

基于多目视觉深度神经网络的路面 宏观纹理三维重建方法

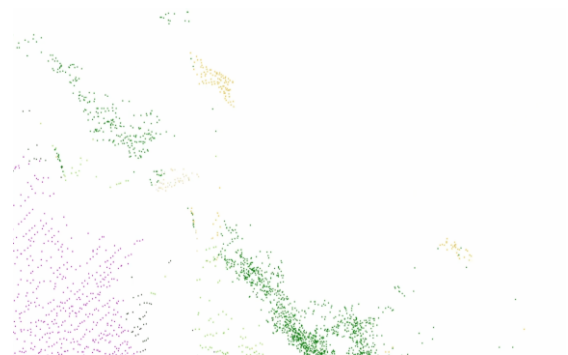
马涛、童峥（副研究员）、张一鸣、张伟光

东南大学 交通学院

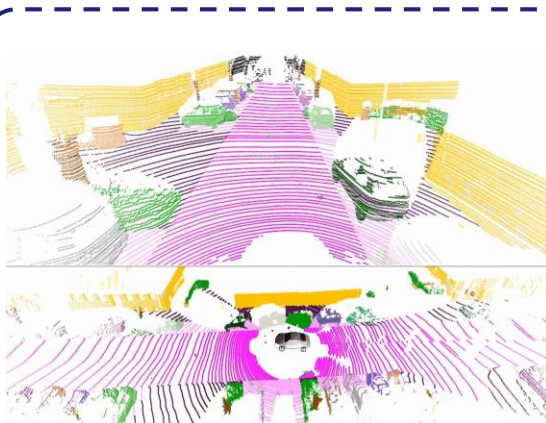
江苏 南京

2023年4月22日

- **研究背景**
- **研究内容**
- **结果分析**
- **结论展望**



道路数字孪生体构建需求



数字孪生模型精细化需求



路面抗滑与磨耗性能评估需求

- ◆ 道路数字孪生模型的构建是交通基础设施数字化的重要环节与关键保障
- ◆ 道路数字孪生模型不仅包括数字底座，还需要**精细化**表征路面服役性能
- ◆ 道路数字孪生模型需要通过**三维宏观纹理**来表征路面空间抗滑与磨耗性能

研究背景：研究不足

第五届全国路面材料力学与
数值仿真研讨会 (江苏 南京)



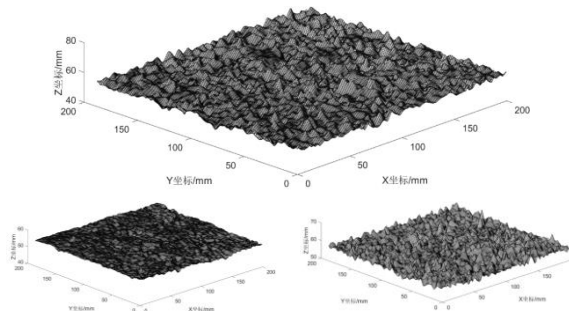
摆式摩擦仪



人工铺砂



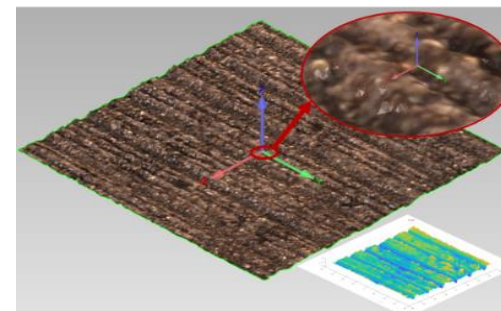
三维激光检测系统



宏观纹理点云数据



多目路面图像采集



宏观纹理三维重构

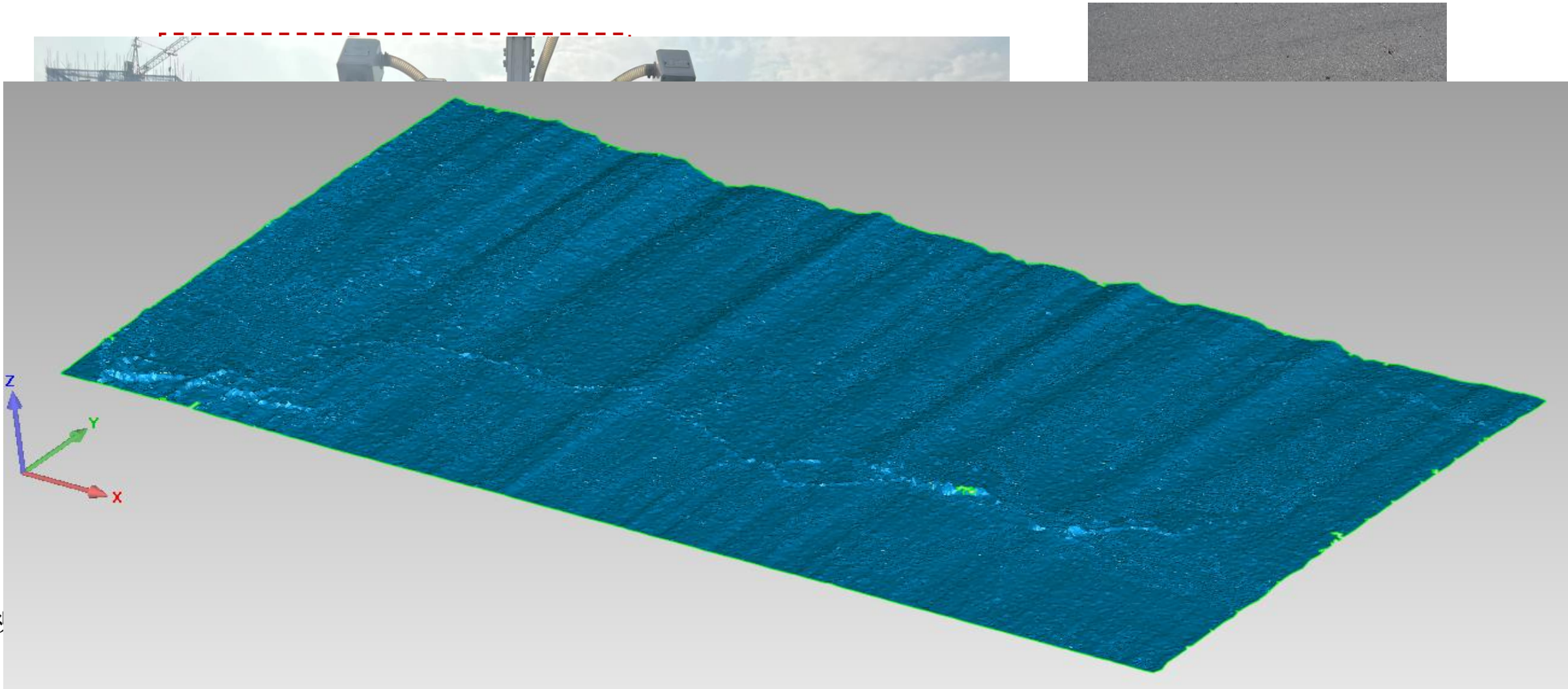
- ◆ **指标法**: 适用性不广, 效率不高, 覆盖区域无法满足数字孪生模型需求
- ◆ **模型法**: 延纵向测量精度低、与先进算法结合困难、三维重建易漏点
- ◆ **图像法**: 易受路表材料与背景噪声影响、但易与深度学习结合

