摘 要

虚拟现实是利用计算机模拟建立的三维空间的虚拟场景，结合外围人机交互设备，给予操作者视觉、听觉、力觉和触觉等各个感官的模拟，使操作者如同身临其境，可以如同现实一样去感知三维空间的事物及其特性。虚拟现实的三大特性是：沉浸感、交互性和构想性。人实际认识事物很大程度上是通过人手来实现的，因此研究人手与虚拟场景的交互操作是非常重要的，为了增强人手与虚拟场景的沉浸感和交互性，操作者借助的外围接口设备显得很关键。

本文研究的重点就是在对现有力反馈数据手套进行研究和分析的基础之上，研制了一种基于低摩擦气缸为驱动器的新型力反馈数据手套，设计的力反馈数据手套样机具有输出力大、摩擦力小和重量轻等特点，并且能够较好地实现力反馈数据手套关节角度测量和反馈力输出这两大通用功能。

首先，以人手骨骼模型为出发点，分析人手的运动特性，建立了人手运动简图模型。探讨了力反馈数据手套控制的对象——虚拟手模型的建立方法、碰撞检测算法、抓取技术和虚拟力计算。

其次，通过选用低摩擦气缸作为驱动器和相关机械结构的设计，研制了一种新型力反馈数据手套。通过研究角度传感器和位移传感器的原理，设计了人手-手套整体的姿态间接测量方法。

然后，针对所设计的力反馈数据手套进行量化分析。建立了人手-手套整体的运动学模型，得到并求解其运动学方程组，以实现位姿反馈。设计了气动回路，得到力反馈的控制模型。同时，对设计的力反馈数据手套的性能参数：重量、摩擦力和运动范围进行了评估和计算。

最后，针对设计的力反馈数据手套设计了实验系统，进行了低摩擦气缸静特性、人手关节角度测量和力反馈控制三个实验，得到了手套驱动器输出力的计算公式、人手弯曲时关节角度的变化曲线和模拟虚拟操作时的力触觉功能。

关键词：虚拟现实；力反馈；数据手套；角度测量

ABSTRACT

Virtual Reality is giving simulation of the operator's vision, hearing and feeling by making use of the three-dimension virtual scene in the computer and with the help of human-interaction equipment, so that the operator seems have self participation to perception the three-dimension's things and their features as reality. Virtual Reality has three characteristics: Immersion, Interaction and Imagination. Actually, people acknowledge things by hands at most time, so it is very important to research interaction between the hand and virtual scene. Therefore, the human-interaction equipment plays a key role in the interaction, so as to enhance the immersion and interaction.

The main point of this paper is design a new type of force feedback data glove, which using low-friction cylinders as its actuator, on the base of research on existing data gloves at home and abroad. The glove has three characteristics with big output force, low-friction and light weight. What's more, the glove realized common glove's two functions very well, which is joint measurement and feedback force output.

First, the hand's kinematics characteristics are analyzed on the base of the hand skeleton model, so that it gains kinematics diagram. Then, it investigates establishing method, collision detection algorithm , grasp technology and virtual force calculation of the virtual hand model, which is controlled by the force feedback data glove.

Secondly, a new type of force feedback data glove has been designed via choosing low-friction cylinder and designing mechanical structure. And, a joint measurement method has been designed via investigation on the principle of the angle sensor and the translation sensor.

Then, quantitative analysis has been made on the designed glove. Kinematics model has been established on hand-glove to gain the kinematics equations and its solution, so as to realize the hand position feedback. The force feedback control model has been established via design proper pneumatic circuit. Meanwhile, estimation and calculation have been made on the glove property parameters, which are weight, friction and range of motion.

Finally, experimental system has been designed on the glove to do three experiments, which are low-friction cylinder static characteristic, hand joint measurement and force feedback control, and it gains calculation formula of the glove actuator, hand joint change curve with hand bending and simulating force haptic with virtual operation.

Key Words: Virtual Reality; Force Feedback; Data Glove; Joint Measurement

大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下,独立进行研究工作所取得的成果，撰写成博/硕士学位论文 “ 新型气动力反馈数据手套的设计与研究 ”。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解大连海事大学有关保留、使用研究生学位论文的规定，即：大连海事大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连海事大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。同意将本学位论文收录到《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》（中国学术期刊（光盘版）电子杂志社）、《中国学位论文全文数据库》（中国科学技术信息研究所）等数据库中，并以电子出版物形式出版发行和提供信息服务。保密的论文在解密后遵守此规定。

本学位论文属于：　　保　密□ 在_____年解密后适用本授权书。

不保密□ （请在以上方框内打“√”）

论文作者签名： 导师签名：

日期：2010年 7月 2日

第1章 绪论

1.1 课题背景及意义

虚拟现实（Virtual Reality），简称VR，是上世纪九十年代出现的高新技术。单独来看，“虚拟”与“现实”二者是矛盾的，虚拟现实是利用计算机模拟建立的三维空间的虚拟场景，并结合外围人机交互设备，给予操作者视觉、听觉、力觉和触觉等各个感官的模拟，使操作者如同身临其境，可以如同现实一样去感知三维空间的事物及其特性。

虚拟现实技术集成了计算机图形技术、计算机仿真技术、人工智能、传感技术和显示技术等技术的最新发展结果，是由计算机技术辅助生成的高技术模拟系统，在各个行业应用都非常广泛：

1）城市规划：城市规划一直是对全新的可视化技术需求最为迫切的领域之一，将虚拟现实技术应用在城市规划中，城市规划方案不但可以借助虚拟现实系统给用户带来强烈、逼真的感官冲击；而且可以通过虚拟现实的数据接口在实时的虚拟场景中随时获取项目的数据资料，以方便设计人员进行复杂项目的规划和随时修改。

2）医学：VR在医学领域的应用有着十分重要的现实意义。一方面，在虚拟环境中，医护人员可以借助虚拟的人体模型以及外围交互设备，可以很容易了解人体内部器官结构；另一方面，外科医生在动手术之前，通过虚拟现实技术的帮助，能够重复地模拟手术，寻找最佳手术方案并提高熟练度。

3）虚拟装配：装配是一个机械产品从设计到完成的最后一个环节，将虚拟现实技术应用在机械产品装配上称之为虚拟装配。传统的装配是指将工程师的设计图纸加工为现实产品，然后进行产品的装配。这样不但使得产品的生产周期很长，而且在装配工程中一旦发现问题就得需要工程师重新修改图纸，重新加工与装配，生产成本和生产周期大大提高。虚拟装配则是将工程师设计的模型导入到虚拟场景中，借助外围接口设备进行模拟装配，这样装配过程中遇到的问题工程只需修改图纸即可，大大降低了生产周期和成本。同时，对于虚拟装配的仿真结果可以视频输出，从而可以方便地对工人进行生产培训。

4）模拟器：目前国内外结合虚拟现实技术制造的模拟器主要有飞机模拟器、汽车模拟器和航海模拟器，模拟器主要由底部六自由度并联机器人、上部模拟舱（飞机驾驶

室、汽车驾驶室或轮船驾驶室）以及虚拟现实系统组成，并联机器人模拟实际飞机飞行（汽车行驶或轮船航行）的位移和速度，让操作者感受到飞行员（司机或轮船驾驶员）实际的运动惯性。在模拟舱中，操作者借助于虚拟现实系统可以感受实际飞行场景（汽车路面或海上波浪）。这样，一方面可以对操作者进行飞行或者驾驶培训，另一方面可以模拟实际飞行或者驾驶遇到的问题，寻求最佳解决方案。

虚拟现实虽然广泛应用在各个领域，但是所有虚拟现实系统的组成是一致的如图1.1所示：

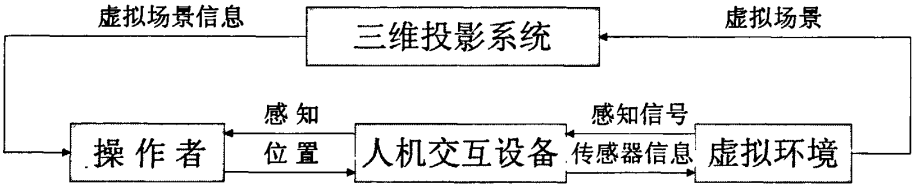


图 1.1 虚拟现实系统框图

Fig. 1.1 Block diagram of virtual reality system

由上图可知虚拟现实系统具有以下三大基本特征：

1）沉浸感（Immersion）：沉浸感指的是指操作者作为主角所感觉到得虚拟环境的真实程度。理想的虚拟环境应该能使操作者全身心地投入其中，在虚拟空间中进行有目的的漫游、观看、触摸、听取和闻嗅各种虚拟对象的特征，使操作似乎离开了自身所处的真实环境，沉浸在虚拟世界之中，成为虚拟系统的组成部分。

2）交互性（Interactivity）：交互性指的是操作者对虚拟环境中物体的可操作程度和从虚拟环境中得到反馈的自然程度。用户从虚拟环境所得到的信息，经过大脑的分析和思考，成为自己想要实施的动作或者策略，通过人机交互设备反馈给虚拟环境，实现与虚拟现实系统的交互。

3）构想性（Imagination）：构想性强调虚拟现实技术应具有广阔的可想象空间，操作者可以充分发挥自己的想象力，建立更为真实的虚拟环境，以获取更多的知识，认识复杂系统层次的运动机理和规律性。

虚拟现实系统中，沉浸感和交互性是最为重要的两大特点，而只有操作者与虚拟现实系统具有充分的交互性，才能保证操作者产生身临其境的真实感觉。因此，交互性是

实现虚拟现实系统功能的基本保证。操作者与虚拟现实系统的交互是通过人机交互设备来实现的。目前主要的人际交互设备有三维鼠标、立体眼镜、数据头盔、力反馈器和力反馈数据手套等。

传统的人机交互设备一般只能实现视觉的交互，而要增加虚拟现实系统的沉浸感以及交互性，力觉和触觉的感知是不可或缺的。例如遥操作系统的操作者需要具有交互作用的远处场景的感觉，即要求对物体轮廓表面及抓握力进行探测和感知;基于虚拟现实的外科手术训练中，手术刀端部对虚拟生理组织剖切力的测量，可以给受训人员提供触觉感知反馈等等。在虚拟环境中，由于缺乏触觉感知反馈手段，而使许许多多的信息源很难反馈和显示给异地的用户，从而难以实现更加全面的人机交互作用。显而易见，没有基于虚拟现实的接触觉、力觉感知反馈作用，就很难满足各种工程实际应用的要求。

实际操作中发现，人手是感知实际物体的力触觉最常用的手段之一。因此，虚拟现实系统中反映人手的接触觉信息的力反馈数据手套是最重要的人机交互设备之一。力反馈数据手套的研究对虚拟制造中零件的装配、虚拟雕刻、机器人遥操作、人与计算机虚拟运动和力信息交互感知等研究和发展有极其重要的意义和影响。带有力/力矩反馈的能实现多维移动和转动的数据手套是虚拟现实技术中的力控制/力显示设备，在虚拟现实技术中，操作者通过操纵力反馈数据手套，可以在计算机的虚拟环境中获得操作真实物体的感觉和身临其境的感觉，操作者能获取现场的总体印象，这将极大地提高操作者的现场感知能力，更有效、更准确地完成各种复杂任务。

因此，力反馈数据手套作为虚拟现实系统人机交互接口设备的一种重要形式，对其进行研究和探索具有重要的理论意义和极高的应用价值。

1.2 力反馈数据手套概述

力反馈数据手套的前身是数据手套，传统的数据手套只能将操作者人手在空间的姿态反映给虚拟手，而不能将虚拟手在虚拟场景中产生的力反馈给人手，这样操作者对于虚拟场景中的物体就不能有力触觉的感知。

力反馈数据手套是传统数据手套和产生反馈力的驱动器的结合体。简单地说，也就是传感器和驱动器的结合体。

力反馈数据手套在虚拟现实系统中主要有两个作用：一是将传感器测得的人手的位姿在虚拟场景中虚拟手上再现；二是将虚拟手在虚拟环境中的虚拟力通过驱动器真实地

反馈到人手上。力反馈数据手套的操作过程如图 1.2 所示：

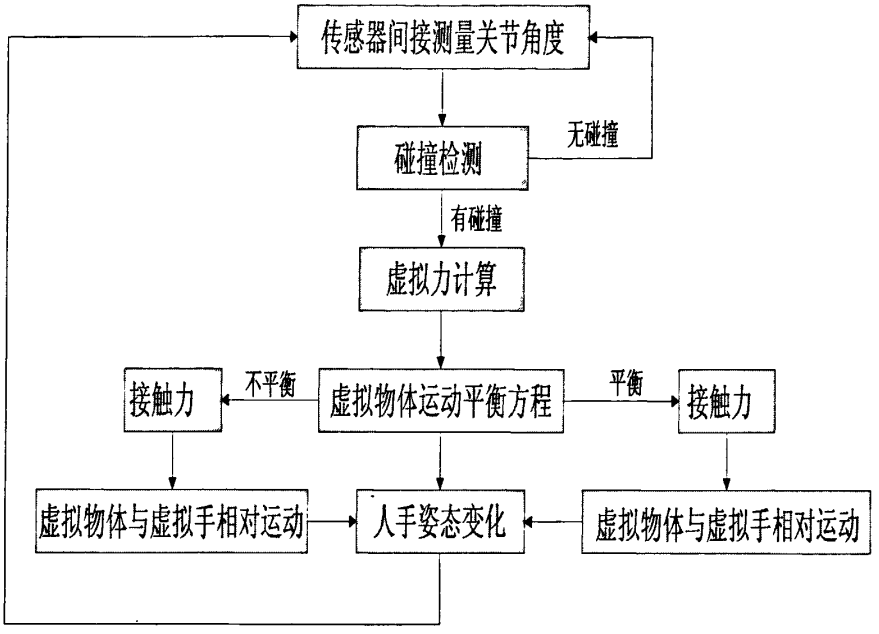


图 1.2 力反馈数据手套操作过程

Fig. 1.2 Process of force feedback data gloves

操作者佩戴力反馈数据手套在空间自由度，手套上的传感器直接（或间接）测量人手各关节的弯曲角度，在虚拟场景中的虚拟手上再现人手的实时姿态，根据虚拟手的姿态进行虚拟物体与虚拟手的碰撞检测，若无碰撞，则人手继续运动，传感器继续更新各个关节角度数值，虚拟手持续反映人手实时姿态；若二者产生碰撞，则解虚拟物体与虚拟手的运动平衡方程，若二者不平衡，则虚拟手与虚拟物体之间的作用力为接触力，二者之间的运动为相对运动；若二者平衡，则虚拟手与虚拟物体之间的作用力为抓取力，虚拟物体应与虚拟手一起运动。不论是接触力还是抓取力最终通过计算机控制力反馈数据手套上的驱动器使得反馈力在人手上再现，使操作者产生力的感觉。

1.3 国内外力反馈数据手套的研究现状与分析

1.3.1 国内外主要研究单位与产品

哈尔滨工业大学的孙中圣博士设计的基于气动人工肌肉的外骨架式力反馈数据手套如图 1.3 所示[1]，手指各个关节的弯曲角度基于平面四杆机构原理来测量得到，驱动

器采用的是气动人工肌肉外加气动制动气囊的组合，既可实现人手的自由运动，又可满足对三个手指的各个关节产生持续的反馈力。气动人工肌肉的最大输出力可达 14N，角度测量精度高，适用于不同的人手。手套重量达 690g，不适合操作长时间佩戴。

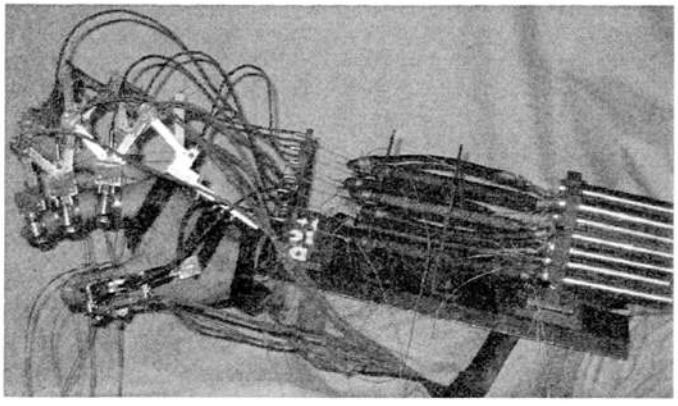


图 1.3 气动人工肌肉的外骨架式力反馈数据手套

Fig. 1.3 Pneumatic artificial muscles outer-frame force feedback data glove

中科院研制的 Cas-Grasp 力反馈数据手套如图 1.4 所示[2]，该手套采用线性电磁铁作为驱动部件，系统体积小。传输机构为外径只有 1.3mm 的蛇管-钢丝绳结构，人手弯曲角度由同类型的 Cas-Glove 的 18 个传感器测得。手套的缺点是输出力/摩擦力比较大。

