

工学博士学位论文

虚拟现实交互控制视觉沉浸感
关键技术的研究与实现

<http://www.ixueshu.com/>

河北大学

2010年5月

密 级：
分类号：

学校代码：10075
学 号：20061279

工学博士学位论文

虚拟现实交互控制视觉沉浸感 关键技术的研究与实现

<http://www.ixueshu.com>

学位申请人： 刘秀玲
指导教师： 王洪瑞 教授
 李晓苇 教授
学位类别： 工学博士
学科专业： 光学工程
授予单位： 河北大学
答辩时间： 二〇一〇年五月

Classified Index:
U.D.C.:

CODE: 10075
NO: 20061279

A Dissertation for the Degree of D. Engineering

Research and Implementation of Key Technologies for Vision Immersion in Interactive Control of Virtual Reality

<http://www.ixueshu.com>

Candidate: Liu Xiuling

Supervisor: Prof. Wang Hongrui

Prof. Li Xiaowei

Academic Degree Applied for: Doctor of Engineering

Specialty: Optical Engineering

University: Hebei University

Date of Oral Examination: May, 2010

河北大学

学位论文独创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知， 除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得河北大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。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致谢。

作者签名：_____ 日期：_____年_____月_____日

学位论文使用授权声明

本人完全了解河北大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

本学位论文属于

- 1、保密 ☐ ，在_____年_____月_____日解密后适用本授权声明。
- 2、不保密 ☒ 。

（ 请在以上相应方格内打“√” ）

保护知识产权声明

本人为申请河北大学学位所提交的题目为（虚拟现实交互控制视觉沉浸感构建技术的研究与实现）的学位论文，是我个人在导师（王瑞琦
李瑞）指导并与导师合作下取得的研究成果，研究工作及取得的研究成果是在河北大学所提供的研究经费及导师的研究经费资助下完成的。本人完全了解并严格遵守中华人民共和国为保护知识产权所制定的各项法律、行政法规以及河北大学的相关规定。

本人声明如下：本论文的成果归河北大学所有，未经征得指导教师和河北大学的书面同意和授权，本人保证不以任何形式公开和传播科研成果和科研工作内容。如果违反本声明，本人愿意承担相应法律责任。

声明人：

刘永记

日期：2010年6月8日

作者签名：

刘永记

日期：2010年6月8日

导师签名：

王瑞琦
李瑞

日期：2010年6月8日

摘 要

分布式虚拟现实作为一种最强大的人机交互技术,目前已成为信息领域的研究热点之一,而视觉沉浸感是分布式虚拟现实系统设计的主要目标。传统的虚拟现实系统的视觉沉浸感主要集中在模型的精细程度、光照效果、纹理映射等静态场景上,随着分布式虚拟现实的发展,用户群越来越庞大,虚拟场景的复杂程度越来越高,虚拟现实环境与用户的交互越来越深入,影响视觉沉浸感的诸多分布式系统的动态问题也越来越明显。因此,提高分布式系统中的视觉沉浸感,尤其是大规模复杂场景与用户交互控制的视觉沉浸感,已经成为分布式虚拟现实系统的重要研究课题。

本文针对影响分布式虚拟现实系统交互控制视觉沉浸感的关键技术问题展开研究,主要包括分布式场景的视觉实时性和一致性、用户外设与虚拟场景的交互控制的准确性和实时性等方面。设计并实现了提高分布式虚拟现实系统智能交互控制视觉沉浸感的关键技术,并通过其与六自由度并联机器人运动平台的反馈控制研究,从视觉和感觉上显著增强了用户的沉浸感。

本论文的主要工作和创新如下:

- (1) 提出并实现了新型混合 P2P 结构的分布式虚拟现实系统框架。将整个系统从逻辑上分为三层:集中式 P2P 网络结构、集中式 P2P 分组、结构化分布式 P2P 网络群。完成了网络服务平台、控制平台以及渲染节点这三类网络节点的设计和实现,提高了信息的传输速度,减少了视觉信息的延迟;
- (2) 提出并实现了 P2P 网络结构下不同类型节点的渲染策略。对于同组节点提出了主从缓存渲染策略以满足同一场景的分块视觉一致性,对于同群节点采用了节点之间的一致性控制、设计了预测算法以满足多个用户之间的动态协同一致性,从而保证了用户视觉效果的一致性;
- (3) 提出并实现了基于光线投射的蜂窝状空间分解碰撞检测算法。将碰撞检测转化为判断在下一帧中多面体蜂窝子空间内局部子多面体截面到对方阈值线的距离值与对方所设定阈值的大小的关系问题,从而完成任意多面体间的精细检测,提高了碰撞检测的速度,增强了视觉冲击力;
- (4) 提出并实现了基于基准点的碰撞检测算法,通过扫描线求交运算和“穿针引线”

式剖分空间多边形, 将模型间的碰撞检测转化为基本几何特征对之间的碰撞检测, 把碰撞精度精确到模型表面的某些点和区域, 更适用于快速实时精确的交互控制系统, 此算法将提高视觉效果的真实性的;

- (5) 建立了新型 6-DOF 并联机器人运动平台的动力学模型。针对新型 6-DOF 的结构特点求解系统的逆运动学问题, 由拉格朗日算子得到平台的运动方程, 并基于拉格朗日法建立 6-DOF 并联机构的动力学方程, 进而针对模型在实际控制中的应用进行了简化处理。利用此模型完成与虚拟现实的反馈控制, 将从视觉和感觉上进一步提高用户的沉浸感。

关键词 分布式虚拟现实 视觉沉浸感 一致性 碰撞检测 动力学模型

<http://www.ixueshu.com>

Abstract

Distributed virtual reality technology, which is one of the most powerful man-machine interactive technologies, has attracted great research interests in the field of information. Visual immersion is the main design purpose for a distributed virtual reality system. Visual immersion of the traditional virtual reality system mainly focused on the static scenes, such as fine level, lighting effect and texture mapping of models. With the development of distributed virtual reality system, the user groups keep growing, the virtual environments are more and more complex, and the interaction between virtual environment and users become in-depth. The dynamic problems, which affect the visual immersion, have become more and more evident. Therefore, improving the visual immersion of virtual reality system, particularly the visual immersion of interactive control with the users in large scale and complex scenes, has become an important challenge in distributed virtual reality system.

In this paper, the key technical issues affecting the visual immersion of the interactive control in distributed virtual reality system have been studied, including vision in real-time and consistency in distributed scenes, the accuracy and real-time of interactive control between user and virtual scene, and so on. The key technologies of improving the visual immersion of intelligent interactive control in distributed virtual reality system have been designed and implemented. Immersion effect both in vision and sense have been remarkably enhanced through the feedback control studies of 6-DOF parallel robot platform.

The main work and innovations of this paper are listed as follows:

- (1) A new hybrid P2P architecture framework for the distributed virtual reality system has been designed and implemented. The whole system were logically divided into three parts: the centralized P2P network structure, the centralized P2P grouping and the structured distributed P2P network team. Three types of nodes, including the network service platform, control platform and rendering node, have been achieved, which improved the transmission speed of information, and reduced the delay of visual information;
- (2) Rendering strategy of different types of nodes based on P2P network structure has been designed and implemented. For the same team of nodes, render strategies of main-follow and cache memory were proposed to meet the visual consistency of the same sub-block scene. For the same group of nodes, the consistent control and

- prediction algorithm were proposed to meet dynamic synergy between the multiple users consistently. So the consistency of the visual effects was confirmed;
- (3) The collision detection algorithm of honeycomb-like space decomposition based on ray casting has been designed and implemented. The collision detection has been changed into the problem of comparing the distance between local sub-polyhedron cross section and the value of opponent in the next frame with the set value of opponent. It completed the fine detections between the polyhedrons at random which not only increased the speed of collision detection but also enhanced the visual impact;
 - (4) The collision detection algorithm based on the basic point has been designed and implemented. Though calculating the intersection of scanning lines and disparting space polygon by "go-between" approach, the algorithm has changed the collision detection between models into the detection between pairs of basic geometric characteristics, which was more suitable for the interactive control system of fast, real-time, and precision. This algorithm improved the truth of the visual effect;
 - (5) The dynamic model of motion platform of a new type of 6-DOF parallel robot has been designed and implemented. For the structural features of the new type of 6-DOF, the inverse kinematics of the system has been solved. The motion equations of platform were obtained by the Lagrangian. Dynamic equations of 6-DOF parallel mechanism were also established by Lagrange's equation. Then simple processing was developed in accordance with the application of the model in the actual control. This model completed the feedback control of the virtual reality, and it will further enhance the user's immersion in vision and sense.

Keywords Distributed virtual reality Vision immersion Consistency
Collision detection Dynamics model

目 录

第1章 引言	1
1.1 课题研究的目的和意义	1
1.2 分布式虚拟现实系统	3
1.2.1 分布式虚拟现实系统简介	3
1.2.2 分布式虚拟现实系统的应用领域	4
1.3 增强视觉沉浸感的关键技术及现状分析	6
1.3.1 分布式虚拟现实的系统架构	6
1.3.2 分布式虚拟现实的一致性控制	8
1.3.3 精确碰撞检测的实时性	10
1.3.4 运动平台控制的准确性和实时性	12
1.4 课题来源	13
1.5 论文主要内容和贡献	13
1.6 论文的主要结构	14
第2章 混合式 P2P 结构的分布式虚拟现实系统框架	15
2.1 P2P 网络技术	15
2.1.1 P2P 的概念	15
2.1.2 P2P 的技术优势	16
2.1.3 P2P 的结构分类	17
2.2 新型混合式 P2P 结构的系统框架	20
2.3 混合式 P2P 结构系统的网络模型	21
2.3.1 节点连接信息管理	21
2.3.2 系统控制信息管理	23
2.4 混合式 P2P 结构系统的功能模型	26
2.4.1 渲染节点	27
2.4.2 控制平台	28
2.5 小结	29

第 3 章 系统的一致性控制算法和策略的研究	.. 30
3.1 分布式虚拟现实系统渲染场景不一致的原因	31
3.1.1 因果不一致	31
3.1.2 时空不一致	32
3.2 渲染节点分类	33
3.2.1 同组节点	33
3.2.2 同群节点	34
3.3 基于场景分块的局部渲染和邻近控制策略	34
3.4 分布式渲染初始化	.. 35
3.4.1 平台初始化	35
3.4.2 网络连接初始化	36
3.5 同组节点的主从缓存渲染策略	37
3.5.1 主从渲染规则	37
3.5.2 缓存渲染策略	38
3.6 同群节点的一致性控制及预测算法	39
3.6.1 基本原则	40
3.6.2 基于 Mahalanobi 的实体唯一性控制算法	40
3.6.3 同群节点的一致性预测算法	43
3.7 小结	43
第 4 章 基于光线投射的蜂窝状空间分解碰撞检测算法	45
4.1 碰撞检测算法分类	.. 45
4.2 基于光线投射的缓存算法	46
4.2.1 基于缓存的检测方法	46
4.2.2 光线投射算法	47
4.3 局部碰撞子多面体	.. 48
4.3.1 投影区域的确定	48
4.3.2 反向投影构建子包围盒	49
4.4 蜂窝状空间分解法	.. 51

4.4.1 改进子空间的紧密性·····	52
4.4.2 阈值距离碰撞检测法·····	54
4.5···算法实现与比较·····	55
·····4.6···小结·····	56
第5章 基于基准点的智能碰撞检测算法·····	57
5.1 基于距离计算的碰撞检测算法·····	57
5.2 ···局部最小碰撞区域·····	59
5.2.1 非碰撞模型的快速剔除·····	59
5.2.2 确定局部相交子区域·····	60
5.3 精确碰撞检测算法概述·····	61
·····5.4···基准点·····	64
5.4.1 确定 IRS 区域长、宽、高的扫描分割量·····	64
5.4.2···获取基准点·····	66
···5.5···碰撞检测策略·····	68
5.5.1···获取相关点·····	69
5.5.2···分类相关点·····	69
5.5.3 基于距离的碰撞策略·····	70
···5.6···“穿针引线”法·····	72
5.6.1 相关点的归类划分·····	72
5.6.2 ···碰撞判断策略·····	72
5.6.3 “点—三角形”碰撞判断策略·····	76
·····5.7···实验对比·····	78
5.7.1 模型复杂度不同·····	78
5.7.2 ···模型数量不同·····	80
5.7.3 碰撞检测精度不同·····	81
·····5.8···小结·····	81
第6章 运动平台的动力学分析与交互控制·····	82
6.1 新型运动平台的结构分析·····	82

目 录

6.2 平台动力学分析理论基础.....	84
6.2.1 拉格朗日方法简介.....	84
6.2.2 牛顿-欧拉法(N-E法)简介.....	85
6.3 并联机构平台空间运动的动力学模型分析.....	86
6.3.1 系统的逆运动学分析.....	86
6.3.3 并联平台空间运动微分方程的推导.....	96
6.4 并联平台模型简化应用及仿真验证.....	104
6.4.1 对称平面运动.....	105
6.4.2 应用仿真.....	106
.....6.5 小结.....	108
.....第7章 结束语.....	114
7.1 主要工作与创新点.....	114
7.2 研究成果的应用前景展望.....	115
7.3 研究中存在的问题及下一步工作设想.....	116
.....参考文献.....	117
.....致 谢.....	127
攻读学位期间取得的科研成果.....	128

第1章 引言

1.1 课题研究的目的是和意义

计算机技术的发展已经将计算机图形学变成了一种实用的工具。计算机图形学现在已经频繁应用于多个领域，例如：科学、艺术、工程、商务、娱乐、广告、教学和培训等，它将传统的数字、矩阵和规则用直接的视觉表达来展现，带给人们更强的视觉冲击力和更直观的效果。计算机图形学的一个最新应用是生成虚拟现实环境，在此环境中用户可与三维场景进行交互。随着网络技术的发展，人们越来越依赖网络进行虚拟交流以及协同工作，这导致了分布式虚拟现实技术的迅速发展^[1]。

分布式虚拟现实系统是一种基于网络的虚拟现实系统。在这个系统中，位于不同物理位置的多个用户或多个虚拟环境可以通过网络连接，或者多个用户同时参与一个虚拟现实环境，通过计算机与其他用户进行交互以同时共享信息^[2]。随着我国经济的发展，分布式虚拟现实系统被越来越广泛地应用于各类系统的设计、研发、测试、评估及人员训练等方面。随着系统复杂性的提高以及应用范围和场景规模的不断扩大，基于集群的高性能并行与分布式虚拟现实技术正日益成为新的研究热点^[3-7]。

视觉沉浸感是分布式虚拟现实系统设计的主要目标。传统虚拟现实系统的视觉沉浸感主要集中在模型的精细程度、光照效果、纹理映射等静态场景问题上，而伴随用户群越来越庞大，虚拟场景的复杂程度越来越高，视觉沉浸感的诸多问题也变得越来越明显^[8-10]。这主要体现在以下几个方面：

(1) 从图形工作站和观察系统方面。简单的虚拟训练的图形监视器都是以光栅扫描的形式工作，一般使用 CRT 或平板系统。复杂的虚拟现实场景大多采用多板显示屏幕或大幅面、曲面式屏幕系统来展现^[11]，如图 1-1、图 1-2 所示，系统投影机提供了多通道显示，通过进行边缘融合、变形校正和彩色平衡，来增强视觉冲击力，达到身临其境的视觉效果^[5]。而对于分布式虚拟现实系统，多个通道的渲染信号来源于分布式系统的不同渲染节点，对于场景复杂度不同的渲染节点，其渲染效率不同，从而造成了多个渲染节点无法同步匹配的问题，造成视觉的不真实感。



图 1-1 多板显示屏幕



图 1-2 多通道环形屏幕

(2) 从分布式多用户协作方面。分布式虚拟系统需要位于不同网络节点的多个用户协同操作。但是由于存在网络延时等问题^[12], 有可能造成不同用户在同一时间看到的场景信息以及虚拟环境中用户的替身(avatar)和场景中动态实体的状态信息不一致, 例如: 用户 1 发现一个本地场景中动态实体与其替身的交互信息为碰撞, 从而用户 1 操纵其替身躲避, 同时将信息传送给用户 2, 而由于动态实体的信息传输延时, 用户 2 观测到的当地场景信息为动态实体未碰撞用户 1, 而用户 1 出现了避障的动作, 出现了视觉误差, 降低了视觉的沉浸感。

(3) 从用户与虚拟场景的交互控制方面。用户与虚拟现实系统中场景交互的准确性和实时性是考察用户在虚拟场景中视觉沉浸感的重要指标。交互控制的基础是用户外设与虚拟场景的碰撞检测, 随着虚拟场景复杂度的不断提高, 碰撞检测的准确性和实时性越来越变成较为矛盾的两个方面^[13], 而对于视觉真实感而言, 此两方面是缺一不可的。如图 1-3 所示, 用户在运动过程中能够从视觉上感知环境内的场景变化, 并根据变化信息调整运动设备, 也就是说场景内的碰撞检测信息和外部设备的反馈处理必须实时准确, 才能保证参与者高度的视觉沉浸感。碰撞检测的实时性能够首先保证视觉效果的真

实性，而碰撞检测的精确性，能够给出正确的反馈信号，作用于用户的外部设备，而这其中，外部设备根据碰撞检测得到的信号正确而实时的动作，反作用于用户，可进一步从感觉和视觉方面提高沉浸感。



图 1-3 用户外设与场景的交互控制

本文针对影响分布式虚拟现实系统智能交互控制视觉沉浸感的关键技术展开研究。针对分布式虚拟现实系统的实时显示和多用户的协作问题，提出了基于混合式 P2P 网络结构的分布式虚拟现实系统架构，引入协同渲染思想完成了基于场景分块和预测算法的一致性控制；针对用户外设与虚拟场景的碰撞检测实时性和准确性问题，本文在图像空间的碰撞检测算法基础上提出了基于光线投射的蜂窝状碰撞检测算法，对于大规模场景保证了碰撞检测的实时性；同时在基于距离的碰撞检测算法基础上设计了基于特征点的碰撞检测算法，保证了复杂模型下，实时碰撞检测的精确性。在此基础上，本文研究了虚拟场景与自主研发的新型并联六自由度运动平台交互控制的实时性和准确性问题，完成了并联机器人运动平台动力学模型的建立，同时，针对模型在实际控制中的应用进行了简化处理，进一步从视觉和感觉上显著提高了用户的沉浸感。

1.2 分布式虚拟现实系统

1.2.1 分布式虚拟现实系统简介

分布式虚拟现实系统是近年来越来越受到广泛关注的现代并行仿真系统，它是计算机网络技术、通信技术、自动控制技术和虚拟现实技术等多种学科技术领域交叉结合的产物^[14]。分布式虚拟现实系统的目标是在“沉浸式”的虚拟现实的基础上，将分布在不同

物理位置上的多个用户或多个虚拟现实环境通过网络连接起来,使多个用户同时参与到一个共享的虚拟空间,通过网络与其他用户共享信息,进行交流、学习、训练、研讨、娱乐,甚至协同完成一件比较复杂的产品设计或进行一艰难任务的演练,以达到协同工作的目标,它将虚拟现实系统的应用提高到了一个更高的境界。

分布式虚拟现实系统具有以下几个特点^[15]:

- 网络用户共享虚拟工作空间;
- 伪实体的行为具有真实感;
- 支持实时交互,共享时钟;
- 多个用户可以采用各自不同的方式相互通信;
- 资源信息共享,允许用户自然操纵虚拟世界中的对象。

分布式虚拟现实技术除了具有沉浸性 (Immersion)、交互性 (Interaction)和想象性 (Imagination)三大特征以外^[16],还具备以下特征:

- 分布式虚拟现实系统允许一组处于不同物理位置上的用户进行实时自由的交互,这些用户可能根本无任何地理空间上的交互关系。分布式虚拟现实系统应该具有可扩展性,能够同时容纳大量的用户;
- 分布式虚拟现实系统的逼真度要求很高,它必须为用户提供一个高度真实感和沉浸感的虚拟现实环境。这一特征与单用户的虚拟现实环境相类似,但是分布式虚拟现实系统要考察的逼真度类型要比单用户复杂的多。主要考虑的有物理逼真度、模型逼真度、感官逼真度、基于行为特征的逼真度和时间逼真度、信息逼真度和系统逼真度等。分布式虚拟现实系统中的各个要素不仅要求行为正确、真实、可信,而且要恰当的还原和模仿真实世界的复杂度;
- 分布式虚拟现实系统需要给用户高度真实、自然的交互方式。在分布式虚拟现实系统中,每个用户角色都可能以替身(avatar)的形式出现,这个替身可能是一个自定义的模型描述,例如:真实的三维人或者赛车、操纵器械等,可能是用户的视频信息,也可能是两者的结合。替身要能够与虚拟场景以及其它替身进行实时的交互。

1.2.2 分布式虚拟现实系统的应用领域

分布式虚拟现实系统在军事、教育、科学计算的三维可视化、工程、交互式娱乐、

电子商务、艺术等领域都有着极其广泛的应用前景。利用它可以创建多媒体通信、实境式电子商务、协作系统、虚拟社区、网络游戏等全新的应用系统。典型的应用领域有^[17-19]：

军事领域：军事领域是对分布式虚拟现实技术最早进行研究和应用的领域。最早的分布式虚拟战场系统是在 1983 年美国陆军和 DARPA 共同制定的 SIMNET 研究计划。我国从 1996 年起开展此项研究，典型的系统包括在国家 863 计划支持下的一个分布式虚拟环境基础信息平台-DVENET 系统。基于 DVENET 的分布式虚拟战场环境可以将分布在不同地域的若干真实仿真器和虚拟仿真器联合在一起，进行异地协同和对抗战术仿真演练。

教育领域：分布式虚拟现实系统已经被广泛用于电脑太空旅游、建造人体模型、显示化合物分子结构等诸多应用领域，可以使学生遨游太空、游览海底、观摩城堡，甚至深入原子内部直观的观察电子的运动轨迹。由于数据更加逼真，从而大大提高了人们的想象力、激发了受教育者的学习兴趣，学习效果非常显著。

工程领域：目前的工程领域很大程度上依赖于图形工具以直观的显示各种产品，CAD/CAM 已经成为了机械、建筑等领域必不可少的工具软件。分布式虚拟现实系统的广泛应用能够使工程人员通过全球网或局域网按分工协作的方式进行三维模型的设计、交流和发布，从而进一步提高生产效率并降低工作成本。

商业领域：分布式虚拟现实系统能够使得公司与顾客建立直接的联系。分布式虚拟系统的应用可大幅改善顾客购买商品的经历。国外的一些虚拟社区就包含了很多真实的商业公司，顾客可以直接访问虚拟世界中的商店，在那里挑选商品，通过 Internet 办理付款等手续，商品会被及时的送到顾客手中。

娱乐应用：娱乐领域是分布式虚拟现实系统应用的一个重要的和广泛的领域。它能够提供更逼真的虚拟现实环境，从而使人们能够通过协作享受其中的乐趣，带来更好的娱乐感觉。网络游戏就是虚拟现实系统的一个最广泛的应用。

随着分布式虚拟现实技术的发展，分布式虚拟现实系统还被应用于高难度和危险环境下的训练。例如：医疗手术训练系统，此系统利用 MRI 或 CT 数据在计算机中重构人体或某一器官的三维模型，并赋予一定的物理特征(例如密度、韧度、组织比例等)，通过外部执行器或数据手套等高精度的交互工具模拟手术的全过程，以达到训练、研究的目的；此外，美国的 NASA 和欧洲空间局 ESA 还成功的将此技术应用于航天运载器

的空间活动、空间站的操作和对哈勃太空望远镜维修的地面训练等领域。

1.3 增强视觉沉浸感的关键技术及现状分析

1.3.1 分布式虚拟现实的系统架构

1.3.1.1 分布式虚拟现实的结构模型

分布式虚拟现实系统是基于网络的虚拟现实环境,在这个环境中,位于不同物理位置的多个用户或多个虚拟环境通过网络相互联结。根据分布式系统环境中所运行的共享应用系统的个数,可把分布式虚拟现实系统分为集中式结构和复制式结构。

集中式结构只在中心服务器上运行一份共享的应用系统。该系统可以是会议代理或对话管理进程。中心服务器的作用是对网络不同节点的多个参加者的输入/输出操纵进行管理,允许多个参加者进行信息共享。其特点是结构简单,容易实现,但对网络通信的带宽有较高的要求,并且其功能和执行效率高度依赖于中心服务器。

复制式结构是在每个参加者所在的网络节点的机器上都复制中心服务器信息,这样每个参加者的进程中都有一份共享的应用系统。服务器接收来自于其它网络节点的输入信息,并把信息传送到运行在本地上的应用系统,由系统进行计算并产生输出。它的优点是所需网络带宽相对较小。另外,由于每个参加者只与整体应用系统的局部备份进行交互,所以交互响应的实时性以及交互效果好。但是此结构比集中式结构要复杂,在维护共享应用系统的多个备份信息或状态一致性方面都比较困难^[20,21]。

1.3.1.2 分布式虚拟现实系统结构及各自优缺点

合理设计分布式虚拟现实系统的网络结构,能够在目前较为局限的硬件资源(如 CPU 计算速度、磁盘存储容量、带宽等)及其代价的情况下,平衡本地计算和网络传输功能。同时,分布式虚拟现实系统的网络架构也确定了参与虚拟现实系统的各种物理设备所扮演的角色和应具有的功能。

分布式虚拟现实系统结构的设计主要有两种模式: C/S 模式和 P2P 模式,如图 1-4 和图 1-5 所示^[22]。

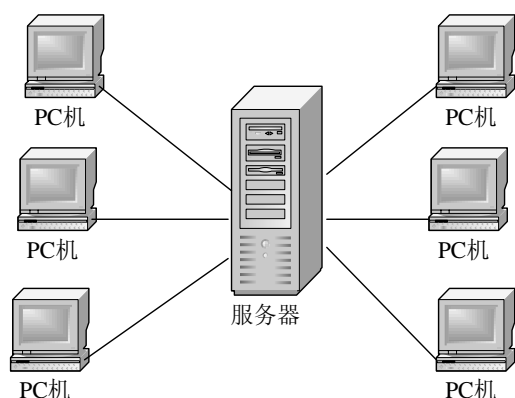


图 1-4 C/S 模式

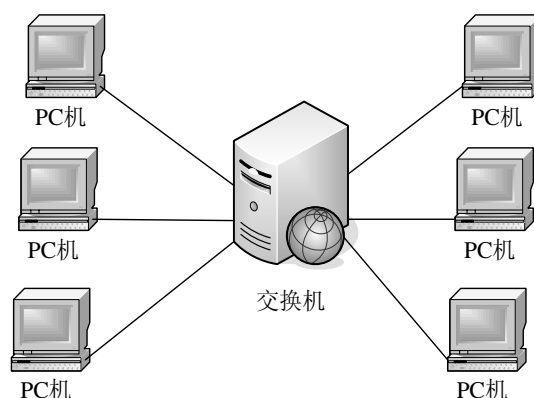


图 1-5 P2P 模式

传统 C/S 模式下的虚拟现实系统，仿真网络呈现一种星型的逻辑拓扑结构。系统中包含共享统一的虚拟现实环境数据的一组客户端，每个客户端直接连接服务器，服务器分别根据各个客户端的请求处理中心数据。在这种结构中，服务器是整个系统的统一和唯一的控制管理中心，各个客户端之间的信息交互都要通过服务器转发，每当一个客户端节点发出一个变化信息，就会将此变化数据首先传给中心服务器，服务器计算客户端节点动作的结果，然后再将数据发送给所有的其它客户端节点。此模式下，服务器可以较好的处理小规模交互系统，但是不能同时处理成千上万的客户端信息，因此，传统的虚拟现实交互系统的服务器都是一组功能各异的机器，每个机器有不同的职责。所有客户端节点通过网格计算的方法动态共享资源，并通过簇的方式保持一致性。当一个客户端节点要求连接到系统上时，它首先连接到注册服务器，注册服务器核实节点是否存在、使用有效密码、符合各项登陆条件之后，用户才能正式成为系统中的一个节点，与其他客户端节点通过服务器进行通信。在此模式下，系统网络中的通信有序，但服务器的开销大，整个系统的性能完全依赖服务器的处理能力。

基于 P2P 结构的虚拟现实系统就可以有效的避免上述问题。在 P2P 网络中，每个节点具有对等的职能，每个节点都是独立的，既不依赖于其他节点，也不被其他节点所依赖。由于每个节点功能相似，P2P 网络具有极强的自组织能力。P2P 模式的分布式虚拟现实网络环境，每个节点都向网络上的其它节点广播自身的状态信息，同时接收来自其他节点的状态信息。这种结构从网络管理的角度来讲是比较容易实现的。P2P 网络与 C/S 结构相比较，在虚拟交互系统应用上具有很多优势：(1)开销降低。P2P 网络中无中心服务器，原来由服务器完成的计算转化为由散布的客户端来完成。如果整个服务的机

制能够被类似网格系统所代替，将节省很大开销；(2)带宽降低。C/S 结构下，任意客户端节点之间的交互都要通过中心服务器实现，在 P2P 环境下，客户端的交互可以直接进行，无需第三方介入；(3)网络延迟由于少了中心服务器这一瓶颈而大大降低。

表 1-1 给出了 C/S 模式的分布式虚拟现实系统结构和 P2P 模式的分布式虚拟现实系统结构的比较。

表 1-1 C/S 和 P2P 模式的分布式虚拟现实系统结构的比较

特性	C/S 模式	P2P 模式
服务器	需要中心服务器存储数据信息和给客户端进行数据交互	不需要中心服务器存储数据信息，信息存储于各个节点
可扩展性	可扩展性受中心服务器的制约，可扩展性较差	可方便的增加或删除节点，具有灵活的可扩展性
网络通讯能力	通讯能力依赖于服务器的处理能力，信息传输量大，带宽要求高	数据信息存储于各个网络节点，传输信息量小，要求的带宽低，实时性好
安全性	信息的发布由中心服务器统一管理，安全性好	网络节点处于灵活的通讯模式下，安全性差
抗干扰能力	信息集中，抗干扰能力强	信息分散，抗干扰能力差
应用成熟度	目前常用的系统模式，有成熟的系统和算法	新兴的系统模式，实现难度较大，成熟度不高

1.3.2 分布式虚拟现实的一致性控制

随着分布式虚拟现实系统的场景复杂度越来越高以及用户数量越来越多，由于网络延迟和场景渲染的不同步造成的一致性問題成为了影响显示设备视觉效果的重要原因之一^[23,24]。而其中时空不一致是一致性問題中最关键的因素。围绕分布式虚拟系统时空一致性所展开的关键技术研究主要包括三个方面：时空一致性模型、时空一致性控制技术和分布式虚拟现实支撑平台对时空一致性控制的支持。目前，这三个方面都已经取得了一定的进展，但仍然不能满足规模较大、实体行为复杂的分布式虚拟环境的需求。

1.3.2.1 时空一致性

研究时空一致性問題的主要出发点是避免各个网络节点间的实体状态差异，目前已定义了四维空间的时空一致性来解释和解决时空一致性問題。四维空间的时空一致性是由三个位置坐标与一个时间坐标构成的空间，用它来描述虚拟实体的状态，其中包括

了时间不一致、时空转化与时空不一致三种情况^[25,26]。

时间不一致: 由于节点间的时钟不同步以及存在信息传输的延迟而导致的节点间在时间上存在的差异, 成为时间不一致。例如, 在某个时刻发生了事件 E, 由于节点 A 和节点 B 都分别有自己的时钟, 它们对事件 E 的观测都是以各自的时钟为参考的, 因此它们认为事件 E 发生的时刻分别为 t_A 与 t_B 。

时空转化: 网络节点间的时间不一致将导致它们对同一场景内实体位置的观测存在差异, 这种现象称为时空转化。

时空不一致: 时间不一致通过时空转化造成的各个网络节点对同一实体空间位置和状态的视觉观测出现了差异, 这种现象称为时空不一致。

上述定义阐述了时空不一致的原因, 而目前要提高时空一致性, 常常需要牺牲分布式虚拟现实系统的其它一些性能, 例如: 节点对于变化的响应时间。所以在分布式虚拟交互环境中, 连续媒体的一致性模型把一致性定义和响应时间约束都归入了时空一致性模型。它以描述的方式提出了短期一致性的要求, 但没有给出具体的、明确的约束。它认为只要实体在每个网络节点上的最终状态和理想计算结果相同就是一致的, 这是基于分布式离散事件系统中一致性定义, 而放松了分布式虚拟环境对短期一致性的要求。

1.3.2.2 基于 P2P 的分布式虚拟现实系统一致性要求

在传统的 C/S 结构中, 系统的对象管理、用户节点的交互都是经过服务器来实现的, 而在 P2P 系统模式下, 没有中心服务器这样一个数据信息管理者存在, 所有的数据都分散在网络各个节点上, 节点之间也只能建立部分的数据连接。各个节点分别控制各自的虚拟场景的状态, 这些状态的整合构成整个客观虚拟世界^[27]。

虚拟环境中某一个网络节点所产生的一个事件必须被其他相关节点“同时”感知到, 这就是一致性的要求。一致性是指给定时间 t , 所有的状态是正确的。每个用户产生的事件必须同步发送给其他用户, 这样每次获得相同的更新。由于在基于 P2P 的分布式虚拟环境中, 角色和实体的状态计算由各个节点完成, 用户节点的状态受用户节点之间的网络状态, 甚至用户节点本身的计算性能影响, 使得各个终端表现出不一致的状态。只有当系统中的所有节点, 所载有的数据统一时, 多个用户之间才能以统一的数据为基础进行交互, 进而推进数据的变化。由于网络延迟、不可靠传输等原因, 可能会导致各个节点对同一个实体的状态的计算参数不一致^[28]。

虚拟现实系统的视觉沉浸感对延迟非常敏感。如果控制分布式虚拟状态事件产生的延迟在人眼可接受的范围内,用户会感觉到真实感。实时性表现为用户节点运行的流畅性,用户能够及时接收其他用户发送来的数据并处理反馈,不会因为网络状态计算处理等原因而出现停等现象。为了实现实时性的效果,通常采用第一时间发送消息,或预估消息内容等方式,这给系统一致性带来一定的威胁。因此,保证在空间上各个节点对应的角色信息以及场景中的实体信息在各个节点的一致性就成为了基于 P2P 的分布式虚拟环境系统的一个关键性难点。

现有的典型时空一致性控制技术主要有本地滞后技术、时间扭曲技术、推算定位技术、异地状态延迟技术、实体迁移技术、部分因果同步技术、滞后状态同步技术、分层控制技术。由于单一的时空一致性控制技术通常局限性较大、应用领域比较有限,集成多种技术来共同实现时空一致性控制符合分布式虚拟现实系统规模日益扩大、模型类型日益复杂的趋势。

1.3.3 精确碰撞检测的实时性

在虚拟现实系统中,交互控制的实时性和准确性是提高虚拟环境中“身临其境”的沉浸感以及实现人机和谐的关键。而高效而快速的进行物体间的碰撞检测,在提高虚拟环境的真实性、增强虚拟环境的沉浸感以及加强实时交互操作等方面起着至关重要的作用^[29]。目前,国内外许多专家和学者已经针对碰撞检测问题开展了很多有重要价值的研究工作,提出了多种比较成熟的碰撞检测算法^[30]。这些算法总体上可以归为两大类:(1)静态碰撞检测。主要用于检测静止状态中各物体之间是否发生干涉的算法,例如机械零件装配过程中的干涉检查等。这类算法的特点在于对实时性要求不高,但对精度要求较高。(2)动态碰撞检测。主要是针对场景中物体的相对位置不断随时间变化的情况,例如机械零件的加工过程以及机械系统的运动仿真等。动态碰撞检测算法又分为离散碰撞检测算法和连续碰撞检测算法。

从本质上讲,离散碰撞检测算法可以看成在某一个离散时间点上进行的静态碰撞检测算法的特例,但是它更注重算法的效率,所以离散碰撞检测算法是目前研究的重点。连续碰撞检测算法的研究一般涉及到四维时空问题或者结构空间精确的建模。这类算法能较好地解决离散碰撞检测算法存在的问题,但存在计算速度较慢的缺点,需要作进一步的研究才能适用于大规模场景中的实时碰撞检测。

因此,当前大多数要求实时性的算法都属于离散碰撞检测算法。通过对比检测算法的原理,我们可以把他们大致分为两种算法:基于图形空间和基于图像的静态碰撞检测算法。这两类算法的主要区别在于是利用物体三维几何特性进行求交计算,还是利用物体二维投影的图像及深度信息来进行相交分析。目前使用最多的就是基于图形的碰撞检测算法,主要形成了两种趋势,一种是层次包围盒算法(hierarchical bounding volumes),另一种是空间分解算法(space decomposition)^[31]。

1.3.3.1 基于图形空间的碰撞检测算法

层次包围盒算法到目前为止是最为成熟和使用广泛的,基本思想是用一个简单的几何形体(即包围盒)将虚拟场景中复杂的几何物体围住,通过构造二叉树、四叉树和八叉树等树状层次遍历结构越来越逼近真实的物体。它主要包括: AABB-tree(轴平行包围盒层次树, Axis-Aligned Bounding Boxes tree)^[32], OBB-tree(任意方向包围盒层次树, Oriented Bounding Box-tree)^[33], spheres-tree(包围球层次树)^[34], k-DOPs (discrete orientation polytope 层次树和 spheres)^[35], 固定方向凸包 FDH(fixed direction convex hull)^[36]等,其他还包括混合层次包围体树。但是,这些算法的效率极大地取决于物体模型的表示方法和物体所处场景的复杂程度,同时由于物体空间的碰撞检测只在物体几何空间进行,巨大的计算量往往使得系统不堪重负,特别是在复杂的大规模场景中要实现实时交互显得尤为困难。

空间分割法是将整个虚拟空间划分成等体积的规则单元格,以此将场景中的物体分割成更小的群组,并只对占据了同一单元格或相邻单元格的几何对象进行相交测试。空间分割法中也采用层次树的方法进一步提高算法的速度,比较典型的有八叉树^[37]、BSP (binary space partitioning) 树^[38-41]等。但是由于空间分割法由于存储量大、灵活性差,通常适用于稀疏环境中分布比较均匀的几何对象间的碰撞检测。

1.3.3.2 基于图像空间的碰撞检测算法

基于图像的碰撞检测算法一般利用图形硬件对物体的二维图像采样和相应的深度信息来判别两物体之间的相交情况。最初由于检测结果的不精确性和对图形硬件要求过高一直发展较慢。但是近年来,随着图形硬件卡(graphics process unit, GPU)加速技术的快速发展,基于图像的碰撞检测算法得到了很大的发展,并逐步形成了先对物体进行凸分解,再使用模板缓存和深度缓存进行碰撞检测的算法。

1.3.4 运动平台控制的准确性和实时性

虚拟现实系统的用户能够根据虚拟现实场景的属性得到实时、精确的碰撞信息是提高视觉沉浸感的关键因素，在此基础上，用户操作的对象能够根据碰撞信息实时、准确的动作也是提高视觉沉浸感的必要补充^[42-47]。对于特定的能够完成复杂动作的运动平台，其正确的动力学模型以及简化的动力学控制是保证其在短时间内正确运动的前提。

在本论文的研究过程中，为提高碰撞反馈的实时性和精确性以及拓展研究成果的应用范围，设计并加工了具有自主知识产权的新型并联六自由度运动平台。运动平台对于场景信息的实时、精确反馈控制，也是提高用户视觉沉浸感的有效补充。与该运动平台配合能够使本文的研究成果拓展到健康增进、振动检测、模拟训练等多个领域。因此，本文在上述研究的基础上进一步就该平台的运动控制基础问题——平台的动力学模型进行了深入研究。

并联平台的研究方向主要集中在运动学和动力学这两大领域。在过去的日子里在运动学领域已经取得丰硕的理论成果，而由于并联平台动力学问题的复杂性，因此，在动力学领域的研究相对较少^[48-50]。而动力学模型可以用来准确描绘并联平台复杂的动力系统，从而实时的处理平台的动态仿真、动力响应、以及计算机控制，是对并联平台进行分析和控制的基础。虽然基于性能的控制策略不需要依赖于精确的被控对象模型及负载参数。例如：自适应控制可以很好地解决模型参数不确定性问题；鲁棒控制对有界干扰具有较好的抑制能力，并使闭环系统对参数变化具有自适应性，但并联机构的动力学特性对控制性能的影响仍是不能忽略的。如果机器人的动力学模型足够准确，就能够消除和补偿机器人实际动力的影响，保证轨迹跟踪的稳态误差趋近于 0。因此，在进行并联平台高速运动控制时，不能忽略动力学特性的影响。对于基于动力学模型的控制策略而言，实现的关键在于动力学模型准确的表达以及简化，保证系统的稳定性、可控和可观性以及在线计算效率。

本文涉及的并联平台是一个多自由度闭链结构形式，此结构的系统运动学和动力学模型相对复杂，但由于并联平台动力学模型对整个并联平台控制系统的重要性，仍需要不断完善复杂多自由度并联平台动力学建模的方法，并联机构动力学建模手段相关的研究具有很大潜力和实际意义。

1.4 课题来源

本课题来源于科技部国际科技合作项目《载人六自由度并联机器人与虚拟环境的智能交互控制研究》(批准号: 2008DFR10530)。本项目将围绕我课题组研制的六自由度并联平台的运动及其和高临场感多投影面虚拟现实环境交互的关键技术问题展开研究,拟综合运用网络拓扑分析、人工智能理论等多项前沿科技,为并联平台提供高临场感的虚拟现实环境快速生成系统的基础上,完成基于网络节点的分布式多交互系统架构的设计,实现多个并联机器人的互联,进而完成机器人与虚拟环境、平台与平台之间的双向实时智能感知和交互控制。另外,本项目将更进一步深入研究平台机构承载对象(人)在运动过程中的生理反应检测,并将其作为反馈量对平台的运动和虚拟环境的情景变化加以调节,将信息融合分析技术引入运动生理领域,在复杂系统的表达和智能控制的问题上有所突破。

本文着重研究此项目中涉及分布式虚拟现实系统在交互控制方面视觉沉浸感的关键技术问题。在本文的研究过程中又进一步得到了河北省科技厅科技支撑计划项目的支持(载人六自由度并联机器人与虚拟环境的智能交互控制研究 08393534D、分布式虚拟场景的实时绘制与一致性控制研究 08243531D)。

1.5 论文主要内容和贡献

本文围绕分布式虚拟现实系统交互控制方面增强视觉沉浸感的主要技术问题展开,研究内容和主要贡献包括:

- 分布式场景的视觉实时性和一致性方面

提出了一种综合现有两种 P2P 网络优势的新型混合式 P2P 结构的分布式虚拟现实系统框架,在此基础上,将整个系统从逻辑上分为三层:集中式 P2P 网络结构、集中式 P2P 分组、结构化分布式 P2P 网络群,提高了网络的执行效率的同时,保证了安全性;

提出了基于 P2P 网络结构下的同组节点的主从缓存渲染策略满足同一场景的分块视觉一致性,设计了同群节点之间一致性控制及预测算法以满足多个用户之间的动态协同一致性。

- 用户与虚拟场景的交互控制方面

提出了基于光线投影的蜂窝状空间分解碰撞检测算法,将碰撞检测问题转化为判断在下一帧中多面体蜂窝子空间内局部子多面体截面到对方阈值线的距离值与对方所设

定阈值的大小的关系问题，从而完成任意多面体间的精细检测，提高了大规模复杂场景下碰撞检测的速度和精度；

提出了基于基准点的碰撞检测算法，主要通过扫描线求交运算和“穿针引线”式剖分空间多边形，将模型间的碰撞检测转化为基本几何特征对之间的碰撞检测，把碰撞精度精确到模型表面的某些点和区域，更适用于快速实时精确的交互控制系统；

分析了新型 6-DOF 并联机器人运动平台的运动学特性，使用拉格朗日方法建立了并联机构的动力学模型。然后针对模型在实际控制中的应用进行了简化处理，设计了非线性控制器对仿生机器马的轨迹跟踪进行控制。

1.6 论文的主要结构

本论文共分为七章，主要的结构如下：

第 1 章介绍了本文的研究意义，分布式虚拟现实的基本概念，以及提高视觉沉浸感的主要技术问题，并在此基础上给出了本文的研究内容和主要的创新点。

第 2 章首先介绍了 P2P 技术及其特点，分析了现有的 P2P 结构，并在此基础上提出了本文设计的混合式 P2P 系统结构，给出了结构各个部分的设计思路。

第 3 章在第二章提出的新型混合式 P2P 网络结构下，就各个渲染节点场景的一致性问题进行分析，采用了节点之间的一致性控制、设计了预测算法来进一步提高基于 P2P 的分布式虚拟环境中节点进行同步交互的实时性和可扩展性。

第 4 章在首先介绍基于图像空间碰撞检测算法的基础上，将多面体局部进行空间分解，将碰撞检测转化为判断在下一帧中多面体蜂窝子空间内局部子多面体截面到对方阈值线的距离值与对方所设定阈值的大小的关系问题，提出了蜂窝状的碰撞检测算法。

