

硕士学位论文

室外场景下的三维视觉-激光 SLAM 系统和
基于 *ClusterMap* 的重定位方法

**3D VISUAL-LIDAR SLAM AND
CLUSTERMAP BASED
RE-LOCALIZATION APPROACH IN
OUTDOOR SCENES**

潘志琛

哈尔滨工业大学
2018 年 11 月

国内图书分类号: TM301.2
国际图书分类号: 62-5

学校代码: 10213
密级: 公开

工学硕士学位论文

室外场景下的三维视觉-激光 SLAM 系统和 基于 *ClusterMap* 的重定位方法

硕 士 研 究 生: 潘志琛

导 师: 陈浩耀副教授

申 请 学 位: 工学硕士

学 科: 控制工程

所 在 单 位: 哈尔滨工业大学 (深圳)

答 辩 日 期: 2018 年 11 月

授予学位单位: 哈尔滨工业大学

Classified Index: TM301.2

U.D.C: 62-5

Dissertation for the Master's Degree in Engineering

**3D VISUAL-LIDAR SLAM AND
CLUSTERMAP BASED
RE-LOCALIZATION APPROACH IN
OUTDOOR SCENES**

Candidate:	Pan Zhichen
Supervisor:	Professor Chen Haoyao
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Specialty:	Control Engineering
Affiliation:	Harbin Institute of Technology(Shenzhen)
Date of Defence:	November, 2018
Degree-Conferring-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘 要

SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 是空间定位技术的前沿方向, 按照不同的传感器, 可以大致分为视觉 SLAM 和激光 SLAM 两类, 但无论哪种传感器, 都有其局限性。例如, 单目视觉 SLAM 存在固有尺度偏差, 会造成定位误差的累积, 并且容易受到光照变化的不利影响。只利用激光雷达作为传感器的 SLAM 系统会受制于激光检测距离的有限性, 且从环境中提取稳定特征信息较为困难, 尤其是在室外、非结构化的场景中。因此本文提出了一种框架完整的三维视觉-激光 SLAM 系统, 称为 VL-SLAM, 该系统融合单目相机和三维激光传感器数据, 能够在室外环境下, 获得与真实场景尺度一致的定位与建图结果。此外, 本文利用从三维激光点云数据中提取的目标物体的点云簇, 生成聚类地图, 称为 *ClusterMap*, 并在该地图中, 根据相邻点云簇之间的相互位置关系建立每个点云簇的位置描述子, 然后通过匹配位置描述子, 可以实现重新定位。这种重定位的方法对三维点云的稠密度要求不高, 且不需要对点云实现完美的分割, 而且可以忽略一些诸如环境光照、物体形貌、观测方向等条件变化对重定位算法可靠度的影响, 这些影响在依赖于视觉特征或者物体外观特征实现重定位的方法中是很难消除的。

本文同时在 KITTI 数据集和自制数据集上对算法性能做了验证, 结果表明, 文中提出的三维视觉-激光 SLAM 能够在室外环境下获得低漂移的定位和建图结果, 且基于聚类地图的重定位方法能够可靠地利用已有地图实现重新定位, 即使该地图是数月之前生成的。

关键词: 三维视觉-激光 SLAM; 室外; 聚类地图; 重定位

Abstract

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) is the frontier of spatial locating technology. According to different sensors, it can be roughly divided into two types: visual SLAM and laser SLAM, but any sensor has its limitations. For example, SLAM based solely on monocular camera suffers from scale inconsistencies and illumination changes while lidar-only SLAM method suffers from limited detection distance and difficulties to extract robust features, especially in outdoor, unstructured environment, in this paper, we propose a complete 3D visual-lidar SLAM system, namely VL-SLAM, which combines a monocular camera with a lidar and can obtain scale-invariant localization and mapping results in outdoor scenes. In addition, we extract point clusters of interesting objects in lidar perceptions to generate *ClusterMap*, based on which we propose a re-localization method using location descriptors created according to the mutual locational relationships between adjacent clusters. This method does not depend on the high density and perfect clustering of point cloud and can eliminate effects of changes on such as illumination, appearance, and viewpoint which are difficult to overcome when using visual features or object characteristics to achieve re-localization.

We verify the performance of proposed algorithms on both KITTI dataset and customized dataset where the results show that the method demonstrated in this paper can acquire low-drift localization and mapping results, and able to reliably complete re-localization using pre-built *ClusterMap*, even though it is built a few months ago.

Keywords: 3D visual-lidar SLAM, outdoor, *ClusterMap*, re-localization

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 绪论	1
1.1 课题来源	1
1.2 课题研究的背景和意义	1
1.3 国内外研究现状	2
1.3.1 基于 GPU 的深度学习加速	2
1.3.2 基于专用芯片的加速	3
1.3.3 基于 FPGA 的加速	4
1.3.4 手势识别研究现状	4
1.4 本文的主要研究内容	5
第 2 章 图片的插入方法	6
2.1 XeLaTeX 编译方法的配置输入谷关紧要的汉子占地方其实是废话遮掩	6
第 3 章 表格的绘制方法	11
3.1 研究生院的绘表规范	11
3.2 普通表格的绘制方法	11
3.3 长表格的绘制方法	13
3.4 列宽可调表格的绘制方法	15
3.4.1 表格内某单元格内容过长的情况	15
3.4.2 对物理量符号进行注释的情况	17
第 4 章 数学公式的输入方法	19
4.1 研究生院的公式规范	19
4.2 生成 L ^A T _E X 数学公式的两种方法	19
4.2.1 基于 MathType 软件的数学公式生成方法	19
4.2.2 基于 MATLAB 软件的数学公式生成方法	20
4.3 数学字体	21
4.4 行内公式	22

4.5 行间公式	23
4.6 可自动调整大小的定界符	23
4.7 数学重音符号	24
结 论	25
参考文献	26
攻读硕士学位期间发表的论文	28
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限	29
致 谢	30