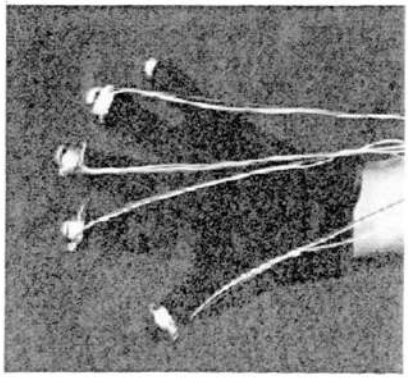


图 1.4 Cas-Grasp 力反馈数据手套

Fig. 1.4 Cas-Grasp force feedback data glove

东南大学研制了一种基于磁流变效应的力反馈数据手套如图 1.5 所示[3]，该驱动器的

核心部分是电流变液体，利用其流变特性随着粘度变化而发生剧烈变化这一特性产生输出力，最大输出力为 6N，摩擦力为 0.3N，但由于放置便液体的机构比较复杂，体积大，使得这种力反馈驱动器不能对多根手指进行力反馈。

图 1.5 基于磁流变效应的力反馈数据手套

Fig. 1.5 Magneto-rheological force feedback data glove

由美国 Virtual Technology 公司开发的 CyberGrasp 力反馈数据手套如图 1.6 所示[4]，这款手套是目前世界上唯一一款商业化成品。手指关节弯曲角度由独立数据手套上的电阻式传感器测得，驱动器由 14 个高精度直流电机和传输机构组成，能对每个手指提供持续最大 12N 的反馈力，但是手套重量达到 350g，不适合操作者长时间佩戴。

图 1.6 CyberGrasp 力反馈数据手套

Fig. 1.6 CyberGrasp force feedback data glove

美国罗格斯（Rutgers）大学的 Mourad Bouzit 设计了一种基于力矩电机驱动的 LRP

外骨架式力反馈数据手套如图 1.7 所示[5]，手指各个关节弯曲角度测量是基于平面丝杆机构原理，通过安装在电机轴上的光电编码器测量相邻连杆之间绳子的长度变化来计算的。驱动器由直流力矩电机和腱鞘传输系统组成，对每个手指关节能够提供最大力矩值为 1.4Nm。为了减轻手套重量，驱动器和光电编码器都放在原理手指端，但这样导致角度测量系统离手指较远，角度测量的精度不能保证。连杆机构使得手套适应于不同的人手，但手套的重量还是接近 350g，对操作者来说还是偏重了些。

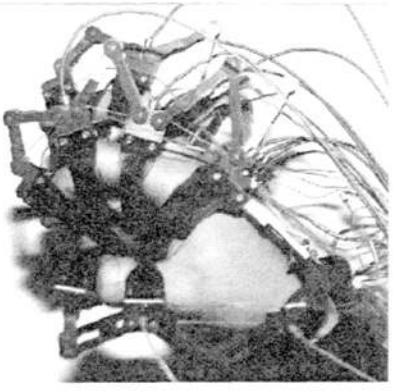


图 1.7 LRP 外骨架式力反馈数据手套

Fig. 1.7 LRP outer-frame force feedback data

美国罗格斯（Rutgers）大学的 Grigore Burdea 设计的 The Rutgers Master-ND 力反馈数据手套如图 1.8 所示[6]。

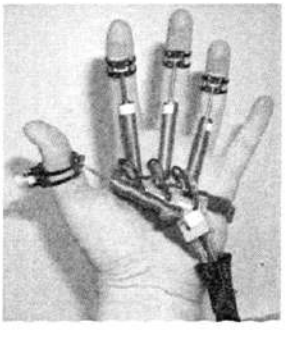


图 1.8 The Rutgers Master-ND 力反馈数据手套

Fig. 1.8 The Rutgers Master-ND force feedback data glove

四个微型气缸通过球形关节安装在 L 型底座上，气缸可绕底座左右旋转和上下摆动，气缸活塞杆与手指关节相连接，手指可以进行内收/外展和弯曲/伸展，结构简单。由红外传感器测得的活塞杆位移和霍尔非接触传感器测得气缸的角度值可以间接得到手指各个关节的弯曲角度，气缸的伸缩运动即可为手指提供输出力。由于气缸的材料为玻璃-石墨，使得手套摩擦力很低，约为 14mN，而手套的最大输出力可达 14N。活塞杆的行程最大可达 44mm，可以适用于不同的人手，手套总体质量仅为 80g。这款手套在摩擦力、输出力和重量三个方面都要优越于其它力反馈数据手套，缺点就是由于安装在手掌上，使人手的运动范围受到一定的限制，最大只能达到实际人手运动最大幅度的55%左右。

日本东京大学设计 Sensor Glove Ⅱ外骨架式力反馈数据手套如图 1.9 所示[7]，平面连杆机构安装在手指各个关节上，手套共有 20 个自由度，能对所有手指关节产生反馈力，关节角度由安装在连杆上的旋转编码器间接测量得到，驱动器由直流电机和绳索传输系统构成，为了减轻手套重量，驱动器放置在远离手套的地方，手套的缺点是摩擦力较大。

图 1.9 Sensor Glove Ⅱ力反馈数据手套

Fig. 1.9 Sensor Glove Ⅱ force feedback data glove

日本庆应义塾大学(Keio University)的 Tatsuya Koyama 设计的 Multi-fingered master hand 力反馈数据手套如图 1.10 所示[8]，该手套的角度测量和驱动器都集中在平行的四杆机构上，四杆机构通过另外一根独立连杆相连，通过电位计测得四杆机构测得两个角度间接计算得到手指弯曲角度。该手套重量轻结构简单，但是输出力最大只有 3N 左右，而摩擦力却达到 0.2N。

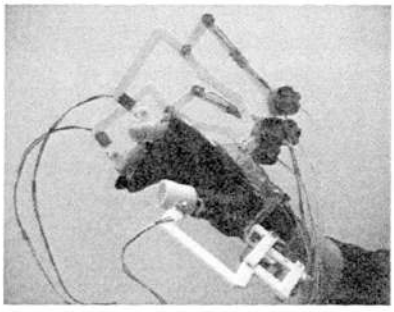


图 1.10 Multi-fingered master hand 力反馈数据手套

Fig. 1.10 Multi-fingered master hand force feedback data glove

1.3.2 现有力反馈数据手套对比分析

由以上关于国内外目前所研制的力反馈数据手套可知，若从驱动安装位置来考虑，可将力反馈数据手套分为外骨架式和内置式两种。外骨架式力反馈数据手套驱动器安装在手背上，如哈尔滨工业大学、中科院、美国 Virtual Technology 公司、美国罗格斯大学的 Bouzit 和日本庆应义塾大学所设计都是属于外骨架式的。而东南大学和美国罗格斯大学所设计的力反馈数据手套则都是将驱动器安置在手上，属于内置式的。外骨架式重量大，运动空间自由，可对手指的多个关节输出反馈力。而内置式结构简单，重量轻，但是使得手指的运动空间受到一定的限制。

从力反馈数据手套驱动器的驱动形式来看主要有三种：1 电驱动、气动驱动和电流变液体驱动[9]。电驱动一般采用的是直流电机，气动驱动一般采用的是气动人工肌肉或者微型气缸，电流变液体驱动一般利用的是智能材料的磁流变效应。

从力反馈数据手套手指关节弯曲角度测量来看有两种形式，一种是通过商品化的数据手套直接测得，如 Cyber Grasp 等；另外一种是传感器间接测量得到，如 LRP 和 The Rutgers Master-ND 等。通过商品化的数据手套测量角度大大增加了力反馈数据手套的造价。因此，力反馈数据手套的设计者一般倾向于通过传感器间接测量手指关节的弯曲角度。

1.3.3 当前力反馈数据手套的主要研究内容与研究方向

力反馈数据手套的本质是在获取人手运动姿态的同时，根据抓取物体的状态施加虚拟力到相应的受力关节，产生实际人手抓取的力觉感受，力反馈数据手套的量度则是要

遵循小体积、低摩擦佩戴安全舒适等三个原则。因此，力反馈数据手套的研究内容与方向主要为以下几个方面：

1）驱动器的选择：目前常用的驱动器有直流电机、气动人工肌肉和低摩擦气缸。适用性较强的驱动器的要求是重量轻、体积小、输出力大和摩擦力小，并且要求驱动器能方便地和人手结合在一起，使得力反馈数据手套能够将人手的位姿简易地反馈给虚拟手。

2）机械结构的设计：机械结构设计遵循两个原则：一是力反馈数据手套是采用外骨架式还是采用内置式；二是如何和驱动器恰当地结合实现关节角度测量。外骨架式重量大，运动范围也大；内置式重量轻，运动空间却受限制。设计角度测量原理机构和传感器位置合理布置是实现角度测量的两个关键。

3）虚拟场景的建立：建立逼真的虚拟场景是利用力反馈数据手套进行虚拟交互的前提条件。虚拟场景的建立主要包括虚拟手的建模、抓取对象的动态模型的建立、虚拟力的计算以及信息交互等。现行的力反馈数据手套交互系统大部分都是基于 3 维图形工业标准 OpenGL 并结合 MFC 类库开发的，这种方式逼真度远远不够，不能提供良好的沉浸感。法国达索公司开发的虚拟软件 Virtools 模型逼真，场景跟现实接近，结合三维立体投影系统具有很好的沉浸感和逼真度。笔者认为利用 Virtools 提供的二次开发环境，若能将力反馈数据手套在 Virtools 中实现很好地交互使用，将克服以往力反馈数据手套系统逼真度不够的瓶颈。

4）输出力控制系统设计：将虚拟场景中的产生的虚拟力实时、精确地反馈到人手上是控制系统设计的关键。基于力反馈数据手套的虚拟交互系统由于传感器、传输系统以及摩擦力的存在往往导致控制系统实时性不强，实际输出力与虚拟力存在较大偏差等问题。因此，控制方法的设计与优化也是基于力反馈数据手套的虚拟交互系统的需要研究的一大关键。

1.4 课题主要研究内容

1、以人手为研究对象，分析人手和虚拟手模型。其中包括建立人手运动简图模型的建立、虚拟手的建模方法探讨、虚拟手碰撞检测算法学习、虚拟手抓取技术研究和虚拟力的计算。

2、根据人手模型的所有特性，设计并制作一套力反馈数据手套样机。其中包括驱

动器的选择、机械结构设计与加工和传感器的设计三个方面的内容。

3、以研制的力反馈数据手套样机为对象，对样机进行分析。其中包括运动学分析、反馈力控制以及样机参数评估，样机参数包括摩擦力、运动范围、输出力大小和重量等。

4、以研制的力反馈数据手套样机为对象，研究其实验系统。其中包括驱动器静态特性、角度测量动特性以及输出力控制系统的研究。

第 2 章 人手和虚拟手模型研究

在进行力反馈数据手套的设计之前，对人手模型的认识是必须的一个前提条件。只有正确分析了人手模型的机械运动特性，才有可能设计出合理实用的力反馈数据手套，才能使得操作者戴上所设计的力反馈数据手套之后能实现人手的各种运动姿态，最终能够保证在虚拟手上再现人手的实时位姿。同时，只有建立了虚拟手模型并认识虚拟手模型的运动特性，才能得到虚拟手与虚拟场景中的物体之间相互作用的虚拟力，这个则是力反馈数据手套能够提供力触觉的基础。

2.1 人手运动简图模型

2.1.1 人手生物学模型

从生物学角度来看，人手同人体其它部位一样，都是由皮肤、肌健、血管、神经、骨关节及韧带组成，共 19 块骨骼和 16 个关节。骨骼通过关节相连，不会发生变形，可以看作是刚体。人手受力都是从肌肉变形开始的，肌肉产生的力或者力矩通过肌腱控制关节的运动，进而带动各段指骨的运动。可以看出，骨骼在人手运动中发挥主导作用，骨骼的运动决定了人手的姿态。因此，在分析人手模型时，忽略皮肤及其软组织，只考虑人手的骨骼模型，如图 2.1 所示。骨骼模型具有刚体的性质，研究其运动学较为简单，这就可以将人手的运动姿态看作是完全取决于关节的转动。

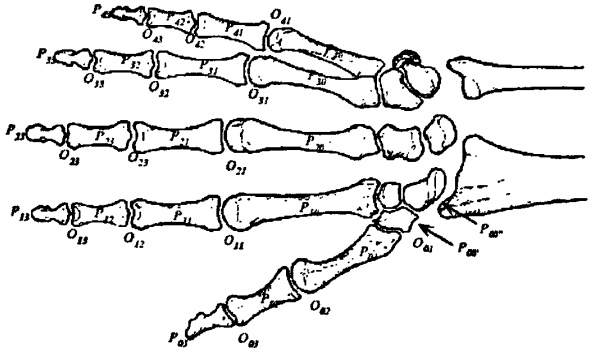


图 2.1 人手骨骼模型

Fig. 2.1 Model of hand skeleton

从人手外表上看，大拇指似乎比其它手指少一段指骨，其实本质上不是这样的。从图 2.1 可以看出，由于大拇指与手腕连接两块特殊骨骼 $P_{00'}$和 $P_{00''}$的存在，可以将大拇指看作是与其它手指的骨骼组成是一样的，也就是说人手的每个手指都是由三段指骨(P_{ij})和 三个关节(O_{ij})组成，三段指骨分别是末端指骨、中段指骨和近端指骨，三个关节分别是末端指关节、近端指关节和掌骨指关节。任意一根手指的运动特点就能代表其余手指的运动特点，而不用单独对大拇指进行特殊的运动分析。

2.1.2 人手自由度

手指的运动方式有两种：弯曲/伸展和内收/外展。末端指关节和近端指关节只能进行弯曲或者伸展，相当于机械运动副的转动副，只有一个转动自由度，如图 2.2 所示：

图 2.2 手指关节转动副

Fig. 2.2 Revolute pair of finger joint

掌骨指关节不但能进行弯曲或者伸展运动，还能进行内收或者外展运动，相当于机械运动副中的球销副，具有两个转动自由度，如图 2.3 所示。

图 2.3 掌骨指关节球销副

Fig. 2.3 Sphere-pin pair metacarpal finger joint

从以上分析可知，每根手指在空间都具有 4 个自由度，3 个弯曲/伸展的自由度和 1 个内收/外展自由度，再加上人手手腕在空间有 6 个自由度，那么人手一共是 26 个自由度。也就是说，人手的 26 个自由度决定了人手的运动方式及其运动特点。

2.1.3 人手运动特点

由于人手自身的特性，26 个自由度的人手跟具有相同自由度的机构的运动特点是由差别的，实际人手的运动特点如下：

1）人手的末端指关节和近端指关节二者的弯曲/伸展运动是相互约束的，二者的关系如下式：

$$\theta_3 = 0.46 * \theta_2 + 0.083 * \theta_2^2 \qquad (2.1)$$

虚拟手的模拟中，二者的关系不用如此精确，一般用三分之二来代替即可，这样能带来计算和力反馈控制的方便，而且误差也可以接受。

2）每个手指的三个关节与手指的“中轴”始终处于同一平面上，三个关节的弯曲/伸展运动只能在同一平面进行。如图 2.4 所示：

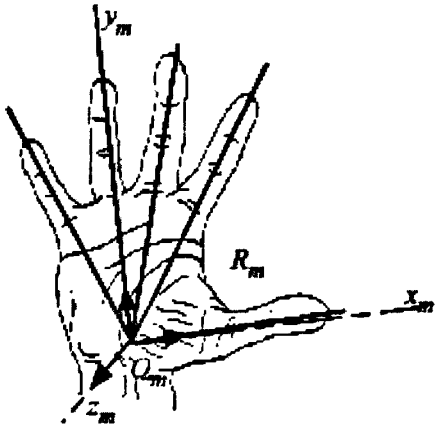


图 2.4 人手坐标系

Fig. 2.4 Coordinate system of hand

从人手坐标系图可以看出，手指的弯曲/伸展运动只能在垂直于 $x_m o_m y_m$ 的平面上进行。

3）掌骨指关节弯曲/伸展和内收/外展的轴线可以认为是垂直的，如图 2.5 所示：

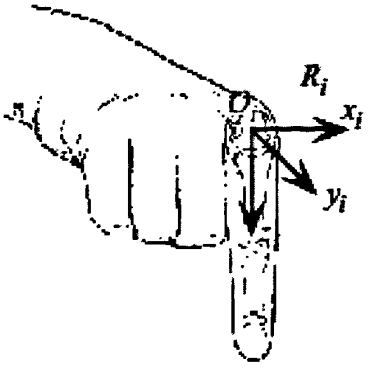


图 2.5 掌骨指关节坐标系

Fig. 2.5 Coordinate system of metacarpal finger joint

从上图可以看出，掌骨指关节的弯曲/伸展运动只能在 $y_iO_iz_i$ 平面上进行，而内收/外展运动只能在 $x_iO_iz_i$ 平面进行，二个平面是始终垂直的。

