

基于双目视觉的室内服务机器人航向角补偿方法

于清晓, 闫维新, 付 庄, 赵言正

(上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要:为了减少陀螺仪累积误差及外界磁场对机器人航向角的影响,提出了一种基于双目视觉的服务机器人航向角补偿方法。采用颜色分割与重投影相结合的方法,检测图像中的地面区域,通过加权平均融合检测结果,得出较完整的地面图像区域;使用 Canny 算子提取边缘直线,并进行滤波处理,求出视觉反馈角度,调整机器人的姿态直至反馈角度趋近于零;结合当前陀螺仪方向角和标准方位角,求出此时机器人航向角的偏移角。实验表明,该方法实时性好、航向角精度高,受光照变化的影响较小,完全可以满足室内移动机器人实时导航需求。

关键词:颜色分割;重投影;加权平均;Canny 算子

中图分类号: TP242.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)03-0007-05

A Heading Angle Compensation Method of Indoor Service Robot Based on Binocular Vision

Yu Qingxiao, Yan Weixin, Fu Zhuang, Zhao Yanzheng

(State Key Lab of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To reduce the effect on the heading angle induced by the accumulated error of the gyroscope and the external magnetic field, a heading angle compensation algorithm based on binocular vision was proposed. The color segmentation method combined with the re-projection transformation was adopted to detect the floor area in the image, and the weighted average method was applied to fuse the detected results to obtain the whole ground plane area. By using the Canny operator, straight edges were extracted and filtered to calculate the feedback angle. Then, the posture of the robot was adjusted until the feedback angle was nearly equal to zero. Therefore, the heading offset angle can be calculated by combining the current angle of the gyroscope with the corresponding standard orientation angle. Experimental results indicate that the proposed algorithm, which has good real-time and high accuracy, is robust to illumination changes, and moreover, it can meet the demand of the indoor mobile robot navigation effectively.

Key words: color segmentation; re-projection transformation; weighted average; Canny operator

机器人位姿检测对于在大型室内环境中的移动机器人长距离导航至关重要。移动机器人的位姿可表示为 $[x, y, \theta]^T$, 其中 (x, y) 表示机器人坐标值, θ 为机器人航向角。确定移动机器人位姿的方法大致分为两大类^[1]: 实时跟踪机器人位姿和机器人全局位姿估计。机器人全局位姿估计方法中, 机器人航向角大多通过其携带的陀螺仪获取^[2]。目前, 移动机器人使用的陀螺仪, 即使在相同条件下进行测量, 测量值也会存在差异, 差异值便为陀螺仪的漂移量。移动机器人导航中, 陀螺仪方向角的漂移主要来自两方面: 陀螺仪电子器件受温度影响, 使测量结果发生漂移, 并随时间累积; 环境中的铁磁物体干扰地磁场, 从而影响陀螺仪的测量精

收稿日期: 2012-12-18

基金项目: 国家高科技发展计划(“863”计划)项目(2007AA041601, 2007AA041602, 2007AA041603); 国家自然科学基金项目(61105101); 机器人技术与系统国家重点实验室开放研究项目(SKLR-2010-ZD-06)

作者简介: 于清晓(1982—), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 从事室内服务机器人、机器视觉等方面研究。

E-mail: qingdao_yu@yahoo.com.cn

赵言正(1965—), 男, 山东烟台人, 教授, 博士生导师, 从事特种机器人、智能机器人等方面的研究, 本文通信作者。

E-mail: yzh-zhao@sjtu.edu.cn

度。因此,必须对陀螺仪方向角进行校正,以获取较准确的航向角,实现移动机器人的自主导航。

本研究采用加权平均方法融合颜色分割和重投影法检测的地面图像区域,通过 Canny 算子提取区域内的特征直线,采用基于视觉反馈的机器人姿态调整方法,补偿机器人的航向角,提高机器人航向角的测量精度。

1 基于视觉反馈的服务机器人航向角补偿方法

1.1 路面图像区域检测

视觉图像中包含了大量的图像信息,为减少视觉处理的计算量,需先提取图像中感兴趣的区域。利用视觉信息实现特征目标检测的方法有 4 种:颜色和灰度、边缘、光流、立体视觉的三维信息^[3]。本文采用基于颜色分割与双目视觉重投影相结合的方法,融合二者的图像处理结果,获得较准确的路面区域。