第 1 章 绪论

1.1 课题来源

本课题来源于我也不知道是什么来源。

1.2 课题研究的背景和意义

SLAM 是 Simultaneous Localization and Mapping 的缩写，中文译作“同时定位与地图构建”^[1]。它主要用来为机器人在未知环境中提供位置和地图信息，在机器人的各个领域，都能发现 SLAM 技术在其中扮演着重要角色，可以说，自主机器人离开了 SLAM，就像人失去了感知系统一样，难以在未知环境中主动寻路与避障。例如在 VR/AR 领域，可以根据 SLAM 获得的场景地图和相机位姿，在真实场景中加入虚拟物体并做相应渲染，能够使得虚拟物体更加接近于真实状态；在无人机领域，SLAM 可以帮助无人机建立局部地图，辅助无人机进行路径规划和自主避障；在无人驾驶领域，利用 SLAM 获得的定位信息，再融合其他的定位信息，能够大大提高无人车的定位精度，达到车道线级别^[2]；在服务机器人领域，SLAM 提供的高精度环境地图，能够帮助机器人完成路径规划、自主探索与主动避障等任务。SLAM 技术涵盖的范围非常广泛，按照传感器的不同，它可以分为基于视觉传感器的视觉 SLAM（简称 vSLAM），基于激光雷达传感器的 2D/3D SLAM，其中基于二维激光 2D SLAM 的发展相对比较成熟，早在 2005 年，Sebastian Thrun 等人的经典著作《概率机器人学》^[3]就已经将 2D SLAM 研究和总结得非常透彻，基本确定了其主要框架，并且已经有很多优秀的开源算法能够实现良好的 SLAM 性能，如 karto-slam，gmapping，cartographer 等，有些已经在扫地机器人，服务机器人等商业产品中有所应用。但是对于大尺度复杂场景，例如室外环境，单一传感器很难满足所有适用性要求^[4]，例如视觉传感器易受环境光照影响，导致视觉特征追踪失败；二维激光在室外无规则场景难以获取足够的场景信息，无法可靠定位与建图等。于是 SLAM 技术又发展出了基于 RGBD 相机的 RGBD SLAM，和基于视觉和惯性单元的视觉惯导里程计（VIO）。由于 RGBD 相机能够方便地获取像素级别的图像信息与深度信息的对应关系，因此大大丰富了传感器对场景形貌的感知程度，有助于建立真实场景的稠密地图，且三维信息的引入能够加速运动估计的效率与精度，使得 RGBD SLAM 能够适用于多种场合，Google 的平板产品 Project

Tango 就已集成了 RGBD SLAM 模块。不过由于 RGBD 相机的有效使用距离有限,通常不到 10m,这也就限制了其在室外场景中的应用。另外,视觉但是又存在距离有限,和较难获得结构信息的制约,利用三维激光和单目视觉的融合方案就会更加合适。

1.3 国内外研究现状

卷积神经网络最大的特征是不需要人为的设计特征分类器,这在一定程度上简化了寻找特征的难题,因为对于一些问题,寻找明显的特征并设计相应的分类器是极其困难的。卷积神经网络以原始数据作为网络的输入,通过大量数据的训练,网络自己学习并优化参数,最终得到特征分类器。但是卷积神经网络也存在计算量大的特征,这使得在以串行运算的计算模式的传统 CPU 上运算时间长,从而不能满足计算需求^[5]。

针对卷积神经网络计算量大的特征,学者研究如何对其进行加速,目前为止采用的加速方案有使用 GPU 加速, FPGA 加速^[6]和专用芯片加速。

1.3.1 基于 GPU 的深度学习加速

通用处理器 (CPU) 的内部主要有控制器、寄存器和逻辑单元组成,但是逻辑单元在总体结构中所占的比例较小^[7],这使得它不适用与卷积神经网络的并行计算。GPU 则与之相反,逻辑单元的数量远超过控制器与寄存器的和,它把大规模的数据分解成独立小部分并行执行,使得它的执行效率远远高于 CPU。目前主要有 NVIDIA 和 AMD 两家的 GPU,它们的产品如图1-1, 1-2所示。

目前,使用 GPU 对 CNN 进行加速的技术已经十分成熟并且可取得良好的效果^[8]。但随着模型复杂度增加,数据集越来越庞大,单个 GPU 训练模型也存在性能不足,因此采用多个 GPU 并行技术训练技术,将模型拆分成小部分分配到多个 GPU 上存储和训练^[9]。文献^[10]中模型训练使用随机梯度下降算法,并用 4 块 GPU 对算法进行加速,最终达到的速度比使用 1 块 CPU 训练快 3.2 倍。在文献^[11]中,采用 1-bit 量化法来减少 GPU 间数据传输量,降低通信消耗,从而进一步提高网络训练效率,该方法在使用 20 块 GPU 训练时达到的效率是 1 块 CPU 训练效率的 6-7 倍。文献^[12]将 GPU 加速与云计算平台相结合,充分利用云计算高效的分布式计算模型和 GPU 丰富的计算资源,并在此基础上提出一种新型使用大数据计算的并行计算模型。



图 1-1 NVIDIA Tesla GPU



图 1-2 AMD Radeon GPU

1.3.2 基于专用芯片的加速

与人工智能常用的几种处理器如 CPU(中央处理器)、GPU(图像处理器)相比,专用芯片 (Application Specific Integrated Circuit,ASIC) 就是针对一些特定应用场景而生,所以在工作效率,性能表现中都更加突出。

在 20 世纪 90 年代初,贝尔实验室就开发了能够对卷积神经网络加速的芯片 ANNA^[13]。该芯片包含 64 个计算单元,能够同时进行 64 个卷积操作,针对卷积神经网络,该芯片还进行了专门的优化,用 4bit 来表示其状态值,权重参数使用 6bit 定点数表示,其峰值运算速度达到约每秒 4×10^9 个乘累加操作 (Multiply-add Accumulation,MAC)^[14,15]。在该芯片上使用卷积神经网络进行手写数字体识别和文本是否有倾斜检测试验时,其展现出的性能要比单独使用 DSP 计算快 10 到 100 倍。相机厂家佳能研发了一款卷积网络芯片,用于低功耗智能相机,完成多类物体的识别,首先在所有位置和规模上使用 Gabor 滤波器,然后使用简单版本的稀疏和侧向抑制改进,得到最终的模型,并且该模型在功能较少的情况下表现良好^[16]。文献^[17]中提到一种先进的 28nmFD-SOI 工艺研制的专用芯片,它有一组支持内核压缩的高效能深度卷积神经网络硬件加速核,片上重配置数据传输结构,可以用来改善数据重用并减少片上和片外存储器流量,带有外围设备基于 ARM 的主机子系统和一些高速接口用于图像或其他传感器。Eyeriss 芯片^[18]是由 MIT 研发的新型芯片,如图1-3所示,它将数据在处理单元与内存条之间的频率降低,减少在这过程中时间与能量的消耗。与普通 GPU 相比,Eysriss 的每个处理单元都有内存,而不是共享内存,并且它有一个特殊的电路,该电路能够向处理单元分配任务。这些设计使得 Eyeriss 芯片具有极高的运行效率,其峰值效率能达到手机 GPU 的 10 倍。该芯片的其他特性如表1-1所示。

