



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111275764 A

(43)申请公布日 2020.06.12

(21)申请号 202010089290.7

(22)申请日 2020.02.12

(71)申请人 南开大学

地址 300071 天津市南开区卫津路94号

(72)发明人 苑晶 周光召 孙沁璇

(74)专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代理事务所 12201

代理人 刘国威

(51)Int.Cl.

G06T 7/73(2017.01)

G01S 11/12(2006.01)

G01S 17/08(2006.01)

G01S 7/48(2006.01)

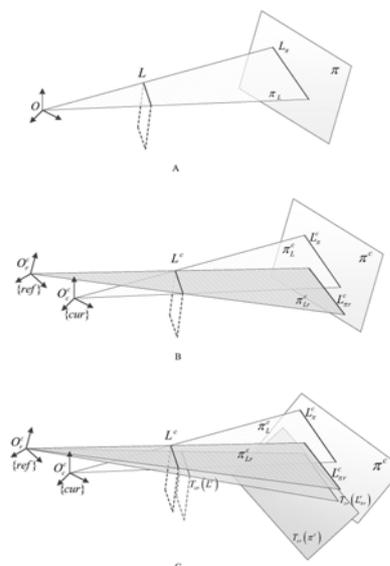
权利要求书2页 说明书7页 附图1页

(54)发明名称

基于线段阴影的深度相机视觉里程测量方法

(57)摘要

本发明属于移动机器人自主定位与导航领域,为提出一种基于直线阴影的RGB-D视觉里程计方法,通过平面约束遮挡线和被遮挡点线的几何关系,构建最小重投影误差方程,通过非线性优化求解位姿。为此,本发明采取的技术方案是,基于线段阴影的深度相机视觉里程测量方法,首先提取图像中的平面和线段结构并进行参数拟合,在普朗克(Plücker)坐标系下定义方线段和平面的表示方式;使用平面 π 、遮挡线L和平面 π_L 进行位姿估计;最后通过被遮挡线匹配约束提高位姿估计的精度。本发明主要应用于移动机器人自主定位与导航场合。



1. 一种基于线段阴影的深度相机视觉里程测量方法,其特征是,首先提取图像中的平面和线段结构并进行参数拟合,在普朗克(Plücker)坐标系下定义方线段和平面的表示方式;使用平面 π 、遮挡线 L 和平面 π_L 进行位姿估计;最后通过被遮挡线匹配约束提高位姿估计的精度。

2. 如权利要求1所述的基于线段阴影的深度相机视觉里程测量方法,其特征是,具体步骤如下:

S1. 通过深度相机RGB-D传感器获取环境的彩色和深度图像信息,使用彩色和深度信息提取图像中的平面和直线结构,直线包含遮挡处和被遮挡处的点;

S2. 定义三维空间直线 L 的Plücker坐标表达式,如下:

$$L = [u^T, v^T]^T$$

其中向量 $u \in R^3$ 垂直解析平面 π_L ,由原点 O 和直线 L 构成,向量 $v \in R^3$ 表示直线 L 的方向向量,并且 L 满足Plücker约束:

$$u^T v = 0$$

L 的Plücker矩阵定义为:

$$L = \begin{bmatrix} [u]_{\times} & v \\ -v^T & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

原点与遮挡线构成的平面 π_L 定义为:

$$\pi_L = L^* \cdot \tilde{O} = [u^T, 0]^T \quad (2)$$

其中 $\tilde{O} = [0, 0, 0, 1]^T$ 为原点的齐次坐标, L^* 为 L 的对偶Plücker矩阵,计算方法如下:

$$L^* = \begin{bmatrix} [v]_{\times} & u \\ -u^T & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

S3. 定义约束平面 $\pi = [n^T, d]^T$ 上被遮挡点构成的直线表达式 L_{π} 的Plücker矩阵如下:

$$L_{\pi} = [-du^T, (u \times n)^T]^T \quad (4)$$

其中 n^T 表示平面法向量, d 表示平面到原点的距离, L_{π} 的对偶Plücker矩阵为:

$$L_{\pi}^* = \pi \pi_L^T - \pi_L \pi^T = \begin{bmatrix} [u \times n]_{\times} & -du \\ du^T & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

S4. 使用平面 π 和遮挡线 L 进行位姿估计,右上角标 c 和 r 分别表示当前帧和参考帧,平面的刚体变换 $T_{cr}(\pi)$ 表达式为:

$$T_{cr}(\pi) = \begin{bmatrix} T_{cr}(n) \\ T_{cr}(n, d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} & 0 \\ -t_{cr}^T R_{cr} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} n \\ -t_{cr}^T R_{cr} n + d \end{bmatrix} \quad (6)$$

