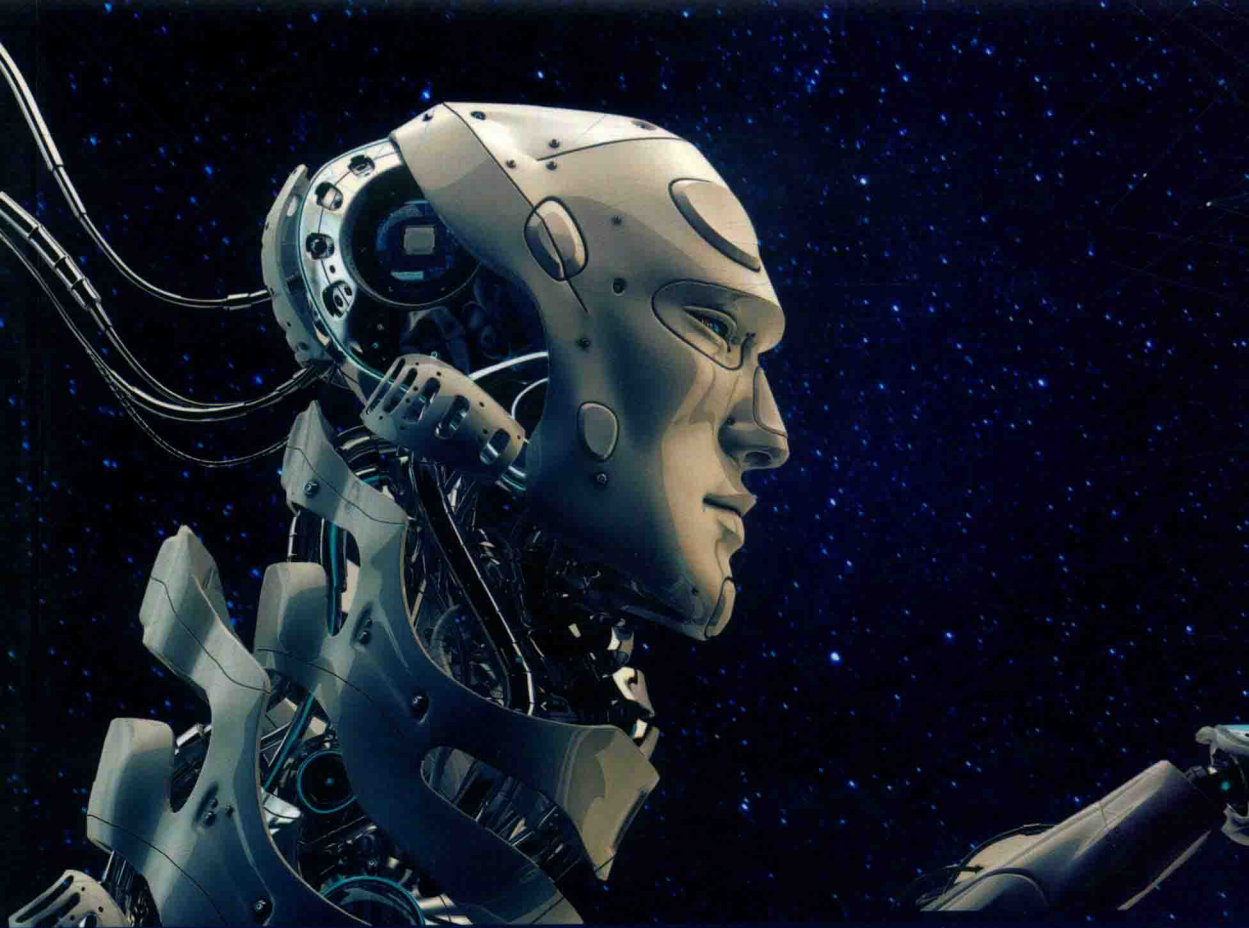




面向虚拟现实仿真环境的 头颈部外骨骼系统

李 鹏 吴东苏 著

非外借



科学出版社

面向虚拟现实仿真环境的 头颈部外骨骼系统

李 鹏 吴东苏 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书针对现有高性能头盔显示器在虚拟现实仿真环境应用中存在的问题,提出一种六自由度的头颈部外骨骼系统,主要内容涉及虚拟现实环境下人体头部运动特性的计算、并联机构的尺寸优化设计和运动学与动力学分析、时变参数的实时辨识、基于机械测量和基于头颈部表面肌电信息测量的头部运动预测、人机交互力计算及其控制策略、系统软硬件设计与集成等。

本书可以为在人机工程学、机器人与机构学、交通运输工程学、控制科学等多学科交叉领域中从事机构优化、机器人运动学与动力学、人机交互研究的相关专业技术人员提供参考,也可作为相关专业的研究生和高年级本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

面向虚拟现实仿真环境的头颈部外骨骼系统/李鹏,吴东苏著. —北京:科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-059348-1

