



南京邮电大学
Nanjing University of Posts and Telecommunications

厚德、弘毅、求是、笃行

点云配准加速硬件设计与实现

——毕业论文答辩——

B20030119 汪宇翔

2024 年 6 月 6 号

—— 信达天下 · 自强不息 ——



目录

01

选题背景及意义

求知若渴，朝夕不倦

02

研究过程与方法

旁稽博采，格物致知

03

实验结果

知行合一，行以致远

04

总结与展望

寒木春华，理想可期



01

PART ONE

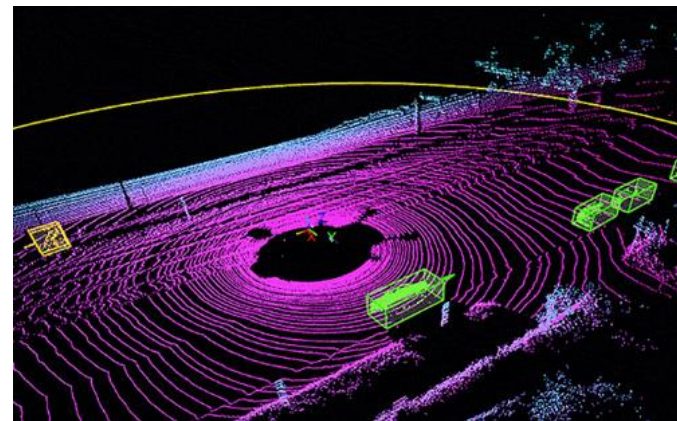
选题背景及意义

求知若渴，朝夕不倦

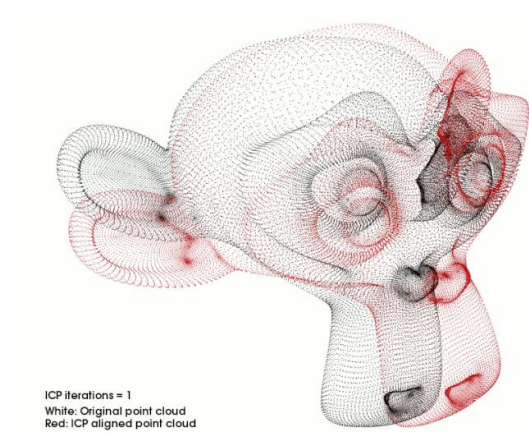
选题背景

随着3D技术的发展，越来越多的人开始关注三维场景，其中 **点云** 作为用来表征三维场景的重要手段，关注度也越来越高。

在点云的各种应用中，**点云配准** 正在发挥着重要的作用



3D点云标注示意图



点云配准示意图

选题背景

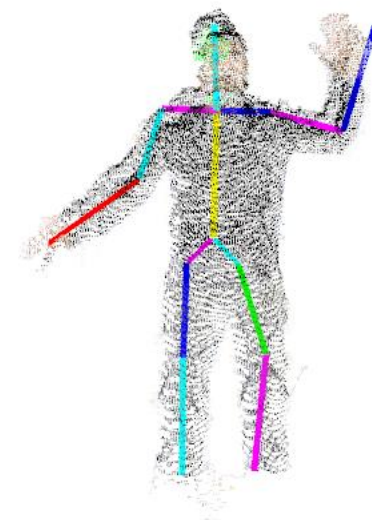
点云配准的各项应用



(a) 三维重建示意图。通过点云恢复原始3D物体信息



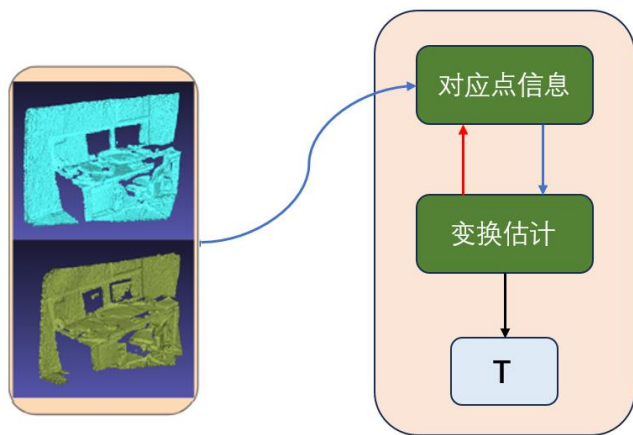
(b) 三维定位示意图。将局部点云定位到全局点云中并进行配准



(c) 姿态估计示意图。通过点云估计智能体姿态信息

选题背景

点云配准问题定义 (传统ICP配准)



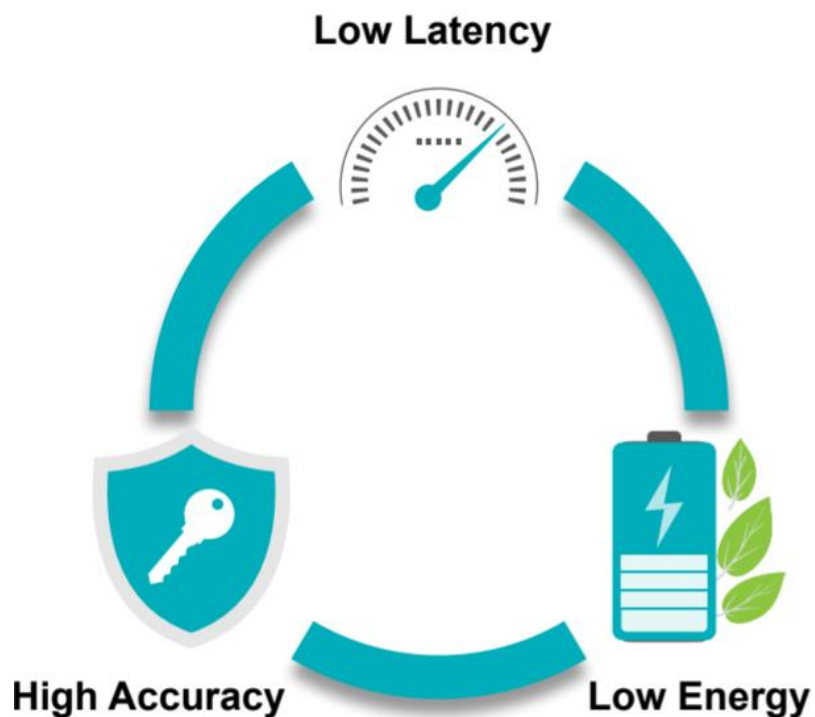
ICP配准算法流程图

- **方法：**基于优化的点云配准方法、基于特征学习的点云配准方法以及端到端学习的配准方法

- **ICP配准流程：**给定两个输入点云，迭代估计两帧点云之间的对应关系和变换矩阵。
 - 对应点搜索是在目标点云中找到源点云中每一个点的对应点。
 - 变换矩阵估计是利用对应点关系估算变换矩阵，包括旋转矩阵和平移矩阵。
 - 这两个阶段将反复进行，以找到最佳变换