遮挡线的刚体变换 $T_{cr}(L)$ 为:

$$T_{cr}(L) = \begin{bmatrix} T_{cr}(u, v) \\ T_{cr}(v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} & [t_{cr}]_{\times} R_{cr} \\ 0 & R_{cr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} u + [t_{cr}]_{\times} R_{cr} v \\ R_{cr} v \end{bmatrix} \quad (7)$$

为了求解位姿,定义重投影误差函数:

$$E(R_{cr}, t_{cr}) = \alpha_{\pi} \sum_{j=1}^{N_{\pi}} \|\pi_j^c - T_{cr}(\pi_j^r)\|_2^2 + \alpha_L \sum_{i=1}^{N_L} \|L_i^c - T_{cr}(L_i^r)\|_2^2 = E_1(R_{cr}) + E_2(R_{cr}, t_{cr}) \quad (8)$$

其中

$$E_1(R_{cr}) = \alpha_{\pi} \sum_{j=1}^{N_{\pi}} \|n_j^c - T_{cr}(n_j^r)\|_2^2 + \alpha_L \sum_{i=1}^{N_L} \|v_i^c - T_{cr}(v_i^r)\|_2^2 \quad (9)$$

$$E_2(R_{cr}, t_{cr}) = \alpha_\pi \sum_{j=1}^{N_\pi} \|d_j^c - T_{cr}(n_j^c, d_j^c)\|_2^2 + \alpha_L \sum_{i=1}^{N_L} \|u_i^c - T_{cr}(u_i^c, v_i^c)\|_2^2 \quad (10)$$

通过最小化 (9) 式可求得旋转变量 R_{cr} , 最小化 (10) 式求得位移变量 t_{cr} ;

S5. 通过被遮挡线匹配进一步优化位姿, 参考帧相对于当前帧的原点坐标为 $O_c^r = t_{cr}$, 参考帧坐标系下的平面 π_{Lr}^c 由遮挡线 L^c 和参考帧的原点 O_c^r 构成, 计算方式如下:

$$\pi_{Lr}^c = L^{c*} \cdot \tilde{O}_r^c = \begin{bmatrix} [v^c]_\times t_{cr} + u^c \\ -u^{cT} t_{cr} \end{bmatrix} \quad (11)$$

被遮挡线由约束平面 π 和平面 π_L^r 相交所得, 其对偶 Plücker 矩阵如下:

$$L_{\pi r}^{c*} = \pi^c \pi_{Lr}^{cT} - \pi_{Lr}^c \pi^{cT} = \begin{bmatrix} [v_{\pi r}^c]_\times & u_{\pi r}^c \\ -u_{\pi r}^{cT} & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中

$$u_{\pi r}^c = -d^c([v^c]_\times t_{cr} + u^c) - n^c t_{cr}^T u^c \quad (13)$$

$$v_{\pi r}^c = -[n^c]_\times [v^c]_\times t_{cr} + [u^c]_\times n^c \quad (14)$$

参考帧的遮挡线、被遮挡线和约束平面的观测分别表示为: $L^r, L_{\pi r}^r, \pi^r$, 通过匹配当前帧与参考帧被遮挡线 $L_{\pi r}^r$ 精化上文求得的 R_{cr}, t_{cr} 值, 如果 R_{cr}, t_{cr} 正确收敛, 且满足 $\pi^c = T_{cr}(\pi^r)$, $L^c = T_{cr}(L^r)$, 则 $L_{\pi r}^c$ 与 $L_{\pi r}^r$ 是匹配的, 定义新的目标函数:

$$F(R_{cr}, t_{cr}) = \sum_{i=1}^{N_L} \{\|L_{\pi r i}^c - T_{cr}(L_{\pi r i}^r)\|_2^2 + \|L_i^c - T_{cr}(L_i^r)\|_2^2\} + \sum_{j=1}^{N_\pi} \|\pi_j^c - T_{cr}(\pi_j^r)\|_2^2 \quad (15)$$

通过最小化 (15) 式求得最终的旋转和平移矩阵。

基于线段阴影的深度相机视觉里程测量方法

技术领域

[0001] 本发明属于移动机器人自主定位与导航领域,特别是关于深度相机RGB-D的视觉里程计方法。

背景技术

[0002] 视觉里程计是通过输入图像序列增量地估计与视觉传感器固定感知的人或物的运动轨迹方法。相比于传统的惯导和轮式里程计,视觉里程计克服了惯导漂移和轮胎打滑的测量误差问题,且视觉传感器有功耗小,价格便宜,采集的信息丰富等优点,视觉里程计在移动机器人定位和导航领域得到了广泛地关注和应用。

