

文章编号: 2095-2163(2020)03-0027-05

中图分类号: TP24

文献标志码: A

基于有限范围内自发光特征物的机器人双目定位研究

王 强, 王国庆, 杨 康, 梁思瑞, 王明圣

(长安大学 工程机械学院, 西安 710064)

摘 要: 针对室内光照多变对机器人视觉带来的不良影响所造成的室内机器人难定位的问题, 提出了基于固定自发光特征物的双目定位算法设计, 实现了机器人在室内环境中的定位。针对视觉定位算法实时性不高、处理数据量大的问题, 通过预先建立数据库的方法避免复杂的计算, 提高了视觉定位速度。具体而言, 建立了固定特征物投影模型, 实现了特征物模型的建立和对应数据库的生成, 将特征点像素坐标与投影平面坐标进行匹配, 并将相机在环境坐标系中的位姿转换为运动平台在环境坐标系中的位姿, 实现了运动平台在室内环境中的定位。最终经过测试, 证明该方法是可行的。

关键词: 室内移动机器人; 双目定位; 自发光特征物; 双目定位算法

Binocular location of robots based on limited range self-luminescent features

WANG Qiang, WANG Guoqing, YANG Kang, LIANG Sirui, WANG Mingsheng

(School of Engineering Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

[Abstract] Aiming at the problem that indoor robots are difficult to locate due to the adverse effects of indoor illumination on machine vision, a binocular localization algorithm based on fixed self-luminous features is proposed, which realizes the localization of robots in indoor environment. Aiming at the problem of low real-time performance and large amount of data processing of visual localization algorithm, the method of pre-establishment of database avoids complex calculation and improves the speed of visual localization. Specifically, the projection model of fixed feature is established, the establishment of feature model and the generation of corresponding database are realized, the pixel coordinates of feature points are matched with the projection plane coordinates, and the pose of camera in the environment coordinate system is converted to that of the motion platform in the environment coordinate system, thus realizing location of indoor environment of the motion platform in the environment coordinate system. Finally, the test results show that the method is feasible.

[Key words] indoor mobile robot; binocular localization; self-luminous feature; binocular localization algorithm

0 引 言

自主移动机器人是可依靠自身智能系统进行自主导航的在地面运动的机器人。文献[1]中提出如何解决移动机器人“走”的问题一直是自主移动机器人领域所存在的问题。文献[2]提出移动机器人实现自主运动的基础就是实现其自身定位。文献[3]提出在小型移动机器人的发展下, 对其自主运动系统应该有更高的要求。文献[4]提出大多数小型移动机器人需要通过传感器感知其所处环境及自身位置。文献[5]所述的“爱家一号”通过重复路径来记忆路径。文献[6]中的 Botlr 的机器人管家, 使用激光雷达和摄像机进行导航和定位。文献[7]所述的移动机器人监控系统为机器人搭载多种模块化传感器, 能感知机器人周围环境。文献[8]所述的 CASIA-I 轮式移动机器人, 是在多传感器信息融合

的基础上实现了自主定点移动和轨迹跟踪的功能。

以上研究都取得了不同的进展, 但是依然存在定位不精确等问题。室内环境的光照情况复杂, 影响机器视觉的图像采集和处理。所以, 视觉定位在室内环境中的应用也受到了很大的限制。本次研究提出基于固定自发光特征物的双目定位算法设计, 可以解决光照情况复杂的问题, 将特征物图像与预先建立的数据库进行数据匹配, 确定机器人的实时位姿, 以实现机器人在室内环境中的定位。

1 整体方案

根据周围环境进行绝对定位, 不存在累积误差且精度高, 并极力降低定位算法的复杂度。双目摄像机安装在运动平台顶端, 便于采集图像。运动测试平台机械结构三维模型图如图 1 所示。其中, 双目定位系统位于平台的最上方。

基金项目: 陕西省工业攻关项目(2016GY-003)。

作者简介: 王 强(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 自动化控制; 王国庆(1972-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 动态仿真、机器人控制系统。

