

# 一种基于单目视觉的自主机器人导航控制方法

梁 栋,倪 娜,李洪伟

(北京航天控制仪器研究所,北京 100039)

**摘 要:** 首先对单目视觉获得的原始图像进行图像校正处理,利用边界判据函数分割获得可行区域,得到障碍物位置信息,然后在可行区域中根据障碍物位置分段给出机器人导航控制边界,最后采用拟合曲线模型得到前进路径曲线。试验表明,该算法有效稳定,可实时获取可行区域并实现移动机器人自主避障功能。

**关键词:** 机器视觉;自主机器人;可行区域;障碍物躲避

**中图分类号:** U666.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5558(2014)01-00879

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-5558.2014.03.003

## A Method of Autonomous Robot Navigation and Control Based on Monocular-vision

LIANG Dong, NI Na, LI Hong-wei

(Beijing Institute of Aerospace Control Device, Beijing 100039)

**Abstract:** This paper takes correction measures to the original image obtained by single camera firstly, and then segments the accessible region for the robot from image via boundary criterion function, obstacles will be positioned by segment result, and the navigation and control boundaries will extracted from the distribution of the obstacles in the accessible region, at last, path curves matched quadratic model are derived by curve fitting method. Experiments results proves the stability of the algorithm, autonomous robot can segment the accessible region and avoid obstacles with acceptable time-consuming.

**Key words:** machine vision; autonomous robot; accessible region; obstacles avoidance

## 0 引言

自主移动机器人的导航与控制涉及到信息获取、感知理解、避障控制、路径规划等基本功能,由于视觉图像信息量大,可提供丰富的环境信息,因此基于机器视觉的自主机器人一直是此领域的研究热点,其中障碍物的识别一般通过立体视觉或多传感器融合来实现<sup>[1-3]</sup>。

本文给出了一种基于单目视觉进行机器人导航控制的方法,以减少由于多目视觉和多传感器带来的计算量增大和成本增加。全文包括以下几个部分:首先对单目视觉获得的原始图像进行逆透视变换,对变换后的图像进行滤波和梯度提取等预处理,利用融合梯度和灰度信息进行图像分割获得可行区

域,然后根据障碍物数量分段给出可行区域中的避障控制边界,并采用二次多项式曲线模型拟合避障控制边界中心点得到路径规划曲线,最后给出试验结果。

## 1 图像校正

在摄像机成像过程中,客观世界的三维场景通过透镜成像投影到摄像机的二维成像平面上,图像将损失三维场景的深度信息。在机器人的视觉系统中存在如下几个坐标系:

(1)世界坐标系。也称真实或现实坐标系,它是客观世界的绝对坐标系,记为  $W = \{(x, y, z)\} \in E^3$ ;

(2)摄像机坐标系。以摄像机为中心的坐标系统记为  $C = \{(x, y, z)\} \in E^3$ ;

(3)像平面坐标系。摄像机内部成像平面坐标系记为  $P = \{(x', y')\} \in E^2$ ;

(4)计算机图像坐标系。在计算机内部数字图像存储所用的坐标系,记为  $I = \{(u, v)\} \in E^2$ 。

假设:摄像机的光学系统为理想的光学元件,镜头没有畸变,摄像机成像过程符合小孔成像模型,则得到图1所示的摄像机投影模型。图1左边所示世界坐标系中,平面AUB代表路平面,O点为摄像机镜头中心点,OG为摄像机光轴,OI为摄像机镜头中心离路面的高度,以机器人前进方向为Y轴正方向,G点为世界坐标系原点。图1右图为摄像机成像坐标系,平面A'B'C'D'为像平面,像平面矩形中心G'设为坐标原点,H和W分别为像平面的高和宽。通过成像过程的反变换,即逆透视变换可以获得成像对应的真实世界的横向和纵向距离信息。世界坐标系下路平面上任意点  $P(P_x, P_y)$  映射到像平面的坐标设为  $P'(P'_x, P'_y)$ ,且满足式(1)的转换关系。