I. ①面… II. ①李… ②吴… III. ①头部-体壁-肌肉骨骼系统-计算机仿真-虚拟现实-研究 ②颈-体壁-肌肉骨骼系统-计算机仿真-虚拟现实-研究 IV. ①R323.1 ②R322.7 ③TP391.98

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 250861 号

责任编辑: 惠 雪 曾佳佳 / 责任校对: 杨聪敏
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 15 3/4

字数: 314 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

针对现有分辨率和对比度高、视场角大、专业级立体显示的头盔显示器一般在使用过程中会出现运动不便,定位跟踪干扰大,有沉重感、束缚感和异物感等问题,本书以高精度与短延迟跟踪、低工作负荷的功能需求为目标,从提高头盔显示器佩戴舒适性的角度出发,提出一种主要由 6URHS 并联机构和传统头盔显示器组成的新型虚拟现实设备——头颈部外骨骼系统(head-neck exoskeleton, HNE),并对该系统的若干关键技术进行了研究,具体有以下几个方面:

(1) 执行机构的尺寸优化设计及原型样机研制。首先,从人机工程学的角度研究分析了人体的骨骼构造结构、运动结构以及人体关节运动自由度,建立了人体躯干至头部的结构模型,并利用串联机器人运动学正解法对头部运动范围进行了仿真分析;同时考虑了模拟座舱环境空间对人体活动范围的限制,通过选取座舱区域的极限位置点对驾驶员头部运动范围加以环境约束,从而获得更为准确而有效的头部运动范围,通过对实测数据进行量化与修正处理,得到了描述头部运动范围的六维超椭球体和头部运动速度、精度的极限数值,明确了执行机构尺寸优化的性能指标。其次,提出了一种量化六自由度工作空间的六维超椭球体的计算方法,实现了头部运动空间和 HNE 工作空间的统一显性数学表达与比较,为进一步建立 HNE 机构的尺寸优化模型提供了便利。再次,对各性能指标进行了归一化处理,定义了相应的子目标函数,建立了尺寸优化问题的数学模型,并提出了基于质心泰森多边形结构(centroidal voronoi tessellation, CVT)的非线性最小二乘法对优化问题进行了解算。计算结果显示, CVT 的使用可以使参数初始值均匀覆盖整个参数空间,可在保持非线性最小二乘法原有优势的同时,提高算法的全局搜索能力,提供多组非劣解。然后,在执行机构的结构设计方面,提出了穿越式的驱动支链设计方案,减小了自身结构尺寸和安装占用空间,通过悬挂安装驱动支链保证了穿越式方案的实施,实践证明,机构的使用效果达到了设计目标。最后,按照最优方案完成了执行机构的设计研制。

(2) 执行机构的运动学与动力学分析。分析了 6URHS 并联机构关节空间与任务空间之间的运动学关系;对螺母单独进行了动力学分析,推导了驱动支链的动力学方程,采用牛顿-欧拉法建立了部件级、细粒度的 6URHS 并联机构动力学模型;采用 Simulink 的 SimMechanics 模块建立了 6URHS 并联机构的虚拟样机,进行了开环动力学响应实验,实验结果显示数学模型与虚拟样机的动力学响应基本一致,数学模型的准确度与虚拟样机相仿。对 6UPS 并联机构模型与 6URHS 并联机构模

型进行了能量转化分析,分析结果证明,考虑螺母的动力学特性,建立 6URHS 并联机构的动力学模型具有较高的必要性。

(3) 系统重要未知参数的辨识。针对含头盔显示器的动平台质量、重心位置等参数具有时变不确定性的特点,本书重点对非线性系统的在线辨识算法进行了研究,通过理论分析和文献资料阅读,归纳、总结了部分辨识方法的优、缺点;结合待辨识参数和执行机构动力学模型,给出了用于参数辨识的系统状态空间模型和观测函数;通过在线辨识仿真,对比分析了连续-离散扩展卡尔曼滤波 (continuous-discrete extended Kalman filter, CDEKF) 算法和连续-离散平方根无味卡尔曼滤波 (continuous-discrete square-root unscented Kalman filter, CDSR-UKF) 算法的辨识速度、精度和稳定性,仿真结果显示 CDSR-UKF 在这三方面均要优于 CDEKF;采用 CDSR-UKF 对 HNE 的动平台参数进行了在线辨识实验,实验结果显示 CDSR-UKF 能对参数的阶跃变化作出快速响应,辨识误差较小,且阶跃变化越小, CDSR-UKF 的响应速度和辨识精度就越高。