通讯作者: 王 强 Email: 3122950935@qq.com

收稿日期: 2019-12-24

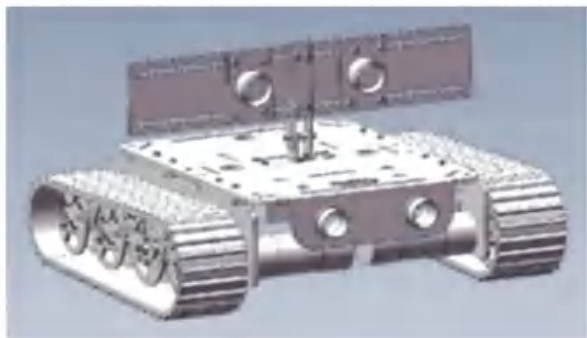


图1 运动测试平台机械结构三维模型

Fig. 1 3d model of mechanical structure of motion test platform

通过采用摄像机采集室内自发光特征物图像,并提取图像中的特征物的特征,将特征与预先建立的数据库进行数据匹配,确定机器人的实时位姿。

基于室内自发光特征物的双目定位算法,可以解决室内光照情况复杂的问题,研究时将涉及算法的理论支撑、模型建立、数据库建立、图像处理、特征提取、特征匹配以及平台定位等。基于自发光特征物的双目定位算法流程如图2所示。

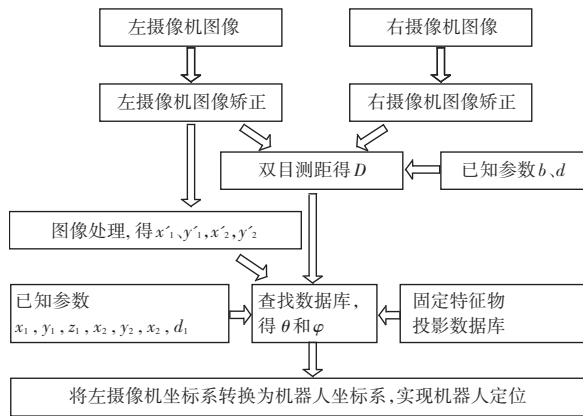


图2 基于自发光特征物的双目定位算法流程

Fig. 2 Binocular positioning algorithm flow based on self-illumination feature

首先根据左右摄像机得到周围物体的图像,将得到的图像传递回来之后进行图像矫正,经过左右两个摄像机实现双目定位。将摄像机得到的特征物上某些点的坐标与自发光特征物投影数据库进行匹配,可以将左摄像机的坐标系转化为机器人坐标系,进而实现移动机器人定位。

2 室内自发光特征物的双目定位算法

2.1 基于自发光特征物的双目定位

以自然环境中合适的点 O 为原点建立符合右手螺旋法则的环境坐标系 $OXYZ$ 。以相机光心 O_c 为原点,以向量 $\vec{O_cO}$ 为 Z 轴正方向建立符合左手螺

旋法则的相机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 。垂直于光轴 $\vec{O_cO}$ 且距 O_c 点距离为焦距 d 的平面即为投影平面。以投影平面与光轴 O_cO 的交点 O' 为原点在投影平面上建立投影坐标系 $O'X'Y'$ 。环境坐标系中任一点 P 在相机投影平面上的成像图如图3所示。

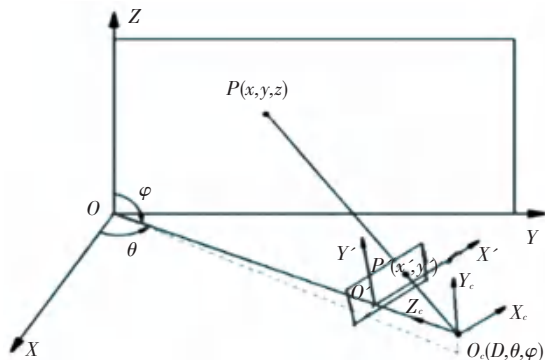


图3 环境坐标系中任一点P在相机投影平面上的成像图

Fig. 3 Image of any point P in the environmental coordinate system on the projection plane of the camera

