

# 基于 VINS-Mono 的室内机器人定位系统\*

曾 超, 郑茜颖, 程树英

(福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350108)

**摘 要:** 针对 VINS-Mono 在室内移动机器人场景中定位精度发散较快的问题, 在原系统中融合了轮式里程计的数据, 提出了基于 VINS-Mono 的室内移动机器人定位系统。系统对轮式里程计和陀螺仪数据积分, 提供精确运动约束; 结合预积分和运动恢复结构(SFM)的运算结果, 用松耦合方法计算单目尺度和陀螺仪偏差; 用非线性最小二乘优化算法融合预积分数据和相机数据, 获得机器人位姿、特征点深度及陀螺仪偏差的最优估计。在公开数据集上进行仿真实验, 结果表明: 改进后的系统定位精度优于原系统。

**关键词:** 运动估计; 多传感器融合; 同时定位与建图

中图分类号: TP212; TP242

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2022)11-0085-04

## Indoor robot positioning system based on VINS-Mono\*

ZENG Chao, ZHENG Qianying, CHENG Shuying

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the positioning precision of VINS-Mono diverges quickly in the indoor mobile robot scene, data of wheel odometer is fused in the original system, and an indoor mobile robot positioning system based on VINS-Mono is proposed. The system integrates the wheel odometer and gyroscope data to provide precise motion constraints; combines the pre-integration and structure from motion (SFM) calculation results to calculate the monocular scale and gyroscope deviation with a loose coupling method. The nonlinear least squares optimization algorithm is used to fuse the pre-integration data and camera data to obtain the optimal estimation of robot pose, feature point depth and gyroscope deviation. The simulation experiment on the public data set shows that the positioning precision of the improved system is better than that of the original system.

**Keywords:** motion estimation; multi-sensor fusion; simultaneous localization and mapping

### 0 引 言

在全球定位系统(GPS)失效的情况下, 室内移动机器人通过融合多传感器的数据获取精确的位置是一项富有挑战性的工作<sup>[1]</sup>。由于单目相机和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)两种传感器有互补的特点, 并且成本低廉, 基于单目相机和 IMU 融合的视觉-惯性里程计(visual-inertial odometry, VIO)在近些年取得了飞快的发展<sup>[2-5]</sup>, 其中, VINS-Mono<sup>[5]</sup> 就是比较经典的开源框架之一。然而, VIO 在移动机器人场景中由于定位精度发散较快, 经常导致系统崩溃。Wu K J 等人分析并通过实验证明了在移动机器人场景中, 由于加速度计得不到充分的激励, 仅使用单目相机和 IMU 计算出的轨迹误差很大, 并通过加入轮式里程计提升了机器人的定位精度<sup>[6]</sup>。

本文针对室内移动机器人场景中 VINS-Mono 定位精度发散较快的问题, 融合单目相机、陀螺仪和轮式里程计的

数据, 并加入平面约束, 最终获得精确的轨迹。

### 1 系统框架

本文在 VINS-Mono 的基础上, 用轮式里程计的数据代替加速度计进行位移的积分, 提出如图 1 所示的机器人室内定位框架。系统总体框架主要包括 4 部分: 1) 在测量预处理中, 系统分别对单目图像、陀螺仪数据以及轮式里程计数据进行处理, 采用 KLT 稀疏光流追踪算法<sup>[7]</sup>对现有特征点进行追踪, 得到连续 2 帧图像间的特征点关系, 并同时陀螺仪数据和轮式里程计数据进行预积分, 得到 2 帧关键帧之间的相对位姿, 然后通过误差传递方程量化预积分的误差以及计算预积分结果对各个变量的雅可比; 2) 在第二部分初始化阶段, 首先, 通过运动恢复结构(structure from motion, SFM)算法计算出无尺度的相机位姿和特征点深度, 然后, 通过视觉-陀螺仪-轮式里程计联合校准算法, 计算出陀螺仪偏差和单目相机尺度; 3) 第三部分基于滑动窗口的

收稿日期: 2021-01-04

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471124); 福建省科技厅工业引导性重点项目(2020H0007)

非线性优化中,对滑动窗口内的关键帧数据以及对应的预积分数据通过非线性最小二乘优化求得最优解,从而对轨迹进行更精确的估计;4)第四部分是一个单独的模块,当该模块开启时,系统利用 DBOW2<sup>[8]</sup>进行回环检测,对相似度高于阈值的回环候选帧进行特征点检索,并去除误匹配点,随后通过重定位算法和全局位姿图优化算法对轨迹进行修正,保证轨迹的全局一致性。