(4) 系统控制策略。首先,分别设计基于并联机构机械跟踪测量和基于头颈部表面肌电信息测量的头部运动预测算法,通过典型的头部运动实验确定两种算法对于头部在不同运动速度及加速度下的适应性,并总结出头部运动预测的误差来源;针对两者的特点设计高效的融合算法,实现高精度、低延时的头部运动检测。其次,通过理论分析和实验研究掌握头颈部表面肌电信息与头部运动之间的规律关系,确定影响头颈部肌电信号强弱的主要变量,建立三自由度的头颈部肌电力关系估计模型,并对模型参数进行优化估计研究。再次,提出了一种基于 HNE 系统动力学模型的无接触式人机交互力计算方法,该方法通过建立 HNE 任务空间力与关节空间力的关系,采用间接的方式能实时根据关节空间力的反馈计算人机交互力。最后,针对系统的设计功能,提出了 HNE 的主动柔顺控制策略 (active compliance control strategy of HNE, ACCSH);并对策略涉及的内容——运动轨迹规划和控制器设计进行了研究。鉴于螺旋副存在自锁问题,根据六自由度并联机构任务空间与关节空间的运动学关系,结合 6UPS 与 6URHS 各自驱动支链的运动特点,提出了基于 6UPS 并联机构驱动支链动力学模型和力传感器反馈数据的头部运动预测方法 (即前文提及的机械跟踪测量方案),该方法通过对头部运动的预测实现了对执行机构动平台运动轨迹的规划;针对系统设计功能之二——减小头盔显示器与使用者头部间的广义接触力,本书基于系统动力学模型,设计了带有惯性项与非线性项补偿的控制器;通过仿真与实验,对主动柔顺控制策略用于 HNE 控制的可行性与效果进行了验证,实验结果显示主动柔顺控制策略可以在实施精确位置跟踪的同时,有效地减小广义接触力,从而达到减小系统使用者工作负荷的系统设计目标。

(5) 系统软件设计及其运行环境。按照功能划分,采用模块化的方法对系统软

件架构进行了设计,基于 Visual Studio 实现了指令模块等 17 个功能模块,并根据任务需求将各模块有机结合,开发完成了系统管理软件、头部运动预测软件、在线辨识软件、系统控制软件以及动力学与运动学计算软件;基于 C++Builder 开发了系统管理软件的可视化操作界面,基于 OpenGL 设计了用于动态显示 6URHS 并联机构运动状态的虚拟样机,方便了测试实验的开展,保证了实验的安全性;基于 Windows XP 和 RTX8.1 搭建了系统软件的运行环境,设计了服务器 (Windows)-客户端 (RTX) 的上、下位机控制架构,实现了 HNE 的 480Hz 的高频率实时控制。

(6) 系统性能测试。构建了头颈部外骨骼系统的原型样机,实现了系统硬件、软件的联合调试;采用仿真与实验相结合的方法,对 HNE 的设计功能实施效果和系统动力学响应等特性进行了研究。建立了有、无金属物体干扰两种跟踪性能测试实验环境,采用惯性陀螺测量了动平台的位姿信息,对电磁跟踪器与 HNE 的静、动态跟踪精确度、抗干扰能力和稳定性进行了对比,实验结果证实了 HNE 的良好跟踪性能;提出了基于动力学模型与力反馈数据的广义接触力计算方法,为通过实验手段验证 ACCSH 的实施效果提供了便利。参考了报告 AGARDAR-144 和 MIL-STD-1558 中关于飞行模拟机动感模拟平台的运动测试规范,设计了 HNE 运动特性极限等测试项目,完成了相关实验,并对实验结果进行了分析说明。

在以上研究的开展过程中,南京航空航天大学民航学院顾宏斌教授提出了很多独到的见解和建议,在此对顾教授表示真挚的感谢。此外,本书的研究还得到了国家自然科学基金 (编号 61403204、51205195、U1633120、71701099)、江苏省自然科学基金 (编号 BK20130981、SBK2016020220) 的资助,在此一并表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2018 年 8 月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 改善头盔显示器的佩戴舒适性方面	2
1.2 提升跟踪稳定性与实时性方面	4
1.2.1 位置跟踪器	4
1.2.2 头部运动预测	5
1.3 HNE 的设计要求和系统结构	7
1.3.1 执行机构的结构设计	7
1.3.2 驱动方式设计	8
1.3.3 控制系统设计	9
1.3.4 控制软件设计	9
1.4 本书的主要研究内容	10
第 2 章 执行机构的尺寸优化设计	13
2.1 虚拟座舱环境中头部运动特性分析	15
2.1.1 头部运动范围分析	16
2.1.2 六自由度运动空间的量化方法和头部运动空间六维包络超椭球体的计算	20
2.1.3 运动速度分析	37
2.1.4 运动精度分析	38
2.2 优化设计	38
2.2.1 设计参数	38
2.2.2 运动特性指标目标函数	39
2.2.3 优化算法、数学模型及优化结果	42
2.3 优化结果分析	45
2.3.1 非劣解验证	45
2.3.2 最优解及其运动特性指标分析	50
2.4 结论	53
第 3 章 执行机构的运动学与动力学分析	55
3.1 6URHS 并联机构运动学分析	56
3.1.1 位置分析	57

