

学校编码: 10384
学号: 23220101153194

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦门大学

硕士学位论文

二自由度并联机构物理仿真平台控制
系统研究

Research on Control System of Physical Simulation
Platform for 2-DOF Parallel Manipulator

涂权招


指导教师: 彭侠夫 教授

专业名称: 检测技术与自动化装置

论文提交日期: 2013 年 月

论文答辩日期: 2013 年 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: 

评阅人: _____

2013 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）：陈和招

2013年6月5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）：涂权招

2013年6月5日

摘要

船舶在海上的摇荡运动主要是由海浪引起的,为了进一步研究船舶运动的性能,有必要对海浪进行研究。利用虚拟现实技术模拟海浪,不仅给人身临其境的感觉,而且具有可靠性、经济性、无破坏性和安全性等诸多优点,得到各国学者广泛的研究。随着航海和船舶技术的发展,船舶运动模拟技术同步发展起来,且并联机构被广泛运用到船舶运动模拟中。本文提出运用二自由度并联机构实现模拟船舶在海上的摇摆运动,主要研究内容概括如下:

对随机海浪进行分析研究,建立基于海浪谱的海浪运动数学模型;对海浪波倾角进行建模,且根据船舶航行的实际情况修正海浪波倾角;在随机海浪作用下,分析船舶横摇运动的受力情况,建立在小角度情况下船舶横摇运动的线性模型。利用 MATLAB 对上述数学模型分别进行仿真研究。

设计了一种二自由度结构的并联机构。运用坐标旋转变换法,对并联机构的运动学进行分析,得到该机构的位置逆解模型,推算出其位置逆解的解析解。建立 SimMechanics 的二自由度并联机构模型,对并联机构的运动进行了仿真研究。

设计了二自由度并联机构的液压系统。推导出单缸液压系统正反向的非线性模型及状态空间模型,并从工程应用的角度简化模型,建立其正反向的传递函数;运用 MATLAB 中的 SimHydraulics 工具箱,建立单缸液压闭环控制系统的仿真模型,对液压系统进行仿真研究,验证了液压系统模型的正确性和 PID 控制器的有效性。

设计了二自由度并联机构的通信系统。对 TCP/IP 协议族的各层协议和套接字进行分析讨论,详细地比较套接字模式和套接字 I/O 模型,得到一个高效的、实时性较好的、可靠的通信系统设计方案。详细介绍了上位机通信系统和下位机通信系统的实现过程。

分析研究海浪网格模型,对 Yin 模型、梯形网格模型、同心圆网格模型和二叉树分割模型四种网格模型进行比较,提出了一种层次细节的同心扇形网格模型;在 VC++6.0 中实现了在海浪环境下船舶摇荡运动视景仿真系统,利用同心扇形网格模型实现海浪网格,并考虑光照效果和海面对天空的反射效果,运用多重纹理映射技术对海浪进行渲染,同时基于船舶横摇运动模型实现了船舶横摇运动

的虚拟现实仿真；运用 MATLAB 中 Virtual Reality Toolbox 工具箱实现了二自由度并联机构的虚拟现实仿真。

关键字：海浪；横摇运动；并联机构；运动学；套接字；液压系统；虚拟现实仿真

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

The swaying motion of ship on the ocean is mainly caused by ocean wave. In order to forecast the performance of ship, it is necessary to study ocean wave. Using virtual reality technology, simulating ocean wave not only make people feel that they are on the scene, but also has the advantages of reliability, economy, no-breakage, security, and so on. The simulation technology has been extensively researched by many scholars. With the development of navigation and ship, the technology of ship motion simulation developed simultaneously. And the parallel manipulator has been widely applied to the ship motion simulation. The 2-DOF parallel manipulator was proposed to simulate the swaying motion of ship on the ocean. The main researched contents are as follows:

The model of ocean wave was analyzed and established based on ocean wave spectrum. According to the actual situation of ship navigation, the slope of wave surface was revised, and the model was established. On the force analysis of ship, the linear model of ship rolling motion was established in the case of small angle. And the simulation study of models was performed.

The inverse kinematics model of 2-DOF parallel manipulator was established by coordinating rotation matrix transformation. With MATLAB/SimMechanics, modeling and simulating the 2-DOF parallel manipulator to research the motion of parallel manipulator.

The hydraulic system was implemented for the 2-DOF parallel manipulator. The nonlinear model and the state space model of forward and inverse motion were deduced for the single cylinder hydraulic system. The transfer function was established by simplifying from point of engineering application. With MATLAB/SimHydraulics, the simulation model of the single cylinder hydraulic system was established to research the performance of hydraulic system. The results of simulation showed that the tracking performance of controller was good.

