



“十一五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

仿人多指灵巧手 及其操作控制

· 刘 宏 姜 力 著 ·



科学出版社
www.sciencep.com

“十一五”国家重点图书出版规划项目
21 世纪先进制造技术丛书

仿人多指灵巧手 及其操作控制

刘 宏 姜 力 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

仿人多指灵巧手是一个高度集成、高度智能化的机电一体化系统,对仿人多指灵巧手及其操作控制的研究不仅对机电一体化系统和理论的研究具有重要的学术价值,而且对仿人多指灵巧手在空间机器人、工业机器人、服务机器人、残疾人假肢等领域的应用具有重要的实际意义。

本书以哈尔滨工业大学与德国宇航中心联合研制的 HIT/DLR 手为例,论述了仿人多指灵巧手的机电一体化设计、传感技术和驱动技术、运动学和动力学、抓取规划、力规划和控制系统结构、手指控制,以及遥控操作技术。

本书可作为高校和科研院所机器人及机电一体化专业、自动控制专业师生的参考书,也可以作为研究多指灵巧手及其相关技术的科研工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

仿人多指灵巧手及其操作控制/刘宏,姜力著. —北京:科学出版社,2010
 (“十一五”国家重点图书出版规划项目·21世纪先进制造技术丛书)
 ISBN 978-7-03-026815-0

I. ①仿… II. ①刘…②姜… III. ①机械手-智能控制 IV. ①TP241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 025950 号

责任编辑:刘宝莉 陈 婕 / 责任校对:赵桂芬
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 3 月第一次印刷 印张:16 1/2

印数:1—2 500 字数:310 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪,先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点,同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展,为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术,出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合,产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战,要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展,激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升制造学科的学术水平。我们相信,有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,本丛书将为发展制造科学,推广先进制造技术,增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物,在制造业中的应用范围很广,从喷漆、焊接到装配、抛光和修理,成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科,已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一,并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展,因此,本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后,我们衷心地感谢所有关心丛书并为丛书出版尽力的专家们,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对丛书的厚爱。

A handwritten signature in black ink, reading '熊有佐' (Xie Youzuo) in a cursive style.

华中科技大学

2008年4月

前 言

近年来,具有多个关节的仿人多指灵巧手成为机器人领域的研究热点之一。本书结合多指灵巧手的最新研究成果和发展趋势,以作者近年来在仿人多指灵巧手及其操作控制领域取得的研究成果为基础,系统地论述仿人多指灵巧手及其操作控制的理论、方法和关键技术,包括基于机电一体化思想的仿人多指灵巧手设计、多指操作规划和操作控制等。本书的主要内容如下:

第1章介绍多指灵巧手的发展历史、趋势、代表性成果以及多指操作控制理论的研究概况。第2章以哈尔滨工业大学和德国宇航中心联合研制的仿人多指灵巧手为例,论述基于机电一体化思想的仿人多指手设计。第3章和第4章分别论述仿人多指手的传感技术和驱动技术。在传感技术方面,重点论述基于MEMS的微型六维指尖力/力矩传感器;在驱动技术方面,重点介绍自主研制的微型直线驱动器和基于DSP/FPGA的无刷直流电机驱动器。第5章和第6章分别论述仿人多指手的运动学、动力学和多指手的抓取规划。在多指操作运动学方面,论述一种层次化的位形空间多指操作运动学计算方法;在抓取规划方面,介绍一种基于E-ANFIS算法的抓取模型重构方法和适用于步态操作的四指平面力封闭算法。第7章论述多指抓取力规划和一种模块化的灵巧操作控制系统结构。在多指抓取力规划方面,介绍一种基于抓取力向量形式的线性约束梯度流力规划方法。第8章论述仿人多指灵巧手的手指控制方法,包括手指位置控制和柔顺控制。最后,第9章介绍仿人多指灵巧手的遥操作技术。

