

文章编号: 1001-0920(2012)05-0792-05

移动机器人前向单目视觉的建模研究

张学习, 杨宜民, 蔡述庭

(广东工业大学 自动化学院, 广州 510090)

摘要: 为了实现目标对象的快速、精确识别, 对移动机器人前向单目视觉进行了建模. 首先, 给出了前向单目视觉成像模型, 包括软、硬件设计, 并结合目标特征属性得到目标中心在图像上的坐标; 然后, 通过视觉标定模型实现前向单目视觉的目标定位, 得到目标对象在机器人坐标系中的坐标; 最后, 利用参数估计的方法计算真实检测结果与理想检测结果的误差分布模型的参数, 得到前向单目视觉的观测模型. 实验结果表明, 前向单目视觉模型建立精确, 且实时性好.

关键词: 前向单目视觉; 移动机器人; 成像模型; 视觉标定模型; 观测模型

中图分类号: TP24

文献标识码: A

Model design of monocular front vision for mobile robot

ZHANG Xue-xi, YANG Yi-min, CAI Shu-ting

(College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China. Correspondent: ZHANG Xue-xi, E-mail: zxxnet_2@163.com)

Abstract: Aiming at the fast and precise recognition of target, mobile robot's monocular front vision is modeled. Firstly, image model of monocular front vision is proposed, including design flows of hardware and software, through which the target's position on image can be obtained. Then, target location by monocular front vision, through vision calibration model, is performed to get the target's position within the robot coordinate. Finally, parameter estimation method is applied to calculate the parameters of error distribution model of the real and ideal detection results, by which the observation model of monocular front vision can be achieved. Experiment results show that target recognition under this model design has better real-time property and higher accuracy.

Key words: monocular front vision; mobile robot; image model; vision calibration model; observation model

1 引言

视觉是人类最重要的感觉器官, 人类所获得的大部分外界信息都来自视觉. 随着人类对自然世界的不断探索, 人们总希望能通过某种数字化机器来实现人类视觉的功能, 自动地获取外部世界的信息^[1]. 建立一个能像人类一样快速、精确地感知外界变化的系统更是机器视觉的研究重点. 实际上, 机器视觉正是计算机视觉和人工智能在机器人学中的应用, 并随着机器人学以及计算机视觉和人工智能的发展而产生和发展起来的. 从硬件结构上来看, 常用的视觉传感器大致可分为全局视觉、单个摄像机视觉、双摄像机立体视觉和全向视觉^[2-5]. 从软件处理的角度来看, 机器视觉系统主要分为静止视觉、移动视觉和立体视觉^[6], 其中静止视觉的研究比较成熟. 对于移动机器

人而言, 单个摄像机视觉系统由于具有性价比高、实时性好等优点, 而具有广泛的应用前景. 文献[7]对移动机器人前向单目视觉的摄像机标定进行了研究; [8]对动态目标的识别进行了研究; [9-10]对单目视觉在移动机器人定位等领域的应用进行了算法的仿真实验. 但上述研究只涉及到移动机器人前向单目视觉硬件和软件的部分内容, 并没有对误差结果进行定量分析.

本文将移动机器人前向单目视觉的建模分为成像模型、视觉标定模型和观测模型3个部分, 并结合目标特征属性实现目标对象的精确、快速识别. 最后, 利用参数估计的方法计算真实检测结果与理想检测结果的误差分布模型的参数, 得到前向单目视觉的观测模型, 实现前向单目视觉的模型建立.

收稿日期: 2010-10-22; 修回日期: 2011-01-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61104105); 广东省“211工程”基金项目(粤发改[431]).

作者简介: 张学习(1978-), 男, 副教授, 博士, 从事智能控制、信息处理技术等研究; 杨宜民(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、人工智能等研究.

2 前向单目视觉成像模型

2.1 前向单目视觉的硬件设计

前向单目视觉由USB彩色数字摄像机和调节机构组成. 整套设备在调整好后可安装固定, 以确保在使用过程中不会出现松动、移位等影响视觉标定的现象. 前向单目视觉实物图如图1所示.