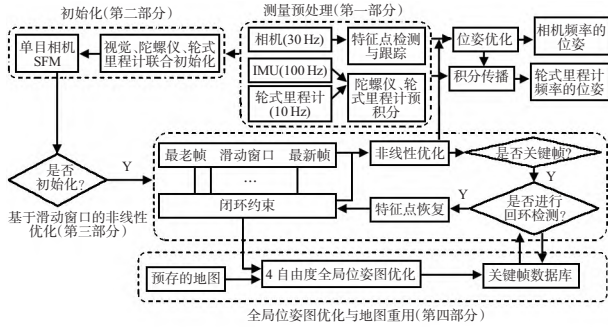


图1 系统的整体框架

本文在 VINS-Mono 的基础上主要修改了预积分部分、初始化部分和基于滑动窗口的非线性优化部分。

## 2 改进的预积分算法

### 2.1 陀螺仪和轮式里程计的数学模型

陀螺仪能够测量出  $k$  时刻机体的角速度值  $\tilde{\omega}_k$ , 其测量值受到陀螺仪偏差  $b_{\omega_k}$  和高斯白噪声  $n_{\omega}$  的影响

$$\tilde{\omega}_k = \omega_k + b_{\omega_k} + n_{\omega} \quad (1)$$

式中  $\omega_k$  为真实角速度值,  $n_{\omega}$  服从零均值的高斯分布  $n_{\omega} \sim N(0, \sigma_{\omega}^2)$ , 陀螺仪偏差  $b_{\omega_k}$  会随着时间缓慢变化, 它的导数为高斯白噪声,  $\dot{b}_{\omega_k} \sim N(0, \sigma_{b_{\omega}}^2)$ 。

轮式里程计能够测量出机器人左右轮在  $k-1$  时刻到  $k$  时刻分别滚过的距离  $\tilde{D}_{lk}$  和  $\tilde{D}_{rk}$ , 测量值受到高斯白噪声  $n_o$  的影响

$$\tilde{D}_{lk} = D_{lk} + n_o \quad (2)$$

$$\tilde{D}_{rk} = D_{rk} + n_o \quad (3)$$

式中  $D_{lk}$  和  $D_{rk}$  为左右两个轮子在  $k-1$  时刻到  $k$  时刻滚过距离的精确值,  $n_o$  为测量噪声, 服从零均值高斯分布  $n_o \sim N(0, \sigma_o^2)$ 。在  $k$  时刻轮式里程计坐标系  $O_k$  下,  $k+1$  时刻轮式里程计坐标系  $O_{k+1}$  的坐标系原点的坐标为  $\tilde{\phi}_{O_{k+1}}^{O_k} = [(\tilde{D}_{lk} + \tilde{D}_{rk})/2 \ 0 \ 0]^T$ , 该值受到高斯噪声  $n_{\phi} = N(0, \sigma_{\phi}^2)$  的影响<sup>[9]</sup>

$$\tilde{\phi}_{O_{k+1}}^{O_k} = \phi_{O_{k+1}}^{O_k} + n_{\phi} \quad (4)$$

### 2.2 陀螺仪-轮式里程计预积分

对于时间上连续的两个轮式里程计坐标系  $O_k$  和  $O_{k+1}$ , 在时间段  $[k, k+1]$  中存在多个陀螺仪和轮式里程计的测量

值。假设陀螺仪的偏差值  $b_{\omega}$  已经被估计出来, 则在  $O_k$  坐标系上对这些数据进行积分可以得到

$$\alpha_{O_{k+1}}^{O_k} = \sum_{i=1}^j R_{O_i}^{O_k}(\tilde{\phi}_{i+1}^{O_i} - n_{\phi}) \approx \sum_{i=1}^j R_{O_i}^{O_k}(\tilde{\phi}_{i+1}^{O_i}) \quad (5)$$

$$\gamma_{O_{k+1}}^{O_k} = \int_{t \in [k, k+1]} \gamma_{O_k O_t} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{2}(\tilde{\omega}_t - b_{\omega_t} - n_{\omega}) \end{pmatrix} dt \approx \int_{t \in [k, k+1]} \gamma_{O_k O_t} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{2}(\tilde{\omega}_t - b_{\omega_t}) \end{pmatrix} dt \quad (6)$$