3.1.2	速度分析	59
3.1.3	加速度分析	60
3.2	6URHS 并联机构动力学分析	61
3.2.1	驱动支链动力学分析	61
3.2.2	动平台动力学分析	69
3.3	模型验证	71
3.4	建立 6URHS 并联机构动力学模型的必要性	74
3.5	结论	79
第 4 章	头颈部外骨骼系统动平台的参数辨识方法研究	80
4.1	HNE 对参数辨识方法的要求	81
4.2	辨识方法	83
4.2.1	连续预测方程的推导	83
4.2.2	CDEKF	84
4.2.3	CDSR-UKF	86
4.3	CDEKF 和 CDSR-UKF 的仿真与实验研究	89
4.3.1	CDEKF 与 CDSR-UKF 的仿真比较研究	89
4.3.2	CDSR-UKF 辨识效果的实验验证	97
4.4	结论	105
第 5 章	头颈部外骨骼系统的主动柔顺控制	106
5.1	头部运动预测	107
5.2	基于系统动力学模型的惯性项与非线性项补偿控制器	111
5.2.1	控制器的设计	111
5.2.2	稳定性分析	114
5.3	仿真验证	116
5.3.1	头部运动预测的仿真验证	118
5.3.2	INCCDM 效果的仿真验证	121
5.4	INCCDM 的实验验证	124
5.4.1	HNE 原型样机的主动柔顺控制框架	124
5.4.2	基于力反馈与动力学模型的接触力计算	124
5.4.3	验证实验	126
5.5	基于头颈部表面肌电信息测量的头部运动预测算法	147
5.5.1	头颈部运动变化与头颈部肌电信号 (sEMG) 的对应关系分析	148
5.5.2	融合运动学跟踪信号和头颈部表面肌电信号的头部运动预测算法	153
5.6	结论	161

第 6 章 头颈部外骨骼系统的性能测试	163
6.1 头颈部外骨骼系统的结构	163
6.1.1 系统的运行环境	163
6.1.2 系统的硬件结构	164
6.1.3 系统软件	169
6.1.4 系统的性能测试要求	171
6.1.5 测试辅助硬件	172
6.2 HNE 的跟踪实验及其结果分析	173
6.2.1 跟踪精确度与抗干扰能力测试	173
6.2.2 跟踪稳定性对比	178
6.2.3 位置跟踪延时	178
6.3 其他性能测试	178
6.3.1 HNE 的运动特性极限	178
6.3.2 动态阈值	179
6.3.3 各驱动支链的耦合运动	179
6.4 结论	181
参考文献	182
附录 A 人体测量数据、人体上身结构模型及头部位置与姿态统计结果	193
附录 A.1 人体测量数据	193
附录 A.1.1 飞行员人体静态尺寸数据	193
附录 A.1.2 飞行员人体动态尺寸数据	194
附录 A.2 建立人体躯干至头部的结构模型	196
附录 A.2.1 关节运动类型	196
附录 A.2.2 简化人体骨骼体系	196
附录 A.3 4 位飞行学员的头部运动位置与姿态直方图	198
附录 A.4 4 位飞行学员的头部运动位置与姿态箱型图	212
附录 A.5 4 位飞行学员头部运动的速度特性	224
附录 B 头颈部外骨骼系统的 Simulink 虚拟样机	234
附录 C 辨识仿真的状态向量估计结果	236

第1章 绪 论

虚拟现实技术因其对未来高技术产业的发展和国家技术创新能力的提升所具有的作用，已列入国家长期科技发展规划。头盔显示器是基于虚拟现实技术研发的一种人机交互设备，其功能是完成三维立体虚拟场景的显示，主要用于模拟训练、工业生产、医疗、虚拟维修与装配、数字图书馆等领域。传统的驾驶舱式仿真系统，如汽车驾驶模拟器、飞行模拟器等的驾驶舱内部是与实车（机）完全相同的实物，舱外环境是采用环幕投影方式生成虚拟场景，该方案的逼真度、沉浸感虽然较高，但结构复杂、占用空间大、成本高，且在更换车型或机型时需要将整个驾驶舱全部换掉，降低了系统的实用性。而头盔显示器和数据手套的出现有效地解决了传统驾驶舱式仿真系统存在的问题，如图 1.1 所示，用头盔显示器代替环幕投影系统，可以同时生成驾驶舱外部环境的 360° 虚拟场景和虚拟的驾驶舱内部环境，这既降低了系统的成本和复杂度，又增强了仿真系统的可重构性——由于驾驶舱内部环境是虚拟的而非实物，可以在不改变驾驶舱硬件的情况下通过更换软件（动力学模型、驾驶舱内部环境的视景模型等）便可模拟不同的对象，如不同的车型、机型等。随着虚拟现实技术及相关仪器设备的发展，这种基于虚拟现实技术的驾驶舱仿真系统势必会在人机交互仿真领域展现出越来越大的作用和发展前景。