第 5 章将针对复杂模型的碰撞检测精确性问题设计基于特征点的碰撞检测算法，首先快速剔除非碰撞模型节点和确定碰撞相交子空间，进而采用穿针引线的方法完成精确碰撞点的获取。

第 6 章首先分析了新型六自由度并联机器人的机械结构，进而使用拉格朗日方法建立了并联机构的动力学模型。进而针对模型在实际控制中的应用进行了简化处理。

第 7 章总结了论文的主要工作和创新点，展望了今后的工作。最后是致谢、参考文献，以及攻读博士学位期间的论文发表情况。

第 2 章 混合式 P2P 结构的分布式虚拟现实系统框架

近年来,伴随着网络技术的迅速发展,分布式虚拟现实系统受到越来越多的关注,并被广泛应用于各个领域。为了提高参与者的视觉沉浸感,越来越多的视觉显示系统采用了多屏幕拼接或环形屏幕的形式,另外,随着应用的不断深入,越来越多的分布式虚拟现实系统需要多个网络节点的参与者协同工作完成任务^[51]。但是随着虚拟场景复杂度的不断提高以及对虚拟场景变化速度等特性的要求不断深入,对系统网络的带宽以及渲染速度等都提出了更高的要求,而现有硬件的发展无法全部满足系统设计的需求,因此,设计合理、优化的分布式虚拟现实信息交互的系统结构成为了提高视觉沉浸感最根本的要求^[52-59]。

目前,大规模分布式虚拟现实系统大多采用基于服务器的 C/S 网络体系结构。一个设计合理的虚拟交互系统同一时刻需要承担成千上万的用户节点同时交换信息,这给网络通信技术带来很大的挑战。一个新的用户加入不仅仅增加了计算需求,也增加了网络的通信量,这使得中心化的管理结构出现了瓶颈,其可扩展性差的缺点也就越来越明显。伴随着网络技术的发展,虚拟现实系统用户群正在迅速扩大,虚拟环境设计越来越复杂,相应的虚拟替身以及环境中动态实体的状态也越来越多,网络通信负载也就越来越大。基于 P2P 网络结构的虚拟现实系统可以有效避免传统的 C/S 结构中的上述问题。在 P2P 结构中没有中心数据管理者存在,所有数据分散在系统中各个节点上,基于 P2P 的分布式虚拟交互系统设计的核心方向就在于节点的连接和数据信息控制方案。

本章首先介绍了 P2P 技术及其特点以及现有的 P2P 结构类型。通过对集中式 P2P 网络和结构化分布式 P2P 网络进行分析,结合本系统的应用特点,在分布式模式的基础上,本文提出了一种综合上述两种 P2P 网络优势的新型混合式 P2P 结构的分布式虚拟现实系统框架,进而完成了系统网络模型以及功能模型的设计和开发。

2.1 P2P 网络技术

2.1.1 P2P 的概念

“Peer”在英语里有“对等者”和“伙伴”的含义,从字面上,P2P 可以理解为对等互联网。国内一般将 P2P 翻译成“点对点”或“端对端”,学术界则统一称之为对等计算。P2P

可以被定义为：网络的参与者共享他们所拥有的一部分资源(存储能力、处理能力、网络连接能力)，这些共享资源通过网络提供服务，能被其它对等节点(Peer)直接访问而无需经过中间实体。在此网络中，参与者既是资源(服务)的提供者，又是资源的获取者，为其他节点提供服务，同时也享用其他节点提供的服务^[60-62]。

Intel 公司将 P2P 定义为：通过在系统间的直接交换达成计算资源和与信息共享的系统。其中，资源和服务包括信息交换、处理器时钟、缓存和磁盘空间等。IBM 对 P2P 的定义则更为广泛，认为 P2P 是若干互联协作的计算机构成的系统，系统具备以下特征^[63,64]：

- 系统依存于边缘化设备的主动协作，每个成员直接从其它成员而不是从服务器的参与中受益；
- 系统中成员同时扮演服务器与客户端的角色；
- 系统应用的用户能够意识到彼此的存在而构成一个虚拟的群体。

从学术研究的角度看，P2P 包含了以下三个层面的含义：

- P2P 实现技术：指构建 P2P 系统时所用到的技术；
- P2P 通讯模式：每个通信方都具有相同的逻辑能力，每一个通信方也有能力发起一个通讯过程；
- P2P 网络：P2P 网络是一种具有高度扩展性的分布式系统结构，其对等概念是指网络中的物理节点在逻辑上具有相等的位置。

2.1.2 P2P 的技术优势

P2P 模式突破了传统的 C/S 模式，强调节点之间的“对等性”，其核心思想是通过参与节点之间的直接信息交互来实现资源和服务的共享。P2P 的主要技术优势如下^[65,66]：

- 非中心化：网络的资源分散存储在各个节点上，信息的传输都直接在节点之间进行，避免了中心服务器存储数据和信息交换带来的瓶颈；
- 可扩展性：在 P2P 网络中，随着用户的加入，系统整体的资源和服务能力也在同步地扩充，能够满足用户的需要，理论上讲其可扩展性几乎可以认为是无限的；
- 健壮性：P2P 架构具有耐攻击、高容错的优点。P2P 系统中的数据都分散存储于各个节点，节点之间也只建立局部连接，当部分节点或网络遭到破坏时，对其它部分的影响很小。P2P 网络一般在部分节点失效时能够自动调整整体拓扑，保持其它

节点的连通性;

- 低成本、高性能: 采用 P2P 架构可以有效地利用互联网中散布的大量普通节点, 将计算任务或存储资料分布到所有节点上, 可以用更低的成本提供更高的计算和存储能力, 从而达到高效交换和高性能计算等目的;
- 负载均衡: P2P 网络环境中每个节点既是服务器又是客户机, 减少了对传统 C/S 结构下对服务器计算能力、存储能力的要求, 同时资源分布在多个节点, 更好的实现了整个网络的负载均衡。

2.1.3 P2P 的结构分类

P2P 系统从最初的发展到现在, 演变出了多种网络拓扑结构, 主要包括: 以 Napster 为代表的集中式拓扑结构、以 Gnutella 为代表的纯分散式非结构化拓扑结构、以 CAN、Chord、Pastry 等为代表的纯分散式结构化拓扑结构以及以 KaZaa 为代表的半分布式拓扑结构^[22,67-68]。

2.1.3.1 集中式拓扑结构

集中式拓扑结构采用中央服务器管理 P2P 各个节点, 如图 2-1 所示, P2P 节点向中央目录服务器注册关于自身的信息(名称、地址、资源和元数据), 但所有内容存贮在各个节点中而非服务器上, 查询节点根据目录服务器中信息的查询以及网络流量和延迟等信息来选择与定位其它对等节点并直接建立连接, 而不必经过中央目录服务器进行。

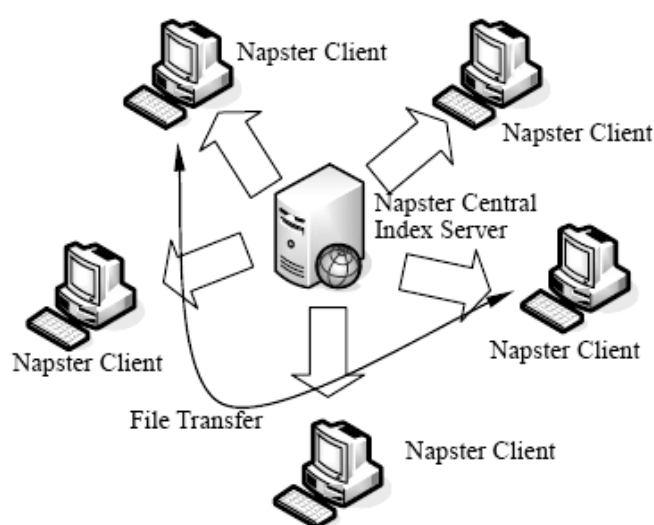


图 2-1 集中式拓扑结构

集中式拓扑结构的优点是提高了网络的可管理性, 使得各个节点对共享资源的查找

和更新非常方便,缺点是网络的稳定性差,中央服务器的瘫痪容易导致整个网络的崩溃,可靠性和安全性较低,并且扩展性差。

2.1.3.2 纯分散式非结构化拓扑结构

纯分散式非结构化拓扑结构是在重叠网络(overlay)采用了随机图的组织方式,节点度数服从"Power-Law"幂次规律,能够较快地发现目的节点,面对网络的动态变化体现了较好的容错能力,因此具有较好的可用性。同时可以支持复杂查询,如带有规则表达式的多关键词查询、模糊查询等,最典型的案例是 Gnutella。

该拓扑结构解决了网络结构中心化的问题,扩展性和容错性较好。但是网络中的搜索算法以泛洪的方式进行,控制信息的泛滥消耗了大量带宽并很快造成网络拥塞甚至网络的不稳定,从而导致整个网络的可用性较差。目前对此类结构的研究主要集中于改进发现算法和复制策略以提高发现的准确率和性能。

2.1.3.3 纯分散式结构化拓扑结构

纯分散式结构化拓扑结构的最新的研究成果体现在采用分布式散列表(DHT)的拓扑网络。分布式散列表(DHT)是一个由广域范围内大量节点共同维护的巨大的散列表。散列表被分割成不连续的块,每个节点被分配散列块。

DHT 类结构能够自适应节点的动态加入或者退出,有良好的鲁棒性、可扩展性、均匀性和自组织能力。由于网络采用了确定性拓扑结构, DHT 可以提供精确的发现。DHT 结构最大的问题是 DHT 的维护机制较复杂,尤其是节点频繁加入或者退出时造成的网络波动会增加 DHT 的维护代价。另外, DHT 仅支持精确关键词匹配查询,无法支持内容/语义等复杂查询。

2.1.3.4 半分布式拓扑结构

半分布式拓扑结构综合了纯 P2P 中心化和集中式 P2P 快速查找的优势。按节点能力不同(计算能力、内存大小、连接带宽、网络滞留时间等)区分为普通节点和超级节点两类。选择性能较高(处理、存储、带宽等方面性能)的节点作为超级节点,超级节点与其临近的若干普通节点之间构成一个自治的簇,在各个超级点上存储了系统中其他部分节点的信息,发现算法仅在超级节点之间转发,超级节点再将查询请求转发给适当的普通叶子节点。半分布式结构也是一个层次式结构,如图 2-2 所示,超级点之间构成一个高速转发层,超级点和所负责的普通节点构成若干层次。最典型的案例就是 KaZaa。

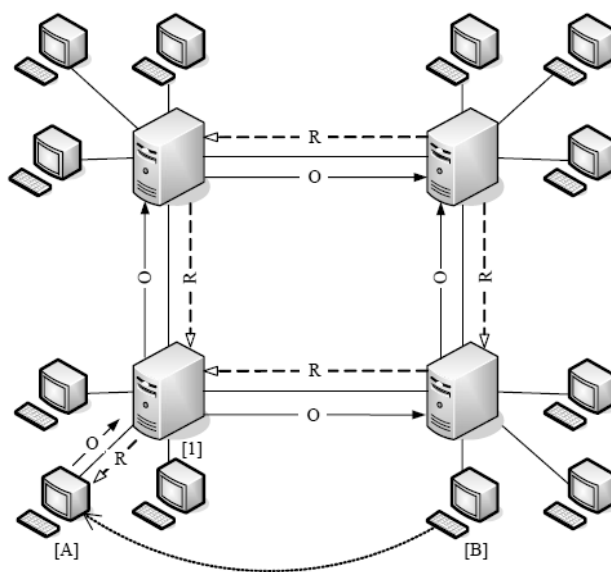


图 2-2 半分布式拓扑结构

半分布式结构极为有效地消除纯 P2P 结构中使用泛洪算法带来的网络拥塞、搜索迟缓等不利影响，性能、可扩展性较好，较容易管理。同时，由于每个簇中的超级节点监控着所有普通节点的行为，能确保一些恶意的攻击行为能在网络局部得到控制，在一定程度上提高整个网络的负载平衡。但此结构对超级点依赖性大，易于受到攻击，容错性也受到影响。

2.1.3.5 各种拓扑结构的比较

在实际应用中，每种拓扑结构都有其优缺点，表 2-1 分别从可扩展性、可靠性、可维护性、发现算法的效率、复杂查询等方面比较了这四种拓扑结构的综合性能。

表 2-1 4 种拓扑结构的性能比较

	集中式拓扑	纯分散式非结构化拓扑	纯分散式结构化拓扑	半分布式拓扑
可扩展性	差	差	好	中
可靠性	差	好	好	中
可维护性	好	好	好	中
发现算法效率	高	中	高	中
复杂查询	支持	支持	不支持	支持

2.2 新型混合式 P2P 结构的系统框架

本系统的研究是以分布式虚拟现实视觉的沉浸感为目标,实现多个运动平台与虚拟现实环境的交互,以及多个运动平台在虚拟场景中的互联、互访和交互控制,同时,对于虚拟现实环境的展现涉及到了大屏幕拼接以及多通道环幕拼接等多种形式。通过对集中式 P2P 网络和结构化分布式 P2P 网络进行分析,结合本系统的应用特点,在分布式模式基础上,本文设计了一种综合上述两种 P2P 网络优势的混合式 P2P 结构分布式虚拟现实系统框架,如图 2-3 所示。

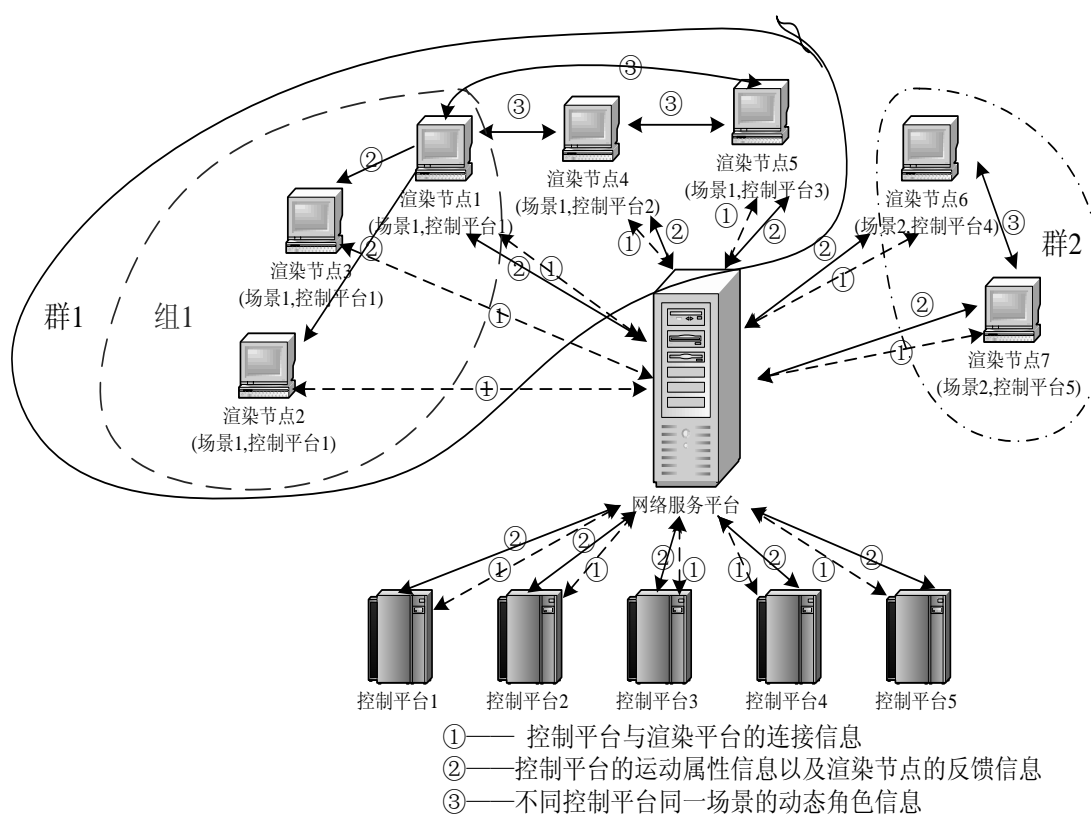


图 2-3 新型混合式 P2P 结构系统框架

首先,将用户节点按照功能进行分类,选择性能(处理、存储、带宽等各方面性能)较好的节点定义为超级节点,即网络服务平台;与运动平台相连,接受运动指令的节点定义为控制平台;而用于与显示系统相连,负责虚拟场景渲染得节点为渲染节点。

进而,本文将整个系统从逻辑上分为三层:

- 第一层是由网络服务平台为中心服务器构成的集中式 P2P 网络结构,主要用于维护多个控制平台与多个渲染节点的对应关系和多个渲染节点之间的组群关系以及建立连接关系、传达指令;

- 第二层是同一控制平台所对应的渲染节点构成的集中式 P2P 分组关系，用于同一控制平台对应场景在不同视点下的渲染同步；
- 第三层是不同控制平台对应的同一场景的结构化分布式 P2P 网络群关系，用于多个控制平台在同一场景中的协同控制。

在此模式下，所有的基础信息都被分散存放在需要对此信息进行处理的关键点上，网络服务平台只保留节点的索引信息，网络服务平台与控制平台以及各个渲染节点之间具有交互能力，特定属性相同的渲染节点间也具有信息交互能力，这种信息存储的分散性以及节点之间交互的便捷性，弱化了传统 C/S 模式中心服务器的概念，维持了整个网络的负载平衡，在网络的可扩展性和稳定性等方面都有很大的改善。同时，本结构也有效的消除了分布式 P2P 网络中的“泛洪”过程对网络信息传播造成的不利影响，提高了 P2P 网络的执行效率，同时使得网络中普通节点的行为受到了监控，可在一定程度上将一些恶意行为控制在局部范围以内，提高了系统的安全性。

2.3 混合式 P2P 结构系统的网络模型

分布式虚拟现实中的网络模型主要有两种：对等型和层次型。在对等模型中，系统中每个对等节点都维护着一个共享虚拟环境及所有实体数据库的局部拷贝，并负责仿真计算本地实体的行为，接收和处理远程实体的状态更新，实时刷新场景显示。当本地实体状态变化时，须向所有远程节点广播该状态的变化。在层次模型中，系统中设有一台中心服务器，它负责协调各仿真实体的仿真活动，维护共享虚拟环境的一致性，客户机则只负责实体的仿真计算和场景的显示等任务。本文以层次型为基础，在网络服务器平台按照渲染场景的不同完成分群，进而将同一控制平台对应的渲染节点成组，如图 2-3 所示，以组内主渲染节点为中心以组播的形式完成组内实体数据的传播，以广播的方式完成同群内主渲染节点的信息交互，在实现控制平台对于对应渲染节点控制的同时，完成相同场景控制平台之间的互联、互访以及交互控制，同时，减少数据的传输冗余，提高场景显示的实时性^[69,70]。

2.3.1 节点连接信息管理

2.3.1.1 节点网络属性

在本文所设计的混合式 P2P 分布式系统中，定义了三种类型的节点：用于网络索引连接以及控制信息和状态反馈传递的超级节点——网络服务平台、集中式管理的控制平

台以及同时具有结构化分布式 P2P 网络特点的渲染节点。

网络服务平台相当于索引服务器，在控制平台与渲染节点以及渲染节点与渲染节点之间起到桥梁的作用，故此，网络服务平台的节点属性定义可较为独立，本系统设计当中此超级节点的属性包括：

- 节点 IP 地址——Server Ip
- 端口号——Server Port

控制平台和渲染节点的属性包含：

- 全局唯一标识 ID——Identify
- 节点 IP 地址——Peer Ip
- 通信的端口号——Peer Port
- 此节点连接的网络服务平台 IP——Server Ip
- 网络服务平台的通信端口号——Server Port

2.3.1.2 节点状态信息维护

由于 P2P 网络具有很强的动态特性，P2P 网络中的每一个节点随时都有可能加入或退出 P2P 系统，或者改变节点自身的状态，从而造成 P2P 网络拓扑结构、节点连接关系的变化，出现网络搅动现象。

本系统中状态信息的维护是以网络服务平台为中心，按照集中式 P2P 网络设计原则，本文提出了节点“心跳线”的概念，建立了节点索引表，完成了不同属性节点的信息维护 and 对应关系管理。

本文在网络服务平台建立了用于管理各个节点状态的“心跳线”索引表，表结构如表 2-2 所示。当单独的控制平台或渲染节点启动后，网络服务平台为该节点建立索引，但心跳标志为“未启动”；当有节点标识 ID 相同的渲染节点和控制平台都启动后，心跳标志才被置为“启动”，也就是说只有控制平台与渲染节点建立连接关系后，对应节点能在系统中参与信息传递。

表 2-2 网络服务平台“心跳线”索引表

节点标识 ID	节点类型	节点 IP 地址	节点端口号	场景 ID	上线标志	心跳标志
Identify	控制平台 渲染节点	Peer Ip	Peer Port	Scene ID	顺序号	启动 未启动

对于网络服务平台出现的对应同一控制平台的多个渲染节点，定义第一次登陆到网

络服务平台的渲染节点为“主渲染节点”，其它同一控制平台的渲染节点为“从渲染节点”，构成“组关系”。对于不同控制平台对应的同一场景的渲染节点，构成“群关系”。

对于渲染节点构成的结构化分布式 P2P 网络，本文引入“Pastry”路由算法，完成组群的信息管理。在 Pastry 协议中没有规定具体应该采用的散列算法，但是定义了散列所得的键值是一个一维空间。在 Pastry 协议中，每个节点拥有一个 128bit 的标识(Node ID)。为了保证 Node ID 的唯一性，一般有节点的网络标识经过散列得到。Pastry 中的每一个节点拥有一个路由表(Routing Table)，一个邻居节点集合(Neighborhood Set)和一个叶子节点集合(Leaf Set)，他们一起构成了节点的状态表。Pastry 网络主要有以下几个重要的参数：

b : 用 2^b 进制来处理 128bit ID, b 的值一般取 1, 2, 3, 4;

L : 叶子节点结合的容量，一般取 $2b$ 或 $2b+1$;

M : 邻居节点集合的容量，一般取 $2b$ 或 $2b+1$;

N : 代表网络中存活的节点数。

本文所设计的主渲染节点的索引信息包含组节点集合以及群节点集合两个索引信息表，如表 2-3 和 2-4 所示。

表 2-3 组节点集合

节点 IP 地址	节点端口号
Peer Ip	Peer Port

表 2-4 群节点集合

节点标识 ID	节点 IP 地址	节点端口号
Identify	Peer Ip	Peer Port

2.3.2 系统控制信息管理

2.3.2.1 系统信息格式

为保证系统的可扩展性，以及保证网络服务平台能够从接收到的各种网络流量中正确识别出控制信息，必须定义统一的控制消息格式。在本系统中，规定各个节点之间采用标准的协议数据单元(PDU: ProtocolDataUnit)进行信息的交互。其中，最基本的协议

数据单元为原始协议数据单元(Original PDU), 原始协议数据单元格式如图 2-4 所示, 在虚拟现实系统运行中使用的各类消息都是基于原始协议数据单元的^[57]。

PDU ID	PDU TYPE
Identify	Peer PORT
Peer IP	
Time Stamp	Reserve
Payload	

图 2-4 原始协议数据单元格式

图 2-4 中协议数据单元 ID(PDU ID)表示协议数据单元全局唯一标识; 协议数据单元类型(PDU Type)表明该协议数据单元所支持的 P2P 协议类型以及相关操作; 全局唯一标识(Identify)、节点的 IP 地址(Peer Ip)以及通信的端口号(Peer Port)用于记录发送协议数据单元的节点的基本信息; 时间戳(Time Stamp)用于说明协议数据单元所对应事件的执行时间; 保留位(Reserver)主要用于协议数据单元的功能扩展; 负载(Payload)主要用于对协议数据单元进行扩展, 负载的内容应根据系统的 P2P 协议格式决定。

2.3.2.2 系统信息传输

本文网络服务平台以网络引擎 RAKNET 为基础, 定义基于 XML 的动态数据结构及各层次之间的通信协议, 完成对于多控制平台和多渲染节点的对应信号传输, 如图 2-5 所示, 以实现通讯的实时性和准确性。具体的实现方法如下: 服务器平台启动后, 给渲染节点和控制平台分配各自的 ID, 渲染节点和控制平台通过发送数据包给服务平台来连接对方, 通过开启的服务平台交互数据信息来更新自己。

网络服务平台的主要工作是在每帧中获取这一帧要传送给各个客户端的时间片长度, 其中表示帧时长的变量是从网络服务平台内部负责计算帧时长的帧时长控制类中取出的, 然后将其写入要传送给客户端的数据包中, 再写入其他数据信息后统一发送此数据包。

在 RAKNET 协议中, Packet 是网络传输中用于存储数据的一个最重要的数据结构, 它的结构如下:

```
Struct Packet
{
    PlayerID playerId;
    Unsigned long length;
    Unsigned long bitsize;
    Char *data;
}
```

PlayerID 表明了包的出处。每一个连接服务器的客户端都将被分配一个唯一的 ID 号，用于标识自己。Length 和 bitsize 用于说明这个结构中的数据长度和比特大小。Data 为传播的数据。

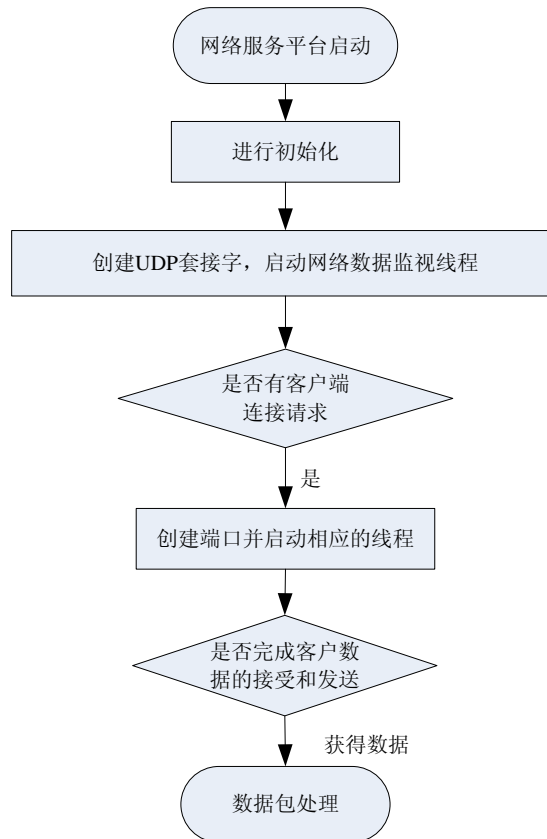


图 2-5 交互系统通信原理

在本系统中，控制平台和渲染节点都定义了自己的 Packet，用于和服务端传递和交互信息。在实际传输中为了继承的方便本系统把 Packet 改造成：

渲染节点：

```

class RenderPacket
{
public:
    string mIdentify;
    Vector3 mPosition;
    Quaternion mOrientation;
    Vector3 mSpeed;
    map<string, string> mStates;
    map<int, string> mCommands;
};
  
```

控制平台：

```
class ControllerPacket
{
public:
    string mIdentify;
    float mAcceleration;
    float mTinyOrient;
    map<string, string> mStates;
    map<int, string> mCommands;
};
```

2.4 混合式 P2P 结构系统的功能模型

本文所提出的分布式多交互虚拟现实系统结构的目的是之一构造一个可复用的、弹性的多用户大型虚拟平台，尽量减轻场景模型建立者的设计和维护负担，可以使用户在该虚拟平台上与虚拟环境交互的同时，能够与其他同一场景的网络用户交互。本文提出的分布式系统功能结构包含以网络服务平台为中心的两个主要部分：控制平台的功能设计以及渲染节点的功能设计，如图 2-6 所示。

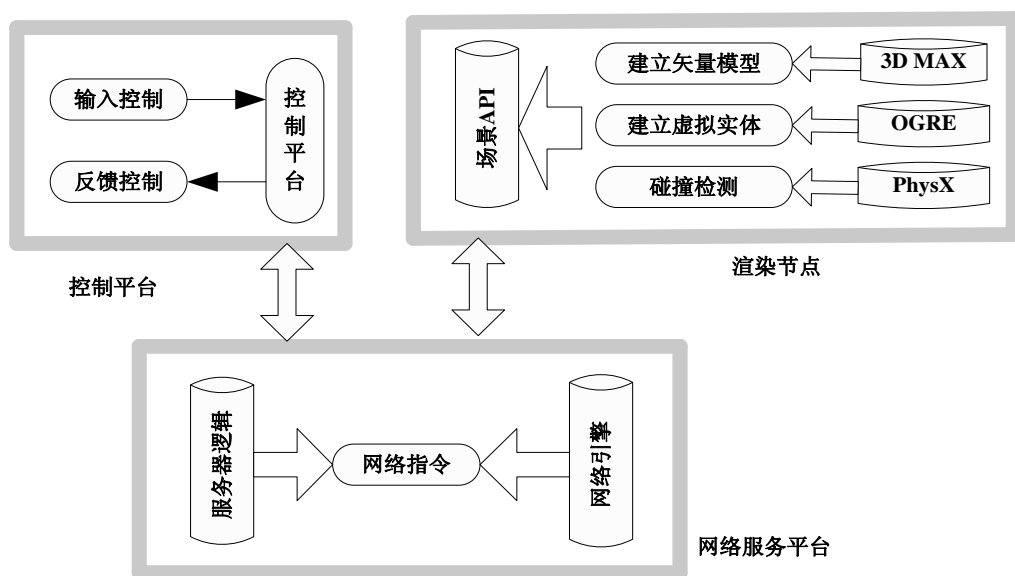


图 2-6 系统整体功能构架

控制平台是虚拟场景和控制节点的接口。一方面采用正向运动学分析完成控制节点对虚拟场景速度、加速度、方向等输入的控制；另一方面根据虚拟场景的碰撞反馈信息，利用反向运动学分析得到控制节点的反馈信息，最终完成虚拟场景与控制节点的双向交互控制。

场景渲染节点是基于图形渲染引擎实现了虚拟场景的渲染。渲染平台生成实时的虚拟环境，在虚拟环境中创建具有物理特性的实体对象并完成实体和环境的交互。根据视点的位置判断需要处理的数据，将这些数据调入缓存同时回传网络服务平台，实现多个渲染节点的协同渲染。

2.4.1 渲染节点

分布式虚拟现实交互控制系统渲染端的主要任务是实现三维场景的渲染，生成实时的虚拟环境；在虚拟环境中创建具有物理特性的实体对象并完成实体和环境的交互。基本封装结构包含了基础层、开发层和应用层三部分，如图 2-7 所示。

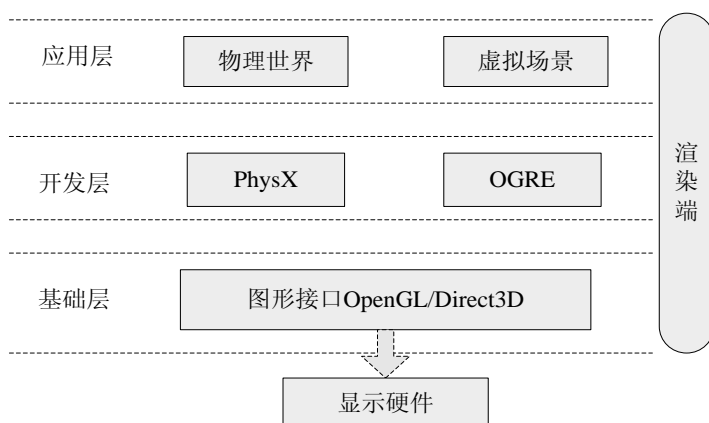


图 2-7 渲染端封装结构

- (1) 基础层 使用 Dierct3D 和 OpenGL 实现 3D 图形的渲染，Dierct3D 和 OpenGL 提供多个不同渲染窗体的子类。OGRE 提供对两者的封装和统一的接口——渲染系统类 `Rendersystem`。同时提供与外围显示硬件的接口；
- (2) 开发层 利用 OGRE 开发基本的虚拟场景，在其应用框架基础上进行扩展；通过对物理引擎 PhysX 进行类封装，实现交互需要的物理效果。PhysX 提供多种物理概念以及可编程的分组碰撞和碰撞检测；
- (3) 应用层 利用可视化开发工具 Visual Studio.NET 将开发层的交互虚拟场景封装为 Windows API，作为面向用户的界面，应用层是交互控制的基础，同时为网络分布式架构地开发奠定了基础；

虚拟场景的渲染主要是利用场景管理器类 `Ogre::SceneManager` 完成的，利用 3DMAX 工具构建矢量模型，利用 OGRE 与 3DMAX 的接口完成模型的材质设定和贴图优化，得到对应的 `.mesh` 和 `.material` 等文件。以实体对象为中心分别创建上、下、左、

右、前、后六个摄像机，完成了六通道视口输入，保证视角范围的立体化。六个摄像机和实体节点一起绑定到场景节点之上。

场景渲染的过程可分为初始化、渲染循环和渲染场景三部分，如图 2-8 所示。

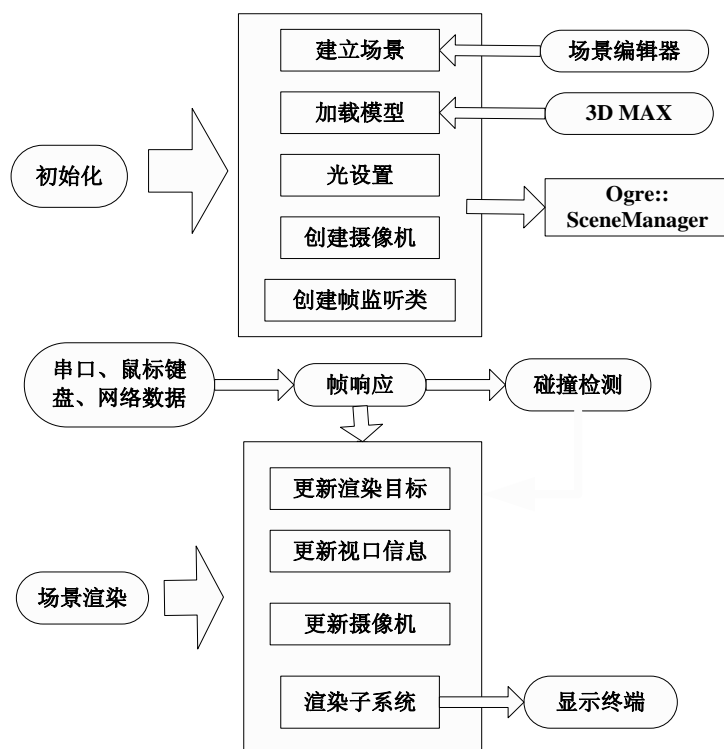


图 2-8 场景渲染过程

此部分完成基于 XML 的场景资源文件及第三方模型数据(包括静态模型、动态实体对象及骨骼动画)的加载，设置光效并创建摄像机，同时创建帧监听类；循环监听过程中外部更新数据触发帧响应处理；帧响应处理主要实现碰撞检测及渲染场景的更新。场景渲染首先更新渲染目标，然后更新与之关联的视口并产生 FPS 统计信息，视口调用与之关联的摄像机 render scene 方法进行渲染，最后更新场景渲染子系统类实现场景显示。在实际的渲染过程中，为保证视角范围的立体化，创建上、下、左、右、前、后六个摄像机视口。由于实体对象的运动具有很大的随意性，为达到实时交互的目标同时保证视觉上自然流畅，设定 33 毫秒的逻辑更新定时器。

2.4.2 控制平台

控制平台是虚拟现实和运动平台的接口层，其在分布式虚拟现实中负责向对应的渲染节点发送控制信息以及从网络服务平台接受渲染节点的场景反馈信息。这些数据信息

的处理过程为先发送到网络服务平台,网络服务平台检索索引表将数据发送给对应的渲染节点。与此相对应,渲染节点的场景信息也经由网络服务平台反馈给对应的控制平台,控制平台根据得到的调试信息,给出合理的参数设置。从而优化虚拟环境速度、加速度、转向等数据;同时,根据碰撞实体的物理特性及碰撞的方位,给出碰撞反馈算法,反馈碰撞物体的信息,进而利用反向运动学分析得到机构的运行信息,最终完成环境与运动平台的实时交互,实现对运动平台的控制。

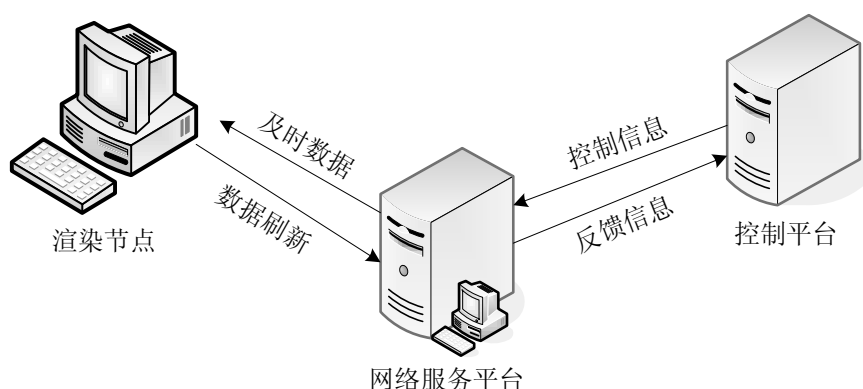


图 2-9 控制平台每帧运行原理

2.5 小结

本章首先介绍了 P2P 技术及其特点以及现有的 P2P 结构类型。通过对集中式 P2P 网络和结构化分布式 P2P 网络进行分析,结合本系统的应用特点,在分布式模式基础上,本文提出了一种综合上述两种 P2P 网络优势的新型混合式 P2P 结构的分布式虚拟现实系统框架,完成了网络服务平台、控制平台以及渲染节点这三类节点的设计,以节点“心跳线”建立节点索引表,完成不同属性节点的信息维护 and 对应关系管理,完成了节点之间连接关系的确定,定义基于 XML 的动态数据结构及各层次之间的通信协议,最后完成了各种类型节点的功能模型设计。

第 3 章 系统的一致性控制算法和策略的研究

虚拟现实系统大多采用多屏幕拼接或者多通道环形屏幕投影的形式来提高视觉效果。多屏幕中的各个分块子屏幕和环幕中的各个通道都对应了一个渲染节点,由于同一场景在不同视角下所展现的场景复杂度不同,往往造成各个渲染节点不能达到同步渲染;另外,随着大规模分布式虚拟现实系统的应用越来越广泛,越来越多的用户通过网络来进行远程的信息交流和协作,由于网络延时等问题的制约,有可能造成不同用户在同一时间看到的场景信息以及虚拟环境中用户的替身(avatar)和动态实体等状态信息不同,出现视觉误差降低视觉的沉浸感^[71-73]。上述问题都表现为分布式虚拟现实系统的一致性控制问题。

基于 P2P 的分布式虚拟环境要能够保证在空间上各个节点交互控制的正确性,就要求各个节点各自控制的角色对象的状态保持一致性,例如节点 A 在其渲染场景中对应对了控制角色 A,则 A 的位置、状态等属性变化要实时的通知其他节点,保证各个节点角色的一致性感知和处理;另外,由于基于 P2P 的分布式虚拟环境系统的空间共享性的存在,节点之间需要共享场景中的实体,因此保证相同实体特别是动态的实体(属性可变化的实体)在不同渲染节点的一致性,也是基于 P2P 的分布式虚拟现实系统的空间共享性特征的必要保证。然而,在基于 P2P 的分布式虚拟环境中,角色和实体的状态的计算由各个节点完成,由于网络延迟、不可靠传输等原因,可能会导致各个节点对同一个实体的状态的计算参数不一致。因此保证在空间上各个节点对应的角色信息以及场景中的实体信息在各个节点的一致性就成为了基于 P2P 的分布式虚拟环境系统的一个关键性难点^[74]。

前一章介绍了本文所提出的混合式 P2P 分布式虚拟现实系统的构架,它充分结合了集中式和结构式 P2P 各自的优势,在减小了系统吞吐量的同时,保证了系统的可扩展性和灵活性。本章就此结构下各个渲染节点场景的一致性问题分析,提出了基于主从控制的缓存算法和唯一性控制算法来进一步提高基于 P2P 的分布式虚拟环境中节点进行同步交互的实时性和可扩展性。该算法首先将节点进行了分类,根据对应的控制平台的不同首先分为了同组节点和非同组节点;进而,根据场景的不同分成了同群的节点和异群的节点。同组的节点由于对应的是一个角色,所以各个子场景需要实时对应,算法

中同组的节点中区分了主节点和子节点,同组节点的状态变更由主节点唯一控制,通过预测算法达到同组的节点同步。同群的节点对应不同的控制平台但共享同一场景,需要将角色信息和场景中的动态实体信息进行同步,本文着重提出了角色和动态实体的唯一性控制模型,减少了通讯带宽,保证了变化模型的准确性,进而利用预测算法完成了多节点的同步。

3.1 分布式虚拟现实系统渲染场景不一致的原因

在分布式虚拟现实系统中,地理位置上分布的多个用户可以通过网络在同一虚拟世界中共享场景资源进行通信和交互,若某一个用户在虚拟场景中的角色(avatar)发生变化或场景中的其它动态实体属性发生变化,其它用户在其渲染节点应该能够同步一致的观测到此变化,但是由于网络的延时、时钟不同步以及本地渲染节点渲染能力的差异,场景信息的不一致是不可避免的。分布式虚拟现实系统中场景的不一致主要可分为因果不一致和时空不一致^[23,75,76]。

3.1.1 因果不一致

因果不一致也就是因果顺序颠倒。现实世界中,事件的发生存在因果顺序。例如,一个点火的事件可以导致一个爆炸的事件。这两个事件是有因果关系的,若不点火,则爆炸不会发生。若在虚拟世界中由于网络传输的延时此顺序可能被颠倒,这样用户会感到虚拟世界是混乱的。文献[75]给出了一个实例,如图 3-1 所示,在一个仿真世界中,节点 A 的角色是一个坦克,它向其他节点发出向目标开火信息,节点 B 的角色是一个目标,它接到节点 A 的信息后,向其它节点发送爆炸的信息,节点 C 为一个观察者。由于网络延迟的存在,坦克的消息可能后于目标摧毁的消息到达观察者,因此,观察者看到的是目标摧毁先于坦克开火,这与真实的情况相反。

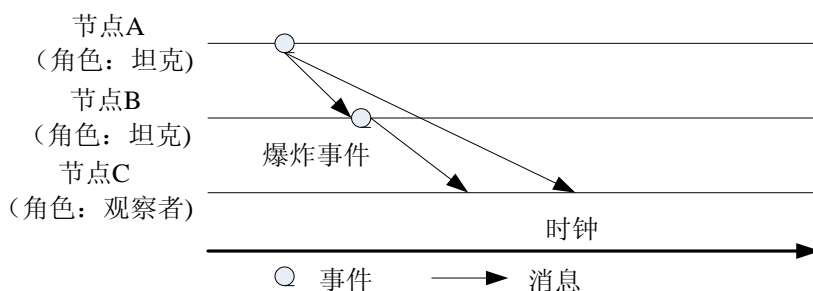


图 3-1 因果不一致

在分布式虚拟现实系统中，由于因果颠倒造成的场景不一致现在较少，而且，此不一致可通过预先设定的规律避免，因此本章不对此不一致性进行研究。

3.1.2 时空不一致

分布式虚拟现实系统中有许多的角色和实体，他们需要不断的交互各自的变化信息，才能使他们的动作被其他渲染节点所了解^[77]。但是由于通讯延迟，各个渲染节点上的角色以及实体信息存在如下的不一致现象^[78-80]。例如，一个包含两个节点的网络，通讯只在节点 A 和节点 B 之间进行，角色 A 代表节点 A 的控制属性，角色 B 代表节点 B 的控制属性，同时存在一个动态的实体 O，在 P2P 系统中，可能存在如图 2 所示的不一致。在某一个时刻，A 节点向 B 节点的通信存在网络延迟 Δt_a (B 向 A 为 Δt_b)，O 节点由角色 A 控制，从图 3-2 可见，角色 B 在渲染节点 A 的现实有 $(t - \Delta t_b)$ 的延迟，而角色 A 在节点 B 上的显示有 $(t - \Delta t_a)$ 的延迟。

