

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 19920141152918

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

面向工业机器人的云制造仿真服务系统的
研究与开发

Research and Development of Simulation Service System with
Cloud Manufacturing for Industrial Robot

潘俊浩

指导教师姓名: 卓 勇 教 授

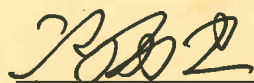
专业名称: 机 械 工 程

论文提交日期: 2017 年 月

论文答辩时间: 2017 年 月

学位授予日期: 2017 年 月

答辩委员会主席:



评 阅 人:

2017 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

潘俊浩

2017年5月19日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版)，允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

()1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于
年 月 日解密，解密后适用上述授权。

()2. 不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人(签名)：

潘俊浩

2017年 5月

摘要

伴随着工业信息化技术的不断提高,在自动化生产中工业机器人施展出的作用愈加明显。机器人仿真作为机器人性能和工作特点的有效研究工具,在机器人研究领域占据重要地位,为生产制造提供有效的参考依据。计算机技术与互联网技术的兴起,尤其是虚拟现实、云计算、大数据等新兴技术,为机器人仿真研究提供了新的思路。

本文在现有机器人仿真研究的基础上,基于虚拟现实与云制造技术,对机器人加工仿真、机器人示教、机器人在线选型等功能进行研究开发与集成,初步搭建了一个面向工业机器人的云制造仿真服务原型系统。主要研究内容如下:

(1) 对工业机器人的运动学进行推导,求解 ABB IRB4600-60/2.05 型号机器人的正逆运动学问题,并对其末端执行器的运动轨迹进行规划。

(2) 针对当前机器人示教普遍存在的地域限制,设计了一种虚拟示教器与虚拟机器人的示教方案。使用正则表达式进行 RAPID 语言的解析与编译,设计其语言解释器。参照真实的机器人示教器,进行示教器界面及功能设计,并将其部署在移动端,通过 RPC 技术实现与虚拟场景间的通信。

(3) 应对当前云制造服务在机器人领域的迫切需要,收集目前国内外庞大的机器人信息,设计机器人信息数据库,用于工业机器人的在线选型。基于现有案例建立规则,推理实现机器人焊接工艺的自动生成,为用户提供机器人焊接解决方案的推荐。

(4) 针对机器人焊接仿真,为了实现交互指定机器人焊接路径的功能,文中提出一种基于二面角与曲率判断的三角网格模型特征快速提取算法,可以准确高效地提取模型的点、线特征。

(5) 针对机器人磨抛、切削等加工过程的材料去除仿真,对三角网格模型的布尔减运算算法进行研究,提出了一种改进的空间三角面片快速求交算法。

文中开发的系统基于虚拟现实技术与云制造服务理念,扩展了机器人仿真系统的开发形式,将仿真功能与制造信息服务进行集成,可用于机器人信息检索、

机器人工艺生成、机器人示教、机器人加工仿真等工作，能有效运用在教学、实践、生产中，具有一定的实际应用价值。

关键词：虚拟现实 工业机器人仿真 云制造服务

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

As industrial information technology is continuously developing, industrial robot plays an even more obvious role in automatic production. Robot simulation occupies an important place in the field of robot research, not only it's an effective tool to study robot performance and working characteristics, but also it can provide reference for robot production. With the development of computer technology and Internet technology, especially the development of emerging technologies, like virtual reality, cloud computing, big data and so on, there is a new research area for robot.

Based on available research of robot simulation, a simulation service prototype system with Cloud Manufacturing is established for industrial robot in this paper. With Virtual Reality and Cloud Manufacturing, a few of functions are studied and developed, like robot processing simulation, robot teaching, robot online selection and so on. The main research contents of this paper are as follows:

(1) The kinematics of industrial robots is deduced, and the positive and negative kinematics problems of ABB IRB4600-60/2.05 robot are solved. Besides, the trajectories of the robot tool are planned.

