

学校编码: 10384  
学 号: 32620141150590

分类号: TP242.6 密级: 内部★五年  
UDC: 681.5

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

机器人诊疗系统中穿刺力建模、识别与控制  
研究

Study on Force Modeling, Identification, and Control of  
Robot Therapy System

杨重骏

指导教师姓名: 聂立铭 副 教 授

谢 瑜 副 教 授

专 业 名 称: 转 化 医 学

论文提交日期: 2017 年 4 月

论文答辩时间: 2017 年 5 月

学位授予日期: 2017 年 6 月

答辩委员会主席: 崔长彩

评 阅 人: 刘厚德 王灿

2017 年 6 月

# 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（聂立铭副教授与谢瑜副教授）课题组的科研成果，获得（国家自然科学基金资助项目与高等学校博士学科点专项科研基金资助项目）课题经费或实验室的资助，在（福建省传感技术重点实验室与厦门大学分子影像暨转化医学研究中心）完成。

声明人：

日期：2017年05月20日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人：

日期： 2017年 05月 20日

## 摘 要

本研究的主要目的是能够实现穿刺力建模，完成力控制系统的设计，从而实现医学手术过程中手术机器人的从手力觉控制，即当主手医生输入特定力函数，从手直流电机能够输出相应的力函数。本研究搭建了力建模与控制实验平台，并完成了力分析与建模、影响因素分析以及力控制实验。

首先，对穿刺针穿刺过程的作用原理进行简要的分析，对穿刺过程中穿刺针的受力情况做出理论上的分析与推导，对实验建模过程中需要用到的解析模型进行选择与确定，对穿刺力建模过程中需要用到的假定与前提做出设定。

其次，介绍了机器人辅助穿刺实验环境的搭建与设计过程，对穿刺平台的硬件系统做出设计，利用直流电机与线性位移平台作为穿刺过程的执行机构，利用直流电机控制器作为动力源，利用压电式力传感器获取穿刺过程中的穿刺力，使用数据采集卡对数据进行采集。设计多种类型的穿刺针以满足穿刺力建模要求、研究穿刺力受力的影响因素。设计穿刺针与软组织的固定机构，保证穿刺过程中系统的稳定，减少穿刺误差。

再次，利用有限元软件和数学解析模型完成对穿刺针穿刺软组织过程的建模。利用实验数据分别对背膜阻力、摩擦力、切割力进行解析模型建模。在模型确立以后，分别对穿刺针的几何特性、穿刺的软组织对象类型以及穿刺方式等穿刺力的影响因素做出实验与分析。

最后，利用 LabVIEW 平台，整合与设计了全自动化的数据采集系统，同时建立了穿刺力跟踪系统，优化与简化了各个模块的控制程序，重点分析了控制算法，完成了力控制系统的设计，对该系统进行实验验证。

**关键词** 机器人系统；分析建模；力控制

## ABSTRACT

The main purpose of the study is to achieve the insertion force modeling, the completion of the force control system design, in order to control the slaver of the surgical robot during the medical operation. That is when the master enters one force function, the slaver can output the corresponding one. This study builds force modeling and sets up a control experiment platform, and completes the force analysis and modeling, influencing factor analysis and force control experiment.

Firstly, the principle of the needle insertion process is briefly analyzed, and the force analysis of the needle during insertion is analyzed and deduced theoretically. The analytical model needed in the modeling is selected and determined. The assumptions that need to be used in the modeling during insertion are set.

Secondly, the construction and design process of the computer-aided insertion experiment environment is introduced. The hardware system of the puncture platform with the DC motor and the linear displacement platform as the actuator of the insertion is designed. The sensor obtains the puncture force in the process, and the data acquisition card is used to collect the data. A variety of types of needle to meet the requirements of force modeling is designed to study the impact of modeling. The needle and soft tissue of the fixed body to ensure the stability of the system during insertion to reduce error is also constructed.

Thirdly, the finite element and mathematical model of the soft tissue are used to build during needle insertion. The analytical model is used to model the stiffness, friction and cutting force. After the establishment of the model, the geometric characteristics of the needle, the types of soft tissue and the means of insertion are tested and analyzed respectively.

