

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

触摸交互是重要的人机交互方式，是人控制手指触摸交互表面，通过点击、长按、滑动等手势向计算机输入信息的方式。尽管触摸交互的主要载体触摸屏已问世数十年，触摸交互仍存在三点不足：（1）普适性：触摸交互被限制于有源表面上，不满足普适计算中人随时随地与计算机交互的需求；（2）响应性：人对触摸交互响应性的感官需求极高，能察觉到低至 10 毫秒的延迟，而常用触摸屏的延迟为 50 毫秒，不能提供最佳用户体验；（3）意图性：人机交互朝着自然动作输入的方向发展，而自然触摸交互中人的有意触摸和无意触碰混杂，误触更频繁。为克服上述不足，设计无源、低延迟、精准的触摸交互技术，本文提出了基于最优控制理论的触摸运动模型，揭示触摸前后极短时间内手指的运动规律。该模型为基于运动传感（包括位移、速度和加速度）的触摸交互技术提供了计算理论基础。基于模型，本文针对多种触摸交互任务（目标选择、文本输入），优化触摸感知和防误触技术，提升交互效率和用户体验。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）。本文详细描述了模型的表达、提出过程和推导过程，通过实验验证了模型的有效性，最后讨论了模型在普适性、响应性和意图性三方面对触摸交互技术的指导意义。

（2）提出了基于运动传感指环的低延迟触摸感知技术：基于指环的触摸感知技术使用户能在无源表面（如桌面、墙面）上触摸输入 [xx]，具有较强的普适性。先前工作利用阈值方法感知触摸 [xx]，延迟高达 200 毫秒，准确率仅为 85%[xx]。本文基于触摸运动模型，提出了低延迟的基于指环的触摸感知技术，延迟低于 10 毫秒，准确率超过 99%。低延迟是技术的关键，由于用户无法在触摸交互中察觉到低于 10 毫秒的延迟，该技术理论上提供了最佳用户体验。

（3）提出了面向连续触摸输入的防误触技术：文本输入是最复杂的连续触摸输入任务，针对触摸屏十指文本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防误触技术。本文通过文本输入任务评测防误触技术的性能，防误触技术的准确率达到 99%，且允许用户在打字时将非交互手指休息在触摸屏上（而不会引发误触），将打字速率提升 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.....	III
目 录.....	IV
插图和附表清单.....	VI
符号和缩略语说明.....	VII
第 1 章 引言	1
1.1 选题背景及意义.....	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 电容触摸屏.....	3
1.2.2 基于运动传感的触摸感知技术.....	3
1.3 研究内容.....	4
1.4 主要研究成果.....	4
1.5 论文组织结构.....	6
第 2 章 基于最优控制理论的触摸运动模型	8
2.1 触摸运动的数学模型.....	8
2.2 触摸运动的计算模型.....	11
2.2.1 卡尔曼滤波.....	11
2.2.2 最小二乘拟合.....	11
2.3 触摸运动的应用.....	13
第 3 章 基于运动传感指环的低延迟触摸感知技术	14
第 4 章 面向连续触摸输入的防误触技术	15
参考文献.....	16
附录 A 补充内容.....	18
致 谢.....	20

目 录

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 1.1	名称	2
图 2.1	基于最佳控制理论的触摸运动模型图示	9
图 2.2	触摸运动计算模型的拟合实例	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
HMP PQ	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、滑动等手势向计算机输入信息的方式。电容触摸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 选题背景及意义

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、平板电脑等触摸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]，其规模仅为触摸屏设备的23.8%。相比于键鼠交互，触摸交互具有便捷、易学、自然等优势，使其适用于包括老人、儿童在内的更广泛用户群体。

【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，代表性产品是微软的Hololens2）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物理实体之上。如图1.1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无源表面上（如桌面、墙面），支持用户通过触摸与用户界面进行交互[xx]。触摸交互将摆脱触摸屏表面的限制，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。

