

基于双目相机的视觉里程计

赵文恺, 李 刚⁺

(广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘 要: 针对移动机器人视觉导航定位需求, 提出一种基于双目相机的视觉里程计改进方案。对于特征信息冗余问题, 改进 ORB (oriented FAST and rotated BRIEF) 算法, 引入多阈值 FAST 图像分割思想, 为使误匹配尽可能减少, 主要运用快速最近邻和随机采样一致性算法; 一般而言, 运用的算法主要是立体匹配算法, 此算法的特征主要指灰度, 对此算法做出改进, 运用一种新型的双目视差算法, 此算法主要以描述子为特征, 据此恢复特征点深度; 为使所得位姿坐标具有相对较高的准确度, 构造一种特定的最小二乘问题, 使其提供初值, 以相应的特征点三维坐标为基础, 基于有效方式对相机运动进行估计。根据数据集的实验结果可知, 所提双目视觉里程具有相对而言较好的精度及较高的实时性。

关键词: 移动机器人; 双目视觉里程计; ORB 算法; 立体匹配; 最小二乘

中图分类号: TP242 **文献标识号:** A **文章编号:** 1000-7024 (2020) 04-1133-06

doi: 10.16208/j.issn1000-7024.2020.04.038

Visual odometry based on binocular camera

ZHAO Wen-kai, LI Gang⁺

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Aiming at the visual navigation positioning requirements of mobile robot, a visual odometry based on binocular camera was proposed. For the problem of feature information redundancy, the improved ORB (oriented FAST and rotated BRIEF) algorithm was introduced, and the multi-threshold FAST image segmentation idea was introduced. To reduce mis-matching as much as possible, the fast nearest neighbor and random sampling consistency algorithms were mainly used. Generally speaking, the algorithm used is mainly a stereo matching algorithm. The characteristics of this algorithm mainly refer to grayscale. This algorithm was improved and a new binocular disparity algorithm was used. This algorithm mainly used descriptors as features. Therefore, the feature point depth was restored. To obtain the relatively high accuracy of the pose coordinates, a specific least squares problem was constructed to provide an initial value, and based on the corresponding 3D coordinates of the feature points, camera motion was estimated based on efficient way. According to the experimental results of the data set, the binocular vision mileage of this design has relatively good accuracy and high real-time performance.

Key words: mobile robot; binocular visual odometry; ORB algorithm; stereo matching; least squares

0 引 言

近年来, 随着机器人行业的快速发展, 视觉定位技术成为机器人导航领域的重要研究方向^[1,2], 其中视觉里程计 (visual odometry, VO) 是机器人定位的重要方法之一。若以传感器选型为基础, 可对视觉里程计进行详细地分类, 共涉及 3 种类型, 依次是单目、双目和深度相机^[3], 在这 3 种相机类型中, 深度相机与单目相机均存在一定的缺陷,

例如, 具有相对较大的噪声等^[4], 故而, 在 VO 领域被普遍运用的相机类型主要是双目相机^[5-7]。由于采集图像信息在一定程度上存在差异性, 故而, 又可细分为两种方法, 第一, 特征点法^[8], 此方法具有相对而言比较强的鲁棒性, 即便噪音十分嘈杂, 也可顺利地完成任务, 因此, 此方法也成为一项核心方法; 第二, 直接法^[9], 应用频率相对较低。

现阶段, 针对 VO 领域, 无论是国内, 还是国外, 均

收稿日期: 2018-12-27; 修订日期: 2020-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51466001)

作者简介: 赵文恺 (1993-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 研究方向为视觉定位; ⁺通讯作者: 李刚 (1972-), 男, 吉林白山人, 博士, 教授, 研究方向为控制理论与控制工程。E-mail: 492068901@qq.com

