



本科毕业设计 (论文)



智能驾驶危险仿真场景的生成

题 目: 和优化算法

学生姓名: 刘东林

学 号: 2123020065

专 业: 人工智能

班 级: 人工智能 2102 班

指导老师: 王海东教授

计算机学院

2025 年 5 月

湖南工商大学本科毕业设计诚信声明

本人郑重声明：所呈交的本科毕业设计 湖南工商大学学位论文 L^AT_EX 模板使用示例 v0.1 是本人在指导老师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，成果不存在知识产权争议，除文中已经注明引用的内容外，本设计不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本设计做出重要贡献的个人和集体均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名:刘东林

日 期: 2025 年 1 月 3 日

摘要

在智能驾驶系统的发展过程中，仿真场景的生成与优化是确保其安全性和可靠性的重要手段。本项目综述了智能驾驶危险仿真场景的生成和优化技术。首先，基于自然驾驶数据，识别并提取出具有代表性的危险驾驶场景，为仿真场景的构建提供了数据基础。其次，通过多维场景自动提取和融合方法，识别出典型的行车场景，如巡线、跟车、邻车切入等，并将其与动态驾驶场景进行融合，以生成更为复杂和真实的测试场景。此外，针对现有测试场景中危险场景数量不足的问题，提出了一种基于聚类分析和重要性采样的测试用例生成和增强方法，有效提高了危险场景的测试覆盖率和测试效率。最后，开发了一种自动化仿真测试平台，实现了测试场景的快速构建、仿真软件的联合调用以及结果分析与报告生成的全自动化执行。通过这些方法，能够显著提高智能驾驶系统在仿真环境中的安全测试效率，为智能驾驶技术的进一步发展提供了有力支持。

关键词：智能驾驶 仿真场景 危险场景生成 自动化技术

ABSTRACT

In the development of intelligent driving systems, the generation and optimization of simulation scenarios are crucial for ensuring their safety and reliability. This project reviews the technologies for generating and optimizing dangerous simulation scenarios in intelligent driving. Firstly, based on natural driving data, representative dangerous driving scenarios are identified and extracted, providing a data foundation for the construction of simulation scenarios. Secondly, through multi-dimensional scenario automatic extraction and fusion methods, typical driving scenarios such as line-following, following, and lane-changing are identified and integrated with dynamic driving scenarios to generate more complex and realistic test scenarios. Additionally, to address the issue of insufficient dangerous scenarios in existing test scenarios, a test case generation and enhancement method based on cluster analysis and importance sampling is proposed, which effectively improves the test coverage and efficiency of dangerous scenarios. Finally, an automated simulation testing platform has been developed, enabling the rapid construction of test scenarios, joint invocation of simulation software, and fully automated execution of result analysis and report generation. These methods can significantly improve the safety testing efficiency of intelligent driving systems in simulation environments, providing strong support for the further development of intelligent driving technology.

Key words: Intelligent Driving Simulation Scenarios Dangerous Scenario Generation Automation Technology

目录

第1章 引言

随着科技的飞速发展，智能驾驶技术逐渐从实验室走向现实道路，成为汽车工业和人工智能领域的重要研究方向。智能驾驶系统通过集成先进的传感器、控制器、执行器以及复杂的算法，实现对车辆的自主控制和决策，旨在提高道路安全性、缓解交通拥堵、降低能源消耗以及提升驾驶舒适性。然而，智能驾驶系统的安全性和可靠性始终是其发展的关键瓶颈。在复杂的道路交通环境中，智能驾驶系统需要面对各种突发状况和潜在危险，如行人突然横穿马路、车辆紧急变道、恶劣天气条件等，这些场景对系统的感知、决策和控制能力提出了极高的要求。

1.1 研究背景

为了在智能驾驶系统投入实际应用之前充分验证其性能，传统的道路测试方法存在诸多局限性。道路测试周期长、成本高，且难以覆盖所有可能的危险场景，特别是那些发生概率较低但后果严重的事故场景。此外，道路测试还存在一定的安全风险，可能对测试人员和周围环境造成威胁。因此，仿真技术应运而生，成为智能驾驶系统测试和验证的重要手段。通过构建虚拟的仿真场景，可以在计算机中模拟真实的道路交通环境，让智能驾驶系统在虚拟世界中“驾驶”，从而在可控、低成本的条件下，全面、高效地评估系统的性能。