4）人手的运动范围是有限的，掌骨关节的弯曲/伸展角度范围是 0-90°，近端指关节弯曲/伸展的范围是 0-120°，末端指关节的弯曲/伸展的范围是 0-80°，手指内收/外展的范围为-25°至 25°，人手手腕上下翻转的角度是-90°到 90°。

2.1.4 建立人手运动简图模型

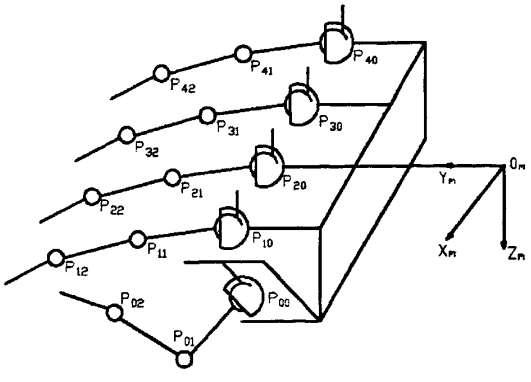


图 2.6 人手运动简图

Fig. 2.6 Kinematic sketch of hand

通过以上分析可以得出人手运动简图模型如图 2.6 所示，人手的运动简图模型分析：

每根手指看作是由三段连杆组成的平面连杆机构，每个平面连杆机构都包含两个转动副和一个球销副，球销副两个转动的轴线相互垂直，手腕处建立基础坐标系，有 6 个自由度，决定了人手在空间的位置。

2.2 虚拟手研究

力反馈数据手套交互的对象是虚拟手，虚拟手在人机交互中的流程图如图 1.2 所示：

由流程图可以看出，要实现完虚拟手的人机交互的整个过程，逼真的虚拟手模型是物质基础，碰撞检测算法、抓取技术和虚拟力计算是三个技术条件，虚拟手的完全研究也正是包含这四个方面的。

2.2.1 虚拟手建模方法探讨

虚拟手建模包括几何模型和运动学模型两部分的建立。几何模型描述的是虚拟手的几何特征、纹理以及材质等，描述的是人手的物理特性。运动学模型描述的是人手各部分之间的运动关系，建立正确的运动学模型是实现操作者和虚拟手发生交互的基础。

1、虚拟手几何模型

最终建立的几何模型好坏判断的依据是虚拟手与人手的相似度，也就是说看虚拟手相比较人手的是否逼真。

可建立虚拟手几何模型有很多，一般的三维建模软件如 Solid works、Pro/E 等都是可以实现的，但普通的三维建模软件的优势在于体现机械零件的外形特征以及约束关系，而在材质、纹理等逼真度的反映较差，这里要讨论的是如何利用 3DS MAX 进行虚拟手的几何建模。3DS MAX 是美国 Autodesk 公司推出的一款三维动画制作软件，它在模型的建立与渲染上以一种崭新的面貌呈现在用户面前，利用 3DS MAX 建立的模型逼真度很好。

由于人手并不是一个简单的整体，因此要对每段指骨以及手掌分别建模，如图 2.7 所示，将人手分成 16 个部分进行分别建模。

在 3DS MAX 建立好的模型导入到虚拟场景中一般有两种方式。第一种是利用三维数据转换软件，如 3D Connection 等将虚拟手几何模型转换成虚拟现实软件可读的文件格式，转换的过程中要注意避免模型文件信息的丢失。第二种是直接利用虚拟现实软件与 3DS MAX 之间的数据接口直接数据读进虚拟现实软件中，如美国 PTC 公司的

Mockup、法国达索公司的 Virtools 等。

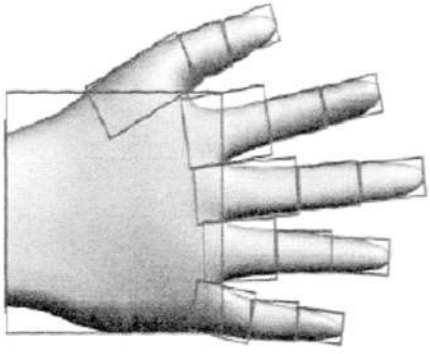


图 2.7 人手分解图

Fig. 2.7 Decomposition picture of the hand

2、虚拟手运动学模型

虚拟手运动学模型的目的就是要找到上述 16 个部分之间的运动学关系，由于人手五根手指运动学的共性，这里以食指为例研究手指各段指骨以及掌骨之间的运动学关系。D-H 理论是分析平面连杆机构各杆之间运动学关系的最佳方法，根据 D-H 理论建立食指的 D-H 坐标系如下图 2.8 所示：

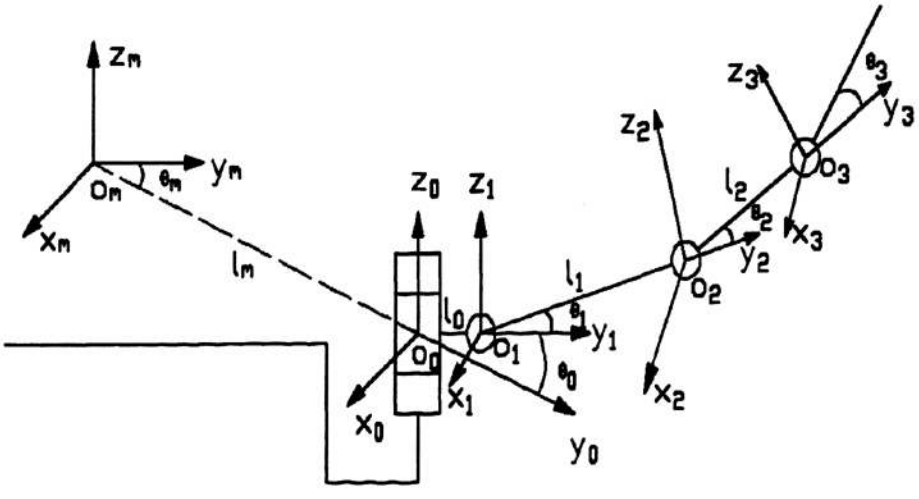


图 2.8 食指 D-H 坐标系

Fig. 2.8 D-H coordinate system of index finger

手腕处坐标系 $o_mx_my_mz_m$ 为基础坐标系，食指有四个自由度，掌骨指关节可以看作是两个长度为 0 的连杆的单自由度关节，内收/外展关节建立坐标系为 $o_0x_0y_0z_0$，弯曲/伸展关节建立的坐标系为 $o_1x_1y_1z_1$，近端指关节和末端指关节依次建立的坐标系为 $o_2x_2y_2z_2$ 和 $o_3x_3y_3z_3$。手指各关节坐标系原点建立在关节处，基础坐标系原点在腕关节中心处。所有坐标系的 x 轴方向都是根据右手法则确定，基础坐标系 y 轴平行指向手指，z 轴垂直手掌向上。其它坐标系的 y 轴为相邻两坐标原点的连线方向，z 轴垂直连线向上。手指内收/外展关节坐标系相对基础坐标系的距离为 l_m，偏角为 θ_m，手指各连杆长度为 l_i（i=0，1，2，3），手指相邻连杆之间的夹角为 θ_i（i=0，1，2，3）。根据空间机构学理论，各相邻坐标系之间的变换矩阵为：

$$ {}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & l_{i-1} \\ \sin\theta_i\cos\beta_{i-1} & \cos\theta_i\cos\beta_{i-1} & -\sin\beta_{i-1} & -d_i\sin\beta_{i-1} \\ \sin\theta_i\sin\beta_{i-1} & \cos\theta_i\sin\beta_{i-1} & \cos\beta_{i-1} & d_i\cos\beta_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.2} $$

式中：

d_i—相邻连杆之间的距离；

l_{i-1}—连杆长度；

β_{i-1}—为相邻连杆之间的扭角；

θ_i—为相邻连杆之间的夹角；

由图 2.8 易得食指坐标系的 D-H 参数如下表：

表 2.1 食指坐标系 D-H 参数

Table. 2.1 D-H parameters of index finger coordinate system

i	θ_i	β_{i-1}	l_{i-1}	d_i
0	θ_0	0°	l_m	0
1	θ_1	-90°	0	0
2	θ_2	0°	l_1	0
3	θ_3	0°	l_2	0

D-H 参数分别代入式(2.1)中，即可分别求得坐标系之间的变化矩阵。

坐标系 0 相对于坐标系 m 的转换矩阵为：

$$ {}^{0}A_{m}=\begin{bmatrix}\cos\theta_0 & -\sin\theta_0 & 0 & l_m\\ \sin\theta_0 & \cos\theta_0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{2.3} $$

坐标系 1 相对于坐标系 0 的转换矩阵为：

$$ {}^{1}A_{0}=\begin{bmatrix}\cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ -\sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{2.4} $$

坐标系 2 相对于坐标系 1 的转换矩阵为：

$$ {}^{2}A_{1}=\begin{bmatrix}\cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_1\\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{2.5} $$

坐标系 3 相对于坐标系 2 的转换矩阵为：

$$ {}^{3}A_{2}=\begin{bmatrix}\cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & l_2\\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{2.6} $$

根据矩阵乘法可以计算得出指端相对于手掌的腕关节基础坐标系的转换矩阵：

$$ {}^{3}A_{m}={}^{0}A_{m}\,{}^{1}A_{0}\,{}^{2}A_{1}\,{}^{3}A_{2} \tag{2.7} $$

将式（2.3）、(2.4)、(2.5）和（2.6）代入式（2.7）得：

$$ {}^{3}A_{m}=\begin{bmatrix}c_0c_{123} & -c_0s_{123} & -s_0 & l_0c_0c_{12}+l_1c_0c_1+l_m\\ s_0c_{123} & -s_0s_{123} & c_0 & l_2s_0c_{12}+l_1s_0c_1\\ -s_{123} & -c_{123} & 0 & -l_2s_{12}-l_1s_1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{2.8} $$

式中：

$$s_0 = \sin\theta_0, c_0 = \cos\theta_0, c_1 = \cos\theta_1, s_1 = \sin\theta_1;$$
$$s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2), c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2);$$
$$s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3), c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3);$$

有了手指相对于手腕基础坐标系的坐标变换矩阵，虚拟手几何模型的 16 个独立的部分并不是完全独立的，而是像实际人手一样，16 个部分之间是存在联动和一定的约束关系的，这样就使得虚拟手不仅从几何形状上与人手一致，而且还使得虚拟手与人手的运动特点也保持一致，为人手与虚拟手的交互奠定了良好的基础。

2.2.2 虚拟手碰撞检测

在与虚拟手进行交互的虚拟场景中，当虚拟手进行物体的抓取之前，需要及时判断虚拟手与被抓取物体之间的接触情况，也就是要对虚拟手与物体之间进行碰撞检测。碰撞检测是虚拟场景中虚拟手与其它物体的交互基础，是进行虚拟仿真的一个先行步骤。虚拟手碰撞检测研究的主要内容是建立最优化的碰撞检测算法，衡量碰撞检测算法的两个重要指标是实时性和精确性。

对于两个几何模型来说，常用的碰撞检测算法主要包括空间分解法和层次包围盒法两种。本文选择层次包围盒法作为虚拟手与物体之间的碰撞检测算法进行研究。

包围盒算法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，通过构造树状层次结构可以越来越逼近真实的物体。当对两个物体碰撞检测时，首先检查两者的包围盒是否相交，若不相交，则说明两个物体未相交，否则再进一步对两个物体作检测，因为包围盒的求交算法比物体求交算法要简单的多，所以可以快速排除很多不相交的物体，从而大大加快和简化了碰撞检测算法。常用的包围盒有 AABB 层次树（Aligned Axis Bounding Box）和 OBB 层次树（Oriented Bounding Box），本文研究的是基于 OBB 包围盒（方向包围盒）的碰撞检测算法。

OBB 包围盒方向具有任意性，从而可以根据被包围对象的几何特征尽可能地紧密地包裹对象，这种紧密性可以成倍地减少参与相交测试的包围盒的数目和基本几何元素的数目,大大优化了碰撞检测模型，提高了实时性和精确性。这样，就使得 OBB 包围盒算法的性能要优于其它算法。

虚拟现实软件 Virtools 提供了多种碰撞检测的响应模块，其中包括基于 AABB 包围

盒、球形包围盒和 OBB 包围盒等算法等。将虚拟手模型从 3DS MAX 中导入到 Virtools 中去，利用 Virtools 提供的碰撞 BB 即可实现基于 OBB 包围盒算法的虚拟手的碰撞检测。

2.2.3 虚拟手抓取技术

虚拟手与虚拟场景的虚拟物体发生碰撞并不是力反馈数据手套与虚拟手交互的最终行为，虚拟手的最终目的是要能够实现抓起移动物体，因此有必要对虚拟手抓取物体的技术进行探讨（本文的研究只针对规则的方形物体展开）。

抓取技术研究的目的是要建立合适的抓取规则，根据抓取规则判断虚拟手何时才能使被抓取的物体进行移动，抓取规则的建立要把握好度，既不能归于简化，也不能过于繁琐。抓取规则太简单的话会造成虚拟手误抓，不能抓持上想要抓取的对象；抓取归于过于复杂的话就会造成计算量的大大增加，进而延缓整个虚拟现实交互系统，给系统带来滞后。

本文从人手抓取姿态和抓取稳定性的特点出发，提出了一种修正的基于点接触平面法矢的虚拟手抓取规则。该规则能使虚拟手正确地抓取虚拟物体,并且抓取姿态比较真实自然。该抓取规则主要包括以下两个方面：

1）要想抓住方形物体，必须至少有三个或者三个以上的手指（手掌）与物体接触，并且其中有一个手指必须是大拇指，因为实际人手抓取物体时都是有大拇指参与的。另外，这三个接触点必须不能在同一条直线上，也就是说人手要抓住物体的至少两个面才可能抓住物体。如图 2.9 所示：

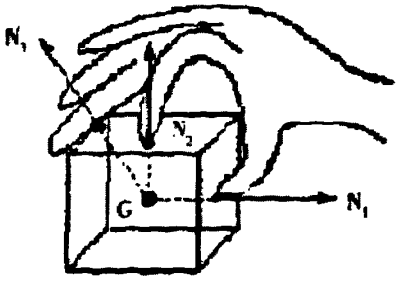


图 2.9 抓取规则 1

Fig. 2.9 Grape principle 1

图中：

G—物体质心；

N_1、N_2、N_3—虚拟手与物体接触面的法向向量；

2）由上图可以看出，实际抓取物体时，接触面得法向量的角度值必须大于某一特定的值才可能抓起物体，这个角度值称之为临界抓持角度，一般将其设定为 90°（摩擦系数较大的物体可以将临界角度值减小）。抓取 2 可以描述为：接触面的所有法向量两两之间的夹角至少有一个必须是大于等于 90°，如图 2.10 所示：

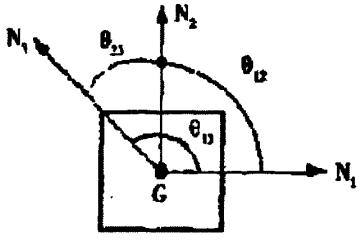


图 2.10 抓取规则 2

Fig. 2.10 Grape principle 2

实际抓取计算过程如下：

设图 1 中设三个接触面的中心为 A（x1,y1,z1），B（x2,y2,z2）和 C（x3,y3,z3）,被抓物体的质心为 G（x0,y0,z0）。

第一步，首先判断 A、B、C 三个接触面得中心是否处于三个平面的坐标域内；

第二步，计算三个法向量之间的夹角θ_{12},θ_{13}和θ_{23}，如果至少有一个大于 90 度，则认为抓取。

根据向量乘法易得夹角的计算公式：

$$\theta_{12}=\arccos\frac{(x_1-x_0)(x_2-x_0)+(y_1-y_0)(y_2-y_0)+(z_1-z_0)(z_2-z_0)}{\sqrt{(x_1-x_0)^2+(y_1-y_0)^2+(z_1-z_0)^2}\cdot\sqrt{(x_2-x_0)^2+(y_2-y_0)^2+(z_2-z_0)^2}}$$

$$\theta_{13}=\arccos\frac{(x_1-x_0)(x_3-x_0)+(y_1-y_0)(y_3-y_0)+(z_1-z_0)(z_3-z_0)}{\sqrt{(x_1-x_0)^2+(y_1-y_0)^2+(z_1-z_0)^2}\cdot\sqrt{(x_3-x_0)^2+(y_3-y_0)^2+(z_3-z_0)^2}}$$

$$\theta_{23}=\arccos\frac{(x_3-x_0)(x_2-x_0)+(y_3-y_0)(y_2-y_0)+(z_3-z_0)(z_2-z_0)}{\sqrt{(x_3-x_0)^2+(y_3-y_0)^2+(z_3-z_0)^2}\cdot\sqrt{(x_2-x_0)^2+(y_2-y_0)^2+(z_2-z_0)^2}}$$