任意点 P 在环境坐标系中的坐标值 (x, y, z) 与其在相机坐标系中的坐标值 (x_c, y_c, z_c) 之间具有变换关系。首先,把环境坐标系 $OXYZ$ 平移到 O 与 O_c 重合的位置,得到坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 。这个过程的平移变换矩阵为 T_1 。此时环境坐标系中 P 点坐标表示为 (x_1, y_1, z_1) :

$$[x_1 \ y_1 \ z_1 \ 1] = [x \ y \ z \ 1] \cdot T_1, \quad (1)$$

类似地,将坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$, 绕 Z_1 轴顺时针旋转 $(90 - \theta)^\circ$, 得坐标系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$, 其旋转变换矩阵为 T_2 。将坐标系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 逆时针绕 X_2 轴旋转 $(180 - \varphi)^\circ$, 得坐标系 $O_3 X_3 Y_3 Z_3$, 其旋转变换矩阵为 T_3 。当然,还要将右手系变为左手系,也就是将 X_3 轴反向,其变换矩阵为 T_4 。至此,已把环境坐标系变换为相机坐标系。将环境坐标系中 P 点的坐标表示为 (x_c, y_c, z_c) 。以上四步变换过程的矩阵表示为:

$$[x_c \ y_c \ z_c \ 1] = [x \ y \ z \ 1] \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4, \quad (2)$$

最终可得:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \cos \varphi & -\cos \theta \sin \varphi & 0 \\ \cos \theta & -\sin \theta \cos \varphi & -\sin \theta \sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & -\cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & D & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \\ \hat{w} \\ \hat{h} \end{bmatrix}$$

(3)

将式(3)改写成标量形式,即为:

$$\begin{cases} x_c = -x \sin \theta + y \cos \theta, \\ y_c = -x \cos \theta \cos \varphi - y \sin \theta \cos \varphi + z \sin \varphi, \\ z_c = -x \cos \theta \sin \varphi - y \sin \theta \sin \varphi - z \cos \varphi + D. \end{cases} \quad (4)$$

根据投影平面坐标与相机坐标系关系的透视变换公式最终可求得 P 点在投影平面 YOZ 上的 P' 点的坐标为:

$$\begin{cases} x' = \frac{d(-x \sin \theta + y \cos \theta)}{-x \cos \theta \sin \varphi - y \sin \theta \sin \varphi - z \cos \varphi + D}, \\ y' = \frac{d(x \cos \theta \cos \varphi + y \sin \theta \cos \varphi - z \sin \varphi)}{x \cos \theta \sin \varphi + y \sin \theta \sin \varphi + z \cos \varphi - D}. \end{cases} \quad (5)$$

2.2 基于自发光特征物的双目定位算法实现

设环境坐标系原点 O 为室内标志物上的一特定地点,任意点 P 在投影平面 YOZ 上的 P' 点的坐标方程组有 $\sin \theta$ 、 $\sin \varphi$ 和 $\cos \theta$ 、 $\cos \varphi$ 四个未知数,再有一组方程就有唯一解。也即有 2 个标志点 P_1 和 P_2 就可以得到 4 个方程,则方程就有唯一解,即:

$$\begin{cases} x'_1 = \frac{d_1(-x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta)}{-x_1 \cos \theta \sin \varphi - y_1 \sin \theta \sin \varphi - z_1 \cos \varphi + D}, \\ y'_1 = \frac{d_1(x_1 \cos \theta \cos \varphi + y_1 \sin \theta \cos \varphi - z_1 \sin \varphi)}{x_1 \cos \theta \sin \varphi + y_1 \sin \theta \sin \varphi + z_1 \cos \varphi - D}, \\ x'_2 = \frac{d_2(-x_2 \sin \theta + y_2 \cos \theta)}{-x_2 \cos \theta \sin \varphi - y_2 \sin \theta \sin \varphi - z_2 \cos \varphi + D}, \\ y'_2 = \frac{d_2(x_2 \cos \theta \cos \varphi + y_2 \sin \theta \cos \varphi - z_2 \sin \varphi)}{x_2 \cos \theta \sin \varphi + y_2 \sin \theta \sin \varphi + z_2 \cos \varphi - D}. \end{cases} \quad (6)$$

至此,只要建立自发光特征物投影数据库,可通过查找 x'_1 、 y'_1 、 x'_2 、 y'_2 、 x_1 、 y_1 、 z_1 、 x_2 、 y_2 、 z_2 、 D 、 d_i 的值确定数据库中对应的 $\sin \theta$ 、 $\sin \varphi$ 和 $\cos \theta$ 、 $\cos \varphi$ 值,从而得到左摄像机光心 O_l 在环境坐标系中的坐标 (D, θ, φ) 。