本书主要由刘宏和姜力撰写并统稿。其中,何平、赵京东、李家炜和樊绍威参与了第1章的撰写,何平、刘伊威、樊绍威和兰天参与了第2章的撰写,王嘉力、杨磊和樊绍威参与了第3章的撰写,谢宗武和兰天参与了第4章的撰写,何平还参与了第5章的撰写,樊绍威和李家炜参与了第6章的撰写,杨磊参与了第8章的撰写,胡海鹰和蒋再男参与了第9章的撰写。本书相关的研究工作得到了以下项目的支持:国家自然科学基金项目“机器人多指手的实时力优化和自主操作控制的研究”(项目编号:60675045)、“仿人机器人手局部自主操作的研究”(项目编号:60275032)和“新一代仿人型残疾人假手系统及理论的研究”(项目编号:50435040),国家“863”计划项目“新一代五指仿人灵巧手及其协调控制的研究”(项目编号:2006AA04Z255)和“高性能仿人型假手”(项目编号:2009AA043803)等。金明河、高晓辉、李家炜、谢宗武、刘伊威、杨磊、何平、赵京东、胡海鹰、魏然、王滨、王捷、蒋再男、樊绍威、兰天等参加了本书相关的研究工作。赵京东参加了本书的

编辑和整理工作,蔡鹤皋院士审阅了本书的全部文稿。

与国内外已出版的同类书籍相比,本书密切结合作者在仿人多指灵巧手方面取得的研究成果,突出特色和创新,力求系统、全面地反映仿人多指灵巧手的最新设计思想和操作控制方法。本书对于机器人学的数学基础、基础理论和共性技术不做详细介绍。在内容阐述上,本书力求概念清晰,问题明确;在写作手法上,力求简洁、明了,通过具体实例进行形象化的论述,以增强本书的可读性和实用性。

本书的出版将满足机器人和自动化领域内科技工作者和研究生的需要。本书可以作为高校和科研院所机器人及机电一体化专业、自动控制专业师生的参考书,也可以作为研究多指灵巧手及其相关技术的科研工作者的参考书。

限于作者的学术水平,书中难免会有不妥之处,敬请指正。

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编:熊有伦(华中科技大学)

编 委:(按姓氏笔画排序)

丁 汉(上海交通大学/华中科技大学)	李涵雄(香港城市大学/中南大学)
王田苗(北京航空航天大学)	周仲荣(西南交通大学)
王立鼎(大连理工大学)	查建中(北京交通大学)
王国彪(国家自然科学基金委员会)	柳百成(清华大学)
王越超(中科院沈阳自动化所)	赵淳生(南京航空航天大学)
王 煜(香港中文大学)	钟志华(湖南大学)
冯 刚(香港城市大学)	徐滨士(解放军装甲兵工程学院)
冯培恩(浙江大学)	顾佩华(汕头大学)
任露泉(吉林大学)	黄 强(北京理工大学)
江平宇(西安交通大学)	黄 真(燕山大学)
刘洪海(朴次茅斯大学)	黄 田(天津大学)
孙立宁(哈尔滨工业大学)	管晓宏(西安交通大学)
宋玉泉(吉林大学)	熊蔡华(华中科技大学)
张玉茹(北京航空航天大学)	翟婉明(西南交通大学)
张宪民(华南理工大学)	谭 民(中科院自动化研究所)
李泽湘(香港科技大学)	谭建荣(浙江大学)
李涤尘(西安交通大学)	雒建斌(清华大学)