选题意义

低延迟：与现实场景进行实时交互

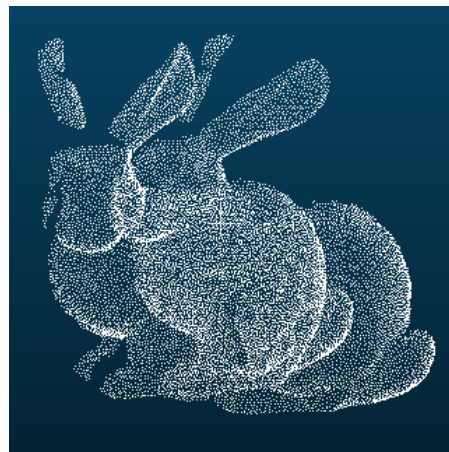
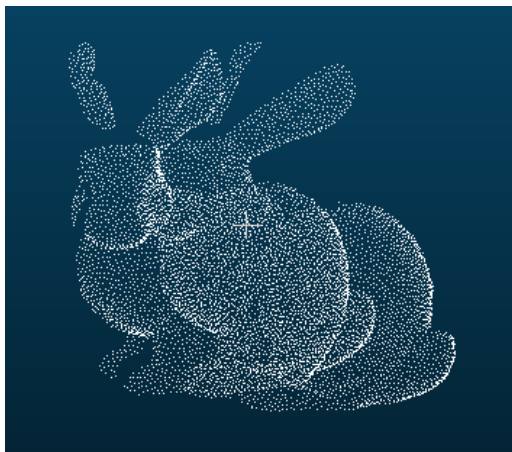
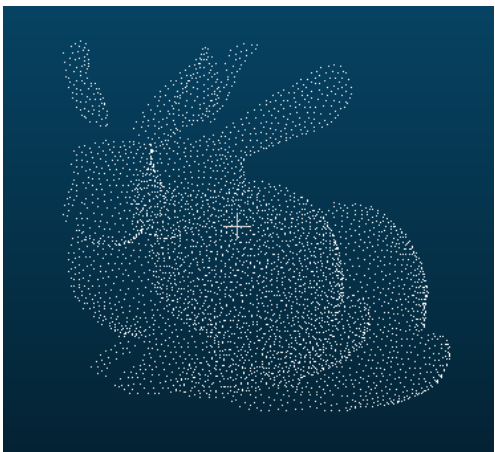


