

一种基于立式突出路标的巡检机器人 视觉自定位方法

杨树玉^{1,2,3}, 蔡富东⁴, 赵鹏鹏^{1,2,3}, 韩延彬^{1,2,3}, 李金屏^{1,2,3}

(1. 济南大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250022)

(2. 济南大学山东省网络环境智能计算技术重点实验室, 山东 济南 250022)

(3. 山东省“十三五”高校信息处理与认知计算重点实验室, 山东 济南 250022)

(4. 山东信通电子股份有限公司, 山东 淄博 255088)

[摘要] 在某些不允许对环境做出大量改造的苛刻的室内定位条件下, 传统的定位方法很难满足巡检机器人定位的需求, 而使用视觉方法尽可能利用环境中的自然路标或布设少量人工路标辅助定位是一种可行的方案. 鉴于某些特殊场合不允许在地面布设定位标志, 提出了一种应用少量立式突出路标的视觉定位解决方案, 即通过在环境中某些设备侧面布设少量的人工路标, 利用透视模型和三角函数, 完成机器人的定位. 实验表明, 该定位方法操作简单, 贴近实用, 且可获得较为准确的定位效果, 能够满足巡检机器人定位需求.

[关键词] 巡检机器人, 视觉定位, 人工路标, 立式路标, 透视模型

[中图分类号] TP391 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)03-0045-08

A Visual Self-localization Method of Patrol Robot Based on Vertical Highlighted Landmarks

Yang Shuyu^{1,2,3}, Cai Fudong⁴, Zhao Pengpeng^{1,2,3}, Han Yanbin^{1,2,3}, Li Jinping^{1,2,3}

(1. School of Information Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

(2. Shandong Provincial Key Laboratory of Network Based Intelligent Computing, University of Jinan, Jinan 250022, China)

(3. Shandong College and University Key Laboratory of Information Processing and Cognitive Computing in 13th Five-year, Jinan 250022, China)

(4. Shandong Senter Electronic Co., Ltd, Zibo 255088, China)

Abstract: In some special indoor cases, a large number of modifications on environment are not allowed. Therefore, it is difficult for traditional localization methods to localize them. Through the way of vision, it is feasible to use the natural landmarks in the environment or lay a small number of artificial landmarks to assist the positioning. On certain special occasions, localization landmarks are not allowed arrangement to the ground, so a visual method is proposed to use a small amount of vertical highlighted labels to localization. By setting a small amount of artificial landmarks in the environment, using the principle of perspective model and trigonometric function, robot localization is completed. The experiment shows that the proposed method is simple and practical, and that moreover, it can obtain localization information accurately and meet the location requirements of the patrol robot.

Key words: patrol robot, visual localization, artificial landmark, vertical landmark, perspective model

传统的机器人定位技术包括磁定位、惯性定位或里程计定位、激光定位、超声定位、卫星定位、视觉定位等^[1-2]. 磁定位需要在场景中布设磁带或磁性材料, 对导航环境的改造较大, 其路径的可变性和可维护性较差, 且存在材料的氧化问题^[3-4]. 惯性或里程计定位方法, 定位误差会随着机器人航程的增加而累积变大, 通常需要与其他定位方式结合^[5-6]. 激光定位中激光传感器价格昂贵、易出现镜面反射和漫反射, 受障碍物及表面光滑影响较大^[7]. 超声定位通常存在回波信息大、波束角大、角度分辨率差等不足^[8]. 卫星定位方法精度不高, 无法穿透建筑物, 通常无法应用于室内环境. 视觉定位是一种较直观的定位方法, 可

收稿日期: 2019-07-05.

基金项目: 国家自然科学基金(61701192)、山东省重点研发计划(2017CXGC0810)、山东省科技重大专项(新兴产业)项目(2015ZDXX0801A03).