[0003] 目前,视觉里程计的方法主要有特征点法、直接法。特征点法的主要通过图像的特征点提取,特征点匹配,构建最小化重投影误差,使用非线性优化估计帧间位姿。特征点法是传统的视觉里程计方法,并已经有了较多成功的应用实例,但是也存在一些问题。特征点法的特征点提取和匹配步骤存在比较耗时和有误匹配的问题,且获取的特征点较为稀疏,无法实现地图复用,当图像有运动模糊、低光照、重复纹理或缺少纹理等情况时,特征点法的准确性会受到较大影响。鉴于特征点法的问题,研究者提出了直接对齐两帧图片的像素亮度值的直接法和半直接法,直接法通过最小化光度误差来估计两帧间的位姿。相比于特征点法,直接法不再需要提取和匹配特征点,而是基于两帧图片对应像素点的亮度值不变的假设,通过相机模型直接使用像素点的值构造光度误差,并最小化光度误差估计位姿参数。稠密的直接法会使用图片上所有像素点来计算光度误差,计算量是巨大的,一般视觉里程计中的直接法是半稠密的,也就是只使用有一定梯度信息的像素点来计算光度误差,可以保持位姿估计的相对准确性的同时让直接法具备了实时性。直接法在相机运动不剧烈时能得到鲁棒而准确的位姿估计结果,且因较为充分地利用整个图像信息,增加了算法对运动模糊,重复纹理和缺少纹理的鲁棒性。直接法的主要缺点为,进行对齐的两帧图像需要符合亮度不变的假设,图片亮度差异程度决定了直接法的估计结果的准确性。较小的亮度差异下直接法仍能工作,较大的亮度差异下直接法会得到错误的位姿估计。

[0004] 视觉里程计所使用的视觉传感器一般是单目相机,双目相机或RGB-D相机,无论使用这三种相机中的哪一种,都可以基于特征点法或直接法实现视觉里程计。基于纯单目相机的视觉里程计方法较为复杂,在位姿估计的同时还需要重建三维的地图点,且估计得到的位姿和三维点没有绝对尺度,容易出现尺度漂移,需要较好的初始化。双目相机可通过双目立体匹配得到图像场景中像素点的深度值,图像处理工作量大,在昏暗或纹理特征不明显的环境不适用。RGB-D相机能同时获取场景的彩色图像和深度图像,深度图像通过红外结构光或飞行时间法的硬件结构获取,因易受日光影响多数在室内使用,且深度测量的范围受限。基于已有深度的视觉里程计能估计得到含有绝对尺度的运动轨迹,一般没有尺度漂移,位姿估计结果更准确。

发明内容

[0005] 为克服现有技术的不足,本发明旨在提出一种基于直线阴影的RGB-D视觉里程计方法,通过平面约束遮挡线和被遮挡点线的几何关系,构建最小重投影误差方程,通过非线性优化求解位姿。为此,本发明采取的技术方案是,基于线段阴影的深度相机视觉里程测量方法,首先提取图像中的平面和线段结构并进行参数拟合,在普朗克(Plücker)坐标系下定义方线段和平面的表示方式;使用平面 π 、遮挡线L和平面 π_L 进行位姿估计;最后通过被遮挡线匹配约束提高位姿估计的精度。

[0006] 具体步骤如下:

[0007] S1.通过深度相机RGB-D传感器获取环境的彩色和深度图像信息,使用彩色和深度信息提取图像中的平面和直线结构,直线包含遮挡处和被遮挡处的点;

[0008] S2.定义三维空间直线L的Plücker坐标表达式,如下:

$$[0009] \quad L = [u^T, v^T]^T$$

[0010] 其中向量 $u \in R^3$ 垂直解析平面 π_L ,由原点0和直线L构成,向量 $v \in R^3$ 表示直线L的方向向量,并且L满足Plücker约束:

$$[0011] \quad u^T v = 0$$

[0012] L的Plücker矩阵定义为:

$$[0013] \quad L = \begin{bmatrix} [u]_{\times} & v \\ -v^T & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0014] 原点与遮挡线构成的平面 π_L 定义为:

$$[0015] \quad \pi_L = L^* \cdot \tilde{O} = [u^T, 0]^T \quad (2)$$

[0016] 其中 $\tilde{O} = [0, 0, 0, 1]^T$ 为原点的齐次坐标, L^* 为L的对偶Plücker矩阵,计算方法如下:

$$[0017] \quad L^* = \begin{bmatrix} [v]_{\times} & u \\ -u^T & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0018] S3.定义约束平面 $\pi = [n^T, d]^T$ 上被遮挡点构成的直线表达式 L_{π} 的Plücker矩阵如下:

$$[0019] \quad L_{\pi} = [-du^T, (u \times n)^T]^T \quad (4)$$

[0020] 其中 n^T 表示平面法向量,d表示平面到原点的距离, L_{π} 的对偶Plücker矩阵为:

$$[0021] \quad L_{\pi}^* = \pi \pi_L^T - \pi_L \pi^T = \begin{bmatrix} [u \times n]_{\times} & -du \\ du^T & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0022] S4.使用平面 π 和遮挡线L进行位姿估计,右上角标c和r分别表示当前帧和参考帧,平面的刚体变换 $T_{cr}(\pi)$ 表达式为:

$$[0023] \quad T_{cr}(\pi) = \begin{bmatrix} T_{cr}(n) \\ T_{cr}(n, d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} & 0 \\ -t_{cr}^T R_{cr} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} n \\ -t_{cr}^T R_{cr} + d \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0024] 遮挡线的刚体变换 $T_{cr}(L)$ 为:

$$[0025] \quad T_{cr}(L) = \begin{bmatrix} T_{cr}(u, v) \\ T_{cr}(v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} & [t_{cr}]_{\times} R_{cr} \\ 0 & R_{cr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} u + [t_{cr}]_{\times} R_{cr} v \\ R_{cr} v \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0026] 为了求解位姿,定义重投影误差函数:

$$[0027] \quad E(R_{cr}, t_{cr}) = \alpha_{\pi} \sum_{j=1}^{N_{\pi}} \|\pi_j^c - T_{cr}(\pi_j^r)\|_2^2 + \alpha_L \sum_{i=1}^{N_L} \|L_i^c - T_{cr}(L_i^r)\|_2^2 = E_1(R_{cr}) + E_2(R_{cr}, t_{cr}) \quad (8)$$

[0028] 其中

$$[0029] \quad E_1(R_{cr}) = \alpha_{\pi} \sum_{j=1}^{N_{\pi}} \|n_j^c - T_{cr}(n_j^r)\|_2^2 + \alpha_L \sum_{i=1}^{N_L} \|v_i^c - T_{cr}(v_i^r)\|_2^2 \quad (9)$$

$$[0030] \quad E_2(R_{cr}, t_{cr}) = \alpha_{\pi} \sum_{j=1}^{N_{\pi}} \|d_j^c - T_{cr}(d_j^r)\|_2^2 + \alpha_L \sum_{i=1}^{N_L} \|u_i^c - T_{cr}(u_i^r, v_i^r)\|_2^2 \quad (10)$$

[0031] 通过最小化 (9) 式可求得旋转变量 R_{cr} , 最小化 (10) 式求得位移变量 t_{cr} ;

[0032] S5. 通过被遮挡线匹配进一步优化位姿, 参考帧相对于当前帧的原点坐标为 $O_c^r = t_{cr}$, 参考帧坐标系下的平面 π_{Lr}^c 由遮挡线 L^c 和参考帧的原点 O_c^r 构成, 计算方式如下:

$$[0033] \quad \pi_{Lr}^c = L^{c*} \cdot \tilde{O}_r^c = \begin{bmatrix} [v^c]_{\times} t_{cr} + u^c \\ -u^{cT} t_{cr} \end{bmatrix} \quad (11)$$

[0034] 被遮挡线由约束平面 π 和平面 π_{Lr}^r 相交所得, 其对偶 Plücker 矩阵如下:

$$[0035] \quad L_{\pi r}^{c*} = \pi^c \pi_{Lr}^{cT} - \pi_{Lr}^c \pi^{cT} = \begin{bmatrix} [v_{\pi r}^c]_{\times} & u_{\pi r}^c \\ -u_{\pi r}^{cT} & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0036] 其中

$$[0037] \quad u_{\pi r}^c = -d^c([v^c]_{\times} t_{cr} + u^c) - n^c t_{cr}^T u^c \quad (13)$$

$$[0038] \quad v_{\pi r}^c = -[n^c]_{\times} [v^c]_{\times} t_{cr} + [u^c]_{\times} n^c \quad (14)$$

[0039] 参考帧的遮挡线、被遮挡线和约束平面的观测分别表示为: $L^r, L_{\pi r}^r, \pi^r$, 通过匹配当前帧与参考帧被遮挡线 $L_{\pi r}^r$ 精化上文求得的 R_{cr}, t_{cr} 值, 如果 R_{cr}, t_{cr} 正确收敛, 且满足 $\pi^c = T_{cr}(\pi^r)$, $L^c = T_{cr}(L^r)$, 则 $L_{\pi r}^c$ 与 $L_{\pi r}^r$ 是匹配的, 定义新的目标函数:

$$[0040] \quad F(R_{cr}, t_{cr}) = \sum_{i=1}^{N_L} \{\|L_{\pi r i}^c - T_{cr}(L_{\pi r i}^r)\|_2^2 + \|L_i^c - T_{cr}(L_i^r)\|_2^2\} + \sum_{j=1}^{N_{\pi}} \|\pi_j^c - T_{cr}(\pi_j^r)\|_2^2 \quad (15)$$

