

8-13-2020

Mono-SLAM Based Method for Stitching Images of Sequence From UAV

Yuelong Ma

1. *Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China;*

Zhao Yong

2. *Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;*

Xuefeng Cao

1. *Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Mono-SLAM Based Method for Stitching Images of Sequence From UAV

Abstract

Abstract: It is an effective method to generate orthoimage from image sequence obtained from UAV. Most of the SfM-based methods for generating orthoimage are expensive computation and need hours or more to process image sequence, but the orthoimages generated finally are not satisfactory most of the time. *An algorithm to stitch image sequence obtained from UAV incrementally was designed based on monocular SLAM generating orthoimage for large-scale instantaneously.* Through the flow of SLAM, the system could estimate the position and attitude of the camera and the trajectory of UAV, meanwhile, generate a map of 3D point cloud. With the detection of loop-closure within SLAM and local optimization based on pose-graph, the system could minimize the impact of error accumulation and the computation for optimization, meanwhile, retain the accuracy. With the proposed adaptive weighted multiband algorithm, the system could fuse and visualize the orthoimage instantaneously. The experiment results demonstrate the efficient and effective of the proposed algorithm.

Keywords

image sequence, image stitching, orthoimage, mono slam

Recommended Citation

Ma Yuelong, Zhao Yong, Cao Xuefeng. Mono-SLAM Based Method for Stitching Images of Sequence From UAV[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10): 2349-2355.

一种基于单目 SLAM 的无人机序列图像拼接方法

马跃龙¹, 赵勇², 曹雪峰¹

(1.信息工程大学, 河南 郑州 450002; 2.西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要: 由无人机序列图像生成正射影像图是获取大范围正射影像图的一种有效方法。基于 SfM 生成正射影像图的方法计算量大, 耗时长, 所生成的正射影像图可视化效果较差。设计了基于单目 SLAM 的无人机序列图像增量式拼接算法, 实现了大范围场景正射影像图的实时生成。通过单目 SLAM 系统实时估计相机位置与姿态, 获取无人机飞行轨迹, 同时生成 3D 点云地图。通过 SLAM 环路检测与基于位姿图的局部优化, 有效降低了估计误差累积的影响, 在保持估计精度的同时实现了优化操作的最小化。利用所提出的自适应权重的多频带算法, 实现正射影像图的实时拼接融合与显示。通过实验验证了本方法的实时性与有效性。

关键词: 序列图像; 图像拼接; 正射影像图; 单目 SLAM

中图分类号: TP346.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 10-2349-07

Mono-SLAM Based Method for Stitching Images of Sequence From UAV

Ma Yuelong¹, Zhao Yong², Cao Xuefeng¹

(1. Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: It is an effective method to generate orthoimage from image sequence obtained from UAV. Most of the SfM-based methods for generating orthoimage are expensive computation and need hours or more to process image sequence, but the orthoimages generated finally are not satisfactory most of the time. An algorithm to stitch image sequence obtained from UAV incrementally was designed based on monocular SLAM generating orthoimage for large-scale instantaneously. Through the flow of SLAM, the system could estimate the position and attitude of the camera and the trajectory of UAV, meanwhile, generate a map of 3D point cloud. With the detection of loop-closure within SLAM and local optimization based on pose-graph, the system could minimize the impact of error accumulation and the computation for optimization, meanwhile, retain the accuracy. With the proposed adaptive weighted multiband algorithm, the system could fuse and visualize the orthoimage instantaneously. The experiment results demonstrate the efficient and effective of the proposed algorithm.

Keywords: image sequence; image stitching; orthoimage; mono slam

引言

近年来, 无人机技术的快速发展使其在军事和

民用领域得到了广泛的应用, 在情报探测、战场救援、抗震救灾、火警监控等方面发挥了重要作用^[1]。高效快速地对所获取的无人机序列图像进行处理, 实时生成精确的正射影响图对无人机任务的完成具有重要作用。

SfM(Structure from Motion)是最早被应用于无人机序列图像处理并生成正射影像图的方法, 目前



收稿日期: 2016-05-23 修回日期: 2016-07-16;
基金项目: 国家自然科学基金(41401465, 41371384);
作者简介: 马跃龙(1984-), 男, 内蒙古开鲁, 博士生, 研究方向为计算机视觉; 赵勇(1984-), 男, 湖南湘潭, 硕士, 研究方向为计算机视觉。

