

重庆大学

硕士学位论文

基于三轴加速度传感器的手指运动参数检测

姓名：戴加满

申请学位级别：硕士

专业：生物医学电子与信息技术

指导教师：侯文生

20090602

## 摘 要

人的手部运动的参数检测可以在多方面得到应用,如手部运动功能评估、配合电刺激等控制方式的肢体康复治疗等。手部运动检测有多种不同的方法,从最早的测角仪、磁传感器、普通摄像技术到后来的超声、高速摄像技术等。但是这些方法都存在诸如易受外界环境干扰、易妨碍手指运动习惯性、数据量大和仪器成本高等不足。加速度传感器在运动控制中具有高效、准确等特点,本文选用基于 MEMS 的三轴加速度传感器 ADXL330 进行手指运动参数检测并制作了测量装置,该装置简单便于固定于手指上、价格低廉,采用该方法可以检测手指的静态信息和动态信息,更可以从平面运动检测扩展到空间运动检测。

在对传感器外围电路了解的基础上,制作了传感器测量装置包括传感器的电路板、固定传感器的装置等。建立了基于 LabVIEW 软件及硬件的数据采集系统,运用 Matlab 编写了数据处理程序包括对数据的滤波、平滑、计算和图形绘制等。通过分析传感器的内部结构和实验测试,确定以传感器的三个轴与重力方向间的夹角作为检测手指运动的基本参数。在此基础上,通过记录、分析竖直平面内固定在钢条上的传感器在不同角度时的输出数据,结果表明单个传感器的静态输出绝对误差小于 4%;制作了简易的手指关节模型,记录、分析了在竖直平面内两个传感器在不同角度时的输出数据,结果表明了用两个传感器可以测量模型的关节夹角。以上两个实验表明单个传感器可以检测单个指节与重力方向的夹角,用两个传感器可以检测两个指节间的夹角。通过前臂运动姿态检测实验即在竖直平面内将单个传感器固定于手腕附近,采集其在前臂摆动过程中的输出并用高速摄像技术记录前臂运动的过程,结果表明两者之间运动轨迹一致,最终值的绝对误差小于 5%,但是存在一定的时间滞后性。

为了进一步验证测量原理模型的正确性,用步进电机代替手指关节和刚性材料代替手指指节制作了手指模型。电机的驱动部分包括由 L297 和 L298 组成的硬件驱动电路以及基于 LabVIEW 和 USB-6008 采集卡的脉冲控制软件。进行了相关的手指模型实验即将传感器固定在模型的指节上,分别采集模型在不同状态下的传感器的输出,实验结果表明多个传感器可以对多个关节在动态和静态时进行运动姿态检测。因此,所有的实验结果表明在一定误差允许范围内使用该传感器可以进行手指的运动参数检测。

为了将传感器直接用于检测人的手指运动姿态,采用四个传感器对不同的受试者进行了手指(以食指为例)运动参数检测。实验的数据采集系统由 NI9205 采集模块及 LabVIEW 软件组成。实验前规定了受试者的动作方式并进行训练。要

求受试者在实验时分别完成食指向下运动一次（仅近端关节运动，其他两个关节保持不动）、向下运动再向上运动运动一次（要求同上）、自然握拳运动。记录、分析不同受试者在不同运动方式下的传感器的输出数据得到受试者食指运动的角度信息、位置信息、角速度和角加速度信息。初步的实验结果表明食指在自然运动情况下指节运动有先后顺序、不同指节运动的速度不同而且不同指节运动的角度也不相同。

以上所有实验表明：利用加速度传感器进行运动参数检测能得到传感器各轴与重力方向间的夹角，通过该角度关系还可以得到更多的运动参数信息。更重要的是采用三轴加速度传感器进行手指运动参数检测可以从平面运动扩展到空间运动。

**关键词：**手指运动，加速度传感器，重力方向，角度

## ABSTRACT

The detection of human hand movement parameters can be applied in many aspects. Such as the assessment of hand motor function, physical rehabilitation therapy coupled with electrical stimulation and so on. There are many different ways to detect the hand movement, from the earliest goniometer, magnetic sensor, ordinary camera technology to subsequent ultrasound technology, high-speed camera technology and so on. However, there are some disadvantages in these methods such as easily influenced by external interference, impeding the movement of fingers, huge amount of data and the high cost of equipments. This paper select three-axis accelerometer named ADXL330 based on MEMS to detect the parameters of finger movement. All the disadvantages mentioned above can be avoided when this sensor is used to detecting the finger movement. And there are some advantages in this method such as more information can be attain from static state to kinematic state, from plane location to space location.

On the basis of understanding of the peripheral circuits of the sensor, the detecting devices including circuit board of sensor and the fixture were made. LabVIEW and its hardware were used to acquisiting data and Matlab was used to process the data. The data-processing procedures include data filtering, smoothing, computing and graphics rendering. On the basis of analyzing the inner configuration of the sensor and experiments, the sensor measurement principle mathematic model was confirmed and angles between the direction of gravity and three axis of the sensor were selected as detection parameter. Different experiments were done to verify the correctness of this mathematic model. In the demarcate experiment fixing a sensor on a steel bars which was put on different angles in the vertical plane, the results show that the absolute errors of sensor's static state output are less than 4%; in the joint model experiment fixing two sensor on the model which was put on different angles in the vertical plane, the results show that the errors of two sensor are in a certain range. These two experiments show that one sensor can be used to detect the angle between knuckle and the direction of gravity, two sensors can be used two detect angle between two different knuckles. In the forearm experiment fixing a sensor on the vicinity of the wrist when it moves, at the same time, high-speed camera was used to record the process of forearm movement, the results of sensor was contrasted with the results of high-speed camera, which shows that

the traces of them are same and the absolute errors of the final value of angles are less than 5%, but certain time lag is exist.

In order to verify the accuracy of the model further, step motors and the rigid material were used to make the model of finger. And the results of the experiments fixing sensors on this motor-model which was put in different angles in the vertical plane, the results show that the sensors have good repeatability and accuracy. Therefore, all the results of experiments verify that the sensors can be used to detect the movement of fingers.

In order to use the sensors to detecting finger movement, four sensors were used to detect different volunteers' finger movements (index finger). Experimental data acquisition system is comprised of LabVIEW software and acquisition hardware named NI9205 module. Before the experiment, the motion modes were prescribed and the volunteers were trained. In the experiments, volunteers were requested to move their index fingers keeping two joints of their fingers static first, and then fisting naturally. The outputs of the sensors were processed which contain the information of angle, location, angle velocity and acceleration. Preliminary experimental results show that the moving sequence of the knuckles of the index finger is different, the moving speed and acceleration of them are different.

All the experiments show that the angles between axis of sensors and the direction of the gravity can be attained when three-axis accelerometers are used to detect the parameters of movement, from which more movement information can be attain. The most important thing is that this method provides the basis of theory and experiment for space location of objects.

**Keywords:** finger movement, accelerometer sensor, the direction of gravity, angle

# 学位论文独创性声明

本人声明所呈交的 硕 士学位论文  
《基于改进的粒子群算法的入侵检测》是我个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。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谢意。

学位论文作者签名：戴加波

签字日期：2009.6.7

导师签名：何文

签字日期：2009.6.7

# 学位论文使用授权书

本人完全了解重庆大学有关保留、使用学位论文的规定。本人完全同意《中  
国博士学位论文全文数据库、中国优秀硕士学位论文全文数据库出版章程》(以  
下简称“章程”)，愿意将本人的 硕 士学位论文《基于改进的粒子群算法的入侵检测》提  
交中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)在《中国博士学位论文全文数据库》、  
《中国优秀硕士学位论文全文数据库》以及《重庆大学博硕士学位论文全文数据库》  
中全文发表。《中国博士学位论文全文数据库》、《中国优秀硕士学位论文全文  
数据库》可以以电子、网络及其他数字媒体形式公开出版，并同意编入 CNKI  
《中国知识资源总库》，在《中国博硕士学位论文评价数据库》中使用和在互联  
网上传播，同意按“章程”规定享受相关权益和承担相应义务。本人授权重庆大  
学可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公开论文的全部或部分内  
容。

作者签名：戴加波

导师签名：何文  
2009年6月7日

**备注：**审核通过的涉密论文不得签署“授权书”，须填写以下内容：

该论文属于涉密论文，其密级是\_\_\_\_\_，涉密期限至\_\_\_\_\_年\_\_\_月\_\_\_日。

**说明：**本声明及授权书必须装订在提交的学位论文最后一页。

# 1 绪 论

## 1.1 人体运动参数检测的基本概念

人体的运动既复杂, 又有规律, 每一个完整的动作, 各个相关部分之间都有内在的联系, 每个运动项目都是由一系列有规律的动作所组成的。运动学分析主要是对动作的时间和空间规律进行分析, 其研究的主要内容是运动的轨迹、速度(或者角速度)以及加速度(或者角加速度)<sup>[1]</sup>。运动分析过程, 就是建立机构运动的数学模型并求解的过程。要对人体的运动进行分析, 应将人体物化并转化为适当的计算模型<sup>[2]</sup>, 这样才能够科学地对人体进行运动学分析。人体的运动学分析也是对人体进行运动学分析的基础。在人体模型的建模方面, 前人已经做了大量的工作, 其中比较有代表性的是 E.P.汉纳范(Hananvan)<sup>[3]</sup>于 1964 年发表的通过铰链连接的人体数学模型, 他把人体简化为简单几何形状的均匀刚体, 由此来推断人体环节质量的回归方程。崔来友等<sup>[4]</sup>提出了人体机械化的概念, 把人体等效为机构, 应用机构学的基本理论建立了人体的运动学模型, 再运用坐标变换的数学方法解决了人体运动位姿的计算问题。

人体运动参数检测是生成人体运动计算机仿真演示和控制拟人机器人运动的主要手段。尤其近年来很多国家都大力开展了作为多学科、高精端技术融合的拟人机器人的研究工作, 其中主要方面是拟人机器人的仿人运动。用于人体运动检测的方法大致可以归纳为机械式、磁场式和光学式三种。机械式方法采用测角仪的原理, 在人体上绑缚测角仪或穿上传感衣服, 可以直接测量人体在关节空间中的运动角度, 由角度测量结果可进一步计算关节的角速度和角加速度。但这种方法不能适应各种各样的人体体形, 会对人体的运动形成一定的限制。磁场式和光学式测量方法在实际应用中更为广泛。磁传感器可以测量位置和方位, 在处理遮挡情况时比光学传感方法要好, 然而, 这种方法对人体周围环境中的铁磁性物体非常敏感, 所产生的测量噪声比光学传感方法大很多。光学式方法, 主要原理是采用摄像机记录人体运动, 形成图像序列, 进而分析计算出人体运动参数。其主要特点是基本上不干涉人体运动, 在不同的领域如人体医疗康复、运动员运动分析、保安监视等已得到了广泛应用<sup>[5,6]</sup>。在光学式人体运动参数测量方法中, 一种研究思路是在人体上加贴标记点, 利用记录标记点的位置来反应人体的关节位置和运动情况。这种研究思路简单有效, 所提取的人体运动数据应用于拟人机器人的运动控制中<sup>[7]</sup>, 但存在标记点被遮挡的问题。另外一种思路就是基于人体模型的方法, 也是近年来日益受到国外学者重视的一种研究方法。即将人体看成是若干刚体由关节连接而成的系统, 在人体运动分析中, 可以人体模型假设成杆状模型,

平面模型和三维立体模型。人体模型对人体的描述越准确,则将得到越真实的人体运动分析结果<sup>[8]</sup>。

## 1.2 手的运动参数检测的重要性及主要进展

手的运动参数检测具有广泛的研究性和应用性。手指运动的研究主要集中在脑机接口、康复工程、远程控制、虚拟技术等方面。对人体假肢的制作、太空研究等领域都有广泛的应用。

在脑机接口方面,主要通过脑电(EEG)、表面肌电(sEMG)和核磁共振(fMRI)等手段来研究手指运动的动作模式和动作识别。

关于手指的动作识别国内外采用最多的方法是通过拍摄手指的动作,通过图像处理和算法的改进进行理论研究。手势是一种常用的自然直观的交流方式。手势识别研究的主要目的就是把手势引入到人机接口(Human Computer Interface, HCI)中,实现更加符合人类行为习惯的人机接口。手势识别和手的运动跟踪在人机交互技术中起着重要的作用,但由于各种原因,手的三维运动跟踪显得非常困难。手势识别可用于虚拟现实、三维设计、临场感、可视化、医学研究、手语理解等领域中,它的解决方法对于表情识别、唇读、步态识别、时空纹理分类、视觉导航、图像拼接和基于内容的视频检索等研究都有直接推广的意义。最近几年,基于计算机视觉的手势识别<sup>[1]</sup>逐渐引起研究人员的关注和兴趣。同采用数据手套或电磁波等方式的手势识别相比,基于视觉的手势识别更加自然舒适。数据手套和电磁波发射器等接触性传感器会削弱人机交互的自然性和灵活性。基于视觉的手势识别过程可以分为分割、表示识别3个阶段。分割阶段需要解决的主要问题是环境因素,特别是背景的影响。最简单而常用的方法是附加某种限制,如限制使用黑色或白色的墙壁、深色的服装等来简化背景,或要求人手戴上特殊颜色的手套或者加上标记物等来强调前景,这样可以直接从背景中分割出手<sup>[9,10]</sup>。由于人体皮肤颜色在HSV空间具有聚集的特性,有人应用这种特性将手势从复杂彩色背景中分割出来<sup>[11]</sup>。差值图像法<sup>[12,13]</sup>首先录制背景图像,将含有手势的图像和背景图像进行比较,从而分割出手势。迄今为止,除了运动捕捉系统(光学、电磁波)和数据手套以外,几乎没有特别鲁棒的手的三维运动跟踪方法,更谈不上对手的三维运动进行实时跟踪。其主要原因是<sup>[14]</sup>:

(1)手指的三维运动是一种既非形变也非刚体的多自由度的运动,因此在跟踪过程中需要同时估计多个运动参数;

(2)人的观察力敏锐,任何微笑的错误运动都很容易被看出,因此在实际的运动跟踪中需要获取非常精确的三维运动;

(3)手运动时,仅仅通过一个摄像机是不可能始终跟踪手的所有部分,因其某



一部分经常会遮挡另一部分, 由于遮挡, 被遮挡部分的信息就会在图像序列中丢失, 从而不可能跟踪或评估出被遮挡部分结构的三维运动。

目前, 主要有以下三种运动估计的方法<sup>[15]</sup>:

(1) 基于特征点。这种方法的最大困难在于如何从人的运动序列图像中获取高精度的匹配特征点<sup>[16,17]</sup>。虽然此类方法中的运动捕捉系统和数据手套比较有效, 但该系统需要在关节上安放特殊的标志和穿戴特殊的设备, 以便在序列图像中准确跟踪这些特殊的标志<sup>[18]</sup>。正是因为需要安放特殊的标志和穿戴特殊的设备, 因而极大地约束了该系统的应用范围。

(2) 基于边缘特征。这种方法通常需要比较简单的背景, 以便能够从背景中分割出运动物体的边缘<sup>[19,20]</sup>。但通常情况下, 即使有简单的背景, 也很难做到有效的分割。因为衣服的许多褶皱和皮肤的相似性足以使许多图像分割的方法不可能从背景中分割出有语意的身体和手指的各个部分。

(3) 基于区域特征。这种方法绝大部分是通过基于光流的匹配模板来实现的<sup>[21]</sup>, 其跟踪误差是逐步积累的, 因而随着跟踪帧数的增加, 误差也越来越大, 从而产生误差的匹配, 而一旦产生错误匹配, 由于没有反馈过程, 就不可能回到正确的匹配中去。

近几年来, 基于事件相关脑电图(EEG)的脑-机接口(BCI)研究, 无论在理论还是应用上都取得了长足发展, 也吸引了人们越来越多的关注<sup>[22]</sup>。脑-机接口是在人脑与计算机或其他电子设备之间建立的直接的交流和控制通道, 通过这种通道, 人就可以直接通过脑来表达想法或操纵设备, 而不需要语言或动作。具体来讲, 脑-机接口实验可以将实验者的运动想象、特定任务执行等大脑信息以EEG形式传递出来, 当这种EEG被计算机获得后, 我们就可以运用适当算法进行进一步的信号处理和机器学习<sup>[23]</sup>。首先, 适当的特征需要被从EEG中提取出来, 然后通过方程式或神经网络等复杂算法再将这些特征进行转化, 以便产生左、右手等相关控制信号来达到控制机器的目的<sup>[24]</sup>。在众多的脑-机接口实验中, 基于脑电信号的手指动作识别由于具有实验方法简单、响应时间短、识别率高等优点而成为一个研究重点<sup>[25]</sup>。山东大学李同磊等<sup>[26]</sup>就是运用了一种基于运动感觉皮层脑电位下降(BP)和事件相关非同步(ERD)的算法来对左、右手食指敲击键盘的单试验EEG进行识别, 这种算法使用共空域子空间分解(CSSD)来分析多通道EEG信号、提取特征, 然后应用神经网络来训练数据, 最后进行分类识别。

表面肌电信号是一种无创的评价肌肉活动的检测方法。重庆大学许蓉<sup>[26]</sup>等为了探讨手部握力与前臂表面肌电信号的关系, 通过实验在不同握力水平下采集受试者前臂指浅屈肌和桡侧腕长伸肌的肌电信号, 将采集到的肌电信号用中位频率的方法分析提取特征值, 并运用 SPSS 软件统计同一握力水平不同受试者的特征

值。活程度无明显差异。王人成等<sup>[27]</sup>建立一套基于表面肌电信号(sEMG)的手指运动模式识别系统。研发了基于有源电极的 sEMG 检测装置和包含信号采集、分析、离线识别和在线识别模块的配套软件。该系统能够同时采集 4 个通道 sEMG 数据, 用 16 种时域、频域和时频域方法对其分析, 并可以对 7 种 sEMG 特征提取及分类方法进行对比研究, 还能在线控制假手。该系统为多指、多自由度假手 sEMG 控制方法的研究提供了一个实验平台, 该系统不仅可以用于手指运动模式识别, 而且也可以用于人体其他运动模式的 sEMG 特征提取方法和分类器的对比研究。

美国学者Ogawa在1990年首先提出了血液中的脱氧血红蛋白可改变血管周围水分子的MR信号理论, 为fMRI的产生奠定了理论基础<sup>[29,30]</sup>。国际上应用最广泛的fMRI技术是快速回波平面成像, EPI是Mansfield在1977年首次阐述的<sup>[30]</sup>, 通过单次脉冲激发提供重建需要的全部梯度回波, 是目前最快的磁共振成像方法。手指运动相关脑皮层功能区fMRI的研究进展主要在如下两个方面<sup>[31]</sup>:

