



基于联邦滤波进行立体相机/IMU/里程计运动平台组合导航定位

万文辉¹ 李宇² 胡文敏³ 赵强¹ 孙逊¹ 张秋昭⁴ 邱凯昌¹
郭杭² 吴立新^{3,4}

1 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室,北京,100101

2 南昌大学信息工程学院,江西南昌,330038

3 中国矿业大学大学物联网研究中心,江苏徐州,221116

4 中国矿业大学大学环境与测绘学院,江苏徐州,221116

摘要:在无GPS信号的受限环境中,基于序列立体影像的运动平台视觉定位精度较高,能够改正航迹推算方法的误差累积,但在纹理贫乏或光照不足的环境下容易定位失败。为提高受限环境下运动平台定位的精度与稳健性,提出一种基于联邦滤波的立体相机、惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)及里程计组合导航方法。该方法在联邦滤波中利用IMU分别同里程计与立体相机构成子滤波器,有效避免立体视觉定位失效而导致的系统定位失败,提高了定位稳健性。地下巷道实验结果证明,所提方法能有效提高运动平台导航定位的精度,并且在立体视觉定位失效的情况下仍能实现连续定位。

关键词:联邦滤波;视觉测程;航迹推算;惯性测量单元

中图法分类号:P228

文献标志码:A

在太空或地下矿井等无GPS信号的受限环境中,运动平台的导航定位技术对于探测或救援任务的实施至关重要。航迹推算方法将惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)同里程计组合起来,能够实时地提供连续的定位结果,得到了广泛的应用^[1]。然而IMU漂移和地形起伏导致车轮打滑会使得定位误差迅速累积,无法满足远距离高精度定位的需要。相机作为一种功耗低、体积小、信息获取丰富的传感器,在导航定位研究中已获得了广泛的关注。文献[2]较早提出利用多相机进行视觉定位的方法。文献[3]提出基于立体相机的视觉测程定位方法。文献[4]引入光束法平差提高了视觉定位的精度。文献[5-6]应用滑动窗口光束法平差方法优化影像位姿估计结果,提高了序列影像定位精度。文献[7]提出了一种几何关键帧自动选取的视觉测程方法,并分析了不同相机配置对定位精度的影响。相关的研究成果已成功应用于国内外深空探测任务中,为执行任务的巡视器和着陆器提供了高精度的定

位结果^[8-10]。总的来说,基于视觉的定位方法误差与时间和地形均无关,定位精度较高,能够消除或减小航迹推算定位误差。

尽管视觉定位方法精度较高,但在深空或地下环境中,光照及纹理条件复杂,若图像纹理质量不佳,无法进行特征点追踪,最终将导致定位失败。文献[11]采用无迹卡尔曼滤波方法,将IMU与视觉组合进行系统标定。文献[12]利用扩展卡尔曼滤波方法将视觉测程和IMU组合,修正了定位累积误差。文献[13]将扩展卡尔曼滤波用于立体相机、IMU及里程计的集成定位。这些方法多采用集中式滤波,系统中局部处理异常会影响整体滤波效果,定位稳健性与精度有待提高。联邦滤波是一种分散式滤波方法,系统由若干子滤波器组成。在部分子滤波器失效的情况下,系统仍能输出可靠结果,稳定性强。文献[14]较早将联邦滤波应用多传感器集成的导航系统分散式滤波中。文献[15]将联邦滤波用于INS/GPS的组合导航,提高了系统稳定性。文献[16]研究了基

于联邦滤波的月球车自主导航方法,通过滤波融合航迹推算与天文导航的结果,提高了定位精度与稳定性。视觉定位在贫纹理环境下易出现定位失败情况,采用联邦滤波有助于提高定位稳健性。目前,针对立体相机/IMU/里程计集成定位的相关研究还有待深入,对贫纹理条件下的组合导航稳健性的分析也不多。

本文提出一种基于联邦滤波的IMU/立体相机/里程计的组合导航方法,定位精度优于单独采用航迹推算与视觉定位方法,并能在视觉定位失败的情况下依然稳健地获取连续定位结果。通过地下巷道实验对所提方法的有效性与容错性进行了分析与验证。

1 基于联邦滤波的组合导航方法

联邦滤波是一种两级结构分散化滤波方法,

由若干子滤波器与一个主滤波器组成。滤波计算时,各子滤波器独立进行时间与量测更新,主滤波器则将各子滤波器的结果进行融合得到全局最优估计^[14]。联邦滤波方法的分散化结构有利于降低系统计算量,同时系统在部分子滤波器失效时仍能输出滤波结果,提高了整个系统的容错性。