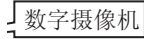


图1 前向单目视觉的硬件组成

图1中, 调节机构将整套设备固定在机器人车体上, 并可调节设备的高度和姿态, 使摄像机能观测到机器人附近特定区域的图像, 并保证采集图像不会出现歪曲、偏移等现象.

2.2 前向单目视觉的软件设计

前向单目视觉的软件处理包括图像采集、图像预处理、图像分割、特征提取和目标识别等模块, 其工作流程如图2所示.

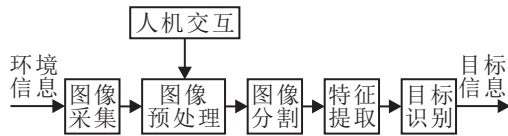


图2 前向单目视觉的工作框图

图2中, 人机交互的目的是对目标的相关信息进行检测, 图像分割采用基于颜色的阈值分割方法. 特征提取首先利用空间域处理方法中的邻域平均法实现图像去噪, 然后利用阈值法平滑图像, 最后对特征区域的属性进行计算^[11-12]. 目标识别则利用视觉标定加以实现.

由于摄像机捕捉图像时, 并不能保证目标(球)的整体都被拍摄到, 若直接利用求取平均值的方法计算球的中心位置坐标, 会存在较大误差. 因此, 应该结合球的4个顶点坐标, 对球的中心位置重新计算. 由于近大远小的关系, 球越靠近机器人, 捕捉到的半径越大. 因此, 摄像机捕捉到的球的半径与球在图像中的纵坐标 b_{ally} 成比例关系. 图像坐标系原点为图像左上角, 向右为 x 轴正方向, 向下为 y 轴正方向. 图像大小为 640×480 像素, 则可求出球的中心在图像的坐标位置 (b_x, b_y) 与4个顶点的关系, 其中球与左顶点 (l_x, l_y) 关系如下:

$$\begin{cases} b_x = l_x + r_{up} - l_y \times (r_{up} - r_{dn})/240, \\ b_y = l_y. \end{cases} \quad (1)$$

这里: r_{up}, r_{dn} 分别为摄像机捕捉到的球的最大半径和最小半径, 可在实际图像中通过测定得到.

3 前向单目视觉标定模型

特征提取获得目标在图像上的位置后, 需要进行视觉标定, 进一步得到其在机器人坐标系中的坐标. 由于前向单目视觉的摄像头不使用广角镜头, 本文假定摄像机的光学成像模型为针孔成像模型. 因此, 这里讨论的视觉标定是指目标点从图像坐标系到机器人坐标系的坐标映射^[13].

3.1 参数测定

为了计算目标特征点的实际位置, 需要测定如下参数: 摄像头镜面中心到机器人中心的距离 a , 摄像头捕捉到的地面上最近距离 e 与最远距离 g 和摄像头镜面中心到地面的垂直距离 j 等, 这些参数的单位均为 cm . 根据上述参数, 可计算出主光轴 c 与水平面的夹角 α , 各个角度的关系如图3所示.

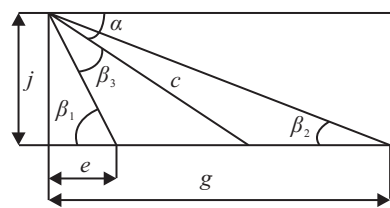


图3 主光轴与水平面的夹角示意图

3.2 测距模型

根据纵向测距模型和横向测距模型, 可求得球中心与镜面中心的距离 d_x 和 d_y . 纵向测距模型和横向测距模型如图4所示.

