

基于最优控制理论的触摸运动模型

(申请清华大学工学博士学位论文)

培 养 单 位 ： 计算机科学与技术系

学 科 ： 计算机科学与技术

研 究 生 ： 古 裔 正

指 导 教 师 ： 史 元 春 教 授

副 指 导 教 师 ： 喻 纯 副 教 授

二〇二一年十二月

Modeling, Sensing and Understanding Pervasive Touch Input

Thesis Submitted to

Tsinghua University

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Doctor of Philosophy

in

Computer Science and Technology

by

Gu Yizheng

Thesis Supervisor: Professor Shi Yuanchun

Associate Supervisor: Associate Professor Yu Chun

December, 2021

学位论文指导小组、公开评阅人和答辩委员会名单

指导小组名单

李 XX	教授	清华大学
王 XX	副教授	清华大学
张 XX	助理教授	清华大学

公开评阅人名单

刘 XX	教授	清华大学
陈 XX	副教授	XXXX 大学
杨 XX	研究员	中国 XXXX 科学院 XXXXXXXX 研究所

答辩委员会名单

主席	赵 XX	教授	清华大学
委员	刘 XX	教授	清华大学
	杨 XX	研究员	中国 XXXX 科学院 XXXXXXXX 研究所
	黄 XX	教授	XXXX 大学
	周 XX	副教授	XXXX 大学
秘书	吴 XX	助理研究员	清华大学

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容；（3）按照上级教育主管部门督导、抽查等要求，报送相应的学位论文。

本人保证遵守上述规定。

作者签名： _____

导师签名： _____

日 期： _____

日 期： _____

摘 要

【题目】基于最优控制理论的触摸运动模型

触摸是最重要的人机交互方式之一，尽管其主要载体触屏已问世数十年，触摸交互仍有三大改进方向：(1) 普适性，随着普适计算的发展，包括触屏在内的设备将从人们的视线中消失，此时如何支持触摸输入仍有待研究；(2) 响应性，人对触摸交互响应性的感官需求极高，人在触摸交互中能察觉到低至 10 毫秒的延迟，而常用触屏设备的延迟为 50 毫秒，未能提供最佳用户体验；(3) 有意性，交互朝着自然动作输入方向发展，自然动作中人的有意触摸和无意触碰混杂，触摸交互面临误触带来的挑战。改进触摸交互的一条技术路线是充分利用触摸的运动规律，即触摸前后手指的位移、速度和加速度特征。本文提出了基于最优控制理论的触摸运动模型：在触摸事件发生前（100 毫秒左右），人下意识地对手指运动进行最优控制规划 [xx]，随后手指沿可预测的时空轨迹运动。因此，触摸事件可以在低延迟、甚至负延迟下准确预测。基于模型，本文针对多种触摸交互任务（目标选择、文本输入），优化触摸感知和意图推理技术，提升交互效率和体验。具体贡献如下：

(1) 提出了基于最佳控制理论的触摸运动模型，包含数学模型（描述触摸运动的数学方程）和计算模型（利用位移、速度、加速度传感信号拟合触摸运动方程的计算方法）。触摸运动模型为触摸交互技术提供了计算理论基础，本文详细描述了模型及其推导过程，展望了模型在普适性、响应性和有意性三方面对触摸交互技术的改进方法。

(2) 改进了基于运动传感器指环的触摸感知技术：基于指环的触摸感知技术具有较强的普适性，使用户能在普通的桌子、墙面上进行触摸交互 [xx,xx,xx]，先前工作利用阈值方法判断触摸，延迟 200 毫秒，准确率为 85%[xx]。本文基于触摸运动模型，改进了基于运动传感器的触摸感知技术，延迟低至 10 毫秒，低于用户可察觉的范围，同时准确率超过 99%。

(3) 提出了面向连续触摸输入的防误触技术：针对触屏连续触摸输入中用户频繁误触的问题，本文提出基于触摸运动模型的意图推理技术，有效过滤触屏上的误触点击。文本输入是最快、最复杂的触摸输入任务，本文在文本输入任务中验证意图推理技术的可行性，准确率达到 99%，足以允许用户在十指触屏打字间隙将手指休息在触屏上（而不会引发误触），将触屏十指打字速率提升 20%。

关键词：触摸交互；感知技术；意图识别

Abstract

An abstract of a dissertation is a summary and extraction of research work and contributions. Included in an abstract should be description of research topic and research objective, brief introduction to methodology and research process, and summary of conclusion and contributions of the research. An abstract should be characterized by independence and clarity and carry identical information with the dissertation. It should be such that the general idea and major contributions of the dissertation are conveyed without reading the dissertation.

An abstract should be concise and to the point. It is a misunderstanding to make an abstract an outline of the dissertation and words “the first chapter”, “the second chapter” and the like should be avoided in the abstract.

Keywords are terms used in a dissertation for indexing, reflecting core information of the dissertation. An abstract may contain a maximum of 5 keywords, with semi-colons used in between to separate one another.

Keywords: keyword 1; keyword 2; keyword 3; keyword 4; keyword 5

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	III
插图和附表清单.....	V
符号和缩略语说明.....	VI
第 1 章 引言	1
1.1 选题背景.....	1
1.1.1 触摸交互的重要性.....	1
1.1.2 触摸交互的改进方向.....	2
1.2 研究现状.....	3
1.2.1 电容触屏.....	3
1.2.2 基于运动传感的触摸感知技术.....	3
1.3 研究内容.....	3
1.3.1 触摸运动数学模型.....	3
1.3.2 触摸运动计算模型.....	3
1.3.3 触摸运动模型的应用.....	4
1.4 主要研究成果.....	4
1.5 论文组织结构.....	4
1.6 最优控制理论在手部运动建模上的应用.....	4
1.7 论文的语言及表述.....	4
1.8 论文题目的写法.....	5
1.9 摘要的写法.....	5
1.10 引言的写法.....	5
1.11 正文的写法.....	6
1.12 结论的写法.....	6
第 2 章 基于最优控制理论的触摸运动模型	7
2.0.1 无约束端到端运动.....	7
2.0.2 过特定点的端到端运动.....	8

2.1 触摸运动的数学模型	9
2.2 触摸运动的计算模型	10
2.3 插图	10
2.4 表格	11
2.5 算法	12
第 3 章 基于可穿戴运动传感器的触摸感知技术	13
3.1 数学符号	13
3.2 数学公式	14
3.3 数学定理	14
第 4 章 面向连续触摸输入的防误触技术	15
4.1 顺序编码制	15
4.2 著者-出版年制	15
参考文献	16
附录 A 补充内容	18
致 谢	20
声 明	21
个人简历、在学期间完成的相关学术成果	22
指导教师学术评语	23
答辩委员会决议书	24