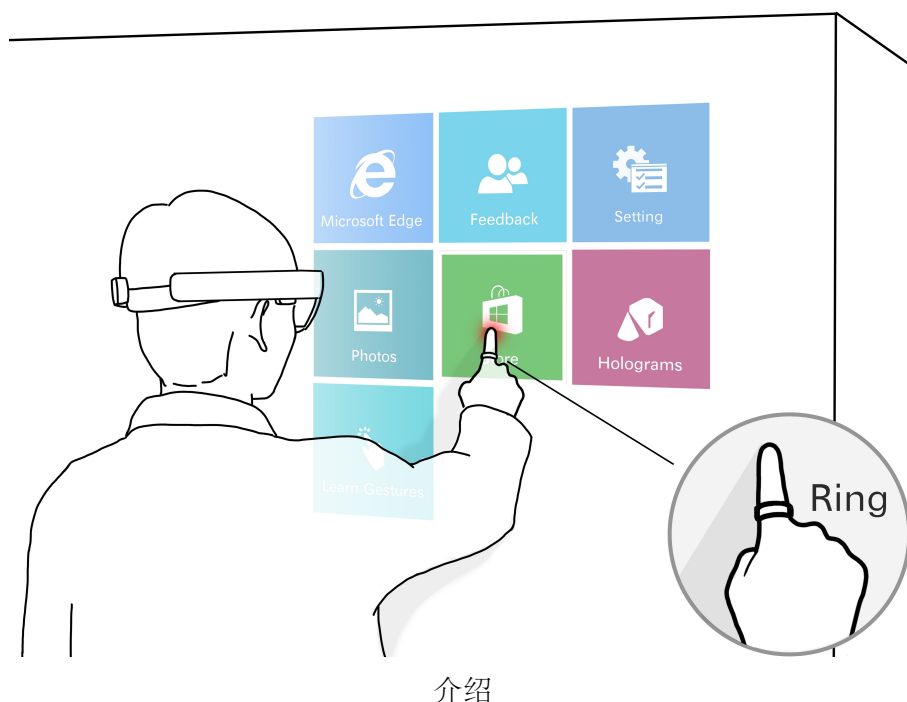


图 1.1 名称

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。

(1) 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，触摸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。

(2) 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。

(3) 意图性：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，在目前的触摸屏十指打字中，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 头盔的触摸交互模态中，用户既可以在普通的桌子上触摸交互，也可能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 电容触摸屏

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 [1]、高响应性 [2] 和准确的有意性 [3],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:

(1) 触摸运动数学模型: 本文中的触摸运动特指从用户产生触摸意图,到手指触碰到交互表面的这一段时间中手指的运动规律,触摸运动的数学模型是描述触摸运动时空轨迹的数学方程 $x(t)$,描述手指位置 x 与时间 t 之间的关系。通过对时间 t 求导,该方程可描述手指瞬时速度 v 、加速度 a 与时间 t 之间的关系。本文的第一个研究内容是触摸运动的数学模型是什么,即 $x(t)$ 的表达式具体是什么。

(2) 触摸运动计算模型: 在已知触摸运动方程的前提下,想要利用模型来改进触摸交互技术,还需要弄清楚一个问题,即如何利用传感信号拟合触摸运动方程。在工程上,有若干传感器种可用于传感手指的运动信号,例如,深度摄像头可以感知手指的位移 x ;戴在手指上的运动传感器可以感知手指的加速度 a 。然而,传感信号并非真值,传感器总是收到采样率和采样精度的限制,在这些限制之下,如何更精准地拟合触摸运动方程,是第二个研究内容——触摸运动计算模型需要回答的问题。

(3) 模型对触摸交互技术的指导性意义: 触摸运动模型揭示了触摸事件前后手指运动的规律,与触摸交互技术息息相关,在此背景下,如何利用触摸运动模型改进触摸运动交互,是值得研究的内容。

