

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 2 月 10 日 (10.02.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/028554 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06T 7/73 (2017.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2021/111064
- (22) 国际申请日: 2021 年 8 月 6 日 (06.08.2021)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202010783333.1 2020 年 8 月 6 日 (06.08.2020) CN
- (71) 申请人: 天津大学 (TIANJIN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国天津市南开区卫津路 92 号天津大学, Tianjin 300072 (CN)。
- (72) 发明人: 冯伟 (FENG, Wei); 中国天津市南开区卫津路 92 号天津大学, Tianjin 300072 (CN)。 万亮 (WAN, Liang); 中国天津市南开区卫津路 92 号天津大学, Tianjin 300072 (CN)。 李楠 (LI, Nan); 中国天津市南开区卫津路 92 号天津大学, Tianjin 300072 (CN)。 张乾 (ZHANG, Qian); 中国天津市南开区卫津路 92 号天津大学,

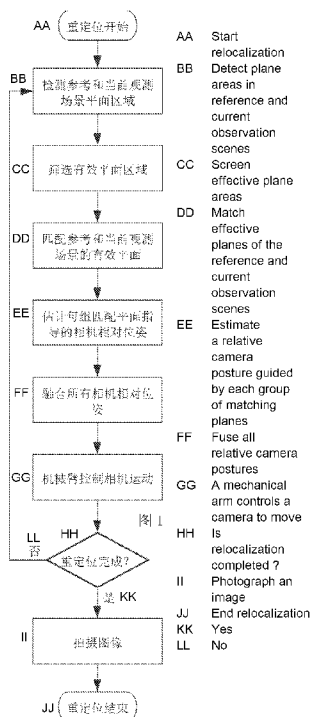
Tianjin 300072 (CN)。 孟忱 (MENG, Chen); 中国天津市南开区卫津路 92 号天津大学, Tianjin 300072 (CN)。 王小伟 (WANG, Xiaowei); 中国甘肃省敦煌市敦煌研究院, Gansu 736299 (CN)。 苏伯民 (SU, Bomin); 中国甘肃省敦煌市敦煌研究院, Gansu 736299 (CN)。

(74) 代理人: 天津市北洋有限责任专利代理事务所 (BEI & OCEAN); 中国天津市南开区鞍山道 282 号启航大厦 1210 室, Tianjin 300073 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) Title: ACTIVE CAMERA RELOCALIZATION METHOD HAVING ROBUSTNESS TO ILLUMINATION

(54) 发明名称: 对光照鲁棒的主动相机重定位方法



(57) Abstract: An active camera relocalization method having robustness to illumination. The method comprises the following steps: extracting an effective plane area image set of scenes in a current observation image T and a reference observation image R; establishing a matching relationship in the effective plane area image set; obtaining a relative camera posture guided by each group of matching planes; obtaining camera movement guidance information by means of fusing all relative camera postures; and by means of a movement step size, determining whether a relocalization process is completed.

(57) 摘要: 一种对光照鲁棒的主动相机重定位方法, 包括下列步骤: 提取当前观测图像T及参考观测图像R中场景的有效平面区域图像集合; 在有效平面区域图像集合中建立匹配关系; 获得每组匹配平面所指导的相机相对位姿; 通过融合所有的相机相对位姿获得指导相机运动信息; 通过运动步长判断重定位过程是否完成。

ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

对光照鲁棒的主动相机重定位方法

技术领域

本发明属于人工智能、计算机视觉领域，涉及主动视觉技术，具体为对光照鲁棒的主动相机重定位方法。

背景技术

主动式相机重定位，旨在物理真实地将相机六自由度位姿恢复到与拍摄参考图像时一致，在环境监测，历史文化遗产预防性保护，微小变化检测等领域发挥着重要作用，是主动视觉技术的一个重要应用[1]。主动式相机重定位过程包括相机的相对位姿估计和相机的动态调整，相机的调整由机器人平台完成。

目前最先进的主动式相机重定位方法在大量野生赋存环境下的文化遗产微小变化检测任务中取得了巨大成功[2]。但需要注意的是，这些监测任务是在稳定和可控的环境条件下进行的，在这种条件下，所采用图像的特征匹配结果能够支持准确的相机位姿估计。

然而，当历次观测的光照条件（方向和强度）不同时，监测结果差强人意。光照的显著差异会改变场景（尤其是普遍存在的三维结构场景）的表观，进而使涉及到姿态估计的图像中的特征点描述子会发生变化，导致相机位姿估计失败。此外，如果观测场景中的背景（非监测对象区域）变化较大，例如，被监测古建筑附近的植被在不同季节可能发生剧烈变化（甚至结构变化），将显著增加图像中误匹配特征点的数量，严重影响重定位结果的准确性。实际任务中常见的上述两种情况，会严重损害主动相机重定位的精度，导致实际监测结果不可靠，从而无法支持户外不可控环境条件下的重定位作业。

参考文献：

[1] Feng W , Tian F P , Zhang Q , et al. Fine-Grained Change Detection of Misaligned Scenes with Varied Illuminations [C] ICCV. IEEE, 2015.

[2] Tian F P, Feng W, Zhang Q, et al. Active camera relocalization from a single reference image without hand-eye calibration [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2018, 41(12): 2791-2806.

[3] 冯伟，孙济洲，张乾，田飞鹏，韩瑞泽，专利名称：一种无需手眼标定的相机六自由度位姿精确重定位方法，申请号：CN201611140264.2

发明内容

本发提供了具有相同发明构思的两种主动相机重定位方法，利用观测场景中的所有有效平面对相机的运动信息进行联合估计，有效减少了现有重定位方法对历次观测场景光照一致性和场景结构一致性的依赖，同时有效减少了重定位过程的时间花费，从而支持可靠高效的户外任务作业。技术方案如下：

一种对光照鲁棒的主动相机重定位方法，包括下列步骤：

步骤一：提取当前观测图像 $\mathbf{T}$ 及参考观测图像 $\mathbf{R}$ 中场景的有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}_{n=1}^N$ 和

$$\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}_{m=1}^M;$$

步骤二：在有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中建立匹配关系，方法为：

(1) 对于有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ ，计算其中每一个平面区域图像 $\mathbf{T}_i^{\mathbf{P}}$ 的 SIFT 特征点的个数；计算其中每两个平面区域图像之间的最小欧氏距离；对有效平面区域图像集合 $\mathcal{R}$ 做同样操作；

(2) 对于有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ ，以其中每一个平面区域图像 $\mathbf{T}_i^{\mathbf{P}}$ 作节点建立无向全连通图 $\mathcal{G}_1 = \{V^{(1)}, E^{(1)}\}$ ；对有效平面区域图像集合 $\mathcal{R}$ 做同样操作得到无向全连通图 $\mathcal{G}_2 = \{V^{(2)}, E^{(2)}\}$ ；

(3) 以平面图像的 SIFT 特征点个数作为图的节点权重，以平面图像间的欧式距离作为图的边权重，求解 $\mathcal{G}_1$ 和 $\mathcal{G}_2$ 间的图匹配问题，建立有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中匹配关系 $\mathcal{S} = \{(\mathbf{R}_i^{\mathbf{P}}, \mathbf{T}_i^{\mathbf{P}})\}_{i=1}^L$ 。

步骤三：获得每组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ ；

步骤四：通过融合所有的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 获得指导相机运动信息。

步骤一具体包括：

(1) 针对观测对象，选取原场景图像，分别检测当前观测图像 $\mathbf{T}$ 及参考观测图像 $\mathbf{R}$ 中场景的平面区域，得到平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}$ ；

(2) 在平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}$ 中分别选取有效平面区域得到图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}_{m=1}^M$ ，方法如下：