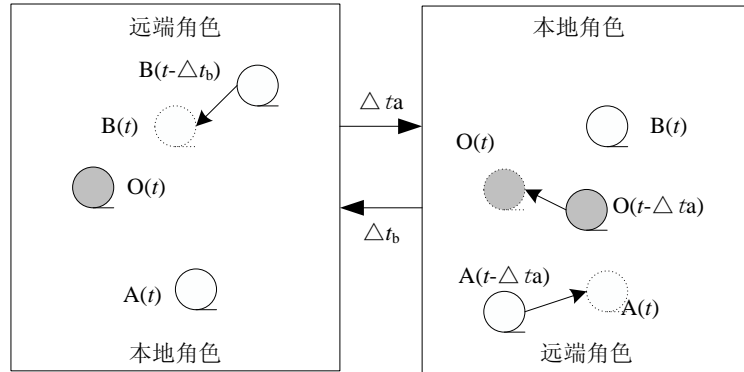


图 3-2 时空不一致

从图中可以看出，在时刻 t ，角色 A 和 B 以及动态实体 O 的最终属性为：

渲染节点 A:

$$A_A(t) = A(t) \quad B_A(t) = B(t - \Delta t_b) \quad O_A(t) = O(t) \quad (3-1)$$

$$A_B(t) = A(t - \Delta t_a) \quad B_B(t) = B(t) \quad O_B(t) = O(t - \Delta t_a) \quad (3-2)$$

其中：左边代表角色和实体的状态，下标表示他们所在的节点；右边代表在那个时刻在相关节点的控制下的实际状态。

上述的不一致是由于网络延迟等原因造成的，被称为“时空不一致性”，这种不一致性是不可避免的，本章的主要工作围绕降低时空不一致性展开。

3.2 渲染节点分类

3.2.1 同组节点

随着各种高度沉浸感的虚拟现实环境(如 CAVE 系统、投影阵列)相继出现,对单个场景渲染已经不能满足这些虚拟现实环境的需要,对于此需求,分布式虚拟现实系统可以采用多个渲染节点对应同一渲染场景,视点连续,同步渲染。图 3-3 给出了一个控制平台通过网络服务平台控制 4 个渲染节点的实例,其中,摄像机绑定于角色的中部,4 个渲染节点分别以 73 度为视棱锥分割角度,完成了正前、左侧、右侧以及下方的场景显示和同步化处理。但是由于每一帧图像的各部分在 3D 场景中的复杂程度不一样,就会造成渲染终端负载不平衡,在渲染每一帧画面的过程中,渲染终端完成各自渲染任务用时不一致,如果把各个渲染终端的渲染结果输出到显示节点上,将造成显示节点场景显示的错位。

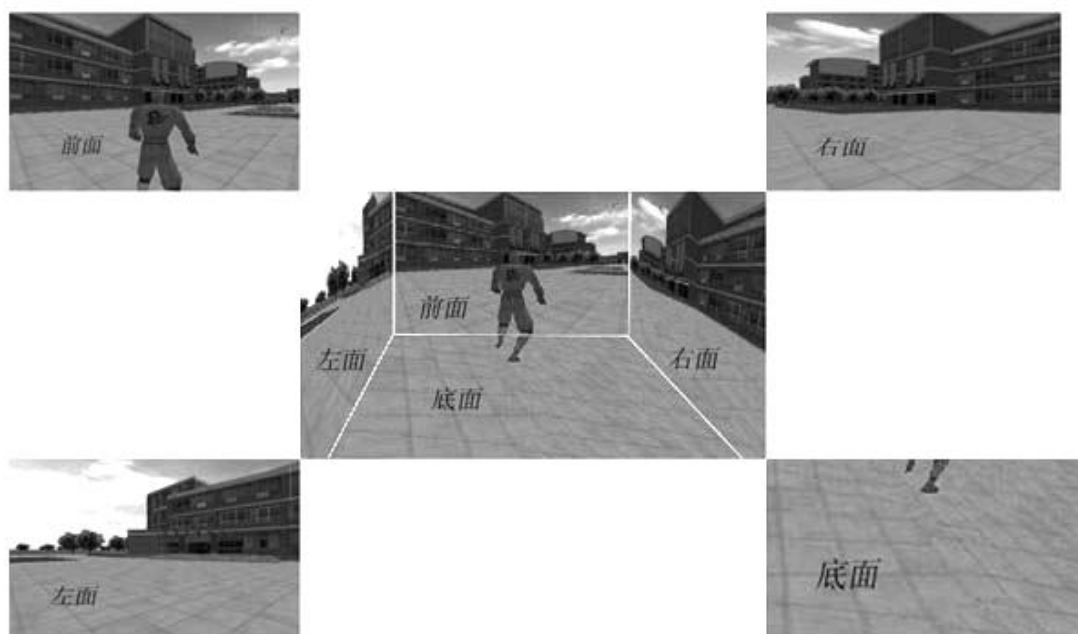
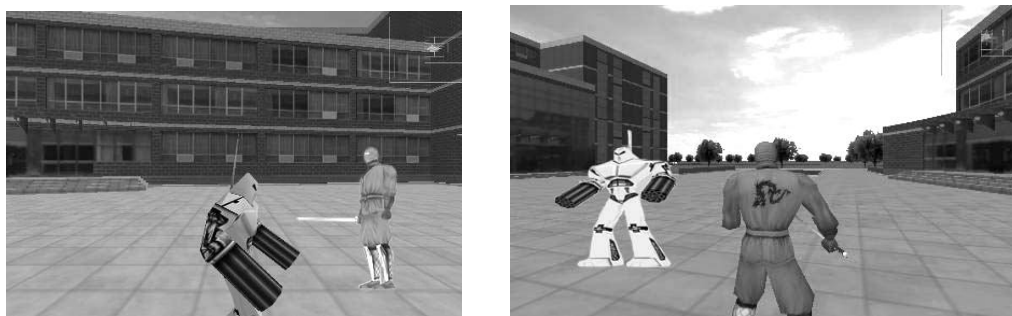


图 3-3 同组节点的协同控制

本文对于此类型的渲染需求采用了渲染节点分组的主从渲染策略,一个节点为主渲染节点,其他多个节点为辅助渲染节点,同时对一个角色对应的场景的多个视点进行渲染,并满足相互之间的约束关系。

3.2.2 同群节点

分布式虚拟现实系统最大的应用在于多个用户共享同一场景,用户对于自己的场景具有唯一的支配权力,例如多个用户在同一场景中的互动游戏,相当于多个用户共享同一平台,在各自的活动,用户可以互联、互见、互访完成交互和协作。也就是说此类用户关系对等,彼此之间要不断交换角色的信息,才能完成属性的同步处理。另外,多个用户共享的场景中存在着可改变属性的动态实体,动态实体的属性信息可由于与角色的交互而发生变化,此变化信息也应该通知给各个用户,完成用户对于场景资源的同步。但是多个角色在同一场景中出现时,由于渲染节点存储的场景信息以及角色信息的不对应或数据变化不同步,也将会造成显示节点角色显示的错位和动态实体信息显示的错位。如图 3-4 所示,两个控制平台的替身,角色 1 和角色 2 在两个主渲染节点 1 和 2 中可交互,则角色信息必须是同步的。



(a)渲染节点 1 的渲染场景

(b)渲染节点 2 的渲染场景

图 3-4 同群节点的协同控制

本文根据共享场景的不同将渲染节点分成不同的群,同一群内的渲染节点对应的角色以及渲染场景中的动态实体根据唯一性控制原则,采用缓存的方法完成多个用户的渲染一致性。

3.3 基于场景分块的局部渲染和邻近控制策略

由于对于每一个渲染节点只有角色视线范围内的场景是可观测的,同时对于其他场景的角色和场景中的动态实体也是视场范围内部分可观测的,无论是场景的渲染还是角色信息的交互都是在某一场景范围内完成的。因此,为了减少各种类型渲染节点场景渲染的工作量,同时,方便规划节点位置以及节点相邻关系,本文提出了一种基于场景分块的局部渲染方法。该方法将场景按规整网格剪裁为 10×10 的 100 个子场景单元,每个

子单元按位置相关进行编号存储,存储内容包括场景单元的位置信息以及所包含的模型数据。

在场景渲染方面,各个渲染节点采用基于视点的几何分块渲染的方法来降低了每帧场景渲染的模型量。在每一帧渲染的响应逻辑中,根据场景的位置信息可以确定当前视点所在子场景的编号,以及与其相邻的八个子场景的编号。如图 3-5(a)图所示,如果确定当前视点所在子场景为 S_{ij} ,则可确定仿真子场景分别为: S_{i-1j-1} 、 S_{i-1j} 、 S_{i-1j+1} 、 S_{ij-1} 、 S_{ij} 、 S_{ij+1} 、 S_{i+1j-1} 、 S_{i+1j} 、 S_{i+1j+1} 。图 3-5(b)图表示分块渲染的基本流程。

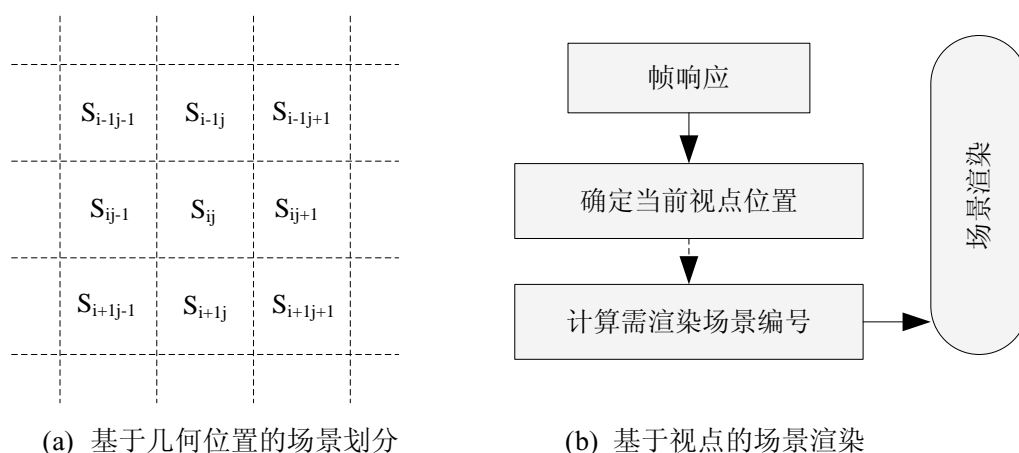


图 3-5 分块实时渲染

在多个渲染节点的邻居节点寻找方面,节点根据本地存储的本节点的场景编号,以及其他用户渲染节点的场景编号,寻找位于如图 3-5(a)中以此节点编号为中心的九个子场景的编号的所有节点列表,定义为邻居节点,在角色和实体信息传送方面只有邻近节点之间完成信息的同步传送,从而减少了信息的传输量,增加了系统的可扩展性。

3.4 分布式渲染初始化

分布式渲染初始化完成三个平台的初始化及网络通讯连接的初始化。

3.4.1 平台初始化

1. 网络服务平台初始化

- 启动端口监听,等待连接请求到来;
- 设置系统每 30 毫秒运行一帧逻辑。

2. 控制平台初始化

- 注册监听;

- 设置每 30 毫秒运行一帧逻辑;
- 连接到服务器。

3. 渲染平台初始化

- 创建多个方位的渲染窗口, 在相应摄像机未创建之前渲染窗口隐藏;
- 初始化图形渲染引擎: `int initialize(void * wnd);` 创建场景管理器:
`createWorld(Render::ST_EXTERIOR_REAL_FAR);`
- 创建摄像机节点;
- 加载自定义地图: `load(String("level.cfg"));`
- 初始化远程连接端口, 连接到服务器端 `new RenderPortImp();`
- 创建本地渲染对象, 在本系统中就是绑定的 `mash:`
`createLocalRenderCharacter (Vector3(10537.4,3060.96,-15518))。`

3.4.2 网络连接初始化

首先定义了各个平台初始化的网络配置文件, 用于标示控制节点与渲染节点的对应关系。以渲染平台为例, 配置文件的格式:

```
Identify = Render-01

Server Ip = 127.0.0.1

Server Port = 20001

Client Port = 20014
```

其中, `Identify` 为渲染节点的标示 ID, 用于建立此渲染节点与具有相同标示 ID 的其他渲染节点以及控制节点的对应关系; `Server Ip` 和 `Server Port` 为网络服务平台的 IP 地址以及端口号, 用于实现渲染节点与网络服务平台的连接; `Client Port` 为渲染节点的端口号。

网络连接的基本流程为:

1. 网络服务平台初始化各节点端口对象。控制节点和渲染节点的 `server ip` 设置与网络平台 `server ip` 相同则完成节点与网络服务平台的连接。进而, 所有节点端口向网络服务平台提交格式化结构 `ObjectKey`, 该结构包括成员: 类型(`type`: 是控制端, 还是渲染端), 是否激活(`isActive`)以及端口标示(`identify`)。
2. 控制节点和渲染节点启动后分别寻找匹配的端口对象。本系统利用 `map` 容器封

装 ObjectKey 结构, 进而遍历所有要连接到节点的端, 依据端口标示(identify)相同完成对应的连接关系。也就是说控制节点启动后找相应渲染节点, 反之, 渲染节点先启动找相应的控制节点。以渲染节点启动为例, 遍历的过程如下:

```
switch(type)
{
    case HBDX_PORT_RENDER:
    { // 找到相应的 Controller 建立对应关系
        map<unsigned short, ObjectKey>::iterator itp;
        for(itp=mPortObjects.begin();itp!=mPortObjects.end();itp++)
        {
            if( itp->second.type == HBDX_PORT_CONTROLLER &&
itp->second.identify == identify)
            {
                if(!itp->second.isActive)
                { // 建立对应关系
                    mPortObjects[index].isActive = true;
                    this->SendControllerConnected(identify, index);
                    itp->second.isActive = true;
                    this->SendRenderConnected(identify, itp->first);
                }
                break;
            }
        }
        break;
    }
}
```

3.5 同组节点的主从缓存渲染策略

3.5.1 主从渲染规则

本系统对于同一控制节点对应的渲染场景可创建正前、左、右、正后、上和下 6 个方位的渲染节点。此 6 个渲染节点标示 ID 与控制节点的标示 ID 都相同。为保证各个渲染节点每帧图像的实时性以及一致性, 本系统提出了主从渲染规则, 如图 3-6 所示:

- (1) 控制平台控制的每一组渲染节点只有一个主渲染节点(F-RP), 其他渲染节点为子渲染节点(C-RP), 定义服务器端上线最早的节点为 F-RP;
- (2) 控制平台的控制指令, 例如: 速度、加速度和方向的变化信息, 只发送给主渲染节点, 主渲染节点完成对应的位置以及方向信息转换后, 将此信息分发给对应的子渲染节点;
- (3) 子渲染节点将该场景内的动态实体信息以及角色和实体的碰撞信息发送给主

渲染节点；

- (4) 主渲染节点将角色和动态实体的信息发送给同群的其它主渲染节点，进一步完成同群节点的一致性控制。

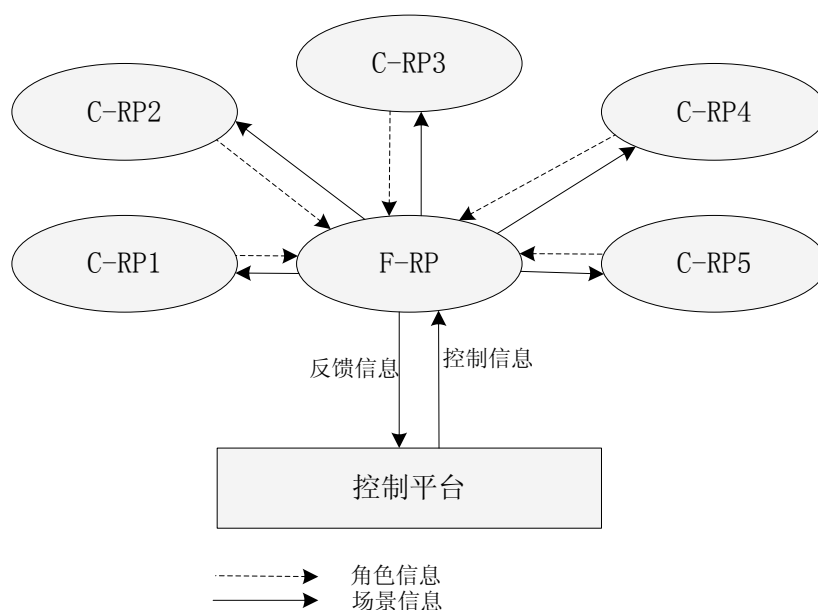


图 3-6 主从渲染规则

3.5.2 缓存渲染策略

本文区别无外加控制中断和外加控制中断两种情况下，采用下一帧场景缓存的方法，在 33ms 的时间间隔内，完成多个渲染节点缓存场景的显示以及下一帧场景的缓存更新，避免了各个渲染节点由于各自渲染任务用时不一致而造成的场景显示不同步。同时各个子渲染子节点向主渲染节点反馈下一帧场景中动态实体信息，主渲染节点进一步将集合的信息发送给同群的其它主渲染节点，为多个控制节点在同一场景中的互连、互访提供数据基础。

当无外加控制中断时，各个渲染节点以固定的速度、方向变化。此运行状态下，设定每秒的刷新频率为 30 次，也就是 33ms 完成一次场景的帧更新，在场景更新的同时，利用 Camera 在此时间间隔内为直线运动，计算下一帧 Camera 的位置以及待渲染的场景，利用缓存处理技术，完成下一帧场景的存储，向主渲染节点发送下一帧的动态实体信息，同时，接受主渲染节点提供的其它同群节点提供的场景角色和动态实体信息，在

下一次更新命令到来时,直接完成下一帧场景的显示,从而完成场景的快速显示及同步处理。

当渲染节点对应的控制节点给出外加控制中断信号情况,例如通过外设进行了速度和方向的修正。此时,控制平台将向网络服务平台发中控制中断请求,网络服务平台将向对应的渲染平台提出渲染节点更新的命令。本文根据消息的响应机制,设计了一个渲染场景的网络数据传输包 `RenderPacket`:

```
class RenderPacket
{
public:
    string mIdentify;
    Vector3 mPosition;
    Quaternion mOrientation;
    Vector3 mSpeed;
    map<string, string> mStates;
    map<int, string> mCommands;    };

```

其中, `mIdentify` 用于渲染节点标示; `mPosition` 标示渲染对象在场景中的位置; `mOrientation` 是一个 `Quaternion` 四元数,表示下一刷新时间的方向的偏移量; `mSpeed` 表示下一刷新时间场景的速度; `map<string, string> mStates` 作为 `map` 容器表示当前场景中可以渲染的角色,此部分主要在多个控制节点在同一场景中协同时使用; `map<int, string> mCommands` 为当前场景收到的渲染命令。

网络服务平台将更新渲染场景的命令发送给与控制节点标示相同的主渲染节点,主渲染节点根据 `RenderPacket` 内的变化信息,完成下一帧场景的设定和缓存,同时向各个自渲染节点发送下一帧的场景渲染信息包以及同群节点提供的角色和动态实体信息,在网络服务平台发出更新渲染命令后的 `33ms`,完成场景的渲染更新,对于 `33ms` 未能完成下一帧场景渲染的渲染子节点,则丢掉此渲染包,直接进行下一 `33ms` 的渲染场景存储,从而完成多个渲染子节点的同步更新。

3.6 同群节点的一致性控制及预测算法

目前多节点同步控制研究中提出的各类模型都基于一个假设:各个节点相互计算彼此的状态,通过投票等相关机制确定一个公认的状态来统一结果。投票所消耗的带宽是 $O(n^2)$,因此,该假设影响了基于 `P2P` 的分布式虚拟环境系统中节点同步交互的实时性和可扩展性。本文采用了日本著名学者 Yonekura 的基于最近距离的控制策略^[81],对于同群节点一致性控制是让每个节点唯一性的决定一个角色(或者实体)的状态,其它任何

节点获得的此角色(或者实体)状态都必须服从该状态,从而保证了状态的一致性。

3.6.1 基本原则

对于分布式虚拟现实系统而言,多个渲染节点的渲染场景内所有的角色和属性可变化的动态实体(例如可自由移动的实体)都是可观测和可控制的。为了在不牺牲吞吐量的前提下保证各个渲染节点的场景一致性,就应该首先确定各个角色和实体的唯一控制权归属,也就是说确定场景中的角色和实体在某一时刻只唯一的受某一渲染节点控制,此渲染节点同时向其它邻近渲染节点发布此角色和实体的属性信息。为了保证同群节点的一致性控制,必须遵循以下三个原则^[81]:

- 控制权的唯一性。对于每一个角色和实体在某一时刻其控制权是唯一的,并且所有渲染节点对于控制权的归属是统一的;
- 合理有效的控制权划分。控制权的归属必须遵循一定的划分原则,并且此划分原则是固定的,所有节点一致。角色的唯一性控制较为简单。因为角色是用户在其主渲染节点行为的替身(avatar),所以角色的控制权属于其对应的渲染节点,其他渲染节点从该节点获得对于此角色的信息。实体在整个渲染场景中可自由移动,它们是多个用户所共享的资源,不同时刻其与不同渲染角色的可交互关系不同。当某一个实体邻近某一个角色时,该实体就有可能与角色发生交互,它的属性就由此角色对应的渲染节点控制。也就是说实体的控制权在不同的时刻有不同的归属;
- 在存在网络延时等情况下,保证角色、实体属性在多渲染节点的一致性。在合理分配角色和用户的控制权后,各个渲染节点负责将所控制的角色和实体的变化信息通知其它节点,如何保证多个节点渲染的一致性是本节讨论的另一关键问题。

3.6.2 基于 Mahalanobi 的实体唯一性控制算法

关于角色主控制区域的划分以往的研究多用场景分块的方法进行,但是此方法只考虑了角色的位置属性,而对于其它属性(例如速度和方向属性)没有涉及。基于场景分块的主控制区域划分只能计算最近距离而无法判定最近到达,因而在实体的控制权确定方面存在漏洞。

传统的最近距离方法:

p 维空间的两点(两个 p 维向量 x,y)的距离定义为:

$$d_E(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + \dots + (x_p - y_p)^2} = \sqrt{(x - y)^t (x - y)} \quad (3-3)$$

并且点 X 欧氏模数为:

$$d_E(x, 0) = \|x\|_2 = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_p^2} = \sqrt{x^t x} \quad (3-4)$$

可得, 所有到原点距离相等的点满足:

$$\|x\|_2^2 = x_1^2 + \dots + x_p^2 = c^2 \quad (3-5)$$

本文利用马氏距离(Mahalanobi)的思想完成区域的设定。马氏距离是由印度统计学家马哈拉诺比斯(P. C. Mahalanobis)提出的, 表示数据的协方差距离。它是一种有效的计算两个未知样本集的相似度的方法。与欧式距离不同的是它考虑到各种特性之间的联系并且是尺度无关的(scale-invariant), 即独立于测量尺度。对于一个均值为 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_p)$, 协方差矩阵为 Σ 的多变量向量 $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)$, 其马氏距离为:

$$D_m(x) = \sqrt{(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)} \quad (3-6)$$

利用马氏距离设定分量上的权重:

$$u = \left(\frac{x_1}{s_1}, \dots, \frac{x_p}{s_p} \right) \quad v = \left(\frac{y_1}{s_1}, \dots, \frac{y_p}{s_p} \right) \quad (3-7)$$

定义 x, y 之间的距离。其中 s_i 是标准差:

$$d(x, y) = d_E(u, v) = \sqrt{\left(\frac{x_1 - y_1}{s_1} \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_p - y_p}{s_p} \right)^2} = \sqrt{(x - y)^t D^{-1} (x - y)} \quad (3-8)$$

其中: $D = \text{diag}(s_1^2, \dots, s_p^2)$ 。

现在 x 的模数等于:

$$\|x\| = d(x, 0) = d_E(u, 0) = \|u\|_2 = \sqrt{\left(\frac{x_1}{s_1} \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_p}{s_p} \right)^2} = \sqrt{x^t D^{-1} x} \quad (3-9)$$

所有到原点等距离的点满足：

$$\|x\| = c \quad \left(\frac{x_1}{s_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{x_p}{s_p}\right)^2 = c^2 \quad (3-10)$$

这是以原点为中心的某个椭球体的方程。

虚拟漫游的交互控制系统，此时的利用马氏距离的基本思想，可知任何一个角色的控制区域为一个椭圆球，如图 3-7 所示。选取角色的速度方向为椭圆的长轴方向，假定当前时刻 $T=t_0$ ，位置为 $A(t_0)$ ，下一帧的位置估计值为： $A(t_1)=A(t_0)+v(t_1-t_0)$ ，则下一步的工作是如何确定椭圆的两个轴的参数^[81]。

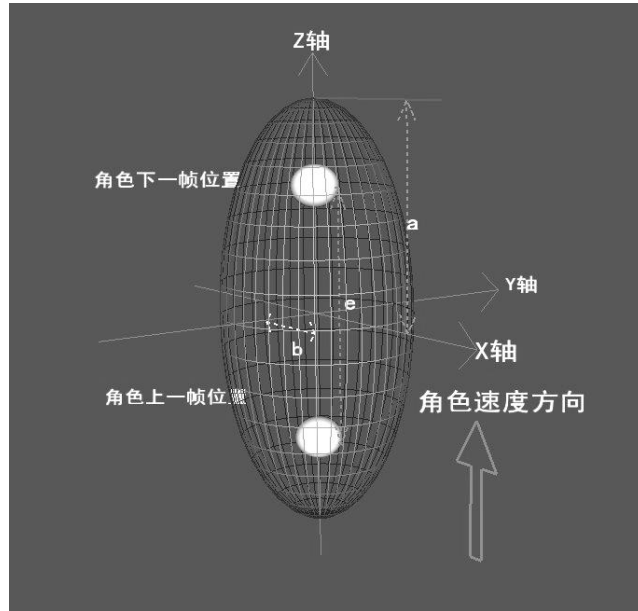


图 3-7 控制区域参数设定

设定角色 A 每一帧的变化距离为 D ，则椭圆的长轴参数为：

$$a = D \times Scale \quad (3-11)$$

其中， $Scale$ 为一个常数比例系数。

椭圆的短轴参数为：

$$b = c = \sqrt{a^2 - \left(\frac{c}{2}\right)^2} \quad (3-12)$$

3.6.3 同群节点的一致性预测算法

由于存在网络延迟等传输问题,分布式系统多个渲染节点得到其它渲染节点传来的角色和实体信息存在不同步的现象,对于同群的对等节点,本文仍然是区分有外加控制信号中断和无外加控制两种情况进行多节点的一致性处理。对于有外加控制信号中断的情况,本文仍采用下一帧场景缓存的方法,渲染节点根据控制信号完成角色下一步属性的确定,同时分发给其他渲染节点,在 33ms 的时间间隔内,完成多个渲染节点缓存场景的显示以及下一帧场景的缓存更新。本节主要讨论对于无外加控制信号的情况下节点的状态预测以及对于不属于任意一个角色的实体的属性预测。

本文同样利用前边设计的更新渲染包 **RenderPacket**,设计角色缓存的方法,实现多个控制节点在同一场景中的协同控制。具体的流程如下:

- 各个渲染主节点在更新本地渲染场景的同时,以 33ms 为间隔,将下一帧场景网络数据封装到 **RenderPacket** 包内传给同一场景内端口标示(identify)不同的所有其它渲染主节点;
- 各个渲染节点接收其他渲染节点的下一帧场景数据传输包,当根据位置和偏移量信息判断其它渲染包角色在下一帧本渲染视窗是否为可见,若是,进而判断本帧渲染中该角色是否已经在场景显示,若是,根据 **RenderPacket** 位置信息以及 **Map** 容器中 **mStates** 的动作信息,在缓存中更新角色下一帧信息;若否,在缓存中增加角色,设定位置及动作信息。

由于场景和角色信息在各个渲染节点都是本地化存储,所以在 33ms 的时间间隔内能够完成下一帧场景的存储以及角色信息的存储,从而保证了多个控制节点在同一场景的互连、互见以及互访。

3.7 小结

本章着重讨论分布式虚拟现实场景的视觉一致性问题,通过分析 P2P 网络结构对各个渲染节点场景一致性的影响,提出了主从渲染算法和唯一性控制的预测协同算法来进一步提高基于 P2P 的分布式虚拟环境中节点进行同步交互的实时性和可扩展性。算法首先将节点进行了分类,根据对应的控制平台的不同首先分为了同组节点和非同组节点;进而,根据场景的不同分成了同群的节点和异群的节点。同组节点提出了主从缓存渲染策略,同组节点的状态变更由主节点唯一控制,通过预测算法达到同组的节点同步。同

群节点设计了角色和动态实体的唯一性控制模型，减少了通讯带宽，保证了变化模型的准确性，进而利用预测算法完成了多节点的同步。

第4章 基于光线投射的蜂窝状空间分解碰撞检测算法

用户与虚拟现实系统中场景交互的准确性和实时性是考察用户在虚拟场景中视觉沉浸感的重要指标。随着虚拟场景复杂度的不断提高,碰撞检测逐步成为一个难点和热点问题^[82],其准确性和实时性之间的矛盾越来越突出,而对于视觉真实感而言,此两方面是缺一不可的。碰撞检测的实时性能够首先保证视觉效果的真实性和碰撞检测的精确性,能够给出正确的反馈信号,作用于用户的外部设备,而这其中,外部设备根据碰撞检测得到的信号正确而实时的动作,反作用于用户,又可从感觉和视觉方面进一步提高沉浸感。

本章在已有的基于图像空间碰撞检测算法基础上,提出基于光线投射的蜂窝状空间分解碰撞检测算法,对多面体局部进行空间分解,将碰撞检测问题转化为判断在下一帧中多面体蜂窝子空间内局部子多面体截面到对方阈值线的距离值与对方所设定阈值大小的关系问题,从而完成任意多面体间的精确检测,提高了碰撞检测的速度和精度,也使基于图像空间的碰撞检测适用于任意多面体。此算法适用于大规模复杂场景的实时碰撞检测。

4.1 碰撞检测算法分类

目前,国内外许多专家和学者已经针对碰撞检测问题开展了很多有重要价值的研究工作,其研究可分刚体和软体的碰撞检测^[83],刚体的碰撞检测又可分为基于物体空间的和基于图像空间的两大类碰撞检测算法。其中基于物体空间的碰撞检测算法又可划分为基于层次包围盒的碰撞检测算法和基于空间分解的碰撞检测算法,它们都是碰撞检测领域应用最为广泛的算法。典型的层次包围盒算法有:包围球^[34,84]、AABB 包围盒^[32,85]、OBB 包围盒^[33,86]、K-DOPs 包围盒^[35,87]等。常用的空间分解法有八叉树法^[37,88]和 BSP 树法^[38-41,89]。但是,这些算法的执行效率极大地取决于物体模型的复杂程度和物体所处场景的规模大小,同时由于包围盒的构造十分复杂,巨大的计算量往往使得系统 CPU 负担过重、执行效率不高,尤其是在复杂的大规模场景中要实现实时交互则显得尤为困难。而基本的基于图像空间碰撞检测算法^[90]最初由于其不精确性和对图形硬件要求过高而一直发展缓慢。近年来,随着图形硬件卡加速技术的快速发展,这一类碰撞检测算法

得到了很大的发展,其中最著名的有 Shinya^[91]和 Rossignac^[92]等提出的干涉检测算法, Govindaraju 等提出的 CULLIDE 算法^[93],以及 Baciú 等提出的 RECODE 算法^[94,95],国内也对基于图像的碰撞检测算法做了大量的研究,其中有范昭炜等提出的基于深度和模板缓存的碰撞检测算法^[96,97],王季等提出的基于深度纹理的实时碰撞检测算法^[98]和基于扫描元的快速碰撞检测算法^[99]。但是,当前大多数基于图像空间的算法只能处理凸多面体,对于非凸多面体必须先进行凸分解,这样大大降低了执行效率,并且检测精度也不高。

4.2 基于光线投射的缓存算法

4.2.1 基于缓存的检测方法

在虚拟现实系统中,缓存主要由以下四部分组成:颜色缓存、深度缓存、模板缓存、累积缓存。目前应用最为广泛的基于图像的碰撞检测算法都是以模板缓存和深度缓存测试为基础。其基本思路是^[100]:

首先,将三维模型空间降维到二维图像空间,然后通过模板测试设置各个多面体投影区域内的模板缓存值,判断投影区域内所有像素点的模板缓存值是否相同,从而确定投影相交区域。其中模板测试的功能主要是对存储在模板缓存中的像素值与参考值比较,并且比较仅适用于掩码的相应位为 1 的数位。测试通过条件的取值范围包括:总不通过测试、总是通过测试以及参考值分别为小于、小于等于、等于、大于等于、大于、不等于模板值时通过测试。

其次,根据模板测试的通过条件,对模板缓存值进行保持当前值、以 0 替换、以参考值替换、增加该值、减小该值以及对其按位取反的数值修正,用于指定片元未通过模板测试、通过模板测试但未通过深度测试、模板测试和深度测试皆通过三种情况下的模板缓存值。

进而,由于深度缓存对于屏幕上的每个像素,时刻追踪视点与占据该像素的物体上的对应点之间的距离,每次处理一个表面并对表面上的每个投影点计算深度值。计算出来的值与以前保存的深度值进行比较。使用深度测试,使碰撞检测简化到深度方向的一维区间的重叠检测,最后利用深度方向上的同一像素点多面体可能的 7 种关系,如图 4-1 所示,判断深度方向上的缓存值,继而确定碰撞的方式和深度。

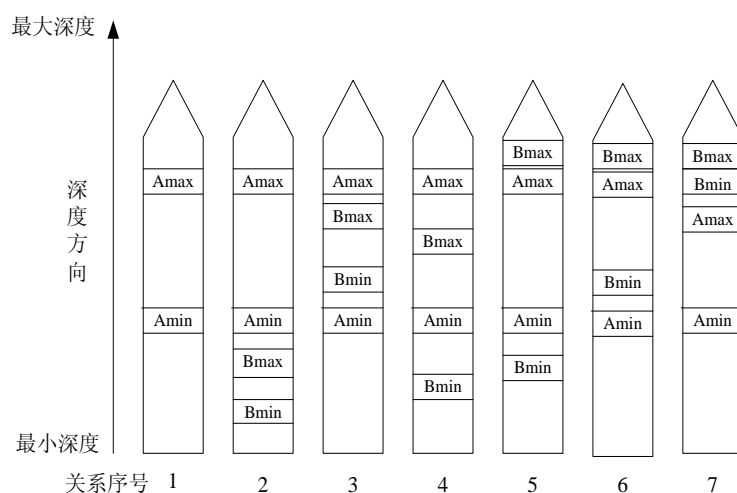


图 4-1 多面体在深度方向上的 7 种关系

4.2.2 光线投射算法

本文引入了光线投射算法来确定某一像素的深度缓存值。光线投射建立于几何光学的基础之上，它沿着光线的路径追踪，是一种有效的可见性判断方法，该方法可以看做是深度检测算法的一种变形。

由于场景中有无限条光线存在，而我们只关注那些穿过像素的光线，因此可以从像素出发，逆向跟踪射入场景中的光线路径。在光线投射算法中，每次处理一个像素，设定光线从投影面中的各个像素点出发，并延平行于光线投射路径(即深度方向)辐射，该光线必然会与各个多面体发生相交，计算出每个相交点的深度值，如图 4-2 所示，从而根据图 4-1 确定该像素点的深度缓存，进而进行确定碰撞方式。

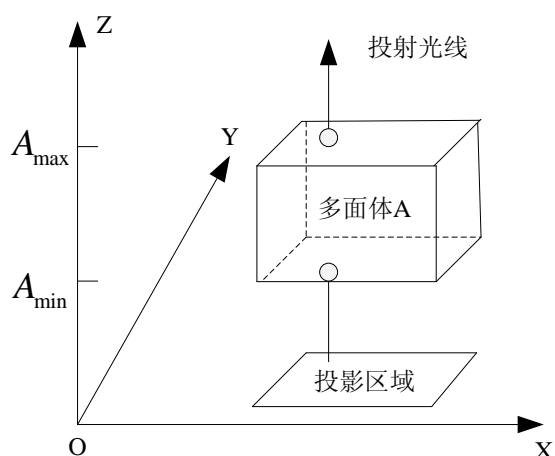


图 4-2 光线投射算法示意图

总体来说其判断碰撞发生与否的充要条件是：设 $P(X)$ 为凸多面体 X 在某个坐标平面上的投影， $D(X)$ 为凸多面体 X 在深度方向上的深度值。凸多面体之间有发生碰撞的充要条件是：

$$P(A) \cap P(B) \neq \Phi \text{ 且 } D(A) \cap D(B) \neq \Phi$$

如果只满足一条，则必定不会发生碰撞。

由上述分析不难发现，这类算法的局限性就在于它们只能处理凸多面体，对于非凸多面体必须先进行表面凸分解，将任意多面体分解为一系列凸面片的集合，从而降低了碰撞检测的效率和速度，也局限了基于图像空间的碰撞检测算法的发展，本文在光线投影算法的基础上，提出了基于蜂窝状空间分解的碰撞检测算法：

首先，根据上述算法的基本原理，不进行凸分解而直接对任意多面体进行垂直于某个表面的投影，通过对比不同多面体投影区域的模板缓存值，确定相交的投影区域，从而实现非碰撞多面体的快速剔除。因为投影区域相交的多面体有可能发生碰撞，投影区域不相交的多面体则一定不可能发生碰撞；

其次，根据图 4-1 和相交投影区域内的深度缓存值，可以得出多面体在深度方向上只有满足了关系 3、4、5、6 的才有可能发生碰撞，之所以说可能发生碰撞，是因为对于满足关系 3、4、5、6 的凹多面体来说，有不发生碰撞的可能，如图 4-3 所示；



图 4-3 有可能不发生碰撞的凹多面体

再次，在前两步的基础上，引入了蜂窝状空间分解方法，用来对满足这 4 中关系的多面体进行精确碰撞检测。

4.3 局部碰撞子多面体

4.3.1 投影区域的确定

设多面体 A 、 B 的投影面是 XOY 坐标平面， Z 轴方向为深度方向，则多面体 A 、 B 的投影区域如图 4-4 所示。

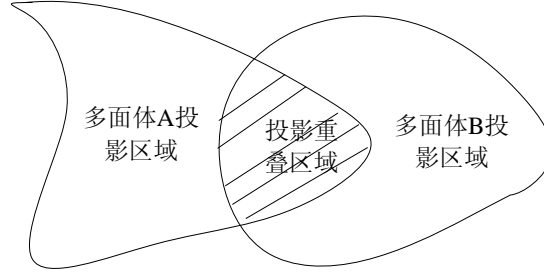


图 4-4 多面体 A、B 的投影区域

首先引入定义 1，并按定义 1 对投影重叠区域进行划分。

定义 1: 设多面体 A、B 在纵轴方向上投影重叠区域交点分别为点 a、b，设横轴方向上投影重叠区域最小值是点 c 处，最大值是点 d 处，则过 c、d 两点做平行于纵轴的直线，同时过 a 点做平行于横轴的直线，与过 c、d 两点直线相交于 e、f 点。同理过 b 点做平行于横轴的直线，与过 c、d 两点直线相交于 h、g 点。定义线段 ab、ef、hf、gh、eg 分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 ，如图 4-5 所示。在深度方向上，由多面体 A 和 B 的深度缓存值可以得到 A_{\max} 、 A_{\min} 和 B_{\max} 、 B_{\min} 。

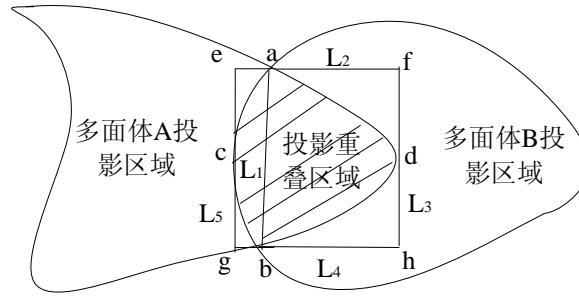


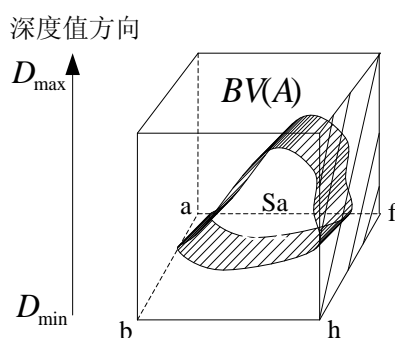
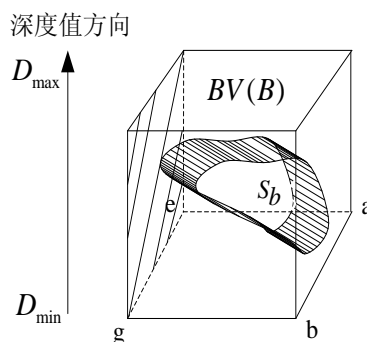
图 4-5 划分投影重叠区域

4.3.2 反向投影构建子包围盒

投影区域确定后，接下来的问题是如何获取多面体 A、B 在空间范围内的碰撞部分。在这里，本章所使用的方法是从二位图像进行反向投影，构造局部子包围盒。

首先，确定多面体 A、B 有可能相撞部分在深度方向的范围。设 D_{\max} 为投影重叠区域深度方向最大值， D_{\min} 为投影重叠区域深度方向最小值，则与关系 3、4、5、6 相对应的 D_{\max} 分别为： B_{\max} 、 B_{\max} 、 A_{\max} 、 A_{\max} ；相应的 D_{\min} 分别为： B_{\min} 、 A_{\min} 、 A_{\min} 、 B_{\min} 。

其次，构建空间子包围盒。以多面体 A 为例，因为多面体子空间中只有相对面部分才有可能发生相撞，所以只需要对多面体 A 投影重叠区域的前半部分进行反向投影，即以两投影区域交点的连线进行划分，顶点 $afhb$ 所包为的投影重叠区域为多面体 A 的投影重叠区域的前半部分，把与该区域相对应的几何多面体部分定义为 S_a 。于是分别从顶点 $afhb$ 所围成的四边形的四条边，沿着深度方向做四个垂直于投影面的平面，同时根据从定义 1 确定的 D_{\max} 和 D_{\min} 开始，做两个平行于投影面的水平面，则这六个面在空间中相交形成的一个六面体 $BV(A)$ ，如图 4-6 所示。


 图 4-6 构建 $BV(A)$

 图 4-7 构建 $BV(B)$

同理，可以由顶点 $ae gb$ 所包围形成的物体 B 的投影重叠区域前半部分和根据定义 1 确定的 D_{\max} 和 D_{\min} ，把与该区域相对应的几何多面体部分定义为 S_b ，同时构建 $BV(B)$ ，如图 4-7 所示，其中阴影区域是 $BV(A)$ 和 $BV(B)$ 可能发生碰撞的对立面。

对于动态模型，可以通过矩阵变换获取任意时间段 $BV(A)$ 和 $BV(B)$ 的顶点坐标值。

为了实现矩阵平移和空间点的唯一表示，我们在矩阵变换中采用齐次坐标系，设初始点坐标为 $M = (x, y, z, 1)$ 。由以下两步骤完成：

平移。设 (T_x, T_y, T_z) 为 X 、 Y 、 Z 方向上的平移量。平移转换矩阵 T_T 表示为：

$$T_T = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

即点平移后的坐标为：

$$M' = T_T M \quad (4-2)$$

旋转。通过模型节点的空间四元数，求得多面体 A、B 相对绕 x 轴、 y 轴、 z 轴的角度分别为 ∂ 、 β 、 ε ，则绕 x 轴，绕 y 轴，和绕 z 轴的旋转矩阵分别是：

$$T_{RX} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & \cos \partial & \sin \partial & \\ & -\sin \partial & \cos \partial & \\ & & & 1 \end{pmatrix} T_{Ry} = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & & \\ & 1 & & \\ \sin \beta & & \cos \beta & \\ & & & 1 \end{pmatrix} T_{Rz} = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon & \sin \varepsilon & & \\ -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \quad (4-3)$$

则总的旋转矩阵为：

$$M_R = T_{Rz} T_{Ry} T_{RX} \quad (4-4)$$

旋转后的坐标表示为：

$$M'' = M_R M' \quad (4-5)$$

可得 $BV(A)$ 和 $BV(B)$ 的变换坐标方程：

$$M'' = T_{Rz} T_{Ry} T_{RX} T_T M \quad (4-6)$$

综上所述，不论节点模型如何移动变换，总能得到任意时间段 $BV(A)$ 和 $BV(B)$ 。

4.4 蜂窝状空间分解法

由上述分析可知，只有相交多面体的对立面(阴影面)才可能发生碰撞，所以本文只关心 $BV(A)$ 和 $BV(B)$ 的对立面，并由对立面开始沿相反方向进行蜂窝状空间分解，把

其分割成 n 行 m 列的 $n \times m$ 个子空间，就好像 $n \times m$ 个蜂窝一样，其中 A 和 B 的第 i ($0 \leq i \leq n-1$) 行、第 j ($0 \leq j \leq m-1$) 列子空间，分别记为 A_{ij} 和 B_{ij} ，用于分别存放该子空间内 A 和 B 的子部分。同时用 $D_{ij}(A)$ 和 $D_{ij}(B)$ 表示 A_{ij} 和 B_{ij} 的子包围盒截面到对方阈值线的距离，如图 4-8 所示。