在仿真场景的构建过程中，危险场景的生成和优化尤为关键。危险场景是指那些可能导致智能驾驶系统出现错误决策、控制失效或者发生事故的场景。准确地生成和优化这些危险场景，可以帮助研究人员深入理解智能驾驶系统在面对危险时的行为表现，发现系统潜在的缺陷和不足，进而针对性地改进系统的设计和算法，提高系统的鲁棒性和安全性。然而，危险场景的生成并非易事，需要综合考虑道路交通规则、车辆动力学特性、传感器感知范围、环境因素等多种因素，且要保证生成的场景具有高度的真实性和代表性，能够真实反映智能驾驶系统在实际道路中可能遇到的危险情况。

1.2 研究目的和意义

1.2.1 研究目的

本研究旨在深入探讨智能驾驶危险仿真场景的生成和优化技术，以期为智能驾驶系统的安全测试和性能提升提供有力支持。研究目的的具体包括：

系统地梳理和总结现有的智能驾驶危险仿真场景生成方法，分析其优缺点和适用范围，为后续的研究工作奠定理论基础。研究和开发新的危险场景生成算法，能够更高效、更准确地生成多样化的危险场景，提高仿真测试的覆盖率和有效性。探索危险场景的优化策略，通过优化场景的参数设置、布局结构等，使生成的场景更具挑战性和针对性，能够更好地测试智能驾驶系统的极限性能。构建一个完整的智能驾驶危险仿真场景生成

和优化框架，整合数据采集、场景生成、场景优化、仿真测试等环节，为智能驾驶系统的开发和测试提供一套实用的工具和流程。本研究的意义主要体现在以下几个方面：

1.2.2 意义

理论意义：丰富和完善智能驾驶仿真测试领域的理论体系，为智能驾驶危险场景的生成和优化提供新的思路和方法，推动相关学术研究的深入发展。

技术意义：提高智能驾驶仿真测试技术的水平，为智能驾驶系统的开发和测试提供更高效、更可靠的工具，促进智能驾驶技术的成熟和应用。

实际应用意义：通过生成和优化危险仿真场景，能够更全面地评估智能驾驶系统的安全性，提前发现和解决潜在的安全问题，降低智能驾驶系统在实际应用中的风险，为智能驾驶车辆的上路行驶提供安全保障，具有重要的社会价值和经济价值。

1.3 研究方法

数据驱动分析

交通事故数据分析：收集并整理大量的交通事故案例数据，涵盖不同类型的事故（如追尾、侧撞、翻车等）以及事故发生的各种因素（如天气条件、道路状况、车辆类型、驾驶行为等）。运用数据挖掘技术，如关联规则挖掘、聚类分析等，从海量数据中挖掘出事故发生的潜在规律和关键影响因素，识别出常见的危险场景模式。例如，通过分析发现，在雨天湿滑路面上，车辆在高速行驶时容易发生侧滑，进而引发侧撞事故；或者在交通拥堵路段，车辆频繁变道、加塞等行为容易导致追尾事故等。

驾驶行为数据挖掘：采集大量的驾驶行为数据，包括车辆的行驶轨迹、速度、加速度、转向角度、刹车力度等，以及驾驶员的操作行为（如踩油门、踩刹车、打方向盘等）。利用机器学习算法，如随机森林、支持向量机等，对驾驶行为数据进行分类和预测，识别出危险驾驶行为模式。例如，通过分析发现，驾驶员在高速行驶时突然急刹车、急转弯等行为容易导致车辆失控，进而引发事故；或者在跟车过程中，车距过近且跟车速度过快，容易发生追尾事故等。

危险场景类别定义与参数设置

场景分类框架构建：基于数据驱动分析的结果，构建一个系统化的危险场景分类框架。将危险场景按照不同的维度进行分类，如按照事故类型（追尾、侧撞、翻车等）、道路类型（高速公路、城市道路、乡村道路等）、天气条件（晴天、雨天、雪天等）、交通状况（拥堵、畅通等）等。为每一类危险场景设定具体的参数和条件，如车辆的速度范围、加速度范围、转向角度范围、车距范围等。例如，在高速公路追尾场景中，设定车辆的初始速度为 80-120km/h，车距为 10-20 米，加速度为 -5-0m/s² 等。

