



中国卫星导航定位协会
GNSS & LBS Association of China



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY



莫斯科鲍曼国立技术大学
Bauman Moscow State Technical University

自主无人系统

多传感器融合技术

汇报人：沈凯

北京理工大学自动化学院

汇报内容



一 研究背景及意义

二 国内外研究现状

三 可观测性与可观测度

四 多源自适应融合算法

五 总结与展望



一、研究背景及意义

- 自主无人系统又称移动机器人（例如无人车、无人机等），是一种集环境感知、导航定位、决策规划、运动控制等功能于一体的智能系统。
- 自主无人系统具有机动灵活、低成本和适应性强等特点，可替代人类完成无人驾驶、应急救援和军事作战等任务，拓展人类活动空间，推动军事变革、经济发展和社会进步。

一、研究背景及意义

民用



无人驾驶



车联网



灾后救援



服务机器人

军用



无人机



陆上无人平台

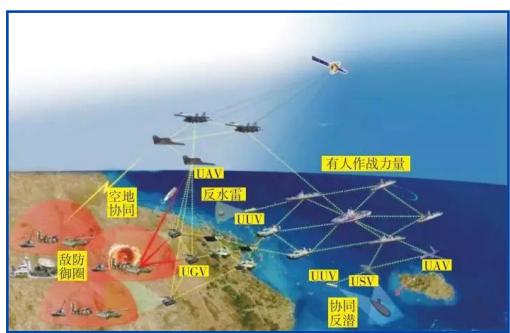


人机协同作战



空中加油

汇报内容



一 研究背景及意义

二 国内外研究现状

三 可观测性与可观测度

四 多源自适应融合算法

五 总结与展望



二、国内外研究现状

国外布局

美国国防部《无人系统综合路线图》

- 自主性和机器人技术的进步有可能成为重要的力量倍增器；
- 人工智能在许多领域具有推进无人系统发展的巨大潜力，包括：导航和感知（多传感器智能融合）、群体行为和战术等，这将有利于开发出具有更高自主性的无人系统。



二、国内外研究现状

国内布局

国务院印发《新一代人工智能发展规划》

- 重点突破复杂动态场景感知与理解、实时精准定位、面向复杂环境的智能导航等共性技术；
- 关键共性技术的研发部署要以算法为核心，以数据和硬件为基础，以提升感知识别等能力为重点。

二、国内外研究现状

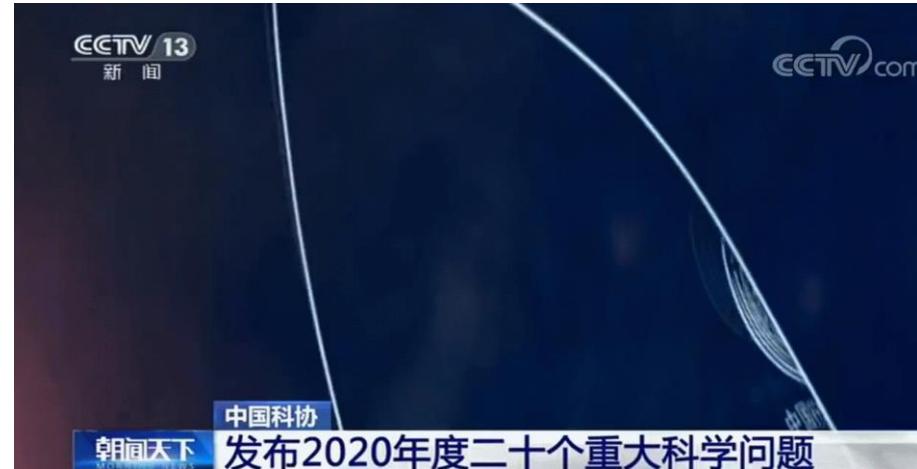
国内布局

中国科协发布20个重大科学问题和工程技术难题

● 10个工程技术难题为：

● 无人车如何实现在卫星不可用

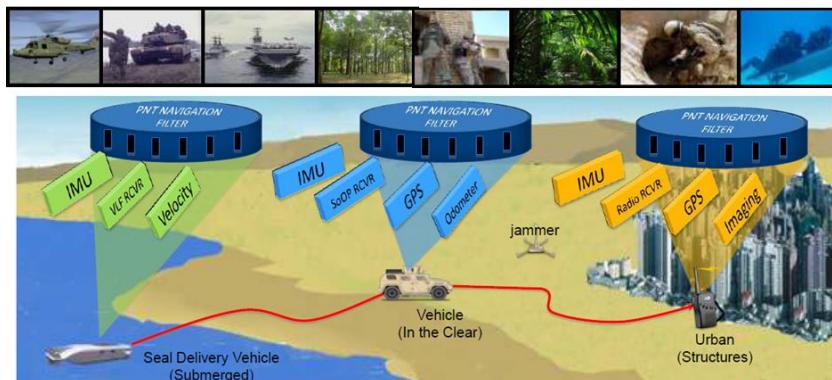
条件下的高精度智能导航？



二、国内外研究现状

国外—美国

美国国防高级研究计划局（DARPA）提出融合一切可用的信号源，以实现高可靠性和高可用性的导航定位；基于因子图提出多源定位导航架构，以实现不同传感器的优选组合。



美国多源定位导航概念示意图



美国空军研究实验室样机

二、国内外研究现状

国外—俄罗斯

● 俄罗斯莫斯科鲍曼国立技术大学提出“功能-智能导航 (Functional-Intelligent Navigation)”概念，设计了新型的智能导航系统，并应用在航空电子系统中。



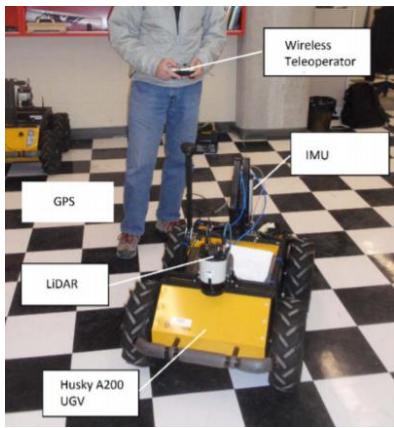
开放式的飞行模拟、智能导航与控制试验平台

二、国内外研究现状

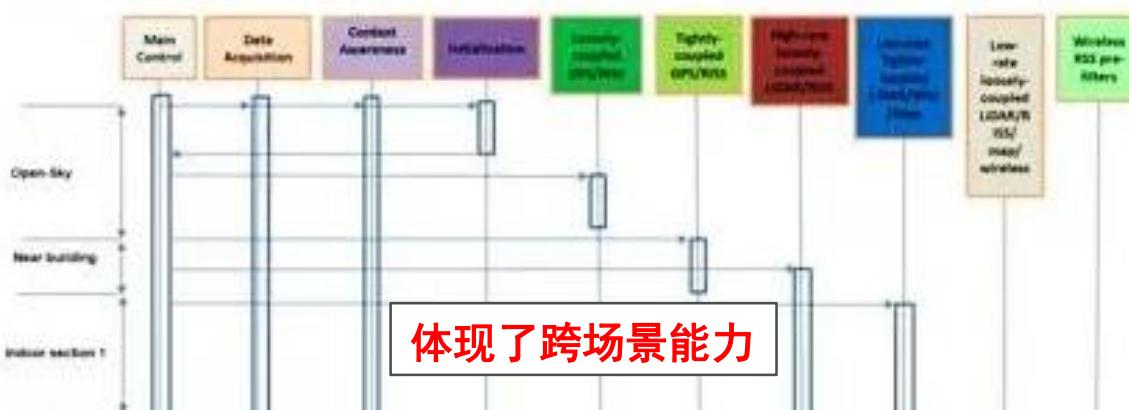
国外—加拿大

加拿大皇家军事学院提出可重配置的多传感器融合导航与定位架构，并利用无人引导车，通过搭载惯导、里程计、相机等传感器，实现了室内外跨场景传感器切换与无缝导航。

加拿大皇家军事学院无人车



可重配置多传感器融合架构



二、国内外研究现状

国内—百度

● 百度Apollo平台包括车辆平台、硬件平台、软件平台、云端数据服务等四部分。百度擅长的是软件平台和云端数据，车辆平台、硬件平台则由生态联盟内的合作伙伴提供。



Apollo迭代过程		
版本	亮点	开放功能
Apollo1.0 2017.7.5	支持封闭场地自动驾驶	开放数据平台1.0, 和高精地图联合测试
Apollo1.5 2017.9.20	支持昼夜定车道自动驾驶	开放障碍物感知、决策规划、云端仿真、高精地图服务、端到端的深度学习
Apollo2.0 2018.1.8	支持简单城市道路自动驾驶	首次开放安全服务，并进一步强化了其自定位、感知、规划决策和云端仿真等能力
Apollo2.5 2018.4.19	支持限定区域视觉高速自动驾驶 解锁高速公路场景	开放视觉感知、实时相对地图、高速规划与控制三大能力
Apollo3.0 2018.7.4	提供了量产园区自动驾驶解决方案	提供软、硬件、安全、多模人机交互方面的全面升级的开放平台服务支持
Apollo3.5 2019.1.8	支持包括市中心和住宅小区场景等 复杂城市道路自动驾驶	发布开源计算框架Apollo Cyber-RT



二、国内外研究现状

面临的挑战

场景



城市峡谷



隧道



高架桥

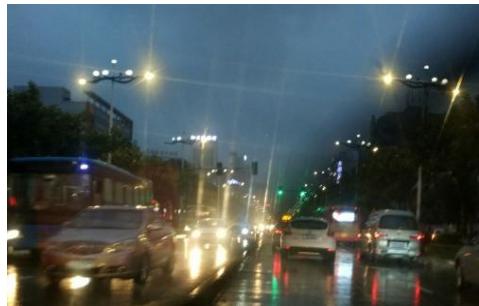


对抗性环境

天气



雾天



雨天

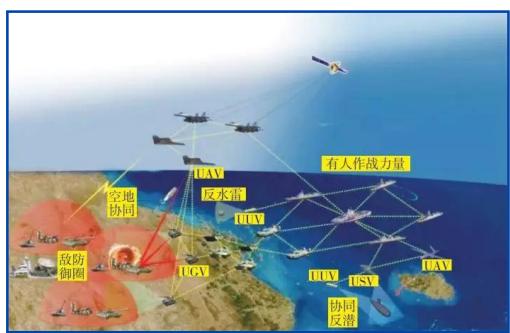


雪天



灾害

汇报内容



一 研究背景及意义

二 国内外研究现状

三 可观测性与可观测度

四 多源自适应融合算法

五 总结与展望



三、可观测性与可观测度

3.1 惯性导航系统的控制理论研究

从控制理论的角度看导航系统

1988年，I.Y. Bar-Itzhack发表论文《Control Theoretic Approach to Inertial Navigation Systems》，从控制理论的角度分析了惯性导航系统的可观测性，并给出了可观测性与估计质量（或精度）的关系。1992年，I.Y. Bar-Itzhack等提出了分段式定常系统（PWCS）的可观测性分析方法，并应用在惯导系统传递对准过程分析中。

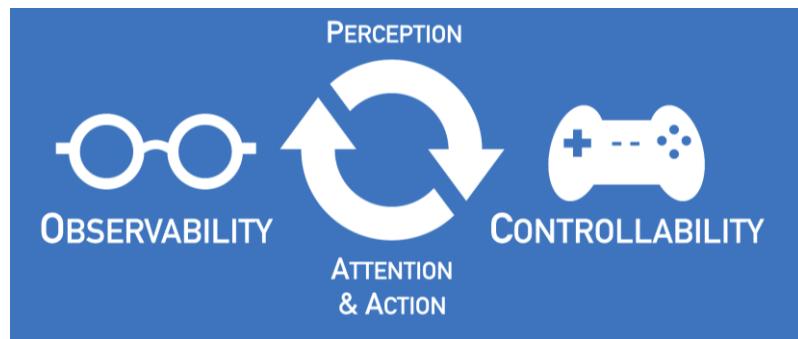
三、可观测性与可观测度

3.2 可观测性与可观测度分析方法

系统的可观测性是指是否能够利用有限时间内的系统观测值，确定系统的初始状态。

Yes or No? 可观测或不可观测?