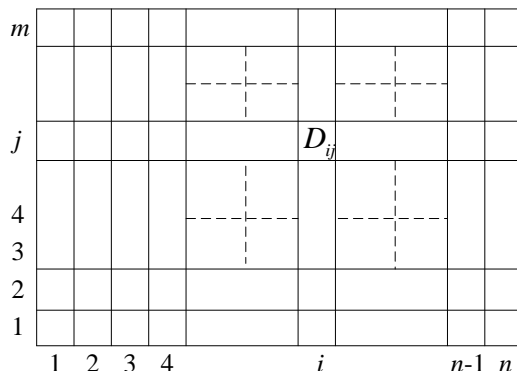


图 4-8 蜂窝状空间分解

经过上述空间分解就把空间分解成了 $n \times m$ 个子蜂窝状空间，空间分解后就把物体间碰撞位置的判断转换为判断子空间内 $D_{ij}(A)$ 或 $D_{ij}(B)$ 与对方所设定的阈值距离的大小关系对比问题。

4.4.1 改进子空间的紧密性

因为 A_{ij} 和 B_{ij} 与其所处子空间包围盒不够紧密，如图 4-9 所示，这样往往会对碰撞检测带来误差，造成发生碰撞的假象，如图 4-10 所示， A_{ij} 和 B_{ij} 的包围盒截面已经发生相交，但是它们却没有发生相交。

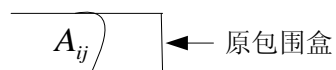


图 4-9 未改进前的包围盒效果

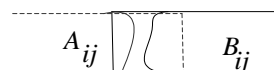


图 4-10 碰撞假象

所以，为了保证碰撞检测的精度，必须在进行精确碰撞检测前改进子空间包围盒的紧密性。本章提出了等比例缩减算法来解决这一问题，其中设定缩减比原始值为 5%，比例度为 0.1%。以 A_{ij} 为例，等比例缩减法的流程如图 4-11 所示。

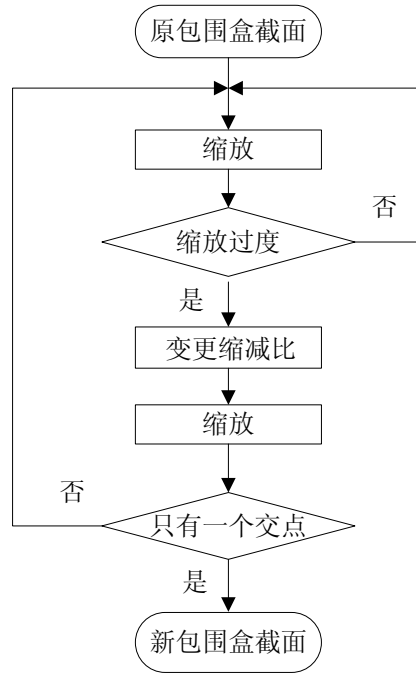
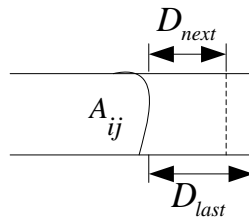


图 4-11 等比例缩减法流程

首先，定义三种缩减后的情况：情况 1，当新的包围盒截面与 A_{ij} 的没有交点时，继续进行缩减；情况 2，当新包围盒截面与 A_{ij} 产生两个交点或两个以上的交点时，表示缩减过度；情况 3，当新包围盒截面与 A_{ij} 有且仅有与交点时，表示新截面能够很好的体现 A_{ij} 的几何特性，停止缩减，应用新产生的截面为 A_{ij} 子空间的包围盒截面；

其次，在每一单位周期内，按缩减比缩减截面到 A_{ij} 的距离。即设缩减前包围盒截面(图 4-12 实线所示)到 A_{ij} 的距离为 D_{last} ，设缩减后包围盒截面到 A_{ij} 的距离为 D_{next} ，则根据公式(7)可计算出缩减后包围盒截面的位置(图 4-12 虚线所示)：

$$D_{next} = D_{last} * (1 - \text{缩减比}) \quad (4-7)$$


 图 4-12 缩减截面到 A_{ij} 的距离

再次：检验新产生的截面属于 3 种情况的哪一种。若属于情况 3，则直接转到第四步；若属于情况 1，则重复第二步操作；若属于情况 2，则表示缩减过度，新截面使 A_{ij} 的几何特性失真，则让新截面退回到上未执行本周期缩减时的位置，同时用比例度对缩减比进行一个比例度的递减，然后进行第二步操作，若还是属于情况 2，则再进行一个比例度的递减，重复第二步操作，如此重复循环检验直至达到情况 2 为止。

最后：当前进行等比例缩减后的新截面与 A_{ij} 有且只有一个交点产生，我们定义它为 A_{ij} 子空间部分的截面。这样，新截面与 A_{ij} 的紧密性得到了很大的提高，如图 4-13 所示。

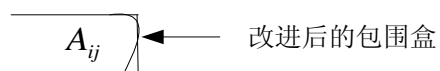


图 4-13 A_{ij} 的新包围盒截面



图 4-14 A_{ij} 和 B_{ij} 的新包围盒

该方法极大地提高了空间的紧密性，如图 4-14 所示，同时也提高了碰撞检测的精度。

4.4.2 阈值距离碰撞检测法

通过上述方法改善子空间包围盒的紧密性，本文设计了阈值距离碰撞检测法来判定多面体 A_{ij} 与 B_{ij} 是否真正发生了碰撞。该方法主要分以下几个主要环节。

首先，必须设定阈值和阈值线。设多面体 A 在单位时间周期内的移动速度(即步长)是 d ，由物理定律可知，在很短的时间内，物体的移动可以看作是直线运动，所以 A_{ij} 在单位时间周期也沿面体 A 的速度方向移动距离 d 。于是，设定阈值为多面体单位时间周期内的移动速度 d ，起始位置是 B_{ij} 的截面位置，阈值面(虚线表示)位置设定在距 B_{ij} 截面 d 远处，如图 4-15 所示。

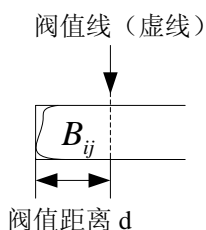
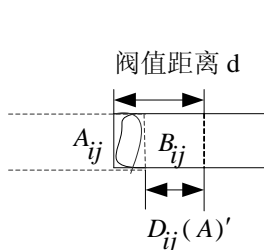
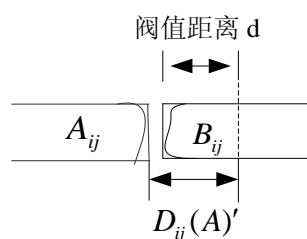


图 4-15 阈值和阈值线

其次, 考虑到某些子空间内有可能不包含 A_{ij} 或 B_{ij} , 则对于这些子空间, 定义它们的 $D_{ij}(A)$ 或 $D_{ij}(B)$ 为-1。在精确碰撞检测前, 首先检查 $D_{ij}(A)$ 或 $D_{ij}(B)$ 是否为-1, 只要 $D_{ij}(A)$ 或 $D_{ij}(B)$ 至少有一个是-1, 则不再往下判断, 即可得出 A_{ij} 和 B_{ij} 在该子空间内不会发生碰撞。当且仅当 $D_{ij}(A)$ 和 $D_{ij}(B)$ 都不为-1 时, 可进行精细碰撞检测。

在确定 $D_{ij}(A)$ 和 $D_{ij}(B)$ 都不为-1 的情况下, 设定碰撞发生的条件: 设多面体 A 向多面体 B 运动, 因为阈值距离是 A 在一个单位时间周期内的最大移动距离, 所以, 在下一个周期内, A_{ij} 所在位置不会超过 B_{ij} 的阈值线所在位置。因为 $D_{ij}(A)$ 为 A_{ij} 到 B_{ij} 阈值线的距离, 所以假设 A_{ij} 下个周期移动后到 B_{ij} 阈值线的距离为 $D_{ij}(A)'$, 于是当且仅当 $0 \leq D_{ij}(A)' \leq d$ 时, 表示 A_{ij} 与 B_{ij} 发生碰撞, 如图 4-16 所示; 当 $D_{ij}(A)' > d$ 时, 可以断定 A_{ij} 与 B_{ij} 没有碰撞发生, 如图 4-17 所示。

图 4-16 $0 \leq D_{ij}(A)' \leq d$ 时, 发生碰撞图 4-17 $D_{ij}(A)' > d$ 未发生碰撞

4.5 算法实现与比较

本章算法已在 CPU Pentium E2200 2.20GHz, 内存 2G, 显卡 NVIDIA GeForce 9700, 显存 512MB, 采用 VS8.0 编程语言的 PC 机上得以实现, 为了验证该算法的有效性, 我们在使用不同三角面片数模型的情况下, 把本章算法与 RECODE 算法的检测时间进行了对比。测试平台为 Open Scene Graph(简称 OSG)开源图像渲染引擎, 采用 osg::Timer_T 函数类, 在碰撞发生和碰撞完成的瞬间分别插入两个定时计时器, 通过判定两个定时计时器的差值来确定碰撞检测时间(如表 4-1 所示), 图 4-18 是所得的检测时间对比曲线图。

表 4-1 两种算法的检测时间对比表

三角面片数/K	平均检测时间/ms	
	本文算法	RECODE 算法
6.646	4.023	4.981
10.772	4.145	6.220
20.174	8.264	11.237
26.432	12.462	16.690

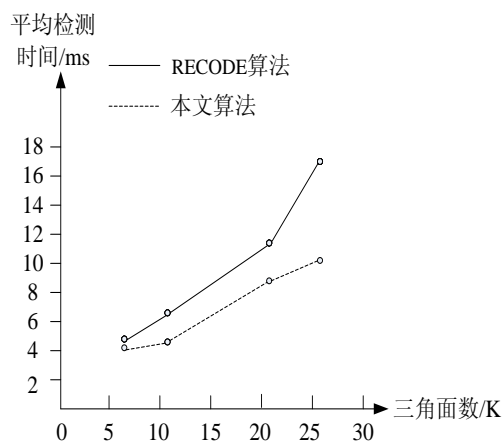


图 4-18 两种算法的检测时间对比曲线图

从图中曲线变化不难看出，随着三角面片数的不断增加，RECODE 算法的检测时间在迅速上升，与此形成鲜明对比的是，本章算法的检测时间曲线上升的速度则相对较慢，说明在相同的场景复杂度下，本章算法的平均碰撞检测时间要大大少于RECODE 算法。

4.6 小结

本章从实际应用的角度出发，在已有的基于图像空间碰撞检测算法基础上，引入光线投射算法完成碰撞多面体投影重叠区域的确定以及反向投影确定潜在碰撞多面体的自包围盒，进而设计了蜂窝状空间分解法，将碰撞检测转化为判断在下一帧中多面体蜂窝子空间内局部子多面体截面到对方阈值线的距离值与对方所设定阈值的大小的关系问题，利用等比例缩减和阈值距离判定法，完成了任意多面体间的精细检测，提高了碰撞检测的速度和精度，也使基于图像空间的碰撞检测适用于任意多面体。此方法不仅使基于图像空间的算法适用性更加广泛，而且还提高了基于图像算法碰撞检测的精度和实时性，能够保证在类似于虚拟驾驶仿真等实时性要求较高的虚拟环境下的视觉真实性。

第5章 基于基准点的智能碰撞检测算法

上一章所提出的碰撞检测算法的处理对象虽然从凸多面体扩展到了任意多面体,但是碰撞检测的精度仍然不够,仅仅将碰撞发生区域局限于某一个或多个子空间内,子空间包围盒的截面只是与模型子部分有且只有一个交点,紧密性仍然有待改进,如图 5-1 所示,该包围盒不能很好的体现模型子部分的几何特性,将碰撞转化为区域 A_{ij} 截面的相交判断,碰撞精确仍不是很高。因此,上述算法较适宜用于对于实时性要求高于精确性的大规模多实体场景下的碰撞检测。

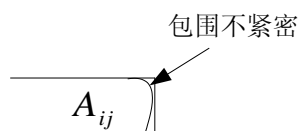


图 5-1 包围盒包围不够紧密

本章主要针对虚拟交互系统的高精度和高实时性要求,提出了一种以模型面扫描点作为基准点代替模型外层轮廓进行碰撞检测的算法。与等距离扫描线检测法相类似^[101],该算法主要通过扫描线求交运算提取模型的基准点,并把基准点经“穿针引线”法构造后形成的基本集合元素(点、线、面)作为模型的特征对,将模型间的碰撞检测转化为由一系列基准点构成的点、线、面这类基本几何元素特征对之间的碰撞检测。大大降低了算法的复杂性,同时较好地满足了实时性和精确性的要求,不仅提高了碰撞检测的速度,也可以获取碰撞发生位置,把碰撞精度精确到模型表面的某些扫描点和扫描区域。同时,本算法能够根据场景的规模以及模型的复杂程度同时综合用户在实时性和精确性方面的要求,灵活调节参数,满足检测的智能性。

5.1 基于距离计算的碰撞检测算法

近年来研究人员对碰撞检测进行了广泛而深入地研究,提出了大量高效的新算法^[102-106]。随着硬件水平的发展以及对于检测精度要求的不断深入,基于距离的碰撞检测方法逐渐成为了研究的热点,其中最著名的当属 LC 算法^[107]和 GJK 算法^[108],它们分别属于距离计算^[109]和基于特征点的碰撞检测方法^[103]。此类算法是通过寻找和跟踪两个凸多面体之间的最近点来计算它们之间的距离^[110],当距离小于或等于某个阈值时,两者

就发生了碰撞。当物体的运动速度不是非常快时，相邻帧间运动物体的位移变化很小，物体间的距离变化不大，可以利用帧间的连续性来增量式地计算。

其中 GJK 算法不是直接对两凸多面体进行搜索和跟踪，而是在它们的明氏距离多面体参数空间中搜索跟踪执行。对于两个凸多面体可以证明它们的明氏差(TCSO)也是一个凸多面体，TCSO 的每个顶点对应于分别来自于两凸多面体顶点的矢量差，GJK 算法也跟踪两凸多面体表面上的两个点，当这两个点的距离为两凸多面体之间的最近距离时，称这两点为见证点，它们不一定是惟一的。与 GJK 算法类似，LC 算法是一种基于特征(点、线、面)的增量算法。LC 算利用瞬时相关性原理，最靠近的特征(面、边或顶点)在凸多面体沿细分离散路径非快速运动的情况下变化较小的特性，引入了最近特征对这一概念，通过 Voronoi 图的构造，建立了用于验证最近特征的局部适用准则来确定最近特征对，然后计算两个最近特征间的距离以判断两个凸多面体是否相交。该算法利用了运动的空间和时间的连续性，假定新的最近特征对是上一时刻最近特征对邻近的特征，因而下一时刻最近特征对的确认不再需要全局搜索。

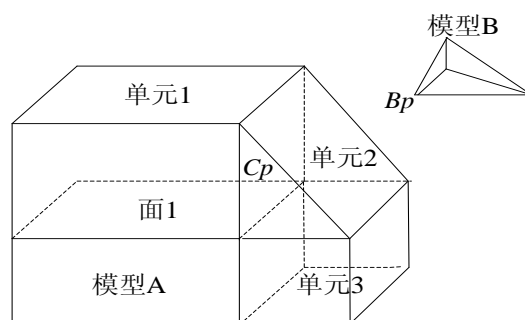


图 5-2 Voronoi 域

如图 5-2 所示，面 1 和顶点 Bp 分别为物体 A、B 上的候选特征，先判断点 Bp 是否在面 1 的 Voronoi 域(单元 1)里，由于 Bp 在约束面 Cp 外，下一步测试 Bp 是否在 Cp 指向的邻近域(单元 2)中，如此测试下去直到两特征都分别位于对方的 Voronoi 域中，这样的特征对即为最近特征对。一般情况下，物体在相邻两时刻位移不大，故相邻两时刻的最近特征对相隔也不会很远，最近特征对的更新花费时间很少，从而使得该算法具有一定的实时性。但是该算法在物体结构较复杂或者运动较快的情况下，算法效率显著降低，无法满足实时性要求。

对于一些对精确性要求较高的特殊复杂场景，本章引入基于基准点的碰撞检测算法

来完成精确的碰撞检测。本算法提出通过扫描线求交运算和设计“穿针引线”法以剖分空间多边形，将模型间的碰撞检测转化为基本几何特征对之间的碰撞检测。该方法大大降低了算法的复杂性，同时较好地兼顾了实时性和精确性的要求，不仅提高了碰撞检测的速度，也可以获取碰撞发生位置，把碰撞精度精确到模型表面的点和区域，更适用于快速实时精确的交互控制系统。该算法主要由两大阶段组成：预处理阶段和精确判断阶段。在预处理阶段，快速剔除非碰撞物体，确定发生碰撞的子空间区域；精确碰撞判断阶段的主要任务是确定碰撞发生与否和碰撞位置，从而达到碰撞检测的目的。本文采用导弹攻击坦克群为例对算法进行了辅助说明。

5.2 局部最小碰撞区域

为了降低计算的复杂性，本文首先快速剔除场景中不可能发生碰撞的模型节点。大规模的虚拟场景中，待碰撞模型节点(记作 O_i)数量很多，不可能一一对他们进行系统的碰撞检测，为了提高检测的实时性，我们首先对明显不可能与碰撞节点(记作 CN)发生碰撞的物体进行排除，这样通过缩减碰撞检测的检测范围，进一步提高计算效率。

5.2.1 非碰撞模型的快速剔除

交互系统要求很高的实时性，必须选择一种简单而又快速的包围盒进行相交测试，而包围球构造简单，当模型转动后不用重新计算，并且容易进行相交判定，故此本章选定包围球作为基本包围盒进行相交测试。

设包围球中心坐标为 (x_0, y_0, z_0) ，包围球的半径为 R ，球面顶点坐标为 (x, y, z) ，则包围球的约束方程为：

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \leq R^2 \quad (5-1)$$

于是设 CN 包围球中心坐标 (x_c, y_c, z_c) ，半径 R_1 。 O_i 包围球中心坐标 (x_i, y_i, z_i) ，半径 R_2 。则两个包围球的中心距离：

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (5-2)$$

可以定义相交判定定理为：当且仅当 $d \leq (R_1 + R_2)$ 时可认为两包围球相交，当 $d > (R_1 + R_2)$ 时，认为两包围球没有发生相交。

基于此基本原理，分别判断 CN 与 O_i 的中心距离之和与两者包围球半径和的关系，若满足条件 $d \leq (R_1 + R_2)$ ，则认定 O_i 可能与 CN 发生碰撞，并将其归类为潜在碰撞节点 (记作 P_i)。反之则认为不可能与 CN 发生碰撞，直接舍弃。以此类推，如果有碰撞发生，只有可能发生在 CN 和 P_i 之间。

5.2.2 确定局部相交子区域

对于经过上述操作所得到的潜在碰撞节点，由于其包围球的不精密性，可能存在包围球相交但模型并没有真正相交的情况。在图 5-3 中，坦克节点 O_a (左) 与坦克节点 O_b (右) 都与导弹节点 CN 的包围球相交，但是 O_b 与 CN 明显没有发生碰撞。本接将进一步通过获取获取局部相交子区域来进一步剔除非碰撞节点，该方法包括：

(1) 创建 O_i 与 CN 的 AABB 包围盒。根据 O_i 与 CN 在各个轴上的极值可以确定 AABB 包围盒的空间区域。

(2) 确定局部相交子区域。通过构建包围盒，可进一步剔除非碰撞节点，同时可以根据 O_i 与 CN 包围盒相交的极值确定局部相交子区域 (IRS 区域)，如图 5-4 所示。IRS 内的 O_a 和 CN 的子部分别记为 SP_a 和 SCN ，如果 O_a 和 CN 发生碰撞，有且仅有可能在 SP_a 和 SCN 中发生，于是通过上述步骤进一步缩小了碰撞检测的范围，提高了检测速度。

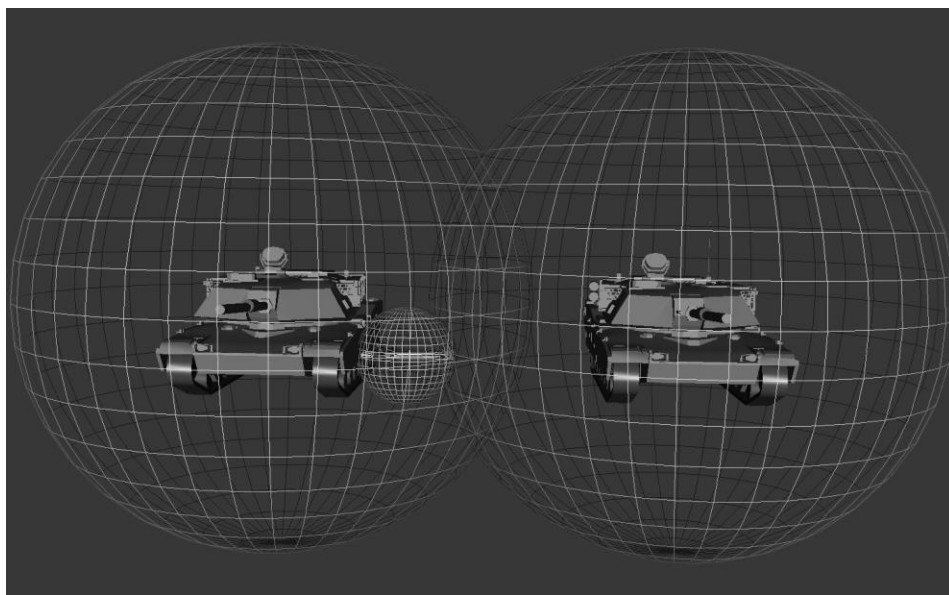


图 5-3 包围球相交，模型没相交

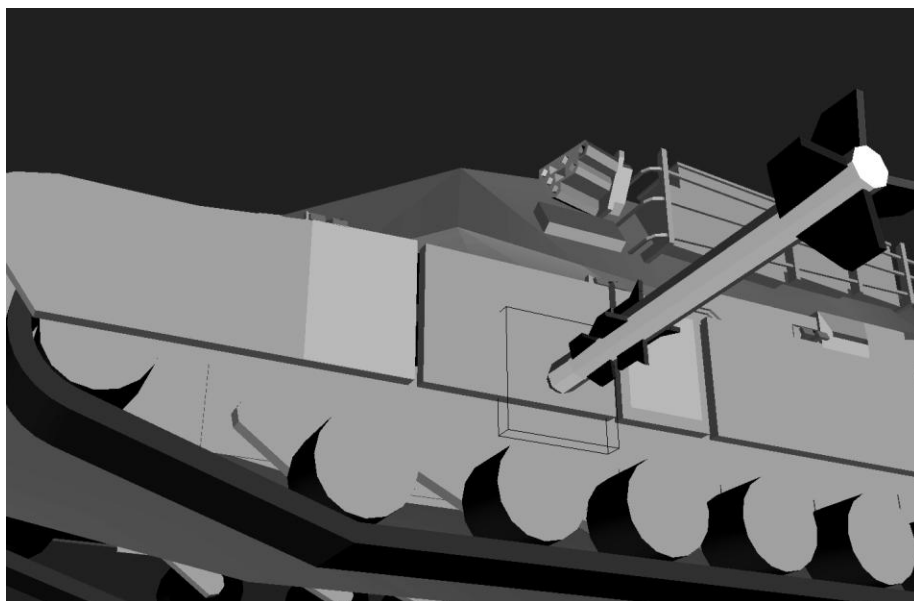


图 5-4 IRS 区域

对于动态模型，可以通过矩阵变换获取任意时间段内 IRS 区域的各个顶点坐标值。设初始点坐标为 $M = (x, y, z, 1)$ 。

首先，设定平移矩阵 T_T ，则平移后的坐标为：

$$M' = T_T M \quad (5-3)$$

其次，设绕 x 轴，绕 y 轴，和绕 z 轴的旋转矩阵分别为： T_{RX} 、 T_{Ry} 、 T_{Rz} ，则旋转矩阵表达式为：

$$T_R = T_{Rz} T_{Ry} T_{RX} \quad (5-4)$$

旋转后的坐标表示为：

$$M'' = T_R M' \quad (5-5)$$

综上所述，可得每个顶点的经矩阵变换后的坐标方程为：

$$M'' = T_R T_T M \quad (5-6)$$

5.3 精确碰撞检测算法概述

经过预处理阶段后，已经得到了 SP_a 、 SCN 和相交子区域 IRS，下一步只需对 SP_a 和 SCN 进行精确碰撞检测。传统的基于距离的碰撞检测算法，例如 LC 算法，大多数都是

采用顶点作为特征来寻找凸多面体之间的最近距离，但是在构造多面体模型时，顶点的分布是不平衡和无序的，并且顶点的数目是固定的，不能满足碰撞检测的有效性和智能性。本文提出了精确度可调节的规则分布的基准点的概念，由基准点构造形成的基本集合元素(点、线、面)作为模型的特征对，提出了“穿针引线”的算法，通过对基准点之间距离的判定完成碰撞以及碰撞区域的确定，提高了系统的灵活性，该阶段的流程图如图 5-5 所示。

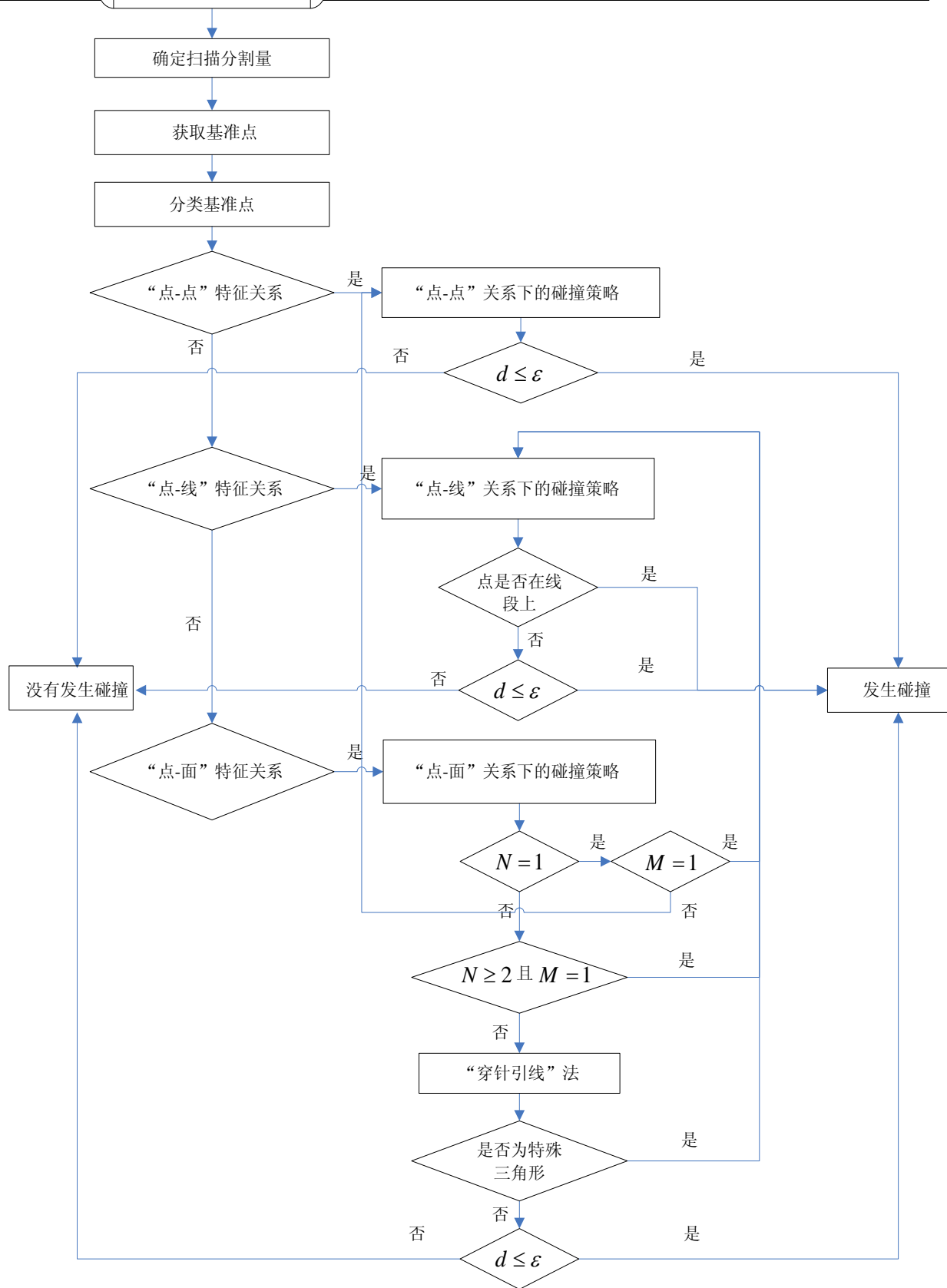


图 5-5 精确碰撞检测流程图

5.4 基准点

5.4.1 确定 IRS 区域长、宽、高的扫描分割量

若任意多面体 A 都可以表示为 $A = \sum_{i=0}^n (x_i, y_i, z_i)$ ，其中 (x_i, y_i, z_i) 是多面体 A 的所有面顶点，则称点 (x_i, y_i, z_i) 为多面体的基准点(记作 BP)。为了保证基准点表示模型的真实性和完整性，必须取模型表面上的点作为基准点，但是对于一个模型来说，其构造时的顶点是分布式不均匀和无序的，如图 5-6 所示。如果选取其构造模型时所设定的顶点作为基准点，那么会造成计算繁琐和碰撞检测不精确等问题。所以，不能使用构造顶点作为基准点，本节通过均匀扫描分割使选取后的基准点按一定顺序均匀地分布于模型的表面，这样为基本几何元素特征对之间的碰撞检测提供便利。

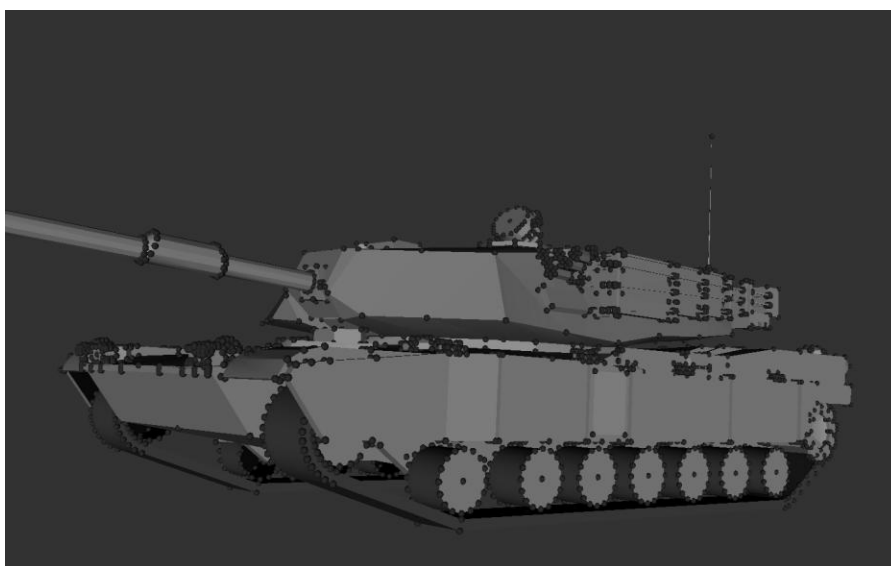


图 5-6 顶点的分布情况

采用均匀扫描采样的方式，本节分别对 IRS 的长、宽、高三个方向六个面进行等间隔均匀扫面采样，其中根据虚拟环境中笛卡尔坐标系，如图 5-7 所示，定义 IRS 的长、宽、高三个方向分别代表 X 轴、 Y 轴、 Z 轴方向。但是当 IRS 的长、宽、高的值较大时，如何快速获取基准点并且又可以使用这些基准点不失真地表示 SP_a 和 SCN 是本节要解决的关键问题。

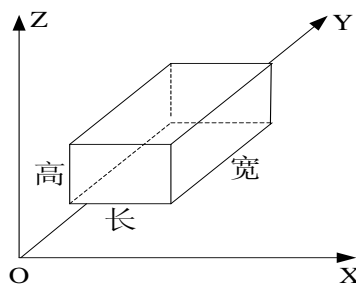


图 5-7 虚拟环境中的笛卡尔坐标系

首先定义两个变量：(1)扫描分割量(记作 DN)，表示 IRS 在各个坐标轴方向上的等分数，其中 $DN.x$ 、 $DN.y$ 、 $DN.z$ 分别表示长、宽、高的等分个数，且是一个整数；(2)扫描采样密度(记作 SD)，其中 $SD.x$ 、 $SD.y$ 、 $SD.z$ 分别表示 X 、 Y 、 Z 方向上每个等分之间的距离，其中 SD 和 DN 的相互关系如下所示：

$$SD.x = \frac{\text{长度值}}{DN.x}, \quad SD.y = \frac{\text{宽度值}}{DN.y}, \quad SD.z = \frac{\text{高度值}}{DN.z} \quad (5-7)$$

如果 SD 设定的值太大，则基准点数量就会过少，导致由基准点所构造的模型的几何特征失真；如果 SD 设定的值太小，则基准点数量会过多，将会造成计算量成百上千倍地增加，例如对于长度为 660 像素，宽度为 610 像素，高度为 149 像素的 IRS 区域，若设 $SD.x=1.0$ 、 $SD.y=1.0$ 、 $SD.z=1.0$ ，虽然基准点构造的模型表面能准确无误的表示原模型的几何特征，但实验表明仅仅计算扫描点的时间就会花费数秒之多，这无法满足实时性要求很高的交互系统。

所以设定适当的 SD 和 DN 是十分重要的，既要求扫描计算时间在很短时间内进行，又能保证基准点充分体现出模型的几何特性，使由基准点构造的模型外壳不存在失真现象。因此，必须对 $SD.x$ 、 $SD.y$ 、 $SD.z$ 的大小设定一个度，这个度称之为采样阈值(记作 ST)，它表示 $SD.x$ 、 $SD.y$ 、 $SD.z$ 分别占 IRS 长、宽、高的比例，即：

$$\frac{SD.x}{\text{长度值}} \leq ST, \quad \frac{SD.y}{\text{宽度值}} \leq ST, \quad \frac{SD.z}{\text{高度值}} \leq ST \quad (5-8)$$

由式(5-7)可得：

$$\frac{SD.x}{\text{长度}} = \frac{1}{DN.x}, \quad \frac{SD.y}{\text{宽度}} = \frac{1}{DN.y}, \quad \frac{SD.z}{\text{高度}} = \frac{1}{DN.z} \quad (5-9)$$

联立式(5-7)-式(5-9)可得:

$$\frac{1}{DN.x} \leq ST, \quad \frac{1}{DN.y} \leq ST, \quad \frac{1}{DN.z} \leq ST \quad (5-10)$$

所以:

$$DN.x \leq \frac{1}{ST}, \quad DN.y \leq \frac{1}{ST}, \quad DN.z \leq \frac{1}{ST} \quad (5-11)$$

经实验论证, 当 $ST=0.05$ 时, 既能满足实时性, 又能最大限度的保证不失真。又因为 DN 为整型变量, 所以 $DN.x$ 、 $DN.y$ 和 $DN.z$ 应该为小于 $\frac{1}{ST}$ 且离 $\frac{1}{ST}$ 最近的整数。

5.4.2 获取基准点

在 DN 确定后, 就可以获取潜在碰撞节点 p_a 在三个方向(X 、 Y 、 Z 方向)六个面(上、下、左、右、前、后)的基准点, 如图 5-8 所示。本节设计了扫描线采样法来确定 SP_a and SCN 各个轴上的基准点, 并以 X 轴方向扫描采样为例, 说明整个均匀扫描采样过程。其扫描线算法的立体示意图和正视示意图如图 5-9 所示。

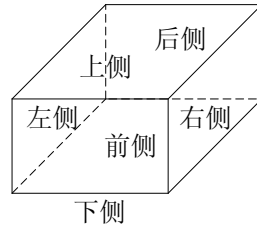


图 5-8 IRS 区域产生基准点的六个方向

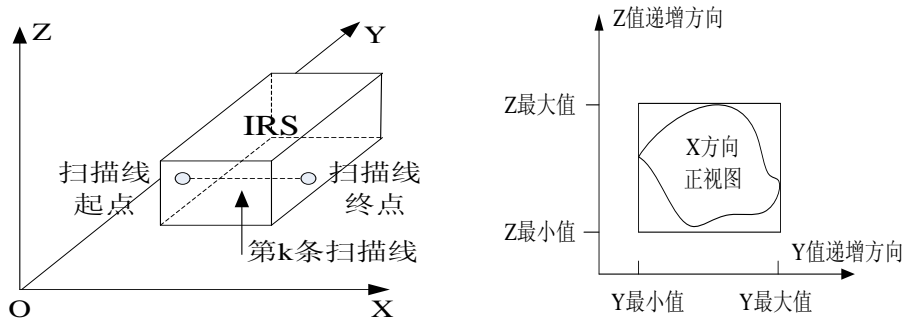


图 5-9 X 方向扫描线立体示意图和正视示意图

具体实现方法为:

(1) 设定扫描线的移动方向和移动顺序 因为采用的是平行于坐标轴的均匀采样, 所以移动方向分别设定为 Y 值递增方向和 Z 值递增方向, Y 值、 Z 值方向上的递增量为

Y 、 Z 方向上的扫描采样密度 $SD.y$ 和 $SD.z$ 。移动顺序则设定为先水平再垂直：从 Z 和 Y 的最小值开始，直到 Z 和 Y 都为最大值位置，对于每一个 Z 值， Y 值总以扫描采样密度 $SD.y$ 为间隔从 Y 最小值递增到 Y 最大值。这样在 X 轴方向一共产生了 $DN.y \times DN.z$ 条扫描线与 SP_a 进行求交测试。

(2)提取基准点 设 $DN.y \times DN.z$ 条扫描线与 SP_a 相交测试所得交点个数为 n ，当 $n \geq 2$ 时，根据扫描设定的起点和终点，分别选取第一个交点和最后一个交点作为左侧基准点(记作 XL)和右侧基准点(记作 XR)；当 $n = 1$ 时，选取该点同时作为左、右侧基准点；当 $n = 0$ 时，认为没有基准点产生。以此类推，可分别获得 x 方向所有的基准点。(图 5-10 所示，红色小球表示基准点)。

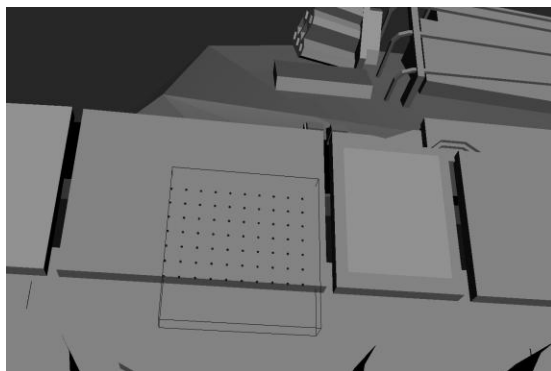


图 5-10 X 方向产生的所有基准点

同理，可获取 Y 方向和 Z 方向上所有的基准点。图 5-11 和图 5-12 为 SP_a 和 SCN 的所有基准点(记作 $SCN - Array$)。

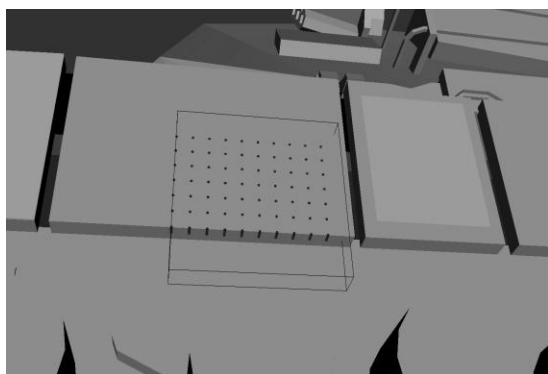


图 5-11 SP_a 的所有基准点

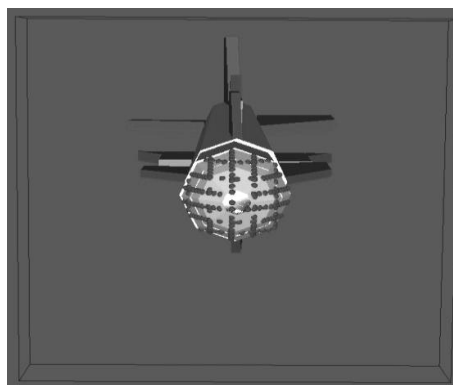


图 5-12 SCN 的所有基准点

图 5-13 所示为在 IRS 内的模型构造顶点，可以明显看出使用基准点表示模型的几何特性是正确的，因为在 IRS 内，基本没有构造顶点，所以如果用构造顶点表示模型的

几何特性时，它并不能代表整个 *IRS* 区域，只能是其中的很小的一部分，这样对碰撞检测会造成碰撞区域遗漏的问题。而基准点是分布均匀的，由它们构造的模型外壳可以很好的体现原模型的几何特性，基本不存在任何失真的现象，而且还可以把碰撞区域限制在某一个或几个基准点构成的区域内，同时也不用对原模型的整个 *IRS* 做碰撞检测，不仅提高了碰撞精度，还大大缩短了碰撞检测所需的时间，更适用于实时性和交互性要求很高的虚拟现实系统。

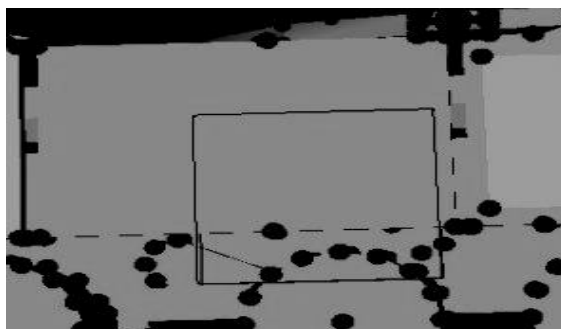


图 5-13 *IRS* 内的构造顶点

5.5 碰撞检测策略

上述可知，所有的基准点都很好的体现了模型子空间部分的几何特性，并且使原本排列不均匀无序的模型表面顶点转化为排列均匀有序的基准点，下一步主要在基准点的基础上，通过一系列剖分和判断，来确定是否有碰撞发生。首先引入两个定义：

定义 1： 三维空间点与三维空间点集(含有的空间点个数为 n ，其中 $n \geq 1$)中的相互关系只有三种情况：点—点间关系、点—线关系和点—面关系。在这里，“线”和“面”定义为由点集中任意两个或多个点构成的线段和空间多边形。并且“线”与“线”、“面”与“面”之间并不存在交叉重合，因此我们将点、边和面称为基本几何特征，而“点—点”关系、“点—线”关系和“点—面”关系则称之为三种基本特征关系对。

定义 2： 对于给定点 $A(x_0, y_0, z_0)$ 来说，如果点 $P(x, y, z)$ 满足下述约束方程为，则称点 P 为点 A 的相关点(记作 RP)

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \leq R^2 \quad (5-12)$$

其中， R 称之为 A 的相关量，可见相关点是基准点的一个子集，即 $RP \subseteq BP$ 。

5.5.1 获取相关点

设 $SCN - Array$ 的基准点个数为 M ，对于这么多的基准点，如果每个都逐一判断的话，所消耗的时间将是不可想象的，所以首先根据定义(2)获取 $SCN - Array.at(i)$ 的相关点。

对于 $SCN - Array$ 来说，它由 X 、 Y 、 Z 三个方向的基准点组成，而且三个方向上的相关量的定义也不相同。由图 5-9 可知， X 方向采样密度分别为 $SD.y()$ 和 $SD.z()$ ，因此为了不造成任何相关点遗漏的现象，本章选定 $SD.y()$ 和 $SD.z()$ 中较大值作为 $SCN - Array.at(i)$ 在 X 方向的相关量。同理， Y 方向的相关量为 $SD.x()$ 和 $SD.z()$ 中较大值， Z 方向的相关量为 $SD.x()$ 和 $SD.y()$ 中较大值。由于篇幅有限下文中均以 $SCN - Array.at(i)$ 和 XR 为例说明碰撞判断的过程。通过 $SCN - Array.at(i)$ 遍历 XR 中的每个基准点，把所有满足公式(5-12)的基准点看作是 $SCN - Array.at(i)$ 的相关点，如图 5-14 所示，并记作 RP_XR 。