第 1 步：确定面积比：分别计算所检测到的平面区域的图像面积与原场景图像面积的比例；

第 2 步：设定阈值，分别选取集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}$ 中，平面区域图像面积占场景图像面积比大于阈值的区域组成有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}_{m=1}^M$ ；

第 3 步：若集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}$ 中所有的平面区域图像面积占比均小于阈值，则根据各自集合中各自集合中平面区域面积占比较大的图像区域确定有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}_{n=1}^N$ 和

$$\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}_{m=1}^M;$$

(3) 对有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^P\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^P\}_{m=1}^M$ 中所有平面区域图像进行图像形态学腐

蚀, 获得所有有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^P\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^P\}_{m=1}^M$ 。

第2步所设定的阈值可以为10%。

步骤三具体为:

第1步: 对于每一对匹配平面 $(\mathbf{R}_i^P, \mathbf{T}_i^P)$, 计算 $\mathbf{T}_i^P, \mathbf{R}_i^P$ 间的单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$;

第2步: 对于每一个单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$, 分别对其进行奇异值分解, 求取所对应的旋转矩阵和平移向量,

即为该组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 。

步骤四具体为:

(1) 确定参与每个 $\mathbf{P}_i$ 计算的 SIFT 特征点个数及特征点在平面上的分布;

(2) 根据每个 $\mathbf{P}_i$ 所对应的 SIFT 特征点个数即数值权和 SIFT 特征点分布情况即分布权进行权重融合,

按照各自对相机相对位姿的影响比重对所有的 $\mathbf{P}_i$ 做加权融合, 获得最终用来指导相机运动的信息, 两个权重的确立方法如下:

第1步: 数值权 φ_i : 用参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的特征匹配点对的个数与参与匹配关系 $\mathcal{S}$ 中所有 L 个相机相对位姿计算的特征匹配点对的个数的比值来确定;

第2步: 分布权 η_i : 将参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的有效平面区域图像 $\mathbf{T}_i^P$ 按照平面区域形状的外接矩形裁剪生成 $\bar{\mathbf{T}}_i^P$, 将 $\bar{\mathbf{T}}_i^P$ 均匀分割成网格区域, 统计每一个网格中参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的特征匹配点个数, 计算这些分布在每一个网格中的相关特征匹配点个数的方差, 进而计算分布权, 方差越小, 权值越高。

本发明同时提供一种对光照鲁棒的主动相机重定位方法, 包括下列步骤:

步骤一: 提取当前观测图像 $\mathbf{T}$ 及参考观测图像 $\mathbf{R}$ 中场景的有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^P\}_{n=1}^N$ (N 表示平面总数, n 为平面索引, p 为表示平面的标识) 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^P\}_{m=1}^M$ (M 表示平面总数, m 为平面索引, p 为表示平面的标识);

步骤二: 在有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中建立匹配关系, 方法为:

(1) 对于有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$, 计算其中每一个平面区域图像 $\mathbf{T}_n^P$ 的 SIFT 特征点的个数; 计算其中每两个平面区域图像之间的最小欧氏距离; 对有效平面区域图像集合 $\mathcal{R}$ 做同样操作;

(2) 对于有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$, 以其中每一个平面区域图像 $\mathbf{T}_n^P$ 作节点建立无向全连通图

$\mathcal{G}_1 = \{V^{(1)}, E^{(1)}\}$ (V 表示节点集合, 每个节点对应一个平面; E 为边集合, 每个边表示边上两个节点代表的平面间的欧氏距离); 对有效平面区域图像集合 $\mathcal{R}$ 做同样操作得到无向全连通图 $\mathcal{G}_2 = \{V^{(2)}, E^{(2)}\}$;

(3) 以平面图像的 SIFT 特征点个数作为图的节点权重, 以平面图像间的欧式距离作为图的边权重, 求解 $\mathcal{G}_1$ 和 $\mathcal{G}_2$ 间的图匹配问题, 建立有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中匹配关系 $\mathcal{S} = \{(\mathbf{R}_i^p, \mathbf{T}_i^p)\}_{i=1}^L$ (L 表示当前观测及参考观测图像中具有匹配关系的图像个数, i 为索引)。

步骤三: 获得每组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$;

步骤四: 通过融合所有的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 获得指导相机运动信息。

步骤五: 判断重定位过程是否完成。若重定位完成则终止; 若未完成则重复迭代步骤一至步骤五。

优选地, 步骤一具体包括:

(1) 针对观测对象, 选取原场景图像, 分别检测当前观测图像 $\mathbf{T}$ 及参考观测图像 $\mathbf{R}$ 中场景的平面区域, 得到平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}$;

(2) 在平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}$ 中分别选取有效平面区域得到图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}_{m=1}^M$, 方法如下:

第 1 步: 确定面积比: 分别计算所检测到的平面区域的图像面积与原场景图像面积的比例;

第 2 步: 设定阈值, 分别选取集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}$ 中, 平面区域图像面积占场景图像面积比大于阈值的区域组成有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}_{m=1}^M$;

第 3 步: 若集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}$ 中所有的平面区域图像面积占比均小于阈值, 则根据各自集合中平面区域面积占比较大的图像区域确定有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}_{m=1}^M$;

(3) 对有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}_{m=1}^M$ 中所有平面区域图像进行图像形态学腐蚀, 获得所有有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}_{m=1}^M$ 。

第 2 步所设定的阈值可以为 10%。

步骤三具体为:

第 1 步: 对于每一对匹配平面 $(\mathbf{R}_i^p, \mathbf{T}_i^p)$, 计算 $\mathbf{T}_i^p, \mathbf{R}_i^p$ 间的单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$;

第2步：对于每一个单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$ ，分别对其进行奇异值分解，求取所对应的旋转矩阵和平移向量，即为该组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 。

步骤四具体为：

(1) 确定参与每个 $\mathbf{P}_i$ 计算的 SIFT 特征点个数及特征点在平面上的分布；

(2) 根据每个 $\mathbf{P}_i$ 所对应的 SIFT 特征点个数即数值权和 SIFT 特征点分布情况即分布权进行权重融合，

按照各自对相机相对位姿的影响比重对所有的 $\mathbf{P}_i$ 做加权融合，获得最终用来指导相机运动的信息，其中，两个权重的确立方法如下：

第1步：数值权 φ_i ：用参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的特征匹配点对的个数与参与匹配关系 $\mathcal{S}$ 中所有 L 个相机相对位姿计算的特征匹配点对的个数的比值来确定；

第2步：分布权 η_i ：将参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的有效平面区域图像 $\mathbf{T}_i^P$ 按照平面区域形状的外接矩形裁剪生成 $\bar{\mathbf{T}}_i^P$ ，将 $\bar{\mathbf{T}}_i^P$ 均匀分割成网格区域，统计每一个网格中参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的特征匹配点个数，计算这些分布在每一个网格中的相关特征匹配点个数的方差，进而计算分布权，方差越小，权值越高。

步骤五具体为：

根据相机运动信息中平移维度的尺度大小判断重定位是否终止，当运动步长小于步长阈值 ξ 时，则判定重定位过程完成，终止重定位，否则重复步骤一至步骤五。

本发明提供的技术方案的有益效果是：

1、本发明在重定位过程中，由于对于相机运动信息（即相机相对位姿）的估计是基于平面的，可以有效减少由不同光照条件（方向、强度）导致观测的三维场景的表观不同对相机相对位姿估计的影响；同时，有效平面的选取和匹配可以有效减少观测的三维场景的结构性变化对相机相对位姿估计的影响。能使得现有的重定位设备可以在户外可靠地作业，基本屏蔽由场景光照差异和结构性变化所带来的主动相机重定位作业场景的限制。