高准确性：满足自动驾驶等场景的严格要求

低功耗：常常部署在边缘设备中

选题意义

挑战一：如何高效地处理大规模点云数据



点云越多



信息越丰富

难题？

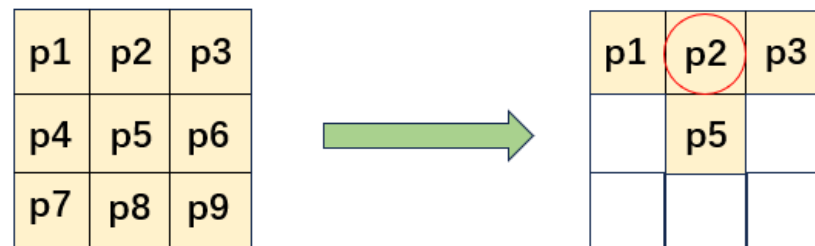
- 更多的 计算单元
- 更多的 数据搬运
- 更长的 响应时间

选题意义

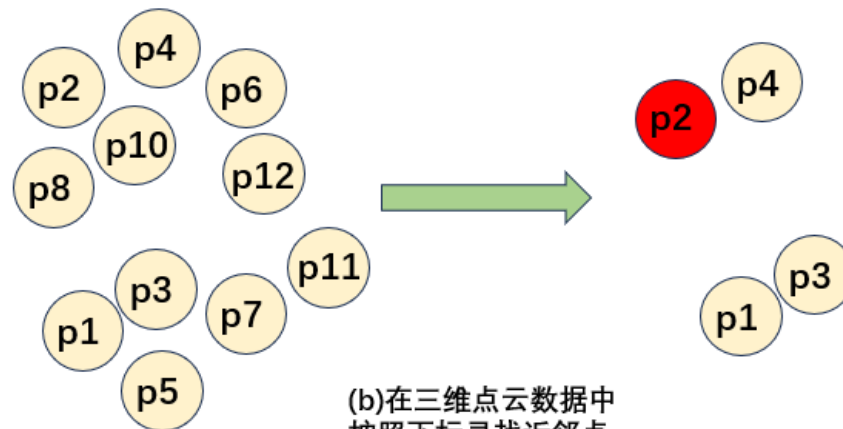
挑战二：如何高效的进行近邻搜索

对应点搜索是在目标点云中找到源点云中每一个点的对应点，在ICP的算法过程中，将目标点云中距离原点云最近的点视为其对应点。

点云数据是**非结构化的**，不能像2D图像数据那样按照下标轻松找到近邻点



(a)在二维图像数据中按照下标寻找近邻点



(b)在三维点云数据中按照下标寻找近邻点



南京邮电大学
Nanjing University of Posts and Telecommunications

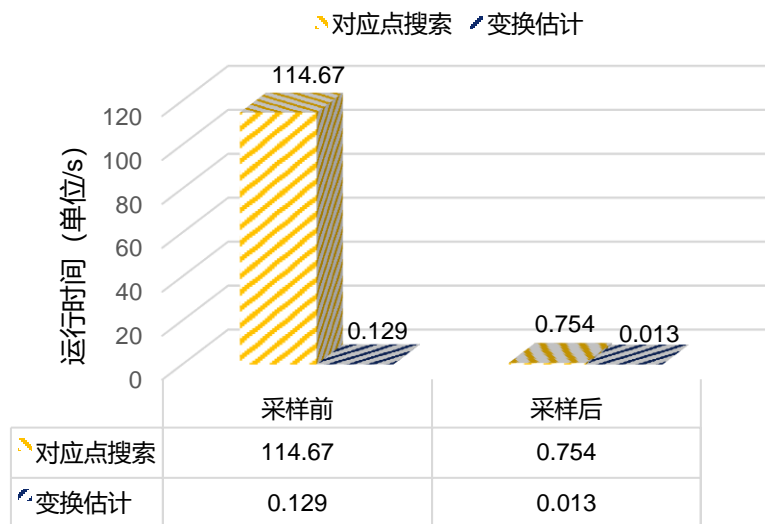
02

PART TWO

研究过程与方法

旁稽博采，格物致知

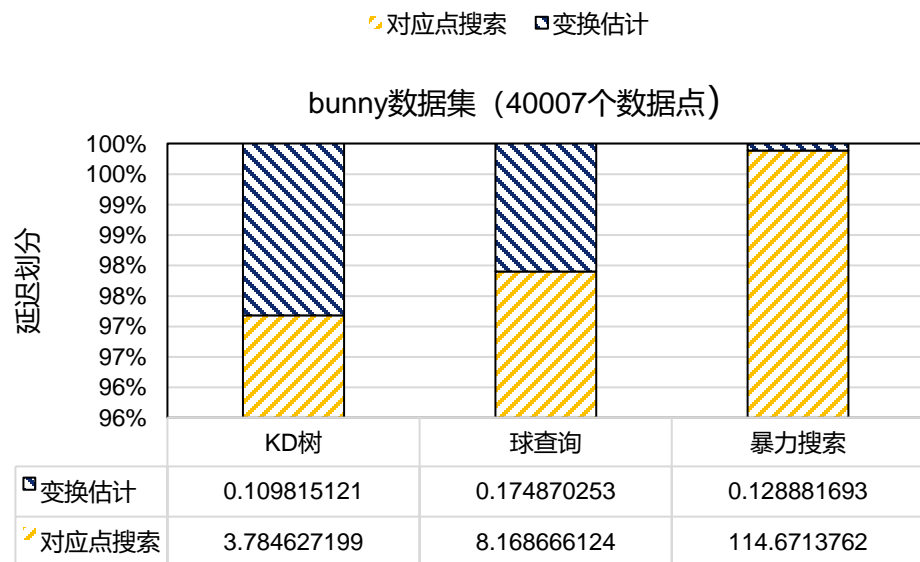
动机



点云规模大?



通过 **下采样** 的方式
降低点云规模

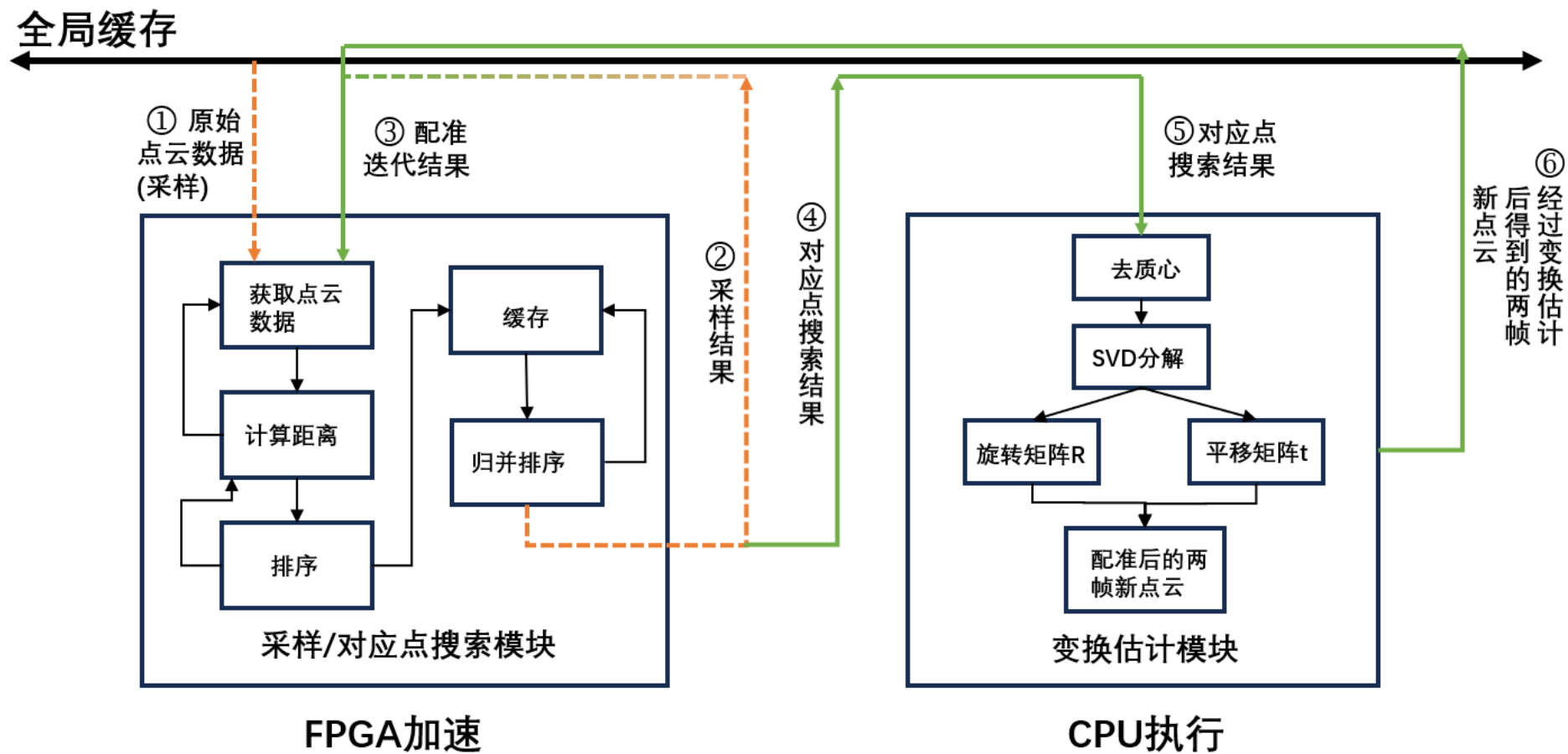


对应点搜索步骤花费时间长?