Finally, the software system based on LabVIEW is designed. The insertion force data acquisition and servo system are established. The control program of each module is optimized and simplified. The control algorithm module is analyzed. The force control system is completed. The system is verified by the experiment.

**Key words:** Robot System; Analysis and Modeling; Force Control

## 目 录

<b>第一章 绪 论 .....</b>	<b>1</b>
1.0 引 言 .....	1
1.1 研究背景与意义 .....	1
1.2 国内外研究进展概况 .....	4
1.2.1 经皮手术的建模研究进展 .....	4
1.2.2 手术穿刺针的跟踪策略研究进展 .....	5
1.3 研究的主要目标 .....	7
1.4 论文结构和章节安排 .....	8
<b>第二章 穿刺针穿刺过程理论分析 .....</b>	<b>11</b>
2.0 引 言 .....	11
2.1 穿刺过程的作用原理 .....	11
2.2 穿刺过程的受力分析 .....	12
2.3 穿刺力模型的建立 .....	14
2.3.1 背膜阻力建模 .....	14
2.3.2 摩擦力建模 .....	17
2.3.3 切割力建模 .....	19
2.4 穿刺对象的力学特性分析 .....	20
2.4.1 肝脏组织的解剖结构与力学特性分析 .....	21
2.4.2 食道组织的解剖结构与力学特性分析 .....	22
2.5 本章小结 .....	23
<b>第三章 机器人辅助穿刺实验环境搭建与系统设计 .....</b>	<b>25</b>
3.0 引 言 .....	25
3.1 系统总体结构设计 .....	25
3.2 硬件系统设计 .....	26
3.2.1 直流电机与电机位移平台的选型 .....	26
3.2.2 电机控制器的选型 .....	27
3.2.3 力传感器的选型 .....	27
3.2.4 数据采集卡的选型 .....	28
3.2.5 接口电源盒的选型 .....	28
3.2.6 穿刺针的选型 .....	29
3.2.7 实验系统的搭建 .....	30
3.3 软件系统设计 .....	33
3.3.1 电机控制软件 .....	33
3.3.2 数据采集软件 .....	34
3.4 本章小结 .....	36
<b>第四章 针穿刺实验建模与影响因素分析 .....</b>	<b>37</b>
4.0 引 言 .....	37
4.1 穿刺力实验建模 .....	37

4.2 计算机仿真实验建模.....	38
4.2.1 有限元法分析.....	39
4.2.2 软组织穿刺仿真实验.....	39
4.2.3 仿真实验分析与讨论.....	40
4.3 穿刺力动物实验数据采集.....	41
4.3.1 实验过程.....	42
4.3.2 实验结果.....	43
4.4 解析模型.....	44
4.4.1 背膜阻力建模.....	45
4.4.2 摩擦力建模.....	46
4.4.3 切割力建模.....	46
4.5 影响因素分析.....	46
4.5.1 穿刺针几何特性.....	47
4.5.2 软组织对象.....	49
4.5.3 穿刺方式.....	52
4.6 本章小结.....	52
<b>第五章 针穿刺力控制算法与实现.....</b>	<b>55</b>
5.0 引 言.....	55
5.1 力控制系统的总体结构.....	55
5.2 基于 LABVIEW 的图形化编程.....	56
5.3 软件程序实现.....	57
5.3.1 电机运动控制模块设计.....	57
5.3.2 数据采集模块设计.....	59
5.3.3 人机交互模块设计.....	60
5.4 系统辨识与参数估计.....	61
5.5 生物软组织穿刺的力控制结构.....	61
5.5.1 PID 位置控制.....	62
5.5.2 专家经验控制.....	64
5.6 总体结构.....	66
5.7 实验过程.....	67
5.8 实验分析与讨论.....	69
5.9 本章小结.....	73
<b>第六章 总结与展望.....</b>	<b>75</b>
6.1 全文总结.....	75
6.2 展 望.....	76
参考文献.....	77
致 谢.....	80
攻读硕士学位期间的研究成果.....	81
附 录.....	83