可观测度反映了系统状态变量可被观测的程度。 度量





三、可观测性与可观测度

3.2 可观测性与可观测度分析方法

分析系统的可观测度，可以确定哪些状态估计的比较准确，哪些状态难以估计，从而判断传感器的工作性能及其环境适应能力，为多传感器优选组合提供决策依据。

在线决策

可观测度与系统状态可估计性 (Estimability) 直接相关，在 Kalman 滤波性能自评估机制外，提供新的滤波性能表征方法。



三、可观测性与可观测度

3.3 线性时变系统可观测度分析方法

● 线性时不变(LTI)系统:

$$\text{rank}[\mathcal{O}(H, \Phi)] = \text{rank} \begin{bmatrix} H \\ H\Phi \\ \vdots \\ H\Phi^{n-1} \end{bmatrix} = n$$

可观测性矩阵



三、可观测性与可观测度

3.3 线性时变系统可观测度分析方法

线性时变(LTV)系统:

$$\text{rank} \left[O_k (H, \Phi) \right] = \text{rank} \begin{bmatrix} H_k \\ H_{k+1} \Phi_{k+1} \\ \vdots \\ H_{k+l-1} \Phi_{k+l-1} \cdots \Phi_k \end{bmatrix} = n$$

可观测性矩阵



三、可观测性与可观测度

3.3 线性时变系统可观测度分析方法

线性时变(LTV)系统:

$$DoO_k^i = \frac{E_k \left[(x^i)^2 \right]}{E_k \left[(y^i)^2 \right] \sum_{j=1}^n (a_{j,k}^i)^2}$$

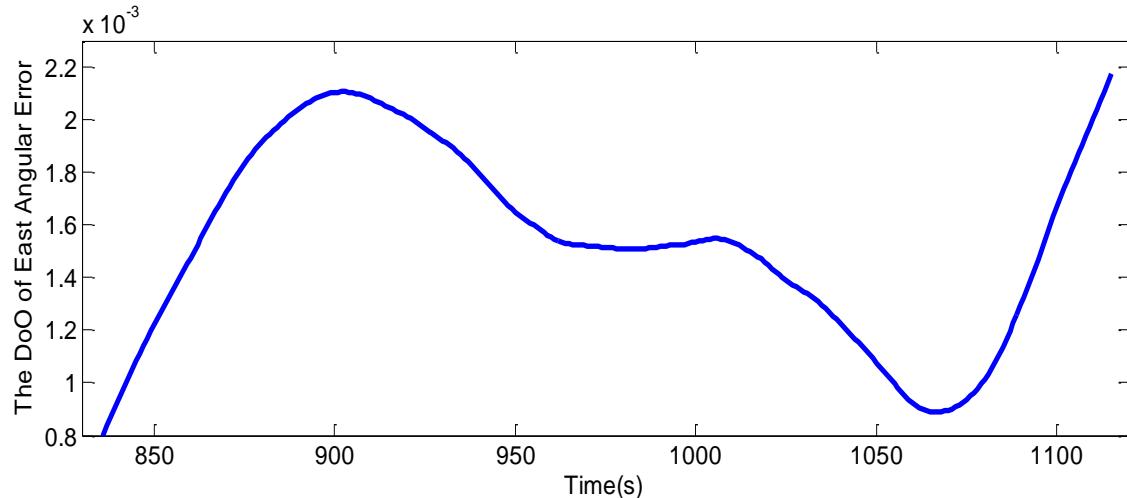


可观测度 (标量)

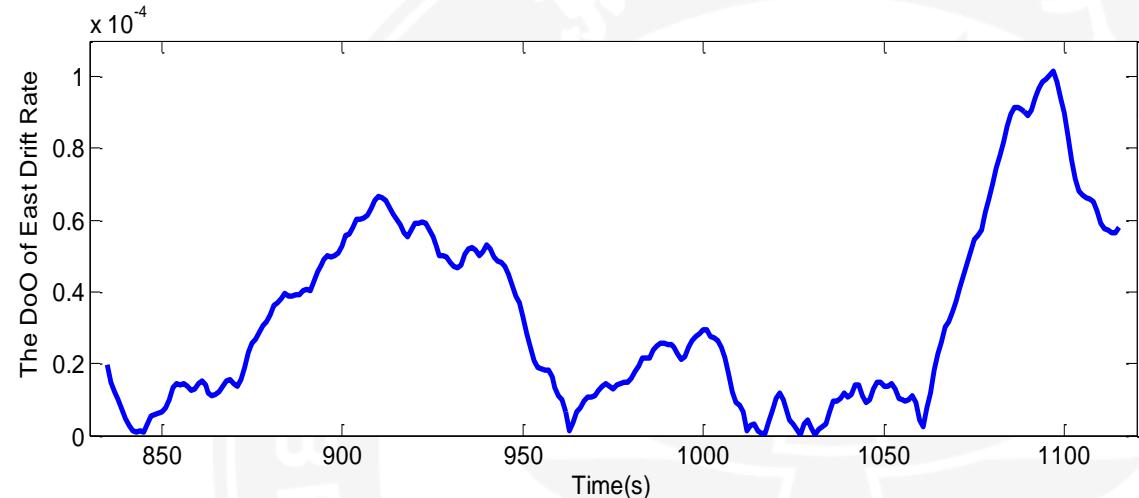
三、可观测性与可观测度

3.3 线性时变系统可观测度分析方法

惯性导航系统误差可观测度分析



惯导姿态误差



惯导陀螺漂移

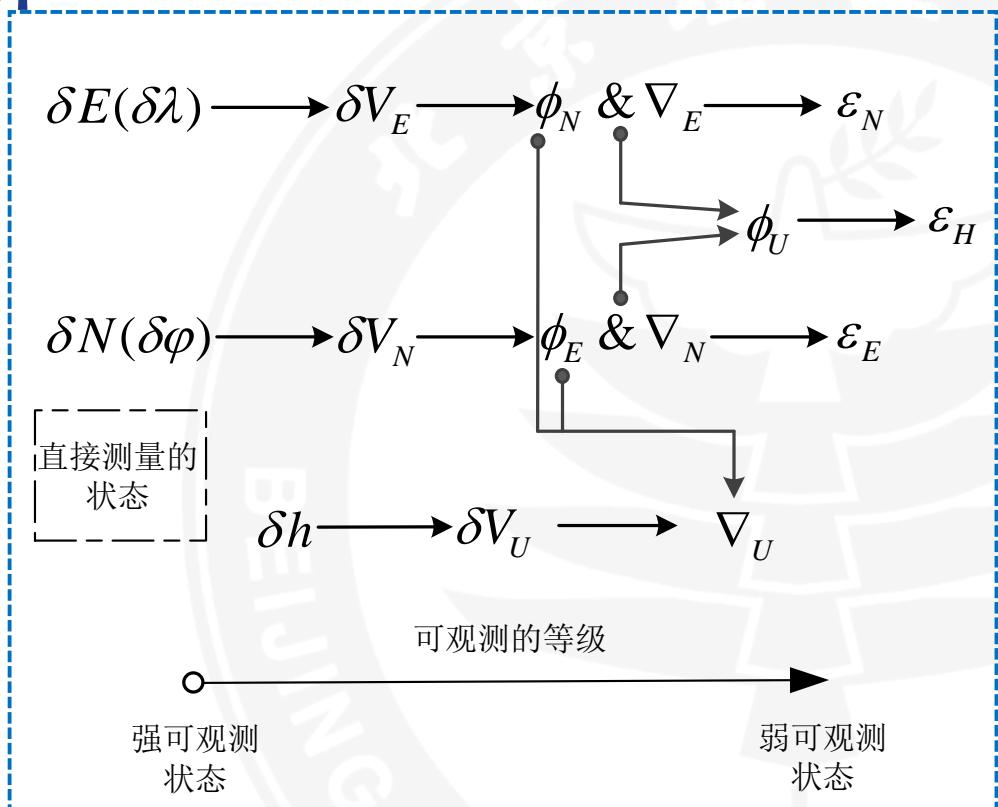
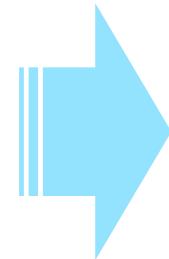
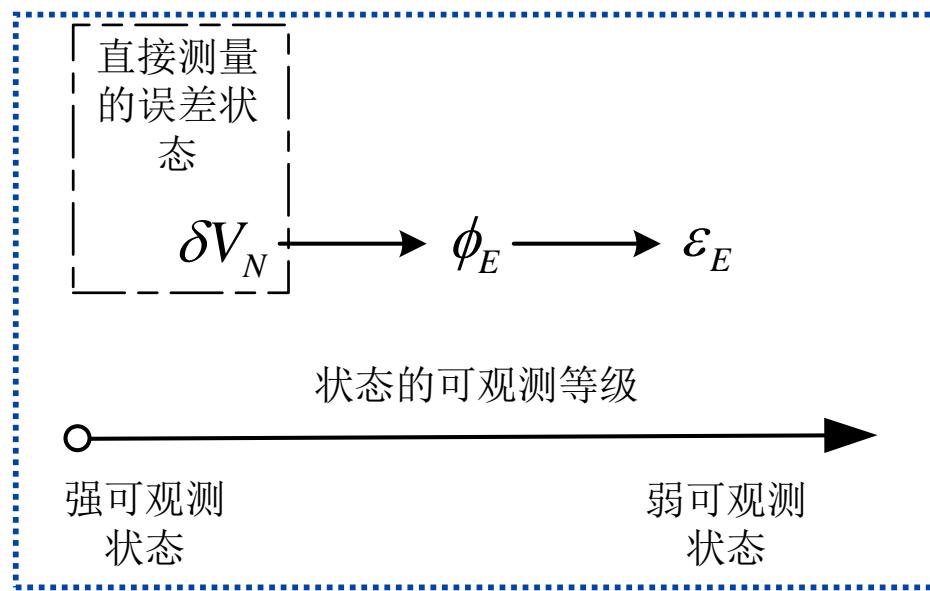
Kai Shen*, Yuanqing Xia, Meiling Wang, et al. Quantifying observability and analysis in integrated navigation [J]. Navigation-Journal of the Institute of Navigation. 2018, 65 (2): pp. 169 - 181.