仿真环境参数配置：使用 CARLA 等仿真软件，根据定义的危险场景类别和参数，设置仿真环境中的各种参数。包括天气参数（如雨量大小、雪量大小、雾浓度等）、光照参数（如太阳高度角、光照强度等）、道路参数（如路面材质、摩擦系数等）、交通密

度参数（如车辆数量、行人数量等），以模拟真实世界中的各种复杂条件。例如，在模拟雨天追尾场景时，设置雨量为中雨，路面摩擦系数降低 20。

手动控制场景实现

Python 脚本编写：利用 Python 语言编写脚本，控制仿真环境中的车辆和行人行为。通过脚本设定车辆的初始位置、速度、加速度、转向角度等参数，以及行人的行走路径、速度等参数。例如，编写一个脚本，让车辆在高速公路的某一车道上以 100km/h 的速度行驶，然后在某一时刻突然急刹车，同时让另一辆车以更高的速度从后方驶来，模拟追尾场景。

初始状态配置：在仿真开始前，配置好场景的初始状态。包括车辆的初始位置、速度、方向等，以及行人的初始位置、速度等。确保场景的初始状态符合设定的危险场景类别和参数。例如，在模拟行人横穿马路场景时，将行人初始位置设定在道路一侧的人行道上，速度设定为正常步行速度，车辆初始位置设定在距离行人一定距离的道路上，速度设定为正常行驶速度。

强化学习算法应用

DQN 算法选择与实现：选择 DQN (Deep Q-Network) 强化学习算法，用于在 CARLA 环境中训练和测试模型，生成对抗性场景。DQN 算法通过深度神经网络来近似 Q 值函数，能够处理高维的状态空间和动作空间，适用于复杂的仿真环境。实现 DQN 算法时，需要设计合适的状态表示、动作空间、奖励函数等。例如，状态表示可以包括车辆的速度、位置、加速度、周围环境信息等；动作空间可以包括车辆的加速度、转向角度等；奖励函数可以设定为避免碰撞、保持安全距离等。

对抗性场景生成：在 CARLA 环境中，利用 DQN 算法训练智能体，使其能够生成对自动驾驶系统构成挑战的对抗性场景。智能体通过与环境的交互，学习如何在复杂场景中做出最佳决策，生成能够有效测试自动驾驶系统性能的场景。例如，智能体可以学习如何在交通拥堵路段中，通过频繁变道、加塞等行为，制造出复杂的交通环境，考验自动驾驶系统的决策和控制能力。

数据收集与效果量化

传感器数据采集：在仿真过程中，收集车辆的传感器数据，包括速度、位置、加速度、转向角度、刹车力度等。这些数据可以通过仿真软件提供的 API 接口获取。例如，在 CARLA 中，可以使用车辆的传感器组件来获取车辆的实时数据。

事件记录：记录仿真中的关键事件，如碰撞、紧急制动、车道偏离等。这些事件可以通过仿真软件的事件监听机制来实现。例如，在 CARLA 中，可以使用事件监听器来监听车辆的碰撞事件，并记录碰撞发生的时间、位置、速度等信息。

评价指标设定：设定量化仿真效果的评价指标，如碰撞率、反应时间、安全距离保持率等。这些指标可以用于评估生成的危险场景对自动驾驶系统的影响。例如，碰撞率可以表示为在一定仿真时间内，发生碰撞的次数与总仿真次数的比值；反应时间可以表示为自动驾驶系统从检测到危险到做出反应的时间间隔。

数据分析：使用统计方法对收集到的数据进行分析，评估场景生成的效果。例如，

通过计算碰撞率的平均值、标准差等统计量，分析不同危险场景对自动驾驶系统的影响程度；或者通过绘制反应时间的分布图，了解自动驾驶系统在不同场景下的反应速度。

结果展示

图表展示：使用数据可视化工具（如 Matplotlib、Seaborn）制作图表展示仿真结果。例如，绘制碰撞率随仿真时间变化的折线图，或者绘制反应时间的直方图，直观地展示仿真结果。

视频展示：剪辑仿真视频，直观展示场景和车辆行为。例如，将仿真过程中生成的对抗性场景录制为视频，展示车辆在复杂交通环境中的行驶情况，以及自动驾驶系统在面对危险时的决策和控制过程。

场景实现与验证

API 应用：使用 CARLA API 实现场景脚本开发，自动化场景生成过程。通过 API 调用，可以实现对车辆、行人、环境等的控制，以及对仿真过程的监控和数据采集。