通讯联系人: 李金屏, 博士, 教授, 研究方向: 模式识别、人工智能. E-mail: ise_lijp@ujn.edu.cn

应用于室内外定位,近年来随着视觉研究的深入及视觉系统成本的降低,基于视觉的定位方法逐渐成为巡检机器人定位研究的热点。

视觉定位中较为流行的是基于及时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)的定位方法和基于路标的定位方法^[9]。SLAM 定位方法在实际应用中需要预先构建环境地图,由于传感器测量的不确定性,机器人位置的估计和地图特征的估计都是不确定的,且这些不确定是相关的,因此其定位误差随着移动距离逐渐增加。工业生产中为保证定位的稳定性和准确性,通常使用活动信标^[10]或人工路标^[11-12]进行定位。但在某些特定定位场景中(如图 1(a)、(b))不允许在地面对环境做较多改造,此时选择合适的区域布设少量的人工路标成为解决该问题的关键。

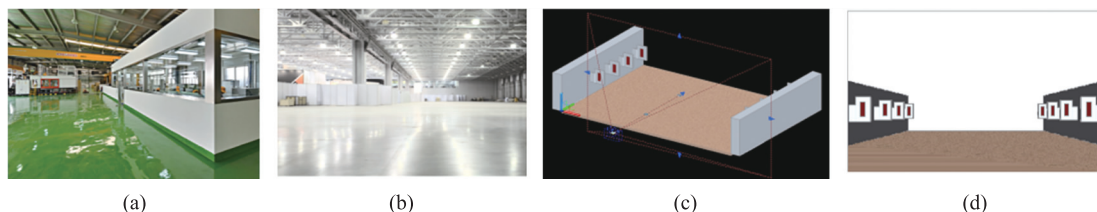


图 1 场景示意图及模型模拟图

Fig. 1 Scene schematic diagram and model simulation diagram

利用自然存在或在工厂设备上增加少量的定位路标辅助定位的方式贴近实用、操作简单,且便于员工控制。从国内外大量的研究工作来看,人工路标多布设在地面或天花板上。文献[13]将路标布设到天花板上进行定位,虽然该方式在一定程度上避免了噪声感染,但在天花板高度较高的情况下(如生产车间)往往难以保证其定位精度,且无法在户外应用。文献[14]设计了一种粘贴在地面上的规则路标,这种路标设计简单、便于检测,但无法避免环境或人为因素的污染,且远距离情况下定位误差较大。文献[15-17]设计了基于地面导航线的视觉定位方法,但该方法对环境改造较大,易磨损,并不适合特殊的定位环境。从大量的研究工作看,这种不允许在地面布设定位标志的特殊定位环境很难找到合适的区域布设人工路标同时保证定位精度。为解决该定位问题,本文提出了一种沿着巡检路径设置立式路标(见图 1(c)、(d))和基于该立式路标的检测和定位方法,可在较大程度上避免某些自然和人为因素对路标的污染,其定位准确性和实时性较高,贴近实用,能够满足巡检环境中的定位需求。

1 相关理论及概念

1.1 透视相机原理

图 2(a)所示的透视摄像机模型也称作针孔相机模型^[18],其描述了通过一个带有小孔的简单光学设备进行图像成像的过程。该模型可以代表现代摄像机的准确描述。

图 2(a)中透视中心到成像面中心的直线为相机的光轴或主轴,其中透视中心到成像面的距离为焦距。图中世界坐标系下的 x_p 点经过透视相机模型投影到图像平面上的点为 x_j ,此处 x_p 点投影到 x_j 点经历了 4 个坐标系的变换,分别为世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系和像素坐标系。图 2(b)展示了坐标系转化的简易模型,其中点 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ 到点 $p(x, y)$ 的转换表示了相机坐标系下的点到像素坐标系的变换。

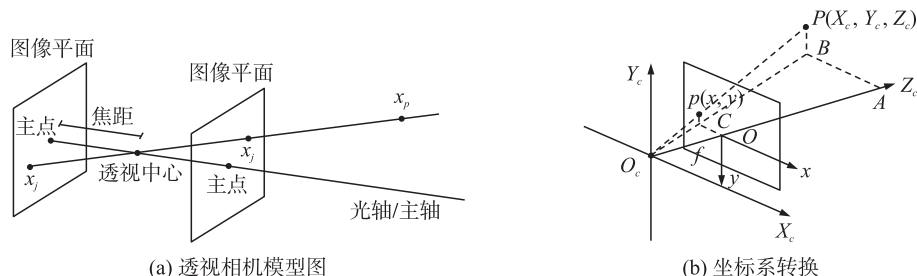


图 2 相机模型图

Fig. 2 Camera model

其转换过程可用式(1)来计算:

$$P = \begin{bmatrix} 1/k_u & 0 & u_0 \\ 0 & 1/k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中,右侧矩阵表示世界坐标系下的物体实际坐标,用齐次坐标系表示;相似变换矩阵中的 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 矩阵分别表示旋转变换矩阵和平移变换矩阵; f 为相机的焦距; k_u 和 k_v 分别为电荷耦合器件 (Charge-coupled device, CCD) 在 x 和 y 方向上的像元尺寸,单位为毫米/像素. 通过式(1)可将现实世界中的图像转换为相机图像.

1.2 色彩模型及二值化

HSV 色彩模型的参数由色调 (H)、饱和度 (S)、明度 (V) 组成,其亮度分量可单独提取出来进行分析. 由于本文的标签提取方法对亮度具有很高的敏感性,故使用 HSV 色彩模型对图像进行处理分析.

二值化是将图像上点的灰度值设置为 0 或 255,使整个图像出现只有明显的黑白效果. 在本文的标签提取算法中,使用固定阈值进行二值化提取出标签区域,为保证尽量准确无遗漏地提取标签区域,设置了一个较低的阈值来提取所有疑似标签的区域.

2 基于立式突出路标的局部定位原理

机器人的局部定位主要需要计算两个参数:机器人偏离预定路线的偏移距离和机器人偏移预定方向的角度. 本文通过在行进路线上的一系列立式突出路标,使用视觉定位的方式对路标进行分析,从而计算出机器人局部定位信息.

2.1 路标设计

针对路标应用场景中背景环境复杂多变,常规的视觉路标难以检测,设计了一种优先考虑准确检测的立式突出路标 (见图 3(a)),其中待检测区域使用红色反光材料 (尺寸为 15 cm×5 cm),在右侧中部额外增加一部分白色反光材料 (尺寸为 7.5 cm×5 cm) 以区分左右侧路标. 图 3(b) 为增加固定支架的路标,支撑部分安放位置和大小参数如图所示. 图 3(c) 中为支架部分的模型. 路标的铺设方式如图 3(d) 所示,将路标垂直粘贴到墙壁上. 相比于平行于墙壁的粘贴方式,垂直的粘贴方式可使机器人的摄像头在较远距离下即可捕捉到红色路标区域. 所有路标布设在距地面相同高度的墙壁上 (实验中布设高度为 125 cm),不要求左右两边对称且同侧路标间距不要求相同.

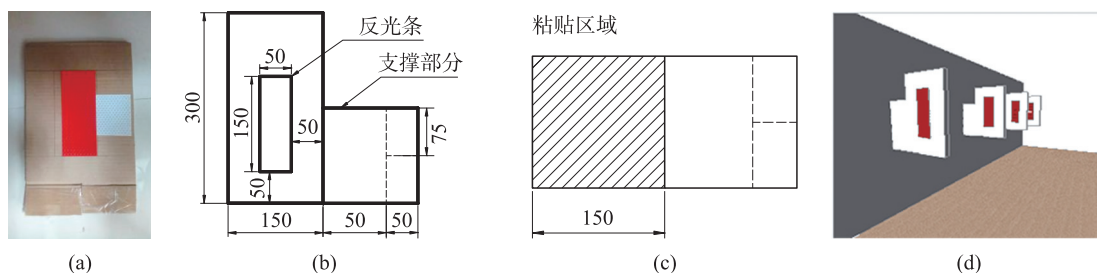


图 3 路标设计模型

Fig. 3 Model of label design

2.2 局部定位公式

规定机器人位置处于路径中央按给定的方向行进时为正确的位姿. 假定机器人在预定线路上只发生了角度的偏移,在不考虑距离偏移的情况下,可推理出其角度的偏移公式.