- 研究背景
- 研究内容
- 结果分析
- 结论展望

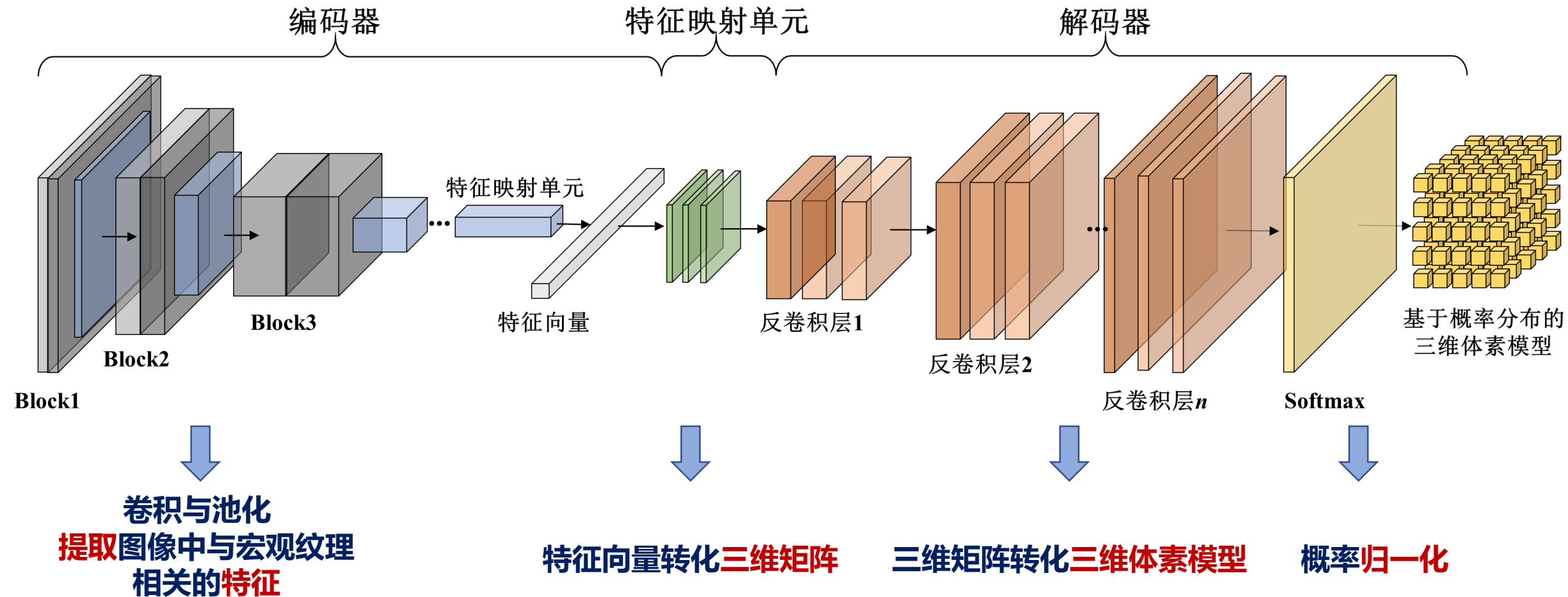


研究内容：概述

第五届全国路面材料力学与
数值仿真研讨会 (江苏 南京)