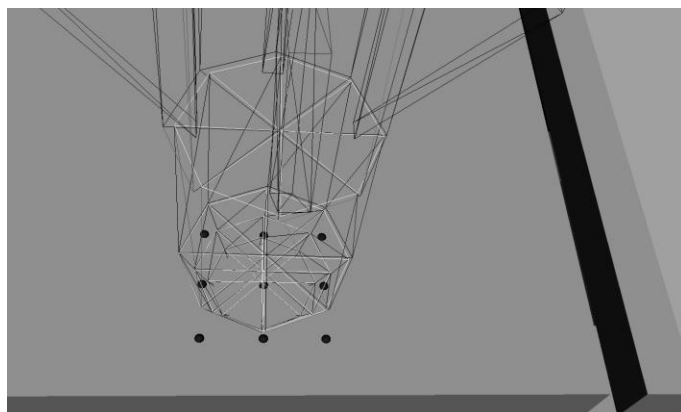


图 5-14 SCN 的所有相关点

将图 5-14 中相关点个数与图 5-11 中基准点个数进行对比，可以明显看出，点的个数从 100 个锐减到了 9 个，碰撞检测需要判断的范围明显变小，大大缩减了计算所需时间。

5.5.2 分类相关点

将 RP_XR 中的相关点根据定义(1)划归为不同的基本几何特征对：当有且仅有一个

相关点时，则定义该点和 $SCN - Array.at(i)$ 为“点—点”特征关系对，记作 PP ；当有且仅有两个相关点时，则把由这两个点形成的线段和 $SCN - Array.at(i)$ 定义为“点—线”特征关系对，记作 PL ；当相关点个数大于等于 3 个时，则把由该些点构成的空间多边形和 $SCN - Array.at(i)$ 定义为“点—面”特征关系对，记作 PF 。

5.5.3 基于距离的碰撞策略

本章提出的碰撞检测策略是基于距离场算法。距离场是一个标量场，它反映了空间中任意一点到一个给定物体表面的最短距离。这个距离可以是有符号的，用于表征该点是位于物体之外还是物体之内。这样相对于任一封闭曲面 $S \in R^3$ ，可以定义空间中任意一点 $p \in R^3$ 的有符号距离场值 $f(p) = d(p, s)$ 。一般而言，可以设定该点位于物体之外时场值为正，位于物体之内时场值为负。显然， $f(p) = 0$ 就表示了物体的表面 S 。将物体表示为距离场形式可以大大简化物体间的布尔运算、点相对物体位置的判断等操作。物体距离场表示非常适合物体间碰撞检测。

在本文碰撞判断策略中，以逐点判定的方式计算 $SCN - Array.at(i)$ 在三种特征关系对中的最小距离 d ，且 $d \geq 0$ 。并设定一个偏移厚度 ε ，当 $d \leq \varepsilon$ 时就认为发生碰撞，这里 ε 的值取决于各个坐标轴方向的采样密度。利用此方法明确发生碰撞以后，还需同时确定碰撞发生区域。

5.5.3.1 “点—点”特征关系下的碰撞判断策略

当 PP 非空时，进行“点—点”特征关系对下的碰撞判断。这是三种特征关系对中最简单的一种，只需判断 $SCN - Array.at(i)$ 和相关点之间的距离 d 与偏移厚度 ε 的大小即可。设 $\varepsilon = 5.0$ 。当 $d \leq \varepsilon$ 时，即认定碰撞发生，相关点就为碰撞点即碰撞发生区域；当 $d > \varepsilon$ 时，认定没有碰撞发生。

5.5.3.2 “点—线”特征关系下的碰撞判断策略

设 LA 和 LB 为“点—线”特征关系下的两个相关点，这种情况稍微复杂一些。首先定义一条线段(记作 $Line$)，其两个端点分别就是 LA 和 LB 。

此时有两种情况产生，一种是 $SCN - Array.at(i)$ 在 $Line$ 上或 $Line$ 的延长线上(如图

5-15 所示)。对于这种情况, 应先排除 $SCN - Array.at(i)$ 在 $Line$ 延长线上的情况, 因为此时不可能发生碰撞。其次, 当 $SCN - Array.at(i)$ 在 $Line$ 上时, 即可认定碰撞发生, 且碰撞点就为 $SCN - Array.at(i)$, 而 $Line$ 就为碰撞发生区域。

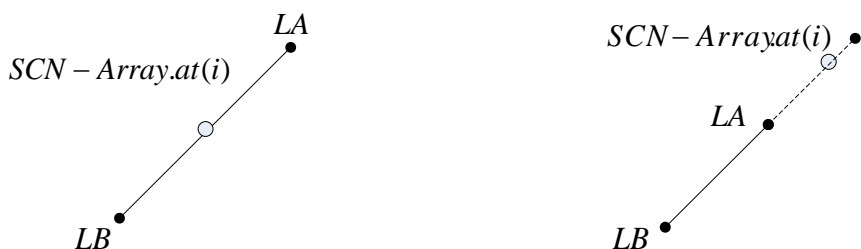


图 5-15 线段上或延长线上

第二种情况是, $SCN - Array.at(i)$ 不在线段 $Line$ 上, 如图 5-16 所示。



图 5-16 线段外

此时, 先做 $SCN - Array.at(i)$ 在 $Line$ 上的垂线, 垂足为 V 。当 V 在 $Line$ 延长线上时, 不会发生碰撞。当垂足 V 在 $Line$ 上时, 计算点 $SCN - Array.at(i)$ 到垂足 V 的距离 d , 由于扫描采样过程中, 每条扫描线段每次都按采样密度 $SD.x()$ (或 $SD.y()$ 或 $SD.z()$) 位移, 这样就必然会出现下列情况, 如图 5-17 所示, 线段 $Line$ 正好处于两基准点之间, 所以为了避免丢失这种碰撞现象, 设定偏移厚度 ε 的值等于该扫描方向上两个采样密度中较大的值。只要当 $d \leq \varepsilon$ 时, 就认定碰撞发生, 且把垂足 V 作为碰撞点, $Line$ 作为碰撞发生区域。

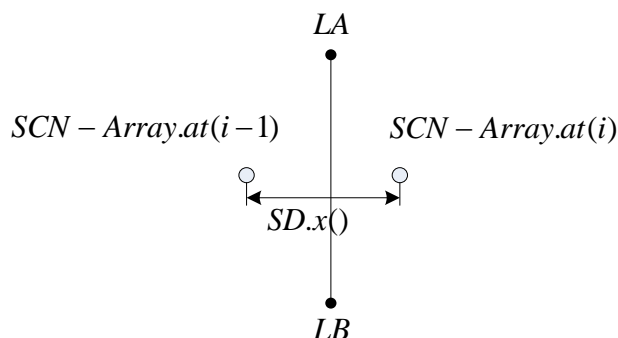


图 5-17 线段落于基准点之间

5.5.3.3 “点-面”特征关系下的碰撞判断策略

当 PF 非空时, 进行“点—面”特征下的碰撞判断。此时碰撞检测是最复杂的, 因为不仅 PF 包含个数众多的相关点, 而且对于不同排列次序的基准点, 不再单纯是点或线而是一个空间多边形, 对于任意多边形的距离求解是比较困难的, 而点与三角形之间的碰撞检测是较容易实现的, 因此, 本文选择三角形为分界单元, 设计“穿针引线”法将任意多变形分解为若干的三角形, 将“点-面”的碰撞检测问题简化到“点—三角形”的距离检测。

5.6 “穿针引线”法

5.6.1 相关点的归类划分

对于坐标轴方向的扫描采样过程, 扫描线都在另外两个坐标轴方向上按固定的采样密度位移, 所以在这里引入分治策略, 将另外两个坐标轴分为主轴(扫描线垂直方向)和副轴(扫描线水平方向), 同时所有相关点则按主轴和副轴进行分类。由扫描线基本原理可得, 对于某个坐标轴方向的扫描采样, 扫描线都在另外两个坐标轴方向上的位移顺序都是先水平后竖直, 所以对相关点的划分也必须严格按照先水平后竖直的方法划分。下面以 X 方向的扫描线为例说明“点—面”特征关系下的碰撞判断策略, 此时 Y 轴为副轴, Z 轴为主轴。根据 PF 中各个相关点的坐标, 将主轴划分为 N 组, 记作 $Z[n](n=0、1、2……N-1)$, 副轴划分为 M 组, 记作 $Z[n].at(m)(m=0、1、2……M-1)$ 。

5.6.2 碰撞判断策略

在划分完所有的相关点后, 根据 N 和 M 的个数采取不同的碰撞判断策略。首先按主轴数组的个数分类, 然后再对副轴包含相关点的个数进行讨论。

5.6.2.1 $N=1$ 的情况

当 $N=1$ 时, 意味着主轴上只有一个值即 $Z[0]$, 它的含义是: PF 的所有相关点的 Z 值都相同, 并且它们都共面, 但是并不能保证它们都共线, 应为 X 和 Y 的坐标值各不相同。所以, 需要对副轴包含相关点的个数作出进一步判断。

1. 当 $M=1$ 时, 只需按“点-点”特征关系对下的碰撞策略判断 $SCN-Array.at(i)$ 和 $Z[0].at(0)$ 的碰撞关系即可。

2. 当 $M \geq 2$ 时, 这里采取类似“点-线”特征关系对下的碰撞策略进行判断。分别按顺序依次选取两个顶点作为线段 $Line$ 的顶点, 从 $Z[0].at(0)$ 和 $Z[0].at(1)$ 开始, 依次是 $Z[0].at(1)$ 和 $Z[0].at(2)$ 、..... $Z[0].at(M-2)$ 和 $Z[0].at(M-1)$ 。

5.6.2.2 $N \geq 2$ 的情况

当 $N \geq 2$ 时, 表明在主轴方向存在多个层次的相关点。此时, 因为相关点存在的位置是二维的(横向和竖向), $SCN-Array.at(i)$ 与相关点之间的关系就不再是简单的“点—点”特征关系对或者“点—线”特征关系对, 而是同时包含了“点—线”特征关系对和“点—面”特征关系对, 其中“点—线”特征关系对是一种特殊的“点—面”情况, 应该单独讨论。

1. 特殊的“点—面”特征关系对 当 $N \geq 2$ 时, 存在一种特殊形状的相关点排列顺序, 就是 $N \geq 2$, 而对于每一个 $Z[n]$, 对应的副轴相关点的个数 $M=1$, 表明此时所有的相关点称链状竖直排列, 如图 5-18 所示。对于这种情况, 应该把其视作 $N=1$ 、 $M \geq 2$ 这种情况的一种变形。可以采取和 $N=1$ 、 $M \geq 2$ 这种情况相同的碰撞策略, 只不过是把每次横向取两个点作为线段端点的操作, 变成了每次竖向依次取两个点, 分别是 $Z[0].at(0)$ 和 $Z[1].at(0)$ 、 $Z[1].at(0)$ 和 $Z[2].at(0)$ $Z[N-2].at(0)$ 和 $Z[N-1].at(0)$ 。

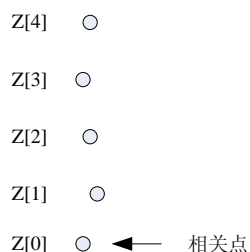


图 5-18 特殊的排列顺序

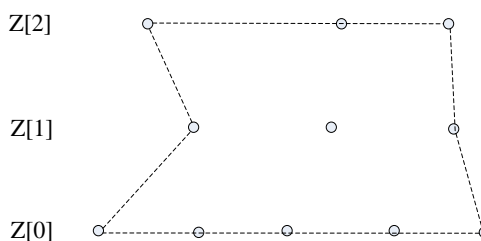


图 5-19 相关点构成的空间多边形

2. “点—面”特征关系对 这种情况是最为复杂的一种，当 $N \geq 2$ 、 $M \geq 2$ 时，相关点在空间坐标中的排列是呈现面状分布的，即是一个分布无规则不均匀的空间多边形，如图 5-19 所示，其中虚线表示空间多边形的外层轮廓。对于这样空间多边形很难做“点—面”的碰撞检测，所以必须对这个空间多边形进行面剖分处理，因为点与三角面的碰撞检测是很简单、快速的，所以在这里选定的是三角面剖分，即把多边形划分为有多个三角形所组成的集合，同时要求每个三角形之间并不存在重复的区域。这样就把“点—面”特征关系对的碰撞检测进一步的转化成了“点—三角面”特征关系下的碰撞检测，使碰撞检测更加简便和细化，主要分两部完成。

(1)空间多边形的三角剖分 对于一般情况下的“点-面”特征关系对，使用“穿针引线”法进行三角面剖分。具体实现方法是：

首先，从 $Z[0]$ 开始，依次取主轴上的两组值。

其次，先由下到上构造三角形。选定 $Z[n-1].at(0)$ 为三角形的下顶点，然后选定 $Z[n].at(0)$ 和 $Z[n].at(1)$ 为两个上顶点，这样就构造出了第一个三角形。同理下顶点不变，然后依次选取 $Z[n]$ 的两个相关点作为上顶点，如 $Z[n].at(1)$ 和 $Z[n].at(2)$ $Z[n].at(m-1)$ 和 $Z[n].at(m)$ ($m=0, 1, \dots, M-1$)。这样就以 $Z[n-1].at(0)$ 为公共下顶点构造出了 $M-1$ 相互不重叠的三角形，如图 5-20 所示。

再次，从上到下构造三角形。该步骤和前一步同理，只不过此时公共点上顶点变成了 $Z[n].at(m)$ ，而每次依次选取 $Z[n-1]$ 中两个相关点作为下顶点，如 $Z[n-1].at(0)$ 和 $Z[n-1].at(1)$ 、 $Z[n-1].at(1)$ 和 $Z[n-1].at(2)$ $Z[n-1].at(m-1)$ 和 $Z[n-1].at(m)$ ($m=0, 1, \dots, M-1$)。这样就以 $Z[n].at(m)$ 为公共上顶点构造出了 $M-1$ 相互不重叠的三角形，如图 5-21 所示。

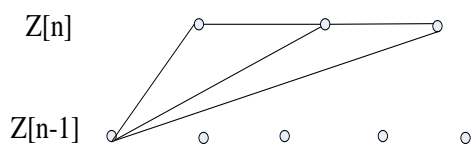


图 5-20 从下到上构造三角形

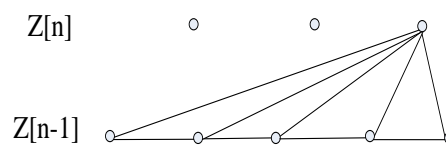


图 5-21 从上到下构造三角形

综合前三步可以把一个任意的空间多边形通过三角面的剖分,转化成一系列没有重复的三角形的组合,如图 5-22 所示,图 5-23 所示为将图 5-14 中的相关点进行“穿针引线”法后构造的三角形。

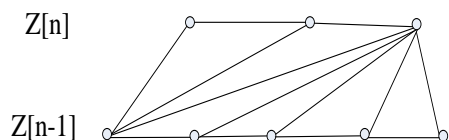


图 5-22 “穿针引线”法剖分空间多边形

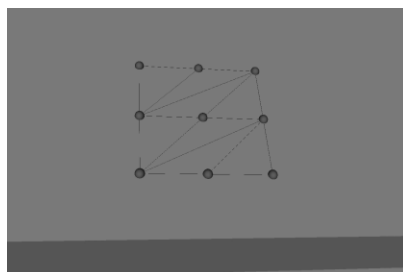


图 5-23 由相关点构造的剖分三角形

但是还是存在两种特殊情况的三角面剖分,由于因为 $Z[n-1]$ 和 $Z[n]$ 的副轴上的相关点个数可能同时为 1 个,或者至少有一个为 1 个,这样根据“穿针引线”方法,就会产生特殊的剖分三角形其实是一条线段,所以必须对这两种情况加以特殊分析。

特殊情况一: $Z[n-1]$ 和 $Z[n]$ 的副轴上的相关点个数同时为 1 个,如图 5-24,此时再根据“穿针引线”法构造三角形就会产生特殊的剖分三角形。因为当从下到上构造三角形时,公共下顶点为 $Z[n-1].at(0)$,上顶点是 $Z[n].at(0)$,这样实际上只构造了一条线段而非三角形。同理,当从上到下构造三角形时,公共上顶点是 $Z[n].at(0)$,下顶点是 $Z[n-1].at(0)$,同样会产生这种特殊情况,如图 5-25。

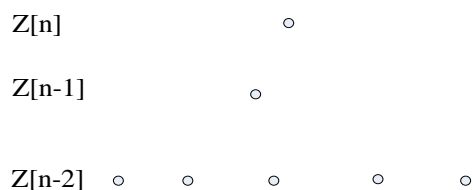


图 5-24 特殊情况一

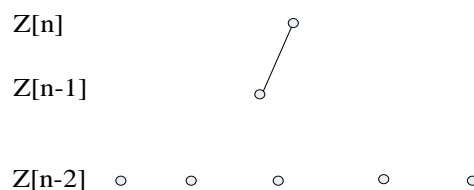


图 5-25 特殊的剖分三角形

此时,我们只需要则先将 $Z[n-1].at(0)$ 和 $Z[n].at(0)$ 定义为一条线段的两个端点,然后按照“点-线”特征关系对下的碰撞策略处理。

特殊情况二: $Z[n-1]$ 副轴上的相关点个数为 1 个,而 $Z[n]$ 和 $Z[n-2]$ 含有相关点个数大于等于 2 个,如图 5-26 所示。

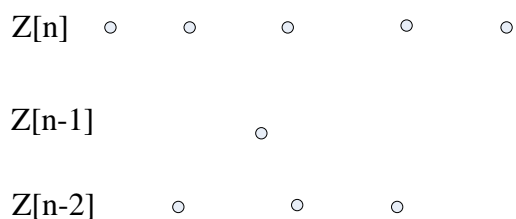


图 5-26 特殊情况二

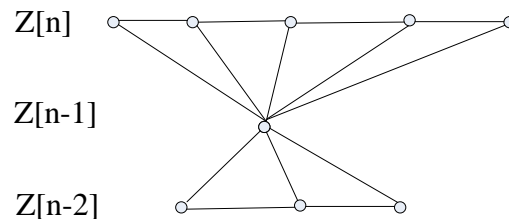


图 5-27 特殊情况二时的剖分三角形

此时，当从上到下构造剖分三角形时，只选取 $Z[n-1].at(0)$ 为公共上顶点，然后从左到右依次选取 $Z[n-2]$ 的两个相关点作为下顶点；当从下到上构造剖分三角形，同样只取 $Z[n-1].at(0)$ 为公共下顶点，然后依从左到右的次序选取 $Z[n]$ 的两个相关点作为上顶点，如图 5-27 所示。

到此为止，我们已经把按任意形状的空间多边形通过三角面剖分，划分成了一系列不相互重叠的三角形包括“特殊三角形”的集合。将“点—面”特征关系对的碰撞检测转化为“点—三角形”的碰撞检测，这样可以把碰撞区域精确到具体某个三角形区域内。进一步提高了碰撞检测的精度。

5.6.3 “点—三角形”碰撞判断策略

设 S_1 、 S_2 、 S_3 为三角形的三个顶点。做点 $SCN - Array.at(i)$ 在三角形所在平面的投影，投影点为 P ，判断投影点 P 是否在三角形 $S_1S_2S_3$ 内部。这里采用的累加角度和算法判定点是否在三角形内部：设 P 和三角形的顶点分别构成向量 $\overrightarrow{PS_i}$ 。设角 $\angle S_iPS_{i+1} = \partial_i$ ，如果 $\sum_{i=1}^n \partial_i = 0$ ，则 P 在多边形之外，若 $\sum_{i=1}^n \partial_i = 2\pi$ ，则 P 在多边形内部，如图 5-28 所示。

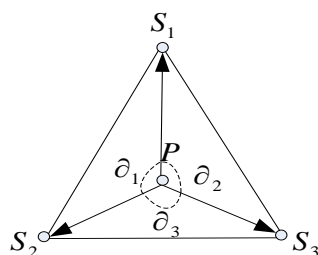


图 5-28 累计角度和方法

角度 ∂_i 可以通过公式(5-13)求得：

$$\partial_i = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{PS_i} \cdot \overrightarrow{PS_{i+1}}}{\|\overrightarrow{PS_i}\| \|\overrightarrow{PS_{i+1}}\|}\right) \quad (5-13)$$

当 P 不在三角形 $S_1S_2S_3$ 内部时(如图 5-29 所示), 认定为不可能发生碰撞。当 P 在三角形 $S_1S_2S_3$ 内部时(如图 5-30 所示), 则做进一步判断。

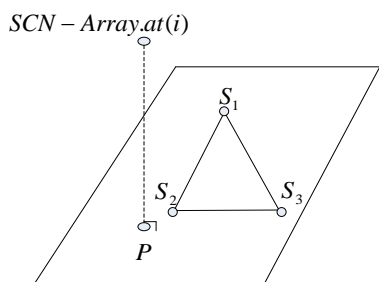


图 5-29 P 在三角形 $S_1S_2S_3$ 外部

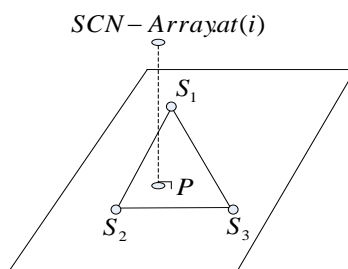


图 5-30 P 在三角形 $S_1S_2S_3$ 内部

当 P 在三角形 $S_1S_2S_3$ 内部时, $SCN-Array.at(i)$ 和三角形 $S_1S_2S_3$ 这对“点—三角面”特征关系对已经转化为 $SCN-Array.at(i)$ 和 P 之间的“点—点”特征关系。所以要判断是否发生碰撞, 只需判断 $SCN-Array.at(i)$ 和 P 两点之间的距离 d 即可。根据扫描线采样原理, X 、 Y 、 Z 方向上每次采样密度分别是 $SD.x()$ 、 $SD.y()$ 、 $SD.z()$, 所以也存在一个类似于图 5-17 中的问题, 就是构造的三角形很可能正处在上两个相关点之间, 如图 5-31 所示。

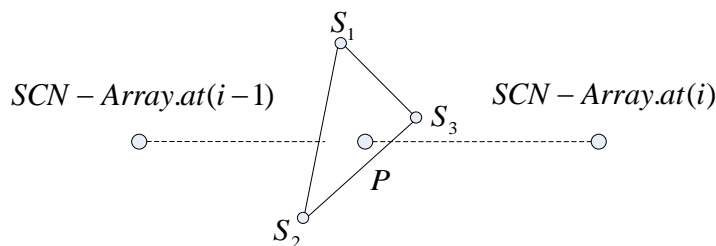


图 5-31 P 在三角形内部

此时就不能简单的判断 $SCN-Array.at(i)$ 和 P 两点之间的距离 d 了, 而需要设定一个偏移厚度 ε , 当 $d \leq \varepsilon$ 时即认为发生了碰撞, P 划归为碰撞点, 三角形 $S_1S_2S_3$ 定义为碰撞区域; 当 $d \geq \varepsilon$ 时, 则认为没有发生碰撞。同理, 这里的 ε 大小仍然选定各个扫描

线方向上相应的采样密度中的较大值。

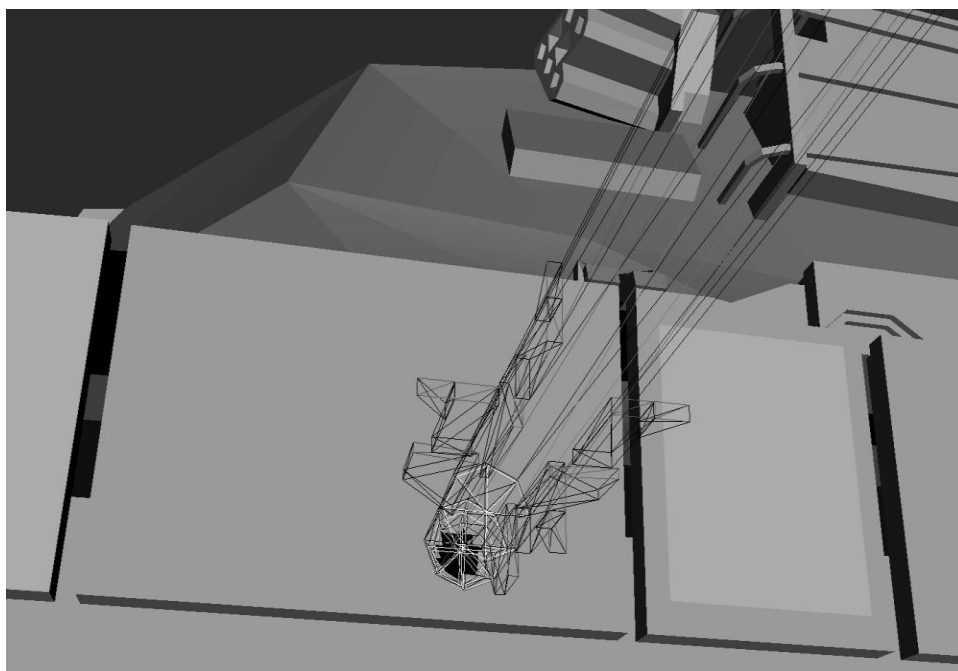


图 5-32 总体碰撞效果图

综上所述，可以最终确定是否有碰撞发生。当碰撞发生时，更能精确到点、线、三角形面这样的碰撞区域，大大提高了算法的准确度，同时还确保了碰撞检测时间限定在一个很短的时间段之内。其总体效果图如图 5-32 所示。

5.7 实验对比

此部分我们将研究算法在多面体间碰撞检测的效率。与上一章所用的硬件环境一致，仍在 CPU Pentium E2200 2.20GHz，内存 2G，显卡型号为 NVIDIA GeForce 9700GT，显存 512MB 的 PC 机上验证。

5.7.1 模型复杂度不同

此类试验中，我们采用同一动态实体模型(火箭模型)与不同面片数的静态实体模型(坦克模型)进行碰撞检测。选取的坦克模型的面片数分别是：5442、8673、10113 和 25447。此试验分成两个部分：

(1)火箭模型能够与坦克模型相交，表 5-1 和图 5-33 给出了不同模型复杂度下碰撞检测的时间。

表 5-1 碰撞检测时间

三角面数/K	平均检测时间/ms
5.442	3.523
8.676	4.145
10.113	4.633
26.432	13.5102

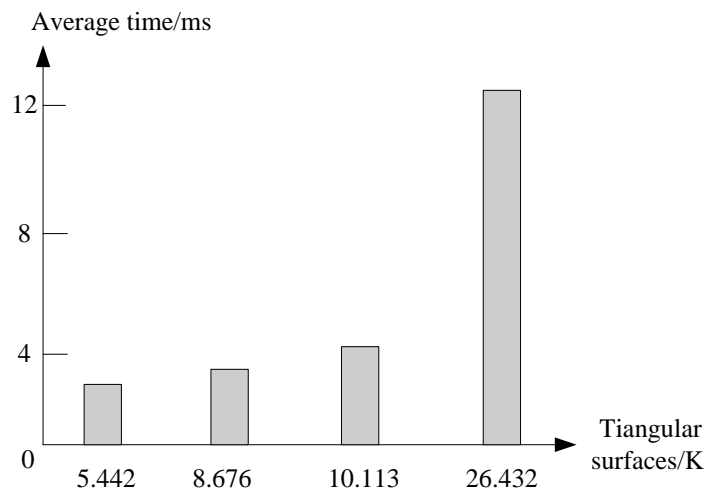


图 5-33 柱状图分析

(2)火箭模型不能与坦克模型相交，表 5-2 和图 5-34 给出了不同模型复杂度下碰撞检测的时间。

表 5-2 碰撞检测时间

三角面数/K	平均检测时间/ms
5.442	0.031
8.676	0.035
10.113	0.038
26.432	0.042

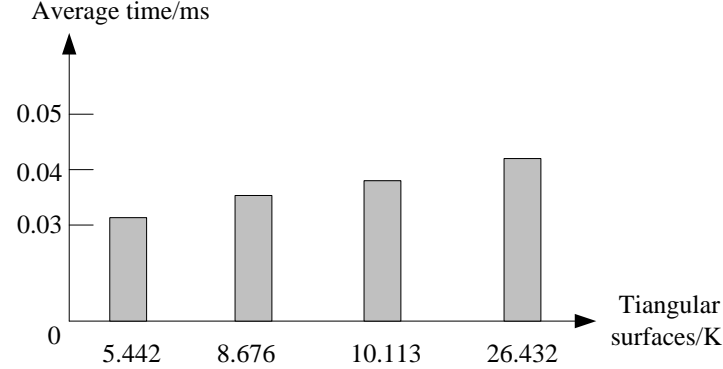


图 5-34 柱状图分析

从表中的数据可以看出,随着模型复杂度的提高,算法的处理时间能够保持或低于线性增长,尤其是当模型数量巨大时,此算法将保证处理时间符合要求。

5.7.2 模型数量不同

本试验中,我们将给出 9 组不同的场景模型数量,为方便统计,选择场景中的静态模型全部为相同的坦克,每一个坦克包含 26432 个三角面。其中,导弹作为动态实体在试验中必定与其中一个坦克碰撞。这 9 组试验中选取的坦克数量分别是:1、20、40、60、150、540、1040 和 5040。平均碰撞检测时间如表 5-3 所示,表 5-4 给出了检测时间增长量。

表 5-3 平均碰撞检测时间

坦克数量	检测时间/ms
1	13.510
20	14.488
40	14.869
60	15.792
150	20.013
540	34.692
1040	52.270
2540	105.738
5040	187.614

表 5-4 碰撞检测时间增加量

坦克数量的增量	检测时间的增量/ms
1-20	0.978
20-40	0.381
40-60	0.922
60-150	4.222
150-540	14.678
540-1040	17.579
1040-2540	53.468
2540-5040	81.876

从表 5-3 可以看出,当模型量相对较少(从 1 到 150),碰撞检测所需的时间很接近。当模型量很大时(从 540 到 5040),从表 5-3 和 5-4 仍然能够得出结论,模型的增长速度高于碰撞检测时间的增长速度。

5.7.3 碰撞检测精度不同

在本试验中，首先假定火箭肯定与由 26432 个面组成的坦克向碰撞，当通过设置不同的 ST 值，也就是选取不同的检测精度，来观察检测时间的变化。

表 5-5 ST 不同时的检测时间变化

ST	平均时间/ms	BP 的数量		DN.x, DN.y, DN.z	
		SP _a	SCN	SP _a	SCN
0.004	2126.080	495	10598	10, 15, 40	10, 250, 250
0.005	761.988	375	5179	10, 15, 30	10, 200, 200
0.01	179.232	150	1854	10, 10, 15	10, 100, 100
0.04	22.254	110	256	10, 10, 10	10, 25, 25
0.05	13.510	110	193	10, 10, 10	10, 20, 20
0.07	12.132	110	146	10, 10, 10	10, 20, 20
0.1	11.418	110	91	10, 10, 10	10, 10, 10

从表 5-5 可以看出，ST 越小，选取的基准点 BPS 就越多，平均检测时间也就越长。若所研究的系统为一个要求高度实时性的交互系统，需要选择较大的 ST 值以限制检测时间，相反地，若系统要求高度的精确性，则我们可以选择较小的 ST 以满足要求。从以上数据可以看出本算法具有高度的灵活性以适应不同系统的需求。

5.8 小结

本章从交互系统的高精确性和实时性要求出发，通过扫描线求交运算、“穿针引线”式剖分空间多边形实现了任意多面体的碰撞检测，并将模型间的碰撞检测转化为由一系列基准点构成的点、线、面这类基本几何元素特征对之间的碰撞检测。大大降低了算法的复杂性，较好地满足了实时性和精确性要求，不仅提高了碰撞检测的速度，也可以获取碰撞发生位置，把碰撞精度精确到模型表面的某些扫描点和扫描区域，能够保证实时性和精确性较高的虚拟交互系统的要求。

第 6 章 运动平台的动力学分析与交互控制

虚拟现实系统根据场景的属性得到实时、精确的碰撞信息是提高视觉沉浸感的关键因素,在此基础上,用户操作的外部设备能够根据碰撞信息完成实时、准确的动作也是提高视觉沉浸感的必要补充。对于特定的能够完成复杂动作的运动平台,其正确的动力学模型以及简化的动力学控制是保证其在短时间内正确运动的前提^[48]。

在本论文的研究过程中,为提高碰撞反馈的实时性和精确性以及拓展研究成果的应用范围,课题组在燕山大学的协助下设计并加工了具有自主知识产权的新型并联六自由度运动平台,运动平台对于场景信息的实时、精确反馈控制,也是提高用户视觉沉浸感的有效补充。与该运动平台配合能够使本文的研究成果广泛应用于健康增进、振动检测、模拟训练等多个领域^[50,111-114]。因此,本文在上述研究的基础上进一步就该平台的运动控制基础问题——平台的动力学模型进行了深入研究。

本章分析了新型并联六自由度运动平台的运动学特性,以此为基础,使用拉格朗日方法建立了并联运动平台的动力学模型。然后针对模型在实际控制中的应用进行了简化处理,设计了非线性控制器对运动平台的轨迹跟踪进行控制,并辅以仿真试验,从仿真结果可以看出,文中对平台设计的控制方法可以使得运动平台准确实现对时变轨迹的跟踪。文章中所建立的并联机构动力学模型是并联六自由度运动平台驱动系统和控制系统设计的基础,也是机构动力学性能评价、动力学优化设计及实时控制的必要条件^[49]。上面平台的运动控制及仿真可以证明此动力学模型的正确性。

根据本章给出的动力学模型,在上述章节得到实时性很高的精确碰撞检测的基础上,可完成虚拟现实环境对运动平台的实时反馈控制,在增强运动者视觉效果的同时,增强交互的沉浸感。

6.1 新型运动平台的结构分析

本系统所设计的正交并联平台为 PSS 3-2-1 型平台,图 6-1 为平台的实物照片。平台每一个 PSS 运动链构成一个分支,六个分支按 3、2、1 分为第一、第二、第三组,分别于动平台的 3 个相互垂直的平面相连。第一组支链的球铰中心(B_4, B_5, B_6)分布在以平面中心为中心的等腰三角形的三个顶点上,第 2 组支链的球铰中心(B_2, B_3)分布在过

平面中心、以平面上下两边平行的线段端点上，第 3 组支链的球铰中心(B_1)位于平面的中心。每一个分支中，6 个交流伺服电机输出正交相关的三个方向的直线运动。 Δl_i ($i=1,\dots,6$) 表示为各驱动的位移，当各分支的位移输入量为零且处于正交位姿时，定义为该正交并联机构的初始状态。平台的参数如下：动平台长度为 76cm，宽度为 70cm，高度为 4cm，重量为 240kg。

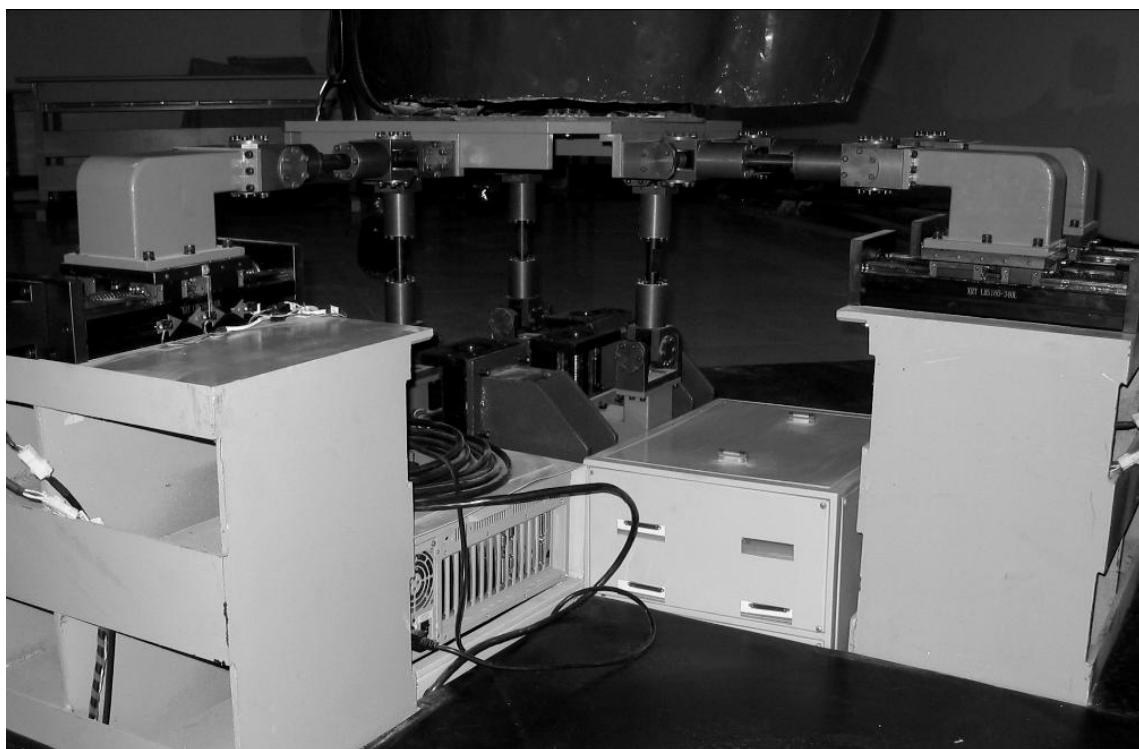


图 6-1 PSS 3-2-1 型正交并联平台

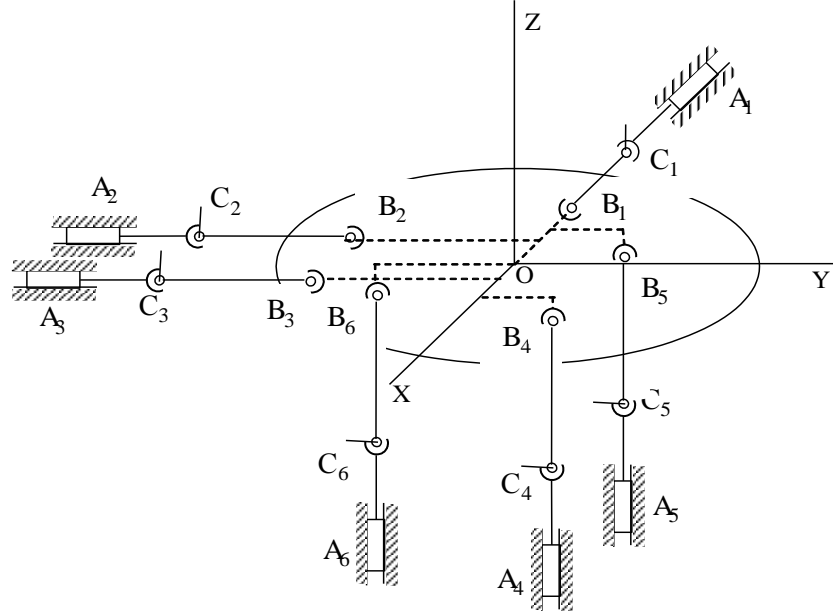


图 6-2 并联平台结构图解

图 6-2 展示了本课题所研制的并联平台结构图解，此并联平台模型为严格的刚体模型。为了方便设定笛卡尔变量，建立与系统平台固连的坐标系 $OXYZ$ ，选择平台初始位置时重心为坐标原点 O ， Z 轴垂直向上^[115]。在 B_i ($i=1, \dots, 6$) 点的每个连杆 B_iC_i 长度为 c ，由三自由度球铰连接在系统平台上，在 C_i ($i=1, \dots, 6$) 点通过两自由度的万向接头连接在螺母转向装置 C_iA_i 杆的输出端。转向装置的输出使平台产生三个正交相关方向上的线性运动， C_1A_1 沿着 OX 轴平行移动， C_2A_2 ， C_3A_3 沿着 OY 轴平行移动， C_4A_4 ， C_5A_5 ， C_6A_6 沿着 OZ 轴平行移动，根据 C_iA_i 的线性位置用 Δ_i ($i=1, \dots, 6$) 表示线性位移， Δ_i 的正值表示沿着坐标轴正向的位移，系统平台的坐标系 $Cxyz$ 受刚性条件约束。

6.2 平台动力学分析理论基础

由于并联机器人的机构特点不同于串联机器人，它的动力学模型是非常复杂的。一般来说，通常对并联机构动力学分析的方法有：牛顿-欧拉法、拉格朗日法、虚功原理法和达朗伯原理等^[116,117]，下面将简述拉格朗日方法和牛顿-欧拉法的内容。

6.2.1 拉格朗日方法简介

拉格朗日方法是构造拉格朗日方程表示系统内的能量来描述动力学系统的运动而不是分析单一部分的力和运动。使用这种方法，封闭的动力学方程可以在任何坐标系中

推导出^[118]。

为了推导出 6-DOF 并联平台的动力学方程，用拉格朗日算子描述系统内的能量。根据系统的结构特点建立坐标系并选取广义坐标的正方向。拉格朗日算子 L 由下式计算：

$$L = K - P \quad (6-1)$$

其中， K 和 P 分别表示系统的动能和势能。广义坐标和广义力/力矩分别表示为 $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_i)^T$ 和 $\mathbf{F} = (f_1, f_2, \dots, f_i)^T$ 。一个 n 自由度并联机器人的运动拉格朗日方程的一般形式可以写为：

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{F} \quad (6-2)$$

机器人自由度数可以用 Somov-Malishev 公式来确定：

$$s = 6n - \sum_{i=1}^5 (6-i)p_i \quad (6-3)$$

式中 n -元素的自由度数

i -运动关节自由度

p_i -自由度为 i 的运动关节数

这里我们将基于拉格朗日方程推导整个系统的动力学方程。在实际操作过程中，不同的系统有具体的不同的推导过程，但我们可以得到最终动力学方程的一般形式^[119]：

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{F} \quad (6-4)$$

其中， $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 为惯量矩阵， $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为哥氏力和离心力矢量， $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 表示势能的偏导数。计算系统的动能和势能 K 和 P ，然后，可以计算动力学方程的参数。和串联机器人相比，并联机器人采用多杆共同驱动平台运动^[120]。在本文中将基于系统的逆动力学分析来计算能量，动能和势能可以分别表示为系统广义速度和广义坐标的函数^[121]。

6.2.2 牛顿-欧拉法(N-E 法)简介

N-E法是递推算法。它首先将并联机构的各个连杆分离出来，并以各重心为参考点建立坐标系，再根据牛顿力学第三定律建立各连杆的N-E方程^[122]。采用该方法的关键是处理好关节驱动力和关节连杆位移之间的耦合关系。N-E法的优点在于该方法全局有效。

但在三维空间分析由多个坐标系描述的各关节连杆运动之间的耦合关系时并不方便。

6.3 并联机构平台空间运动的动力学模型分析

下面将分析机器人平台在空间中的动力学模型。首先在系统平台逆运动学分析的基础上计算其能量，然后建立系统的动力学方程。

6.3.1 系统的逆运动学分析

根据机构的空间结构，设 C 点为系统平台质心，则 Cx, Cy, Cz 为平台的惯性中心轴， $\Delta l_i = 0 (i=1, \dots, 6)$ 在坐标系 $Cxyz$ 中和固定坐标系 $OXYZ$ 中相一致， OZ 轴指向 OXY 平面垂线段方向，根据球铰 $B_i (i=1, \dots, 6)$ 在坐标系 $Cxyz$ 中的位置可用坐标向量定义其为^[123]：

$$\tilde{r}_{B_1} = \begin{pmatrix} -a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \tilde{r}_{B_2} = \begin{pmatrix} -e \\ -b \\ 0 \end{pmatrix}, \tilde{r}_{B_3} = \begin{pmatrix} e \\ -b \\ 0 \end{pmatrix}, \tilde{r}_{B_4} = \begin{pmatrix} d \\ m \\ -h \end{pmatrix}, \tilde{r}_{B_5} = \begin{pmatrix} -d \\ m \\ -h \end{pmatrix}, \tilde{r}_{B_6} = \begin{pmatrix} 0 \\ -n \\ -h \end{pmatrix}. \quad (6-5)$$

$C_i (i=1, \dots, 6)$ 点在坐标系 $OXYZ$ 中的坐标用坐标向量表示为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{R}_{C_1} = \begin{pmatrix} -(a+c)+\Delta l_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \tilde{R}_{C_2} = \begin{pmatrix} -e \\ -(b+c)+\Delta l_2 \\ 0 \end{pmatrix}, \tilde{R}_{C_3} = \begin{pmatrix} e \\ -(b+c)+\Delta l_3 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \tilde{R}_{C_4} = \begin{pmatrix} d \\ m \\ -(h+c)+\Delta l_4 \end{pmatrix}, \tilde{R}_{C_5} = \begin{pmatrix} -d \\ m \\ -(h+c)+\Delta l_5 \end{pmatrix}, \tilde{R}_{C_6} = \begin{pmatrix} 0 \\ -n \\ -(h+c)+\Delta l_6 \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (6-6)$$