## CONTENTS

<b>Chapter 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1.0 PREFACE.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 BACKGROUND &amp; SIGNIFICANCE .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 RESEARCH OVERVIEW.....</b>	<b>4</b>
1.2.1 Modeling Technology .....	4
1.2.2 Tracking Technology.....	5
<b>1.3 OBJECTIVE .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 OUTLINE.....</b>	<b>8</b>
<b>Chapter 2 Theoretical Analysis of Needle Insertion.....</b>	<b>11</b>
<b>2.0 PREFACE.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 INTERACTION PRINCIPLE.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 FORCE ANALYSIS.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 THEORETICAL MODELING.....</b>	<b>14</b>
2.3.1 Stiffness Modeling .....	14
2.3.2 Friction Modeling .....	17
2.3.3 Cutting Modeling.....	19
<b>2.4 MECHANICAL PROPERTIES.....</b>	<b>20</b>
2.4.1 Liver Structure .....	21
2.4.2 Esophageal Structure.....	22
<b>2.5 CONCLUSION.....</b>	<b>23</b>
<b>Chapter 3 Composition &amp; Design of Insertion System .....</b>	<b>25</b>
<b>3.0 PREFACE.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 SYSTEM DESIGN.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2 HARDWARE DESIGN.....</b>	<b>26</b>
3.2.1 Motor & Platform Selection.....	26
3.2.2 Controller Selection .....	27
3.2.3 Force Sensor Selection.....	27
3.2.4 Data Acquisition Card Selection.....	28
3.2.5 Power Selection .....	28
3.2.6 Needle Selection .....	29
3.2.7 System Build.....	30
<b>3.3 SOFTWARE DESIGN.....</b>	<b>33</b>
3.3.1 Motor Control Software.....	33
3.3.2 Data Acquisition Software .....	34
<b>3.4 CONCLUSION.....</b>	<b>36</b>
<b>Chapter 4 Modeling &amp; Factors Analysis of Needle Insertion.....</b>	<b>37</b>
<b>4.0 PREFACE.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 EXPERIMENTAL MODELING.....</b>	<b>37</b>



<b>4.2 SIMULATION MODELING</b> .....	<b>38</b>
4.2.1 Finite Element Method Analysis.....	39
4.2.2 Simulation .....	39
4.2.3 Analysis & Discussion .....	40
<b>4.3 EXPERIMENTAL DATA COLLECTION</b> .....	<b>41</b>
4.3.1 Experiment Procedure.....	42
4.3.2 Result .....	43
<b>4.4 ANALYTICAL MODELING</b> .....	<b>44</b>
4.4.1 Stiffness Modeling .....	45
4.4.2 Friction Modeling .....	46
4.4.3 Cutting Modeling .....	46
<b>4.5 FACTORS ANALYSIS</b> .....	<b>46</b>
4.5.1 Needle Geometric Characteristic .....	47
4.5.2 Soft Tissue.....	49
4.5.3 Insertion Method.....	52
<b>4.6 CONCLUSION</b> .....	<b>52</b>
<b>Chapter 5 Algorithm and Implementation Needle Force Control</b> .....	<b>55</b>
<b>5.0 PREFACE</b> .....	<b>55</b>
<b>5.1 OVERALL STRUCTURE OF THE FORCE CONTROL SYSTEM</b> .....	<b>55</b>
<b>5.2 LABVIEW GRAPHICAL PROGRAMMING</b> .....	<b>56</b>
<b>5.3 SOFTWARE PROGRAM</b> .....	<b>57</b>
5.3.1 Motor Control .....	57
5.3.2 Data Collection .....	59
5.3.3 Human-Computer Interaction .....	60
<b>5.4 SYSTEM IDENTIFICATION</b> .....	<b>61</b>
<b>5.5 FORCE CONTROL STRUCTURE ON SOFT TISSUE</b> .....	<b>61</b>
5.5.1 PID Control.....	62
5.5.2 Expert Control.....	64
<b>5.6 OVERALL STRUCTURE</b> .....	<b>66</b>
<b>5.7 EXPERIMENT PROCEDURE</b> .....	<b>67</b>
<b>5.8 ANALYSIS &amp; DISCUSSION</b> .....	<b>69</b>
<b>5.9 CONCLUSION</b> .....	<b>73</b>
<b>Chapter 6 Summary &amp; Outlook</b> .....	<b>75</b>
<b>6.1 SUMMARY</b> .....	<b>75</b>
<b>6.2 OUTLOOK</b> .....	<b>76</b>
<b>References</b> .....	<b>77</b>
<b>Acknowledgements</b> .....	<b>80</b>
<b>Research Achievement</b> .....	<b>81</b>
<b>Appendix</b> .....	<b>83</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 第一章 绪 论