如图 4 所示,Robot 代表机器人当前位置;两侧墙壁上的路标分别用 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 表示; h 为单目摄像机的 CCD (COMS); f 为摄像机焦距; M 点为路径消失点,也即道路中心位置; l 为中轴线; d 为机器人距离右侧道路边缘的距离; α 为机器人的偏移角度; l_i 为摄像头光心到路径消失点的距离在感光元件上的长度.

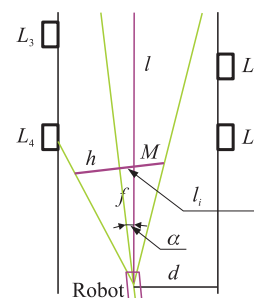


图 4 角度偏移示意图

Fig. 4 Diagram of angle deviation

当机器人角度发生偏移时,可通过两侧路标的连线计算出 M 点的位置,从而计算出 l_i 的长度,根据三角函数的关系,有:

$$\alpha = \arctan \frac{l_i}{f}. \quad (2)$$

再进一步推算为当角度和距离同时发生偏移时,其示意图如图 5 所示.

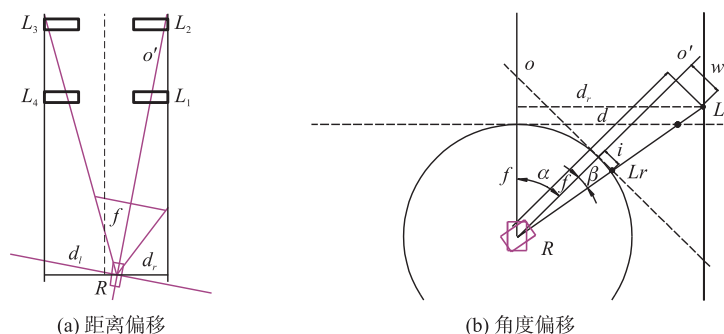


图 5 角度距离同时发生偏移

Fig. 5 The Angle and distance are offset at the same time

图 5 中,(a)表示机器人的角度和距离同时发生了偏移,其运行的方向并非正前方且所处的位置也不在路径中央,在这种状态下为机器人建立一种圆形的偏移模型,如图 5(b)所示. 图中, R 表示机器人; f 为机器人摄像头的焦距,以 f 为半径建立圆形模型,表示机器人的角度旋转只能在该圆形路径上进行; α 为当前机器人的偏移角度,可根据式(2)求出; o' 表示机器人摄像头的光心方向,也即机器人当前前进方向; o 表示机器人方向校正之后的光心方向;路径边缘与光心的距离 d_r 即机器人距离右侧墙壁的距离. L_1 为路径上的一个路标, RL_1 与 o' 的夹角为 β ,同时 L_1 在图像上的成像为 L_1' , i 为 L_1' 到光心的距离, w 为 L_1 到光心的距离, L_1 在摄像头光心方向上到机器人 R 的距离为 d .

人工路标在图上抽象为一个点,但路标是有实际尺寸的,如图 6 的旋转模型所示,图中路标的实际长度用 h_w 表示,投影到相机的成像面上的长度为 h_i , c 表示相机的成像面 (CCD),图中的 w 和 i 分别和图 5(b)中的 w 和 i 对应. 根据相似三角形原理,可得:

$$\frac{d}{f} = \frac{w}{i} = \frac{h_w}{h_i}. \quad (3)$$

已知相机的焦距 f 和图上的距离 i 以及路标的尺寸 h_w 和 h_i ,可以求得 d 和 w . 根据三角函数的关系,可得夹角 β 的表达式为:

$$\tan \beta = \frac{i}{f}. \quad (4)$$

RL_1 的长度可利用下式求得:

$$RL_1 = \frac{w}{\sin \beta}. \quad (5)$$

由此可求得图 5(b)中 d_r 的长度:

$$d_r = \sin(\alpha + \beta) \cdot RL_1, \quad (6)$$

$$d_r = \frac{\sin(\alpha + \beta) \cdot i \cdot h_w}{h_i \cdot \sin \beta}. \quad (7)$$

设实际的偏移距离为 d_o ,路径宽度为 d_w ,则该状态下的偏移距离公式为:

$$d_o = \frac{d_w}{2} - \frac{\sin(\alpha + \beta) \cdot i \cdot h_w}{h_i \cdot \sin \beta}. \quad (8)$$

3 巡检机器人视觉检测方法

为充分利用反光条路标的反光和红色特征来提取路标区域,可在机器人上增加固定光源,光源方向与

机器人运动的方向相同. 在路标检测中,首先利用其反光高亮特征,提取 HSV 空间中 V 通道较大的部分区域划分出疑似路标区域,再利用路标边缘颜色呈现红色的特征,在疑似路标的区域中提取出边缘为红色的区域作为图像中提取的路标区域.