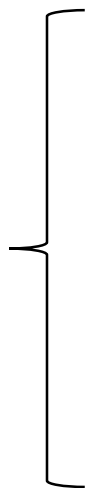


步骤1：多目图像采集 步骤2：基于多目图像与深度学习的宏观纹理三维重建 的性能评估



单一视角路面图像仅提供在该视角中的宏观纹理信息。然而，由于纹理自遮挡作用，部分纹理特征无法准确展示，导致基于单一视角路面图像的二维重建结果精度不高、稳定性差。

不同视角下体素模型



区域内是否存在纹理的概率



基于贝叶斯概率的多视角
体素模型融合方式

多目视觉路面三维宏观
纹理重建结果

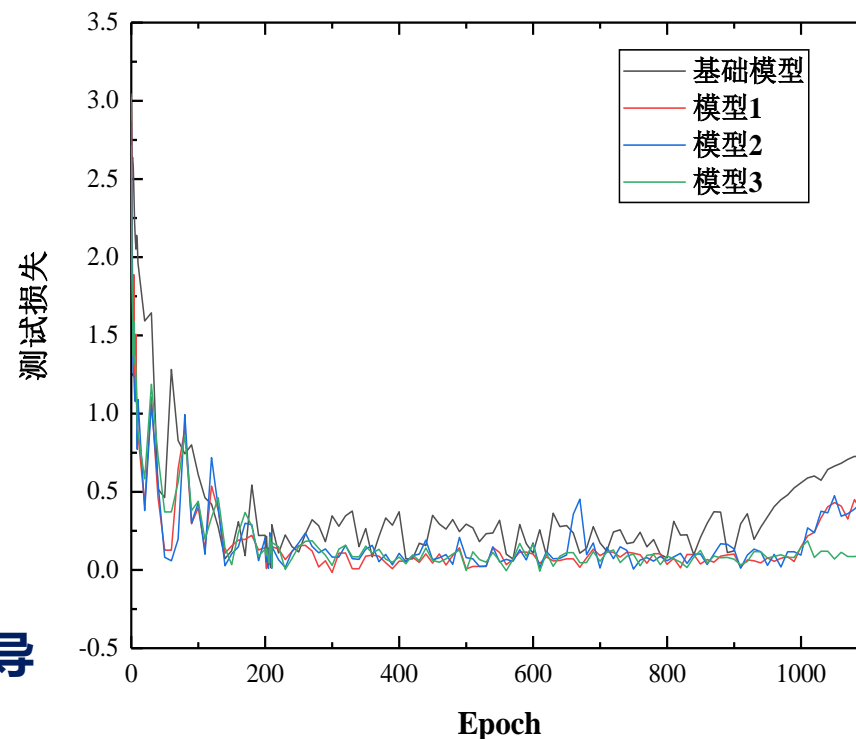
损失函数



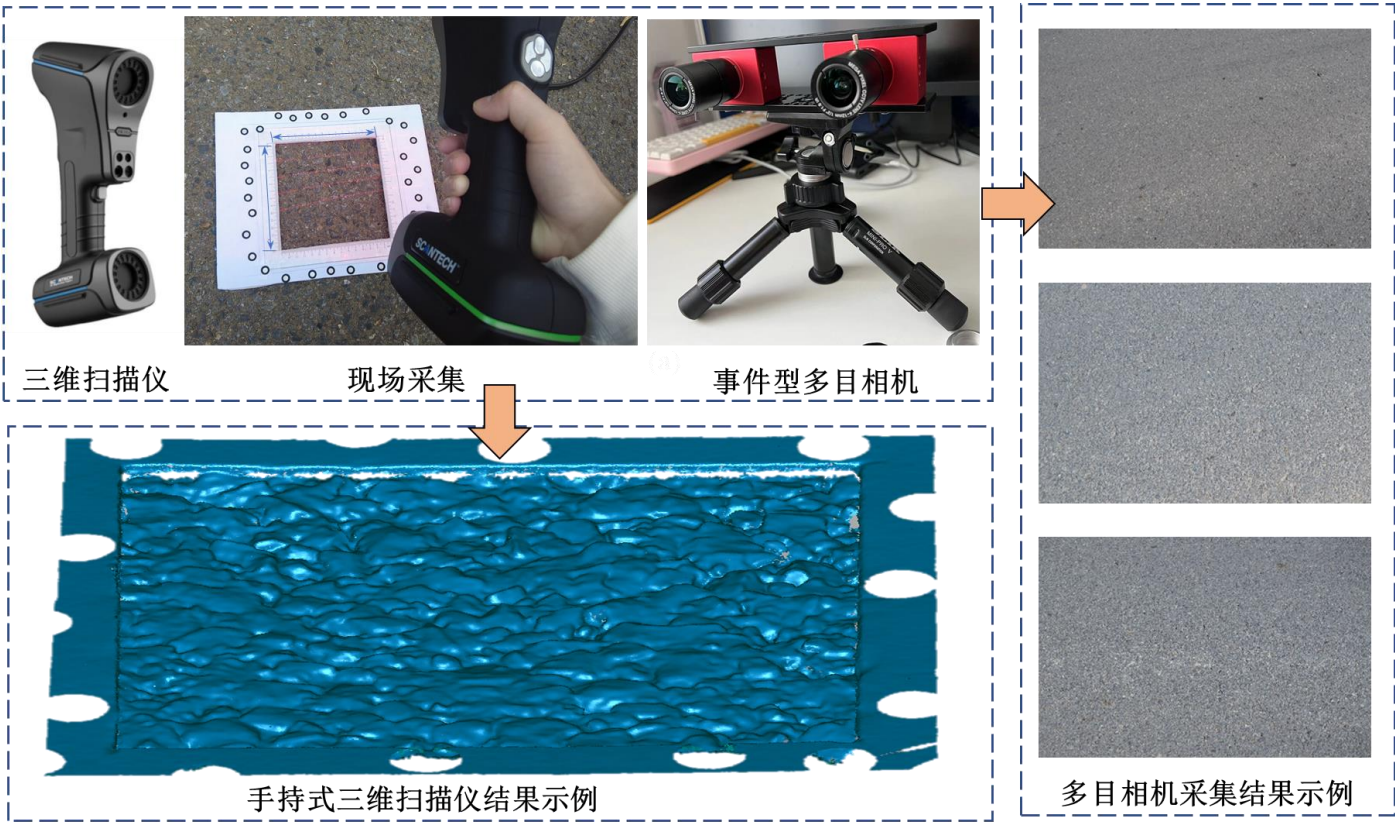
多目视觉深度神经网络存在多目视觉组合模块，损失函数偏导在多目视觉组合模块的反向传递：



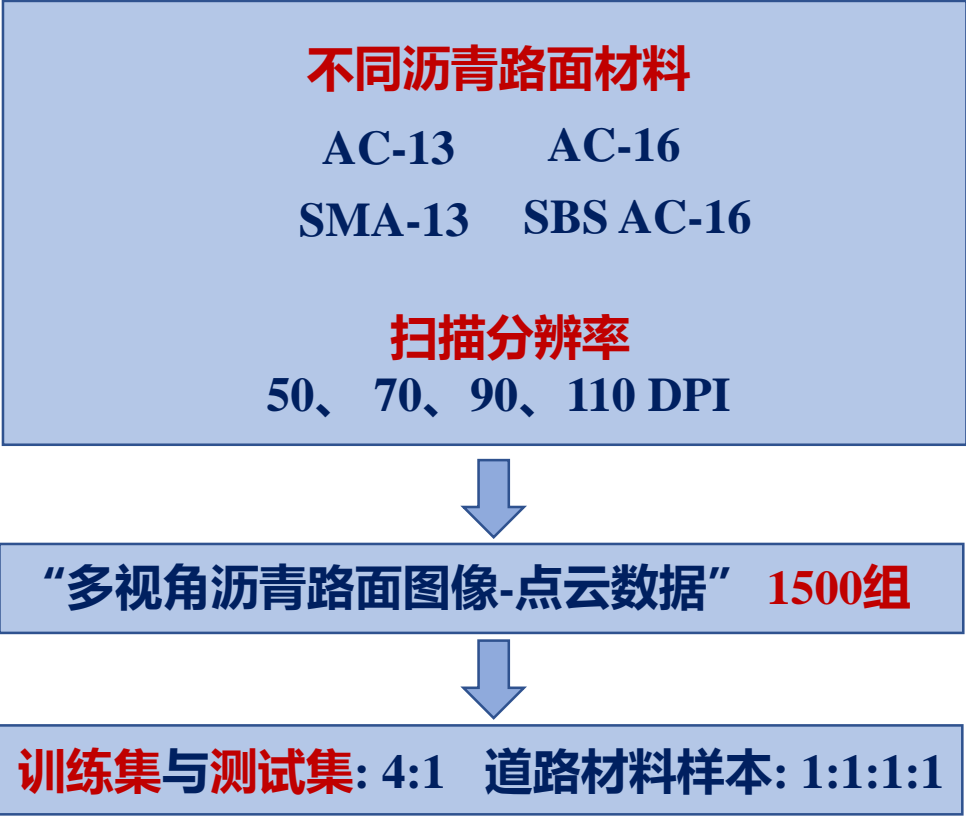
TensorFlow自动求导模块



研究内容：数据集构建



三维宏观纹理与多目图像数据采集



数据集构建与划分

基础模型

模块	层位	参数
输入	#1	256×256×3×H 多目图像组
编码器	#2	7 × 7 Max.conv. 96 ReLu with stride 2
	#3	3 × 3 Stochastic pooling stride 2
	#4	5 × 5 Max.conv. 256 ReLu with stride 2
	#5	3 × 3 Stochastic pooling stride 2
	#6	3 × 3 Max.conv. 384 ReLu with stride 1
	#7	3 × 3 Max.conv. 384 ReLu with stride 1
	#8	3 × 3 Max.conv. 256 ReLu with stride 1
特征映射单元	#9	16 × 16 × 3 fully connected layer 256 TanH
解码器	#10	3 × 3 × 3 Deconv. 256 ReLu with stride 1
	#11	3 × 3 × 3 Deconv. 384 ReLu with stride 1
	#12	5 × 5 × 3 Deconv. 256 ReLu with stride 4
	#13	7 × 7 × 3 Deconv. 96 ReLu with stride 4
Softmax	#14	Softmax
多目视觉组合模块	#15	贝叶斯融合

