

# 针对运动模糊的鲁棒VI-SLAM系统

徐泽文, 吕泽仁, 张怡迪, 杨钊龙, 卫浩\*

中国科学院自动化研究所  
多模态人工智能系统全国重点实验室

# 报告纲要

---

## ➤ 数据集分析

## ➤ 针对运动模糊的鲁棒VI-SLAM系统

- 基于指数滑动平均 (EMA) 的IMU数据处理

- 旋转平移解耦的鲁棒初始化

- 中值绝对偏差MAD

## ➤ 实验结果

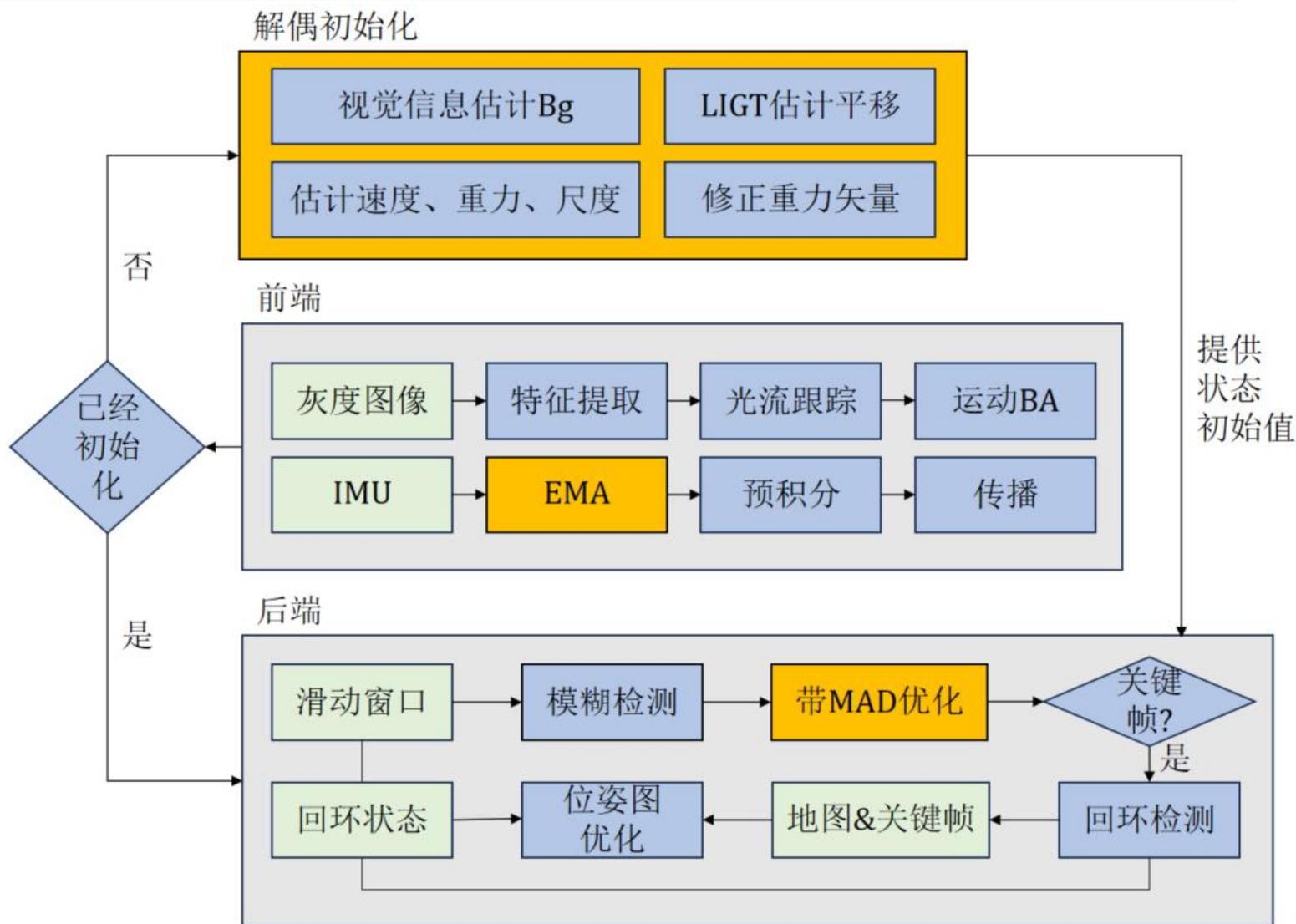
# 数据集分析

- 数据集主要难点:

运动模糊、动态物体干扰、镜头遮挡 (纯黑/部分遮挡)



# 针对运动模糊的鲁棒VI-SLAM系统



- 对视觉信息进行加权、增加IMU置信度

# 报告纲要

---

## ➤ 数据集分析

## ➤ 针对运动模糊的鲁棒VI-SLAM系统

- 基于指数滑动平均 (EMA) 的IMU数据处理

- 旋转平移解耦的鲁棒初始化

- 中值绝对偏差MAD

## ➤ 实验结果

# 基于EMA的IMU数据滤波

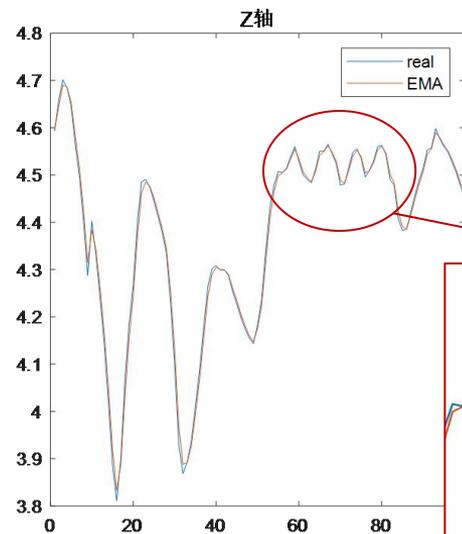
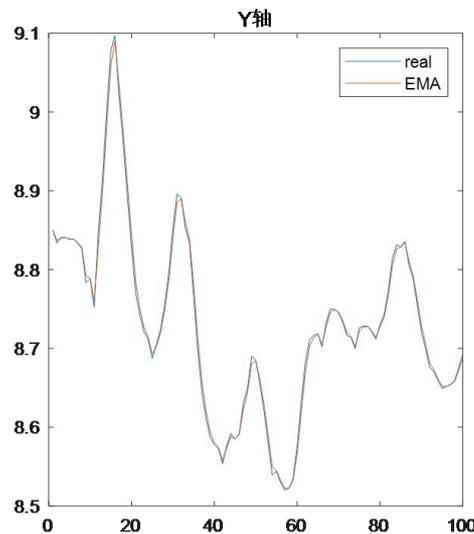
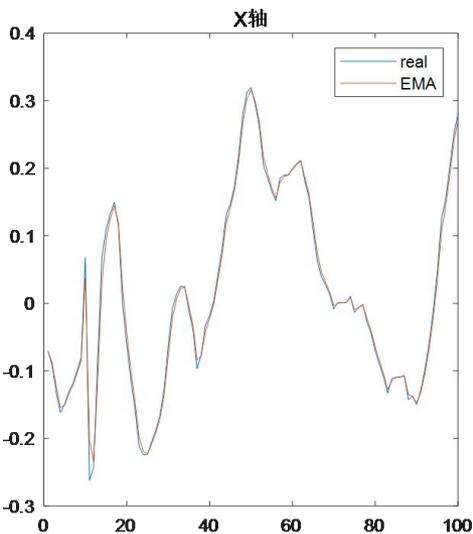
- 指数平滑滤波:

$$EMA_t = \alpha \times ACC_t + (1 - \alpha) \times EMA_{t-1}$$

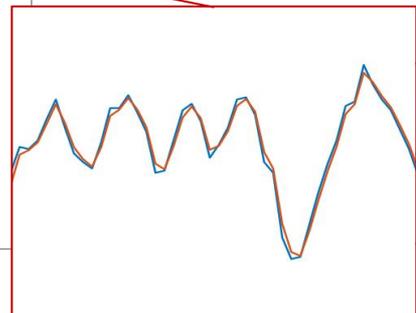
其中 $\alpha = 0.8$ ， $ACC_t$ 表示 $t$ 时刻对应的加速度值， $EMA_t$ 表示滤波后的加速度值作为系统的输入。

- 注意:

- 由于EMA本质为一阶滞后滤波法，会导致角速度值变差，因此只有加速度计数据采用了EMA滤波方法。



C0\_test数据



# 旋转平移解耦的鲁棒初始化

- 旋转估计:

- 1. 利用视觉信息估计bg

$$\mathbf{n}_i = \mathbf{f}_i \times \mathbf{R}\mathbf{f}'_i$$

$$\mathbf{R} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{R}} \lambda_{\mathbf{M}, \min} \quad \text{with } \mathbf{M} = \sum_{i=1}^n (\mathbf{f}_i \times \mathbf{R}\mathbf{f}'_i)(\mathbf{f}_i \times \mathbf{R}\mathbf{f}'_i)^T$$

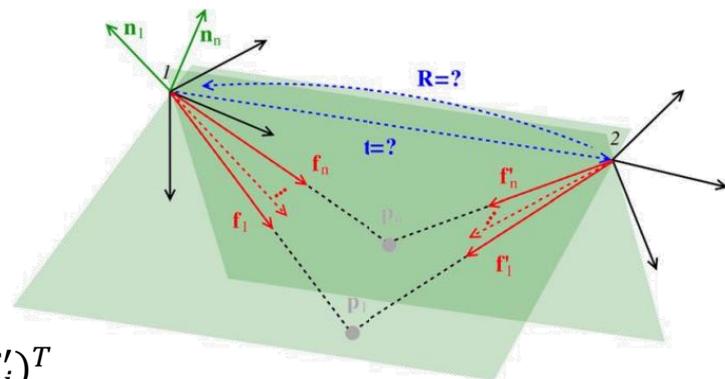
- 2. 利用IMU预积分构建bg的约束，并带入M中

$$\hat{\gamma}_{b_j}^{b_i} = \gamma_{b_j}^{b_i} \operatorname{Exp} \left( \mathbf{J}_{\mathbf{b}_g}^{b_i} \gamma_{b_j}^{b_i} \mathbf{b}_g \right)$$

$$\mathbf{M}'_{ij} = \sum_{k=1}^n \left( \left[ \mathbf{f}_i^k \right]_{\times} \mathbf{R}_{bc}^T \gamma_{b_j}^{b_i} \operatorname{Exp} \left( \mathbf{J}_{\mathbf{b}_g}^{b_i} \gamma_{b_j}^{b_i} \mathbf{b}_g \right) \mathbf{R}_{bc} \mathbf{f}_j^k \right) \left( \left[ \mathbf{f}_i^k \right]_{\times} \mathbf{R}_{bc}^T \gamma_{b_j}^{b_i} \operatorname{Exp} \left( \mathbf{J}_{\mathbf{b}_g}^{b_i} \gamma_{b_j}^{b_i} \mathbf{b}_g \right) \mathbf{R}_{bc} \mathbf{c}_j^k \right)^T$$

- 3. 求解bg，并重新计算旋转矩阵

$$\mathbf{b}_g^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{b}_g} \lambda \quad \text{with } \lambda = \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} \lambda_{\mathbf{M}'_{ij}, \min}$$



# 旋转平移解耦的鲁棒初始化

- 平移估计 (LIGT) :

- 在旋转已知的情况下，线性计算平移，根据视差选取关键帧

$$0 = [X_i]_{\times} \left( d_{\zeta}^{(\varsigma, \eta)} R_{\zeta, i} X_{\zeta} + t_{\zeta, i} \right), 1 \leq i \leq n, i \neq \varsigma$$

$$d_{\zeta}^{(\varsigma, \eta)} = \frac{\mathbf{a}_{\varsigma, \eta}^T \mathbf{t}_{\varsigma, \eta}}{\theta_{\varsigma, \eta}^2}$$

- Linear Global Translation (LiGT) 约束

$$\mathbf{B}t_{\eta} + \mathbf{C}t_i + \mathbf{D}t_{\zeta} = 0, 1 \leq i \leq n, i \neq \varsigma,$$

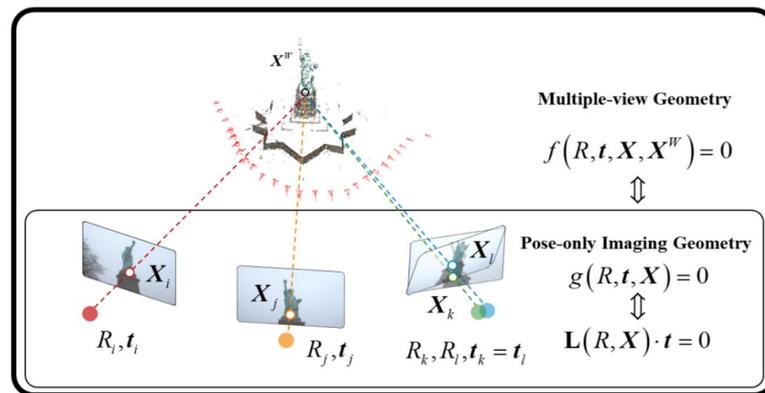
$$\mathbf{B} = [X_i]_{\times} R_{\zeta, i} X_{\zeta} a_{\varsigma, \eta}^T R_{\eta}$$