3.1 路标粗提取

对获取的图像做预处理,将 HSV 色彩空间中的亮度信息作为独立单元提取出来进行分析. 规定将 HSV 三通道中的 V 通道值大于 250 作为疑似路标区域提取,效果如图 7 所示.

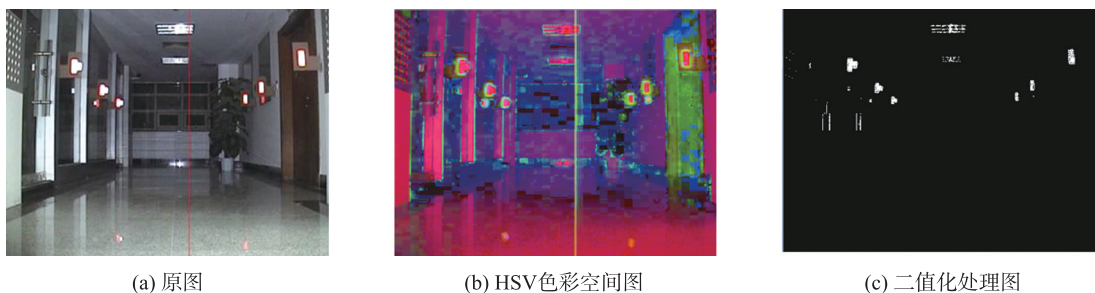


图 7 阈值处理及二值化

Fig. 7 Threshold processing and binarization

3.2 精确提取路标

在图像二值化后,为解决图像中路标区域有孔洞及整个图像含有大量噪声点的问题,利用开闭运算结合的方式对图像进行滤波操作,减少噪声(如图 8(a)所示). 处理之后的图像中仍包涵部分噪声,因定位需要的路标仅为前三组,故通过设置固定的面积阈值可筛选出所需路标,同时过滤部分噪声. 路标的反光材料呈现在图像中,其边缘部分会呈现出一定的颜色特征(如图 8(b)所示),利用该特征对其进行计算. 颜色差值函数可表示如下:

$$v = \frac{\sum_i \sum_j R(i,j) - G(i,j)}{\sum_i \sum_j (i,j)}, \quad (9)$$

式中, v 为差值阈值; i 和 j 为目标区域边缘像素坐标; 函数 R 和函数 G 分别为该点在 RGB 颜色空间下的 R 值和 G 值. 通过设置 v 的数值,可精确提取出路标区域,图 8(c)所示为其结果图.