考虑到系统中IMU能够输出稳定的测量结果,将IMU分别同里程计与立体相机构成子滤波器1与子滤波器2,再对两个子滤波器的结果进行融合,最终输出最优组合结果。滤波中,若系统中因立体相机视觉定位解算失败导致子滤波器2失效,则由子滤波器1继续进行滤波解算,提高了系统定位解算的容错性。算法流程如图1。

1.1 IMU与里程计数据滤波

里程计可以量测得到运动平台的行驶距离,结合量测时间间隔进而获取行驶速度,以抑制IMU位置漂移。

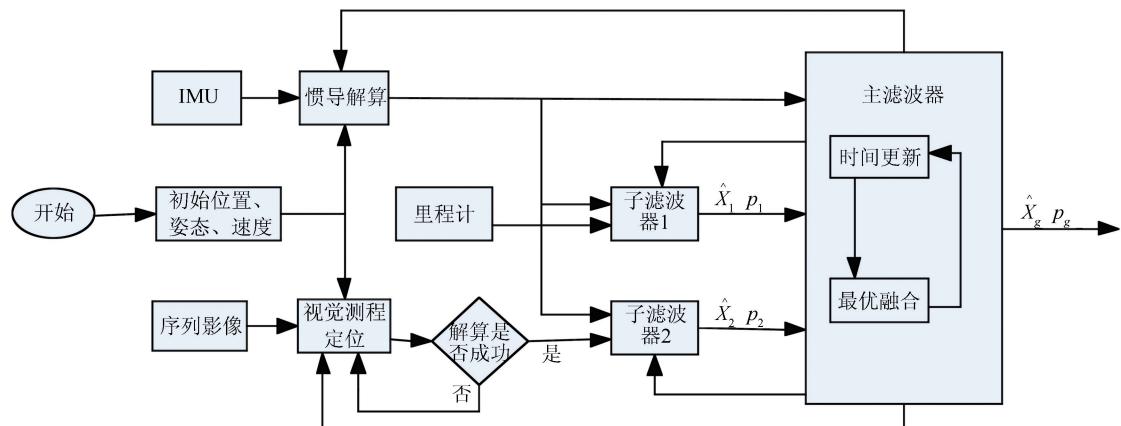


图1 联邦滤波方法流程

Fig.1 Workflow of the Proposed Federated Filter

基于扩展卡尔曼滤波建立IMU同里程计组合导航模型状态方程:

$$\mathbf{X}_k^{DR} = \boldsymbol{\Phi}_{k|k-1}^{DR} \mathbf{X}_{k-1}^{DR} + \mathbf{W}_k^{DR} \quad (1)$$

系统状态矢量为19维向量:

$$\mathbf{X}^{DR} = [\varphi \quad \delta_v \quad \delta_p \quad \epsilon_b \quad \nabla_b \quad e_p \quad \delta k]^T \quad (2)$$

$\boldsymbol{\Phi}^{DR}$ 为状态转移矩阵; \mathbf{W}^{DR} 为过程噪声; φ 为三个方向失准角; δ_v 为三个方向速度误差; δ_p 为位置误差; ϵ_b 为IMU三个方向陀螺漂移; ∇_b 为三个方向加速度零偏; e_p 为里程计三个方向位置误差; δk 为里程计刻度系数误差。系统观测方程为:

$$\mathbf{Z}_k^{DR} = \mathbf{H}_k^{DR} \mathbf{X}_k^{DR} + \mathbf{V}_k^{DR} \quad (3)$$

式中 \mathbf{V}^{DR} 为量测噪声; 量测矩阵为:

$$\mathbf{H}_k^{DR} = [-\mathbf{M}_{3 \times 3} \quad \mathbf{E}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 12} \quad -\mathbf{v}_{od}^n], \quad \mathbf{E}_{3 \times 3} \text{ 为}$$

单位矩阵; \mathbf{v}_{od}^n 为里程计在三个方向上的速度;

$\mathbf{M}_{3 \times 3}$ 为运动平台速度的反对称矩阵:

$$\mathbf{M}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{v}_{od}^n(3) & \mathbf{v}_{od}^n(2) \\ \mathbf{v}_{od}^n(3) & 0 & -\mathbf{v}_{od}^n(1) \\ -\mathbf{v}_{od}^n(2) & \mathbf{v}_{od}^n(1) & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2 IMU与序列立体影像数据滤波