1.4 主要研究成果

本文提出了基于最优控制理论的触摸运动模型,揭示了触摸事件前后极短时间内手指的运动规律,探讨了如何利用触摸传感信号(包括位移、速度和加速度)更准确地拟合触摸运动方程。本文详细描述了触摸运动模型(第2章),讨论了模型对触摸交互技术的指导性意义。基于触摸运动模型,本文针对经典的触摸交互任务(目标选择和文本输入),优化触摸感知(第3章)和意图推理技术(第4章),提升触摸交互的效率和用户体验。

(1) 提出了基于最佳控制理论的触摸运动模型

通过实验观察和验证，本文发现，人产生触摸意图时，已对触摸运动做出了完整的规划，其心理可描述为：“在规定时间内 t_1 内，最平稳地将手指从初始点 x_0 移动到目标点 x_1 。”其中，目标点 x_1 是位于交互表面之下的虚构点。在触碰到交互表面之前，手指会沿着最平稳的时空轨迹向目标点 x_1 移动，直到接触交互表面而停止。根据 Tamar 等人关于最佳控制理论适用于手部运动建模的论述 [xx]，“最平稳的”指的是最小化手指运动急动度的平方的积分，由此约束可解得触摸运动的方程如下所示：

$$x(\tau) = \begin{cases} x_0 + (x_1 - x_0)(6\tau^5 - 15\tau^4 + 10\tau^3) & \tau \leq \tau_c \\ 0 & \tau > \tau_c \end{cases} \quad (1.1)$$

其中， $\tau = \frac{t}{t_1}$ 是运动的时间进度， τ_c 表示手指触摸到交互表面的时间。以上是触摸运动模型的数学模型部分。

在工程技术中，只有对触摸运动方程进行有效的拟合，才能充分发挥模型的作用。本文提出了触摸运动的计算模型，提出了利用运动传感信号更准确地拟合触摸运动方程的计算方法。本文讨论了各运动传感信道（位移、速度、加速度）、传感精度和采样率对运动方程拟合精度的影响。最后，本文讨论了模型对触摸交互技术的指导性意义，包括（1）低延迟触摸感知，（2）防误触技术，（3）触摸瞬间力度估计，和（4）运动传感器性能改进建议。其中，低延迟触摸感知技术和防误触技术具有重要的实用价值，为此，作者基于模型实现了对这两项交互技术的优化，做出后续两点主要贡献：

(2) 提出了基于运动传感指环的低延迟触摸感知技术：

针对现有触摸感知技术普适性不强，响应性不高的问题，本文提出了基于运动传感指环的低延迟触摸感知技术。目前主流的电容触摸屏技术存在普适性不强的缺点，用户只能在专用触摸屏设备上进行触摸交互，不符合普适计算中随时、随地、随心交互的原则。xx 等人提出了基于运动传感指环的触摸感知技术，使得用户能在无源物体表面（如桌面、墙面）上触摸输入，增强了触摸交互的普适性。然而，先前基于运动传感指环的技术采用阈值方法判断触摸事件，延迟高达 200 毫秒，准确率仅为 85%，不满足触摸交互的高响应性需求。

基于触摸运动模型，本提出了基于运动传感指环的低延迟触摸感知技术。从信息论的角度能够论证，基于触摸运动模型的触摸感知技术最大限度地利用了传感器所提供的信息，其感知能力远优于先前工作中所使用的阈值方法或机器学习方法，通过实验我们也验证了这一观点：本技术的触摸感知延迟低至 10 毫秒，准

确率超过 99%。低延迟是本技术的关键词，由于人在触摸交互中无法察觉到 10 毫秒的延迟，本技术为用户提供了最佳用户体验，与先前技术相比实现了质的飞越。

在触摸感知的基础上，本文介绍了一种基于运动传感指环的单指文本输入法，用户可以在普通的桌子上打字，速度达到每分钟输入 20.59 个英文单词。该文本输入技术为混合现实场景提供了高效、实用的文本输入方案。鉴于文本输入是最复杂的触摸输入任务之一，该文本输入技术的成功验证了低延迟触摸感知技术的鲁棒性。