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 多指灵巧手的代表性成果	2
1.3 多指灵巧手的发展趋势	10
1.4 多指抓取模型及抓取规划	10
1.4.1 抓取静力学	10
1.4.2 抓取约束和特性	12
1.4.3 抓取规划	13
1.5 多指手控制综述	16
1.5.1 手指的控制	17
1.5.2 多指控制	20
1.6 小结	22
参考文献	22
第 2 章 仿人多指手的机电一体化设计	29
2.1 HIT/DLR I 手概况	29
2.2 机构和驱动系统的集成化设计	31
2.2.1 基关节单元	31
2.2.2 手指单元	31
2.3 传感系统的设计	33
2.3.1 关节力矩传感器	33
2.3.2 电机位置传感器	33
2.3.3 关节位置传感器	34
2.3.4 六维指尖力/力矩传感器	34
2.3.5 温度传感器	35
2.4 电气系统的集成化设计	35
2.5 控制系统硬件的设计	37
2.5.1 微处理器系统	37
2.5.2 高速串行通信系统	38

2.6	控制系统软件的设计	38
2.7	HIT/DLR I 手的外观设计	40
2.7.1	外包装	40
2.7.2	机构的优化设计	42
2.8	手腕的设计	42
2.9	HIT/DLR II 手的机电一体化设计	43
2.9.1	HIT/DLR II 五指手概述	43
2.9.2	HIT/DLR II 手的机构和驱动	44
2.9.3	HIT/DLR II 手的控制系统硬件	47
2.9.4	手掌构形的拟人化设计	51
2.10	小结	57
	参考文献	57
第3章	仿人多指手的传感技术	59
3.1	机器人的外部传感	59
3.1.1	视觉传感器	59
3.1.2	测距传感器	59
3.1.3	接近觉传感器	61
3.1.4	触觉传感器	62
3.1.5	力/力矩传感器	62
3.2	机器人的内部传感	63
3.2.1	规定位置的检测	63
3.2.2	位置感知	64
3.2.3	速度和角速度的检测	67
3.2.4	加速度的检测	67
3.3	HIT/DLR 手的关节位置和速度检测	67
3.3.1	原理	67
3.3.2	电机位置和速度的计算	68
3.3.3	关节位置的检测	68
3.4	微型五维指尖力/力矩传感器	69
3.4.1	多维力传感器研究概述	69
3.4.2	微型五维力传感器的弹性体设计	72
3.4.3	微型五维力传感器的信号处理电路	74
3.5	基于 MEMS 的微型六维指尖力/力矩传感器	75
3.5.1	全平面的弹性体结构	75
3.5.2	基于 MEMS 的薄膜电阻应变计	78

3.5.3 基于DSP的传感器信号处理电路和微处理器电路	82
3.6 微型六维力/力矩传感器的静态解耦	84
3.6.1 基于最小二乘的静态解耦	84
3.6.2 基于人工神经网络(ANN)的静态解耦	85
3.6.3 静态解耦实验	86
3.7 指尖触觉传感器	89
3.7.1 压阻式触觉传感器的原理	89
3.7.2 触觉传感器的本体结构设计	90
3.8 小结	91
参考文献	91
第4章 仿人多指手的驱动技术	93
4.1 机器人灵巧手驱动技术概述	93
4.1.1 驱动器	93
4.1.2 传动系统	94
4.2 微型直线驱动器	95
4.2.1 直线驱动技术概况	95
4.2.2 微型直线驱动器的原理和组成	96
4.2.3 微型直线驱动器的电路	98
4.2.4 微型直线驱动器的数学模型	100
4.2.5 微型直线驱动器的滑模位置控制器设计	102
4.2.6 微型直线驱动器的位置控制	106
4.3 HIT/DLR II 手的内置式驱动系统	109
4.3.1 基于DSP/FPGA的驱动控制电路	109
4.3.2 相电流检测电路	110
4.3.3 电源系统	112
4.4 小结	113
参考文献	113
第5章 仿人多指手的运动学和动力学	115
5.1 手指运动学	115
5.1.1 位置运动学	115
5.1.2 微分运动学	118
5.2 手指静力学	119
5.3 多指操作运动学	119
5.3.1 物体运动学	121
5.3.2 手掌运动学	121