序列立体影像定位是基于相邻立体影像间特征点追踪建立的帧间相对位置与姿态,通过位置与姿态的不断递推,从而计算得到连续的影像位置与姿态。传统基于相邻帧特征点匹配的解算方法定位误差随行驶距离而累积,因而引入多帧影像间连续匹配,进而建立多帧间几何约束,构成几何约束强的区域影像网,应用光束法平差求解网中影像最优化的位置姿态参数。

基于区域网光束法平差的视觉测程定位方法的主要步骤为^[7]:①特征点提取;②特征点匹配与

连续追踪;③粗差剔除;④定位初解算;⑤几何关键帧选取;⑥平差定位解算。

IMU 同序列立体影像的组合滤波中, 观测量为运动平台的姿态和位置信息。滤波量测方程中

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \delta_\theta \\ \delta_\gamma \\ \delta_\psi \end{bmatrix} = \frac{1}{\cos\theta} \begin{bmatrix} -\cos\theta\cos\psi \\ -\sin\psi \\ -\sin\theta\sin\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_E \\ \varphi_N \\ \varphi_U \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, φ_E 、 φ_N 、 φ_U 为平台失准角; θ 、 γ 、 ψ 为三个姿态角, δ_θ 、 δ_γ 、 δ_ψ 为对应姿态误差角。

立体影像连续定位解算依赖于特征点的连续追踪。滤波过程中, 当影像纹理贫乏无法完成特征点追踪时, 视觉定位无法输出结果, 滤波将失败。为提高定位解算稳健性, 通过 IMU 与里程计组合的子滤波器的联合滤波, 提高定位稳健性与精度。

1.3 基于联邦滤波的立体相机/IMU/里程计组合导航方法

联邦滤波为一种分散化滤波方法, 在兼顾精度和容错性情况下, 能稳健地输出滤波结果。滤波时, 各子滤波器独立进行时间与量测更新, 主滤波器又进行时间更新, 相应状态估计与协方差矩阵结果进行全局信息融合后依照信息分配系数更新子滤波器与主滤波器。联邦滤波的关键是在满足信息守恒原则下实现各个子滤波器的最优融合。

设有 N 个局部状态估计的公共状态为 $\hat{\mathbf{X}}_1$ 、 $\hat{\mathbf{X}}_2$ 、 \cdots 、 $\hat{\mathbf{X}}_N$, 一个主滤波器估计的公共状态为 $\hat{\mathbf{X}}_p$, 对应的估计误差协方差阵为 \mathbf{P}_{11} 、 \mathbf{P}_{22} 、 \cdots 、 \mathbf{P}_{nn} 与 \mathbf{P}_{pp} , 各个滤波器不相关。信息融合过程中, 全局最优滤波器的状态与协方差为^[10]:

$$\mathbf{X}_g = \mathbf{P}_g \left(\sum_{i=1}^N \mathbf{P}_{ii}^{-1} \hat{\mathbf{X}}_i + \mathbf{P}_{pp}^{-1} \hat{\mathbf{X}}_p \right) \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_g = \left(\sum_{i=1}^N \mathbf{P}_{ii}^{-1} + \mathbf{P}_{pp}^{-1} \right)^{-1} \quad (7)$$

全局噪声总信息量 \mathbf{Q}^{-1} 需分配至各个子滤波器与主滤波器中, 即

$$\mathbf{Q}^{-1} = \sum_{i=1}^N \mathbf{Q}_i^{-1} + \mathbf{Q}_p^{-1} \quad (8)$$

式中, \mathbf{Q}_i^{-1} 及 \mathbf{Q}_p^{-1} 为子滤波器与主滤波器分配得到的信息, 相应计算式为:

$$\mathbf{Q}_i = \boldsymbol{\beta}_i^{-1} \mathbf{Q}, i = 1 \cdots N, p \quad (9)$$

$$\mathbf{Q}_m = \boldsymbol{\beta}_m^{-1} \mathbf{Q} \quad (10)$$

式中, $\boldsymbol{\beta}_i$ 与 $\boldsymbol{\beta}_m$ 分别为各自子滤波器与主滤波器分配参数。信息分配需满足守恒, 即