## 1.0 引 言

近些年来,在手术领域正发生着一场追求微创甚至无创的变革,在此背景下,机器人辅助微创手术应运而生<sup>[1]</sup>。微创手术在减小手术创伤、减轻病人痛苦、减少感染机会、缩短愈合时间等方面具有积极意义。然而,作为一种新型手术科技,机器人微创手术也存在着局限。当前的医疗影像检测手段尚不足以在线提供视觉图像信息,因而限制了图像的导航效果。对于传统的穿刺介入手术来说,穿刺工具常常因人手抖动、器官变形等因素偏离规划的路径,操作过程中会对器械周边的软组织造成一些不必要的损伤,影响了手术的疗效<sup>[2]</sup>。

与此同时,在传统手术操作中医生有时可能需要几天连续于手术台上进行手术操作,对体力和心智都是极大的考验。机器人在医疗领域的运用具有提高手术精度、降低医生疲劳程度、仿真实验、录制教学等多种优势<sup>[3]</sup>。由于医疗机器人存在着巨大的优势,世界各地的研究机构及各大医院都展开了其相关研究,目前部分成果也成功地应用于临床手术<sup>[4][5]</sup>。

## 1.1 研究背景与意义

在医疗机器人系统中,机器人辅助针穿刺系统方面的研究引起了国内外众多学者的广泛关注<sup>[4][5]</sup>,逐步成为本研究领域内的一大热点。在现实的手术操作过程中,医生与病人的肌肉组织本身即是一个交互力直接实现的过程,医生操作仪器施加力的作用,而手术仪器对肌肉组织施加力作用。因此,如果从手能直接根据主手作用的力信号对软组织施加相同的力信号,从而实现真正的力控制操作,主从式系统便能够更加贴近现实的手术过程,从而达到更精确、高效,完善力-力型机器人辅助穿刺手术系统。据此,如图 1.1 所示,在机器人辅助穿刺手术系统中,其主要问题主要包括对穿刺力建模方面的研究和力反馈与控制方面的研究。