已获得了许多优异的研究成果。根据文献 [10] 可知, 其以视觉词典为核心, 通过一系列设计得到了视觉里程计, 通过对图像库构造字典匹配位姿, 这种方法体现出了十分明显的优势, 即具有相对较高的匹配精度, 然而, 由于整个操作过程具有一定的复杂性, 故而, 具体的应用依然存在局限性。曹文平^[11]对此做出了相应的改进, 运用 BM 立体匹配算法, 基于特定的方式计算了双目视差, 并以像素灰度为基础, 基于有效手段完成了代价函数的构造操作, 尽管具有相对而言比较高的运算速度, 但依然存在一定的缺陷, 这主要体现于视差图方面, 十分容易导致空洞点的出现。此后, 文献 [12] 提出了一种改进后的双目相机, 此相机的 VO 主要以直接法为核心而完成相应的设计, 表现出了一定的优势, 主要指对大规模稠密地图的恢复方面, 然而, 该相机的应用却需要借助于合适的光照, 故限制性因素较强。

现阶段, 视觉里程计依然面临一系列问题, 例如, 设备成本相对较高、定位精度有待于进一步改进等, 对此, 本设计运用的视觉里程计主要有一种, 即以双目相机为核心的视觉里程计。提取特征点时, 本文主要运用了 ORB 算法, 使特征点范围在原有基础上有所增加, 从而确保了信息的全面性, 同时, 还最大程度确保了 ORB 的实时响应性; 为了使视差获取更具精确度, 本设计构建代价方程计算视差时, 主要基于 BRIEF 描述子完成了相应的构建过程; 为了达到深入改进 VO 精度的目的, 以 PnP 的 3D-2D 模型为基础, 提出一种特定的迭代算法, 即提供初值的算法, 并基于 g2o 对相机所在位姿进行计算。

1 基于改进 ORB 的特征点检测与匹配

针对特征点提取, 最常见的一些算法有 SIFT, SURF, ORB。在这些算法中, SIFT 算法与 SURF 算法均具有一定的缺陷, 因而, 不能满足本设计的相应要求。基于对 VO 实时性的考虑, 本文对特征点提取时, 运用的算法主要有一种, 即基于 ORB 的特征点提取算法。一般而言, ORB 算法对特征匹配时, 主要通过两个操作完成相应的匹配过程, 第一, 对 FAST 关键点进行提取; 第二, 完成 BRIEF 描述子的构造过程, 在满足尺度不变性的基础上, 并尽可能确保旋转不变性的前提下, 引入灰度质心, 并引入图像金字塔。对于 ORB 算法, 尽管其最大程度确保了特征提取的运算速度, 然而, 在阈值方面, 因 FAST 的设置相对而言比较单调, 十分容易导致分布不均现象, 将在极大程度上影响配准精度。

1.1 基于改进 ORB 的特征点检测

基于上述问题, 本文运用的算法主要是特定的 ORB 算法, 此算法主要以四叉树图像分割为基础^[13], 对多阈值 FAST 提取特征点进行了相应的设置。首先采取一系列有

效措施完成了高斯图像金字塔的构建操作, 以各个尺度为基础, 对相应的单元格进行划分, 而其又在一定程度上有关于待检测关键点, 以各个单元格为基准, 采取有效措施完成相应地 FAST 检测, 对于关键点数目, 若基于一系列假设检测即可获得其数值, 则随后展开后续单元格的检测, 否则将进入二次检测过程。检测后, 对于获得的特征点, 再次基于特定的方式完成相应的划分操作, 主要基于四叉树方式, 为了使划分结果在一定程度上具有平衡性, 应以特征点数目为核心, 完成相应的顺序排列操作, 然后展开相应的节点管理工作。最后对其特征方向展开具体的计算操作, 并完成描述子的计算过程。

存储特征点时, 采取的存储方式相对而言比较特殊, 主要为四叉树方式, 不但能够最大程度地节约存储空间, 还能够使特征点的分布更具匀称性。详情如图 1 所示。



图 1 改进 ORB 算法框架

四叉树主要运用于二位空间分割, 并对其做出了详细定义, 即一个节点下, 可存在的节点数相对而言比较小, 最多有 4 个节点, 将图像细分为多个区域, 主要有 4 个区域, 详情如图 2 所示, 整个空间被细分为多个同等的象限, 共计 4 个, 如图 2 所示, 分别是 UL, UR, BL, BR, n1, n2, n3, n4 为展开节点, 圆圈代表的含义主要有一点, 主要指检测到的 FAST 角点。