[0041] 通过最小化 (15) 式求得最终的旋转和平移矩阵。

[0042] 本发明的特点及有益效果是:

[0043] 1) 提出一种最新的 RGB-D 视觉里程计算法, 通过图像中的平面约束平面和遮挡线, 构建几何关系求解位姿, 不同于传统的基于平面和线段特征匹配的里程计方法, 本发明更高效。

[0044] 2) 融合被遮挡线的投影关系, 进一步优化位姿, 提高了算法的准确性, 并通过平面的约束关系, 避免错误的线段特征匹配, 增加了算法的鲁棒性。

附图说明:

[0045] 图1基于线段阴影的RGB-D视觉里程计说明图。

[0046] A: 空间直线阴影模型, 子图B: 遮挡线运动估计模型子图C: 被遮挡线匹配模型。

具体实施方式

[0047] 本发明采用的技术方案为：一种基于直线阴影的RGB-D视觉里程计方法，其中，包括以下步骤：

[0048] S1. 通过RGB-D传感器获取环境的彩色和深度图像信息，使用彩色和深度信息提取图像中的平面和直线结构，直线包含遮挡处和被遮挡处的点。

[0049] S2. 定义三维空间直线L的Plücker坐标表达式，如下：

$$[0050] \quad L = [u^T, v^T]^T$$

[0051] 其中向量 $u \in R^3$ 垂直解析平面 π_L ，(由原点0和直线L构成)，向量 $v \in R^3$ 表示直线L的方向向量，并且L满足Plücker约束：

$$[0052] \quad u^T v = 0$$

[0053] L的Plücker矩阵定义为：

$$[0054] \quad L = \begin{bmatrix} [u]_{\times} & v \\ -v^T & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0055] 原点与遮挡线构成的平面 π_L 定义为：

$$[0056] \quad \pi_L = L^* \cdot \tilde{O} = [u^T, 0]^T \quad (2)$$

[0057] 其中 $\tilde{O} = [0, 0, 0, 1]^T$ 为原点的齐次坐标， L^* 为L的对偶Plücker矩阵，计算方法如下：

$$[0058] \quad L^* = \begin{bmatrix} [v]_{\times} & u \\ -u^T & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0059] S3. 定义约束平面 $\pi = [n^T, d]^T$ 上被遮挡点构成的直线表达式 L_{π} 的Plücker矩阵如下：

$$[0060] \quad L_{\pi} = [-du^T, (u \times n)^T]^T \quad (4)$$

[0061] 其中 n^T 表示平面法向量， d 表示平面到原点的距离， L_{π} 的对偶Plücker矩阵为：

$$[0062] \quad L_{\pi}^* = \pi \pi_L^T - \pi_L \pi^T = \begin{bmatrix} [u \times n]_{\times} & -du \\ du^T & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0063] S4. 使用平面 π 和遮挡线L进行位姿估计。右上角标 c 和 r 分别表示当前帧和参考帧，平面的刚体变换 $T_{cr}(\pi)$ 表达式为：

$$[0064] \quad T_{cr}(\pi) = \begin{bmatrix} T_{cr}(n) \\ T_{cr}(n, d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} & 0 \\ -t_{cr}^T R_{cr} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} n \\ -t_{cr}^T R_{cr} + d \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0065] 遮挡线的刚体变换 $T_{cr}(L)$ 为：

$$[0066] \quad T_{cr}(L) = \begin{bmatrix} T_{cr}(u, v) \\ T_{cr}(v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} & [t_{cr}]_{\times} R_{cr} \\ 0 & R_{cr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} u + [t_{cr}]_{\times} R_{cr} v \\ R_{cr} v \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0067] 为了求解位姿，定义重投影误差函数：

$$[0068] \quad E(R_{cr}, t_{cr}) = \alpha_{\pi} \sum_{j=1}^{N_{\pi}} \|\pi_j^c - T_{cr}(\pi_j^r)\|_2^2 + \alpha_L \sum_{i=1}^{N_L} \|L_i^c - T_{cr}(L_i^r)\|_2^2 = E_1(R_{cr}) + E_2(R_{cr}, t_{cr}) \quad (8)$$

[0069] 其中

$$[0070] \quad E_1(R_{cr}) = \alpha_{\pi} \sum_{j=1}^{N_{\pi}} \|n_j^c - T_{cr}(n_j^r)\|_2^2 + \alpha_L \sum_{i=1}^{N_L} \|v_i^c - T_{cr}(v_i^r)\|_2^2 \quad (9)$$

$$[0071] \quad E_2(R_{cr}, t_{cr}) = \alpha_\pi \sum_{j=1}^{N_\pi} \|d_j^c - T_{cr}(n_j^c, d_j^c)\|_2^2 + \alpha_L \sum_{i=1}^{N_L} \|u_i^c - T_{cr}(u_i^c, v_i^c)\|_2^2 \quad (10)$$