5.3.3	接触运动学	121
5.3.4	通用形式的多指操作运动学	123
5.4	平面抓取时多指操作运动学的计算实例	124
5.4.1	虚拟指节	124
5.4.2	封闭的运动链	125
5.4.3	运动学计算	128
5.5	手指动力学	131
5.5.1	应用迭代的 Newton-Euler 算法求解手指连杆动力学	132
5.5.2	腱传动系统的动力学	133
5.5.3	基关节动力学	134
5.5.4	手指动力学方程	134
5.6	小结	135
	参考文献	135
第 6 章	仿人多指手的抓取规划	137
6.1	抓取模型的数学描述	137
6.1.1	最佳抓取平面	137
6.1.2	抓取模型的构建	137
6.2	E-ANFIS 模型的框架及建模	140
6.2.1	自适应神经模糊推理系统	140
6.2.2	前件专家系统结构及知识表示形式	141
6.2.3	E-ANFIS 模型的结构	142
6.3	基于 E-ANFIS 的抓取模型的构建	144
6.4	一种四指力封闭抓取算法	146
6.4.1	力封闭算法的通用性证明	146
6.4.2	力封闭算法的描述	149
6.5	多指手的抓取规划实验	150
6.5.1	E-ANFIS 模型的训练	151
6.5.2	灵巧手抓取操作的流程	153
6.5.3	模型重构实验及结果	154
6.5.4	四指力封闭算法的实验结果	156
6.6	小结	158
	参考文献	158
第 7 章	多指抓取的力规划和控制系统结构	160
7.1	多指抓取力规划概述	160
7.2	基于线性约束梯度流的多指力优化算法	161

7.3	改进的线性约束梯度流力优化算法	165
7.3.1	理论依据	165
7.3.2	改进的线性约束梯度流算法	166
7.3.3	初值的给定方法	168
7.4	抓取力优化的计算实例	169
7.5	灵巧操作控制系统	173
7.5.1	多指手控制结构综述	173
7.5.2	模块化的灵巧操作控制系统	174
7.5.3	模块化的灵巧操作控制系统的组成	174
7.6	自主抓取策略	177
7.6.1	时间驱动的自主抓取策略	177
7.6.2	时间-事件混合驱动的自主抓取策略	178
7.7	柔顺运动规划器	179
7.7.1	混合外力控制	179
7.7.2	混合外力控制器的设计	180
7.7.3	混合外力控制器的性能分析和改进	181
7.7.4	混合外力控制器的仿真	183
7.8	小结	185
	参考文献	185
第8章	仿人多指手的手指控制	187
8.1	HIT/DLR 手的空间变换	187
8.2	关节位置控制	189
8.2.1	摩擦力及其补偿	189
8.2.2	具有摩擦力补偿的关节位置 PID 控制算法	190
8.2.3	关节位置控制系统	193
8.2.4	关节位置控制实验	194
8.3	关节的冲击控制和力矩控制	198
8.3.1	冲击控制和力控制方法的综述	198
8.3.2	基于事件的并行位置/力矩控制	200
8.4	关节的阻抗控制	202
8.4.1	基于位置的关节阻抗控制系统及实验	202
8.4.2	目标阻尼对阻抗控制系统过渡过程的影响	203
8.5	手指的笛卡儿位置控制	205
8.6	手指的笛卡儿阻抗控制	207
8.6.1	坐标变换	208

8.6.2 手指的笛卡儿阻抗控制算法	209
8.6.3 手指的笛卡儿阻抗控制实验	210
8.7 小结	213
参考文献	213
第9章 仿人多指手的遥操作	216
9.1 多指手遥操作技术概述	216
9.1.1 临场感遥操作技术	217
9.1.2 时延遥操作技术	219
9.2 具有临场感的多指手遥操作	226
9.2.1 临场感多指手遥操作系统的体系结构	226
9.2.2 具有临场感的多指手遥操作系统设计	228
9.2.3 临场感多指手遥操作实验	231
9.3 基于虚拟现实的时延遥操作	234
9.3.1 基于虚拟现实的时延遥操作概况	234
9.3.2 基于虚拟现实的时延遥操作系统设计	236
9.3.3 基于虚拟现实的时延遥操作实验	240
9.4 小结	242
参考文献	243