<http://www.china-simulation.com>

• 2349 •

已有大量基于 SfM 的算法实现, 如开源工程 OpenMVG^[2]与 openDroneMap, 以及商业软件 Pix4DMapper, Photoscan^[3]等。

基于 SfM 的无人机序列图像处理具有相似的处理流程: 特征点检测与匹配、图像对齐与稀疏点云生成^[4], 稠密点云与 Mesh 生成, 纹理贴图与图像融合。然而基于 SfM 方法的无人机序列图像处理非常耗时, 通常需要几个小时或更长时间的计算才能得到最终的正射影像图, 因而并不适用于实时性要求较高的应用任务。

同时定位与成图(SLAM)是机器人与计算机视觉领域的一个重要研究方向, 被认为是实现机器人在陌生环境下自主导航的关键技术。通过自身携带的传感器对周围环境的观测, 机器人可以实时估计自身在空间中的位置, 同时构建环境地图。相比于 SfM, 实时性是 SLAM 的重要优点。

SLAM 问题首次在 20 世纪 80 年代被提出^[5-6], 经过几十年的发展, SLAM 问题的解决先后经历了扩展卡尔曼滤波器^[7-8]、粒子滤波器^[9-10]、信息滤波器^[11-12]以及基于图优化(Graph Optimization)的图 SLAM(Graph SLAM)^[13-14]等方法。

Andrew^[15]首先实现了单目摄像头的 SLAM 问题求解, 成功估计得到单目摄像头在三维空间中的运动轨迹; Klein^[16]通过多线程技术将单目 SLAM 问题求解中的相机跟踪与地图构建并行化而提出了 PTAM 解决方案, 实现了相机定位与地图构建的实时计算。然而 PTAM 主要用于小型办公场景中的 AR 研究, 无法适用于大范围场景中相机定位与地图构建的问题。ORB-SLAM^[17]使用 ORB 算子实现图像特征的快速提取与匹配, 并且引入了基于 BoW 的环路检测算法^[18]进行 SLAM 环路检测, 较好地解决了大范围场景的相机定位与地图构建问题。PTAM 与 ORB-SLAM 是基于特征点的 SLAM 求解的典型代表, 与之相对是以 DTAM^[19]和 LSD-SLAM^[20]为代表直接方法(direct method)。不同于基于特征点的图像匹配方法, 直接方法直接利用像素强度进行图像匹配, 从而可以尽可能多地利

用图像的整体像素信息。与基于特征点的图像匹配方法相比, 直接方法运算量较大, 并且对所使用的相机有较高的要求, 鲁棒性不高。

目前已有研究者将 SLAM 技术应用于实时全景图生成^[21]以及水下声纳图像的实时拼接^[22]。然而文献[21]仅适用于相机运动为纯旋转的场景, 而文献[22]则由于缺少相应的图像融合算法, 可视化效果较差, 因而均不满足无人机序列图像的拼接需求。

图像拼接特别是全景图生成是一个相对成熟的研究领域, 有大量的软件和工程可供选择, 如 Photoshop, Microsoft Photosynth, 智能手机应用^[23]以及数字相机自身的图像拼接功能等。正确的图像对齐与图像融合是图像正确拼接的重要基础, Zaragoza^[24]使用移动 DLT(Direct Linear Transformation)改进图像对齐算法, 从而在非平坦场景以及复杂相机运动(旋转与平移)的情况下得到较好的图像对齐效果。然而对于真实的应用场景, 完美的图像对齐并不容易获得, 因而需要应用切缝处理^[25-26]以及图像融合^[27-28]方法来最小化接缝的视觉影响。然而大多数切缝处理方法^[25-26]所需的计算量较大, 并且需要预先为所有图像准备蒙版, 因而不适用于无人机序列图像的实时拼接。

本文设计了一种基于单目 SLAM 的无人机序列图像增量式拼接算法, 通过单目 SLAM 系统实时估计相机位置与姿态, 获取无人机飞行轨迹, 同时生成 3D 点云地图; 利用所提出的自适应权重的多频带算法实现大范围场景正射影像图的实时拼接与融合显示。

1 算法设计

本文设计一种基于单目 SLAM 的无人机序列图像拼接方法, 实现正射影像图的实时生成与融合显示。飞行平台所拍摄的图像回传进入单目 SLAM 系统, 实时估计相机位姿, 同时生成 3D 点云地图, 拟合融合平面。根据关键帧图像的相对位姿进行图像变换, 使用自适应权重的多频带算法实现正射影像图的实时生成与融合显示。算法框架如图 1 所示。