式中  $\alpha_{O_{k+1}}^{O_k}$  为  $[k, k+1]$  时间内对机器人位移的积分, 其中  $j$  为  $[k, k+1]$  时间内轮式里程计测量数据的次数,  $R_{O_i}^{O_k}$  为第  $i$  次测量时轮式里程计坐标系  $O_i$  到  $k$  时刻轮式里程计坐标系  $O_k$  的旋转。式(6)为  $[k, k+1]$  时间内对机器人旋转的积分, 采用四元数表示旋转,  $\gamma_{O_{k+1}}^{O_k}$  为  $O_{k+1}$  坐标系到  $O_k$  坐标系的旋转,  $\gamma_{O_k O_t}$  为  $t$  时刻轮式里程计坐标系  $O_t$  到  $O_k$  坐标系的旋转,  $\otimes$  为四元数之间的乘法。

## 3 改进的初始化算法

初始化算法的步骤如下: 1) 通过 SFM 算法估计滑动窗口内的所有帧的位姿和特征点的深度<sup>[5]</sup>; 2) 结合单目相机 SFM 的计算结果以及预积分的值, 建立联立方程, 求得陀螺仪的偏差以及单目相机的尺度。

### 3.1 陀螺仪偏差校准

设滑动窗口中的 2 个连续的轮式里程计坐标系为  $O_k$  和  $O_{k+1}$ , 通过初始化的第一步视觉 SFM 算法, 可以得到 2 个坐标系相对于滑动窗口中第一帧相机坐标系的旋转角  $q_{O_k}^{C_0}$  和  $q_{O_{k+1}}^{C_0}$ 。通过预积分可以得到的两帧图像之间的旋转测量值  $\tilde{\gamma}_{O_{k+1}}^{O_k}$ , 结合预积分精确值  $\gamma_{O_{k+1}}^{O_k}$  对陀螺仪偏差  $b_{\omega}$  的雅可比  $J_{b_{\omega}}^{\gamma}$ , 可以将旋转预积分精确值  $\gamma_{O_{k+1}}^{O_k}$  与陀螺仪偏差  $b_{\omega}$  用近似的线性关系表示为

$$\gamma_{O_{k+1}}^{O_k} \approx \tilde{\gamma}_{O_{k+1}}^{O_k} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{2} J_{b_{\omega}}^{\gamma} b_{\omega} \end{pmatrix} \quad (7)$$

根据旋转之间的几何关系, 可以得到式(8)

$$\min_{\delta b_{\omega}} \sum_{k \in B} \| (q_{O_{k+1}}^{C_0})^{-1} \otimes q_{O_k}^{C_0} \otimes \gamma_{O_{k+1}}^{O_k} \|^2 \quad (8)$$

式中  $B$  为滑动窗口内的所有图像, 结合式(7)和式(8)即可解出陀螺仪偏差  $b_{\omega}$ 。

### 3.2 尺度校准

相比于 VINS-Mono, 本文在系统中没有使用加速度计, 因此, 不用计算重力向量以及系统的速度, 只需要计算单目相机尺度使 SFM 的结果调整到米制单位。在第一步单目 SFM 中, 得到滑动窗口中每个相机坐标系相对于第一个相机坐标系的无尺度位置  $\tilde{p}_{C_k}^{C_0}$ , 设单目相机的尺度为  $s$ , 结合相机坐标系和轮式里程计坐标系之间的外参  $(p_C^O, q_C^O)$ , 可以得

到以下等式

$$q_{o_k}^{c_0} = q_{c_k}^{c_0} \otimes (q_c^o)^{-1} \quad (9)$$

$$\bar{sp}_{o_k}^{c_0} = \bar{sp}_{c_k}^{c_0} - R_{o_k}^{c_0} p_c^o \quad (10)$$

式中  $R_{o_k}^{c_0}$  为  $k$  时刻轮式里程计坐标系相对于第一帧相机坐标系的旋转,对于滑动窗口中的 2 个连续轮式里程计坐标系  $O_k$  和  $O_{k+1}$ ,结合 2 个坐标系之间位移的预积分值  $\alpha_{o_k+1}^{o_k}$ ,可以得出以下等式

$$\alpha_{o_k+1}^{o_k} = s R_{o_k}^{o_k} (\bar{p}_{o_k+1}^{c_0} - \bar{p}_{o_k}^{c_0}) \quad (11)$$