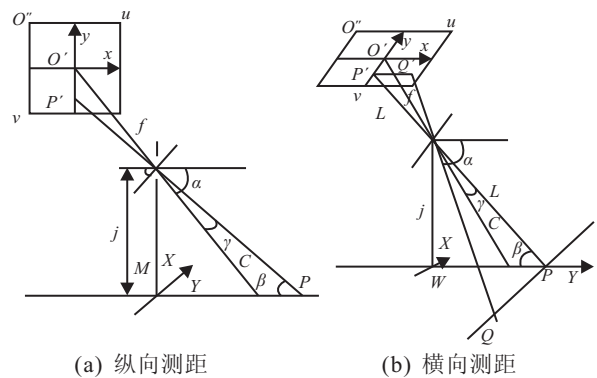


图4 测距模型

在图4中涉及如下几个坐标系: 摄像机坐标系 XMY , CCD平面坐标系 $xO'y$, 以及图像平面坐标系 $uO''v$. 图4(a)中: f 为焦距, 光轴为 c , 光心 O 到地面的距离为 j , 光轴与像平面的交点为 O' , 光轴 c 与水平方向的夹角为 α . 现地面上有一点 P , 通过透镜成像在像平面 $xO'y$ 上的像点分别为 P' , PP' 与地面的交角为 β , PP' 与光轴的交角为 γ . 对于图4(b), 设有两点 P, Q 在机器人坐标系 XMY 下的坐标为 $P(O, Y), Q(X, Y)$; 点 P', Q' 在 CCD 平面坐标系 $xO'y$ 下的坐标为 $P'(O, y), Q'(x, y)$; 点 P', Q' 在图像平面坐标系 $uO''v$ 下的坐标为 $P'(O, v), Q'(u, v)$; 点 $xO'y$ 在图

像平面坐标系 $uO''v$ 下的坐标为 $O'(u_0, v_0)$. PQ 垂直于 MY , 则有

$$\begin{cases} d_x = ((u_0 - u) \times \text{ccd}_x \times h) / \\ (\sqrt{f^2 + (v - v_0)^2} \times f \times d_y^2 \times \\ \sin(\alpha + \tan^{-1}((v - v_0) \times \text{ccd}_y / f))), \\ d_y = h / \tan(\alpha + \tan^{-1}((v_0 - v) \times \text{ccd}_y / f)), \end{cases} \quad (2)$$

其中 ccd_x 和 ccd_y 分别为 CCD 平面中的一个像素对应于像平面在 x 轴和 y 轴方向上的物理尺寸大小. 图像分辨率取 640×480 , 所对应的 (u_0, v_0) 则为 $(320, 240)$. 由式 (2) 计算得到的球的坐标是相对于摄像头镜面中心的, 需要将该坐标转换为以机器人中心为原点的坐标, 即

$$\begin{cases} u_x = d_x + a, \\ u_y = d_y. \end{cases} \quad (3)$$

4 前向单目视觉的目标定位结果及分析

实验中 XP-130MG 彩色数字摄像头放置在机器人的正前方; 计算机 CPU 为 Intel Core Duo(Yonah), T2300(1.66G), 内存为 1024M, 程序采用 VC++ 6.0 进行编程实现. 前向单目视觉的目标定位结果如表 1 所示.

表 1 前向单目视觉目标定位结果


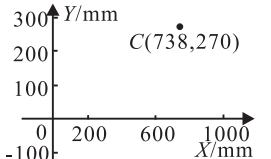

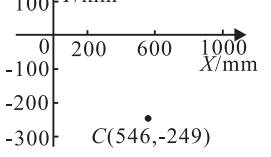
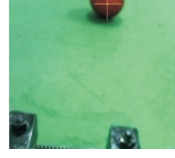
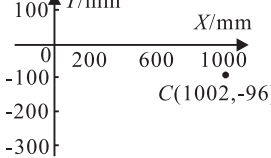
序号	原始图像	目标定位结果
1		 C(738, 270)
2		 C(546, -249)
3		 C(1002, -96)

图 5 中, 圆点代表球的中心, 定位结果以 mm 为单位, 图 5(a)~图 5(b) 中球的实际位置坐标分别为 $(702, 300)$, $(515, -260)$ 和 $(1050, -120)$. 实验中, 当球在机器人前向附近时, 前向单目视觉能准确地获得目标中心的位置. 当机器人只能看到一部分目标物体时, 仍然能由特征属性计算出目标的中心坐标. 前向单目视觉采集并处理一帧图像的时间不到 10ms, 实时性较好.

