



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114067070 B

(45) 授权公告日 2024. 09. 06

(21) 申请号 202111389612.0

G06T 5/70 (2024.01)

(22) 申请日 2021.11.22

G06T 3/08 (2024.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114067070 A

(56) 对比文件

CN 105723631 A, 2016.06.29

CN 111780769 A, 2020.10.16

(43) 申请公布日 2022.02.18

审查员 肖丽金

(73) 专利权人 华南理工大学

地址 510641 广东省广州市天河区五山路

专利权人 广东光寻技术有限公司

(72) 发明人 文尚胜 杨跃腾 关伟鹏

(74) 专利代理机构 北京东方盛凡知识产权代理有限公司 11562

专利代理师 李娜

(51) Int. Cl.

G06T 17/05 (2011.01)

G06T 7/70 (2017.01)

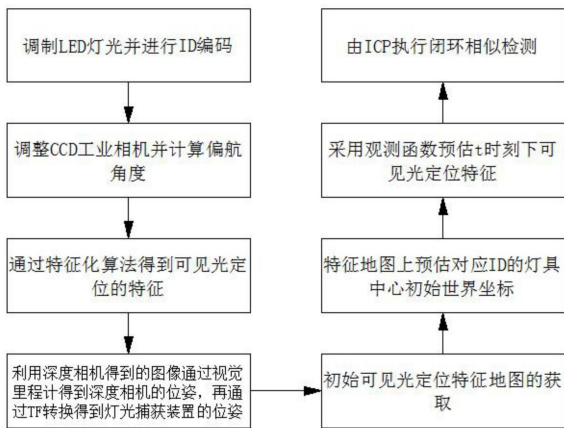
权利要求书2页 说明书9页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法

(57) 摘要

本发明公开一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法,包括步骤一、调制LED灯光并进行ID编码,步骤二、调整CCD工业相机并计算偏航角度,步骤三、通过特征化算法得到可见光定位的特征,步骤四、利用深度相机捕获并通过TF获取灯光捕获装置的位姿,步骤五、初始可见光定位特征地图的获取,步骤六、特征地图上预估对应ID的灯具中心初始世界坐标,步骤七、采用观测函数预估t时刻下可见光定位特征,步骤八、由ICP执行闭环相似检测;本发明通过结合深度相机的重投影误差与工业相机的观测误差优化工业相机的位姿,利用可见光定位的观测误差,对位姿进行优化,提高了定位与建图的精度,同时实现了LED信标的自主定位功能。



1.一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法,其特征在于包括以下步骤:

步骤一、调制LED灯光,并在调制过程中对每个LED灯体分配一个ID编码;

步骤二、调整CCD工业相机,利用工业相机捕捉调制后的LED灯光,获得LED灯体的ID消息以及灯体中心的像素坐标,并通过里程计获得偏航角度;

步骤三、对t时刻的终端航向角 α^* 、工业相机捕获的LED灯光图片以及LED灯体的ID消息经特征化算法得到每一个位姿下的可见光定位的特征;

步骤四、利用深度相机捕获周围环境的RGBD图像,利用基于ORB-SLAM2算法的LoopClosing线程得到t时刻的深度相机位姿,再经过TF变换转换成LED灯光捕获装置的位姿;

步骤五、对利用深度相机得到的LED灯光捕获装置的位姿及每个位姿下的可见光定位特征进行时间戳上的匹配,得到一个初始可见光定位特征的地图;

步骤六、对初始可见光定位特征的地图进行基于ID上的分类,同时对处于观测到同一个ID特征下预估对应ID的灯具中心的初始世界坐标;

步骤七、利用得到的灯具中心的初始世界坐标及t时刻下的位姿,采用观测函数预估t时刻下的可见光定位的特征,优化灯具中心的世界坐标与工业相机位姿;

观测函数由灯具中心的世界坐标、工业相机的世界坐标获得,其中观测函数中的id取为实际的 id^{obs} ,观测函数公式如下

$$pre_t^{vlp}(x_t^{vlp}, p_t^{vlp}) = \begin{bmatrix} k * \sqrt{(x_t^{vlp} - m_x^{vlp})^2 + (y_t^{vlp} - m_y^{vlp})^2} \\ \arctan(x_t^{vlp} - m_x^{vlp}, y_t^{vlp} - m_y^{vlp}) \\ id^{obs} \end{bmatrix}$$

$$其中比例系数 k = \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m \frac{\sqrt{(u_t^{vlp-z} - c_x^{vlp})^2 + (v_t^{vlp-z} - c_y^{vlp})^2}}{\sqrt{(x_t^{vlp} - m_x^{vlp})^2 + (y_t^{vlp} - m_y^{vlp})^2}}; \arctan为反正切函数,$$

(m_x^{vlp}, m_y^{vlp}) 为世界坐标系上灯具中心点的坐标, (x_t^{vlp}, y_t^{vlp}) 为工业相机平面中心点的坐标; $(u_t^{vlp-z}, v_t^{vlp-z})$ 为像素平面坐标系上灯具中心的坐标;

步骤八、对经过能观测到之前相同ID的有效范围内的一段位姿通过ICP执行闭环相似检测,减少位姿的误差。

2.根据权利要求1所述的一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法,其特征在于:所述步骤一中对LED灯光的调制是使LED灯光的发光芯片按照调制的频率进行闪烁,闪烁频率对应于调制的信号。

3.根据权利要求1所述的一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法,其特征在于:所述步骤二中调整CCD工业相机时使工业相机的相机坐标系的 y_c 轴与turtlebot2的前行方向一致,所述步骤二中具体包括

1)获得灯体的ID消息,将CCD工业相机水平安装在捕获装置上,并调整捕获装置使其捕捉到不多于一个LED灯体的LED灯光,捕获LED灯光后根据LED灯光中调制的内容解析出LED

灯体的ID;

2) 获得LED灯体的灯具中心,先将图像转换为灰度图,利用高斯模糊处理减少高频噪声并对图像执行二值化,检测到灯具中心区域图像的轮廓后计算轮廓区域的图像矩,获取轮廓中心;