三、可观测性与可观测度

3.3 线性时变系统可观测度分析方法



惯性导航系统误差可观测度分析

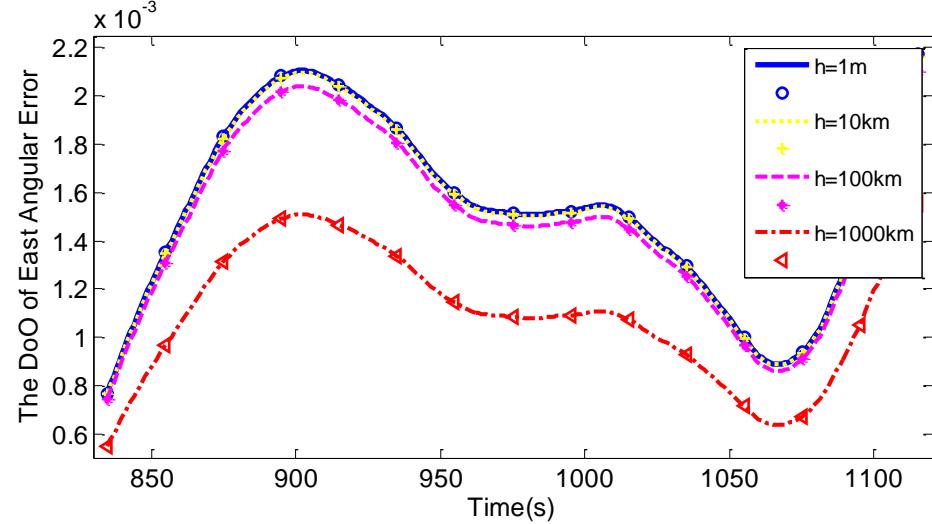


三、可观测性与可观测度

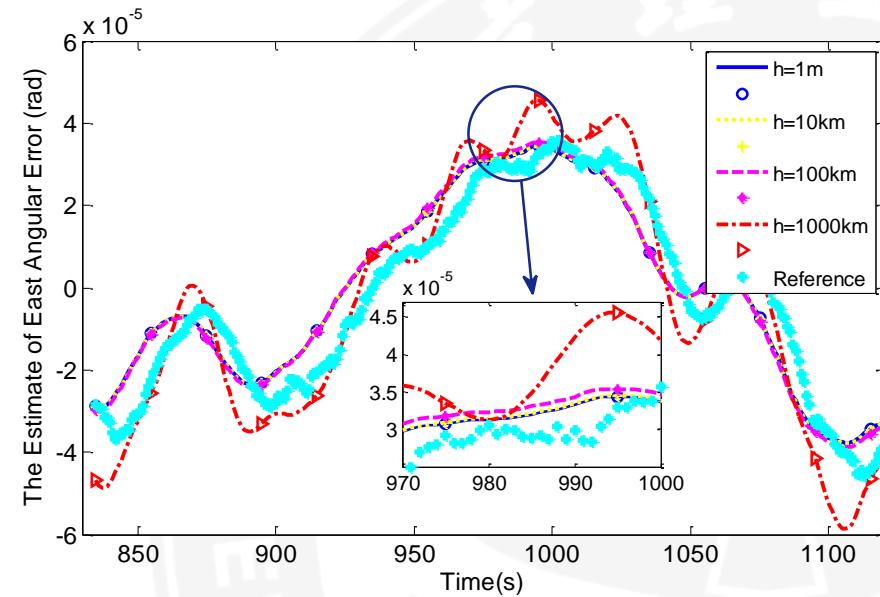
3.3 线性时变系统可观测度分析方法



惯性导航系统误差可观测度分析



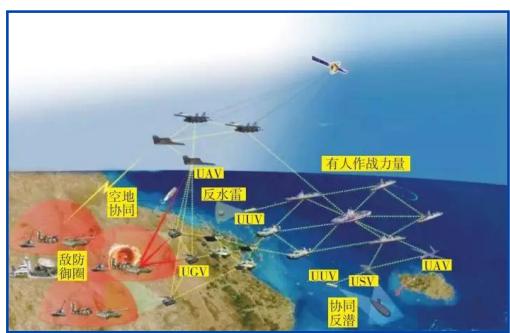
惯导误差可观测度



惯导姿态误差

Kai Shen*, Yuanqing Xia, Meiling Wang, et al. Quantifying observability and analysis in integrated navigation [J]. Navigation-Journal of the Institute of Navigation. 2018, 65 (2): pp. 169 - 181.

汇报内容



一 研究背景及意义

二 国内外研究现状

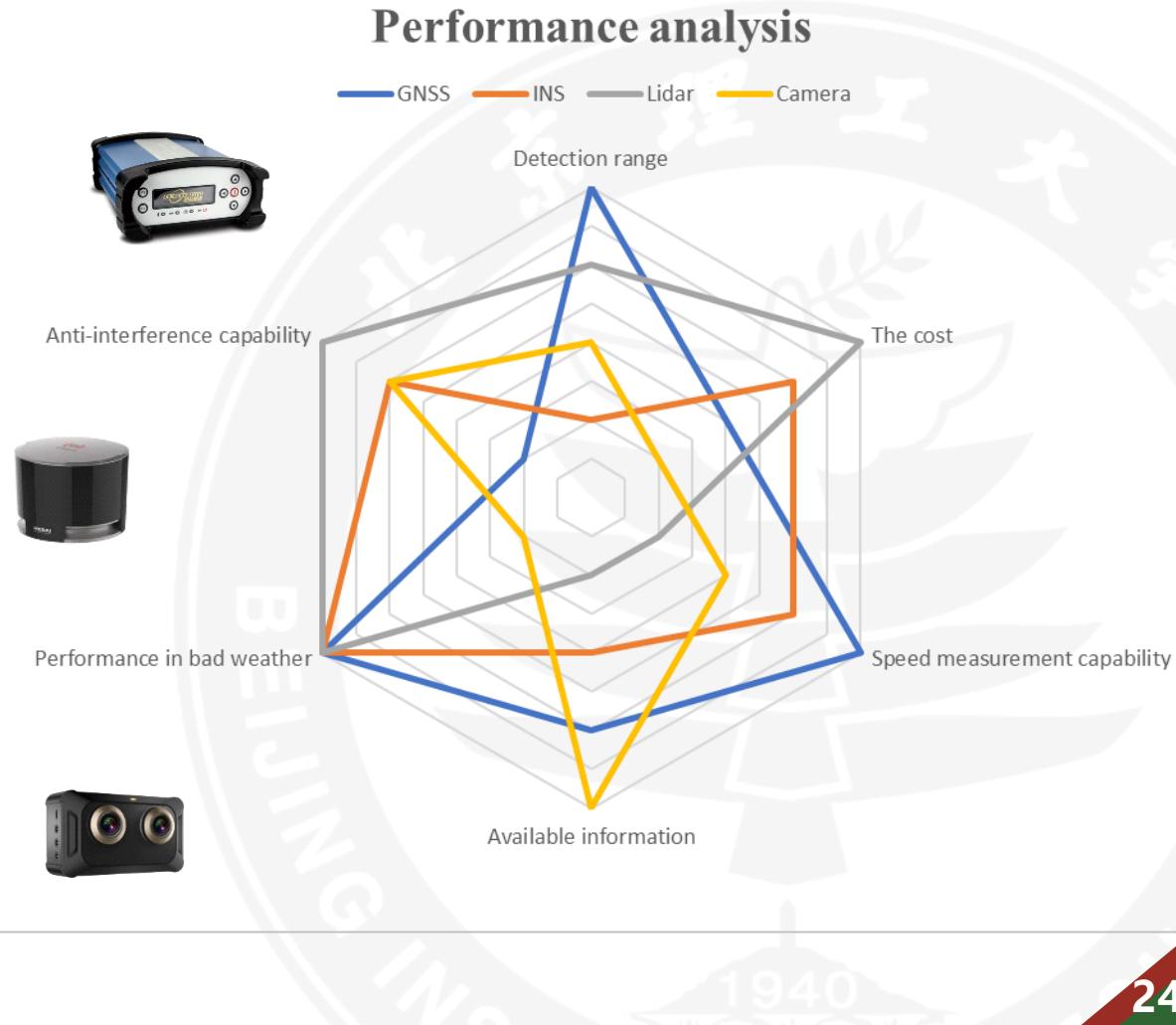
三 可观测性与可观测度

四 多源自适应融合算法

五 总结与展望

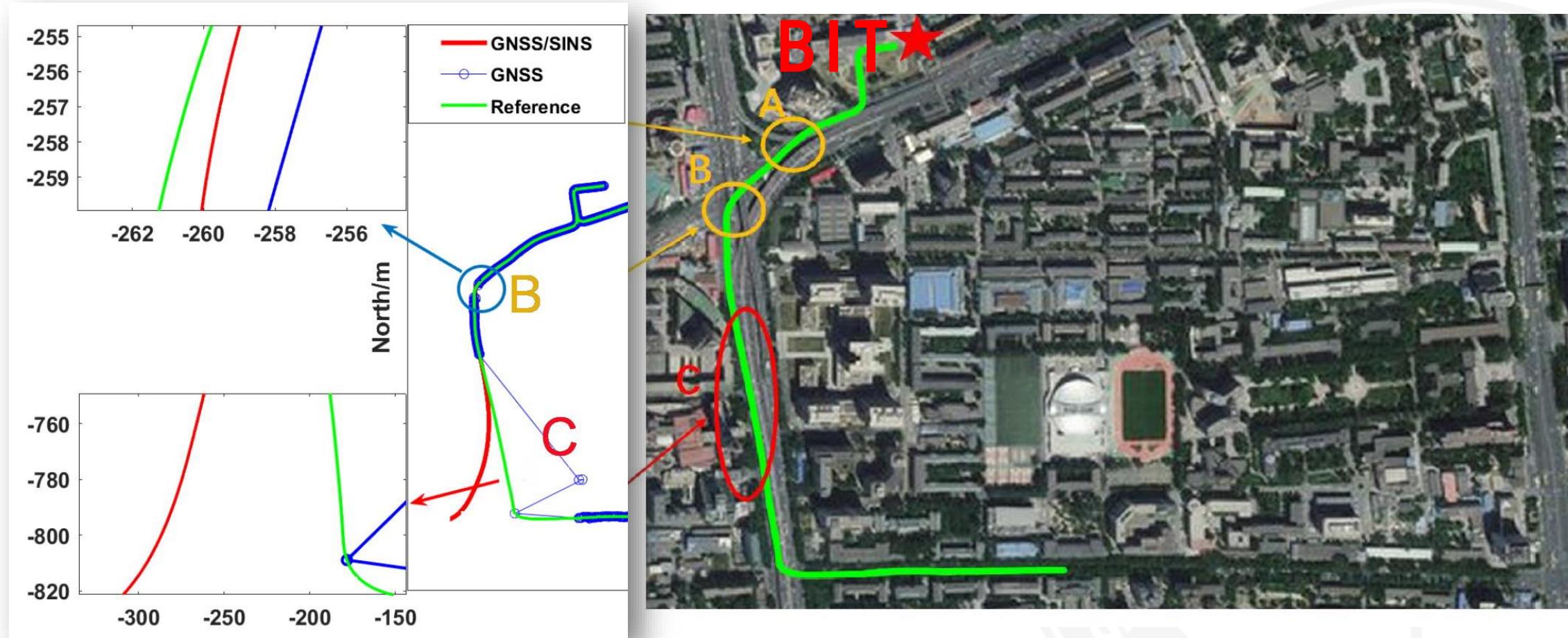
四、多源自适应融合算法

4.1 多传感器组合导航



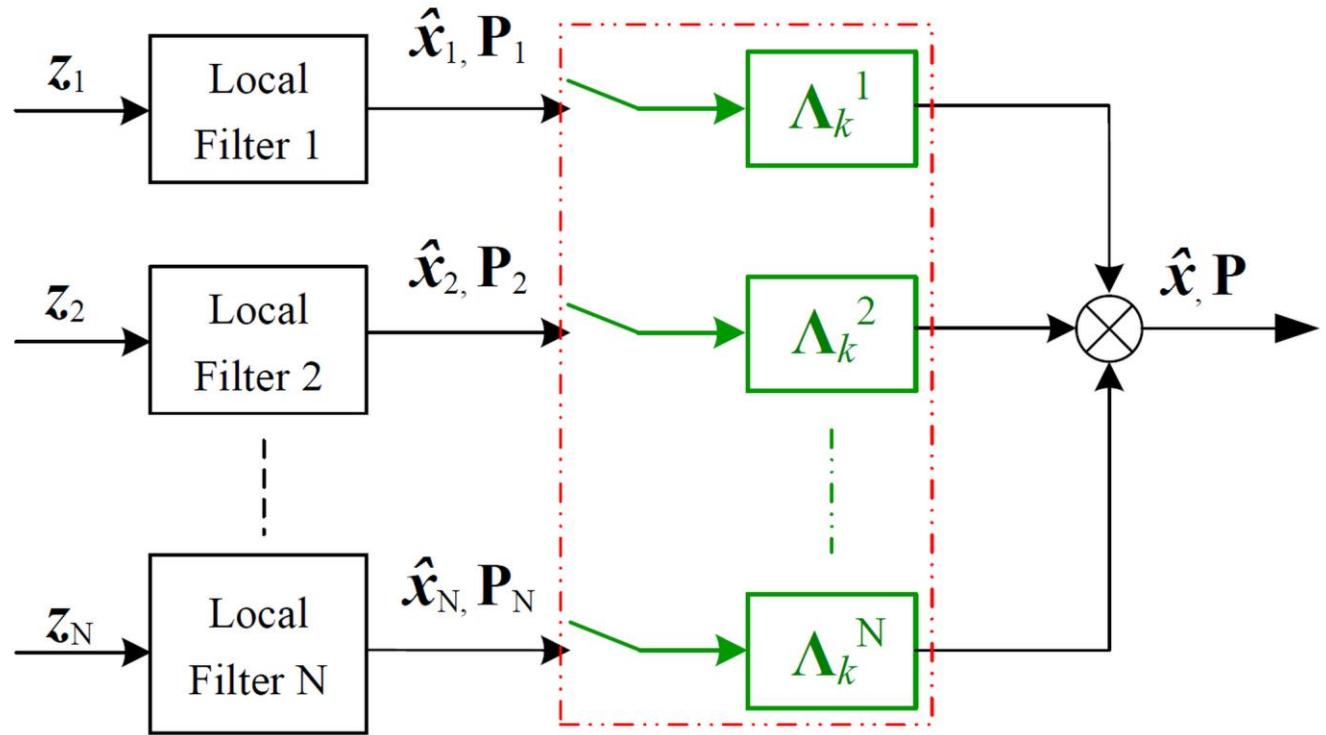
四、多源自适应融合算法

4.2 自适应融合算法(FKF)