2017 年体系结构顶会 ISCA 上,谷歌发布张量处理器 (Tensor Processing

表 1-1 Eyeriss 芯片特性

character	property	character	property
Technology	TSMC 65nm LP 1P9M	Core Area	3.5mmx3.5mm
Gate Count	1852kGates(NAND2)	TOTAL SRAM Size	181.5KB
On-Chip Buffer	108KB	#of PEs	168
Scratch Pad/PE	0.5KB	Supply Voltage	0.82-1.17V
Core Frequency	100-250MHz	Peak Performance	16.8-42.0GOPS
Word Bit-width	16-bit Fixed-Point	Filter Size	1-32[width] 1-32[height]
#of Filter	1024	#of Channels	1-1024
Stride Range	1-12[horizontal] 1,2,4[vertical]		

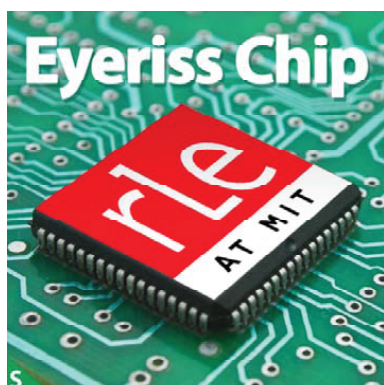


图 1-3 MIT Eyeriss Chip

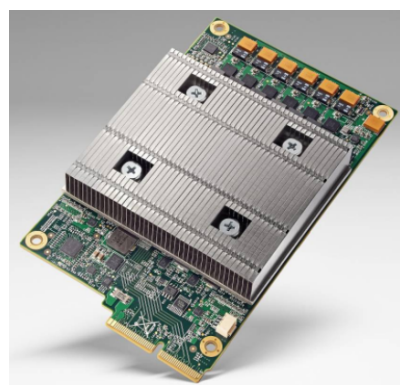


图 1-4 Google TPU

Unit,TPU) 数据中心性能分析论文^[19]。TPU, 如图1-4, 的核心是 65535 个 8 位乘累加矩阵乘法单元和一个 28MiB 的软件管理的片上内存, 矩阵乘法单元的峰值计算能力可达到 92TOPS。TPU 是基于 TensorFlow 框架进行神经网络开发的, 主要有 MLP,CNN 和 LSTM 网络模型。尽管某些应用利用率很低, 但 TPU 平均比快 15 到 30 倍, 其 TOPS/Watt 要高出 30 到 80 倍。如果在 TPU 中使用 GPU 的 GDDR5 内存, 其吞吐量近三倍, 并将 TOPS/Watt 提高到 GPU 的近 70 倍和 CPU 的近 200 倍。TPU 的计算资源主要有矩阵乘法单元, 静态存储器 SRAM 用作缓存, 以及硬件连接的激活函数, 为了控制这些资源之间的计算, Google 还专门为神经网络的推理设计了高级指令。

1.3.3 基于 FPGA 的加速

先如今, FPGA 芯片都集成了 DSP 核, 提供大量硬件乘累加单元, 使得并行的卷积计算成为可能, 在 FPGA 上实现卷积神经网络开始成为一个研究热点。

1.3.4 手势识别研究现状

在学术界, 研究人员提出多种算法与方式进行手势识别。在文献^[20]中, 研究

人员提出一种识别手势的方法，该方法要求使用者穿戴红色的手套，并且在特征提取时只提取形成手势的红色手套对应的像素区域，如图1-5所示。Meenakshi et.al^[21]使用 RGB 图像，它要求使用单一背景图片。由于 RGB 图对不同光照条件十分敏感，要求先将图片转换到 YCbCr 空间，随后对其进行二值化并提取相应的手势区域，如图1-6所示。



图 1-5 Captured with color gloves



图 1-6 RGB image with plain and uniform background

1.4 本文的主要研究内容

本论文研究了卷积神经网络一般模型的结构特征，在分析网络结构的基础上分析了其在 FPGA 上实现并行计算的可行性，将整个功能的实现分为 PC 端训练过程和 FPGA 端的推理过程。

对于上述的内容，本论文的组织结构如下：

第一章，介绍本论文研究内容的背景和意义，并简单介绍了目前对卷积神经网络的主要加速方案和技术，以及对于手势识别的研究现状，最后概括了本论文的主要研究内容和论文的组织结构；

第二章，介绍卷积神经网络的一般模型；

第三章，

第 2 章 图片的插入方法

2.1 XeLaTeX 编译方法的配置输入谷关紧要的汉子占地方其实是废话遮掩

图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。



图 2-1 打高尔夫球的人

Fig.2-1 The person playing golf

图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。

应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。

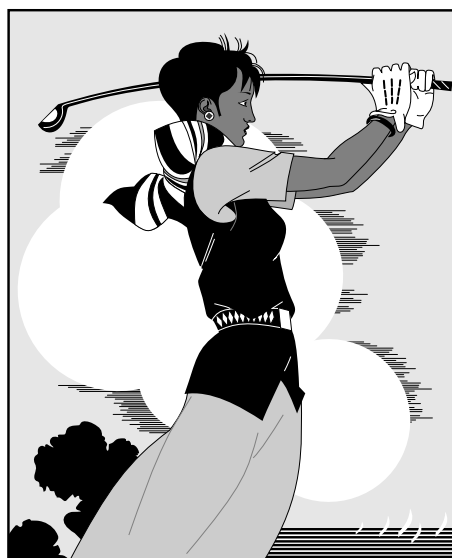


图 2-2 打高尔夫球的人

Fig.2-2 The person playing golf

图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字

图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。

[illegible]