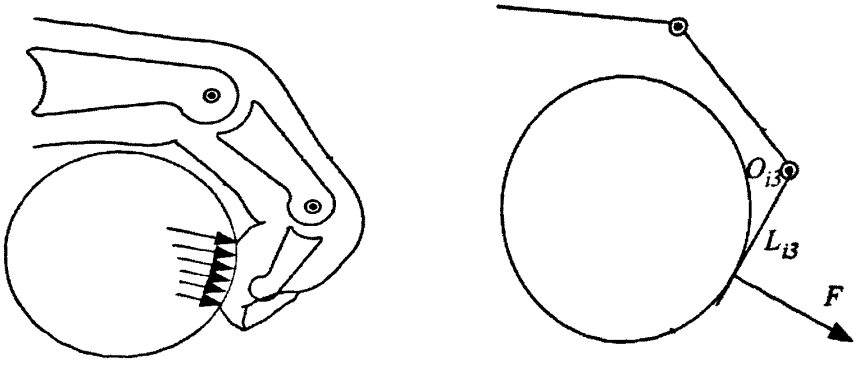
抓取规则 1 和 2 是相互制约，缺一不可的。只有同时满足规则 1 和 2 才认为物体被抓持，若只有规则 1 则很容易产生误抓的现象。虚拟手与物体接触满足规则 1 后还需调整虚拟手与被抓物体的相对关系使之满足规则 2 才被抓持，这样能保证被抓持物体的稳定性。抓取规则 2 考虑的是接触面得法向向量，而与物体的形状无关，因此这种抓取规则可以推广到形状各异的被抓取物体上。另外，只有在满足抓取规则 1 的前提下才开始计算法向量之间的夹角，不需要实时计算，不会造成很大的计算量以至于给系统带来滞后。

2.2.4 虚拟力

力反馈数据手套的最终目的是将虚拟手在虚拟场景中受到其它物体的作用力反馈到人手上，对碰撞检测和虚拟抓取技术的研究就是为了判断虚拟手何时受到作用力以及受到的作用力是何种类型，将这种虚拟的作用力简称为虚拟力。那么虚拟手受到的虚拟力是多大就是本节要研究的内容，只有这样人手才能感觉到与现实世界一样力的感觉。

虚拟手在虚拟场景的主要动作有碰撞和抓取两种，可以将虚拟力分为接触力和抓取力两种。

接触力发生在虚拟场景发生碰撞行为的两个物体之间。实际中接触力反映的是被接触物体表面的物体属性，如刚度、粘度等。虚拟手与物体接触的受力情况分析如图 2.11 所示：



(a) (b)

图 2.11 手指接触受力分析

Fig. 2.11 Force analysis of finger touch

手指接触物体时为面接触，受力区域为接触面，如上图（a）所示。理论上接触面上各点的受力是不同的，手指所受的接触力应为各点受力函数的积分，为了简化起见，假设手指受力为点接触，接触点在上述接触面的中心，接触力的计算简化为：

$$F = k \times x + b \times \dot{x} + u \tag{2.9}$$

式中：x—虚拟物体表面变形量；

k—虚拟物体的刚度系数；

b—阻尼系数；

u—补偿力；

补偿力可以看作是等效的摩擦力或者是实现触觉的影响力，影响触觉的力比如有：恒力、阶跃力等，大多数情况只考虑摩擦力即可。

虚拟手抓取物体克服的是虚拟物体的重力，以被抓取物体为研究对象，根据立以及力矩的平衡方程即可求得各手指的抓取力，根据前述抓取技术得抓取物体时的受力分析如图 2.12 所示：

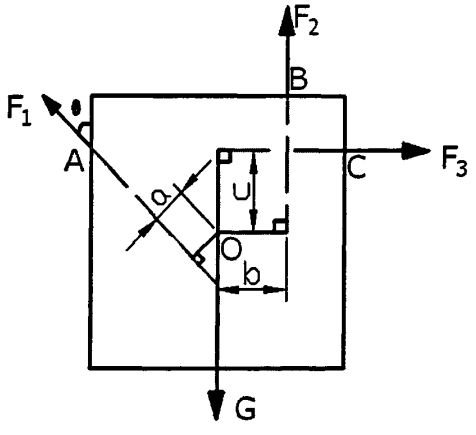


图 2.12 抓取物体受力分析

Fig. 2.12 Force analysis of grape object

O 为被抓物体质心，A、B 和 C 为虚拟手与物体接触等效作用点，G 被抓物体重力，F_1,F_2 和 F_3 分别为手指受到的虚拟抓取力，a、b 和 c 分别为质心到虚拟抓取力的距离，θ 为受力夹角，a、b、c 和 θ 这里看作是已知（详见虚拟手抓取技术 2.3.3）。

力平衡方程有两个：

$$F_1 \cos\theta + F_2 = G \tag{2.10}$$

$$F_1 \sin\theta = F_3 \tag{2.11}$$

以质心为旋转中心，列力矩平衡方程如下：

$$F_1 a + F_3 c = F_2 b \tag{2.12}$$

解方程（2.10）、（2.11）和（2.12）得各手指虚拟抓取力：

$$F_1 = \frac{b}{a + b\cos\theta + c\sin\theta} G \ , \quad F_2 = \frac{a + c\sin\theta}{a + b\cos\theta + c\sin\theta} G$$

$$F_3 = \frac{b\sin\theta}{a + b\cos\theta + c\sin\theta} G$$

这里讨论被抓物体外形是方形的情况，而力与力矩平衡方程是适用于任何形状的物体的，因此此种虚拟力的计算方法可以推广到任何被抓物体上，唯一的差异是 a、b、c 和 θ 四个参数相对于质心在数值大小上有所不同。

2.3 本章小结

本章以手为研究对象，首先从人手生物学模型出发，研究其运动学特点，得到人手的运动简图模型，人手运动简图模型是设计力反馈数据手套的基础。力反馈数据手套最终是佩戴在人手上进行操作虚拟手的，因而力反馈数据手套的运动不能制约人手的自由运动，人手的运动模型正是为了诠释人手的运动。

其次，探讨了力反馈数据手套操作并控制的对象—虚拟手的几何模型和运动学模型如何建立、虚拟手与被抓取虚拟物体之间的碰撞检测算法、虚拟手抓取物体的判定准则和虚拟手抓取物体产生的虚拟力的计算方法，为今后针对所设计的力反馈数据手套与虚拟现实软件进行人机交互操作做好了准备。

第3章 力反馈数据手套设计

力反馈数据手套的设计要满足两个方面的要求：一是能够测量人手各个手指关节实时运动的弯曲角度；二是能够提供合适的输出力实现力反馈。传统的数据手套都是靠依附在手套上的传感器测得的，这种测量方式由于标定柔性体造成的误差较大。本课题研究的目的是设计一种集角度测量和力反馈为一体的力反馈数据手套，通过设计合理的机械结构间接测量手指各关节的弯曲角度，这种测量方式虽然结构比较复杂，但是测量精度却大大提高。

3.1 力反馈数据手套结构设计

3.1.1 驱动器选择

驱动器的作用是提供输出力，力反馈驱动器的选取一般遵循以下几个原则：

1）重量轻：力反馈数据手套的主体是驱动器，手套的重量主要是由驱动器的重量决定的，如果所选的驱动重量太大就会导致佩戴手套的操作者感觉不适。

2）摩擦力小：衡量一个力反馈数据手套性能最重要的指标之一就是摩擦力的大小，当不需要力反馈数据手套对手指进行力反馈时，如果驱动器的摩擦力太大，那么人手就得克服摩擦力才能自由运动，人手就有了力的感觉，这样就直接导致了力反馈数据手套设计的失败。因此，驱动器的摩擦力必须足够小到相对于输出力来说可以忽略。

3）输出力易于控制：力反馈数据手套实际操作时，要对驱动器的输出力的大小进行实时的控制，这就要求输出力的计算模型最好为线性的，从而使控制模型较为简单。

4）安全性：力反馈数据手套是直接佩戴在操作者手上，这就要求驱动器不能对操作者造成任何的伤害。

目前国内外应用在力反馈数据手套的驱动器主要有电动和气动两种。电动驱动器常见的有电机和马达，电机和马达作为驱动器通常是放置在远离手掌的地方，不能直接安装在手上的，主要是受重量和安全性两方面因素的限制。而要想将电机或者马达的输出力传到手指上，就需要增加一套力传输系统，这样就使得手套的摩擦力增加。

近些年随着气动技术的发展，气动人工肌肉和微型气缸逐渐成为力反馈数据手套驱动器的理想选择，气动驱动器克服了电驱动器重量大和不安全的缺陷，而且气驱动器能够直接安装在手上，减小了力反馈系统的摩擦力。哈工大孙中圣研制的力反馈数据手套

选择的就是 Festo 的人工肌肉作为驱动器，但是受人工肌肉本身特性（人工肌肉输出力时必须一端固定）影响，还需设计一套制动系统配合人工肌肉使用才能满足力反馈数据手套功能要求。

综上所述，本课题选择微型低摩擦气缸作为力反馈数据手套的驱动器。只要选择的气缸摩擦力足够小，就能保证不供气时活塞杆能够与人手一起自由运动，当需要产生输出力时只要对气缸供应一定压力的气体即可。

本课题选择 SMC 公司生产 CJ2Q 低摩擦气缸作为力反馈数据手套的驱动器，如图 3.1 所示：

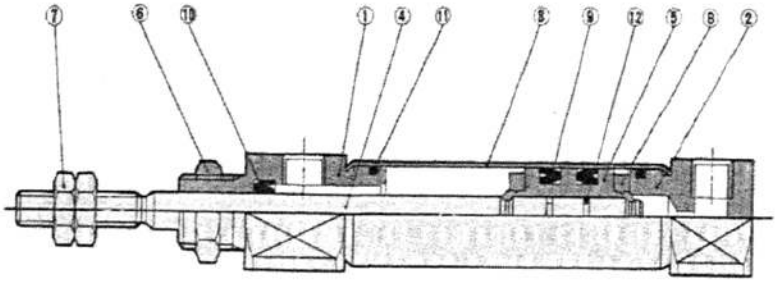


图 3.1 CJ2Q 气缸结构

Fig. 3.1 CJ2Q cylinder structure

气缸构成零部件如下表 3.1 所示：

表 3.1 CJ2Q 气缸构成零件

Tab. 3.1 Parts of CJ2Q cylinder

序号	名称	材质	备注	序号	名称	材质	备注
1	杆侧端盖	铝合金	白色	7	杆端螺母	钢材	镀镍
2	无杆端盖	铝合金	白色	8	缓冲垫	聚氨酯	
3	缸筒	不锈钢		9	活塞密封圈	NBR	低摩擦用
4	活塞杆	不锈钢		10	杆密封圈	NBR	低摩擦用
5	活塞	黄铜		11	缸筒静密封圈	NBR	
6	安装螺母	黄铜	镀镍	12	活塞静密封圈	NBR	

跟一般气缸相比，CJ2Q 气缸有三个特殊之处：

1）缸筒内侧的加工精度比一般气缸要高；

2）采用了特殊的润滑脂；

3）密封材料采用摩擦系数很小的材质；

以上三个特性决定了 CJ2Q 气缸的低摩擦性能。

力反馈数据手套根据驱动器安放位置不同分为外置式和内骨架式两种，外置式是将驱动器安置在手背上，内骨架式是将驱动器安置在手掌内部。气缸缸筒为刚体的特性决定了选用 CJ2Q 为驱动器的力反馈数据手套只能采用内骨架式结构，内骨架式手套的不足是使人手的运动范围受到一定的限制。为了尽可能地满足人手的运动范围，CJ2Q 的缸径应该越小越好，行程越大越好，而行程的大小应该是由气缸的长度和人手的大小共同决定的。同时，为了使气缸与其它安装件方便连接，选择气缸的连接方式为双耳环结构；为了使气缸位移可测，选择活塞上带内置磁环，最终气缸的型号为：CDJ2QD10-30-B，如图 3.2 所示：

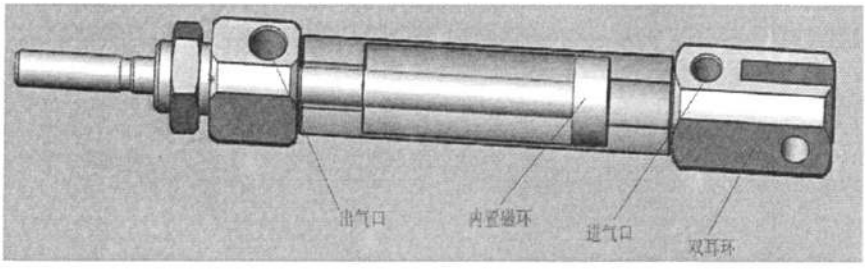


图 3.2 CDJ2QD10-30-B 气缸

Fig. 3.2 CDJ2QD10-30-B cylinder

气缸 CDJ2QD10-30-B 是不能直接使用的，对于力反馈手套的驱动器来说，人手从完全松开的状态到抓取物体之前是不受力的，这时候并不要求气缸产生输出力，同时人手从松开物体到完全伸展的过程也是不受力的，依据这两个过程来看所采用的气缸只要是单作用的即可，因此可以将气缸的有杆端盖以及露在外部的活塞杆部分截去，这样不但使气缸成为单作用的，而且还使得气缸尺寸从长度上大大减小，增加了人手戴上力反馈数据手套的运动范围。

3.1.2 机械结构设计

手指的运动包括弯曲/伸展和内收/外展两种运动，这就要求气缸能够在手掌内部能够上下摆动和左右摆动，再结合上活塞的伸缩运动就可以完全满足手指的两种运动，最终设计的气缸安装的机械结构如图 3.3 所示：

气缸与底座之间的连接副需要上下摆动和左右摆动两个自由度，上图所示机械连接结构是由并联机器人上常见的万向轴连接副衍化而来，一般的万向轴连接副由两个虎克铰和一个十字轴组成。这里，气缸上的耳环通过螺栓与虎克铰连接，底座为虎克铰的变形，由于受尺寸（转轴仅为 3mm，加工不方便）的限制，十字轴改成用两个同大小的销轴固定在具有两个垂直孔的长方体上，底座固定在手掌上，这样气缸便满足了绕底座的两个转动自由度。

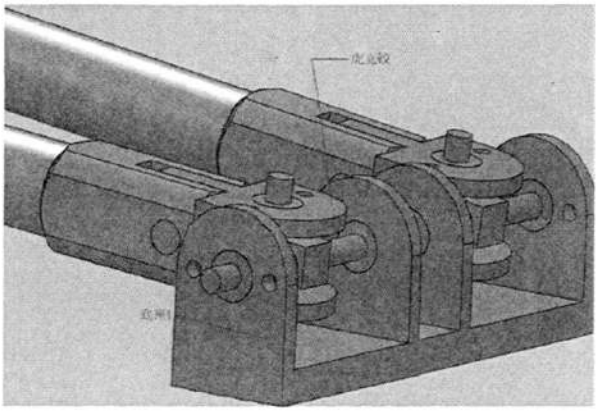


图 3.3 气缸安装的机械结构

Fig. 3.3 Mechanical structure of cylinder assembly

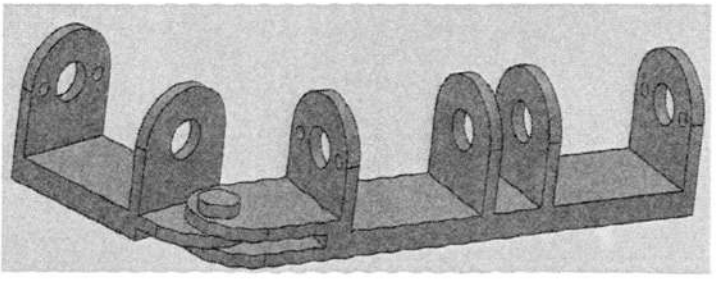


图 3.4 手套整体底座

Fig. 3.4 Whole base of the force feedback data glove

受人手尺寸和气缸最小缸径为 10mm 的限制，一只手上只能装三个气缸，也就是只能对三个手指产生力反馈，分别为大拇指、食指和无名指，最终设计的手套整体底座如图 3.4 所示。

