统，标定工具坐标系 TCF 相对于机器人末端法兰坐标系的位姿，从而达到对制造现场的机器人的精度长期维护的目的。

4.1 TCP 校准方法

1.3 节中简单介绍了现有 TCP 校准方法，其中四点法和七点法需要人工参与，七点法是在四点法标定了工具坐标系相对法兰坐标系位置变换的基础上，利用后三个点标定姿态变换。单激光线法和平行激光线法测量原理基本一致，利用遮挡激光的信号作为触发获取工具位置和姿态，两种方法均能实现末端工具位姿的非接触式测量。不同的是平行激光线法有两条平行激光同时测量，测量效率相当于单激光线法的 2 倍。本节将详细介绍测量信息更加全面的七点法和测量效率更高的平行激光法。

4.1.1 七点法测量原理

机器人标定工具坐标系的七点法中，前四个点用来标定 TCP 相对于末端法兰坐标系下的位置。具体方法如图 4-1 所示：机器人携带末端工具从任意四个方向靠近同一参考点 \mathbf{P}_{ref} ，参考点在机器人基坐标系下的齐次位置向量为 $\mathbf{p} = (x_0, y_0, z_0, 1)^T$ ，为保证测量精度，四个位置需足够分散，测量过程中记录四个位置处末端法兰中心的位姿信息，分别用 $\mathbf{P}_1(x_1, y_1, z_1, A_1, B_1, C_1)$ 、 $\mathbf{P}_2(x_2, y_2, z_2, A_2, B_2, C_2)$ 、 $\mathbf{P}_3(x_3, y_3, z_3, A_3, B_3, C_3)$ 、 $\mathbf{P}_4(x_4, y_4, z_4, A_4, B_4, C_4)$ 表示。

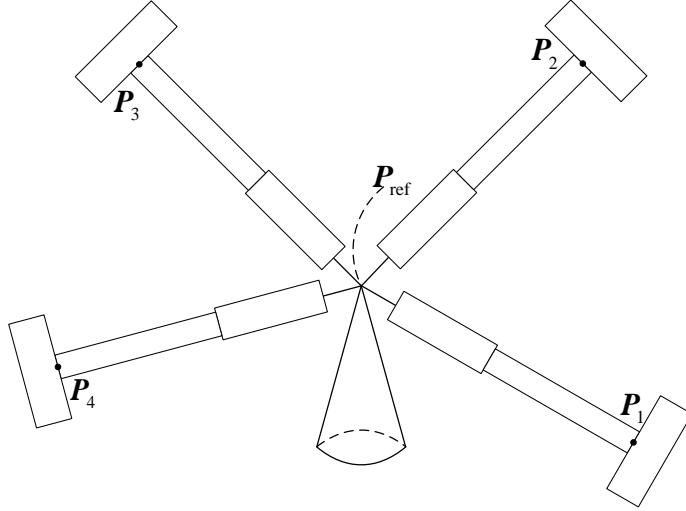


图 4-1 四点法测量原理

理论上， $P_1 \sim P_4$ 四点位于以 P_{ref} 为球心的同一个球面上，球面方程如下：

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2 \quad (4-1)$$

其中 R 为 $P_1 \sim P_4$ 所在球面半径。将 $P_1 \sim P_4$ 坐标分别代入式(4-1)并化简：

$$2 \cdot \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 + z_2^2 - z_1^2 \\ x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2 + z_3^2 - z_1^2 \\ x_4^2 - x_1^2 + y_4^2 - y_1^2 + z_4^2 - z_1^2 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

式(4-2)可求解 $P_{\text{ref}}(x_0, y_0, z_0)$ 位置。根据 P_i 的姿态信息 (A_i, B_i, C_i) ($i=1, 2, 3, 4$) 和姿态矩阵之间的变换关系，可求得对应的机器人基坐标系到末端法兰坐标系的转换关系：

$$T_{ei}^b = \begin{bmatrix} c A_i c C_i - s A_i c B_i s C_i & -c A_i s C_i - s A_i c B_i c C_i & s A_i s B_i & x_i \\ s A_i c C_i + c A_i c B_i s C_i & -s A_i s C_i + c A_i c B_i c C_i & -c A_i s B_i & y_i \\ s B_i s C_i & s B_i c C_i & c B_i & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

其中 s 和 c 分别表示函数 \sin 和 \cos 。设 TCP 在末端法兰坐标系下的坐标为 $(t_x^{\text{tcp}}, t_y^{\text{tcp}}, t_z^{\text{tcp}})$ ，根据坐标转换关系可得：

$$\begin{bmatrix} T_{e1}^b \\ T_{e2}^b \\ T_{e3}^b \\ T_{e4}^b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_x^{\text{tcp}} \\ t_y^{\text{tcp}} \\ t_z^{\text{tcp}} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ p \\ p \\ p \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

利用最小二乘法或 SVD 分解法对式(4-4)进行求解，可得到 TCP 在末端法兰坐标系下的位置的标定值 $(t_x^{\text{tcp}}, t_y^{\text{tcp}}, t_z^{\text{tcp}})$ 。

在标定 TCP 位置后，利用该结果继续对末端工具坐标系的姿态进行标定。将末端工具坐标系姿态调整至与机器人基坐标系一致(与位置标定类似，通过人眼进行判断，使末端工具坐标系与机器人基坐标系基本一致)。保持机器人末端

法兰坐标系姿态不变，控制机器人沿基坐标系 X_b 轴方向运动，再沿 Z_b 轴方向运动，记录三个位置处末端法兰中心的位姿信息，分别用 $P_5(x_5, y_5, z_5, A_5, B_5, C_5)$ 、 $P_6(x_6, y_6, z_6, A_6, B_6, C_6)$ 、 $P_7(x_7, y_7, z_7, A_7, B_7, C_7)$ 表示，对应的 TCP 在基坐标系下的坐标分别为 $P_8(x_8, y_8, z_8)$ 、 $P_9(x_9, y_9, z_9)$ 、 $P_{10}(x_{10}, y_{10}, z_{10})$ ，如图 4-2 所示。

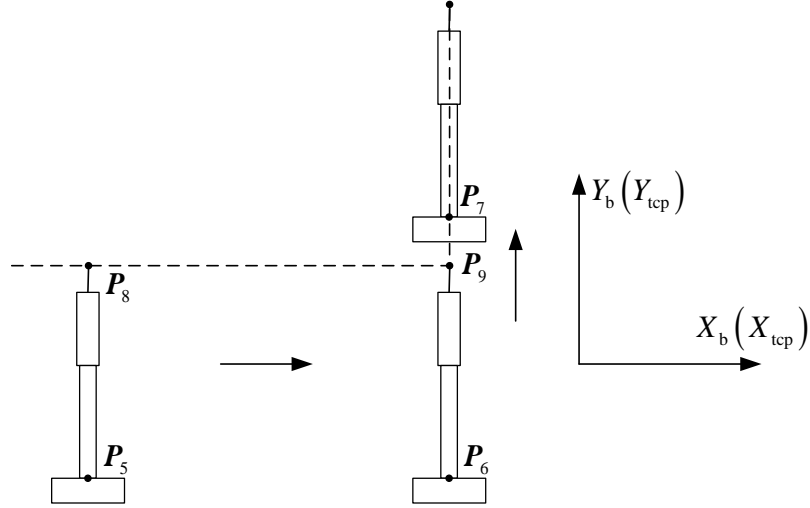


图 4-2 七点法姿态测量原理

将 $P_5 \sim P_7$ 位姿信息代入式(4-3)中分别得到 T_{e5}^b 、 T_{e6}^b 、 T_{e7}^b ，利用 TCP 在末端法兰坐标系下的位置标定值 $(t_x^{tcp}, t_y^{tcp}, t_z^{tcp})$ 可得：

$$\begin{bmatrix} x_8 \\ y_8 \\ z_8 \\ 1 \end{bmatrix} = T_{e5}^b \cdot \begin{bmatrix} t_x^{tcp} \\ t_y^{tcp} \\ t_z^{tcp} \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_9 \\ y_9 \\ z_9 \\ 1 \end{bmatrix} = T_{e6}^b \cdot \begin{bmatrix} t_x^{tcp} \\ t_y^{tcp} \\ t_z^{tcp} \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_{10} \\ y_{10} \\ z_{10} \\ 1 \end{bmatrix} = T_{e7}^b \cdot \begin{bmatrix} t_x^{tcp} \\ t_y^{tcp} \\ t_z^{tcp} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

由于末端工具坐标系与基坐标系姿态基本一致，沿基坐标系 X_b 轴和 Z_b 轴运动就相当于沿末端工具坐标系对应的轴运动，因此规定向量 $\overrightarrow{P_8P_9}$ 为末端工具坐标系 X_{tcp} 轴方向，向量 $\overrightarrow{P_9P_{10}}$ 为末端工具坐标系 Z_{tcp} 轴方向，两向量叉乘得到末端工具坐标系 Y_{tcp} 轴方向。再将各个轴向向量单位化即可得到末端工具坐标系相对于基坐标系的姿态变换。

4.1.2 平行激光法测量原理

平行激光法利用两条平行激光对末端工具中心轴位置进行同时测量^[32]，如图 4-3 所示，该测量系统安装的平面应与机器人基平面平行，否则容易产生关于机器人基平面的镜面误差。因此安装过程中需要通过一系列调整使平行激光方向严格平行于 Y_b 轴。按照上述要求安装后，需要使用机器人末端法兰标定两条激光在

机器人基坐标系 Z_b 轴方向的高度值分别为 h_{up} 和 h_{down} ，两条激光高度差为 $\Delta h = h_{up} - h_{down}$ (Δh 为正值)。

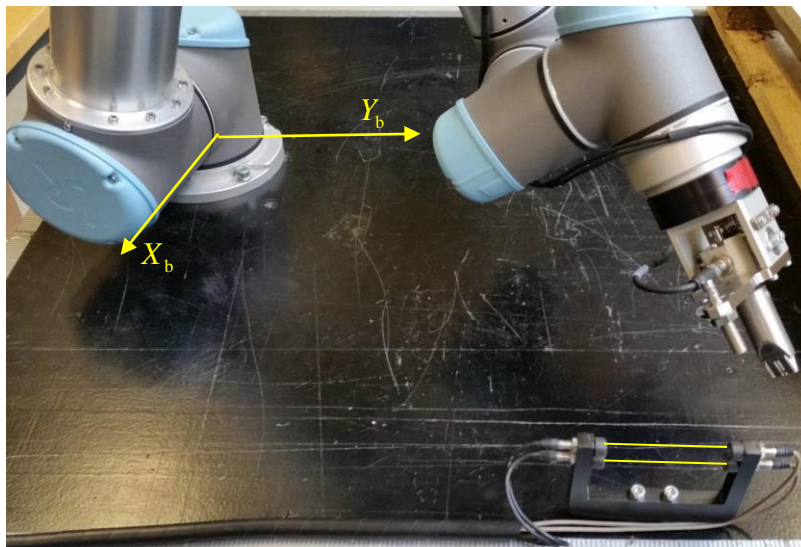


图 4-3 平行激光法测量装置^[32]

标定后，调整机器人姿态，使末端法兰坐标系 Z_e 轴向下垂直于机器人基平面， Y_e 轴与 Y_b 轴方向相同，机器人携带末端工具沿 X_b 轴方向缓慢移动，初始状态激光接收器处于接收状态，测量步骤如下：