5 前向单目视觉观测模型

实验结果表明, 目标距离机器人越远, 识别误差

越大. 因此, 有必要进一步研究前向单目视觉的观测模型. 观测模型用于计算目标位于机器人坐标系下的不同位置时测量数据的分布情况. 首先, 将目标球放置在前向单目视觉的视野范围内的不同位置上, 计算得到目标球在机器人坐标系下的坐标; 然后, 利用测量工具得到球在机器人坐标系下的实际坐标; 最后, 利用参数估计的方法计算真实检测结果与理想检测结果的误差分布模型的参数^[14]. 根据实际测量结果, 目标球位于机器人 500mm 以内的距离, 前向单目视觉的测量误差基本可以忽略. 考虑到机器人的特性, 下面以目标球位于机器人正前方 500mm 处进行观测, 从而得到前向单目视觉传感器模型的误差形式. 机器人对位于正前方 500mm 的目标球的距离检测结果如图 5 所示, 共进行了 1500 次实验.

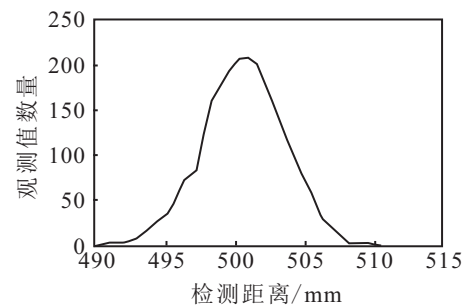


图 5 实际距离检测结果直方图

从图 5 可以看出, 前向视觉传感器观测值的分布基本上是以理想观测结果为均值的正态分布. 对于这 1500 组数据, 其均值为 500.7238 mm, 方差 σ 为 8.9360 mm^2 . 下面利用 Matlab 对实验结果进行进一步的处理. 在 Matlab 的 cftool 工具箱中, 提供了高斯分布的拟合函数, 具体步骤如下:

Step 1: 将各个观测距离数据的值存入数组 D , 将其对应的个数存入数组 E , 并输出到工作空间;

Step 2: 分别将数组 D , E 导入到 cftool;

Step 3: 选择“Gaussian”进行拟合.

拟合得到的结果如图 6 所示. 其中: 均值为 500.8 mm, 方差为 8.5698 mm^2 .

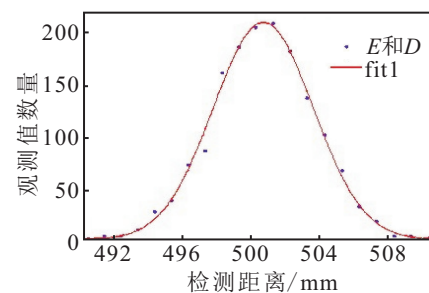


图 6 拟合后的距离直方图

在得到前向单目视觉传感器模型的具体形式后, 需根据真实的检测结果确定不同观测距离的 σ 的具体数值. 根据实际情况, 为了简化计算过程并减小查

找表需要的存储空间, 在观测距离上, 间隔 5 cm 计算一次 σ . σ 的计算是在大量检测结果上进行的 (每个位置重复进行 1 500 次观测), 具体过程如下:

Step 1: 将球放置在前向视觉视野范围内的不同位置上, 经过图像处理、目标识别和视觉标定等步骤, 计算出球在机器人坐标系下的坐标, 即观测结果;

Step 2: 利用测量工具得到球在机器人坐标系下的实际坐标, 即观测模型的理想观测结果;

Step 3: 根据理想观测结果和实际观测结果, 计算不同观测距离上的 σ 值.

在观测模型的参数计算中, 在场地上采集大量真实的观测图像并计算球到机器人的距离是建立前向单目视觉传感器观测模型的重要步骤. 在真实观测图像采集过程中, 球在场地上的位置必须尽量准确测量得到. 根据本文前面所述的实验方法, 球在机器人不同距离的原始方差和拟合后方差如图 7 所示.