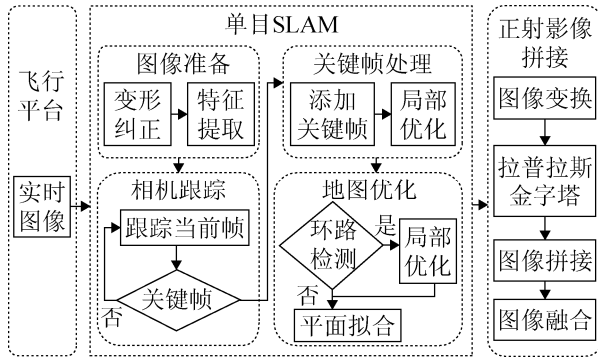


图 1 基于单目 SLAM 的正射影像图生成算法流程

1.1 基本原理

相机位姿定义为一系列刚体变换矩阵:

$$P_c = [R | t] \in SE(3) \quad (1)$$

其中: $R \in SO(3)$ 表示相机的旋转矩阵, $t \in \mathbb{R}^3$ 表示相机的平移向量。

由李群与李代数的运算规则, 将相机位姿定义为向量表示形式:

$$\mu = (v_1, v_2, v_3, q_1, q_2, q_3) = \ln(P_c) \in \mathbb{R}^6 \quad (2)$$

世界坐标系中的点 $p_w = (X, Y, Z)$ 到相机坐标系中点 $p_c = (x, y, z)^T$ 的变换表示为:

$$p_c = P_c p_w = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t = \exp(\mu) p_w \quad (3)$$

标准针孔相机模型的投影变换表示为:

$$p = Proj(p_c) = \left(\frac{X_C f_x}{Z_C} + x_0, \frac{Y_C f_y}{Z_C} + y_0 \right)^T \quad (4)$$

其中: f_x, f_y 与 x_0, y_0 分别为针孔相机模型的焦距与相机中心坐标。

相对应地, 计算 $Z_C = 1$ 平面上与 p_c 点相对应的 p'_c 点位置的反投影函数 $Proj^{-1}$ 可以定义为:

$$p'_c = Proj^{-1}(p) = \left(\frac{x - x_0}{f_x}, \frac{y - y_0}{f_y}, 1 \right)^T \quad (5)$$

1.2 地图构建与跟踪

为保证地图构建的实时性, 在另一个单独的线程中进行图像纠正与特征提取等各项准备工作, 使用 FAST 特征点算子与 BRIEF^[29] 特征描述符算子加快特征点的提取与特征描述符的计算。

在地图初始化过程中, 系统会自动选择满足初始化条件的两帧关键帧 K_1, K_2 初始化地图。在地图初始化完成之后, 当前图像所对应的相机位姿 μ 可以利用已有 3D 地图点 P 与 2D 特征点 p 之间的对应集合求解 PnP 问题得到。

通过搜索窗口在当前帧与上一个关键帧之间搜索查找 3D 地图点与 2D 特征点之间的对应集合, 粗略估计当前帧的相机位姿, 应用该位姿查找更多的对应集合。

确定 3D 地图点 P 与当前帧特征点 p 之间的对应集合之后, 当前帧的相机位姿可以通过最小化带有权重的平方残差函数进行估计:

$$\mu^* = \operatorname{argmin}_{P_i \in P} \sum \omega_i e_i^T \Sigma_i^{-1} e_i \quad (6)$$

其中: 误差 e_j 被定义为地图点的测量值 $p_i = (x_i, y_i)^T$ 与预测值 p'_i 之间的差值:

$$e_i = p_i - p'_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} - Proj(\exp(\mu) P_i) \quad (7)$$

权重 ω_i 可以减小较大残差的影响。

1.3 关键帧更新与位姿优化

两帧之间的相对距离定义为相机位姿的平移与旋转的权重组合:

$$\operatorname{dist}(i, j) = \mu_{ji}^T W \mu_{ji} \quad (8)$$

其中: W 是一个对角矩阵, 表示 μ_{ji} 中每个参数的权重。如果当前帧与上一个关键帧 K_{i-1} 之间的距离超过某个阈值时, 则创建新的关键帧 K_i , 以保证地图中的关键帧之间具有足够的重叠度。