四、多源自适应融合算法

4.2 自适应融合算法(FKF)



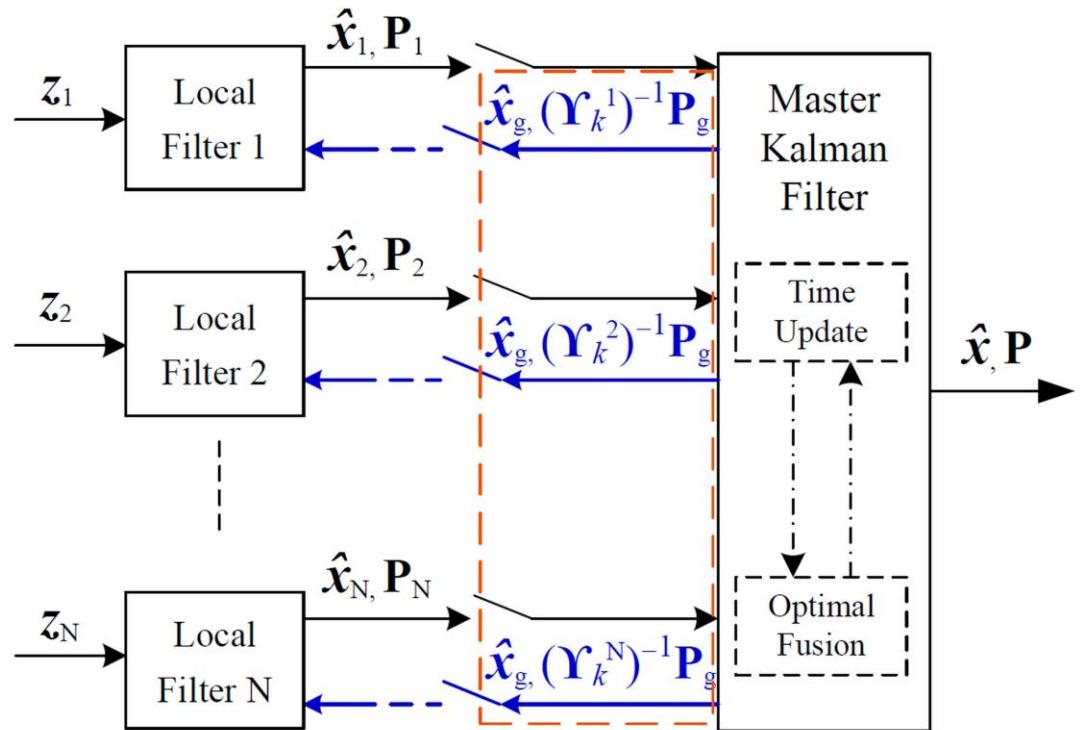
$$\mathbf{P}_{k+1}^g = \sum_{\zeta=1}^N \boldsymbol{\Lambda}_k^\zeta \mathbf{P}_k^\zeta \boldsymbol{\Lambda}_k^{\zeta T}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^g = \sum_{\zeta=1}^N \boldsymbol{\Lambda}_k^\zeta \hat{\mathbf{x}}_k^\zeta$$

Kai Shen*, Meiling Wang, et al. Observability analysis and adaptive information fusion for integrated navigation of unmanned ground vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67 (9): pp. 7659-7668.

四、多源自适应融合算法

4.2 自适应融合算法(FKF)



$$\mathbf{Q}_k^\zeta = (\mathbf{Y}_k^\zeta)^{-1} \mathbf{Q}_k^g$$

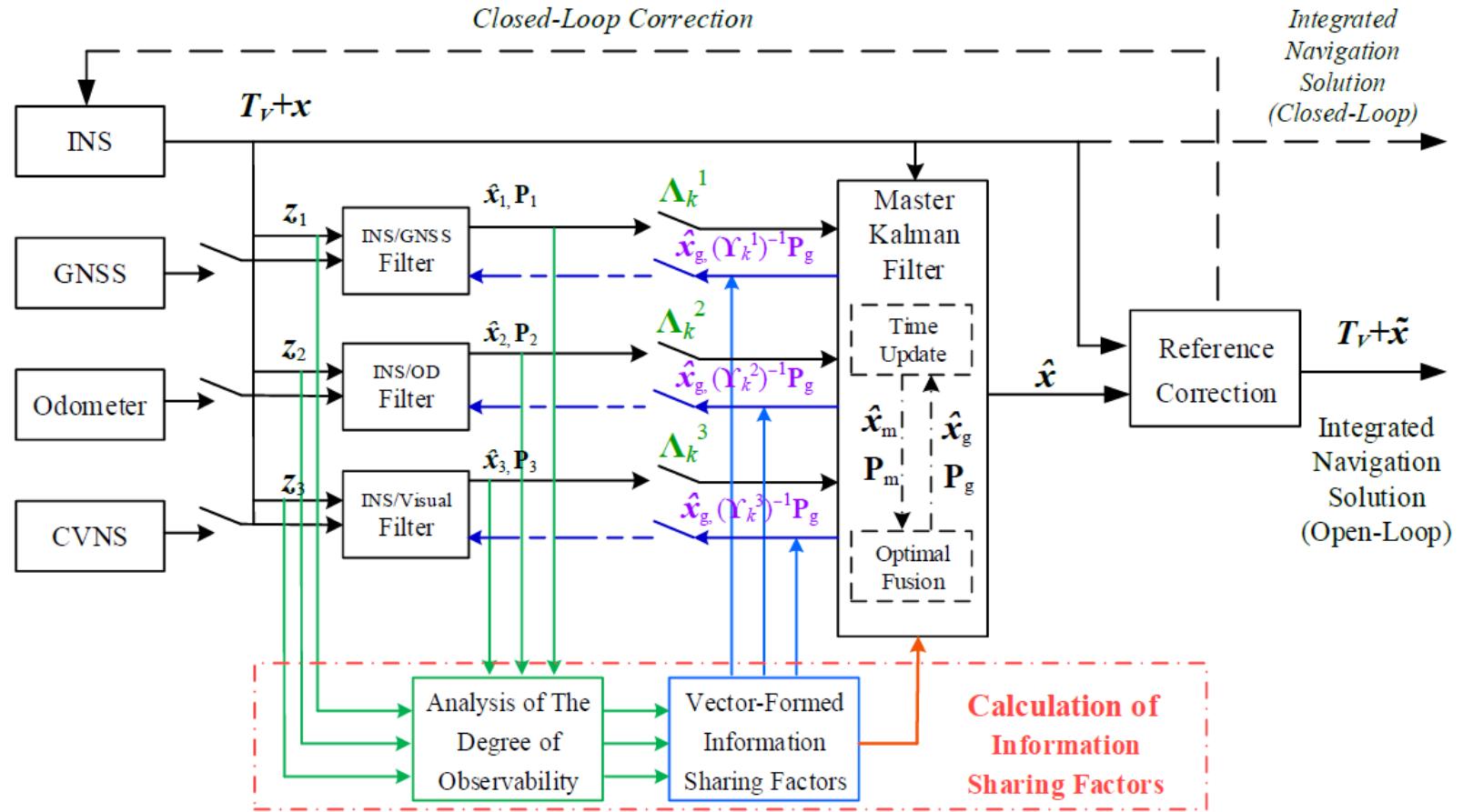
$$\mathbf{P}_k^\zeta = (\mathbf{Y}_k^\zeta)^{-1} \mathbf{P}_k^g$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^\zeta = \hat{\mathbf{x}}_k^g$$

Kai Shen*, Meiling Wang, et al. Observability analysis and adaptive information fusion for integrated navigation of unmanned ground vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67 (9): pp. 7659-7668.

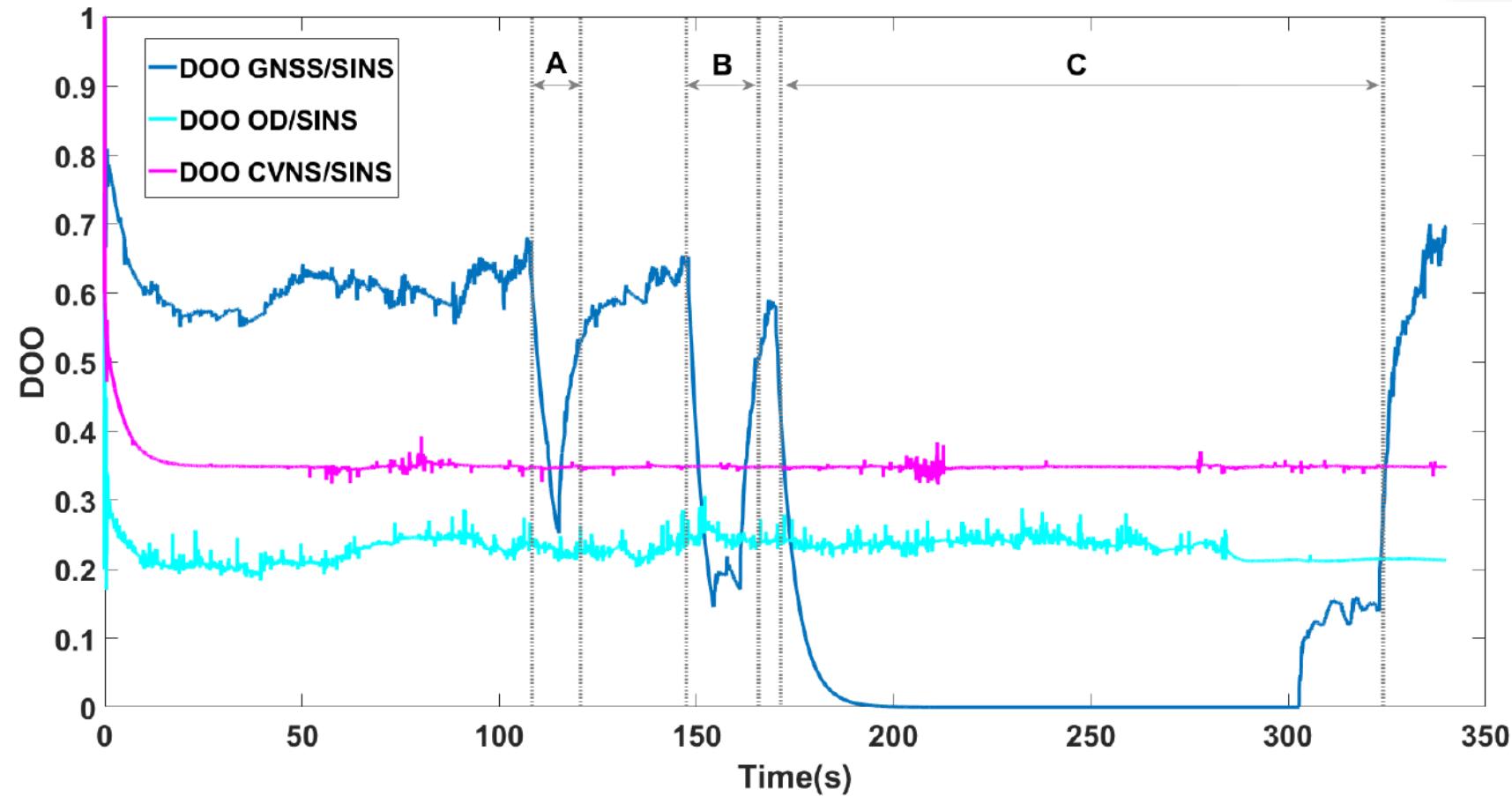
四、多源自适应融合算法

4.2 自适应融合算法(FKF)