设计 **专用加速模块**
加速对应点搜索步骤

整体架构——点云配准加速器

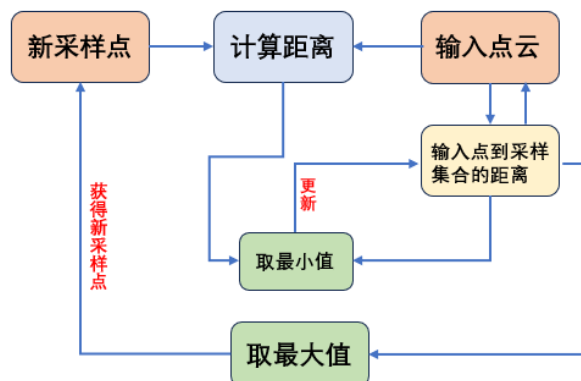


设计思路 —— 将采样/对应点搜索模块映射到一个加速模块中

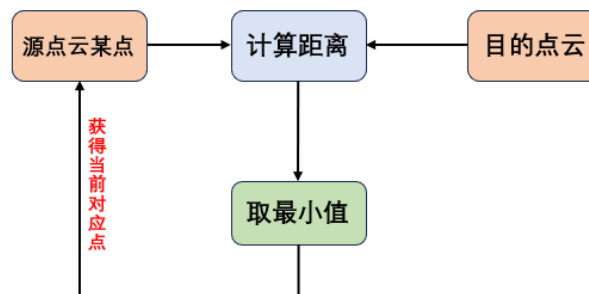


核心观察：最远点采样和对应点搜索都是基于 **距离比较** 实现的

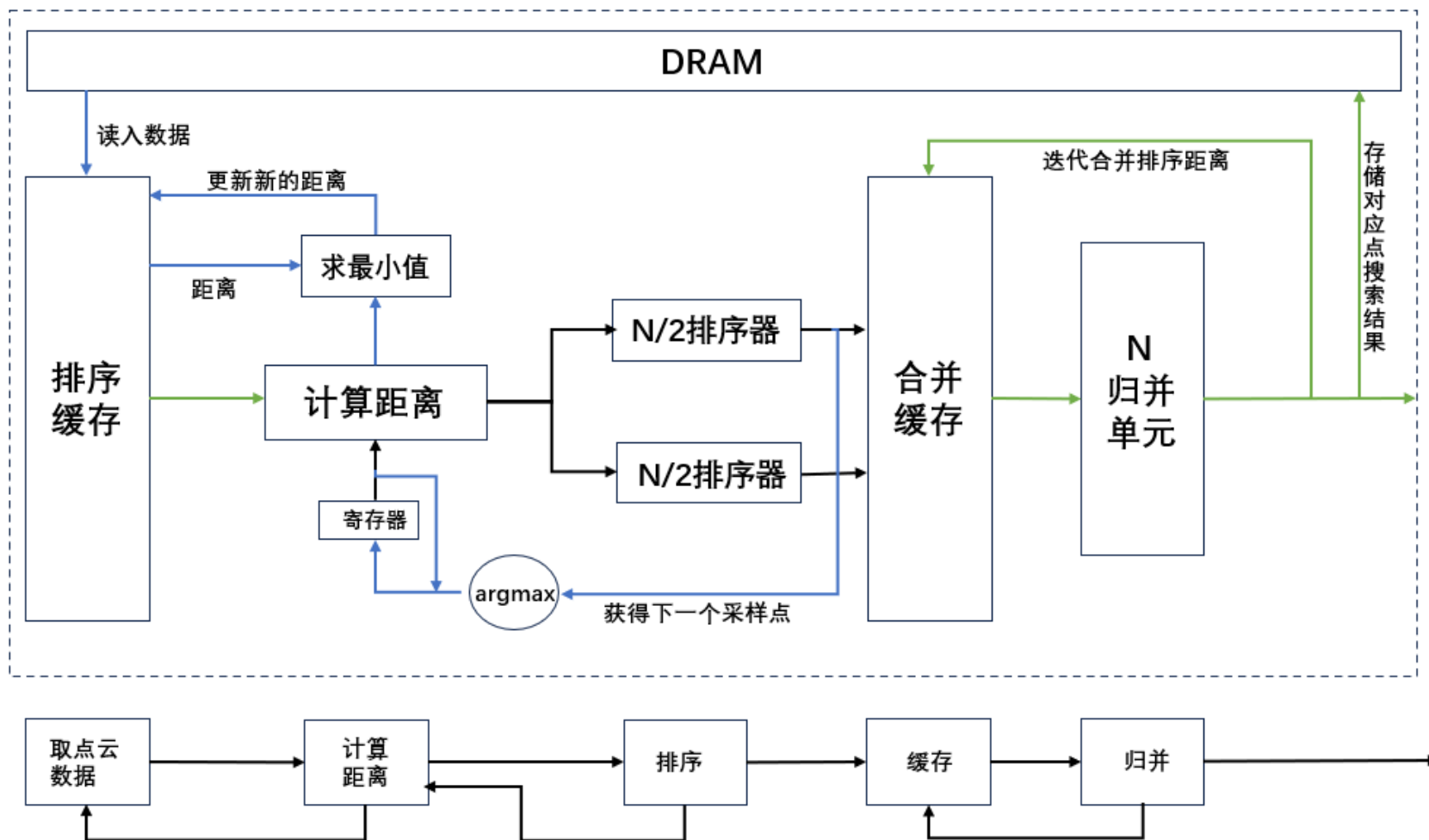
最远点采样：



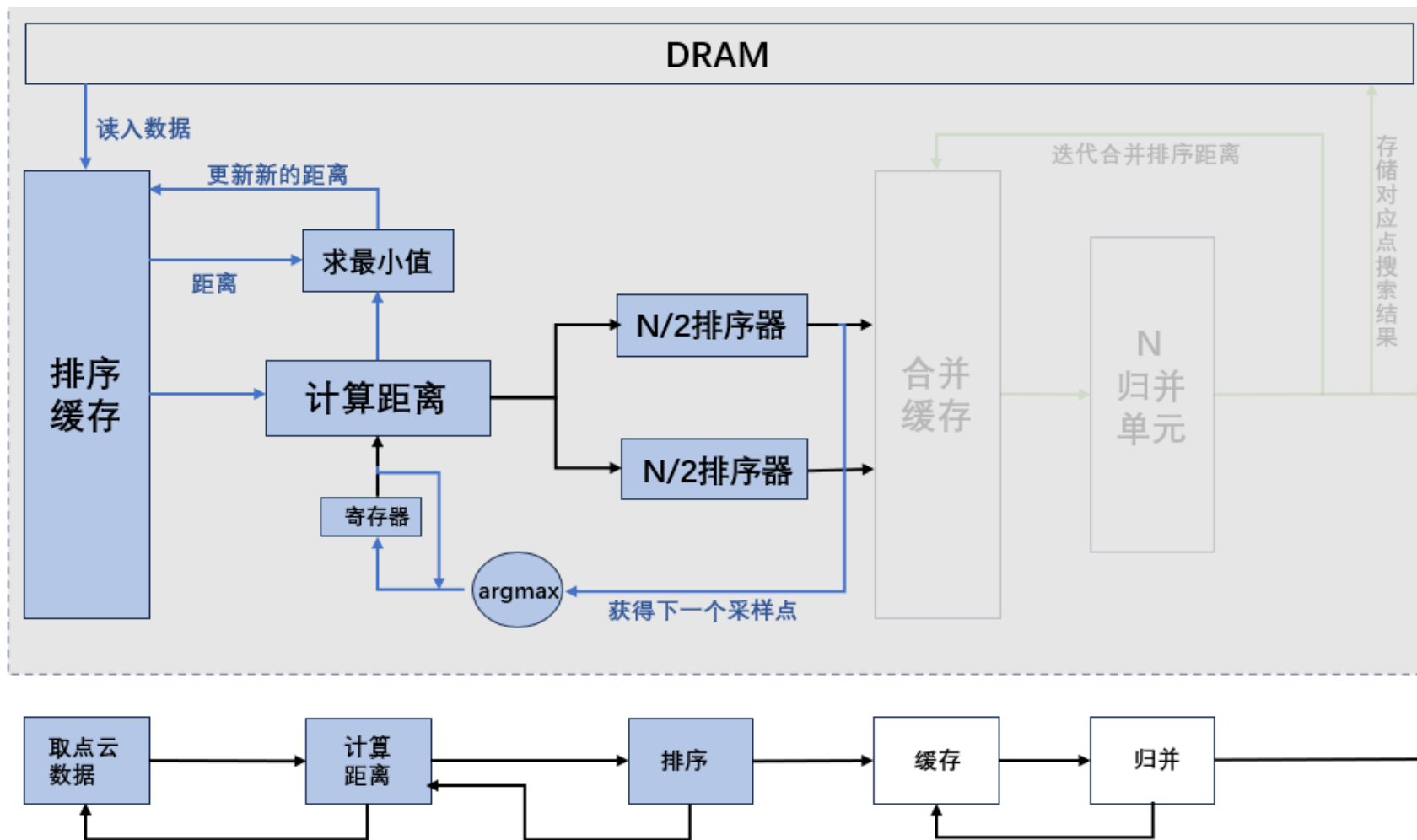
对应点搜索：



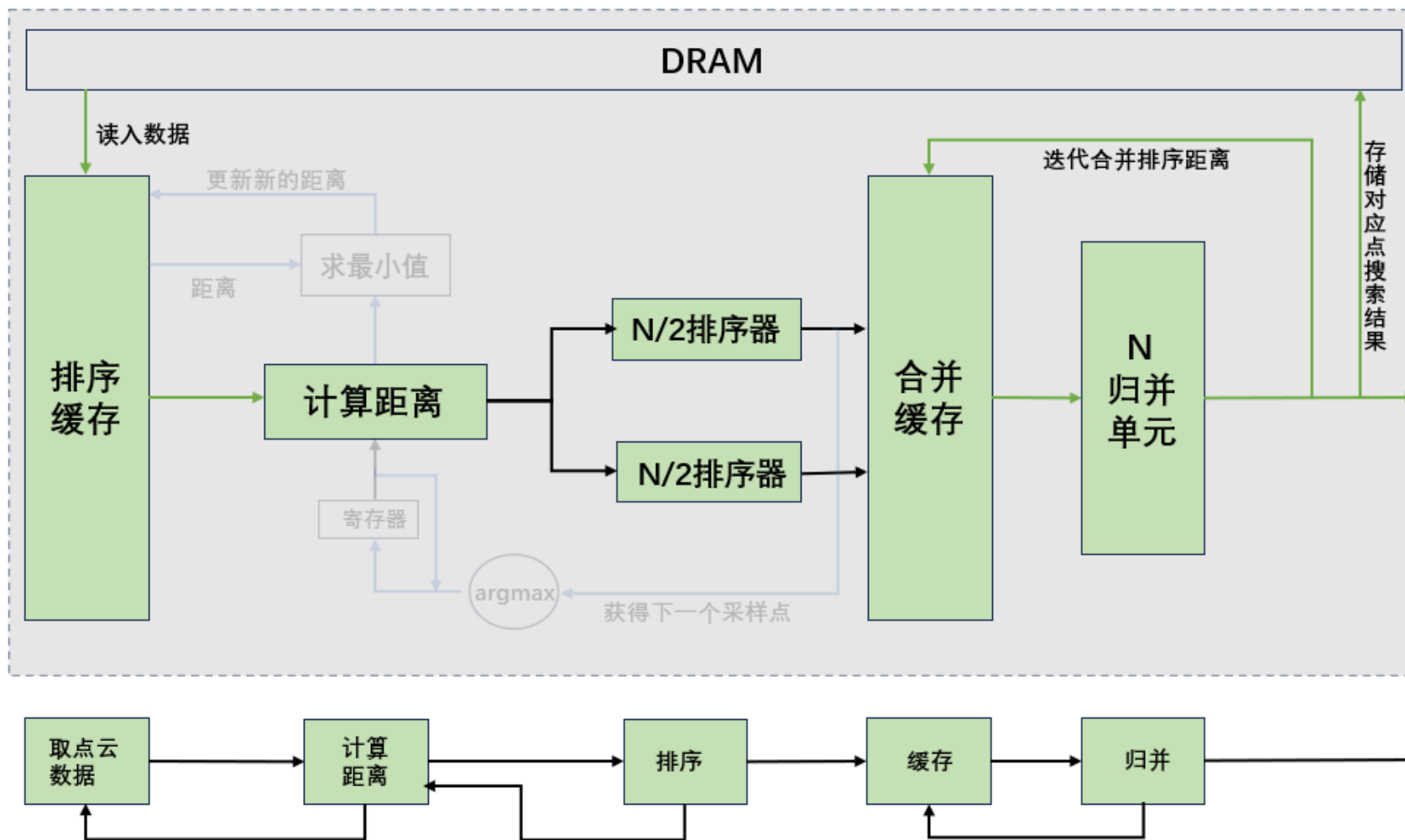
采样/对应点搜索模块设计



采样数据流动



对应点搜索数据流动





南京邮电大学
Nanjing University of Posts and Telecommunications

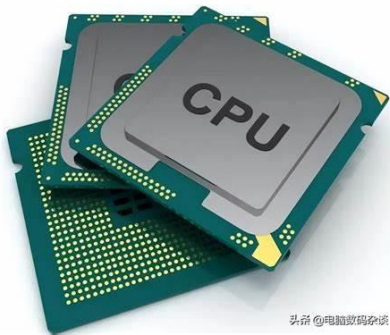
03

PART THREE

实验结果

知行合一，行以致远

实验设置



比较 CPU 与 FPGA 加速
设计的 **时延** 与 **能耗**



操作系统	Windows 11 64位操作系统
CPU 型号	Inter 10 th Gen Core™ i5-10210U @ 1.60GHz
内存大小	8GB
CPU 频率	1.60GHz
编程语言	Python