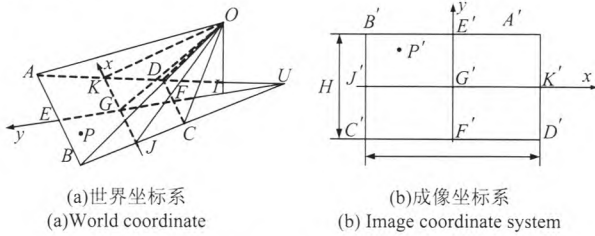


图1 摄像机投影模型

Fig. 1 Camera pinhole-imaging model

$$\begin{cases} P_y = P'_y \cdot \left( \frac{2h \cdot \tan(\alpha_0) [1 + \tan^2(\gamma_0)]}{H - 2 \cdot \tan(\alpha_0) \cdot \tan(\gamma_0) \cdot P'_y} \right) \\ P_x = \frac{2 \cdot h \cdot \tan(\beta_0) \cdot (UG + P_y)}{W \cdot \cos \gamma_0 \cdot UG} \cdot P'_x \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$$UG = \frac{h [\tan(\gamma_0) - \tan(\gamma_0 - \alpha_0)] \cdot \cos(\gamma_0 - \alpha_0)}{\cos(\gamma_0 - \alpha_0) - \cos \gamma_0}$$

H表示图像的高度,W表示图像宽度,h摄像机安装高度,  $2\beta_0$  摄像机镜头水平视场角,  $2\alpha_0$  摄像机垂直视场角,  $\gamma_0$  摄像机光轴与垂直于地面直线的夹角。

将计算机内部所存成像坐标系  $I_p$  转换为世界坐标系计算机存储坐标系  $I_w$  流程如图2所示。

(1)坐标平移。存储坐标系下  $I_p$  经过坐标平移为成像坐标系 P, 设  $(x_0, y_0)$  为 P 坐标系的坐标原点在  $I_p$  坐标系下的坐标,其转换关系为  $P(x, y) = I_p(x - x_0, y - y_0)$ ;

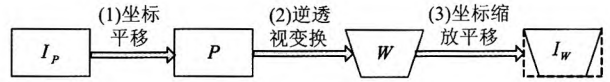


图2 机器人视觉系统坐标转换流程

Fig. 2 Coordinate system transform flow in robot vision system

(2)逆透视变换。成像坐标系经过逆透视变换转化为世界坐标系 W, 转换关系由式(1)给出;

(3)坐标缩放平移。通过坐标的缩放平移将世界坐标系 W 缩小为成像大小, 经过平移保存在计算机存储坐标系下  $I_w$ , 其转换关系为  $I_w(u, v) = W(k(u - u_0), k(v - v_0))$ , k 表示真实世界大小变换为图像大小缩小的倍数,  $(u_0, v_0)$  表示世界坐标系 W 的原点经过缩小后在  $I_w$  下的坐标。

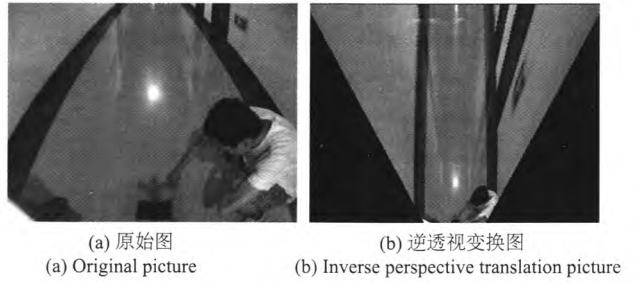


图3 逆透视变换效果图

Fig. 3 Inverse perspective translation

图3给出了逆透视变换前后的图像,摄像机光轴与垂直于地面直线的夹角为  $30^\circ$ ,可以看出,机器人视野内原先由于透视变换导致成像坐标系下相交的平行线经过逆透视变换后,又变为平行了,地平面横向和纵向距离变为真实世界距离。