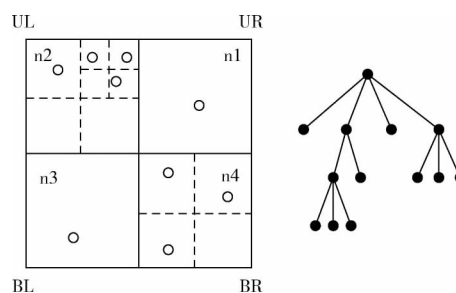


图 2 四叉树索引

1.2 基于改进 ORB 的特征点匹配

视觉里程计中, 最核心的一项环节为特征匹配环节, 若特征匹配具有较好的合理性, 则十分有利于后续的位姿估计。针对匹配方法, 比较常见的方法主要涉及两种, 第一种, 暴力匹配 (brute-force matcher), 此算法相对而言比较简便, 然而, 若特征点数量在一定程度上有所增加, 则总体的运行时间必定会有所延长; 第二种, 快速近似最近邻 (FLANN), 此算法主要运用于对实时性要求相对较高的场合。然而, 若仅以 FLANN 为基准, 则必定会在一定程度上导致误匹配, 故而, 本设计运用的算法则相对特殊, 主要为 FLANN 和 RANSAC 的组合匹配算法。

RANSAC 算法具有自身独特的优势, 主要体现于一点, 即可使噪声得到最大程度地消除。在匹配图像时, RANSAC 算法的关键步骤为采取有效方式完成单应性矩阵的计算过程, 这体现于多视图几何中, 主要指两幅图片特征点处于共同平面上的映射关系。假定像素点坐标是 (u, v) , 单应性矩阵 H 定义为

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

若要计算 H 矩阵的 8 个参数, 至少需要 4 对匹配点, 而实际给定点数远远大于 8 对, 因此使用随机一致性检验求解。描述如下:

- (1) 选定输入参数时, 以多数的匹配点为核心, 采取特定的方式选定这些匹配点的 4 对;
- (2) 经过相应的采集处理后, 以所得 8 个点为基础, 采取有效方式完成单应性矩阵 H 的估算过程;
- (3) 以上述 H 矩阵为基准, 采取特定的计算方式对剩余匹配成功点对数 n 进行相应的验证;
- (4) 迭代 K 次, 找到最大 n 满足的矩阵 H 。

2 基于 BRIEF 描述子的双目视差

立体匹配共涉及两种, 第一种, 局部立体匹配^[14], 这种算法又可细分为两种, 分别为 BM 和 SGBM, 具有相对而言比较差的视觉效果; 第二种, 全局立体匹配, 此算法具有相对较高的计算精度, 然而, 整体的计算量相对庞大, 在具体运用过程中, 并无较好的应用型。本设计运用的算法同样未局部立体匹配算法, 但这种算法主要以 BRIEF 描述子为基础, 故整体性能有所改进, 对特征点视差的提取具有一定的优势。

此前, 基于 ORB 特征提取能够获得 BRIEF 描述子, BRIEF 是一种十分特殊的二进制编码, 其组成方式主要为向量组成, 即 0, 1 向量, 在特征点周围的图像块 A 处随意

选定像素点 $p1$ 和 $p2$, $A(p1)$ 代表的含义相对固定, 主要为 $p1$ 点灰度值, $A(p2)$ 同样具有固定含义, 即 $p2$ 点灰度值, 若 $I(p1)$ 与 $I(p2)$ 相比, 后者数值相对较大, 则取 0, 反之, 则取 1。定义式 (2) 为

$$\tau(A: p1, p2) = \begin{cases} 1, & A(p1) < A(p2) \\ 0, & A(p1) > A(p2) \end{cases} \quad (2)$$

以得到的 BRIEF 向量为特征信息进行匹配, 算法描述如下:

- (1) 将待匹配特征点为核心, 采取有效方式与手段在参考图像中构建图像主窗口, 中心点的表征方式主要基于一种, 即多个像素的 BRIEF 表征;
- (2) 相同行内, 以目标图像为基准, 用窗口完成相应的扫描操作, 并分别构建等同的子窗口;
- (3) 构造代价函数 (cost function), 对特定的相似度进行评估, 主要指主窗口与子窗口, 并在确定目标点时, 以此为基准, 即以具有相对较高相似度的最高窗口的中点确定为目标点;
- (4) 以左右图像为基础, 采取适当的计算方式确定其像素点视差;
- (5) 对 (1) ~ (4) 步骤进行重复操作, 获得所有有用的像素点视差。