插图和附表清单

图 2.1	示例图片标题	10
图 2.2	多个分图的示例	11
表 2.1	三线表示例	11
表 2.2	带附注的表格示例	11
表 2.3	跨页长表格的表题	12

符号和缩略语说明

PI	聚酰亚胺
MPI	聚酰亚胺模型化合物, N-苯基邻苯酰亚胺
PBI	聚苯并咪唑
MPBI	聚苯并咪唑模型化合物, N-苯基苯并咪唑
PY	聚吡咯
PMDA-BDA	均苯四酸二酐与联苯四胺合成的聚吡咯薄膜
MPY	聚吡咯模型化合物
As-PPT	聚苯基不对称三嗪
MAsPPT	聚苯基不对称三嗪单模型化合物, 3,5,6-三苯基-1,2,4-三嗪
DMA sPPT	聚苯基不对称三嗪双模型化合物 (水解实验模型化合物)
S-PPT	聚苯基对称三嗪
MSPPT	聚苯基对称三嗪模型化合物, 2,4,6-三苯基-1,3,5-三嗪
PPQ	聚苯基喹噁啉
MPPQ	聚苯基喹噁啉模型化合物, 3,4-二苯基苯并二嗪
HMPI	聚酰亚胺模型化合物的质子化产物
HMPY	聚吡咯模型化合物的质子化产物
HMPBI	聚苯并咪唑模型化合物的质子化产物
HMA sPPT	聚苯基不对称三嗪模型化合物的质子化产物
HMSPT	聚苯基对称三嗪模型化合物的质子化产物
HMPPQ	聚苯基喹噁啉模型化合物的质子化产物
PDT	热分解温度
HPLC	高效液相色谱 (High Performance Liquid Chromatography)
HPCE	高效毛细管电泳色谱 (High Performance Capillary electrophoresis)
LC-MS	液相色谱-质谱联用 (Liquid chromatography-Mass Spectrum)
TIC	总离子浓度 (Total Ion Content)
<i>ab initio</i>	基于第一原理的量子化学计算方法, 常称从头算法
DFT	密度泛函理论 (Density Functional Theory)
E_a	化学反应的活化能 (Activation Energy)
ZPE	零点振动能 (Zero Vibration Energy)
PES	势能面 (Potential Energy Surface)
TS	过渡态 (Transition State)

TST	过渡态理论 (Transition State Theory)
ΔG^\ddagger	活化自由能 (Activation Free Energy)
κ	传输系数 (Transmission Coefficient)
IRC	内禀反应坐标 (Intrinsic Reaction Coordinates)
ν_i	虚频 (Imaginary Frequency)
ONIOM	分层算法 (Our own N-layered Integrated molecular Orbital and molecular Mechanics)
SCF	自洽场 (Self-Consistent Field)
SCRF	自洽反应场 (Self-Consistent Reaction Field)

第1章 引言

触摸交互是自然人机交互的重要组成部分，是人主动控制手指触摸交互表面，通过点击、长按、滑动、拖拽等手势向计算机输入信息的方式。电容触屏作为触摸交互的主要载体已问世数十年，触摸交互技术得到了长足的发展，然而，触摸交互仍有改进空间，包括更强的普适性、更高的响应性和更准确的有意性判断。改进触摸交互的一条技术路线是充分利用触摸运动的规律，从原理的角度发掘改进触摸交互的机会。本章首先介绍触摸交互在人机交互领域的重要性和待改进方向，随后通过文献综述总结已有触摸交互技术及其不足，接下来简述本文提出的触摸运动模型及其研究内容，最后介绍论文组织结构。

1.1 选题背景

1.1.1 触摸交互的重要性

目前，触摸交互是最重要的人机交互方式之一。2021年，手机、平板电脑等触屏设备的全球出货量达到15.1亿台，而笔记本、台式机等基于键鼠交互的设备全球出货量为3.6亿台^[1]，其规模仅为触屏设备的23.8%。相比于键鼠交互，触摸交互有着便携和易学的优势，使其适用于包括老人、儿童在内的更广泛用户群体：（1）便携性：手机、平板电脑等触屏设备的体积比笔记本电脑更小，携带更方便；（2）易学性：触摸交互中用户用手指直接点选目标，比鼠标的间接控制方法更直观、易学。

【图：smartphone=1350; tablet=160; laptop=280; desktop=80】

在未来，触摸交互仍将是重要的研究课题。人机交互研究者普遍认为，头戴式混合现实设备（简称MR头盔，如Hololens、MagicLeap）是最有可能取代手机的下一代智能终端。MR头盔利用深度摄像头扫描物理环境，将虚拟元素叠加渲染在任意物理实体之上。如图xx所示，MR头盔中一种有前景的交互方式是将虚拟的用户界面渲染在任意表面上（如普通桌面、墙面），并支持用户通过触摸与用户界面进行交互[xx]。触摸交互将摆脱触屏表面的限制，用户获得在任意表面上触摸交互的能力。与目前MR头盔中流行的空中手势交互相比，触摸交互为用户提供了触觉反馈和物理支撑，给交互的确认感[xx]、输入精度[xx]和抗疲劳性[xx]带来诸多好处。然而，目前MR头盔中的触摸交互技术尚未成熟，仍然值得进一步研究。

1.1.2 触摸交互的改进方向

尽管触摸屏技术已经问世数十年，技术得到了长足的发展，但触摸交互仍有值得改进的地方，分别体现在普适性、响应性和有意性三个方面。

- **普适性**：普适计算是一个强调和环境融为一体的计算概念，主张计算设备朝小型化、可穿戴的方向发展，直至消失在人们的视线当中，人们能在任何时间、地点，以任何方式与数字世界交互。在人机交互往普适计算发展的过程中，触屏等专用输入设备可能是第一批消失的，此时如何支持触摸交互是值得研究的问题。例如，上一小节中所述的基于 MR 头盔的触摸交互技术是增强触摸普适性的一个实例。
- **响应性**：人对触摸交互响应性的感官需求极高，在点击触摸任务中，人能察觉到低至 10 毫秒的端到端延迟，并对高于 100 毫秒的延迟感到极度厌烦 [xx]。然而，目前智能手机触摸屏的延迟普遍在 50 毫秒以上，未能给用户提供了极致的用户体验。一种容易察觉到延迟的方法是快速的拖拽任务，例如，在手机中长按 APP 图标并快速移动。尽管目前的触摸屏延迟在多数任务下不会让用户感到厌烦，但如果要将用户体验提升到最高水平，就需要将触摸交互的延迟降低到 10 毫秒以内，让用户无法察觉延迟的存在。
- **有意性**：自然动作交互是人机交互的发展趋势，其特点是有意动作和无意动作混杂，给交互的意图识别带来困难。例如，在目前的触屏十指打字中，用户必须将手悬空，久而久之会导致疲劳的问题，这种要求用户故意悬空手部以防止误触的交互方式是不自然的，应该开发一款强力的防误触算法，允许用户在打字的间隙将手指休息在触摸屏上（而不会引发误触）；又例如，在上一小节所述的基于 MR 头盔的触摸交互模式中，用户既可以在普通的桌子上触摸交互，也可能仅仅是将手休息在桌子上，在此场景下的触摸交互技术需要发展出识别用户触摸是否具有交互意图的能力。

