

单目视觉测距在移动机器人的应用

李 欣,董建园

(西安建筑科技大学,陕西 西安 710055)

摘 要:运用 Matlab 软件中摄像机标定工具箱通过传统的摄像机小孔成像原理对摄像机内外参数进行标定。找出图像像素坐标系与机器人所在地面的世界坐标系之间的联系。并且借助图像中消失点,确定机器人移动路径。找出图像上对应的机器人预通过区域。基于对障碍物边缘检测确定其是否出现在预通过区域上,并仅对区域内的障碍物进行单目视觉测距。在计算距离时提出了一种仅与机器人移动方向相关的距离计算方法。以保证机器人移动时不会与前方障碍物相碰撞。

关键词:边缘检测;路径估计;摄像机标定

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)11-0247-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.11.060

Application of Monocular Vision Measurement in Mobile Robot

LI Xin,DONG Jian-yuan

(Xi'an University of Architecture and Technology,Xi'an 710055,China)

Abstract: Application of camera calibration toolbox in the Matlab software calibrated the camera's interior and exterior parameters by traditional camera pinhole imaging principle. Find out the connection between the image pixel coordinate system and the world coordinate system. And with the vanishing point in the image, determine the robot moving path. Find out the robot pre-pass area in the image. Based on the edge detection of the obstacles, determine whether it is appeared in the pre-pass area, and conduct monocular vision measurement for the obstacles. Put forward a kind of distance calculation method along the robot moving direction related. Ensure the robot doesn't collide with obstacles.

Key words: edge detection; path estimation; camera calibration

0 引 言

近年来,随着机器视觉的不断发展,在现代工业自动化生产过程中,机器视觉正成为一种提高生产效率和保证产品质量的关键技术,如机械零件的自动检测、智能机器人控制及生产线的自动监控等。在国防和航天等领域,机器视觉也具有相当重要的应用意义,如运动目标的自动跟踪与识别、自治战车导航、登月舱的自动着陆以及空间机器人的视觉控制等^[1]。在移动机器人应用方面,视觉系统通常是对机器人移动路径进行路径规划,以避免其中障碍。其中周围环境已知的全局路径规划的理论研究比较完善,在环境未知的情况下局部规划也在迅速发展^[2]。文中提出一种局部环境的障碍物检测,根据摄像机获取的图像信息,分析机器人移动方向上的障碍物距离。一般的单目视觉测距的

原理是通过摄像机的针孔成像模型将物体的图像信息转换为三维空间中的位置关系,即单目摄像机的标定^[3]。电脑通过视觉信息分析障碍物的距离,控制机器人的移动方向。文中在此基础上提出对机器人前进路径进行预估计,并仅对路径内障碍物进行距离测量,减少其他方向的距离,增强了测距的准确性和实际应用性。

1 摄像机标定

1.1 摄像机标定原理

实际障碍物的三维几何位置与其在图像中对应点之间的相互关系是由摄像机针孔成像的几何模型决定的^[4],这些几何模型参数就是摄像机参数。在大多数条件下这些参数必须通过实验与计算才能得到,这个

收稿日期:2013-01-29

修回日期:2013-05-06

网络出版时间:2013-08-27

基金项目:陕西省教育专项科研项目计划项目(11JK0986)

作者简介:李 欣(1987-),男,硕士研究生,研究方向为数字图像处理与嵌入式系统;董建园,副教授,研究方向为嵌入式系统及应用、计算机测控技术、数字图像处理及可视化技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130827.1436.023.html>

过程被称为是摄像机标定^[5]。也是障碍物视觉测距的基础。实际点 M 的坐标转换到图像点上的过程如图 1,需要经过世界坐标——摄像机坐标——图像坐标系之间的转换^[6]。其基本原理如下:

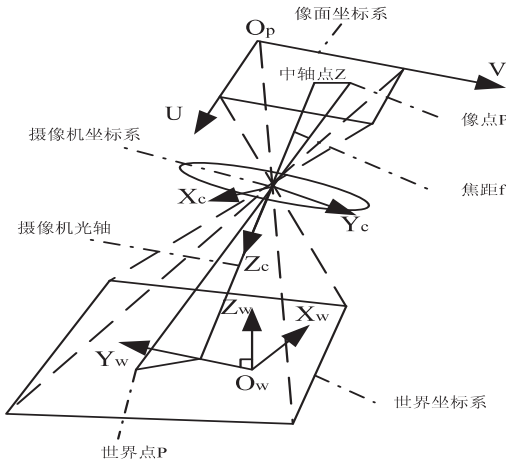


图 1 世界坐标到成像坐标的转换

如图 1 所示将 M 点在世界坐标系 W 的坐标用向量 $[X_w, Y_w, Z_w]^T$ 表示;在摄像机坐标系 C 的坐标用 $[X_c, Y_c, Z_c]^T$ 表示;图像中像素坐标用向量 $[u, v]^T$ 表示。当 M 点从世界坐标系 W 到摄像机坐标系 C 转换时,需要考虑坐标系的旋转和平移,其转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \mathbf{R}X_w + \mathbf{T} \quad (1)$$

其中, \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别表示了世界坐标系和摄像机坐标系之间的相对位置和姿态,称为外参数。 \mathbf{R} 为旋转矩阵, \mathbf{T} 是平移向量。

当 M 点从摄像机坐标系到像素坐标系转换时,首先建立小孔成像的几何模型 x_n :

$$x_n = \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

让 $r^2 = x^2 + y^2$ 。考虑到镜头畸变系数 \mathbf{kc} 的影响,新的小孔模型 x_d 应变为:

$$x_d = \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \mathbf{kc}(1)r^2 + \mathbf{kc}(2)r^4 + \mathbf{kc}(5)r^6)x_n + \mathbf{dx} \\ \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, \mathbf{dx} 为切向畸变矢量: $\mathbf{dx} = [2\mathbf{kc}(3)xy + \mathbf{kc}(4)(r^2 + 2x^2)]$; 向量 \mathbf{kc} 同时包含了径向与切向的畸变系数。考虑畸变系数后,最终摄像机坐标系 C 到像素坐标系 P 转换公式为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{fc}(1) & \mathbf{alpha_c} * \mathbf{fc}(1) & \mathbf{cc}(1) \\ 0 & \mathbf{fc}(2) & \mathbf{cc}(2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{KK} \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

矩阵 \mathbf{KK} 只与摄像机内部结构有关,被称作内参数。 $\mathbf{fc}(1)$ 和 $\mathbf{fc}(2)$ 分别为图像坐标 U, V 轴上的焦距, $\mathbf{cc}(1)$ 和 $\mathbf{cc}(2)$ 为主点的 U, V 轴坐标。 $\mathbf{alpha_c}$ 为摄像机畸变系数^[5]。

1.2 标定过程及结果

应用 Matlab 程序的标定工具箱,选择 9×7 棋盘格标定模板,对摄像机进行平面标定。因为是单目摄像头的测距,只能获得 2 维的世界坐标信息。因此将障碍物投影在地平面,获取其地面的 2 维坐标。首先采集普通标定模板不同位置的照片,经过标定工具箱计算可以求得内参数 \mathbf{KK} 的线性唯一解^[7]。从以上关于标定的分析可以看出,确定一组标定点的地平面坐标和图像坐标是进行摄像机标定的关键一步^[8]。因此将标定模板按特定位置放置在水平地面上,以模板坐标系为选定的世界坐标系得到地平面坐标和图像坐标关系。其中如图 1 中的 Z_w 轴与地面垂直, X_w 轴与摄像机平面平行,则摄像机与前方障碍物的距离即为 Y_w 轴方向距离。摄像机距离标定平面的原点 O 的 Y_w 坐标为 -346 mm 。

通过 Matlab 标定工具箱可以得到其内参数为:

焦距: $\mathbf{fc} = [649.860 \ 627 \ 969 \ 137 \ 340; 650.168 \ 472 \ 663 \ 987 \ 810]$;

光轴主点: $\mathbf{cc} = [308.583 \ 728 \ 364 \ 824 \ 820; 254.482 \ 912 \ 123 \ 890 \ 340]$;

偏斜系数: $\mathbf{alpha_c} = 0.000 \ 000 \ 000 \ 000 \ 000$;