The communication system was implemented for the 2-DOF parallel manipulator. Protocols of TCP/IP and sockets were analyzed, one efficient, real-time and reliable scheme of communication system was proposed by the detailed comparison of sockets mode and I/O model. And then, the realization of communication systems of computer and controller was introduced in detail.

A grid model of concentric sectors was proposed on the research of ocean wave grid model. The scene simulation system on ship rolling motion was implemented by VC++6.0. The ocean wave grid was implemented based on the grid model of concentric sectors. Various latest rendering techniques such as multi-texture mapping were adopted to simulate light effect and reflection effect. And the virtual reality simulation of ship rolling motion was implemented. The virtual reality simulation of 2-DOF parallel manipulator was implemented with MATLAB/Virtual Reality Toolbox.

Keywords: Ocean Wave; Rolling Motion; Parallel Manipulator; Kinematics; Sockets; Hydraulic System; Virtual Reality Simulation

目录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 海浪模拟概述.....	2
1.3 并联机构概述.....	3
1.4 论文主要研究工作.....	6
第二章 海浪信号及船舶横摇运动建模	8
2.1 海浪信号.....	8
2.1.1 海浪的数学描述.....	8
2.1.2 频谱.....	9
2.1.3 方向谱.....	11
2.1.4 海浪的数值仿真.....	12
2.1.5 波倾角.....	13
2.1.6 波倾角的数值仿真.....	15
2.2 船舶横摇运动.....	17
2.2.1 船舶横摇运动受力分析.....	18
2.2.2 船舶横摇运动建模.....	18
2.2.3 船舶横摇运动的数值仿真.....	20
2.3 本章小结.....	21
第三章 并联机构运动学分析	22
3.1 并联机构的结构.....	22
3.2 并联机构运动学分析.....	22
3.2.1 齐次变换.....	23
3.2.2 位置逆解.....	24
3.3 SimMechanics 的并联机构建模.....	25
3.3.1 SimMechanics 简介.....	25
3.3.2 并联机构建模.....	25
3.3.3 模拟验证与结果分析.....	28
3.4 本章小结.....	31
第四章 液压系统平台设计	32
4.1 液压系统原理图.....	32
4.2 单缸液压系统.....	33
4.2.1 单缸液压系统的基本描述.....	33
4.2.2 单缸液压系统的非线性模型.....	34
4.2.3 单缸液压系统的状态空间模型.....	35
4.2.4 单缸液压系统的传递函数.....	36
4.3 SimHydraulics 的单缸液压系统建模.....	39

4.3.1 SimHydraulics 简介.....	39
4.3.2 单缸液压系统建模.....	39
4.3.3 模拟验证与结果分析.....	41
4.4 本章小结.....	43
第五章 通信系统实现	44
5.1 TCP/IP 协议簇.....	44
5.2 套接字网络编程.....	45
5.2.1 套接字概述.....	45
5.2.2 套接字模式与 I/O 模型	46
5.3 上位机通信系统.....	48
5.3.1 套接字网络通信模块.....	48
5.3.2 数据处理模块.....	50
5.3.3 上位机通信系统描述.....	50
5.3.4 上位机通信系统实现.....	51
5.4 下位机通信系统.....	53
5.4.1 下位机通信系统简介.....	53
5.4.2 下位机通信系统实现.....	54
5.5 本章小结.....	56
第六章 虚拟现实仿真	57
6.1 海浪网格模型.....	57
6.2 基于 OpenGL 的虚拟现实仿真.....	59
6.2.1 OpenGL 简介.....	59
6.2.2 海浪网格实现.....	60
6.2.3 海浪渲染.....	61
6.2.4 船舶横摇运动虚拟现实仿真.....	62
6.2.5 视景仿真系统实现.....	63
6.3 基于 Virtual Reality Toolbox 的虚拟现实仿真.....	64
6.4 本章小结.....	65
总结与展望	67
参考文献	69
攻读硕士学位期间已发表或录用的学术论文	72
致谢.....	73