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

随着机器人技术的飞速发展,其应用领域日益扩大。作为机器人与环境相互作用的执行部件,末端执行器对于机器人智能化水平和作业水平的提高具有十分重要的作用。

目前,商业机器人一般由 6 个关节组成,使用夹钳式(或平行移动式)的单自由度末端执行器夹持工件。这类传统的末端执行器结构简单,控制方便,对于实现负荷的大范围运动作业非常有效,但是存在以下缺点:

(1) 对于工件的夹持和定位是通过施加较大压力所产生的摩擦力来实现的,不存在抓取的几何封闭和力封闭,因此抓取精度较低,且稳定性和可靠性较差。

(2) 传统的末端执行器一般是针对特定任务而设计的,因此通用性较差。当执行不同的作业任务时,需要设计多个手爪,这不仅提高了生产成本,而且末端执行器的频繁更换限制了生产效率的提高。

(3) 传统的末端执行器制约了机器人精细作业水平的提高。对于大多数商业机器人来说,通过机器人臂调整末端位置,通过手腕调整末端姿态。由于机器人臂的尺寸较大,因此,通过臂调整机器人末端位置姿态的方式很难实现精确定位和操作,并且动态响应较差。

(4) 对于传统的末端执行器来说,缺少精确的力控制能力,只能实现对夹持力要求不高的作业。

近年来,多自由度、多关节的多指灵巧手成为机器人末端操作器的发展方向。多指灵巧手相当于安装在机器人末端的可独立实现精细操作运动的一组机器人,是拟人化并能实现灵活操作的末端执行器。通过机器人臂实现粗定位,采用手腕和多指手实现精细定位,宏/微操作器的有机结合能够较好地克服使用单自由度末端执行器所存在的问题。

多指灵巧手与物体的接触点较多,如果采用适当的抓取方式和规划算法,从理论上可以实现任意形状物体的抓取,并且对物体施加任意的运动和力。因此,在不更换末端执行器的情况下,就可以对各种复杂形状的物体进行高精度、稳定和可靠的抓握和操作。

1.2 多指灵巧手的代表性成果

对机器人多指灵巧手的研究是从假肢开始的。1509年,人们为在战争中失去一只手的年轻战士 Berlichingen 制作了通过弹簧驱动的假手(简称 Berlichingen 手)。这只假手在战斗中发挥了很大的作用,但是在生活中却很不方便。在 Berlichingen 手之后,人们又相继研究了许多假手,有些假手至今仍在使用。Childress 将假手分为装饰型、被动型、身体驱动型和外部动力型四种类型。其中,外部动力型手从 1920 年开始流行,从 20 世纪 30 年代开始得到广泛的应用^[1]。1962 年,由 Tomovic 和 Boni 研制的 Belgrade 手就是为南斯拉夫的一位伤寒病患者设计的,它被认为是世界上最早的灵巧手^[2]。

1974 年,日本成功研制了 Okada 手,它是早期灵巧手的典型代表,如图 1.1 所示。该手有 3 个手指和 1 个手掌,其中,拇指有 3 个自由度,另两个手指各有 4 个自由度。手指的每个关节由电机驱动,通过钢丝-滑轮机构实现运动和动力的传递。Okada 手可以完成将螺栓拧进螺母之类的操作^[3]。