(2) Aiming at region limit of the robot teaching, a new scheme is proposed with virtual teaching pendant and virtual robot. To interpret and edit RAPID language, an interpreter is designed with the use of regular expression. Refer to real robot teaching pendant, the interface and functions of virtual teaching pendant are designed. And the pendant is installed on the mobile device, which can communicate with virtual robot by RPC (Remote Procedure Call Protocol).

(3) Responding to urgent need of Cloud Manufacturing in robot filed, a robot information database is set up, which includes a large load of robot information, for online selection of industrial robot. And the automatic generation function of robot welding process is implemented based on case-based reasoning and rules, to provide

users with recommended welding robot solutions.

(4) To realize the function of specifying welding path interactively, a fast extraction algorithm of triangular mesh model features is proposed based on dihedral angle and curvature judgment, which can extract the feature like point and line of the model accurately and efficiently.

(5) The simulation of the material removal process of the robot grinding and cutting is carried out. And the Boolean subtraction algorithm for triangular mesh model is studied, and an improved algorithm for fast intersection of spatial triangles is proposed.

The system developed in this paper is based on Virtual Reality and Cloud Manufacturing, which expands the traditional development form of robot simulation system and integrates robot simulation and manufacturing information service. It can be used for robot information retrieving, robot process recommending, robot teaching and robot simulation. And it can be effectively used in teaching, practice, production, which has a high value of practical application.

Keywords: Virtual Reality; industrial robot simulation; Cloud Manufacturing

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景及意义	1
1.1.2 课题来源	2
1.2 工业机器人仿真	2
1.2.1 国内外研究现状	2
1.2.2 目前存在的问题	4
1.3 虚拟现实技术	4
1.4 云制造技术	5
1.5 本文研究内容及组织结构	6
1.5.1 本文研究内容	6
1.5.2 本文组织结构	7
第二章 系统总体设计方案	9
2.1 系统开发平台	9
2.1.1 系统开发平台的选择	9
2.1.2 Unity3d 游戏引擎	10
2.2 系统功能分析与设计	11
2.2.1 需求分析	11
2.2.2 功能模块设计	12
2.3 系统整体框架	15
2.4 本章小结	15
第三章 机器人运动学分析与轨迹规划	17
3.1 机器人的 D-H 参数	17
3.1.1 D-H 参数简介	17

3.1.2 ABB IRB4600-60/2.05 机器人的 D-H 参数	17
3.2 机器人运动学分析	19
3.2.1 机器人正运动学	19
3.2.2 机器人逆运动学	22
3.3 机器人轨迹规划	26
3.3.1 关节空间轨迹规划	26
3.3.2 笛卡尔空间轨迹规划	26
3.3.3 姿态插补	30
3.4 本章小结	30
第四章 机器人虚拟示教器设计及实现	33
4.1 基于平板电脑的示教器设计	33
4.1.1 虚拟示教器面板设计	33
4.1.2 虚拟示教器功能设计	34
4.2 机器人语言解释器设计	39
4.2.1 RAPID 语言简介	39
4.2.2 RAPID 语言解释器的设计	41
4.3 通信模块的实现	44
4.4 虚拟示教器操作实例	45
4.4 本章小结	46
第五章 系统关键技术研究	49
5.1 机器人数据库设计及工艺自动生成	49
5.1.1 机器人信息数据库设计及访问	49
5.1.2 焊接工艺的自动生成	53
5.2 特征提取算法研究	55
5.2.1 三角网格模型拓扑信息重建	56
5.2.2 三角网格模型特征提取	61
5.2.3 特征边自动生长算法	68
5.2.4 三次样条曲线插值	70
5.3 布尔减运算算法研究	73