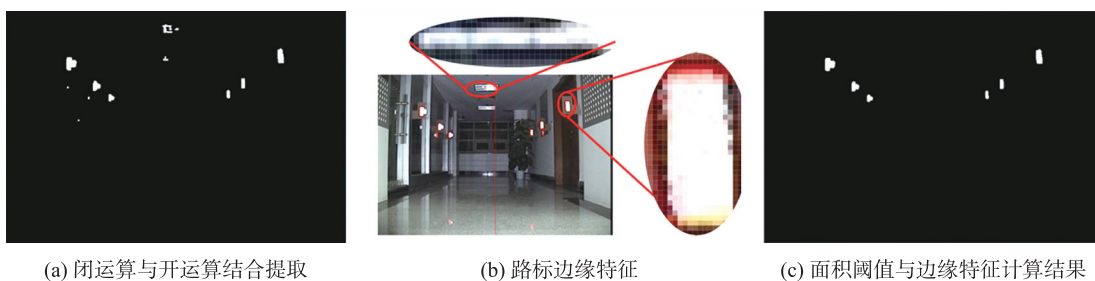


图 8 精确提取路标区域

Fig. 8 Get the label area exactly

4 实验结果与分析

4.1 实验环境

仿真实验中使用的机器人是美国 MobilerRobots 公司设计推出的智能移动机器人 Pioneer-P3DX. 机器人机身(图 9(a))主要包括顶板、用户控制面板、车身及附件面板、声呐环、电机、车轮、编码器、电源、电池等^[19]; 内置工控机主机部分包括 Intel 双核 2.4 G CPU、800MHz 内存及如 FDD 接口、USB2.0 等多种标准接口;除此之外,还有串口网络摄像头(图 9(b))、视频采集卡等外援视频采集设备,共同组合成的多功能先锋机器人,如图 9(c)所示. 仿真实验中使用的摄像头为安讯士 AXIS 214 PTZ Network Camera,其分辨率为 704×480,焦距设置为定焦 4.1 mm,光圈设置为 F1.3. 摄像头可在云台上进行 360°旋转及上下 180°的俯仰.

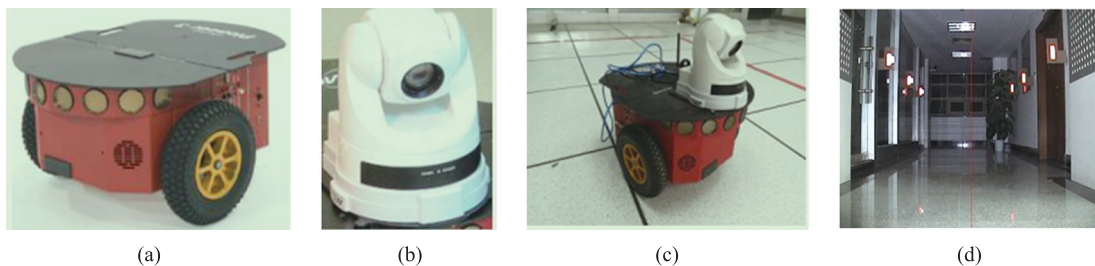


图 9 仿真实验设备及环境

Fig. 9 Simulation experiment equipment and environment

仿真实验环境为实验室外的廊道中(图 9(d)),廊道宽度为 2 500 mm,标签布设的高度为 1 250 mm,两侧墙壁上分别设置数个等高标签。

4.2 实验结果分析

仿真实验分别对该定位方法进行了机器人角度偏移和距离偏移实验。在角度偏移中,设置机器人方向为正前方(偏移 0°),并使用标签进行测定,记录下标签显示的偏移角度作为角度误差,记录 30 次实验的结果,如图 10(a)所示。为测定该方法的距离误差,将机器人到路标的垂直距离分为 5 个类别,分别为 280、300、320、360、400 cm,每个距离进行 10 次水平距离计算并统计该类别下的平均误差和误差方差,结果如图 10(b)所示。

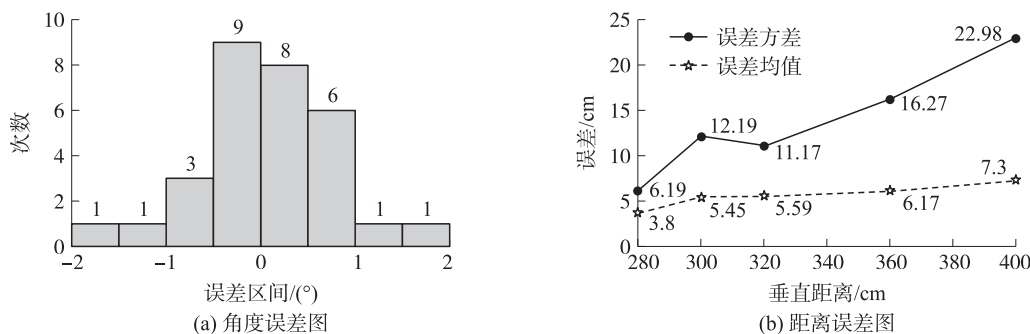


图 10 误差分析图

Fig. 10 Error analysis

角度误差实验中的测试结果按区间进行分类,横轴表示将角度误差分为 0 、 $(0, 0.5]$ 、 $(0.5, 1]$ 等 9 个区间,其中角度左偏为正值,右偏为负值;纵轴表示在该区间内的样本数。数据显示角度误差主要集中在 $[-1, 1]$ 内,证明该方法获取的机器人定位误差满足实际应用的需要。在距离误差的实验结果中可以看出,平均误差随着测试垂直距离的增加而增加,定位距离在 4 m 以内时平均误差可以控制在 10 cm 以内,误差的方差随垂直距离增加的趋势非常明显。