观测量是姿态误差角, 因此滤波前对相关的角误差做相应的转换, 将平台失准角转换成姿态误差角^[13], 转换关系如式(5), 该式进行了相关的简化, 略去其中二阶小量:

$$\sum_{i=1}^N \boldsymbol{\beta}_i + \boldsymbol{\beta}_m = 1 \quad (11)$$

2 组合导航定位方位实验与分析

为了验证该方法的可行性, 分别在中国山东科技大学地下矿井实验场(实验 1)以及中国矿业大学(徐州)文昌校区的防空洞内(实验 2)进行了两个模拟地下巷道环境的导航平台定位实验。图 2 是实验平台, 平台上安置了 IMU、里程计与立体相机。IMU 的陀螺零偏为 $0.07^\circ/\text{s}$, 采集频率为 100 Hz 。里程计测量分辨率为 4.9 mm , 采集频率为 2 Hz 。立体相机基线长为 0.3 m , 相机视场角为 41° 。行驶过程中, 运动导航平台由工控机同步采集里程仪、IMU 及序列影像数据。图 3 为立体相机在两个实验场中获取的典型立体影像。在两个实验进行前, 已在三维控制场中对立体相机内方位元素、相机间相对外方位元素及同 IMU 的相对位置姿态参数进行了标定^[1]。



图 2 运动实验导航平台

Fig.2 Experimental Mobile Platform
in the Experiment Field

地下矿井内组合导航实验 1 中, 移动平台由起点进入巷道, 至终点后原路返回起点, 全程行驶约 98 m , 以 2 帧/s 获取了 1448 帧立体影像, 联邦滤波中子滤波器 1、子滤波器 2 和主滤波器的信息分配参数分别为 0.2 、 0.65 、 0.15 。为了分析不同定位方法的精度, 分别采用 IMU 与里程计



(a) 实验1影像



(b) 实验2影像

图3 获取的立体影像

Fig.3 Stereo Images Acquired in Two Experiments

航迹推算方法、序列影像视觉测程方法及联邦滤波进行解算,通过闭合差大小评价定位精度,定位解算结果表明三种解算方法定位精度分别为5.07%、1.75%及0.49%,定位轨迹如图4。结果表明联邦滤波器定位精度明显优于子滤波器1和子滤波器2单独的定位精度。

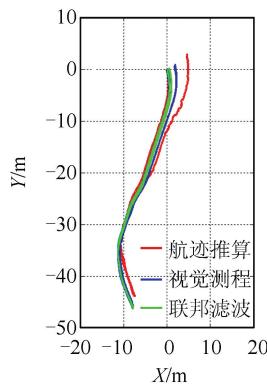


图4 实验1三种方法确定的行驶轨迹

Fig.4 Localization Results in Experiment 1 from Dead-reckoning, Visual Odometry and Federated Filter

防空洞内组合导航实验2中,在行驶路径上布控了7个检查点,其局部坐标由全站仪测得,作为真值进行定位精度验证。实验过程中,运动平台由检查点1出发,按点号顺序依次行驶一圈后回到起始点,形成闭合环。采集数据过程中,控制移动平台在检查点处停留短暂停留,并记录此时获取图像与IMU数据的序号,以作为后续真值比较的数据索引。实验中,实验平台共行进约238 m,以4 fps获取了7 100帧立体图像。与实验1类似,分别采用IMU与里程计航迹推算方

法、序列影像视觉测程方法及联邦滤波进行解算。联邦滤波参数与实验1中所设参数值相同。精度评定时,依据先前在经过检查点时记录的数据索引编号,确定在检查点处计算得到的定位结果,通过同检查点数据的对比进行精度评定。三种方法得到的行驶路径如图5,在各个检查点的定位误差如图6及表1,定位精度分别为9.12%、2.35%及2.08%。

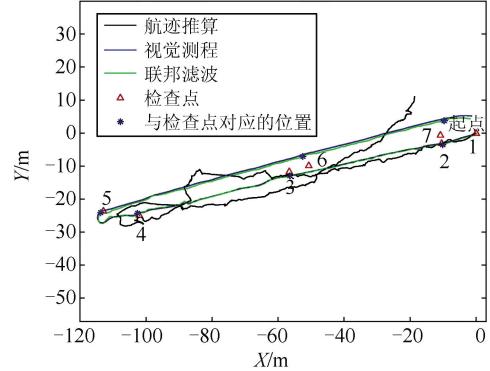


图5 实验2三种方法确定的行驶轨迹

Fig.5 Localization Results in Experiment 2 from Dead-reckoning, Visual Odometry and Federated Filter