改进触摸交互的一条技术路径是充分利用触摸的运动规律，即总结触摸前后手指的位移、速度和加速度特征，建立触摸的运动模型。触摸的运动模型将有利于提高触摸交互的普适性、响应性和有意性，这是因为：（1）基于视觉方法的运动传感是普适计算场景下容易获得的传感能力；（2）触摸运动模型可利用手指触摸表面前的传感信号拟合触摸的运动方程，从而以低延迟、甚至负延迟识别触摸事件；（3）触摸运动方程中的参数将能作为判断触摸有意性的有效特征。

1.2 研究现状

1.2.1 电容触屏

很准确、常用，但在普适性、响应性和有意性上存在弊端。

1.2.2 基于运动传感的触摸感知技术

位置识别可以做到很准，但是触摸瞬间的感知是难点。

MR 头盔中一种直观的感知触摸事件的方法，是利用 MR 头盔的前置摄像头来观察用户的手指是否接触到交互表面。然而，基于视觉的方法在触摸感知方面存在两大内在缺点：首先，由于 MR 头盔的摄像头是从手背的方向观察手指运动的，手指与交互平面的接触点时常被遮挡，因此很难准确、低延迟地识别触摸事件；第二，基于手型恢复的视觉方法往往会消耗大量的计算资源，导致系统延迟过大，影响用户体验。出于以上原因，此前最先进的利用 Hololens 识别任意物体表面触摸事件的工作中，实验表面存在 3.5% 的未识别点击和 19.0% 的误触 [xx]，系统延迟达到 180 毫秒。在相关工作中，有许多工作致力于提高触摸的识别准确率 [2019-5,31]，降低识别延迟 [2019-18,43,2,6]。因此，基于视觉的触摸感知技术仍然未达到实用水平，仍然需要进一步改进。

1.3 研究内容

触摸交互是人主动控制手指触摸交互表面，通过点击、长按、滑动、拖拽等手势向计算机输入信息的方式。目前，触摸交互技术的改进难点在于触摸瞬间的识别，是否具有强普适性 []、高响应性 [] 和准确的有意性 []，这要求研究者在触摸前后极短的时间跨度上优化触摸交互技术。在此背景下，本文提出了基于最佳控制理论的触摸运动模型。

触摸运动模型描述了一次触摸中，用户从产生触摸意图，到手指触碰到交互表面这一段短暂时间中的运动规律，时间跨度大约为 100 毫秒，运动规律包括手指的位移、速度和加速度的时空运动规律。围绕触摸运动模型的建立和应用，我们提出了以下三点研究内容：

- 触摸运动数学模型：描述触摸运动的数学方程
- 触摸运动计算模型：(1) 高通滤波；(2) 卡尔曼滤波；(3) 基于贝叶斯的最小二乘拟合（fuse 位移、速度和加速度）
- 触摸运动模型的应用：

观察公式，我们不难发现其中有很多变量的确定是对触摸交互技术有利的。

(1) 低延迟、高准确率地识别触摸事件的发生。当实际测量结果与运动方程差异过大时,大到必定是外力作用(而不是手指运动或传感器误差时),可以判定为触摸事件的发生。(2) 推测点击力度:根据公式,可以精准计算触摸瞬间手指的速度,该速度与点击力度成正比。点击力度可用于拓展触摸交互的可达性 [xx]。(3) (4) 为传感器的性能改进提供了指导,例如,传感器的精度作用是平方级的,而传感器采样率的作用是线性的。(5) 为触摸的意图,在十指打字等连续触摸任务中,若对每只手指下落的过程拟合其运动方程,手指间运动方程的相关性是判断触摸意图的有力特征子。

1.4 主要研究成果

1.5 论文组织结构

难点:值得注意的是,在空中交互被过分看好的背景下,当前有非常多的工作集中攻破了手型识别技术(大多数是基于视觉),手指指尖的位置识别是无需深入研究的。对于触摸交互技术而言,更重要、更亟需攻破的技术难点是在普适性、响应性和有意性上:即(1)如何在普适计算环境下准确判断触摸事件发生、如何低延迟判断触摸事件发生、如何判断触摸为有意触摸。都是更难的课题。

以上是我们针对触摸运动建模的背景。在本章剩下的内容中,我们将详细介绍基于最优控制理论的触摸运动模型,该模型分为两大部分:数学模型和计算模型。数学模型指的是对触摸运动的数学建模,用数学方程描述手指的下落过程。在讨论触摸运动中手指的运动方程之前,我们先回顾 Tamar 等人对手部动作的数学建模 [xx],这是先前工作中,研究者将最优控制理论应用在运动建模上的一个实例。

1.6 最优控制理论在手部运动建模上的应用

1.7 论文的语言及表述

除国际研究生外,学位论文一律须用汉语书写。学位论文应当用规范汉字进行撰写,除古汉语研究中涉及的古文字和参考文献中引用的外文文献之外,均采用简体汉字撰写。

国际研究生一般应以中文或英文书写学位论文,格式要求同上。论文须用中文封面。

研究生学位论文是学术作品,因此其表述要严谨简明,重点突出,专业常识应简写或不写,做到立论正确、数据可靠、说明透彻、推理严谨、文字凝练、层次

分明，避免使用文学性质的或带感情色彩的非学术性语言。

论文中如出现一个非通用性的新名词、新术语或新概念，需随即解释清楚。

1.8 论文题目的写法

论文题目应简明扼要地反映论文工作的主要内容，力求精炼、准确，切忌笼统。论文题目是对研究对象的准确、具体描述，一般要在一定程度上体现研究结论，因此，论文题目不仅应告诉读者这篇论文研究了什么问题，更要告诉读者这个研究得出的结论。例如：“在事实与虚构之间：梅乐、卡彭特、沃尔夫的新闻观”就比“三个美国作家的新闻观研究”更专业、更准确。