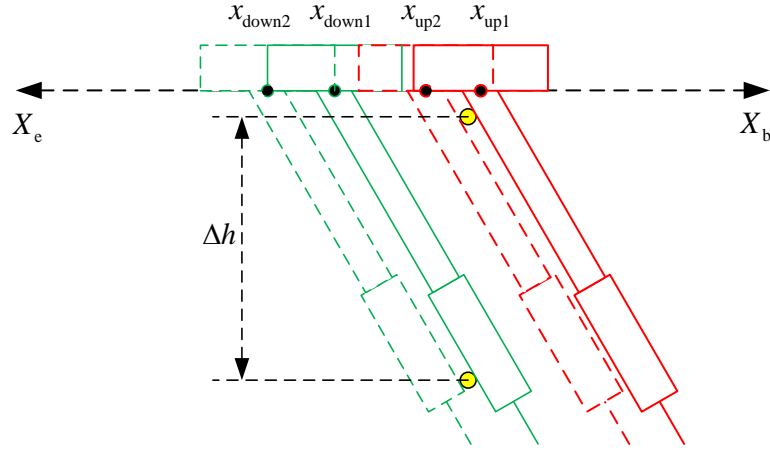
第一步，如图 4-4 所示，竖排两个圆点为平行激光的侧视图，当末端工具遮挡激光时，激光对管从接受状态变为遮挡状态时，记录此时末端法兰中心位置 x_{up1} 和 x_{down1} (两个信息不一定同时记录，激光接收状态转变的瞬间进行记录，下同)；

第二步，如图 4-4 所示，继续沿 X_b 轴方向缓慢移动工具，激光对管从遮挡状态变为状态时，记录此时末端法兰中心位置 x_{up2} 和 x_{down2} 。

第三步，将末端法兰坐标系绕 Z_e 轴旋转 90° ，使 X_e 轴与 Y_b 轴方向相同，重复第一步和第二步，分别记录末端法兰中心位置 x_{up3} 和 x_{down3} 、 x_{up4} 和 x_{down4} 。

此时可得到在末端法兰坐标系下末端工具轴线方向向为：

$$\vec{a} = \left(-\frac{(x_{up1} + x_{up2}) - (x_{down1} + x_{down2})}{2}, \frac{(x_{up3} + x_{up4}) - (x_{down3} + x_{down4})}{2}, \Delta h \right) \quad (4-6)$$


 图 4-4 末端工具轴线高度差为 Δh 两点沿 X 轴方向的偏差测量示意图

需要注意的是，向量 \vec{a} 第一个坐标应在前面加入负号，因为在第一步和第二步测量过程中 X_e 轴与 X_b 轴方向相反。

根据向量 \vec{a} 调整机器人姿态，使末端工具方向与 Z_b 轴平行，重复第一步和第二步，分别记录末端法兰中心位置 x_{up5} 和 x_{down5} 、 x_{up6} 和 x_{down6} ，理论上 $x_{up5} = x_{down5}$ 且 $x_{up6} = x_{down6}$ ，调整末法兰中心位置横坐标到 $(x_{down5} + x_{down6})/2$ 处，并沿 Z_b 轴正向提高机器人手臂。再沿 Z_b 轴负向缓慢移动工具，当恰好遮挡第一条激光时记录末端法兰中心位置 z_7 。因此 TCP 与末端法兰中心的距离 D 为：

$$D = z_7 - h_{up} \quad (4-7)$$

根据式(4-6)和(4-7)即可求出新的 TCP 在末端法兰坐标系中的位置，具体过程参考文献[32]。

4.2 TCF 快速自动校准方法

4.2.1 TCF 快速自动校准测量基本原理

图 4-5 为 TCF 快速自动校准测量系统中的测量平面，两激光对管发射出来的激光十字交叉，因此该测量方法也称为十字交叉激光法。激光对管分为发射端和接收端，从发射端指向接收端的方向为校准传感器坐标系 X_s 轴和 Y_s 轴正方向，即箭头所指方向；两条激光十字交叉点即为校准传感器坐标系原点 O_s ； Z_s 轴方向通过右手定则得到。理想条件下，根据该方法可建立校准传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 。

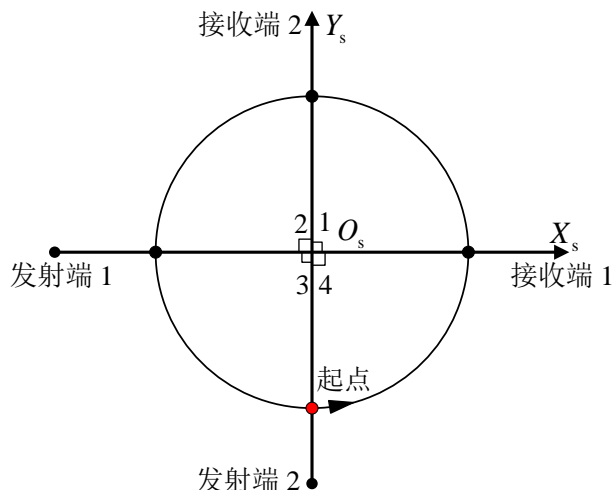


图 4-5 十字交叉激光测量平面

对机器人进行示教，使末端工具垂直于图 4-5 所示的十字交叉激光测量平面(后简称测量平面)并做匀速圆周运动，起点和圆周运动方向如图 4-5 所示，圆周运动的半径为 R 。理想情况下，示教轨迹的运动圆心为传感器坐标系原点 O_s ，分别连接运动轨迹圆心和运动轨迹与激光对管光线四个交点，则对应的 $\angle 1$ 、 $\angle 2$ 、 $\angle 3$ 、 $\angle 4$ 相等，均为 90° 。

当于机器人的工具端发生时，机器人仍然按照示教轨迹运动，末端工具在测量平面内的运动轨迹会发生整体偏移， $\angle 1 \sim \angle 4$ 会变化为图 4-6 所示情形。

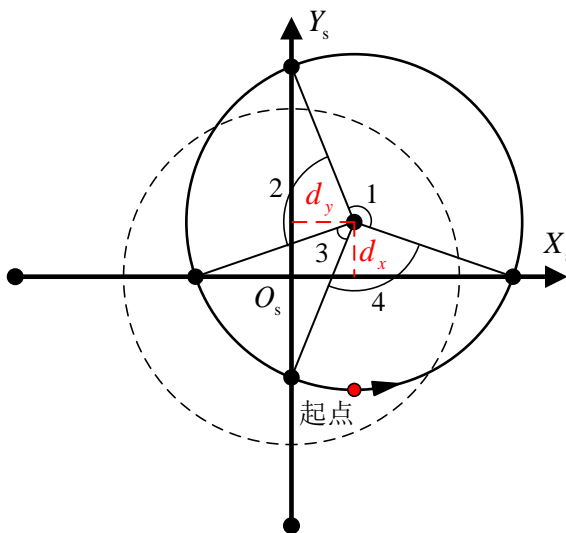


图 4-6 十字交叉激光测量平面

激光对管接收端信号状态分为可接收和被遮挡两种状态，根据信号状态的改变对转过 $\angle 1 \sim \angle 4$ 四个角度所需时间进行计时，用时分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 ，因此可求 $\angle i (i=1,2,3,4)$ 的弧度为：

$$\angle i = \frac{t_i}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} \cdot 2\pi \quad (4-8)$$

如图 4-6 所示, 根据 $\angle 1 \sim \angle 4$ 的值可分别计算末端工具偏移后的轨迹圆心到 X_s 轴的距离 d_x 和到 Y_s 轴的距离 d_y :

$$\begin{cases} d_x = R \cdot \cos(\frac{\angle 3 + \angle 4}{2}) \\ d_y = R \cdot \cos(\frac{\angle 2 + \angle 3}{2}) \end{cases} \quad (4-9)$$

注意, 式(4-9)中角度不可随意替换, 求出的距离 d_x 和 d_y 本身带有正负符号, 轨迹圆心在坐标系 $X_s O_s Y_s$ 下的坐标为 (d_y, d_x) 。

4.2.2 新 TCF 建立算法

任意两个坐标系之间的旋转关系可用欧拉角唯一表示, 坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ 按欧拉角转换到坐标系 $OX_4Y_4Z_4$ 的转换关系如图 4-7 所示: 坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ 绕 Z_1 轴旋转角度 ψ 得到坐标系 $OX_2Y_2Z_2$, Z_1 轴与 Z_2 轴重合; 然后坐标系 $OX_2Y_2Z_2$ 绕 X_2 轴旋转角度 θ 得到坐标系 $OX_3Y_3Z_3$, X_2 轴与 X_3 轴重合; 最后坐标系 $OX_3Y_3Z_3$ 绕 Z_3 轴旋转角度 ϕ 得到坐标系 $OX_4Y_4Z_4$, Z_3 轴与 Z_4 轴重合。图 4-7 中虚线和直角符号可辅助空间想象。

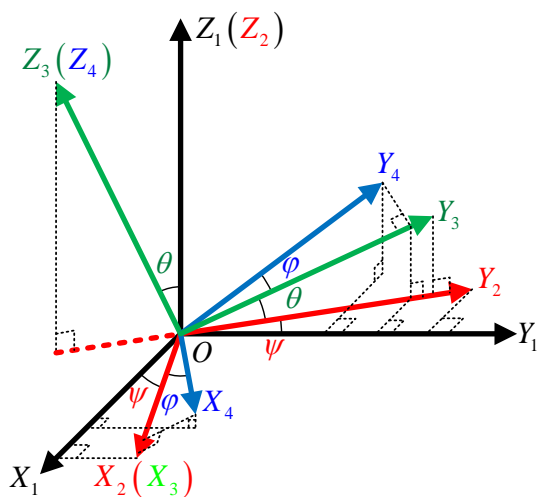


图 4-7 欧拉角示意图

考虑末端工具为有中心轴的回转体, 定义 Z 轴方向沿工具中心轴指向外端。根据工业现场末端工具被撞歪的情况, 认为末端工具不会产生绕工具自身中心轴方向的旋转, 因此 TCF 只有 5 个自由度发生变化。所以在建立新的 TCF 过程中, 新旧坐标系之间无绕 Z 轴的旋转量, 数学上有 $\phi = -\psi$, 因此只需计算 ψ 和 θ 两个旋转量即可, 对应旋转矩阵公式为:

$$\begin{aligned}
 R &= Rot(Z, \psi) \cdot Rot(X, \theta) \cdot Rot(Z, -\psi) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(-\psi) & -\sin(-\psi) & 0 \\ \sin(-\psi) & \cos(-\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-10) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos^2 \psi + \sin^2 \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \psi (1 - \cos \theta) & \sin \psi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \psi (1 - \cos \theta) & \sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta \\ -\sin \psi \sin \theta & \cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

建立如图 4-8 所示坐标系初始状态：机器人基坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 固定，十字交叉激光校准系统安装时保证传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 的 X_s 轴和 Y_s 轴分别与基坐标系 X_b 轴和 Y_b 轴方向相同；机器人法兰坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 的 X_e 轴与 X_s 轴方向相同， Y_e 轴与 Y_s 轴方向相反。