考虑到本文方法是对机器人摄像头获得的图像进行分析而获取的定位参数,图像的质量将直接影响结果的准确性。因此在理论上对误差产生的原因进行分析,得到图 11。在理论误差曲线中,实线表示理论透视距离,对应左侧纵坐标,也即摄像头距离路标越远,路标在图像中所占的像素就越少。虚线表示理论单像素计算误差,对应右侧纵坐标,表示每计算错误一个像素所带来的理论误差值。从图中可以看出,随着路标所占的像素数越来越少,透视距离逐渐变大,每计算错一个像素所带来的误差也越来越大,计算的容错性变小。当路标所占像素在 30 px 时,误差上升幅度剧烈增加,此时对应的理论距离为 385 cm。从分析可知,本文的定位方法在实验使用的摄像头条件下垂直距离应控制在 400 cm 以内,可保证定位精度控制在 10 cm 以内,且该方法对计算有一定的容错性,可满足实际应用需求。

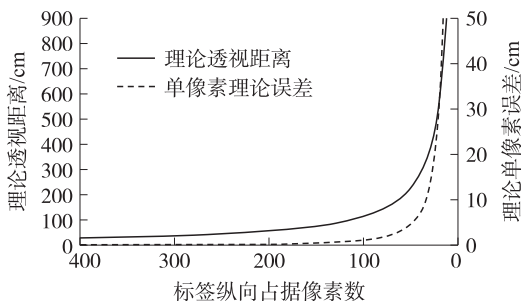


图 11 单像素理论误差与透视距离图

Fig. 11 Theoretical error of single pixel and perspective distance

实际应用中造成该方法产生定位误差的原因有很多,如受光照不均影响造成路标区域检测误差;由于相机并非绝对的小孔透视模型,基于这种原理而定义的方法会因为图像的畸变而产生一定的计算误差;此外路标布设过程中可能出现的人为误差也会对测试结果造成一定影响。

5 结语

本文提出的基于立式突出路标的定位方法实现了巡检机器人在某些特殊环境下的定位要求,适合无法在常规位置布设路标的工厂等室内环境。该方法降低了路标布设的要求。由于使用了反光材料和额外光源,对路标布设环境的要求也大大降低,可适应复杂多变的环境。该定位方法具有短距定位精准、操作简单方便、路径更改成本低等优势。但该方法尚未考虑在圆形或更复杂的路径环境下的定位,有待进一步研究。

[参考文献] (References)