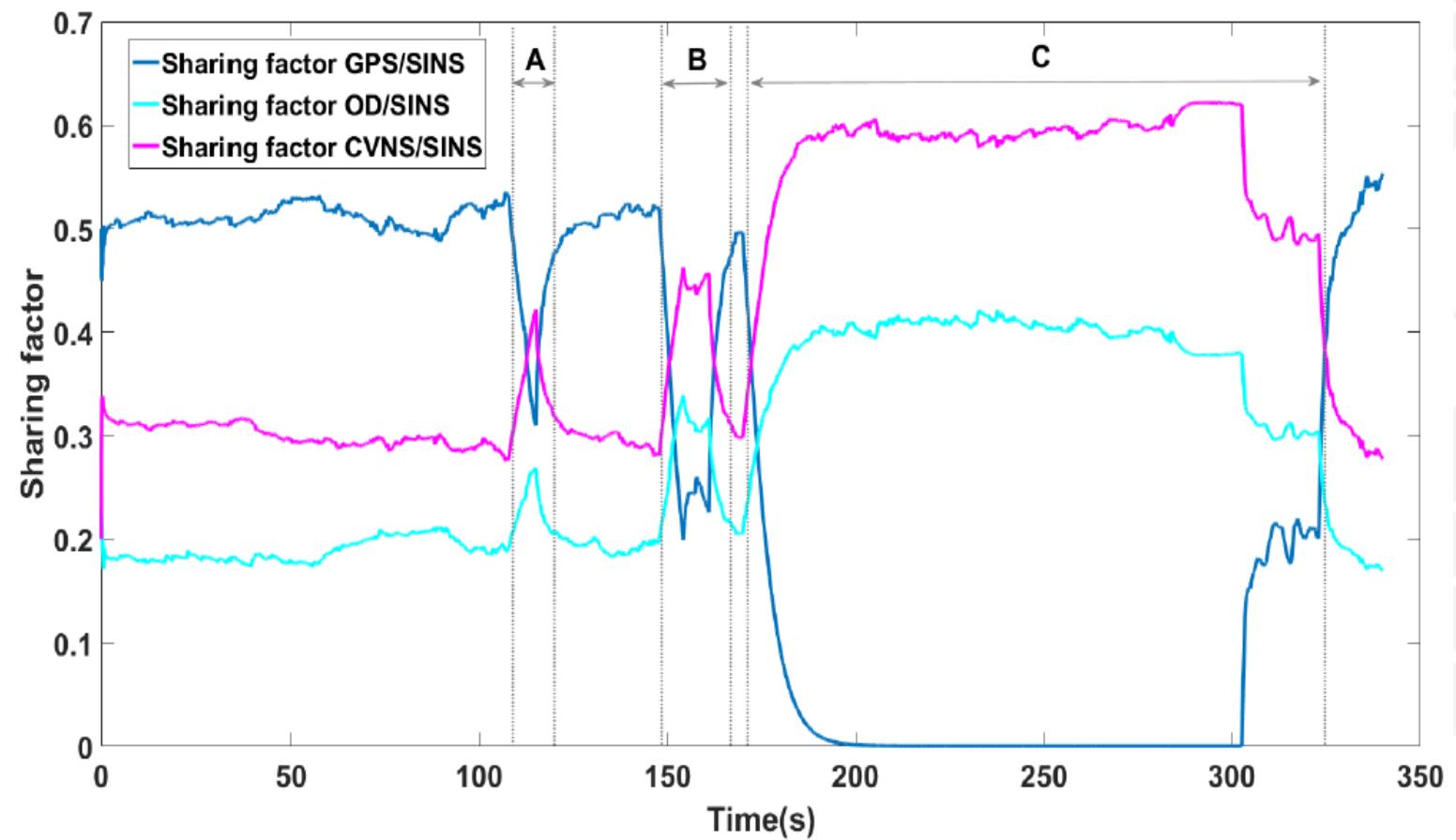
四、多源自适应融合算法

4.2 自适应融合算法(FKF)



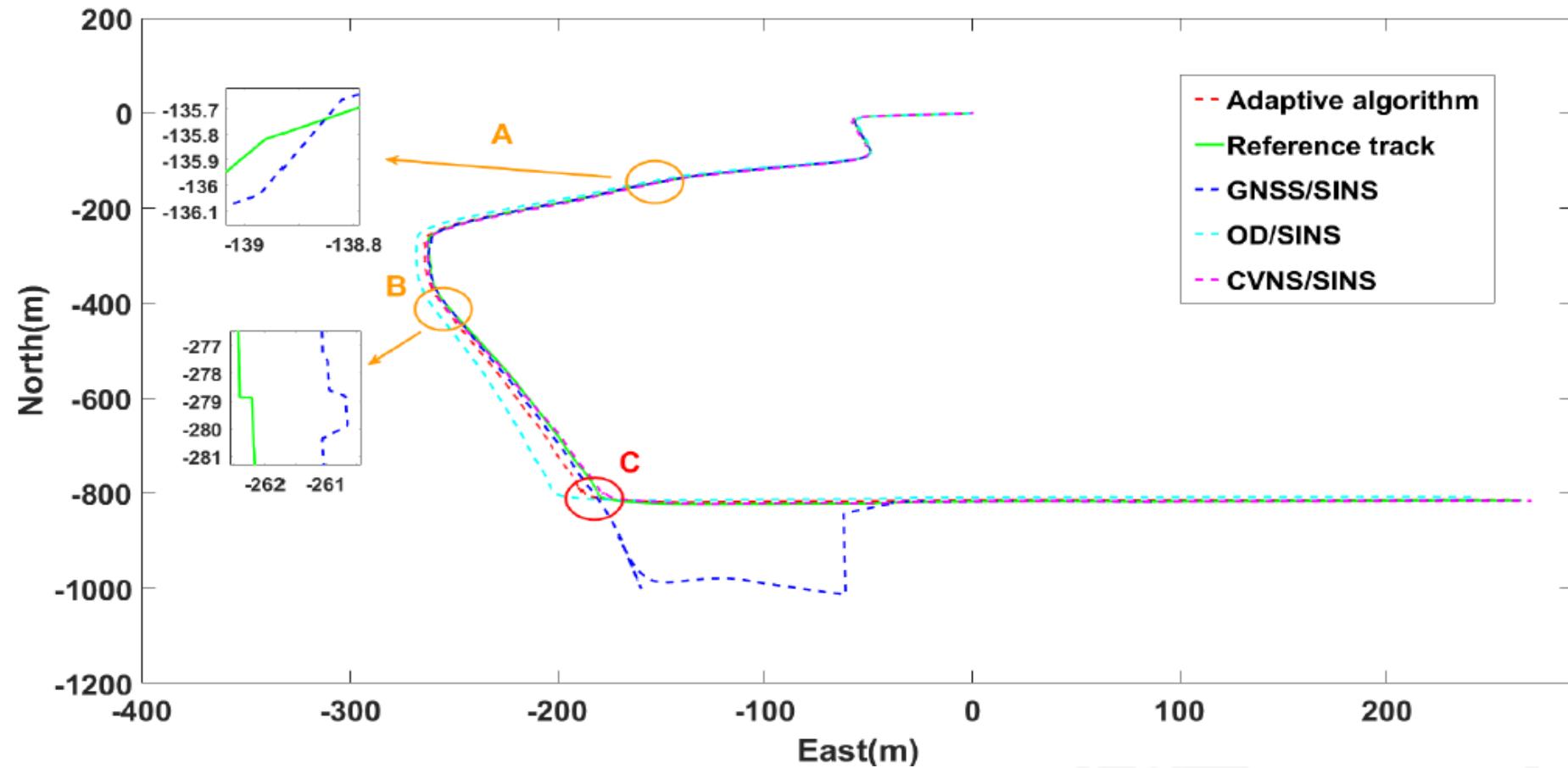
四、多源自适应融合算法

4.2 自适应融合算法(FKF)



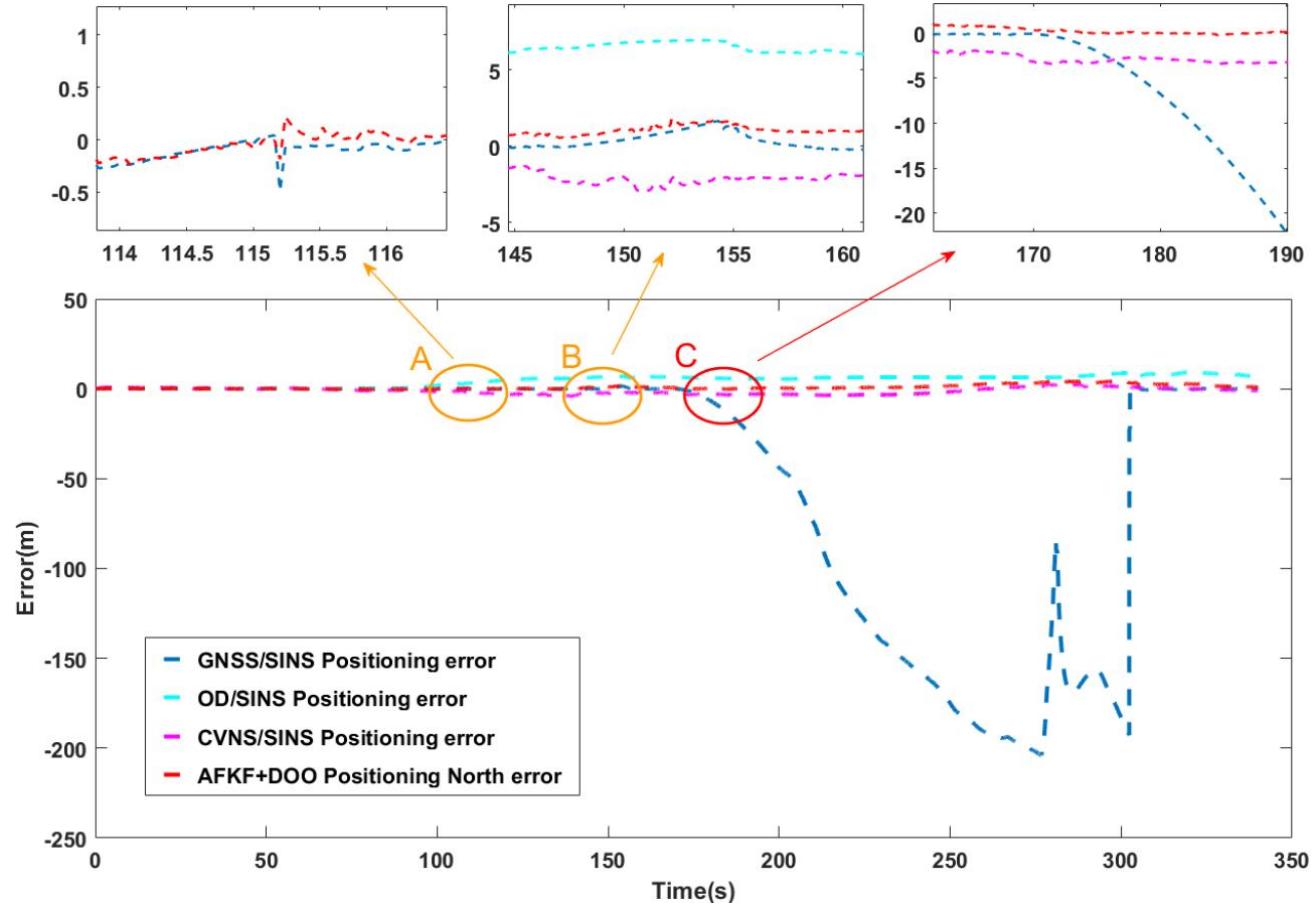
四、多源自适应融合算法

4.2 自适应融合算法(FKF)