5.3.1 空间三角形求交	73
5.3.2 交线链和交线环的获取	77
5.3.3 区域分类	78
5.3.4 三角网格二次剖分	78
5.4 本章小结	79
第六章 系统实现	81
6.1 系统用户界面设计	81
6.2 仿真环境建立	82
6.2.1 场景及模型建立	82
6.2.2 场景渲染	83
6.2.3 本文建立的仿真环境	83
6.3 碰撞检测及加工效果实现	84
6.3.1 碰撞检测功能	84
6.3.2 加工效果的实现	85
6.4 平台发布	85
6.4.1 资源的上传与下载	86
6.4.2 平台的发布	87
6.5 系统运行示例及验证	88
6.5.1 机器人信息服务模块	88
6.5.2 机器人仿真服务模块	90
6.5.3 机器人示教服务模块	91
6.6 本章小结	93
第七章 总结与展望	95
7.1 总结	95
7.2 展望	96
参 考 文 献	97
致 谢.....	103
攻读硕士学位期间发表的论文及其他成果	105

Table of Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and Meanings of the Subject	1
1.1.1 Background and Meanings	1
1.1.2 Source of the Subject	2
1.2 Industrial Robot Simulation	2
1.2.1 Research Status	2
1.2.2 Main Problems of Industrial Robot Simulation	4
1.3 Virtual Reality	4
1.4 Cloud Manufacturing	5
1.5 Main Contents and Structure of This Paper	6
1.5.1 Main Contents	6
1.5.2 Paper Structure.....	7
Chapter 2 Design of the System	9
2.1 Development Platform	9
2.1.1 The Selection of Development Platform.....	9
2.1.2 Unity3d Engine	10
2.2 Analysis and Design of System Functions	11
2.2.1 Demand Analysis	11
2.2.2 Functional Modules Design	12
2.3 System Framework	15
2.4 Summary	15
Chapter 3 Kinematics Analysis and Trajectory Planning	17
3.1 D-H Parameters of Robot	17
3.1.1 Introduction of D-H Parameters.....	17
3.1.2 D-H Parameters of ABB IRB4600 60/2.05 Robot.....	17
3.2 Robot Kinematics Analysis	19
3.2.1 Forward Kinematics.....	19
3.2.2 Inverse Kinematics	22

3.3 Robot Trajectory Planning.....	26
3.3.1 Trajectory Planning in Joint Space	26
3.3.2 Trajectory Planning in Cartesian Space	26
3.3.3 Posture Interpolation.....	30
3.4 Summary.....	30
Chapter 4 Design and Relization of Virtual Teching Pendant	33
4.1 Design of Robot Teching Pendant base on Tablet Computer.....	33
4.1.1 Design of Pendant Panel	33
4.1.2 Design of Pendant Functions	34
4.2 Design of Robot Language Interpreter	39
4.2.1 Introduction of RAPID	39
4.2.2 Design of RAPID Interpreter.....	41
4.3 Realization of Communication Module	44
4.4 Operation Examples of Pendant.....	45
4.4 Summary.....	46
Chapter 5 Study of Key Technology.....	49
5.1 Design of Robot Database and Automatic Generation of Process.....	49
5.1.1 Design and Access of Robot Information Database	49
5.1.2 Automatic Generation of Robot Welding Process	53
5.2 Study of Feature Extraction Algorithm	55
5.2.1 Topological Reconstruction of Triangular Mesh Model.....	56
5.2.2 Feature Extraction of Triangular Mesh Model.....	61
5.2.3 Automatic Growing Algorithm of Feature Line.....	68
5.2.4 Cubic Splines Interpolation	70
5.3 Study of Boolean Subtraction Algorithm.....	73
5.3.1 Triangle Intersection	73
5.3.2 Search of Intersection Chains and Loops.....	77
5.3.3 Region Classification	78
5.3.4 Second Triangulation of Model	78
5.4 Summary.....	79
Chapter 6 System Implementation.....	81
6.1 Design of User Interface	81
6.2 Establishment of Simulation Environment	82