记 $\bar{i}_0, \bar{j}_0, \bar{k}_0$ 为坐标系 $OXYZ$ 的单位法向量，组成基础向量 $\bar{e}_0 = (\bar{i}_0 \ \bar{j}_0 \ \bar{k}_0)$ 。这样坐标系 $OXYZ$ 中任一点的位置矢量可表示成基础向量和其坐标向量 \tilde{R} 的乘积： $\bar{R} = \bar{e}_0 \tilde{R}$ 。坐标系 $Cxyz$ 的单位法向量随并联机构平台受刚性条件约束，设 $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ 为其单位法向量，组成其基础向量 $\bar{e} = (\bar{i} \ \bar{j} \ \bar{k})$ 。坐标系 $Cxyz$ 中任一点的矢径可定义为乘积： $\bar{r} = \bar{e} \tilde{r}$ 。则平台质心在坐标系 $OXYZ$ 中的位置可由矢径表示为：

$$\bar{R}_C = \bar{e}_0 \tilde{R}_C \quad (6-7)$$

其中， $\tilde{R}_C = (X_C \ Y_C \ Z_C)^T$ 为 C 点在坐标系 $OXYZ$ 中的位置。

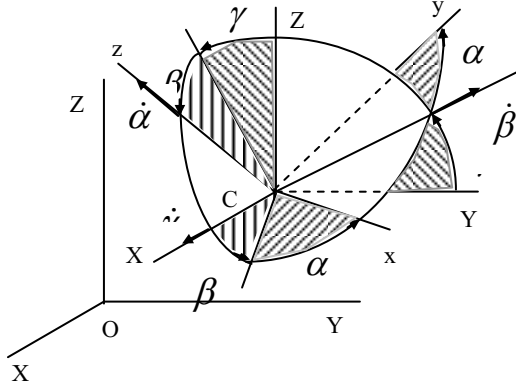


图 6-3 坐标系 OXYZ 和 Cxyz

如图 6-3 所示, 坐标系 Cxyz 的坐标轴方向由旋转角度 α, β, γ 表示, 基础向量 \bar{e}_0 和 \bar{e} 之间的关系可由矩阵 A 来表示, 且满足:

$$\bar{e} = \bar{e}_0 A_x A_y A_z = \bar{e}_0 A \quad (6-8)$$

其中:

$$A_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}, A_y = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}, A_z = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A = A_x A_y A_z = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \alpha & -\cos \beta \sin \alpha & \sin \beta \\ \cos \gamma \sin \alpha + \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha & \cos \gamma \cos \alpha - \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha & -\sin \gamma \cos \beta \\ \sin \gamma \sin \alpha - \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha & \sin \gamma \cos \alpha + \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha & \cos \gamma \cos \beta \end{pmatrix}$$

其中 A 为正交矩阵, A 为坐标系 Cxyz 到 OXYZ 的变换矩阵^[124]。标记矩阵 A 中个元素为:

$$\begin{cases} a_{11} = \cos \beta \cos \alpha, a_{12} = -\cos \beta \sin \alpha, a_{13} = \sin \beta \\ a_{21} = \cos \gamma \sin \alpha + \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha, a_{22} = \cos \gamma \cos \alpha - \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha \\ a_{23} = -\sin \gamma \cos \beta, a_{31} = \sin \gamma \sin \alpha - \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ a_{32} = \sin \gamma \cos \alpha + \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha, a_{33} = \cos \gamma \cos \beta \end{cases} \quad (6-9)$$

\tilde{R} 在坐标系 OXYZ 中由坐标矢量定义为平台上点的位置可由向量表示为:

$$\begin{cases} \bar{R} = \bar{R}_C + \bar{r} = \bar{e}_0 \tilde{R}_C + \bar{e} \tilde{r} = \bar{e}_0 \tilde{R}_C + \bar{e}_0 A \tilde{r} = \bar{e}_0 (\tilde{R}_C + A \tilde{r}) = \bar{e}_0 \tilde{R} \\ \tilde{R} = \tilde{R}_C + A \tilde{r} \end{cases} \quad (6-10)$$

平台角速度矢量为:

$$\bar{\omega} = \dot{\gamma} + \dot{\beta} + \dot{\alpha} = \bar{e} \tilde{\omega} \quad (6-11)$$

其中:

$$\tilde{\omega} = \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\beta} \sin \alpha + \dot{\gamma} \cos \beta \cos \alpha \\ \dot{\beta} \cos \alpha - \dot{\gamma} \cos \beta \sin \alpha \\ \dot{\alpha} + \dot{\gamma} \sin \beta \end{pmatrix}$$

球铰 B_i ($i=1, \dots, 6$) 在坐标系 $OXYZ$ 中的位置由坐标向量定义为:

$$\tilde{R}_{B_i} = \tilde{R}_C + A \tilde{r}_{B_i} \quad (i=1, \dots, 6) \quad (6-12)$$

杆 $B_i C_i$ ($i=1, \dots, 6$) 的长度由点 B_i 和 C_i 的坐标求得, 使之等于 c :

$$\left(\tilde{R}_{B_i} - \tilde{R}_{C_i} \right)^T \left(\tilde{R}_{B_i} - \tilde{R}_{C_i} \right) = c^2 \quad (i=1, \dots, 6), \quad (6-13)$$

螺母转向装置 $C_i A_i$ 的位移 Δl_i ($i=1, \dots, 6$) 与由式(6-7)确定的给定平台位置是一致的。

考虑式(6-12), 式(6-13)可写成如下的格式:

$$(X_C - a a_{11} + a + c - \Delta l_1)^2 + (Y_C - a a_{21})^2 + (Z_C - a a_{31})^2 = c^2$$

$$(X_C - e a_{11} - b a_{12} + e)^2 + (Y_C - e a_{21} - b a_{22} + b + c - \Delta l_2)^2 + (Z_C - e a_{31} - b a_{32})^2 = c^2$$

$$(X_C + e a_{11} - b a_{12} - e)^2 + (Y_C + e a_{21} - b a_{22} + b + c - \Delta l_3)^2 + (Z_C + e a_{31} - b a_{32})^2 = c^2$$

$$\begin{aligned} & (X_C + d a_{11} + m a_{12} - h a_{13} - d)^2 + (Y_C + d a_{21} + m a_{22} - h a_{23} - m)^2 + \\ & + (Z_C + d a_{31} + m a_{32} - h a_{33} + h + c - \Delta l_4)^2 = c^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (X_C - d a_{11} + m a_{12} - h a_{13} + d)^2 + (Y_C - d a_{21} + m a_{22} - h a_{23} - m)^2 + \\ & + (Z_C - d a_{31} + m a_{32} - h a_{33} + h + c - \Delta l_5)^2 = c^2 \end{aligned}$$

$$(X_C - n a_{12} - h a_{13})^2 + (Y_C - n a_{22} - h a_{23} + n)^2 + (Z_C - n a_{32} - h a_{33} + h + c - \Delta l_6)^2 = c^2$$

从最后一个等式可以得到:

$$\Delta l_1 = X_C - a a_{11} + a + c - \sqrt{c^2 - (Y_C - a a_{21})^2 - (Z_C - a a_{31})^2} \quad (6-14)$$

$$\Delta l_2 = Y_C - e a_{21} - b a_{22} + b + c - \sqrt{c^2 - (X_C - e a_{11} - b a_{12} + e)^2 - (Z_C - e a_{31} - b a_{32})^2} \quad (6-15)$$

$$\Delta l_3 = Y_C + e a_{21} - b a_{22} + b + c - \sqrt{c^2 - (X_C + e a_{11} - b a_{12} - e)^2 - (Z_C + e a_{31} - b a_{32})^2} \quad (6-16)$$

$$\Delta l_4 = Z_C + da_{31} + ma_{32} - ha_{33} + h + c - \sqrt{c^2 - (X_C + da_{11} + ma_{12} - ha_{13} - d)^2 - (Y_C + da_{21} + ma_{22} - ha_{23} - m)^2} \quad (6-17)$$

$$\Delta l_5 = Z_C - da_{31} + ma_{32} - ha_{33} + h + c - \sqrt{c^2 - (X_C - da_{11} + ma_{12} - ha_{13} + d)^2 - (Y_C - da_{21} + ma_{22} - ha_{23} - m)^2} \quad (6-18)$$

$$\Delta l_6 = Z_C - na_{32} - ha_{33} + h + c - \sqrt{c^2 - (X_C - na_{12} - ha_{13})^2 - (Y_C - na_{22} - ha_{23} + n)^2} \quad (6-19)$$

6.3.2 并联平台运动学关系式

系统平台质心的速度为：

$$\bar{V}_C = \bar{e}_0 \tilde{R}_C \quad (6-20)$$

其中， $\tilde{R}_C = (\dot{X}_C \quad \dot{Y}_C \quad \dot{Z}_C)$ 。系统平台角速度 $\bar{\omega} = \bar{e} \tilde{\omega}$ 已经在上面式中定义。

我们规定驱动装置速度等于 C_i 点的速度和 $B_i C_i$ ($i=1, \dots, 6$) 杆的角速度^[125]。为此，

我们首先应该计算平台上 B_i ($i=1, \dots, 6$) 点的速度：

$$\bar{V}_{B_i} = \bar{V}_C + [\bar{\omega}, \bar{r}_{B_i}] = \bar{e}_0 \tilde{R}_C + \bar{e} \hat{R}_{B_i} \tilde{\omega} = \bar{e}_0 (\tilde{R}_C + A \hat{R}_{B_i} \tilde{\omega}) = \bar{e}_0 \tilde{V}_{B_i} \quad (i=1, \dots, 6) \quad (6-21)$$

$$\text{其中：} \tilde{V}_{B_i} = (\dot{X}_{B_i} \quad \dot{Y}_{B_i} \quad \dot{Z}_{B_i})^T = \tilde{R}_C + A \hat{R}_{B_i} \tilde{\omega}$$

$$\begin{aligned} \hat{R}_{B_1} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a \\ 0 & a & 0 \end{pmatrix}, & \hat{R}_{B_2} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & b \\ 0 & 0 & -e \\ -b & e & 0 \end{pmatrix}, & \hat{R}_{B_3} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & b \\ 0 & 0 & e \\ -b & -e & 0 \end{pmatrix}, \\ \hat{R}_{B_4} &= \begin{pmatrix} 0 & -h & -m \\ h & 0 & d \\ m & -d & 0 \end{pmatrix}, & \hat{R}_{B_5} &= \begin{pmatrix} 0 & -h & -m \\ h & 0 & -d \\ m & d & 0 \end{pmatrix}, & \hat{R}_{B_6} &= \begin{pmatrix} 0 & -h & n \\ h & 0 & 0 \\ -n & 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

由式(6-21)， B_i ($i=1, \dots, 6$) 点的速度分别为：

$$\tilde{V}_{B_1} = \begin{pmatrix} \dot{X}_{B_1} \\ \dot{Y}_{B_1} \\ \dot{Z}_{B_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{X}_C - a(a_{12}\omega_z - a_{13}\omega_y) \\ \dot{Y}_C - a(a_{22}\omega_z - a_{23}\omega_y) \\ \dot{Z}_C - a(a_{32}\omega_z - a_{33}\omega_y) \end{pmatrix} \quad (6-22)$$

$$\tilde{V}_{B_2} = \begin{pmatrix} \dot{X}_{B_2} \\ \dot{Y}_{B_2} \\ \dot{Z}_{B_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{X}_C - \omega_x ba_{13} + \omega_y ea_{13} + \omega_z (ba_{11} - ea_{12}) \\ \dot{Y}_C - \omega_x ba_{23} + \omega_y ea_{23} + \omega_z (ba_{21} - ea_{22}) \\ \dot{Z}_C - \omega_x ba_{33} + \omega_y ea_{33} + \omega_z (ba_{31} - ea_{32}) \end{pmatrix} \quad (6-23)$$

$$\tilde{V}_{B_3} = \begin{pmatrix} \dot{X}_{B_3} \\ \dot{Y}_{B_3} \\ \dot{Z}_{B_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{X}_C - \omega_x ba_{13} - \omega_y ea_{13} + \omega_z (ba_{11} + ea_{12}) \\ \dot{Y}_C - \omega_x ba_{23} - \omega_y ea_{23} + \omega_z (ba_{21} + ea_{22}) \\ \dot{Z}_C - \omega_x ba_{33} - \omega_y ea_{33} + \omega_z (ba_{31} + ea_{32}) \end{pmatrix} \quad (6-24)$$

$$\tilde{V}_{B_4} = \begin{pmatrix} \dot{X}_{B_4} \\ \dot{Y}_{B_4} \\ \dot{Z}_{B_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{X}_C + \omega_x (ha_{12} + ma_{13}) - \omega_y (ha_{11} + da_{13}) - \omega_z (ma_{11} - da_{12}) \\ \dot{Y}_C + \omega_x (ha_{22} + ma_{23}) - \omega_y (ha_{21} + da_{23}) - \omega_z (ma_{21} - da_{22}) \\ \dot{Z}_C + \omega_x (ha_{32} + ma_{33}) - \omega_y (ha_{31} + da_{33}) - \omega_z (ma_{31} - da_{32}) \end{pmatrix} \quad (6-25)$$

$$\tilde{V}_{B_5} = \begin{pmatrix} \dot{X}_{B_5} \\ \dot{Y}_{B_5} \\ \dot{Z}_{B_5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{X}_C + \omega_x (ha_{12} + ma_{13}) - \omega_y (ha_{11} - da_{13}) - \omega_z (ma_{11} + da_{12}) \\ \dot{Y}_C + \omega_x (ha_{22} + ma_{23}) - \omega_y (ha_{21} - da_{23}) - \omega_z (ma_{21} + da_{22}) \\ \dot{Z}_C + \omega_x (ha_{32} + ma_{33}) - \omega_y (ha_{31} - da_{33}) - \omega_z (ma_{31} + da_{32}) \end{pmatrix} \quad (6-26)$$

$$\tilde{V}_{B_6} = \begin{pmatrix} \dot{X}_{B_6} \\ \dot{Y}_{B_6} \\ \dot{Z}_{B_6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{X}_C + \omega_x (ha_{12} - na_{13}) - \omega_y ha_{11} + \omega_z na_{11} \\ \dot{Y}_C + \omega_x (ha_{22} - na_{23}) - \omega_y ha_{21} + \omega_z na_{21} \\ \dot{Z}_C + \omega_x (ha_{32} - na_{33}) - \omega_y ha_{31} + \omega_z na_{31} \end{pmatrix} \quad (6-27)$$

考虑运动关节 C_1 如图 6-4 所示。选择 B_1 点作为基端， B_1C_1 杆上 C_1 点的速度可表示为：

$$\bar{V}_{C_1} = \bar{V}_{B_1} + [\bar{\omega}_1, \bar{B_1C_1}] \quad (6-28)$$

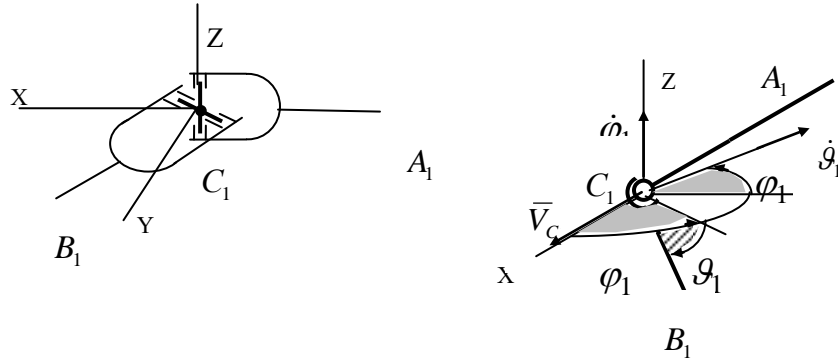


图 6-4 运动关节 C_1

其中， $\bar{V}_{C_1} = V_{C_1} \bar{i}_0$ ， $\bar{\omega}_1 = \bar{\phi}_1 + \bar{\mathcal{Q}}_1 = \dot{\phi}_1 \bar{k}_0 + \dot{\mathcal{Q}}_1 (-\sin \phi_1 \bar{i}_0 + \cos \phi_1 \bar{j}_0) = \bar{e}_0 \tilde{\omega}_1$ ，

$$\tilde{\omega}_1 = (-\dot{\mathcal{Q}}_1 \sin \phi_1 \quad \dot{\mathcal{Q}}_1 \cos \phi_1 \quad \dot{\phi}_1)^T, \quad \overline{B_1C_1} = \bar{R}_{C_1} - \bar{R}_{B_1} = \bar{e}_0 (\tilde{R}_{C_1} - \tilde{R}_{B_1}).$$

式(6-28) 对 $OXYZ$ 坐标轴的估计值可表示为：

$$\begin{aligned}
 V_{C_1} &= \dot{X}_{B_1} + \dot{\vartheta}_1 \cos \varphi_1 (Z_{C_1} - Z_{B_1}) - \dot{\varphi}_1 (Y_{C_1} - Y_{B_1}) \\
 0 &= \dot{Y}_{B_1} + \dot{\varphi}_1 (X_{C_1} - X_{B_1}) + \dot{\vartheta}_1 \sin \varphi_1 (Z_{C_1} - Z_{B_1}) \\
 0 &= \dot{Z}_{B_1} - \dot{\vartheta}_1 \sin \varphi_1 (Y_{C_1} - Y_{B_1}) - \dot{\varphi}_1 \cos \varphi_1 (X_{C_1} - X_{B_1})
 \end{aligned}$$

由上式可知：

$$\begin{aligned}
 \dot{\vartheta}_1 &= \frac{\dot{Z}_{B_1}}{\sin \varphi_1 (Y_{C_1} - Y_{B_1}) + \cos \varphi_1 (X_{C_1} - X_{B_1})} \\
 \dot{\varphi}_1 &= -\frac{1}{(X_{C_1} - X_{B_1})} (\dot{Y}_{B_1} + \dot{\vartheta}_1 \sin \varphi_1 (Z_{C_1} - Z_{B_1})) \\
 V_{C_1} &= \dot{X}_{B_1} + \dot{\vartheta}_1 \cos \varphi_1 (Z_{C_1} - Z_{B_1}) - \dot{\varphi}_1 (Y_{C_1} - Y_{B_1})
 \end{aligned}$$

将 \tilde{V}_{B_1} 经过代换，且

$$\begin{aligned}
 (X_{C_1} - X_{B_1}) &= \Delta l_1 - (a + c) + a a_{11} - X_C \\
 (Y_{C_1} - Y_{B_1}) &= a a_{21} - Y_C \\
 (Z_{C_1} - Z_{B_1}) &= a a_{31} - Z_C
 \end{aligned}$$

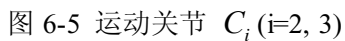
得到：

$$\dot{\vartheta}_1 = \frac{\dot{Z}_C - a(a_{32}\omega_z - a_{33}\omega_y)}{\sin \varphi_1 (a a_{21} - Y_C) + \cos \varphi_1 (\Delta l_1 - (a + c) + a a_{11} - X_C)} \quad (6-29)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{\varphi}_1 &= -\frac{1}{\Delta l_1 - (a + c) + a a_{11} - X_C} (\dot{Y}_C - a(a_{22}\omega_z - a_{23}\omega_y) + \\
 &\quad \frac{(\dot{Z}_C - a(a_{32}\omega_z - a_{33}\omega_y)) \sin \varphi_1 (a a_{31} - Z_C)}{\sin \varphi_1 (a a_{21} - Y_C) + \cos \varphi_1 (\Delta l_1 - (a + c) + a a_{11} - X_C)}) \quad (6-30)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{C_1} &= \dot{X}_C - a(a_{12}\omega_z - a_{13}\omega_y) + \frac{1}{\Delta l_1 - (a + c) + a a_{11} - X_C} \{ \dot{Y}_C (a a_{21} - Y_C) + \\
 &\quad \dot{Z}_C (a a_{31} - Z_C) + a(\omega_z (a a_{11} a_{12} + Y_C a_{22} + Z_C a_{32}) - \omega_y (a a_{11} a_{13} + Y_C a_{23} + Z_C a_{33})) \} \quad (6-31)
 \end{aligned}$$

与运动关节 C_1 相似，对于关节 C_i ($i=2,3$) (图 6-5) 所示，选择 B_i 点作为肢端。


$$\begin{cases} 0 = \dot{X}_{B_i} + \dot{\vartheta}_i \sin \varphi_i (Z_{C_i} - Z_{B_i}) - \dot{\varphi}_i (Y_{C_i} - Y_{B_i}) \\ V_{C_i} = \dot{Y}_{B_i} + \dot{\varphi}_i (X_{C_i} - X_{B_i}) - \dot{\vartheta}_i \cos \varphi_i (Z_{C_i} - Z_{B_i}) \quad (i = 2, 3) \\ 0 = \dot{Z}_{B_i} + \dot{\vartheta}_i \cos \varphi_i (Y_{C_i} - Y_{B_i}) - \dot{\vartheta}_i \sin \varphi_i (X_{C_i} - X_{B_i}) \end{cases}$$
$$\begin{cases} \dot{g}_i = \frac{\dot{Z}_{B_i}}{-\cos \varphi_i (Y_{C_i} - Y_{B_i}) + \sin \varphi_i (X_{C_i} - X_{B_i})} \\ \dot{\varphi}_i = \frac{1}{(Y_{C_i} - Y_{B_i})} \left(\dot{X}_{B_i} + \frac{\dot{Z}_{B_i} \sin \varphi_i (Z_{C_i} - Z_{B_i})}{-\cos \varphi_i (Y_{C_i} - Y_{B_i}) + \sin \varphi_i (X_{C_i} - X_{B_i})} \right) \\ V_{C_i} = \dot{Y}_{B_i} + \dot{X}_{B_i} \frac{(X_{C_i} - X_{B_i})}{(Y_{C_i} - Y_{B_i})} + \dot{Z}_{B_i} \frac{(Z_{C_i} - Z_{B_i})}{(Y_{C_i} - Y_{B_i})} \end{cases} \quad (i = 2, 3)$$
$$\begin{aligned}(X_{C_2} - X_{B_2}) &= -e + ea_{11} + ba_{12} - X_C \\ (Y_{C_2} - Y_{B_2}) &= \Delta l_2 - (b + c) + ea_{21} + ba_{22} - Y_C \\ (Z_{C_2} - Z_{B_2}) &= ea_{31} + ba_{32} - Z_C \\ (X_{C_3} - X_{B_3}) &= e - ea_{11} + ba_{12} - X_C \\ (Y_{C_3} - Y_{B_3}) &= \Delta l_3 - (b + c) - ea_{21} + ba_{22} - Y_C \\ (Z_{C_3} - Z_{B_3}) &= -ea_{31} + ba_{32} - Z_C\end{aligned}$$

92

$$\dot{g}_2 = \frac{\dot{Z}_C - \omega_x ba_{33} + \omega_y ea_{33} + \omega_z (ba_{31} - ea_{32})}{\sin \varphi_2 (-e + ea_{11} + ba_{12} - X_C) - \cos \varphi_2 (\Delta l_2 - (b+c) + ea_{21} + ba_{22} - Y_C)} \quad (6-32)$$

$$\dot{\varphi}_2 = \frac{1}{(\Delta l_2 - (b+c) + ea_{21} + ba_{22} - Y_C)} \left(\dot{X}_C - \omega_x ba_{13} + \omega_y ea_{13} + \omega_z (ba_{11} - ea_{12}) + \frac{(\dot{Z}_C - \omega_x ba_{33} + \omega_y ea_{33} + \omega_z (ba_{31} - ea_{32})) \sin \varphi_2 (ea_{31} + ba_{32} - Z_C)}{\sin \varphi_2 (-e + ea_{11} + ba_{12} - X_C) - \cos \varphi_2 (\Delta l_2 - (b+c) + ea_{21} + ba_{22} - Y_C)} \right) \quad (6-33)$$

$$V_{C_2} = \dot{Y}_C - \omega_x ba_{23} + \omega_y ea_{23} + \omega_z (ba_{21} - ea_{22}) + \frac{1}{\Delta l_2 - (b+c) + ea_{21} + ba_{22} - Y_C} \times \{ \dot{X}_C (-e + ea_{11} + ba_{12} - X_C) + \dot{Z}_C (ea_{31} + ba_{32} - Z_C) + (b\omega_x - e\omega_y)(a_{13}(e + X_C) + a_{23}(ea_{21} + ba_{22}) + a_{33}Z_C) - \omega_z ((ba_{11} - ea_{12})(e + X_C) + (ba_{21} - ea_{22})(ea_{21} + ba_{22}) + (ba_{31} - ea_{32})Z_C) \} \quad (6-34)$$

$$\dot{g}_3 = \frac{\dot{Z}_C - \omega_x ba_{33} - \omega_y ea_{33} + \omega_z (ba_{31} + ea_{32})}{\sin \varphi_3 (e - ea_{11} + ba_{12} - X_C) - \cos \varphi_3 (\Delta l_3 - (b+c) - ea_{21} + ba_{22} - Y_C)} \quad (6-35)$$

$$\dot{\varphi}_3 = \frac{1}{(\Delta l_3 - (b+c) - ea_{21} + ba_{22} - Y_C)} \left(\dot{X}_C - \omega_x ba_{13} - \omega_y ea_{13} + \omega_z (ba_{11} + ea_{12}) + \frac{(\dot{Z}_C - \omega_x ba_{33} - \omega_y ea_{33} + \omega_z (ba_{31} + ea_{32})) \sin \varphi_3 (-ea_{31} + ba_{32} - Z_C)}{\sin \varphi_3 (e - ea_{11} + ba_{12} - X_C) - \cos \varphi_3 (\Delta l_3 - (b+c) - ea_{21} + ba_{22} - Y_C)} \right) \quad (6-36)$$

$$V_{C_3} = \dot{Y}_C - \omega_x ba_{23} - \omega_y ea_{23} + \omega_z (ba_{21} + ea_{22}) + \frac{1}{\Delta l_3 - (b+c) - ea_{21} + ba_{22} - Y_C} \times \{ \dot{X}_C (e - ea_{11} + ba_{12} - X_C) + \dot{Z}_C (-ea_{31} + ba_{32} - Z_C) + (b\omega_x + e\omega_y)(a_{13}(-e + X_C) + a_{23}(-ea_{21} + ba_{22}) + a_{33}Z_C) - \omega_z ((ba_{11} + ea_{12})(-e + X_C) + (ba_{21} + ea_{22})(-ea_{21} + ba_{22}) + (ba_{31} + ea_{32})Z_C) \} \quad (6-37)$$

对于运动关节 C_i ($i=4,5,6$) (图 6-6), B_i ($i=4,5,6$) 点作为肢端。

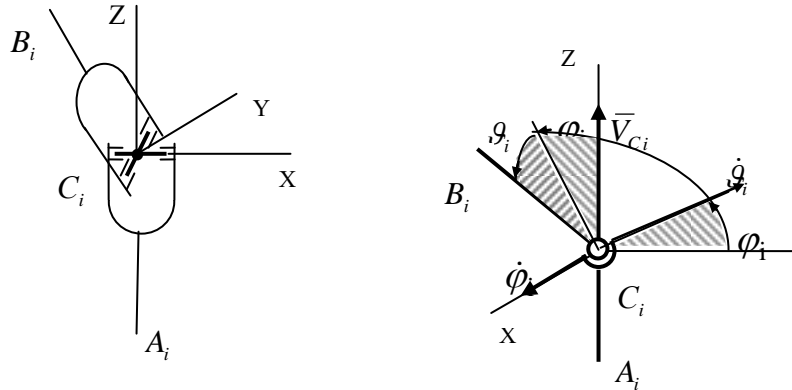


图 6-6 运动关节 C_i ($i=4, 5, 6$)

与 C_i ($i=1,2,3$) 的公式相类似, 写下 C_i ($i=1,2,3$) 在 $OXYZ$ 坐标轴上的估计量:

$$\begin{aligned} 0 &= \dot{X}_{B_i} + \dot{\vartheta}_i \cos \varphi_i (Z_{C_i} - Z_{B_i}) - \dot{\vartheta}_i \sin \varphi_i (Y_{C_i} - Y_{B_i}) \\ 0 &= \dot{Y}_{B_i} + \dot{\vartheta}_i \sin \varphi_i (X_{C_i} - X_{B_i}) - \dot{\varphi}_i (Z_{C_i} - Z_{B_i}) \quad (i=4,5,6) \\ V_{C_i} &= \dot{Z}_{B_i} + \dot{\varphi}_i (Y_{C_i} - Y_{B_i}) - \dot{\vartheta}_i \cos \varphi_i (X_{C_i} - X_{B_i}) \end{aligned}$$

从中发现:

$$\begin{cases} \dot{\vartheta}_i = \frac{\dot{X}_{B_i}}{\sin \varphi_i (Y_{C_i} - Y_{B_i}) - \cos \varphi_i (Z_{C_i} - Z_{B_i})} \\ \dot{\varphi}_i = \frac{1}{(Z_{C_i} - Z_{B_i})} (\dot{Y}_{B_i} + \dot{\vartheta}_i \sin \varphi_i (X_{C_i} - X_{B_i})) \quad (i=4,5,6) \\ V_{C_i} = \dot{Z}_{B_i} + \dot{\varphi}_i (Y_{C_i} - Y_{B_i}) - \dot{\vartheta}_i \cos \varphi_i (X_{C_i} - X_{B_i}) \end{cases}$$

将 \tilde{V}_{B4} , \tilde{V}_{B5} , \tilde{V}_{B6} 经过代换, 且

$$(X_{C4} - X_{B4}) = d - da_{11} - ma_{12} + ha_{13} - X_C$$

$$(Y_{C4} - Y_{B4}) = m - da_{21} - ma_{22} + ha_{23} - Y_C$$

$$(Z_{C4} - Z_{B4}) = \Delta l_4 - (h+c) - da_{31} - ma_{32} + ha_{33} - Z_C$$

$$(X_{C5} - X_{B5}) = -d + da_{11} - ma_{12} + ha_{13} - X_C$$

$$(Y_{C5} - Y_{B5}) = m + da_{21} - ma_{22} + ha_{23} - Y_C$$

$$(Z_{C5} - Z_{B5}) = \Delta l_5 - (h+c) + da_{31} - ma_{32} + ha_{33} - Z_C$$

$$(X_{C6} - X_{B6}) = na_{12} + ha_{13} - X_C$$

$$(Y_{C6} - Y_{B6}) = -n + na_{22} + ha_{23} - Y_C$$

$$(Z_{C6} - Z_{B6}) = \Delta l_6 - (h+c) + na_{32} + ha_{33} - Z_C$$

得到:

$$\dot{\vartheta}_4 = \frac{\dot{X}_C + \omega_x(ha_{12} + ma_{13}) - \omega_y(ha_{11} + da_{13}) - \omega_z(ma_{11} - da_{12})}{\sin \varphi_4(m - da_{21} - ma_{22} + ha_{23} - Y_C) - \cos \varphi_4(\Delta l_4 - (h+c) - da_{31} - ma_{32} + ha_{33} - Z_C)} \quad (6-38)$$

$$\dot{\varphi}_4 = \frac{1}{(\Delta l_4 - (h+c) - da_{31} - ma_{32} + ha_{33} - Z_C)} \left(\dot{Y}_C + \omega_x(ha_{22} + ma_{23}) - \omega_y(ha_{21} + da_{23}) - \omega_z(ma_{21} - da_{22}) + \sin \varphi_4 (d - da_{11} - ma_{12} + ha_{13} - X_C) \times \right. \\ \left. \frac{(\dot{X}_C + \omega_x(ha_{12} + ma_{13}) - \omega_y(ha_{11} + da_{13}) - \omega_z(ma_{11} - da_{12}))}{\sin \varphi_4 (m - da_{21} - ma_{22} + ha_{23} - Y_C) - \cos \varphi_4 (\Delta l_4 - (h+c) - da_{31} - ma_{32} + ha_{33} - Z_C)} \right) \quad (6-39)$$

$$V_{C_4} = \dot{Z}_C + \omega_x(ha_{32} + ma_{33}) - \omega_y(ha_{31} + da_{33}) - \omega_z(ma_{31} - da_{32}) + \frac{1}{\Delta l_4 - (h+c) - da_{31} - ma_{32} + ha_{33} - Z_C} \left\{ \dot{Y}_C (m - da_{21} - ma_{22} + ha_{23} - Y_C) + \right. \\ \left. \dot{X}_C (d - da_{11} - ma_{12} + ha_{13} - X_C) + \right. \\ \left. \omega_x((ha_{22} + ma_{23})(m - Y_C) + (ha_{12} + ma_{13})(d - X_C) - (ha_{32} + ma_{33})(-da_{31} - ma_{32} + ha_{33})) - \right. \\ \left. \omega_y((ha_{21} + da_{23})(m - Y_C) + (ha_{11} + da_{13})(d - X_C) - (ha_{31} + da_{33})(-da_{31} - ma_{32} + ha_{33})) - \right. \\ \left. \omega_z((ma_{21} - da_{22})(m - Y_C) + (ma_{11} - da_{12})(d - X_C) - (ma_{31} - da_{32})(-da_{31} - ma_{32} + ha_{33})) \right\} \quad (6-40)$$

$$\dot{\varphi}_5 = \frac{\dot{X}_C + \omega_x(ha_{12} + ma_{13}) - \omega_y(ha_{11} - da_{13}) - \omega_z(ma_{11} + da_{12})}{\sin \varphi_5 (m + da_{21} - ma_{22} + ha_{23} - Y_C) - \cos \varphi_5 (\Delta l_5 - (h+c) + da_{31} - ma_{32} + ha_{33} - Z_C)} \quad (6-41)$$

$$\dot{\varphi}_5 = \frac{1}{(\Delta l_5 - (h+c) + da_{31} - ma_{32} + ha_{33} - Z_C)} \left(\dot{Y}_C + \omega_x(ha_{22} + ma_{23}) - \omega_y(ha_{21} - da_{23}) - \omega_z(ma_{21} + da_{22}) + \sin \varphi_5 (-d + da_{11} - ma_{12} + ha_{13} - X_C) \times \right. \\ \left. \frac{\dot{X}_C + \omega_x(ha_{12} + ma_{13}) - \omega_y(ha_{11} - da_{13}) - \omega_z(ma_{11} + da_{12})}{\sin \varphi_5 (m + da_{21} - ma_{22} + ha_{23} - Y_C) - \cos \varphi_5 (\Delta l_5 - (h+c) + da_{31} - ma_{32} + ha_{33} - Z_C)} \right) \quad (6-42)$$

$$V_{C_5} = \dot{Z}_C + \omega_x(ha_{32} + ma_{33}) - \omega_y(ha_{31} - da_{33}) - \omega_z(ma_{31} + da_{32}) + \frac{1}{\Delta l_5 - (h+c) + da_{31} - ma_{32} + ha_{33} - Z_C} \left\{ \dot{Y}_C (m + da_{21} - ma_{22} + ha_{23} - Y_C) + \right. \\ \left. \dot{X}_C (-d + da_{11} - ma_{12} + ha_{13} - X_C) + \right. \\ \left. \omega_x((ha_{22} + ma_{23})(m - Y_C) + (ha_{12} + ma_{13})(-d - X_C) - (ha_{32} + ma_{33})(da_{31} - ma_{32} + ha_{33})) - \right. \\ \left. - \omega_y((ha_{21} - da_{23})(m - Y_C) + (ha_{11} - da_{13})(-d - X_C) - (ha_{31} - da_{33})(da_{31} - ma_{32} + ha_{33})) - \right. \\ \left. - \omega_z((ma_{21} + da_{22})(m - Y_C) + (ma_{11} + da_{12})(-d - X_C) - (ma_{31} + da_{32})(da_{31} - ma_{32} + ha_{33})) \right\} \quad (6-43)$$

$$\dot{\varphi}_6 = \frac{\dot{X}_C + \omega_x(ha_{12} - na_{13}) - \omega_y ha_{11} + \omega_z na_{11}}{\sin \varphi_6 (-n + na_{22} + ha_{23} - Y_C) - \cos \varphi_6 (\Delta l_6 - (h+c) + na_{32} + ha_{33} - Z_C)} \quad (6-44)$$

$$\dot{\varphi}_6 = \frac{1}{(Z_{C_6} - Z_{B_6})} \left(\dot{Y}_C + \omega_x(ha_{22} - na_{23}) - \omega_y ha_{21} + \omega_z na_{21} + \sin \varphi_6 (na_{12} + ha_{13} - X_C) \times \right. \\ \left. \frac{\dot{X}_C + \omega_x(ha_{12} - na_{13}) - \omega_y ha_{11} + \omega_z na_{11}}{\sin \varphi_6 (-n + na_{22} + ha_{23} - Y_C) - \cos \varphi_6 (\Delta l_6 - (h+c) + na_{32} + ha_{33} - Z_C)} \right) \quad (6-45)$$

$$\begin{aligned}
 V_{C_6} = & \dot{Z}_C + \omega_x(ha_{32} - na_{33}) - \omega_y ha_{31} + \omega_z na_{31} + \\
 & \frac{1}{\Delta l_6 - (h+c) + na_{32} + ha_{33} - Z_C} \{ \dot{Y}_C(-n + na_{22} + ha_{23} - Y_C) + \\
 & \dot{X}_C(na_{12} + ha_{13} - X_C) + \\
 & \omega_x((ha_{22} - na_{23})(-n - Y_C) - (ha_{12} - na_{13})X_C - (ha_{32} - na_{33})(na_{32} + ha_{33})) - \\
 & \omega_y(ha_{21}(-n - Y_C) - ha_{11}X_C - ha_{31}(na_{32} + ha_{33})) + \\
 & \omega_z(na_{21}(-n - Y_C) - na_{11}X_C - na_{31}(na_{32} + ha_{33})) \}
 \end{aligned} \tag{6-46}$$

6.3.3 并联平台空间运动微分方程的推导

在并联机构平台空间运动微分方程的推导中遵循如下假定：

(1) $OXYZ$ 坐标系是惯性的；

(2) 杆件和执行器的质量是可忽略的，并联机构平台的质量等于 M 。 Cx, Cy, Cz 轴为中心主惯性轴 J_x, J_y, J_z 为平台对此坐标轴的瞬时惯性惯量；

(3) 在每一点 A_i ($i=1, \dots, 6$) 的力分别可记为 $\bar{F}_1 = F_1 \bar{i}_0$, $\bar{F}_2 = F_2 \bar{j}_0$, $\bar{F}_3 = F_3 \bar{j}_0$, $\bar{F}_4 = F_4 \bar{k}_0$, $\bar{F}_5 = F_5 \bar{k}_0$, $\bar{F}_6 = F_6 \bar{k}_0$ 。每一球铰 C_i ($i=1, \dots, 6$) 任一时刻旋转角度和角速度恰成比例(弹力和粘滞摩擦不计)，根据比例系数 k_C 和 p_C 进行计算，铰点 B_i ($i=1, \dots, 6$) 与相关角速度成比例的(不计粘滞摩擦)，比例系数为 p_B ，对于构建数学模型本文使用第二类拉格朗日方程：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (i=1, \dots, s) \tag{6-47}$$

其中， $L = T - P$ 为系统的能量， q_i, \dot{q}_i 为广义坐标和广义速度， Q_i 为广义力。

选择与平台质心对应的坐标系为广义坐标系^[126-128]，它的坐标和旋转角度为：

$$q_1 = X_C \quad q_2 = Y_C \quad q_3 = Z_C \quad q_4 = \gamma \quad q_5 = \beta \quad q_6 = \alpha \tag{6-48}$$

动能等于：

$$T = \frac{1}{2} (M \dot{X}_C^2 + M \dot{Y}_C^2 + M \dot{Z}_C^2 + J_x \omega_x^2 + J_y \omega_y^2 + J_z \omega_z^2) \tag{6-49}$$

根据式(6-11)有：

$$\begin{cases} \omega_x = \dot{\beta} \sin \alpha + \gamma \cos \beta \cos \alpha \\ \omega_y = \dot{\beta} \cos \alpha + \gamma \cos \beta \sin \alpha \\ \omega_z = \dot{\alpha} + \dot{\beta} \sin \beta \end{cases} \quad (6-50)$$

广义力元素由主动力作用而产生^[129]，由第二类拉格朗日方法来计算：

$$Q_i = \bar{F}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_i} = \bar{F}_k \cdot \frac{\partial \bar{V}_k}{\partial \dot{q}_i} \quad (6-51)$$

而且由关节力引起 $(\bar{F}, -\bar{F})$, $\bar{F}_A = \bar{F}$, $\bar{F}_B = -\bar{F}$ 随力矩 $\bar{M} = [\overline{AB}, \bar{F}_B] = [\overline{BA}, \bar{F}_A]$ 有如下的关系：

$$\begin{aligned} Q_i &= \bar{F}_A \cdot \frac{\partial \bar{r}_A}{\partial q_i} + \bar{F}_B \cdot \frac{\partial \bar{r}_B}{\partial q_i} = \bar{F}_A \cdot \frac{\partial \bar{r}_A}{\partial q_i} + \bar{F}_B \cdot \frac{\partial (\bar{r}_A + \overline{AB})}{\partial q_i} = \bar{F} \cdot \frac{\partial \bar{r}_A}{\partial q_i} - \bar{F} \cdot \frac{\partial \bar{r}_A}{\partial q_i} + \bar{F}_B \cdot \frac{\partial \overline{AB}}{\partial q_i} = \\ &\quad \bar{F}_B \cdot \frac{\partial \frac{d\overline{AB}}{dt}}{\partial \dot{q}_i} = \bar{F}_B \cdot \frac{\partial [\bar{\omega}, \overline{AB}]}{\partial \dot{q}_i} = \bar{F}_B \cdot \left[\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \dot{q}_i}, \overline{AB} \right] = \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \dot{q}_i} \cdot [\overline{AB}, \bar{F}_B] = \bar{M} \cdot \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \dot{q}_i} \end{aligned} \quad (6-52)$$

根据式(6-52)，阻力矩产生的广义力的部分定义为：

$$Q_i = -M_{con} \frac{\partial \omega}{\partial \dot{q}_i} \quad (6-53)$$

由式(6-51)和式(6-53)的关系可得：

$$\begin{aligned} Q_i &= M\bar{g} \cdot \frac{\partial \bar{V}_C}{\partial \dot{q}_i} + \sum_{j=1}^6 \left(\bar{F}_j \cdot \frac{\partial \bar{V}_{A_j}}{\partial \dot{q}_i} - (k_c \vartheta_j + p_c \dot{\vartheta}_j) \cdot \frac{\partial \dot{\vartheta}_j}{\partial \dot{q}_i} - (k_c \varphi_j + p_c \dot{\varphi}_j) \cdot \frac{\partial \dot{\varphi}_j}{\partial \dot{q}_i} \right) - \\ &\quad \sum_{j=1}^6 \left(p_B (\bar{\omega} - \bar{\omega}_j) \cdot \frac{\partial (\bar{\omega} - \bar{\omega}_j)}{\partial \dot{q}_i} \right) \end{aligned} \quad (6-54)$$

平台角速度的向量用坐标系 $OXYZ$ 基础向量 \bar{e}_0 表示为：

$$\bar{\omega} = \bar{e} \tilde{\omega} = \bar{e}_0 A \tilde{\omega} = \bar{e}_0 \tilde{\Omega}, \quad \tilde{\Omega} = \begin{pmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta \\ \dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma \\ \dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma \end{pmatrix}.$$

计算，得

$$\bar{\omega} - \bar{\omega}_1 = \bar{e}_0 \tilde{\Omega}_{B_1}^r = \bar{e}_0 \begin{pmatrix} \dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta + \dot{\vartheta}_1 \sin \varphi_1 \\ \dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma - \dot{\vartheta}_1 \cos \varphi_1 \\ \dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\varphi}_1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}\bar{\omega} - \bar{\omega}_j &= \bar{e}_0 \tilde{\Omega}_{B_j}^r = \bar{e}_0 \begin{pmatrix} \dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta - \dot{\vartheta}_j \cos \varphi_j \\ \dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma - \dot{\vartheta}_j \sin \varphi_j \\ \dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\varphi}_j \end{pmatrix} \quad (j=2,3) \\ \bar{\omega} - \bar{\omega}_j &= \bar{e}_0 \tilde{\Omega}_{B_j}^r = \bar{e}_0 \begin{pmatrix} \dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta - \dot{\varphi}_j \\ \dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma - \dot{\vartheta}_j \cos \varphi_j \\ \dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\vartheta}_j \sin \varphi_j \end{pmatrix} \quad (j=4,5,6)\end{aligned}$$

同样, 既然 $\bar{V}_A = \bar{V}_{C_i}$, 式(6-54)可表示为:

$$\begin{aligned}Q_i &= M\bar{g} \cdot \frac{\partial \bar{V}_C}{\partial \dot{q}_i} + \sum_{j=1}^6 \left(F_j \cdot \frac{\partial V_{C_j}}{\partial \dot{q}_i} - (k_C \vartheta_j + p_C \dot{\vartheta}_j) \cdot \frac{\partial \dot{\vartheta}_j}{\partial \dot{q}_i} - (k_C \varphi_j + p_C \dot{\varphi}_j) \cdot \frac{\partial \dot{\varphi}_j}{\partial \dot{q}_i} \right) - \\ & p_B \sum_{j=1}^6 \left((\Omega_{B_j}^r)_X \cdot \frac{\partial (\Omega_{B_j}^r)_X}{\partial \dot{q}_i} + (\Omega_{B_j}^r)_Y \cdot \frac{\partial (\Omega_{B_j}^r)_Y}{\partial \dot{q}_i} + (\Omega_{B_j}^r)_Z \cdot \frac{\partial (\Omega_{B_j}^r)_Z}{\partial \dot{q}_i} \right), \quad (i=1, \dots, 6)\end{aligned} \quad (6-55)$$