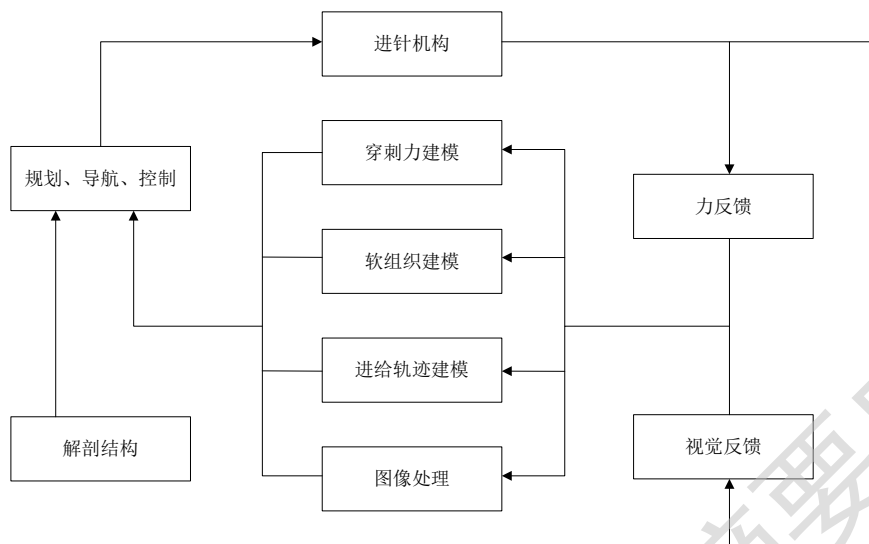


图 1.1 机器人辅助穿刺手术系统

在机器人辅助针穿刺系统中，穿刺或活检对象如果产生变化，其目标位置与作用对象的实时力觉、视觉信息以及操作工具的实时可控性都是机器人辅助远程手术成功的关键因素。

一方面，手术的风险不仅与医生的临床经验等密切相关，还与患者的运动、生理状态或者几何尺寸相关。不同的软组织结构在病变的不同阶段，所涉及的每个过程中器官类型的差异，健康和病变组织机械特性产生的差异，不同患者中相同器官发生组织损伤，软组织自身特性变化以及手术操作过程中腺体肿胀，都会产生不同的生物力学特性。

在常规的针穿刺过程中，外科医生依据影像设备获得图像反馈，在头脑中形成解剖结构的三维影像。实现穿刺手术机器人精确定位的主要对象是刚性体，而生物软组织多为柔性体，常常表现出非连续性、不均匀性、非线性、各向异性以及粘弹性等特点<sup>[2][3]</sup>，在穿刺针进入软组织器官以后，由于穿刺针与软组织器官之间的交互作用会引起较大的变形，所以目标靶点会产生一定程度的偏差，手术前规划的路径就会产生变化。一些实时影像设备可以改善目标靶点的实时可见性，但是由于目标靶点的不确定性，组织变形和针的偏转在手术过程中会出现错位等问题，从而加大手术风险。同时，由于穿刺用钢针的刚性作用，易造成软组织变形或者损伤，从而造成非病灶组织如周围神经、血管等的破坏。这就对于医生对穿刺针的操作熟练程度、手术操作经验有着极高的要求。

为了减少医生的工作压力,获得软组织与穿刺针之间的相互作用关系,首先需要 对软组织与穿刺针之间的穿刺力进行建模。模型主要包括软组织的变形建模、交互力的建模和穿刺针规划路径的建模。这样如果能获得正常结构与病变结构的函数解析模型,即可对病患部位进行解析建模,供医生临床诊断使用,从而有效地减少疾病的漏误诊率。第二,有效而精确的交互力模型有利于辅助完成机器人控制系统的设计,利用该模型可以辅助完成手术训练器的设计。第三,有效的数学解析模型可用于研制力学、材料性能类似的仿人体器官材料,供医生代替真实器官进行实验研究、临床教学等应用。

另一方面,由于人为操作、软组织器官时变等原因,穿刺针的精确定位具有一定的难度,穿刺针针尖定位也成为机器人辅助穿刺控制系统的核心工作之一。由于临床医生不方便直观地触摸到病患部位,大多数穿刺手术是通过术前图像设备定位或规划完成的,外科医生无法直观地感受到病患部位的力觉信息,通过自身已有的解剖知识调整手术策略。众多学者利用 X 光、计算机断层扫描(CT)、核磁共振(MRI)、超声等多种视觉图像技术对穿刺过程进行导航,但穿刺针的视觉定位精度会受到众多外界因素影响<sup>[1][2]</sup>。其次,由于生物体的复杂性,其自身存在不确定约束和复杂边界条件,即使是同一生物个体的同一器官,在不同的手术条件下都会表现出具有时变性的生物力学特性,而随着手术的进行,其周边组织更是实时影响着其软组织自身的状态。第三,由于人工外科手术技术操作的局限性,上世纪八十年代末开始,便有了虚拟手术技术的初步成果,将虚拟现实技术应用于手术机器人便是虚拟手术技术的重要成果,而在虚拟现实技术中,操作者需要同时对视觉和力觉进行感知,在视觉信息不足的前提下,如果能实时获取病变部位的力觉信息,通过已有的穿刺力模型与控制信息对手术过程进行预判,让医生感受到真实的手术场景,而不是在操作机器人,并且病变部位也能实时感受到专家临床医生的专业操作,则手术的成功率将会大大提高。而在主从式手术机器人系统中,关于力觉控制方面的研究尚处于主手感受从手反馈的力信号,将具体的力觉控制应用于手术机器人系统尚处于研究的起步阶段<sup>[2][4][5]</sup>。在视觉反馈不足、生物体条件复杂、虚拟现实技术等方面的迫切需求下,对软组织的力觉反馈与控制研究对提高手术精度,增强手术操作外科医生的临场感和手术过程的沉浸感都有着重要意义。