结合式(9)~式(11),便可求得尺度  $s$ 。

#### 4 改进的非线性优化算法

VINS-Mono 非线性优化的核心思想是将视觉约束、预积分约束、回环检测约束和边缘化的成本函数放在一个大的目标函数中,通过求目标函数的最小值来获得滑动窗口内所有帧的姿态、陀螺仪偏差、特征点深度的最优值。在本文中,主要修改了预积分约束,并且添加了平面约束。

##### 4.1 预积分约束

相比于 VINS-Mono,本系统不需要优化加速度计的偏差以及相机的速度,陀螺仪-轮式里程计残差方程只有 3 项,设滑动窗口内的 2 个连续帧  $O_k$  和  $O_{k+1}$ ,则陀螺仪-轮式里程计预积分的残差可以表示为

$$r_B(\tilde{z}_{o_k+1}^{o_k}, x) = \begin{pmatrix} R_{o_k}^{o_k} (\bar{p}_{o_k+1}^w - \bar{p}_{o_k}^w) - \tilde{\alpha}_{o_k+1}^{o_k} \\ 2[(q_{o_k}^w)^{-1} \otimes q_{o_k+1}^w \otimes (\tilde{\gamma}_{o_k+1}^{o_k})^{-1}]_{xyz} \\ b_{\omega_k+1} - b_{\omega_k} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中  $\tilde{\alpha}_{o_k+1}^{o_k}$  和  $\tilde{\gamma}_{o_k+1}^{o_k}$  为  $k$  到  $k+1$  时刻的预积分测量值,等式右边第一项为预积分对位移的约束,  $\bar{p}_{o_k+1}^w$  和  $\bar{p}_{o_k}^w$  分别为  $k+1$  时刻和  $k$  时刻轮式里程计坐标系相对于世界坐标系的位移,  $R_{o_k}^{o_k}$  为旋转矩阵,表示世界坐标系相对于  $k$  时刻轮式里程计坐标系的旋转。等式右边的第二项为预积分对旋转的约束,  $q_{o_k}^w$  与  $q_{o_k+1}^w$  为四元数,分别为  $k$  时刻和  $k+1$  时刻轮式里程计坐标系到世界坐标系的旋转,  $[\cdot]_{xyz}$  为四元数中的向量部分。等式右边第三项表示  $k$  时刻和  $k+1$  时刻陀螺仪偏差的约束。

##### 4.2 平面约束

由于室内机器人运动的轨迹都在平面上,系统加入平面约束<sup>[6,9]</sup>,以获得更精确的轨迹

$$r_P(\tilde{z}_{o_k+1}^{o_k}, x) = \begin{pmatrix} [e_1 \ e_2]^T (R_{o_k}^w)^T R_{o_1}^w e_3 \\ e_3^T (-p_{o_k}^w + p_{o_1}^w) \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中  $e_1 = [1 \ 0 \ 0]^T$ ,  $e_2 = [0 \ 1 \ 0]^T$ ,  $e_3 = [0 \ 0 \ 1]^T$ ,等式的第一项为滑动窗口中第 1 个和第  $k$  个轮式里程计坐标系之间旋转的约束,  $R_{o_k}^w$  为世界坐标系  $W$  到第  $k$  个轮式里程计坐标系  $O_k$  的旋转,  $R_{o_1}^w$  为第 1 个轮式里程计坐标系  $O_1$  到世界坐标系  $W$  的旋转。该项的几何意义为,  $O_1$  坐标

系和  $O_k$  坐标系之间的横滚角和俯仰角应该近似相等。第二项是对机器人  $O_k$  坐标系  $z$  轴平移的约束,其几何意义为  $O_1$  坐标系和  $O_k$  坐标系在  $z$  轴的平移应该近似相等。

#### 5 实验

本文在数据集 DS1<sup>[6]</sup> 上进行仿真实验,该数据集由 Pioneer 3 DX 机器人和 Project Tango 平板电脑进行收集,提供了频率为 30 Hz、分辨率为  $640 \times 480$  的灰度图像,频率为 10 Hz 的轮式编码器数据以及频率为 100 Hz 的 IMU 数据,此外该数据集还提供了轨迹真值。数据集在一栋大楼内采集,机器人运行的轨迹长度约 1 km。本文通过该数据集测试了 VINS-Mono 以及本文改进后的系统,图 2 为本文改进后的系统在 DS1 数据上运行的效果。