[0072] 通过最小化 (9) 式可求得旋转变量 R_{cr} , 最小化 (10) 式求得位移变量 t_{cr} 。

[0073] S5. 通过被遮挡线匹配进一步优化位姿。参考帧相对于当前帧的原点坐标为 $O_c^r = t_{cr}$, 参考帧坐标系下的平面 π_{Lr}^c 由遮挡线 L^c 和参考帧的原点 O_c^r 构成, 计算方式如下:

$$[0074] \quad \pi_{Lr}^c = L^{c*} \cdot \tilde{O}_r^c = \begin{bmatrix} [v^c]_\times t_{cr} + u^c \\ -u^{cT} t_{cr} \end{bmatrix} \quad (11)$$

[0075] 被遮挡线由约束平面 π 和平面 π_L^r 相交所得, 其对偶 Plücker 矩阵如下:

$$[0076] \quad L_{\pi r}^{c*} = \pi^c \pi_{Lr}^{cT} - \pi_{Lr}^c \pi^{cT} = \begin{bmatrix} [v_{\pi r}^c]_\times & u_{\pi r}^c \\ -u_{\pi r}^{cT} & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0077] 其中

$$[0078] \quad u_{\pi r}^c = -d^c([v^c]_\times t_{cr} + u^c) - n^c t_{cr}^T u^c \quad (13)$$

$$[0079] \quad v_{\pi r}^c = -[n^c]_\times [v^c]_\times t_{cr} + [u^c]_\times n^c \quad (14)$$

[0080] 参考帧的遮挡线、被遮挡线和约束平面的观测分别表示为: $L^r, L_{\pi r}^r, \pi^r$, 通过匹配当前帧与参考帧被遮挡线 $\overline{L_{\pi r}^r}$ 精化上文求得的 R_{cr}, t_{cr} 值。如果 R_{cr}, t_{cr} 正确收敛, 且满足 $\pi^c = T_{cr}(\pi^r)$, $L^c = T_{cr}(L^r)$, 则 $L_{\pi r}^c$ 与 $L_{\pi r}^r$ 是匹配的, 定义新的目标函数:

$$[0081] \quad F(R_{cr}, t_{cr}) = \sum_{i=1}^{N_L} \{ \|L_{\pi r i}^c - T_{cr}(L_{\pi r i}^r)\|_2^2 + \|L_i^c - T_{cr}(L_i^r)\|_2^2 \} + \sum_{j=1}^{N_\pi} \|\pi_j^c - T_{cr}(\pi_j^r)\|_2^2 \quad (15)$$

[0082] 通过最小化 (15) 式求得最终的旋转和平移矩阵。

[0083] 下面结合附图和具体实例进一步详细说明本发明。

[0084] 下面结合附图对本发明的具体实施方案做进一步的描述: 第一步, 首先使用现有算法提取图像中的平面和线段结构并进行参数拟合, 在 Plücker 坐标系下定义方线段和平面的表示方式, 图1中子图A中遮挡线 L 表示如下:

$$[0085] \quad L = [u^T, v^T]^T$$

[0086] 其中向量 $u \in R^3$ 垂直平面 π_L (由原点 O 和直线 L 构成), 向量 $v \in R^3$ 表示直线 L 的方向向量, 并且 L 满足 Plücker 约束:

$$[0087] \quad u^T v = 0$$

[0088] L 的 Plücker 矩阵定义为:

$$[0089] \quad L = \begin{bmatrix} [u]_\times & v \\ -v^T & 0 \end{bmatrix}$$

[0090] 平面 π_L 定义为:

$$[0091] \quad \pi_L = L^* \cdot \tilde{O} = [u^T, 0]^T$$

[0092] 其中 $\tilde{O} = [0, 0, 0, 1]^T$ 为原点的齐次坐标, L^* 为 L 的对偶 Plücker 矩阵, 计算方法如下:

$$[0093] \quad L^* = \begin{bmatrix} [v]_\times & u \\ -u^T & 0 \end{bmatrix}$$

[0094] 然后定义约束平面 $\pi = [n^\top, d]^\top$ 上被遮挡点构成的直线表达式 L_π 的Plücker矩阵如下:

$$[0095] \quad L_\pi = [-du^\top, (u \times n)^\top]^\top$$

[0096] 其中 n^\top 表示平面法向量, d 表示平面到原点的距离, L_π 的对偶Plücker矩阵为:

$$[0097] \quad L_\pi^* = \pi \pi_L^T - \pi_L \pi^T = \begin{bmatrix} [u \times n]_\times & -du \\ du^\top & 0 \end{bmatrix}$$