2.3 特征物选择与投影模型建立

在室内的特征物上设置 2 个特征点,通过其在相机平面坐标系中的坐标值与双目测距得到的 D ,确定左摄像机光心 O_l 在环境坐标系下的坐标 (D, θ, φ) 。建立特征物的投影模型,生成自发光特征物投影数据库,通过数据匹配的方式得到对应的 θ 和 φ 的值。

研究探索阶段选择嵌入式矩形房顶灯作为特征物。选择其一条短边作环境坐标系 X 轴,一条长边作 Y 轴,其交点为原点 O ,使灯平面与坐标系 XOY 平面重合,房顶的灯位于 XOY 平面的第一象限。设矩形房顶灯的长为 l ,宽为 m ,其特征点 P_1 和 P_2 的

坐标如图 4 所示。

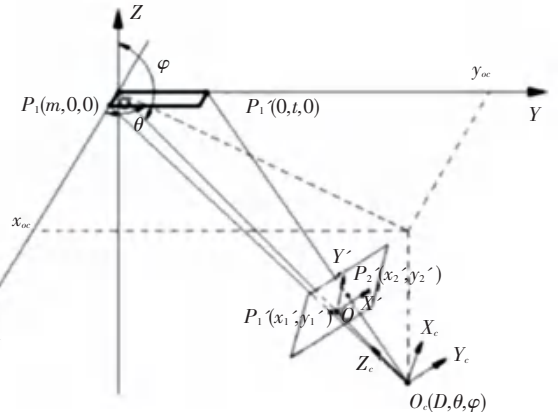


图 4 特征点 P_1 和 P_2 的坐标示意图

Fig. 4 Coordinates of feature points P_1 and P_2 according to (6), we can get:

$$\begin{cases} x'_1 = \frac{-d_1 m \sin \theta}{-m \cos \theta \sin \varphi + D}, \\ y'_1 = \frac{d_1 m \cos \theta \cos \varphi}{m \cos \theta \sin \varphi - D}, \\ x'_2 = \frac{d_2 l \cos \theta}{l \sin \theta \sin \varphi + D}, \\ y'_2 = \frac{d_2 l \sin \theta \cos \varphi}{l \sin \theta \sin \varphi - D}. \end{cases} \quad (7)$$

因摄像机光心的可能位姿在空间中有无数个,数据库中无法全部枚举。所以考虑实际情况仅将 θ 从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 、且 φ 从 $90^\circ \sim 180^\circ$ 、且 D 从 $1 \sim 10$ m 时的数据写入数据库。 D 的采样步长为 1 mm, θ 和 φ 的采样步长为 1° 。特征点 P_1 和 P_2 的部分数据库如图 5 和图 6 所示。

θ	φ	x	y
45	90.5	-0.20206468	0.00007676
45	91	-0.20252374	0.00007678
45	91.5	-0.20300343	-0.00003274
45	101	-0.20629067	0.11900109
45	101.5	-0.21070005	0.11900080
45	102	-0.21513194	0.11900051
45	102.5	-0.21959709	0.00000000
45	103	-0.22409546	0.00000000
45	103.5	-0.22862701	0.00000000
45	104	-0.23319169	0.11900000
45	104.5	-0.23779050	0.11900000
45	105	-0.24242356	0.11900000
45	105.5	-0.24709089	0.11900000
45	106	-0.25179251	0.11900000
45	106.5	-0.25652843	0.11900000
45	107	-0.26129865	0.11900000
45	107.5	-0.26610317	0.11900000
45	108	-0.27094299	0.11900000

图 5 特征点 P_1 的部分数据库

Fig. 5 Partial database of feature point P_1

θ	φ	x	y
100	150.5	0.00000000	1.00000000
100	151	0.00000000	1.00000000
100	151.5	0.00000000	1.00000000
100	152	0.00000000	1.00000000
100	152.5	0.00000000	1.00000000
100	153	0.00000000	1.00000000
100	153.5	0.00000000	1.00000000
100	154	0.00000000	1.00000000
100	154.5	0.00000000	1.00000000
100	155	0.00000000	1.00000000
100	155.5	0.00000000	1.00000000
100	156	0.00000000	1.00000000
100	156.5	0.00000000	1.00000000
100	157	0.00000000	1.00000000
100	157.5	0.00000000	1.00000000
100	158	0.00000000	1.00000000
100	158.5	0.00000000	1.00000000
100	159	0.00000000	1.00000000
100	159.5	0.00000000	1.00000000
100	160	0.00000000	1.00000000