(3) 提出了面向连续触摸输入的防误触技术：

针对现有触摸屏设备上，连续触摸输入误触频发的问题，本文提出了基于触摸运动模型的防误触技术。触摸屏文本输入是典型的连续触摸任务，是最复杂的触摸交互任务之一。目前，用户在触摸屏上十指打字时需要将手指悬空，以避免误触发生，久而久之会产生疲劳的问题；而若用户不将手指悬空，则手指在贴近触摸屏时会引发误触。

解决上述问题最直接的方法是开发一款强力的防误触技术，让用户在触摸屏十指打字的间隙可以将手指休息在屏幕上，而不引发误触，系统只对表达打字意图的触摸做出响应。通过实验观察和数据分析，作者发现：（1）同样是手指触摸屏幕，有意触摸和误触在触摸运动方程的参数上是有差异的，触摸的速度、力度、时长都是触摸有意性的重要表征；（2）有意触摸中，手指触摸运动方程的参数与其它手指独立，而多指休息导致的误触中，不同手指的触摸运动方程的参数具有强相关性。结合以上规律，作者提出了面向连续触摸输入的防误触技术，识别准确率达到 99%，且允许用户在十指打字的间隙将手指休息在触摸屏上（而不会引发误触）。实验表明，该技术改变了用户的打字行为，用户将手指休息在触摸屏上，打字行为更自然、更抗疲劳，打字速度也提升了 20%。

1.5 论文组织结构

本文后续章节的组织结构如下：

第 2 章介绍了基于最优控制理论的触摸运动模型，包括触摸运动的数学建模、计算建模、推导过程和实验评估，并讨论了触摸运动模型对改进触摸交互技术的指导性意义。

第 3 章介绍了基于运动传感指环的低延迟触摸感知技术，包括触摸的运动传感信号分析、基于模型的触摸感知技术介绍、针对目标选取任务的用户实验评估、基于指环触摸感知的文本输入技术介绍，和针对文本输入任务的用户实验评估。

第 4 章介绍了面向连续触摸输入的防误触技术，包括连续触摸输入中有点点

击行为和误触行为分析、基于模型的防误触技术介绍、基于防误触技术的有触觉反馈的触屏文本输入技术介绍，以及针对文本输入任务的用户实验评估。

第 5 章对本文内容进行总结和展望。

第2章 基于最优控制理论的触摸运动模型

最优控制理论是数学最优化的分支，研究使动力控制系统的性能指标实现最优化的综合方法。自1962年Potryagin等人提出最优控制理论以来[xx]，该理论被广泛应用于空间技术[]、电力系统控制[]、经济调控[]等重要领域。1985年，Tamar等人指出，最优控制理论还可用于描述人的手部运动过程[xx]。论文指出，人在手部运动的控制过程中，大脑并不会具体地控制肩关节和肘关节的旋转角度，而是将注意力集中在手部（由手掌和手指构成的整体），试图“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_f, y_f, z_f) ”。其中，“最平稳地”指的是人下意识地最小化手部运动急动度平方的积分：

$$C = \frac{1}{2} \int_0^{t_1} \left(\left(\frac{d^3x}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3y}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3z}{dt^3} \right)^2 \right) dt \quad (2.1)$$

其中， $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$ 是手部位位置随时间变化的函数。受到这份工作的启发，本文作者通过实验验证发现，触摸运动过程同样可由公式2.1描述。在此公式的约束下，本文提出了基于最优控制理论的触摸运动模型。本章分三部分介绍触摸运动模型：（1）触摸运动的数学模型，即描述触摸运动过程的数学方程；（2）触摸运动的计算模型，即利用运动传感信号（位移、速度、加速度时间序列）拟合触摸运动方程的最优化方法；（3）模型对触摸交互技术的指导性意义，即探讨触摸运动方程能给触摸交互技术带来哪些有用的信息，及如何利用这些信息改进交互技术。