颜色分割方法需选用合适的颜色空间以便得到较好的图像分割结果。HSV(hue, saturation, value)空间比较接近人对颜色的视觉感知,并以两个重要的事实作为基础^[4-5]:V 分量与彩色信息无关;H 和 S 分量与人感受彩色的方式紧密相连。因此,本研究选用 HSV 彩色空间进行图像分割。首先,RGB(red, green, blue)图像通过颜色空间转换为 HSV 颜色空间,根据路面的颜色特征,对 H 和 S 分量分别设置阈值,以获得大致的路面区域;然后,将得到的图像区域进行膨胀处理,并分割为若干互不相连的子区域;最后,选取面积最大的子区域作为路面区域。

此外,采用双目视觉重投影法,提取图像中的路面区域。重投影方法避免了特征点的匹配问题,障碍物检测简化为图像间的变换,具有简单、快速的特点。重投影变换方法最初应用于实时障碍物检测中,由 Zhu^[6]和 Zhang^[7]先后独立提出,实现了利用立体视觉技术实时检测障碍物。其后的一些文献中,重投影变换也被称为地平面对换^[8],并逐渐得到了越来越多的重视和应用。重投影变换原理^[7]如下。

设左、右摄像机坐标系分别为 $X_1Y_1Z_1$ 和 $X_2Y_2Z_2$,其中 Z_1, Z_2 为各自的光轴,世界坐标系为 XYZ ,则左、右摄像机之间的关系为

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{R}_1 \mathbf{X}_1 + \mathbf{R}_2^{-1} (\mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_2) = \mathbf{R} \mathbf{X}_1 + \mathbf{T}. \quad (1)$$

其中: $\mathbf{X}_1 = [x_1, y_1, z_1]^T$, $\mathbf{X}_2 = [x_2, y_2, z_2]^T$ 为点 X 在两摄像机坐标系中的坐标; $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ 为左摄像机、右摄像机的旋转矩阵; $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2$ 为相应的平移量。

在针孔成像模型下,左、右图像 Ψ_1 和 Ψ_2 的坐标可分别表示为:

$$(u_1, v_1) = \left(F_1 \frac{x_1}{z_1}, F_1 \frac{y_1}{z_1} \right); (u_2, v_2) = \left(F_2 \frac{x_2}{z_2}, F_2 \frac{y_2}{z_2} \right). \quad (2)$$

其中, F_1 和 F_2 分别为左、右摄像机的等效焦距。若点 X 在平面 Π 上,且光心 O_1 和平面 Π 的距离为 d ,则有 $pu_1 + qv_1 + rF_1 = d \frac{F_1}{z_1}$ 。若选取平面 Π 在 XOY 上,则 (p, q, r) 可由 \mathbf{R}_1 和 \mathbf{T}_1 直接求出。结合上述信息得到关系式:

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= \frac{C_1 u_1 + C_2 v_1 + C_3}{E_1 u_1 + E_2 v_1 + E_3} \\ v_2 &= \frac{D_1 u_1 + D_2 v_1 + D_3}{E_1 u_1 + E_2 v_1 + E_3} \end{aligned} \right\} \circ. \quad (3)$$

其中: $C_i, D_i, E_i (i=1, 2, 3)$ 为重投影系数,则 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ D_1 & D_2 & D_3 \\ E_1 & E_2 & E_3 \end{bmatrix}$ 即重投影变换矩阵。由式(3)建立的重投影

关系可知,地面上的点在重投影图像 Ψ_1 和右图像 Ψ_2 上具有相同的投影位置,即产生地面点的零视差。则由重投影变换矩阵,求出图像中零视差点区域,即为地面图像区域。

通过上述方法,得到两组路面区域后,采用加权平均法进行信息融合,以获得最终的路面图像区域。本文采用的加权平均信息融合公式为

$$out = \text{sign}(\text{believe}_1 \times out_1 + \text{believe}_2 \times out_2 + \theta). \quad (4)$$