图 6 特征点 P_2 的部分数据库

Fig. 6 Partial database of feature point P_2

2.4 双目相机特征识别流程

以实验室内嵌矩形房顶灯为例,对预处理后的图像进行边缘检测。边缘检测通过灰度值突变进行图像分割。从预处理后的图像中,提取出矩形房顶灯的4个端点坐标。图像特征提取的流程如图7所示。

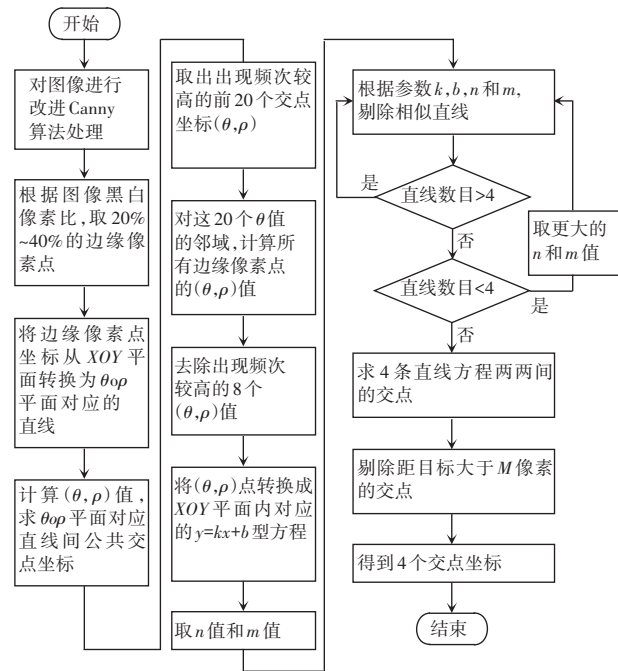


图7 房顶灯图像特征提取的流程

Fig. 7 Flow chart of feature extraction of roof lamp image

2.5 特征匹配

要与数据库中的坐标匹配,还需进行像素坐标到投影平面坐标的变换。环境坐标系的原点为房顶灯的一个角点。根据投影关系可知,若将摄像机对准环境坐标系原点,房顶灯上作为环境坐标系原点的特征点在投影平面上所成的点即为投影平面坐标系上的像主点 O'_l 。建立的自发光特征物投影数据库中的投影平面坐标单位是mm,但特征提取得到的是特征点的像素坐标。像素坐标系的原点在图像的左上角, X 轴正方向水平向右, Y 轴正方向竖直向下。需要将像素坐标系坐标转换为投影平面坐标系坐标。用 $O_{c0}(x_{c0}, y_{c0})$ 表示图像坐标系中的房顶灯图像上作为环境坐标系原点的特征点像素坐标,用 $P_{c1}(x_{c1}, y_{c1})$ 和 $P_{c2}(x_{c2}, y_{c2})$ 表示 P_1 和 P_2 的像素坐标,则像素坐标与投影平面坐标的变换关系见表1。

再对图像中的 O'_l 点进行双目测距,即可得环境坐标系原点与左相机坐标系原点之间的距离 D 。将距离为 D 时得到的特征点投影平面坐标与自发光特征物投影数据库中对应特征点的坐标值进行匹配就可得出相机坐标系在环境坐标系中的坐标 (D, θ, φ) 。

表1 像素坐标与投影平面坐标的变换关系

Tab. 1 Transformation relationship between pixel coordinates and projection plane coordinates

像素坐标	投影平面坐标 (x', y')
$P_{c1}(x_{c1}, y_{c1})$	$P'_1((x_{c1} - x_{c0}) \times p_x, (y_{c0} - y_{c1}) \times p_y)$
$P_{c2}(x_{c2}, y_{c2})$	$P'_2((x_{c2} - x_{c0}) \times p_x, (y_{c0} - y_{c2}) \times p_y)$