插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。



图 2-4 打高尔夫球的人

图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。

图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明

性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体 5 号字。

第 3 章 表格的绘制方法

Methods of drawing tables

3.1 研究生院的绘表规范

Tables drawing standard from graduate school

表应有自明性。表格不加左、右边线。表的编排建议采用国际通行的三线表。表中文字用宋体 5 号字。

每个表格均应有表题（由表序和表名组成）。表序一般按章编排，如第 1 章第一个插表的序号为“表 1-1”等。表序与表名之间空一格，表名中不允许使用标点符号，表名后不加标点。表题置于表上，硕士学位论文只用中文，博士学位论文用中、英文两种文字居中排写，中文在上，要求中文用宋体 5 号字，英文用新罗马字体 5 号字。

表头设计应简单明了，尽量不用斜线。表头中可采用化学符号或物理量符号。

全表如用同一单位，则将单位符号移至表头右上角，加圆括号。表中数据应准确无误，书写清楚。数字空缺的格内加横线“-”（占 2 个数字宽度）。表内文字或数字上、下或左、右相同时，采用通栏处理方式，不允许用“/”、“同上”之类的写法。

表内文字说明，起行空一格、转行顶格、句末不加标点。

如某个表需要转页接排，在随后的各页上应重复表的编号。编号后加“（续表）”，表题可省略。续表应重复表头。

3.2 普通表格的绘制方法

Methods of drawing normal tables

表格应具有三线表格式，因此需要调用 booktabs 宏包，其标准格式如表 3-1 所示。

其绘制表格的代码及其说明如下。

```
\begin{ table }[htbp]
\ bicaption [标签名]{{中文标题}}{Table$!$}{English caption}
\vspace{0.5em}\centering\wuhao
```

表 3-1 符合研究生院绘图规范的表格

Table3-1 Table in agreement of the standard from graduate school

$D(\text{in})$	$P_u(\text{lbs})$	$u_u(\text{in})$	β	$G_f(\text{psi.in})$
5	269.8	0.000674	1.79	0.04089
10	421.0	0.001035	3.59	0.04089
20	640.2	0.001565	7.18	0.04089

```

\begin{ tabular }{cc ... c}
\toprule [1.5 pt]
表头第1个格 & 表头第2个格 & ... & 表头第n个格 \\
\midrule [1 pt]
表中数据(1,1) & 表中数据(1,2) & ... & 表中数据(1,n)\\
表中数据(2,1) & 表中数据(2,2) & ... & 表中数据(2,n)\\
.....\\
表中数据(m,1) & 表中数据(m,2) & ... & 表中数据(m,n)\\
\bottomrule [1.5 pt]
\end{ tabular }
\end{ table }

```

table 环境是一个将表格嵌入文本的浮动环境。

\wuhao命令将表格的字号设置为五号字（10.5pt），在绘制表格结束退出时，不需要将字号再改回为\normalsize，正文字号默认为小四号字（12pt）。

tabular 环境的必选参数由每列对应一个格式字符所组成：c表示居中，l表示左对齐，r表示右对齐，其总个数应与表的列数相同。此外，@{文本}可以出现在任意两个上述的列格式之间，其中的文本将被插入每一行的同一位置。表格的各行以\\分隔，同一行的各列则以&分隔。

\toprule、\midrule和\bottomrule三个命令是由booktabs宏包提供的，其中\toprule和\bottomrule分别用来绘制表格的第一条（表格最顶部）和第三条（表格最底部）水平线，\midrule用来绘制第二条（表头之下）水平线，且第一条和第三条水平线的线宽为1.5pt，第二条水平线的线宽为1pt。

引用方法：“如表~\ref{标签名}~所示”。

3.3 长表格的绘制方法

Methods of drawing long tables

长表格是当表格在当前页排不下而需要转页接排的情况下所采用的一种表格环境。若长表格仍按照普通表格的绘制方法来获得，其所使用的`table` 浮动环境无法实现表格的换页接排功能，表格下方过长部分会排在表格第 1 页的页脚以下。为了能够实现长表格的转页接排功能，需要调用 `longtable` 宏包，由于长表格是跨页的文本内容，因此只需要单独的`longtable` 环境，所绘制的长表格的格式如表 3-2 所示。

此长表格 3-2 第 2 页的标题“编号（续表）”和表头是通过代码自动添加上去的，无需人工添加，若表格在页面中的竖直位置发生了变化，长表格在第 2 页及之后各页的标题和表头位置能够始终处于各页的最顶部，也无需人工调整， $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 系统的这一优点是 word 等软件所无法比拟的。

表 3-2 中国省级行政单位一览
Table3-2 Overview of the provincial administrative unit of China

名称	简称	省会或首府
北京市	京	北京
天津市	津	天津
河北省	冀	石家庄市
山西省	晋	太原市
内蒙古自治区	蒙	呼和浩特市
辽宁省	辽	沈阳市
吉林省	吉	长春市
黑龙江省	黑	哈尔滨市
上海市	沪/申	上海
江苏省	苏	南京市
浙江省	浙	杭州市
安徽省	皖	合肥市
福建省	闽	福州市
江西省	赣	南昌市
山东省	鲁	济南市
河南省	豫	郑州市
湖北省	鄂	武汉市
湖南省	湘	长沙市
广东省	粤	广州市
广西壮族自治区	桂	南宁市
海南省	琼	海口市

表 3-2 (续表)

名称	简称	省会或首府
重庆市	渝	重庆
四川省	川/蜀	成都市
贵州省	黔/贵	贵阳市
云南省	云/滇	昆明市
西藏自治区	藏	拉萨市
陕西省	陕/秦	西安市
甘肃省	甘/陇	兰州市
青海省	青	西宁市
宁夏回族自治区	宁	银川市
新疆维吾尔自治区	新	乌鲁木齐市
香港特别行政区	港	香港
澳门特别行政区	澳	澳门
台湾省	台	台北市

绘制长表格的代码及其说明如下。

```

\wuhao\begin{longtable}{cc ... c}
\longbionenumcaption{{中文标题\label{标签名}}}{Table$!$}
{{English caption }}\vspace{0.5em}\\
\toprule [1.5 pt] 表头第1个格 & 表头第2个格 & ... & 表头第n个格\\ \midrule[1pt]
\endfirsthead
\multicolumn{n}{r}{表~\thetable (续表) }\vspace{0.5em}\\
\toprule [1.5 pt] 表头第1个格 & 表头第2个格 & ... & 表头第n个格\\ \midrule[1pt]
\endhead
\bottomrule [1.5 pt]
\endfoot
表中数据(1,1) & 表中数据(1,2) & ... & 表中数据(1,n)\\
表中数据(2,1) & 表中数据(2,2) & ... & 表中数据(2,n)\\
.....\\
表中数据(m,1) & 表中数据(m,2) & ... & 表中数据(m,n)\\
\end{ longtable }\normalsize