2、本发明在重定位过程中，由于计算相机运动信息（即相机相对位姿）所使用的数学方法与现有重定位方法不同，有效减少了重定位过程的时间花费，能使得现有重定位设备更加高效地作业。

附图说明

图1为本发明实施例1的一种对光照鲁棒的主动相机重定位方法的流程图；

图2为本发明实施例2的一种对光照鲁棒的主动相机重定位方法的流程图；

图3为实施例2的重定位软硬件系统示意图；

图 4 为本发明方法与现有最优重定位方法的时间和精度比较。

具体实施方式

下面结合附图对本发明中的技术方案进行清楚、完整地描述。基于本发明中的技术方案，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

实施例 1

(一) 有效平面的确定

重定位过程开始前，提取当前观测图像 $\mathbf{T}$ 及参考观测图像 $\mathbf{R}$ 中场景的所有有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^P\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^P\}_{m=1}^M$ 。具体步骤如下：

(1) 分别检测当前观测图像 $\mathbf{T}$ 及参考观测图像 $\mathbf{R}$ 中场景的平面区域，得到平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^P\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^P\}$ 。

说明 1：检测图像中的平面区域

使用传统的基于单应矩阵的平面检测方法或基于深度网络模型的机器学习的方法分别检测 $\mathbf{T}$ 及 $\mathbf{R}$ 中的平面区域，得到集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^P\}$ 及 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^P\}$ 。

(2) 在 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中分别选取有效平面区域得到图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^P\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^P\}_{m=1}^M$ 。

说明 2：选取有效平面区域

第 1 步：确定面积比。分别计算所有检测到的平面区域的图像面积与原场景图像面积的比例。

第 2 步：分别选取集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^P\}$ 及 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^P\}$ 中，平面区域图像面积占场景图像面积比大于 10% 的区域组成有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^P\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^P\}_{m=1}^M$ 。

第 3 步：若集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^P\}$ 及 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^P\}$ 中所有的面积占比均小于 10%，则分别选取各自集合中平面区域面积占比前 5 的图像区域组成有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^P\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^P\}_{m=1}^M$ （不足 5 个以实际数目为准）。

(3) 对 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中所有平面区域图像进行图像形态学腐蚀，获得所有有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^P\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^P\}_{m=1}^M$ 。

(二) 平面匹配关系的建立

在有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中建立匹配关系的具体方法为：

(1) 对于有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ ，计算其中每一个平面区域图像 $\mathbf{T}_i^p$ 的 SIFT 特征点的个数；计算其中每两个平面区域图像之间的最小欧氏距离。对有效平面区域图像集合 $\mathcal{R}$ 做同样操作。

(2) 对于有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ ，以其中每一个平面区域图像 $\mathbf{T}_i^p$ 作节点建立无向全连通图 $\mathcal{G}_1$ 。对有效平面区域图像集合 $\mathcal{R}$ 做同样操作得到无向全连通图 $\mathcal{G}_2$ 。

(3) 以平面图像的 SIFT 特征点个数作为图的节点权重，以平面图像间的欧式距离作为图的边权重，求解 $\mathcal{G}_1$ 和 $\mathcal{G}_2$ 间的图匹配问题，建立有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中匹配关系 $\mathcal{S} = \left\{ \left(\mathbf{R}_i^p, \mathbf{T}_i^p \right) \right\}_{i=1}^L$ 。

说明 3：图匹配问题的建立与求解

第 1 步：建立图的节点相似性度量和图的边相似性度量标准。以节点权值矩阵来度量两个建立的图之间的节点相似性，度量依据来源于不同图之间两个节点所表示的平面图像上建立起匹配关系的 SIFT 特征点个数；以边权值矩阵来度量两个建立的图之间的边相似性，具体地，同一个图中的边代表它所连接的两个节点所表示的平面图像间的最小欧式距离，以分别来自两个建立的图之间的边所代表的最小欧氏距离之差的绝对值度量边相似性。

第 2 步：建立问题目标函数。用矩阵 $\mathbf{W}$ 整合第 1 步中的图的节点相似性权值矩阵和图的边相似性权值矩阵，其中 $\mathbf{W}$ 的对角元素两个图之间的节点相似性， $\mathbf{W}$ 的所有非对角元素表示元素两个图之间的边相似性。建立目标函数，求解最优分配矩阵 $\mathbf{X}^*$ ：

$$\mathbf{X}^* = \max(\mathbf{X}_c^T \mathbf{W} \mathbf{X}_c),$$

求得的最优分配矩阵即包含 $\mathcal{G}_1$ 和 $\mathcal{G}_2$ 中节点的匹配情况，进而获得图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中匹配关系

$$\mathcal{S} = \left\{ \left(\mathbf{R}_i^p, \mathbf{T}_i^p \right) \right\}_{i=1}^L$$

注： $\mathbf{X} \in \{1, 0\}^{m \times n}$ 用来表示 $\mathcal{G}_1$ 和 $\mathcal{G}_2$ 间的节点匹配情况， $X_{ij} = 1$ 表示 $\mathcal{G}_1$ 中 V_i 节点和 $\mathcal{G}_2$ 中 V_j 节点匹配， $X_{ij} = 0$ 则表示不匹配。 $\mathbf{X}_c$ 是 $\mathbf{X}$ 的列展开形式。

(三) 匹配平面组指导的相机相对位姿的估计

获得每组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 的具体方法为：

(1) 对于每一对匹配平面 $(\mathbf{R}_i^p, \mathbf{T}_i^p)$ ，计算 $\mathbf{T}_i^p, \mathbf{R}_i^p$ 间的单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$ 。

说明 4：匹配平面对间单应性矩阵的计算

第 1 步：特征匹配。使用确立匹配平面部分提取的 SIFT 特征点，对于 $\mathbf{T}_i^p$ 中的所有特征点，在 $\mathbf{R}_i^p$ 中寻找与其描述子最相近的特征点作为匹配特征点。获得的最终匹配点集为： $\mathbf{T}_i^p$ 中的特征点集合

$X = [x_1, x_2, \dots, x_N]_{3 \times N}$ 依次对应 $\mathbf{R}_i^p$ 中的特征点集合 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]_{3 \times N}$ ，其中 x_i, y_i 均为齐次坐标。

第 2 步：计算单应性矩阵。在 X, Y 中随机选出四对匹配点，对数据进行归一化，求解变换矩阵 $\mathbf{H}$ ，记为模型 $\mathbf{M}$ ；计算数据集中所有数据与模型 $\mathbf{M}$ 的投影误差，并记录内点个数。迭代完成后选取最优模型对应的变换矩阵为 $\mathbf{D}_i^p, \mathbf{C}_i^p$ 间的单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$ 。

(2) 对于每一个单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$ ，分别对其进行奇异值分解，求取所对应的旋转矩阵和平移向量，即为该组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 。

说明 5：匹配平面对所指导的相机相对位姿的估计

第 1 步：计算候选相机相对位姿。对于每一个单应性矩阵 $\mathbf{H}$ 与相机内参矩阵 $\mathbf{K}$ ，可以获得 $\mathbf{A} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{K}$ 。对 $\mathbf{A}$ 进行矩阵的奇异值分解 $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T$ ， $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$)。根据单应性矩阵的物理含义，可以得到旋转矩阵 $\mathbf{r}$ ，平移向量 $\mathbf{t}$ ，平面法向量 $\mathbf{n}$ ，平面距相机的距离 d 有如下关系：

$$\begin{cases} \mathbf{r}' = s\mathbf{U}^T\mathbf{r}\mathbf{V} \\ \mathbf{t}' = \mathbf{U}^T\mathbf{t} \\ \mathbf{n}' = \mathbf{V}^T\mathbf{n} \\ d' = sd \\ s = \det\mathbf{U}\det\mathbf{V} \end{cases}$$