CONTENTS

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background and Significance of the Subject	1
1.2 Summary of Ocean Wave Simulation	2
1.3 Summary of Parallel Manipulator	3
1.4 Main Contents of the Subject.....	6
Chapter 2 Modeling of Ocean Wave and Ship Rolling Motion.....	8
2.1 Ocean Wave	8
2.1.1 Mathematical Model of Ocean Wave.....	8
2.1.2 Spectrum	9
2.1.3 Directional Spectrum	11
2.1.4 Numerical Simulation of Ocean Wave.....	12
2.1.5 Slope of Wave Surface	13
2.1.6 Numerical Simulation of Slope of Ocean Wave	15
2.2 Ship Rolling Motion	17
2.2.1 Force Analysis of Ship Rolling Motion	18
2.2.2 Modeling of Ship Rolling Motion.....	18
2.2.3 Numerical Simulation of Ship Rolling Motion.....	20
2.3 Conclusions.....	21
Chapter 3 Kinematics Analysis of Parallel Manipulator	22
3.1 Structure of Parallel Manipulator.....	22
3.2 Kinematics Analysis of Parallel Manipulator	22
3.2.1 Homogeneous Transformation.....	23
3.2.2 Inverse Kinematics.....	24
3.3 Modeling of Parallel Manipulator based on SimMechanics.....	25
3.3.1 Summary of SimMechanics	25
3.3.2 Modeling of Parallel Manipulator.....	25
3.3.3 Simulation and Analysis	28
3.4 Conclusions.....	31
Chapter 4 Design of Hydraulic System.....	32
4.1 Schematic of Hydraulic System.....	32
4.2 Single Cylinder Hydraulic System.....	33
4.2.1 Basic Description of Single Cylinder Hydraulic System.....	33
4.2.2 Nonlinear Model of Single Cylinder Hydraulic System.....	34
4.2.3 State Space Model of Single Cylinder Hydraulic System	35
4.2.4 Transfer Function of Single Cylinder Hydraulic System.....	36
4.3 Modeling of Single Cylinder Hydraulic System based on SimHydraulics.....	39

4.3.1 Summary of SimHydraulics.....	39
4.3.2 Modeling of Single Cylinder Hydraulic System.....	39
4.3.3 Simulation and Analysis	41
4.4 Conclusions.....	43
Chapter 5 Implementation of Communication System.....	44
5.1 Summary of TCP/IP.....	44
5.2 Sockets Network Programming	45
5.2.1 Summary of Sockets	45
5.2.2 Sockets Mode and I/O Model	46
5.3 Communication System of Computer.....	48
5.3.1 Module of Sockets Network Communication.....	48
5.3.2 Module of Data Processing.....	50
5.3.3 Description of Communication System of Computer.....	50
5.3.4 Implementation of Communication System of Computer.....	51
5.4 Communication System of Controller	53
5.4.1 Summary of Communication System of Controller	53
5.4.2 Implementation of Communication System of Controller.....	54
5.5 Conclusions.....	56
Chapter 6 Virtual Reality Simulation	57
6.1 Ocean Wave Grid Model.....	57
6.2 Virtual Reality Simulation based on OpenGL	59
6.2.1 Summary of OpenGL.....	59
6.2.2 Implementation of Ocean Wave Grid	60
6.2.3 Rendering of Ocean Wave	61
6.2.4 Virtual Reality Simulation of Ship Rolling Motion	62
6.2.5 Implementation of Scene Simulation System.....	63
6.3 Virtual Reality Simulation based on Virtual Reality Toolbox	64
6.4 Conclusions.....	65
Conclusion and Prospect	67
References	69
Papers Published of Author	72
Acknowledge.....	73

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

地球表面 71%是蓝色的海洋，80%的生物生活在海洋中，海洋为我们提供了丰富的物产资源。当今世界第一强国的美国，在其发展历程中始终将海洋作为国家繁荣与安全的根本。

我国是一个名副其实的海洋大国，拥有约为 300 万平方公里的海洋国土和 1.8 万公里的海岸线。科学地利用海洋资源，是我国经济可持续发展的重要途径。船舶作为海洋上的主要运输工具，在经济发展中发挥着举足轻重的作用。然而，船舶在海上的摇荡运动主要是由海浪引起的，为了进一步研究船舶的性能，有必要对海浪进行研究。由于受各种因素（如风、日月引力等）的影响，海浪是一个十分复杂的自然现象，海浪的模拟成为了一个难点。若采用造波机在水池中模拟海浪，不仅得不到精确的观测数据，而且费用极其昂贵；若利用真实环境模拟海陆战争，不仅环境会受到严重污染，而且可能造成人员伤亡。虚拟现实（Virtual Reality，简称 VR）是一种以沉浸性、交互性和构想性为基本特征的高端人机接口。利用虚拟现实技术模拟海浪，其优质的界面和生动的场景给人身临其境的感觉，同时具有可靠性、经济性、无破坏性和安全性等诸多优点，得到国内外学者广泛的研究。