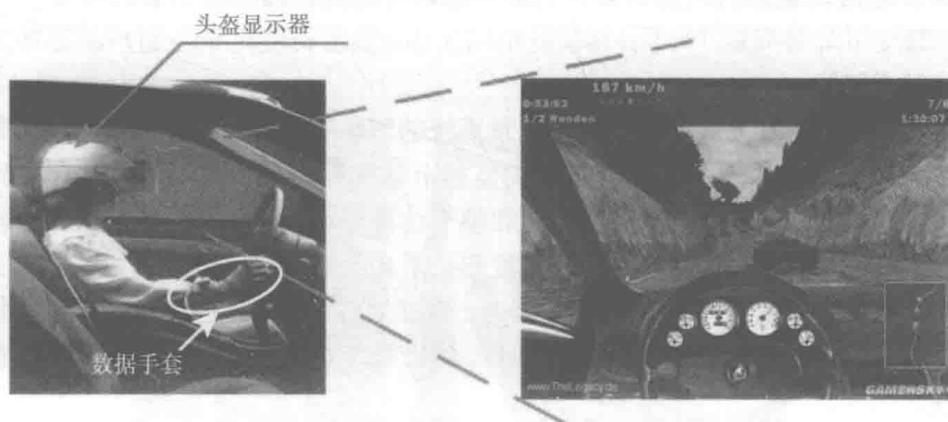


图 1.1 基于虚拟现实技术的汽车驾驶舱仿真系统

国内对基于虚拟现实技术驾驶舱仿真系统的研究开展相对较晚，研究者主要是高等学校和研究所的工作人员，如东南大学、浙江大学、北京科技大学、华东交通大学、山东理工大学、武汉理工大学等^[1-6]对基于虚拟现实技术的汽车驾驶舱

仿真系统进行了研究;北京理工大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学 [7-9] 等对基于虚拟现实技术的飞机驾驶舱仿真系统的若干关键技术进行了研究;清华大学计算机系对基于虚拟现实的无人驾驶飞机仿真训练系统进行了研究 [10], 洛阳电光设备研究所对某型战斗机的虚拟现实驾驶舱进行了研究。国外在这方面的研究较早,可以追溯到 20 世纪 80 年代。美国是最早开始研制该类系统的国家。1994 年, McCarty 等采用头盔显示器代替原有的投影系统,研制了一款低成本的驾驶模拟器,美国国防部下属的仿真、训练和设备司令部 (STRICOM) 主持并研制了基于 TOPIT(touched objects positioned in time) 的虚拟驾驶舱系统 [11], BAE(British Aerospace) 系统公司研制了 Bradley 战地车的虚拟主动战术训练器 [12], 美国的 L3 LINK SIMULATION & TRAINING 公司基于先进头盔显示器 (advanced helmet mounted display, AHMD) 构建了多款军用飞机虚拟驾驶舱,如 F-16 飞机等 [13]。

作为视景系统,头盔显示器的性能品质将会直接影响到仿真系统的沉浸感和逼真度。目前,头盔显示器按外部特征的不同,可分为两类 [14],一是非封闭式头盔显示器,如 Olympus Eye-Trek FMD700、Daeyang/Sony I-Visor DH-4400VP 等;二是封闭式头盔显示器,如 DataVisor80、Virtual Research VR1280。前者质量虽轻,但分辨率却不高、视场角窄,无法完全满足基于虚拟现实技术驾驶舱仿真系统的需求;后者分辨率高、视场角大,且具有暗室,能提高使用者的专注度,但体积与质量大,佩戴时有沉重感、束缚感和异物感,影响了仿真系统的逼真度。位置跟踪器与头盔显示器配合使用,用于测量头盔显示器的空间位置与姿态,以驱动虚拟场景。目前,根据原理的不同,可将跟踪器分为电磁、光学、超声等几类。驾驶舱的零部件通常以金属材质的居多,电磁跟踪器在受到金属干扰后会出现定位稳定性差、精度下降等问题 [15,16];驾驶舱空间狭小,极易诱使光学与超声跟踪器出现测量盲区 [17,18]。

综上所述,在以头盔显示器作为视景系统的驾驶舱仿真系统中,存在较为突出的问题有两个:一是性能参数较高的头盔显示器体积与质量大,使用时存在异物感、沉重感,影响了自身的使用舒适性和整个仿真环境的逼真度;二是跟踪器较差的抗干扰能力、较低的跟踪稳定性和精度影响了虚拟场景的生成实时性,造成了视觉延时,降低了仿真环境的真实感。因此,有必要在提高头盔显示器使用舒适性、跟踪器稳定性与实时性方面开展研究工作,提升整个仿真系统的逼真度、沉浸感和实用性。