```

在绘制长表格的前面留出一个空白行，并在第2行的一开始全局定义长表格的字号为五号字，这样能够保证长表格之前段落的行距保持不变。在绘制长表格结束后，需要\ normalsize命令重新将字号改为小四号字。

长表格的中英文标题是通过ccaption宏包的\longbionenumcaption命令得到的。

\endhead之前的文字描述的是第2页及其之后各页的标题或表头；\endfirsthead之前的文字描述的是第1页的标题和表头，若无此命令，则第1页的表头和标题由\endhead命令确定；同理，\endfoot之前的文字描述的是除最后一页之外每页的表格底部内容；\endlastfoot之前的文字描述的是最后一页的表格底部内容，若无此命令，则最后一页的表格底部内容由\endfoot命令确定；由于规范中长表格每页底部内容均相同（水平粗线），因此模板中没有用到\endlastfoot命令。

注：硕士学位论文的长表格只需要插入中文标题，因此需将\longbionenumcaption一句命令替换为如下两条命令：

\caption{中文标题}

\label{标签名}

3.4 列宽可调表格的绘制方法

Methods of drawing tables with adjustable-width columns 论文中能用列宽可调表格的情况共有两种，一种是当插入的表格某一单元格内容过长以至于放不下的情况，另一种是当对公式中首次出现的物理量符号进行注释的情况，这两种情况都需要调用 tabularx 宏包。下面将分别对这两种情况下可调表格的绘制方法进行阐述。

3.4.1 表格内某单元格内容过长的情况

The condition when the contents in some cells of tables are too long 首先给出这种情况下的一个例子如表 3-3 所示。

绘制这种表格的代码及其说明如下。

\begin{ table }[htbp]

\ bicaption [标签名]{{中文标题}}{Table\$\\!\$}{English caption}

\vspace{0.5em}\wuhao

\begin{ tabularx }{\textwidth}{1 ... X ... 1}

表 3-3 最小的三个正整数的英文表示法

Table3-3 The English construction of the smallest three positive integral numbers

Value	Name	Alternate names, and names for sets of the given size
1	One	ace, single, singleton, unary, unit, unity
2	Two	binary, brace, couple, couplet, distich, deuce, double, doubleton, duad, duality, duet, duo, dyad, pair, snake eyes, span, twain, twosome, yoke
3	Three	deuce-ace, leash, set, tercet, ternary, ternion, terzetto, threesome, tierce, trey, triad, trine, trinity, trio, triplet, troika, hat-trick

\toprule [1.5 pt]

表头第1个格 & ... & 表头第X个格 & ... & 表头第n个格 \\

\midrule[1 pt]

表中数据(1,1) & ... & 表中数据(1,X) & ... & 表中数据(1,n)\\

表中数据(2,1) & ... & 表中数据(2,X) & ... & 表中数据(2,n)\\

.....\\

表中数据(m,1) & ... & 表中数据(m,X) & ... & 表中数据(m,n)\\

\bottomrule [1.5 pt]

\end{ tabularx }

\end{ table }

`tabularx` 环境共有两个必选参数：第1个参数用来确定表格的总宽度，这里取为排版表格能达到的最大宽度——正文宽度`\textwidth`；第2个参数用来确定每列格式，其中标为X的项表示该列的宽度可调，其宽度值由表格总宽度确定。标为X的列一般选为单元格内容过长而无法置于一行的列，这样使得该列内容能够根据表格总宽度自动分行。若列格式中存在不止一个X项，则这些标为X的列的列宽相同，因此，一般不将内容较短的列设为X。标为X的列均为左对齐，因此其余列一般选为l（左对齐），这样可使得表格美观，但也可以选为c或r。

3.4.2 对物理量符号进行注释的情况

The condition when physical symbols need to be annotated

为使得对公式中物理量符号注释的转行与破折号“——”后第一个字对齐，此处最好采用表格环境。此表格无任何线条，左对齐，且在破折号处对齐，一共有“式中”二字、物理量符号和注释三列，表格的总宽度可选为文本宽度，因此应该采用tabularx环境。由tabularx环境生成的对公式中物理量符号进行注释的公式如式(3-1)所示。

$$\ddot{\boldsymbol{\rho}} - \frac{\mu}{R_t^3} \left(3\mathbf{R}_t \frac{\mathbf{R}_t \boldsymbol{\rho}}{R_t^2} - \boldsymbol{\rho} \right) = \mathbf{a} \quad (3-1)$$

式中 $\boldsymbol{\rho}$ ——追踪飞行器与目标飞行器之间的相对位置矢量；
 $\ddot{\boldsymbol{\rho}}$ ——追踪飞行器与目标飞行器之间的相对加速度；
 \mathbf{a} ——推力所产生的加速度；
 \mathbf{R}_t ——目标飞行器在惯性坐标系中的位置矢量；
 ω_t ——目标飞行器的轨道角速度；
 \mathbf{g} ——重力加速度， $= \frac{\mu}{R_t^3} \left(3\mathbf{R}_t \frac{\mathbf{R}_t \boldsymbol{\rho}}{R_t^2} - \boldsymbol{\rho} \right) = \omega_t^2 \frac{R_t}{p} \left(3\mathbf{R}_t \frac{\mathbf{R}_t \boldsymbol{\rho}}{R_t^2} - \boldsymbol{\rho} \right)$ ，这里 p 是目标飞行器的轨道半通径。

其中生成注释部分的代码及其说明如下。

```
\begin{ tabularx }{\textwidth }{@{}l@{\quad}r@{——}X@{}}
```

式中 & symbol-1 & symbol-1的注释内容； \\

& symbol-2 & symbol-2的注释内容； \\

..... ; \\

& symbol-m & symbol-m的注释内容。

```
\end{ tabularx } \vspace {\wordsep}
```

tabularx环境的第1个参数选为正文宽度，第2个参数里面各个符号的意义为：

第1个@{}表示在“式中”二字左侧不插入任何文本，“式中”二字能够在正文中左对齐，若无此项，则“式中”二字左侧会留出一定的空白；

@{\quad}表示在“式中”和物理量符号间插入一个空铅宽度的空白；

@{———}实现插入破折号的功能，它由三个1/2的中文破折号构成；

第2个@{}表示在注释内容靠近正文右边界的地方能够实现右对齐。

由此方法生成的注释内容应紧邻待注释公式并置于其下方，因此不能将代码放入table浮动环境中。但此方法不能实现自动转页接排，可能会在当前页剩余空间不够时，全部移动到下一页而导致当前页出现很大空白。因此在需要转页处理时，还请您手动将需要转页的代码放入一个新的tabularx环境中，将原来的一个tabularx环境拆分为两个tabularx环境。