详情如图 3 所示。

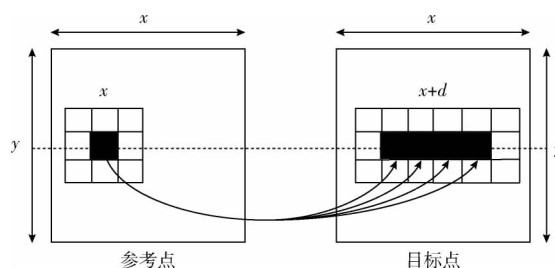


图 3 立体匹配

常用代价函数构造方法有:

SAD (sum of absolute difference)

$$S(x, y, d) = \sum_{i=-n}^n |L(x+i, y+i) - R(x+d+i, y+i)| \quad (3)$$

SSD (sum of squared difference)

$$S(x, y, d) = \sum_{i=-n}^n (L(x+i, y+i) - R(x+d+i, y+i))^2 \quad (4)$$

NCC (normalized cross correlation)

$$S(x, y, d) = \frac{\sum_{i=-n}^n L(x+i, y+i) R(x+d+i, y+i)}{\sqrt{\sum_{i=-n}^n L(x+i, y+i)^2 \sum_{i=-n}^n R(x+d+i, y+i)^2}} \quad (5)$$

式中: L 、 R 代表的含义相对而言比较固定, 主要指为左右像素特征, i 、 j 同样具有各自的固定含义, 分别为遍历整个窗口元素, d 值的计算次数每增加一次, 则应相应地增加 1, 当 S 的数值处于峰值时, 则相应的匹配会处于结束状态, 而所得点便是匹配点, d 代表的含义相对固定, 指视差。

3 运动估计

以前后时刻两帧图像为基础, 采取特定的操作方式获得特征匹配点后, 则应对其运动展开合理的预估。基于双目相机, 借助于内置的特定运行方式能够得到特征点 3D 坐标, 并可由此得到特征点在相应图像的 2D 坐标, 故而, 对相机运动进行估计时, 可基于 PnP (perspective-n-point) 予以操作。PnP 是 3D-2D 运动恢复模型, 具体的求解方法共有多种, 例如, EPnP 等。然而, 所用的方法均为线性计算方法, 均有一定的缺陷。本设计所用的运动估计方法则恰好相反, 主要为以非线性优化为基础的方法, 先以线性方法为核心, 采取有效措施完成相应的初值求解过程, 再完成最小二乘方程的构造操作, 从而实现优化位姿的目的^[15]。

3.1 PnP 投影模型

PnP 在求解位姿时至少需要 3 对 3D-2D 点, 模型如图 4 所示。

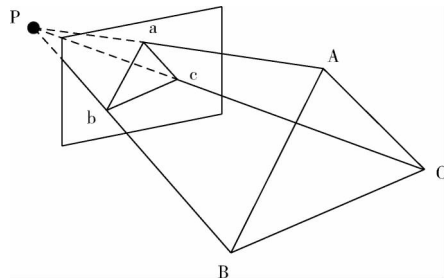


图 4 PnP 投影模型

此中, 相机光心为 P , 世界坐标系 3D 点与像素坐标 2D 点相对而言比较固定, 主要指 A 、 B 、 C 与 a 、 b 、 c , 字母的大写与小写之间具有较好的一致性。由此可知: $\triangle Pab \sim \triangle PAB$, $\triangle Pbc \sim \triangle PBC$, $\triangle Pac \sim \triangle PAC$ 。由余弦定理可得

$$\begin{aligned} PA^2 + PB^2 - 2PA \cdot PB \cdot \cos(a, b) &= AB^2 \\ PB^2 + PC^2 - 2PB \cdot PC \cdot \cos(b, c) &= BC^2 \\ PA^2 + PC^2 - 2PA \cdot PC \cdot \cos(a, c) &= AC^2 \end{aligned} \quad (6)$$