(1) 利手(右手)与非利手(左手)运动的比较利手和非利手运动脑结构基础的差异主要表现在 MII、PMA、SMA。左右手运动都能激活对侧的 MI, 双侧 SMA 和 MII。对于 MII, 左右手运动都以右侧激活为主。与利手相比较, 非利手运动进一步激活了对侧 PMC;各脑区的激活体积非利手较利手运动大<sup>[32]</sup>。学者<sup>[38]</sup>通过研究发现, 运动皮层的不对称现象非常明显。右利手者右手运动时, 左侧大脑半球运动区激活程度较右侧半球运动区强 30~40 倍, 而左利手右手运动时, 左、右大脑半球运动区激活磁共振功能成像已不再停留在实验室研究水平, 而广泛应用于临床, 并扩展到广泛的领域, 如心肌灌注及肾脏等成像。国外一些学者应用功能性磁共振成像技术辅助神经外科手术, 在保留运动及语言功能方面取得了理想的效果。在神经病学和精神病学、癫痫治疗等方面, 磁共振功能成像起到了不可低估的作用。部分学者认为<sup>[33]</sup>, 在脑内某个参与运动完成的中枢失去功能时, 了解和利用不同运动模式的激活区活动规律, 借助脑内原有的神经网络联系, 经过一定的康复训练, 对如何代偿或激活失去功能的区域具有十分重要的指导意义。关于运动区, 很多学者做过诸多的实验, 包括利手与非利手对比研究, 简单运动与复杂运动、随意运动、假象运动的对比研究等<sup>[32-36]</sup>, 掌握了各区参与运动的协调性与具体分工, 提出了较成熟的运动区协作关系与作用, 如补充运动区(SMA)、运动前区(PMA)、前运动区(PMC)、初级运动区(MI)、运动二区(MII)、顶上小叶(SPL)及前辅助运动区(pre-SMA)等。学者认为, 复杂运动的手指运动是评估人脑功能状况的可行性刺激模式<sup>[34]</sup>。

(2) 简单运动与复杂运动的比较刺激方式的选择与皮层功能区的激活具有明显的相关性。简单手指运动只有对侧主要功能区的激活——MI 区, 复杂运动不仅激活 MI 区, 常伴补充运动区 SMA、PMA 区的激活<sup>[33,34]</sup>, 偶尔有同侧第一运动区

的激活<sup>[37]</sup>。当运动难度增加时,除 MI 区外,各区的激活强度随着任务难度加大而增加。PET 试验也证明<sup>[39,40]</sup>,复杂运动时脑血流量的变化区域和程度都要大于简单运动,二者相吻合。通过实验可以证明,利手在进行简单运动时,大脑需要参与该运动完成的区域最少,阐明了为什么人在复杂工作过程中比简单工作更易引起脑疲劳。另外,在研究中发现,运动时,不仅仅大脑半球参与,小脑也同样起一定的作用。简单运动主要依赖于同侧小脑,而当运动复杂程度提高时,需要进一步依赖于对侧小脑的参与<sup>[32]</sup>。

正是基于以上理论的研究,才有了肌电假手和电子假肢的长足发展。肌电假手也称生物电假手,是利用人体的肌电信号进行控制的电动上肢假肢。它是一种利用残肢肌肉收缩时产生的肌电信号,由皮肤电极引出,经过生物电放大器放大后,控制微型直流电机运转,驱动假手开合。由于肌电假手的运动接受大脑指挥,它除了具有电动假手的长处外,还具有直感性强、控制灵活和使用方便等优点,是现代上肢假肢的发展方向。

1919 年 Borchard 等<sup>[41]</sup>最早发明了用电能作为外来动力驱动的机械假手,打开电源开关,食指和中指就能推动拇指,但由于当时缺乏合适的控制系统以及未能解决可提供电源的电池,这种电子假手从未得到实际应用。后来,一种被称为 Vaduz<sup>[42]</sup>的假手得到应用,并在 1949 年申请了专利。这种电子假手是应用残肢残存的肌肉收缩或松弛时残肢周径的不同作为控制信息源的。直到肌电控制假肢出现以后,电子假手的发展才到重视。1945 年德国的 Reiholdreter<sup>[42]</sup>对肌电控制理论进行了基础研究,并发表了肌电控制假肢的实验研究结果。1948 年 Reiholdreter 研制成功世界上第一只肌电控制假手,这只假手被安装在长凳的一端,电子系统中有许多真空管,用一块肌肉控制它的张开和闭合,是第一个单点控制的范例。经过 1957~1960 年的发展,通过将电子假手内的晶体管、电池与电子元件的分别安装,并通过电缆连接,使假手变的十分轻便。20 世纪 60 年代,德国 Ottobock<sup>[43]</sup>公司致力于开发一种符合机械和美容要求的电子假手,该公司于 1965 年生产出了包括三个部分的肌电假手:①具有拇指、食指、中指三个手指,并能完成抓握动作的机械底盘;②应用软塑料做成的具有手形状的内手;③具有真手外观的美容手套。1978 年 Herberts<sup>[44]</sup>等报道了多功能假手的研究成果,利用 EMG 幅度识别和截肢者幻觉,用表面电极检出肌电信息,控制三个自由度电子假手完成指伸、指屈、旋前、旋后、腕伸、腕屈六个动作,准确率为 57%。20 世纪 80 年代 Denning<sup>[45]</sup>等用新的方法识别肌电信息,控制三自由度假肢准确率提高到 72%。1992 年,由德国 Ottobock<sup>[43]</sup>公司和奥地利 Viennatone 助听器公司合作生产第一代经桡肌电系统可以在市场买到。我国从 20 世纪 60 年代初开始探讨应用肌电控制假手。20 世纪 60 年代中期研制出单自由度肌电控制前臂假手,1979 年研制成功三自由度肌电

控制前臂假肢。据不完全统计,我国残肢者正在使用的各类肌电控制假手早已达数万只<sup>[46]</sup>。

自上个世纪 60 年代至今,已经开发出来的机械多指手有很多种,比较有代表性的是 Okada 手, Stanford/JPL 手(也称 Salisbury 手), Utah/MIT4 指手, DLR 系列手, 美国 Johnson 空间研究中心研制的 5 指手、Shadow 多指手、北京航空航天大学研制的 BH 系列手、哈尔滨工业大学的 HIT 系列手等。第一个真正意义上的多指手是日本研制的 Okada 手<sup>[47]</sup>。该手由手掌和三个手指组成,其中拇指有 3 个自由度,另外两个手指各有 4 个自由度,利用电动机驱动钢索完成运动和动力的传递,可以完成拧紧螺母的装配任务。进入 20 世纪 80 年代,随着各种驱动、传感和控制技术的发展,多指手的研制有了较大的发展,研究范围也从机构设计扩大到传感器设计以及抓取操作算法等方面,1984 年,美国 Stanford 大学研制的 Stanford/JPL 手<sup>[48,49]</sup>是最具代表性的非仿人多指手。它是一种 3 指 9 关节手,每一个手指具有 3 个自由度,拇指与其他两个手指相对布置。每个手指由 4 个直流力矩电动机驱动,通过 4 条钢索张力的调节来控制 3 个关节力矩的大小。受到人学和仿生学的启发,1985 年美国麻省理工学院和犹他大学研制出 4 指的仿人多指手——Utah/MIT<sup>[50,51]</sup>。20 世纪 90 年代,多指手的发展进入了一个新的阶段,手指数、关节数逐渐向人手靠近,手指上附加的传感器类型及数量逐渐增加,为模拟人手指功能,实现灵巧操作创造了条件,其中德国宇航中心研制的 DLR 系列手<sup>[52,53]</sup>最具有代表性,DLR2 I 多指手由 4 个完全相同的手指组成,每个手指具有 4 个关节。末端的一个关节存在机械耦合,使用一个驱动器进行驱动。从 20 世纪末开始,各国研制的多指灵巧手样机无论从外形还是功能上更加接近于人手,能够完成类似人手的各种复杂操作。美国约翰逊空间中心(NASA)于 1999 年研制成功的 Robonaut 多指手<sup>[54]</sup>由 1 个用于安装电路板的前臂、1 个手腕和 5 个手指组成,共有 14 个自由度,其中手腕有 2 个自由度,拇指、食指和中指各有 3 个自由度,无名指和小拇指各有 1 个自由度,手掌有 1 个自由度。Shadow 多指手<sup>[55]</sup>是由英国 Shadow Robot Company 公司开发的一种最新型仿人手。Shadow 多指手由 5 个手指和手掌组成,其中拇指和其余 4 指相对布置

20 世纪 80 年代后期,国内的机器人研究机构和部分高等院校相继开展了机器人多指灵巧手的研究工作,如北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、国防科技大学、北京理工大学、北京科技大学等都在多指灵巧手方面做了大量的工作,其中北航研制的 BH 手和哈尔滨工业大学研制的 HIT 手最具代表性。北京航空航天大学机器人研究所先后研制了一系列的 BH<sup>[56]</sup>多指手。BH23 型多指手,结构上借鉴了美国的 Stanford/JPL 多指手,没有手掌,有 3 个手指,每个手指有 3 个关节,3 个手指共 9 个自由度。哈尔滨工业大学的 HIT21 手<sup>[57]</sup>是一种仿 DLR 手。HIT22<sup>[58]</sup>

多指手是由哈尔滨工业大学机器人研究所与德国宇航中心合作开发的具有多种传感功能的新一代机器人多指手。该手由 4 个手指和手掌组成, 共有 13 个自由度, 其中每个手指有 4 个关节、3 个自由度, 拇指另有一个开合的自由度。

综上所述, 现有多指灵巧手的结构形式大都是多指多关节手, 并且手指数目普遍为 3~5 个, 各手指的关节多为 3~4 个转动关节, 整个手具有冗余自由度。从复杂程度上可以把其分为两类: 一类多指手以 Stanford/JPL 手为代表, 没有手掌, 共有 3 个手指, 每指 3 个关, 总的自由度较少, 易于设计制造和控制, 但抓取缺少柔性, 与人手的差异较大, 一般只作为理论研究的实验模型; 另一类以 Utah/MIT4 多指手为代表。它是一种仿人手, 各手指都连接到手掌上, 相对于手掌运动。它的主要问题是关节自由度太多, 控制复杂, 难以实现在线控制, 是机器人多指手研究的难点和未来需要突破的研究发展方向<sup>[59]</sup>。

## 1.3 研究目的及研究内容

### 1.3.1 研究目的

人类完成复杂、灵巧的动作依赖于手指之间的协同配合, 其内在的神经调控机制是运动生理学、康复医学、神经科学、人-机工程学共同关注的问题。研究该方法的方法有很多, 其中运动跟踪是研究该问题的一个重要手段, 即能实时的记录手指的运动状态, 并能提取出其运动参数。本课题采用的是三轴加速度传感器来检测手指运动参数, 目的是实现一种实时检测手指运动姿态的方法, 并设计出相应的装置。

### 1.3.2 研究内容

要实现对手指运动姿态的实时检测, 就需要在硬件上设计出相应的测量装置在软件上编写数据采集及数据分析的程序。本文选用的传感器为加速度传感器, 数据采集系统由 NI 公司的 LabVIEW 软件和相应的采集硬件组成, 数据分析选用 MATLAB 软件。具体的研究内容如下所示:

- ① 了解手指运动特性, 确定检测手指运动姿态的参数;
- ② 电路制作和固定传感器电路的装置的制作;
- ③ 了解传感器的特性;
- ④ 数据采集、处理和显示;
- ⑤ 人体手指运动姿态检测实验。

本文的主要内容就是建立起手指与手指模型的关系, 最终目标是能通过模型来验证基于传感器的检测方法的正确性又能将传感器装置固定手指上来控制模型的运动。

## 2 手的运动生理特性及测量

### 2.1 引言

从解剖学的角度,了解手指的运动生理结构,为手指的运动分析提供基础。同时了解国内外关于手指运动的生理特征模型及手的运动生理参数检测的方法,确定本文采用的检测方法。

### 2.2 手的生理运动结构

人手由肌肉和骨骼组成,肌肉依附在骨骼之上,骨骼之间又是有好多关节相连<sup>[60]</sup>。如图2.1所示,手是一个多关节的系统,它由27块骨骼组成,分为腕骨、掌骨和指骨。腕骨共8块,排列成近远两列,构成一掌面凹陷的腕骨沟,由关节巧妙地连接着,并且在手的运动过程中只有微小的形状变化,因此在手模型中将其简化成刚体;掌骨共5块,由桡骨向尺骨依次为1~5掌骨,近端为底,接腕骨,远端为头,接指骨,中间部分为体,第一掌骨最短而且粗;指骨属长骨,共14块,除拇指仅有2节指骨外,其余各指都有3节指骨,分别为近指骨、中指骨和远指骨。人手由手腕、手掌、一个拇指和4个相邻的手指组成,它们由关节相互连接着,DIP,PIP等分别是关节的名字。当关节运动时,各块骨骼也在发生相应的运动,人手的形状也随着不断地发生变化,即肌肉的扩张和收缩。因此手部运动的自由度与这些关节紧密相关。

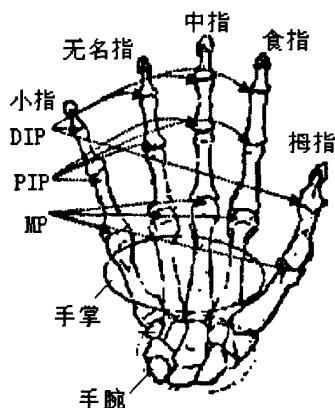


图2.1 手部生理结构<sup>[60]</sup>

Figure 2.1 Physiological structure of hand

人手的关节运动有如下两种运动形式<sup>[61]</sup>: (1)屈和伸。组成关节的两骨互相靠拢,其夹角逐渐变小的运动为屈;相反,两骨之间的夹角逐渐变大的运动为伸。(2)

内收和外展。手指的内收和外展是以通过中指中轴的假想线为准,肢体向中指中轴靠拢的运动为内收,而离开中指中轴的运动为外展。另外,还有一种运动称为环转运动,即肢体的近端在原位转动,远端环绕作圆周运动,运动时整个肢体画成一个尖在近端、底在远端的圆锥形轨迹。环转运动是屈、展、伸、收依次连续的动作。人手总共有31个自由度,每个手指(除拇指外)均有4个自由度,关节DIP和PIP分别有一个,只作屈伸运动,MPJ有两个,可作屈伸、收展和旋转运动;大拇指的结构不同于其它4个手指,有5个自由度,关节TIP有一个,作弯曲运动,TMPJ和TMJ分别有两个,作伸屈和外展运动;MCJ也只有一个自由度;另外手掌在空间中运动还有6个自由度,由于在手部模型中仅仅是模拟手指的运动而不是整个手相对于胳膊的运动,所以,这6个自由度可以忽略不计。这样需要实际考虑到的自由度仅有25个。

从人手的解剖图可知<sup>[62]</sup>: (1)人手可完成线状、二维和三维物体的抓取。并且小指在抓取和操作时所起的辅助作用是不容忽视的; (2)拇指和其他手指均有4个关节自由度,指关节从手掌内到指端依次命名为基关节、近基关节、中关节和末梢关节; (3)拇指最灵活,手指的末梢关节与中关节紧密咬合,不易单独控制。而拇指关节都可以独立运动,这就决定了拇指较其它手指灵活; (4)4指结构几乎一致,方便了仿人机械手指的模块化设计、制造、组装与维护; (5)手指的近基关节结节与基关节相连处垂直正交,在腱的带动下,近基关节可以自由做前俯和后仰运动。

### 2.3 手的运动生理特征模型

手的特征模型的建立是仿生人手制作的理论基础。仿生人手结构是提高机器人灵巧手性能的一种有效方法。早期的灵巧手样机大多采用根据某些运动学优化指标提出的设计方案<sup>[63]</sup>,近期的灵巧手样机向着仿人形方向发展<sup>[64-66]</sup>。设计仿人形灵巧手的主要依据是:人手经过自然界进化已经成为优化结构是灵巧手设计的重要参照;生活中的各种工具是按照人手使用习惯设计的,仿人形灵巧手更适合操作这些工具;仿人形灵巧手与人手具有操作一致性,可以利用人的操作经验实现控制。另外,在某些特殊领域,如医疗、仿人机器人、娱乐等,仿人形灵巧手具有亲切感,容易被用户接受。

目前,在人手运动学模型问题上,基本取得了共识性的研究成果<sup>[67,68]</sup>,一般认为,手指(拇指除外,下同)指掌关节具有两个轴线垂直相交的转动自由度。在此基础上,本文认为指掌关节的运动学结构还需要进一步分析完善。首先,从运动学角度看,两相交轴线按照排列先后次序可以构成两种不同的运动学结构,而指掌关节只能是两者之一;其次,人手在此关节转角极限处,两个自由度具有运动相关性,这种相关性影响手指工作空间。只有研究清楚人手的实际结构,才可

能按照人手结构设计仿人灵巧手，并做出合理的灵巧手抓持规划。

### 2.3.1 点线模型

通过对手部的结构分析，得出如下图所示的点线模型<sup>[69]</sup>。可以看到手指的运动都是围绕关节进行的，通过分析可以将手指运动归纳为两大类型：手指指骨绕关节的弯曲运动和手指绕基部

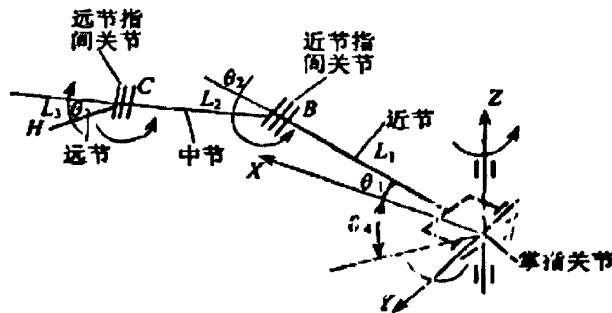


图 2.2 手指点线模型<sup>[69]</sup>

Figure 2.2 Point-line model of finger

关节 MP 的旋转运动。分别处理如下：

① 手指指骨绕关节的弯曲运动姿态的确定。以食指为例，食指各部分指骨绕关节发生转动，该运动平面与手掌平面相垂直。定义相互之间的夹角为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  和  $\theta_3$ ，并规定初始状态  $\theta_1=\theta_2=\theta_3=\pi$ ，即手指完全伸直状态。通过传感器测出  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  和  $\theta_3$  变化后的值并与初始态相比，即可以确定食指各部分指骨的运动姿态。