- [1] 王志文,郭戈. 移动机器人导航技术现状与展望[J]. 机器人,2003,25(5):470-474.
WEN Z W, GE G. Present situation and future development of mobile robot navigation technology[J]. Robot, 2003, 25(5): 470-474. (in Chinese)
- [2] 杨娜,李汉舟. 服务机器人导航技术研究进展[J]. 机电工程,2015,32(12):1641-1648.
Yang N, LI H Z. Navigation of service robot: a review of recent developments[J]. Journal of mechanical & electrical engineering, 2015, 32(12): 1641-1648. (in Chinese)
- [3] STORMS W, SHOCKLEY J, RAQUET J. Magnetic field navigation in an indoor environment[C]//Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service. Kirkkonummi, Finland: Nordic Institute of Navigation, 2010.
- [4] 徐海贵,王春香,杨汝清,等. 磁传感系统在室外移动机器人导航中的研究[J]. 机器人,2007,29(1):61-66.
XU H G, WANG C X, YANG R Q, et al. A magnetic sensing system for outdoor mobile robot navigation[J]. Robot, 2007, 29(1): 61-66. (in Chinese)
- [5] 王聪,孙伟,卜德旭,等. 基于惯性导航与立体视觉的风管清扫机器人同时定位与地图创建方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 59-67.
WANG C, SUN W, BU D X, et al. Simultaneous localization and mapping research for air-duct cleaning robot based on inertial navigation and stereo vision[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(23): 59-67. (in Chinese)
- [6] 李子月,张林,陈善秋,等. 捷联惯性/卫星超紧组合导航技术综述与展望[J]. 系统工程与电子技术,2016,38(4): 866-874
LI Z Y, ZHANG L, CHEN S Q, et al. Ultra-tightly coupled SINS/GNSS navigation technology review and prospect[J]. Systems engineering and electronics, 2016, 38(4): 866-874. (in Chinese)
- [7] TAMAS L, LAZEA G, POPA M, et al. Laser based localization techniques for indoor mobile robots[C]//AT-EQUAL'09 Proceedings of the 2009 Advanced Technologies for Enhanced Quality of Life. Iasi, Romania: European Center for Secure Information and Systems, 2009.
- [8] 包闰贵. 室内机器人超声测距和定位算法的研究[D]. 合肥:安徽大学,2011.
BAO R G. Research on ultrasonic ranging and localization algorithm for indoor robots[D]. Hefei: Anhui University, 2011. (in Chinese)
- [9] 徐则中. 移动机器人的同时定位和地图构建[D]. 杭州:浙江大学,2004.
XU Z Z. Simultaneous location and mapping of mobile robots[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [10] GUTMANN J S, EADE E, FONG P, et al. A constant-time algorithm for vector field slam using an exactly sparse extended information filter[C]//2010 Robotics: Science & Systems Conference. Zaragoza, Spain: Universidad de Zaragoza, 2010.
- [11] WURMAN P R, MOUNTZ M. Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses[C]//National Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence. British Columbia, Canada: Association for the Advancement of Artificial Intelligence, 2007.
- [12] RUSDINAR A, KIM J, LEE J, et al. Implementation of real-time positioning system using extended Kalman filter and artificial landmark on ceiling[J]. Journal of mechanical science & technology, 2012, 26(3): 949-958.
- [13] PINTO A M G, MOREIRA A P, COSTA P G. Indoor localization system based on artificial landmarks and monocular vision[J].

- Telkomika, 2012, 10(4):609-620.
- [14] 矫翔. 基于单目视觉的室内 AGV 定位方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017.
JIAO X. AGV of indoor positioning method research based on monocular vision[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [15] 李金屏, 修择, 吕玉彬, 等. 基于虚拟定标线的巡检机器人视觉导航[J]. 中国体视学与图像分析, 2011, 16(1):50-56.
LI J P, XIU Z, LÜ Y B, et al. A patrol robot visual navigation method based on virtual calibraton line[J]. Chinese journal of stereology and image analysis, 2011, 16(1):50-56. (in Chinese)
- [16] 厉广伟, 夏英杰, 王宁, 等. 机器人视觉导航路径节点的编码与识别[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2015, 29(4):246-250.
LI G W, XIA Y J, WANG N, et al. Path node coding and recognition for autonomous robot vision navigation[J]. Journal of university of Jinan(science and technology), 2015, 29(4):246-250. (in Chinese)
- [17] 王宁, 吴翔, 韩延彬, 等. 基于二进制图案编码的机器人定位[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2014, 28(3):184-188.
WANG N, WU X, HAN Y B, et al. Robot localization based on binary pattern coding[J]. Journal of university of Jinan (science and technology), 2014, 28(3):184-188. (in Chinese)
- [18] MARKS N, ALBERTOS A. 特征提取与图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2010:288-300.
MARKS N, ALBERTOS A. Feature extraction and image processing[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2010:288-300. (in Chinese)
- [19] 杨洁, 闫清东. Pioneer 3-AT 上基于双目立体视觉的环境识别系统[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(2):102-106.
YANG J, YAN Q D. An environmental recognition system based on binocular stereo vision on pioneer 3-AT[J]. Research and exploration in laboratory, 2016, 35(2):102-106. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]