若想获得绘制表格的更多信息，请参见网络上的 Tables in L^AT_EX 2_ε: Packages and Methods 文档。

第 4 章 数学公式的输入方法

4.1 研究生院的公式规范

论文中的公式应另起行，原则上应居中书写，与周围文字留有足够的空间区分开。若公式前有文字（如“解”、“假定”等），文字空两格写，公式仍居中写。公式末不加标点。

公式应标注序号，并将序号置于括号内。公式序号按章编排，如第 1 章第一个公式序号为“(1-1)”。公式的序号右端对齐。

公式较长时最好在等号“=”处转行，如难实现，则可在+、-、 \times 、 \div 运算符处转行，转行时运算符仅书写于转行式前，不重复书写。

文中引用公式时，一般用“见式(1-1)”或“由公式(1-1)”。

公式中用斜线表示“除”的关系时应采用括号，以免含糊不清，如 $a/(b \cos x)$ 。通常“乘”的关系在前，如 $a \cos x/b$ 而不写成 $(a/b) \cos x$ 。

不能用文字形式表示等式，如：刚度 = $\frac{\text{受力}}{\text{受力方向的位移}}$ 。

对于数学公式的输入方法，网络上有一个比较全面权威的文档 **Math mode** 请大家事先大概浏览一下。下面将对学位论文中主要用到的数学公式排版形式进行阐述。

4.2 生成 L^AT_EX 数学公式的两种方法

对于先前没有接触过 L^AT_EX 的人来说，编写 L^AT_EX 数学公式是一件很繁琐的事，尤其是对复杂的数学公式来说，更可以说是一件难以完成的任务。实际上，生成 L^AT_EX 数学公式有两种较为简便的方法，一种是基于 MathType 数学公式编辑器的方法，另一种是基于 MATLAB 商业数学软件的方法，下面将分别对这两种数学公式的生成方法作一下简单介绍。

4.2.1 基于 MathType 软件的数学公式生成方法

MathType 是一款功能强大的数学公式编辑器软件，能够用来在文本环境中插入 Windows OLE 图形格式的复杂数学公式，所以应用比较普遍。但此软件只有 30 天的试用期，之后若再继续使用则需要付费购买才行。网络上有很多破解版

的 MathType 软件可供下载免费使用，笔者推荐下载安装版本号在 6.5 之上的中文破解版。

在安装好 MathType 之后，若在输入窗口中编写数学公式，复制到剪贴板上的仍然是图形格式的对象。若希望得到可插入到 \LaTeX 编辑器中的文本格式对象，则需要对 MathType 软件做一下简单的设置：在 MathType 最上排的按钮中依次选择“参数选项 → 转换”，在弹出的对话框中选中“转换到其它语言（文字）：”，在转换下拉框中选择“Tex -- LaTeX 2.09 and later”，并将对话框最下方的两个复选框全部勾掉，点击确定，这样，再从输入窗口中复制出来的对象就是文本格式的了，就可以直接将其粘贴到 \LaTeX 编辑器中了。按照这种方法生成的数学公式两端分别有标记 $\backslash[$ 和标记 $\backslash]$ ，在这两个标记之间才是真正的数学公式代码。

若希望从 MathType 输入窗口中复制出来的对象为图形格式，则只需再选中“公示对象（Windows OLE 图形）”即可。

4.2.2 基于 MATLAB 软件的数学公式生成方法

MATLAB 是矩阵实验室（Matrix Laboratory）的简称，是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件。它是当今科研领域最常用的应用软件之一，具有强大的矩阵计算、符号运算和数据可视化功能，是一种简单易用、可扩展的系统开发环境和平台。

MATLAB 中提供了一个 latex 函数，它可将符号表达式转化为 \LaTeX 数学公式的形式。其语法形式为 latex(s)，其中，s 为符号表达式，之后再将 latex 函数的运算结果直接粘贴到 \LaTeX 编辑器中。从 \LaTeX 数学公式中可以发现，其中可能包含如下符号组合：

$\backslash\text{qqquad}$ =两个空铅(quad)宽度

$\backslash\text{quad}$ =一个空铅宽度

$\backslash;=5/18$ 空铅宽度

$\backslash:=4/18$ 空铅宽度

$\backslash,=3/18$ 空铅宽度

$\backslash!= -3/18$ 空铅宽度

\backslash = 一个空格

所以最好将上述符号组合从数学公式中删除，从而使数学公式显得匀称美观。

对于 word 等软件的使用者来说，在我们通过 MATLAB 运算得到符号表达式形式的运算结果时，在 word 中插入运算结果需要借助于 MathType 软件，通过在 MathType 中输入和 MATLAB 运算结果相对应的数学表达形式，之后再 MathType 数学表达式转换为图形格式粘贴到 word 中。实际上，也可以将 MATLAB 中采用 latex 函数运行的结果直接粘贴到 MathType 中，再继续上述步骤，这样可以大大节省输入公式所需要的时间。此方法在 MathType 6.5c 上验证通过，若您粘入到 MathType 中的仍然为从 MATLAB 中导入的代码，请您更新 MathType 软件。

4.3 数学字体

在数学模式下，常用的数学字体命令有如下几种：

`\mathnormal`或无命令 用数学字体打印文本；

`\mathit` 用斜体 (`\itshape`) 打印文本；

`\mathbf` 用粗体 (`\bfseries`) 打印文本；

`\mathrm` 用罗马体 (`\rmfamily`) 打印文本；

`\mathsf` 用无衬线字体 (`\sffamily`) 打印文本；

`\mathtt` 用打印机字体 (`\ttfamily`) 打印文本；

`\mathcal` 用书写体打印文本。

在学位论文撰写中，只需要用到上面提到的 `\mathit`、`\mathbf` 和 `\mathrm` 命令。若要得到 Times New Roman 的数学字体，则需要调用 `txfonts` 宏包（此宏包实际上采用的是 Nimbus Roman No9 L 字体，它是开源系统中使用的免费字体，其字符字体与 Times New Roman 字体几乎完全相同）。表 4-1 中分别列出了得到阿拉伯数字、拉丁字母和希腊字母各种数学字体的命令。