1.1 改善头盔显示器的佩戴舒适性方面

当前有两种方法可以改善头盔显示器的佩戴舒适性,一是选择质量轻的头盔显示器;二是选择专业级的头盔显示器,并辅以支撑装置作为头盔重量的承载者。非

封闭式头盔显示器具有质量轻、体积小的优点,因此,在减轻佩戴者工作负荷方面,该类头盔具有独特的优势。近几年来,随着显示器和相关的光学镜片的小型化技术取得的巨大进步,非封闭式头盔显示器在其性能方面,尤其是分辨率有了较大提高,比较具有代表性的产品是 Olympus Eye-Trek FMD700 和 Daeyang/Sony I-Visor DH-4400VP^[14]。Olympus Eye-Trek FMD700 采用光学超分辨率处理技术 (optical super resolution), 将其分辨率提高到 533×450 (每 LCD 面板 720 000 个像素), 其质量也只有 105g。然而即便如此, 533×450 的分辨率也只有桌面图形监视器的 18.3%, 且从人机工程学的角度出发,跟踪器的接收器放置在设备的顶部,虽使得用户对整个装置质量的增加感觉不明显,但是却缺乏对脑后的平衡^[14]。Daeyang/Sony I-Visor DH-4400VP 通过采用 LCOS 芯片,使其在保证质量为 160g 的同时,还能拥有高于 Olympus Eye-Trek FMD700 一倍的分辨率—— 800×600 。但是与桌面图形监视器相比,仍有较大差距,因此还是达不到驾驶舱仿真系统的使用要求。通过以上分析可以看出,非封闭式头盔显示器虽然具有质量轻的优势,但其分辨率低,且只能接受 NTSC/PAL 单视场视频输入的缺点,使其仍无法胜任虚拟现实交互的工作。因此,目前该类头盔主要用于个人观看电视节目和视频游戏设计,而不是基于虚拟现实技术的驾驶舱仿真系统。

第二种可改善头盔显示器佩戴舒适性的方法是引入辅助支撑装置。支撑装置可以代替使用者成为头盔显示器重力的承担者,从而可以部分或彻底缓解使用者的负荷,使其免于因头盔重量引发的疲劳和颈部劳损。从其所完成的功能来看,支撑装置在整个系统中的作用类似于助力器。目前主要的带有支撑装置的头盔显示器有两种:一是地面支撑头盔显示器,如 Fakespace 公司的 Boom3C 和 BoomHF^[19],如图 1.2 所示;二是桌面支撑头盔显示器,如 Fakespace 公司生产的 PUSH1280,如图 1.3 所示。

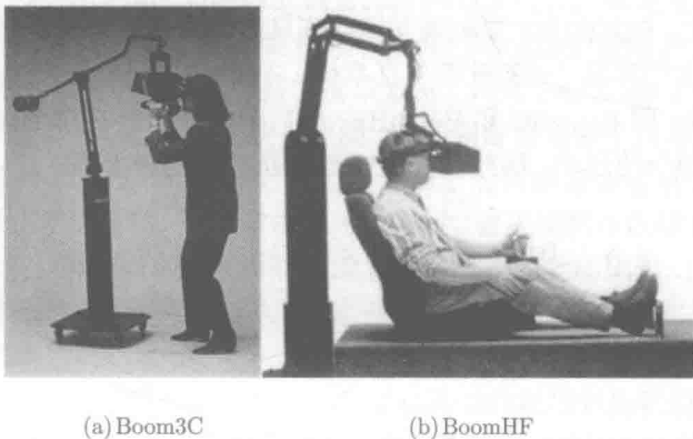


图 1.2 地面支撑装置

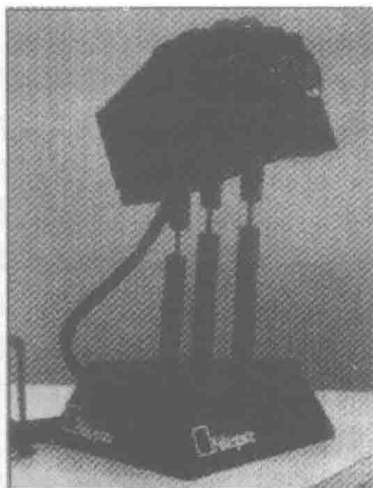


图 1.3 PUSH1280 桌面支撑装置

地面支撑头盔显示器使用了一个人工机械臂代替使用者承担头盔显示器的重量,在机械支撑结构中集成了角度传感器,机械臂关节的个数决定了头盔显示器运动自由度的多少。除了具有减负的功能外,地面支撑头盔显示器还具有低延迟、较为准确的跟踪、消除跟踪抖动、跟踪不受电磁场和背景噪声影响等优点。但由于采用机械臂作为支撑装置,因此整体结构和性能受到了串联机构固有缺陷的影响,如串联机构的质载比大、刚度和运动速度低等缺点决定了该类设备具有较大的质量和体积,无法在狭小的驾驶舱内安装、使用。另外,手是机械支撑部分的运动发起者,这使得使用者不能完全沉浸于虚拟世界,因此削弱了整个系统的沉浸感。

PUSH1280 的显示部分重量由三个微动的活塞和一个底面承担^[20]。该设备机械支撑部分具有三个自由度,分别是前后运动、偏航转动和俯仰转动^[21]。在机械支撑部分的两侧有许多带按钮的手柄,使用者可以通过按钮与虚拟世界进行交互。其缺点是:首先,PUSH1280 的机械支撑部分只能完成小幅度运动,因此不适合头部运动空间较大的环境(如驾驶舱仿真系统),PUSH1280 最适合用于需要漫游的应用系统;其次,同 Boom3C 和 BoomHF 一样,PUSH1280 在使用时,也需要手参与到机械支撑部分的运动,因此 PUSH1280 的沉浸感同样不强。