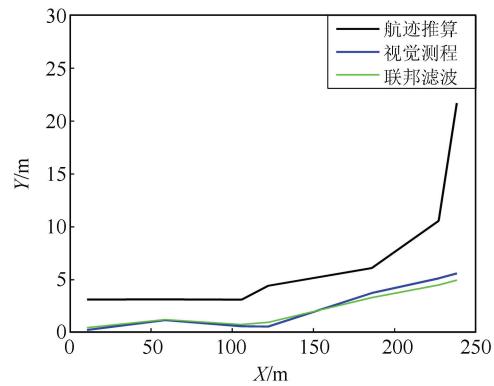


图6 不同方法定位误差

Fig.6 Localization Errors from Dead-Reckoning, Visual Odometry and Federated Filter

为了验证本文所提方法的容错性,实验2中将立体视觉解算强制设置为失败状态,造成断帧情况,以分析定位稳定性与精度。实验中分别设置断帧36帧、136帧、236帧及336帧4种情况。相应定位解算结果显示如图7及表2。总体上看,定位精度随着断帧数量的增加而逐渐降低,这是因为断帧时系统定位结果主要依靠航迹推算,此时系统误差水平明显增大。但相比只使用航迹推算的系统,立体相机、IMU及里程计集成的定位系统仍然能够取得稳定的高精度定位结果,能在地下等受限环境下的导航定位中发挥作用。

表 1 全路径 7 个检查点处定位误差统计/m

Tab.1 Statistic of Localization Errors in 7 Check Points of Traverse Path/m

解算方法	检查点号						
	2	3	4	5	6	7	1
航迹推算	3.13	3.14	3.12	4.43	6.10	10.57	21.70
视觉测程	0.25	1.18	0.60	0.57	3.74	5.13	5.59
联邦滤波(无断帧)	0.47	1.23	0.76	0.97	3.31	4.50	4.96

表 2 联邦滤波中不同数量断帧定位误差对比/m

Tab.2 Statistic of Localization Errors with Different Numbers of Failed Frames/m

断帧情况	检查点号						
	2	3	4	5	6	7	1
无断帧	0.47	1.23	0.76	0.97	3.31	4.50	4.96
断 36 帧	0.47	1.23	1.05	1.07	3.87	4.87	5.55
断 136 帧	0.47	1.23	2.14	1.59	4.93	5.88	6.67
断 236 帧	0.47	1.23	1.96	1.84	4.70	5.27	6.41
断 336 帧	0.47	1.23	5.03	3.87	7.53	8.93	9.32

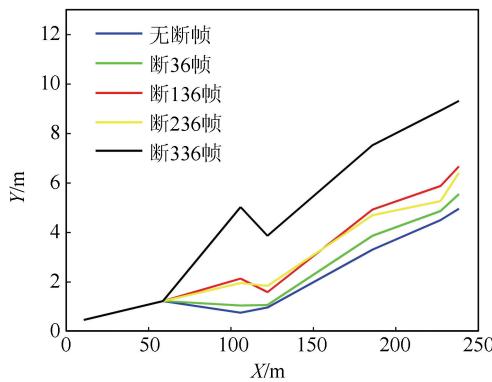


图 7 不同数量断帧下的定位误差

Fig.7 Localization Errors with Different Numbers of Failed Frames

从图 7 及表 2 可以看出, 出现了断 236 帧结果优于断 136 帧的情况, 这是由于断帧时系统子滤波器 2 失效, 子滤波器 1 参数需经振荡调整后趋于合理。由于运动平台状态并非严格平稳, 地面环境也非完全一样, 因此子滤波器 1 输出的位置误差并不是随运行时间严格线性增加, 而是在增加的趋势上有起伏, 随着时间的增加(断帧数增加), 存在小概率的定位精度提升, 致使重新起算时系统整体精度有所提升。总体趋势上, 加上视觉测程滤波器的联邦滤波器系统优于仅用 IMU 和里程计的滤波器, 在部分视觉特征缺乏而视觉测程滤波器失效的环境, 联邦滤波器系统仍能输出可靠的结果, 实现连续定位。

3 结语

本文提出了一种无 GPS 信号的受限环境下基于联邦滤波的 IMU/立体相机/里程计运动平

台组合导航定位方法, 该方法利用 IMU 分别同里程计与立体相机构成两个子滤波器, 有效避免立体视觉定位失效而导致的系统定位失败, 提高了定位稳健性与精度。在无 GPS 信号的地下巷道中的实验结果表明, 联邦滤波能够提高运动平台的定位精度, 定位精度优于航迹推算和视觉测程定位方法, 同时当立体视觉解算失效时仍能够提供高精度的定位结果, 提高了定位的稳健性。