3) 获取偏航角,通过turtlebot2订阅navigation功能包中的odometry消息,得到偏航角信息。

4. 根据权利要求1所述的一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法,其特征在于:所述步骤七中的观测函数是利用了当前工业相机的位姿以及灯具中心的世界坐标对某一位置的可见光定位的观测特征予以估计。

5. 根据权利要求1所述的一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法,其特征在于:所述步骤七中用观测函数预估t时刻下的可见光定位的特征与实际观测的可见光定位的特征的误差构造最小二乘问题,通过依次求解得到误差最小时的灯具中心的世界坐标以及LED灯光捕获装置的位姿。

6. 根据权利要求5所述的一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法,其特征在于:所述最小二乘问题求解采用高斯牛顿迭代法,利用能观测到同一灯具的所有位姿对该灯具中心的世界坐标做出优化,再利用某一时刻下的位姿观测得到的灯具中心的世界坐标对该位姿进行优化。

7. 根据权利要求1所述的一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法,其特征在于:所述步骤八中通过ICP执行的闭环相似检测包括计算两段轨迹之间的欧式变换矩阵;求出经过变换矩阵之后的一段位姿序列与另一段位姿序列之间匹配的欧式距离,阈值小于误差则完成闭环检测,并将其中一段位姿序列代替检测到闭环位姿序列。

一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法

技术领域

[0001] 本发明涉及可见光通信与计算机视觉技术领域,尤其涉及一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法。

背景技术

[0002] 随着智能技术的飞速发展,基于位置的服务的需求每天都在增加,由于传统的定位技术无法满足室内定位的需求,因此新的室内定位技术,例如蓝牙,Wi-Fi和RFID等已经崭露头角;

[0003] 在机器人领域,服务机器人是一种半自主或全自主工作的机器人,在维护保养、修理、运输、清洗、保安、救援、监护等领域有广泛的应用,服务机器人是人工智能高度发展的产物,而自主定位则是机器人应用的基石,对室外机器人定位的研究很多,然而由于绝大多数时间人们都在室内生活、工作、学习,室内将是智能机器人一个广泛的应用区域,而实现室内定位,就是智能机器人在室内进行智能化的第一步;

[0004] 而目前主流的机器人定位技术是SLAM技术和VLP定位,SLAM技术构建的栅格地图表示法在实时应用比较困难,几何信息地图表示法在广域环境中难以维持精确的坐标信息,拓扑图表示法当环境中存在两个相似的地方时,无法确定是否为同一点,至于VLP定位技术受限于图像处理的精度、摄像头视场角的限制、LED布置数量和密度和LED灯具的维护等因素,系统的鲁棒性较差,因此,本发明提出一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法以解决现有技术中存在的问题。

发明内容

[0005] 针对上述问题,本发明的目的在于提出一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法,该基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法通过结合深度相机的重投影误差与工业相机的观测误差优化工业相机的位姿,利用了可见光定位的观测误差,对定位的位姿进行优化,提高了定位与建图的精度,同时实现了LED信标的自主定位功能,本方法推动了可见光通信室内定位以及建图技术的实际应用,具有广阔的市场价值。

[0006] 为实现本发明的目的,本发明通过以下技术方案实现:一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤一、调制LED灯光,并在调制过程中对每个LED灯体分配一个ID编码;

[0008] 步骤二、调整CCD工业相机,利用工业相机捕捉调制后的LED灯光,获得LED灯体的ID消息以及灯体中心的像素坐标,并通过里程计获得偏航角度;

[0009] 步骤三、对t时刻的终端航向角 α^* 、工业相机捕获的LED灯光图片以及LED灯体的ID消息经特征化算法得到每一个位姿下的可见光定位的特征;

[0010] 步骤四、利用深度相机捕获周围环境的RGBD图像,利用基于ORB-SLAM2算法的LoopClosing线程得到t时刻的深度相机位姿,再经过TF变换转换成LED灯光捕获装置的位姿;

[0011] 步骤五、对利用深度相机得到的LED灯光捕获装置的位姿及每个位姿下的可见光定位特征进行时间戳上的匹配,得到一个初始可见光定位特征的地图;

[0012] 步骤六、对初始可见光定位特征的地图进行基于ID上的分类,同时对处于观测到同一个ID特征下预估对应ID的灯具中心的初始世界坐标;

[0013] 步骤七、利用得到的初始灯具中心的世界坐标及t时刻下的位姿,采用观测函数预估t时刻下的可见光定位的特征,优化灯具中心的世界坐标与工业相机位姿;

[0014] 步骤八、对经过能观测到之前相同ID的有效范围内的一段位姿通过ICP执行闭环相似检测,减少位姿的误差。

[0015] 进一步改进在于:所述步骤一中对LED灯光的调制是使LED灯光的发光芯片按照调制的频率进行闪烁,闪烁频率对应于调制的信号。

[0016] 进一步改进在于:所述步骤二中调整CCD工业相机时使工业相机的相机坐标系的 y_c 轴与turtlebot2的前行方向一致,所述步骤二中具体包括

[0017] 1) 获得灯体的ID消息,将CCD工业相机水平安装在捕获装置上,并调整捕获装置使其捕捉到不多于一个LED灯体的LED灯光,捕获LED灯光后根据LED灯光中调制的内容解析出LED灯体的ID;

[0018] 2) 获得LED灯体的灯具中心,先将图像转换为灰度图,利用高斯模糊处理减少高频噪声并对图像执行二值化,检测到灯具中心区域图像的轮廓后计算轮廓区域的图像矩,获取轮廓中心;

[0019] 3) 获取偏航角,通过turtlebot2订阅navigation功能包中的odometry消息,得到偏航角信息。

[0020] 进一步改进在于:所述步骤七中的观测函数是利用了当前工业相机的位姿以及灯具中心的世界坐标对某一位置的可见光定位的观测特征予以估计。

[0021] 进一步改进在于:所述步骤七中用观测函数预估t时刻下的可见光定位的特征与实际观测的可见光定位的特征的误差构造最小二乘问题,通过依次求解得到误差最小时的灯具中心的世界坐标以及LED灯光捕获装置的位姿。