船舶的摇荡运动对船舶会产生一系列的影响。一方面，影响船舶的操纵性，引起乘船人员晕船，降低船舶的舒适性；另一方面，对于军用舰艇来说，降低鱼雷、火炮和导弹的命中率，使舰载飞机起降困难。因此，有必要对船舶摇荡运动进行研究。随着航海和船舶技术的发展，船舶运动模拟技术同步发展起来，且并联机构被广泛运用到船舶运动模拟中。

并联机构具有高刚度、高精度、高承载能力等优点，因此成为国际上机构学研究的热点领域之一，并在多个领域得到了广泛地应用。随着并联机构学理论、技术与应用的不断发展，一方面各种机构的性能得到不断提升，另一方面不单单局限于六自由度并联机构的研究，逐渐加强对少自由度并联机构的相关研究。相比于六自由度并联机构，少自由度并联机构结构简单、经济便宜、控制较容易，

具有良好的应用前景。

基于上述背景,本文深入研究海浪的建模、船舶横摇运动的建模,以及绘制算法和渲染特效的实现技术,实现在海洋场景下船舶运动的模拟与绘制;提出采用二自由度并联机构实现模拟船舶在海上的横摇运动,以该并联机构作为研究对象,对其进行运动学分析,建立液压控制系统、通信系统,以及虚拟现实仿真的实现。

1.2 海浪模拟概述

船舶在海上的摇摆主要是由海浪引起的。为了预测船舶在海上的航行性能,必须对海浪进行研究。海浪是自然界中一种极其复杂的现象,传统的几何模型难以描述海浪,因此有必要采用更加有效的方式。近年来,许多国内外学者对海浪的模拟方法进行了研究。

1986年, Fournier 和 Reeves^[1]采用参数曲面对海浪进行建模,允许使用传统的渲染方式,包括射线追踪和自适应细分,并且运用粒子系统模拟泡沫。因为该模型基于时间建立,所以可以很容易地实现动画。

1986年, Peachey^[2]结合波相位方程和波轮廓线方程两个方程对海浪进行建模。其中波相位方程用来模拟波的折射、波速和波长的变化,波轮廓线方程则根据波的斜度和深度来控制波形。

纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes, 简称 N-S) 方程是流体力学中描述粘性牛顿流体的方程。Kass^[3]于 1990 年通过简化 N-S 方程,推导出适合模拟流动波浪动画的模型。1994 年, Chen^[4]提出一种新的物理方法,运用数值迭代方法求解二维的 N-S 方程来模拟波浪。

采用上述方法,由于计算极其复杂,计算量往往很大,效率低,模拟的波浪看上去不太真实,也无法满足系统的实时性要求。然而,一种基于海浪谱的方法是以随机过程对海浪进行描述,逐渐成为主要的研究途径。

1987 年, Mastin^[5]提出利用经验海浪谱模型来描述自然界中平稳的海浪。通过设定的风速,利用 Pierson-Moskowitz 谱过滤均匀白噪声图来生成真实的海浪场景。此方法虽然简单,但真实感不足。

2001 年, Tessendorf^[6]利用快速傅里叶变换改进 Phillips 谱,采用改进后的谱来模拟海浪,并且通过硬件来加快海浪光照效果实现的计算速度。电影《泰坦尼

克号》中海浪场景特效就是用该方法制作的。

2007年,皮学贤^[7]根据近岸浅海区域的海面波动特征,结合频率谱理论和波动折射理论的方式,逼真且高效地模拟海浪。

运用海浪谱方法,可以利用海洋学中的海浪频谱相关公式快速地生成海浪,更加适合模拟深海场景。与此同时,海浪谱方法生成的海浪更加真实,能够满足系统实时性的要求。

为了提高虚拟现实的仿真速度,层次细节(Level of Detail,简称LOD)技术广泛运用在三维场景的实时渲染领域中。迄今,许多关注LOD模型的论文相继发表。DeHaemer^[8]和Eck^[9]等人提出视角无关的LOD模型,Hoppe^[10]和Luebke^[11]等人提出视角相关的LOD模型。虽然这些算法可以大大提高虚拟场景的渲染速度,但是只适合静态场景,很难适用于像海浪这样的动态场景中。

1.3 并联机构概述

相比较串联机构,并联机构具有精度较高,累积误差影响小,系统动态性能好,承载能力强,刚度大等优点。历经半个多世纪的发展,并联机构已经广泛地应用到娱乐装置、运动模拟器、并联机床和力反馈装置等工程领域。