当插入一个新的关键帧 K_i 时, 需要尽快向地图中添加新的地图点, 以保证地图中有足够的地图点进行后续的匹配与跟踪。为了尽可能多地生成 3D 地图点, 对于跟踪中未成功匹配的所有特征点, 沿极线在相邻关键帧中查找更多匹配。对所有的匹配集合执行三角化运算创建新的地图点, 通过数据关联操作向地图中添加更多的观测, 组合重复的地图点, 并剔除误差较大的地图点。计算并注册新关键帧的 BoW 向量, 构建或更新 BoW 向量数据库。

执行局部捆绑调整(Bundle Adjustment)优化关键帧 K_L 以及关键帧 K_L 所对应的 3D 地图点。通过最小化所有局部观测的权重残差优化关键帧的位姿 μ 与地图点的三维位置 P :

$$\{\mu^*, P^*\} = \operatorname{argmin} \sum_{p_i \in P_L} \sum_{K_i \in K_L} \omega_{ij} e_{ij}^T \Sigma_{ij}^{-1} e_{ij} \quad (9)$$

1.4 环路检测

为了得到高质量的 SLAM 地图, 需要得到高质量的轨迹估计, 而在视觉 SLAM 中跟踪漂移是不可避免的, 从而使得估计误差不断累积。通过 SLAM 环路检测与全局优化, 可以有效抑制误差累积的影响, 得到更好的全局一致地图。

在 BoW 向量数据库中检索与当前关键帧共享相同视觉单词(Visual Words)的关键帧作为环路候选项, 并计算其与当前关键帧的相似度。为了提高系统的鲁棒性, 仅选择其相邻帧也为环路候选项的关键帧作为环路候选项。对于所有环路候选项, 测试其与当前关键帧的匹配关系, 并使用 RANSAC 方法计算粗略的相似变换, 确定与当前关键帧的几何一致性。与当前关键帧具有足够内点的环路候选项会被接受为环路关键帧, 并通过最小化地图点的投影误差优化相对位姿。

在检测到 SLAM 环路之后, 执行数据关联操作融合重复的地图点。由于直接的捆绑调整所需的计算量较大, 因而选择文献[30]中描述的位姿图优化方法对关键帧及其所对应的地图点进行局部优化以减少关键帧偏移, 从而在保证 SLAM 地图正确性的同时使得局部优化的计算量最小。

1.5 地图融合

经过前述各步的处理后, 图像已经正确对齐并且拟合得到融合平面, 地图融合的目的则是以增量方式拼接所有的关键帧得到正射影像图。相比于传统的全景图拼接方法, 无人机序列图像拼接面临如下问题与挑战:

1. 关键帧拼接必须满足实时性要求;
2. 以增量方式拼接融合关键帧;

3. 正确处理由非平面场景与复杂相机运动导致的错误对齐;

4. 融合图像要尽可能正射从而确保融合图像的正确更新

将正射影像拼接分割为一系列的图像块, 对每个图像块构建并保存拉普拉斯金字塔与权重金字塔。通过拉普拉斯金字塔, 可以最小化图像曝光差别与错误对齐, 通过混合操作得到连续亮度, 同时将所有细节保存在低层金字塔中。

首先计算一个 k 级高斯金字塔, 然后由 G_{l-1} 级金字塔减去 G_l 金字塔即可以得到相应的 l 级的拉普拉斯金字塔:

$$G_l(x, y) = \sum_{d_x=-n}^n \sum_{d_y=-n}^n W_{d_x, d_y} G_{l-1}(x+d_x, y+d_y) \quad (10)$$

$$L_l = G_l - G_{l+1} \quad l < k \quad (11)$$

其中: $2n-1$ 为拉普拉斯核大小, 权重 W_{d_x, d_y} 之

和为 1。拉普拉斯金字塔的最高级 L_k 与高斯金字塔的最高级 G_k 相同。默认频带数 k 为 5, 图像块的分辨率为 2^k , 默认使用 256×256 的分辨率。将正射影像拼接分为一系列图像块, 不仅可以实现正射影像图的增量式融合, 而且可以确保所得到的最终图像具有合适的尺寸。

关键帧拼接的处理流程总结如下:

1. 根据相对位姿计算图像的矩形边缘, 当矩形边缘超出融合区域时则扩大融合区域。

2. 为了使得融合得到的图像尽可能正射, 根据高度、视场角与像素位置自适应计算权重图像。计算 Homography 矩阵并用其变换颜色图像与权重图像。

3. 由变换后的图像计算拉普拉斯金字塔与权重金字塔, 将具有最优权重值的图像块与全局拼接图像块融合。

2 实验结果

实验飞行平台使用自制的六旋翼飞行器, 搭载 Go Pro Hero3+ 运动相机, 可以提供 1920×1080 p 的高清视频, 通过 DJI Lightbridge 实现高清视频图

像的实时回传, 进入地面处理平台进行视频图像的实时拼接处理。无人机序列图像拼接系统运行在一台配备 Intel i7-4710CPU, 16GRAM, GTX960 的笔记本电脑上。

飞行平台所拍摄的图像实时回传给地面处理平台, 进入 SLAM 处理流程。相比于传统的基于 SfM 的暴力图像匹配(两两图像匹配)估计相机位姿的方法, SLAM 系统充分利用图像的序列性, 通过前后帧图像之间的匹配关系估计相机位姿, 从而实现相机位姿的实时估计。为了保证 SLAM 系统的运行效率, 在估计得到的位姿序列中仅保留具有一定运动距离的关键帧位姿, 从而得到无人机的飞行轨迹, 如图 2 所示。

在保证相机位姿估计实时性的同时, 为了提高相机位姿的估计精度, 当生成新的关键帧或是检测到 SLAM 环路时, 使用基于位姿图的优化方法对关键帧位姿、与其相关联的关键帧位姿以及相关的地图点进行联合局部优化, 以降低误差累积的影响, 提高估计精度。联合局部优化在提高估计精度的同时使得优化操作所需要的计算量最小, 以保证 SLAM 系统的运行效率。基于位姿图的局部优化关系如图 3 所示。

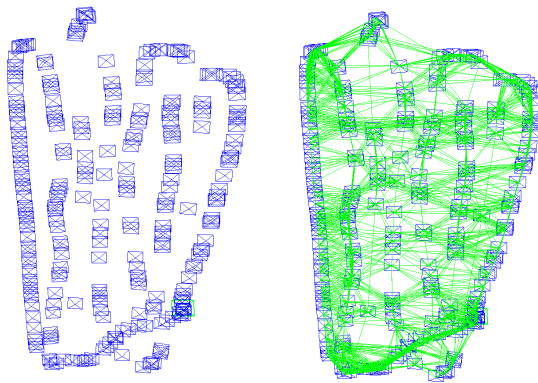


图 2 实时估计飞行轨迹

图 3 位姿图局部优化

利用估计得到的相机位姿, 根据两帧图像特征点之间的匹配构建极线约束关系, 通过三角化可计算得到匹配的特征点所对应的空间点的三维坐标位置, 从而生成三维稀疏点云地图, 并拟合融合平面。生成的稀疏点云如图 4 所示。

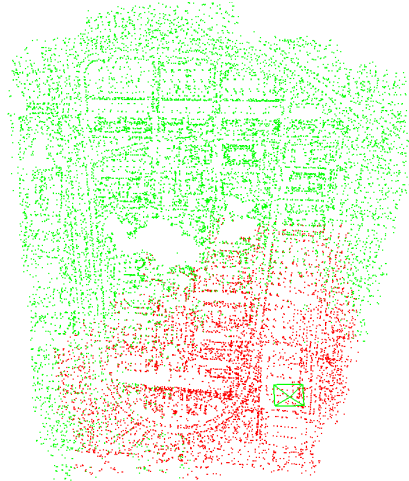


图 4 单目 SLAM 系统生成的三维稀疏点云地图

根据关键帧之间的相对位姿进行图像变换, 将当前操作的关键帧分割为一系列的图像块, 构建并保存图像拉普拉斯金字塔以及相对应的权重金字塔, 选取权重最优的图像块根据其所对应的点云位置进行正射影像图的拼接与融合显示。所得到的正射影像图如图 5 所示。



图 5 系统生成的正射影像图

应用专业的无人机数据处理软件 Pix4DMapper 处理得到的正射影像图如图 6 所示。在整体效果上, 本文方法所得到的正射影像图可以达到 Pix4DMapper 的水平, 而对于边缘图像的融合显示, 本文方法的处理效果要优于 Pix4DMapper 的处理效果。