设 $u = AB^2/PC^2$, $v = BC^2/AB^2$, $w = AC^2/AB^2$, 化简得

$$\begin{aligned} (1-u)y^2 - ux^2 - y\cos(a, b) + 2uxy\cos(a, b) + 1 &= 0 \\ (1-w)x^2 - wy^2 - x\cos(a, b) + 2wxy\cos(a, b) + 1 &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

可知该方程组为二元二次方程, 利用吴消元法求解 PA 、 PB 、 PC 距离, 最后得出相机运动。

3.2 非线性优化运动估计

上述求解为线性方法, 在 3D 点或 2D 点受噪声干扰, 出现误匹配时位姿估计结果不佳, 算法失效, 因此可以把 PnP 构造成非线性最小二乘问题, 通过最小化重投影误差 (reprojection error) 求解最优值。

假设计算 n 个三维空间点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 及其投影点 $U_i(u_i, v_i, z_i)$, ξ 为相机位姿 (R, t) 的李代数, 相机内参为 K , 关系式如下

$$z_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = K \exp(\xi) \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于存在噪声, 预测值与观测值存在误差, 构建最小二乘方程如式 (9)

$$\min \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left\| U_i - \frac{1}{z_i} K \exp(\xi) P_i \right\|^2 \quad (9)$$

3.3 图优化的 PnP 求解

为了获得相对而言比较低的方程值, 应采取有效方法与手段计算最优位姿。所谓图优化, 主要指以图像的方式对优化问题加以详细地描述, 而凸优化的求解方式则应基于一定的软件, 即 g2o。基于图的顶点等方式的详细构建完成最优位姿的求解操作, 此中, 顶点代表的含义相对而言比较固定, 主要指待优化变量, 相机的位姿 ξ , 边为误差项。详情如图 5 所示。

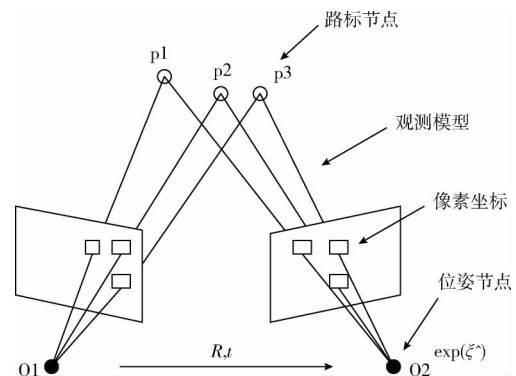


图 5 PnP 图优化

运动位姿求解流程如下:

- (1) 运动位姿初值的获取方式主要基于一种, 即传统 PnP 线性求解法;
- (2) 以位姿初值为基准, 将其设定为图优化模型顶点, 并对边进行了相应地定义, 即定义为重投影误差;
- (3) 以 L-M 为基准完成相应的迭代操作;
- (4) 基于 g2o, 采取一系列有效措施与手段获得最优运动位姿。

4 实验结果与分析

(1) 实验环境

实验平台采用华硕 A55V，配置 Intel(R) Core CPU i5-3210M，主频 2.5 GHz，4 G 内存，软件环境为 Clion + Ubuntu14.04 操作系统。双目视觉传感器的组成主要基于一种方式，即以型号 XG200 的两台工业相机为基础，采取特定的技术手段对其予以支架组合方式，获得相应的双目视觉传感器。可采取手动调节方式对焦距进行相应地调节，同时，还可基于相同的方式调节基线距离，图像分辨率640*480。

(2) 特征提取与特征匹配

实验过程中，对每张图片进行了相应的设定，所提特征点的数量是固定的，最多不超过 500 个点。图 6 为 OpenCV 中 ORB 与改进 ORB 特征提取结果对照，由此可知，对于特征部分，若基于改进后的 ORB 算法，则可获得相对而言比较匀称的分布。



图 6 特征提取结果对比

对相邻两帧图像进行匹配，图 7 (a) 与图 7 (b) 代表的含义分别是只有 FLANN 算法的结果、FLANN 和 RANSAC 组合匹配算法的结果，据此可知，后者可以获得