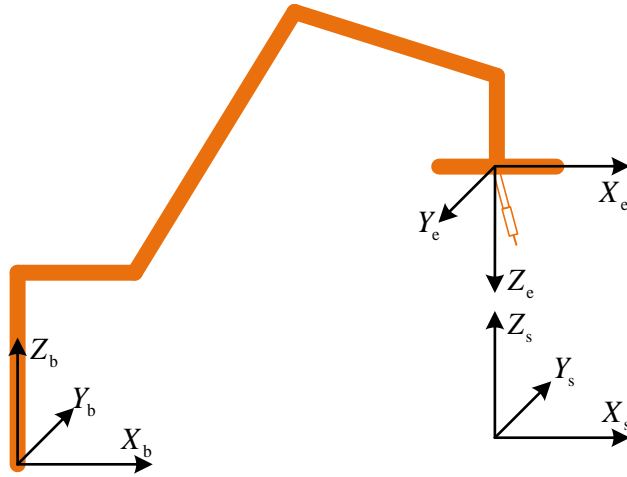


图 4-8 十字交叉激光法系统坐标系建立

如图 4-9 所示为 TCF 校正方案流程，对 TCF 坐标系进行 5D 校正：首先确定末端工具轴线代表的 Z_{tcp} 轴在坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 下的方向，该方向向量可求出对应的欧拉角 ψ 和 θ ，根据 ψ 和 θ 的值修正末端工具方向；再调整机器人使末端工具 TCP 点位于传感器十字交叉点 O_s 的正上方；最后控制机器人带动末端工具上下运动，确定 TCP 点在坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 下的位置 (x_0, y_0, z_0) 。根据欧拉角 ψ 和 θ 以及 (x_0, y_0, z_0) 可建立新的坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 到坐标系 TCF 的转换关系。具体方案如下：

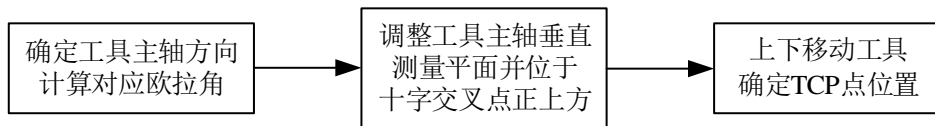


图 4-9 TCF 坐标系进行 5D 校正流程图

首先计算欧拉角 ψ 和 θ ：

如图4-8所示,测量过程中始终保证机器人末端法兰坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 的 X_e 轴方向与传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 的 X_s 轴方向一致, Y_e 轴方向与传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 的 Y_s 轴方向相反, Z_e 轴方向向下,此时末端工具基本竖直向下。测量过程如图4-10所示。

第一步:末端工具上一点 P_1 与测量平面相交,机器人带动工具在传感器测量平面内做匀速圆周运动,圆周运动轴心方向与传感器坐标系 Z_s 轴方向一致,根据传感器所记时间计算测量平面内圆周运动轨迹圆心 O_1 坐标 (d_{y1}, d_{x1}) ;

第二步:沿 Z_s 轴使工具向下运动距离 Δz ,末端工具上一点 P_2' 与测量平面相交,再继续在激光对管平面内以相同半径 R 和相同角速度 ω 做匀速圆周运动,计算对应的轨迹圆心 O_2 坐标 (d_{y2}, d_{x2}) 。

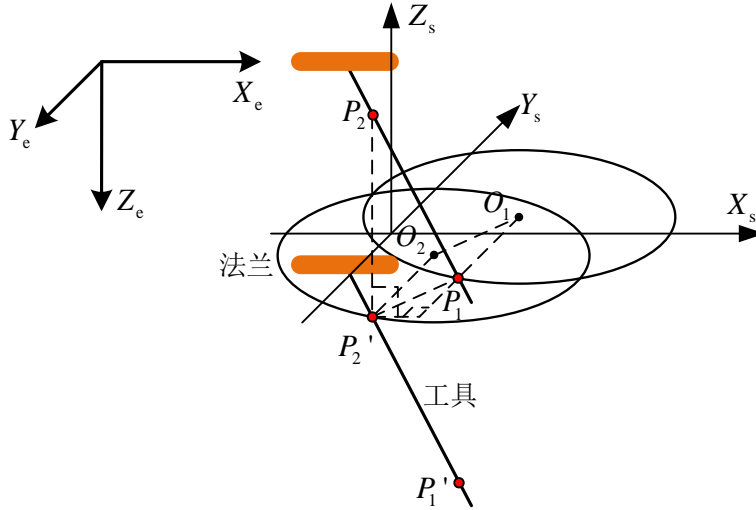


图4-10 十字交叉激光法第一步和第二步坐标系和运动轨迹示意图

工具主轴方向 $\overrightarrow{P_2 P_1}$ 在坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 下的坐标为:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{P_2 P_1} &= \overrightarrow{P_2 P_2'} + \overrightarrow{P_2' P_1} = \overrightarrow{P_2 P_2'} + \overrightarrow{O_2 O_1} \\ &= (0, 0, -\Delta z) + (d_{y1} - d_{y2}, d_{x1} - d_{x2}, 0) \\ &= (d_{y1} - d_{y2}, d_{x1} - d_{x2}, -\Delta z)\end{aligned}\quad (4-11)$$

由于 Y_e 轴和 Z_e 轴分别与 Y_s 轴和 Z_s 轴方向相反,因此在坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 下的坐标为:

$$\overrightarrow{P_2 P_1} = (d_{y2} - d_{y1}, d_{x1} - d_{x2}, \Delta z) = (\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (4-12)$$

根据欧拉角求解公式可得:

$$\begin{cases} \psi = \frac{-\Delta x}{|-\Delta x|} \arccos \frac{\Delta y}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}, -180^\circ \leq \psi < 180^\circ \\ \theta = \arccos \frac{\Delta z}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}}, 0^\circ \leq \theta < 180^\circ \\ \varphi = -\psi \end{cases} \quad (4-13)$$

根据(4-10)和(4-13)调节机器人末端姿态，使工具轴线与传感器坐标系 Z_s 轴平行。

然后将工具主轴移动到与 Z_s 轴重合的位置：

第三步：调整工具主轴方向，使其与 Z_s 轴方向一致，末端法兰坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 相对于坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 发生一定变化，如图 4-11 所示。再在激光对管平面内，以相同半径 R 和相同角速度 ω 做匀速圆周运动，计算对应的轨迹圆心 O_3 坐标 (d_{y3}, d_{x3}) 。

对工具进行平移，沿负 X_s 轴方向移动距离 d_{y3} ，沿负 Y_s 轴方向移动距离 $d_{x3} - R$ ，最终移动到虚线所示位置，此时工具主轴线与 Z_s 轴。

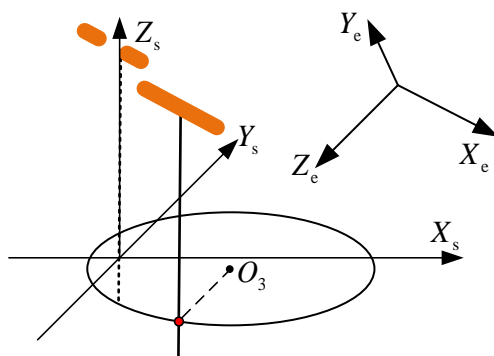


图 4-11 十字交叉激光法第三步坐标系和运动轨迹示意图

最后确定 TCP 点在末端法兰坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 下的位置 (x_0, y_0, z_0) ：

第四步：如图 4-12 所示，机器人携带末端工具做两次沿 Z_s 轴方向的运动，记录两束激光恰好被遮挡和恰好不被遮挡时刻法兰坐标系原点 O_e 的坐标，计算的四次坐标平均值 (x_e, y_e, z_e) 作为 TCP 点与十字交叉点 $O_s(x_s, y_s, z_s)$ 重合时法兰坐标系原点 O_e 位置。在机器人基坐标系下，根据 O_e 位置和十字交叉点 O_s 坐标计算出 TCP 在末端工具坐标系下的位置 (x_0, y_0, z_0) ：

$$(x_0, y_0, z_0) = (x_s, y_s, z_s) - (x_e, y_e, z_e) \quad (4-14)$$

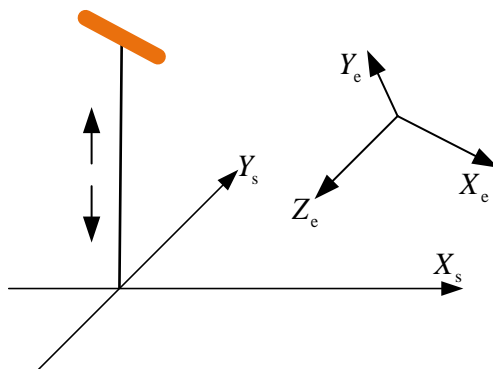


图 4-12 十字交叉激光法第四步坐标系和运动轨迹示意图

值得注意的是，理论上 X_s 轴、 Y_s 轴和 Z_s 轴分别与 X_b 轴、 Y_b 轴和 Z_b 轴平行，但实际情况并非如此，因此需要严格沿(或绕) X_s 轴、 Y_s 轴和 Z_s 轴方向进行平移运动(或做匀速圆周运动)，以此保证 TCP 校准精度。

4.3 测量系统标定与误差分析

理想情况下，传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 的 X_s 轴、 Y_s 轴和 Z_s 轴分别与机器人基坐标系的 X_b 轴、 Y_b 轴和 Z_b 轴平行。但由于加工工艺和安装精度的限制，该校准系统中存在一系列非理想情况： X_s 轴方向在 X_b 轴方向的基础上有小角度偏移、激光对管光线相互不垂直(即 X_s 与 Y_s 不垂直)、 $X_s O_s Y_s$ 平面与 $X_b O_b Y_b$ 平面不平行、两条激光对管光线所在拟合直线不相交造成无实际的 O_s 点等等。因此需要对传感器坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 中各个参数进行标定和误差分析，并对 4.2.2 节中出现的 TCF 计算公式做出相应改进，从而提高 TCF 坐标系标定精度。

4.3.1 TCF 快速自动校准传感器坐标系标定

由于十字交叉激光测量法通过遮挡激光计时的方法进行工具坐标系位姿间接测量，而传感器坐标系又是根据实际的激光对管发射的激光的实际方向定义的，因此需要对激光所在直线进行标定，并根据两条直线方程选择合理的坐标系原点和坐标轴方向。

如图 4-13 所示为标定激光所在直线方程的方法，该激光方向为 X_s 轴方向， X_b 轴和 Y_b 轴方向也如图 4-13 所示。通过测量该激光上两点 A 和 B 确定直线方程。测量过程中始终保持机器人末端法兰坐标系 X_e 轴方向与 X_b 方向一致， Y_e 轴和 Y_b 轴分别与 Z_e 轴和 Z_b 轴方向相反。本节为说明原理暂时使用了机器人末端法兰进行标定，实际标定中使用了配合法兰的专用标定工具，具体描述见 5.2.1 节。测量方法如下：