运行传统ICP配准算法

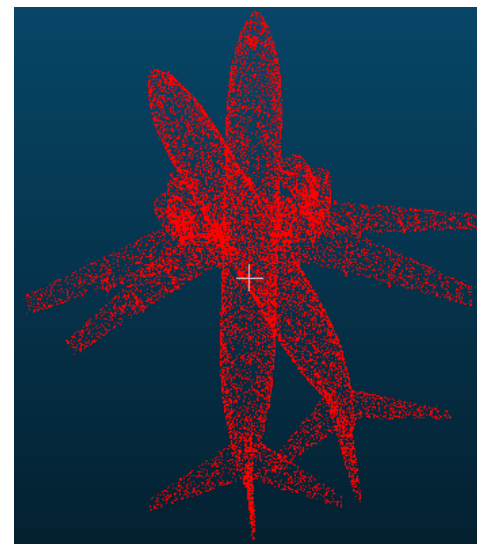
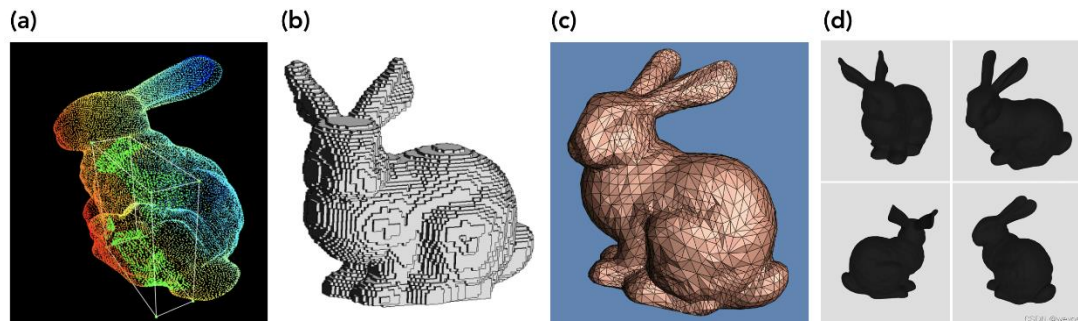
软件	Xilinx vivado2019.2 模拟器
FPGA型号	Zynq xczu7ev-ffvf1517-2LV-e
时钟频率	50MHz
编程语言	HLS

通过仿真平台在FPGA上实现加速设计

实验设置

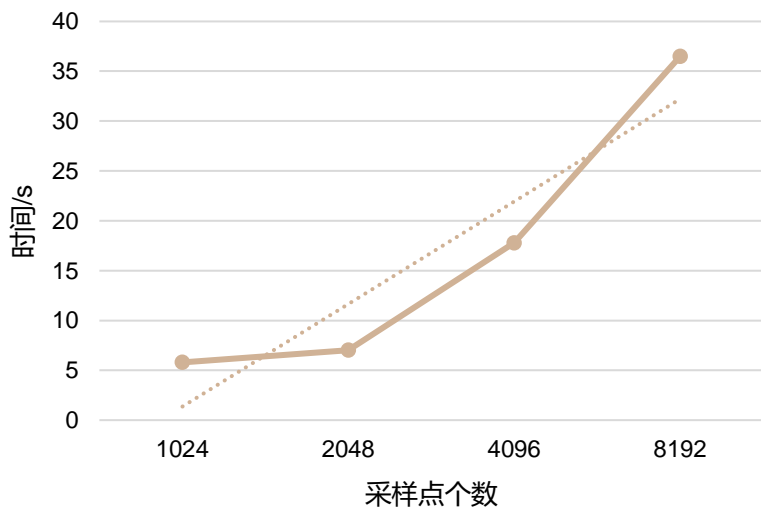
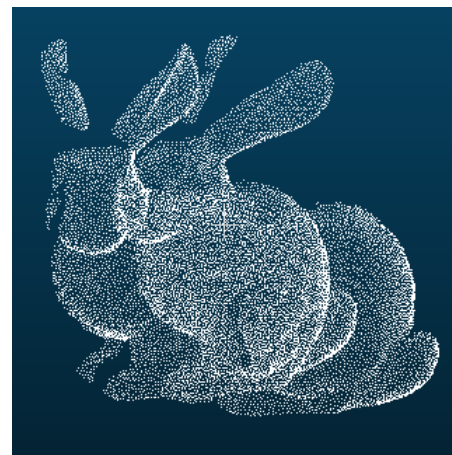
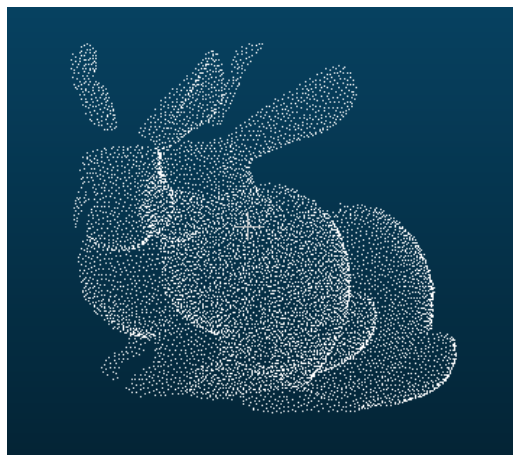
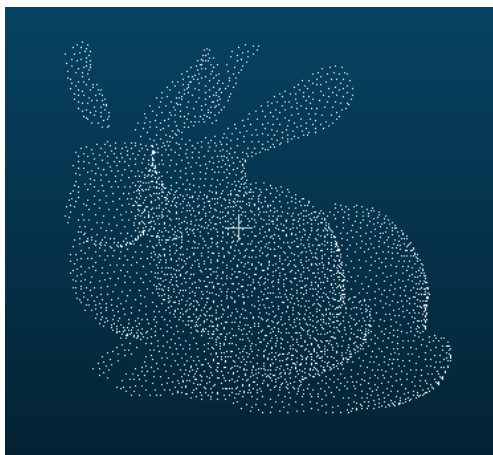
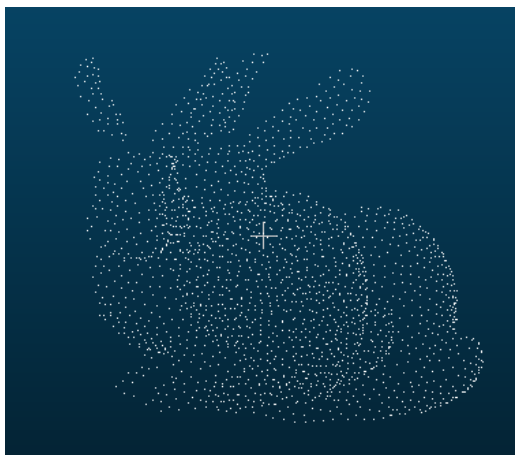
数据集

- Stanford Bunny数据集。该数据集是斯坦福大学1994年创建计算机图形学领域最著名的三维模型数据集。
- ModelNet40数据集。ModelNet40 数据集是一个用于三维物体识别和分类的常用数据集。