从图中可以看出，手套整体底座并不是一个整体，对应大拇指的气缸底座相对于另外两个手指的底座位置是可调的，这种设计的目的的是为了适应不同大小的人手，并且对于同一操作者来说左右手都是适用的。

由驱动器和机械结构部分组成的力反馈手套结构图如下图 3.5 所示：

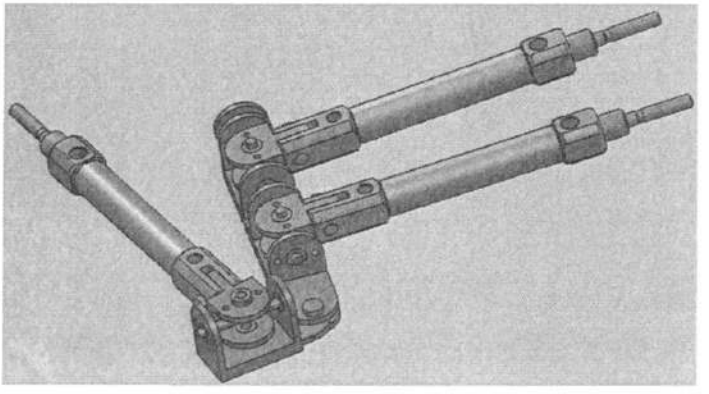


图 3.5 力反馈数据手套设计结构

Fig. 3.5 Designed structure of the force feedback data glove

3.1.3 力反馈数据手套总体设计

衡量力反馈数据手套设计的成败的两个关键因素就是看所设计的结构能否实现角度测量和输出反馈力这两个功能，通过上诉驱动器的选用和机械结构的设计使得人手在戴上手套能与人手一起自由运动，同时在需要力反馈时能够提供适当大小的输出力。而且，只要气缸活塞的位移、气缸左右摆角和气缸上下摆角确定，人手的姿态就是确定的，因此只要将力反馈数据手套以上三个参数实时测量出来，就能够确定操作者人手的实时位姿。

最终设计并加工以及组装成的力反馈数据手套如下图 3.6 所示：

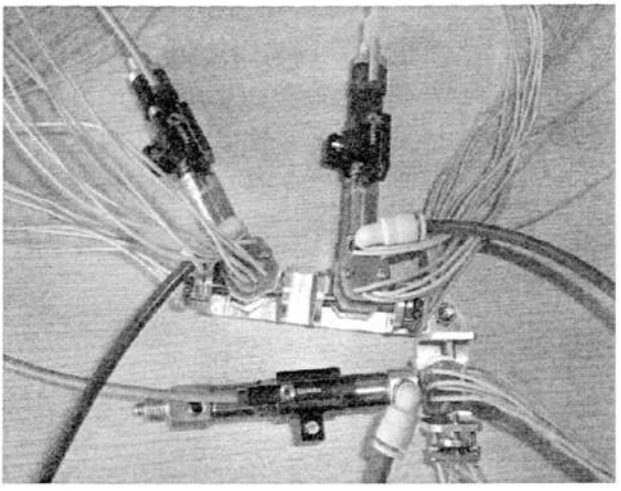


图 3.6 力反馈数据手套实物

Fig. 3.6 Physical of the force feedback data glove

3.2 传感器工作原理

3.2.1 角度传感器工作原理

角度传感器采用的是美国霍尼韦尔（Honeywell）公司生产的各向异性磁阻传感器HMC1512，可测的是从磁铁出发的磁场的方向角，传感器的特性如下：

1）不需要稀土元素磁铁：不像霍尔效应传感器需要钐钴磁铁或类似的稀土元素磁铁，HMC1512 可以和铝镍钴磁钢或陶瓷类磁钢一起工作；

2）宽角度范围：HMC1512 角度范围为± 90°，分辨率 0.07，满足人手运动范围；

3）有效的线性范围：传感器和磁铁之间的线性距离最大可为 8mm；

4）非接触感应：无可移动的部件，大大减小了摩擦力，提高了力反馈数据手套的性能；

5）小体积：HMC1512 为 8 针的表面贴装式封装，外形尺寸仅为 5mmx4mmx1.2mm，非常适用于力反馈是数据手套；

6）较大的信号输出：HMC1512 的工作电压可为 1-25V，当供电电压为 24V 时，输出电压峰值可达接近 300mV，测量简单。

HMC1512 的测量原理如下图 3.7 所示：

小磁铁与轴一起旋转，HMC1512 不动，小磁铁产生的磁场方向相对于 HMC1512 一直在变化，通过感应磁场方向的变化来测量轴的转角。

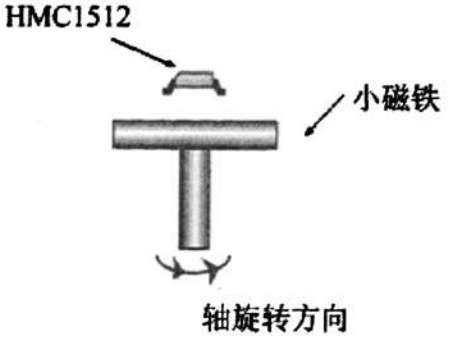
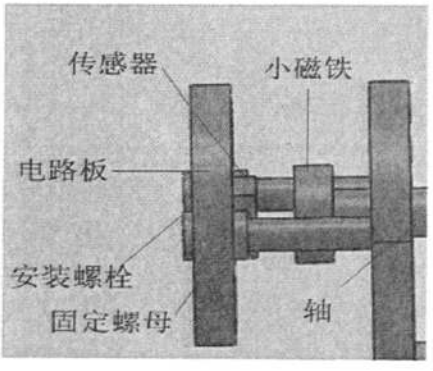


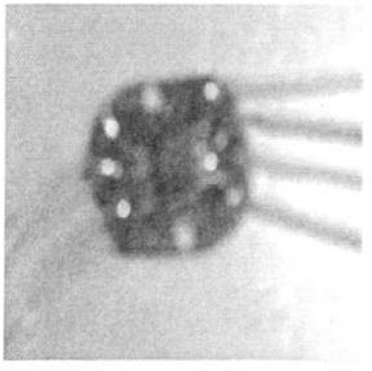
图 3.7 HMC1512 测量原理

Fig. 3.7 Measurement principle of HMC1512

根据 HMC1512 的测量原理设计的安装结构图如下图 3.8(a)所示，实际设计的电路板如图 3.8(b)所示：



(a)安装原理



(b)安装电路板

图 3.8 HMC1512 使用原理

Fig. 3.8 HMC1512 using principle

HMC1512 固定在制作的电路板上，电路板通过两个螺栓与底座相对固定，小磁铁固定在轴上轴一起旋转。HMC 使用两个磁阻桥输出电压，共存于一个膜片上，桥 B 相对于桥 A 物理上旋转 45 度，如图 3.9 所示：

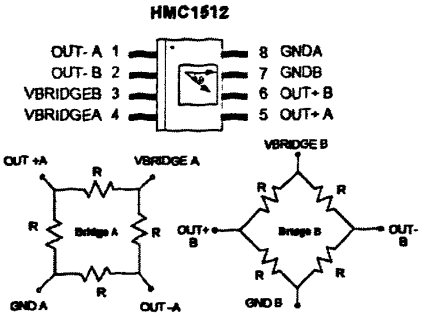


图 3.9 HMC 桥路输出

Fig. 3.9 HMC bridge circuit output

桥 A 的输出电压为：$V_A = V_0 \cdot S \cdot \sin(2\theta)$；桥 B 的输出电压为：$V_B = V_0 \cdot S \cdot \cos(2\theta)$。

式中：

V_0为桥路供电电压；

S 为常数，跟磁铁材料有关，一般为 12mV/V。

由桥路 A 和 B 的输出电压计算式可得轴转角 θ 的计算式如下：

1）若$V_A \le 0, V_B \le 0$，可得$\frac{\Pi}{2} \le \theta \le \frac{3}{4}\Pi$，进而$\theta = \frac{1}{2}\arctan\frac{V_A}{V_B} + \frac{\Pi}{2}$；

2）若$V_A \le 0, V_B > 0$，可得$\frac{3}{4}\Pi < \theta \le \Pi$，进而$\theta = \frac{1}{2}\arctan\frac{V_A}{V_B} + \Pi$；

3）若$V_A > 0, V_B \ge 0$，可得$0 < \theta \le \frac{\Pi}{4}$，进而$\theta = \frac{1}{2}\arctan\frac{V_A}{V_B}$；

4）若$V_A > 0, V_B \le 0$，可得$\frac{\Pi}{4} < \theta \le \frac{\Pi}{2}$，进而$\theta = \frac{1}{2}\arctan\frac{V_A}{V_B} + \frac{\Pi}{2}$；

由上述可知，如果初始位置时小磁铁和传感器的相对角度任意，在实际测量轴转角时就需要先判断桥路 A 和 B 的输出电压的正负才能计算出轴的转动角度。实际上，力反馈数据手套动作过程中，气缸转动的角度不超过 90 度。因此，初始安装时，可将传感器与与转轴近似成 45 度角，也就是气缸的整个动作过程中，转角变化幅度为 45°到+135°，这样就只需要上述 4）和 1）的两种情况即可，保证角度测量直接、方便，初始

化后随着气缸上下摆动 HMC1512 的桥路输出电压的采集程序如下图 3.10 所示：

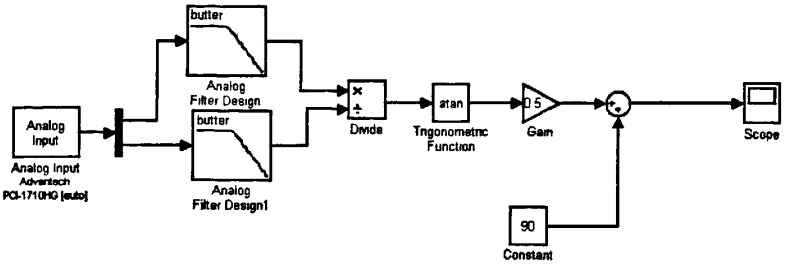


图 3.10 气缸摆动采集程序

Fig. 3.10 Acquisition program of cylinder swing

得到的曲线如图 3.11 所示：

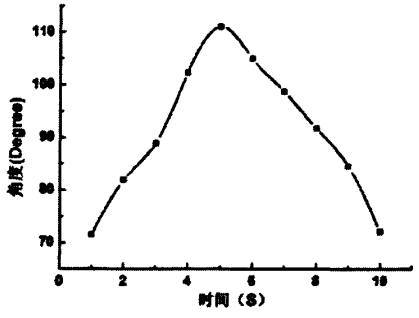


图 3. 11 气缸摆动角度测量曲线

Fig. 3.11 Measurement curve of cylinder swing angle

3. 2. 2 位移传感器工作原理

位移传感器采用的是 Festo 公司生产的电磁式感测的 SMAT-8M 接近开关，活塞杆运动时，通过感应活塞上磁环产生的磁场的移动来确定活塞的位置，从而可测得活塞的位移。SMAT-8M 的特性如下：