[0022] 进一步改进在于:所述最小二乘问题求解采用高斯牛顿迭代法,利用能观测到同一灯具的所有位姿对该灯具中心的世界坐标做出优化,再利用某一时刻下的位姿观测得到的灯具中心的世界坐标对该位姿进行优化。

[0023] 进一步改进在于:所述步骤八中通过ICP执行的闭环相似检测包括计算两段轨迹之间的欧式变换矩阵;求出经过变换矩阵之后的一段位姿序列与另一段位姿序列之间匹配的欧式距离,阈值小于误差则完成闭环检测,并将其中一段位姿序列代替检测到闭环位姿序列。

[0024] 本发明的有益效果为:本发明通过结合深度相机的重投影误差与工业相机的观测误差优化工业相机的位姿,利用了可见光定位的观测误差,对定位的位姿进行优化,提高了定位与建图的精度,同时实现了LED信标的自主定位功能,本方法推动了可见光通信室内定位以及建图技术的实际应用,具有广阔的市场价值。

附图说明

[0025] 图1为本发明方法流程图。

[0026] 图2为本发明CCD工业相机获取灯具的ID示意图。

[0027] 图3为本发明偏航角获取的计算原理图。

[0028] 图4为本发明观测函数距离比例示意图。

[0029] 图5为本发明观测函数角度差示意图。

具体实施方式

[0030] 为了加深对本发明的理解,下面将结合实施例对本发明做进一步详述,本实施例仅用于解释本发明,并不构成对本发明保护范围的限定。

[0031] 实施例1

[0032] 根据图1、2、3所示,本实施例提供了一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法,包括以下步骤:

[0033] 步骤一、调制LED灯光,使LED灯光的发光芯片按照调制的频率进行闪烁,闪烁频率对应于调制的信号,并在调制过程中对每个LED灯体分配一个ID编码;

[0034] 步骤二、调整CCD工业相机,使工业相机的相机坐标系的 y_c 轴与turtlebot2的前行方向一致,利用工业相机捕捉调制后的LED灯光,获得LED灯体的ID消息以及灯体中心的像素坐标,并通过里程计获得偏航角度,其中具体包括

[0035] 1) 获得灯体的ID消息,将CCD工业相机水平安装在捕获装置上,并调整捕获装置使其捕捉到不多于一个LED灯体的LED灯光,捕获LED灯光后根据LED灯光中调制的内容解析出LED灯体的ID;

[0036] 2) 获得LED灯体的灯具中心,先将图像转换为灰度图,利用高斯模糊处理减少高频噪声并对图像执行二值化,检测到灯具中心区域图像的轮廓后计算轮廓区域的图像矩,获取轮廓中心;

[0037] 3) 获取偏航角,通过turtlebot2订阅navigation功能包中的odometry消息,得到偏航角信息;

[0038] 步骤三、对t时刻的终端航向角 α^* 、工业相机捕获的LED灯光图片以及LED灯体的ID消息经特征化算法得到每一个位姿下的可见光定位的特征;

[0039] 步骤四、利用深度相机捕获周围环境的RGBD图像,利用基于ORB-SLAM2算法的LoopClosing线程得到t时刻的深度相机位姿,再经过TF变换转换成LED灯光捕获装置的位姿;

[0040] 步骤五、对利用深度相机得到的LED灯光捕获装置的位姿及每个位姿下的可见光定位特征进行时间戳上的匹配,得到一个初始可见光定位特征的地图;

[0041] 步骤六、对初始可见光定位特征的地图进行基于ID上的分类,同时对处于观测到同一个ID特征下预估对应ID的灯具中心的初始世界坐标;

[0042] 步骤七、利用得到的初始灯具中心的世界坐标及t时刻下的位姿,采用观测函数预估t时刻下的可见光定位的特征,与实际观测的可见光定位的特征的误差构造最小二乘问题,通过依次求解得到误差最小时的灯具中心的世界坐标以及LED灯光捕获装置的位姿,优化灯具中心的世界坐标与工业相机位姿,其中最小二乘问题求解采用高斯牛顿迭代法,利用能观测到同一灯具的所有位姿对该灯具中心的世界坐标做出优化,再利用某一时刻下的位姿观测得到的灯具中心的世界坐标对该位姿进行优化;

[0043] 观测函数是利用了当前工业相机的位姿以及灯具中心的世界坐标对某一位置的可见光定位的观测特征予以验证性地估计；

[0044] 步骤八、对经过能观测到之前相同ID的有效范围内的一段位姿通过ICP执行闭环相似检测,减少位姿的误差,其中包括计算两段轨迹之间的欧式变换矩阵；

[0045] 求出经过变换矩阵之后的一段位姿序列与另一段位姿序列之间匹配的欧式距离,阈值小于误差则完成闭环检测,并将其中一段位姿序列代替检测到闭环位姿序列。

[0046] 实施例2

[0047] 根据图1、2、3、4、5所示,本实施例提供了一种基于深度相机和可见光通信的信标地图构建方法,包括以下具体步骤:

[0048] 步骤一、调制LED灯光,使LED灯光的发光芯片按照调制的频率进行闪烁,闪烁频率对应于调制的信号,并在调制过程中对每个LED灯体分配一个ID编码；

[0049] 步骤二、调整CCD工业相机,使工业相机的相机坐标系的 y_c 轴与turtlebot2的前行方向一致,利用工业相机捕捉调制后的LED灯光,获得LED灯体的ID消息以及灯体中心的像素坐标,并通过里程计获得偏航角度,其中具体包括

[0050] 1) 获得灯体的ID消息,将CCD工业相机水平安装在捕获装置上,并调整捕获装置使其捕捉到不多于一个LED灯体的LED灯光,捕获LED灯光后根据LED灯光中调制的内容解析出LED灯体的ID；

[0051] 2) 获得LED灯体的灯具中心,先将图像转换为灰度图,利用高斯模糊处理减少高频噪声并对图像执行二值化,检测到灯具中心区域图像的轮廓后计算轮廓区域的图像矩,获取轮廓中心；