② 手指绕基部关节 MP 的旋转运动的确定。显然该旋转平面即是手掌平面，这种运动的结果就是确定了相邻两手指之间的位置。相应地定义相邻两手指之间的夹角为  $\gamma$ ，规定初始状态  $\gamma=0$ ，即两指并拢状态。同样的道理，通过传感器测出  $\gamma$  变化后的值，然后与初始态相比即可确定相邻两指的运动位置情况。这样就可以得出手指相对于初始状态的位置变化，从而确定手指的运动姿态。需要补充的是，由于生理结构的特点，手指指骨运动存在着很多约束条件，显然数据手套也必须遵守这些约束，可以在软件处理中将不满足约束的情形进行清除；另外由于将手简化为刚体模型处理从而建立起手指的运动学模型，而实际上手并非刚体，存在肌肉皮肤等软组织，因此还需要对模型进行必要的修正，这样建模的工作量和复杂度将大大增加，因此本文就不做深入讨论。

### 2.3.2 关节-指节模型

图 2.3 为根据解剖学知识得到的人手运动学简化结构。一般认为，除大拇指外其他 4 个手指的结构相同，各具有 4 个自由度，分别是指掌关节的屈曲和侧摆自由



度，中指节关节和远指节关节的屈曲自由度，指掌关节处屈曲和侧摆运动的两个轴线垂直相交。

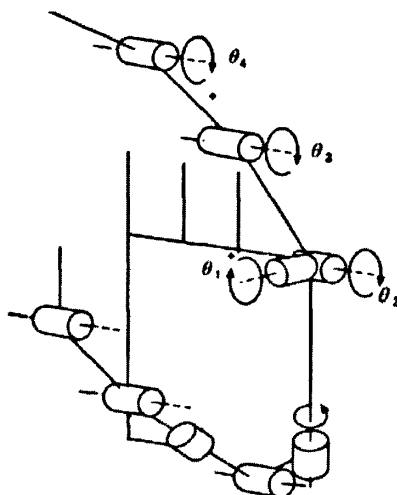


图 2.3 人手运动学简化结构示意图<sup>[70]</sup>

Figure 2.3 Simplified kinematic structure of human hand

手指（以食指为例）指掌关节两个转动轴线的不同排列次序对应于两种不同的运动学结构。两轴线排列次序为先侧摆再屈曲的关节称为侧摆型关节。两轴线排列次序为先屈曲再侧摆的关节称为屈曲型关节，见图 2.4 对于实际机构，通过分析两轴与机架的连接关系，可以判定关节类型。

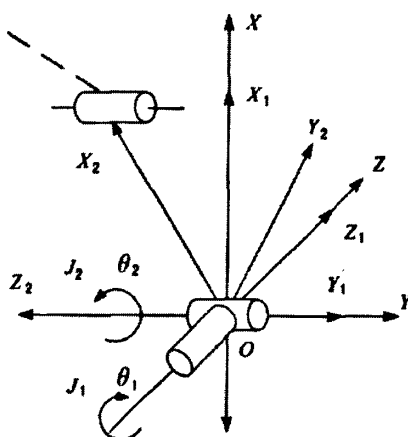


图 2.4 侧摆型关节结构<sup>[70]</sup>

Figure 2.4 Structure of AMPJ

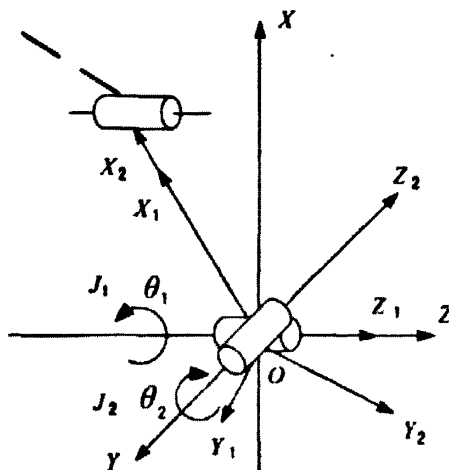
图 2.5 屈曲型关节结构<sup>[70]</sup>

Figure 2.5 Structure of FMPJ

上述两种运动学结构对应着两种手指运动学模型，在限定相同转角范围的条件下，它们具有不同的工作空间。手指的指掌关节在转角范围内自由运动，限制其他关节运动<sup>[70]</sup>。

### 2.3.3 基关节运动学模型

假设仿人机械手指基关节的 2 个自由度分别由 2 个链杆完成;应用指关节坐标系建立手指基关节坐标系和参考坐标系，见图 2.6。

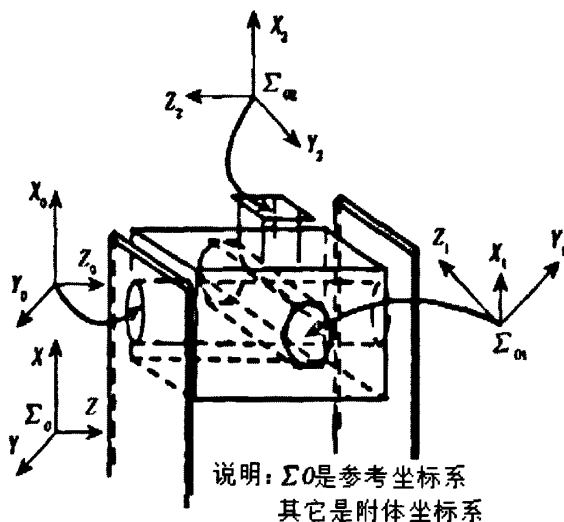
图 2.6 基关节链杆坐标系<sup>[71]</sup>

Figure 2.6 Joint-based coordinate system

### 2.3.4 仿人机械手运动学模型

根据图 2.7 所示人手的解剖学结构和仿人机械手结构以及指关节坐标系建立算法, 我们建立仿人机械手的坐标系, 如图 2.8 所示。图 2.6 仅给出了拇指和小指各关节的坐标系, 其他从略。参考坐标系为手掌坐标系  $\Sigma_{\text{palm}}$ , 它可与拇指基关节坐标系绑定(图中为了直观, 单独标识参考坐标系)。每个手指有 4 个关节, 从根关节到末梢依次记为 1、2、3、4。对于相邻的两个关节, 以前一个关节为临时参考坐标系, 建立后一个关节的 D-H 变换矩阵<sup>[72]</sup>。

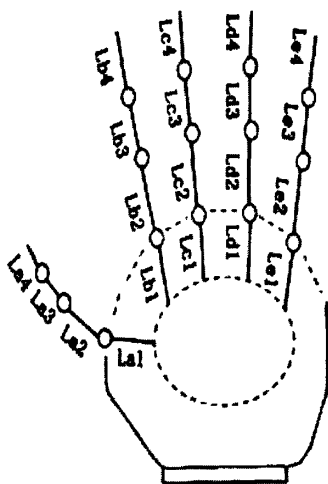


图 2.7 仿人机械手结构示意图<sup>[71]</sup>

Figure 2.7 Structure diagram of bionic manipulator

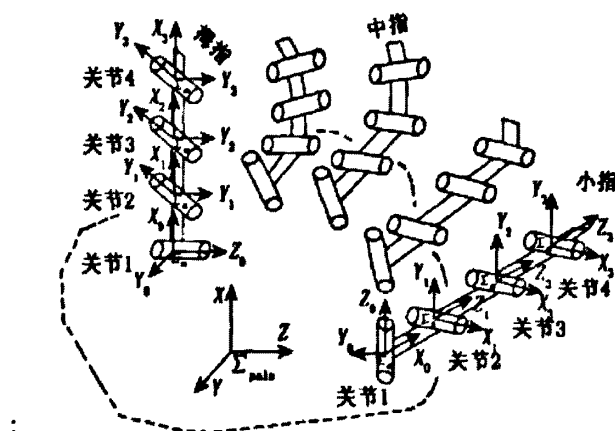


图 2.8 仿人机械手模型及关节坐标系<sup>[71]</sup>

Figure 2.8 model of biomic manipulator and joint coordinate system

本文所采用的手指模型即是最初的简但链杆模型，坐标系为自然坐标系即水平竖直坐标系。

## 2.4 手的运动生理参数检测方法

在手的运动测量方面有多种不同的方法，最早的人体手部运动测量方法是采用测角仪绑缚在人手上进行测量，这种方法的缺陷是不能确定手部运动位置，关节受力和肌肉力矩等<sup>[72]</sup>。电磁式跟踪器也可以用来监测手指的姿态，但是其测量精度易受金属环境的影响。这是因为交变磁场会在附近的导电材料中产生涡流，它们产生二次磁场，使原有的磁场改变，在系统中产生误差<sup>[73]</sup>。Hahn 等人提出用超声测量手指关节运动。这样就使评估手指动态运动成为可能，但却阻碍手指运动的习惯性<sup>[74]</sup>。但主要有基于视频图像处理的动态监测和基于传感器的动态监测方法。视频图像动态监测是在不同时刻对肢体动作进行连续采样而获得的一组图像序列，测试、分析这些图像序列可以描述对象的动态运动过程，即反映不同时间目标的位置和状态，从而得出普通二维图像所不能表达的动态特性和运动学规律。动态序列图像的研究分析，不仅需要具备单帧静态图像的采集、处理、增强、分割、测量、识别等基本技术，同时又要通盘考虑序列的整体时序性，因此需要较高的采样频率，数据量极大，仪器成本较高<sup>[75]</sup>。

基于传感器的肢体运动动态监测是利用各种传感器动态测量肢体运动对空间感应场的反应。如采用加速度计、磁场计、速率陀螺等<sup>[76]</sup>，动态测量肢体在重力场、磁场中的分量以及角速度等状态，由通讯传输至监控机，进行数据处理和分析，从中找出运动状态。这种方法的特点是：结构简单，数据处理容易，仪器成本低廉<sup>[77]</sup>。

使用三维加速度计可以实时检测人体上肢运动<sup>[78]</sup>，可以获得平面甚至是空间内的角度，位置，速度，加速度等运动参数，Carpinella 等人<sup>[79]</sup>运用三维传感器进行手指动态分析的试验取得了很好的成果。国内也有人将三位加速度计运用于设计人体训练强度监测仪<sup>[80]</sup>及肢体运动微型检测系统<sup>[81]</sup>等方面。

## 2.5 本章小结

通过对人体手部的解剖结构分析，确定手部生理模型，在实验分析的时候选用点线模型，在制作手指模型时选用关节指节模型；同对国内外手部运动信息检测的方法进行比较分析，确定采用基于 MEMS 的三轴加速度传感器 ADXL330 对手指的运动信息进行检测。

3 加速度传感器及其在运动参数测量中的应用

3.1 传感器的选择

3.1.1 ADXL330 介绍

ADXL330 是美国模拟器件公司（ADI）新近推出的一款带有信号调理电路，可提供模拟电压输出的小量程、小尺寸、低功耗三轴加速度计。ADXL330 将 MEMS 传感器结构与信号调理结合在一起，功耗电流降低至 200 $\mu$ A(在 2.0V 电源电压下)，比同类器件的功耗典型值低 50%<sup>[82]</sup>。

ADXL330 的引脚排列如图 2.3 所示。从图中可以看出，1、4、9、11、13、16 是预留引脚；2 引脚是自检脚；5、6、7 引脚是公共地；14、15 引脚是电源；8、10、12 引脚是加速度模拟信号输出。为了使 ADXL330 正常工作，还需要一些简单的外围元件<sup>[83]</sup>。

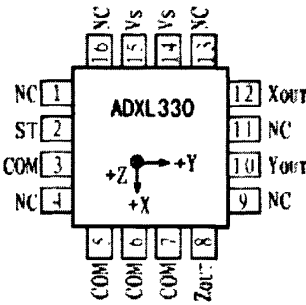


图 3.1 ADXL330 引脚排列

Figure 3.1 ADXL330 pins arrange

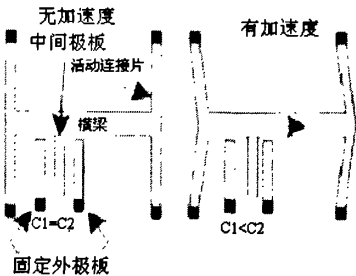


图 3.2 传感器原理

Figure 3.2 The principle of sensor

ADXL330 基本工作过程为：首先利用微传感器感知三维的加速度，将得到的

三维交流信号放大，然后分别将信号解调，在输出端分别将三路信号再次放大、滤波后输出和加速度成正比的模拟电压 [83]。

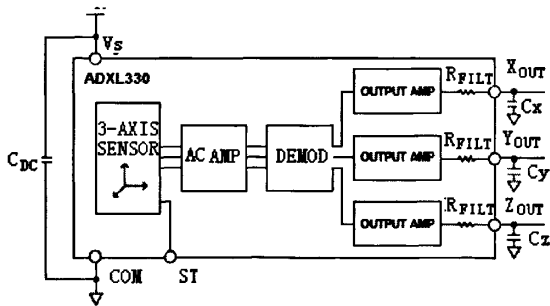


图 3.3 ADXL330 的内部功能模块图

Figure3.3 Modules map of ADXL330 internal function

ADXL330 采用了新的设计技术，保证了其高性能，同时避免了使用额外的温度补偿电路，这种设计可以最大限度地减少量化误差和测量结果的非线性，温度的滞后性也很低（-25℃~70℃时，温度的影响小于 3mg）。

3.1.2 ADXL330 外围电路

加速度传感器 ADXL330 的外围电路如图 3.4 所示[84]。改变电容 C<sub>x</sub>、C<sub>y</sub> 和 C<sub>z</sub> 的大小即可调整带宽[85]。在 DXP 软件中绘制原理图（如图 3.4 所示）。在绘制过程中，传感器 ADXL330 需要单独绘制，其大小依据实际大小进行绘制。其中，引脚间的距离是最关键的注意点，因为它直接影响到制作出电路能否正常使用。电容采用贴片电容。实际制作出的电路板的大小为：10mm\*10mm

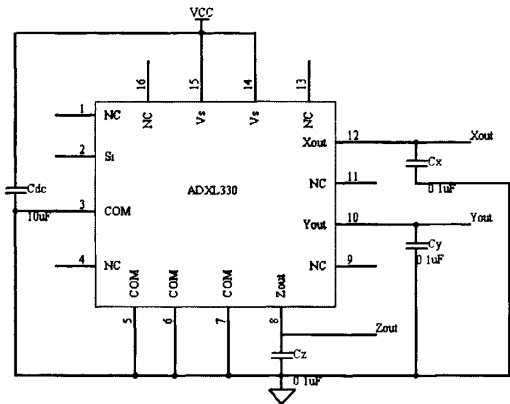


图 3.4 传感器外围电路原理图

Figure3.4 Circuit schematic diagram of sensor

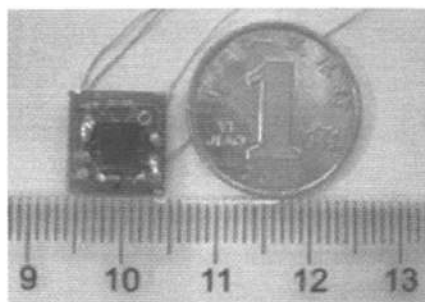


图 3.5 传感器电路板

Figure 3.5 The actual circuit board of sensor

电路焊接时的注意事项：(1)由于该电路板比较小，而且所选器件都是贴片封装，兼之传感器的封装特殊：所有的引脚都没有伸出在器件的下面，所以首先是把元器件都焊接到电路，其次就要检测焊接的正确性。焊接的时候，在电路上涂上焊锡和松香，然后用电吹风进行焊接，松香的目的是保证元器件不被高温损坏，电吹风的温度根据传感器能承受的温度范围调节为 220 度。元器件焊接完毕，就要检测焊接的正确性，另取一新的传感器，测量其管脚间的电阻如：8、12、14 间的电阻为 0.04M，8、10、12 间侧电阻为 0.08M，14、15 为 0，2、14 为无穷大；然后测量焊接传感器连出的焊盘的阻值，如果一致则说明焊接正确，否则必须重复焊接与检测。(2)线的选择。在实验过程中发现，经常出现断线的现象，这给实验带来很大的不方便性。因为传感器要固定在手指上，当采集到的数据不正确的时候不容易发现是断线的原因。而且线本身不能过粗，为的是防止手指在运动的过程中，线的阻力会妨碍手指的运动或是使传感器发生移动造成误差。综合以上因素，并通过实验的证明最后选择了漆包线。

### 3.2 固定传感器的装置

实验中选择的是规格较大的线卡，如下图所示，该装置有一定的弹性，正好可以适应人的手指粗细各不一样，经过简单加工后在实验中进行应用，效果较好。

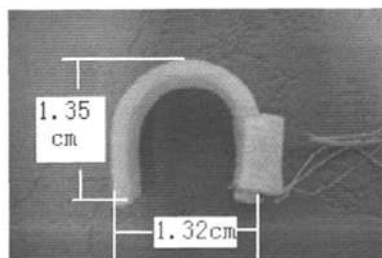


图 3.6 实际固定装置

Figure 3.6 The actual fixing device

3.3 数据采集

3.3.1 软件介绍

数据采集所选择的软件是 NI (National Instrument) 公司的 LabVIEW 软件。LabVIEW 的全称是 Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, 是一种用图标代替文本行创建应用程序的图形化编程语言。传统文本编程语言根据语句和指令的先后顺序决定程序的执行顺序, 而 LabVIEW 则采用数据流编程方式, 程序框图中节点之间的数据流向决定了程序的执行顺序。它用图标表示函数, 用连线表示数据流向。LabVIEW 提供很多外观与传统仪器 (如示波器、万用表) 控件, 可以用来方便地创建用户界面<sup>[86]</sup>。

3.3.2 数据采集程序

数据采集的软件程序的流程图如下图所示:

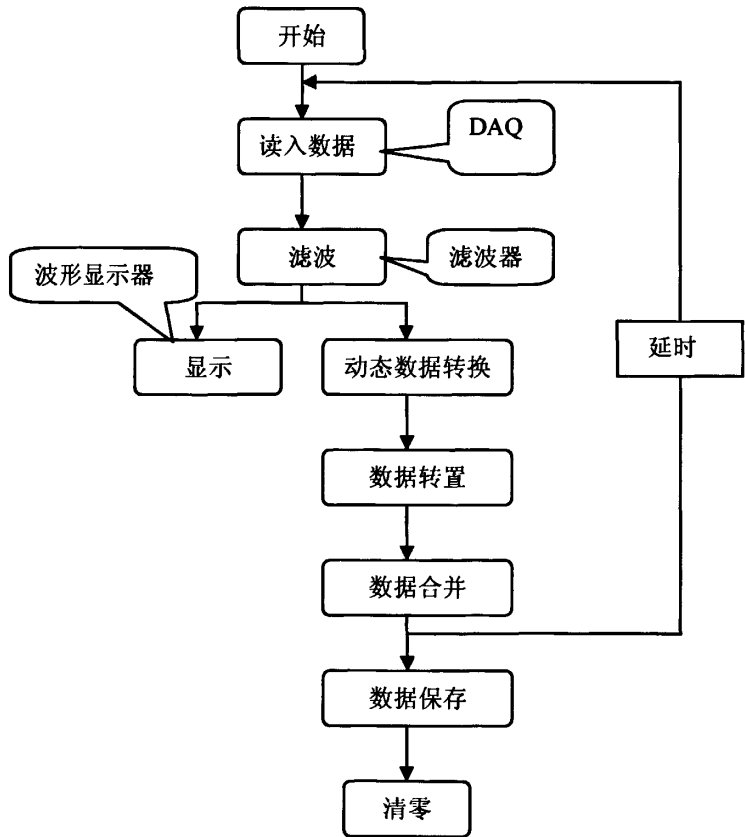


图 3.7 数据采集程序流程图

Figure 3.7 Flow chart of data acquisition procedure



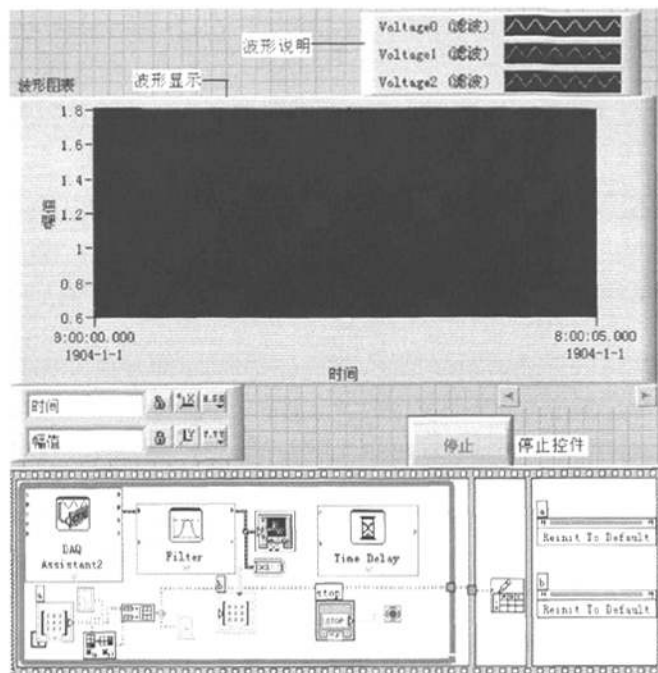


图 3.8 数据采集程序的前、后面板

Figure 3.8 Front panel and block diagram of data acquisition procedure

### 3.3.3 采集卡的选择

本课题的数据采集最大的要求就是采集卡的通道数，因为一个传感器有三个输出，一个手指有三个关节，一个传感器测量一个关节的数据。一个手指至少需要九个采集通道。初期的准备实验中，采用一个传感器进行测量。所需的数据采集接口仅要三个。可以由 NI (National Instrument) 公司生产 6008 采集卡实现，如图 3.9 所示：



图 3.9 USB-6008

Figure3.9 USB-6008

该采集卡具有 8 路 12 位模拟输入通道，方便而易于携带的总线供电型设计，即插即用的 USB 接口等特点。采集卡的端口说明，如下表所示。

表 3.1 模拟端口说明

Table3.1 Narration of analog ports

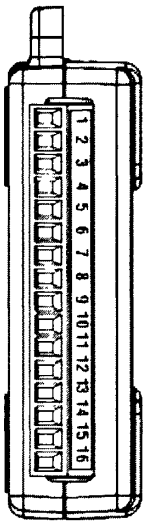
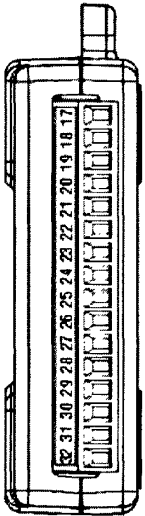
Module	Terminal	Signal, Single-Ended Mode	Signal, Differential Mode
	1	GND	GND
	2	AI 0	AI 0+
	3	AI 4	AI 0-
	4	GND	GND
	5	AI 1	AI 1+
	6	AI 5	AI 1-
	7	GND	GND
	8	AI 2	AI 2+
	9	AI 6	AI 2-
	10	GND	GND
	11	AI 3	AI 3+
	12	AI 7	AI 3-
	13	GND	GND
	14	AO 0	AO 0
	15	AO 1	AO 1
	16	GND	GND

表 3.2 数字端口说明

Table3.2 Narration of data ports

Module	Terminal	Signal
	17	P0.0
	18	P0.1
	19	P0.2
	20	P0.3
	21	P0.4
	22	P0.5
	23	P0.6
	24	P0.7
	25	P1.0
	26	P1.1
	27	P1.2
	28	P1.3
	29	EF1.0
	30	+2.5 V
	31	+5 V
	32	GND

从表中可见，模拟数据采集有两种方式，即：单端和差分。该采集卡的数据端口的 12 条数字 I/O 线以及 5V 电压输出端口被用来驱动步进电机的转动。

## 3.4 数据处理

### 3.4.1 MATLAB 的介绍

MATLAB 的全称矩阵实验室 (Matrix Laboratory)。除具备卓越的数值计算能力外，它还提供了专业水平的符号计算，文字处理，可视化建模仿真和实时控制等功能。MATLAB 具有语言简洁紧凑、使用方便灵活、库函数极其丰富运算符丰富)程序限制不严格、程序设计自由度大程序的可移植性很好、图形功能强大等特点<sup>[87]</sup>。

### 3.4.2 数据处理程序

主要的数据处理程序的流程图如下图所示，正常情况下人手的运动频率低于 10Hz，所以通过低通滤波除去信号中的高频噪声如常见的工频干扰。计算的公式主要依据式 3.2，首先是根据定标数据计算出传感器的灵敏度，然后计算出传感器各轴与重力的夹角，最后由夹角和实际的手指指节的长度计算出手指在平面内的位置，模拟出运动轨迹。本文所需要的图主要有误差图、角度随时间变化的关系图、手指运动轨迹图等。

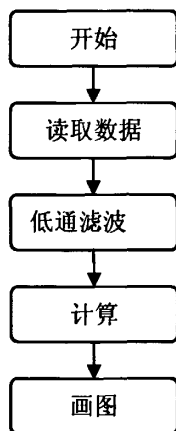


图 3.10 数据处理流程图

Figure3.10 Flow chart of data process

## 3.5 加速度传感器测量运动姿态基本原理

理论上，加速度  $a$ 、速度  $v$  和位移  $s$  之间存在如下关系：

$$\begin{aligned} v &= \int_1^2 a dt \\ s &= \int_1^2 v dt \end{aligned} \quad (3.1)$$

根据传感器输出的加速度信息，通过一次积分求得速度，再积分求出位移，进而检测出手指的运动姿态。按照这一方法处理采集到的传感器数据，得出的结果与实际完全不相符。宋亦旭等<sup>[88]</sup>人分析是由于传感器噪声的存在，对于该噪声一般多采用标准的卡尔曼滤波器（SKF）或扩展的卡尔曼滤波器（EKF）进行传感器数据后处理，但由于加速度计输出中不可避免地含有标定误差，这个系统误差很难采用最优滤波器去除，在使用加速度计信号积分结果出现很大的漂移<sup>[83]</sup>。

通过观察传感器的输出：传感器的输出不仅随受到的外力（外力是指除了重力之外的其他作用力）的变化而变化，在摆放位置发生变化时也会引起输出的改变，也就是说传感器输出和其受力方式有关，对于一个同时受重力和其他外力作用的传感器，在 XOY 平面的受力分析如图 3.11 所示。

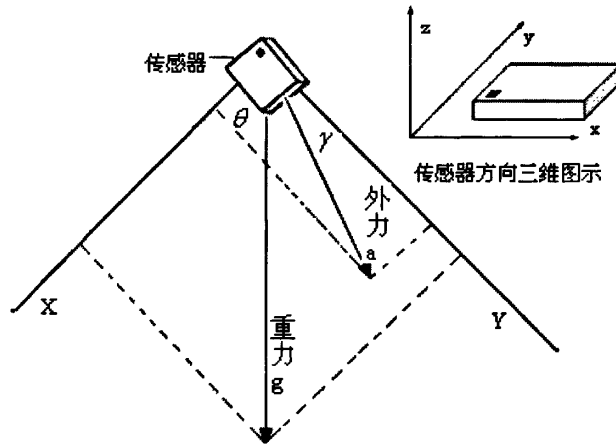


图 3.11 传感器受力示意图

Figure3.11 sketch map of forces on the sensor

由于重力和外力都会影响传感器输出，假设传感器在一个平面内的输入-输出由如下关系：

$$\begin{cases} a \sin \gamma + g \cos \theta = \Delta x / k_1 \\ a \cos \gamma + g \sin \theta = \Delta y / k_2 \end{cases} \quad (3.2)$$

其中，等式左侧第一项代表外力的作用，第二项代表重力的作用；第一式是 X 轴方向，第二轴表示 Y 轴方向。 $a$  是传感器受到外力的加速度， $\gamma$  是该加速度的方

向与传感器 Y 轴的夹角,  $\theta$  是传感器与竖直方向的夹角,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  是相应的传感器的两个轴的电压输出变化量,  $\Delta x = |x - x_0|$ ,  $\Delta y = |y - y_0|$  (其中  $x_0, y_0$  是指 X 轴、Y 轴不受任何外力时的静态输出,  $x, y$  是指传感器的 X 轴、Y 轴输出电压)。

$k_1$ 、 $k_2$  为传感器 X, Y 方向的灵敏度。传感器灵敏度  $k_1$ 、 $k_2$  的确定可以采用重力标定方法, 即将所要标定的测量方向沿着竖直方向, 并在竖直面内将此轴的方向旋转 180 度, 记录传感器输出的最小值  $\beta_{\min}$  和最大值  $\beta_{\max}$ , 则灵敏度  $k_i = (\beta_{\max} - \beta_{\min}) / 2$  (其中  $i=1,2$ )。

根据上式得出重力与传感器各轴的夹角  $\theta$ , 由于重力方向是固定不变的, 即竖直向下, 得到的角度  $\theta$  就是传感器各轴与竖直方向的夹角, 就可以依据  $\theta$  判断出传感器的摆放位置。在测量的时候, 传感器是固定在待测物体上的, 通过传感器摆放位置也就判断出待测物体的位置。而人体的上肢可以看成是由两个连杆连接组成的关节系统, 上肢的运动主要是各个关节的角度变化。所以可以运用此方法检测人体上肢的运动姿态。

### 3.6 验证实验

为了验证上述测量原理的正确性, 本文采用实验进行验证。实验测定主要包括静态和动态测定实验。静态测定实验, 是指手指或模型静止在不同位置的情况下, 分别采集固定于其上的传感器的数据, 并进行分析。为了能验证传感器数据的正确性, 需要和其他的方法进行结合对比, 比如在坐标纸上画好固定的角度, 或者是和步进电机结合等方法, 静态测定实验还应包括单个传感器和多个传感器 (2-3 个) 的测定实验。动态测定实验, 是指手指或模型在运动的情况下, 采集固定于其上的传感器的数据, 这个数据是整个过程的数据。同样为了验证传感器数据的正确性, 需要和其他方法进行结合对比, 比如高速摄像或基于步进电机的手指模型等。而且也应进行单个和多个传感器的测定实验。

因为实验存在误差, 所以本文尽可能多的从多方面进行验证。

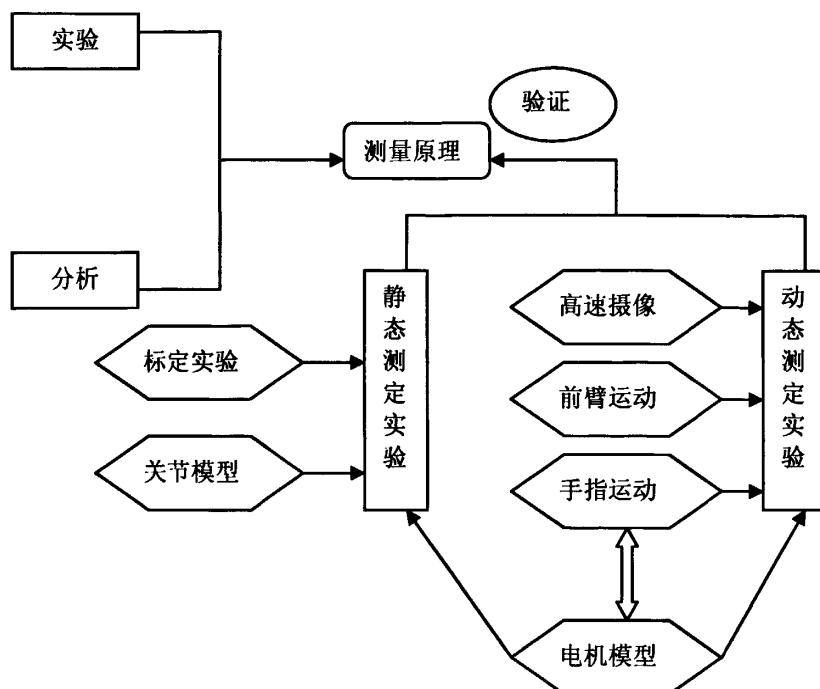


图 3.12 验证过程示意图

Figure3.12 Schematic diagram of the verification process

### 3.6.1 标定实验

该实验使用了一个传感器，且属于静态测定实验。在 XOY 平面，将传感器固定在钢条上，方向如示意图 3.13 所示。分别记录传感器在图 3.13 中的位置 1 到位置 10 的输出电压，每个位置相差的角度 10 度。

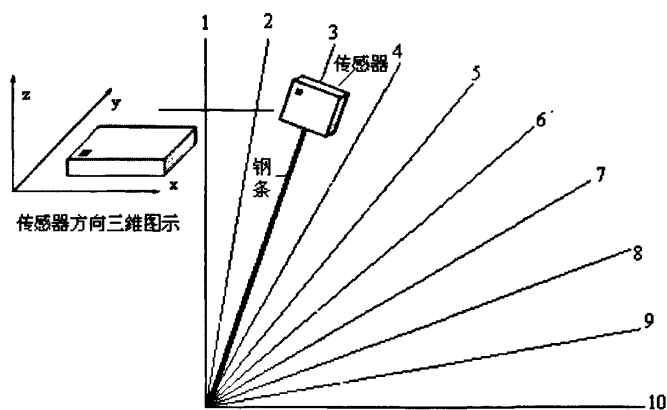


图 3.13 误差测试实验示意图

Figure3.13 sketch map of error test experiment

从实验中可以看出，传感器受到重力的作用，此时外力的方向和传感器的 X 轴方向一致，因为在数据采集过程中传感器始终保持静止，在该方向上没有产生加速度，所以由式 3.2 可以得出：

$$\theta = \arcsin \frac{\Delta y}{gk_2} \text{ 或 } \theta = \arccos \frac{\Delta x}{gk_1} \quad (3.3)$$

重复实验五次，处理采集到的数据，在 Matlab 中画出相应的误差图，其中曲线是指平均值，横坐标中的空间位置 1 到 10 是指图 3.14 中对应的空间位置。从图中可以看出一个传感器在静态测定实验中误差在允许范围内

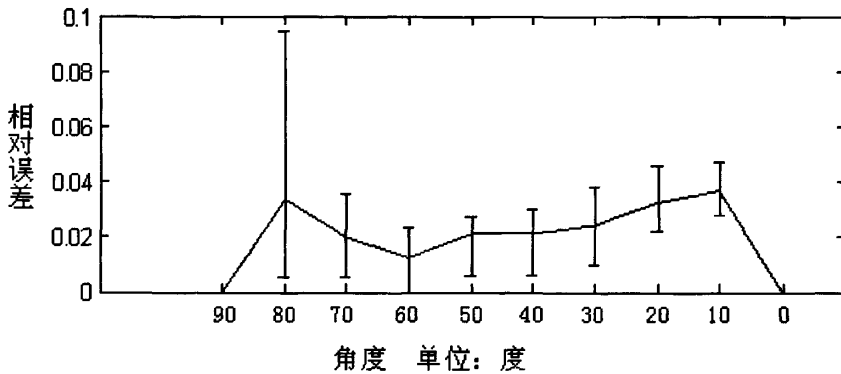


图 3.14 (a) 测量相对误差图

Figure 3.14(a) Relative error diagram of measurement

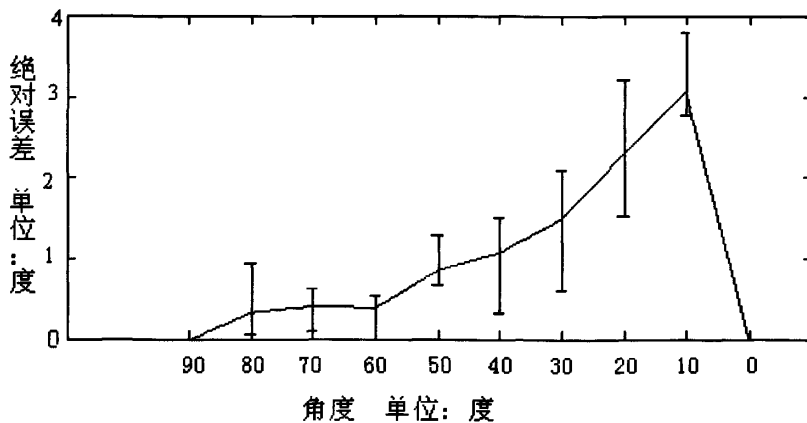


图 3.14(b) 测量绝对误差

Figure 3.14(b) Absolute error diagram of measurement

### 3.6.2 关节模型实验

该测定实验使用两个传感器，进行的是静态测定即记录两个传感器在关节模

型角度变化前后的输出。

手指关节模型如图 3.15 所示，由三段铝合金材料充当指节，用螺丝连接。在实验过程中可以旋转螺丝来控制其松紧程度。将两个传感器同时固定在手指模型的前两个指节上，采集模型在不同角度时的输出。其中的不同的角度分别是 10 到 90 之间，每隔 10 度采集一次数据，重复实验五次。误差图如图 3.16 所示。