1.9 摘要的写法

论文摘要是对论文研究内容的高度概括，应具有独立性和自含性，即应是一篇简短但意义完整文章。通过阅读论文摘要，读者应该能够对论文的研究方法及结论有一个整体性的了解，因此摘要的写法应力求精确简明。论文摘要应包括对问题及研究目的的描述、对使用的方法和研究过程进行的简要介绍、对研究结论的高度凝练等，重点是结果和结论。

论文摘要切忌写成全文的提纲，尤其要避免“第1章……；第2章……；……”这样的陈述方式。

1.10 引言的写法

一篇学位论文的引言大致包含如下几个部分：1、问题的提出；2、选题背景及意义；3、文献综述；4、研究方法；5、论文结构安排。

- 问题的提出：要清晰地阐述所要研究的问题“是什么”。^①
- 选题背景及意义：论述清楚为什么选择这个题目来研究，即阐述该研究对学科发展的贡献、对国计民生的理论与现实意义等。
- 文献综述：对本研究主题范围内的文献进行详尽的综合述评，“述”的同时一定要有“评”，指出现有研究状态，仍存在哪些尚待解决的问题，讲出自己的研究有哪些探索性内容。
- 研究方法：讲清论文所使用的学术研究方法。
- 论文结构安排：介绍本论文的写作结构安排。

^① 选题时切记要有“问题意识”，不要选不是问题的问题来研究。

1.11 正文的写法

本部分是论文作者的研究内容,不能将他人研究成果不加区分地掺和进来。已经在引言的文献综述部分讲过的内容,这里不需要再重复。各章之间要存在有机联系,符合逻辑顺序。

1.12 结论的写法

结论是对论文主要研究结果、论点的提炼与概括,应精炼、准确、完整,使读者看后能全面了解论文的意义、目的和工作内容。结论是最终的、总体的结论,不是正文各章小结的简单重复。结论应包括论文的核心观点,主要阐述作者的创造性工作及所取得的研究成果在本领域中的地位、作用和意义,交代研究工作的局限,提出未来工作的意见或建议。同时,要严格区分自己取得的成果与指导教师及他人的学术成果。

在评价自己的研究工作成果时,要实事求是,除非有足够的证据表明自己的研究是“首次”、“领先”、“填补空白”的,否则应避免使用这些或类似词语。

第2章 基于最优控制理论的触摸运动模型

通过实验观察和验证, Tamar 等人指出手部运动轨迹可由最佳控制理论描述: 在手部运动发生前, 人下意识地规划着用 t_f 的时间将手部从初始点 (x_0, y_0, z_0) 移动到目标点 (x_f, y_f, z_f) , 且最小化手部运动急动度的平方的积分:

$$C = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \left(\left(\frac{d^3x}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3y}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3z}{dt^3} \right)^2 \right) dt \quad (2.1)$$

其中 x , y 和 z 是手部位置随时间变化的函数, 为了求解手部运动的时空轨迹, 应求解 $x(t)$, $y(t)$ 和 $z(t)$ 使得式子2.1的值最小。上述最优化过程可用户解释几种被实验观察所揭示的运动类型, 典型类型包括无约束的端到端运动和弧形的端到端运动。

2.0.1 无约束端到端运动

无约束端到端运动是由下述用户意图引导的手部运动:

“在规定时间内 t_1 内, 最平稳地将手部从初始点 (x_0, y_0, z_0) 移动到目标点 (x_1, y_1, z_1) 。”

其中, “最平稳地”指的是最小化手部运动急动度的平方的积分 (公式2.1), 因此求解无约束端到端运动的方程等价于以下最优化问题:

$$\begin{cases} x(t), y(t), z(t) \\ s.t. x(0) = x_0, x'(0) = x''(0) = 0, x(t_1) = x_1, x'(t_1) = x''(t_1) = 0 \\ y(0) = y_0, y'(0) = y''(0) = 0, y(t_1) = y_1, y'(t_1) = y''(t_1) = 0 \\ z(0) = z_0, z'(0) = z''(0) = 0, z(t_1) = z_1, z'(t_1) = z''(t_1) = 0 \\ \min \frac{1}{2} \int_0^{t_1} \left(\left(\frac{d^3x}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3y}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3z}{dt^3} \right)^2 \right) dt \end{cases} \quad (2.2)$$

读者可能注意到, 手部运动应该受到人的运动能力的限制, 比如手部运动存在一个速度或加速度的上限。然而, 我们未对运动能力作出条件约束, 这是因为该问题的解天然地不会产生超出手部运动能力限制的情况 [xx]。上述最优化问题的解是:

$$\begin{cases} x(\tau) = x_0 + (x_1 - x_0)(6\tau^5 - 15\tau^4 + 10\tau^3) \\ y(\tau) = y_0 + (y_1 - y_0)(6\tau^5 - 15\tau^4 + 10\tau^3) \\ z(\tau) = z_0 + (z_1 - z_0)(6\tau^5 - 15\tau^4 + 10\tau^3) \end{cases} \quad (2.3)$$

其中, $\tau = \frac{t}{t_1 - t_0}$ 表示当前时刻的运动进度。从公式中可以看出, 无约束端到端运动在空间上沿直线运行, 只在时间上存在一个先加速后减速的过程。

2.0.2 过特定点的端到端运动

与端到端的直线运动不同, 现实生活中更多的手部运动沿弧线运行, 根据 Tamar 的理论, 现实生活中大部分弧线手部运动属于过特定点的端到端运动, 即由下述用户意图引导的手部运动:

“在规定时间内 t_2 内, 最平稳地将手部从初始点 (x_0, y_0, z_0) 移动到目标点 (x_2, y_2, z_2) , 且必须在中途经过特定点 (x_1, y_1, z_1) 。”

其中, “最平稳地”指的仍然是最小化手部运动急动度的平方的积分 (公式2.1), 因此求解无约束端到端运动的方程等价于以下最优化问题:

$$\begin{cases} x(t), y(t), z(t), t_1 \\ s.t. x(0) = x_0, x'(0) = x''(0) = 0, x(t_1) = x_1, x(t_2) = x_2, x'(t_2) = x''(t_2) = 0 \\ y(0) = y_0, y'(0) = y''(0) = 0, y(t_1) = y_1, y(t_2) = y_2, y'(t_2) = y''(t_2) = 0 \\ z(0) = z_0, z'(0) = z''(0) = 0, z(t_1) = z_1, z(t_2) = z_2, z'(t_2) = z''(t_2) = 0 \\ \min \frac{1}{2} \int_0^{t_2} \left(\left(\frac{d^3x}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3y}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3z}{dt^3} \right)^2 \right) dt \end{cases} \quad (2.4)$$