[0098] 第二步,使用平面 π 、遮挡线 L 和平面 π_L 进行位姿估计,如子图B中,在当前坐标系下定义各个变量的表示方式: O_r^c 和 O_c^c 分别表示参考帧和当前帧的原点坐标, L^c 表示遮挡线, π^c 表示约束平面, π_L^c 和 π_{Lr}^c 表示原点与遮挡线构成的平面, π^c 为约束平面,右上角标 c 和 r 分别表示当前帧和参考帧,平面 π 的刚体变换 $T_{cr}(\pi)$ 表达式为:

$$[0099] \quad T_{cr}(\pi) = \begin{bmatrix} T_{cr}(n) \\ T_{cr}(n, d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} & 0 \\ -t_{cr}^T R_{cr} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} n \\ -t_{cr}^T R_{cr} + d \end{bmatrix}$$

[0100] 遮挡线 L 的刚体变换 $T_{cr}(L)$ 为:

$$[0101] \quad T_{cr}(L) = \begin{bmatrix} T_{cr}(u, v) \\ T_{cr}(v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} & [t_{cr}]_\times R_{cr} \\ 0 & R_{cr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{cr} u + [t_{cr}]_\times R_{cr} v \\ R_{cr} v \end{bmatrix}$$

[0102] 定义目标函数,表示两帧之间约束平面和遮挡线的重投影误差,计算方式如下:

$$[0103] \quad E(R_{cr}, t_{cr}) = \alpha_\pi \sum_{j=1}^{N_\pi} \|\pi_j^c - T_{cr}(\pi_j^r)\|_2^2 + \alpha_L \sum_{i=1}^{N_L} \|L_i^c - T_{cr}(L_i^r)\|_2^2 = E_1(R_{cr}) + E_2(R_{cr}, t_{cr})$$

[0104] 其中

$$[0105] \quad E_1(R_{cr}) = \alpha_\pi \sum_{j=1}^{N_\pi} \|n_j^c - T_{cr}(n_j^r)\|_2^2 + \alpha_L \sum_{i=1}^{N_L} \|v_i^c - T_{cr}(v_i^r)\|_2^2$$

$$[0106] \quad E_2(R_{cr}, t_{cr}) = \alpha_\pi \sum_{j=1}^{N_\pi} \|d_j^c - T_{cr}(d_j^r)\|_2^2 + \alpha_L \sum_{i=1}^{N_L} \|u_i^c - T_{cr}(u_i^r, v_i^r)\|_2^2$$

[0107] 通过最小化 $E_1(R_{cr})$ 可求得旋转变量 R_{cr} ,最小化 $E_2(R_{cr}, t_{cr})$ 求得位移变量 t_{cr} 。

[0108] 最后一步,通过被遮挡线匹配约束提高位姿估计的精度。子图C中参考帧相对于当前帧的原点坐标为 $O_c^r = t_{cr}$,参考帧坐标系下的解析平面 π_{Lr}^c 由遮挡线 L^c 和参考帧的原点 O_c^r 构成,计算方式如下:

$$[0109] \quad \pi_{Lr}^c = L^{c*} \cdot \tilde{O}_r^c = \begin{bmatrix} [v^c]_\times t_{cr} + u^c \\ -u^{cT} t_{cr} \end{bmatrix}$$

[0110] 被遮挡线 $L_{\pi r}^c$ 由约束平面 π 和平面 π_{Lr}^c 相交所得,其对偶Plücker矩阵如下:

$$[0111] \quad L_{\pi r}^{c*} = \pi^c \pi_{Lr}^{cT} - \pi_{Lr}^c \pi^{cT} = \begin{bmatrix} [v_{\pi r}^c]_\times & u_{\pi r}^c \\ -u_{\pi r}^{cT} & 0 \end{bmatrix}$$

[0112] 其中

$$[0113] \quad u_{\pi r}^c = -d^c([v^c]_{\times} t_{cr} + u^c) - n^c t_{cr}^T u^c$$

$$[0114] \quad v_{\pi r}^c = -[n^c]_{\times} [v^c]_{\times} t_{cr} + [u^c]_{\times} n^c$$