[0052] 3) 获取偏航角,通过turtlebot2订阅navigation功能包中的odometry消息,得到偏航角信息；

[0053] 步骤三、对于同一位姿而言,在世界坐标系上灯具中心定义为 (m_x^{vlp}, m_y^{vlp}) ,工业相机平面中心定义为 (x_t^{vlp}, y_t^{vlp}) ；在像素平面坐标系上灯具中心定义为 $(u_t^{vlp-z}, v_t^{vlp-z})$,工业相机平面中心定义为 (c_x^{vlp}, c_y^{vlp}) ；

[0054] 对于同一位姿而言规定向左旋转为正方向,工业相机的偏航角定义为 θ_t^{vlp-z} ,获得得到的LED灯体的ID信息为 id_t^{vlp-z} ,特征化算法如下式

$$[0055] \quad obs_t^{vlp} = \begin{bmatrix} \sqrt{(u_t^{vlp-z} - c_x^{vlp})^2 + (v_t^{vlp-z} - c_y^{vlp})^2} \\ \arctan(u_t^{vlp-z} - c_x^{vlp}, v_t^{vlp-z} - c_y^{vlp}) - \theta_t^{vlp-z} \\ id_t^{vlp-z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_t^{obs} \\ (\alpha - \theta)_t^{obs} \\ id_t^{obs} \end{bmatrix}$$

[0056] 步骤四、工业相机位姿的获得,通过ORB-SLAM2算法的LoopClosing线程出RGBD Camera的位姿序列 $\{Pose_t^{orb}\}$,再通过CCD工业相机与RGBD Camera的位置关系,通过TF坐标变换得到工业相机的位姿序列 $\{Pose_t^{vlp}\}$ 。

[0057] 步骤五、对于可见光定位的特征序列 $\{\text{obs}_t^{\text{vlp}}\}$ 中的每一个序列 $\text{obs}_{t_{\text{obs}}}^{\text{vlp}}$ 的时间戳 t_{obs} ,在工业相机的位姿序列 $\{\text{Pose}_t^{\text{vlp}}\}$ 中查找相近的时间戳 t_{pose} 上对应的位姿 $\text{Pose}_{t_{\text{pose}}}^{\text{vlp}}$ 。若 $|t_{\text{obs}} - t_{\text{pose}}| \leq t_{\text{threshold}}$,则 $t_{\text{pose}} \approx t_{\text{obs}}$ 。同时将可见光定位的特征、工业相机的位姿放在一起,生成可见光定位地图的地图 $\text{Point}_{t_{\text{orb}}}^{\text{vlp}}$ 。通过遍历,得到可见光定位地图点序列 $\{\text{Point}_t^{\text{vlp}}\}$,作为初始化的可见光定位地图。

[0058] 步骤六、对于初始的可见光定位地图点序列 $\{\text{Point}_t^{\text{vlp}}\}$ 中一次遍历,对序列进行按照ID序号不同的分类 $\{\text{Point}_{t, \text{ID}1}^{\text{vlp}}\}, \{\text{Point}_{t, \text{ID}2}^{\text{vlp}}\}, \dots \{\text{Point}_{t, \text{ID}n}^{\text{vlp}}\}, \dots \{\text{Point}_{t, \text{ID}N}^{\text{vlp}}\}$

[0059] 再对其中一段同一个ID下的序列 $\{\text{Point}_{t, \text{ID}n}^{\text{vlp}}\}$ 执行遍历,计算出近似的灯具中心,设其时间戳序列为 $\{t_1, \dots, t_m\}$,则其计算公式如下

$$[0060] \quad \widehat{m}_x^{\text{vlp}} = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{t_i, \text{ID}n}^{\text{vlp}}, & \text{if } d_{t_i, \text{ID}n}^{\text{obs}} \leq d_{\text{th reold}} \\ x_{t_i, \text{ID}n}^{\text{vlp}}, & \text{if } x_{t_i, \text{ID}n}^{\text{vlp}} > d_{\text{th reold}}, i = 1, \dots, m. \\ \text{and } x_{t_i, \text{ID}n}^{\text{vlp}} = \text{Minimum}\{x_{t_1, \text{ID}n}^{\text{vlp}}, \dots, x_{t_i, \text{ID}n}^{\text{vlp}}, x_{t_m, \text{ID}n}^{\text{vlp}}\} \end{cases}$$

$$[0061] \quad \widehat{m}_y^{\text{vlp}} = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{t_i, \text{ID}n}^{\text{vlp}}, & \text{if } d_{t_i, \text{ID}n}^{\text{obs}} \leq d_{\text{th reold}} \\ y_{t_i, \text{ID}n}^{\text{vlp}}, & \text{if } y_{t_i, \text{ID}n}^{\text{vlp}} > d_{\text{th reold}}, i = 1, \dots, m. \\ \text{and } y_{t_i, \text{ID}n}^{\text{vlp}} = \text{Minimum}\{y_{t_1, \text{ID}n}^{\text{vlp}}, \dots, y_{t_i, \text{ID}n}^{\text{vlp}}, y_{t_m, \text{ID}n}^{\text{vlp}}\} \end{cases}$$

[0062] 依次得到每一个ID对应的初始估计的灯具中心。

[0063] 步骤七、观测函数由灯具中心的世界坐标、工业相机的世界坐标获得,其中观测函数中的id取为实际的 id^{obs} ,公式如下

$$[0064] \quad \text{pre}_t^{\text{vlp}}(x_t^{\text{vlp}}, p_t^{\text{vlp}}) = \begin{bmatrix} k * \sqrt{(x_t^{\text{vlp}} - m_x^{\text{vlp}})^2 + (y_t^{\text{vlp}} - m_y^{\text{vlp}})^2} \\ \arctan(x_t^{\text{vlp}} - m_x^{\text{vlp}}, y_t^{\text{vlp}} - m_y^{\text{vlp}}) \\ \text{id}^{\text{obs}} \end{bmatrix}$$

$$[0065] \quad \text{其中 } k = \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m \frac{\sqrt{(u_t^{\text{vlp}-Z} - c_x^{\text{vlp}})^2 + (v_t^{\text{vlp}-Z} - c_y^{\text{vlp}})^2}}{\sqrt{(x_t^{\text{vlp}} - \widehat{m}_x^{\text{vlp}})^2 + (y_t^{\text{vlp}} - \widehat{m}_y^{\text{vlp}})^2}}$$