上述最优化问题的解是:

$$\begin{cases} x^-(\tau) = \frac{t_2^5}{720} (\pi_1(\tau_1^4(15\tau^4 - 30\tau^3) + \tau_1^3(80\tau^3 - 30\tau^4) - 60\tau^3\tau_1^2 + 30\tau^4\tau_1 - 6\tau^5) \\ + c_1(15\tau^4 - 10\tau^3 - 6\tau^5)) + x_0 \\ x^+(\tau) = \frac{t_2^5}{720} (\pi_1(\tau_1^4(15\tau^4 - 30\tau^3 + 30\tau - 15) + \tau_1^3(80\tau^3 - 30\tau^4 - 60\tau^2 + 10) \\ + c_1(15\tau^4 - 10\tau^3 - 6\tau^5 + 1)) + x_2 \end{cases} \quad (2.5)$$

其中, $\tau = \frac{t}{t_2 - t_0}$ 表示当前时刻的运动进度, $x^-(\tau)$ 是手部在经过特定点 (x_1, y_1, z_1) 之前 (即 $t \leq t_1$) 的运动方程, $x^+(\tau)$ 是手部在经过特定点 (x_1, y_1, z_1) 之

后（即 $t > t_1$ ）的运动方程。 t_1 的值可以通过动态优化问题 [xx] 求解。 π_1 和 c_1 是常数使得 $x^-(t_1) = x^+(t_1) = x_1$ 。运动在 y 轴、 z 轴上的运动方程 $y^-(\tau)$ 、 $y^+(\tau)$ 、 $z^-(\tau)$ 、 $z^+(\tau)$ 与上述公式类似，且运动在三个轴上的方程相互独立。

2.1 触摸运动的数学模型

通过实验观察，我们发现了两种触摸运动，分别是：（1）长时触摸运动，即长按、拖拽等触摸过后手指保持与交互表面接触的触摸运动；（2）短时触摸运动，即轻敲、文本输入点击等触摸过后手指立即抬起的触摸运动。我们借鉴 Tamar 的手部运动模型 [xx] 来描述触摸运动，由于手部运动方程在笛卡尔坐标系的三个轴上的方程是独立的，且触摸运动的主要分量是手指与交互表面的距离 x ，下面我们仅研究 x 与时间 t 的关系：

“长时触摸运动：假设交互表面在触摸瞬间消失，长时触摸运动可描述为无约束端到端运动，其中起始点 x_0 是人产生触摸意图时手指的位置，手指将下落至位于交互表面之下的虚构目标点 x_1 ，然后静止。”

“短时触摸运动：假设交互表面在触摸瞬间消失，短时触摸运动可描述为过特定点的端到端运动，其中起始点 x_0 是人产生触摸意图时手指的位置，手指将下落至位于交互表面之下的虚构点 x_1 ，随即抬起到目标点 x_2 。”

【图：交互表面在触摸瞬间消失的情况】

对于无约束端到端运动，我们有 $x'(t_1) = 0, x''(t_1) = 0$ ；对于上述过特定点的端到端运动，由于 x_1 是运动的最低点，手指下落经过 x_1 后立即上抬，因此手指在 x_1 点上的速度为零，且加速度大于零，即 $x'(t_1) = 0, x''(t_1) > 0$ 。从公式可以看出，无论是长时触摸运动，还是短时触摸运动，其初始点 x_0 至虚构点 x_1 之间的运动方程都可以描述为：

$$\begin{cases} x(t) \\ s.t. x(0) = x_0, x'(0) = x''(0) = 0, x(t_1) = x_1, x'(t_1) = 0, x''(t_1) \geq 0 \\ \min \frac{1}{2} \int_0^{t_1} \left(\frac{d^3 x}{dt^3} \right)^2 dt \end{cases} \quad (2.6)$$

但由于交互表面的存在，手指总是会在叨叨虚构点 x_1 之前被交互表面阻挡，瞬间停止，因此，只有起始点 x_0 到虚构点 x_1 之间

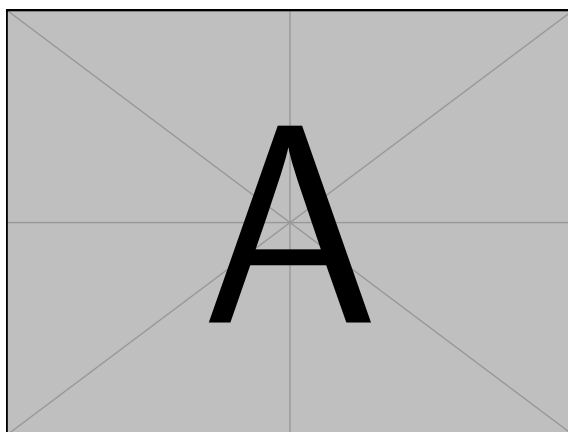
2.2 触摸运动的计算模型

计算模型指的是在已知数学模型的情况下，如何利用位移、速度、加速度传感器去拟合每次触摸的运动方程。其中，在目前的工程学角度来看，基于视觉的位移传感和基于加速度的运动传感器传感是较为常用的，利用这两种技术，我们可以获得一次触摸运动的位移时间序列和加速度时间序列，如以下公式所示。我们要做的是，在充分考虑传感器的采样频率和精度误差的情况下，尽可能准确地拟合运动的数学方程，解决方法是一个最优化问题，即：

求解 H_0, H_f, T_0, T_f , st. \min 位移误差最小二乘/视觉方法误差的标准差的平方 + 加速度误差最小二乘/加速度传感器的标准差的平方。这一最优化问题运用计算机解析方法 SQPxx 是容易解决的，如此一来，便拟合出了触摸运动的方程。

2.3 插图

图片通常在 **figure** 环境中使用 `\includegraphics` 插入，如图 2.1 的源代码。建议矢量图片使用 PDF 格式，比如数据可视化的绘图；照片应使用 JPG 格式；其他的栅格图应使用无损的 PNG 格式。注意，LaTeX 不支持 TIFF 格式；EPS 格式已经过时。