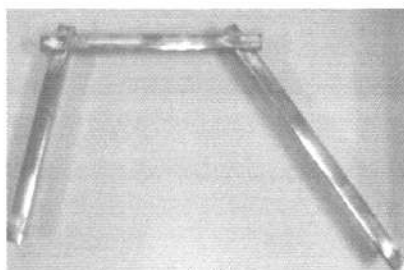


图 3.15 实物图

Figure 3.15 Physical map

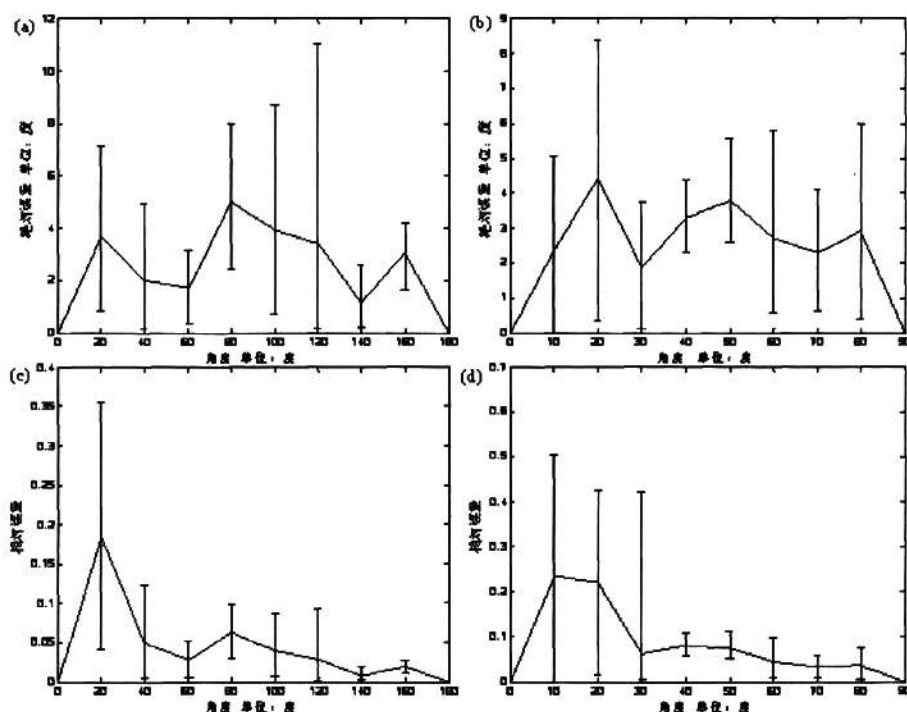


图 3.16 误差图

Figure 3.16 Error map

从处理结果可以看出，该实验存在一定的误差，产生误差的主要原因有：角度的准确值由肉眼用量角器测得，存在一定的误差；固定在模型上的传感器在实验过程中会出现偏转，而且在实验前很难保证固定传感器使其一个方向与重力方



向一致。

### 3.6.3 前臂运动姿态检测

因为人的手臂和手指一样都可以看成是由许多连杆连接组成的关节系统。而且人的前臂是两关节比手指少一个关节(大拇指除外),同时具备控制性好的特点,因为要保证在一个竖直平面内的运动。

#### ① 高速摄像技术

高速摄像是研究高速运动物体或瞬变流逝现象的最有效的方法之一。高速图像获取技术是科学和生产活动中很重要的一种测试手段。高速图像获取技术是以极高的时间分辨率对快速过程进行照相记录的过程,其获取的信息则记录在按时间发展为顺序的一幅幅图片上,通过慢速放映,再现被记录对象的运动或变形图景,即同多对时间尺度的放大来是想对快速过程进行研究。从数学观点来看,高速图像获取的过程就是对连续运动过程进行时间自变量的高分辨率离散化,从而得到时间序列的帧图的过程。它不但能使人们看到以告诉变化着的实物,还能把瞬息万变的流逝过程记录下来,供人们研究和分析。

用高速摄像机把前臂运动过程拍摄下来,并把传感器作为标志点,记录其运动变化。然后用其软件 MIDAS 进行分析处理,把关于位置的信息提取出来。

#### ② 实验准备

将传感器固定前臂腕关节,如图 3.17 中所示。竖直固定一量角器(方便后续分析),受试者肘关节和量角器的原点位置相对应。运用数据采集卡及 LabVIEW 自编程序采集加速度传感器输出。同时运用高速摄像外部装置及软件 MIDAS 拍摄动作。实验场景图和流程图分别如下图所示:

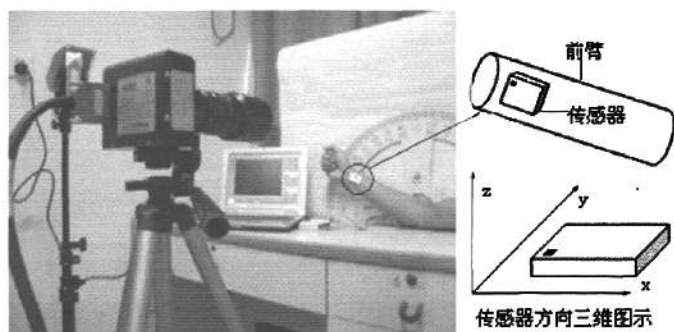


图 3.17 前臂运动姿态检测实验场景图

Figure 3.17 Scene diagram of experiment of detecting the motion attitude of forearm

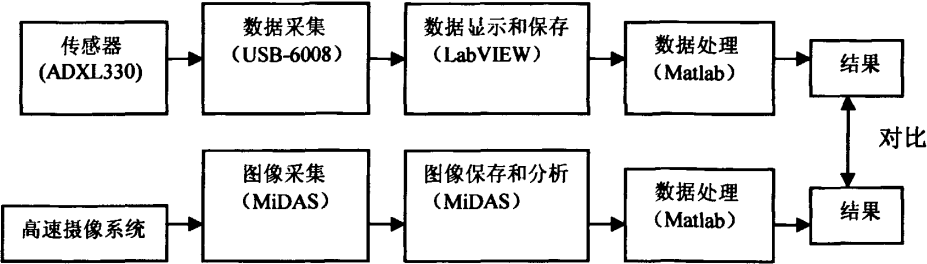


图 3.18 前臂运动姿态检测实验流程图

Figure 3.18 Flow chart of experiment of detecting the motion attitude of forearm

③ 数据采集与处理结果

要求受试者上臂保持不动，通过屈肘使前臂在竖直平面内运动四十到六十度，速度和平时运动速度相当。传感器随着前臂绕肘关节从水平方向开始转动。同时采集传感器数据和图像，并保存。

如图 3.17 所示，在该实验条件下 Y 轴始终与外力产生的加速度  $a$  垂直，所以式 3.2 可写为：

$$\begin{cases} g \cos \theta = \Delta x / k_1 \\ a + g \sin \theta = \Delta y / k_2 \end{cases} \quad \text{得出: } \theta = \arccos \Delta x / g k_1 \quad (3.4)$$

用 Matlab 分析 LabVIEW 采集到的数据，分析 MiDAS 采集到的图像信息，得出运动的角度信息如下图所示。高速摄像数据处理结果显示前臂从 0 度变化到 48.5918 度，传感器数据处理结果显示传感器的初始角度为 1.0223 度，然后从 0 度变化到 46.2429 度，其最终值的绝对误差为 4.83%。

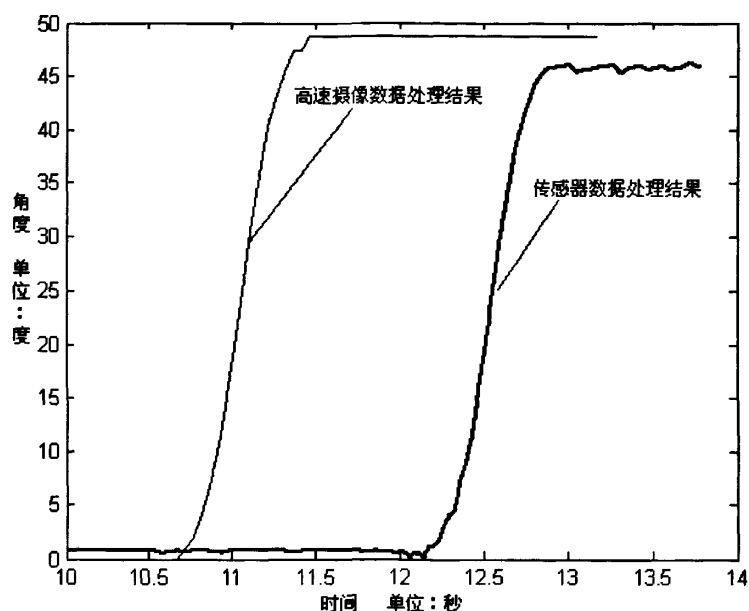


图 3.19 前臂运动姿态检测结果

Fig3.19 Result of the detection of the motion attitude of forearm

从上图可以看出，高速摄像数据处理的结果和传感器采集到数据的处理结果有时间上的滞后性。这一现象在最初的实验中就有所发现，并分析了其产生的原因：实验者在操作两台电脑时点击两个鼠标有前后的时差；两台电脑的自身特性不同，响应时间不一样；两种软件（Midas 和 LabVIEW）的响应时间不同。为了保持数据采集的同时性，把两个鼠标的左键一端用导线相连，使其单击一次能够同时触发采集软件 LabVIEW 和高速摄像采集软件 MiDAS 的开关按钮。同时尽量让两台电脑的配置相同。但结果仍然存在时间的不一致。所以认为该误差的产生是软件的本身响应时间或是其他的因素，包括：操作误差，在使用软件 MiDAS 进行运动轨迹分析时是人工标定标志点，无法保证每帧图的标志点都是一致的；限于实验条件要求要保证运动在一个平面内，而人体上肢运动不可能绝对在竖直平面内运动，而这些因素都无法排除，但对数据的正确性影响不大。

### 3.7 本章小结

选取了加速度传感器 ADXL330 来进行测量，用 LabVIEW 采集数据，用 MATLAB 处理数据。通过对传感器的数据进行分析 and 处理，提出了测量原理模型得出实验测量的参数为角度。为了验证测量原理的正确性，通过实验进行验证，三个实验结果表明在一定的误差允许范围内，可以用该方法进行手指运动参数的检测。

## 4 手指关节模型及运动参数的测试

### 4.1 引言

为了进一步验证用三维传感器检测手指运动信息参数的可靠性,本课题接下来的实验采用步进电机制作的模型进行实验。用步进电机代替手指关节,用刚性材料代替指节,以此制作出手指模型来取代手指进行。该模型的优势是:控制容易,转动准确,能够保持在一个平面内运动,传感器的固定方便等,而且模型步进角度的稳定可以用来检测用传感器测量手指运动参数的准确性,反过来亦可以通过手指的运动来控制模型的运动,这一方面的应用范围就更广。

### 4.2 驱动部分

#### 4.2.1 驱动硬件的介绍

驱动硬件选择的是步进电机。步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件。当步进驱动器接收到一个脉冲信号,它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度(称为“步距角”),它的旋转是以固定的角度一步一步运行的。可以通过控制脉冲个数来控制角位移量,从而达到准确定位的目的;同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度,从而达到调速的目的。这一线性关系的存在,加上步进电机只有周期性的误差而无累积误差等特点。现在比较常用的步进电机包括反应式步进电机(VR)、永磁式步进电机(PM)、混合式步进电机(HB)和单相式步进电机等。虽然步进电机已被广泛地应用,但步进电机并不能象普通的直流电机,交流电机在常规下使用。它必须由双环形脉冲信号、功率驱动电路等组成控制系统方可使用<sup>[84]</sup>。

步进电机的主要参数有:

① 电机固有步距角。它表示控制系统每发一个步进脉冲信号,电机所转动的角度。

② 步进电机的相数。这是指电机内部的线圈组数,目前常用的有二相、三相、四相、五相步进电机。电机相数不同,其步距角也不同,一般二相电机的步距角为 $0.9^\circ/1.8^\circ$ 、三相电机的为 $0.75^\circ/1.5^\circ$ 、五相电机的为 $0.36^\circ/0.72^\circ$ 。

③ 保持转矩。这是指步进电机通电但没有转动时,定子锁住转子的力矩。它是步进电机最重要的参数之一,通常步进电机在低速时的力矩接近保持转矩。

一般步进电机的精度为步进角的 $3\sim 5\%$ ,且不累积;它的力矩会随转速的升高而下降;步进电机低速时可以正常运转,但若高于一定速度就无法启动,并伴有啸叫声。

步进电动机以其显著的特点，在数字化制造时代发挥着重大的用途。伴随着不同的数字化技术的发展以及步进电机本身技术的提高，步进电机将会在更多的领域得到应用<sup>[89]</sup>。

基于以上步进电机的参数特点，选择的电机为常州市丰源微特电机有限公司生产的电机。其型号为：15BY20L017 和 35BY48S053。其主要参数如下表所示：

表 4.1 步进电机的主要参数值

Table 4.1 The main parameter values of step motor		
参数名称	35BY48S053	15BY20L017
相数	4	2
每步转角	7.5°	18°
保持转矩	>300g.cm	25g.cm
起动转矩	80g.cm	8.5 g.cm
步距角精度	7.5° +_7%	18° +_7%
重量	70.5g	9.2g

重量是十分重要的一个参数，因为在制作的手指模型中，要有一个至少有两个“关节”手指模型，而第一个电机要能带动固定在与之相连的“指节”上第二个电机的转动，为了保证实验数据的准确性就要求第一个电机能够“自然”转动。

#### 4.2.2 外围驱动电路设计

驱动电路选择的驱动芯片为 L297 和 L298。L297 是意大利 SGS 半导体公司生产的步进电机专用控制器，它能产生 4 相控制信号，可用于计算机控制的两相双极和四相单极步进电机，能够用单四拍、双四拍、四相八拍方式控制步进电机。芯片内的 PWM 斩波器电路可在开关模式下调节步进电机绕组中的电源。该集成电路采用了 SGS 公司的模拟/数字兼容的 I<sup>2</sup>L 技术，使用 5V 的电源电压，全部信号的连续都与 TTL/CMOS 或集电极开路的晶体管兼容。L297 的芯片引脚特别紧凑，采用双列直插 20 脚塑封封装，其引脚如下图所示，内部结构如图 4.1 所示，L297 内部原理图如图 4.2 所示。从图中可以看出其主要构成为：

① 译码器即脉冲分配器。它将输入的走步时钟脉冲 CP 正/反转方向信号 CW/CCW 半步/全步信号 HALF/FULL 综合以后产生合乎要求的各相通断信号。

② 斩波器。由比较器触发器和振荡器组成用于检测电流采样值和参考电压值并进行比较，由比较器输出信号来开通触发器，再通过振荡器按一定频率形成斩波信号。

③ 输出逻辑。它综合了译码器信号与斩波信号产生 A B C D 1 2 3 4 四相信

号以及禁止信号控制 CONTROL 信号用来选择斩波信号的控制方式当它是低电平时斩波信号作用于禁止信号而当它是高电平时斩波信号作用于 A B C D 信号使能 ENABLE 信号为低电平时禁止信号及 A B C D 信号均被强制为低电平。

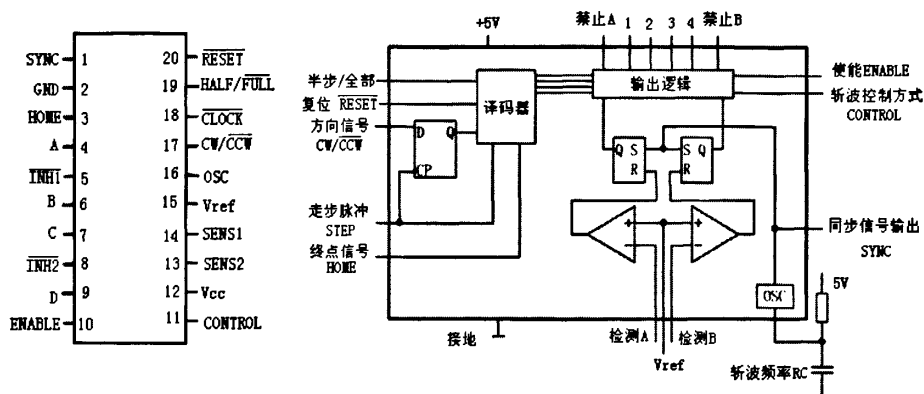


图 4.1 L297 引脚及电路原理图

Figure 4.1 Pin map and circuit schematic diagram of L297

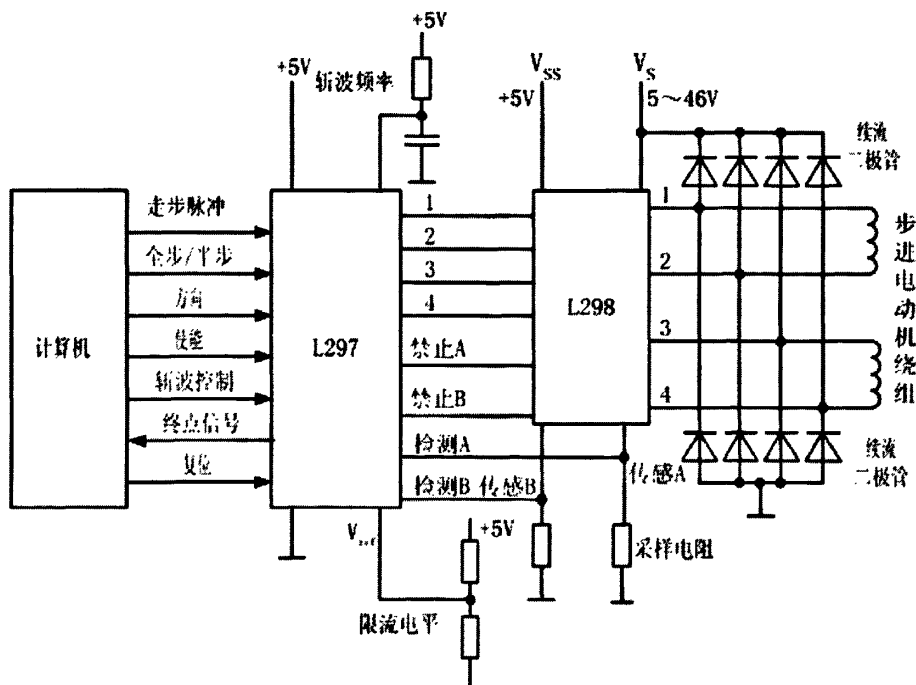


图 4.2 双极性斩波驱动电路

Figure 4.2 Bipolar chopper drive circuit

L298 双 H 桥驱动器可接收标准 TTL 逻辑电平信号，H 桥可承受 46V 电源电压，相电流可达 2.5A，可驱动电感性负载。它的逻辑电路使用 5V 电源功放级使用 5~46V 电压。下桥臂晶体管的发射极单独引出并并联在一起以便接入电流取样电阻形成电流传感信号。图 4.2 为由 L297 和 L298 组成的双极性恒流斩波驱动电路。

驱动芯片选取 L297/L298，其连接的电路原理图如下图所示，其中八个二极管的作用是防止 L298 烧坏；连接 Vref 的电阻是调节参考电压；连接 L298 的 1、15 两脚的电阻是功率电阻，起到反馈作用。