表 4-1 常用数学字体命令一览

Table4-1 Summary of common commands for setting math fonts

	阿拉伯数字 & 大写希腊字母	大小写拉丁字母	小写希腊字母
斜体	<code>\mathit{}</code>	无命令	无命令
粗斜体	<code>\boldsymbol{\mathit{}}</code>	<code>\boldsymbol{}</code>	<code>\boldsymbol{}</code>
直立体	无命令	<code>\mathrm{}</code>	字母后加up
粗体	<code>\mathbf{}</code> 或 <code>\boldsymbol{}</code>	<code>\mathbf{}</code>	<code>\boldsymbol{}</code> 字母后加up

下面列出了一些应采用直立数学字体的数学常数和数学符号。

d、D、p ——微分算子 e ——自然对数之底数
i、j ——虚数单位 π ——圆周率

4.4 行内公式

出现在正文一行之内的公式称为行内公式，例如 $f(x) = \int_a^b \frac{\sin x}{x} dx$ 。对于非矩阵和非多行形式的行内公式，一般不会使得行距发生变化，而 word 等软件却会根据行内公式的竖直距离而自动调节行距，如图 4-1 所示。这三幅图分别

a) 由 L^AT_EX 系统生成的行内公式
a) Inline mode equation derived from L^AT_EX system

b) 由 word 软件生成的 .doc 格式行内公式
b) Inline mode equation displayed as .doc format file derived from word software

c) 由 word 软件生成的 .pdf 格式行内公式
c) Inline mode equation displayed as .pdf format file derived from word software

图 4-1 由 L^AT_EX 和 word 生成的 3 种行内公式屏显效果

Fig.4-1 Three kinds of inline mode equation displayed effects derived from L^AT_EX and word 为 L^AT_EX 和 word 生成的行内公式屏显效果，从图中可看出，在 L^AT_EX 文本含有公式的行内，在正文与公式之间对接工整，行距不变；而在 word 文本含有公式的行内，在正文与公式之间对接不齐，行距变大。因此从这一点来说，L^AT_EX 系统在数学公式的排版上具有很大优势。

L^AT_EX 提供的行内公式最简单、最有效的方法是采用 T_EX 本来的标记——开始和结束标记都写作 \$，例如本节开始的例子可由下面的输入得到。
$$f(x) = \int_a^b \frac{\sin x}{x} dx$$

4.5 行间公式

Displaymath mode equations 位于两行之间的公式称为行间公式，每个公式都是一个单独的段落，例如

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{\|\Delta x_i\| \rightarrow 0} \sum_i f(\xi_i) \Delta x_i$$

除人工编号外， \LaTeX 各种类型行间公式的标记见表 4-2。另外，在自动编号的某

表 4-2 各种类型行间公式的标记

Table4-2 Tags for several kinds of displaymath mode equations

	无编号	自动编号	
单行公式	<code>\begin{displaymath}.....</code> <code>\end{displaymath}</code> 或 <code>\[...]</code>	<code>\begin{equation}</code> <code>\end{equation}</code>
多行公式	<code>\begin{eqnarray*}</code> <code>\end{eqnarray*}</code> <code>\begin{eqnarray}</code> <code>\end{eqnarray}</code>

行公式行尾添加标签 `\nonumber`，可将该行转换为无编号形式。

行间多行公式需采用 `eqnarray` 或 `eqnarray*` 环境，它默认是一个列格式为 `rc1` 的 3 列矩阵，并且中间列的字号要小一些，因此通常只将需要对齐的运算符号（通常为等号 “=”）置于中间列。

4.6 可自动调整大小的定界符

若在左右两个定界符之前分别添加命令 `\left` 和 `\right`，则定界符可根据所包围公式大小自动调整其尺寸，这可从式 (4-1) 和式 (4-2) 中看出。

$$\left(\sum_{k=\frac{1}{2}}^{N^2} \right) \quad (4-1)$$

$$\left(\sum_{k=\frac{1}{2}}^{N^2} \right) \quad (4-2)$$

式 (4-1) 和式 (4-2) 是在 \LaTeX 中分别输入如下代码得到的。

`(\sum_{k=\frac{1}{2}}^{N^2})`

`\left (\sum_{k=\frac{1}{2}}^{N^2}\right)`

`\left` 和 `\right` 总是成对出现的，若只需在公式一侧有可自动调整大小的定界符，则只要用 “.” 代替另一侧那个无需打印出来的定界符即可。

若想获得关于此部分内容的更多信息，可参见 `Math mode` 文档的第 8 章“Brackets, braces and parentheses”。

4.7 数学重音符号

数学重音符号通常用来区分同一字母表示的不同变量，输入方法如下（需要调用 `amsmath` 宏包）：

<code>\acute</code>	\acute{a}	<code>\mathring</code>	\mathring{a}	<code>\underbrace</code>	\underbrace{a}
<code>\bar</code>	\bar{a}	<code>\overbrace</code>	\overbrace{a}	<code>\underleftarrow</code>	\underleftarrow{a}
<code>\breve</code>	\breve{a}	<code>\overleftarrow</code>	\overleftarrow{a}	<code>\underleftrightarrow</code>	\underleftrightarrow{a}
<code>\check</code>	\check{a}	<code>\overleftrightharpoonow</code>	$\overleftrightharpoonow{a}$	<code>\underline</code>	\underline{a}
<code>\ddot</code>	\ddot{a}	<code>\overline</code>	\overline{a}	<code>\underrightarrow</code>	\underrightarrow{a}
<code>\dot</code>	\dot{a}	<code>\overrightarrow</code>	\overrightarrow{a}	<code>\vec</code>	\vec{a}
<code>\grave</code>	\grave{a}	<code>\tilde</code>	\tilde{a}	<code>\widehat</code>	\widehat{a}
<code>\hat</code>	\hat{a}	<code>\underbar</code>	\underbar{a}	<code>\widetilde</code>	\widetilde{a}