进而有 $\mathbf{\Lambda} = d'\mathbf{r}' + \mathbf{t}'\mathbf{n}'^T$ ，求解该等式可获得 8 组算数解 $\{(\mathbf{r}_i, \mathbf{t}_i)\}_{i=1}^8$ ，即为被分解的单应性矩阵 $\mathbf{H}$ 所对应的匹配平面对所指导的相机相对位姿的候选序列。

第 2 步：选取相机相对位姿。使用相机相对位姿的候选序列中的每一组算数解 $(\mathbf{r}_i, \mathbf{t}_i)$ 对参与计算的匹配特征点三角化恢复图像上特征点对应的三维空间点坐标。统计由每组算数解恢复的三维空间点满足空间点位于相机模型前方的个数，同时统计重投影误差。最终位于相机模型前方的空间点个数最多且重投影误差小的一组算数解即为一组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 。

(四) 获得指导相机运动的信息

通过融合所有的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 获得指导相机运动信息的具体方法为：

(1) 确定参与每个 $\mathbf{P}_i$ 计算的 SIFT 特征点个数及特征点在平面上的分布。

(2) 以每个 $\mathbf{P}_i$ 所对应的 SIFT 特征点个数和分布情况作为权重，对所有的 $\mathbf{P}_i$ 做加权融合，获得最终用

来指导相机运动的 $\bar{\mathbf{P}}$ 。

说明 6: 融合权重确立

第 1 步: 数值权 φ_i 。用参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的特征匹配点对的个数与参与 $\mathcal{S}$ 中所有 L 个相机相对位姿计算的特征匹配点对的个数的比值来确定。

第 2 步: 分布权 η_i : 将参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的有效平面区域图像 $\mathbf{T}_i^{\mathbf{P}}$ 按照平面区域形状的外接矩形裁剪生成 $\bar{\mathbf{T}}_i^{\mathbf{P}}$, 将 $\bar{\mathbf{T}}_i^{\mathbf{P}}$ 均匀分割成 10×10 大小的网格区域, 统计每一个网格中参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的特征匹配点个数, 计算这些分布在每一个网格中的相关特征匹配点个数的方差, 进而计算分布权, 方差越小, 权值越高。

说明 7: 指导相机运动信息的确定

第 1 步: 将 $\mathbf{P}_i$ 中的旋转矩阵转换为欧拉角表示形式, 即 $\mathbf{r} \triangleq \langle r^X, r^Y, r^Z \rangle$, 其中 r^X, r^Y, r^Z 分别表示三维空间三个坐标方向的欧拉旋转角。

第 2 步: 用计算的数值权 φ_i 和分布权 η_i 融合所有的 $\mathbf{P}_i$:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{r}}^* = \sum_{i=1}^K (\sigma_1 \varphi_i \mathbf{r}_i^* + \sigma_2 \eta_i \mathbf{r}_i^*) \\ \tilde{\mathbf{t}} = \sum_{i=1}^K (\sigma_1 \varphi_i \mathbf{t}_i + \sigma_2 \eta_i \mathbf{t}_i) \\ * \in \{X, Y, Z\} \end{cases},$$

其中 $\sigma_1, \sigma_2 (\sigma_1 + \sigma_2 = 1)$ 表示数值权和分布权对融合的影响比重, 获得最终指导相机运动的信息 $\bar{\mathbf{P}}$ 。依据经验, 数值权和分布权对相机相对位姿的影响比重是数值权占比 0.8, 分布权占比 0.2。

(五) 判断重定位是否完成

判断重定位过程是否完成的具体方法为:

由于计算的平移向量不可避免地缺失物理真实尺度, 采用已有的重定位方法使用的“二分折半”策略来根据所得的平移向量提供的平移方向信息指导相机运动。当运动步长小于阈值 ξ 时, 则判定重定位过程完成, 终止重定位, 否则重复步骤(一)至步骤(五), 且非首次迭代时, 在步骤一中无需重复提取参考图像中场景的平面区域, 利用首次信息。

实施例 2

此次专利申请的实施例 2, 是实施例 1 的进一步细化, 对于实施例 1 中相同的参数未定义清楚的地方, 在实施例 2 中得到补充定义。此外, 实施例 2 的装置部件有一定的改进, 并对装置部件展开描述。

(一) 有效平面的确定

重定位过程开始前, 提取当前观测图像 $\mathbf{T}$ 及参考观测图像 $\mathbf{R}$ 中场景的所有有效平面区域图像集合

$\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}_{n=1}^N$ (N 表示平面总数, n 为平面索引, p 为表示平面的标识) 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}_{m=1}^M$ (M 表示平面总数, m 为平面索引, p 为表示平面的标识)。具体步骤如下:

(1) 分别检测当前观测图像 $\mathbf{T}$ 及参考观测图像 $\mathbf{R}$ 中场景的平面区域, 得到平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}$ 。

说明 1: 检测图像中的平面区域

使用传统的基于单应矩阵的平面检测方法或基于深度网络模型的机器学习的方法分别检测 $\mathbf{T}$ 及 $\mathbf{R}$ 中的平面区域, 得到集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}$ 及 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}$ 。

(2) 在 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中分别选取有效平面区域得到图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}_{m=1}^M$ 。

说明 2: 选取有效平面区域

第 1 步: 确定面积比。分别计算所有检测到的平面区域的图像面积与原场景图像面积的比例。

第 2 步: 分别选取集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}$ 及 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}$ 中, 平面区域图像面积占场景图像面积比大于 10% 的区域组成有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}_{m=1}^M$ 。

第 3 步: 若集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}$ 及 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}$ 中所有的面积占比均小于 10%, 则分别选取各自集合中平面区域面积占比前 5 的图像区域组成有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}_{m=1}^M$ (不足 5 个以实际数目为准)。

(3) 对 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中所有平面区域图像进行图像形态学腐蚀, 获得所有有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}_{m=1}^M$ 。

(二) 平面匹配关系的建立

在有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中建立匹配关系的具体方法为:

(1) 对于有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$, 计算其中每一个平面区域图像 $\mathbf{T}_i^p$ 的 SIFT 特征点的个数; 计算其中每两个平面区域图像之间的最小欧氏距离。对有效平面区域图像集合 $\mathcal{R}$ 做同样操作。

(2) 对于有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$, 以其中每一个平面区域图像 $\mathbf{T}_i^p$ 作节点建立无向全连通图 $\mathcal{G}_1$ 。对有效平面区域图像集合 $\mathcal{R}$ 做同样操作得到无向全连通图 $\mathcal{G}_2$ 。

(3) 以平面图像的 SIFT 特征点个数作为图的节点权重, 以平面图像间的欧式距离作为图的边权重,

求解 $\mathcal{G}_1$ 和 $\mathcal{G}_2$ 间的图匹配问题，建立有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中匹配关系 $\mathcal{S} = \left\{ \left(\mathbf{R}_i^p, \mathbf{T}_i^p \right) \right\}_{i=1}^L$ 。

说明 3: 图匹配问题的建立与求解

第 1 步：建立图的节点相似性度量和图的边相似性度量标准。以节点权值矩阵来度量两个建立的图之间的节点相似性，度量依据来源于不同图之间两个节点所表示的平面图像上建立起匹配关系的 SIFT 特征点个数；以边权值矩阵来度量两个建立的图之间的边相似性，具体地，同一个图中的边代表它所连接的两个节点所表示的平面图像间的最小欧式距离，以分别来自两个建立的图之间的边所代表的最小欧氏距离之差的绝对值度量边相似性。