多目视觉深度神经网络训练技术

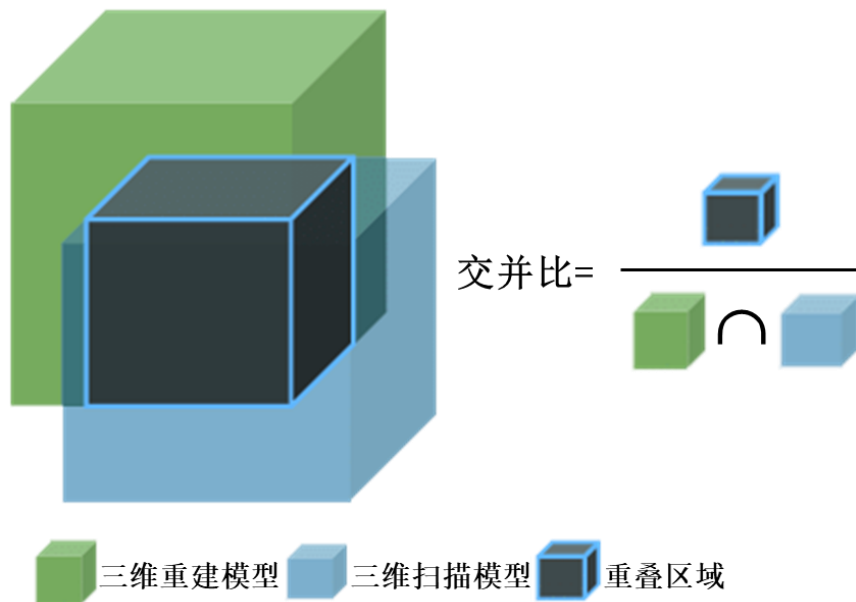
模型	层序单位方差初始化 ^[32]	最大化反卷积 ^[33]	数据增强 ^[34]
基础模型	-	-	-
模型 1	√	-	-
模型 2	√	√	-
模型 3	√	√	√

[32] LIU C, LI Juan, GAO Jie, et al. Three-dimensional texture measurement using deep learning and multi-view pavement images [J]. Measurement, 2021, 172: 108828.

[33] LIU C , TONG Zheng , YUAN Dong-dong, et al. A method for pavement macro-texture reconstruction based on multi-view deep learning: CN112489202A [P]. 2021-03-12.

[34] LU Q , LU Y , XIAO M , et al. 3D-FHNet: Three-dimensional fusion hierarchical reconstruction method for any number of views [J]. IEEE Access, 2019, 7: 172902-172912.

研究内容：评价指标



采用**交并比(IoU)**：表征网络输出的三维重建模型与扫描仪获取的三维扫描模型的**重叠度**

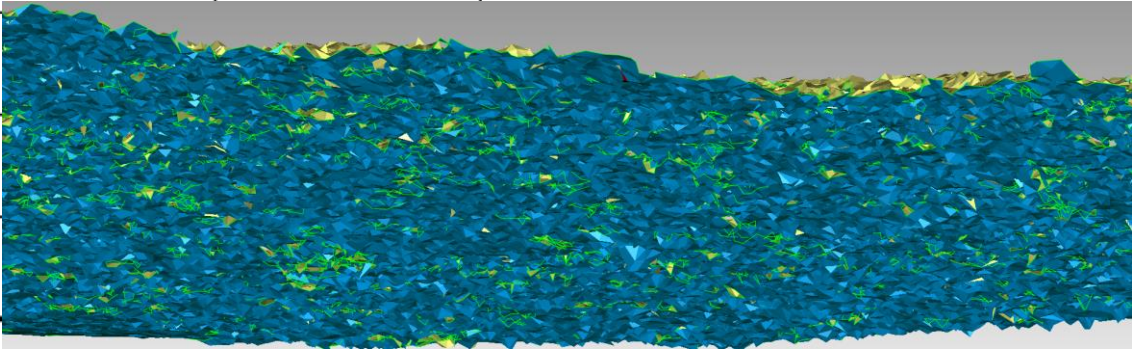
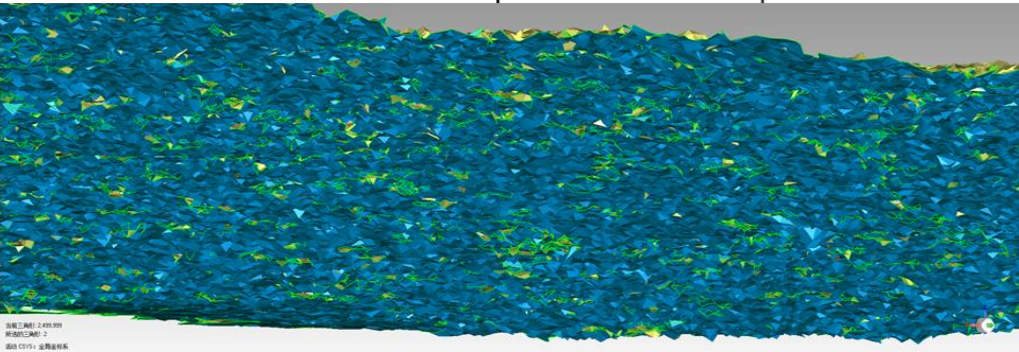
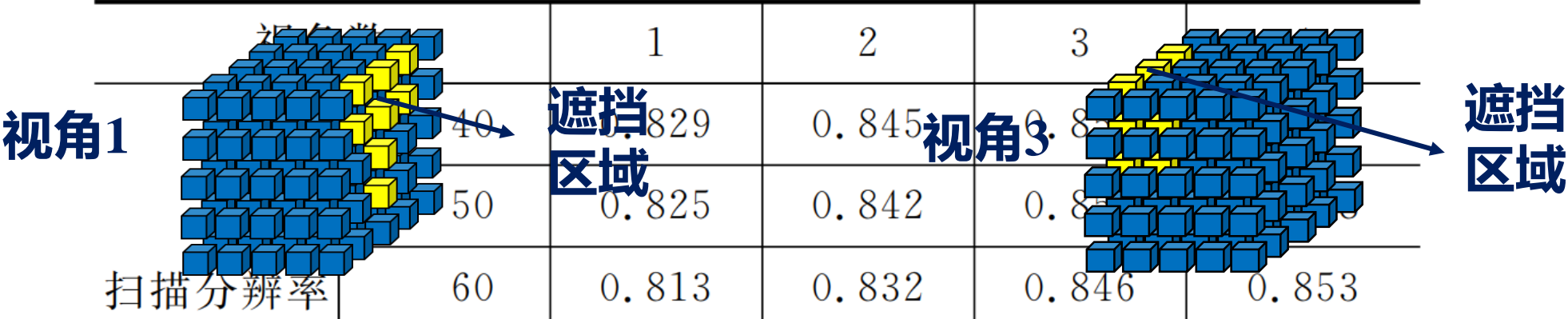
采用**平均误差**：评价基于三维宏观纹理模型的评估结果与实测结果的**差异**