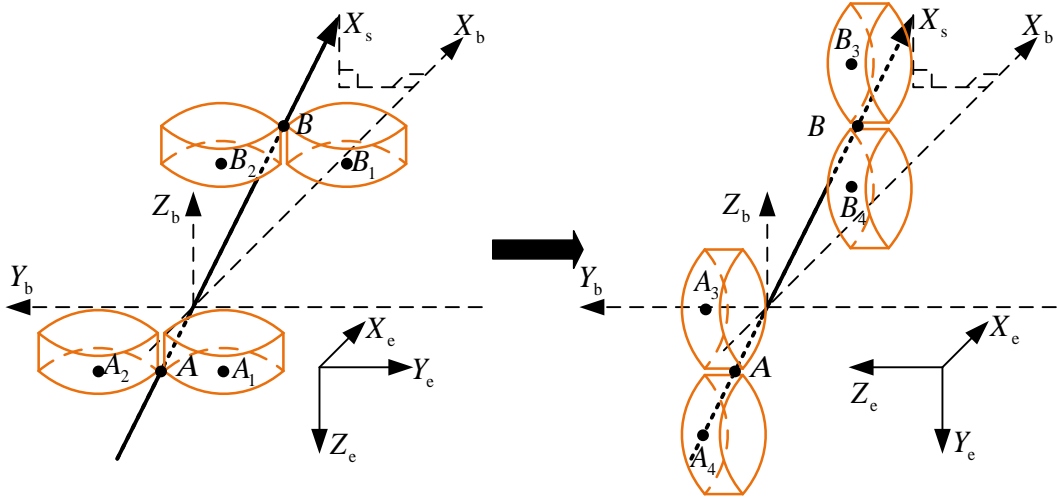


图 4-13 利用法兰盘测量激光光线上的两点

第一步, 如图 4-13 左图所示, 测量激光上 A 点在 X 和 Y 方向坐标: 沿 Y_b 轴方向移动机器人法兰, 在遮挡激光瞬间记录法兰坐标系原点在基坐标系下 X 和 Y 方向坐标 $A_1(x_{A1}, y_{A1})$; 继续沿 Y_b 轴方向平移, 在恰好不遮挡激光瞬间记录法兰坐标系原点在基坐标系下 X 和 Y 方向坐标 $A_2(x_{A2}, y_{A2})$; 根据空间对称性 A 点 X 和 Y 方向坐标为 A_1 点和 A_2 点坐标的中点, 因此点 A 坐标为:

$$A(x_A, y_A) = \left(\frac{x_{A1} + x_{A2}}{2}, \frac{y_{A1} + y_{A2}}{2} \right) \quad (4-15)$$

第二步, 如图 4-13 右图所示, 测量激光上 A 点在 Z 方向坐标: 调整法兰坐标系绕 X_b 轴旋转, 使 Z_e 轴与 Y_b 轴方向一致, 同时可沿 Y_b 轴和 Z_b 轴平移法兰, 使法兰位于 A 点正上方; 开始测量, 沿 Z_b 轴负方向移动机器人法兰, 在遮挡激光瞬间记录法兰坐标系原点在基坐标系下 Z 方向坐标 $A_3(z_{A3})$; 继续沿 Z_b 轴方向移动, 在恰好不遮挡激光瞬间记录法兰坐标系原点在基坐标系下 Z 方向坐标 $A_4(z_{A4})$; 根据空间对称性, 可计算点 A 坐标为:

$$A(x_A, y_A, z_A) = \left(\frac{x_{A1} + x_{A2}}{2}, \frac{y_{A1} + y_{A2}}{2}, \frac{z_{A3} + z_{A4}}{2} \right) \quad (4-16)$$

类似地, 可测量激光所在直线另一点坐标 $B(x_B, y_B, z_B)$, 根据点 A 和点 B 坐标可求得直线 AB 的参数方程为:

$$\begin{cases} x = x_A + (x_B - x_A)t = x_A + m_1 t \\ y = y_A + (y_B - y_A)t = y_A + n_1 t \\ z = z_A + (z_B - z_A)t = z_A + p_1 t \end{cases} \quad (4-17)$$

其中 t 为参数, $m_1 = (x_B - x_A)$, $n_1 = (y_B - y_A)$, $p_1 = (z_B - z_A)$ 。同理可测量方向为 Y_s 轴的激光所在直线上两点 $C(x_C, y_C, z_C)$ 和 $D(x_D, y_D, z_D)$, 并求得直线 CD 的参数方程为:

$$\begin{cases} x = x_C + (x_D - x_C)s = x_C + m_2s \\ y = y_C + (y_D - y_C)s = y_C + n_2s \\ z = z_C + (z_D - z_C)s = z_C + p_2s \end{cases} \quad (4-18)$$

其中 s 为参数, $m_2 = (x_D - x_C)$, $n_2 = (y_D - y_C)$, $p_2 = (z_D - z_C)$ 。

理论上, 直线 AB 和直线 CD 相交于点 O_s , 但由于测量误差存在, 式(4-17)和(4-18)代表的直线不一定相交, 此时选择直线 AB 和直线 CD 的公垂线段 PQ 中点 M 作为点 O_s , 如图 4-14 所示。

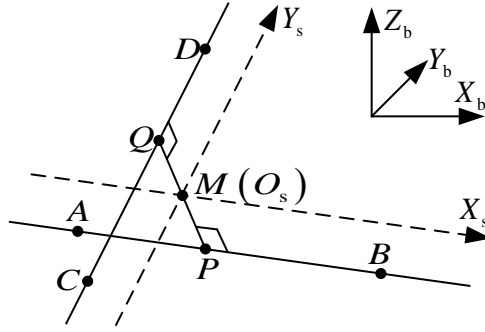


图 4-14 直线 AB 和直线 CD 的公垂线段中点作为点 O_s

由公垂线性质可知, 线段 PQ 长度为直线 AB 和直线 CD 上任意两点间最短距离, 结合式(4-17)和(4-18), 直线 AB 和直线 CD 上任意两点间距离的平方为两条直线方程参变量 t 和 s 的函数, 可表示为:

$$f(t, s) = (x_A - x_C + m_1t - m_2s)^2 + (y_A - y_C + n_1t - n_2s)^2 + (z_A - z_C + p_1t - p_2s)^2 \quad (4-19)$$

对函数 $f(t, s)$ 求偏导数得:

$$\begin{cases} \frac{\partial f(t, s)}{\partial t} = 2(k_1t - k_3s + k_4) \\ \frac{\partial f(t, s)}{\partial s} = 2(k_2s - k_3t - k_5) \end{cases} \quad (4-20)$$

其中 $k_1 = (m_1^2 + n_1^2 + p_1^2)$, $k_2 = (m_2^2 + n_2^2 + p_2^2)$, $k_3 = (m_1m_2 + n_1n_2 + p_1p_2)$,
 $k_4 = (x_A - x_C)m_1 + (y_A - y_C)n_1 + (z_A - z_C)p_1$,
 $k_5 = (x_A - x_C)m_2 + (y_A - y_C)n_2 + (z_A - z_C)p_2$ 。

令式(4-20)中偏导数均为 0, 可求解点 P 和点 Q 对应的参变量 t_P 和 s_Q 为:

$$\begin{cases} t_P = \frac{k_2k_4 - k_3k_5}{k_3^2 - k_1k_2} \\ s_Q = \frac{k_3k_4 - k_1k_5}{k_3^2 - k_1k_2} \end{cases} \quad (4-21)$$

将式(4-21)代入式(4-17)和(4-18)可分别求得坐标 $P(x_P, y_P, z_P)$ 和 $Q(x_Q, y_Q, z_Q)$, 取点 P 和点 Q 中点 $M(x_M, y_M, z_M)$ 作为 TCP 快速自动校准传感器坐标系原点:

$$\begin{cases} x_M = \frac{x_A + x_C + m_1 t_p + m_2 s_Q}{2} \\ y_M = \frac{y_A + y_C + n_1 t_p + n_2 s_Q}{2} \\ z_M = \frac{z_A + z_C + p_1 t_p + p_2 s_Q}{2} \end{cases} \quad (4-22)$$

TCF 坐标系 X_s 轴方向单位向量为:

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \frac{\overrightarrow{AB}}{|\overrightarrow{AB}|} = \frac{1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \begin{bmatrix} m_1 \\ n_1 \\ p_1 \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

Y_s 轴方向单位向量为:

$$\vec{m} = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \frac{\overrightarrow{CD}}{|\overrightarrow{CD}|} = \frac{1}{\sqrt{m_2^2 + n_2^2 + p_2^2}} \begin{bmatrix} m_2 \\ n_2 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (4-24)$$

Z_s 轴方向单位向量为:

$$\begin{aligned} \vec{p} &= \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \frac{\vec{n} \times \vec{m}}{|\vec{n} \times \vec{m}|} \\ &= \frac{1}{\sqrt{(n_y m_z - n_z m_y)^2 + (n_z m_x - n_x m_z)^2 + (n_x m_y - n_y m_x)^2}} \begin{bmatrix} n_y m_z - n_z m_y \\ n_z m_x - n_x m_z \\ n_x m_y - n_y m_x \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-25)$$

TCF 快速自动校准系统设计时, 理论上两激光相互垂直, 但由于加工误差、装配误差和标定误差等一系列原因存在, X_s 轴和 Y_s 轴方向不恰好垂直, 因此定义新的 Y_s' 轴方向为 TCF 坐标系 Y 轴方向, 使得 Y_s' 轴垂直于 X_s 轴和 Z_s 轴:

$$\vec{o} = \begin{bmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{bmatrix} = \vec{p} \times \vec{n} = \begin{bmatrix} p_y n_z - p_z n_y \\ p_z n_x - p_x n_z \\ p_x n_y - p_y n_x \end{bmatrix} \quad (4-26)$$

因此, 机器人基坐标系到校准传感器坐标系的转换关系为:

$$\mathbf{T}_s^b = \begin{bmatrix} n_x & o_x & p_x & x_M \\ n_y & o_y & p_y & y_M \\ n_z & o_z & p_z & z_M \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-27)$$

4.3.2 β 角的定义和新的坐标系转换公式

如 4.3.1 节所述, 在制造 TCP 快速校准测量系统时, 由于制造偏差等原因存在, 代表 X_s 轴方向的激光与代表 Y_s 轴方向的激光不可能恰好垂直, 因此定义角 β

为 X_s 轴与 Y_s 轴夹角，正方向为绕 Z_s 轴逆时针旋转方向。当 $\beta \neq 90^\circ$ 时，坐标平面 $X_s O_s Y_s$ 不是直角坐标平面，因此用与 X_s 轴和 Z_s 轴都垂直的 Y_s' 轴代替 Y_s 轴。在测量过程中，是通过工具遮挡激光获取时间信息，从而根据式(4-8)和(4-9)计算圆周运动圆心到 X_s 轴和 Y_s 轴的距离 d_x 和 d_y ，在坐标系 $X_s O_s Y_s$ 中获取的该位置信息需要转换到坐标系 $X_s O_s Y_s'$ 下的坐标信息。

如图 4-15 所示，即使 Y_s 轴与 X_s 轴相互不垂直，通过 $\angle 1 \sim \angle 4$ 计算偏心距的公式(4-9)仍然试用，得到的仍然是运动轨迹圆心 O_1 到 X_s 轴和 Y_s 轴的距离 d_x 和 d_y 。

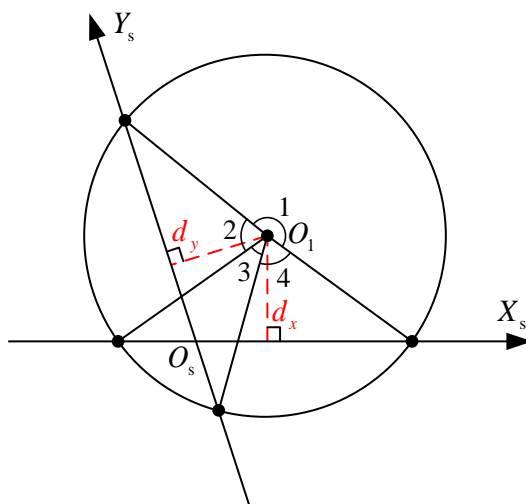


图 4-15 $\beta \neq 90^\circ$ 时距离 d_x 和 d_y 计算方法仍然适用

但由于 Y_s 轴与 X_s 轴相互不垂直，构成了斜坐标系 $X_s O_s Y_s$ ， d_x 和 d_y 不能直接作为圆心 O_1 的横纵坐标。通过图 4-16 可得圆心 O_1 在斜坐标系 $X_s O_s Y_s$ 下的坐标 (x_1, y_1) 为：

$$(x_1, y_1) = \left(\frac{d_y}{\cos(\beta - 90^\circ)}, \frac{d_x}{\sin \beta} \right) \quad (4-28)$$