2.1 触摸运动的数学模型

触摸运动的数学模型是描述触摸事件前后短暂时间内手指运动过程的数学方程。触摸运动的过程可描述为：“如图2.1(a)所示，若交互表面凭空消失，人会在时间 t_1 内最平稳地将手指从初始点 x_0 移动到目标点 x_1 。但实际情况是如图2.1(b)所示的情况，交互表面真实存在，手指会在时间点 t_c 因与交互表面接触而停止。”，触摸运动的方程是：

$$x(\tau) = \begin{cases} x_0 + (x_1 - x_0)(6\tau^5 - 15\tau^4 + 10\tau^3) & \tau \leq \tau_c \\ 0 & \tau > \tau_c \end{cases} \quad (2.2)$$

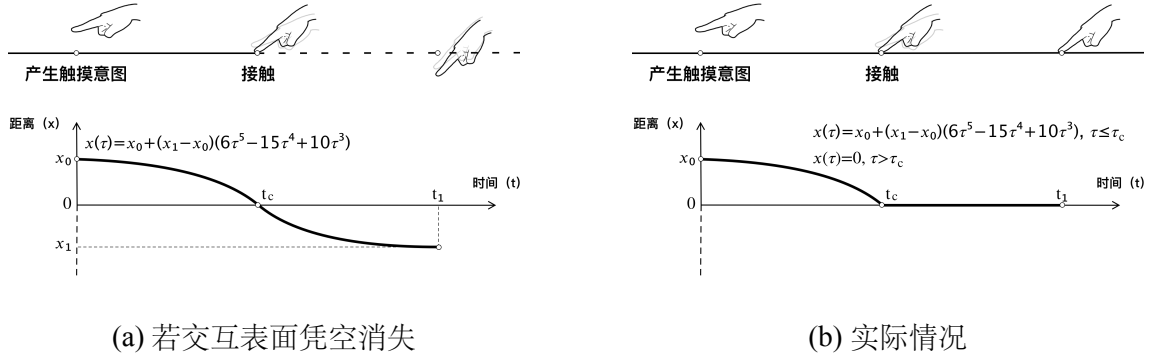


图 2.1 基于最佳控制理论的触摸运动模型图示

其中, x 是手指与交互表面的高度之差, $\tau = \frac{t}{t_1}$ 是时间进度。通过对上述函数的求导不难发现, 触摸运动模型同时揭示了手指速度 v 和加速度 a 与时间 t 之间的关系:

$$v(\tau) = \begin{cases} (x_1 - x_0)(30\tau^4 - 60\tau^3 + 30\tau^2) & \tau < \tau_c \\ 0 & \tau > \tau_c \end{cases} \quad (2.3)$$

$$a(\tau) = \begin{cases} (x_1 - x_0)(120\tau^3 - 180\tau^2 + 60\tau) & \tau < \tau_c \\ 0 & \tau > \tau_c \end{cases} \quad (2.4)$$

公式2.2即为触摸运动的数学模型, 本小节剩余内容将介绍模型的提出和推导过程。需要声明的是, 本文提出的触摸运动模型是对触摸运动过程的良好拟合, 后续章节会通过用户实验验证模型的预测精度。然而, 同人机交互中许多经典的模型一样(如费茨定理 [xx]), 本模型的正确性是无法从人体机理的角度证明的, 模型有可能在未来工作中会得到修正和完善。