畸变系数:

$\mathbf{kc} = [-0.207 \ 699 \ 943 \ 203 \ 193;$

$1.689 \ 429 \ 150 \ 217 \ 271;$

$0.005 \ 131 \ 013 \ 275 \ 429;$

$-0.001 \ 480 \ 433 \ 011 \ 765;$

$0.000 \ 000 \ 000 \ 000 \ 000]$;

焦距误差: $\mathbf{fc_error} = [5.555 \ 149 \ 663 \ 394 \ 868; 5.623 \ 665 \ 143 \ 905 \ 546]$;

光轴主点误差:

$\mathbf{cc_error} = [3.053 \ 665 \ 579 \ 952 \ 463;$

$3.492 \ 256 \ 565 \ 357 \ 053]$;

偏斜系数误差: $\mathbf{alpha_c_error} = 0.000 \ 0$;

畸变系数误差: $\mathbf{kc_error} = [0.036 \ 626 \ 871 \ 070 \ 951; 0.384 \ 123 \ 202 \ 848 \ 471; 0.001 \ 779 \ 436 \ 206 \ 296; 0.001 \ 742 \ 627 \ 874 \ 802; 0.000 \ 000 \ 000 \ 000 \ 000]$;

得到其中地面标定模板的外参数为:

旋转矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} 1.000\ 0 & -0.008\ 8 & 0.001\ 7 \\ -0.001\ 3 & -0.331\ 5 & -0.943\ 5 \\ 0.008\ 9 & 0.943\ 4 & -0.331\ 5 \end{bmatrix}$$

平移向量:

$$T = [-82.965\ 3\ \ 36.324\ 3\ \ 578.621\ 3]^T$$

2 前进路径估计

机器人直线前进路径实际为两条平行直线,根据透视投影原理,一条空间直线上的无穷远像素集在视平面上形成的收敛点称为消失点,而空间中相互平行的直线族在视平面有相同的消失点^[9];那么,两条互不重合的平行线在图像平面上就具有相同的消失点和不同的斜率。两条直线之间的面积称其为机器人预通过的路径。图像上的预通过路径最后在消失点汇合。因此,根据机器人的宽度与消失点的位置即可估计出预通过路径在图像上的位置。通过图像边缘提取判定前方障碍物是否出现在预通过的路径上。对其两旁的障碍物可以忽略距离的测量,以此减少程序运行负担,提高运行效率。在实验中选取机器人宽度为 300 mm,通过标定工具箱的函数 `project_points2.m`^[6] 可以将世界坐标系中的一点转换至像素坐标系中,找到机器人左前脚与右前脚在像素坐标系中的位置分别为点 $A:[25\ 480]$ 和点 $B:[615\ 480]$ 。前方消失点选取世界坐标系 Y 极大一点近似得到在像素坐标系中为点 $C:[320\ 27]$ 。 AC 和 BC 在世界坐标系中为两条平行线,消失于点 C 。机器人将要通过的路径在图像中即是以上三点围成的区域。应用 Matlab 的图像处理函数 `roipoly` 函数可以截取 ROI(感兴趣的图像区域)^[10]。如图 2,图中三角框内为机器人的估计路径。路径中出现的黑盒子即为所设置的障碍物。

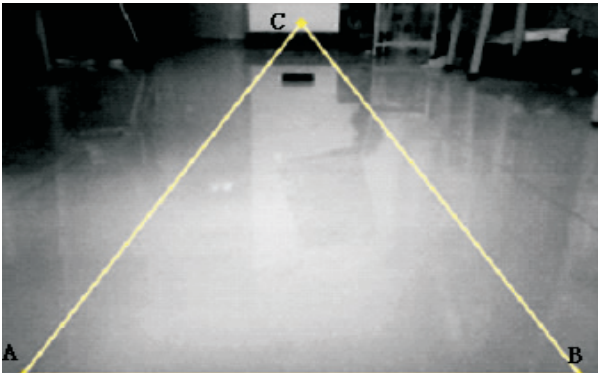


图 2 机器人移动路径

3 图像处理

单目视觉系统在完成图像采集之后,需要对获取图像进行各种预处理,以识别图像中特定估计路径区域内的障碍物。在此主要利用图像增强和分割技术实

现场景的特征提取。对于边缘提取和图像分割来说,对目标物分割提取结果影响最大的是图像中的背景阴影以及杂散噪声等^[11]。首先对图像进行灰度处理,得到如图 3 所示的效果,再进行图像形态学开运算,使图像平滑去噪。最后使用 `sobel` 算子^[11]可以得到障碍物的边界图像。