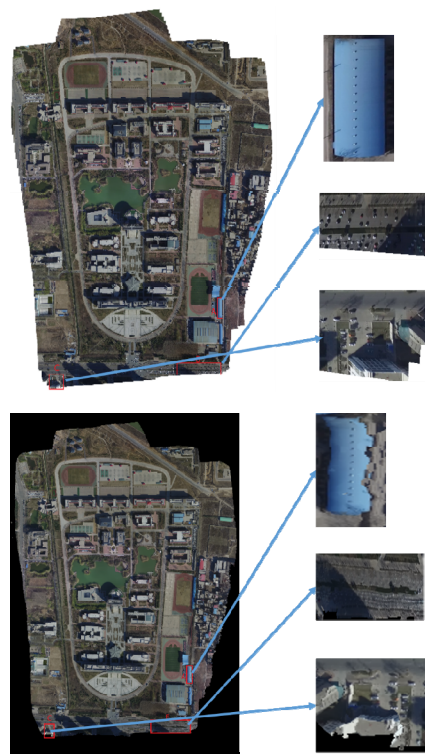


图 6 本方法(上图)与 Pix4DMapper(下图)效果对比

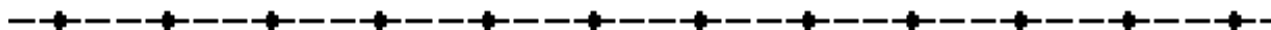
3 结论

传统基于 SfM 由无人机序列图像生成正射影像图的方法所需计算量大,耗时长,所生成的正射影像图可视化效果较差。本文设计了一种基于单目 SLAM 的无人机序列图像增量式拼接方法,实时估计相机的位置与姿态,同时生成三维点云地图,拟合得到图像融合平面,利用所提出的自定义权重的多频带算法,实现了正射影像图的实时拼接与融合显示。通过实验验证了本文算法的实时性与有效性。

参考文献:

- [1] 万刚, 余旭初, 布树辉, 等. 无人机测绘技术及应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2014.
- [2] Kneip L, Furgale P. OpenGV: A unified and generalized approach to real-time calibrated geometric vision [C]//Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on. USA: IEEE, 2014: 1-8.
- [3] Verhoeven G. Taking computer vision aloft—archaeological three - dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan [J]. Archaeological Prospection (S1099-0763), 2011, 18(1): 67-73.
- [4] Triggs B, McLauchlan P F, Hartley R I, et al. Bundle adjustment—a modern synthesis [M]// Vision algorithms: theory and practice. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 1999: 298-372.
- [5] Bailey T, Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part I [J]. IEEE Robot. Autom. Mag.(S1070-9932), 2006, 13(2): 99-110.
- [6] Bailey T, Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II [J]. IEEE Robot. Autom. Mag., 2006, 13(3): 108-117.
- [7] Smith R, M. S, Cheeseman P. Estimating uncertain spatial relationships in robotics [J]. Autonomous Robot Vehicles, 1990: 167-193.
- [8] Castellanos J A, Montiel J M M, Neira J, et al. The SPmap: A probabilistic framework for simultaneous localization and map building [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(5): 948-952.
- [9] Montemerlo M, Thrun S, Koller D, et al. FastSLAM: A factored solution to Simultaneous localisation and mapping [C]// Proc. of the National Conference on Artificial Intelligence, 2002. California: The AAAI Press, 2002: 593-598.
- [10] Hahnel D, Burgard W, Fox D, et al. An efficient algorithm for generating maps of large-scale cyclic environments from new laser range measurements [C]// Proc. of the IEEE/RSJ Int.Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2003. USA: IEEE, 2003.
- [11] Thrun S, Liu Y, Koller D. Simultaneous localisation and mapping with sparse extended information filters [J]. Journal of Robotics Research (S0278-3649), 2004, 23(7): 693-716.
- [12] Eustice R, Singh H, Leonard J J. Exactly sparse delayed-state filters [C]// Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, 2005. USA: IEEE, 2005.
- [13] Lu F, Milios E. Globally consistent range scan alignment for environment mapping [J]. Autonomous Robots (S0929-5593), 1997, 4(4): 333-349.
- [14] Kümmerle R, Grisetti G, Strasdat H, et al. G2o: A general framework for graph optimization [C]// Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. USA: IEEE, 2011: 3607-3613.
- [15] Andrew J D, Ian D M D Reid, et al. MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 2007, 29(6): 1052-1067.
- [16] Klein G, Murray D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces [C]// Mixed and Augmented Reality, 2007. ISMAR 2007, 6th IEEE and ACM International Symposium on. USA: IEEE, 2007: 225-234.
- [17] Ra'ul Mur-Artal J M M Montiel, Tard' J D. ORB-SLAM: a Versatile and Accurate Monocular [J]. IEEE Transactions on Robotics (S1552-3098), 2015, 31(5): 1147-1163.
- [18] Gálvez-López D, Tardós J D. Bags of binary words for