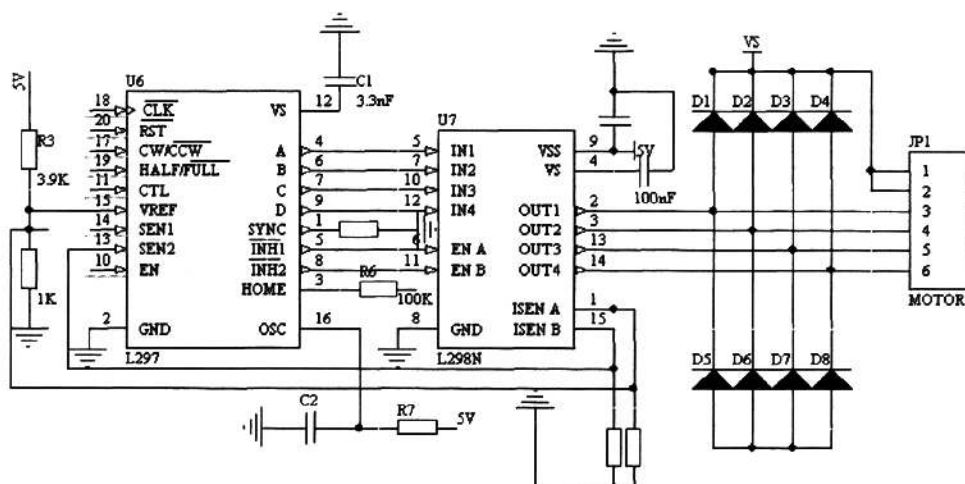


图 4.3 驱动电路原理图

Figure 4.3 Drive circuit schematic

### 4.3.3 控制软件的选取

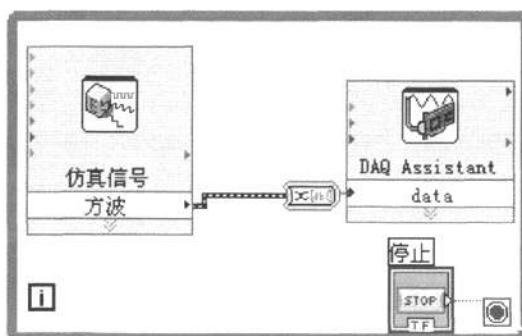


图 4.4 脉冲信号产生程序

Figure 4.4 Pulse signal generation procedure

通常选用的控制软件即脉冲信号的产生都是由单片机产生,而本课题选用的软件是 LabVIEW,其主要特性在前文以介绍。同时在介绍采集卡 USB-6008 时,已经点明它具有数字 I/O 端口、接地端口和 5V 电压输出端口。这些条件都恰好为驱动电路使用。脉冲信号产生程序图如 4.4 所示,参数设置如图 4.5 所示。

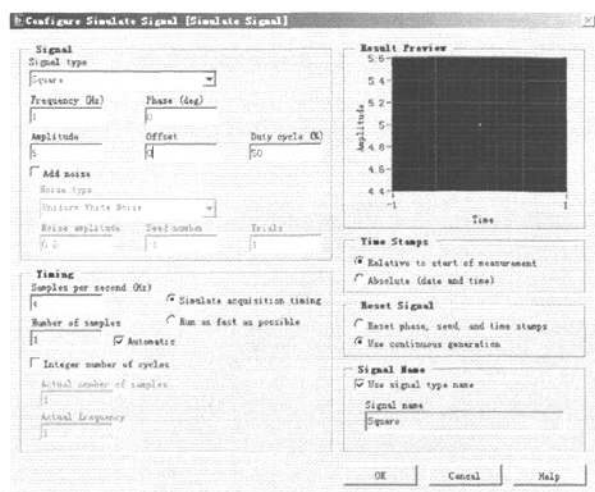


图 4.5 参数设置

Figure 4.5 Parameter setting

### 4.3 数据采集模块

为了采集多个传感器的数据,需要通道数多于八个的采集模块,所以选用 NI 公司的 NI9205 采集模块,如下图所示为该采集模块的实物图:

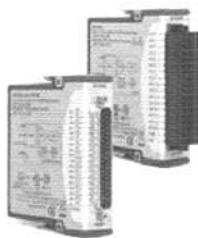


图 4.6 NI9205 数据采集模块

Figure 4.6 NI9205 data acquisition mode

NI9205 采集模块具有 32 路单端或 16 路差分模拟输入,16 位分辨率;250kS/s 总采样速率等特点。但是,NI9205 必须和 cDAQ(如图 4.7 所示)插槽配套使用。



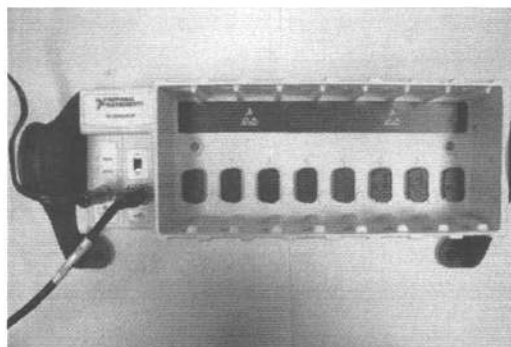
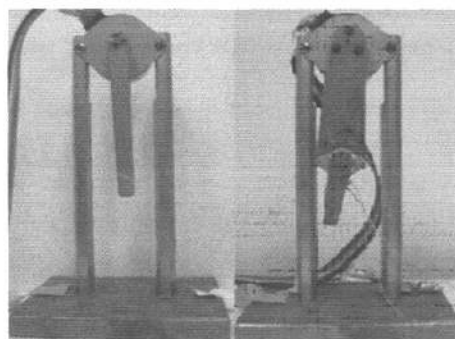


图 4.7 cDAQ 插槽

Figure 4.7 cDAQ slot

## 4.4 模型制作

基于步进电机的手指模型如下图所示，从图中可以看出它主要有如下几个部分：关节部分，这部分主要就是步进电机，但是涉及到大小两个电机的组合，并且要保证电机在“自然”转动过程中不会产生震动等干扰；指节部分，该部分选材很重要，既要有重量轻的要求又要满足刚性大的特性。重量轻是为了减小大电机的负载，刚性大是为了更好的支撑小电机；底座部分，稳定是底座的最大的要求，要保证电机在转动过程中不产生晃动。在实际实验的过程中，先进行的是单个电机模型的实验，而后再进行两个电机的实验。



(a) 单个电机模型 (b) 两个电机模型

图 4.8 基于步进电机的手指模型图

Figure 4.8 Model map of finger based on step motor

## 4.5 基于步进电机模型的实验

该部分实验的目的都是为了验证传感器在基于步进电机的手指模型输出的准确性。实验中用到两台电脑和两个采集卡，两台电脑是分别控制手指模型的运动

和传感器的数据采集，两个采集卡：USB-6008 和 NI9205，前者用来驱动步进电机的手指模型的运动，后者用来采集传感器的输出数据。

#### 4.5.1 基于单个步进电机的手指模型实验

本实验用了一个传感器，既进行了静态测定也进行了动态测定。静态测定是指电机模型转动前后记录其数据，而动态测定是指记录其运动的整个过程。

##### ① 实验准备

连接好电路，包括：步进电机的控制电路和 USB6008，连接好电源和采集通道；将传感器固定于模型一端，同时记录传感器的方向，分别在两台电脑上打开基于 Labview 的数据采集软件和电机控制软件。实验场景图和示意图分别如下所示：

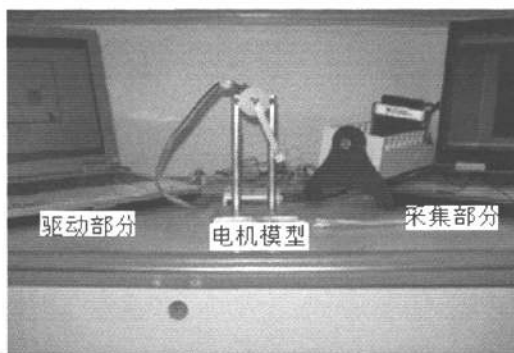


图 4.9 电机模型实验场景图

Figure 4.9 Flow chart of experiment

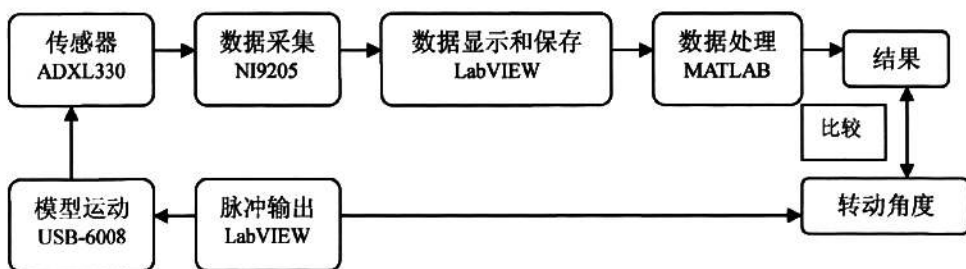


图 4.10 电机模型实验示意图

Figure 4.10 Flow chart of experiment

##### ② 数据采集及数据处理

以步进电机的转轴为圆心，然后电机顺时针运动。静态实验时，分别记录电机在转动一步后静止下来的数据；而动态实验时则记录全过程的数据。重复所有

实验五次。

定标数据的处理采用 LabVIEW 编写的程序进行处理，定标的原因是因为传感器的输出和电源电压有关系，其灵敏度就会受到电源电压的影响，而在本课题的实验条件下使用的是通用的直流电源。为了保证数据的准确性，所以每次实验都先进行定标。其流程图及后面板如下所示：

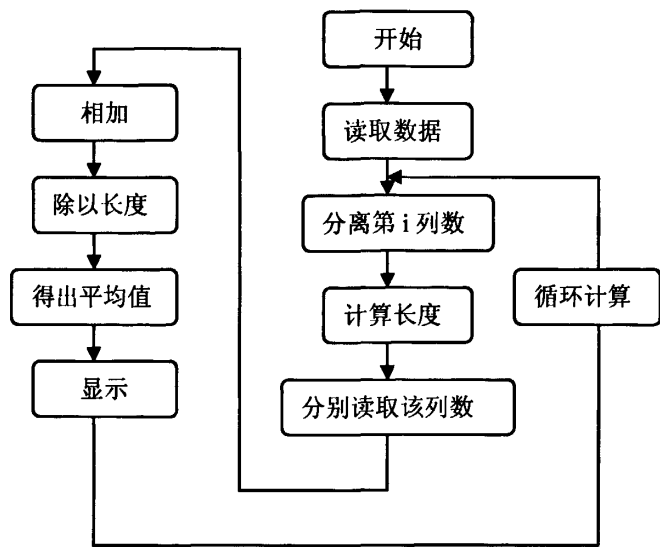


图 4.11 定标数据处理程序流程图

Figure 4.11 Flow chart of processing calibration data

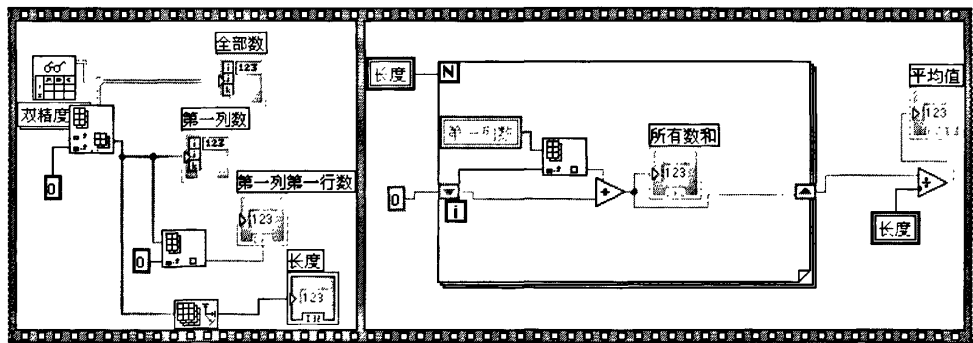


图 4.12 定标数据处理程序后面板

Figure 4.12 Block diagram of data processing

首先由定标数据得出传感器的灵敏度，然后根据传感器的受力情况得出角度的计算公式，最后就可以计算出角度的变化量。

$$k_x = 0.282$$
$$k_y = 0.2825$$

(4.1)

$$\theta_i = \arcsin \frac{\Delta y}{k_y} (i = 1, 2, 3 \dots)$$

(4.2)

$$\Delta \theta = |\theta_1 - \theta_2|$$

(4.3)

动态的角度变化量（10 步）其中每步的传感器输出的变化；电机每动一步其转过的角度为 7.5 度，即每次计算出的变化角度量应在一定的误差范围内；其中电机的每步误差为 7%，所以计算出的误差必须小于该值。电机转一周需要 48 步，实验中先进行的是 12 步。

③ 数据处理结果：

实验重复了五次，每次实验的  $\Delta y$  差别很小如表 4.1 所示；静态和动态实验重复性高，不同次的实验的重复性也高，这就解决了以前观察不到的动态实验的中间过程数据比较的问题。计算出的角度值与步进电机走的角度值之间的比较：前四步即 0°~30°的误差很小，然后逐步增大，结果如表 4.2 所示。存在误差的主要原因有步进电机的步进误差为 7%同时传感器的一个方向不能绝对和重力方向一致，导致运动过程中有一定的外力加速度的影响。

表 4.1  $\Delta y$  值

Table 4.1 The values of $\Delta y$ (*10 <sup>-3</sup> )												
Angle No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	36	36	36	36	33	31	29	26	22	18	15	11
2	36	36	36	35	33	32	29	26	24	19	15	11
3	36	36	36	36	33	33	28	26	22	19	15	11
4	36	36	36	36	33	33	28	26	22	19	15	11
5	36	36	36	36	33	31	29	26	22	18	15	11

表 4.2 数据处理结果

Table 4.2 The results of data processing			
理论值	测量值	绝对误差	相对误差
7.5	7.334	0.166	2.20%
15	14.793	0.207	1.38%
22.5	22.52	0.02	0.08%
30	30.706	0.706	2.30%
37.5	38.88	1.38	3.68%
45	47.52	2.52	5.60%
52.5	57.18	4.68	8.90%
60	68.84	8.84	14.70%

4.5.2 基于两个步进电机的手指模型实验

该实验与上一实验的不同之处是：一是基于两个步进电机模型的实验；二是采用了两个传感器进行测定。这与实际的手指更接近一些。其他的实验准备完全一样。采集传感器在电机行进一步时的输出数据，重复实验五次。同样进行了静态和动态的测定实验。具体的计算步骤和上一实验一致。固定与模型指节上传感器的角度分析如图 4.13 所示。

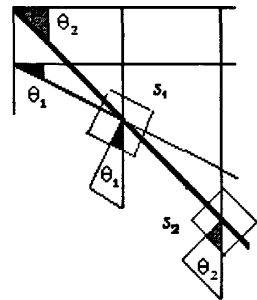


图 4.13 角度分析示意图

Figure 4.13 Schematic map of angle analysis

传感器 s1 和传感器 s2 对应于相应的步进电机  $m_1$  和  $m_2$ ，其中  $m_1$  的步进角为 7.5 度， $m_2$  的步进角为 18 度，所以存在 ( $n$  为定值)的关系其中  $n = 18 - 7.5 = 10.5$ 。数据处理结果，如表 4.3 所示。

表 4.3 数据处理结果

Table 4.3 Result of data processing

s2 角度	s1 角度	s2-s1	相对误差
18.195	6.98	11.215	6.80%
18.1	7.72	10.38	1.140%
18.5	7.3	11.2	6.67%
18.195	6.98	11.215	6.8%
18.3	8.24	10.06	4.19%

存在误差的主要原因有：模型在运动过程中，电机  $m_1$  无法自由带动  $m_2$  的运动，因为电机  $m_1$  要克服重力、 $m_2$  的重量以及连接杆的重量，尤其是在启动时，会因为受到这些力产生滑动，导致步进角的度数不准确；无法验证重复性，因为每次摆的位置不容易控制，不像只有一个电机的模型那么容易控制，而且其不要承

担那么大的重力；两个电机的步进角误差均是 7%。

## 4.6 本章小结

基于步进电机的手指模型实验，从静态到动态，从一个传感器到两个传感器验证了传感器理论模型的正确性。尽管存在误差，但均在允许的范围内，尤其是步进电机的步进角过大和电机重量较大而大电机的保持转矩不够大，对实验的准确性影响很大。在以后的工作中可以主要从这两方面改进实验。

## 5 基于加速度传感器的手指运动参数检测

### 5.1 引言

选用四个传感器进行手指运动参数的检测。其中三个传感器固定于手指（以食指为例）的三个指节处，第四个传感器固定于掌面作为参考。受试者按规定的动作方式进行运动，在实验前要进行训练。采集并分析数据得出手指运动的轨迹，以及更多的运动信息。

### 5.2 单手指多关节实验

#### 5.2.1 实验准备

采用四个传感器对食指运动参数进行检测，其中三个传感器的固定于食指的三个指节处，第四个传感器固定与掌面靠近食指第一关节处，如下图所示：

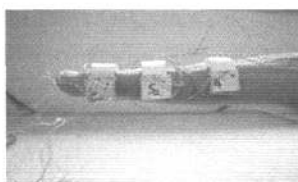


图 5.1 传感器固定位置

Figure 5.1 Fixure of sensors

实验场景图如图所示。连接好电路检测传感器输出是否正常，然后对每个传感器进行定标。数据如表 5.1 所示。

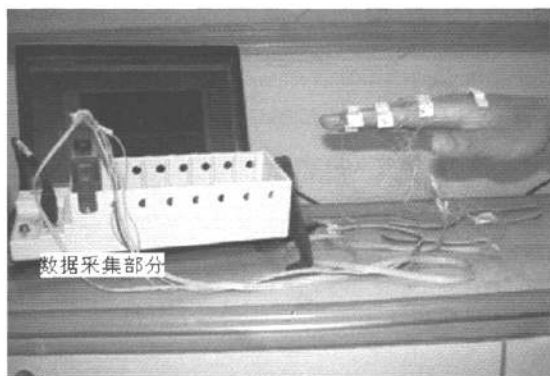


图 5.2 实验场景图

Figure 5.2 Flow chart of experiment

受试者必须是手指在近期内没有受过伤，实验前没有进行剧烈的运动如打篮球、弹钢琴等。受试者食指按以下方式进行运动：方式一，保持掌心向下，自然放平手指（如图 5.3a 所示），尽力保持食指伸直（DIP 和 PIP 不动）向下弯曲即仅有近关节在转动，运动到无法再运动为止并保持不动（如图 5.3b 所示）；方式二，在方式一的基础上增加一个向上回去的动作；方式三，保持掌心向下，自然放平手指进行自然的握拳动作，握拳后保持不动（如图 5.3c 所示）。

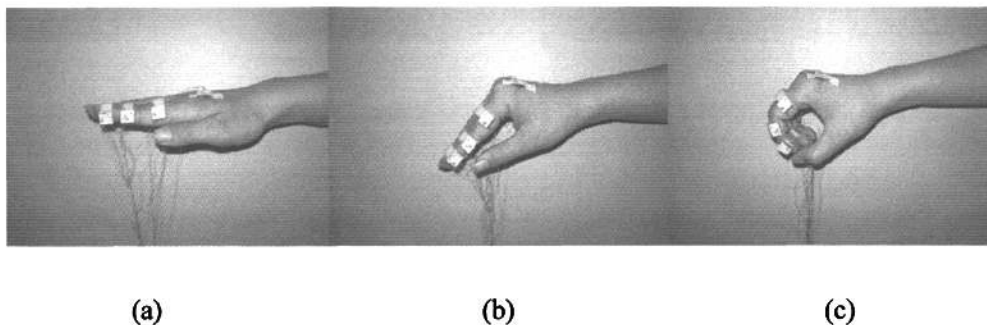


图 5.3 手指动作方式图

Figure 5.3 The way of finger movement

在正式实验前先对受试者进行训练，由于动作比较简单，而且持续时间不长，所以不会使受试者疲劳，更不会产生伤害。

### 5.2.2 数据采集及处理

由式 3.2，并根据实验条件得出计算公式如下：

$$\theta_i = \arccos \frac{\Delta y_j}{k_y} \quad (i=1,2,3, \dots \quad j=1,2,3, \dots) \quad (5.1)$$