仿真测试：在仿真环境中测试场景，验证其合理性和挑战性。通过多次仿真测试，观察场景的运行情况，检查是否存在不合理或不符合预期的情况。根据测试结果调整场景参数，优化场景设计。例如，在测试行人横穿马路场景时，观察行人是否能够安全地通过马路，自动驾驶系统是否能够及时做出避让反应等。

仿真场景构建技术研究

研究综述：对场景自动构建方法进行研究综述，总结目前存在的各种方法，如基于规则的方法、基于数据驱动的方法、基于模型的方法等，分析其优缺点和适用范围。

算法设计：设计基于复杂度组合理论的测试场景生成算法。该算法通过组合不同的场景元素（如车辆、行人、障碍物等）和参数（如速度、位置等），生成具有不同复杂度的测试场景。在 CARLA 环境中实现和测试算法，验证其有效性。

仿真测试技术研究

评价方法体系建立：建立智能驾驶系统测试评价方法体系，设计测试流程。该体系包括测试目标的设定、测试用例的选择、测试过程的执行、测试结果的分析等环节。

测试平台搭建：搭建仿真场景测试平台，执行大规模自动化测试。该平台可以实现对多个测试用例的自动执行、数据采集和结果分析，提高测试效率和准确性。

1.4 创新点

多源数据融合的场景生成方法

融合多种数据源：本研究提出了一种融合多源数据的危险场景生成方法，综合考虑了车辆行驶数据、交通流量数据、环境感知数据等。通过融合这些数据，能够更全面地了解道路交通环境，生成更为真实和多样化的危险场景。例如，结合车辆行驶数据和交通流量数据，可以模拟出在交通拥堵路段中，车辆频繁变道、加塞等行为引发的复杂交通场景；结合环境感知数据，可以模拟出在恶劣天气条件下，车辆行驶的困难情况，如雨天路面湿滑导致的车辆失控等。

提高场景的真实性：多源数据融合方法能够提高生成场景的真实性。传统的单一数

据源生成方法可能存在数据局限性，无法全面反映道路交通环境的复杂性。而多源数据融合方法通过整合不同来源的数据，能够弥补单一数据源的不足，生成的场景更加接近真实世界中的交通情况，为自动驾驶系统的测试提供了更可靠的依据。

基于强化学习的场景优化算法

动态调整场景参数：本研究设计了一种基于强化学习的危险场景优化算法，通过智能体与仿真环境的交互学习，动态调整场景参数。智能体在仿真环境中不断尝试不同的场景参数组合，根据奖励函数的反馈，学习到最优的场景参数设置，使生成的场景更具挑战性和针对性。例如，在模拟车辆超车场景时，智能体可以动态调整前车的速度、加速度以及两车间的距离等参数，生成更加危险的超车场景，有效测试自动驾驶系统的决策和控制能力。

提高场景的挑战性：强化学习算法能够提高生成场景的挑战性。传统的场景生成方法可能生成的场景较为简单，难以充分测试自动驾驶系统的极限性能。而强化学习算法通过不断优化场景参数，能够生成更加复杂和危险的场景，逼迫自动驾驶系统在极端情况下做出决策，从而更全面地评估系统的性能。

自动化仿真测试框架的构建

全流程自动化：本研究构建了一个完整的智能驾驶危险仿真场景生成和优化框架，实现了从数据采集到仿真测试的全流程自动化。该框架包括数据采集与处理模块、场景生成模块、场景优化模块、仿真测试模块等，各模块之间紧密协作，自动完成数据的采集、处理、场景的生成、优化和测试等环节，提高了仿真测试的效率和便捷性。例如，在数据采集与处理模块中，自动从多个数据源采集数据并进行预处理；在场景生成模块中，根据预处理后的数据自动生成危险场景；在仿真测试模块中，自动执行仿真测试并收集测试数据。

提高测试效率：自动化仿真测试框架能够显著提高测试效率。传统的手动测试方法需要耗费大量的人力和时间，而自动化框架可以自动执行测试任务，减少了人工干预，提高了测试的效率。同时，自动化框架还可以实现大规模的测试，一次性测试多个场景和参数组合，获取大量的测试数据，为自动驾驶系统的评估和优化提供了丰富的数据支持。