1) 测量范围大：SMAT-8M 可测气缸的最大位移为 40mm；

2) 输出信号稳定：SMAT-8M 随着活塞移动可生成与位移成比例的电压信号 0-10V；

3) 安装方便：SMAT-8M 配有安装在各种型号圆形气缸的安装组件，并且不用考虑传感器的安装方向。换句话说，也就是活塞伸出时，输出电压增大，活塞缩回时，电压

减小如下图 3.12 所示：

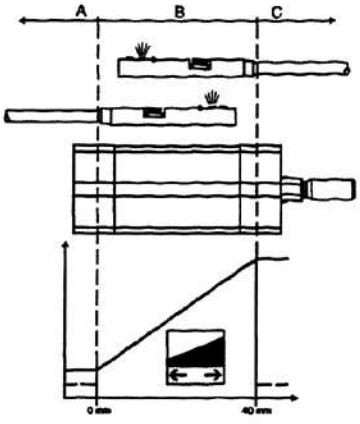


图 3.12　SMAT-8M 输出电压与位移变化关系

Fig. 3.12 Change connection between SMAT-8M's output voltage and displacement

4) 视觉辅助功能：传感器上有两个 LED 灯，绿色 LED 灯亮起时说明传感器处在感测范围之内，红色 LED 灯亮起时说明传感器的位置已经超出感测范围。

传感器安装结构图如下图 3.13 所示：

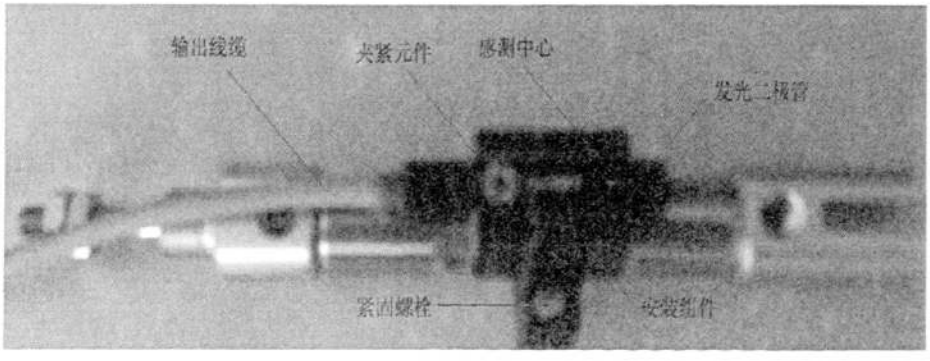


图 3.13 SMAT-8M 安装结构

Fig. 3.13 Fixed structure of SMAT-8M

SMAT-8M 在缸筒上的位置并不是任意的，测量气缸位置之前 SMAT-8M 必须进行初始化。

SMAT-8M 输出线缆如下图 3.14 所示：

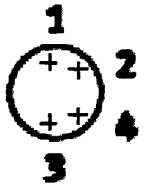


图 3.14 SMAT-8M 输出线缆

Fig. 3.14 SMAT-8M's output cable

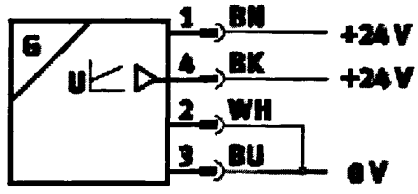


图 3.15 SMAT-8M 初始化接线

Fig. 3.15 SMAT-8M initialization wiring

1 和 3 针脚为工作电压 24V 的正负极，2 和 4 针脚为模拟电压输出的正负极。SMAT-8M 初始化的步骤如下：

1）1、4 针脚接电源 24V 正极，2、3 针脚接电源负极，SMAT-8M 红色灯亮；

2）SMAT-8M（安装组件）缓慢向活塞靠近直至绿灯亮起，固定安装组件；

3）保证 1、3 针脚一直接通电源 24V，断开 2、4 针脚的连接，此时红灯灭，绿灯保持亮；

4）断开的 2、4 针脚即为 SMAT-8M 正常工作时的模拟电压输出，SMAT-8M 初始化完毕。

下面讲述如何确定活塞位移与 SMAT-8M 输出电压之间的关系：

1）硬件采用研华的 PCI-1710HG 采集卡，软件使用 Matlab 中 Simulink 的 RTW 进行输出电压的采集；

2）搭建电压采集框图如下图 3.16 所示：

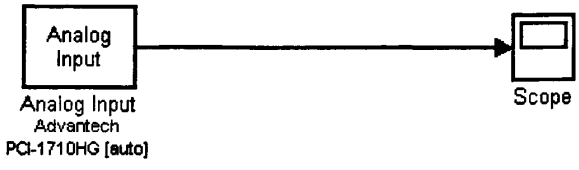


图 3.16 SMAT-8M 电压输出采集

Fig. 3.16 Acquisition program of SMAT-8M's output voltage

3）活塞杆伸缩运动，采集的电压输出的曲线如下图 3.17 所示：

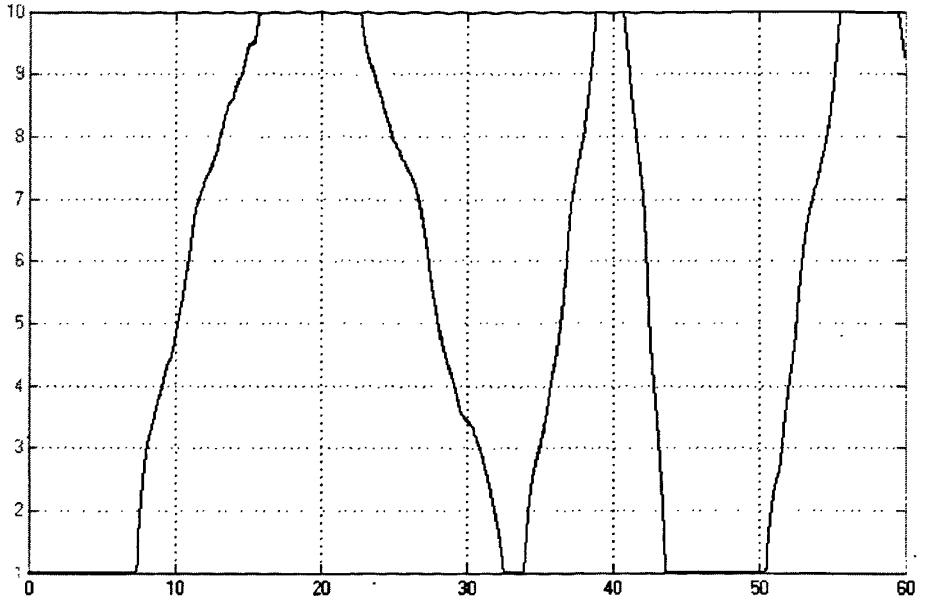


图 3.17　SMAT-8M 电压输出曲线

Fig. 3.17 Curve of SMAT-8M's output voltage

活塞初始位置时，电压值为 1.01V；活塞完全伸出时，电压值为 9.98V；

活塞位移与输出电压为线性关系，由此可以得到活塞位移与实时输出电压的关系为：$S=3.3V_S-3.3$。

Simulink 中建立活塞伸缩实时位移测量系统模块如下图 3.18 所示：

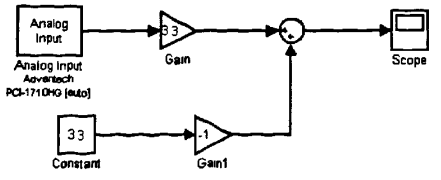


图 3.18 活塞位移采集程序

Fig. 3.18 Acquisition program of the piston displacement

活塞杆进行来回伸缩，采集得的位移曲线如下图 3.19 所示：

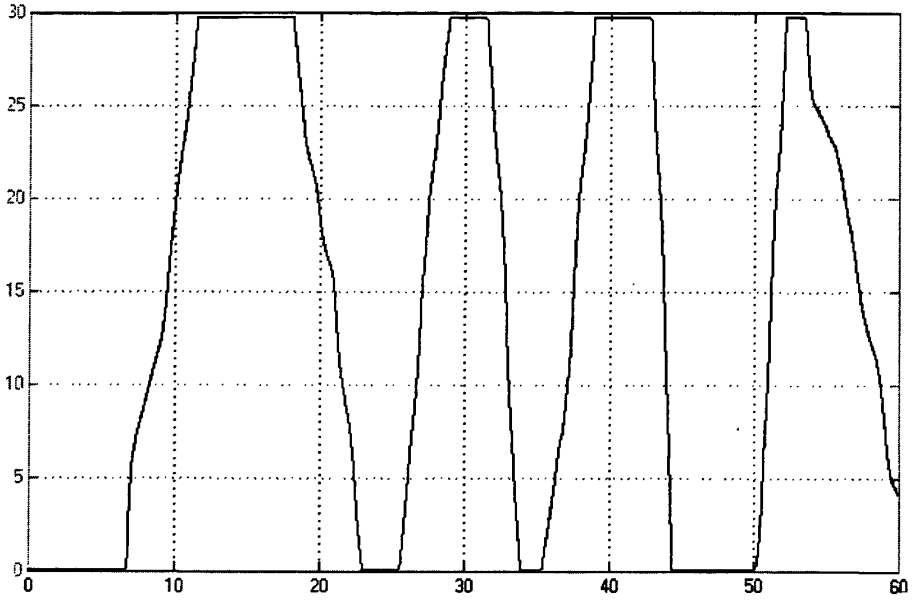


图 3.19 活塞位移采集曲线

Fig. 3.19 Acquisition curve of the piston displacement

3.3 本章小结

本章重点简述了力反馈数据手套的设计，主要包括结构设计和传感器设计两个方面，两个方面正是为了实现力反馈数据手套的关节角度测量和力反馈这两大功能。

结构设计包括驱动器选择、机械结构设计和总体设计三个部分内容，驱动器为反馈力输出源，机械结构是为了满足人手的运动特性，总体设计是为了将驱动器、机械结构和传感器三部分有机地结合在一起。

最后介绍了位移传感器和角度传感器的工作原理，传感器的作用是将驱动器的姿态信息测量出来以转换成人手指各个关节的角度信息。

第 4 章 力反馈数据手套样机分析

对于任何新设计的力反馈数据手套，研究其角度测量系统的原理和反馈力输出原理是必不可少的，本章讨论的主要内容包括:1)力反馈数据手套如何测量手指各关节的弯曲角度；2）如何控制力反馈数据手套的驱动器—气缸在适当时候输出反馈力；3）衡量力反馈数据手套特性的参数如何。

4.1 位姿反馈分析

位姿反馈是力反馈数据手套两大功能之一，本节探讨的内容是针对设计的力反馈数据手套，研究其位姿反馈的原理，将力反馈数据手套的角度测量系统进行量化分析。

4.1.1 运动学分析

第三章已经讲述了对于一个手指来说，要测量的手套参数有三个：气缸运动位移 S、气缸上下摆动角度 β 和气缸左右摆动角度 α。测得的气缸左右摆动的角度即为对应手指内收/外展的角度，气缸运动位移和气缸上下摆动的角度共同决定了相应手指各个关节的弯曲角度。因此，力反馈角度测量的问题就转换为如何由这两个测量值计算出手指各个关节弯曲角度的问题。操作者戴上力反馈数据手套之后，二者作为一个整体的运动学模型如下图 4.1 所示：

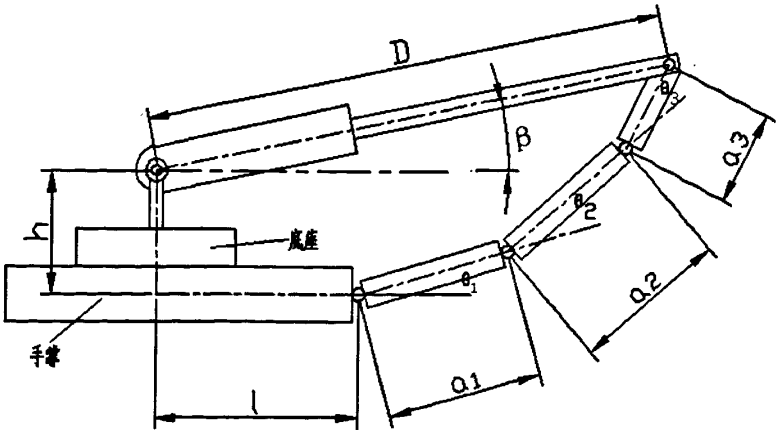


图 4.1 力反馈数据手套运动学模型

Fig. 4.1 Kinematics model of the force feedback data glove

图示运动学模型参数说明：

D—气缸转动中心到活塞杆末端的距离，为气缸不伸出时的基本长度 S_0 与气缸位移 S 之和，即 $D=S+S_0$；

h—气缸旋转中心到手掌底部的垂直距离；

l—气缸旋转中心在手掌的垂直投影点到对应手指近端指关节的距离；

a_1—对应手指近端指骨的长度；

a_2—对应手指中段指骨的长度；

a_3—对应手指末端指骨的长度；

β—气缸上下摆动的角度；

θ_1—掌骨指关节的弯曲角度；

θ_2—近端指关节的弯曲角度；

θ_3—末端指关节的弯曲角度；

由平面几何知识，水平方向上有如下等式：

$$a_1 S_1 + a_2 S_{1+2} + a_3 S_{1+2+3} = DS_\beta + h \tag{4.1}$$

垂直方向上有如下等式：

$$a_1 C_1 + a_2 C_{1+2} + a_3 C_{1+2+3} = DC_\beta - l \tag{4.2}$$

由式(2.1)可知近端指关节的弯曲角度与末端指关节的弯曲角度之间存在如下关系：

$$\theta_3 = 2/3\theta_2 \tag{4.3}$$

由（4.1)、(4.2）和（4.3）即可组成操作者戴上力反馈数据手套的运动学方程组，方程组中参数说明如下：

$s_\beta = \sin\beta, c_\beta = \cos\beta, c_1 = \cos\theta_1, s_1 = \sin\theta_1;$

$s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2), c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2);$

$s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3), c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3);$

操作者戴上力反馈数据手套，上述三个等式中的参数 h、l、a_1 、a_2 和 a_3 即为已知量，D 和 β 可测得。因此上述三个等式组成的方程组只含有三个未知量—手指各关节的弯曲角度 θ_1、θ_2 和 θ_3，运动学方程组是可解的，这也就说明了设计的力反馈数据手套在操作者的手指运动过程中手指各关节的弯曲角度是可测的，能够在虚拟场景中的虚拟手上实时再现操作者人手的位姿，实现了力反馈数据手套位姿反馈的功能。

4.1.2 解运动学方程

此力反馈数据手套工作的过程如下：手套戴在操作者手上，手套另一端与计算机相连接，人手进行弯曲/伸展运动，对应虚拟现实软件实时采集传感器数据，同时求解力反馈数据手套的运动方程组得到手指各个关节的弯曲角度，对应虚拟手再现各个关节的弯曲程度。

对于人机交互系统来说，实时性是最重要的一项指标，而此力反馈数据手套的运动学方程组是非线性带三角函数的方程组（一般称为超越方程组），这类非线性方程组一般是不能直接求解的（除非可以通过三角代换、三角消元和恒等变形转换为一个变量的方程组），绝大部分的这类方程组都是通过相应的数值解法求解。因此，针对此力反馈数据手套的运动学方程组研究一种简单并计算量小的数值解法是非常必要的。运动学方程组的求解越简单，基于此力反馈数据手套的虚拟现实交互系统的交互性越好。

求解方程组之前先将式（4.3）代入（4.1）和（4.2）得到二元一次超越方程组如下：

$$\begin{cases} a_1\sin\theta_1 + a_2\sin(\theta_1+\theta_2) + a_3\sin(\theta_1+\frac{5}{3}\theta_2) = D\sin\beta + h \\ a_1\cos\theta_1 + a_2\cos(\theta_1+\theta_2) + a_3\cos(\theta_1+\frac{5}{3}\theta_2) = D\cos\beta - l \end{cases} \tag{4.4}$$

由上所述可知，此力反馈数据手套样机对于人手关节实时角度测量问题就转换成如何实时解上述非线性方程组的问题，基于 Matlab 的 Simulink 具有实时仿真的功能，利用其中的功能模块搭建的解上述方程组的模型框图如下 4.2 所示：

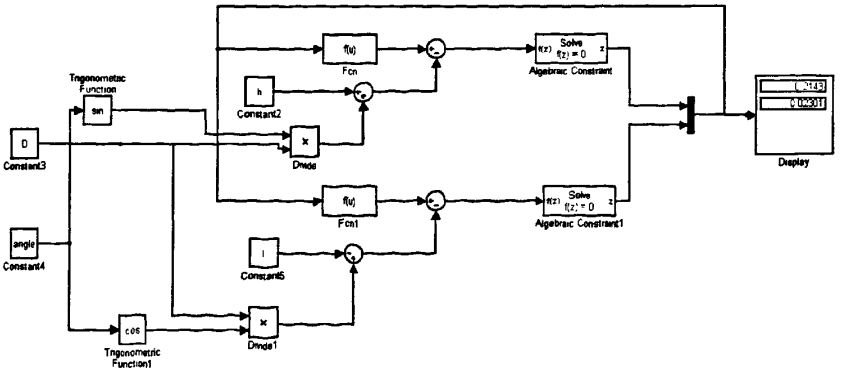


图 4.2 非线性方程组实时仿真模型

Fig. 4.2 Real-time simulation model of the nonlinear equations

取 h=15,l=40,给定十组初值（D，β）得到的解如下表所示：

表 4.1 非线性方程组的解

Tab. 4.1 Solution of the nonlinear equations

输　入		输　出	
D	β	θ_1	θ_2
95	0.5	0.8149	0.1727
97	0.45	0.718	0.2074
99	0.4	0.6298	0.2291
101	0.35	0.5488	0.2397
103	0.3	0.475	0.2375
105	0.25	0.4096	0.2268
107	0.2	0.3558	0.1979
109	0.15	0.3227	0.1412
111	0.05	0.07704	0.2638
113	0.02	0.2143	0.02301

为了验证上述解法的正确性，在 C++中定义如下两个函数：

$$f_1(\theta_1,\theta_2)=a_1\sin\theta_1+a_2\sin(\theta_1+\theta_2)+a_3\sin(\theta_1+\frac{5}{3}\theta_2)-D\sin\beta-h$$

$$f_2(\theta_1,\theta_2)=a_1\cos\theta_1+a_2\cos(\theta_1+\theta_2)+a_3\cos(\theta_1+\frac{5}{3}\theta_2)+D\cos\beta+l$$

```
#include "stdafx.h"
#include<stdio.h>
#include<math.h>

int main(int argc, char* argv[])
{
double g1,g2,a1,a2,a3,x1,x2,D,b,h,l;
a1=30;
a2=25;
a3=28;
h=15;
l=40;
x1=0.2143;
x2=0.02301;
D=113;
b=0.02;

printf("\n");
g1=a1*sin(x1)+a2*sin(x1+x2)+a3*sin(x1+5.0/3*x2)-D*sin(b)-h;
g2=a1*cos(x1)+a2*cos(x1+x2)+a3*cos(x1+5.0/3*x2)-D*cos(b)+l;
printf("a1*sin(x1)+a2*sin(x1+x2)+a3*sin(x1+5.0/3*x2)-D*sin(b)-h=%f",g1);
printf("\n");
printf("a1*cos(x1)+a2*cos(x1+x2)+a3*cos(x1+5.0/3*x2)-D*cos(b)+l=%f",g2);
printf("\n");
    return 0;
}
```

图 4.3 验证程序

Fig. 4.3 Verification program

将表 4.1 每组对应的 θ_1、θ_2、D 和 β 作为输入，计算上述两个函数值，程序如图 4.3

所示。

得到计算结果如下表 4.2 所示：

表 4.2 验证结果

Tab. 4.2 Verification result

序号	(f_1,f_2)
1	(0.000829，-0.00157)
2	(-0.000886,0.001602)
3	(-0.000823，-0.000626)
4	(-0.001837,0.001942)
5	(-0.077916,0.081159)
6	(0.000699，-0.000424)
7	(0.001809，–0.000749)
8	(0.001455，-0.000749)
9	(-0.00147,0.000610)
10	(-0.003309,0.000779)

从上表计算结果可以看出，此种非线性方程组的解法精度能达到 10^{-3}，精度足够满足要求。

4.2 力反馈分析

力反馈数据手套另一大功能是将虚拟手产生的虚拟力反馈到操作者手上，形成力触觉。力触觉是否真实需要解决两个问题：一是反馈力控制策略的问题，虚拟手只有在抓取到物体时才产生虚拟力，与被抓取的虚拟对象未发生碰撞时并不需要力反馈数据手套的气缸动作；二是因被抓取的虚拟对象不同产生的虚拟力的大小不一样，这就要求手套的气缸供气压力是可控的。