根据式(6-55)广义力可计算为:

$$\begin{aligned}Q_{X_C} &= F_1 + \sum_{j=2}^3 F_j \frac{X_{C_j} - X_{B_j}}{Y_{C_j} - Y_{B_j}} + \sum_{j=4}^6 F_j \frac{X_{C_j} - X_{B_j}}{Z_{C_j} - Z_{B_j}} - \sum_{j=2}^3 \frac{(k_C \varphi_j + p_C \dot{\varphi}_j - p_B (\Omega_{B_j}^r)_Z)}{Y_{C_j} - Y_{B_j}} - \\ & \sum_{j=4}^6 \left\{ (k_C \vartheta_j + p_C \dot{\vartheta}_j - p_B ((\Omega_{B_j}^r)_Y \cos \varphi_j + (\Omega_{B_j}^r)_Z \sin \varphi_j)) + \right. \\ & \left. (k_C \varphi_j + p_C \dot{\varphi}_j - p_B (\Omega_{B_j}^r)_X) \frac{\sin \varphi_j (X_{C_j} - X_{B_j})}{Z_{C_j} - Z_{B_j}} \right\} \left(\frac{1}{\sin \varphi_j (Y_{C_j} - Y_{B_j}) - \cos \varphi_j (Z_{C_j} - Z_{B_j})} \right)\end{aligned} \quad (6-56)$$

$$\begin{aligned}Q_{Y_C} &= F_1 \frac{Y_{C_1} - Y_{B_1}}{X_{C_1} - X_{B_1}} + F_2 + F_3 + \sum_{j=4}^6 F_j \frac{Y_{C_j} - Y_{B_j}}{Z_{C_j} - Z_{B_j}} + \frac{(k_C \varphi_1 + p_C \dot{\varphi}_1 - p_B (\Omega_{B_1}^r)_Z)}{X_{C_1} - X_{B_1}} - \\ & \sum_{j=4}^6 (k_C \varphi_j + p_C \dot{\varphi}_j - p_B (\Omega_{B_j}^r)_X) \frac{1}{Z_{C_j} - Z_{B_j}}\end{aligned} \quad (6-57)$$

$$\begin{aligned}Q_{Z_C} &= -Mg + F_1 \frac{Z_{C_1} - Z_{B_1}}{X_{C_1} - X_{B_1}} + \sum_{j=2}^3 F_j \frac{Z_{C_j} - Z_{B_j}}{Y_{C_j} - Y_{B_j}} + F_4 + F_5 + F_6 - \\ & \{ (k_C \vartheta_1 + p_C \dot{\vartheta}_1 + p_B ((\Omega_{B_1}^r)_X \sin \varphi_1 - (\Omega_{B_1}^r)_Y \cos \varphi_1) - \\ & (k_C \varphi_1 + p_C \dot{\varphi}_1 - p_B (\Omega_{B_1}^r)_Z) \frac{\sin \varphi_1 (Z_{C_1} - Z_{B_1})}{X_{C_1} - X_{B_1}} \} \left(\frac{1}{\sin \varphi_1 (Y_{C_1} - Y_{B_1}) + \cos \varphi_1 (X_{C_1} - X_{B_1})} \right) + \\ & \sum_{j=2}^3 \{ (k_C \vartheta_j + p_C \dot{\vartheta}_j - p_B ((\Omega_{B_j}^r)_X \cos \varphi_j + (\Omega_{B_j}^r)_Y \sin \varphi_j) + \\ & (k_C \varphi_j + p_C \dot{\varphi}_j - p_B (\Omega_{B_j}^r)_Z) \frac{\sin \varphi_j (Z_{C_j} - Z_{B_j})}{Y_{C_j} - Y_{B_j}} \} \left(\frac{1}{\cos \varphi_j (Y_{C_j} - Y_{B_j}) - \sin \varphi_j (X_{C_j} - X_{B_j})} \right)\end{aligned} \quad (6-58)$$

$$\begin{aligned}
 Q_\gamma = & \frac{F_1 a}{X_{C_1} - X_{B_1}} (Y_C (a_{13}a_{22} - a_{12}a_{23}) + Z_C (a_{13}a_{32} - a_{12}a_{33})) - \\
 & (F_2 + F_3)b(a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21}) + (F_2 - F_3)e(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}) + \\
 & \frac{F_2}{Y_{C_2} - Y_{B_2}} \{ (ea_{21} + ba_{22})(b(a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21}) - e(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22})) + \\
 & Z_C (b(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}) - e(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32})) \} + \\
 & \frac{F_3}{Y_{C_3} - Y_{B_3}} \{ (-ea_{21} + ba_{22})(b(a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21}) + e(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22})) + \\
 & Z_C (b(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}) + e(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32})) \} + \\
 & (F_4 + F_5 + F_6)h(a_{11}a_{32} - a_{12}a_{31}) + (F_4 + F_5)m(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}) + \\
 & ((F_4 - F_5)d - F_6n)(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}) + \\
 & (k_C \vartheta_1 + p_C \dot{\vartheta}_1 + p_B ((\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta) \sin \varphi_1 - (\dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma) \cos \varphi_1 + \dot{\vartheta}_1)) \times \\
 & \frac{a(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32})}{\sin \varphi_1 (Y_{C_1} - Y_{B_1}) + \cos \varphi_1 (X_{C_1} - X_{B_1})} - \\
 & (k_C \vartheta_2 + p_C \dot{\vartheta}_2 - p_B ((\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta) \cos \varphi_2 + (\dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma) \sin \varphi_2 - \dot{\vartheta}_2)) \times \\
 & \frac{(e(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) - b(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}))}{\sin \varphi_2 (X_{C_2} - X_{B_2}) - \cos \varphi_2 (Y_{C_2} - Y_{B_2})} + \\
 & (k_C \vartheta_3 + p_C \dot{\vartheta}_3 - p_B ((\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta) \cos \varphi_3 + (\dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma) \sin \varphi_3 - \dot{\vartheta}_3)) \times \\
 & \frac{(e(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) + b(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}))}{\sin \varphi_3 (X_{C_3} - X_{B_3}) - \cos \varphi_3 (Y_{C_3} - Y_{B_3})} - \\
 & (k_C \varphi_1 + p_C \dot{\varphi}_1 - p_B (\dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\varphi}_1)) \times \\
 & \frac{a}{X_{C_1} - X_{B_1}} \left((a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}) + \frac{(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) \sin \varphi_1 (a_{31} - Z_C)}{\sin \varphi_1 (Y_{C_1} - Y_{B_1}) + \cos \varphi_1 (X_{C_1} - X_{B_1})} \right) - \\
 & (k_C \varphi_2 + p_C \dot{\varphi}_2 - p_B (\dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\varphi}_2)) \times \\
 & \frac{\sin \varphi_2 (ea_{31} + ba_{32} - Z_C)}{Y_{C_2} - Y_{B_2}} \left(\frac{e(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) - b(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31})}{\sin \varphi_2 (X_{C_2} - X_{B_2}) - \cos \varphi_2 (Y_{C_2} - Y_{B_2})} \right) + \\
 & (k_C \varphi_3 + p_C \dot{\varphi}_3 - p_B (\dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\varphi}_3)) \times \\
 & \frac{\sin \varphi_3 (-ea_{31} + ba_{32} - Z_C)}{Y_{C_3} - Y_{B_3}} \left(\frac{e(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) + b(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31})}{\sin \varphi_3 (X_{C_3} - X_{B_3}) - \cos \varphi_3 (Y_{C_3} - Y_{B_3})} \right) - \\
 & (k_C \varphi_4 + p_C \dot{\varphi}_4 - p_B (\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta - \dot{\varphi}_4)) \times \\
 & \frac{h(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) + m(a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21}) - d(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22})}{Z_{C_4} - Z_{B_4}} - \\
 & (k_C \varphi_5 + p_C \dot{\varphi}_5 - p_B (\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta - \dot{\varphi}_5)) \times \\
 & \frac{h(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) + m(a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21}) + d(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22})}{Z_{C_5} - Z_{B_5}} - \\
 & (k_C \varphi_6 + p_C \dot{\varphi}_6 - p_B (\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta - \dot{\varphi}_6)) \times \\
 & \frac{h(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) - n(a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21})}{Z_{C_6} - Z_{B_6}} -
 \end{aligned}$$

$$p_B \{6(\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta) + \dot{\mathcal{G}}_1 \sin \varphi_1 - \dot{\mathcal{G}}_2 \cos \varphi_2 - \dot{\mathcal{G}}_3 \cos \varphi_3 - \dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_6\} \quad (6-59)$$

$$\begin{aligned} Q_\beta = & F_1 a \cos \alpha \left(a_{13} - \frac{a a_{11} a_{13} + Y_C a_{23} + Z_C a_{33}}{X_{C_1} - X_{B_1}} \right) - \\ & F_2 (b \sin \alpha - e \cos \alpha) \left(a_{23} - \frac{(e + X_C) a_{13} + (e a_{21} + b a_{22}) a_{23} + Z_C a_{33}}{Y_{C_2} - Y_{B_2}} \right) - \\ & F_3 (b \sin \alpha + e \cos \alpha) \left(a_{23} - \frac{(-e + X_C) a_{13} + (-e a_{21} + b a_{22}) a_{23} + Z_C a_{33}}{Y_{C_3} - Y_{B_3}} \right) + \\ & (F_4 + F_5 + F_6) h \cos \gamma \sin \beta + a_{33} \{ \sin \alpha (m(F_4 + F_5) - n F_6) - d \cos \alpha (F_4 - F_5) \} - \\ & \frac{F_4}{Z_{C_4} - Z_{B_4}} \{ h(\cos \beta (d - X_C) + \sin \beta ((m - Y_C) \sin \gamma + (-d a_{31} - m a_{32} + h a_{33}) \cos \gamma)) - \\ & (m \sin \alpha - d \cos \alpha) ((d - X_C) a_{13} + (m - Y_C) a_{23} - (-d a_{31} - m a_{32} + h a_{33}) a_{33}) \} - \\ & \frac{F_5}{Z_{C_5} - Z_{B_5}} \{ h(\cos \beta (-d - X_C) + \sin \beta ((m - Y_C) \sin \gamma + (d a_{31} - m a_{32} + h a_{33}) \cos \gamma)) - \\ & (m \sin \alpha + d \cos \alpha) ((-d - X_C) a_{13} + (m - Y_C) a_{23} - (d a_{31} - m a_{32} + h a_{33}) a_{33}) \} - \\ & \frac{F_6}{Z_{C_6} - Z_{B_6}} \{ h(-X_C \cos \beta + \sin \beta ((-n - Y_C) \sin \gamma + (n a_{32} + h a_{33}) \cos \gamma)) + \\ & n \sin \alpha (-X_C a_{13} + (-n - Y_C) a_{23} - (n a_{32} + h a_{33}) a_{33}) \} - \\ & (k_C \mathcal{G}_1 + p_C \dot{\mathcal{G}}_1 + p_B ((\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta) \sin \varphi_1 - (\dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma) \cos \varphi_1 + \dot{\mathcal{G}}_1)) \times \\ & \quad \times \frac{a a_{33} \cos \alpha}{\sin \varphi_1 (Y_{C_1} - Y_{B_1}) + \cos \varphi_1 (X_{C_1} - X_{B_1})} - \\ & (k_C \mathcal{G}_2 + p_C \dot{\mathcal{G}}_2 - p_B ((\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta) \cos \varphi_2 + (\dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma) \sin \varphi_2 - \dot{\mathcal{G}}_2)) \times \\ & \quad \times \frac{(e \cos \alpha - b \sin \alpha) a_{33}}{\sin \varphi_2 (X_{C_2} - X_{B_2}) - \cos \varphi_2 (Y_{C_2} - Y_{B_2})} + \\ & (k_C \mathcal{G}_3 + p_C \dot{\mathcal{G}}_3 - p_B ((\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta) \cos \varphi_3 + (\dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma) \sin \varphi_3 - \dot{\mathcal{G}}_3)) \times \\ & \quad \times \frac{(e \cos \alpha + b \sin \alpha) a_{33}}{\sin \varphi_3 (X_{C_3} - X_{B_3}) - \cos \varphi_3 (Y_{C_3} - Y_{B_3})} - \\ & (k_C \mathcal{G}_4 + p_C \dot{\mathcal{G}}_4 - p_B (\dot{\beta} \cos(\gamma - \varphi_4) - \dot{\alpha} \sin(\gamma - \varphi_4) - \dot{\mathcal{G}}_4)) \times \\ & \quad \times \frac{-h \cos \beta + (m \sin \alpha - d \cos \alpha) a_{13}}{\sin \varphi_4 (Y_{C_4} - Y_{B_4}) - \cos \varphi_4 (Z_{C_4} - Z_{B_4})} - \\ & (k_C \mathcal{G}_5 + p_C \dot{\mathcal{G}}_5 - p_B (\dot{\beta} \cos(\gamma - \varphi_5) - \dot{\alpha} \sin(\gamma - \varphi_5) - \dot{\mathcal{G}}_5)) \times \\ & \quad \times \frac{-h \cos \beta + (m \sin \alpha + d \cos \alpha) a_{13}}{\sin \varphi_5 (Y_{C_5} - Y_{B_5}) - \cos \varphi_5 (Z_{C_5} - Z_{B_5})} + \\ & (k_C \mathcal{G}_6 + p_C \dot{\mathcal{G}}_6 - p_B (\dot{\beta} \cos(\gamma - \varphi_6) - \dot{\alpha} \sin(\gamma - \varphi_6) - \dot{\mathcal{G}}_6)) \times \\ & \quad \times \frac{h \cos \beta + n \sin \alpha a_{13}}{\sin \varphi_6 (Y_{C_6} - Y_{B_6}) - \cos \varphi_6 (Z_{C_6} - Z_{B_6})} - \\ & (k_C \varphi_1 + p_C \dot{\varphi}_1 - p_B (\dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\varphi}_1)) \times \\ & \quad \times \frac{a \cos \alpha}{X_{C_1} - X_{B_1}} \left(a_{23} + \frac{a_{33} \sin \varphi_1 (a a_{31} - Z_C)}{\sin \varphi_1 (Y_{C_1} - Y_{B_1}) + \cos \varphi_1 (X_{C_1} - X_{B_1})} \right) - \\ & (k_C \varphi_2 + p_C \dot{\varphi}_2 - p_B (\dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\varphi}_2)) \times \\ & \quad \times \frac{e \cos \alpha - b \sin \alpha}{Y_{C_2} - Y_{B_2}} \left(a_{13} + \frac{a_{33} \sin \varphi_2 (e a_{31} + b a_{32} - Z_C)}{\sin \varphi_2 (X_{C_2} - X_{B_2}) - \cos \varphi_2 (Y_{C_2} - Y_{B_2})} \right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (k_c \dot{\varphi}_3 + p_c \dot{\varphi}_3 - p_B (\dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\varphi}_3)) \times \\
 & \quad \frac{e \cos \alpha + b \sin \alpha}{Y_{C_3} - Y_{B_3}} \left(a_{13} + \frac{a_{33} \sin \varphi_3 (-e a_{31} + b a_{32} - Z_C)}{\sin \varphi_3 (X_{C_3} - X_{B_3}) - \cos \varphi_3 (Y_{C_3} - Y_{B_3})} \right) - \\
 & \quad \frac{(k_c \dot{\varphi}_4 + p_c \dot{\varphi}_4) - p_B (\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta - \dot{\varphi}_4)}{Z_{C_4} - Z_{B_4}} \times \\
 & \quad \left(-h \sin \gamma \sin \beta + (m \sin \alpha - d \cos \alpha) a_{23} + \frac{\sin \varphi_4 (X_{C_4} - X_{B_4}) (-h \cos \beta + (m \sin \alpha - d \cos \alpha) a_{13})}{\sin \varphi_4 (Y_{C_4} - Y_{B_4}) - \cos \varphi_4 (Z_{C_4} - Z_{B_4})} \right) - \\
 & \quad \frac{(k_c \dot{\varphi}_5 + p_c \dot{\varphi}_5) - p_B (\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta - \dot{\varphi}_5)}{Z_{C_5} - Z_{B_5}} \times \\
 & \quad \left(-h \sin \gamma \sin \beta + (m \sin \alpha + d \cos \alpha) a_{23} + \frac{\sin \varphi_5 (X_{C_5} - X_{B_5}) (-h \cos \beta + (m \sin \alpha + d \cos \alpha) a_{13})}{\sin \varphi_5 (Y_{C_5} - Y_{B_5}) - \cos \varphi_5 (Z_{C_5} - Z_{B_5})} \right) + \\
 & \quad \frac{(k_c \dot{\varphi}_6 + p_c \dot{\varphi}_6) - p_B (\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta - \dot{\varphi}_6)}{Z_{C_6} - Z_{B_6}} \times \\
 & \quad \left(h \sin \gamma \sin \beta + n \sin \alpha a_{23} + \frac{\sin \varphi_6 (X_{C_6} - X_{B_6}) (h \cos \beta + n \sin \alpha a_{13})}{\sin \varphi_6 (Y_{C_6} - Y_{B_6}) - \cos \varphi_6 (Z_{C_6} - Z_{B_6})} \right) - \\
 & p_B \{ 6 \dot{\beta} - \cos \gamma (\dot{\varphi}_1 \cos \varphi_1 + \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 + \dot{\varphi}_3 \sin \varphi_3) - \sin \gamma (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) - \\
 & \quad - \dot{\varphi}_4 \cos(\gamma - \varphi_4) - \dot{\varphi}_5 \cos(\gamma - \varphi_5) - \dot{\varphi}_6 \cos(\gamma - \varphi_6) \} \quad (6-60) \\
 & Q_\alpha = F_1 a \left(-a_{12} + \frac{a a_{11} a_{12} + Y_C a_{22} + Z_C a_{32}}{X_{C_1} - X_{B_1}} \right) + \\
 & F_2 \left((b a_{21} - e a_{22}) - \frac{(e + X_C)(b a_{11} - e a_{12}) + (b a_{21} - e a_{22})(e a_{21} + b a_{22}) + Z_C(b a_{31} - e a_{32})}{Y_{C_2} - Y_{B_2}} \right) + \\
 & F_3 \left((b a_{21} + e a_{22}) - \frac{(-e + X_C)(b a_{11} + e a_{12}) + (b a_{21} + e a_{22})(-e a_{21} + b a_{22}) + Z_C(b a_{31} + e a_{32})}{Y_{C_3} - Y_{B_3}} \right) - \\
 & \quad - (F_4 + F_5)(m a_{31} - d a_{32}) + F_6 n a_{31} - \\
 & \quad \frac{F_4}{Z_{C_4} - Z_{B_4}} \{ (m a_{21} - d a_{22})(m - Y_C) + (m a_{11} - d a_{12})(d - X_C) - (m a_{31} - d a_{32})(-d a_{31} - m a_{32} + h a_{33}) \} - \\
 & \quad \frac{F_5}{Z_{C_5} - Z_{B_5}} \{ (m a_{21} + d a_{22})(m - Y_C) + (m a_{11} + d a_{12})(-d - X_C) - (m a_{31} + d a_{32})(d a_{31} - m a_{32} + h a_{33}) \} + \\
 & \quad \frac{F_6}{Z_{C_6} - Z_{B_6}} \{ n a_{21}(-n - Y_C) - n a_{11} X_C - n a_{31}(n a_{32} + h a_{33}) \} - \\
 & - (k_c \dot{\varphi}_1 + p_c \dot{\varphi}_1 - p_B ((\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta) \sin \varphi_1 - (\dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma) \cos \varphi_1 + \dot{\varphi}_1)) \times \\
 & \quad \frac{a a_{32}}{\sin \varphi_1 (Y_{C_1} - Y_{B_1}) + \cos \varphi_1 (X_{C_1} - X_{B_1})} - \\
 & - (k_c \dot{\varphi}_2 + p_c \dot{\varphi}_2 - p_B ((\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta) \cos \varphi_2 + (\dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma) \sin \varphi_2 - \dot{\varphi}_2)) \times \\
 & \quad \frac{(b a_{31} - e a_{32})}{\sin \varphi_2 (X_{C_2} - X_{B_2}) - \cos \varphi_2 (Y_{C_2} - Y_{B_2})} - \\
 & (k_c \dot{\varphi}_3 + p_c \dot{\varphi}_3 - p_B ((\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta) \cos \varphi_3 + (\dot{\beta} \cos \gamma - \dot{\alpha} \cos \beta \sin \gamma) \sin \varphi_3 - \dot{\varphi}_3)) \times \\
 & \quad \frac{(b a_{31} + e a_{32})}{\sin \varphi_3 (X_{C_3} - X_{B_3}) - \cos \varphi_3 (Y_{C_3} - Y_{B_3})} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + (k_C \dot{\vartheta}_4 + p_C \dot{\vartheta}_4 - p_B (\dot{\beta} \cos(\gamma - \varphi_4) - \dot{\alpha} \sin(\gamma - \varphi_4) - \dot{\vartheta}_4)) \times \\
 & \quad \frac{(ma_{11} - da_{12})}{\sin \varphi_4 (Y_{C_4} - Y_{B_4}) - \cos \varphi_4 (Z_{C_4} - Z_{B_4})} + \\
 & (k_C \dot{\vartheta}_5 + p_C \dot{\vartheta}_5 - p_B (\dot{\beta} \cos(\gamma - \varphi_5) - \dot{\alpha} \sin(\gamma - \varphi_5) - \dot{\vartheta}_5)) \times \\
 & \quad \frac{(ma_{11} + da_{12})}{\sin \varphi_5 (Y_{C_5} - Y_{B_5}) - \cos \varphi_5 (Z_{C_5} - Z_{B_5})} - \\
 & (k_C \dot{\vartheta}_6 + p_C \dot{\vartheta}_6 - p_B (\dot{\beta} \cos(\gamma - \varphi_6) - \dot{\alpha} \sin(\gamma - \varphi_6) - \dot{\vartheta}_6)) \times \\
 & \quad \times \frac{na_{11}}{\sin \varphi_6 (Y_{C_6} - Y_{B_6}) - \cos \varphi_6 (Z_{C_6} - Z_{B_6})} + \\
 & (k_C \dot{\varphi}_1 + p_C \dot{\varphi}_1 - p_B (\dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\varphi}_1)) \times \\
 & \quad \frac{a}{X_{C_1} - X_{B_1}} \left(a_{22} + \frac{a_{32} \sin \varphi_1 (a_{31} - Z_C)}{\sin \varphi_1 (Y_{C_1} - Y_{B_1}) + \cos \varphi_1 (X_{C_1} - X_{B_1})} \right) - \\
 & (k_C \dot{\varphi}_2 + p_C \dot{\varphi}_2 - p_B (\dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\varphi}_2)) \times \\
 & \quad \frac{1}{Y_{C_2} - Y_{B_2}} \left(ba_{11} - ea_{12} + \frac{(ba_{31} - ea_{32}) \sin \varphi_2 (ea_{31} + ba_{32} - Z_C)}{\sin \varphi_2 (X_{C_2} - X_{B_2}) - \cos \varphi_2 (Y_{C_2} - Y_{B_2})} \right) - \\
 & (k_C \dot{\varphi}_3 + p_C \dot{\varphi}_3 - p_B (\dot{\beta} \sin \gamma + \dot{\alpha} \cos \beta \cos \gamma - \dot{\varphi}_3)) \times \\
 & \quad \frac{1}{Y_{C_3} - Y_{B_3}} \left(ba_{11} + ea_{12} + \frac{(ba_{31} + ea_{32}) \sin \varphi_3 (-ea_{31} + ba_{32} - Z_C)}{\sin \varphi_3 (X_{C_3} - X_{B_3}) - \cos \varphi_3 (Y_{C_3} - Y_{B_3})} \right) + \\
 & \quad \frac{(k_C \dot{\varphi}_4 + p_C \dot{\varphi}_4) - p_B (\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta - \dot{\varphi}_4)}{Z_{C_4} - Z_{B_4}} \times \\
 & \quad \left((ma_{21} - da_{22}) + \frac{\sin \varphi_4 (X_{C_4} - X_{B_4}) (ma_{11} - da_{12})}{\sin \varphi_4 (Y_{C_4} - Y_{B_4}) - \cos \varphi_4 (Z_{C_4} - Z_{B_4})} \right) + \\
 & \quad + \frac{(k_C \dot{\varphi}_5 + p_C \dot{\varphi}_5) - p_B (\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta - \dot{\varphi}_5)}{Z_{C_5} - Z_{B_5}} \times \\
 & \quad \left((ma_{21} + da_{22}) + \frac{\sin \varphi_5 (X_{C_5} - X_{B_5}) (ma_{11} + da_{12})}{\sin \varphi_5 (Y_{C_5} - Y_{B_5}) - \cos \varphi_5 (Z_{C_5} - Z_{B_5})} \right) - \\
 & \quad \frac{(k_C \dot{\varphi}_6 + p_C \dot{\varphi}_6) - p_B (\dot{\gamma} + \dot{\alpha} \sin \beta - \dot{\varphi}_6)}{Z_{C_6} - Z_{B_6}} \times \\
 & \quad \left(na_{21} + \frac{\sin \varphi_6 (X_{C_6} - X_{B_6}) na_{11}}{\sin \varphi_6 (Y_{C_6} - Y_{B_6}) - \cos \varphi_6 (Z_{C_6} - Z_{B_6})} \right) - \\
 & - p_B \{ 6\dot{\gamma} \sin \beta + 6\dot{\alpha} - \cos \beta (\cos \gamma (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) + \dot{\vartheta}_4 \sin(\gamma - \varphi_4) + \dot{\vartheta}_5 \sin(\gamma - \varphi_5) + \dot{\vartheta}_6 \sin(\gamma - \varphi_6)) + \\
 & + \sin \beta (\dot{\vartheta}_1 \sin \varphi_1 - \dot{\vartheta}_2 \cos \varphi_2 - \dot{\vartheta}_3 \cos \varphi_3 - \dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_6) + \cos \beta \sin \gamma (\dot{\vartheta}_1 \cos \varphi_1 + \dot{\vartheta}_2 \sin \varphi_2 + \dot{\vartheta}_3 \sin \varphi_3) \}
 \end{aligned} \tag{6-61}$$

根据式(6-47)计算式(6-49)动能的导数, 考虑式(6-50), 得

$$\frac{\partial T}{\partial X_C} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial Y_C} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial Z_C} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{X}_C} = M\dot{X}_C, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{Y}_C} = M\dot{Y}_C, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{Z}_C} = M\dot{Z}_C,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{X}_C} \right) = M \ddot{X}_C, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{Y}_C} \right) = M \ddot{Y}_C, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{Z}_C} \right) = M \ddot{Z}_C,$$

$$\frac{\partial T}{\partial \gamma} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} = J_z \omega_z \sin \beta - J_y \omega_y \cos \beta \sin \alpha + J_x \omega_x \cos \beta \cos \alpha,$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} \right) &= (J_x \dot{\omega}_x - (J_y - J_z) \omega_y \omega_z) \cos \beta \cos \alpha - (J_y \dot{\omega}_y - (J_z - J_x) \omega_x \omega_z) \cos \beta \sin \alpha + \\ &\quad + (J_z \dot{\omega}_z - (J_x - J_y) \omega_x \omega_y) \sin \beta, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \beta} = ((J_y \omega_y \sin \alpha - J_x \omega_x \cos \alpha) \operatorname{tg} \beta + J_z \omega_z (\omega_x \cos \alpha - \omega_y \sin \alpha))$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} = J_x \omega_x \sin \alpha + J_y \omega_y \cos \alpha,$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) &= J_x \dot{\omega}_x \sin \alpha + J_y \dot{\omega}_y \cos \alpha + (J_x \omega_x \cos \alpha - J_y \omega_y \sin \alpha) \omega_z - \\ &\quad - (J_x \omega_x \cos \alpha - J_y \omega_y \sin \alpha) (\omega_x \cos \alpha - \omega_y \sin \alpha) \operatorname{tg} \beta, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \alpha} = (J_x - J_y) \omega_x \omega_y,$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = J_z \omega_z, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) = J_z \dot{\omega}_z.$$

平台势能等于^[130]:

$$P = MgZ_C = [0 \quad 0 \quad Mg \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \mathbf{q}$$

计算它的导数

$$\frac{\partial P}{\partial X_C} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial Y_C} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial Z_C} = Mg, \quad \frac{\partial P}{\partial \dot{X}_C} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial \dot{Y}_C} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial \dot{Z}_C} = 0,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial P}{\partial \dot{X}_C} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial P}{\partial \dot{Y}_C} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial P}{\partial \dot{Z}_C} \right) = 0,$$

$$\frac{\partial P}{\partial \gamma} = \frac{\partial P}{\partial \beta} = \frac{\partial P}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial \dot{\gamma}} = \frac{\partial P}{\partial \dot{\beta}} = \frac{\partial P}{\partial \dot{\alpha}} = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial P}{\partial \dot{\gamma}} \right) = 0, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial P}{\partial \dot{\beta}} \right) = 0, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial P}{\partial \dot{\alpha}} \right) = 0$$

将计算得到的导数代入方程(6-47), 得到:

$$M \ddot{X}_C = Q_{X_C}$$

$$M \ddot{Y}_C = Q_{Y_C}$$

$$M \ddot{Z}_C + Mg = Q_{Z_C}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_x \dot{\omega}_x - (J_y - J_z) \omega_y \omega_z) \cos \beta \cos \alpha - (J_y \dot{\omega}_y - (J_z - J_x) \omega_x \omega_z) \cos \beta \sin \alpha + \\
 & + (J_z \dot{\omega}_z - (J_x - J_y) \omega_x \omega_y) \sin \beta = Q_\gamma \\
 & (J_x \dot{\omega}_x - (J_y - J_z) \omega_y \omega_z) \sin \alpha + (J_y \dot{\omega}_y - (J_z - J_x) \omega_x \omega_z) \cos \alpha = Q_\beta \\
 & J_z \dot{\omega}_z - (J_x - J_y) \omega_x \omega_y = Q_\alpha
 \end{aligned}$$

基于运动方程:

$$\dot{X}_C = V_X, \quad \dot{Y}_C = V_Y, \quad \dot{Z}_C = V_Z \quad (6-62)$$

将最后一个方程推导为柯西方程一般形式:

$$M \dot{V}_X = Q_{X_C} \quad (6-63)$$

$$M \dot{V}_Y = Q_{Y_C} \quad (6-64)$$

$$M \dot{V}_Z + Mg = Q_{Z_C}, \quad (6-65)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega_x \cos \alpha - \omega_y \sin \alpha}{\cos \beta} \quad (6-66)$$

$$\dot{\beta} = \omega_x \sin \alpha + \omega_y \cos \alpha \quad (6-67)$$

$$\dot{\alpha} = \omega_z - (\omega_x \cos \alpha - \omega_y \sin \alpha) \tan \beta \quad (6-68)$$

$$\dot{\omega}_x = \frac{1}{J_x} \left((J_y - J_z) \omega_y \omega_z + Q_\beta \sin \alpha + \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} (Q_\gamma - Q_\alpha \sin \beta) \right) \quad (6-69)$$

$$\dot{\omega}_y = \frac{1}{J_y} \left((J_z - J_x) \omega_x \omega_z + Q_\beta \cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\cos \beta} (Q_\gamma - Q_\alpha \sin \beta) \right) \quad (6-70)$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{1}{J_z} \left((J_x - J_y) \omega_x \omega_y + Q_\alpha \right) \quad (6-71)$$

式(6-63)-式(6-71)和式(6-29) -式(6-46)即为描述并联机构平台空间运动的动力学方程。

6.4 并联平台模型简化应用及仿真验证

由上一部分的内容可以看到,使用拉格朗日方法对此并联平台所建立的动力学模型是非常复杂的,模型中系统的物理和数学结构特点被完整的展现出来,但由于系统的数学模型自由度太大且涉及非线性,这样会使计算量过大,对系统进行控制无法实现实时

性的要求^[131,132]。完整的动力学模型无法直接应用于机器人平台的控制器设计当中，因此本文针对不同的控制要求和运动轨迹对建立的动力学模型进行简化，以增强模型的实用性^[133]。动力学模型简化的根本目的是为了获得一个满足工程精度要求的低阶、有效的计算模型，从而可以用简化模型对原始复杂结构进行性能分析以及模拟仿真等，得到满足精度的简化模型。下面通过一些简化的实例，并辅以仿真，分析所建立的动力学模型在平台控制器设计当中的应用。有仿真结果也能证明所建立的动力学模型的正确性。

6.4.1 对称平面运动

考虑在忽略一个驱动的条件下平台在一对称平面运动的动力学模型。以 YZ 平面上的运动为例，此时初始条件可假定为：

- 1) $\alpha = 0, \beta = 0, X_C = 0$;
- 2) 忽略铰链的弹力和粘性摩擦力；
- 3) 驱动 1 的影响忽略不计；
- 4) 驱动 2 和 3, 4 和 5、6 产生的驱动力大小相同，即 $F_2=F_3, F_4=F_5=F_6$ 。

设定下列符号：

$$MY(\gamma) = m - m\cos\gamma - h\sin\gamma - Y_C$$

$$NY(\gamma) = n - n\cos\gamma + h\sin\gamma + Y_C$$

$$BZ(\gamma) = Z_C - b\sin\gamma$$

从一般方程考虑到上面指定的假设和标示，方程中所给平面运动可表示为：

$$M\ddot{Y}_C = Q_{Y_C} \quad (6-72)$$

$$M\ddot{Z}_C = Q_{Z_C} \quad (6-73)$$

$$J_X\ddot{\gamma} = Q_\gamma \quad (6-74)$$

其中：

$$\begin{aligned} Q_{Y_C} = Q_2 = F_2 + F_4 \frac{-MY(\gamma)}{\sqrt{c^2 - (MY(\gamma))^2}} + F_6 \frac{NY(\gamma)}{\sqrt{c^2 - (NY(\gamma))^2}} + \\ + \frac{k_C\phi_4 + p_C\dot{\phi}_4}{\sqrt{c^2 - (MY(\gamma))^2}} + \frac{k_C\phi_6 + p_C\dot{\phi}_6}{\sqrt{c^2 - (NY(\gamma))^2}} - \frac{p_B(\dot{\gamma} - \dot{\phi}_4)}{\sqrt{c^2 - (MY(\gamma))^2}} - \frac{p_B(\dot{\gamma} - \dot{\phi}_6)}{\sqrt{c^2 - (NY(\gamma))^2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{Z_c} = Q_3 = & -Mg + F_2 \frac{BZ(\gamma)}{\sqrt{c^2 - (BZ(\gamma))^2}} + F_4 + F_6 - \frac{k_c \theta_2 + p_c \dot{\theta}_2}{\sqrt{c^2 - (BZ(\gamma))^2}} + \frac{p_B(\dot{\gamma} - \dot{\theta}_2)}{\sqrt{c^2 - (BZ(\gamma))^2}} \\
 Q_\gamma = Q_4 = & F_2 b \left[\sin \gamma - \frac{\cos \gamma BZ(\gamma)}{\sqrt{c^2 - (BZ(\gamma))^2}} \right] + F_4 \left[m \cos \gamma + h \sin \gamma + \frac{MY(\gamma)(m \sin \gamma - h \cos \gamma)}{\sqrt{c^2 - (MY(\gamma))^2}} \right] + \\
 & F_6 \left[h \sin \gamma - n \cos \gamma - \frac{NY(\gamma)(n \sin \gamma + h \cos \gamma)}{\sqrt{c^2 - (NY(\gamma))^2}} \right] + \frac{(k_c \theta_2 + p_c \dot{\theta}_2) b \cos \gamma}{\sqrt{c^2 - (BZ(\gamma))^2}} - \\
 & \frac{(k_c \phi_4 + p_c \dot{\phi}_4)(m \sin \gamma - h \cos \gamma)}{\sqrt{c^2 - (MY(\gamma))^2}} + \frac{(k_c \phi_6 + p_c \dot{\phi}_6)(n \sin \gamma + h \cos \gamma)}{\sqrt{c^2 - (NY(\gamma))^2}} - \\
 & p_B(\dot{\gamma} - \dot{\theta}_2) \left(1 + \frac{b \cos \gamma}{\sqrt{c^2 - (BZ(\gamma))^2}} \right) - p_B(\dot{\gamma} - \dot{\phi}_4) \left(1 - \frac{m \sin \gamma - h \cos \gamma}{\sqrt{c^2 - (MY(\gamma))^2}} \right) - \\
 & p_B(\dot{\gamma} - \dot{\phi}_6) \left(1 + \frac{n \sin \gamma + h \cos \gamma}{\sqrt{c^2 - (NY(\gamma))^2}} \right)
 \end{aligned}$$

除了铰链的弹力和粘性摩擦力，我们得到在考察平面上用式(6-72)-式(6-74)所表示的简化动力学模型，其中广义力部分为：

$$\begin{aligned}
 M\ddot{Y}_C = Q_{Y_c} = Q_2 = & F_2 + F_4 \frac{-MY(\gamma)}{\sqrt{c^2 - (MY(\gamma))^2}} + F_6 \frac{NY(\gamma)}{\sqrt{c^2 - (NY(\gamma))^2}} \\
 M\ddot{Z}_C = Q_{Z_c} = Q_3 = & -Mg + F_2 \frac{BZ(\gamma)}{\sqrt{c^2 - (BZ(\gamma))^2}} + F_4 + F_6 \\
 J_X \ddot{\gamma} = Q_\gamma = Q_4 = & F_2 b \left[\sin \gamma - \frac{\cos \gamma BZ(\gamma)}{\sqrt{c^2 - (BZ(\gamma))^2}} \right] + F_4 \left[m \cos \gamma + h \sin \gamma + \frac{MY(\gamma)(m \sin \gamma - h \cos \gamma)}{\sqrt{c^2 - (MY(\gamma))^2}} \right] + \\
 & + F_6 \left[h \sin \gamma - n \cos \gamma + \frac{NY(\gamma)(n \sin \gamma + h \cos \gamma)}{\sqrt{c^2 - (NY(\gamma))^2}} \right]
 \end{aligned}$$

6.4.2 应用仿真

6.4.2.1 沿单轴运动

1)只沿着 Y 轴的运动： $Y_C(t) = a_y \sin \omega t, Z_C(t) = Z_C, \gamma = 0$

在此情况下：

$$\begin{aligned}
 \dot{Y}_C(t) = & a_y \omega \cos \omega t, \dot{Z}_C(t) = \ddot{Z}_C(t) = 0, \gamma = 0, \sin \gamma = 0, \cos \gamma = 1, NY(\gamma) = Y_C(t), \\
 MY(\gamma) = & -Y_C(t), BZ(\gamma) = Z_C
 \end{aligned}$$

方程可写为:

$$M\ddot{Y}_C = -Ma_y\omega^2 \sin \omega t = F_2 + F_4 \frac{Y_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Y_C(t))^2}} + F_6 \frac{Y_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Y_C(t))^2}}$$

$$M\ddot{Z}_C + Mg = \frac{Z_C}{\sqrt{c^2 - Z_C^2}} F_2 + F_4 + F_6$$

$$0 = -b \frac{Z_C}{\sqrt{c^2 - Z_C^2}} F_2 + \left(m + \frac{hY_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Y_C(t))^2}} \right) F_4 + \left(-n + \frac{hY_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Y_C(t))^2}} \right) F_6$$

得到系统的线性代数方程 $AX=B$, 其中位置参数 $X=(F_2, F_4, F_6)^T$ 且矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \frac{Y_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Y_C(t))^2}} & \frac{Y_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Y_C(t))^2}} \\ \frac{Z_C}{\sqrt{c^2 - Z_C^2}} & 1 & 1 \\ -b \frac{Z_C}{\sqrt{c^2 - Z_C^2}} & m + \frac{Y_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Y_C(t))^2}} & -n + \frac{Y_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Y_C(t))^2}} \end{pmatrix}$$

在这样的运动下逆运动学求解为:

$$\Delta l_1 = c - \sqrt{c^2 - (Y_C(t))^2 - Z_C^2} \quad (6-75)$$

$$\Delta l_2 = Y_C(t) + c - \sqrt{c^2 - Z_C^2} \quad (6-76)$$

$$\Delta l_3 = Y_C(t) + c - \sqrt{c^2 - Z_C^2} \quad (6-77)$$

$$\Delta l_4 = Z_C + c - \sqrt{c^2 - (Y_C(t))^2} \quad (6-78)$$

$$\Delta l_5 = Z_C + c - \sqrt{c^2 - (Y_C(t))^2} \quad (6-79)$$

$$\Delta l_6 = Z_C + c - \sqrt{c^2 - (Y_C(t))^2} \quad (6-80)$$

2)只沿着 Z 轴的运动: $Y_C(t) = Y_C, Z_C(t) = a_z \cos \omega t, \gamma = 0$

在此情况下:

$$Y_C(t) = Y_C, \dot{Y}_C(t) = 0, \dot{Z}_C(t) = -a_z \omega \sin \omega t, \ddot{Z}_C(t) = -a_z \omega^2 \cos \omega t, \gamma = 0, \\ \sin \gamma = 0, \cos \gamma = 1, NY(\gamma) = Y_C, MY(\gamma) = -Y_C, BZ(\gamma) = Z_C(t).$$

方程形式为:

$$\dot{Y}_C = 0$$

$$\dot{Z}_C = -a_z \omega \sin \omega t$$

$$\dot{\gamma} = 0$$

$$M\ddot{Y}_C = 0 = F_2 + F_4 \frac{Y_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} + F_6 \frac{Y_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}}$$

$$M\ddot{Z}_C = Mg - Ma_z \omega^2 \cos \omega t = \frac{Z_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Z_C(t))^2}} F_2 + F_4 + F_6$$

$$J_X \ddot{\gamma} = 0 = -b \frac{Z_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Z_C(t))^2}} F_2 + \left(m - \frac{hY_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} \right) F_4 + \left(-n + \frac{hY_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} \right) F_6$$

得到系统的线性代数方程 $AX=B$ ，其中位置参数 $X=(F_2, F_4, F_6)^T$ 且矩阵：

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \frac{Y_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} & \frac{Y_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} \\ \frac{Z_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Z_C(t))^2}} & 1 & 1 \\ -b \frac{Z_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Z_C(t))^2}} & m - \frac{hY_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} & -n + \frac{hY_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} \end{pmatrix}$$

根据测定的平台的相应参数，以 a) 为例对平台进行运动学和动力学模型仿真。参数如下： $a=0.318$ ， $b=0.35m$ ， $c=0.3m$ ， $h=0.02m$ ， $a=0.38m$ ， $m=0.129m$ ， $n=0.241m$ ， $M=4kg$ 。

取 $a_y=2$ ， $\omega=1$ ，设计非线性控制器，经仿真检测系统的轨迹跟踪能力^[134,135]，图 6-7 到图 6-9 分别为控制变量 Y_C ， Z_C 和 γ_C 与期望信号 Y_{Cd} ， Z_{Cd} 和 γ_{Cd} 的轨迹跟踪仿真图。