浮点操作数(FLOPs)：表征模型运算的复杂程度，浮点操作越多，说明模型约复杂

- 研究背景
- 研究内容
- 结果分析
- 结论展望

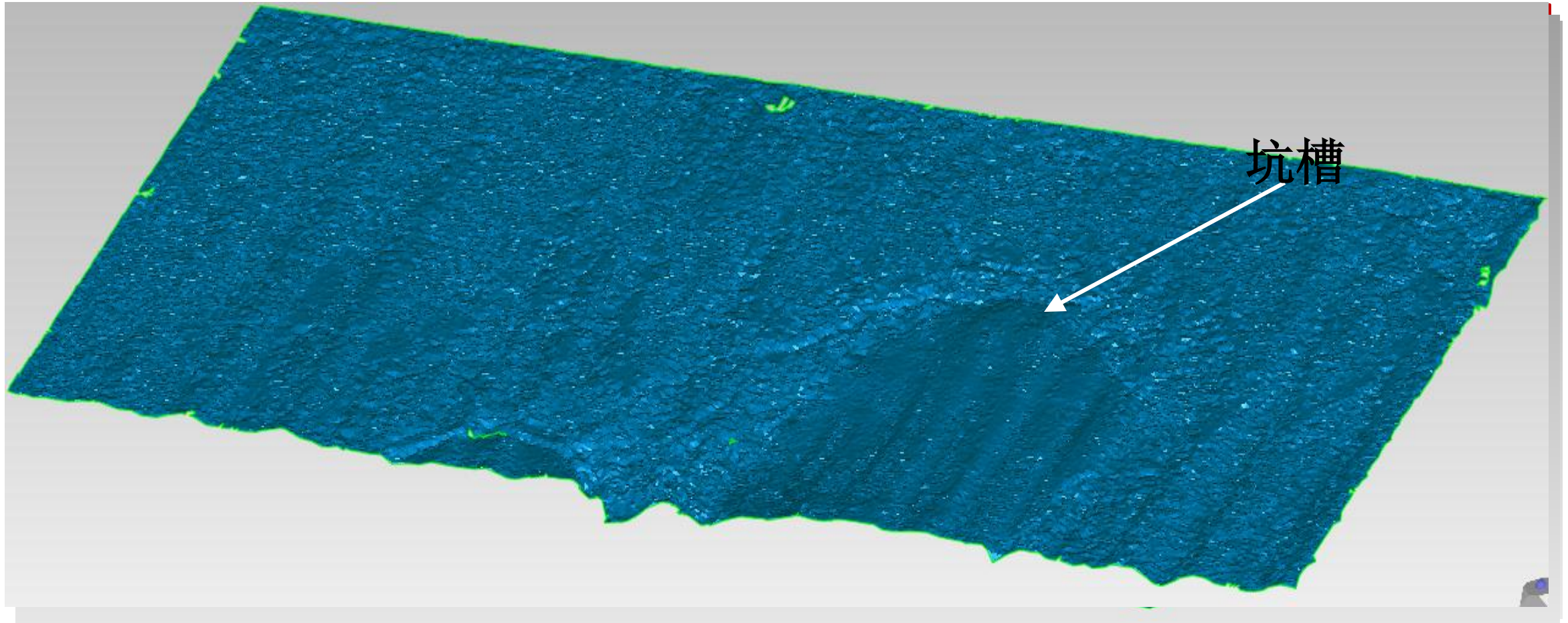
结果分析：单视角路面宏观纹理三维重建

当视角数量大于3时，三维重建交并比不再显著增加，多视角路面图像已经完整地展现路面宏观纹理信息。



结果分析：多目视觉深度神经网络路面宏观纹理三维重建

第五届全国路面材料力学与
数值仿真研讨会 (江苏 南京)