- fast place recognition in image sequences [J]. IEEE Transactions on Robotics (S1552-3098), 2012, 28(5): 1188-1197.
- [19] Richard A Newcombe, Andrew J Davison. Live dense reconstruction using a single moving camera [J]. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on (S1063-6919), 2010, 1498-1505.
- [20] Engel J, Schöps T, Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM [M]// Computer Vision-ECCV 2014. Germany: Springer, 2014: 834-849.
- [21] Lovegrove S, Davison A J. Real-time spherical mosaicing using whole image alignment [M]// Computer Vision-ECCV 2010. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 73-86.
- [22] Maki T, Kondo H, Ura T, et al. Photo mosaicing of tagiri shallow vent area by the auv" tri-dog 1" using a slam based navigation scheme [C]// OCEANS 2006. USA: IEEE, 2006: 1-6.
- [23] Brown M, Lowe D G. Automatic panoramic image stitching using invariant features [J]. International Journal of Computer Vision (S0920-5691), 2007, 74(1): 59-73.
- [24] Zaragoza J, Chin T-J, Tran Q-H, et al. As-projective-as-possible image stitching with moving DLT [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, IEEE (S0162-8828), 2014, 36(7): 1285-1298.
- [25] Kwatra V, Schödl A, Essa I, et al. Graphcut textures: image and video synthesis using graph cuts [J]. ACM Transactions on Graphics (ToG) (S0730-0301), 2003, 22(3): 277-286.
- [26] Zhao Y, Xu D. Fast Image Blending Using Seeded Region Growing [M]// Advances in Image and Graphics Technologies. Germany: Springer, 2015: 408-415.
- [27] Burt P J, Adelson E H. A multiresolution spline with application to image mosaics [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 1983, 2(4): 217-236.
- [28] P Perez M Gangnet, Blake A. Poisson image editing [C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. USA: IEEE International, 2003.
- [29] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF [C]// Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on. USA: IEEE, 2011: 2564-2571.
- [30] Strasdat H, Davison A J, Montiel J M M, et al. Double window optimisation for constant time visual SLAM [C]// Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on. USA: IEEE, 2011: 2352-2359.



(上接第 2348 页)

- [5] 肖朝, 杨红雨, 梁海军, 等. 多投影显示系统结构光几何校正算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(6): 802-808.
- [6] Audet S, Okutomi M. A user-friendly method to geometrically calibrate projector-camera systems [C]// Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). USA: IEEE, 2009: 47-54.
- [7] 蓝建梁, 丁友东. 基于结构光与单应的投影机几何校正 [J]. 光电子·激光, 2015, 5(26): 1010-1018.
- [8] Zhu B, Xie L J, Wang Q H, et al. An Intelligent Projection System Adapted to Arbitrary Surfaces [C]// Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, 2011 First International Conference on. CHINA: IEEE, 2011: 293-298.
- [9] 朱博, 解利军, 杨延俊, 等. 自适应复杂环境的投影图像校正算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(7): 941-948.
- [10] Xie C, Wang Q, Cheng W. Simple auto-geometric correction for non-planar projection [C]// International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence. CHINA: IEEE, 2012: 1834-1837.
- [11] Han C, Fan J T, Jiang Z G. Projection Geometric Correction for Screen Pattern [J]. Applied Mechanics & Materials (S1660-9336), 2012, 263(1): 2414-2417.
- [12] Changsoo Je, Kwang Hee Lee, Sang Wook Lee, Multi-projector color structured-light vision [J]. Signal Processing: Image Communication (S0923-5965), 2013, 28(9): 1046-1058.
- [13] 范静涛, 韩成, 张超, 等. 一种新的 De Bruijn 彩色结构光解码技术研究 [J]. 电子学报, 2012, 40(3): 483-488.
- [14] Raskar R, Beardsley P, Baar J V, et al. RFIG Lamps: Interacting with a Self-Describing World via Photosensing Wireless Tags and Projectors [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2004, 23(3): 404-413.