[0066] 观测函数的第一行推导如下,如说明书附图2中,由于三角形相似可得

$$[0067] \quad k = \frac{H_{\text{像}}}{H_{\text{灯}} - H_{\text{像}}} = \frac{d_t}{D_t}$$

[0068] 其中

$$[0069] \quad d_t = \sqrt{(u_t^{\text{vlp}} - c_x^{\text{vlp}})^2 + (v_t^{\text{vlp}} - c_y^{\text{vlp}})^2}$$

$$[0070] \quad D_t = \sqrt{(x_t^{\text{vlp}} - m_x^{\text{vlp}})^2 + (y_t^{\text{vlp}} - m_y^{\text{vlp}})^2}$$

[0071] 考虑到存在误差,实际上k值获取先通过预估的ROI中心以及投影的比例来获得并取平均值

$$[0072] \quad k = \frac{1}{N} * \sum_{t=m}^n \frac{\sqrt{(u_t^{\text{vlp}} - c_x^{\text{vlp}})^2 + (v_t^{\text{vlp}} - c_y^{\text{vlp}})^2}}{\sqrt{(x_t^{\text{vlp}} - m_x^{\text{vlp}})^2 + (y_t^{\text{vlp}} - m_y^{\text{vlp}})^2}}$$

[0073] 因此可得

$$[0074] \quad \begin{aligned} & \sqrt{(u_t^{\text{vlp}} - c_x^{\text{vlp}})^2 + (v_t^{\text{vlp}} - c_y^{\text{vlp}})^2} \\ & = k * \sqrt{(x_t^{\text{vlp}} - m_x^{\text{vlp}})^2 + (y_t^{\text{vlp}} - m_y^{\text{vlp}})^2} \end{aligned}$$

[0075] 观测函数的第二行的推导如下:

[0076] 由于工业相机的相机坐标系的 y_c 轴与turtlebot2的前行方向一致,如说明书附图3,有 $\alpha_o = \alpha_n - \theta$,其中 $\alpha_o = \arctan(x_t^{\text{vlp}} - m_x^{\text{vlp}}, y_t^{\text{vlp}} - m_y^{\text{vlp}})$ 。

[0077] 对于t时刻下的同一位姿而言, $\alpha_n = \arctan(u_t^{\text{vlp}} - c_x^{\text{vlp}}, v_t^{\text{vlp}} - c_y^{\text{vlp}})$, $\theta = \theta_t^{\text{vlp}-Z}$

[0078] 故 $\arctan(x_t^{\text{vlp}} - m_x^{\text{vlp}}, y_t^{\text{vlp}} - m_y^{\text{vlp}}) = \arctan(u_t^{\text{vlp}} - c_x^{\text{vlp}}, v_t^{\text{vlp}} - c_y^{\text{vlp}}) - \theta_t^{\text{vlp}-Z}$ 设观测函数中的id与实际测量的id相同,即为 $id^{obs} = id_t^{\text{vlp}-Z}$,可以得到误差函数为

$$[0079] \quad error_t^{\text{vlp}} = \begin{bmatrix} \sqrt{(u_t^{\text{vlp}} - c_x^{\text{vlp}})^2 + (v_t^{\text{vlp}} - c_y^{\text{vlp}})^2} - k * \sqrt{(x_t^{\text{vlp}} - m_x^{\text{vlp}})^2 + (y_t^{\text{vlp}} - m_y^{\text{vlp}})^2} \\ \text{atan2}(u_t^{\text{vlp}} - c_x^{\text{vlp}}, v_t^{\text{vlp}} - c_y^{\text{vlp}}) - \theta_t^{\text{vlp}-Z} - \text{atan2}(x_t^{\text{vlp}} - m_x^{\text{vlp}}, y_t^{\text{vlp}} - m_y^{\text{vlp}}) \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0080] 考虑如下最小二乘问题

$$[0081] \quad \min_p \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} \| error_{t_i}^{\text{vlp}}(m_x^{\text{vlp}}, m_y^{\text{vlp}}) \|^2$$

[0082] 先利用观测到同一个ID下的位姿序列对灯具中心的世界坐标进行优化。设

$$p = [m_x^{\text{vlp}}, m_y^{\text{vlp}}]^T = [p_1, p_2]^T, \text{ 则}$$

$$[0083] \quad errdist_i(p) = \sqrt{(u_t^{vlp-Z} - c_x^{vlp})^2 + (v_t^{vlp-Z} - c_y^{vlp})^2} - k * \sqrt{(x_t^{vlp} - p_1)^2 + (y_t^{vlp} - p_2)^2}$$

$$[0084] \quad errang_i(p) = atan2(u_t^{vlp-Z} - c_x^{vlp}, v_t^{vlp-Z} - c_y^{vlp}) - \theta_t^{vlp-Z} - atan2(x_t^{vlp} - p_1, y_t^{vlp} - p_2)$$

$$[0085] \quad error_{t_i}^{vlp}(m_x^{vlp}, m_y^{vlp}) = \sqrt{[errdist_i(p)]^2 + [errang_i(p)]^2} = r_i(p)$$

$$[0086] \quad \phi(p) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} [r_i(p)]^2$$

$$[0087] \quad \frac{\partial \phi}{\partial p_j} = \frac{\partial}{\partial p_j} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m [r_i(p)]^2 = \sum_{i=1}^m r_i(p) * \frac{\partial r_i(p)}{\partial p_j}$$

[0088] 写成矩阵的形式有 $\nabla \phi(p) = J_r(p)^T r(p)$, 其中

$$[0089] \quad \{J_r(p)\}_{ij} = \frac{\partial r_i(p)}{\partial p_j}, J_r(p) \in \mathbb{R}^{m \times 2}$$

$$[0090] \quad \{r(p)\}_{ij} = r_i(p), r(p) \in \mathbb{R}^{m \times 1}$$

[0091] 即p的最优条件为

$$[0092] \quad \nabla \phi(p) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial p_1} & \frac{\partial r_1}{\partial p_2} \\ \frac{\partial r_2}{\partial p_1} & \frac{\partial r_2}{\partial p_2} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_m}{\partial p_1} & \frac{\partial r_m}{\partial p_2} \end{bmatrix}^T * \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0093] 采用GN法来求解此方程。