数据的处理主要包括原理数据、角度信息图、手指的运动轨迹图、夹角变化图和夹角角速度变化图。根据式 5.1 可以由原始数据得出角度信息图；由于受试者的三个指节长度固定，假设受试者的近端指节、中端指节和远端指节的长度分别为  $a$ ,  $b$  和  $c$ ，那么如图 5.4 所示：

$O_2$  的坐标为  $(-a \cos \theta_1, -b \sin \theta_2)$ ；

$O_3$  的坐标为  $(-a \cos \theta_1 - b \cos \theta_2, -a \sin \theta_1 - b \sin \theta_2)$ ；

$O_4$  的坐标为  $(-a \cos \theta_1 - b \cos \theta_2 - c \cos \theta_3, -a \sin \theta_1 - b \sin \theta_2 - c \sin \theta_3)$ 。



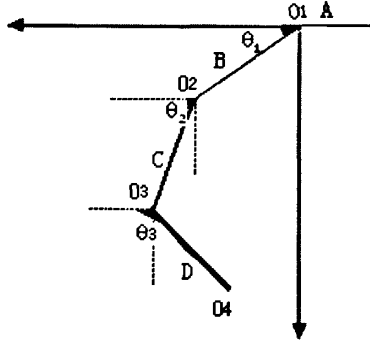


图 5.4 指节夹角分析图

Figure 5.4 The angle of finger joints

根据这三个点的坐标即可模拟出手指的运动轨迹图。从图 5.4 还可以看出角  $AO_1B$  为近端指节与掌面的夹角，角  $BO_2C$  为中端指节与近端指节的夹角，角  $CO_3D$  为远端指节与中端指节的夹角。这三个角可以由  $\theta_1$ ， $\theta_2$  和  $\theta_3$  间的数学关系计算出来，公式如下所示：

$$\angle AO_1B = 180 - \theta_1 + \theta_0 \quad (\text{式 5.2})$$

$$\angle BO_2C = 180 - \theta_2 + \theta_1 \quad (\text{式 5.3})$$

$$\angle CO_3D = 180 - \theta_3 + \theta_2 \quad (\text{式 5.4})$$

根据式 5.2, 5.3 和 5.4 可以得出三个指节的夹角随时间的变化关系。由角位移、角速度和角加速度存在的关系：

$$\omega = \frac{d\psi}{dt}, a = \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{式 5.5})$$

可以得出角速度的变化关系图和角加速度的变化关系图。

下面就选取一位受试者的数据绘制以上的图形。其中图中的颜色分别表示不同传感器的输出：黑色指传感器 S0 的一个轴的输出（S0 固定于掌面），红色对应于传感器 S1（固定于 DIP 处），蓝色对应于传感器 S2（固定于 PIP 处），绿色对应于传感器 S3（固定于 MP 处）。A、B、C 列分别表示动作方式一、二、三。第一行表示不同动作方式下传感器一个轴输出的原始数据，第二行表示不同动作方式下处理的角度结果，第三行表示不同动作方式下手指的运动轨迹。

其中动作方式的轨迹图是在受试者的指节长度固定的基础上，根据角度信息计算出在坐标系中的位置来模拟运动轨迹的。该受试者的指节长度分别为（5cm, 3cm, 2cm）。图 5.5 (b3) 中的颜色意义为：蓝色表示手指的最初状态，红色是最终状态也就是向上运动的停止位置，而绿色是手指向下运动所达到最远位置。采用三轴加速度传感器检测手指的运动参数不仅可以得到手指的运动角度信

息, 还可以通过简单的数学运算得出其角加速度信息(运动时间是已知的)、位置信息(轨迹图中可以看出)和速度信息等, 以动作方式三为例, 其具体信息见表 5.1。

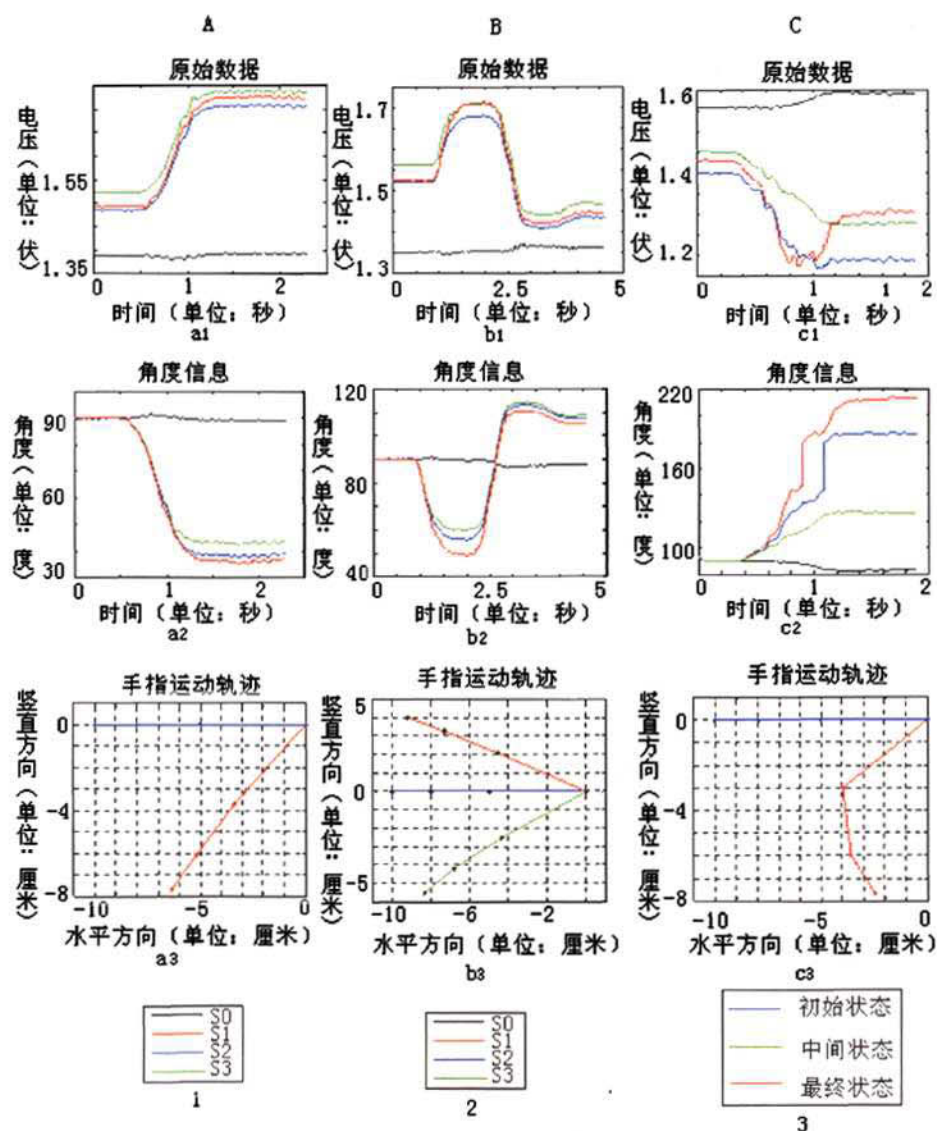


图 5.5 数据处理结果

Figure 5.5 The result of data processing

表 5.1 手指运动参数检测信息表

Table 5.1 Information table of parameters of detecting finger movements

传感器	S0 (black)	S1 (red)	S2 (blue)	S3 (green)
动作时间 (单位: 秒)	1.59	1.59	1.59	1.59
初始状态值	82.93	89.68	89.75	89.77
角度信息	最终状态值	90.38	214.30	187.61
(单位: 度)	角度变化值	7.54	124.62	97.86
	初始坐标	(0 0)	(-10 0)	(-8 0)
位置信息	最终坐标	(0 0)	(-2.48 -7.65)	(-3.60 -5.99)
	位移(cm)	0	10.73	7.43
	角速度			
(单位: 度/秒)	4.74	78.38	61.54	17.48
速度信息	线速度			
(单位: cm/s)	0	6.75	4.67	1.99

实验中采集了五个样本信息, 根据手指的轨迹可以得出各个关节的夹角随时间的变化关系。

其中  $\theta_0$  是近端指节与掌面的夹角, 其大小由传感器 S0 计算得出。用 Matlab 绘制三个指节间夹角随时间的变化关系如图 5.6 所示, 图中曲线的颜色和图 5.4 的颜色对应一致。其中图 5.6 是样本的代表图。

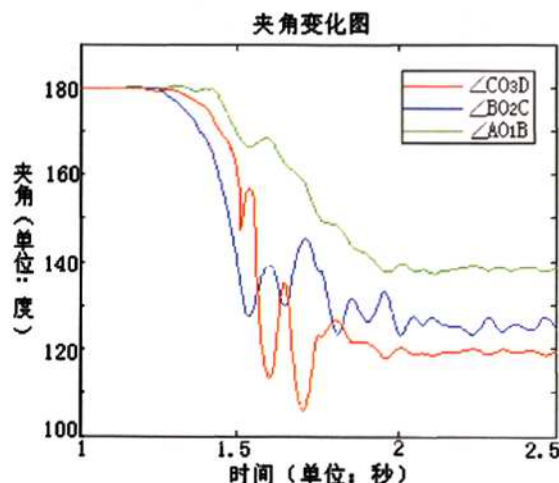


图 5.6 指节夹角变化图

Figure 5.6 The figure of changes of angles

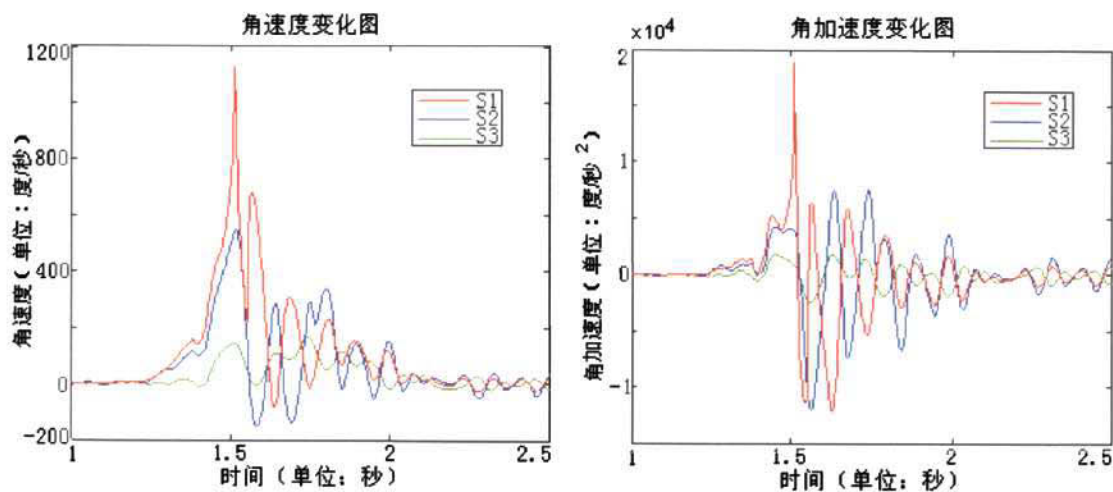
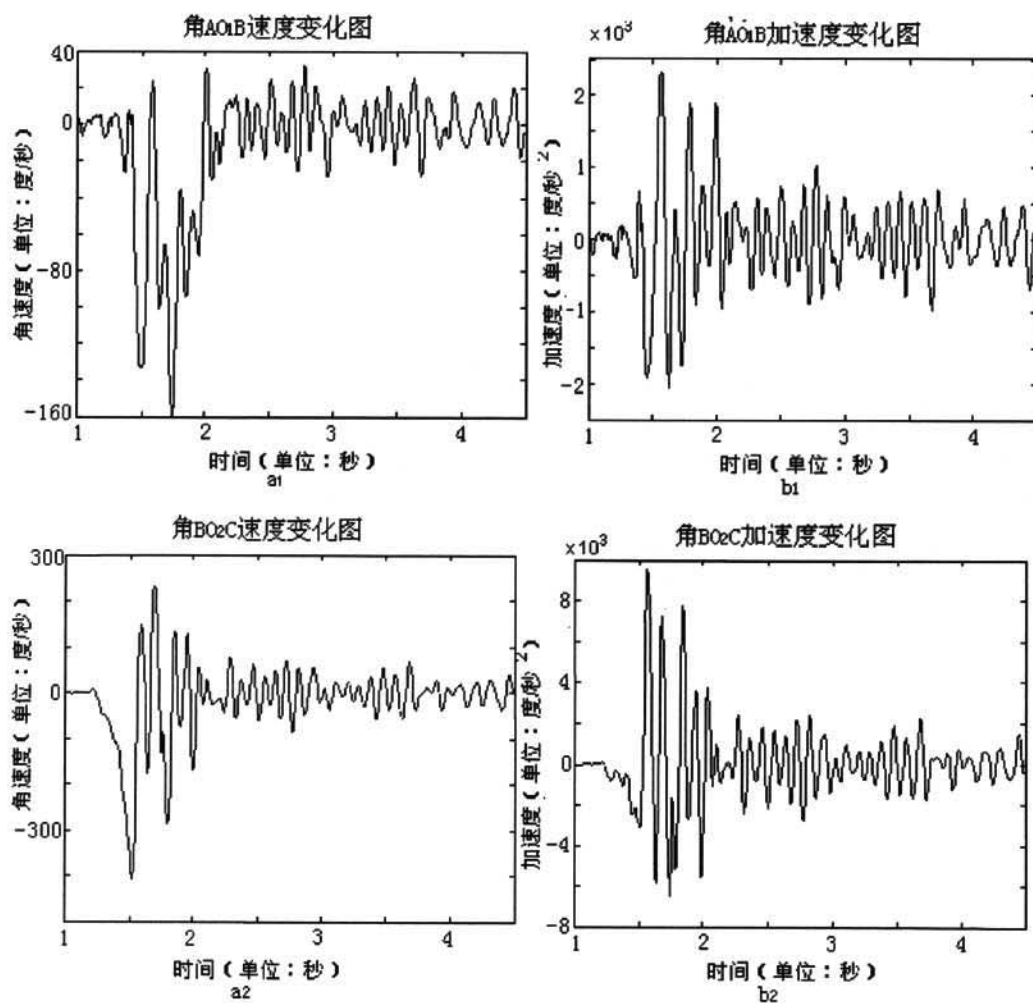


图 5.7 角速度及角加速度变化图

Figure 5.7 The changes of the angle velocity and acceleration



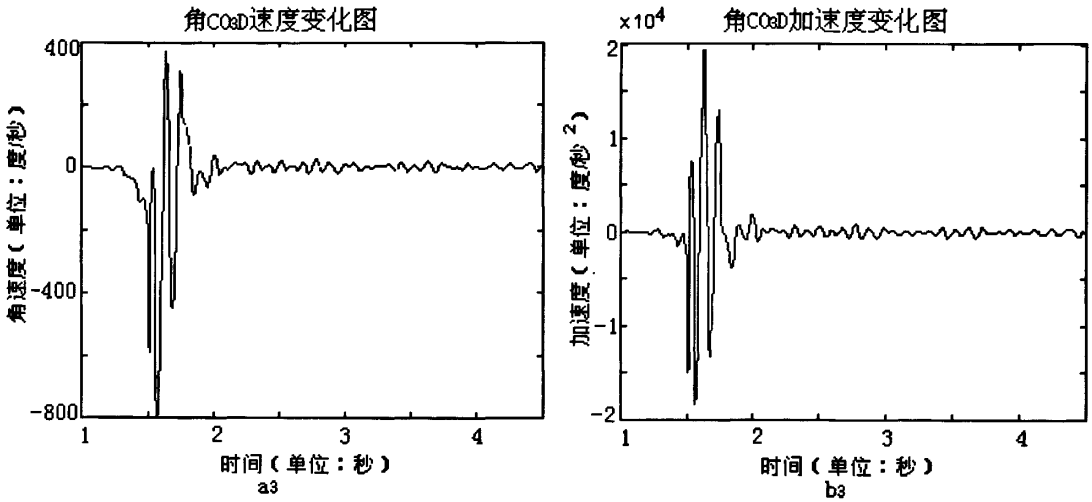


图 5.8 夹角速度及加速度变化图

Figure 5.8 The changes of the angle velocity and acceleration

图 5.7 是固定于手指指节上的三个传感器计算出的角度的角速度及角加速度随时间的变化曲线。计算的方法如式 5.5 所示，即后一点的值与前一点的值之差与时间间隔的比值，若后一点的值比前一点的值小则其差为。

图 5.8 的 a 列表示夹角的速度变化，b 列表示加速度的变化。第一行表示的是角  $AO_1B$  即近端指节与掌面夹角的速度和加速度的变化，第二行表示角  $BO_2C$  即中端指节与近远端指节夹角的速度和加速度变化，第三行表示角  $CO_3D$  即远端指节与中端指节夹角的速度和加速度的变化。从图 5.6 和至图 5.7 中可以看出：自然握拳时，角  $AO_1B$  变化滞后于其他两个角变化即近端指节的变化明显滞后于其他两个关节的变化，中端指节和远端指节的变化先后顺序相当，但前者比后者略快；人手在自然握拳时，其三个关节夹角最终值大小的顺序为角  $CO_3D$  最大，角  $AO_1B$  最小。角  $AO_1B$  的变化最小角  $CO_3D$  的变化最大，角  $AO_1B$  变化平缓没有产生波动其他两个两个角变化波动比较大说明自然握拳时，三个关节角度变化的快慢顺序是远端指节变化最快，近端指节变化最慢。

### 5.3 本章小结

通过四个传感器检测食指的运动信息，对三种动作方式下受试者的数据进行分析处理，表明用该方法检测食指的运动信息，操作简单、结果和实际的动作相吻合，更可以从直观中判断出手指的动作方式，能够得到食指三个关节的夹角随时间的变化关系。根据角度绘制食指运动示意图，可以得出较准确的食指关节运动的角度，更可以得出更多的信息如角加速度信息、位置信息、速度信息等。从实验中可以得出一些结论，但由于样本数太小这些结论需要在后期的实验中扩大样本数进一步的验证。

