

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.06.001

融合超声传感与视觉图像的智能小车避障设计

黄鼎键^{1,2}, 杨华山^{1,2}, 林辰耀², 钟勇^{1,2}, 王尚津²

(1.福建省汽车电子与电驱动技术重点实验室(福建工程学院),福建 福州 350118;
2.福州市汽车机电行业技术创新中心(福建工程学院),福建 福州 350118)

摘要: 基于 MATLAB 软件及 Arduino 开发板等硬件,提出并设计了一种融合超声传感和视觉图像技术并能实现主动避障的智能小车。建立单目相机的数学模型,并使用 MATLAB 的相机标定工具箱进行参数标定,根据标定结果对图像畸变进行校正并实现了障碍物目标的跟踪测距。而后通过 MATLAB 软件及 Arduino 开发板调用超声波模块实现对前方障碍物的测距。根据系统结构方案选用合适的硬件搭建智能小车,测试表明,该车能满足不同场景下实现主动避障,为智能驾驶系统设计提供参考。

关键词: MATLAB; 超声传感; 视觉图像; 主动避障

中图分类号: TH132.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-4348(2021)06-0511-04

Obstacle avoidance design of intelligent vehicles integrating ultrasonic sensing and visual image

HUANG Dingjian^{1,2}, YANG Huashan^{1,2}, LIN Chenyao², ZHONG Yong^{1,2}, WANG Shangwei²

(1. Key Laboratory for Automotive Electronics and Electric Drive of Fujian Province, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Fuzhou Automobile Electromechanical Industry Technology Innovation Center, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Based on MATLAB and Arduino development board, an intelligent car was proposed and designed, which integrates ultrasonic sensing and visual image technology and can realize active obstacle avoidance. Firstly, the mathematical model of monocular camera was established, and the camera calibration toolbox of MATLAB was used for parameter calibration. According to the calibration results, the image distortion was corrected, and the obstacle target tracking and ranging was realized. Secondly, the ultrasonic module was called through MATLAB software and Arduino development board to realize the distance measurement of obstacles ahead. Finally, according to the system structure scheme, the appropriate hardware was selected to build the intelligent car. The test shows that the car can meet the requirements of active obstacle avoidance in different scenarios. The methods and technologies proposed in this study can provide certain reference for the design of intelligent driving system.

Keywords: MATLAB; ultrasonic sensing; visual image; active obstacle avoidance

目前,实现主动避障所采用的传感器有超声传感、红外传感、激光雷达、摄像头、毫米波雷达等,乔凌霄^[1]设计了基于超声传感器的避障小

车,通过分析速度、距离数据完成智能小车避障。戴文翔^[2]利用红外传感器设计了基于树莓派的智能避障小车。一些学者运用单线或多线激光雷

收稿日期: 2021-10-25
基金项目: 2021 年省级大学生创新创业训练计划项目(S202110388058); 福建工程学院科研启动基金项目(GY-Z19119); 福建工程学院本科教学改革研究项目(JG202101)
第一作者简介: 黄鼎键(1982—),男,福建福州人,副教授,博士,研究方向:智能网联汽车仿真与设计等。

达完成挖掘机器人、无人艇、车辆等避障系统^[3-5]。还有一些学者利用视觉图像实现机器人、智能小车的避障^[6-8]。但是仅选用其中一种传感器在不同场合存在局限性,因此国内外学者在融合多种传感器实现主动避障方面开展了众多研究^[9-11]。本文提出一种融合超声传感和视觉图像的方法实现智能小车主动避障,设计了具备主动避障功能的智能小车结构方案,完成了基于单目相机和超声传感的测距,为基于超声传感和视觉图像的障碍物检测和主动避障提供理论和技术依据。

1 智能小车结构与系统方案设计

智能小车主要由控制单元、传感模块、执行器以及车架 4 部分构成,其中控制单元由工控计算机和 Arduino UNO 开发板构成,以工控计算机作为整个控制系统的数据处理和运算平台,以 Arduino 开发板作为数据采集和电机控制器,传感模块采用 HC-SR04 超声模块和单目摄像头两种传感器进行数据采集,用于获取前方障碍物的距离和方位,执行器则是采用安装在车体两侧的直流电机,电机驱动模块 L298N 用于配合控制器实现直流电机的控制。智能小车的控制单元、传感模块、执行器之间的硬件连接关系如图 1 所示。