[0094] 设 $F(p) = \nabla \phi(p) = J_r(p)^T r(p)$, 对 $F(p)$ 求导, 得

$$J_F(p)_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial p_j} = \frac{\partial}{\partial p_j} J_r(p)^T r(p)_i$$

$$[0095] \quad = \frac{\partial}{\partial p_j} \sum_{k=1}^m \frac{\partial r_k}{\partial p_i} r_k = \sum_{k=1}^m \frac{\partial r_k}{\partial p_i} \frac{\partial r_k}{\partial p_j} + \sum_{k=1}^m \frac{\partial^2 r_k}{\partial p_i \partial p_j} r_k$$

[0096] 由于二阶导求解较为麻烦, 此处忽略第二项求和, 得

$$[0097] \quad J_F(p) = J_r(p)^T J_r(p)$$

$$[0098] \quad (J_r(p)^T J_r(p))_{ij} = \sum_{k=1}^m \frac{\partial r_k}{\partial p_i} \frac{\partial r_k}{\partial p_j}$$

[0099] 利用迭代公式 $\Delta p = -J_F^{-1}(p_o) F(p_o)$ 可得

$$[0100] \quad \Delta p = - (J_r(p_k)^T J_r(p_k))^{-1} (J_r(p_k)^T r(p_k))$$

$$[0101] \quad \begin{cases} \Delta p = - (J_r(p_k)^T J_r(p_k))^{-1} (J_r(p_k)^T r(p_k)) \\ p_{k+1} = p_k + \Delta p_k \end{cases}$$

[0102] 利用QR分解, $(J_r(p_k)) = Q(p_k) R(p_k)$, 其中 $Q(p_k) Q(p_k)^T = I$, $R(p_k)$ 为上对角矩阵, 可得 $\Delta p_k = R(p_k)^{-1} Q(p_k) F(p_k)$, 因此p的最优解的求解方式为

$$[0103] \quad \begin{cases} \Delta p_k = R(p_k)^{-1} Q(p_k) F(p_k) \\ p_{k+1} = p_k + \Delta p_k \end{cases}$$

[0104] 当已知灯具中心 (m_x^{vlp}, m_y^{vlp}) 时, 可以对位姿进行优化, 对这个误差函数用最小二乘来求解, 考虑如下最小二乘问题

$$[0105] \quad \min_{x_{t_i}^{vlp}, y_{t_i}^{vlp}} \frac{1}{2} \| \text{error}_{t_i}^{vlp}(x_{t_i}^{vlp}, y_{t_i}^{vlp}) \|^2$$

[0106] 设 $q = [q_1, q_2]^T = [x_{t_i}^{vlp}, y_{t_i}^{vlp}]^T$, 则

$$[0107] \quad \text{error}_{t_i}^{vlp}(q) = \sqrt{[\text{errdist}_i(q)]^2 + [\text{errang}_i(q)]^2} = f(q)$$

[0108] 其中

$$[0109] \quad \text{errdist}_i(p) = \sqrt{(u_t^{vlp-Z} - c_x^{vlp})^2 + (v_t^{vlp-Z} - c_y^{vlp})^2} - k * \sqrt{(x_{t_i}^{vlp} - p_1)^2 + (y_{t_i}^{vlp} - p_2)^2}$$

$$[0110] \quad \text{errang}_i(p) = \text{atan2}(u_t^{vlp-Z} - c_x^{vlp}, v_t^{vlp-Z} - c_y^{vlp}) - \theta_t^{vlp-Z} - \text{atan2}(x_{t_i}^{vlp} - p_1, y_{t_i}^{vlp} - p_2)$$

[0111] 函数 $f(q)$ 泰勒一阶展开得

$$[0112] \quad \frac{1}{2} \| f(q + \Delta q) \|^2 \approx \frac{1}{2} \| f(q) + J_{t_i}(q) \Delta q \|^2$$

$$[0113] \quad J_{t_i}(q) = \left[\frac{\partial f}{\partial q_1}, \frac{\partial f}{\partial q_2} \right]$$

[0114] 同样利用GN法求迭代得

$$[0115] \quad \begin{cases} \Delta q = - (J_r(q_k)^T J_r(q_k))^{-1} (J_r(q_k)^T r(q_k)) \\ q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \end{cases}$$

[0116] 直至收敛, 可以求到q的最优值;

[0117] 步骤八、对经过能观测到之前相同ID的有效范围内的一段位姿通过ICP执行闭环相似检测, 减少位姿的误差;

[0118] ICP算法先假设有一段待检测闭环的位姿序列 $\{p_i\}$ 与优化地图中的相似位姿序列 $\{p'_i\}$, 假设存在一个欧式变换 R, t 使得

$$[0119] \quad p_i = R p'_i + t$$

$$[0120] \quad \text{error}_i = p_i - (R p'_i + t)$$

$$[0121] \quad \min_{R,t} J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \| p_i - (Rp'_i + t) \|^2$$

[0122] 其中相似原理为 p_i 的 obs_t^{vlp} 与 p'_i 的 $obs_t^{vlp^i}$ 如果满足以下条件:

$$[0123] \quad rel_d = \frac{|d_i^{obs} - d_i^{obs'}|}{d_i^{obs}} < d_{thres}^{rel}$$

$$[0124] \quad rel_{\alpha-\theta} = \frac{|(\alpha - \theta)_i^{obs} - (\alpha - \theta)_i^{obs'}|}{(\alpha - \theta)_i^{obs'}} < (\alpha - \theta)_{thres}^{rel}$$

$$[0125] \quad id_t^{obs} = d_t^{obs'}$$

[0126] 则视为 p_i 与 p'_i 为相似点对,其中 d_{thres}^{rel} 与 $(\alpha - \theta)_{thres}^{rel}$ 为设定的阈值。

[0127] 定义质心为

$$[0128] \quad p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i)$$

$$[0129] \quad p' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p'_i)$$

[0130] 执行去质心操作 $q_i = p_i - p$, $q'_i = p'_i - p'$, $H = \sum_{i=1}^n q_i q_i^T$, 对H求SVD分解可得 $H = U \Sigma V^T$, $R^* = VU^T$, $t^* = p - Rp'$, 将 R^* , t^* 代入到 p'_i 的计算中, 得到 $Rp'_i + t$, 再对这两段序列之间求位姿之间的欧式距离, 再取平均值, 即

$$[0131] \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \| p_i - (Rp'_i + t) \|^2$$