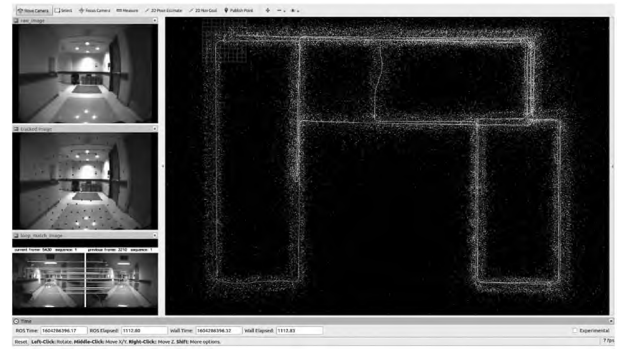


图 2 改进后系统的运行效果

其中,图 2 左边的 3 幅图从上到下分别代表机器人上摄像头拍摄的原图、图中跟踪的特征点,以及回环检测中匹配的特征点,右边的图像则代表机器人运行的轨迹以及计算出的 3 维路标点。对 VINS-Mono 以及本文改进后系统的运行结果进行分析,图 3 中左图和右图分别代表 VINS-Mono 和改进后系统运行的轨迹与真实轨迹的对比,其中,虚线代表的是真实的轨迹, VINS-Mono\_loop 和 VINS-Mono\_no\_loop 分别代表 VINS-Mono 运行 DS1 数据集时有回环检测和无回环检测的轨迹。由于 VINS-mono 运行到 700 s 时尺度开始漂移并且之后系统崩溃,因此只显示了前 700 s 的轨迹。 Our\_method\_loop 和 Our\_method\_no\_loop 分别代表改进后的系统在运行 DS1 数据集时有回环检测和无回环检测的轨迹。图 4 是两个系统对应的绝对轨迹误差的箱型图,改进系统的绝对轨迹误差在各方面的属性都优于原系统。测得的 VINS-Mono 无回环检测和有回环检测的轨迹均方根误差分别为 13.39 m 和 12.73 m;本文改进后的系统无回环检测和有回环检测的轨迹均方根误差分别为 1.59 m 和 1.54 m。综上所述,在室内移动机器人场景中,本系统解决了 VINS-Mono 定位精度发散较快的问题,轨迹的精度也有了大幅的提升。

#### 6 结论

基于改进 VINS-Mono 的室内移动机器人定位系统,主要改进了系统中的预积分、初始化以及非线性优化部分。



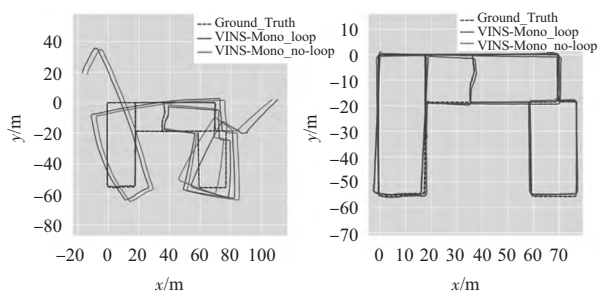


图3 VINS-Mono 计算的轨迹与真实轨迹对比 (左图)

改进后系统计算的轨迹与真实轨迹对比 (右图)

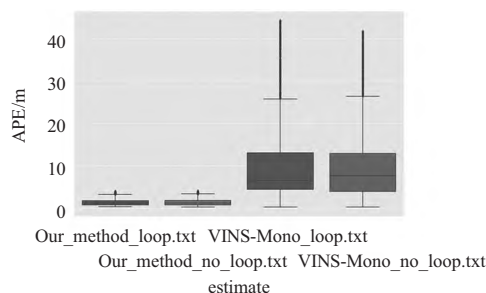


图4 改进前后2个系统对应的绝对轨迹误差箱型图

通过轮式里程计数据替代加速度数据进行预积分,可以得到精确的运动约束;结合之前的预积分数据及单目 SFM 算法的运算结果,通过松耦合方法,能够计算出陀螺仪偏差以及单目相机的尺度;用非线性最小二乘优化算法融合预积分数据和相机数据,能够对机器人轨迹、路标点深度以及陀螺仪偏差进行优化。仿真实验证明了改进的室内移动机器人定位系统相比于原系统的定位精度有较大的提升。

#### 参考文献:

- [1] 高云峰,周伦,吕明睿,等. 自主移动机器人室内定位方法研究综述[J]. 传感器与微系统,2013,32(12):1-5,9.  
GAO Yunfeng,ZHOU Lun,LÜ Mingrui,et al. Research overview of indoor localization methods for autonomous mobile robots[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2013,32(12):1-5,9.