第 2 步：建立问题目标函数。用矩阵 $\mathbf{W}$ 整合第 1 步中的图的节点相似性权值矩阵和图的边相似性权值矩阵，其中 $\mathbf{W}$ 的对角元素两个图之间的节点相似性， $\mathbf{W}$ 的所有非对角元素表示元素两个图之间的边相似性。建立目标函数，求解最优分配矩阵 $\mathbf{X}^*$ ：

$$\mathbf{X}^* = \max(\mathbf{X}_c^T \mathbf{W} \mathbf{X}_c),$$

求得的最优分配矩阵即包含 $\mathcal{G}_1$ 和 $\mathcal{G}_2$ 中节点的匹配情况，进而获得图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中匹配关系

$$\mathcal{S} = \left\{ \left(\mathbf{R}_i^p, \mathbf{T}_i^p \right) \right\}_{i=1}^L$$

注： $\mathbf{X} \in \{1, 0\}^{m \times n}$ 用来表示 $\mathcal{G}_1$ 和 $\mathcal{G}_2$ 间的节点匹配情况， $X_{ij} = 1$ 表示 $\mathcal{G}_1$ 中 V_i 节点和 $\mathcal{G}_2$ 中 V_j 节点匹配， $X_{ij} = 0$ 则表示不匹配。 $\mathbf{X}_c$ 是 $\mathbf{X}$ 的列展开形式。

(三) 匹配平面组指导的相机相对位姿的估计

获得每组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 的具体方法为：

(1) 对于每一对匹配平面 $(\mathbf{R}_i^p, \mathbf{T}_i^p)$ ，计算 $\mathbf{T}_i^p, \mathbf{R}_i^p$ 间的单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$ 。

说明 4: 匹配平面对间单应性矩阵的计算

第 1 步：特征匹配。使用确立匹配平面部分提取的 SIFT 特征点，对于 $\mathbf{T}_i^p$ 中的所有特征点，在 $\mathbf{R}_i^p$ 中寻找与其描述子最相近的特征点作为匹配特征点。获得的最终匹配点集为： $\mathbf{T}_i^p$ 中的特征点集合 $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]_{3 \times N}$ 依次对应 $\mathbf{R}_i^p$ 中的特征点集合 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]_{3 \times N}$ ，其中 x_i, y_i 均为齐次坐标。

第 2 步：计算单应性矩阵。在 X, Y 中随机选出四对匹配点，对数据进行归一化，求解变换矩阵 $\mathbf{H}$ ，记为模型 $\mathbf{M}$ ；计算数据集中所有数据与模型 $\mathbf{M}$ 的投影误差，并记录内点个数。迭代完成后选取最优模型对应的变换矩阵为 $\mathbf{D}_i^p, \mathbf{C}_i^p$ 间的单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$ 。

(2) 对于每一个单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$ ，分别对其进行奇异值分解，求取所对应的旋转矩阵和平移向量，即为该组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 。

说明 5：匹配平面对所指导的相机相对位姿的估计

第 1 步：计算候选相机相对位姿。对于每一个单应性矩阵 $\mathbf{H}$ 与相机内参矩阵 $\mathbf{K}$ ，可以获得 $\mathbf{A} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{K}$ 。对 $\mathbf{A}$ 进行矩阵的奇异值分解 $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T$ ， $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$)。根据单应性矩阵的物理含义，可以得到旋转矩阵 $\mathbf{r}$ ，平移向量 $\mathbf{t}$ ，平面法向量 $\mathbf{n}$ ，平面距相机的距离 d 有如下关系：

$$\begin{cases} \mathbf{r}' = \mathbf{s}\mathbf{U}^T\mathbf{r}\mathbf{V} \\ \mathbf{t}' = \mathbf{U}^T\mathbf{t} \\ \mathbf{n}' = \mathbf{V}^T\mathbf{n} \\ d' = sd \\ s = \det\mathbf{U}\det\mathbf{V} \end{cases}$$

进而有 $\mathbf{\Lambda} = d'\mathbf{r}' + \mathbf{t}'\mathbf{n}'^T$ ，求解该等式可获得 8 组算数解 $\{(\mathbf{r}_i, \mathbf{t}_i)\}_{i=1}^8$ ，即为被分解的单应性矩阵 $\mathbf{H}$ 所对应的匹配平面对所指导的相机相对位姿的候选序列。

第 2 步：选取相机相对位姿。使用相机相对位姿的候选序列中的每一组算数解 $(\mathbf{r}_i, \mathbf{t}_i)$ 对参与计算的匹配特征点三角化恢复图像上特征点所对应的三维空间点坐标。统计由每组算数解恢复的三维空间点满足空间点位于相机模型前方的个数，同时统计重投影误差。最终位于相机模型前方的空间点个数最多且重投影误差小的一组算数解即为一组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 。

(四) 获得指导相机运动的信息

通过融合所有的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 获得指导相机运动信息的具体方法为：

(1) 确定参与每个 $\mathbf{P}_i$ 计算的 SIFT 特征点个数及特征点在平面上的分布。

(2) 以每个 $\mathbf{P}_i$ 所对应的 SIFT 特征点个数和分布情况作为权重，对所有的 $\mathbf{P}_i$ 做加权融合，获得最终用来指导相机运动的 $\bar{\mathbf{P}}$ 。

说明 6：融合权重确立

第 1 步：数值权 φ_i 。用参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的特征匹配点对的个数与参与 $\mathcal{S}$ 中所有 L 个相机相对位姿计算的特征匹配点对的个数的比值来确定。

第 2 步：分布权 η_i ：将参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的有效平面区域图像 $\mathbf{T}_i^P$ 按照平面区域形状的外接矩形裁剪生成 $\bar{\mathbf{T}}_i^P$ ，

将 $\bar{\mathbf{T}}_i^P$ 均匀分割成 10×10 大小的网格区域, 统计每一个网格中参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的特征匹配点个数, 计算这些分布在每一个网格中的相关特征匹配点个数的方差, 进而计算分布权, 方差越小, 权值越高。

说明 7: 指导相机运动信息的确定

第 1 步: 将 $\mathbf{P}_i$ 中的旋转矩阵转换为欧拉角表示形式, 即 $\mathbf{r} \equiv \langle r^X, r^Y, r^Z \rangle$, 其中 r^X, r^Y, r^Z 分别表示三维空间三个坐标方向的欧拉旋转角。

第 2 步: 用计算的数值权 φ_i 和分布权 η_i 融合所有的 $\mathbf{P}_i$:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{r}}^* = \sum_{i=1}^K (\sigma_1 \varphi_i \mathbf{r}_i^* + \sigma_2 \eta_i \mathbf{r}_i^*) \\ \tilde{\mathbf{t}} = \sum_{i=1}^K (\sigma_1 \varphi_i \mathbf{t}_i + \sigma_2 \eta_i \mathbf{t}_i) \\ * \in \{X, Y, Z\} \end{cases},$$

其中 $\sigma_1, \sigma_2 (\sigma_1 + \sigma_2 = 1)$ 表示数值权和分布权对融合的影响比重, 获得最终指导相机运动的信息 $\bar{\mathbf{P}}$ 。

依据经验, 数值权和分布权对相机相对位姿的影响比重是数值权占比 0.8, 分布权占比 0.2。

(五) 判断重定位是否完成

判断重定位过程是否完成的具体方法为:

由于计算的平移向量不可避免地缺失物理真实尺度, 采用已有的重定位方法使用的“二分折半”策略来根据所得的平移向量提供的平移方向信息指导相机运动。当运动步长小于阈值 ξ 时, 则判定重定位过程完成, 终止重定位, 否则重复步骤 (一) 至步骤 (五), 且非首次迭代时, 在步骤一中无需重复提取参考图像中场景的平面区域, 利用首次信息。

(六) 利用重定位软硬件系统实现相机精确重定位

通过如图 3 所示的重定位软硬件系统实现相机的精确重定位。重定位软硬件系统由六自由度微动云台、云台智能控制系统、重定位软件系统及对光照鲁棒的主动相机重定位方法四个模块组成。重定位软件系统中集成了上述方法过程。实际工作中, 工作人员根据软件系统 UI 提示选择历史观测图像, 然后系统自动执行上述方法, 即步骤 (一) 至步骤 (五)。在步骤 (四) 中, 方法获得最终指导相机运动的信息 $\bar{\mathbf{P}}$, 软件系统发送运动指令给云台智能控制系统, 云台智能控制系统进而驱动六自由度微动云台执行运动 $\bar{\mathbf{P}}$ 。执行后, 云台智能控制系统返回运动完成指令给重定位软件系统, 并进行下一次方法迭代。当满足步骤 (五) 判断条件后, 系统拍摄当前图像, 相机重定位完成。

下面结合具体实例对本发明方法进行可行性验证:

实验使用搭载佳能 5D Mark III 相机的机械监测平台进行重定位实验, 对于同一监测目标, 设备分别使

用本发明方法和现有最先进的重定位方法进行重定位作业。实验在室内和室外的三类监测场景进行，分为普通场景（无明显光照和场景结构变化）、光照变化场景（室外在不同天气和不同时刻进行重定位作业，室内在一组可控方向和强度的 LED 光下进行重定位作业）、结构变化场景（室外在不同季节有大量植物的场景下进行重定位作业，室内在可移动物体场景下进行重定位作业）。

结果分析选取重定位过程花费的时间和重定位后拍摄图像与参考图像之间的特征点平均距离（AFD）作为评估重定位方法的指标。其中 AFD 是指两幅图像所有匹配的特征点之间的欧式距离的平均值，这可以直观地评价重定位的精度。

根据图 2 所展示的本方法和已有最优的重定位方法[3]在不同场景下重定位作业的结果表明：对于无明显光照和场景结构变化的普通检测场景，两种重定位方法的重定位精度无显著优劣差异，但本方法的时间性能更加好；对于有光照强度和光照方向变化的场景，本方法除了在时间性能上有良好的优越性外，在重定位精度方面也有显著地优越性，尤其对于室外场景，在已有最优的重定位方法重定位作业失败时，相同情况下，本方法的重定位结果仍然支持相关需求；对于有明显场景结构变化的场景，本方法在时间性能和重定位精度方面均体现了显著的优越性。因此，可以表明发明方法的可行性和优越性。

权利要求

1.一种对光照鲁棒的主动相机重定位方法，包括下列步骤：

步骤一：提取当前观测图像 $\mathbf{T}$ 及参考观测图像 $\mathbf{R}$ 中场景的有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}_{n=1}^N$

和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}_{m=1}^M$ ；

步骤二：在有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中建立匹配关系，方法为：

(1) 对于有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ ，计算其中每一个平面区域图像 $\mathbf{T}_i^{\mathbf{P}}$ 的 SIFT 特征点的个数；

计算其中每两个平面区域图像之间的最小欧氏距离；对有效平面区域图像集合 $\mathcal{R}$ 做同样操作；

(2) 对于有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ ，以其中每一个平面区域图像 $\mathbf{T}_i^{\mathbf{P}}$ 作节点建立无向全连通图

$\mathcal{G}_1 = \{V^{(1)}, E^{(1)}\}$ ；对有效平面区域图像集合 $\mathcal{R}$ 做同样操作得到无向全连通图 $\mathcal{G}_2 = \{V^{(2)}, E^{(2)}\}$ ；

(3) 以平面图像的 SIFT 特征点个数作为图的节点权重，以平面图像间的欧式距离作为图的边权重，求解 $\mathcal{G}_1$ 和 $\mathcal{G}_2$ 间的图匹配问题，建立有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中匹配关系

$\mathcal{S} = \{(\mathbf{R}_i^{\mathbf{P}}, \mathbf{T}_i^{\mathbf{P}})\}_{i=1}^L$ 。

步骤三：获得每组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ ；

步骤四：通过融合所有的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 获得指导相机运动信息。

2. 根据权利要求 1 所述的主动相机重定位方法，其特征在于，步骤一具体包括：

(1) 针对观测对象，选取原场景图像，分别检测当前观测图像 $\mathbf{T}$ 及参考观测图像 $\mathbf{R}$ 中场景的平面区域，得到平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}$ ；

(2) 在平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}$ 中分别选取有效平面区域得到图像集合

$\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}_{m=1}^M$ ，方法如下：

第 1 步：确定面积比：分别计算所检测到的平面区域的图像面积与原场景图像面积的比例；

第 2 步：设定阈值，分别选取集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}$ 中，平面区域图像面积占场景图像

面积比大于阈值的区域组成有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}_{m=1}^M$ ；

第 3 步：若集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^{\mathbf{P}}\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^{\mathbf{P}}\}$ 中所有的平面区域图像面积占比均小于阈值，则根据

各自集合中各自集合中平面区域面积占比较大的图像区域确定有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \left\{ \mathbf{T}_n^p \right\}_{n=1}^N$

和 $\mathcal{R} = \left\{ \mathbf{R}_m^p \right\}_{m=1}^M$;

(3) 对有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \left\{ \mathbf{T}_n^p \right\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \left\{ \mathbf{R}_m^p \right\}_{m=1}^M$ 中所有平面区域图像进行图像形态

学腐蚀, 获得所有有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \left\{ \mathbf{T}_n^p \right\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \left\{ \mathbf{R}_m^p \right\}_{m=1}^M$ 。

3. 根据权利要求 2 所述的主动相机重定位方法, 其特征在于, 第 2 步所设定的阈值为 10%。

4. 根据权利要求 1 所述的主动相机重定位方法, 其特征在于, 步骤三具体为:

第 1 步: 对于每一对匹配平面 $(\mathbf{R}_i^p, \mathbf{T}_i^p)$, 计算 $\mathbf{T}_i^p, \mathbf{R}_i^p$ 间的单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$;

第 2 步: 对于每一个单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$, 分别对其进行奇异值分解, 求取所对应的旋转矩阵和平移向量, 即为该组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 。

5. 根据权利要求 1 所述的主动相机重定位方法, 其特征在于, 步骤四具体为:

(1) 确定参与每个 $\mathbf{P}_i$ 计算的 SIFT 特征点个数及特征点在平面上的分布;

(2) 根据每个 $\mathbf{P}_i$ 所对应的 SIFT 特征点个数即数值权和 SIFT 特征点分布情况即分布权进行权重融合, 按照各自对相机相对位姿的影响比重对所有的 $\mathbf{P}_i$ 做加权融合, 获得最终用来指导相机运动的信息, 两个权重的确立方法如下:

第 1 步: 数值权 φ_i : 用参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的特征匹配点对的个数与参与匹配关系 $\mathcal{S}$ 中所有 L 个相机相对位姿计算的特征匹配点对的个数的比值来确定;

第 2 步: 分布权 η_i : 将参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的有效平面区域图像 $\mathbf{T}_i^p$ 按照平面区域形状的外接矩形裁剪生成 $\bar{\mathbf{T}}_i^p$, 将 $\bar{\mathbf{T}}_i^p$ 均匀分割成网格区域, 统计每一个网格中参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的特征匹配点个数, 计算这些分布在每一个网格中的相关特征匹配点个数的方差, 进而计算分布权, 方差越小, 权值越高。