## 2 获取可行区域

可行区域作为自主机器人可以到达的地面区域,获得它需要经过图像滤波,梯度信息获取和区域生长三个步骤。

### 2.1 中值滤波

图像在成像和传输过程中不可避免受到噪声干扰。目前,针对不同类型的噪声,常用的图像滤波方法有低通滤波法、带通滤波法、锐化滤波、均值滤波、中值滤波等。针对人眼的视觉特性,研究表明中值滤波是图像处理的最佳方法。

二维图像信号的中值滤波可用如下表达式表示:

$$y_{ij} = \text{Med}_A \{x_{ij}\} = \text{Med} \{x_{(i+r), (j+s)}, (r, s) \in A, (i, j) \in I^2\} \quad (2)$$

式中,  $x_{ij}$  表示图像上坐标为  $(i, j)$  的点的原始灰度值,  $A$  表示图像  $I$  的滤波窗口, 可选用方形, 十字形, 圆形,  $y_{ij}$  表示  $x_{ij}$  在  $A$  窗口下的中值滤波结果, 本文选用  $3 \times 3$  方形滤波窗口作为的中值滤波器窗口。

## 2.2 获取边缘梯度信息

常用的梯度算子有 Roberts, Sobel, Prewitt, LoG<sup>[5]</sup>, 针对图 3(a) 的边缘梯度处理结果如图 4 所示。

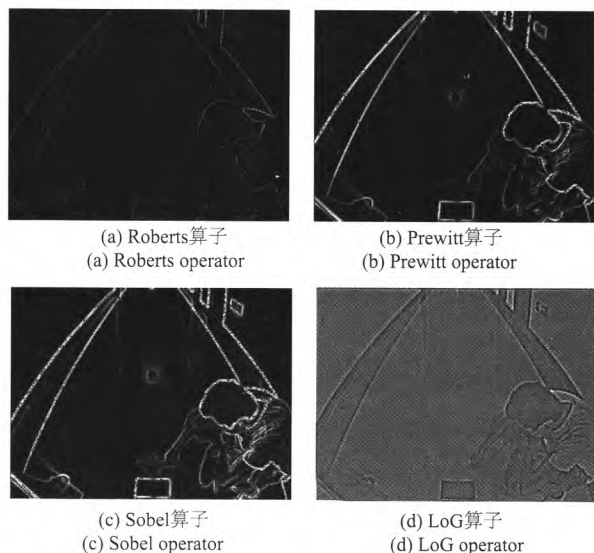


图 4 边缘提取结果图

Fig. 4 Gradient extract results

Roberts、Sobel 和 Prewitt 为的一阶微分梯度算子, 处理结果来看, Roberts 算子计算简单, 但边缘信息不够丰富, Sobel 算子把重点放在接近模板中心的像素点, 而 Prewitt 没有把重点放在接近于模板中心的像素点, LoG 为二阶微分梯度算子, 利用高斯平滑滤波, 边缘较好, 但计算量过大, 因此本文选择计算量小且细节丰富的 Sobel 作为梯度算子, 如图 5 所示。

$N_1$	$N_2$	$N_3$
$N_8$	$(i, j)$	$N_4$
$N_7$	$N_6$	$N_5$

图 5 Sobel 算子邻域图

Fig. 5 Sobel gradient operator windows

$\nabla f[i, j]$  设为坐标为  $(i, j)$  点的梯度值, 则:

$$\nabla f[i, j] = \sqrt{\nabla f_x^2 + \nabla f_y^2}$$

其中,

$$\nabla f_x = (N_3 + 2 \times N_4 + N_5) - (N_7 + 2 \times N_8 + N_1)$$

$$\nabla f_y = (N_1 + 2 \times N_2 + N_3) - (N_5 + 2 \times N_6 + N_7)$$

## 2.3 利用区域生长获得可行区域

边缘是一个区域的结束, 也是另一个区域的开始, 利用该特征可以分割图像。由于存在灰度渐变, 导致边缘模糊, 利用传统的梯度阈值分割, 将会导致边缘的断裂, 不能完整的分割目标, 本文利用梯度信息融合灰度信息的判据函数  $J(i, j)$  作为可行区域边界的判据, 运用区域生长算法获取可行区域  $R$ , 其步骤如下:

(1) 选取种子点

$Seed(i, j) = \{Seed(i, j) | (i \pm r, j \pm s) \in F, (i \pm r, j \pm s) \in R', (r = 0, 1, \dots, 5, s = 0, 1, \dots, 5)\}$ , 其中  $F$  视野前方近处区域,  $R'$  表示上一幅图像的可行区域, 并将种子点作为待判断点  $C(i, j)$ ;

(2) 对于待判断点  $C(i, j)$  利用判据函数  $J(i, j)$  进行区域生长判断, 其中:

$$J(i, j) = c_1 \cdot \nabla f[i, j] + c_2 \cdot |Gray[i, j] - GrayR'|$$

式中,  $Gray[i, j]$  表示待判断点灰度值,  $GrayR'$  表示上一幅图像可行区域的平均灰度值,  $c_1 + c_2 = 1$ , 若  $J(i, j) < Th$ , 则令  $C(i, j) \in R$ , 否则令  $C(i, j) \notin R$ , 本文中设  $c_1 = c_2 = 0.5$ ,  $Th = 40$ ;

(3) 将坐标  $(i, j)$  的相邻像素依次设为待判断点  $C(i, j)$ , 转向步骤(2), 若判断完毕, 则结束此次区域生长。

## 3 避障控制

单个视觉虽然不能对障碍物进行精确立体空间定位, 但通过逆透视变换, 障碍物在横向和纵向上透视效果图中具有清晰的边缘, 通过可行区域分割, 障碍物将会与可行区域分割开, 获得障碍物在横向和纵向的距离, 如图 6 所示。在可行域图中, 假设视野前方只有一个障碍物,  $H, W$  分别为视野的高度和宽度,  $S$  为机器人的当前位置。且测得障碍物高度为  $H_o$ , 宽度为  $W_o$ , 障碍物外形所构成的矩形中心坐标为  $O_o(x_o, y_o)$ , 则其路径规划分为以下几个步骤:

(1) 确定分支路径。由于障碍物将可行区域分成左右两部分, 首先要确定行驶路径是经过障碍物左边还是右边。令:

$$Left = x_o - \frac{W_o}{2},$$

$$Right = W - (x_o + \frac{W_o}{2})$$

若  $Left > Right$ , 选择左边, 反之, 选择右边;

(2) 确定避障控制边界。以选择经过障碍物右边为例, 首先确定避障控制点 B 的坐标为  $(x_o + \frac{W_o}{2}, y_o - \frac{H_o}{2})$ , 然后连接 OB 作为避障控制边界, OB 与可行域右边界共同组成了避障控制边界, 如图 6(a) 所示;

(3) 将避障控制边界中心点利用最小二乘法进行二次曲线拟合, 拟合曲线 SP 作为规划路径;

(4) 存在多个障碍物时, 可以将路径根据障碍物位置分段规划, 每一段存在一个障碍物, 则此时多个障碍物的路径规划算法简化为分段进行的单个障碍物规划, 将分段路径连接即为多障碍物路径, 如图 6(b) 所示, 存在两个障碍物, 则将路径规划划分为两段, 分别获得规划路径  $\hat{SP}_1$  和  $P_1P_2$ ,  $\hat{SP}_2$  即为全局路径。