在平面 $X_s O_s Y_s$ 内，做 Y_s' 轴垂直于 X_s 轴，由解析几何可得圆心 O_1 在直角坐标系 $X_s O_s Y_s'$ 下的坐标 (x_2, y_2) 为：

$$(x_2, y_2) = \left(x_1 + \frac{d_x}{\tan \beta}, d_x \right) = \left(\frac{d_y}{\cos(\beta - 90^\circ)} + \frac{d_x}{\tan \beta}, d_x \right) \quad (4-29)$$

式(4-29)说明圆周运动圆心到 X_s 轴距离 d_x 仍为纵坐标，但横坐标表达式发生了较大变化，因此应以坐标 (x_2, y_2) 修正坐标 (d_y, d_x) 。如果不加修正，其误差值为：

$$\Delta E = d_y - x_2 = d_y - \frac{d_y}{\cos(\beta - 90^\circ)} - \frac{d_x}{\tan \beta} \quad (4-30)$$

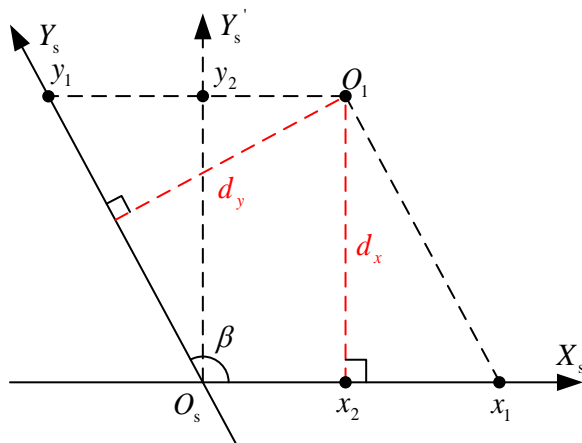
图 4-16 坐标系 $X_s O_s Y_s$ 到坐标系 $X_s O_s Y'_s$ 坐标转换

图 4-17 表示的即是圆周运动圆心横坐标未修正误差变化曲线，选取 $d_x = d_y = 5\text{mm}$ ， $-5^\circ \leq \beta - 90^\circ \leq 5^\circ$ ，由图 4-17 可知该误差曲线类似奇函数，因此当 β 接近 90° 时，式(4-30)中误差项 $-\frac{d_x}{\tan \beta}$ 起主要作用，而 $d_y - \frac{d_y}{\cos(\beta - 90^\circ)}$ 这一项近似为 0，误差也会随着 d_x 绝对值的增大而增大。当 β 值超出 $\pm 1.2^\circ$ 时，误差 ΔE 就已经超出 $\pm 0.1\text{mm}$ 因此用式(4-30)进行修正十分必要。

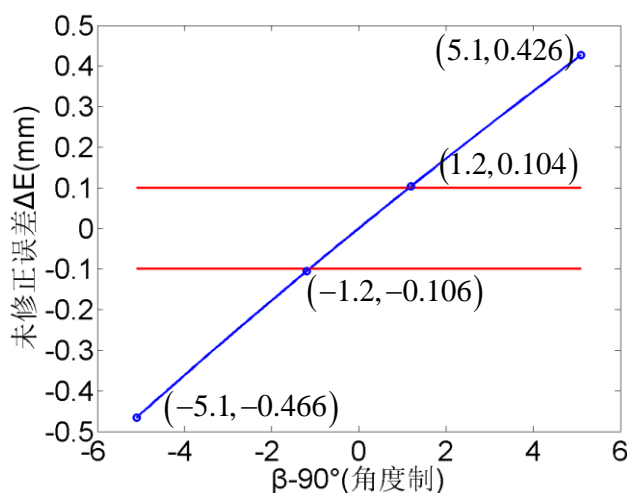


图 4-17 轨迹圆心坐标修正前后误差图

4.4 本章小结

本章首先总结了已有 TCP 校准的方法，包括传统的需要人工参与的七点法和自动化程度相对较高的平行激光法。但这两种方法在精度和速度上都不能满足制造现场需求，因此设计了校准速度更快、精度更高的十字交叉激光法。然后分

析了该方法的基本测量原理，总共分为四步，首先标定末端工具轴线方向，再确定 TCP 在末端法兰坐标系下的位置，最后得到 5D 校准坐标系 TCF。为了保证测量精度，最后详细说明测量系统需要标定参数的方法并对系统误差进行分析，修正测量原理中坐标表达式。

第5章 精度维护实验验证

5.1 温度补偿实验

5.1.1 实验系统搭建及系统标定结果

第3章提出的机器人温度误差在线补偿方法是针对工业现场从事如焊接、搬运、冲孔等通用工作的工业机器人。机器人在长时间高速运行过程中，由于温度效应存在，机器人焊接或冲孔的位置将发生偏移。基于3.1节所述的温度误差补偿方法，利用校准视觉测量系统在不同的机器人姿态下测量末端基准球，可以识别机器人关节参数的变化，并结合机器人逆运动学原理和数值迭代方法，修正机器人各运动关节转角，修正温度效应带来的机器人末端法兰漂移。

由于如焊接、冲孔等机器人系统不易搭建，而且这类系统中的温度误差无法直观评价，只能通过人眼或卡尺评价焊点位置变化，因此搭建了如图5-1所示机器人测试系统，由机器人、白车身、末端工具、基准球和校准视觉测量系统五部分组成。

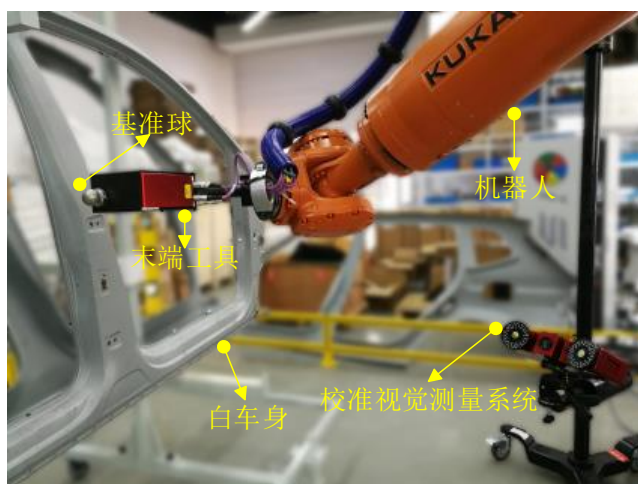


图 5-1 机器人温度误差补偿实验系统

为了获取温度漂移数据，末端工具使用视觉传感器代替焊枪等工具，与固定位置的校准视觉测量系统的传感器不同，该处的视觉传感器可随机器人姿态改变而运动。

实验使用的校准视觉传感器为双目条纹投影测量系统，如图5-2所示。虽然目前应用较多的是单目结构光测量系统^[49-51]，但单目结构光传感器只能获得结构

光平面上的点云，测量区域较小，对机器人运动姿态限制较大。由式(3-8)可知，机器人温度误差补偿需要机器人将基准球从多个不同的姿态运动至传感器上方进行测量，以保证参数识别的精度，单目结构光较小的测量范围必然影响系统最终的补偿精度。而且为了保证测量精度，单目结构光测量系统的投射角范围需要在 45° 到 75° 之间^[50]，这进一步限制了机器人末端基准球的测量范围。而采用双目条纹投影测量系统投影面广、视场范围大，对机器人运动姿态限制小。另外，单目结构光测量系统是通过拟合结构光平面与基准球相交圆圆心位置间接求解球心坐标^[50]；而双目条纹投影测量系统利用条纹投影的相位信息辅助双目相机进行同名点匹配，得到基准球表面大量点云，通过点云直接拟合球心位置，球心测量精度比单目结构光测量精度高。

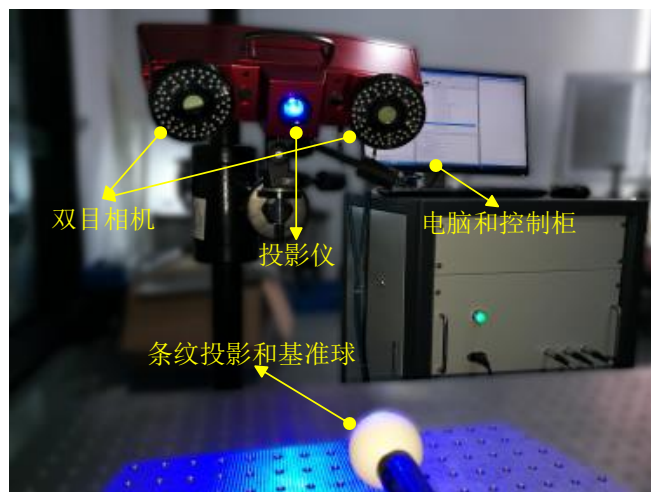


图 5-2 双目视觉测量实验系统

如图 5-2 所示的双目视觉测量系统，采用两个 IMPERX B3320M 相机并装配两个 ZEISS Distagon T* 2.8/25 定焦镜头，相机分辨率为 3312×2488 。投影仪为 TI 公司的 LightCrafter 4500 PRO，分辨率为 912×1140 。双相机系统在工作距 700mm 处的视场约 $570\text{mm} \times 430\text{mm}$ 。在设定机器人测量姿态时应保证基准球在该双目条纹投影传感器的标定范围之内，同时不同测量姿态六轴转角在允许范围内都有较大的差异，从而保证标定精度。利用搭建好的双目条纹投影传感器测量一根标准的球杆，测量结果显示，基准球半径误差和球间距误差分布为 -0.02mm 和 -0.018mm ，精度满足实验过程中基准球测量要求。

机器人末端基准球采用精密轴承球，直径为 $38.1 \pm 0.01\text{mm}$ ，其材料为掺杂了 6% 钴元素的碳化钨，莫氏硬度达到 9.5，热膨胀系数极低，对热冲击和温度波动有极强的抵抗作用^[49]。该基准球符合温度误差补偿要求，视觉测量系统将其球心作为特征点进行测量。

搭建完实验系统后首先标定校准视觉传感器坐标系到机器人基坐标系的转换关系 T_b^s 和特征点在机器人末端法兰坐标系下的坐标 P_e 。机器人携带基准球运动 9 个姿态，校准视觉传感器对基准球球心进行测量，如图 5-3 所示。记录机器人关节参数和校准视觉传感器测量球心的坐标位置，根据式(3-18)求解 T_b^s 和 P_e ，结果为：

$$T_b^s = \begin{bmatrix} 0.9003 & -0.1695 & -0.4009 & 2037.2109 \\ -0.1695 & 0.7117 & -0.6817 & -1761.8217 \\ 0.4009 & 0.6817 & 0.6120 & 343.7652 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

$$P_e = \begin{bmatrix} 43.0823 \\ -5.6419 \\ 306.7015 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$



图 5-3 校准视觉传感器测量基准球球心

5.1.2 参数筛选结果

标定后，获取机器人长时间运行的漂移数据，该数据用于运动学模型参数筛选流程。机器人带动末端工具（视觉传感器）对白车身上多个特征孔进行测量。在每个测量周期中，首先对车身上 34 个测点进行测量，完成车身上测点测量后，机器人再带动基准球至校准视觉传感器上方，校准视觉传感器从 20 个不同的姿态测量基准球球心位置。单次测量循环的时间约 3 分钟，共获取 90 组数据，每组数据包括 34 个车身测点在末端工具（视觉传感器）下的坐标和 20 个基准球球心在校准视觉传感器下的坐标；记录 54 个姿态下机器人六轴角度信息。