6. 根据权利要求 5 所述的主动相机重定位方法, 其特征在于, 数值权占比 0.8, 分布权占比 0.2。

7. 一种对光照鲁棒的主动相机重定位方法, 包括下列步骤:

步骤一: 提取当前观测图像 $\mathbf{T}$ 及参考观测图像 $\mathbf{R}$ 中场景的有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \left\{ \mathbf{T}_n^p \right\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \left\{ \mathbf{R}_m^p \right\}_{m=1}^M$, N 表示平面总数, n 为平面索引, p 为表示平面的标识, M 表示平面总数, m

为平面索引， p 为表示平面的标识；

步骤二：在有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中建立匹配关系，方法为：

(1) 对于有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ ，计算其中每一个平面区域图像 $\mathbf{T}_n^p$ 的 SIFT 特征点的个数；
计算其中每两个平面区域图像之间的最小欧氏距离；对有效平面区域图像集合 $\mathcal{R}$ 做同样操作；

(2) 对于有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ ，以其中每一个平面区域图像 $\mathbf{T}_n^p$ 作节点建立无向全连通图 $\mathcal{G}_1 = \{V^{(1)}, E^{(1)}\}$ ， V 表示节点集合，每个节点对应一个平面； E 为边集合，每个边表示边上两个节点代表的平面间的欧氏距离；对有效平面区域图像集合 $\mathcal{R}$ 做同样操作得到无向全连通图 $\mathcal{G}_2 = \{V^{(2)}, E^{(2)}\}$ ；

(3) 以平面图像的 SIFT 特征点个数作为图的节点权重，以平面图像间的欧式距离作为图的边权重，求解 $\mathcal{G}_1$ 和 $\mathcal{G}_2$ 间的图匹配问题，建立有效平面区域图像集合 $\mathcal{T}$ 和 $\mathcal{R}$ 中匹配关系

$$\mathcal{S} = \left\{ (\mathbf{R}_i^p, \mathbf{T}_i^p) \right\}_{i=1}^L, \quad L \text{ 表示当前观测及参考观测图像中具有匹配关系的图像个数, } i \text{ 为索引。}$$

步骤三：获得每组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ ；

步骤四：通过融合所有的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 获得指导相机运动信息；

步骤五：判断重定位过程是否完成，若重定位完成则终止；若未完成则重复迭代步骤一至步骤五。

8. 根据权利要求 7 所述的主动相机重定位方法，其特征在于，步骤一具体包括：

(1) 针对观测对象，选取原场景图像，分别检测当前观测图像 $\mathbf{T}$ 及参考观测图像 $\mathbf{R}$ 中场景的平面区域，得到平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}$ ；

(2) 在平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}$ 中分别选取有效平面区域得到图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}_{m=1}^M$ ，方法如下：

第 1 步：确定面积比：分别计算所检测到的平面区域的图像面积与原场景图像面积的比例；

第 2 步：设定阈值，分别选取集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}$ 中，平面区域图像面积占场景图像

面积比大于阈值的区域组成有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}_{m=1}^M$ ；

第 3 步：若集合 $\mathcal{T} = \{\mathbf{T}_n^p\}$ 和 $\mathcal{R} = \{\mathbf{R}_m^p\}$ 中所有的平面区域图像面积占比均小于阈值，则根据

各自集合中平面区域面积占比较大的图像区域确定有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \left\{ \mathbf{T}_n^{\mathbf{P}} \right\}_{n=1}^N$ 和

$$\mathcal{R} = \left\{ \mathbf{R}_m^{\mathbf{P}} \right\}_{m=1}^M;$$

(3) 对有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \left\{ \mathbf{T}_n^{\mathbf{P}} \right\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \left\{ \mathbf{R}_m^{\mathbf{P}} \right\}_{m=1}^M$ 中所有平面区域图像进行图像形

态学腐蚀, 获得所有有效平面区域图像集合 $\mathcal{T} = \left\{ \mathbf{T}_n^{\mathbf{P}} \right\}_{n=1}^N$ 和 $\mathcal{R} = \left\{ \mathbf{R}_m^{\mathbf{P}} \right\}_{m=1}^M$ 。

9. 根据权利要求 8 所述的主动相机重定位方法, 其特征在于, 第 2 步所设定的阈值为 10%。

10. 根据权利要求 7 所述的主动相机重定位方法, 其特征在于, 步骤三具体为:

第 1 步: 对于每一对匹配平面 $(\mathbf{R}_i^{\mathbf{P}}, \mathbf{T}_i^{\mathbf{P}})$, 计算 $\mathbf{T}_i^{\mathbf{P}}, \mathbf{R}_i^{\mathbf{P}}$ 间的单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$;

第 2 步: 对于每一个单应性矩阵 $\mathbf{H}_i$, 分别对其进行奇异值分解, 求取所对应的旋转矩阵和平移向量, 即为该组匹配平面所指导的相机相对位姿 $\mathbf{P}_i$ 。

11. 根据权利要求 7 所述的主动相机重定位方法, 其特征在于, 步骤四具体为:

(1) 确定参与每个 $\mathbf{P}_i$ 计算的 SIFT 特征点个数及特征点在平面上的分布;

(2) 根据每个 $\mathbf{P}_i$ 所对应的 SIFT 特征点个数即数值权和 SIFT 特征点分布情况即分布权进行权重融合, 按照各自对相机相对位姿的影响比重对所有的 $\mathbf{P}_i$ 做加权融合, 获得最终用来指导相机运动的信息, 两个权重的确立方法如下:

第 1 步: 数值权 φ_i : 用参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的特征匹配点对的个数与参与匹配关系 $\mathcal{S}$ 中所有 L 个相机相对位姿计算的特征匹配点对的个数的比值来确定;

第 2 步: 分布权 η_i : 将参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的有效平面区域图像 $\mathbf{T}_i^{\mathbf{P}}$ 按照平面区域形状的外接矩形裁剪生成 $\overline{\mathbf{T}}_i^{\mathbf{P}}$, 将 $\overline{\mathbf{T}}_i^{\mathbf{P}}$ 均匀分割成网格区域, 统计每一个网格中参与 $\mathbf{P}_i$ 计算的特征匹配点个数, 计算这些分布在每一个网格中的相关特征匹配点个数的方差, 进而计算分布权, 方差越小, 权值越高。

12. 根据权利要求 7 所述的主动相机重定位方法, 其特征在于, 步骤五具体为: 根据相机运动信息中平移维度的尺度大小判断重定位是否终止, 当运动步长小于预设的步长阈值 ξ 时, 则判定重定位过程完成, 终止重定位, 否则重复步骤一至步骤五。