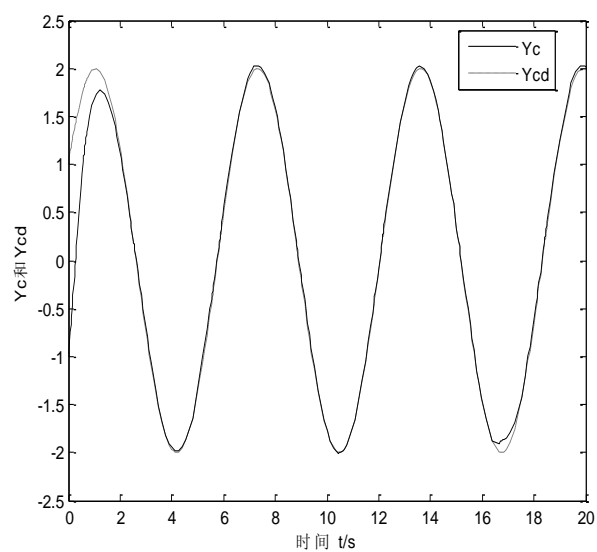


图 6-7 控制变量 Y_C 坐标轨迹跟踪仿真图

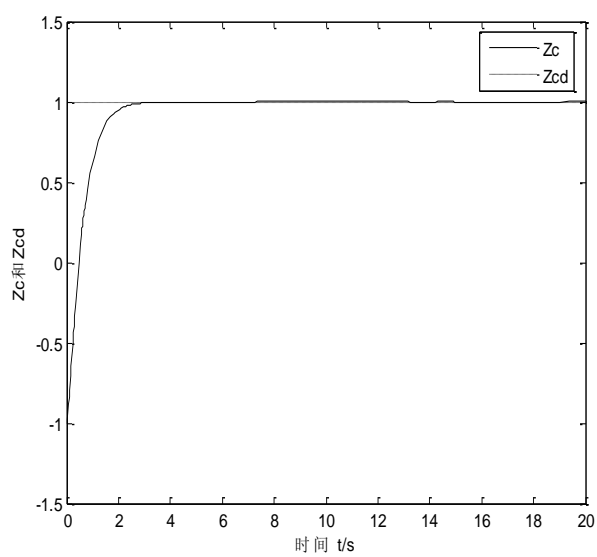
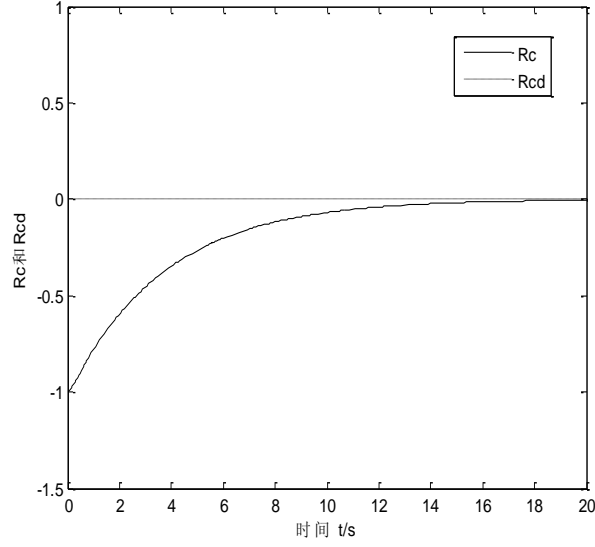


图 6-8 控制变量 Z_C 坐标轨迹跟踪仿真图


 图 6-9 控制变量 γ_C 坐标轨迹跟踪仿真图

6.4.2.2 沿 YZ 平面运动

沿 YZ 轴进行正弦和余弦曲线运动：

$$Y_C(t) = a_y \sin \omega t, Z_C(t) = a_z \cos \omega t, \gamma = 0$$

$$\dot{Y}_C(t) = a_y \omega \cos \omega t, \dot{Z}_C(t) = -a_z \omega \sin \omega t, \ddot{Y}_C(t) = -a_y \omega^2 \sin \omega t, \ddot{Z}_C(t) = -a_z \omega^2 \cos \omega t$$

$$\gamma = 0, \sin \gamma = 0, \cos \gamma = 1, NY(\gamma) = Y_C, MY(\gamma) = -Y_C, BZ(\gamma) = Z_C$$

方程形式为：

$$M\ddot{Y}_C = -Ma_y \omega^2 \sin \omega t = F_2 + F_4 \frac{Y_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} + F_6 \frac{Y_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}}$$

$$M\ddot{Z}_C = Mg - Ma_z \omega^2 \cos \omega t = \frac{Z_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Z_C(t))^2}} F_2 + F_4 + F_6$$

$$J_X \ddot{\gamma} = 0 = -b \frac{Z_C(t)}{\sqrt{c^2 - (Z_C(t))^2}} F_2 + \left(m - \frac{hY_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} \right) F_4 + \left(n - \frac{hY_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} \right) F_6$$

得到系统矩阵的线性代数方程：

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \frac{Y_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} & \frac{Y_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} \\ \frac{Z_C}{\sqrt{c^2 - Z_C^2}} & 1 & 1 \\ -b \frac{Z_C(t)}{\sqrt{c^2 - Z_C^2}} & m - \frac{hY_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} & -n + \frac{hY_C}{\sqrt{c^2 - Y_C^2}} \end{pmatrix}$$

令 $a_y = 2$, $a_z = 1$, $\omega = 1$, 则平台在 YZ 平面做一轨迹方程为 $Y_{Cd}^2/4 + Z_{Cd}^2 = 1$ 的椭圆运动。

设定运动平台质心初始位置为 $(-1, -1, -1)$, 即实际起始位置与理论位置不重合, 设计非线性控制器, 检测系统的轨迹跟踪能力^[136]。图 6-10 到图 6-12 分别为控制变量 Y_C, Z_C 和 γ_C 与期望信号 Y_{Cd}, Z_{Cd} 和 γ_{Cd} 的轨迹跟踪仿真图。

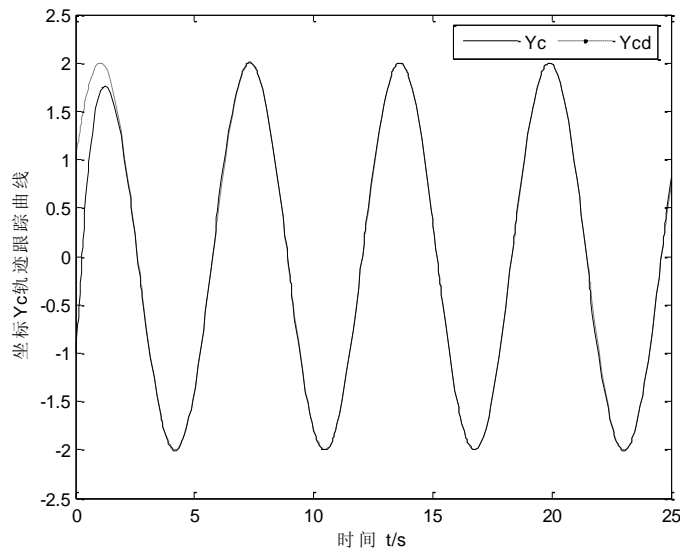
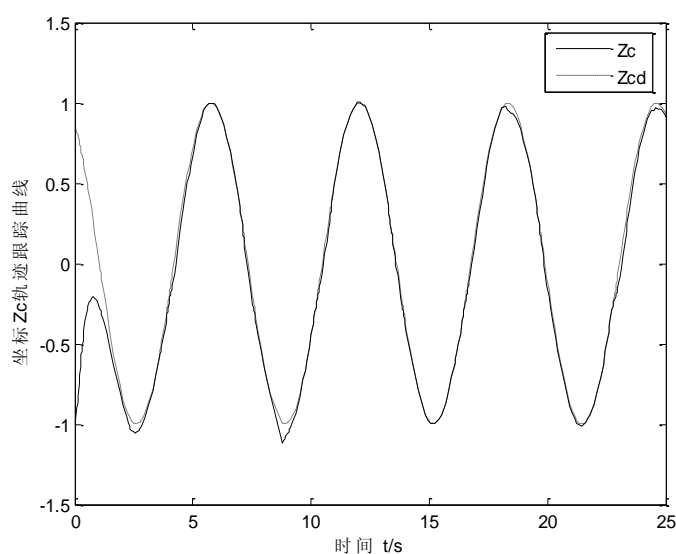
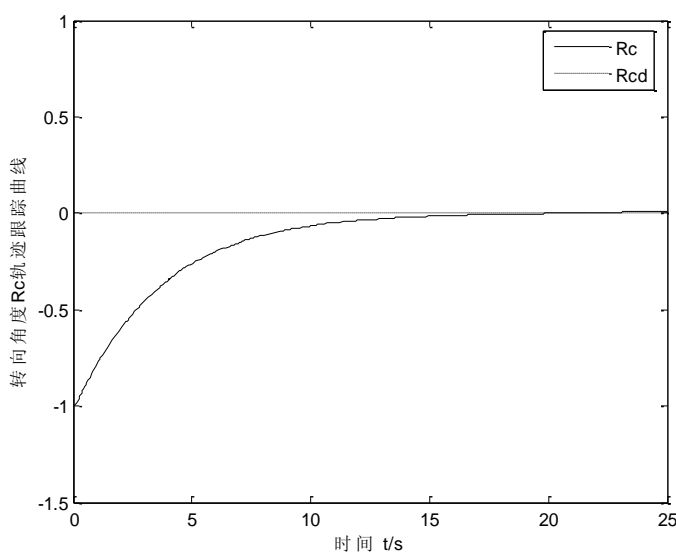


图 6-10 控制变量 Y_C 轨迹跟踪仿真图

图 6-11 控制变量 Z_c 轨迹跟踪仿真图图 6-12 控制变量 γ_c 轨迹跟踪仿真图

6.5 小结

本章分析了新型 PSS 6-DOF 正交并联机器人运动平台的运动学特性，以此为基础，使用拉格朗日方法建立了并联机构的动力学模型。然后针对模型在实际控制中的应用进行了简化处理，设计了非线性控制器对仿生机器马的轨迹跟踪进行控制，并辅以仿真试验，从仿真结果可以看出，文中对平台设计的控制方法，可以使得机器人准确实现对时变理论轨迹的跟踪。文章中所建立的并联机构动力学模型是仿生机器马驱动系统和控制

系统设计的基础，也是机构动力学性能评价、动力学优化设计及实时控制的必要条件。上面平台的运动控制及仿真可以证明此动力学模型的正确性。

根据本章给出的动力学模型，在上述章节得到实时性很高的精确碰撞检测的基础上，可完成虚拟现实环境对运动平台的实时反馈控制，在增强运动者视觉效果的同时，增强交互的沉浸感。

第 7 章 结束语

本文从提高大规模复杂场景下分布式虚拟现实交互控制的视觉沉浸感这一重要问题出发,首先从系统结构方面提出了混合 P2P 模式的系统架构,以提高数据传输实时性和智能性;从观察系统以及视觉真实性方面提出了分布式场景的主从渲染策略和一致性算法;通过分析动态的交互控制实时性对于视觉沉浸感的影响,提出了灵活的碰撞检测算法;进而通过对于运动平台的动力学分析,保证了碰撞反馈的实时性,从视觉和感觉方面显著增强了参与者的身临其境的效果。本文的研究成果为多人协作的复杂虚拟现实系统的进一步理论研究和应用奠定了基础。

7.1 主要工作与创新点

本文针对影响分布式虚拟现实系统智能交互控制视觉沉浸感的关键技术问题展开研究,主要工作和创新如下:

(1)在分布式虚拟现实场景一致性对于视觉沉浸感的影响方面

提出并实现了新型混合 P2P 结构的分布式虚拟现实系统框架。完成了以网络服务器为中心的集中式 P2P 网络结构设计;根据渲染场景的不同将渲染节点分群,完成了结构化分布式 P2P 网络的群结构设计;根据渲染节点对应的控制平台的不同将渲染节点分组,完成了集中式 P2P 网络的组结构设计。进而设计并实现了网络服务平台、控制平台以及渲染节点这三类网络节点的主要功能。本文所设计的系统结构提高了信息的传输速度,减少了视觉的延迟,增强了虚拟现实的视觉沉浸感。

对于同组节点提出并实现了主从渲染策略和缓存策略以满足同一场景分块渲染的视觉一致性;对于同群节点采用了场景角色和动态实体属性的一致性控制策略、设计了预测算法以满足多个用户之间的动态协同一致性,从而保证了用户视觉效果的一致性。

(2)在分布式虚拟现实与用户的交互控制对于视觉沉浸感的影响方面

提出并实现了基于光线投射的蜂窝状空间分解碰撞检测算法。将碰撞检测转化为判断在下一帧中多面体蜂窝子空间内局部子多面体截面到对方阈值线的距离值与对方所设定阈值的大小的关系问题,从而完成任意多面体间的精细检测,实验结果证明该算法提高了碰撞检测的速度,增强了视觉的冲击力。

提出并实现了基于基准点的智能碰撞检测算法,通过设计扫描线求交和扫描分割量,利用均匀分布的模型表面基准点代替模型顶点,该算法可根据精度要求调整扫描分割量,具有高度的智能性。进而设计“穿针引线”法剖分空间多边形,从而将模型间的碰撞检测转化为基本几何特征对之间的碰撞检测。该算法适用于精确、实时的交互控制系统,进一步提高了视觉效果的真实性和交互性。

建立了新型 6-DOF 并联机器人运动平台的动力学模型。针对其结构特点求解系统的逆动力学问题,建立 6-DOF 并联机构的运动方程,并基于拉格朗日法建立动力学方程,进而针对模型在实际控制中的应用进行了简化处理。利用此模型完成与虚拟现实的反馈控制,将进一步从视觉和感觉上提高用户的沉浸感。

本文的研究成果已成功应用于多通道分布式虚拟漫游交互控制系统的设计中,构建了以河北大学校园为背景的虚拟场景,完成了多个渲染节点的协同渲染以及运动平台对虚拟环境的实时控制,达到了视觉沉浸感的应用效果。同时,本文的研究成果还应用于虚拟校园系统当中,向外界展现了河北大学的校园风光。

7.2 研究成果的应用前景展望

我国对虚拟现实技术的研究起步很晚,自 20 世纪 90 年代初发展到现在已取得了初步的成果,此技术已经引起政府相关部门和科学家们的高度重视。国内对于虚拟现实的研究大多集中在场景的渲染方面,对于能够支持与机器智能人交互且多人参与的分布式系统研究较少。与发达国家相比,我国在该领域的研究还有一定的差距,应用于工程实际的分布式虚拟现实系统尚不多。

本文的研究成果可直接应用于健身保健系统的研究和开发中。目前,世界上 50% 的人口居住在城市,随着社会竞争日益激烈,人们的生活和工作节奏越来越快,工作压力越来越大,亚健康人群日益增加,为了调节生活节奏、放松紧张情绪、恢复精力和增强体质,越来越多的人选择进行健身运动,但城市的密集环境又使运动种类单一,本系统可以提供交互娱乐的多人协作保健运动,通过调整虚拟场景以及运动平台的运动姿态,可以达到医疗康复的效果。

本研究成果还可应用于多种虚拟现实系统当中,例如:虚拟驾驶、虚拟手术训练、虚拟试验操作等,为虚拟现实技术提供更先进的理论和技术支持,拓展更大的应用空间。

7.3 研究中存在的问题及下一步工作设想

虽然本文在提高虚拟现实系统的视觉沉浸感方面取得了一定的研究成果，但是还有很多工作需要做进一步的研究。

在一致性控制方面，随着虚拟现实的规模越来越大，用户越来越多，信息的安全性是我们今后研究的重点课题。P2P 系统中节点是相对独立的，用户状态可以根据各自的计算结果来更新，从而使系统的安全受到更大威胁，为了保证系统的安全性，需要进一步设计并实现能够防止欺骗行为的同步方案。

在交互控制方面，本文完成了对于运动平台动力学的分析以及运动平台对于虚拟场景的正向运动控制，例如：速度、方向、加速度和摩擦的控制，但针对场景对运动平台的反馈控制研究较少。为达到真实的效果，需要进一步根据运动平台的动力学模型并完善反馈控制算法，最终实现运动平台和虚拟环境的双向实时交互控制。

参考文献

- [1] 申蔚, 曾文琪. 虚拟现实技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [2] 汪成为, 高文, 王行仁. 灵境(虚拟现实)技术的理论、实现及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [3] C. Bouras, T. Tsiatsos. Distributed virtual reality: building a multi-user layer for the EVE platform [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2004, 27(2): 91-111.
- [4] 巫影. 虚拟现实技术综述 [J]. 计算机与数字工程, 2002, 30(3): 41-44.
- [5] C. Wayne. A critical history of computer graphics and animation [DB/OL]. November, 2003, <http://accad.osu.edu/~waynec/history/lesson2.html>,
<http://accad.osu.edu/~waynec/history/lesson13.html>.
- [6] 邹湘军, 孙健. 虚拟现实技术的演变发展与展望 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1905-1909.
- [7] 曾建超. 虚拟现实的技术及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [8] I. Wald, T. Lze, A. Kensler. Ray tracing animated scenes using coherent grid traversal [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 485-493.
- [9] 黄沛杰, 王文成. 基于中介面加快光线跟踪计算 [J]. 计算机学报, 2007, 30(2): 262-271.
- [10] 苗兰芳, 黄劲, 郑文庭, 等. 点模型的局部几何重建和光线跟踪 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(6): 805-821.
- [11] W. J. Li, C. C. Chang, K. Y. Hsu, *et al.* A PC-based distributed multiple display virtual reality system [J]. Displays, 2001, 22(5): 177-181.
- [12] 刘晓建. 大规模分布式仿真信息传输延迟技术研究 [D]. 博士学位论文, 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [13] P. Jiménez, F. Thomas, C. Torras. 3D collision detection: a survey [J]. Computers & Graphics, 2001, 25(2): 269-285.
- [14] 张茂军. 虚拟现实系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [15] S. Snowden, C. Greenhalgh. A review of distributed architecture for networked VR [J]. VR: research, development and application, 1996, 2(1): 155-175.
- [16] 潘志庚, 姜晓红, 张明敏, 等. 分布式虚拟环境综述 [J]. 软件学报, 2000, 11(4): 461-467.

- [17] 杨宝民, 朱一宁. 分布式虚拟现实技术及其应用 [M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [18] J. Nomura, K. Sawada. Virtual reality technology and its industrial applications [J]. Control Engineering Practice, 1999, 7 (11): 1381-1394.
- [19] C. Alan, R. S. William, D. W. Jeffrey. Developing virtual reality applications: foundations of effective design [M]. Morgan Kaufmann Publishers, 2009.
- [20] B. Matthias, M. Sebastian, P. Sebastian. A comparative study of pub/sub methods in structured P2P networks [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 41(25): 385-396.
- [21] H. X. Ma, T. Risch. A database approach for information communication in a peer-to-peer collaborative CAD environment [J]. Software-Practice & Experience, 2007, 37(11): 1193-2132.
- [22] 陈万寿. 对等网络(P2P) [M]. 北京:人民邮电出版社, 2007.
- [23] S. P. Zhou, W. T. Cai, B. S. Lee. Time-space consistency in large-scale distributed virtual environments [J]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. 2004, 14(1): 31-47.
- [24] 彭宇行, 张拥军, 李思昆. 分布式虚拟环境的时空一致性研究 [J]. 电子学报, 2005, 33(2): 313-316.
- [25] H. S. Son. Semantic information and consistency in distributed realtime systems [J]. Information and Software Technology, 1988, 30(7): 443-449.
- [26] 秦啸. 分布式交互系统中连续媒体的延迟一致性模型(英文) [J]. 软件学报, 2002, 13(6): 1029-1039.
- [27] Y. Kawahara, T. Aoyama, H. Morikawa. A peer-to-peer message exchange scheme for large scale networked virtual environments [J]. Telecommunication systems, 2004, 25(3): 353-370.
- [28] J. M. Duncan, F. Joe. The need for real time consistency management in P2P mobile gaming environments [C]. Proceedings of the 2004 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology, Singapore, 2004, 203-211.
- [29] 王志强, 洪嘉振, 杨辉. 碰撞检测问题研究综述 [J]. 软件学报, 1999, 10(5): 545-551.
- [30] A. Garica-Alonso, N. Serrano. Solving the collision detection problem [J]. IEEE Computer Graphics and Application, 1994, 13(3): 36-43.
- [31] 金汉均. 虚拟环境中物体碰撞检测算法研究 [D]. 博士学位论文, 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [32] B. G. Vanden. Efficient collision detection of complex deformable models using AABB trees [J].

- Journal of Graphics Tools, 1999, 4(2): 1-13.
- [33] J. W. Chang, W. P. Wang, M. S. Kim. Efficient collision detection using a dual OBB-sphere bounding volume hierarchy [J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(1): 50-57.
- [34] G. Bradshaw, C. Sullivan. Adaptive medial-axis approximation for sphere-tree construction [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23 (1): 1-26.
- [35] T. K. James, H. Martin, S. B. Joseph, *et al.* Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-DOPs [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1998, 4(1): 21-36.
- [36] 魏迎梅, 吴泉涌, 石教英. 碰撞检测中的固定方向凸包包围盒的研究 [J]. 软件学报, 2001, 12(7): 1056-1063.
- [37] H. Noborio, S. Fukudaands, S. Arimoto. Fast Interference check method using octree representation [J]. Advanced Robotics, 1989, 3(3): 193-212.
- [38] S. Ar, B. Chazelle, A. Tal. Self-customized BSP trees for collision detection. [J]. Computational Geometry: Theory and Applications, 2000, 15(1-3): 91-102.
- [39] J. L. Bentley. Multidimensional binary search trees used for associative searching [J]. ACM Communications, 1975, 18(9): 509-517.
- [40] B. Naylor, J. Amanatides, W. Thibault. Merging BSP trees yields polyhedral set operations [C]. International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Dallas, 1990, 115-124.
- [41] W. Thibault, B. Naylor. Set operations on polyhedra using binary space partitioning trees [J]. ACM Computer Graphics, 1987, 21(4): 153-162.
- [42] T. Victor, F. Marta. Enhancing collaboration in virtual reality applications [J]. Computers & Graphics, 2005, 29(5): 704-718.
- [43] E. J. Lee, S. El-tawil. FEMvrml: an interactive virtual environment for visualization of finite element simulation results [J]. Advances in Engineering Software, 2008, 39(9): 737-743.
- [44] T. Monahan, G. Mcardle, B. Michela. Virtual reality for collaborative e-learning [J]. Computers & Education, 2008, 50(4): 1339-1353.
- [45] J. Bush. Viability of virtual reality exposure therapy as a treatment alternative [J]. Computers in Human Behavior, 2008, 24(3): 1032-1040.

- [46] F. Semeraro, M. Bergamasco, A. Frisoli, *et al.* Virtual reality prototype in healthcare simulation training [J]. *Resuscitation*, 2008, 77(1): S60-S61.
- [47] G. Romero, J. Maroto, J. Félez. Virtual reality applied to a full simulator of electrical sub-stations [J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(3): 409-417.
- [48] 蔡自兴. 机器人学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [49] 孙迪生, 王炎. 机器人控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [50] 金振林. 新型六自由度正交并联机器人设计理论与应用技术研究 [D]. 博士学位论文, 秦皇岛: 燕山大学, 2002.
- [51] 段作义, 吴威, 赵沁平. 基于构件的分布式虚拟现实应用系统 [J]. *软件学报*, 2006, 17(3): 546-558.
- [52] M. K. Park, M. C. Lee. Development of the PNU vehicle driving simulator and its performance evaluation [J]. *Robotics and Automation*, 2001, 3:2325-2330.
- [53] M. O. Alhalabi, S. Horiguehi, S. Kunifuji. An experimental study on the effects of network delay in cooperative shared haptic virtual environment [J]. *Computers & Graphics*, 2003, 27:205-213.
- [54] P. J. Mark. Networking for distributed virtual simulation [J]. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1994, 27(3):387-394.
- [55] D. McGregor, A. KaPolka, M. Zyda, *et al.* Requirements for large-scale networked virtual environments [C]. *International Conference on Control*, 2003: 353-358.
- [56] 高大鹏, 敬万钧, 禹正扬. 一种分布式虚拟现实软件平台的设计与实现 [J]. *计算机工程*, 2006, 24(6): 72-74.
- [57] 吴春江. 分布式 P2P 仿真技术研究 with 实现 [D]. 硕士学位论文, 成都: 电子科技大学, 2008.
- [58] 张翔. 面向复杂场景的虚拟现实关键技术研究 [D]. 硕士学位论文, 成都: 电子科技大学, 2004.
- [59] 于海凤, 邢桂芬, 张凯. 虚拟现实技术在视景仿真系统中的应用 [J]. *计算机工程与设计*, 2006, 27(6): 1108-1110.
- [60] 刘姗姗. 基于 P2P 的大规模分布式虚拟现实系统设计中若干问题的研究 [D]. 博士学位论文, 合肥: 中国科技大学, 2008.
- [61] R. M. Luis, F. A. Antonio, L. Luis, *et al.* Self-managed topologies in P2P networks [J]. *Computer*

- Networks, 2009, 53(10): 1722-1736.
- [62] Y. Yang, J. D. Song. Research of P2P overlay in heteromorous network [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications. 2008, 15(1): 24-30.
- [63] 詹晓强, 胡德敏. 基于 P2P 系统的动态负载均衡算法 [J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(1): 58-60.
- [64] J. M. Pullen. The network workbench: network simulation software for academic investigation of Internet concepts [J]. Computer Networks, 2000, 32(3): 365-378.
- [65] W. S. Shi, Y. G. Mao. Performance evaluation of peer-to-peer web caching systems [J]. Journal of Systems and Software. 2006, 79(5): 714-726.
- [66] H. R. Tian, S. H. Zou, W. D. Wang, *et al.* Constructing efficient peer-to-peer overlay topologies by adaptive connection establishment [J]. Computer Communications, 2006, 29(17): 3567-3579.
- [67] 陈仕权, 熊选东, 郑军辉. 一种树形结构信息的 P2P 存储服务模型 [J]. 微计算机信息, 2006, 22(36): 260-262.
- [68] 何统洲, 毛峰. 基于 P2P 计算的动态多副本开销模型 [J]. 计算机工程与应用, 2006, 45 (26): 143-146.
- [69] M. Torpey, D. Wilbert, B. Helfinstine, *et al.* Experiences and lessons learned using RTI-NG in a large-scale, platform-level federation [C]. Proceedings of the Spring Simulation Interoperability Workshop, Orlando, 2001.
- [70] 王菁. P2P 系统中资源管理机制的研究 [D]. 博士学位论文, 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- [71] S. Bryson. Virtual reality in scientific visualization [J]. Computers & Graphics, 1993, 17(6): 679-685.
- [72] M. Lozano, P. Morillo, J. M. Orduña, *et al.* A new system architecture for crowd simulation [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2009, 32(2): 474-482.
- [73] 符云清, 全文君. 协同虚拟环境中的并发控制机制 [J]. 计算机工程, 2009, 19(4): 51-55.
- [74] 陈红. 协同虚拟环境的一致性控制研究 [D]. 硕士学位论文, 杭州: 浙江大学, 2005.
- [75] 周绥平, 陈宗基. 分布交互仿真的时空一致性 [J]. 系统仿真学报, 1996, 8(3): 6-13.
- [76] P. Morillo, S. Rueda, J. M. Orduna, *et al.* A latency-aware partitioning method for distributed virtual environment systems [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(9):

1215-1226.

- [77] X. R. Hu, M. Hua. Role-based concurrency control policy in CSCW [J]. Journal of Computer Era, 2004, 10(3): 30-32.
- [78] 宋渝. 协同虚拟环境的研究和设计 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [79] 余春艳, 庄越挺, 潘云鹤. 基于角色的协同虚拟环境并发控制投机策略 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(6): 658-664.
- [80] Q. P. Lin, C. P. Low. Multiuser collaborative work in virtual environment based CASE tool [J]. Journal of Information and Software Technology, 2003, 45(5): 253-267.
- [81] T. Yonekura, Y. Kawano, D. Hanawa. Peer-to-peer networked field-type virtual environment by using AtoZ [C]. IEEE Proceedings 2004 International Conference on Cyberworlds, Tokyo, 2004, 241-248.
- [82] P. Jimenez, F. Thomas, C. Torras. 3D collision detection: a survey [J]. Computers and Graphics, 2001, 25(2): 269-285.
- [83] B. Heidelberger, M. Teschner, M. Gross. Real-time volumetric intersections of deforming objects [C]. Proceedings of the Vision, Modeling and Visualization, 2003, 461-468.
- [84] S. Krishnan, D. Manocha. An efficient surface intersection algorithm based on the lower dimensional formulation [J]. ACM Transactions on Graphics, 1997, 16(1): 74-106.
- [85] D. B. Gvan. Efficient collision detection of complex deformable models using AABB trees [J]. Journal of Graphics Tools, 1997, 2(4): 1-13.
- [86] S. Gottschalk, M. Lin, D. Manocha. OBB tree: a hierarchical structure for rapid interference detection [C]. Proceedings of the 23rd annual conference on computer graphics and interactive techniques, Siggraph, 1996, 171-180.
- [87] J. T. Klosowski, M. Held, J. S. B. Mitchell, *et al.* Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of K-DOPs [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1998, 4 (1): 21-36.
- [88] D. Ayala, P. Brunet, R. Juan, *et al.* Object representation by means of nonminimal division quadrees and octrees [J]. ACM Transactions on Graphics, 1985, 4(1): 41-59.
- [89] C. Ericson. BSP tree hierarchies [J]. Real-Time Collision Detection, 2005, 349-382.
- [90] D. Knott, D. K. Pai. CInDeR: collision and interference detection in real-time using graphics

- hardware [C]. Proceedings of the Graphics Interface, Halifax, 2003, 73-80.
- [91] M. Shinya, M. Forgue. Interference detection through rasterization [J]. The Journal of Visualization and Computer Animation, 1991, 4 (2): 132-134.
- [92] J. Rossignac, A. Megahed, B.O. Schneider. Interactive inspection of solids: cross-section and interferences [C]. Proceedings of the 19th annual conference on computer graphics and interactive techniques, Siggraph, 1992, 353-360.
- [93] N. K. Govindaraju, S. Redon, M. Lin, *et al.* Cullide: interactive collision detection between complex models in large environments using graphics hardware [C]. Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Euro graphics Workshop on Graphics Hardware, Saarbrücken, 2003, 25-32.
- [94] G. Baciú, W. Wong, H. Sun. Rendering in object interference detection on conventional graphics workstations [C]. Proceedings of the Pacific Graphics, Korea, 1997, 51-58.
- [95] G. Baciú, W. S. K. Wong, H. Sun. Recoed: an image-based collision detection algorithm [J]. Journal of Visualization and Computer Animation, 1999, 10(4): 181-192.
- [96] 范昭炜, 万华根, 高曙明. 基于图像的快速碰撞检测算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(9): 805-810.
- [97] 宋永军, 苏鸿根. 一种基于图像的刚体碰撞检测 [J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(5): 82-84.
- [98] 王季, 翟正军, 蔡小斌. 基于深度纹理的实时碰撞检测算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(1): 59-63.
- [99] 徐芝琦, 陈志杨, 叶修梓, 等. 基于扫描跟踪元的快速碰撞检测 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(11): 1417-1424.
- [100] Y. J. Kim, M. C. Lin, D. Manocha. Fast penetration depth estimation between polyhedral models using hierarchical refinement [C]. International Workshop on Foundations of Robotics, 2002, 12.
- [101] 胡艳, 陈蒙蒙. 一种基于等距线的碰撞检测算法 [J]. 电子科技, 2009, 22(3): 44-47.
- [102] P. Harish, K. K. George, C. Roberto. Efficient algorithm to detect collision between deformable B-spline surfaces for virtual sculpting [J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(10-11): 1055-1066.
- [103] F. M. Gong, B. Gao, Q. L. Niu, *et al.* An algorithm of rapid collision detection based on feature points [J]. Journal of Engineering Graphics, 2008, 29(6): 75-79.
- [104] Y. Kang, Y. S. Xiong, K. Tan, *et al.* A collision detection algorithm based on local scene pruning

- with moving object [J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(11): 214-217.
- [105] X. D. Chen, G. Xu, J. H. Yong, *et al.* Computing the minimum distance between a point and a clamped B-spline surface [J]. *Graphical Models*, 2009, 71(3): 107-112.
- [106] 韩晓霞, 万华根, 周智华. 高度复杂拟凸体的实时触觉绘制 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2009, 21(1): 60-66.
- [107] M. C. Lin, J. F. Canny. A fast algorithm for incremental distance calculation [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, 1991, 1008-1014.
- [108] E. G. Gilbert, D. W. Johnson, S. S. Keerthi. A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1988, 4 (2): 193-203.
- [109] D. Cohenor, A. Solomovic, D. Levin. Three-dimensional distance field metamorphosis [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1998, 17(2): 116-141.
- [110] 金汉均, 李朝晖, 王彦林, 等. 碰撞检测中计算两凸多面体间最短距离的算法研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2006, 30(2): 300-306.
- [111] Q. P. Ha, Q. H. Nguyen, D. C. Rye, *et al.* Fuzzy sliding-mode controllers with applications [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, 48 (1): 38-46.
- [112] C. I. Byrnes, A. Isidori, J. C. Willems. Passivity, feedback equivalence, and the global stabilization of minimum phase nonlinear systems [J]. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 1991, 36: 1228-1240.
- [113] M. Roopaei, J. M. Zolghadri. Chattering-free fuzzy sliding mode control in MIMO uncertain systems [J]. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 2009, 71(10): 4430-4437.
- [114] J. Y. Chen. Expert SMC-based fuzzy control with genetic algorithms [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 1999, 336(4): 589-610.
- [115] S. Staicua, D. Zhang. A novel dynamic modeling approach for parallel mechanisms analysis [D]. Bucharest: Politehnica University, 2006.
- [116] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [117] 申铁龙. 机器人鲁棒控制基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [118] 王常武, 孔令富, 韩佩富, 等. 改进的 6-DOF 并联机器人 Lagrange 动力学模型及其并行处

- 理 [J]. 计算机工程与应用, 2000, (3): 78-79.
- [119] 霍伟. 机器人动力学与控制 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [120] 傅绍文, 姚郁, 王晓晨. 电动 Stewart 仿真平台动力学建模与惯性参数辨识 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(9): 1909-1921.
- [121] 罗磊, 莫锦秋, 王石刚. 并联机构动力学建模和控制方法分析 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(1): 75-78.
- [122] 韩佩富, 王常武, 孔令富. 改进的 6-DOF 并联机器人 Newton-Euler 动力学模型 [J]. 机器人, 2000, 22(4): 315-318.
- [123] 胡福生, 郝秀清, 陈建涛. 3PSS 并联机构的运动学分析 [J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2006, 20(1): 43-46.
- [124] 黄田, 倪雁冰, 王洋. 32HSS 并联机床运动学设计 [J]. 制造技术与机床, 2000, (3): 10-12.
- [125] J. S. Zhao, K. Zhou, Z. J. Feng. A theory of degrees of freedom for mechanisms [J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(6): 621-643.
- [126] P. Renaud, A. Vivas, N. Andreff, *et al.* Kinematic and dynamic identification of parallel mechanisms [J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(9): 1099-1109.
- [127] 刘极峰, 易际明. 机器人技术基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [128] A. Marc, M. G. Clément. Kinematic, static and dynamic analysis of a planar 2-DOF tensegrity mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(9): 1072-1089.
- [129] G. Thomas, M. John. Inverse dynamic analysis of parallel manipulators with full mobility [J]. Mechanism and Machine Theory, 2003, 38(6): 549-562.
- [130] P. L. Yen, C. C. Lai. Dynamic modeling and control of a 3-DOF cartesian parallel manipulator [J]. Mechatronics, 2009, 19(3): 390-398.
- [131] H. R. Wang, F. Gao, Z. Huang. Design of 6-axis force/torque sensor based on stewart platform related to isotropy [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1998, 11(3): 217-222.
- [132] B. Dasgupta, T. S. Mruthyunjaya. The stewart platform manipulator: a review [J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(1): 15-40.
- [133] C. C. Cheah, S. Kawamura, S. Arimoto, K. Lee. PID control of robotic manipulator with uncertain jacobian matrix [C]. Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation,

Detroit, 1999, 494-499.

[134] 蒙以正. MATLAB 5.X 应用与技巧 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[135] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[136] J. B. Anton, R. Lynda, M. Benno. A method for inverse dynamic analysis using accelerometry [J].
Journal of Biomechanics, 1996, 29(7): 949-954.

致 谢

值此论文完成之际，谨向给予我指导、关心和支持各位老师、领导、同学和亲友们致以衷心的感谢！

首先，衷心感谢我的导师王洪瑞教授和李晓苇教授对我的悉心培养！本论文从选题、设计、研究直到撰写的各个阶段，都是在导师们的亲自指导下完成的，每一点进展和成绩都凝聚着导师们的心血。两位导师深厚的学术功底，清晰的思路、丰富的经验、深厚的学术修养和永无止境的探索精神让人折服，严谨的工作态度和敏锐的科学洞察力使我受益良多。仅将此论文献给尊敬的导师，是他们指引我走进科学殿堂，我会把追求科学精神作为终生奋斗目标。导师和师母对我生活上的关心、照顾和帮助丝毫不逊于学术上的指引，这些我也将牢记在心！

感谢物理学院张连水教授、傅广生教授给我的指导和大力支持！感谢电信学院领导以及同事们在我读研期间给与的大力帮助！感谢课题组的肖金壮老师、高征老师、王立玲老师在科研上的协作！感谢俄罗斯喀山国立科技大学杰科嘉列夫教授等专家在并联运动平台参数获取和运动学、动力学建模中的合作与指导！感谢燕山大学宋维公教授和王洪斌教授在论文撰写过程中的指导！

课题组的硕士研究生杜欢平、刘京、王清泉分别参与了本论文的第二和三、第四和五、以及第六章的研究工作，在此对他们的协作和帮助表示感谢！同时，感谢博士研究生董斌同学以及硕士研究生杨国杰、梁铁、刘聿铭、陈伟磊、李丽、王东雨等多位同学的配合和支持！

同时，向对论文进行评审并提出宝贵意见和建议的各位专家表示深深的谢意！

本论文得到了科技部国际科技合作项目(编号:2008DFR10530)和河北省科学技术厅科技支撑计划(编号:08393534D、08243531D)的资助，特此致谢！

感谢父母的养育之恩，感谢家人对我学业的大力支持，是他们无私的爱和关怀使我得以全身心地投入到学习和工作中。

最后，我要特别感谢我的爱人白国义先生，是你无私的奉献让我顺利地完成了学业！你和女儿对我的理解、关爱是我克服困难的强大动力！

攻读学位期间取得的科研成果

一、攻读博士学位期间公开发表的学术论文

1. 刘秀玲, 杨国杰, 王洪瑞, 杜欢平, 郭磊. 动态生理信息融合在人体健康评价系统的应用. 计算机工程与应用, 2010, 46(16): 226-228. (二类, 与第 1 章相关)
2. 刘秀玲, 杜欢平, 杨国杰, 王洪瑞. 分布式多交互虚拟场景渲染的协同控制. 计算机工程与应用, 2009, 45(29): 78-81. (二类, 与第 3 章相关)
3. **Xiuling Liu**, Huanping Du, Hongrui Wang. Design and Development of a Distributed Virtual Reality System. Proceedings of the Eighth International Conference On Machine Learning and Cybernetics, 2009, 2: 889-893. (EI, 与第 2 章相关)
4. **Xiuling Liu**, Tie Liang, Hongrui Wang. Design of the Multi-agent Based Electrical Graphic Platform for Distribution Network. Proceedings of the Eighth International Conference On Machine Learning and Cybernetics, 2009, 4: 2086-2090. (EI, 与第 2 章相关)
5. Hongrui Wang, **Xiuling Liu**, Jing Liu. The Contour Projection Based Collision Detection Algorithm. Proceedings of the Eighth International Conference On Machine Learning and Cybernetics, 2009, 3: 1611-1615. (EI, 与第 4 章相关)
6. 刘秀玲, 王洪瑞, 杨国杰. 基于本体信息的知识管理系统的研究与开发. 河北大学学报(自然科学版), 2008, 28(5): 550-554. (核心, 与第 1 章相关)
7. **Xiuling Liu**, Zhanfang Feng, Hongrui Wang. Fuzzy Sliding Mode Control for Robot Based On Passivity Theory. 2008 International Symposium on Intelligence and Disign, 2008, 1: 174-177. (EI, 与第 6 章相关)
8. **Xiuling Liu**, Yudong Feng, Hongrui Wang. An Intelligent Sliding Mode Controller Based on Nominal Model of Robotic Manipulator. The 4th International Conference on Natural Computation, 2008, 4: 322-325 (EI, 与第 6 章相关)
9. **Xiuling Liu**, Guojie Yang, Huanping Du, Hongrui Wang. A Moving Effect

- Judgment and Adjustment System Based on Physiology Information Fusion. IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence, 2008, 2: 311-315. (EI, 与第 7 章相关)
10. 刘秀玲,王洪瑞,王永清,陈超英.临界阻抗法在配电网谐波源探测中的应用.电力系统自动化, 2007, 31(14): 76-80. (EI)
11. 刘秀玲,王洪瑞,王永清.电网谐波阻抗的测量及修正. 电力系统自动化学报,2007,19(2):55-59. (核心)
12. **Xiuling Liu**, Hongrui Wang. A Multi-agent Based Framework for Intelligent Electrical Graphic System. Proceedings of 2007 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2007, 1: 83-87. (EI, 与第 2 章相关)
13. 刘秀玲,王洪瑞,王永清,陈超英. 配电网图形系统框架模型和供电路径分析的改进. 电力系统自动化, 2006,30(20): 45-48.(EI, 与第 2 章相关)
14. 刘秀玲,王洪瑞. 配电网中谐波源探测方法. 农村电气化, 2006, 12, 57-59.
15. Dong Bin, **Xiuling Liu**, Hongrui Wang. Research on three dimension data mining based on visualization technology. Proceedings of the Eighth International Conference On Machine Learning and Cybernetics, 2009, 1: 292-296. (EI, 与第 1 章相关)
16. Hongrui Wang, Jing Liu, **Xiuling Liu**. The Honeycomb-shaped Spatial Decomposition Collision Detection Algorithm. Proceedings of the Eighth International Conference On Machine Learning and Cybernetics, 2009, 3: 1861-1865. (EI, 与第 4 章相关)

二、专利和软件登记

1. 专利：一种高临场感智能感知交互运动系统及实现方法，申请号：200910073829.3，第二发明人。(与第 2-6 章有关)
2. 软件登记：分布式虚拟场景交互漫游系统软件 V001，登记号：2009SR021237，第二申请人。(与第 2-5 章有关)

三、主持或参加的科研项目

1. 主持并鉴定了河北省科技厅项目：医院知识管理系统的研究与开发；

2. 主持并鉴定了河北省教育厅项目：利用临界阻抗法进行配电网谐波源探测新方法的研究；
3. 作为第二主持人参加了科技部国际科技合作项目：载人六自由度并联机器人与虚拟环境的智能交互控制研究；
4. 作为第二主持人参加了河北省科技厅项目：分布式虚拟场景的实时绘制与一致性控制研究；
5. 作为第三完成人参加了河北省科技厅项目：六自由度并联机器人系统的开发及在保健机器人中的应用；
6. 作为第四完成人参加了河北省自然科学基金项目：机器人驱动系统饱和信息的诊断和力矩优化。



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>

阅读此文的还阅读了:

1. [视觉中的虚拟与现实](#)
2. [虚拟现实关键技术研究及应用](#)
3. [视觉设计和虚拟现实技术的跨界与融合](#)
4. [虚拟现实头盔延时感和沉浸感的研究](#)
5. [虚拟现实技术中的沉浸感研究](#)
6. [虚拟现实技术的运用对数字媒体交互方式的改善](#)
7. [浅谈虚拟现实技术](#)
8. [虚拟现实系统及其关键技术的研究进展](#)
9. [试析《无敌破坏王》中虚拟现实艺术的沉浸感](#)
10. [虚拟技术与虚拟现实技术](#)
11. [虚拟现实技术概述](#)
12. [VR虚拟现实影像的视觉特征探析](#)
13. [虚拟现实技术的关键技术研究](#)
14. [简析虚拟现实技术](#)
15. [论虚拟旅游与虚拟现实技术](#)
16. [基于交互式三维动态视景的虚拟现实模型技术](#)
17. [基于虚拟现实技术的视觉文化教育研究](#)
18. [虚拟现实技术交互方式的设计与创新](#)
19. [试论虚拟现实技术对数字媒体交互方式的改变](#)
20. [虚拟现实技术简述](#)
21. [视觉的虚拟与现实的建构](#)
22. [虚拟现实系统中曲线的交互式生成](#)
23. [虚拟现实技术应用](#)
24. [虚拟现实及其关键技术](#)
25. [简述虚拟现实技术](#)

- [26. 交互式虚拟现实系统技术探讨](#)
- [27. 关于虚拟现实技术人机交互的研究](#)
- [28. 虚拟现实技术应用](#)
- [29. 基于虚拟现实技术的虚拟乒乓球系统的研究与实现](#)
- [30. 虚拟现实软件的交互通信研究](#)
- [31. 虚拟现实技术概论](#)
- [32. 虚拟现实系统及其关键技术的研究进展](#)
- [33. 浅谈虚拟现实技术](#)
- [34. 虚拟现实技术概述](#)
- [35. 虚拟现实交互控制视觉沉浸感关键技术的研究与实现](#)
- [36. 虚拟现实技术给视觉艺术带来变革](#)
- [37. 虚拟现实关键技术及应用综述](#)
- [38. 浅谈虚拟现实技术](#)
- [39. 虚拟现实技术对现代展示艺术视觉化的实现](#)
- [40. 虚拟现实技术与增强现实技术](#)
- [41. 浅谈虚拟现实技术](#)
- [42. 交互式虚拟现实技术及其运用探析](#)
- [43. 虚拟现实交互技术](#)
- [44. 虚拟现实及触觉交互技术:趋势与瓶颈](#)
- [45. 虚拟现实之眼 Oculus与HMD关键技术](#)
- [46. 简述虚拟现实技术](#)
- [47. 虚拟与增强现实技术](#)
- [48. 简析虚拟现实技术](#)
- [49. 交互式虚拟现实游戏特质分析](#)
- [50. 交互式虚拟现实系统的关键技术研究](#)