国外的期刊习惯将图表的标题和说明文字写成一段，需要改写为标题只含图表的名称，其他说明文字以注释方式写在图表下方，或者写在正文中。

图 2.1 示例图片标题

若图或表中有附注，采用英文小写字母顺序编号，附注写在图或表的下方。国外的期刊习惯将图表的标题和说明文字写成一段，需要改写为标题只含图表的名称，其他说明文字以注释方式写在图表下方，或者写在正文中。

如果一个图由两个或两个以上分图组成时，各分图分别以 (a)、(b)、(c)..... 作为图序，并须有分图题。推荐使用 **subcaption** 宏包来处理，比如图 2.2(a) 和图 2.2(b)。

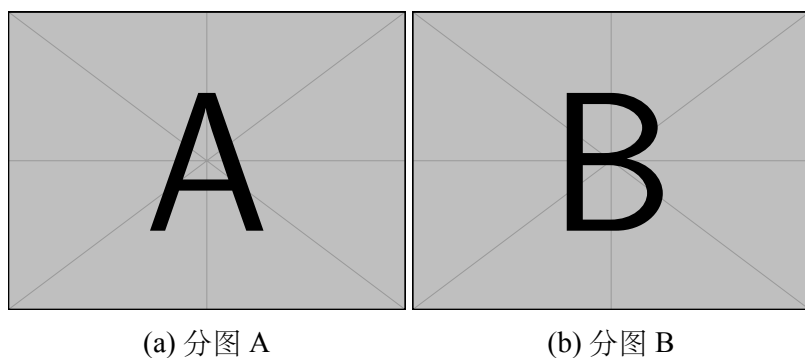


图 2.2 多个分图的示例

2.4 表格

表应具有自明性。为使表格简洁易读，尽可能采用三线表，如表 2.1。三条线可以使用 **booktabs** 宏包提供的命令生成。

表 2.1 三线表示例

文件名	描述
thuthesis.dtx	模板的源文件，包括文档和注释
thuthesis.cls	模板文件
thuthesis-*.bst	BibTeX 参考文献表样式文件

表格如果有附注，尤其是需要在表格中进行标注时，可以使用 **threeparttable** 宏包。研究生要求使用英文小写字母 **a**、**b**、**c**……顺序编号，本科生使用圈码①、②、③……编号。

表 2.2 带附注的表格示例

文件名	描述
thuthesis.dtx ^a	模板的源文件，包括文档和注释
thuthesis.cls ^b	模板文件
thuthesis-*.bst	BibTeX 参考文献表样式文件

^a 可以通过 **xelatex** 编译生成模板的使用说明文档；使用 **xetex** 编译 **thuthesis.ins** 时则会从 **.dtx** 中去除掉文档和注释，得到精简的 **.cls** 文件。

^b 更新模板时，一定要记得编译生成 **.cls** 文件，否则编译论文时载入的依然是旧版的模板。

如某个表需要转页接排，可以使用 **longtable** 宏包，需要在随后的各页上重复表的编号。编号后跟表题（可省略）和“（续）”，置于表上方。续表均应重复表头。

表 2.3 跨页长表格的表题

表头 1	表头 2	表头 3	表头 4
Row 1			
Row 2			
Row 3			
Row 4			
Row 5			
Row 6			
Row 7			
Row 8			
Row 9			
Row 10			

2.5 算法

算法环境可以使用 `algorithms` 或者 `algorithm2e` 宏包。

算法 2.1 Calculate $y = x^n$

输入: $n \geq 0$
输出: $y = x^n$
 $y \leftarrow 1$
 $X \leftarrow x$
 $N \leftarrow n$
 while $N \neq 0$ **do**
 if N is even **then**
 $X \leftarrow X \times X$
 $N \leftarrow N/2$
 else { N is odd}
 $y \leftarrow y \times X$
 $N \leftarrow N - 1$
 end if
 end while

第3章 基于可穿戴运动传感器的触摸感知技术

3.1 数学符号

中文论文的数学符号默认遵循 GB/T 3102.11—1993 《物理科学和技术中使用的数学符号》^①。该标准参照采纳 ISO 31-11:1992^②，但是与 T_EX 默认的美国数学会 (AMS) 的符号习惯有所区别。具体地来说主要有以下差异：

1. 大写希腊字母默认为斜体，如

$$\Gamma \Delta \Theta \Lambda \Xi \Pi \Sigma \Upsilon \Phi \Psi \Omega.$$

注意有限增量符号 Δ 固定使用正体，模板提供了 `\increment` 命令。

2. 小于等于号和大于等于号使用倾斜的字形 \leq 、 \geq 。
3. 积分号使用正体，比如 \int 、 \oint 。
4. 行间公式积分号的上下限位于积分号的上下两端，比如

$$\int_a^b f(x) dx.$$

行内公式为了版面的美观，统一居右侧，如 $\int_a^b f(x) dx$ 。

5. 偏微分符号 ∂ 使用正体。
6. 省略号 `\dots` 按照中文的习惯固定居中，比如

$$1, 2, \dots, n \quad 1 + 2 + \dots + n.$$

7. 实部 **Re** 和虚部 **Im** 的字体使用罗马体。

以上数学符号样式的差异可以在模板中统一设置。另外国标还有一些与 AMS 不同的符号使用习惯，需要用户在写作时进行处理：

1. 数学常数和特殊函数名用正体，如

$$\pi = 3.14 \dots; \quad i^2 = -1; \quad e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n.$$

2. 微分号使用正体，比如 dy/dx 。
3. 向量、矩阵和张量用粗斜体 (`\symbf`)，如 \mathbf{x} 、 $\mathbf{\Sigma}$ 、 \mathbf{T} 。
4. 自然对数用 $\ln x$ 不用 $\log x$ 。

英文论文的数学符号使用 T_EX 默认的样式。如果有必要，也可以通过设置

① 原 GB 3102.11—1993，自 2017 年 3 月 23 日起，该标准转为推荐性标准。

② 目前已更新为 ISO 80000-2:2019。

`math-style` 选择数学符号样式。

关于量和单位推荐使用 `siunitx` 宏包，可以方便地处理希腊字母以及数字与单位之间的空白，比如： $6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ， $9 \mu\text{m}$ ， $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ， $10^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ 。

3.2 数学公式

数学公式可以使用 `equation` 和 `equation*` 环境。注意数学公式的引用应前后带括号，建议使用 `\eqref` 命令，比如式 (3.1)。

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f = \sum_{k=1}^m n(\gamma; a_k) \mathcal{R}(f; a_k) \quad (3.1)$$