参 考 文 献

- [1] Wan Wenhui. Theory and Methods of Stereo Vision Based Autonomous Rover Localization in Deep Space Exploration [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2012:51-76 (万文辉. 基于立体视觉的深空探测车自主定位理论与方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2012:51-76)
- [2] Matthies L. Dynamic Stereo Vision[D]. Pittsburgh, USA: Carnegie Mellon University, 1989
- [3] Olson C F, Matthies L H, Schoppers M, et al. Rover Navigation Using Stereo Ego-Motion[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, 43(4):215-229
- [4] Li R, Di K, Matthies R E, et al. Rover Localization and Landing Site Mapping Technology for 2003 Mars Exploration Rover Mission[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, 70(1):77-90
- [5] Sünderhauf N, Konolige K, Lacroix S, et al. Visual Odometry Using Sparse Bundle Adjustment on an Autonomous Outdoor Vehicle[M]. Proceedings of Tagungsband Autonome Mobile Systeme, Springer Vehicle, 2005

- [6] Konolige K, Agrawal M, Solá J. Large Scale Visual Odometry for Rough Terrain [J]. *Tracts in Advanced Robotics*, 2007, 66:201-212
- [7] Di Kaichang, Wan Wenhui, Liu Zhaoqing. New Visual Odometry Method for Planetary Rover Localization[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(1):46-61
- [8] Cheng Y, Maimone M W, Matthies L H. Visual Odometry on the Mars Exploration Rovers - A Tool to Ensure Accurate Driving and Science Imaging[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, 13(2):54-62
- [9] Grotzinger J, Crisp J, Vasavada A R, et al. Mars Science Laboratory Mission and Science Investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170(1-4):5-56
- [10] Liu Z, Di K, Peng M, et al. High Precision Landing Site Mapping and Rover Localization for Chang'e-3 mission[J]. *Science China-Physics Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(1):1-11
- [11] Kelly J, Sukhatme G S. Fast Relative Pose Calibration for Visual Odometry [C]. *International Symposium on Experimental Robotics*, Berlin, Germany, 2009
- [12] Corke P, Lobo J, Dias J. An Introduction to Inertial and Visual Sensing [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2007, 26(6):519-535
- [13] Liu C, Zhou F, Sun Y, et al. Stereo-Image Matching Using a Speeded Up Robust Feature Algorithm in an Integrated Vision Navigation System [J]. *Journal of Navigation*, 2012, 65(4):671-692
- [14] Carlson N A. Federated Filter for Fault-Tolerant Integrated Navigation Systems [C]. IEEE PLANS, Orlando FL, USA, 1988
- [15] Zhou Jiangbin, Yua Jianping, Luo Jianjun, et al. Fully Integrated SINS/GPS Navigation System Based on Federated Filters[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(6):1 562-1 569
- [16] Pei Fujun, Ju Hehua, Cui Pingyuan. Autonomous Navigation Method Based on Federated Kalman Filter for Lunar Rover[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(4):1 429-1 434

Mobile Platform Localization by Integration of Stereo Cameras, IMU and Wheel Qdometer Based on Federated Filter

WAN Wenhui¹ LI Yu² HU Wenmin³ ZHAO Qiang¹ SUN Xun¹ ZHANG Qiuzhao⁴
DI Kaichang¹ GUO Hang² WU Lixin^{3,4}

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330038, China

3 IoT Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

4 School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: In a GPS-denied environment, visual odometry based on sequential stereo images can be applied to correction of accumulated localization errors from dead-reckoning. Visual odometry however, performs poorly or even fails under poor texture or illumination conditions. To achieve high precision and robust localization, a federated filter based localization method is proposed that integrates stereo cameras, the IMU, and wheel odometer. The two sub filters in the federated filter, constructed by a IMU integrated with the wheel odometer and stereo cameras provide robust localization when visual odometry fails. Experimental results in an underground field demonstrates robust performance and improvement in localization accuracy.

Key words: federated filter; visual odometry; dead-reckoning; IMU

First author: WAN Wenhui, PhD, assistant professor, specializes in localization of planetary probe. E-mail: wanwh@radi.ac.cn

Corresponding author: DI Kaichang, PhD, professor. E-mail: dikc@radi.ac.cn

Foundation support: The National Program on Key Basic Research Project, No. 2012CB719902; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41171355, 41374039.