其中: out_1, out_2 分别是单、双目视觉判别方法的输出,1 代表完全可通行区域,0 代表障碍物; $believe_1,$

$believe_2$ 分别为单、双目视觉判别结果置信度,表示判别结果的可靠性,最大为 1,最小为 0; θ 为待定阈值。

加权平均法需选取合适的加权置信度,以获得较理想的融合效果。为充分考虑单目视觉判别的结果,本研究把单目判别的置信度 $believe_1$ 设置为 1,而双目视觉判别结果的置信度,由式(5)计算^[3]:

$$believe_2 = 1 / (1 + e^{t_0 - t}) \quad (5)$$

其中: t 是纹理一致程度的量化指标, t 越大,纹理越复杂,反之,纹理越均匀一致; t_0 是待定的纹理阈值。 t 值可以通过式(6)获取:

$$t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [g(x_i, y_j) - g(x_i + dx_i, y_j + dy_j)]^2 \quad (6)$$

1.2 机器人航向角补偿算法

由式(4)求出地面区域后,采用 Canny 算子^[9-10],提取边缘直线,求出有效特征直线的角度,以校正陀螺仪的方向角。Canny 算子的检测结果夹杂着一些无效的直线,需提取有效的特征直线。本研究采用双阈值法,分别对直线的长度、角度属性设置阈值,以筛选有效的特征直线。首先对直线长度属性设置阈值,筛选出大于阈值的所有直线;然后对直线角度属性(相对于图像坐标系 X 轴的夹角)设置阈值,进一步筛选出满足角度阈值区间的直线。此外,为去除噪声干扰,提高反馈角的精度,仍需对双阈值处理过的直线进行滤波处理。本文采用剔除直线角度的最大值、最小值后再进行均值滤波的方法,求取直线的反馈角度。首先,求取所有直线角度绝对值的平均值;然后,剔除与该平均值之间的差值最大的两条直线;最后,对余下的直线角度进行均值滤波,滤波的结果即所求的反馈角。

获得视觉反馈角后,采用基于视觉反馈的机器人姿态调整方法,调整机器人的位姿直至反馈角度基本为零;记录当前陀螺仪的方向角,结合事先标定的标准方位角,便可求出当前机器人航向角的偏移角。图 1 为基于视觉反馈的机器人姿态调整算法的结构示意图。