注意公式编号的引用应含有圆括号，可以使用 `\eqref` 命令。

多行公式尽可能在“=”处对齐，推荐使用 `align` 环境。

$$a = b + c + d + e \quad (3.2)$$

$$= f + g \quad (3.3)$$

3.3 数学定理

定理环境的格式可以使用 `amsthm` 或者 `ntheorem` 宏包配置。用户在导言区载入这两者之一后，模板会自动配置 `theorem`、`proof` 等环境。

定理 3.1 (Lindeberg–Lévy 中心极限定理): 设随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 独立同分布，且具有期望 μ 和有限的方差 $\sigma^2 \neq 0$ ，记 $\bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ，则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{\sqrt{n}(\bar{X}_n - \mu)}{\sigma} \leq z\right) = \Phi(z), \quad (3.4)$$

其中 $\Phi(z)$ 是标准正态分布的分布函数。

证明： Trivial. ■

同时模板还提供了 `assumption`、`definition`、`proposition`、`lemma`、`theorem`、`axiom`、`corollary`、`exercise`、`example`、`remark`、`problem`、`conjecture` 这些相关的环境。

第 4 章 面向连续触摸输入的防误触技术

模板支持 BibTeX 和 BibLaTeX 两种方式处理参考文献。下文主要介绍 BibTeX 配合 natbib 宏包的主要使用方法。

4.1 顺序编码制

在顺序编码制下，默认的 \cite 命令同 \citet 一样，序号置于方括号中，引文页码会放在括号外。统一处引用的连续序号会自动用短横线连接。

\cite{zhangkun1994}	⇒	[2]
\citet{zhangkun1994}	⇒	张昆 等 ^[2]
\citep{zhangkun1994}	⇒	[2]
\cite[42]{zhangkun1994}	⇒	[2] ⁴²
\cite{zhangkun1994,zhukezhen1973}	⇒	[2-3]

也可以取消上标格式，将数字序号作为文字的一部分。建议全文统一使用相同的格式。

\cite{zhangkun1994}	⇒	[2]
\citet{zhangkun1994}	⇒	张昆 等 [2]
\citep{zhangkun1994}	⇒	[2]
\cite[42]{zhangkun1994}	⇒	[2] ⁴²
\cite{zhangkun1994,zhukezhen1973}	⇒	[2-3]

4.2 著者-出版年制

著者-出版年制下的 \cite 跟 \citet 一样。

\cite{zhangkun1994}	⇒	张昆 等 (1994)
\citet{zhangkun1994}	⇒	张昆 等 (1994)
\citep{zhangkun1994}	⇒	(张昆 等, 1994)
\cite[42]{zhangkun1994}	⇒	(张昆 等, 1994) ⁴²
\citep{zhangkun1994,zhukezhen1973}	⇒	(张昆 等, 1994; 竺可桢, 1973)

注意，引文参考文献的每条都要在正文中标注^[2-35]。

参考文献

- [1] Alsop T. Shipment forecast of tablets, laptops and desktop pcs worldwide from 2010 to 2024 (in million units)[J]. Statista, 2020.
- [2] 张昆, 冯立群, 余昌钰, 等. 机器人柔性手腕的球面齿轮设计研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1994, 34(2): 1-7.
- [3] 竺可桢. 物理学论[M]. 北京: 科学出版社, 1973: 56-60.
- [4] Dupont B. Bone marrow transplantation in severe combined immunodeficiency with an unrelated mhc compatible donor[C]//White H J, Smith R. Proceedings of the third annual meeting of the International Society for Experimental Hematology. Houston: International Society for Experimental Hematology, 1974: 44-46.
- [5] 郑开青. 通讯系统模拟及软件[D]. 北京: 清华大学无线电系, 1987.
- [6] 姜锡洲. 一种温热外敷药制备方案: 中国, 88105607.3[P]. 1980-07-26.
- [7] 中华人民共和国国家技术监督局. GB3100-3102. 中华人民共和国国家标准-量与单位[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [8] Merkt F, Mackenzie S R, Softley T P. Rotational autoionization dynamics in high rydberg states of nitrogen[J]. J Chem Phys, 1995, 103: 4509-4518.
- [9] Mellinger A, Vidal C R, Jungen C. Laser reduced fluorescence study of the carbon monoxide nd triplet rydberg series - experimental results and multichannel quantum defect analysis[J]. J Chem Phys, 1996, 104: 8913-8921.
- [10] Bixon M, Jortner J. The dynamics of predissociating high Rydberg states of NO[J]. J Chem Phys, 1996, 105: 1363-1382.
- [11] 马辉, 李俭, 刘耀明, 等. 利用 REMPI 方法测量 BaF 高里德堡系列光谱[J]. 化学物理学报, 1995, 8: 308-311.
- [12] Carlson N W, Taylor A J, Jones K M, et al. Two-step polarization-labeling spectroscopy of excited states of Na₂[J]. Phys Rev A, 1981, 24: 822-834.
- [13] Taylor A J, Jones K M, Schawlow A L. Scanning pulsed-polarization spectrometer applied to Na₂[J]. J Opt Soc Am, 1983, 73: 994-998.
- [14] Taylor A J, Jones K M, Schawlow A L. A study of the excited $1\Sigma_g^+$ states in Na₂[J]. Opt Commun, 1981, 39: 47-50.
- [15] Shimizu K, Shimizu F. Laser induced fluorescence spectra of the $a\ 3\Pi_u-X\ 1\Sigma_g^+$ band of Na₂ by molecular beam[J]. J Chem Phys, 1983, 78: 1126-1131.
- [16] Atkinson J B, Becker J, Demtröder W. Experimental observation of the $a\ 3\Pi_u$ state of Na₂[J]. Chem Phys Lett, 1982, 87: 92-97.
- [17] Kusch P, Hessel M M. Perturbations in the $a\ 1\Sigma_u^+$ state of Na₂[J]. J Chem Phys, 1975, 63: 4087-4088.
- [18] 广西壮族自治区林业厅. 广西自然保护区[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.