四、多源自适应融合算法

4.2 自适应融合算法(FKF)



高的精度

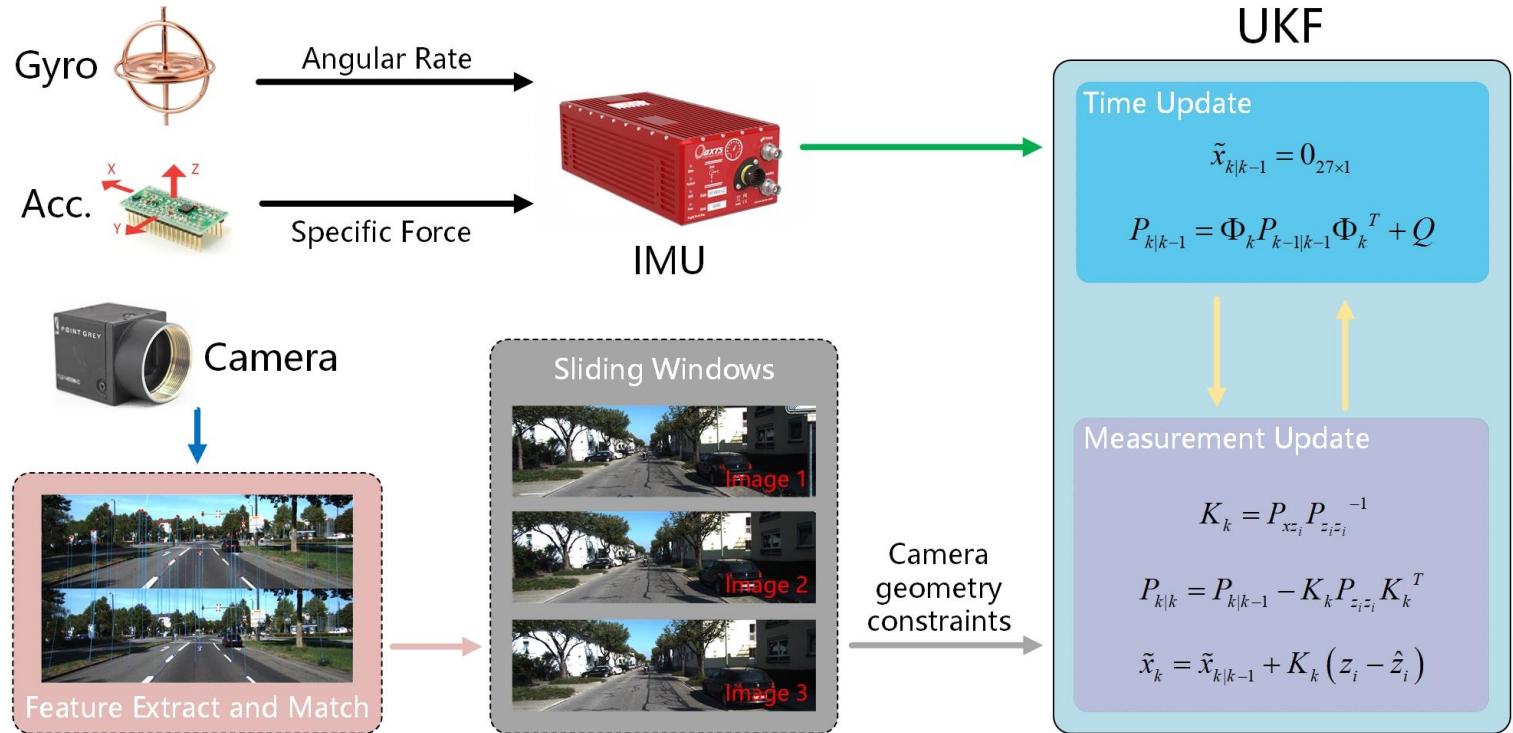
可靠性

鲁棒性

环境适应性

四、多源自适应融合算法

4.3 自适应鲁棒算法(VIO)



不确定性



Chaoyang Zhai, Meiling Wang, Yi Yang, Kai Shen*. Robust vision-aided inertial navigation system for protection against ego-motion uncertainty of unmanned ground vehicle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020.



四、多源自适应融合算法

4.3 自适应鲁棒算法(VIO)

● 先验协方差矩阵：

$$\mathbf{P}_k^{Fac} = E[\Delta_k \Delta_k^T]$$

$$\mathbf{P}_k^{Cal} = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k$$

● 对角化矩阵（算子）：

$$\mathbf{\Pi}_\kappa = [\Pi_{ij}]_{n \times n}$$

● 对角化方差矩阵：

$$\mathbf{D}_k^{Fac} = \sum_{\kappa=1}^n \mathbf{\Pi}_\kappa \mathbf{P}_k^{Fac}$$

$$\mathbf{D}_k^{Cal} = \sum_{\kappa=1}^n \mathbf{\Pi}_\kappa \mathbf{P}_k^{Cal}$$



四、多源自适应融合算法

4.3 自适应鲁棒算法(VIO)

● 异常度：

$$\alpha_k = \text{Trace} \left(\frac{\mathbf{D}_k^{Fac}}{n \cdot \mathbf{D}_k^{Cal}} \right)$$

并且 $M_\alpha = E[\alpha_k] = 1$
 $\delta_\alpha = 1 - 3$

● “量测异常度” (The Degree of Abnormity, DoA) 用于量测值异常程度的度量。



四、多源自适应融合算法

4.3 自适应鲁棒算法(VIO)

后验协方差矩阵:

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} + \boxed{\gamma_k \cdot \beta_k \cdot \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1}}$$

其中 $\beta_k = \begin{cases} 0 & \text{if } \alpha_k < M_\alpha, \gamma_k \approx 1-2 \\ \alpha_k - M_\alpha & \text{if } \alpha_k \geq M_\alpha \end{cases}$

量测异常
补偿项

KF → EKF → UKF ...



四、多源自适应融合算法

4.3 自适应鲁棒算法(VIO)

● 卡尔曼增益矩阵：

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T \left(\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k - \boxed{\beta_k \cdot \mathbf{P}_k^{Fac}} \right)^{-1}$$

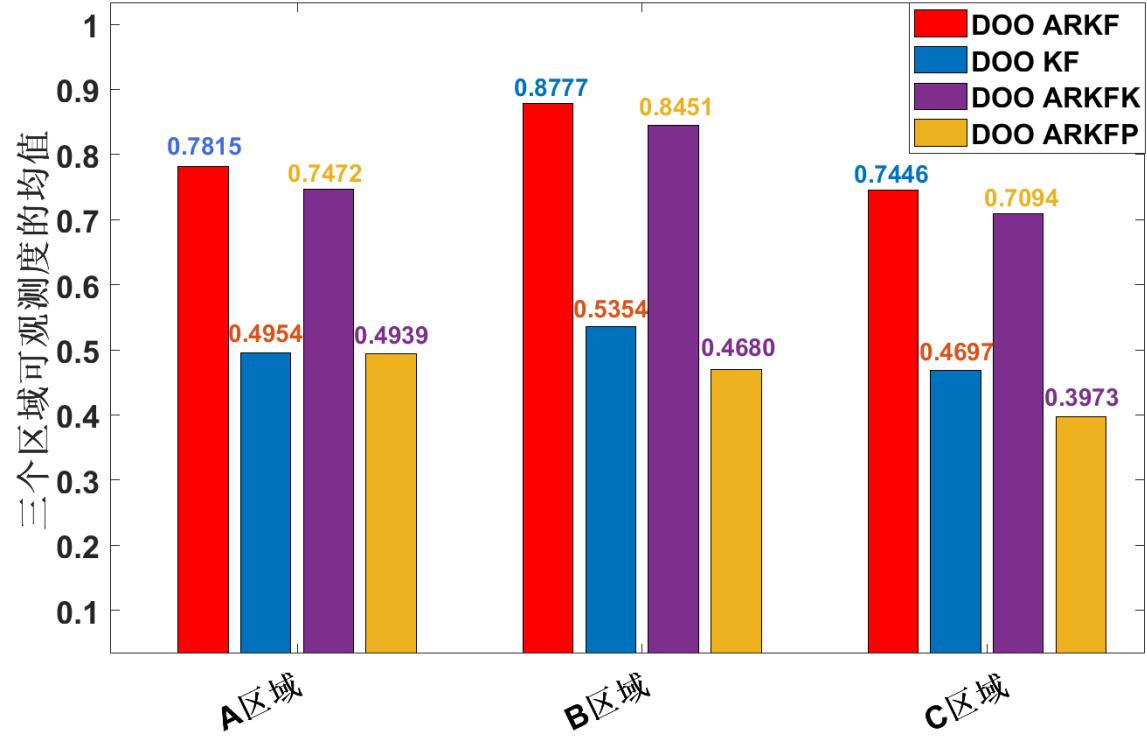
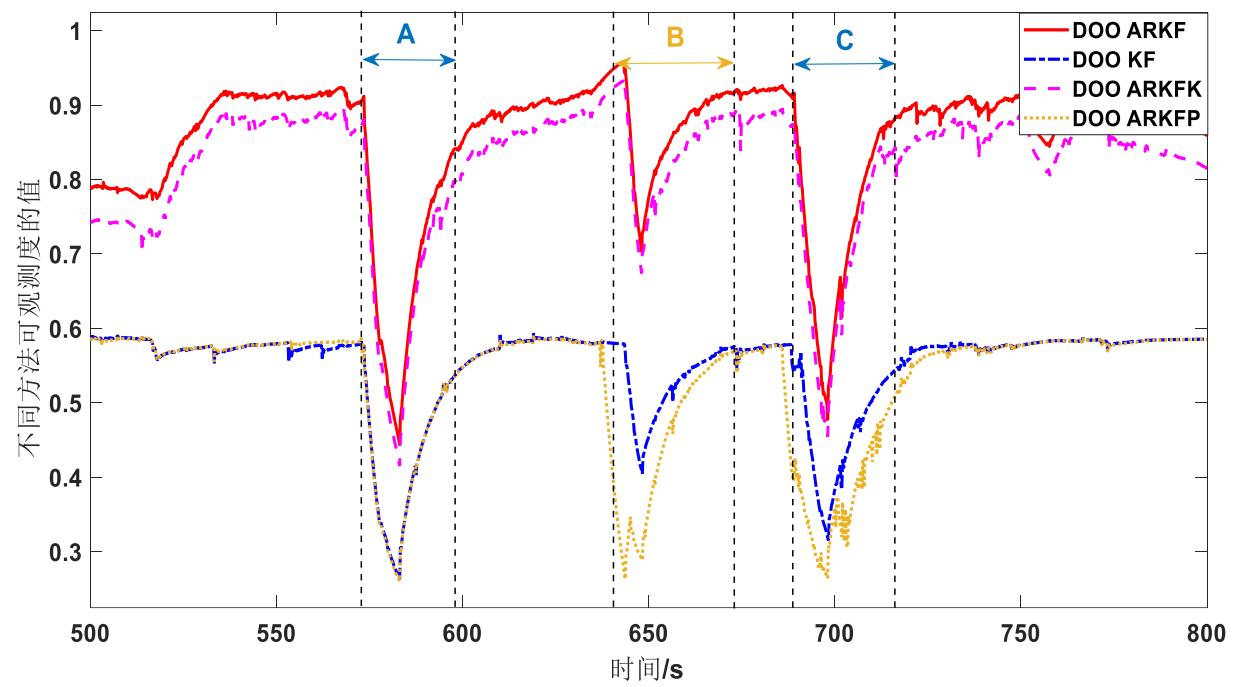
$$= \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T \left(\mathbf{P}_k^{Cal} - \boxed{\beta_k \cdot \mathbf{P}_k^{Fac}} \right)^{-1}$$

量测异常
补偿项

KF → EKF → UKF ...