调整机器人的姿态,确保视觉反馈角趋近零时,记录当前陀螺仪的方向角,与对应的标准方位角之间的差值,即为陀螺仪方向角的漂移值。陀螺仪方向角的漂移角可表示为

$$\alpha = \theta_G - \theta_T \quad (7)$$

则在一个陀螺仪方向角校正周期内,服务机器人实际的航向角可表示为

$$\theta_R = \theta_G + \alpha \quad (8)$$

其中: θ_R 为机器人当前实际的航向角; θ_G 为陀螺仪的当前方向角; θ_T 为目标方位的标准方位角; α 为陀螺仪方向角的漂移值。

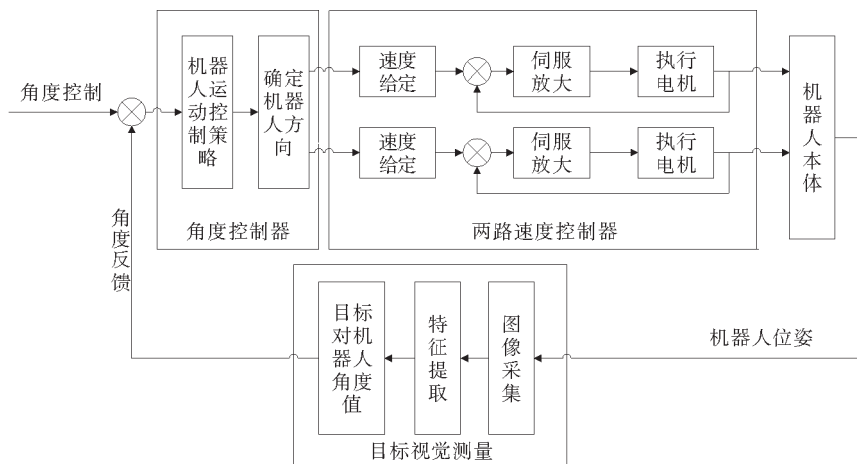


图 1 基于视觉反馈的机器人姿态调整算法结构示意图

Fig. 1 The chart of the robot pose adjustment algorithm based on visual feedback

2 实验及结果分析

本研究采用的实验平台是一台装有双目视觉的餐厅服务机器人,如图 2 所示。机器人餐厅的地板上交替铺着双色地毯,每个地毯的位置固定,不能发生相对移动,确保地毯间的边缘直线只有东西南北四个方位。事先通过陀螺仪,校准出这四个方位的标准方向角(多次测量取平均值),并存储在数据库中备用。

服务机器人运动过程中,双目视觉能够实时获取机器人前方的路况信息。采集到的图像经图像校正后,才能用于随后的图像处理。图 3 为经图像校正处理后的双目视觉图像。

为补偿机器人的航向角,需要先提取图像中的地面区域,然后提取该区域中的特征直线。分别采用颜色分割和重投影方法对双目图像进行处理,并对得到的检测结果进行加权平均融合,即可获得较准确的地面图像区域。图 4 中标注的区域即为获得的餐厅地面图像区域。



图 2 餐厅服务机器人图片

Fig. 2 The image of the restaurant service robot

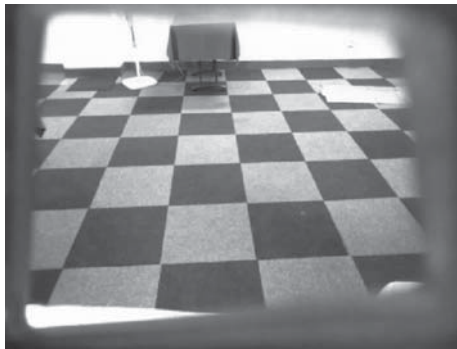


图 3 经图像校正后的餐厅环境图

Fig. 3 The corrected restaurant environment image

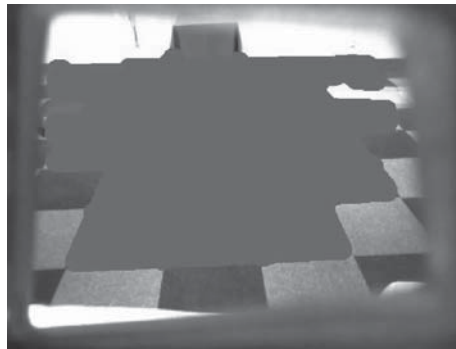


图 4 信息融合后获得的地面图像区域图

Fig. 4 The obtained ground area image with the weighted average fusion

通过 Canny 算子处理后,可获取地面图像区域内的 58 条边缘直线。为提取有效的特征直线,对直线的长度、角度等属性设置阈值,可提取图 5 所示的共 14 条特征直线,其角度的弧度值分别为 $[0.030\ 293\ 8, 0.030\ 293\ 8, 0.039\ 453\ 2, 0.015\ 623\ 7, 0.045\ 423\ 3, 0.027\ 390\ 4, 0.032\ 246\ 9, 0.031\ 735\ 4, 0.040\ 518\ 4, 0.027\ 770\ 6, 0.034\ 869\ 6, 0.046\ 263\ 3, 0.044\ 415\ 2, 0.425\ 751\ 0]$,其中最大弧度值为 0.425 751,最小为 0.015 623 7。去除最大、最小的弧度值,对剩余的弧度值做均值滤波,求出反馈角的弧度值为 0.035 889 5,经单位转换后,可知其角度值为 $2.056\ 32^\circ$ 。

获得视觉反馈角后,采用基于视觉反馈的机器人姿态调整的方法,控制机器人向反方向旋转相应角度,然后重复上述过程,直至视觉反馈角度趋近于零。然后,根据式(7)即可求出当前陀螺仪方向角的漂移角,由式(8)便可得出当前机器人的实际航向角,实现了机器人航向角的自主补偿。