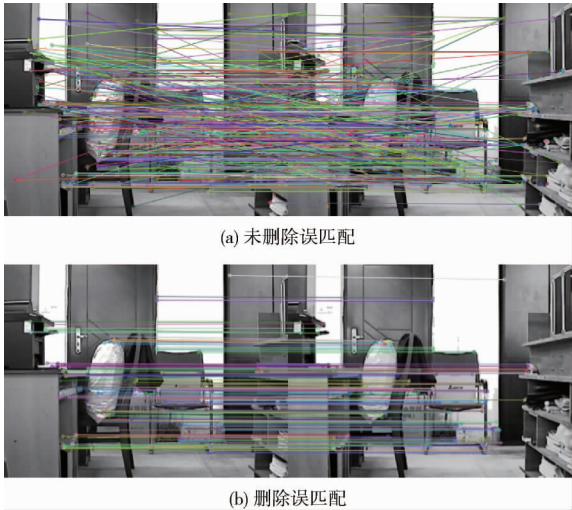


图 7 消除误匹配效果

相对而言比较优良的 VO 特征匹配效果。

(3) 测试数据集

根据表 1，以相邻两帧图像为基准，采取一系列有效措施对两者的定位精度进行相应的测量，假定坐标系原点 (0,0) 为最初位置，采样节点的数量共计 4 个，对比两者的误差。

据表 1 能够得知，在两帧图像间位置进行相应计算时，该视觉里程计具有相对而言比较高的定位精度，且平均相对误差比较低，具体误差百分比为 2.65%，基本符合相应的要求。

对于优化前与优化后的位置误差进行详细测定，并对于平均每帧耗时进行相应地测定，对数据进行采集时，以 Y 轴为基础，使双目相机展开一定距离的直线运动，运动距离为 50 m。因相机始终处于相对而言比较固定的高度位置，相机的整个运动也始终保持直线运动趋势，故而，相应误差的来源则共涉及一种途径，即 Y 轴移动距离。据图 8 能够得知，针对视觉里程计，若采取优化处理后，则可使误差在较大程度上有所减小，然而，位置误差同样会伴随采样距离的增加而增大，这是由于本文的优化处理操作具有一定的局限性，仅针对前端视觉里程计相邻两帧图像间的位姿，后端并未做出相应地优化处理，与具体情况具有较好的一致性。

据表 2，对于运行时间，将优化与未优化时，均加入其中，同时，对于误差范围，亦是如此，由此可知，若采取

表 1 采样与视觉定位位置对比/m

采样点序号	1	2	3	4
采样位置	(0,1)	(1,0)	(0,-1)	(-1,0)
视觉定位	(0.007,1.004)	(0.978,0.015)	(0.004,-1.011)	(-0.969,0.012)
定位误差	0.011	0.037	0.015	0.043

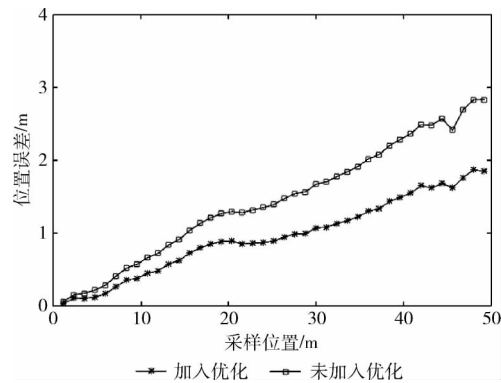


图8 采样位置与位置误差

优化处理后, 每帧图像处理时间并无显著增加, 然而, 却在一定程度上降低了相对误差, 总体而言, 符合相应的需求。

表2 运行时间和误差范围

算法	平均每帧耗时/ms	相对误差范围/%
未加入优化	39.67	3.07~5.76
加入优化	51.30	1.87~4.69

5 结束语

本设计对视觉里程提出了一定的要求, 主要是应能满足对相邻两帧相机运动状态进行实时估计的目的, 然后, 由于现阶段视觉里程计存在一系列问题, 例如, 定位精度相对较低等, 故, 提出了一种改进视觉里程计的方案, 此方案主要以双目相机为基准。在现有 ORB 算法的基础上进行改进, 提取描述子作为信息获得视差, 恢复特征点三维坐标, 采用 FLANN 和 RANSAC 组合算法进行匹配, 对匹配到的特征点构建最小二乘问题, 求得最佳位姿。根据实验结果可知, 对于相邻两帧图像, 该方案可以较好地两者之间的位姿进行估计, 符合了相应的要求。同时, 运用的整个过程中, 因并未展开相应的优化处理操作, 会导致一定的累积误差, 故应实施一定的人工校准, 后续工作也将对此进行改进。