四、多源自适应融合算法

4.3 自适应鲁棒算法(VIO)

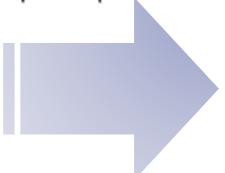
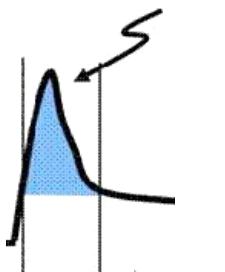


四、多源自适应融合算法

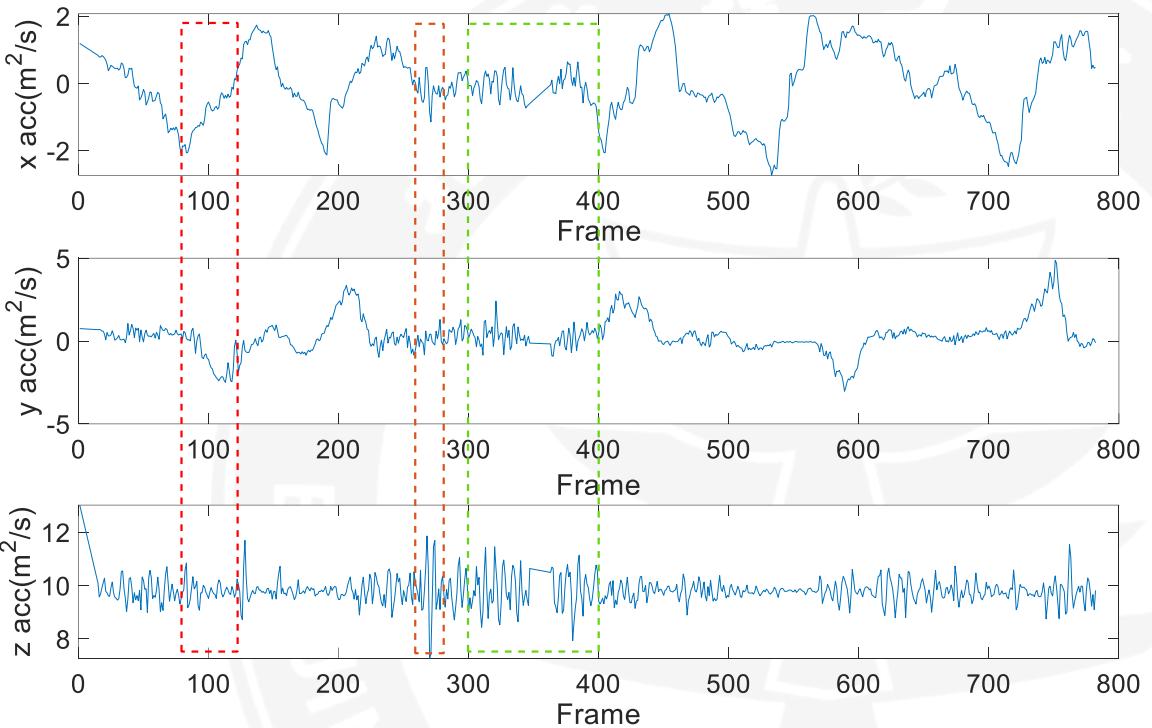
4.3 自适应鲁棒算法(VIO)



视觉里程计（视觉/惯导）



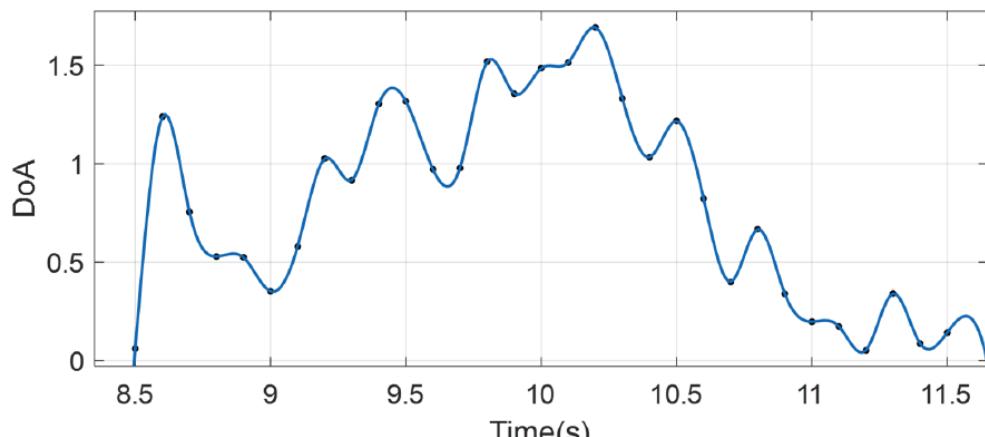
Unpredictable stochastic disturbances caused by ego-motion uncertainty due to uneven pavements, unstructured and dynamic scenes, which may lead to the divergence of estimation algorithms and the unreliability of positioning.



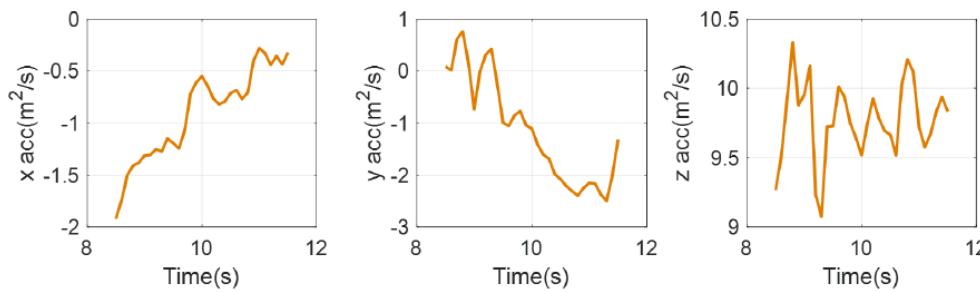
惯导加速度测量值（颠簸）

四、多源自适应融合算法

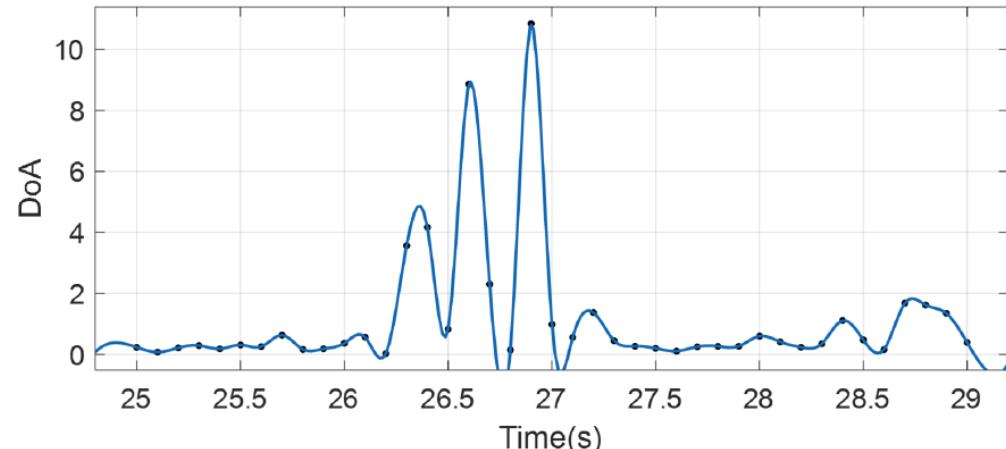
4.3 自适应鲁棒算法(VIO)



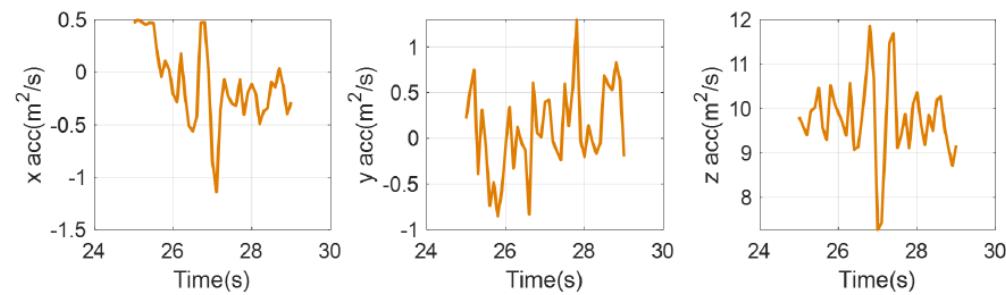
(a) DoAs fitting curve.



(b) Three-axis acceleration data of IMU measurements.



(a) DoAs fitting curve.



(b) Three-axis acceleration data of IMU measurements.

四、多源自适应融合算法

4.3 自适应鲁棒算法(VIO)



视觉里程计（场景1）



Stopping



Steering

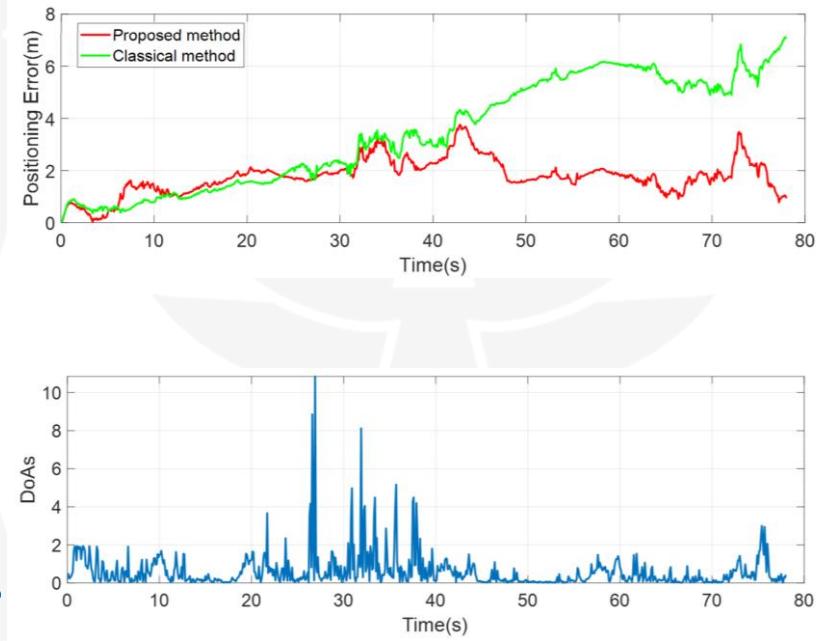


Shadow



Manhole Covers

540 m, 78 sec, 25 km/h



四、多源自适应融合算法

4.3 自适应鲁棒算法(VIO)

视觉里程计（场景1）



540 m, 78 sec, 25 km/h

场景1	均方根 定位误差	终点 定位误差	性能 改善
改进前	4. 00m	7. 06m	✓
改进后	1. 89m	0. 93m	✓
提高	52. 7%	86. 7%	✓

Chaoyang Zhai, Meiling Wang, Yi Yang, Kai Shen*. Robust vision-aided inertial navigation system for protection against ego-motion uncertainty of unmanned ground vehicle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020.