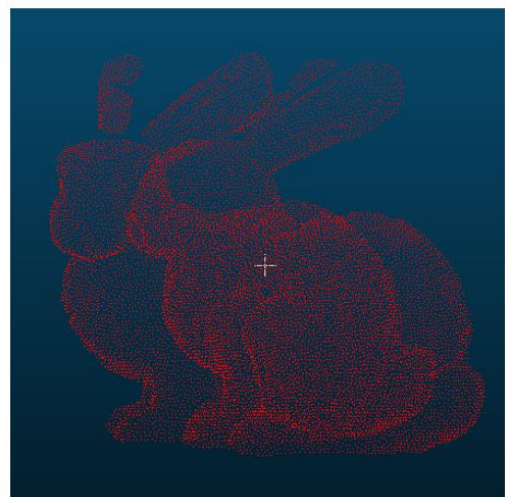
算法效果

点云采样示意图 (原始点云有40097个点)

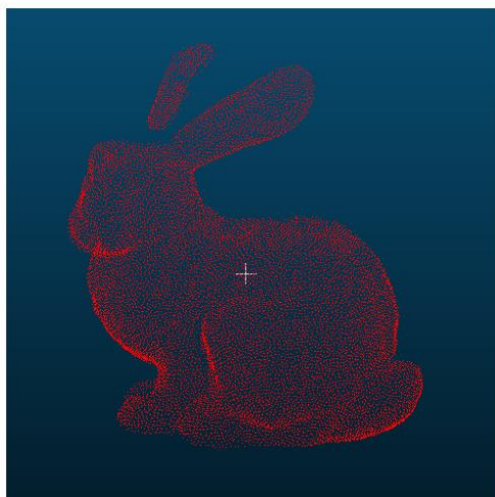


可以看出最远点采样可以很好的**保留点云的整体特征**，同时左图显示随着采样点的增加，采样的时间**显著增加**

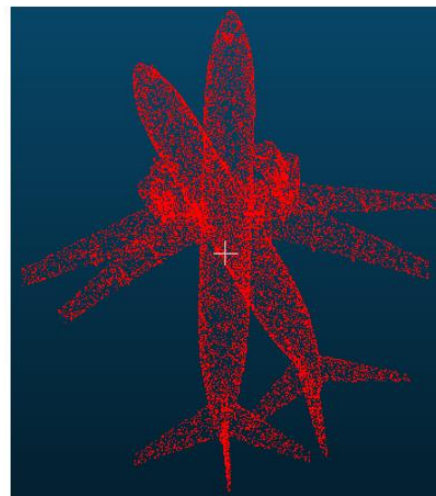
算法效果



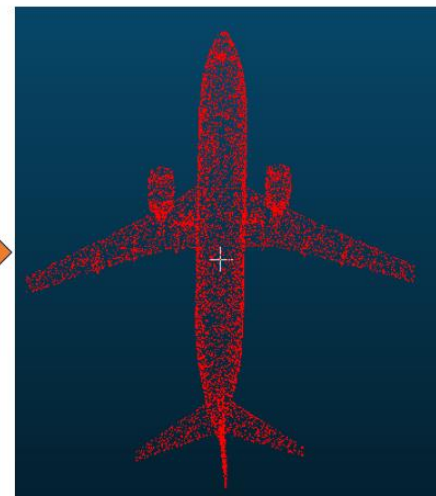
配准效果



Bunny 数据集配准效果



配准效果

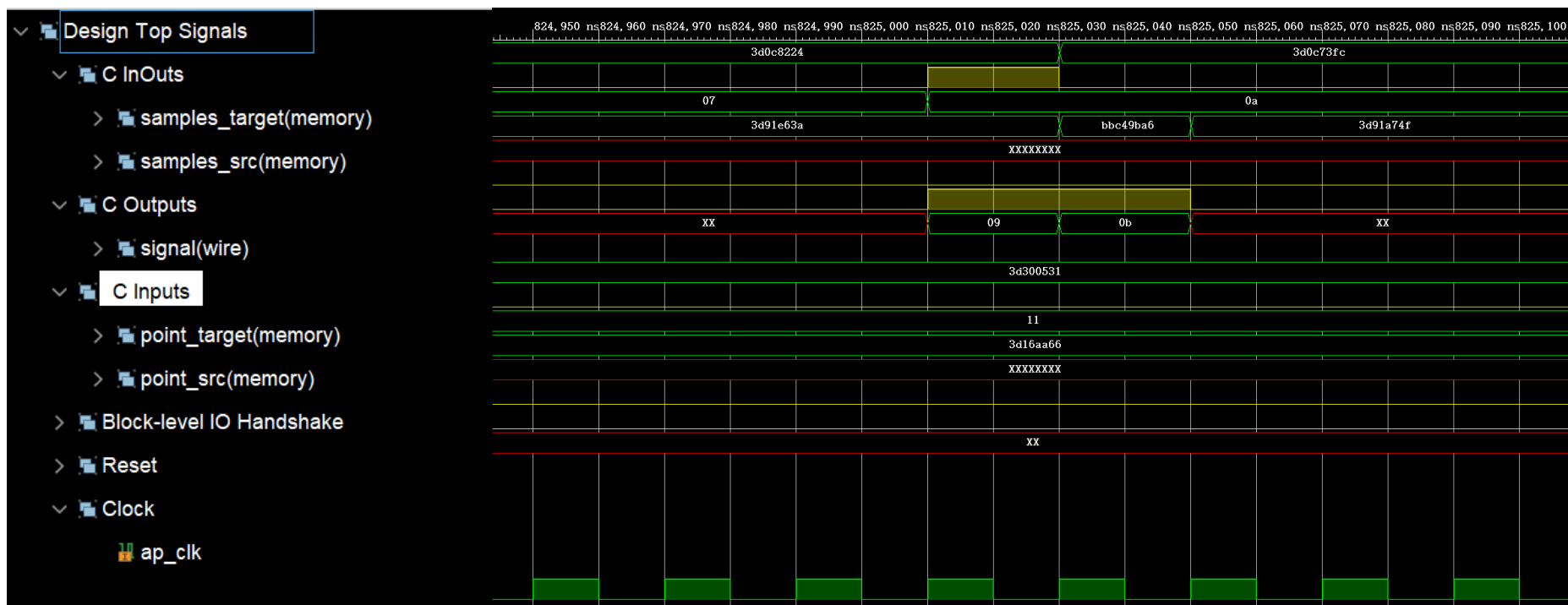


ModelNet40 数据集配准效果

得到了较好的配准效果!