本文中, 触摸运动模型的提出源于一个非正式实验。如图 xx 所示, 16 名被试参与了实验, 被试用食指连续地点击一块木板, 实验者使用 300Hz 的高速摄像头记录被试手指的运动过程。在被试连续点击数次之后, 实验者要求被试闭上双眼, 继续点击。实验者在数秒后迅速移开木板, 这一次, 被试的手指触摸运动会“踏空”, 实验也随即结束。每名用户只会进行一次实验, 采集一次手指踏空的数据, 而不会重复实验, 这是为了防止用户知道实验意图之后, 其触摸心理发生改变。高速摄像头记录的数据显示, 在被试手指踏空的触摸运动中, 其手指移动到了位于原来木板表面的高度之下, 约 1 到 3 厘米的位置上。实验表明, 人在组织一次触摸时, 其心理并非将手指从初始点带到交互表面上, 而是将手指带到交互表面之下的一个虚构点上。

【图：手指踏空实验】

根据最优控制理论，用户组织触摸运动的心理可描述为：“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”指的是最小化手指运动急动度的平方的积分（公式2.1）。为了简化触摸运动方程，作者假设手指在触摸运动的初始点和目标点上都是静止的，即速度和加速度同时为零。该假设是近似的，是考虑到当前传感器精度有限而做出的折中的约束条件，这是因为，如果运动方程的约束条件太少，运动方程的未知变量会变多，使得实际工程项目中很难以有限的运动传感精度和采样率拟合出准确的触摸运动轨迹。综上所述，若交互表面凭空消失，求解触摸运动方程等价于以下最优化问题：

$$\begin{cases} x(t), y(t), z(t) \\ s.t. x(0) = x_0, x'(0) = x''(0) = 0, x(t_1) = x_1, x'(t_1) = x''(t_1) = 0 \\ y(0) = y_0, y'(0) = y''(0) = 0, y(t_1) = y_1, y'(t_1) = y''(t_1) = 0 \\ z(0) = z_0, z'(0) = z''(0) = 0, z(t_1) = z_1, z'(t_1) = z''(t_1) = 0 \\ \min \frac{1}{2} \int_0^{t_1} \left(\left(\frac{d^3x}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3y}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3z}{dt^3} \right)^2 \right) dt \end{cases} \quad (2.5)$$

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，上述最优化问题未包含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]。作者将上述最优化问题的求解过程写在附录 xx 中，此处直接给出问题的解：

$$\begin{cases} x(\tau) = x_0 + (x_1 - x_0)(6\tau^5 - 15\tau^4 + 10\tau^3) \\ y(\tau) = y_0 + (y_1 - y_0)(6\tau^5 - 15\tau^4 + 10\tau^3) \\ z(\tau) = z_0 + (z_1 - z_0)(6\tau^5 - 15\tau^4 + 10\tau^3) \end{cases} \quad (2.6)$$

上述公式表明，在触摸运动方程中，手指在 x 、 y 、 z 三个轴上的时空运动轨迹是相互独立的。本文在选题背景中已经阐述，本文的研究重点在于提高触摸交互的普适性、响应性和有意性，而不关心触摸在交互表面上 2D 位置的识别，因此，我们仅保留上述公式中 x 轴上的时空轨迹函数，作为触摸运动模型的表述（公式2.2）。

2.2 触摸运动的计算模型

触摸运动的计算模型是在已知数学模型的情况下，利用位移、速度、加速度等传感器信号来拟合触摸运动方程参数的计算方法。在工程技术中，常见的运动信号传感方法主要有（1）基于视觉方法的位移传感，和（2）基于运动传感器的加速度传感。由于速度传感器大多通过位移除以时间来计算，本文只讨论位移信号，而省去速度信号。

实验观察发现，一次触摸运动从用户产生触摸意图（手指开始加速运动），到手指触碰到交互表面的时长最短不低于 50 毫秒，最长不超过 200 毫秒。因此，从实用的角度出发，触摸运动的计算模型应该讨论，如何利用触摸事件发生前 50 毫秒的采样数据拟合触摸运动方程。假设我们用采样频率为 f_x 的位移传感器和采样频率为 f_a 的加速度传感器监测手指运动，在触摸发生前 50 毫秒内收集到以下数据：

$$\begin{cases} [X_1, X_2, \dots, X_n] & n = \lfloor 0.05f_x \rfloor \\ [A_1, A_2, \dots, A_m] & m = \lfloor 0.05f_a \rfloor \end{cases} \quad (2.7)$$