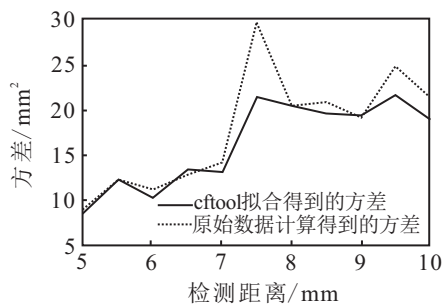


图 7 前向单目视觉方差分布图

从图 7 可以看出, 对原始数据进行拟合以后, 一定程度上降低了方差. 在前向单目视觉成像模型和视觉标定模型不变的情况下, 本文对 5 个机器人的 σ 值进行测量, 实验结果如表 2 所示.

表 2 不同机器人的前向单目视觉传感器方差值 mm^2

检测距离/mm	机器人				
	1	2	3	4	5
500	8.469 8	8.132 2	8.295 1	8.113 1	8.250 1
600	10.210 3	10.816 0	9.679 7	10.208 1	10.385 7
700	13.011 6	12.829 8	12.729 8	13.358 5	12.259 8
800	20.032 2	20.297 8	19.831 5	20.529 2	20.740 3
900	18.838 0	19.178 9	20.018 5	18.940 3	19.025 1
1000	18.199 0	17.735 0	18.215 5	19.007 5	18.093 9

从表 2 可以看出, 在相同距离的 σ 值, 不同机器人的结果是不同的. 具体原因主要包括: 彩色摄像机出场参数的误差和前向单目视觉安装的误差等.

6 结 论

为了实现目标对象的快速、精确识别, 本文对移动机器人的前向单目视觉进行了建模研究. 首先, 给出了前向单目视觉的硬件设计和软件设计流程; 然后, 对各个模块进行了说明, 包括: 图像分割和特征提取等; 接着, 通过视觉标定模型实现前向单目视觉的

目标定位; 最后, 利用参数估计的方法计算真实检测结果与理想检测结果的误差分布模型的参数, 得到前向单目视觉的观测模型. 目标定位结果表明了该设计方案的有效性, 观测模型的建立为相关的数据处理算法提供了参数依据.

参考文献(References)

- [1] 庄严, 陈东, 韩建达, 等. 移动机器人基于视觉室外自然场景理解的研究与进展[J]. 自动化学报, 2010, 36(1): 1-11.
(Zhuang Y, Chen D, Han J D, et al. Status and development of natural scene understanding for vision-based outdoor mobile robot[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(1): 1-11.)
- [2] Linda G Shapiro, George C Stockman. Computer vision[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 16-19.
- [3] 刘斐. 应用于足球机器人的彩色全向视觉关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2007: 2-10.
(Liu F. Research on key issues of color omni-directional vision for soccer robots[D]. Changsha: Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2007: 2-10.)
- [4] 许俊勇, 王景川, 陈卫东. 基于全景视觉与里程计的移动机器人同步定位和地图创建研究[J]. 机器人, 2008, 30(4): 289-297.
(Xu J Y, Wang J C, Chen W D. Omni-vision and odometer based self-localization for mobile robot[J]. Robot, 2008, 30(4): 289-297.)
- [5] 张学习, 杨宜民, 何启承, 等. 基于前向单目视觉的机器人自定位研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(8): 849-851.
(Zhang X X, Yang Y M, He Q C, et al. A self-localization method with monocular front vision for robot[J]. Laser and Infrared, 2008, 38(8): 849-851.)
- [6] 张峰, 史利民, 孙凤梅, 等. 一种基于图像的室外场景自动三维重建系统[J]. 自动化学报, 2010, 36(5): 625-633.
(Zhang F, Shi L M, Sun F M, et al. An image based on 3D reconstruction system for large indoor scenes[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(5): 625-633.)
- [7] 谢云, 杨宜民. 基于单目视觉的自主足球机器人自定位研究[J]. 电路与系统学报, 2006, 11(1): 29-34.
(Xie Y, Yang Y M. The study of self-localization for autonomous soccer robot based of monocular vision[J]. Journal of Circuits and Systems, 2006, 11(1): 29-34.)
- [8] 卢惠民, 王祥科, 刘斐, 等. 基于全向视觉和前向视觉的足球机器人目标识别[J]. 中国图像图形学报, 2006, 11(11): 1686-1689.
(Lu H M, Wang X K, Liu F, et al. Omni-vision and front