(上接第84页)

- [11] ZHU T,WU D,LIU M,et al. In-line fiber-optic interferometric sensors in single-mode fibers[J]. Sensors,2012,12:10430-10449.
- [12] LEE B H,KIM Y H,PARK K S,et al. Interferometric fiber-optic sensors[J]. Sensors,2012,12:2467-2486.
- [13] GONG H,YANG X,NI K,et al. An optical fiber curvature sensor based on two peanut-shape structures modal interferometer[J]. IEEE Photonic Technology Letters,2014,26(1):22-24.
- [14] MAO L L,LU P,LAO Z F. Highly sensitive curvature sensor based on single-mode fiber using core-offset splicing[J]. Optics & Laser Technology,2014,57:39-43.
- [15] YUAN G,TIAN Z,RAO Y J,et al. All-fiber curvature sensor based on multimode interference[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2011,11(23):679-681.
- [16] TIAN Y,CHAI Q,TAN T,et al. Directional bending sensor based on a dual side-hole fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2018,30(4):375-379.

- [2] LEUTENEGGER S,LYNEN S,BOSSE M,et al. Keyframe-based visual-inertial odometry using nonlinear optimization[J]. International Journal of Robotics Research,2015,34:314-334.
- [3] BLOESCH M,OMARI S,HUTTER M,et al. Robust visual inertial odometry using a direct EKF-based approach[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Hamburg,Germany:IEEE,2015:298-304.
- [4] MOURIKIS A I,ROUMELIOTIS S I. A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation[C]//2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy:IEEE,2007:3565-3572.
- [5] QIN T,LI P,SHEN S. VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator[J]. IEEE Transactions on Robotics,2018,34:1004-1020.
- [6] WU K J,GUO C X,GEORGIOU G,et al. VINS on wheels[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Singapore:IEEE,2017:5155-5162.
- [7] LUCAS B D,KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[C]//Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vancouver,1981:674-679.
- [8] GALVEZ-LOPEZ D,TARDOS J D. Bags of binary words for fast place recognition in image sequences[J]. IEEE Transactions on Robotics,2012,28:1188-1197.
- [9] QUAN M,PIAO S,TAN M,et al. Tightly-coupled monocular visual-odometric SLAM using wheels and a MEMS gyroscope[J]. IEEE Access,2019,7:97374-97389.

#### 作者简介:

- 曾超(1996-),男,硕士研究生,研究方向为视觉SLAM。  
郑茜颖(1970-),女,通讯作者,博士,副教授,研究领域为人工智能与计算机视觉。  
程树英(1966-),女,博士,教授,博士研究生导师,研究领域为薄膜太阳能电池和太阳能光伏及其应用。

- [17] DENG M,TANG C P,ZHU T,et al. Highly sensitive bend sensor based on Mach-Zehnder interferometer using photonic crystal fiber[J]. Optics Communications,2011,284:2849-2853.
- [18] ZHANG L Y,ZHANG W G,CHEN L,et al. A fiber bending vector sensor based on M-Z interferometer exploiting two hump-shaped tapers[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2015,27(11):1240-1243.
- [19] ZHANG S S,ZHANG W G,GAO S C,et al. Fiber-optic bending vector sensor based on Mach-Zehnder interferometer exploiting lateral-offset and up-taper[J]. Optics Letters,2012,37(21):4480-4482.
- [20] YU X J,BU D,CHEN X F,et al. Lateral stress sensor based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometer and Fourier analysis[J]. IEEE Photonics Journal,2016,8(2):6801710.

#### 作者简介:

- 季彩虹(2000-),女,研究方向为光纤传感器。  
江超(1969-),男,通讯作者,博士,教授,硕士研究生导师,主要从事光纤传感器研究工作。