$$\mathbf{C} = \theta_{\zeta, \eta}^2 [X_i]_{\times} R_i$$

$$\mathbf{D} = -(\mathbf{B} + \mathbf{C}).$$

- 松耦合计算速度、重力方向和尺度因子

- 利用重力自由度为2的约束对重力进一步修正



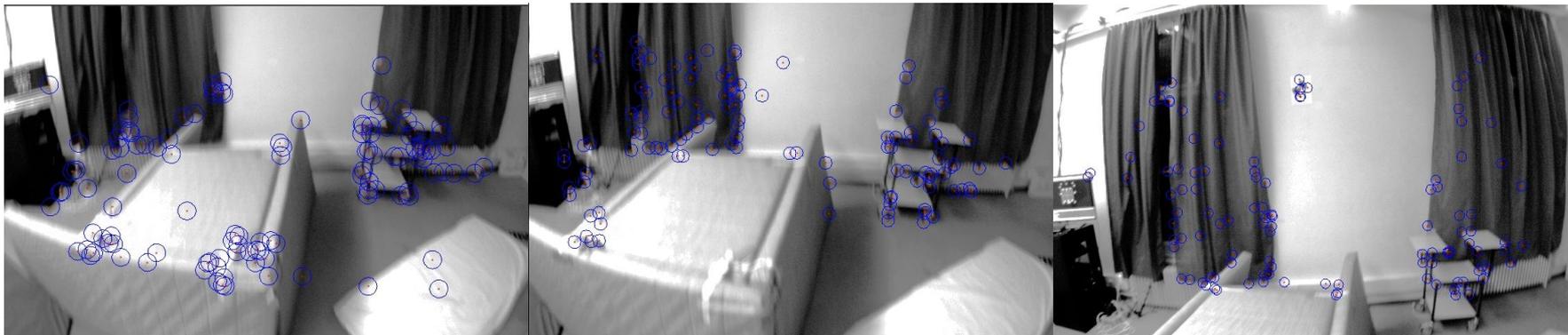
# 中值绝对偏差MAD

- 视觉权重设置:

$$\hat{\sigma}(\{res_{k,i}\}) = c \text{median}(\{|res_{k,i} - \text{median}(\{res_{k,i}\})|\})$$

其中  $c = 1.4826$ ,  $res_{k,i}$  表示第  $k$  帧图像上第  $i$  个特征的重投影误差,  $\{res_{k,i}\}$  表示第  $k$  帧上所有特征的重投影误差集合, 则第  $k$  帧图像上的信息矩阵为:

$$M_I = \begin{bmatrix} 1/\hat{\sigma}(\{res_{k,i}\})^2 & 0 \\ 0 & 1/\hat{\sigma}(\{res_{k,i}\})^2 \end{bmatrix}$$



模糊噪声大, 清晰噪声小

# 实验结果-Test数据集

Sequence	APE [mm]	ARE [deg]	RPE [mm]	RRE [deg]	Badness	Initiali	Tracking
C0_test	70.581	4.904	7.618	0.358	0.126	0	0.353
C1_test	363.268	19.442	19.542	0.454	0.977	4.925	1.816
C2_test	81.295	5.011	8.342	0.488	0.209	1.39	0.406
C3_test	54.047	5.069	3.664	0.429	0	0	0.27
C4_test	69.727	5.252	5.854	0.475	0.145	0	0.349
C5_test	192.708	11.27	8.936	0.456	0.671	0	0.964
C6_test	62.433	4.838	4.933	0.444	0.097	0	0.312
C7_test	62.106	8.035	5.47	0.558	0.06	2.859	0.311
C9_test	111.702	6.187	5.735	0.469	0.628	1.178	0.559
C10_test	265.791	9.74	5.4	2.629	1	0.566	1.329
C11_test	194.077	7.514	7.058	0.557	0.744	0.316	0.97
D0_test	110.19	7.59	8.871	0.962	0.384	0.423	0.551
D1_test	146.683	5.992	8.549	0.551	0.665	0	0.733
D2_test	461.698	8.045	40.107	2.165	0.84	1.82	2.308
D3_test	83.593	4.929	6.84	0.535	0.197	0	0.418
D4_test	75.722	4.202	4.852	0.554	0.16	0	0.379
D5_test	141.606	5.102	11.76	0.369	0.375	2.348	0.708
D6_test	139.052	4.788	10.179	0.454	0.548	0.53	0.695
D7_test	174.516	4.554	14.189	0.455	0.566	0	0.873
D8_test	324.446	11.745	20.145	0.585	0.895	2.781	1.622
D9_test	78.167	3.352	3.171	0.469	0.129	0.303	0.391
D10_test	284.414	10.677	29.274	8.227	0.67	0.493	1.422