则触摸运动的计算模型是利用上述时间序列拟合触摸运动方程（公式2.2）的计算方法。本小节剩余内容将按照计算顺序介绍此问题的解决方法。

2.2.1 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波可用于控制测量数据的误差。研究工作中一般认为，基于视觉方法的位移信号和基于运动传感器的加速度信号的传感误差都符合正态分布 $[xx]$ ，设位移信号的标准差为 σ_x ，加速度信号的标准差为 σ_a 。 σ_x 和 σ_a 的值取决于传感器的质量，可以通过实验测量。

卡尔曼滤波器如何设计。

由于卡尔曼滤波联立了位移信号和加速度信号，最终可以将位移传感信号的误差降低至 $\Delta x = k_x \sigma_x$ ，将加速度传感信号的误差降低至 $\Delta a = k_a \sigma_a$ 。

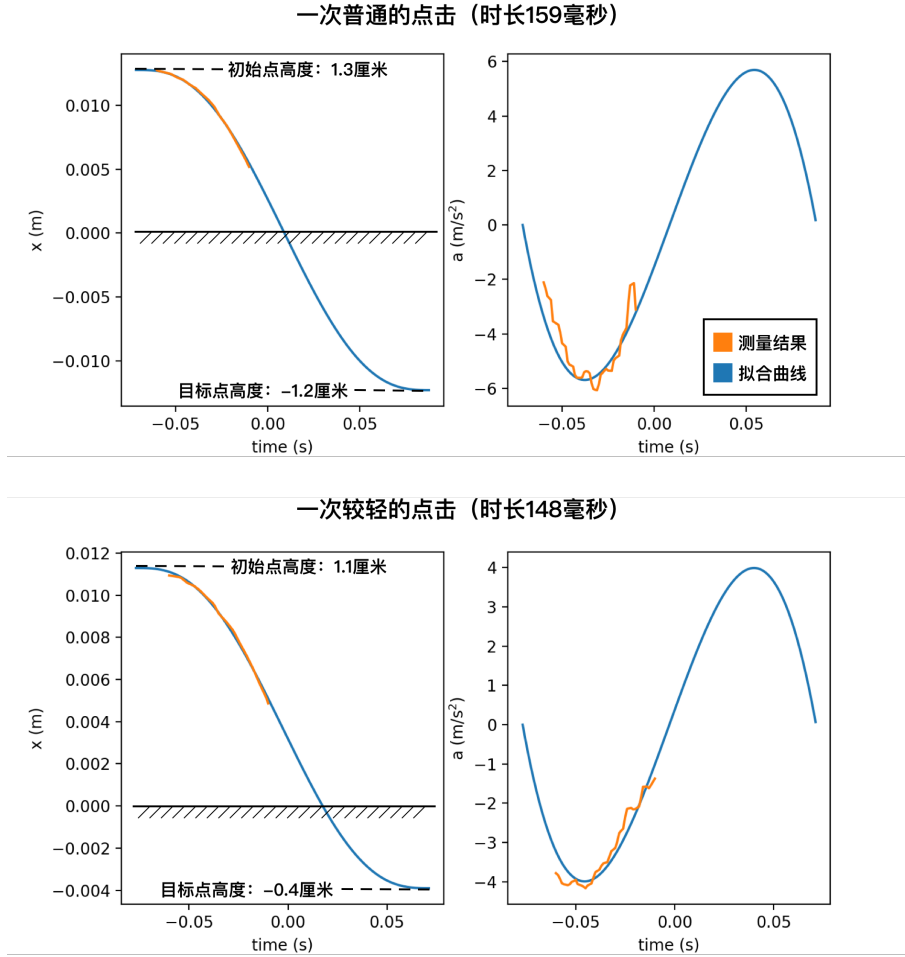
2.2.2 最小二乘拟合

拟合触摸运动方程的过程是求解未知量 x_0, x_1, t_1, t_s ，使得方程的时空轨迹与测量结果相符，其中 x_0, x_1, t_1 是触摸运动方程（公式2.2）中的未知常量，而 t_s 是测量结果第一帧 (X_1, A_1) 对应到触摸运动过程的时间戳。即时间序列 $[X_1, X_2, \dots, X_n]$ 和 $[A_1, A_2, \dots, A_m]$ 分别对应触摸运动位移方程（公式2.2）和触摸运动加速度方程（公式2.4）中时间跨度 $t \in [t_s, t_s + 0.05]$ 的部分。

由于传感器误差符合正态分布，应采用最小二乘法拟合触摸运动方程，即求解以下最优化问题：

$$\begin{cases} x_0, x_1, t_1, t_s \\ \min \frac{\sum_{i=1}^n \left(X_i - x(t_s + \frac{i}{f_x}) \right)^2}{(\Delta x)^2} + \frac{\sum_{i=1}^m \left(A_i - a(t_s + \frac{i}{f_a}) \right)^2}{(\Delta a)^2} \end{cases} \quad (2.8)$$