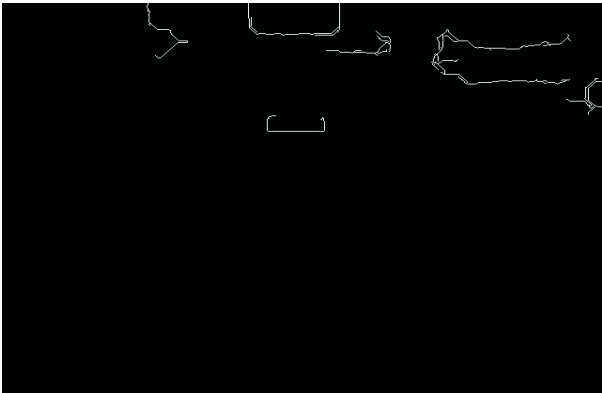


图 3 未考虑路径的边缘图像

若不考虑路径问题,直接运用 `bwareaopen` 函数删除小面积的对象,将比较小的图像干扰去除,可获得如图 3 的障碍物图像,在其中还明显包含了其他背景图像的边缘,需要进一步筛选才能获得影响机器人前进的主要障碍物^[12]。

在图 4 中,首先覆盖机器人预通过路径以外的边缘图像,减少了背景边缘图像的干扰。此时通过 `bwareaopen` 函数删除小面积的对象,得到如图 5 的障



图 4 考虑路径后的边缘图像提取

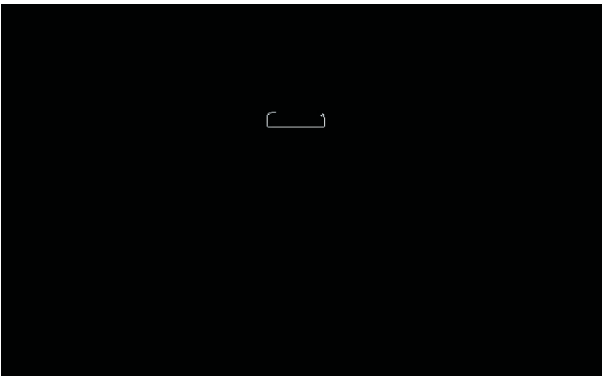


图 5 障碍物图像

碍物图像,经过与图 3 对比可明显清晰得到障碍物的位置。则直接借助 regionprops 函数得到障碍物的像素坐标信息。

4 距离测量

根据上文将地面上的障碍物投影在地面坐标系上,这样使 Z_w 轴的坐标参数设置为 0,代入公式(1)中可简化为:

$$\begin{cases} X_c = r_{11}X_w + r_{12}Y_w + t_1 \\ Y_c = r_{21}X_w + r_{22}Y_w + t_2 \\ Z_c = r_{31}X_w + r_{32}Y_w + t_3 \end{cases} \quad (5)$$

通过 Matlab 的标定工具箱提供的 normalize.m 函数可将 M 点的像素坐标转换成小孔几何模型 x_n ,如式(2)。跟式(5)可以组成关于 X_w 和 Y_w 的二元一次方程组。求出 X_w, Y_w 的值,即得到地面障碍物的距离参数。由于机器人在向前移动时预通过路径已经得到,障碍物如出现在路径上,碰撞距离即为机器人前进距离。由此可将测距模型简化成在机器人行动的 Y_w 方向距离,而忽略路线以外的障碍物。所以将障碍物在世界坐标系中的 X_w 坐标恒定,为方便起见选 X_w 为 0,得到关于 Y_w 的关系式:

$$x_d(2) = \frac{r_{22}Y_w + t_2}{r_{32}Y_w + t_3} \quad (6)$$

这样就可以得到关于测距的更为简便的计算方法。既可以准确监测前方障碍物距离,防止其他干扰障碍出现误操作,又可以有效减少程序处理的图像信息,提高机器人反应速度。

5 实验及分析

为了验证提出的单方向标定的可行性,实验首先将已标定的摄像头同标定第 18 张标定板一样的角度和高度固定在机器人的正中间,在机器人前方摆设障碍物大小为 114×43×29 mm 的长方盒。应用 Matlab 软件图像处理函数对所拍摄的图片进行预处理,对障碍物进行边缘检测,得到其在图像上的像素参数。计算得出前方障碍物的测量距离。表 1 给出了分别用传统方法结果 1 和单方向标定方法的结果 2 得出的 Y_w 方向距离,单位 mm。

实验结果表明两种方法的测量都存在一定的误差,其原因主要在于摄像头的畸变误差、标定的计算误差和图像处理等干扰误差。同时在不同光线的环境中也会影响到图像边缘提取的结果不同,从而影响测距效果,产生误差。但相比以上两种方法的结果相差不大,在实际应用中单方向标定测量方法的优点使其更能适应实际的需求。

表 1 测距实验结果

实际距离	结果 1	误差 1	结果 2	误差 2
500	491.8	8.2	491.4	8.6
1 000	985.0	15.0	984.9	15.1
1 500	1 447.8	52.2	1 447.4	52.4
2 000	1 967.4	32.6	1 966.6	33.4
2 500	2 466.8	33.2	2 463.2	36.8
3 000	2 971.6	28.4	2 970.3	29.7
3 500	3 458.3	41.7	3 456.2	43.8
4 000	3 961.7	38.3	3 959.9	40.1

6 结束语

文中通过 Matlab 软件机器人移动的预通过路径估计,对在路径之上的障碍物通过单目视觉进行前方障碍物测距。通过实验对比,采用路径估计方法得到的障碍物边缘图像处理较简单。在测距实验中,两种方法的测量误差平均在 2%,基本达到测距要求。但此实验过程仅局限于室内,对室外不同气候环境的干扰考虑不足,将是接下来该实验进行的重点工作。

参考文献:

[1] 郑南宁. 计算机视觉与模式识别[M]. 北京:国防工业出版社,1998:33-34.

[2] 张毅,罗元,郑太雄. 移动机器人技术及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,2007:27-28.

[3] 周磊,任国全,李冬伟. 视觉导航中的单目摄像机标定改进算法[J]. 计算机应用,2011,31(7):1838-1840.

[4] Forsyth D A, Ponce J. Computer vision: a modern approach [M]. 2nd ed. [s. l.]:Pearson,2003.

[5] 邱茂林,马颂德,李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报,2000,26(1):43-55.

[6] Bouget J Y. Matlab camera calibration toolbox[EB/OL]. 2003-04-18. http://www.vision.caltech.edu/bougetj/calib_doc/index.html.

[7] 孙玉青,冀小平. Matlab 标定工具箱在摄像机定标中的应用[J]. 太原科技,2010(3):99-100.

[8] 宋雪峰,杨明,王宏. 基于网格状纹理的简易摄像机标定方法[J]. 计算机工程与应用,2002,38(7):72-74.

[9] 李青,郑南宁,张雪涛. 用三线法标定车载摄像机的外部参数[J]. 光电工程,2004,31(8):23-26.

[10] 袁胜智,谢晓芳,郭清风,等. 红外目标图像感兴趣区域自动提取研究[J]. 电光与控制,2009,16(7):1-4.

[11] Castleman K R. 数字图像处理[M]. 朱志刚,译. 北京:电子工业出版社,2004:402-403.

[12] Hold S, Nuim C, Kummer A. Efficient and robust extrinsic camera calibration procedure for lane departure warning [C]//Proc of intelligent vehicles symposium. [s. l.]:IEEE, 2009:382-387.

单目视觉测距在移动机器人的应用

作者：[李欣](#), [董建园](#), [LI Xin](#), [DONG Jian-yuan](#)

作者单位：[西安建筑科技大学, 陕西 西安, 710055](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：

Computer Technology and Development

ISTIC

年, 卷(期):

2013(11)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201311061.aspx