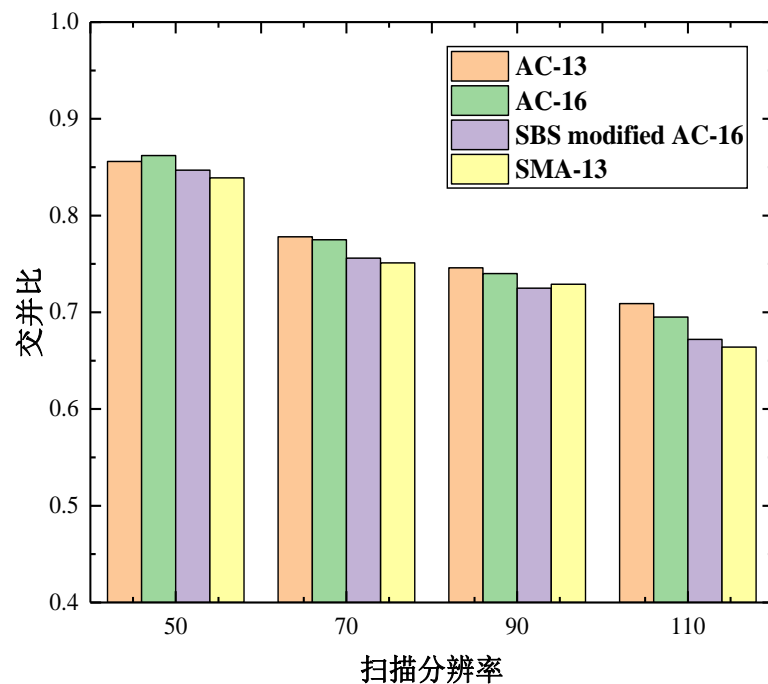


结果分析：不同路面材料的重建效果

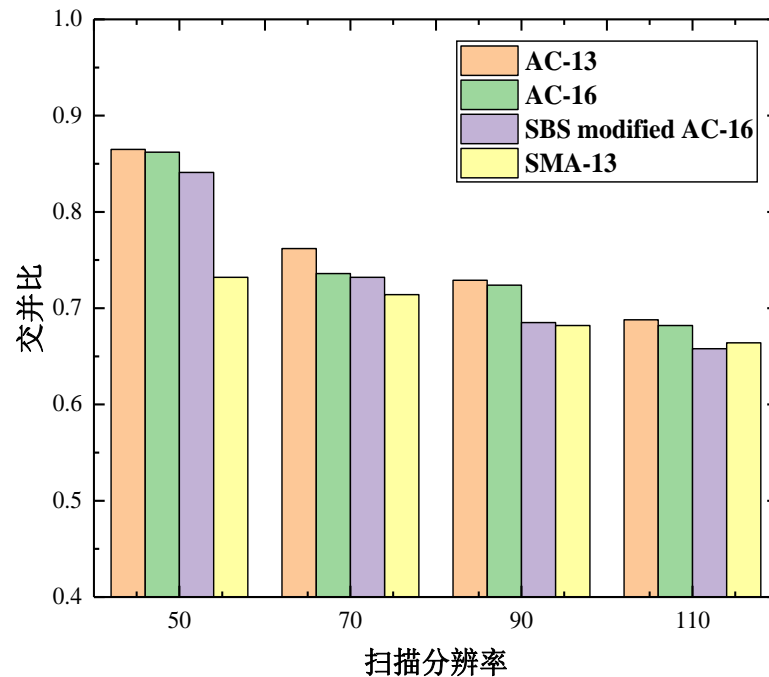
第五届全国路面材料力学与
数值仿真研讨会 (江苏 南京)

多目视觉深度神经网络的交并比基本不受材料特性影响，而单目视觉深度神经网络的交并比一定程度受材料特性影响。

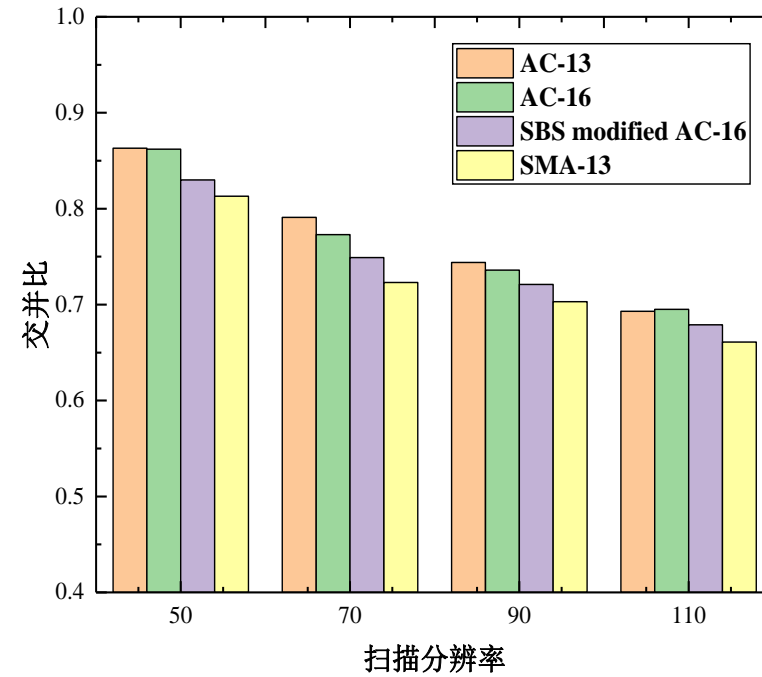
单视角



双视角



三视角



四视角70DPI 的路面宏观纹理三维重建方法对比结果

模型		模型 3	MVF- CNN ^[24-25]	3D- FHNET ^[25]	Stereo Vision ^[26]
交 并 比	平均交并比	0.769	0.765	0.755	0.550
	AC-13	0.795	0.763	0.723	0.580
	AC-16	0.775	0.750	0.739	0.487
	SBS 改性 AC-16	0.768	0.773	0.777	0.519
	SMA-13	0.738	0.775	0.782	0.612

参考文献

[24] ZHU Z, WANG X, BAI S, et al. Deep learning representation using autoencoder for 3D shape retrieval [J]. Neurocomputing, 2016, 204: 41-50.

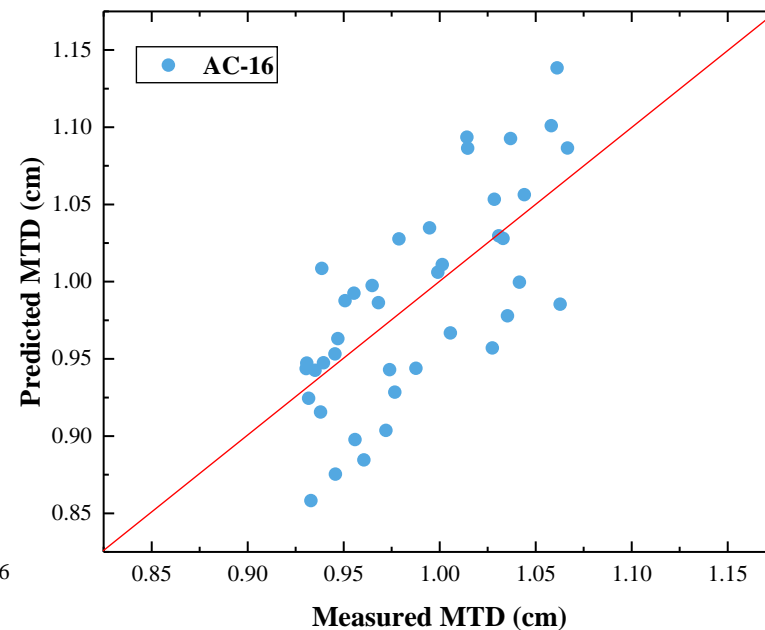
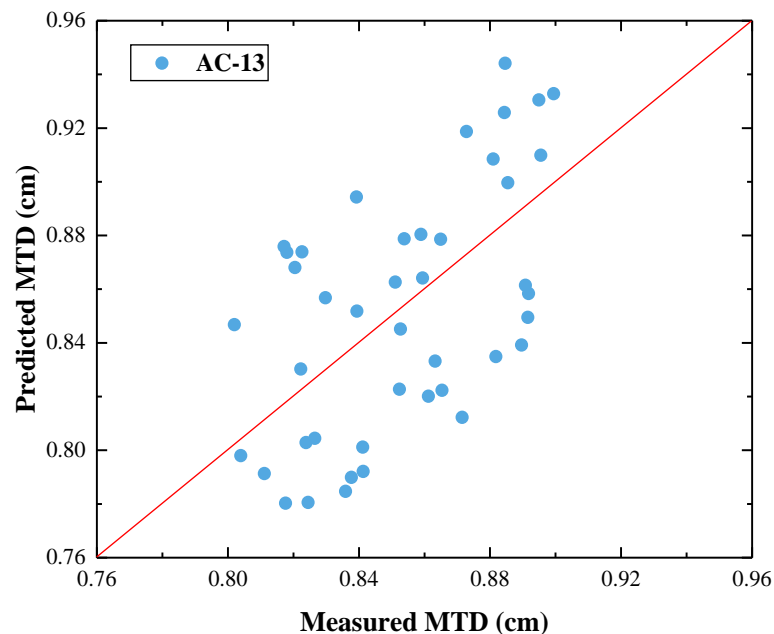
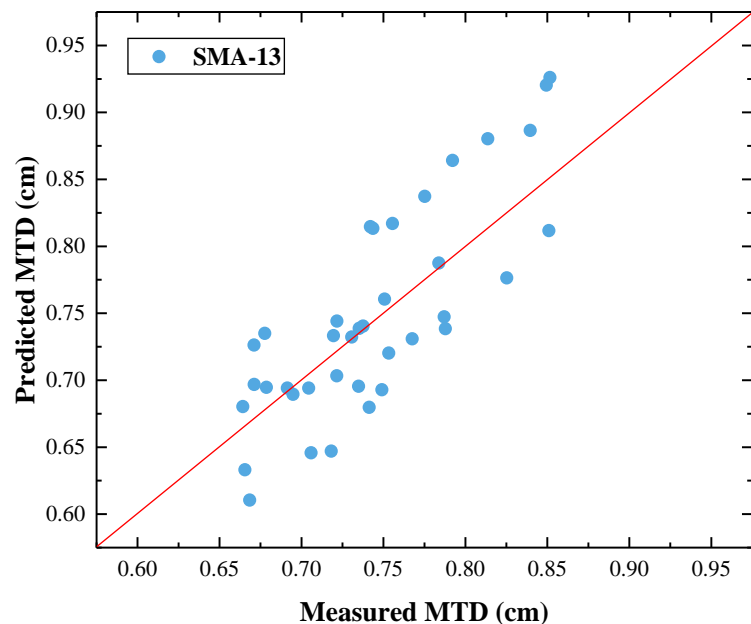
[25] LENG B, SHUANG G, ZHANG X, et al. 3D object retrieval with stacked local convolutional autoencoder [J]. Signal Processing, 2015, 112 (7): 119-128.