- [19] 霍斯尼. 谷物科学与工艺学原理[M]. 李庆龙, 译. 2 版. 北京: 中国食品出版社, 1989: 15-20.
- [20] 王夫之. 宋论[M]. 刻本. 金陵: 曾氏, 1865 (清同治四年) .
- [21] 赵耀东. 新时代的工业工程师[M/OL]. 台北: 天下文化出版社, 1998[1998-09-26]. <http://www.ie.nthu.edu.tw/info/ie.newie.htm>.
- [22] 全国信息与文献工作标准化技术委员会出版物格式分委员会. GB/T 12450-2001 图书书名页[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 1.
- [23] 全国出版专业职业资格考试办公室. 全国出版专业职业资格考试辅导教材: 出版专业理论与实务·中级[M]. 2014 版. 上海: 上海辞书出版社, 2004: 299-307.
- [24] World Health Organization. Factors regulating the immune response: Report of WHO Scientific Group[R]. Geneva: WHO, 1970.
- [25] Peebles P Z, Jr. Probability, random variables, and random signal principles[M]. 4th ed. New York: McGraw Hill, 2001.
- [26] 白书农. 植物开花研究[M]//李承森. 植物科学进展. 北京: 高等教育出版社, 1998: 146-163.
- [27] Weinstein L, Swertz M N. Pathogenic properties of invading microorganism[M]//Sodeman W A, Jr, Sodeman W A. Pathologic physiology: mechanisms of disease. Philadelphia: Saunders, 1974: 745-772.
- [28] 韩吉人. 论职工教育的特点[C]//中国职工教育研究会. 职工教育研究论文集. 北京: 人民教育出版社, 1985: 90-99.
- [29] 中国地质学会. 地质评论[J]. 1936, 1(1)-. 北京: 地质出版社, 1936-.
- [30] 中国图书馆学会. 图书馆学通讯[J]. 1957(1)-1990(4). 北京: 北京图书馆, 1957-1990.
- [31] American Association for the Advancement of Science. Science[J]. 1883, 1(1)-. Washington, D.C.: American Association for the Advancement of Science, 1883-.
- [32] 傅刚, 赵承, 李佳路. 大风沙过后的思考[N/OL]. 北京青年报, 2000-04-12(14)[2002-03-06]. <http://www.bjyouth.com.cn/Bqb/20000412/B/4216%5ED0412B1401.htm>.
- [33] 萧钰. 出版业信息化迈入快车道[EB/OL]. (2001-12-19)[2002-04-15]. <http://www.creader.com/news/20011219/200112190019.htm>.
- [34] Online Computer Library Center, Inc. About OCLC: History of cooperation[EB/OL]. [2000-01-08]. <http://www.oclc.org/about/cooperation.en.htm>.
- [35] Scitor Corporation. Project scheduler[CP/DK]. Sunnyvale, Calif.: Scitor Corporation, 1983.

附录 A 补充内容

附录是与论文内容密切相关、但编入正文又影响整篇论文编排的条理和逻辑性的资料，例如某些重要的数据表格、计算程序、统计表等，是论文主体的补充内容，可根据需要设置。

A.1 图表示例

A.1.1 图

附录中的图片示例（图 A.1）。

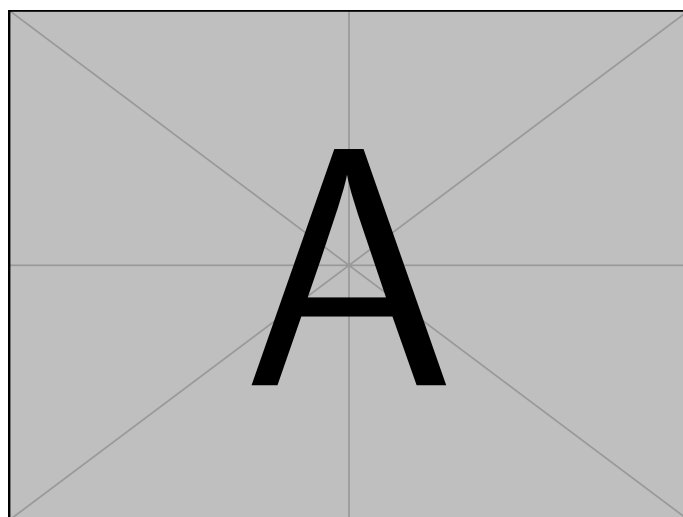


图 A.1 附录中的图片示例

A.1.2 表格

附录中的表格示例（表 A.1）。

表 A.1 附录中的表格示例

文件名	描述
thuthesis.dtx	模板的源文件，包括文档和注释
thuthesis.cls	模板文件
thuthesis-*.bst	BibTeX 参考文献表样式文件
thuthesis-*.bbx	BibLaTeX 参考文献表样式文件
thuthesis-*.cbx	BibLaTeX 引用样式文件

A.2 数学公式

附录中的数学公式示例（公式（A.1））。

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f = \sum_{k=1}^m n(\gamma; a_k) \mathcal{R}(f; a_k) \quad (\text{A.1})$$

致 谢

衷心感谢导师 ××× 教授和物理系 ×× 副教授对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

在美国麻省理工学院化学系进行九个月的合作研究期间，承蒙 Robert Field 教授热心指导与帮助，不胜感激。

感谢 ××××× 实验室主任 ××× 教授，以及实验室全体老师和同窗们学的热情帮助和支持！

本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____ 日 期：_____

个人简历、在学期间完成的相关学术成果

个人简历

197×年××月××日出生于四川××县。

1992年9月考入××大学化学系××化学专业，1996年7月本科毕业并获得理学学士学位。

1996年9月免试进入清华大学化学系攻读××化学博士至今。

在学期间完成的相关学术成果

学术论文：

- [1] Yang Y, Ren T L, Zhang L T, et al. Miniature microphone with silicon-based ferroelectric thin films[J]. Integrated Ferroelectrics, 2003, 52:229-235.
- [2] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 硅基铁电微声学器件中薄膜残余应力的研究 [J]. 中国机械工程, 2005, 16(14):1289-1291.
- [3] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 集成铁电器件中的关键工艺研究 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(S4):192-193.
- [4] Yang Y, Ren T L, Zhu Y P, et al. PMUTs for handwriting recognition. In press[J]. (已被 Integrated Ferroelectrics 录用)

专利：

- [5] 任天令, 杨轶, 朱一平, 等. 硅基铁电微声学传感器畴极化区域控制和电极连接的方法: 中国, CN1602118A[P]. 2005-03-30.
- [6] Ren T L, Yang Y, Zhu Y P, et al. Piezoelectric micro acoustic sensor based on ferroelectric materials: USA, No.11/215, 102[P]. (美国发明专利申请号.)

指导教师学术评语

论文提出了……

答辩委员会决议书

论文提出了……

论文取得的主要创新性成果包括：

1. ……

2. ……

3. ……

论文工作表明作者在 ××××× 具有 ××××× 知识，具有 ×××× 能力，论文 ××××，
答辩 ××××。

答辩委员会表决，（× 票/一致）同意通过论文答辩，并建议授予 ×××（姓名）
×××（门类）学博士/硕士学位。