[0132] 这个数值越小, 匹配程度也就越高, 当小于一定阈值时, 则可以认为在这里实现了闭环检测, 用 $\{p'_i\}$ 代替 $\{p_i\}$ 即可。

[0133] 以上显示和描述了本发明的基本原理、主要特征和优点。本行业的技术人员应该了解, 本发明不受上述实施例的限制, 上述实施例和说明书中描述的只是说明本发明的原理, 在不脱离本发明精神和范围的前提下, 本发明还会有各种变化和改进, 这些变化和改进都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

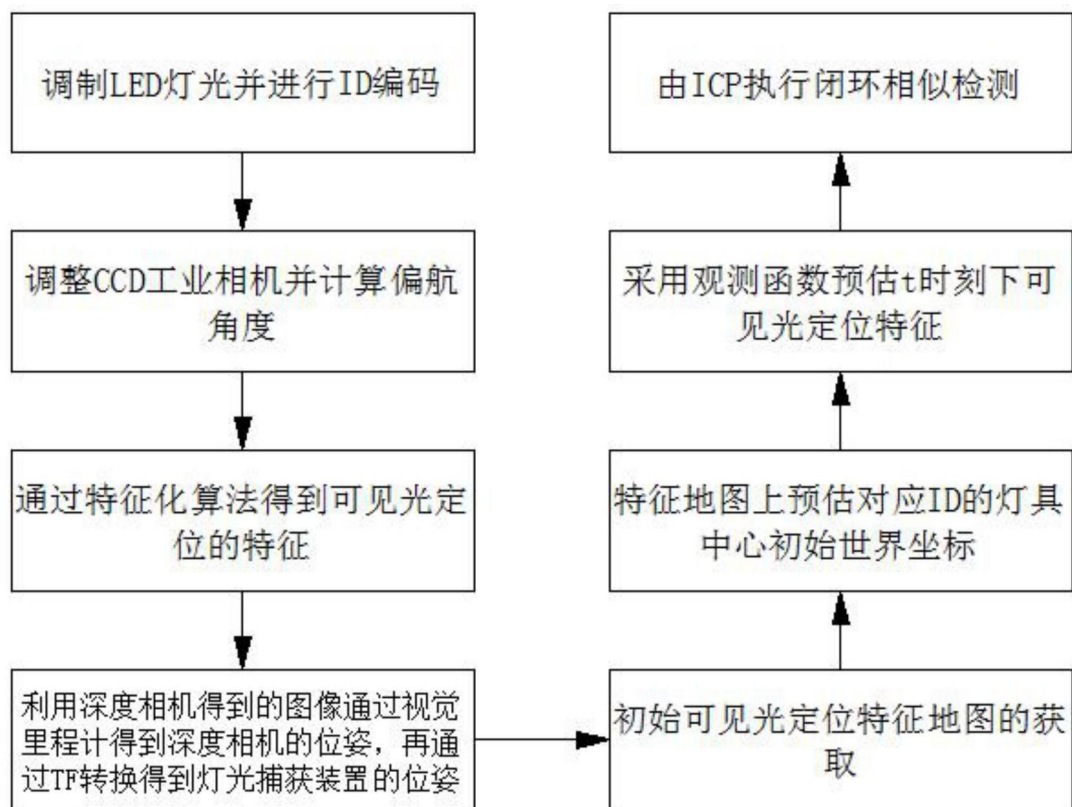


图1

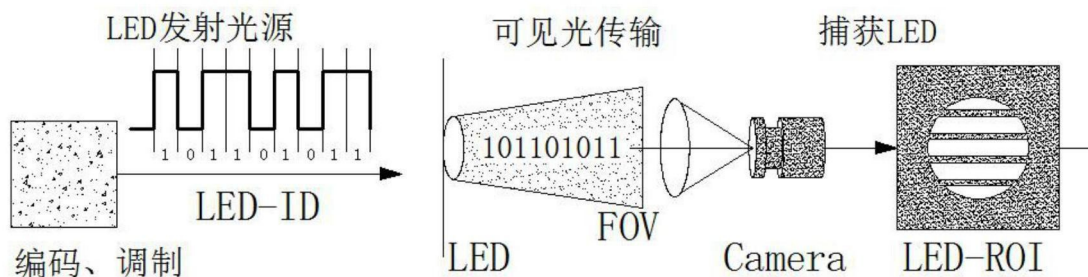


图2

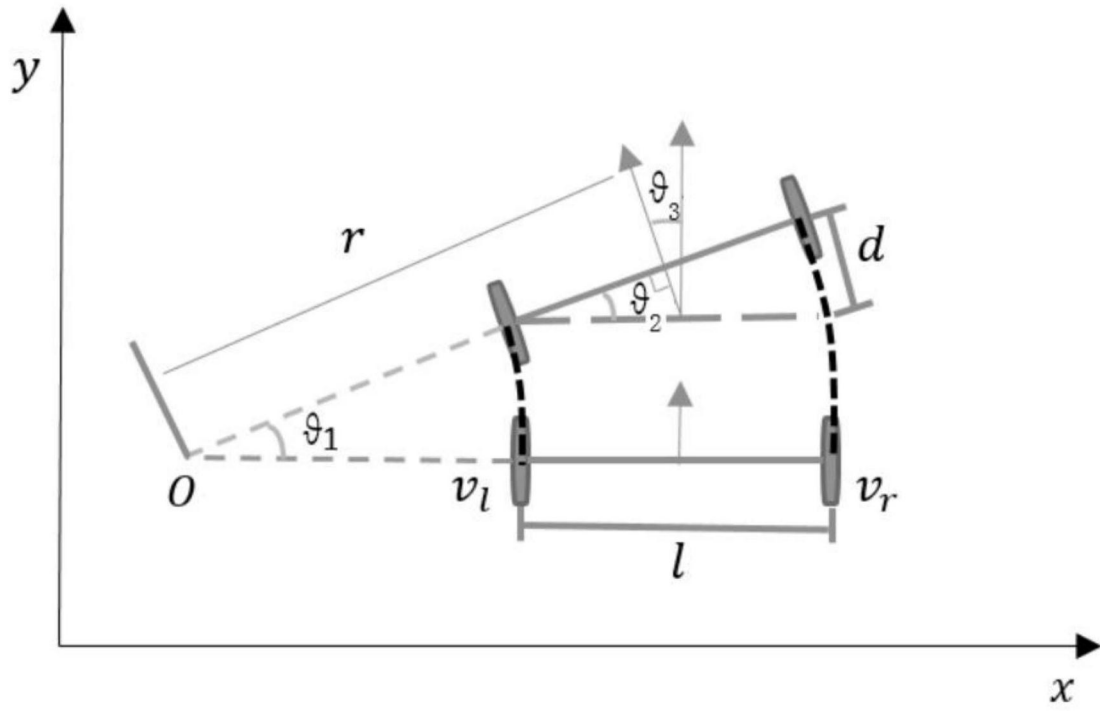


图3

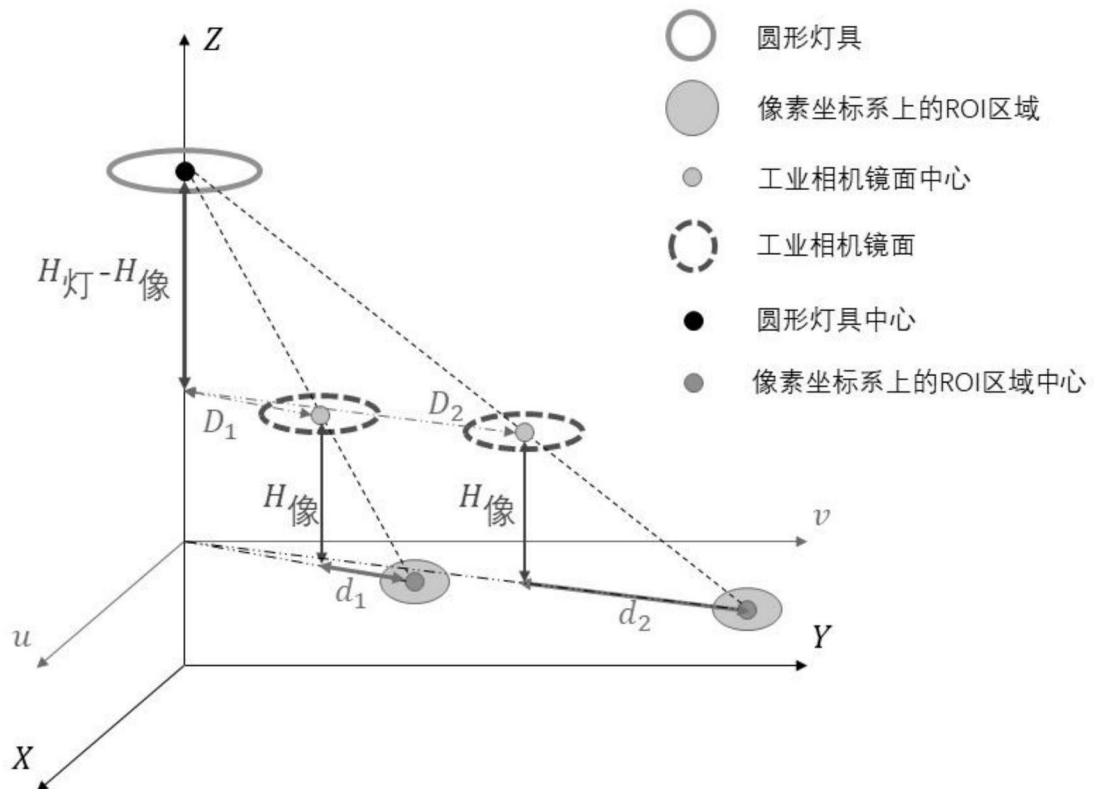


图4

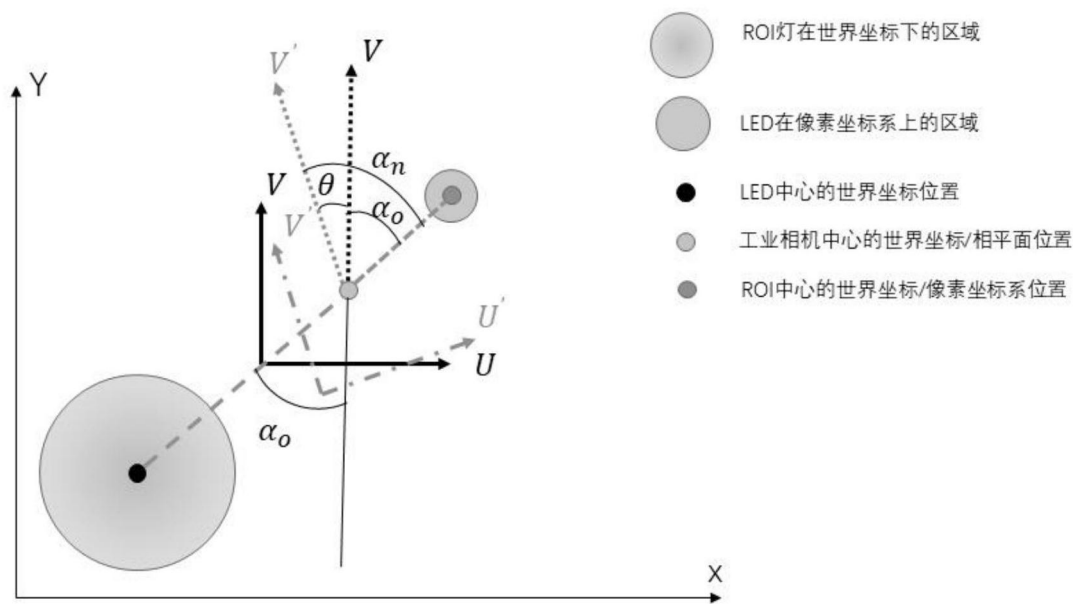


图5