根据 3.2 节提出的机器人运动学模型参数筛选方法,从 KR150R3100 机器人最初的 24 个参数中筛选出显著变化的 8 个参数,在线温度误差补偿时机器人只需要携带基准球进行 6 个位姿的测量即可较好地解算 8 个参数。筛选过程如表 5-1 所示,最终筛选参数结果为: $d_4, d_6, a_1, a_2, a_3, \alpha_3, \alpha_4, \beta_2$ 。可以发现,内部热源发热的确只导致部分参数发生显著变化,但不一定为非零长度参数,也证明传统方法中只考虑补偿非零长度量是不完善的。

表 5-1 参数筛选过程

$card(\Delta X_0)$	被去掉 参数	λ 值 (%)	平稳变化参数集合 S
24	-	7.95	$\theta_1, \theta_3, \theta_5, \theta_6, \alpha_1, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, d_3, d_5, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$
23	θ_6	61.36	$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \alpha_1, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, d_1, d_3, d_5, a_1, a_3, a_4, a_5$
22	θ_4	77.27	$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_5, \alpha_1, \alpha_5, \alpha_6, d_1, d_3, d_5, a_3, a_4, a_6$
21	θ_3	77.27	$\theta_1, \theta_2, \theta_5, \alpha_1, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, d_1, d_3, d_5, d_6, a_1, a_4, a_6$
20	θ_1	76.14	$\theta_2, \theta_5, \alpha_1, \alpha_5, \alpha_6, d_1, d_3, d_5, a_4, a_6$
19	θ_5	77.27	$\theta_2, \alpha_1, \alpha_5, \alpha_6, d_1, d_3, d_5, a_1, a_4, a_5, a_6$
18	θ_2	75.00	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_5, \alpha_6, d_3, d_5, a_4, a_5$
17	a_6	84.09	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, d_1, d_5, a_4, a_5$
16	α_2	89.77	$\alpha_1, \alpha_5, \alpha_6, d_1, d_3, d_5, a_4, a_5$
15	α_1	93.18	$\alpha_5, \alpha_6, d_3, d_5, a_4, a_5$
14	a_5	93.18	$\alpha_5, \alpha_6, d_1, d_3, d_5, d_6, a_5$
13	α_5	93.18	$\alpha_6, d_1, d_3, d_5, a_5$
12	d_5	93.18	α_6, d_1, d_3, a_5
11	d_1	93.18	α_6, d_3, a_5
10	α_6	90.91	d_3, a_5
9	a_4	90.91	d_3
8	d_3	90.91	-

残差优于 0.1mm 的监测方向所占百分比的 λ 值曲线如图 5-4 所示,可以看出随着补偿参数个数减少, λ 值整体呈上升趋势,当补偿参数个数减小到 10 以后, λ 值略有下降,说明补偿参数也不可过少,解算方程个数一般为补偿参数个数的 2~3 倍即可。

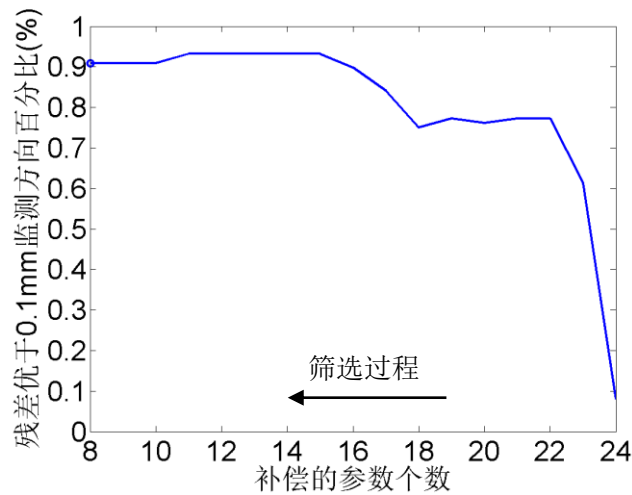


图 5-4 残差优于 0.1mm 的监测方向所占百分比的 λ 值曲线

5.1.3 实验数据及分析

参数筛选后利用新的参数组合对参数值进行辨识，结合机器人六轴角度和末端工具（视觉传感器）测量值对车身测点坐标进行从新计算。整个测试重复进行 3 次，补偿统计结果如表 5-2 所示。表中数据显示，论文提出的温度补偿方法和参数选取策略优于传统方法。用 8 个参数替代全部参数进行补偿，也可有效提高温度误差补偿效率。

表 5-2 残差优于 0.1mm 监测方向百分比(%)

测试序号	补偿前	传统方法	论文方法
1	43.18	73.86	90.91
2	49.41	80.00	96.47
3	48.05	87.01	94.81

车身某测点两种方法的补偿效果如图 5-5 所示，传统方法只在 y 方向补偿效果较好，本文方法在三个坐标方向补偿效果均较好。

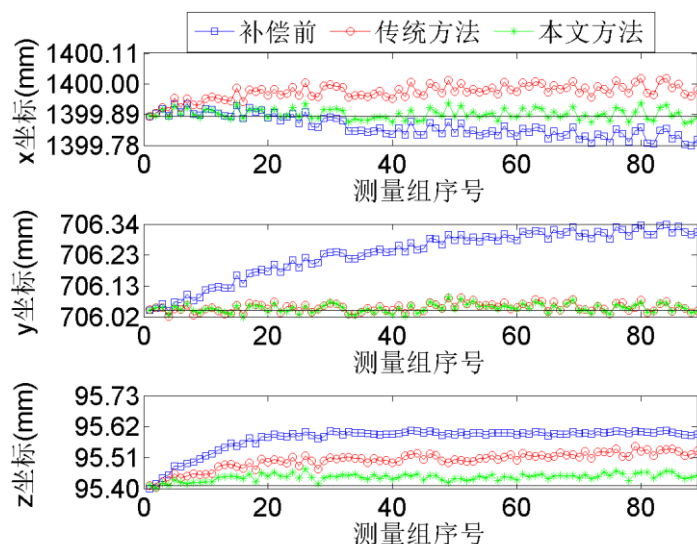


图 5-5 补偿效果对比图

5.2 TCF 自动校准实验

5.2.1 实验平台搭建

如图 5-6 所示，为 TCF 快速自动校准方法实验验证平台，使用 UR10 机器人对测量系统进行系统标定和精度验证实验，UR10 机器人重复定位精度为 0.1mm。机器人末端携带经过精密加工的仿真涂胶工具头，用于系统标定和工具坐标系精度验证。测量系统使用的激光对管尺寸为直径 12mm，长 35mm，工作距离 0~30 米。采用 ROMER 超高精度绝对臂测量机测量涂胶工具 TCP 点，验证工具坐标系重新标定的重复定位精度。涂胶工具仿真头尖端加工出锥形内窝，如图 5-7 所示，配合测量机 probe 圆形测头，可保证每次测量 TCP 位置均为同一点。

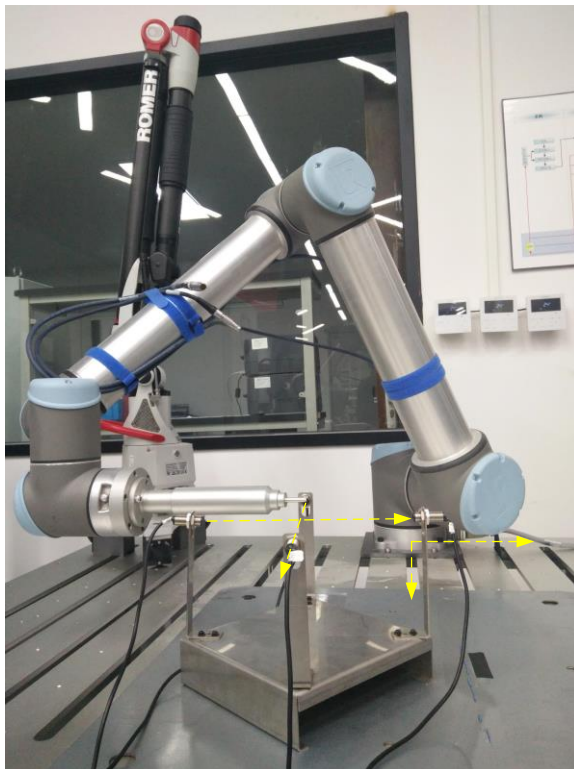


图 5-6 TCF 自动校准实验平台

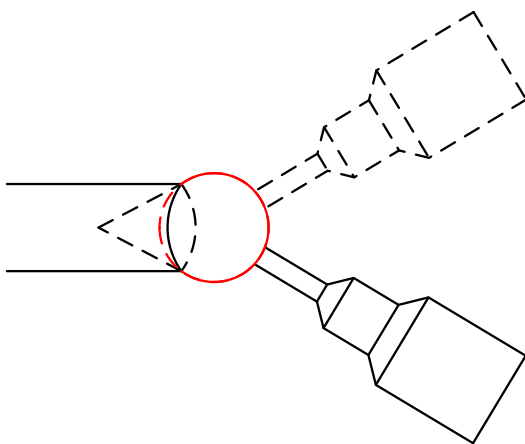


图 5-7 Probe 测量 TCP 示意图

5.2.2 TCP 快速自动校准系统标定

根据 4.3.1 节提出的十字交叉激光测量系统标定方法，对搭建的实验装置进行标定，由于某些型号的机器人末端法兰盘体积较大，无法用于十字交叉激光测量系统的标定过程，需要在法兰盘上安装特制的用于标定的工具，如图 5-6 所示。该测量工具经过精密机械加工，安装后工具轴心恰好与末端法兰坐标系的 Z_0 轴重合。用该工具可完全取代 4.3.1 节中法兰在系统标定中的作用，而且解决了某些型号机器人末端法兰体积过大的问题。

首先测量激光所在直线上点 A 、 B 、 C 、 D 坐标, 向量 \overrightarrow{AB} 为 X_s 轴正方向, 向量 \overrightarrow{CD} 为 Y_s 轴正方向, 测量的原始数据如表 5-3 所示, 表中字母含义与 4.3.1 节中完全一致, 下同。根据表 5-3 数据和式(4-16)~(4-18)计算对应点的坐标和直线参数方程, 结果如表 5-4 所示。

表 5-3 激光方程标定原始数据

法兰 中心点	坐标(mm)	法兰 中心点	坐标(mm)
A_1	(793.67, -128.61, 207.45)	C_1	(796.99, -132.40, 207.44)
A_2	(793.68, -123.65, 207.46)	C_2	(801.95, -132.43, 207.45)
A_3	(793.66, -139.26, 196.72)	C_3	(786.35, -132.42, 196.86)
A_4	(793.68, -139.23, 191.76)	C_4	(786.31, -132.44, 191.92)
B_1	(805.58, -128.96, 207.46)	D_1	(796.87, -120.35, 207.47)
B_2	(805.56, -124.01, 207.47)	D_2	(801.84, -120.34, 207.47)
B_3	(805.57, -139.27, 197.19)	D_3	(786.32, -120.36, 197.13)
B_4	(805.55, -139.25, 192.24)	D_4	(786.35, -120.37, 192.19)