6.2.1 Model and Scene Building.....	82
6.2.2 Scene Rendering	83
6.2.3 Simulation Environment	83
6.3 Relization of Collision Detection and Process Effect	84
6.3.1 Collision Detection	84
6.3.2 Process Effect.....	85
6.4 Platform Release	85
6.4.1 Upload and Download of Resource	86
6.4.2 Platform Release	87
6.5 Examples and Verification of System	88
6.5.1 Robot Information Service Module	88
6.5.2 Robot Simulation Service Module.....	90
6.5.3 Robot Teaching Service Module.....	91
6.6 Summary.....	93
Chapter 7 Conclusion and Future Work	95
7.1 Conclusion	95
7.2 Future Work	96
References	97
Acknowledgments	103
Publications	105

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

1.1.1 研究背景及意义

随着科技革命的再次爆发与产业变革的兴起，全球科技发展迈入了一个新领域；受此影响，制造业逐渐形成了智能化的发展趋势。智能制造在世界范围内获得广泛重视，各国政府均提出了符合本国国情的战略与计划，我国也适时提出了“中国制造 2025”规划^[1-3]。其中强调，必须牢牢把握当前这千载一时的机遇，推进制造业的转型升级，以发展智能制造为突破口，促进我国由制造大国到制造强国的转变^[4-5]。

机器人技术是智能制造领域的关键技术之一，其发展水平很大程度上反映了智能制造的水平。工业机器人是面向工业范围的机器人，一般为多关节机械手或者多自由度的机器设备，集成了机械、电子、控制等技术^[6-7]，能被使用者直接操控，也可以根据预先设定的程序执行作业。工业机器人能够在复杂危险的环境中代替人类完成单调重复或是难以完成的工作，因此被大量应用于码垛、焊接、装配等领域。自上世纪六十年代第一台工业机器人诞生以来，在近六十年的发展中，工业机器人经历了翻天覆地的变化，已然成为当前的研究热点之一^[8]。工业机器人的迅速发展，功能的日益强大，促使其成为当今柔性制造、计算机集成制造等先进制造技术的重要组成部分^[9]。

尽管工业机器人发展迅速，但在其研究领域仍存在不少的困难与阻碍。首要的问题就是价格过于昂贵：据不完全统计，工业机器人的价格一般在十几万到数十万人民币^[10]。对于大多数的研究人员而言，购置一台工业机器人用于研究的难度较大；而计算机技术为工业机器人的研究困境提供了出路，工业机器人仿真技术应运而生。通过计算机的仿真模拟，研究人员能够在缺乏实物的条件下，顺利开展工业机器人的研究。运用工业机器人仿真技术，不仅可以轻松进行机器人性能与工作特点的研究，同时仿真结果亦能作为机器人生产制造中的有效依据^[11-12]。当前，机器人仿真技术的地位正在不断提升，其内容也越来越广泛，从最初的运

动力学求解，到包含动力学、轨迹规划等众多方向；而虚拟现实、云制造等新兴技术的面世，也为机器人仿真提供了更宽的思路。

虚拟现实技术（Virtual Reality, VR）是一种利用计算机将资源进行整合，构建三维虚拟环境实现用户沉浸式、交互式操作的技术^[13-14]，综合了计算机图形学、人工智能、网络技术、仿真技术等多种计算机技术。自上世纪六十年代，虚拟现实概念被提出以来，经过多年的发展，虚拟现实技术已经成为当前最具研究前景的技术之一。

2015年，“互联网+”概念问世，强调互联网在生产资源配置中具有显著作用，必须结合互联网与经济社会，促进实体经济的创新与生产力的提升^[15-16]。在“互联网+”的意识形态下，制造业产生了基于互联网、面向服务的制造新模式——云制造（Cloud Manufacturing, CM）。云制造是对现有制造与服务技术的拓展和更新，运用以云计算、大数据为代表的新兴信息技术与信息化制造技术，构建制造资源池和制造能力池，进行统一管理分配，实现智能、共赢、高效的协同共享^[17-18]。