[0115] 参考帧的遮挡线、被遮挡线和约束平面的观测分别表示为： $L^r, L_{\pi r}^r, \pi^r$ ，通过匹配当前帧与参考帧的被遮挡线 $L_{\pi r}^r$ 优化 R_{cr}, t_{cr} 的值。如果 R_{cr}, t_{cr} 正确收敛，且满足 $\pi^c = T_{cr}(\pi^r)$ ， $L^c = T_{cr}(L^r)$ ，则 $L_{\pi r}^c$ 与 $L_{\pi r}^r$ 是正确匹配，子图C中橙色部分表示通过位姿 T_{cr} 变换后的线段或平面，得到新的重投影误差函数如下：

$$[0116] \quad F(R_{cr}, t_{cr}) = \sum_{i=1}^{N_L} \{ \|L_{\pi r i}^c - T_{cr}(L_{\pi r i}^r)\|_2^2 + \|L_i^c - T_{cr}(L_i^r)\|_2^2 \} + \sum_{j=1}^{N_{\pi}} \| \pi_j^c - T_{cr}(\pi_j^r) \|_2^2$$

[0117] 通过最小化 $F(R_{cr}, t_{cr})$ 求得最终的旋转和平移矩阵。

[0118] 以上所述仅为本发明的较佳实施例，并不用以限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内，所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

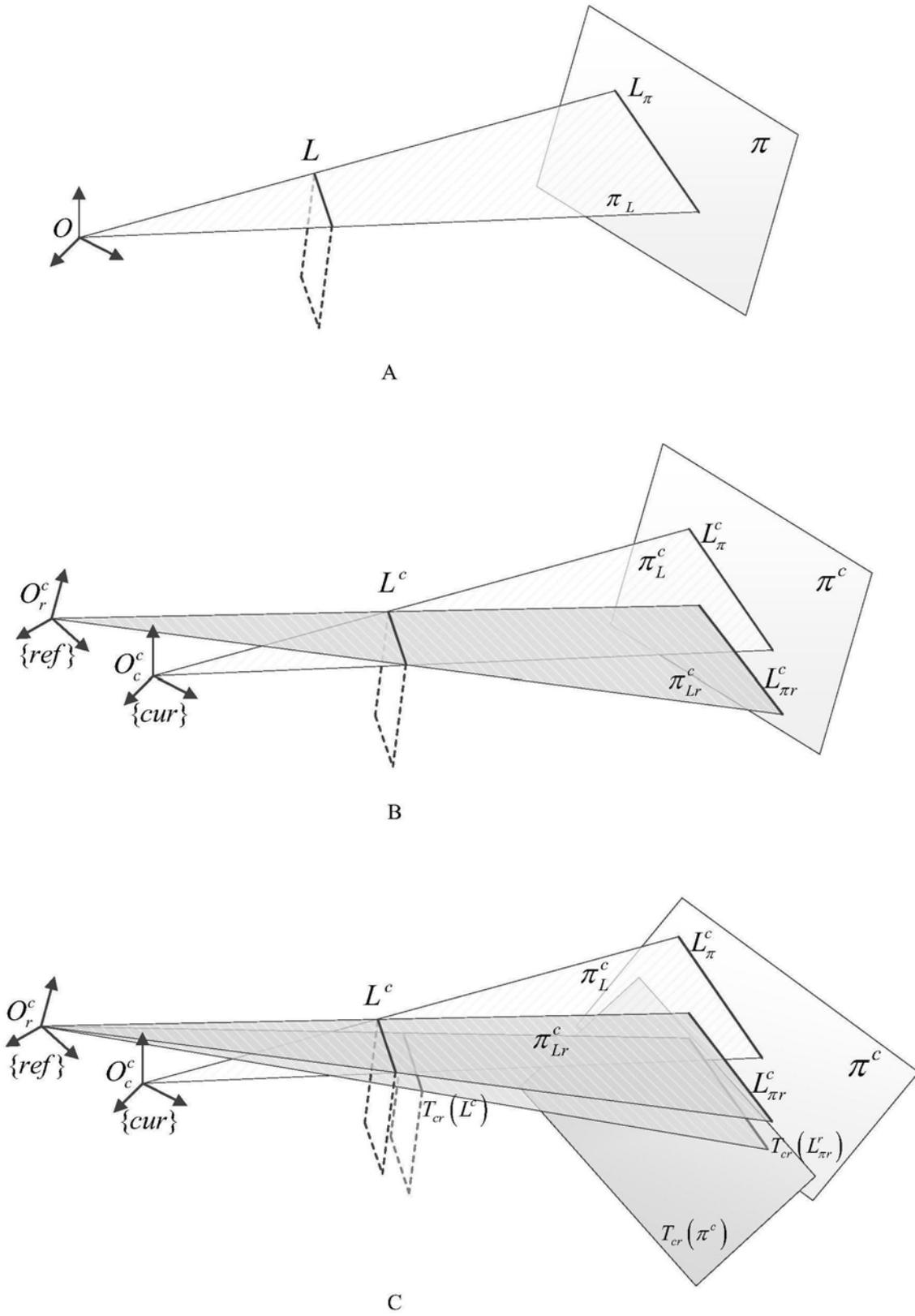


图1