表 5-4 激光上点坐标和激光所在直线方程

激光 测量点	坐标(mm)	直线	直线 参数方程
A	(793.68, -126.13, 194.24)	AB	$\begin{cases} x = 793.68 + 11.89t \\ y = -126.13 - 0.35t \\ z = 194.24 + 0.47t \end{cases}$
B	(805.57, -126.48, 194.71)		
C	(799.47, -132.42, 194.39)	CD	$\begin{cases} x = 799.47 - 0.11s \\ y = -132.42 + 12.07s \\ z = 194.39 + 0.27s \end{cases}$
D	(799.36, -120.35, 194.66)		

得到直线 AB 和 CD 参数方程后, 结合式(4-20)~(4-22)可计算出两条直线公垂线的中点 M 坐标, 如表 5-5 所示; 结合式(4-23)~(4-26)可求出 X_s 轴、 Y_s 轴、 Z_s 轴、 Y'_s 轴正方向单位向量 \vec{n} 、 \vec{m} 、 \vec{o} 、 \vec{p} 的值, 如表 5-5 所示。

表 5-5 TCF 校准传感器坐标系原点和坐标轴单位向量计算结果

点	坐标(mm)	单位 向量	坐标(mm)
<i>M</i>	(7799.42, -126.30, 194.50)	\vec{n}	(0.9988, -0.0294, 0.0395)
		\vec{m}	(-0.0091, 0.9997, 0.0224)
		\vec{o}	(-0.0402, -0.0227, 0.9989)
		\vec{p}	(0.0285, 0.9993, 0.0239)

根据表 5-5 和式(4-27)可得机器人基坐标系到校准传感器转换关系为:

$$\mathbf{T}_s^b = \begin{bmatrix} 0.9988 & 0.0285 & -0.0402 & 799.42 \\ -0.0294 & 0.9993 & -0.0227 & -126.30 \\ 0.0395 & 0.0239 & 0.9989 & 194.50 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

根据向量 \vec{n} 和 \vec{m} 计算 β 值为:

$$\beta = \arccos(\vec{n} \cdot \vec{m}) = \arccos(-0.0376) = 87.85^\circ \quad (5-4)$$

5.2.3 TCP 快速校准测量系统修正结果及分析

系统标定后, 根据 4.2.2 节和 4.3.2 节方法进行工具坐标系测量。首先测量工具处于正常安装状态下工具坐标系的位姿, 测量结果为:

$$\mathbf{T}_{tcp}^e = \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0000 & -0.0016 & 0.2388 \\ -0.0000 & 1.0000 & -0.0012 & 0.1791 \\ 0.0016 & 0.0012 & 1.0000 & 149.2497 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

测量后手动调整工具 TCP 点与某一固定点重合, 如图 5-8(a)图所示, 记录此时 TCP 点在基坐标系下的坐标为 (795.14, -280.09, 150.19)。手动调整机器人姿态至任意位置, 记录此时 TCP 点在基坐标系下的坐标为 (795.18, -230.17, 240.12), 用 probe 对工具尖端进行测量, 如图 5-9(a)图所示, 记录此时 TCP 点在 probe 下的坐标为 (768.452694, 27.578469, 194.809524)。

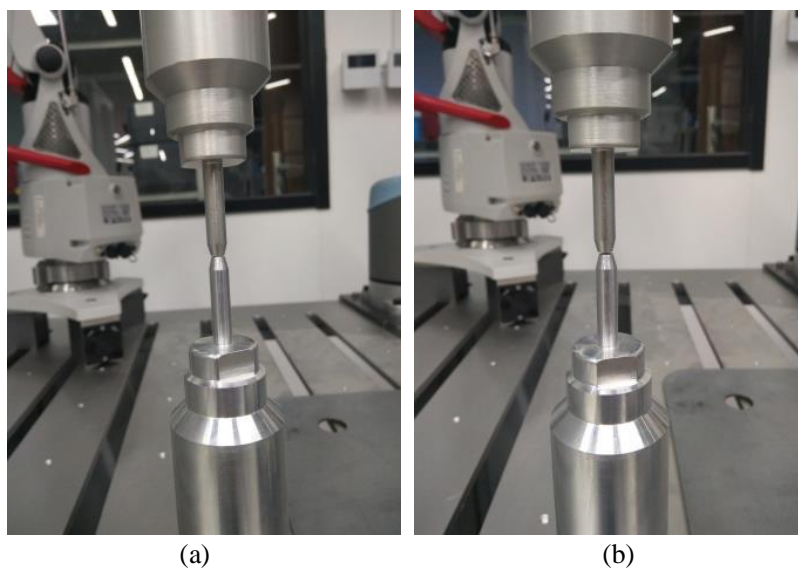


图 5-8 校准后到达特定点对比图：(a)工具处于正常状态；(b)工具处于偏斜状态

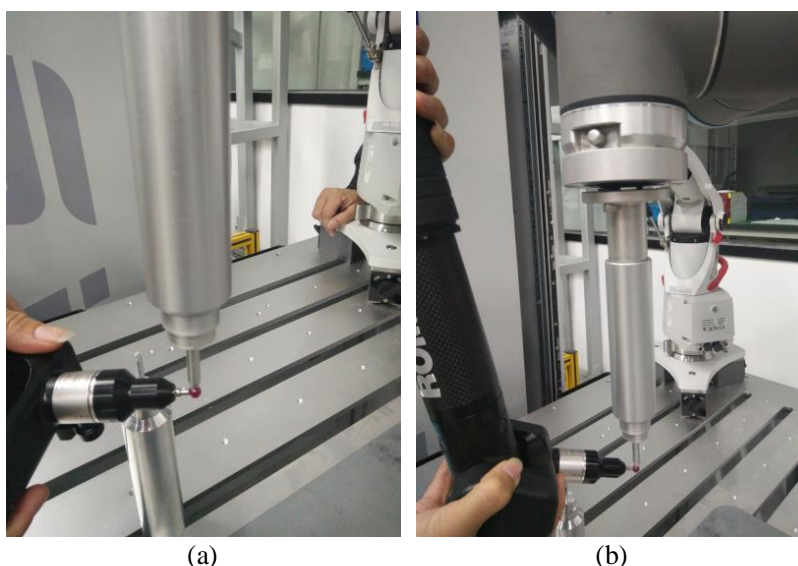


图 5-9 绝对臂测量机分别测量特定点的坐标：(a)工具处于正常状态；(b)工具处于偏斜状态

工具与法兰之间加入垫片后，再测量工具处于偏斜状态下工具坐标系的位姿，测量结果为：

$$\mathbf{T}_{\text{tcp}}^e = \begin{bmatrix} 0.9963 & 0.0051 & 0.0857 & -13.2159 \\ 0.0051 & 0.9929 & -0.1187 & 18.2912 \\ -0.0857 & 0.1187 & 0.9892 & 152.3880 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

在机器人控制器中输入坐标(795.14,-280.09,150.19)，TCP 点到达的位置如图 5-8(b)图所示；输入坐标(795.18,-230.17,240.12)，TCP 点到达的位置如图 5-9(b)图所示，此时再次用 probe 对工具尖端进行测量，记录此时 TCP 点在 probe 下的

坐标为(768.357495,27.653641,194.430964)。通过调整垫片位置变换工具坐标系位姿，用 probe 重复测量 TCP 点坐标的结果如表 5-6 所示。

表 5-6 TCP 校准 10 次后 probe 测量 TCP 点坐标的结果

测量序号	坐标(mm)
1	(768.452694,27.578469,194.809524)
2	(768.357495,27.653641,194.430964)
3	(768.705367,27.184856,195.205489)
4	(768.356934,28.025085,194.523618)
5	(768.096584,27.478632,194.725965)
6	(768.769512,27.269856,194.324815)
7	(767.932908,27.195469,194.256489)
8	(768.489635,27.501527,194.360974)
9	(768.365807,27.388902,194.656982)
10	(768.254907,27.460258,195.136850)

根据表 5-6 中数据可计算此 10 个测点的位置均方根误差为 0.48mm。该精度与传统七点法精度水平相当，测量时间仅为 15s。

5.3 本章小结

本章对第 3 章和第 4 章提出的温度误差补偿模型和 TCP 快速自动校准方法进行了实验验证，结果表明两种测量系统测量精度和耗时均可达到机器人在线精度维护要求。由于温度变化引起的机器人运动学模型参数不会突变，所以在精度维护过程中先进行温度误差补偿，再进行 TCP 校准，形成一套完整的精度维护流程。制造现场的工业机器人需要定期执行该流程对应程序，达到精度维护的目的。

第6章 总结与展望

6.1 全文总结

论文针对制造现场中工业机器人长期工作过程中出现的两类典型精度漂移问题进行研究,并提出相应的可应用于制造现场的精度维护方法。首先明确机器人长期在线精度维护的两大问题,即温度变化对运动学模型参数的影响和长期工作过程中工具坐标系位姿的改变,两者都会引起工具尖端实际运行轨迹和规划轨迹的偏差。研究过程中,从基础理论入手,分析问题本质,从而找到更好的补偿模型和校准方法。注重理论与实用性并重,提出的解决方案可以有效解决制造现场工业机器人精度维护的实际问题。通过实验证明方法满足精度要求,实验数据与理论研究相符。对本文的研究内容和创新点总结如下:

(1) 分析了工业机器人在当今智能制造领域的重要地位,作为未来九大科技中的重要硬件支柱,进一步提高其在线长期精度维护技术水平具有重要意义;分析了目前国内外机器人精度维护的发展现状,包括温度误差补偿和工具坐标系标定技术;在分析了制造现场提出的新需求的基础上,明确了机器人精度维护的新要求,为研究工作的开展提供了指导方向。

(2) 把机器人正向运动学模型作为研究内容的入手点,明确测量领域中坐标系之间转换关系、点坐标在坐标系之间的转换关系和向量在坐标系之间的转换关系;研究机器人 DH 模型并根据 BX200L 机器人的实际操作和机器人手册中的机器人尺寸推导 DH 模型参数, matlab 验证其正确性; DH 模型参数辨识过程中容易出现病态矩阵,因此在温度补偿时使用修正的 DH 模型;最后研究了工具坐标系建立的标准以及工具坐标系和运动学模型参数对精度维护的影响。

(3) 研究了温度误差补偿的方法。首先基于微分运动学建立温度误差补偿模型,为提高温度误差补偿精度,采用双目条纹投影法测量特征点坐标;提出新的参数筛选流程,并筛选出新的补偿参数组合,提高了温度误差补偿精度;针对新的温度误差补偿系统建立了新的系统标定方法,可同时标定特征点在末端法兰坐标系下的位置和校准视觉传感器坐标系到机器人基坐标系的转换关系。

(4) 在保证温度对机器人精度维护影响降到误差允许范围内的情况下,继续研究工具坐标系变化对精度维护的影响。在研究了工具坐标系传统的标定技术和已有的自动校准方法后,提出一种基于十字交叉激光的快速自动校准方法;针

对该方法建立一套完整的系统参数标定和工具坐标系校准流程；分析系统误差，从而提出提高测量精度的策略。

(5) 实验验证分为两部分：温度误差补偿实验通过一组数据进行参数筛选，得到参数组合应用于另外两组实验数据，结果表明该参数组合优于传统的温度参数组合，补偿效果明显提升；工具坐标系校准实验通过直观结果和定量数据说明校准精度可达 $\pm 0.5\text{mm}$ ，测量时间仅为 15s，达到了初期精度标准。