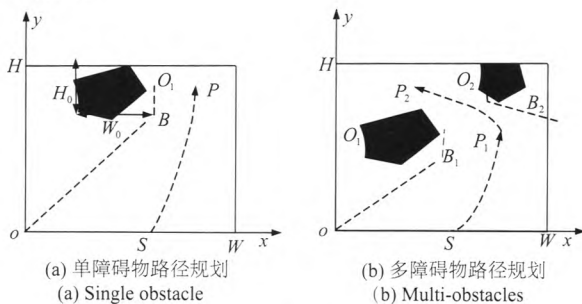


图6 躲避障碍物的路径规划示意图

Fig.6 Path planning with obstacles avoiding

## 4 试验结果

试验在室内环境进行, 采用的工控机搭载 Intel® Atom™ N230 处理器, SDK-2000 视频采集卡获取图像, 每幅图像大小为  $320 \times 240$ , 平均单帧图像耗时 150ms, 摄像机光轴与垂直于地面直线的夹角为  $44^\circ$ 。图 7 给出了在典型多个障碍物的情况下可行域和第一段路径的规划结果。转向控制指令在本文中由 PID 控制模型得到, 取路径曲线 SP 的近似直线 SP 的斜率作为控制模型输入, 试验过程指令曲线如图 8 所示。

## 5 结论

本文目的是实现利用单个 CCD 摄像机实现自主移动机器人的环境感知、躲避障碍物、路径规划算

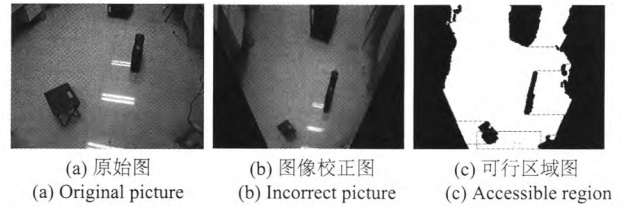


图7 避障过程序列图像示意图

Fig.7 Obstacle avoiding process

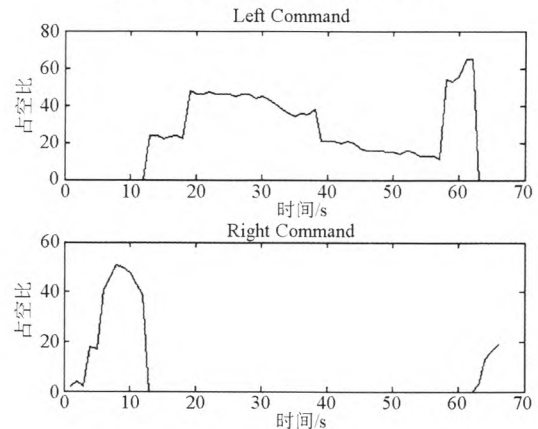


图8 试验过程左右转向指令

Fig.8 The steering control command

法。室内试验表明, 算法有效稳定, 可实现预定的机器人自主移动和避障功能, 同时今后需要进一步进行复杂试验环境并提高控制模型精度。

## 参考文献

- [1] Massimo Bertozzi and Alberto Broggi, Gold: A Parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection, IEEE Transactions on Image Processing. vol. 7, pp. 63-81, Jan. 1998.
- [2] Hiroshi Hattori, Stereo for 2D visual navigation, Proceeding of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Dearborn. USA, pp. 31-381, Oct, 2000.
- [3] 夏庭锴, 杨明, 杨汝清. 基于单目视觉的移动机器人导航算法研究进展[J]. 控制与决策, 2010, 25(1): 1-8. XIA Ting-kai, YANG Ming, YANG Ru-qing. Progress in monocular vision based mobile robot navigation. [J]. Control and Decision, 2010, 25(1): 1-8.
- [4] 孙宏琦, 施维颖, 巨永峰. 利用中直滤波进行图像处理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(2): 104-106. SUN Hong-qi, SHI Wei-ying, JU Yong-feng. Image processing with medium value filter[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2003, 23(2): 104-106.
- [5] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005. ZHANG Guang-jun. Machine Vision[M]. Beijing: Science