多模态数据可视化展示技术

直观展示仿真结果：本研究采用了多模态数据可视化展示技术，将仿真结果以多种方式直观展示出来。除了传统的图表展示外，还通过视频展示、3D 可视化等方式，直观地呈现场景和车辆行为。例如，将仿真过程中生成的对抗性场景录制为视频，展示车辆在复杂交通环境中的行驶情况；或者通过 3D 可视化技术，将车辆的传感器数据和环境信息以三维模型的形式展示出来，使研究人员能够更直观地了解车辆在仿真场景中的感知和决策过程。

增强结果的可理解性：多模态数据可视化展示技术能够增强结果的可理解性。单一的图表展示可能难以全面反映仿真结果的复杂性，而多模态展示方式可以提供更多的信息维度，使研究人员能够更全面地理解仿真结果。例如，通过视频展示，研究人员可以

观察到车辆在仿真场景中的动态行为，了解车辆在不同情况下的反应和决策过程；通过3D可视化，研究人员可以直观地看到车辆的传感器感知范围和环境信息，更好地理解车辆的感知和决策机制。

我们不建议模板使用者更改原有模板的结构，但如果您确实需要，请务必先充分阅读本模板的使用说明并了解相应的`LATEX`模板设计知识。

第 2 章 图表示例

2.1 图片与布局

2.1.1 插图

图片可以通过`\includegraphics` 指令插入，我们建议模板使用者将文章所需插入的图片源问卷放置在 `images` 目录中，另外，矢量图片应使用 PDF 格式，位图照片则应使用 JPG 格式（`LaTeX` 不支持 TIFF 格式）。具有透明背景的栅格图可以使用 PNG 格式。

下面是一个简单的插图示例。



图 2-1 插图示例

如果一个图由多个分图（子图）组成，应通过 (a),(b),(c) 进行标识并附注在分图（子图下方）。目前子图标识不居中问题没有解决，预计下个版本修复。

2.1.2 横向布局

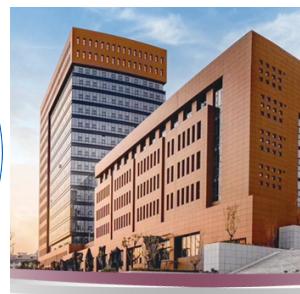
模板提供常见的图片布局，比如单图布局??，另外还有横排布局如下：



(a) test



(b) test



(c) test



(d) test

图 2-2 图片横排布局示例

2.2 纵向布局

纵向布局如图??



(a) test



(b) test

图 2-3 图片纵向布局示例

2.3 坚排多图横排布局



(a) aaa

(b) bbb

图 2-4 图片坚排多图横排布局

竖排多图横排布局如图??所示。注意看 (a)、(b) 编号与图关系

2.4 横排多图竖排布局

潮涌湘江阔，鹏翔天地宽。湖南工商大学正以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引，秉持“新工科+新商科+新文科”与理科融合发展的思路，努力形成一流的理念、一流的目标、一流的标准、一流的品质、一流的机制，打造创新工商、人文工商、艺术工商、体育工商、数智工商、绿色工商、幸福工商，建设读书求知的好园地，乘高等教育改革奋进的东风，朝着创新型一流工商大学的愿景扬帆远航。

横排多图竖排布局如图??所示。注意看 (a)、(b) 编号与图关系。



图 2-5 图片横排多图竖排布局

第3章 表格插入示例

表 3-1 学校文件里对表格的要求不是很高，不过按照学术论文的一般规范，表格为三线表。

	A	B	C	D	E
1	212	414	4	23	fgw
2	212	414	v	23	fgw
3	212	414	vfwe	23	嗯
4	212	414	4fwe	23	嗯
5	af2	4vx	4	23	fgw
6	af2	4vx	4	23	fgw
7	212	414	4	23	fgw

表格如表??所示，**latex** 表格技巧很多，这里不再详细介绍。

潮涌湘江阔，鹏翔天地宽。湖南工商大学正以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引，秉持“新工科+新商科+新文科”与理科融合发展的思路，努力形成一流的理念、一流的目标、一流的标准、一流的品质、一流的机制，打造创新工商、人文工商、艺术工商、体育工商、数智工商、绿色工商、幸福工商，建设读书求知的好园地，乘高等教育改革奋进的东风，朝着创新型一流工商大学的愿景扬帆远航。