1.2 提升跟踪稳定性与实时性方面

1.2.1 位置跟踪器

1) 针对跟踪器测量误差的校正算法研究

跟踪器误差的校正算法有三种:分析法即多项式拟合法^[22]、全局插值法和局部插值法^[23,24]。局部插值法虽只需考虑当前点周围的若干采样点,计算量小,但

获得的函数不够平滑;全局插值法又需整体考虑样本空间,计算量比较大,不适合实时系统。三种方法在应用场合或周围金属环境发生改变时,均需要重新采样校正,且若想获得精度较高的校正结果,需要配备额外的用于接收器定位和位姿测量的仪器,还需要对测量数据进行校正计算,在实时性方面反而降低。金属是驾驶舱仿真系统中各种设备的主要材质,实时性是驾驶舱仿真系统的重要性能指标之一。因此,以上三种校正算法不适合在驾驶舱仿真系统中对跟踪器进行误差校正。

2) 新型跟踪器的研制

目前,新型跟踪器主要以国内研制居多^[25-27],研究内容主要集中在降低跟踪器成本方面,而在测量精度、稳定性和实时性等方面提高不大。

1.2.2 头部运动预测

为了消除位置跟踪信号存在的延时、稳定性差等问题,许多学者就头部运动的预测方法展开了研究,以期望采用运动预测的方式来代替传统的位置跟踪器。当前,用于头部运动预测的方式主要有两种——软件和硬件。软件方面,在分析头部运动特点的基础上,通过建立头部运动模型和预测器来进行头部运动信息的预测,其中,头部模型主要有常速度(constant velocity, CV)模型、“当前”统计(current statistical, CS)模型、常加速度(constant acceleration, CA)模型以及 Singer 模型^[28]等;预测器主要有基于卡尔曼滤波的预测器^[28-31]、基于径向基神经网络的预测器^[32]、具有马尔可夫切换系数的交互式多模型预测器^[28]等。硬件方面,主要是借助传感器^[31,32]等来测量头部运动信息,如基于表面肌电信息(sEMG)的运动预测^[33-43],该方法通过测量人体的颈背部肌电信号,基于模式识别的方法判断头部运动趋势。

头部运动模型和预测器采用测量数据预处理的方式来对预测器的预测值进行修正,具体是:将两次预测间隔内的位置跟踪器数据进行压缩处理,提取其中的新信息来校正下次的预测值。因此,这种基于头部运动模型的预测方法其预测准确性将在很大程度上取决于位置跟踪器的反馈数据。然而,在通常的驾驶舱仿真系统中,金属材质的设备和驾驶舱的狭小空间,会给跟踪器带来干扰和测量盲区,继而影响到跟踪器的稳定性和准确性。所以基于模型的预测方法对使用环境有着特殊要求,其实用性有待提高。采用常规的硬件方式,如采用惯性陀螺来测量头部运动趋势,存在累积误差;而基于表面肌电信息(sEMG)的运动预测,由于确定头部运动与肌电信号的对应关系难度较大,加之使用时需在人体颈背部粘贴电极片,造成了该方案实施难度大,本书在后续章节中将基于头颈部表面肌电信息的头部运动方法进行初探性研究。综合以上分析,在驾驶舱仿真系统中,现有的软、硬件头部运动预测方案都不能很好地解决跟踪器的稳定性和实时性问题。

综上所述,本书针对基于虚拟现实技术的驾驶舱仿真系统中头盔显示器和位

置跟踪器存在的问题,如图 1.4 所示,设计和研制一种以并联机构为支撑装置(以下称为执行机构)的头盔显示器头颈部外骨骼系统(head-neck exoskeleton, HNE),突破相关的设计、测量和控制等关键技术。目标是在驾驶舱仿真系统中,通过对并联机构实施主动控制,消除头盔的沉重感、束缚感和异物感;实现利用机械跟踪和传感器检测信息相融合的方式来进行高精度、低延时的头部运动检测,实时主动跟踪头部运动,为头盔显示器虚拟场景的计算与生成提供高实时、低干扰的位置与姿态信号。



图 1.4 头盔显示器头颈部外骨骼系统的假想图

头颈部外骨骼系统各关键技术间的关系如图 1.5 所示。头颈部外骨骼系统的关键技术包括头部运动特性分析与归纳、执行机构的优化设计、头部运动预测方案、系统控制策略、系统集成和性能评价。头部运动特性分析为执行机构的优化设计提供具体性能指标要求;执行机构的优化设计主要是基于性能指标要求,对机构进行