当需要在字母 i 和 j 的上方添加重音符号时，为了去掉这两个字母顶上的小点，这两个字母应该分别改用 `\imath` 和 `\jmath`。

如果遇到某些符号不知道该采用什么命令能输出它时，则可通过 [Detexify²](#) 网站来获取符号命令。若用鼠标左键在此网页的方框区域内画出你所要找的符号形状，则会在网页右方列出和你所画符号形状相近的 5 个符号及其相对应的 \LaTeX 输入命令。若所列出的符号中不包括你所要找的符号，还可通过点击“Select from the complete list!” 的链接以得分从低到高的顺序列出所有符号及其相对应的 \LaTeX 输入命令。

最后，笔者建议大家还是要以 `Math mode` 这篇 pdf 文档作为主要参考。若要获得最为标准、美观的数学公式排版形式，可以查查文档中是否有和你所要的排版形式相同或相近的代码段，通过修改代码段以获得你所要的数学公式排版形式。

结 论

学位论文的结论作为论文正文的最后一章单独排写，但不加章标题序号。

结论应是作者在学位论文研究过程中所取得的创新性成果的概要总结，不能与摘要混为一谈。博士学位论文结论应包括论文的主要结果、创新点、展望三部分，在结论中应概括论文的核心观点，明确、客观地指出本研究内容的创新性成果（含新见解、新观点、方法创新、技术创新、理论创新），并指出今后进一步在本研究方向进行研究工作的展望与设想。对所取得的创新性成果应注意从定性和定量两方面给出科学、准确的评价，分（1）、（2）、（3）…条列出，宜用“提出了”、“建立了”等词叙述。

参考文献

- [1] Gao X, Zhang T, Liu Y, et al. 14 Lectures on Visual SLAM: From Theory to Practice[M]. [S.l.]: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [2] 贺勇, 路昊, 王春香, et al. 基于多传感器的车道级高精度地图制作方法 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2015, 35(S1): 274G278.
- [3] Thrun S. Probabilistic robotics[J]. Communications of the ACM, 2002, 45(3): 52–57.
- [4] 贺一家, others. 基于多传感器信息融合的视觉 SLAM 方法研究 [J], 2018.
- [5] Cevher V, Becker S, Schmidt M. Convex optimization for big data: Scalable, randomized, and parallel algorithms for big data analytics[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(5): 32–43.
- [6] Anon. 面向大数据的 CPU/GPU/FPGA 计算平台研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016: 1–23.
- [7] 沈绪榜, 刘泽响, 王茹. 计算机体系结构的统一模型 [J]. 计算机学报, 2007, 30(5): 729–736.
- [8] Abdel-Hamid O, Mohamed A-r, Jiang H, et al. Applying convolutional neural networks concepts to hybrid NN-HMM model for speech recognition[C] // Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2012 IEEE International Conference on. 2012: 4277–4280.
- [9] Yu-min W, Nai-jie G, Xiao-vi Z. Parallel Algorithm of Convolutional Neural Network in Multi-GPU Environment[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2017, 38(3): 536–539.
- [10] Zhang S, Zhang C, You Z, et al. Asynchronous stochastic gradient descent for DNN training[C] // Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013 IEEE International Conference on. 2013: 6660–6663.
- [11] Seide F, Fu H, Droppo J, et al. 1-bit stochastic gradient descent and its application to data-parallel distributed training of speech dnns[C] // Fifteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2014.
- [12] 徐顺苟. GPU 计算在大数据处理中的应用 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015: 8–13.

- [13] Boser B E, Sackinger E, Bromley J, et al. An analog neural network processor with programmable topology[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1991, 26(12): 2017–2025.
- [14] 陈志坚. 基于 FPGA 的卷积神经网络并行结构研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013: 7–13.
- [15] Sackinger E, Boser B E, Bromley J, et al. Application of the ANNA neural network chip to high-speed character recognition[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1992, 3(3): 498–505.
- [16] Mutch J, Lowe D G. Multiclass object recognition with sparse, localized features[C] // Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on: Vol 1. 2006: 11–18.
- [17] Desoli G, Chawla N, Boesch T, et al. 14.1 a 2.9 tops/w deep convolutional neural network soc in fd-soi 28nm for intelligent embedded systems[C] // Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 2017 IEEE International. 2017: 238–239.
- [18] Chen Y-H, Krishna T, Emer J S, et al. Eyeriss: An energy-efficient reconfigurable accelerator for deep convolutional neural networks[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(1): 127–138.
- [19] Jouppi N P, Young C, Patil N, et al. In-datacenter performance analysis of a tensor processing unit[C] // Computer Architecture (ISCA), 2017 ACM/IEEE 44th Annual International Symposium on. 2017: 1–12.
- [20] Agrawal I, Johar S, Santhosh J. A tutor for the hearing impaired (Developed using automatic gesture recognition)[J]. International Journal of Computer Science, Engineering and Applications (IJCSEA), 2011, 1(4): 49–61.
- [21] Panwar M, Mehra P S. Hand gesture recognition for human computer interaction[C] // Image Information Processing (ICIIP), 2011 International Conference on. 2011: 1–7.

攻读硕士学位期间发表的论文

Tongtong Zhang, Weiguo Zhou, Xin Jiang, Yun-hui Liu. "FPGA-based Implementation of Hand Gesture Recognition Using Convolutional Neural Network", 2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS), Shenzhen(Accepted).

哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限

学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的学位论文《室外场景下的三维视觉-激光 SLAM 系统和基于 *ClusterMap* 的重定位方法》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读学位期间独立进行研究工作所取得的成果，且学位论文中除已标注引用文献的部分外不包含他人完成或已发表的研究成果。对本学位论文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。

作者签名：:

日期： 年 月 日

学位论文使用权限

学位论文是研究生在哈尔滨工业大学攻读学位期间完成的成果，知识产权归属哈尔滨工业大学。学位论文的使用权限如下：

(1) 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，并向国家图书馆报送学位论文；(2) 学校可以将学位论文部分或全部内容编入有关数据库进行检索和提供相应阅览服务；(3) 研究生毕业后发表与此学位论文研究成果相关的学术论文和其他成果时，应征得导师同意，且第一署名单位为哈尔滨工业大学。

保密论文在保密期内遵守有关保密规定，解密后适用于此使用权限规定。

本人知悉学位论文的使用权限，并将遵守有关规定。

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

致 谢

衷心感谢导师 XXX 教授对本人的精心指导。他的言传身教将使我终生受益。

感谢 XXX 教授，以及实验室全体老师和同窗们的热情帮助和支持！

本课题承蒙 XXXX 基金资助，特此致谢。

...