第4章 公式插入示例

潮涌湘江阔，鹏翔天地宽。湖南工商大学正以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引，秉持“新工科+新商科+新文科”与理科融合发展的思路，努力形成一流的理念、一流的目标、一流的标准、一流的品质、一流的机制，打造创新工商、人文工商、艺术工商、体育工商、数智工商、绿色工商、幸福工商，建设读书求知的好园地，乘高等教育改革奋进的东风，朝着创新型一流工商大学的愿景扬帆远航。

公式插入示例如公式(??)所示。

$$\gamma_x = \begin{cases} 0, & \text{if } |x| \leq \delta \\ x, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.1)$$

第 5 章 引用文献标注

文献标注和索引的处理一直是学术写作的一个麻烦事，特别是在 word 环境下。`latex` 中我们只需要编辑（或直接获取）BibTeX 格式索引文件然后在正文中使用`\cite` `\citet` 等指令进行引用标注就可以。下面介绍在文章中引用指令的具体使用方法。

5.1 顺序编码

根据学校要求，参考文献标注用中括号上标形式进行标注。使用方式与效果如下表所展示

<code>\cite{knuth1984texbook}</code>	⇒ knuth1984texbook
<code>\citet{knuth1984texbook}</code>	⇒ knuth1984texbook<empty c
<code>\citep{knuth1984texbook}</code>	⇒ knuth1984texbook
<code>\cite{knuth1984texbook, lamport1994latex}</code>	⇒ knuth1984texbook, lamport1994latex

5.2 获取 BibTeX 格式索引

获取参考文献的 BibTeX 格式索引有两种方式

- 通过 Google Scholar 或者百度学术等学术文献搜索引擎获取，自行编辑.bib 文件
- 通过 Zotero 等学术文献整理软件，添加所有的引用文献至库中，导出对应的.bib 文件

编译带参考文献的文章时，我们需要两次编译过程。我们提供了对应的自动化脚本，以及配合 vscode latex 插件的任务流程，帮助模板使用者进行编译。

5.3 参考文献插入示例

LaTeX^{lamport1994latex} 插入参考文献最方便的方式是使用 `bibliography{pritchard1969statistical}`，大多数出版商的论文页面^{lamport1994latex,pritchard1969statistical}都会有导出 bib 格式参考文献的链接，把每个文献的 bib 放入“`hutbthesis_main.bib`”，然后用 `bibkey` 即可插入参考文献。

潮涌湘江阔，鹏翔天地宽。湖南工商大学正以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引，秉持“新工科 + 新商科 + 新文科”与理科融合发展的思路，努力形成一流的理念、一流的目标、一流的标准、一流的品质、一流的机制，打造创新工商、人文工商、艺术工商、体育工商、数智工商、绿色工商、幸福工商，建设读书求知的好园地，乘高等教育改革奋进的东风，朝着创新型一流工商大学的愿景扬帆远航。

致谢

感谢制作出中南大学本科学位论文 LaTeX 模板的 edwardzcn。

感谢制作出中南大学博士学位论文 LaTeX 模板的郭大侠 @CSGrandeur。

感谢添加本科学位论文样式支持的 @BlurryLight。

感谢帮助重构项目并进行测试的 @burst-bao 以及为独立使用 LaTeX 进行毕业论文写作提供宝贵经验的 16 级的姜析阅学长。

感谢 CTeX-kit 提供了 LaTeX 的中文支持。

感谢上海交通大学学位论文 LaTeX 模板的维护者们 @sjtug 和清华大学学位论文 LaTeX 模板的维护者们 @tuna 给予的宝贵设计经验。

感谢所有为模板贡献过代码的同学们！

附录 A 附录代码

附录部分用于存放这里用来存放不适合放置在正文的大篇幅内容、典型如代码、图纸、完整数学证明过程等内容。

A.1 堆溢出检测算法

算法 A.1 堆溢出检测算法

- 1: **if** $\beta \in \mathbb{N}^* \wedge \Delta_\beta = \Delta_{\beta-1} \wedge \beta < S$ **then**
 - 2: 正常写入
 - 3: **else if** $\beta \in \mathbb{N}^* \wedge \Delta_\beta \neq \Delta_{\beta-1} \wedge \beta \geq S$ **then**
 - 4: 发生堆溢出
 - 5: **end if**
-