[26] LENG B, LIU Y, YU K, et al. 3D object understanding with 3D convolutional neural networks [J]. Information Sciences, 2016: 188-201.

结果分析：路面性能评估（路面平均构造深度）

第五届全国路面材料力学与
数值仿真研讨会 (江苏 南京)

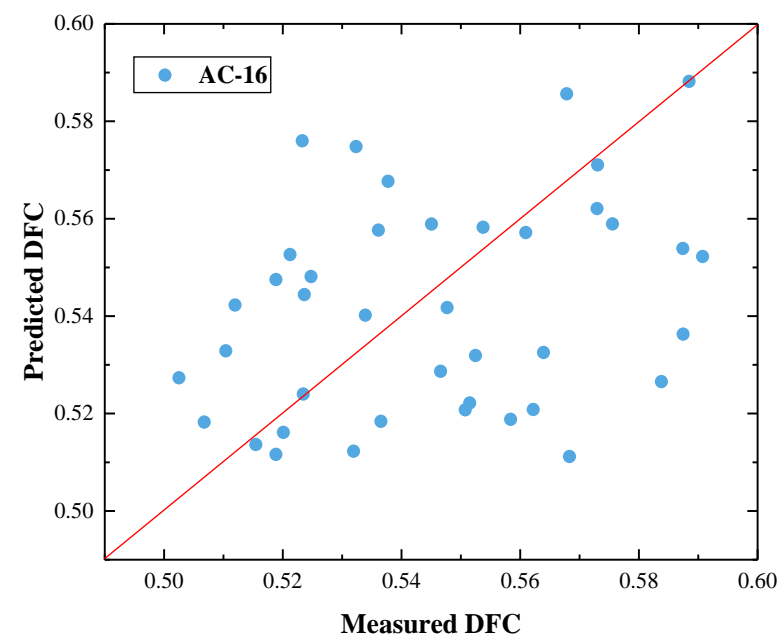
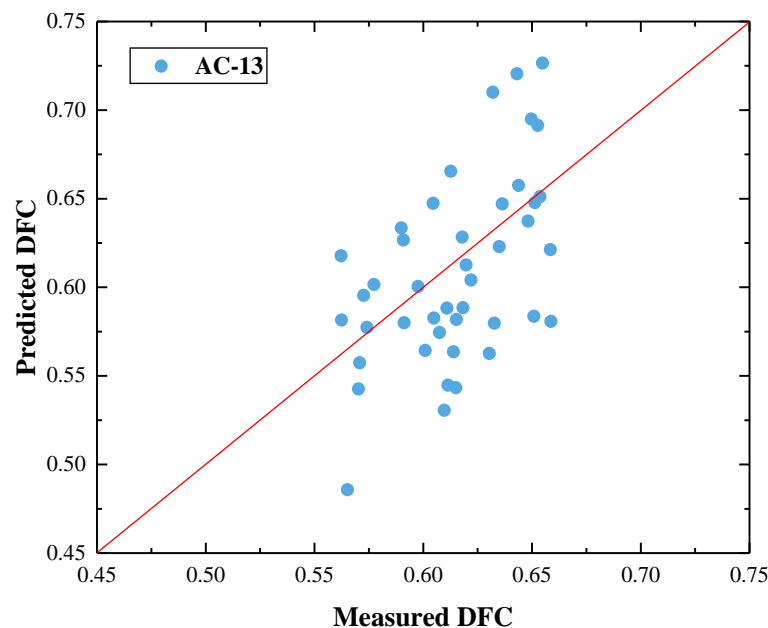
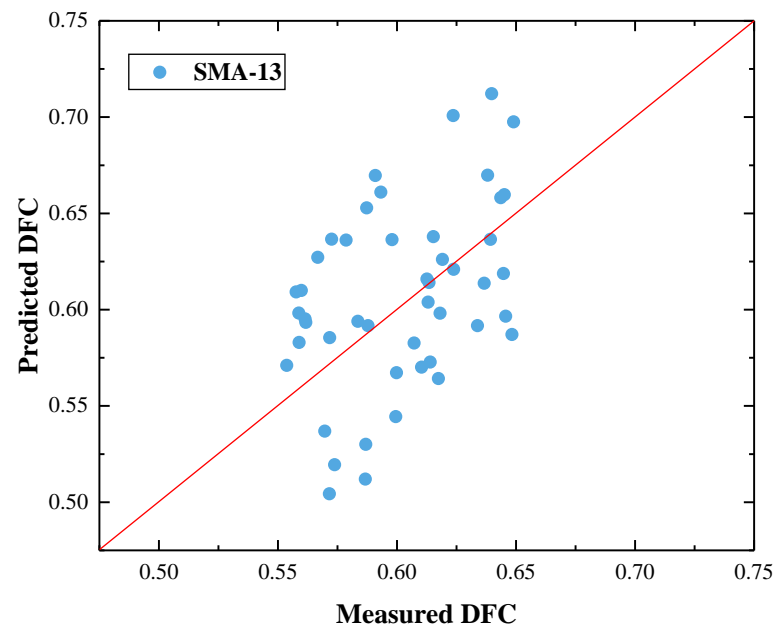
多目视觉深度神经网络评估抗磨损性能（MTD）的实测误差分别为 **6.82%**，精度满足路面性能检测需求。