图 1.2 达芬奇手术机器人系统

## 1.2 国内外研究进展概况

在机器人辅助针穿刺系统中,近年来众多学者开展了广泛而深入的研究,其研究重点主要分为对穿刺针与软组织交互机理的建模研究和对穿刺针的跟踪控制研究两个方面进行。

### 1.2.1 经皮手术的建模研究进展

为了能真实地再现手术操作,模拟手术过程中的动态特性,众多研究者完成了基于物理方面的建模,如弹簧质点模型、有限元模型、边界元模型等<sup>[1]</sup>。由于生物组织并非线性弹性材料,而是非均匀的物体、具有非线性、粘弹性和各向异性,其时间依赖性较强,且随着患者状态的不同而有较大差异。因此,近些年来发展出动态建模的方法,即对生物组织与安装有传感器的手术操作工具相互作用时的特性进行实时测量建模。如切割过程中手术刀受力的测量和分析,穿刺术中针受力的测量和分析等<sup>[6][7]</sup>。

约翰·霍普金斯大学的 Simone 等利用 Steady Hand Robot 获取了离体牛肝脏的穿刺力数据,并运用其算数平均值建立了力学解析模型<sup>[8]</sup>。模型把穿刺力分为三部分:背膜阻力、摩擦力和切割力。背膜阻力被拟合成一个二次多项式模型;摩擦力用修正 Karnopp 模型来表示;对某确定的软组织来说,切割力是一个常值。该模型较为完整,是之后在该领域的研究中被广泛引用的经典模型,也是本文主要参考的模型基础。Glozman 等利用弹簧质点模型建立了简化版的穿刺力模型,该模型可近似描述穿刺针与软组织之间的交互作用力<sup>[9]</sup>。Mohsen 等测量了剪切力,并建立了剪切力的相关模型<sup>[10]</sup>。Valdastri 等对三个方向上的切割力进行了单独建模,并进行了测量和研究<sup>[11]</sup>。Brouwer 等利用统计的方法研究了穿刺针的弯

曲挠度模型<sup>[12]</sup>。Alterovitz 等利用前列腺的有限元模型与匀质材料对手术过程进行了模拟研究,实验结果表明模拟材料无法完全代替真实的软组织<sup>[13]</sup>。国内也有一些学者从能量的角度对切割过程展开了分析,利用能量守恒的原理,在变形阶段、破裂阶段和切割阶段等切割过程分别建立了模型<sup>[14]</sup>。曾衍钧等利用皮肤测试了软组织的粘弹性,利用超声手段分别建立了大、小变形下的应力-应变模型<sup>[15]</sup>。李醒飞等利用超声-力传感器系统测试了软组织变形时的力学特征参数<sup>[16]</sup>。



图 1.3 机器人辅助穿刺系统

除了对力学模型进行研究,一些学者对软组织切割过程中穿刺力的影响因素进行了研究。Chanthasopephan 等研究了切割力同切割速度与刀具切割角度的关系<sup>[17]</sup>。Sundar 等利用大规模的力学实验研究获得了软组织性能系数,利用组织系数分析了针尖类型对相互作用力的影响<sup>[18]</sup>。Maurin 等利用猪肝脏、肾脏进行了穿刺实验,其实验主要分为带皮穿刺与去皮穿刺,其结果表明带皮组织对建模影响较大<sup>[19]</sup>。Kataoka 等利用猎犬前列腺进行试验,其实验结果表明末端力与摩擦力之和构成了总轴向力,摩擦力与夹紧力有关<sup>[20]</sup>。Moore 等在对各种几何形状的针尖进行比较分析后,以立体牛肝为穿刺对象建立了强化切割边缘(ECE)双尖弧面的穿刺针的穿刺力模型。该模型包含了针尖的穿刺力和针尖边缘的切割力,变量包括了针的半径、针尖角度参数以及穿刺深度<sup>[21]</sup>。