A.2 KMP 算法 C++ 描述

```
const int maxn=2e5+5;
int nt[maxn];
int aa[maxn], bb[maxn];
int a[maxn], b[maxn];
int n;
//参数为模板串和next数组
//字符串均从下标0开始
void kmpGetNext(int *s, int *Next)
{
    Next[0]=0;
    //    int len=strlen(s);
    for( int i=1, j=0; i<n; i++)
    {
        while( j&&s[i]!=s[j]) j=Next[j];
        if( s[i]==s[j]) j++;
        Next[i+1]=j;
    }
    //    Next[len]=0;
}
```

```
int kmp( int *ss , int *s , int *Next)
{
    kmpGetNext(s , Next);
    // 调试输出 Next 数组
    // int len=strlen(s);
    // for( int i=0;i<=n; i++)
    //     cout<<Next[i]<<" ";
    // cout<<endl;

    // int ans=0;
    // int len1=strlen(ss);
    // int len2=strlen(s);
    for( int i=0,j=0;i<2*n; i++) // 倍长
    {
        while( j&&ss[ i%n ]!=s[ j ]) j=Next[ j ];
        if( ss[ i%n ]==s[ j ]) j++;
        if( j==n ){
            return 1;
        }
    }

    return 0;
}

int main( void )
{
    while( cin>>n)
    {
        memset(a,0,sizeof(a));
        memset(b,0,sizeof(b));
        rep(i,0,n) cin>>aa[ i ];
        rep(i,0,n) cin>>bb[ i ];
        sort(aa,aa+n);
        sort(bb,bb+n);
        rep(i,0,n-1){
            a[ i ]=aa[ i+1 ]-aa[ i ];
            b[ i ]=bb[ i+1 ]-bb[ i ];
        }
    }
}
```

```
a[n-1]=360000+aa[0]-aa[n-1];
//           rep(i,0,n) cout<<a[i]<<" ";
//           cout<<endl;
b[n-1]=360000+bb[0]-bb[n-1];
//           rep(i,0,n) cout<<b[i]<<" ";
//           cout<<endl;
if(kmp(a,b,nt))
    cout<<"possible"<<endl;
else cout<<"impossible"<<endl;
}
return 0;
}
```

附录 B 康托尔辩辞录：数学的自由与制约

（录自康托尔：《一般集合论基础》，1883）

数学在其发展中是完全自由的，它只受下述自明的关注所制约，即它的概念既要内在地不存在矛盾，还要参与确定与此前形成的，已经存在着地和已被证明地概念之关系（借助定义贯穿起来）。特别地，在引入新数时，数学只遵循：在给出它们地定义时使之具有某种确定性，并且在某些情况下，使之与老数有某种关系，在特定地场合中这种关系一定会使它们（新数和老数）互相区别开来，只要一个数满足这些条件，数学只能而且必须把它看作是存在的和实在的东西，这正是我……关于为什么必须把有理数、无理数和复数看作与有限正整数一样是实在的所建议的理由。

我相信，没有必要害怕，许多人是害怕，这些原则含有对于科学的危险，一方面，实行造出新数的自由必须服从所设计的条件，但这些条件给任意性留下的活动空间是非常小的。而且，每一数学概念在其自身之中也带有必要的矫正物；如果它没有收获也不合适（它的无用很快就会表明这一点），那么它将由于没有成功而被丢弃。另一方面，在我看来，对于数学研究工作的任何多余的限制只会随之而带来更大的危险，由于实际上并没有任何理由可说明它是由科学的本质推断出来的，它的危险就更大了，而数学的本质恰恰在于它的自由。

如果高斯、柯西、阿贝尔、雅可比、狄利克雷、魏尔斯特拉斯、埃尔米特和黎曼总是被束缚而拿他们的新想法去臣服于形而上学的控制，那么，我们今日就不可能为现代函数论的雄伟建筑而高兴，现代函数论的设计和矗立是完全自由的，毫无短视的瞬间目的……。如果福克斯、庞加莱和其他许多杰出的智者受外来影响所包围和限制，我们就会见不到他们带给微分方程论的巨大的推动，还有，如果枯莫尔不是斗胆地（大有成效者）把所谓的“理想”数引入数论，我们今天也无从去羡慕钦佩克罗内克和戴德金在代数和算术上十分重要和杰出的工作。

因此，如已说明的，数学是要脱离形而上学的桎梏而完全自由地发展 …