结果分析：路面性能评估（路面抗滑性能）

第五届全国路面材料力学与
数值仿真研讨会 (江苏 南京)

多目视觉深度神经网络评估抗滑性能 (DFC) 的实测误差分别为 7.28%，精度满足路面性能检测需求。



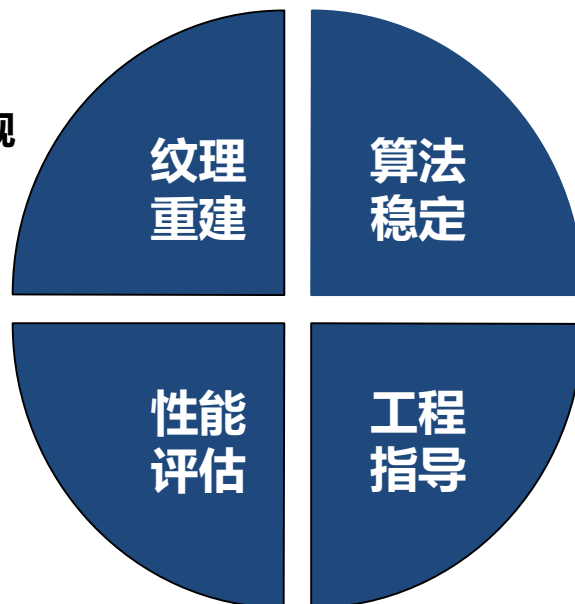
- 研究背景
- 研究内容
- 结果分析
- 结论展望

路面宏观纹理三维重建

- 各个分辨率下精度均能满足路面宏观纹理检测需求
- 准确性优于已有先进重构算法

路用性能评估

- 指标MTD与DFC实测误差分别为6.82%与7.28%
- 测试速度可达到60 km/h，显著提升检测效率



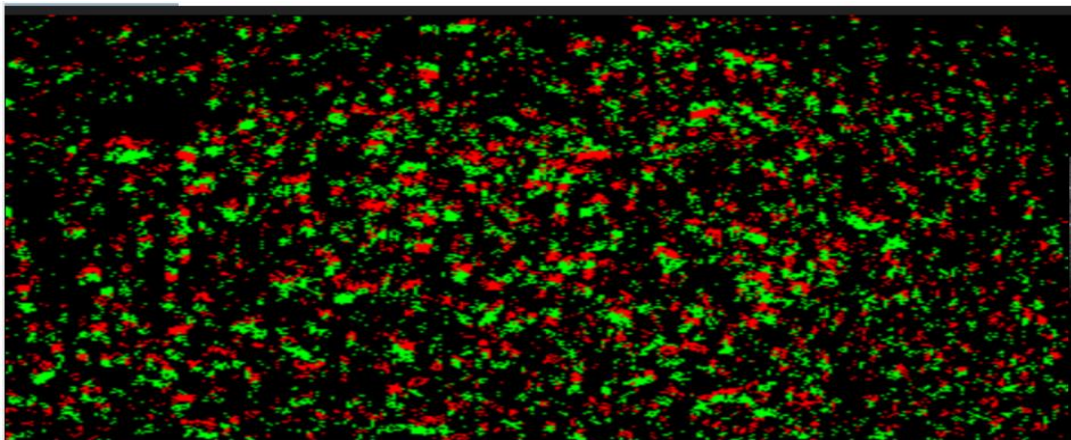
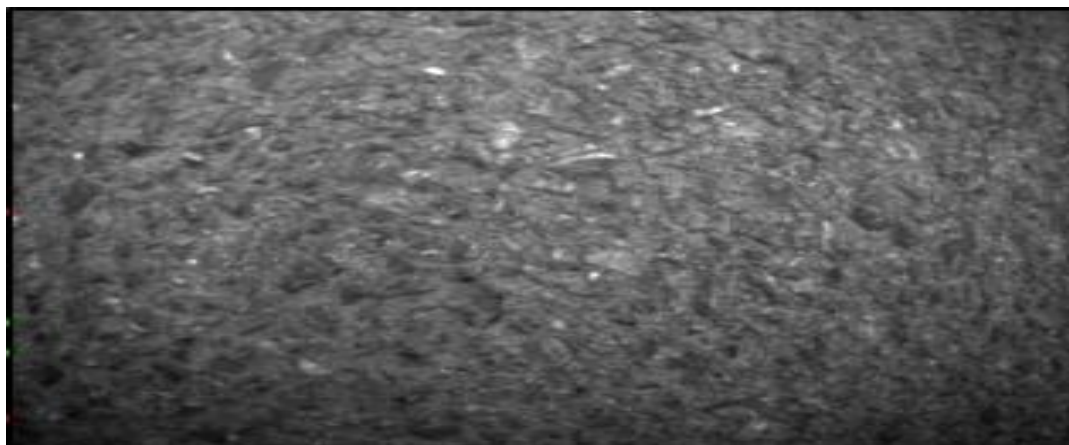
多目视觉深度神经网络

- 基本不受路面材料与背景噪音影响
- 常见沥青路面上三维重建交并比不低于0.725

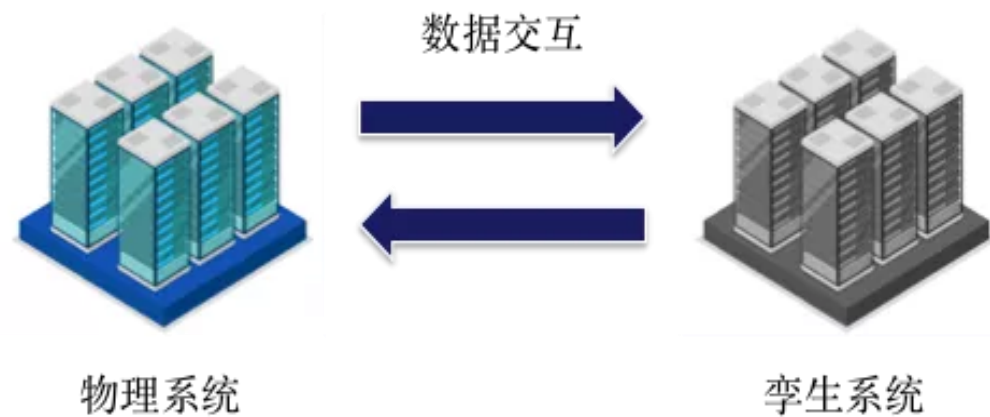
公路数字孪生体构建

- 路面宏观纹理三维模型可用于构建公路数字孪生底座的路表部分
- 评估与分析路面全寿命周期抗磨耗性能与抗滑性能

1、事件型相机



2、数字孪生模型组合



谢谢聆听
欢迎提问