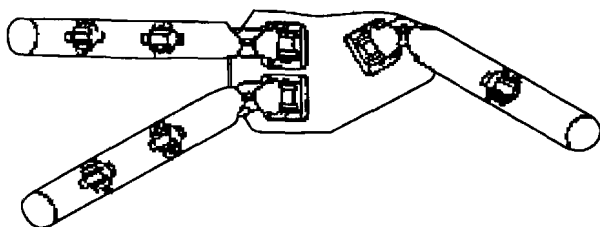


图 1.1 日本的 Okada 灵巧手

20 世纪 80 年代以来,随着机器人技术的快速发展,很多国家加强了机器人多指灵巧手的研制工作,取得了许多代表性的研究成果,一批著名的多指灵巧手问世。

美国麻省理工学院和犹他大学于 1980 年联合研制成功的 Utah/MIT 手是一种拟人化的灵巧手,如图 1.2 所示^[4]。Utah/MIT 手采用了模块化的结构设计,4 个手指(拇指、食指、中指和无名指)完全相同,每个手指有 4 个自由度。手指的配置方式类似于人手,每个手指都连接到手掌并且相对于手掌进行运动。采用气动伺服缸作为手指关节的驱动元件,通过绳索(腱)和滑轮实现远距离传动。为了达到最大的操作度,该手采用了 2N 型腱驱动系统,每个关节通过一对运动方向相反的腱进行驱动。

美国斯坦福大学研制的 Stanford/JPL 手(又称 Salisbury 手)是一种非仿人手,如图 1.3 所示^[5]。该手也采用了模块化设计方法,3 个手指完全相同,每个手指有 3 个自由度。Stanford/JPL 手没有手掌,拇指和其他两个手指相对放置。采用 12 个直流伺服电机作为关节驱动元件,通过 N+1 型腱传动系统传递运动和力。

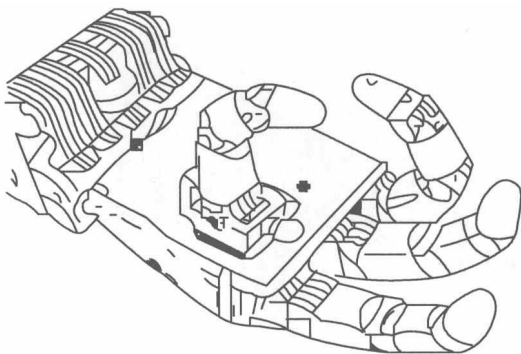


图 1.2 美国的 Utah/MIT 灵巧手

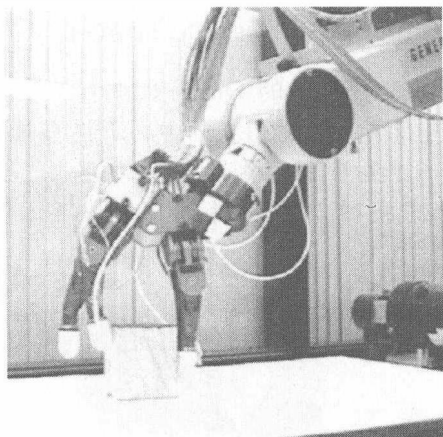


图 1.3 美国的 Stanford/JPL 灵巧手

Utah/MIT 手和 Stanford/JPL 手不仅奠定了多指灵巧手的基本设计思想,如多关节、多自由度的模块化结构和位置、触觉、力等多传感器系统等,而且为多指抓取和操作控制等基础理论的研究提供了良好的实验平台,在多指灵巧手发展史上具有里程碑般的意义。

日本在 1984 年成功研制了 Hitachi 手,如图 1.4 所示^[6]。Hitachi 手有 3 个 4 自由度的手指和 1 个拇指,该手的显著特点是采用了形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)驱动,具有速度快、负载能力强等优点,但是存在耐疲劳能力差、寿命短等问题。

20 世纪 90 年代以后,随着计算机、微电子学、微电机等技术的发展,多指手进入了一个崭新的快速发展阶段。高性能计算机大大地提高了多指手控制系统的信号处理能力和复杂控制算法的计算能力,大规模集成电路和微电机为多指手的集成化设计提供了条件。以德国、意大利为代表的欧洲和美国在灵巧手方面的研究