# 报告纲要

---

## ➤ 数据集分析

## ➤ 针对运动模糊的鲁棒VI-SLAM系统

- 基于指数滑动平均 (EMA) 的IMU数据处理

- 旋转平移解耦的鲁棒初始化

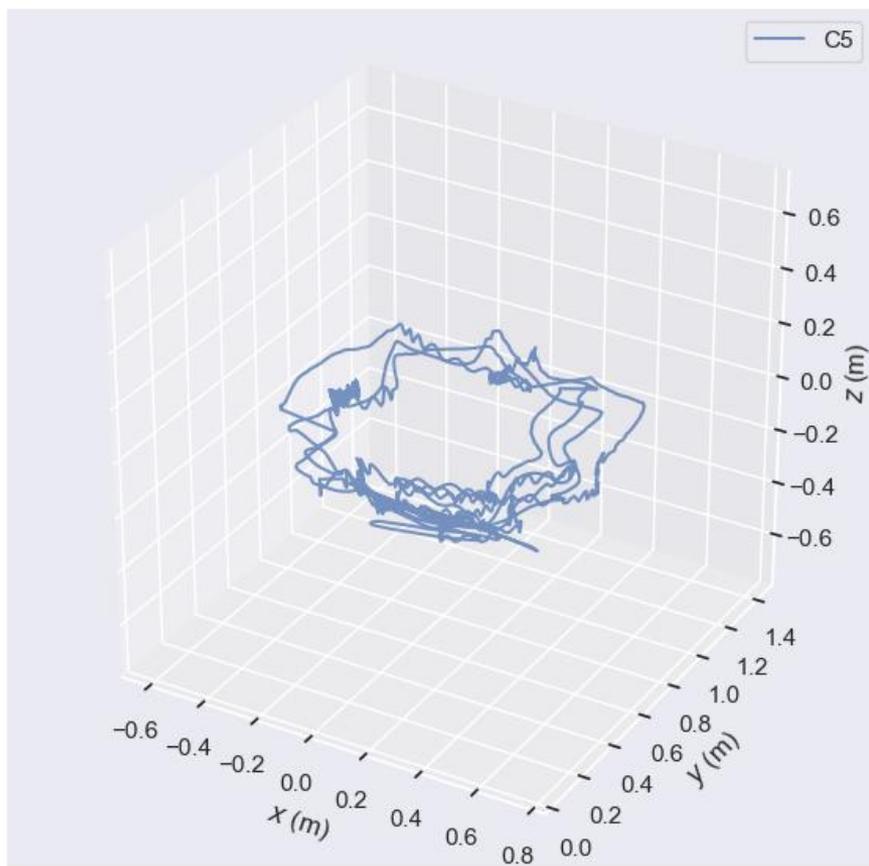
- 中值绝对偏差MAD

## ➤ 实验结果

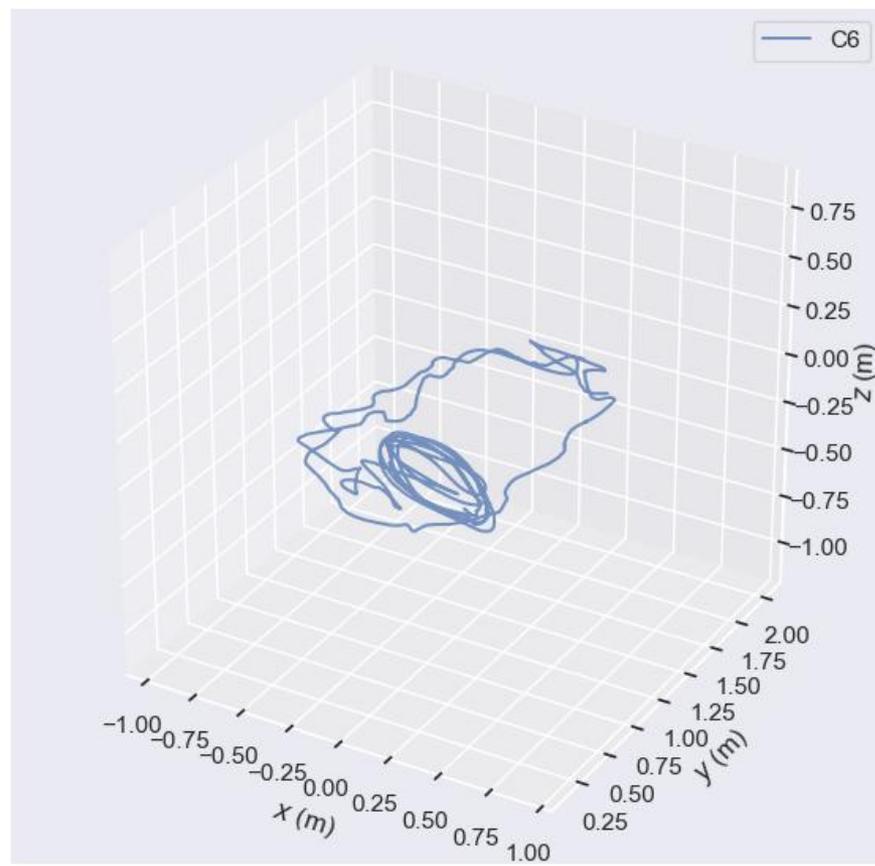
# 消融实验 (ATE)

Sequence	VINS-Mono	Ours	NO-EMA	NO-解耦初始化	NO-MAD
C0_test	129.573	<b>70.581</b>	83.235	98.167	87.339
C1_test	244.144	363.268	<b>107.691</b>	266.744	151.682
C2_test	639.613	<b>81.295</b>	88.005	134.727	115.603
C3_test	307.536	<b>54.047</b>	62.551	136.336	149.871
C4_test	220.828	69.727	71.817	<b>65.887</b>	83.511
C5_test	292.632	192.708	<b>133.119</b>	184.789	170.332
C6_test	105.224	<b>62.433</b>	64.344	88.215	80.078
C7_test	151.304	62.106	<b>60.53</b>	70.438	66.015
C9_test	392.752	111.702	<b>78.256</b>	292.246	255.875
C10_test	451.994	265.791	278.476	189.826	<b>176.564</b>
C11_test	421.045	194.077	199.013	<b>128.482</b>	154.746
D0_test	239.696	<b>110.19</b>	125.549	140.767	129.471
D1_test	206.741	146.683	139.467	<b>108.736</b>	129.362
D2_test	1326.067	<b>461.698</b>	672.28	592.637	795.665
D3_test	147.733	<b>83.593</b>	86.753	140.891	121.56
D4_test	133.125	<b>75.722</b>	84.461	88.843	86.522
D5_test	242.447	141.606	167.911	<b>122.052</b>	140.662
D6_test	231.306	139.052	152.961	126.235	<b>113.194</b>
D7_test	802.349	174.516	310.58	182.758	<b>148.9</b>
D8_test	382.383	324.446	261.217	<b>238.583</b>	651.24
D9_test	108.386	78.167	<b>77.707</b>	86.428	86.679
D10_test	1414.395	<b>284.414</b>	400.729	527.814	557.539