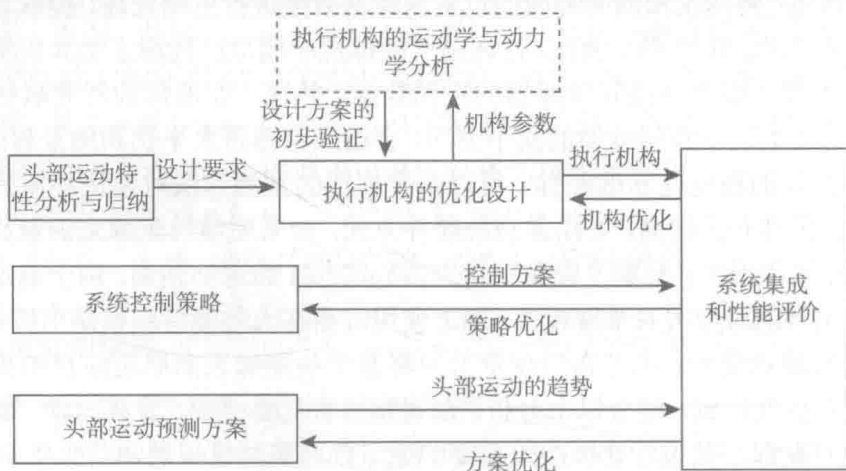


图 1.5 头颈部外骨骼系统各关键技术间的关系

结构选型和尺寸优化设计,通过对执行机构进行运动学和动力学分析,来对机构的最优设计方案可行性进行初步验证,并研制执行机构原型样机;通过对系统控制策略的研究,确定系统控制方案;通过对头部运动预测方案的研究,为执行机构的控制方案提供期望运动轨迹;系统集成主要实现头颈部外骨骼系统软、硬件回路的闭合和系统的联合调试;性能评价主要通过主、客观两种方式,来对系统方案的可行性和系统功能是否达标进行验证,并以此来为设计方案、控制策略和预测方案的改进提供参考依据。

1.3 HNE 的设计要求和系统结构

根据 HNE 的工作原理,本节将从结构、驱动方式、控制系统、控制软件四个方面对 HNE 的设计要求及系统结构进行说明。

1.3.1 执行机构的结构设计

从功能上看,HNE 是一个人机交互系统,它的设计在满足功能要求的同时,要考虑人机工程学的因素,如执行机构的结构要便于安装和使用等。首先,在空间运动自由度上,执行机构要与头部运动统一。在端坐情况下,头部运动具有六个自由度,那么为了实现 HNE 的功能,执行机构亦应具有空间六自由度运动的性能,即执行机构是一个六自由度的并联机构;其次,作为一种并联机构,执行机构的工作空间要满足使用要求,即工作空间要完全覆盖使用者的整个头部运动空间,在数学关系上表现为,头部运动空间是工作空间的子集。因此,对于实现这一要求来说,执行机构的运动范围越大越好。然而,若从使用环境(虚拟座舱与真实座舱间的尺寸比例一般是 1:1,空间相对狭小)和使用成本方面进行考虑,那么执行机构的尺寸是越小越好。这样就形成了一对相互制约的矛盾,为了解决这一问题,需要同时考虑以上三方面的因素,对执行机构进行尺寸优化设计,具体参见第 2 章。

另外,从图 1.5 中可以看出,执行机构的动力学、运动学计算是 HNE 运行过程中影响系统控制效果的一个关键部分。因此,为了确保整个系统具有优良的性能,保证控制环节保持较好的实时性,要求执行机构的动力学、运动学计算简单高效。对于并联机构而言,其结构形式与其动力学、运动学计算的复杂度有直接关系。为此,本书经过反复比较,选择形式与计算复杂度较为简便的 6-3 型 Stewart 平台作为执行机构。

图 1.6 是头颈部外骨骼系统的传感器布局图。为了便于安装、方便设计研制,本书将传感器安装于执行机构的关节空间。这样,根据六个拉压力传感器的反馈数据,通过转换计算可以求得作用在动平台上的力与力矩。



图 1.6 执行机构的传感器布局

1.3.2 驱动方式设计

执行机构的驱动方式在很大程度上决定了系统的运动精度、速度等性能指标。目前，并联机构的驱动方式主要有两种——液压驱动和电驱动。液压驱动方式的突出优点是抗负载的刚度大，具有大的执行器功率质量比，可以用于组建加速能力强、反应速度快、体积小以及质量轻的伺服系统进行大功率和大负载的控制。虽然具有众多优点，但技术实现难度大、设计维护复杂，需要辅助能源以及成本较高等缺点，使液压驱动方式不适合 HNE。

电驱动方式因其实施简便、环保低耗、维护简单等优点在最近几年得到了广泛的关注和应用。当前，在结构形式上电驱动可分为三类：①直线电机直接驱动，这种结构最简单，但是昂贵的价格以及较弱的负载能力制约了它的应用；②伺服电机、减速装置及丝杠组合，这种方式的结构在三类形式当中最为复杂，但价格最便宜，可以使用普通的伺服电机配合齿轮箱等减速装置得到较强的负载能力，但由于齿轮间的齿隙回差和摩擦力等因素会影响执行机构的控制精度和性能，只能用在性能要求不高的情况；③力矩电机与丝杠组合，这种方式的结构复杂度介于第一类与第二类形式之间，且力矩电机具有低转速、大扭矩、过载能力强、响应快、力矩波动小等特点，可省去减速传动齿轮直接驱动负载，从而提高系统的运行精度。然而力矩电机体积较大而且高性能的力矩电机价格较高，会增加整个系统的使用成本。

执行机构的功能是实现对头盔显示器的伺服控制，因头盔显示器的质量较小，对执行机构的负载能力要求较低。因此，本书结合执行机构的这一特点和上述分析，选择交流伺服电机和丝杠组合作为执行机构的驱动方式，该种方式不仅具有成