功能验证

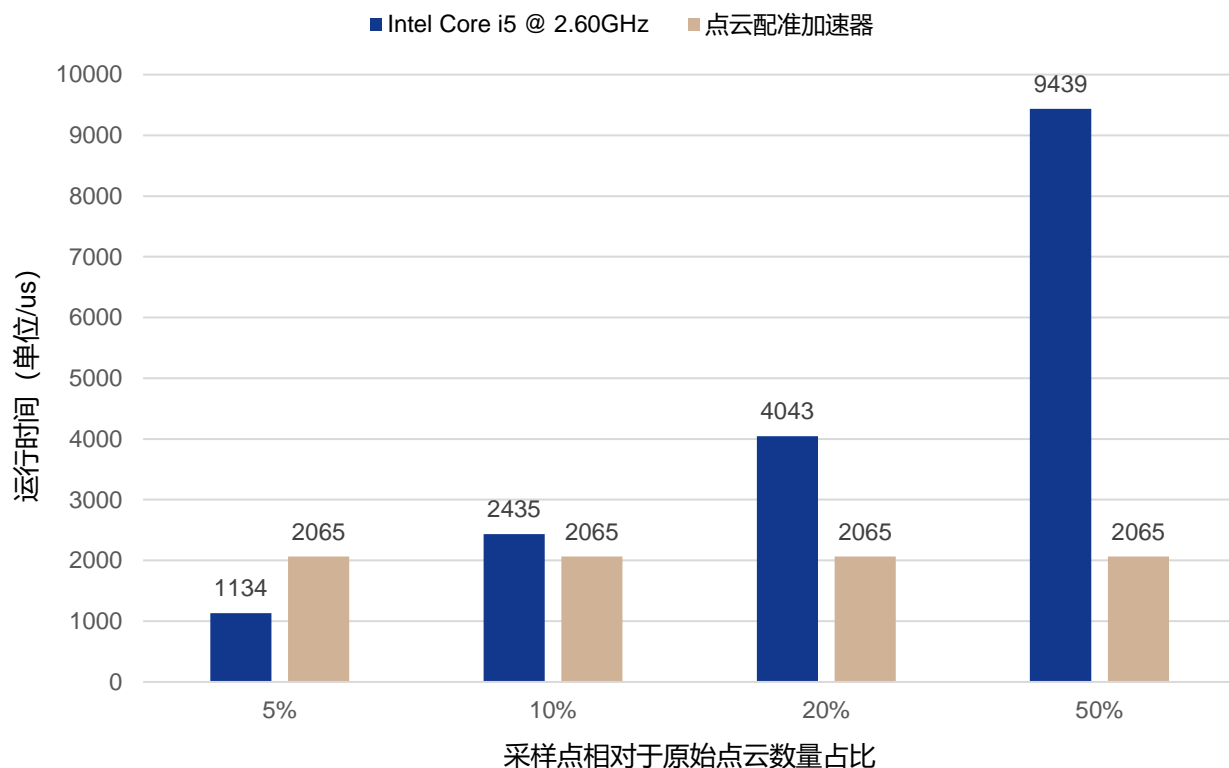
- 在vivado HLS平台，并进行C仿真、C综合以及C/RTL联合仿真，获得波形图



Vivado验证波形图：验证结果正确性

性能分析

加速效果



不同采样系数下的加速效果

(1) 当采样点很少时，在CPU平台上运行的时间可能优于实现的点云配准加速器。可能的原因是CPU通常有大量的缓存和预取机制，可以加速内存访问。

(2) 当ICP配准算法运行在CPU平台时，运行时间会随着点云采样数目的增多而显著增加，这是因为最远点采样和对应点搜索的时间复杂度都是 $O(N^2)$ 的，运行时间会随着数据量规模的增加呈指数上升

(3) 当使用FPGA加速点云配准时，随着点云采样数目的增多，运行时间几乎不变。原因可能是通过资源的叠加，让程序可以并行执行，并不影响程序运行的关键路径。

(4) 可以看出，随着点云采样规模的增多，使用FPGA加速所需要的运行时间远小于CPU平台运行点云配准所需要的时间，加速效果越明显。



性能分析

资源消耗

	BRAM	DSP	FF	LUT
5%	15	105	33476	96689
10%	15	105	32987	97730
20%	15	105	33795	101465
50%	15	105	36392	112697
可用量	624	1728	460800	230400
最高占比	2%	6%	7%	48%

（1）从硬件消耗的占比来看，查找表（LUT，Look-Up Table）使用率最高

（2）如左表所示，当点云采样数量逐渐增加时，查找表的使用量也显著增多，这也验证了上一页中关于加速效果的猜想，正是因为硬件资源的增加，才能有机会让ICP配准时间不变



南京邮电大学
Nanjing University of Posts and Telecommunications

04

PART FOUR

总结与展望

寒木春华，理想可期

—— 信达天下 · 自强不息 ——

本课题的主要工作

(1) 通过具体的数据集，探究了不同的数据规模对点云配准过程的影响，以及不同优化算法对对应点搜索时间的改变，深入分析了点云配准算法的瓶颈与特点。

发现 **最远点采样** 和 **对应点搜索** 是影响点云配准时间的 **主要瓶颈**。

(2) 本文提出了一种 **架构**，将 **最远点采样和对应点搜索映射到一个模块**中，通过该模块加速对原始点云的采样之后，在ICP配准过程中，仍可以利用该模块加速对应点搜索的过程，有效 **减少了运行时间** 并 **降低了资源利用率**。

(3) 通过 **高层次综合设计** 的方式将点云配准加速器在 **FPGA** 上模拟 **实现**，并与 **Intel Core i5 @ 2.60GHz** 平台实现的点云配准算法进行对比，当采样点的规模较大时，实现的点云配准加速器能达到 **4.5倍** 的加速效果。

展望

(1) 传统的ICP算法实现过程中，不需要经历点云采样的步骤，但在本课题的实现过程中，对原始点云进行了下采样，这 **势必对点云配准效果产生影响**，本课题实验中只是对配准直观效果进行了分析，并没有对配准效果的 **具体指标** 进行计算，因此可以通过 **定量** 计算给出 **采样对点云配准效果的具体影响**。

(2) 在最近的研究中，研究者们提出了将 **点云数据结构化** 的思路，用来改善**点云近邻搜索** 的消耗。在本课题未来的工作中，可以考虑通过将 **点云数据结构化加速对应点搜索的过程**。通过调整参数，在误差允许的情况下，加速点云配准的过程。



南京邮电大学
Nanjing University of Posts and Telecommunications

—— 谢谢! ——
恳请各位指导老师批评指正!

B2003119 汪宇翔

2024 年 6 月 6 号

—— 信达天下 · 自强不息 ——