四、多源自适应融合算法

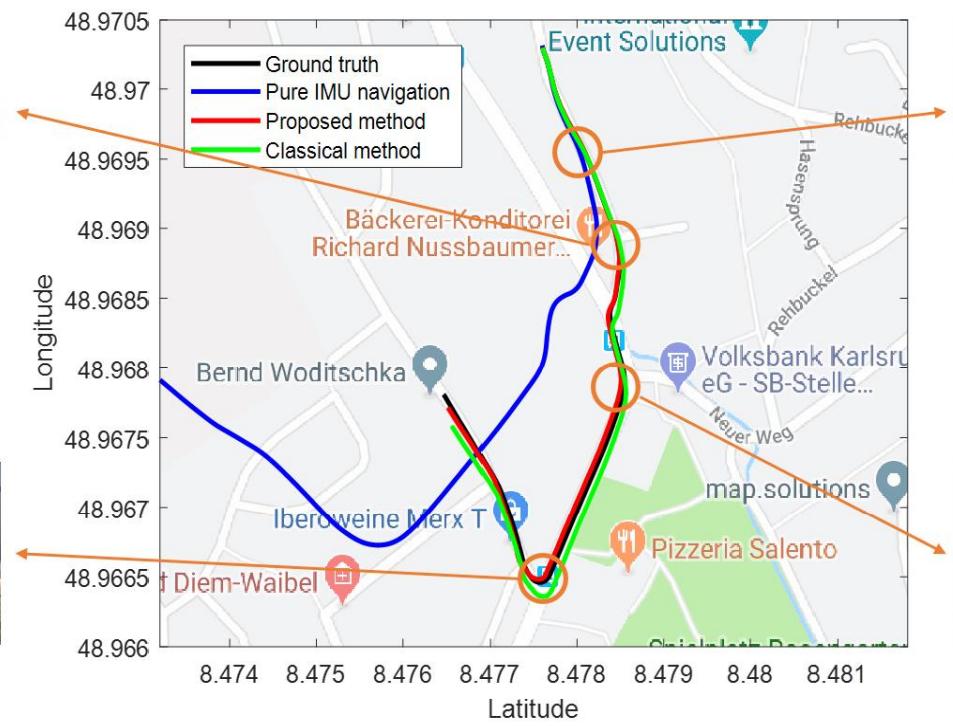
4.3 自适应鲁棒算法(VIO)



视觉里程计 (场景2)



Downslope



Stone Road

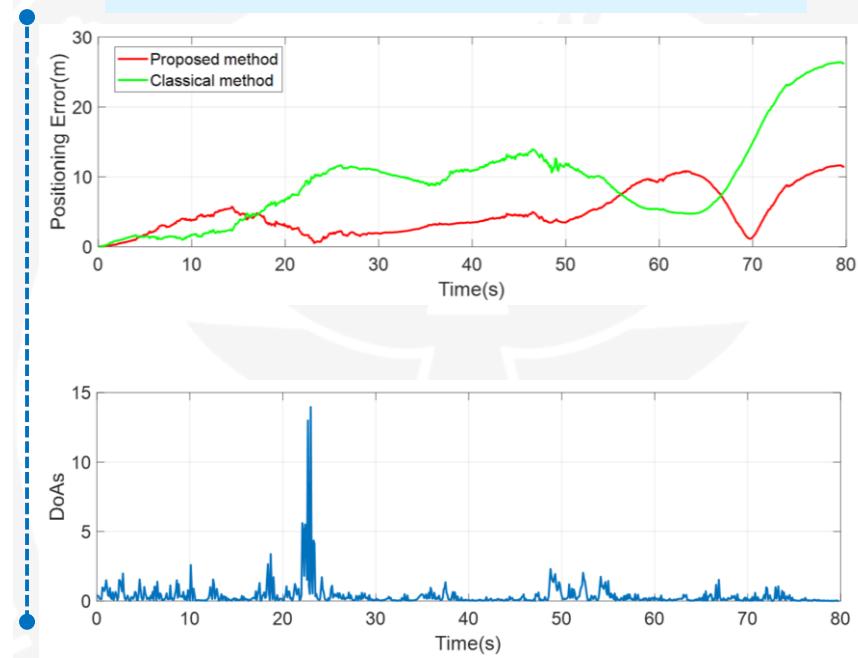


Steering



Upslope

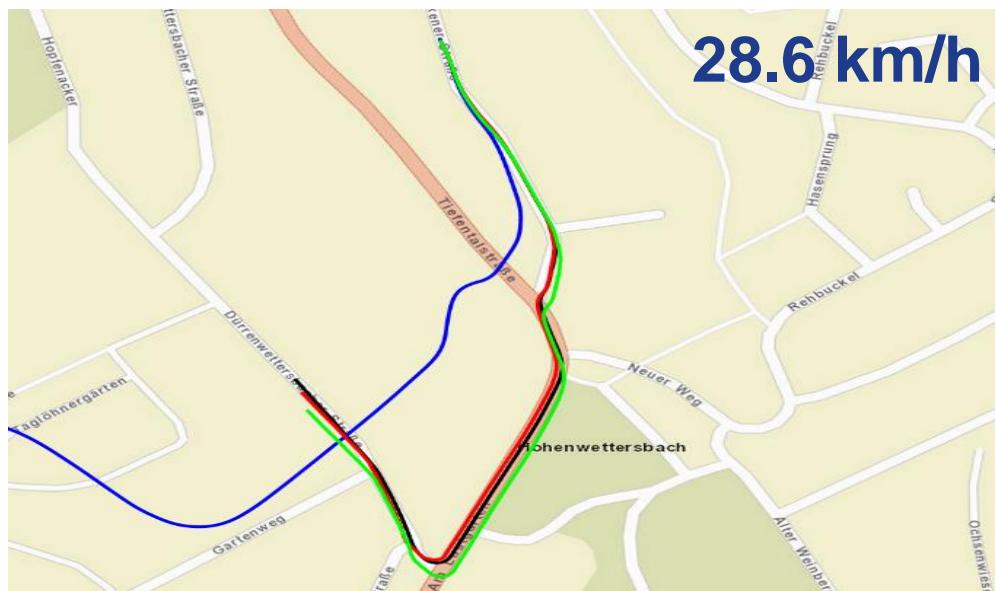
635 m, 80 sec, 28.6 km/h



四、多源自适应融合算法

4.3 自适应鲁棒算法(VIO)

视觉里程计（场景2）



635 m, 80 sec, 28.6 km/h

场景2	均方根 定位误差	终点 定位误差	性能 改善
改进前	11. 44m	26. 25m	✓
改进后	5. 65m	11. 46m	✓
提高	50. 6%	56. 3%	✓

Chaoyang Zhai, Meiling Wang, Yi Yang, Kai Shen*. Robust vision-aided inertial navigation system for protection against ego-motion uncertainty of unmanned ground vehicle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020.

四、多源自适应融合算法

4.3 自适应鲁棒算法(VIO)



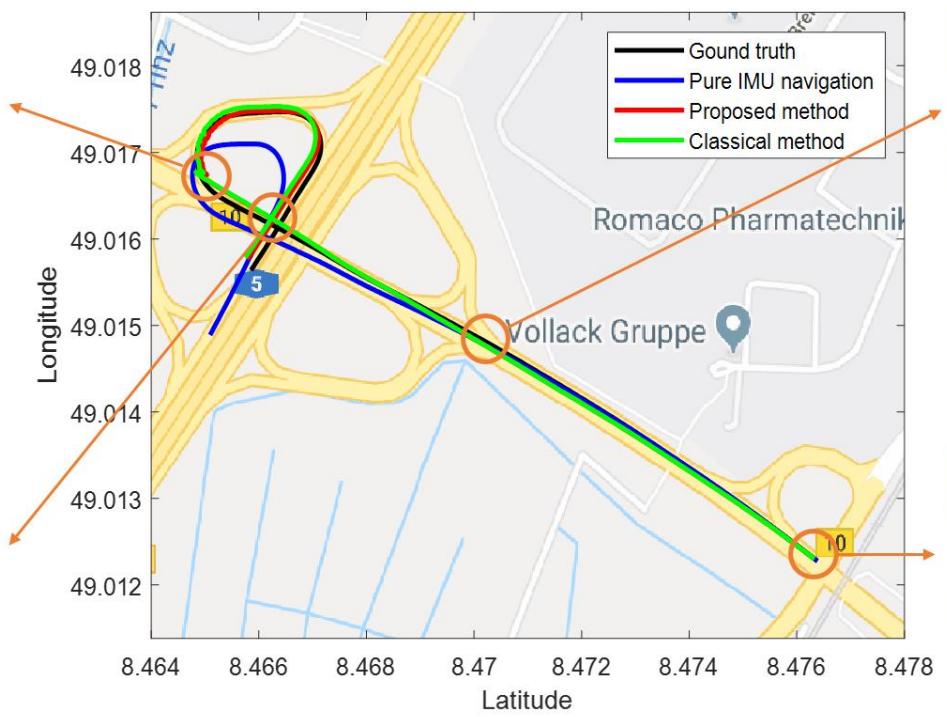
视觉里程计 (场景3)



Steering



Bridge

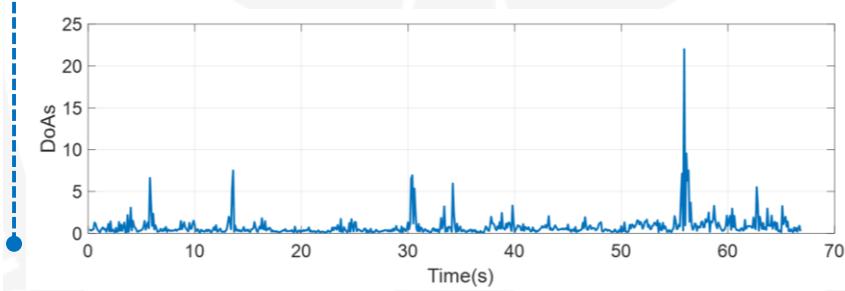
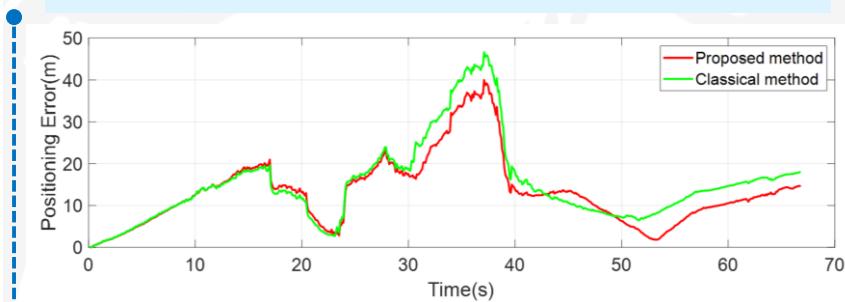


Flat Road



Flat Road

1412 m, 67 sec, 75.9 km/h



四、多源自适应融合算法

4.3 自适应鲁棒算法(VIO)

视觉里程计（场景3）



1412 m, 67 sec, 75.9 km/h

场景3	均方根定位误差	终点定位误差	性能改善
改进前	17. 92m	18. 04m	✓
改进后	15. 66m	14. 74m	✓
提高	12. 6%	18. 3%	✓

Chaoyang Zhai, Meiling Wang, Yi Yang, Kai Shen*. Robust vision-aided inertial navigation system for protection against ego-motion uncertainty of unmanned ground vehicle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020.

汇报内容



一 研究背景及意义

二 国内外研究现状

三 可观测性与可观测度

四 多源自适应融合算法

五 总结与展望



五、总结与展望

从控制理论的角度看**导航系统**，分析（定性/定量）系统的可观测性和可观测度以及其他性质，设计新型的标定、对准、滤波、预测和融合算法。

控制理论→导航系统

从多传感器融合**导航**到多运动体**协同导航**，设计新型的相对导航和协同导航算法，发挥协同导航的优势，提高多源融合导航的连续性和稳健性。

多传感器→多运动体



中国卫星导航定位协会
GNSS & LBS Association of China



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY



莫斯科鲍曼国立技术大学
Bauman Moscow State Technical University

感谢各位专家学者，
敬请批评指正！

汇报人：沈 凯