4.2.1 力控制分析

为了解决上述两个关于反馈力控制的两个问题，就需要设计一个合理的气动自动化系统如下图 4.4 所示。

初始时，二位三通电磁阀逆向导通，气体不能从气缸进气口进入，此时只能排气，人手可以与气缸一起自由运动。虚拟手产生虚拟力时，计算气缸所需要的供气压力，调

节压力比例阀产生对应压力所需要的输入电压，二位三通阀导通，对应压力的气体就直接作用于气缸活塞上产生与虚拟力同大小的推力，作用到操作者手上，最终实现力触觉。

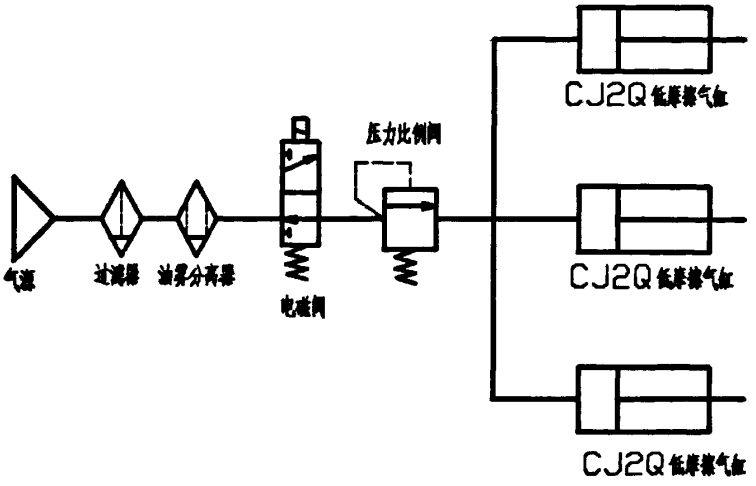


图 4.4 气动系统回路

Fig. 4.4 Pneumatic system circuit

4.2.2 力大小分析

力反馈数据手套能够输出反馈力的大小直接由驱动器的性能决定，气缸的输出力计算公式为：

$$F=\frac{\Pi}{4}PD^2-f \tag{4.5}$$

式中：

F—气缸输出力，N；

D—活塞直径，mm；

P—供气压力，MPa；

f—活塞运动时活塞与缸筒之间的滑动摩擦阻力，N；

活塞与缸筒之间的滑动摩擦阻力与供气压力之间的关系如图 4.5 所示。

从图中可以看出，气动的滑动与供气压力呈线性关系，气缸滑动阻力的计算公式为：

$$f=\frac{\Pi}{4}D^2\times(0.067P+0.028) \tag{4.6}$$

将式（4.6）代入（4.5）得气缸输出力的计算公式为：

$$F=\frac{\Pi}{4}D^2\times(0.933P-0.028) \tag{4.7}$$

CJ2Q 气缸的工作压力 P 范围为：0.03~0.7MPa，代入（4.7）得到输出力 F 范围为：0~49N，即就是此力反馈数据手套样机能够输出的最大触觉力为 49N。

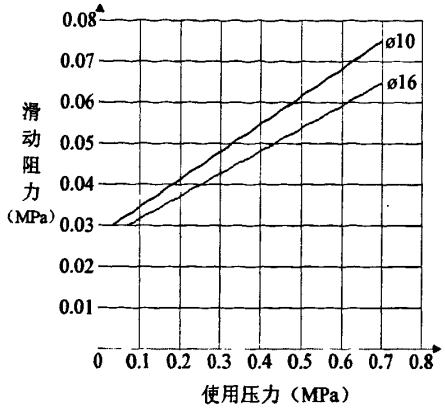


图 4.5 CJ2Q 滑动阻力

Fig. 4.5 Sliding resistance of CJ2Q

4.3 样机特性分析

衡量内置式力反馈数据手套的主要性能参数有：重量、摩擦力和运动范围。

1、重量

手套重量主要由驱动器、机械结构和传感器三部分组成。

气缸的重量计算如下表 4.3 所示：

表 4.3 气缸质量

Tab. 4.3 Cylinder mass （g）

缸径	基准质量	每 15mm 行程增加质量	安装件质量
10	24	4	4

则 CJ2Q10-30 的重量 M 计算公式为：

$$M=24+(4/15)*30+4=36g$$

除去截取气缸的部分，单个 CJ2Q 气缸的重量约为 30g。

机械结构部分的重量可由 SolidWorks 的质量特性工具分析计算，具体数值如下表

4.4 所示。

机械部分总重量约为 53g。

位移传感器 SMAT-8M 每个 10g，一共 30g；而角度传感器很小，算上电路板一起总共约为 5g。

综上所述，所设计的力反馈数据手套样机总质量为：30*3+53+30+5=178g。再算上连接线缆，整个手套的重量不会超过 200g，操作者戴上不会感觉到疲倦。

表 4.4 零件质量

Tab. 4.4 Mass of every part

名称	材料	体积（mm^3）	密度(g/mm^3)	重量(g)	数量	合计(g)
底座 1	铝合金	6856	$2.7*10^{-3}$	18.5	1	18.5
底座 2	铝合金	2884	$2.7*10^{-3}$	7.8	1	7.8
虎克铰	铝合金	1249	$2.7*10^{-3}$	3.4	3	10.2
十字轴	不锈钢	472	$7.9*10^{-3}$	3.7	3	11.1
轴承	轴承钢	42	$7.9*10^{-3}$	0.3	12	3.6
小磁铁	钕铁硼	42	$3.8*10^{-3}$	0.3	6	1.8

2、摩擦力

气缸的工作压力为 0.03~0.7MPa，直接由式（4.2）计算得到 CJ2Q 气缸的滑动摩擦力范围为：2.3N~5.8N。操作者在使用力反馈数据手套样机时摩擦力有两种情况：一是自由运动时手套摩擦力相当于供气压力为 0 时的滑动摩擦力为 2.3N；二是需要进行力反馈时在有供气压力下为静摩擦力，此时摩擦力的大小应由实际测得。对力反馈数据手套来说，主要考虑的是手套自由运动时的摩擦力，即就是此力反馈数据手套样机摩擦力为 2.3N，为最大输出力的 4.7%。

3、运动范围

与外骨架式力反馈数据手套不同，内置式力反馈数据手套是人手的运动范围受到一定的限制，利用 SolidWorks 中的碰撞检测和距离测量两个即可分析此力反馈手套样机的运动范围。

1）手指内收/外展运动范围

以食指为例，气缸左右摆动到极限位置即为手指外展的最大角度，如图 4.6 所示。

$$极限位置摆角\alpha_{max} = \arcsin\frac{dx}{中心距离} = \arcsin\frac{78.46}{123.58} = 39.4°$$

食指实际外展的最大角度为 25°，比气缸摆角最大值要小，可见此力反馈数据手套样机满足人手内收/外展运动范围需求。

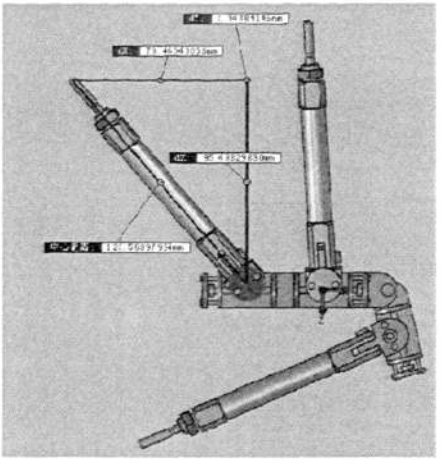


图 4.6 食指外展极限位置

Fig. 4.6 Limited position of index finger's abduction

2）手指弯曲/伸展运动范围

同样以食指为例，但手指弯曲/伸展运动范围由活塞位移和气缸上下摆角共同决定。

首先来看气缸向下摆动的范围，如图 4.7 为气缸下摆至极限位置示意图。

$$极限位置摆角\beta_{max} = \arcsin\frac{dy}{中心距离} = \arcsin\frac{49.85}{115.17} = 25.5°。$$

通过碰撞分析，气缸向上摆动不会受到限制，因此此手套的气缸上下摆角的运动范围为：-25.5°~90°，但是受气缸基本长度的限制，向上摆动的最大角度不可能为 90°，实际验证气缸上摆的最大角度约为 40°(具体大小由人手大小决定)，最终实际气缸上下摆动的角度仅为-25.5°~40°。

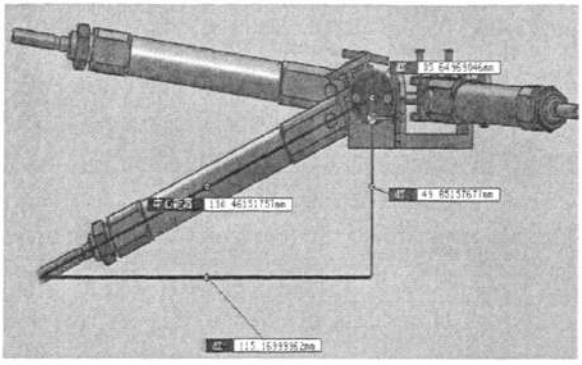


图 4.7 气缸下摆极限位置

Fig. 4.7 Limited position cylinder down swing

手指关节弯曲/伸展的两个极限位置对应活塞位移和气缸上下摆角的两组参数为：（-25.5°，30）和（20,0）。也就是将 D=95，β=20°和 D=125，β=-25.5°分别代入式（4.4）即可解得食指各关节的实际运动范围约为（0,10°）、（0，60°）和（0,40°）。可以看出，操作者戴上此力反馈数据手套后弯曲/伸展的运动范围仅为人手实际运动的最大范围的45%左右（具体数值由人手的实际尺寸决定，人手越大运动范围越大），但是这样的运动范围已经足够满足虚拟手的抓取。

4.4 本章小结

本章的主要研究内容是针对上章所设计的力反馈数据手套进行量化的分析。

首先，对人手-手套整体进行了运动学分析，建立了运动学方程组，并研究了如何在 Matlab 中如何实时解运动学方程组，方程组实时解得目的就是通过角度传感器和位移传感器测量的数据计算出人手实时姿态各个关节的弯曲角度，实现角度测量。

其次，分析人手-手套整体的力反馈功能，气动回路中的电磁换向阀决定是否输出反馈力，压力比例阀决定手套驱动器输出力的大小。

最后，对所设计的力反馈数据手套样机进行性能评估，主要包括手套重量、摩擦阻力和运动范围的分析。

第 5 章 力反馈数据手套实验研究

5.1 实验系统

操作者戴上设计力反馈数据手套如图 5.1 所示：

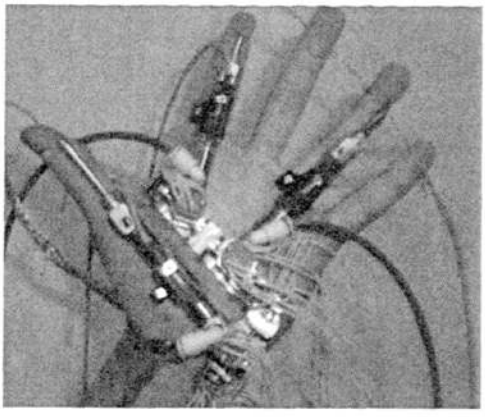


图 5.1 操作者戴上手套

Fig. 5.1 Hand with the glove

实验内容主要包括以下两部分（以食指为例）：

1）人手和手套一起自由运动，得到食指各关节的角度变化曲线；

2）模拟虚拟抓取力的反馈过程，测量反馈力随抓取力的变化曲线，并进行误差评估。

5.1.1 实验原理及装置

此力反馈数据手套的实验原理如下图 5.2 所示。

操作者戴上力反馈数据手套之后。人手与力反馈数据手套一起自由运动，每个手指上的两个角度传感器 HMC1512 和一个位移传感器 SMAT-8M 实时测量气缸两个摆角值和气缸的位移值，经数据采集控制卡的放大电路放大，再经数据采集控制卡进行 A/D 转换，最终交由计算机计算运动学方程组（4.4）得到手指各个关节的弯曲角度。当虚拟手碰撞或抓取物体时，产生虚拟力，计算机将虚拟力的信息转换为压力比例阀所需要的电压值，经数据采集控制卡 D/A 转换输出给压力比例阀，同时通过数据采集控制卡的 DO 输出控制继电器给电磁阀通电，使气动回路通气给 CJ2Q 气缸，输出与虚拟力同大小的

力给手指。

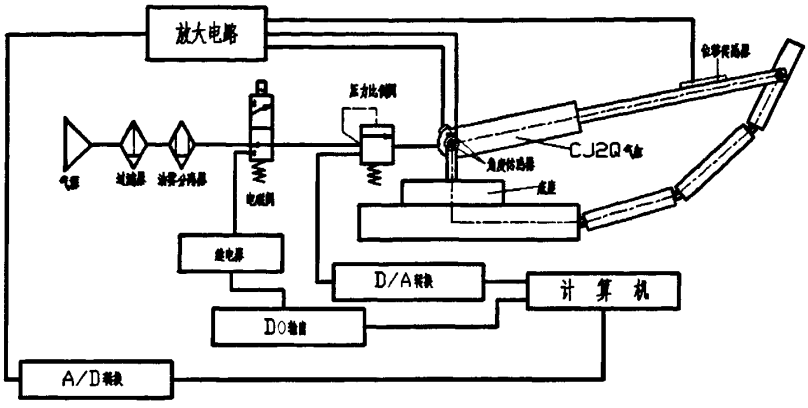


图 5.2 力反馈数据手套实验系统原理

Fig. 5.2 Experimental system principle of the force feedback data glove

实验中所需要的元件信息如下表 5.1 所示：

表 5.1 实验元件

Tab. 5.1 Experimental component

名称	型号	性能参数	厂家
采集控制卡	PCI-1710HG	16 路单端（8 路差分）模拟量输入； 2 路模拟量输出，16 路数字量输出； 分别率 12 位，采样速率为 100KHz；	Adventch
继电器	PCLD-785	16 路继电器输出	Adventch
电磁阀	VQZ115	二位三通，最高工作压力 0.7MPa	SMC
压力比例阀	ITV1050	压力范围 0.005-0.9MPa； 线性度 1%，敏感度 0.2%； 输出精度 3%，最小单位 0.01MPa；	SMC

5.1.2 软件系统

力反馈数据手套的实验主体分为角度测量和力反馈控制部分，实验软件部分需要建立的就是实时的角度测量系统和力反馈控制系统，本实验系统采用基于 RTW（Real-time

Workshop）在 Matlab/Simulink 下设计实时的角度测量与反馈力控制模型，RTW 广泛应用于实时控制的场合，通过在 Simulink 下搭建的模块图可以生成模型的实时代码，RTW 的主要组成与特性如下[58]：

1）Simulink Code Generator：自动为 Simulink 模型产生 C 代码；

2）Make Process：RTW 的扩展功能，可以让用户通过自定义编译和连接；

3）Simulink External Mode：外部模式充当 Simulink 与实时测试环境之间的信息桥梁。外部模式在使用 Simulink 时，作为前台终端进行实时参数的调整、数据记录和可视化；

4）Targeting Support：将目标与 RTW 捆绑在一起，就可以建立一个实时或者模型环境；

5）Rapid Simulation：仿真速度快；

6）Large Scale Modeling：支持 Simulink 中的多级建模映射到 RTW，从而可以产生多个独立的模型。

5.2 驱动器-低摩擦气缸静态特性实验研究

用拉压力传感器采集气缸在不同工作压力下的实际输出力，得到的曲线如下图 5.3 所示：

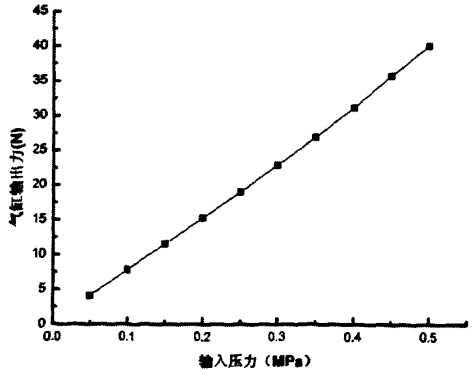


图 5.3 气缸输出力随压力变化曲线

Fig. 5.3 Change cure of cylinder output force with the pressure

由上述曲线可知，气缸输出力随压力变化呈线变化，这对于在利用力反馈数据手套

进行力反馈控制时是有利的，与基于其它驱动器（如电机驱动和人工肌肉驱动等）的力反馈数据相比较，此力反馈数据手套的力反馈控制系统更为简单。

用最小二乘法计算得到气缸输出力与压力之间的关系为：

$$F = 71.3 \times P + 1.365 \tag{5.1}$$

式中：

P—供气压力, MPa;

F—气缸输出力, N;

5.2 力反馈数据手套角度测量系统实验研究

初始状态为操作者刚戴上力反馈手套，人手完全伸展，然后人手自内缓慢弯曲直至气缸完全缩回，由如图 5.4 的采集程序测量食指各关节的角度变化：

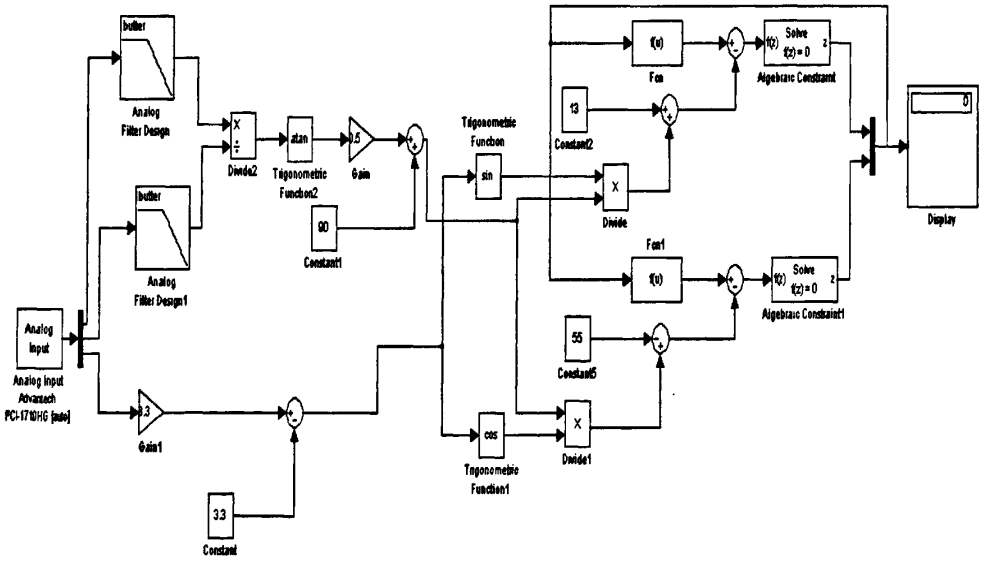


图 5.4 食指关节角度测量程序

Fig. 5.4 Angle measurement program of index finger joints

图 5.5 所示是得到食指各关节角度变化曲线。从图中可以看出，手指弯曲时，各关节的弯曲角度是逐渐增大的，由于近端指关节和末端指关节的相互约束，二者的变化趋势是一致的，同时二者弯曲速率比掌骨指关节大。