## 6 结论及展望

### 6.1 全文工作总结

手指运动参数检测在手部运动功能评估、肢体康复治疗等领域具有重要的应用意义。手部运动检测有多种不同的方法,从最早的测角仪、普通摄像技术到后来的超声、高速摄像技术等,本文在了解国内外关于手指运动参数检测的基础上完成了如下工作。

(1) 通过人体手部的解剖结构分析,确定手部生理模型。对国内外手部运动信息检测的方法进行比较分析,确定采用基于 MEMS 的三轴加速度传感器 ADXL330 对手指的运动信息进行检测。

(2) 选用 LabVIEW 及其相关的硬件设备如 NI6008 和 NI9205 采集传感器的数据,选用 Matlab 对相关数据进行分析处理,并完成了相关软件编程;

(3) 在对传感器的特点了解的基础上,通过实验发现传感器在运动过程中始终受到重力的作用,建立了传感器输出与重力之间的数学关系模型。为了验证该数学模型的准确性,进行了一系列的验证实验。通过标定实验,结果表明单个传感器的静态输出绝对误差小于 4%;通过关节模型实验,证明了两个传感器的静态输出误差在一定的范围内;通过单个传感器检测前臂运动姿态,并将其与高速摄像进行对比,结果表明两者之间的运动轨迹一致,最终值的绝对误差小于 5%,但是存在一定的时间滞后性。

(4) 为了进一步验证测量原理模型的正确性,用步进电机和刚性材料制作了手指模型。并进行了相关的手指模型实验,实验结果表明不论是单个传感器还是两个传感器,不论是动态检测还是静态检测,都具有很好的可重复性和准确性。由此,所有的实验结果证明了使用该传感器可以进行手指的运动参数检测。

(5) 对实际的手指运动进行检测,实验前规定了受试者的动作方式并进行训练。处理的结果显示了手指的运动轨迹,该轨迹包括了手指运动的角度信息、位置信息和速度信息,得出手指指节夹角随时间变化的关系。通过实验得出了一些手指运动过程中的结论。

实验表明,基于三轴加速度传感器的手指运动参数的检测方法既能检测手指运动的静态信息,也能检测其运动过程;不光能得到手指运动的角度信息,还包含了位置信息和速度信息。更重要的采用三轴传感器为以后的空间定位提供了理论和实验基础。

综上所述,本文设计了基于三轴加速度传感器的手指运动参数检测的软件程序及硬件装置。传感器选用的是基于 MEMS 的 ADXL330 加速度传感器,数据采

集系统由 NI 公司的 LabVIEW 软件和相应的采集模块 NI9205 组成, 后期的数据处理选择的是 MATLAB 软件。实验过程中要求传感器的一个方向与重力方向一致即可进行数据采集、数据处理和分析等, 因为传感器在运动过程中始终受到重力的作用, 本文的测量原理正是基于传感器的三个轴的方向与重力方向的夹角来检测手指的运动姿态。

## 6.2 后续工作

在以后的工作中还需要进一步的完成以下工作:

(1) 传感器测量原理模型由二维变为三维, 手指的运动信息检测可以从平面变成空间, 就可以模拟出手指的空间运动轨迹;

(2) 基于步进电机的手指模型制作, 可以选用步进角小且保持转矩大的电机, 就可以减小验证的误差;

(3) 手指实验中, 仅进行了单个手指多关节运动信息检测, 还应补充样本数; 还可以进行多手指的运动信息检测, 以此可以进行手势识别;

(4) 数据处理完全采用 LabVIEW, 不用 Matlab, 可以实现实时检测, 并且可以在手指运动的时候, 同时让手指模型运动;

(5) 制作测量装置, 在目前的基础上制作出一个数据手套来实现手指的运动信息检测。

## 致 谢

本论文是在导师侯文生教授的悉心指导下完成的。在论文的选题、课题研究、实验方法的确立、实验过程及论文撰写、修改的全过程中都浸透着他的心血。他渊博的学术知识、严谨求实的治学作风、一丝不苟的敬业精神、锐意创新的科研精神、诲人不倦的学者风范和厚积薄发的人文素养无不使我倍受启迪和教育，值此论文脱稿之际，于此致以诚挚的谢意和崇高的敬意！

在本研究中，得到了重庆市微系统研究中心郑小林教授、杨军副教授、皮喜田副教授、廖彦剑博士、罗红艳博士等老师在论文撰写、实验方法等方面的指导和帮助，在此表示衷心感谢！

感谢几年来朝夕相处的实验室的各位同学给予我的无私帮助，让我获益菲浅，论文中的很多思想和实验方法都是在与各位同学及老师的讨论中逐渐形成并最终完成的。

我要感谢我的家人，他们给我的温暖、理解和宽容让我有充分的时间和旺盛的精力面对学习、生活、工作中遇到的挫折和困难，同时激励着我顺利完成硕士学业！

戴加满

二〇〇九年四月 于重庆



## 参考文献

- [1] 张春林.高等机构学[M].北京:北京理工大学出版社,1997.
- [2] 郭巧.现在机器人学[M].北京:北京理工大学出版社,1997.
- [3] Roger Bartlett. Sports Biomechanics: reducing injury and improving performance[J]. UK: EFN Spon,1999:161-164.
- [4] 崔来友, 白士红, 张春林等. 人体运动学模型的研究[J]. 机械设计与研究,2003.12: 10-13.
- [5] Aggarwal J K, Cai Q. Human motion analysis[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999; 73 (3):428
- [6] Gavrilu DM.The visual analysis of human movement[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999; 73(1):82
- [7] Atkeson CG, Hale JG, Pollick F, et al. Using humanoid robots to study human behavior[J]. IEEE Intelligent System s and Their Applications, 2000; 15 (4):46
- [8] 张文增, 赵冬斌. 基于模型的人体运动参数检测[J]. 生物医学工程学杂志, 2005,22(1): 147-150.
- [9] Volkert B, Stephen V, Mark B, Andy C. Gesture based direct manipulation in augmented reality[J]. In : Pro2ceedings of the 2nd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia, 2004, 212~220.
- [10] Shahzad Malik, Joe Laszlo. Visual touchpad: A two-handed gestural input device[J]. In: Proceedings of the ACM International Conference on Multimodal Interfaces (ICMI'04), State College,PA,USA,2004,289~296.
- [11] Jiang Wei, Chen Yuan-Fei, Kong Yong, Li Wen-Ming. A new method for dividing hand image for complex background[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2003, 33 (4):410-412 (in Chinese).
- [12] Julien L, Francois B. Visual tracking of bare fingers for interactive surface[J]. In: Proceedings of the 17th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Santa Fe, NM, USA, 2004:119-122.
- [13] Christian von Hardenberg, Francois Berard. Bare-hand human-computer interaction[J]. In: Proceedings of t he ACM Workshop on Perceptive User Interfaces, Orlando, Florida, USA, 2001:1-8.
- [14] 朱继玉, 王西颖, 王威信等. 基于结构分析的手势识别[J]. 计算机学,2006.12: 2130-2137.
- [15] 潘春洪, 马颂德. 基于区域的手指三维运动跟踪[J]. 中国图形图象学,2003,10: 1205-1210
- [16] Caia, Aggaral J k. Automatic tracking of human motion in door scenes across multiple

- synchronized video stream[J]. In: Proceeding of International Conference on Computer Vision, Bombay, India, 1998: 156-162.
- [17] Huber E. 3D real-time recognition using proximity space[J]. In: Proceeding of International conference on pattern recognition, Vienna, Austria, 1996:136-141.
- [18] Cameron G, Bustanoby A, Cope K. Panel on motion capture and character animation[J]. In: SIGGRAPH'97, Los Angeles, California, USA, 1997:442-445.
- [19] Rowley H A, Rehg J M. Analyzing articulated motion using expectation-maximization[J]. In: Proceeding of International Conference on Pattern Recognition, Puerto Rico, 1997:935-941.
- [20] Leung M K, Yang Y H. A human body outline labeling system[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 17: 359-377.
- [21] Horn B K P, Schunck B G. Determining optical flow. Artificial Intelligence, 1999, 17:185-204.
- [22] Blankertz B, Curio G, Müller K R. Classifying single trial EEG: Toward brain computer interfacing[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, MA: MIT Press, 2002.
- [23] Burke D P, Kelly S P, de Chazal P, Reilly R B, Finucane C. A parametric feature extraction and classification strategy for brain-computer interfacing[J]. IEEE Trans. Neu. Sys. Rehab. Eng., 2005, 13(3): 12 - 17.
- [24] Li Y, Gao X, Liu H, Gao S. Classification of single-trial electroencephalogram during finger movement [J]. IEEE Trans. Biomed. Eng., 2004, 51(6): 1019 - 1025.
- [25] Wang Y, Zhang Z, Li Y, Gao X, Gao S, Yang F. An algorithm based on CSSD and FDA for classifying single trial EEG[J]. IEEE Trans. Biomed. Eng., 2004, 51(6): 1019 - 1025.
- [26] 李同磊, 刘伯强, 李可等. 基于脑电信号的手指动作识别[J]. 山东科学, 2006.02:1-6.
- [27] 许蓉, 侯文生, 郑小林等. 握力大小与前臂肌肉表面肌电频率特性的相关性研究[J]. 人类工效学, 2006, 09: 112-114.
- [28] 王人成, 郑双喜等. 基于表面肌电信号的手指运动模式识别系统[J]. 康复医学工程, 2008, 05: 410-412.
- [29] Ogawa S, Lee TM, Nayak AS, et al. Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields[J]. Magn Reson Med, 1990, 14: 68-78.
- [30] Ogawa S, Lee TM, Kay AR, et al. Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1990, 87 (24): 9868-9872.
- [31] 宋扬, 李吉. 手指运动相关脑皮层功能区 fMRI 的研究[J]. 立体定向和功能性神经外科杂志, 2006, vol. 19, No. 3.
- [32] 于薇, 林冲宇, 臧玉峰等. 利手与非利手随意运动的全脑功能磁共振成像[J]. 中华放射学杂志, 2003, 37 (5): 402-405.
- [33] 李艳, 刘世文, 曹丽华等. 正常人三种模式手指运动时脑激活区域的功能磁共振研究[J]. 中

- 华物理医学与康复杂志,2003,25 (6) :335-339.
- [34] 常时新,冯敢生,孔祥泉等. 简单与复杂手指运动的 fMRI 对比分析[J]. 临床放射学杂志,2002,21(1): 13-15.
- [35] 张忠林,沈天真,陈星荣等. 正常运动皮质活动与激发模式和有利手相关性功能 MRI 研究[J]. 国际医药卫生导报,2003,9 (9):4-7.
- [36] 王美豪,祝一虹,李建策等. 运动相关大脑皮层的功能磁共振成像[J]. 放射学实践,2005,20 (1):15-17.
- [37] 李东海,龚洪翰,肖香佐等. 正常人手运动功能脑皮质定位的研究[J]. 中国微侵袭神经外科杂志, 2003, 8(5):220-221.
- [38] Mueller WM,Yetkin FZ. Functional magnetic resonance imaging of the somatosensory cortex [J]. Neurosurg Clin North Am,1997,8 (3):373-381.
- [39] Cet tolo V, Francescato MP, Zuiani C,et al . Functional mapping of the motor and primary sensorial cortex using magnetic resonance techniques [J]. Radiol Med, 1996,92:554-561.
- [40] Shibasaki H,Sadato N,Lyshkow H,et al . Both primary motor cortex and supplementary motor area play an important role in complex finger movement[J]. Brain, 1993,116:1387-1398.
- [41] 李忠义. 机电假手的研究进展.[J] 康复医学,2005: 16-19.
- [42] Wilms E. Der Technik der Vaduzer Hand[J]. Orthopaedie Technik, 1951, 2: 07.
- [43] Kobrinski A E, Bolhovitin S V. Problems of bioelectric control in automatic and remote control[J]. In proceedings of the first International Congress of international Federation of Automatic Control. Moscow, 1960,2.
- [44] Herberts P, Almstrom C, Caine K. Clinical application study of multifunction prosthetic hand[J]. J Bone Joint Surg Br, 1978, 60(4): 552-560.
- [45] Childress DS. Control of limb prostheses[M]. Atlas of limb Prosthetics. 1992: 175-198.
- [46] 郑修军, 张键, 陈中伟等. 机电假手的研究进展[J]. 中国康复医学杂志,2003,18:168-170.
- [47] Okada T . Object Handling System for Manual Industry[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9 (2):79 - 89 .
- [48] Mason M T, Salisbury J K . Robot Hands and the Mechanics of Manipulation [M]. MIT Press, Cambridge,US A, 1985: 3-93 .
- [49] Bonivento C,Melchi orri C. Towards Dexterous Manipulation with the UB2 Hand II[J]. 12th IFAC World Congress, Sydney, Australia: 1993: 1602-1604.
- [50] Jacobsen S C,Wood J E, KnuttiD F. The UT AH/M IT Dexterous Hand:Work in Progress[J]. The International Journal of Robotics Research,1984,3 (4) .
- [51] Caffaz A, Cannata G . The Design and Development of the DIST-2 hand Dexterous Griper[J]. Leuven,Belgium, 1998: 2075 - 2080.

- [52] Lovchik C S,MDiflerM A. The Robot Hand: a Dextrous Robotic Hand for Space [J]. Proceedings for the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, 1999: 907 - 912.
- [53] Butterfass J, Grebenstein M, Liu H, Hirzinger G. DLR2 Hand II: Next Generation of a Dextrous Robot Hand[J]. Proceedings for the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001: 109- 14.
- [54] Lin John , Wu Ying , Huang Thomas S. Capturing human hand motion in image sequences[J]. Video Computing (MOTION' 02), Orlando, Florida, 2002: 99~104.
- [55] <http://www.shadowrobot.com/>
- [56] 王国庆.多指灵巧手控制方法研究[J].北京:北京航空航天大学, 1996 .
- [57] 何平,金明河,刘宏,等.机器人多指灵巧手基关节力矩位置控制系统的研究[J]. 机器人, 2002, 24(4): 314 - 318 .
- [58] 张青云. 四指机器人灵巧手 [J].传感器世界, 2006, 12 (7) .
- [59] 刘庆运, 钱瑞朋. 机器人多指手及其抓取机制的研究进展[J]. 现代制造工程, 2007, 09: 148-152.
- [60] 吕永利.人体形态科学[M].北京:科学出版社, 2003.
- [61] Salisbury J K, Craig J J. Articulated hand: force control and kinematic issues. The International Journal of Robotics Research, 1982, 1 (1): 4 - 17.
- [62] Eusebi A, Fantuzzi C, Melchiorri C, et al. The UB hand II control system: design features and experimental results[J]. New York, NY, USA: IEEE, 1994. 782 - 787.
- [63] Okada T, Object2 handling system for manual industry [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9 (2): 79 -89.
- [64] Ren Hai-Bing, Xu Guang-You, Lin Xue-Yin. Hand gesture recognition based on characteristic curves. Journal of Software[J]. 2002, 13 (5): 987~993.
- [65] 姜威,陈援非,孔勇等.一种在复杂背景彩色图像中划分手部图像的方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2003, 33 (4):10~412.
- [66] Mori T, Kawasaki H, Yoshikawa K, et al. Anthropomorphic robot hand: Gifu hand III. International Conference on Control[J]. Automation and Systems. 2002:1288-1293.
- [67] Anon. Cyber Glove User's Manual[J]. USA: Virtual Technologies, Inc, 1997.
- [68] Turner M L. Programming Dexterous Manipulation by Demonstration[M]. USA: Stanford University, 2001.
- [69] 刘敏娟,崔建昆.手指可达工作空间的三维建模[J].上海理工大学学报, 2006: 96-99.
- [70] 刘博, 张玉茹, 任大伟等. 人手食指运动学建模[J]. 机器人, 2007.05:514-218.
- [71] 辛瑞武, 肖南峰. 五指形仿人机械手的数学模型[J]. 计算技术与自动化, 2006.03: 21-23.

- [72] 陈大跃, 丁 洪, 周新宇等. 人体行走的步态测试与分析系统[J]. 中国生物医学工程学报, 1997, 16 (2):133.
- [73] 张求知, 刘建业, 王立伟. 电磁式跟踪器磁场畸变的姿态校正技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 12:38-42.
- [74] Kendall FP, Kendall HO, McCreary EK. Muscles testing and function[J]. Baltimore Williams & Wilkins, 1983.
- [75] 高文杰, 张建国. 人体上肢仿生机构运动模型的研究[J]. 天津轻工业学报, 2001.3:35-39.
- [76] 赵冬斌, 张文增, 孙振国. 基于高速摄像的人体上肢运动信息检测[J]. 生物医学工程杂志, 2002, 19:76-79.
- [77] A ggarwal JK, Cai Q. Human Motion Analysis[J]. A Review Computer Vision and Image Understanding, 1999, 73 (3): 428.
- [78] 刘光辉, 亢春梅. MEMS 技术的现状和发展趋势[J]. 传感器技术, 2001, 20(1):55-56.
- [79] Carpinella, P. Mazzoleni. Experimental protocol for the kinematic analysis of the hand: Definition and repeatability[J]. The International Journal of Robotics Research. 2006:445-454.
- [80] 焦纯, 杨国胜等. 基于三维运动传感器的训练强度监测仪的设计[J]. 医疗卫生装备, 2003, 3:9-12.
- [81] 朱荣, 周兆英等. 肢体运动微型监测系统研究[J]. 清华大学学报(自然科学版). 2003.11:1464-1467.
- [82] 高光天. 传感器与信号调整器件应用技术[M]. 北京:科学技术出版社, 2002:65-78.
- [83] ADXL330 datasheet. <http://www.analog.com>.
- [84] 孟维国. 三轴加速度计 ADXL330 的特点及应用[J]. 国外电子元器件, 2007, 2:11-13.
- [85] 罗志增, 王人成. 仿生假手触滑觉研究[J]. 传感器技术学报. 2003.9: 233-237.
- [86] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通[M]. 清华大学出版社:2-5.
- [87] <http://www.mathworks.com/>
- [88] 宋亦旭, 谈大龙. 基于内部传感器的轮式移动机器人运动速度估计[J]. 控制理论与应用, 2003, 08:537-541.
- [89] <http://www.zgbfw.com>.

## 附 录

### A. 作者在攻读学位期间发表的论文目录:

- [1] 戴加满,侯文生. 基于加速度传感器的前臂运动姿态检测.传感器与微系统.2009,1: 106-108.

### B. 硕士期间参与的科研项目:

- [1] 指力协同配合的神经调控机理研究, 自然科学基金项目 (30770546) .  
[2] 指力的动态调节模式研究, 重庆市自然科学基金项目 (CSTC, 2007BB5148) .

# 基于三轴加速度传感器的手指运动参数检测

作者：[戴加满](#)  
学位授予单位：[重庆大学](#)

本文链接：[http://d.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_Y1664102.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1664102.aspx)