参考文献:

- [1] Cadena C, Carlone L, Carrillo H, et al. Simultaneous localization and mapping: Present, future, and the robust-perception age [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32 (6): 1-25.
- [2] Fuentes-Pacheco J, Ruiz-Ascencio J, Rendón-Mancha JM. Visual simultaneous localization and mapping: A survey [J]. Artificial Intelligence Review, 2015, 43 (1): 55-81.
- [3] Mur-Artal, Tardos JD. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33 (5): 1255-1262.

- [4] LIU Haomin, ZHANG Guofeng, BAO Hujun. A survey of monocular simultaneous localization and mapping [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28 (6): 855-868 (in Chinese). [刘浩敏, 章国锋, 鲍虎军. 基于单目视觉的同时定位与地图构建方法综述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28 (6): 855-868.]
- [5] LUO Yangyu, LIU Honglin. Research on binocular vision odometer based on bundle adjustment method [J]. Control and Decision, 2016, 31 (11): 1936-1944 (in Chinese). [罗杨宇, 刘宏林. 基于光束平差法的双目视觉里程计研究 [J]. 控制与决策, 2016, 31 (11): 1936-1944.]
- [6] LIN Zhilin, ZHANG Guoliang, YAO Erliang, et al. Stereo visual odometry based on motion object detection in the dynamic scene [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37 (11): 195-203 (in Chinese). [林志林, 张国良, 姚二亮, 等. 动态场景下基于运动物体检测的立体视觉里程计 [J]. 光学学报, 2017, 37 (11): 195-203.]
- [7] Wan R, Schworer M, Cremers D. Stereo dso: Large-scale direct sparse visual odometry with stereo cameras [C] //International Conference on Computer Vision, 2017.
- [8] Mur-Artal R, Montiel MM, Tardos JD. ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 31 (5): 1147-1163.
- [9] Engel J, Koltun V, Cremers D. Direct sparse odometry [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018, 40 (3): 611-625.
- [10] ZHENG Shaohua. The research of localization and path planning technology in visual navigation AGV [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016 (in Chinese). [郑少华. 视觉导航 AGV 定位与路径规划技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.]
- [11] CAO Wenping. Research on map construction method for the intelligent vehicle based on stereo vision [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015 (in Chinese). [曹文平. 基于立体视觉的智能车地图构建方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.]
- [12] Engel J, Stuckler J, Cremers D. Large-scale direct SLAM with stereo cameras [C] //International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hamburg: IEEE, 2015: 1935-1942.
- [13] YU Xinyi, ZHAN Yi'an, ZHU Feng, et al. Improved ORB feature extraction algorithm based on quadtree encoding [J]. Computer Science, 2018, 45 (S2): 222-225 (in Chinese). [禹鑫懿, 詹益安, 朱峰, 等. 一种基于四叉树的改进的 ORB 特征提取算法 [J]. 计算机科学, 2018, 45 (S2): 222-225.]
- [14] ZOU Jingui, WAN Ying, MENG Liyuan. A new stereo matching algorithm based on adaptive weight SAD algorithm and Census algorithm [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018 (11): 11-15 (in Chinese). [邹进贵, 万莹, 孟丽媛. 一种基于自适应权重 SAD 与 Census 融合的匹配算法 [J]. 测绘通报, 2018 (11): 11-15.]
- [15] ZHAO Wenkai. Research on AGV localization and mapping based on binocular camera [D]. Nanning: Guangxi University, 2019: 31-38 (in Chinese). [赵文恺. 基于双目相机的视觉 AGV 定位与建图 [D]. 南宁: 广西大学, 2019: 31-38.]