- Press, 2005.
- [6] 章毓晋. 图像理解与计算机视觉[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- ZHANG Yu-jin. Image understanding and computer vision [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [7] 周俊, 程嘉煜. 基于机器视觉的农业机器人运动障碍目标检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 154-158.
- ZHOU Jun, CHENG Jia-yu. Moving obstacle detection based on machine vision for agriculture mobile robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery. 2011, 42(8): 154-158.
- [8] Shih Ming Yu, Fu Bwo Chau. Robust moving object detection on moving platform[B]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 4319: 591-600.
- [9] Sanae Shimizu, Kazuhiko Yamamoto, Hideki Tank Tanahashi, et al. Moving object detection by mobile stereo omni-directional system (SOS) using spherical depth image [J]. Pattern Analysis and Applications, 2006, 27(6): 1269-1271.
- [10] 祝琨, 杨唐文. 基于双目视觉的运动物体实时跟踪与测距[J]. 机器人, 2009, 31(4): 327-334.
- ZHU Kun, YANG Tang-wen. Real-Time tracking and measuring of moving objects based on binocular vision [J]. Robot, 2009, 31(4): 327-334.
- [11] 杨剑, 吕乃光, 董明利. 加权最小二乘算法在机器视觉系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1870-1877.
- YANG Jian, LV Nai-guang, DONG Ming-li. Application of weighted least square method to machine vision system [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8): 1870-1877.
- [12] MCKEY E S, LEE J W. Some accuracy and resolution aspects of computer vision distance measurements [J]. IEEE PAM I, 1982(4): 646-649.
- [13] 王君. 视觉测量中相机标定及网络规划[B]. 北京邮电大学, 2007(6): 71-74.
- WANG Jun. Research on camera calibration and network planning of video grammetry [B]. Beijing University of Posts and Communication, 2007(6): 71-74.
- [14] BLOSTEIN S D, HUANG T S. Error analysis in stereo determination of 3D point position [J]. IEEE PAM I, 1987(9): 752-769.
- [15] 籍颖, 刘刚, 申巍. 基于机器视觉技术获取导航基准线的方法[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3362-3366.
- JI Ying, LIU Gang, SHEN Wei. A Method based on machine vision to obtain a guidance directrix [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3362-3366.

作者简介: 梁栋, 男, 硕士, 助理工程师, 从事图像处理和惯导平台系统研究。

(上接第 49 页)

## 5 结论

相比于原来利用模拟电路实现的框架轴锁定回路, 改进的数字化框架轴锁定回路具有元器件少、可靠性高、软件编程灵活可变、控制算法丰富可调等优点, 通过采用带有积分分离和微分分离的 PID 控制算法, 可以兼顾框架角锁定的动态特性和稳态精度。在获得较高的锁零精度的同时, 解决了原来模拟框架轴锁定回路在对陀螺和加速度计进行多位置测试时框架锁定抖动的问题, 省去了此时利用机械锁进行框架轴锁定的弊端, 很好的实现了框架轴锁定回路的功能要求。

## 参考文献

- [1] 姚万里. 惯性平台数字控制系统的研究与设计[J]. 中国惯性技术学报, 1990(0): 30-38.
- YAO Wan-li. Research and design of PINS digital control system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 1990(0): 30-38.
- [2] LZX2 单路全波相敏解调器. 西安微电子技术研究所 IC 新产品手册: 75-76.
- A Single full wave phase sensitive demodulator-LZX2. Xi'an Microelectronic Technology Institute IC Product Manual: 75-76.
- [3] 李永安, 陈景文. 双运放电压模式二阶通用滤波器的实现[J]. 电子测量技术, 2007(3): 45-47.
- LI Yong-an, CHEN Jing-wen. Realization of a novel voltage-mode universal two order filter on two operational amplifier [J]. Electronic Measurement Technology, 2007(3): 45-47.
- [4] 来俊鹏. 基于 STC89C52 和 L298 的智能循迹小车控制系统研究[J]. 三门峡职业技术学院学报, 2011(2): 118-121.
- LAI Jun-peng. Research of intelligent tracing car control system based on STC89C52 and L298 [J]. Journal of Sanmenxia Polytechnic, 2011(2): 118-121.
- [5] Texas Instruments. PRC082\_C28x Filter Library. 2003. 6.

(下转第 8 页)