2.6 平台定位

双目定位中得到的是左相机坐标系的位姿,如图8所示,建立机器人坐标系 $O_r X_r Y_r Z_r$ 。需要根据舵机累积的旋转角度 α 、左相机坐标系位姿以及相机在平台上的安装位置关系,计算出运动平台坐标系在环境坐标系中的位姿。

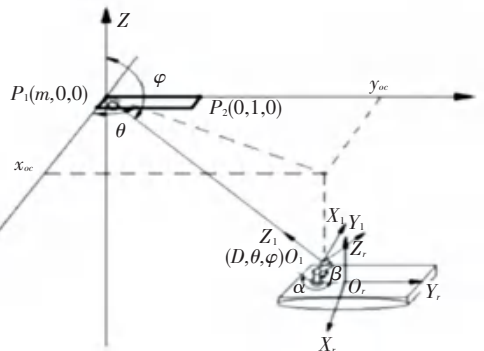


图8 左摄像机坐标系、运动平台坐标系与环境坐标系关系示意图

Fig. 8 The relationship among the left camera coordinate system, the moving platform coordinate system and the environment coordinate system

左摄像机光心在环境坐标系中的直角坐标 (x_c, y_c, z_c) 为:

$$\begin{cases} x_c = D \cos \theta \sin \varphi, \\ y_c = D \sin \theta \sin \varphi, \\ z_c = D \cos \varphi. \end{cases} \quad (8)$$

运动平台与左摄像机位置关系如图9所示。根据图9的角度关系,得平台中心在环境坐标系中的直角坐标 (x, y, z) 为:

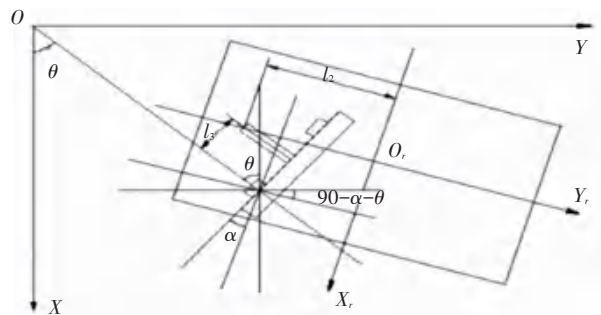


图9 运动平台与左摄像机位置关系

Fig. 9 Position relationship between the moving platform and the left camera

$$\begin{cases} x = x_c + (l_1 \sin \beta - l_3 \cos \theta) \sin \theta - \\ l_1 \sin \beta \cos \alpha \cos \theta + l_2 \sin (\alpha + \theta), \\ y = y_c + l_3 \sin \alpha - l_1 \sin \beta \sin \alpha \cos \theta + \\ l_2 \sin (\alpha + \theta), \\ z = z_c - h - l_1 \sin \beta. \end{cases} \quad (9)$$

运动平台坐标系的 Y_r 轴与环境坐标系 Y 轴夹角为 $(90 - \alpha - \theta)^\circ$ 。

至此,可得机器人运动平台在环境坐标系中的

位置为坐标 (x, y, z) , 在环境坐标系中的姿态为 Y_r 轴与环境坐标系 Y 轴夹角 $(90 - \alpha - \theta)^\circ$ 。

3 基于自发光特征物的双目定位测试

双目定位测试需要进行双目测距,通过原图特征点坐标和特征提取得出的特征点坐标,验证特征提取的效果,得出特征提取的精度。表2中列出了特征点实际坐标、特征提取坐标及其误差值。

表2 特征点实际坐标、特征提取坐标及其误差值

Tab. 2 Actual coordinates of feature points, feature extraction coordinates and their error values

O 点实际坐标	O 点提取坐标	O 点坐标误差	P_1 实际坐标	P_1 提取坐标	P_1 提取误差	P_2 实际坐标	P_2 提取坐标	P_2 坐标误差
(393,263)	(398,263)	(5,0)	(371,151)	(374,153)	(3,2)	(978,278)	(979,279)	(1,1)
(594,364)	(596,367)	(2,3)	(687,330)	(693,329)	(-4,-1)	(805,598)	(808,599)	(3,1)
(807,537)	(806,536)	(-1,-1)	(727,525)	(730,526)	(3,1)	(985,289)	(984,292)	(-1,3)
(37,118)	(40,121)	(3,3)	(127,37)	(128,41)	(1,4)	(423,597)	(424,595)	(1,-2)