### 1.2.2 手术穿刺针的跟踪策略研究进展

力跟踪技术,一般泛指在机器人应用领域中,通过力传感器,将力反馈信号与位移控制(或速度控制)的输入信号结合,通过有关的控制算法,实现力-位混合控制技术。常用的力控制方法一般可划为四种:混合、阻抗、自适应和智能控制<sup>[22]</sup>。目前,力跟踪技术多应用于机器人去毛刺、机器人装配、机器人磨削等工业领域,如孔彦杰等在剖分式齿轮制造中提到的超级螺母预紧力控制<sup>[23]</sup>,杨林

等在有机玻璃研磨抛光中提到的研磨抛光机器人力控制<sup>[24]</sup>, 韩巍等在机械切屑中提到的机器人在线力控制<sup>[25]</sup>等。

奥地利 ARC 机器人研究所利用光学系统进行跟踪, 利用笛卡尔机构进行定位, 利用手持超声探头进行手术路径规划<sup>[26]</sup>。乔治敦大学制造了 11 自由度的机器人, 其中的 8 自由度用于原始坐标位置的确定, 利用 CT 与 MRI 在手术前进行模型构建, 手术进行时结合发光二极管 (LED) 与磁路定位进行位置跟踪<sup>[27]</sup>。斯隆·凯特琳癌症中心研制的微小型啮齿类动物穿刺机构具有 4 自由度, 手术过程中利用正电子发射型计算机断层扫描显像 (PET) 实时监控位置信息<sup>[28]</sup>。

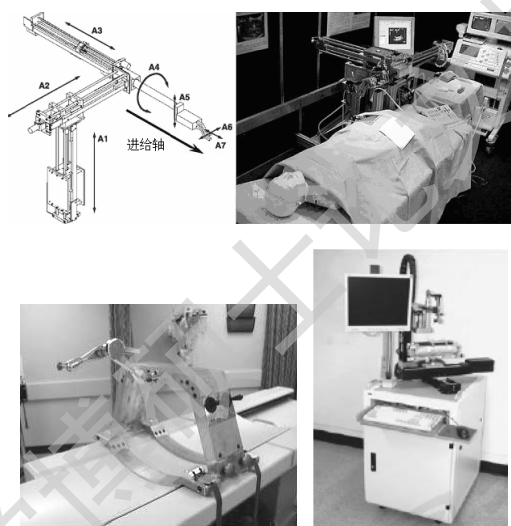


图 1.4 多自由度手术机器人系统

约翰·霍普金斯大学研发的 6 自由度肝脏经皮穿刺机器人在手术过程中, 利用超声技术扫描成像, 利用电磁系统提供定位参考<sup>[2]</sup>。Alterovitz 等研究了穿刺过程中穿刺针的不完整偏转路径, 该研究利用独轮车的运动路径和马尔可夫决策过程, 提出了二维坐标下避障运动控制算法<sup>[13]</sup>。Duindam 等反解三维坐标的运动学路径, 该方法首先反解二维坐标, 然后利用一条二维曲线和一组二维空间曲线替代三维坐标曲线实现运动控制<sup>[29]</sup>。Dimaiio 等利用针操控过程中的雅可比矩阵来控制穿刺针针尖的转向或前进后退<sup>[30]</sup>。赵燕江等利用简化的自行车模型对数学模型进行了分析, 提出了具有回程的自行车前后轮模型<sup>[31]</sup>。哈尔滨工业大学利用 SCARA 型工业机器人构成了穿刺手术的辅助设备, 北京航空航天大学设计了串并联机构形成了冗余机械臂, 有效提高了穿刺手术过程中操作手的灵敏度<sup>[2]</sup>。



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库