6.2 工作展望

由于条件限制，论文对一些问题的分析、处理和验证方法仍然有研究空间，主要包括以下几个方面：

(1) 本文介绍的 DH 模型与 MDH 模型区别主要参考相关文献内容并加以理解，DH 模型在参数识别过程中是否产生病态并使参数 d_i 产生巨大变化都没有进行仿真实验验证，可以通过 MATLAB 仿真进行验证，从根本上对 MDH 模型优越性进行理解，甚至有可能提出更好的机器人修正运动学模型。

(2) 本文从实际应用的实用性考虑，因此温度误差模型建立在机器人标定模型基础上，参数筛选的流程依托历史数据，模型中对实际温度值并不关心，后续研究可尝试直接建立温度与温度误差之间的关系，加入温度传感器，分析传感器的布局和布置精度对温度误差模型的影响。

(3) 工具坐标系标定实验程序普适性较差，需要进一步进行模块化编程，增加用户自定义函数，用户可根据不同型号机器人通信方式和不同尺寸的末端工具 TCF 标定，从而将程序快速移植到不同机器人控制程序当中。

(4) 对工具坐标系标定精度验证只进行了重复定位精度验证，需要进一步设计简单实用的实验进行绝对定位精度验证，对 TCF 校准系统标定过程利用了绝对定位精度相互抵消的方法，但并没有进行严格的理论证明和相关实验验证，后续可进一步进行研究。

参考文献

- [1] 忻华. 中国制造迈出“由大变强”第一步制造强国战略第一个十年行动纲领的六个关键词[J]. 上海质量, 2015(5).
- [2] 吕铁, 吴福象, 魏际刚,等. “中国制造 2025”的六重玄机 改革传媒发行人、编辑总监王佳宁深度对话六位知名学者[J]. 改革, 2015(4).
- [3] 中国青年网. 全球视野下的工业 4.0 和中国制造 2025[J]. 中国机械, 2016(1).
- [4] 何玉庆, 赵忆文, 韩建达,等. 与人共融——机器人技术发展的新趋势[J]. 机器人产业, 2015(5): 74-80.
- [5] 何玉庆, 韩建达. 机器人技术发展路线图理论与实践[M]. 辽宁科学技术出版社, 2016.
- [6] 蔡自兴, 郭璠. 中国工业机器人发展的若干问题[J]. 机器人技术与应用, 2013(3): 9-12.
- [7] 于海斌. 智能制造与机器人技术发展新趋势 [N]. 人民日报, 2015-08-02(005).
- [8] 孙志杰, 王善军, 张雪鑫. 工业机器人发展现状与趋势[J]. 吉林工程技术师范学院学报, 2011, 27(7): 61-62.
- [9] 张善永. 石材立体工艺制品雕刻机器人加工技术研究[D]. 山东大学, 2012.
- [10] 刘旭. 铣削工业机器人在自由曲面仿形加工中的应用研究[D]. 北京交通大学, 2008.
- [11] 赵晓飞, 郭丽峰. 工业机器人在机械加工中的应用[J]. 机械研究与应用, 2015(3): 113-115.
- [12] Shiakolas P S, Conrad K L, Yih T C. On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots[J]. International Journal of Modelling & Simulation, 2002, 22: 245-254.
- [13] Groover M P, Weiss M, Nagel R N. Industrial Robotics: Technology, Programming and Application[M]. McGraw-Hill Higher Education, 1986.
- [14] Slamani M, Nubiola A, Bonev I. Assessment of the positioning performance of an industrial robot[J]. Industrial Robot, 2012, 39(1): 57-68.
- [15] 涂露芳. 福田汽车生产速度追不上订单[N]. 北京日报, 2013-12-22(001).
- [16] Roth Z S, Mooring B W, Ravani B. An overview of robot calibration[J]. Information Technology Journal, 1987, 3(1):377-385.

- [17] Hollerbach J M. A survey of kinematic calibration[M]// The robotics review 1. MIT Press, 1989: 207-242.
- [18] Mooring B, Driels M, Roth Z. Fundamentals of Manipulator Calibration[M]. John Wiley & Sons, Inc. 1991.
- [19] Buschhaus A, Griinsteudel H, Franke J. Geometry-based 6D-pose visual servoing system enabling accuracy improvements of industrial robots[C]// International Conference on Advanced Mechatronic Systems. IEEE, 2017: 195-200.
- [20] Heisel U, Richter F, Wurst K H. Thermal Behaviour of Industrial Robots and Possibilities for Error Compensation[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1997, 46(1): 283-286.
- [21] Gong C, Yuan J, Ni J. Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(14): 2119-2137.
- [22] Lertpiriyasuwat V, Berg M C. Adaptive real-time estimation of end-effector position and orientation using precise measurements of end-effector position[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(3): 304-319.
- [23] Santolaria J, Yagüe J A, Jiménez R, et al. Calibration-based thermal error model for articulated arm coordinate measuring machines[J]. Precision Engineering, 2009, 33(4): 476-485.
- [24] 王一,任永杰,郝继贵,叶声华. 测量机器人在线动态温度误差补偿技术[J]. 光电子.激光, 2009, 20(04): 491-494.
- [25] Li R, Zhao Y. Dynamic error compensation for industrial robot based on thermal effect model[J]. Measurement, 2016, 88:113-120.
- [26] 朴永杰, 邱涛, 陈善本. 弧焊机器人 TCF 参数的标定[J]. 机器人, 2001, 23(2): 109-112.
- [27] 宋月娥, 吴林, 田劲松,等. 弧焊机器人工具参数标定[J]. 焊接学报, 2001, 22(5):1-4.
- [28] 赵娇娇, 朱伟. 弧焊机器人系统标定[J]. 福州大学学报, 2008, 36(s1):36-39.
- [29] 刘蕾. 一种弧焊机器人工具标定方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2014(9): 76-77.
- [30] 周祥. 工业机器人工具及工件坐标系的标定研究[D]. 南京理工大学, 2015.
- [31] 刘常杰, 班荣兴, 郭寅,等. 基于双目视觉机器人 TCP 校准方法研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1912-1917.
- [32] Paananen V J. Dual light barrier method for six degrees of freedom tool center point calibration of an industrial robot[J]. Lutpub, 2014.

- [33] Kaabar M K A. A First Course in Linear Algebra: Study Guide for Undergraduate Linear Algebra Course[M]. 2014.
- [34] Luhmann T, Robson S, Kyle S, et al. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging[M]. 2013.
- [35] Plucker J. On a New Geometry of Space[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1989, 155(11): 725-791.
- [36] Denavit J, Hartenberg R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices[J]. Trans.of the Asme,journal of Applied Mechanics, 1955, 22: 215-221.
- [37] Hayati S A. Robot arm geometric link parameter estimation[C]// Decision and Control, 1983. the, IEEE Conference on. IEEE, 1983:1477-1483.
- [38] 刘成业, 李文广, 马世国,等. 一种机器人工具坐标系标定方法[J]. 山东科学, 2012, 25(1): 69-74.
- [39] 吴聊, 杨向东, 蓝善清,等. 基于平面模板的机器人 TCF 标定[J]. 机器人, 2012, 34(1):98-103.
- [40] 胡敏. 浅谈机器人离线编程软件在机器人教学中的应用[J]. 青年时代, 2016(17):163-163.
- [41] 蔡自兴, 谢斌. 机器人学.第3版[M]. 清华大学出版社, 2015.
- [42] Park I W, Lee B J, Cho S H, et al. Laser-Based Kinematic Calibration of Robot Manipulator Using Differential Kinematics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(6): 1059-1067.
- [43] 任永杰. 测量机器人本体标定技术研究[D]. 天津大学, 2007.
- [44] 王一. 面向测量的多关节运动机构误差模型及标定技术研究[D]. 天津大学, 2009.
- [45] 尹仕斌. 工业机器人定位误差分级补偿与精度维护方法研究[D]. 天津大学, 2015.
- [46] Nubiola A. Calibration of a Serial, Robot Using a, Laser Tracker[M]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011.
- [47] De Smet P. Method for calibration of a robot inspection system: US, US6321137[P]. 2001.
- [48] Li W L, Xie H, Zhang G, et al. Hand-Eye Calibration in Visually-Guided Robot Grinding[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 46(11): 2634-2642.
- [49] Yin S, Guo Y, Ren Y, et al. Real-time thermal error compensation method for robotic visual inspection system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(5): 933-946.
- [50] Wu B, Zhang Y. Reference Sphere Positioning Measurement Based on Line-Structured Light Vision Sensor[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013,

(2013-10-3), 2013, 2013(2013): 533-542.

[51] 杨守瑞, 尹仕斌, 任永杰,等. 机器人柔性视觉测量系统标定方法的改进[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3239-3246.

参加科研情况说明

参与的科研项目：

- 1、国家自然科学基金：机械测试理论、方法与技术(51225505);
- 2、国家自然科学基金：基于多级分层误差补偿策略的工业机器人高精度控制方法研究(51475329)。

致 谢

短暂的硕士研究生生活就要结束了，回顾这两年多的经历，无论在学习上还是生活上总是喜忧参半。幸好身边有人一路相随，能够与我分享喜悦，也能为我排解忧愁；我们的生活轨迹就这样交织在一起，无论遇到什么都能激烈的讨论亦或是无尽的逗趣调侃；大起大落亦或是平淡无奇，我们都欣然接受安然度过。这样一群人相聚在一起的生活大概才叫有滋有味吧。

感谢我的导师郝继贵教授，谢谢您在科研和生活上的指导与帮助。郝老师平时总是工作到很晚，起初不以为意，后来听很多毕业的师兄们说，郝老师一直都是这样，可谓数十年如一日，不由心生敬仰，继而感悟科研上除了天分和机遇，更重要的是这份坚持，沧海桑田我心不改，谢谢郝老师教会我这一切。

感谢林嘉睿老师在初期科研过程中的指引和帮助，感谢任永杰老师和杨凌辉老师对我科研工作的支持，感谢三位老师给予我的关怀和帮助。感谢郭寅老师对我课题进度的督促和关心，以及对我未来工作的指引。特别感谢尹仕斌老师对我后期科研工作的启蒙引导和大力帮助，可谓替我操碎了心。

感谢原 207 的师兄师姐们，是你们带我融入实验室融入科研，207 就像家一样，和你们在一起真的很开心。感谢所有博士师兄师姐，特别是璇哥、博哥、东哥、洋哥、守瑞师姐、尚博、磊哥、涛哥、洵哥、机总，谢谢你们在学术和生活上的关心与帮助。感谢 9 位 2015 级的同门兄弟姐妹，206 的日子同样难忘。

特别感谢郭思阳博士师兄，无论前期科研还是后期科研，无论是 207 还是 206，无论是大型聚餐还是家常便饭，无论美国喜剧还是游泳健身，回忆里总有你的耐心指导和默默陪伴；喜欢与你进行深入的交谈，天南与地北，现实与梦想，过去与未来，无数个话题编织出一个生动的你。愿你出走半生，归来仍是少年！

感谢我的好友兼舍友祎雯、远远、栖杉，427 是只属于我们的回忆，愿你们都前程似锦，花好月圆。感谢邵老师、彬哥、垚哥、虎哥，感谢所有一起工作的小伙伴，特别感谢书博哥，谢谢你们在工作和生活中的指导与关怀。

感谢最最无私的父亲母亲，你们把尽可能多的关心和支持都给了我，逆顺骄馁总有你们的提醒与陪伴，寸草之心怎能报答三春明晖，唯有珍惜眼前时光，多多陪伴，由衷地说一句我爱你们！

最后，向所有帮助过我和真心待我的人说一声谢谢！

张楠楠

二零一七年十一月

于卫津路校区 53 斋