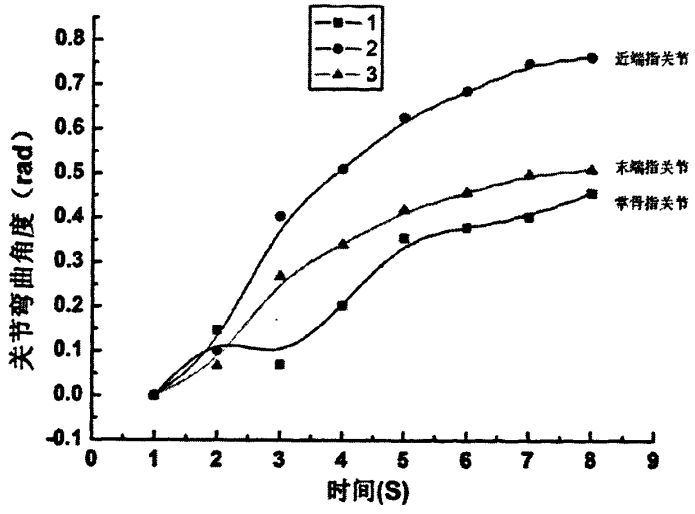


图 5.5 食指弯曲各关节角度变化

Fig. 5.5 Angle change of index finger joints' bending

5.3 力反馈系统实验研究

为了模拟虚拟操作时反馈力在手指上再现的过程，虚拟力大小直接给出，给定十个虚拟力（N）的值，控制压力比例阀的输入压力和电磁阀的开断，同时测量气缸的进气压力，代入式（5.1）计算可得人手感觉的力大小。软件控制程序如图 5.6 所示：

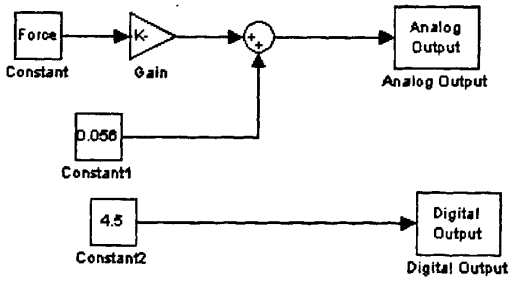


图 5.6 力控制程序

Fig. 5.6 Force control program

实验测得数据如表 5.2 所示。由表 5.2 可知，此力反馈数据手套反馈力的平均误差为：

$$\varsigma=(\frac{0.71}{3}+\frac{1.21}{6}+\frac{1.14}{9}+\frac{0.3}{12}+\frac{0.25}{15}+\frac{0.18}{18}+\frac{0.1}{21}+\frac{0.03}{24}+\frac{0.78}{27}+\frac{0.86}{30})/10=6.8\%$$

表 5.2 力控制实验数据

Tab. 5.2 Experimental data of force control

模拟虚拟力（N）	实测压力（MPa）	手指触觉力（N）	误差（N）
3	0.04	4.29	-0.71
6	0.08	7.21	1.21
9	012	10.14	1.14
12	0.15	12.3	0.3
15	0.19	15.25	0.25
18	0.23	18.18	0.18
21	0.27	21.I	0.1
24	0.31	24.03	0.03
27	0.34	26.22	0.78
30	0.38	29.14	0.86

5.4 本章小结

本章主要内容为力反馈数据手套的相关实验研究。

首先，设计了力反馈数据手套相关实验的方法，阐述了实验所需要的软硬件。

其次，针对力反馈数据手套进行了驱动器静特性、关节角度测量和力反馈控制三个实验。通过驱动器静特性实验得到了驱动器（气缸）输出力与输入压力之间的关系，通过关节角度测量实验得到了人手—手套整体自由运动时人手各个关节的变化曲线，通过力反馈实验使操作者能够感觉到实时的反馈力，并估算了在利用此力反馈数据手套进行操作时反馈力误差。

结　论

1、通过对现有国内外力反馈数据手套的研究与分析，从人手生物学模型出发，研究了人手骨骼组成、自由度和运动特点，建立了 26 自由度人手的运动简图模型。

2、设计了一套以低摩擦气缸 CI2Q 为驱动器的力反馈数据手套样机，通过设计合理的机械结构使得通过结合气缸上下摆动、左右摆动和活塞杆伸缩满足了人手的内收/外展和弯曲/伸展运动。同时，通过使用 HMC1512 角度传感器测量气缸摆角和 SMAT-8M 接近开关测量气缸位移来间接反映人手实时姿态。

3、以人手-手套整体为研究对象，进行运动学分析，建立了运动学方程组，通过在 Matlab 中建立方程组程序，能够实时得到运动学方程组的解，方程组的解即为人手各个关节的弯曲角度。通过设计合理气动回路，结合使用电磁换向阀和压力比例阀实现了力反馈数据手套的反馈力控制。同时，进一步对反映手套性能的参数：重量、摩擦力和运动范围进行了评估，此力反馈数据手套样机重量为不到 200g，人手-手套自由运动时摩擦力为 2.3N，为手套驱动器最大输出力的 4.7%。通过 SolidWorks 中碰撞干涉和距离测量两种工具计算得到此人手-手套整体为实际人手自由运动范围的 45%左右（具体数值由实际人手的大小决定），足够满足虚拟抓取。

4、设计了针对此力反馈数据手套样机的实验系统，采用 SMC 的电磁换向阀（结合 Adventch 的继电器输出板）和压力比例阀进行力控制，实时与计算机的数据交互由 Adventch 的 PCI-1710HG 高增益采集卡来完成，软件系统由 Simulink 中的 RTW 实时模块来实现。通过气缸的静特性实验得到了手套输出力与输入压力的计算关系式，通过角度测量实验得到了人手在弯曲/伸展时手指各个关节的角度变化曲线，通过力反馈控制实验使得人手能够产生力的感觉，并估算了反馈力相对于虚拟力的误差。

参 考 文 献

[1] 孙中圣,包钢，李小宁.影响数据手套力反馈的因素分析.机床与液压，2008,10：21-23.

[2] 原魁,朱海兵,杜清秀.一种虚拟现实系统接触交互接口.中国体视学与图像分析,2001,9:153-156.

[3] 王爱民,戴金桥.一种基于电流变液体的力反馈装置.传感技术学报,2007,4：774-777.

[4] Virtual technologies, 1999.Cyber Grasp user's Guide. Virtual Technologies .Inc, paloalto, CA.

[5] M.Bouzit Design, Implementation and Testing of a data glove with Force Feedback for Virtual and Real Objects Telemanipulation（doctoral dissertation）. Doctor degree dissertation, University of Pierre ET Marie Curie, 1996:12~45.

[6] Mourad Bouzit, George Popescu, Grigore Burdea and Rares Boian. The Rutgers Master II-ND Force Feedback Glove. IEEE VR 2002 on Haptics Symposium, 2002, 3：256-263.

[7] Pe′ter Korondil, Pe′ter T. Szemesl. Sliding Mode Friction compensation for a 20 DOF Sensor Glove. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2000, 12：611-615.

[8] Tatsuya Koyama, Ikuo Yamano. Multi-fingered exoskeleton haptic device using passive force feedback for dexterous teleoperation. 2002 IEEE conference on Intelligent and Systems, 2002, 10：2905-2910.

[9] Paul Richard. Virtual reality graphics simulation with force feedback. International Journal In Computer Simulation 5, 287-303, 1995：287-303.

[10] 齐曼，张珩.数据手套的研究现状.计算机仿真，1996,12：58-60.

[11] 崔洋,包钢,王祖温.虚拟现实技术中力/触觉反馈的研究现状.机床与液压，2008,7：1-4.

[12] 戴金桥,王爱民.基于数据手套的力觉再现装置的设计.传感技术学报，2004,9:359-362.

[13] 孙中圣 ,包钢,李小宁.基于气动人工肌肉力反馈数据手套的柔性物体力觉再现.南京理工大学学报,2009,12：713-716.

[14] 祖超,王博亮,闵小平.虚拟手术仿真中的力反馈研究.厦门大学学报,2009,1：31-35.

[15] 刘海波，席振鹏.力反馈主手研究现状及其力控制方法研究.自动化技术与应用,2008,3：1-6.

[16] 杨元栋,杨泽红,贾培发.虚拟现实力反馈设备的设计与实现.计算机工程与应用,2001,23：151-153.

[17] 王爱民，戴金桥.基于液体智能材料的被动力反馈数据手套. 测控技术,2007,11：10-12.

[18] 戴金桥,王爱民,宋爱国. 适用于力反馈数据手套的被动力觉驱动器. 东南大学学报,2010,1:123-127.

[19] Marwan. Gharaybeh, Grigore C. Burdea. Investigation of a shape memory alloy actuator for detours force feedback masters. Advanced Robotics of Japan, 1995, 3.

[20] Grigore C. Burdea. A Virtual-Reality-Based Telerehabilitation System with Force Feedback. IEEE Transaction On Information Technology In Biomedicine, 2000,4 (1)：317-330.

[21] Andrew Heuser, Hristian Kourtev. Telerehabilitation Using the Rutgers Master II Glove Following Carpal Tunnel Release Surgery: Proof-of-Concept. IEEE Transactions On Neural Systems And Rehabilitation Engineering,2007,15(1):88-93.

[22] V. Popescu, G. Burdea. Virtual Reality Simulation Modeling for a Haptic Glove. Department of Electrical and Computer Engineering Center for Computer Aids for Industrial Productivity：77-82.

[23] Mourad Bouzit, Grigore Burdea. The Rutgers Master II—New Design Force Feedback Glove. IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS,2002,7(2)：256-263.

[24] Maria Claudia F. Castro, Alberto Cliquet, Jr. A Low-Cost Instrumented Glove for Monitoring Forces During Object Manipulation. IEEE TRANSACTIONS ON REHABILITATION ENGINEERING, 1997,5(2)：140-147.

[25] Yoseph Bar-Cohen, Constantinos Mavroidis. Virtual reality robotic telesurgery simulations using MEMICA haptic system. Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 5-8 March, 2001.

[26] Costas S. Tzafestas. Whole-Hand Kinesthetic Feedback and Haptic Perception in Dexterous Virtual Manipulation. IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART A: SYSTEMS AND HUMANS,2003,33(1)：55-59.

[27] 高龙琴,王爱民,黄惟一. 基于 18-传感器数据手套手部交互模型的建立. 传感技术学报,2007,20(3)：11-14.

[28] 杨文珍,高曙明. 基于人手指力学特性的虚拟手接触力生成. 浙江大学学报,2008,42(12)：25-29.

[29] 任程，戴树岭. 基于数据手套的逼真虚拟手的实现. 系统仿真学报,2008,20(22)：6214-6217.

[30] 金钺，侯文君. 基于虚拟手简化面法向距离的抓取碰撞检测算法. 中国机械工程,2008,19(9):356-359.

[31] 王天柱，李文辉. 基于组件的虚拟手建模及碰撞检测. 吉林大学学报,2006,44（4）:11-16.

[32] 张珩.人体手部建模与分析.计算机仿真，1996,15（2）:24-28.

[33] 王党校，张玉茹. 实时力觉交互中的虚拟力计算及渲染方法. 系统仿真学报，2004，16（7）:1-6.

[34] 邓华林，马等着.虚拟装配中的虚拟手交互技术.计算机应用技术，2005，32（6）:99-103.

[35] 付宜利,刘诚.虚拟装配中基于生理约束的虚拟手建模与抓持规划.计算机集成制造系统,2009，15（4）:77-82.

[36] 程成,杨益平. 虚拟装配中虚拟手构造及双手交互模式研究. 和谐人机环境,2008:336-342.

[37] Younkoo Jeong, Dongjoon Lee. A Wearable Robotic Arm with High Force-Reflection Capability. Proceedings of the 2000 IEEE Internatiorlal Mot khhop on Robot and Human Interactive Commun~cat~oii Osaka. Japan - September 27-29 2000:1025-1031.

[38] M. Bergamasco, B. Allotta. An Arm Exoskeleton System for Teleoperat ion and Virtual Environments Applications. IEEE On Scuola Superiore S. Anna Via Carducci, 40, 56127 Pisa, Italy,1994:547-551.

[39] R. E. Ellis. Design and Evaluation of a High-Performance Haptic Interface. Department of Mechanical Engineering, Queen' s University at Kingston, Ontario, Canada K7L 3N6.

[40] Toshiro Noritsugu. Wearable Power Assist Device for Hand Grasping Using Pneumatic Artificial Rubber Muscle. SICE Annual Conference in Sapporo, August 4-6,2004:687-691.

[41] 胡小强.虚拟现实技术.北京:北京邮电大学出版社,2005.

[42] 陈定方，虚拟设计，北京：机械工业出版社，2002.10：109～110.

[43] 张玉茹、李继婷等.机器人灵巧手；北京；机械工业出版社，2007.

[44] 陆鑫盛，周洪.气动自动化系统的优化设计.上海：上海科学技术文献出版社，1999.

[45] 王连明，宋宝玉.机械设计课程设计.哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2005.

[46] 孙德宝.自动控制原理.北京：化学工业出版社，2002.

[47] 陈铁鸣.机械设计.哈尔滨：哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2003.

[48] 江一麟.机构运动学与动力学.上海：上海科学出版社，1987.

[49] 陈岭丽，冯志华.检测技术和系统.北京：清华大学出版社，2005.

[50] 黄真，赵永生.高等空间机构学.北京：高等教育出版社，2006.

[51] 何道清.传感器与传感器技术.北京：科学出版社，2005.

[52] 黄贤武.传感器原理与应用.成都：电子科技大学出版社，1999.

[53] 王利强，彭月祥.计算机测控系统与数据采集卡应用.北京：机械工业出版社，2007.

[54] 杨涤，李立涛等.系统实时仿真开发环境与应用.北京:清华大学出版社，2002.

[55] 李念强，魏长智等.数据采集技术与系统设计.北京：机械工业出版社，2009.

[56] 王宏.MATLAB 6.5 及其在信号处理中的应用.北京：清华大学出版社，2004.

[57] 王华，李有军等.MATLAB 电子仿真与应用教程.北京：国防工业出版社，2007.

[58] 张德丰.MATLAB Simulink 建模与仿真.北京：电子工业出版社，2009.

[59] 岳宏,王小龙.基于虚拟现实手臂外骨骼康复系统的研究. 机械设计与研究，2004，20（1）.

[60] 李建华，王占全.Visual C++ 编程从基础到实践.北京：电子工业出版社，2007.

致　谢

本文是在导师王祖温教授的精心指导下完成的。导师渊博的知识、实求是的科学态度和严谨的治学作风是学生学习和工作的楷模，在此向导师致以崇高的敬意和深深的谢意。

熊伟副教授在课题的具体规划、实施和实验过程中给予自始至终地指导和把握，在此对熊老师表示衷心的感谢和敬意，熊老师严谨的学风是学生学习的榜样。

感谢王海涛副教授在手套设计过程中给予的帮助和建议。

感谢关广丰老师在实验过程中给予的细心指导。

在此，我还要感谢在一起愉快的度过研究生生活船舶机电研究所的所有同学们，正是由于你们的帮助和支持，我才能克服一个一个的困难和疑惑，直至本文的顺利完成。特别感谢于贺春师兄、王成林、周超、徐立芳和马文涛师弟，他们在我课题的进展过程中给予了不少帮助。

最后，感谢我的爸爸妈妈，是他们一直精神和生活上的鼓励与支持才保证我论文工作的顺利完成。养育之恩，无以回报，你们永远健康快乐是我最大的心愿。