- vision based object recognition for soccer robots[J]. J of Image and Graphics, 2006, 11(11): 1686-1689.)
- [9] 陈伟, 吴涛, 李政, 等. 基于粒子滤波的单目视觉 SLAM 算法[J]. 机器人, 2008, 30(3): 242-247.
(Chen W, Wu T, Li Z, et al. A monocular vision SLAM algorithm based on particle filter[J]. Robot, 2008, 30(3): 242-247.)
- [10] 刘洞波, 刘国荣, 喻妙华. 基于单目视觉的机器人 Monte Carlo 自定位方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(2): 251-254.
(Liu D B, Liu G R, Yu M H. Monocular vision based Monte Carlo localization for mobile robot[J]. Control and Decision, 2010, 25(2): 251-254.)
- [11] 徐德, 谭民. 基于知识的机器人视觉测量分类与进展[J]. 控制与决策, 2010, 25(4): 481-486.
(Xu D, Tan M. Development and classification of knowledge-based visual measurement for robots[J]. Control and Decision, 2010, 25(4): 481-486.)
- [12] Alberto Broggi, Claudio Caraffi, Rean Isabella Fedriga, et al. Obstacle detection with stereo vision for off-road vehicle navigation[C]. Proc of the 2005 IEEE Computer Society Conf on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, 2005: 65-73.
- [13] 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.
(Qiu M L, Ma S D, Li Y. Overview of camera calibration for computer vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(1): 43-55.)
- [14] 王忠巍, 曹其新, 栾楠, 等. 基于多传感器数据融合的管道机器人精确定位技术[J]. 机器人, 2008, 30(3): 238-241.
(Wang Z W, Cao Q X, Luan N, et al. Precision location technology of pipeline robot based on multi-sensor data fusion[J]. Robot, 2008, 30(3): 238-241.)

(上接第 791 页)

- [12] Xu Z S, Da Q L. An overview of operators for aggregating information [J]. Int J of Interlligent Systems, 2003, 18(9): 953-969.
- [13] Aczel J, Alsina C. Synthesizing judgements: A functional equation approach[J]. Mathematical Modelling, 1987, 9(3-5): 311-320.
- [14] 魏翠萍. 层次分析法中和积法的最优化理论基础及性质[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(9): 113-115.
(Wei C P. The optimization basis and properties of the sum-product method in AHP[J]. System Engineering – Theory and Practice, 1999, 19(9): 113-115.)
- [15] 骆正清. AHP 中不一致性判断矩阵调整的新方法[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(6): 84-92.
(Luo Z Q. A new method for adjusting inconsistency judgment matrix in AHP[J]. System Engineering – Theory And Practice, 2004, 24(6): 84-92.)
- [16] Wang Y M, Chin K S, Luo Y. Aggregation of direct and indirect judgments in pairwise comparison matrices with a re-examination of the criticisms by Banae Costa and Vansnick[J]. Information Sciences, 2009, 179(3): 329-337.

下 期 要 目

- 非线性系统确定采样型滤波算法综述 王小旭, 等
- 基于局部搜索与混合多样性策略的多目标粒子群算法 贾树晋, 等
- 处理动态优化问题的捕食元胞遗传算法 陈 昊, 等
- 引入人工蜂群搜索算子的粒子群算法 高卫峰, 等
- 结构化对等网络中基于信誉的乐观路由决策 杨 磊, 等
- 基于多尺度并行免疫克隆优化聚类算法 陶新民, 等
- 应急物资运输与分配决策模型及其改进粒子群优化算法 庞海云, 等
- 产出不确定的农产品供应链协调问题研究 王道平, 等