求解以上最优化的计算机算法有许多 [xx,xx,xx]，建议使用 SLSQP[xx] 以在拟合效率和精度之间取得平衡。另外，给未知量 x_0 、 x_1 、 t_1 、 t_s 加上符合实际情况的约束也可以提高拟合的性能，此处建议值为 $x_0 \in [0, 0.03]$ ， $x_1 \in [-0.08, 0]$ ， $t_1 \in [0.05, 0.3]$ ， $t_s \in [0, 0.05]$ ，最优化过程的初始估计值为 $(x_0, x_1, t_1, t_s) = (0.01, -0.01, 0.2, 0.01)$ 。



介绍

图 2.2 触摸运动计算模型的拟合实例

如上图所示是使用触摸运动计算模型拟合实际测量数据的两个实例，上方的两幅子图展示了一次普通力度点击的拟合效果，左上方是对触摸运动位移的拟合，

右上方是对运动的加速度的拟合；下方的两幅子图展示了一次较轻点击的拟合效果。通过观察上图，读者很容易从中找到有用的信息，可用户指导触摸交互技术的改进。

2.3 触摸运动的应用

(1) 低延迟的触摸感知技术：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) 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。

(4) 防误触技术：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。

第 3 章 基于运动传感指环的低延迟触摸感知技术

第 4 章 面向连续触摸输入的防误触技术

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）。

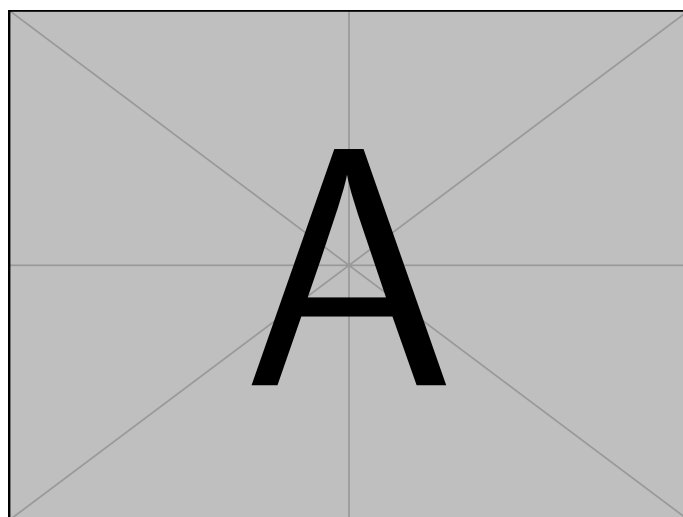


图 A.1 附录中的图片示例

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。