# 轨迹图

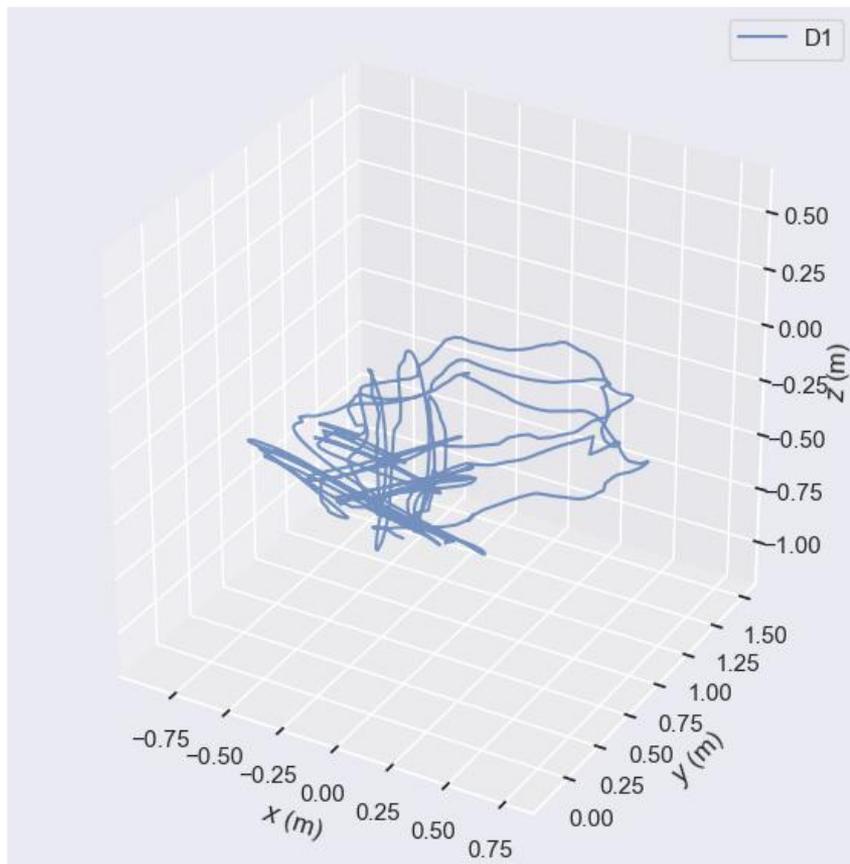


C5\_test

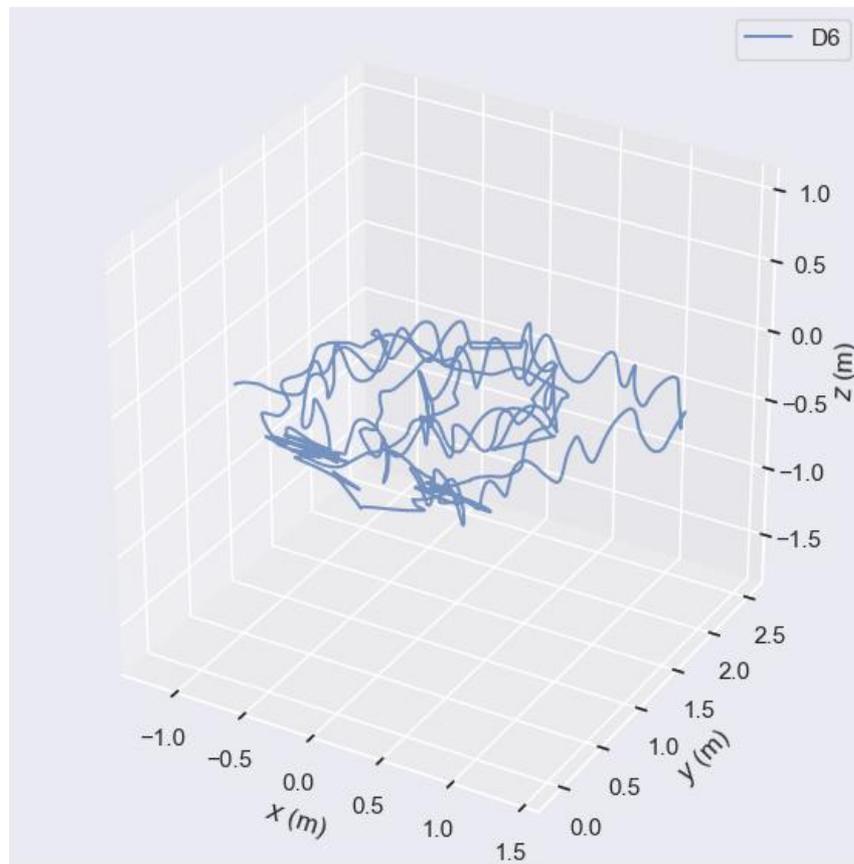


C6\_test

# 轨迹图



D2\_test



D6\_test

# 谢谢!

---

## Q&A ?