可以预见，将机器人仿真系统与虚拟现实、云制造服务等新兴技术相结合，实现高度真实的机器人加工仿真、多方位的资源共享与服务供给，将是未来机器人仿真系统的发展方向。文中旨在提供该模式仿真系统的初探，将机器人仿真、机器人示教、机器人信息查询、机器人工艺推荐等功能集成，基于虚拟现实技术，开发一个面向工业机器人的云制造仿真服务系统。

1.1.2 课题来源

文中研究的课题来源于福建省重大科技专项“海西高端装备制造关键技术研发与开发”（2015HZ0002-1）的子课题“云制造服务系统研究和开发”。

1.2 工业机器人仿真

1.2.1 国内外研究现状

国外在工业机器人仿真的研究开始较早，自上世纪七十年代末就进行了相应的研究。早期的机器人研究主要以运动学、动力学求解为主：Stephen Derby 开发的 GRASP 软件，可以导入机器人模型进行制造、装配仿真，并能给出相应的运

动力学模型^[19]。MS Pickett 等人在实体交互设计分析环境 GMSolid 中开发了 Roboteach 软件,可用于机器人车间的布置、离线编程等功能^[20]。G.R. Mcgalliard 开发了一个机械臂动力学仿真程序,旨在通过基于开环运动链模型的递归拉格朗日算法提供通用的机械臂动力学求解方法^[21]。DK Pai 和 MC Leu 两人开发的 INEFFABELLE 软件,具有图形界面,可用于机器人模型及环境模型的交互创建^[22]。DW Wloka 设计并开发了机器人三维仿真软件——ROBSIM,能在高分辨率的图形终端中进行机器人运动学和动力学的仿真^[23]。N Sreenath 和 PS Krishnaprasad 开发了 DYNAMAN 软件,使用牛顿-欧拉公式解决了多关节机器人的动力学问题^[24]。

随着研究的深入,国外的工业机器人仿真系统向智能化、商业化发展,出现了大量成熟的机器人仿真软件^[25-29]。Deneb 公司发布的 IGRIP 软件能有效地进行机器人工作站的布置与机器人离线编程。美国 SIMENS 公司的机器人仿真系统 ROBCAD,得到了工业领域众多公司的追捧。Jabez Technologies 公司开发的机器人仿真软件 RobotMaster 支持市面上大多数机器人的仿真,适用于切割、焊接、喷漆等作业。Compucraft 公司的 RobotWorks 软件与三维建模软件 SolidWorks 集成,能够充分利用 SolidWorks 强大的建模功能。法国 Dassault 公司推出的 DELMIA 软件,能够有效进行机器人的运动学与动力学仿真。此外,各大机器人生产商针对各自品牌的机器人也研发了相应的仿真软件。

我国工业机器人仿真方面的研究起步较晚,但经过二十多年的发展,已积累了大量的技术经验。早期的研究主要集中在机器人的环境建立与运动学求解。俞文伟和邓建一基于 AutoCAD 开发了 ROSIDY 软件,可用于通用机器人的图形仿真^[30]。清华大学的 THROBSM 软件是我国最早研制成功的大型机器人仿真系统,可用于单手机械臂、双手机械臂的仿真与控制^[31]。徐国桦和杨起帆开发的 ARPS 系统,能够交互式地进行机器人本体及环境的建模,并使用 ARL 语言描述了机器人的运动^[32]。赵东波等人研制了机器人离线编程软件 HOLPSS,能够进行机器人本体及环境的设置、机器人语言的处理、运动学的规划操作^[33]。

进入新世纪以来,国内在工业机器人仿真方面的研究如雨后春笋般涌现出来,开发的形式也越发丰富。赖锡煌综合使用 ADAMS 和 Matlab 进行了多关节机器人的动力学分析^[34]。张永德等人基于 ANSYS 与 ADAMS 进行了机器人的联合仿真,为机器人的系统结构优化与误差分析奠定了基础^[35]。陶智量使用 MATLAB,

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库