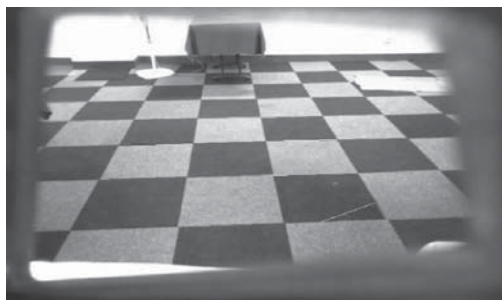


图 5 双阈值处理后的滤波结果图

Fig. 5 The filter results with dual-threshold processing

在餐厅环境中进行了大量的航向角校正测试实验,表 1 记录了某次完整导航的部分测试结果,该实验中双目云台的旋转角始终为 0° 。实验表明,该方法能够有效地实现机器人航向角的自主补偿,减少导航过程中陀螺仪累积误差及外界磁场对机器人航向角的影响,提高了航向角的测量精度。

3 结束语

研究了一种基于视觉反馈的机器人航向角校正方法。通过提取路面图像区域内的特征直线并反馈直线的角度,调整机器人的姿态直至反馈角度基本为零;结合当前陀螺仪的方向角和对应的标准方向角,即可求出当前陀螺仪方向角的偏移角,并以此作为机器人航向角的修正值。基于视觉反馈的机器人航向角校正方法已成功应用到餐厅服务机器人中,并取得了较好的效果。

实验证明,该方法能够有效地补偿服务机器人的航向角,减少陀螺仪温漂、累积角度误差及外界磁场等因素对机器人航向角的影响。

参考文献:

- [1] Yu Q X, Yuan C, Fu Z, et al. Research of the localization of restaurant service robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2010, 7(3): 227-238.
- [2] Hyun M, Lee H K, Kiwan C, et al. Mobile robot localization with gyroscope and constrained kalman filter[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2010, 8(3): 667-676.
- [3] 蔡自兴. 未知环境中移动机器人导航控制理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 175-268.
- [4] Rawan I Z, Enas F A. HSV image watermarking scheme based on visual cryptography[J]. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008, 44: 482-485.
- [5] Wang F, Wang T, Chen B M, et al. An indoor unmanned coaxial rotorcraft system with vision positioning[C]//8th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). Xiamen, June 9-11, 2010: 1948-3449.
- [6] Zhang Z, Weiss R, Hanson A R. Qualitative obstacle detection[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle, WA, June 21-23, 1994: 554-559.
- [7] Zhu Z, Lin X. Real-time algorithms for obstacle avoidance by using reprojection transformation[C]//The IAPR Workshop on Machine Vision and Applications. Tokyo, Nov. 28-30, 1990: 393-396.
- [8] Liu X, Li D H, Liu X Y, et al. A method of stereo images rectification and its application in stereo vision measurement[C]//2nd IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing (IITA-GRS). Qingdao, Aug. 28-31, 2010: 169-172.
- [9] 韩朝起, 黄树彩. 一种用于红外小目标检测的改进 Canny 算法[J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 101-104.
Han Zhaochao, Huang Shucui. An improved Canny arithmetic for infrared small target detection[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(1): 101-104.
- [10] 李二森, 张保明, 周晓明, 等. 自适应 Canny 边缘检测算法研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(6): 119-120.
Li Ersen, Zhang Baoming, Zhou Xiaoming, et al. Study on the self-adaptive Canny edge detection algorithm[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(6): 119-120.

表 1 某完整导航中部分测试结果表

Tab. 1 The some test results of one full navigation

机器人坐标位置/cm	$\theta_G/(\circ)$	特定方位的 $\theta_T/(\circ)$	当前航向角的 $\alpha/(\circ)$		
(75,115)	41.6	41.1	-0.5		
(75,295)	47.1	41.1	-6.0		
(75,450)	36.2	41.1	4.9		
(75,505)	37.2	41.1	3.9		
(75,675)	34.3	41.1	6.8		
(375,675)	31.2	41.1	9.9		
(375,505)	40.2	41.1	0.9		
(375,450)	45.0	41.1	-3.9		
(375,295)	45.8	41.1	-4.7		
(375,115)	52.3	41.1	-11.2		
双目云台可旋转范围/ (\circ)	-60~60	可校正航向角偏移范围/ (\circ)	-30~30	修正后航向角精度/ (\circ)	1