经过计算可得 O 点 x 坐标平均误差为 2.667 px, Y 坐标平均误差为 1.667 px。 P_1 点 x 坐标平均误差为 3.000 px, Y 坐标平均误差为 1.500 px。 P_2 点 x 坐标平

均误差为 1.500 px, Y 坐标平均误差为 1.833 px。

表3中列出了 P_1 点和 P_2 点投影平面实际坐标、计算坐标及其误差值。

表3 P_1 点和 P_2 点投影平面实际坐标、计算坐标及其误差值

Tab. 3 Actual coordinates, calculated coordinates and error values of projection plane of P_1 and P_2 points

P_1 实际坐标	P_1 计算坐标	P_1 坐标绝对误差	P_1 坐标相对误差	P_2 实际坐标	P_2 计算坐标	P_2 坐标绝对误差	P_2 坐标相对误差
(-0.066,0.336)	(-0.072,0.33)	(-0.006,-0.006)	(0.090 9,-0.017 9)	(1.755,-0.045)	(1.743,-0.048)	(-0.012,-0.003)	(-0.006 8,0.066 7)
(0.279,0.102)	(0.291,0.114)	(0.012,0.012)	(0.043,0.117 6)	(0.633,-0.702)	(0.636,-0.696)	(0.003,0.006)	(0.004 7,-0.008 5)
(-0.24,0.036)	(-0.228,0.03)	(0.012,-0.006)	(-0.050 0,-0.166 7)	(0.534,0.744)	(0.534,0.732)	(0,-0.012)	(0.000 0,-0.016 1)
(0.27,0.243)	(0.264,0.24)	(-0.006,-0.003)	(-0.022 2,-0.012 3)	(1.158,-1.437)	(1.152,-1.422)	(-0.006,0.015)	(-0.005 2,-0.010 4)

经过计算可得 P_1 点投影平面 x 坐标平均绝对误差 0.008 mm、平均相对误差 0.041 5, Y 坐标平均绝对误差 0.006 5 mm、平均相对误差 0.059 6。 P_2 点投影平面 x 坐标平均绝对误差为 0.007 5 mm、平均相对误差 0.005 4, Y 坐标平均绝对误差为 0.005 7 mm、平均相对误差 0.016 0。

根据数据库中的数据可知,在不考虑双目测距以及其他因素引起的误差的情况下,在室内距离自发光特征物 3 m 距离内至少可以实现球面坐标中 θ 和 ϕ 值精度 $\pm 5^\circ$ 的定位。

4 结束语

本次研究主要完成了双目视觉定位算法的设计,利用室内固定的自发光特征物进行视觉定位,解决室内光照多变的问题。首先提出了基于自发光特征物的双目定位理论,接着介绍了双目定位算法的实现过程,对于特征物的选择进行了分析,并且建立了投影模型的数据库。通过相机得到的图像进行了特征识别以及与数据库的匹配,最终根据坐标系之间的关系实现了对平台的定位。

参考文献

- [1] 徐德,邹伟. 室内移动式服务机器人的感知、定位与控制[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [2] BURRI M, OLEJNIKOVA H, ACHELIK M W, et al. Real-time visual-inertial mapping, re-localization and planning onboard MAVs in unknown environments[J]// Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg, Germany: IEEE, 2015:1872.
- [3] ZHAO Xiaochuan, LUO Qingsheng, HAN Baoling. Survey on robot multi-sensor information fusion technology[C]//2018 7th World Cogress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, China:IEEE,2008:5019.
- [4] HENDRICH N, BISTRY H, ZHANG Jianwei. Architecture and software design for a service robot in an elderly-care scenario[J]. Engineering, 2015(1):27.
- [5] 田红瑞. 轮式家庭服务机器人导航的研究[D]. 南京:东南大学,2015.
- [6] ASHHAD B K, BRISTY I, KHATUN H. Design and implementation of an interactive service robot[J]. Journal of Computer and Communications, 2015,3(11):121.
- [7] 苏南光,张华成,杨雄珍,等. 基于网络控制的移动监控机器人的设计与研究[J]. 电子世界,2017(23):104.
- [8] 李磊,陈细军,侯增广,等. 自主轮式移动机器人 CASIA-I 的整体设计[J]. 高技术通讯,2003,13(11):51.