13. 根据权利要求 7 所述的主动相机重定位方法, 其特征在于, 数值权占比 0.8, 分布权占比 0.2。

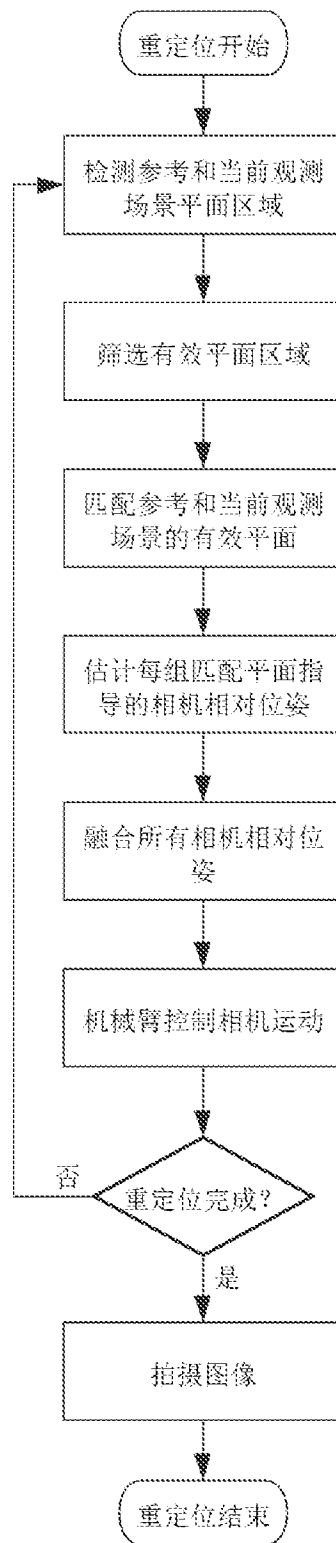


图 1

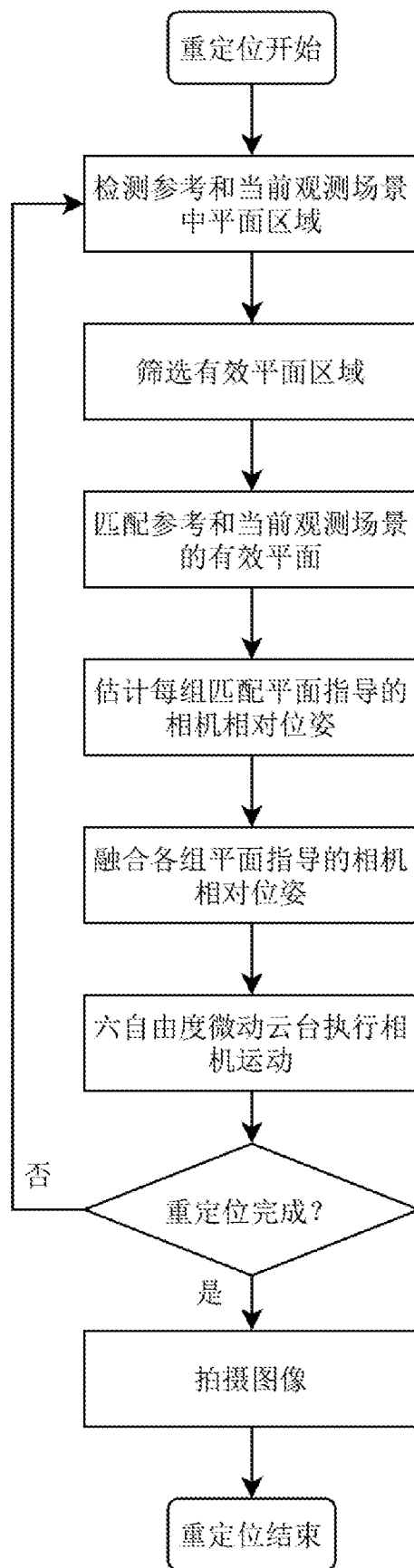


图 2

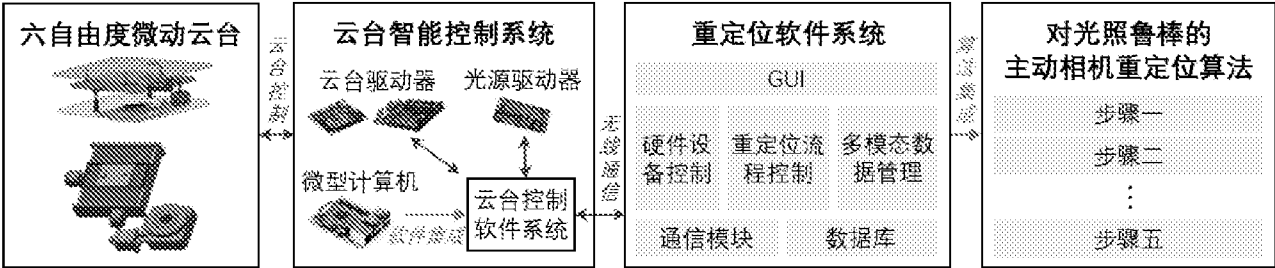


图 3

场景	评价指标	本发明重定位方法	已有最优重定位方法
普通场景1	重定位时间 (秒)	201.7	267.1
	重定位精度 (AFD值)	1.077	1.082
普通场景2	重定位时间 (秒)	193.5	235.2
	重定位精度 (AFD值)	0.633	0.626
光照变化场景1	重定位时间 (秒)	196.8	246.0
	重定位精度 (AFD值)	2.078	重定位失败
光照变化场景2	重定位时间 (秒)	188.7	231.7
	重定位精度 (AFD值)	1.416	28.77
结构变化场景1	重定位时间 (秒)	191.7	241.4
	重定位精度 (AFD值)	7.015	41.53
结构变化场景2	重定位时间 (秒)	200.9	244.3
	重定位精度 (AFD值)	3.859	27.13

图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/111064

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06T 7/73(2017.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06T

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, WPI, CNPAT, CNKI, IEEE, GOOGLE: 主动相机, 重定位, 平面区域, 图像集合, 匹配, 节点, 权重, 位姿, active camera, reposition, plane area, image set, match, node, weight, pose

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 112070831 A (TIANJIN UNIVERSITY) 11 December 2020 (2020-12-11) description paragraphs 0041-0091	1-13
A	CN 106595601 A (TIANJIN UNIVERSITY) 26 April 2017 (2017-04-26) claim 1, description paragraphs 0042-0053	1-13
A	CN 108648240 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 12 October 2018 (2018-10-12) entire document	1-13
A	CN 111402331 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 10 July 2020 (2020-07-10) entire document	1-13
A	US 2014369557 A1 (QUALCOMM INC.) 18 December 2014 (2014-12-18) entire document	1-13



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

12 October 2021

Date of mailing of the international search report

26 October 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/111064

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	112070831	A	11 December 2020	None			
CN	106595601	A	26 April 2017	None			
CN	108648240	A	12 October 2018	None			
CN	111402331	A	10 July 2020	None			
US	2014369557	A1	18 December 2014	WO	2014200625	A1	18 December 2014

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/111064

A. 主题的分类

G06T 7/73 (2017.01) i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06T

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

EPDOC, WPI, CNPAT, CNKI, IEEE, GOOGLE: 主动相机, 重定位, 平面区域, 图像集合, 匹配, 节点, 权重, 位姿, active camera, reposition, plane area, image set, match, node, weight, pose

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 112070831 A (天津大学) 2020年 12月 11日 (2020 - 12 - 11) 说明书第0041-0091段	1-13
A	CN 106595601 A (天津大学) 2017年 4月 26日 (2017 - 04 - 26) 权利要求1、说明书第0042-0053段	1-13
A	CN 108648240 A (东南大学) 2018年 10月 12日 (2018 - 10 - 12) 全文	1-13
A	CN 111402331 A (华南理工大学) 2020年 7月 10日 (2020 - 07 - 10) 全文	1-13
A	US 2014369557 A1 (QUALCOMM INCORPORATED) 2014年 12月 18日 (2014 - 12 - 18) 全文	1-13

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2021年 10月 12日

国际检索报告邮寄日期

2021年 10月 26日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

吴卿

电话号码 86-(10)-53961436

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/111064

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	112070831	A	2020年 12月 11日	无			
CN	106595601	A	2017年 4月 26日	无			
CN	108648240	A	2018年 10月 12日	无			
CN	111402331	A	2020年 7月 10日	无			
US	2014369557	A1	2014年 12月 18日	W0	2014200625	A1	2014年 12月 18日