上个世纪初,Gwinnett^[12]为娱乐产业设计了第一个多自由度并联运动系统,并于1928年申请专利,如图1-1所示。

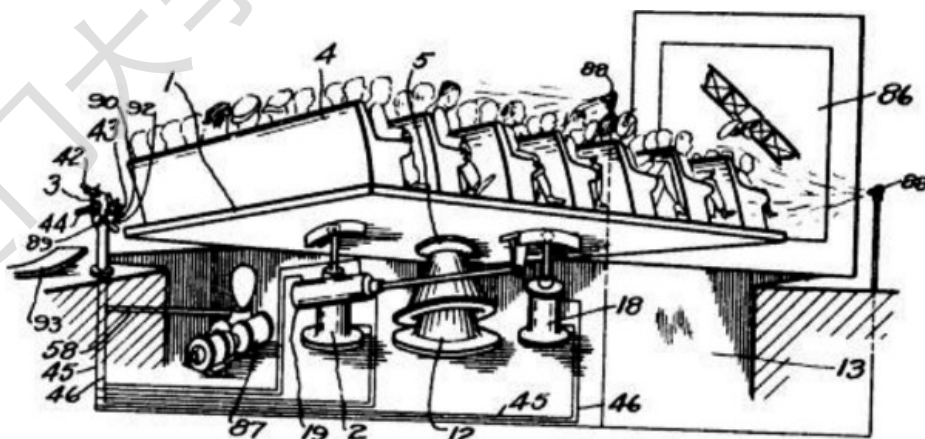


图 1-1 多自由度并联运动系统

1965年,Stewart^[13]在英国杂志 Proceedings of IMechE (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers) 上发表了关于并联机构的著名文章。Stewart提出一种六自由度结构的飞行模拟器运动系统,引起了学术界的广泛关注,如图

1-2 所示。虽然 Stewart 提出的三角形平台结构并不是典型的六自由度并联机构，但在很长一段时间内六自由度并联机构仍然被称为 Stewart 平台。

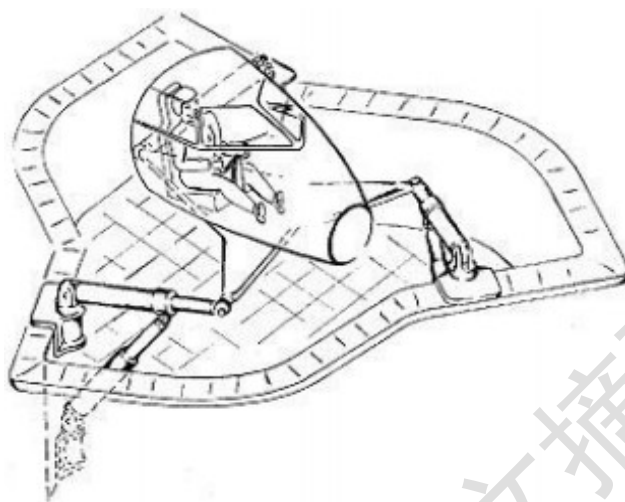


图 1-2 Stewart 飞行模拟器

1994 年 9 月，G&L (Giddings&Lewis) 公司在美国芝加哥国际机械制造技术博览会上首次展出了 VARIAX 虚拟轴机床^[14]，引起轰动，被誉为“21 世纪机床”，如图 1-3 所示。VARIAX 虚拟轴机床历时五年的研制，是 G&L 公司的研究小组在“Stewart 平台”基础发展出来的，并且经过两年的不断试验与改进。



图 1-3 VARIAX 虚拟轴机床

2006 年，日本港湾空港技术研究所的 Akizono 等人^[15]设计了在水下作业的工程机械力反馈遥操作系统，大大提高了水下作业的效率，基本上可以达到陆上作业的水平。法国 Laval 大学的 Gosselin 等人研制了三自由度球面机构的 SHaDe

力反馈装置^[16]，如图 1-4 所示。威尔士 Aberystwyth 大学开发了 3-DOF 力反馈游戏杆手柄^[17]（如图 1-5 所示），可用于研磨、钻孔和插孔等任务。



图 1-4 SHaDe 力反馈装置



图 1-5 力反馈游戏杆

近几年来，国内很多高校和科研单位投入人力物力研究并联机构，并取得了一定的成果。1997 年清华大学精密仪器系和天津大学机械工程学院^[18]联合研制了国内第一台大型虚拟轴机床样机 VAMT1Y，如图 1-6 所示。图 1-7 为河北工业大学研制的五轴并联机床^[19]。北京航空航天大学^[20]、燕山大学^[21]、哈尔滨工业大学^[22]等众多科研院所相继对并联机构投入研究，取得了大量的研究成果。



图 1-6 VAMT1Y 并联机床

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