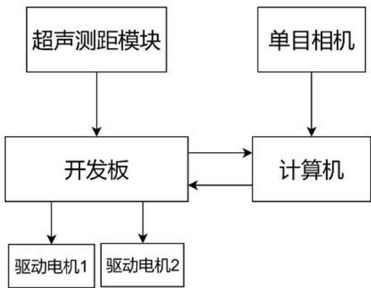


图 1 硬件连接关系图

Fig.1 Hardware connection diagram

车架是用于固定智能小车硬件以及保证小车动作稳定的部分,主要由一块固定板、一个万向轮以及各种连接配件组成。智能小车的总体结构与系统布置方案如图 2 所示(不含线束)。

2 基于视觉图像的障碍物识别与测距

利用单目相机实现障碍物测距,建立相机测距的数学模型并界定世界坐标系、图像坐标系、相机坐标系之间的关系。世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$

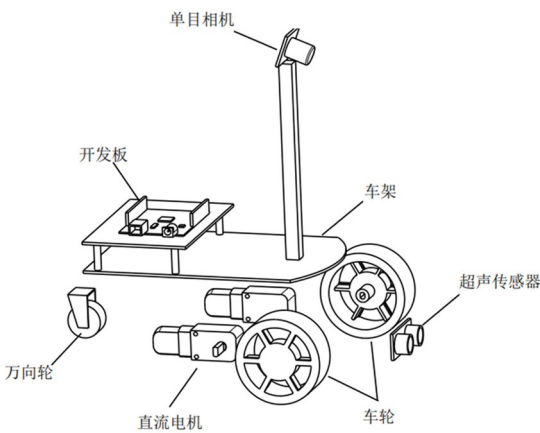


图 2 总体结构

Fig.2 Overall structure

用于描述相机位置;相机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 是以相机光心为原点的坐标系;图像坐标系可分为图像物理坐标系 xoy 和像素坐标系 uv , 如图 3 所示。

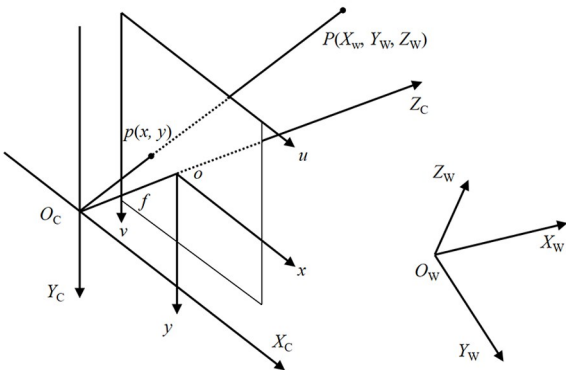


图 3 3 种坐标系

Fig.3 Three coordinate systems

经过坐标变换得到像素坐标系与世界坐标系的关系,如式(1)。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} = M_1 M_2 \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{1}$$

式中, f 为光心到成像平面的距离,一般为相机焦距; $f_x = f/dX$, 代表 u 轴上的尺度因子; $f_y = f/dY$, 代

表 v 轴上的尺度因子; (u_0, v_0) 为光轴在像素平面上的坐标。

R 是一个 3×3 的欧拉变换矩阵, $R = R_x R_y R_z$, 其中矩阵 R_x, R_y, R_z 分别表示绕 x 轴旋转 ψ 角, 绕 y 轴旋转 θ 角, 绕 z 轴旋转 φ 角, 表达式分别如式(2)~(4)所示。

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & \sin\psi \\ 0 & -\sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix}$$

(2)

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}$$

(3)

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

(4)

内参矩阵 M_1 由相机的内部构造决定, 外参矩阵 M_2 由相机相对于世界坐标系的方位决定。采用 MATLAB 提供的“Camera Calibrator”工具箱基于张氏标定法对相机内参进行标定, 共输入 17 张棋盘格图片, 剔除 3 张误差值较大的图片, 如图 4 所示。标定结果的主要参数如表 1 所示。

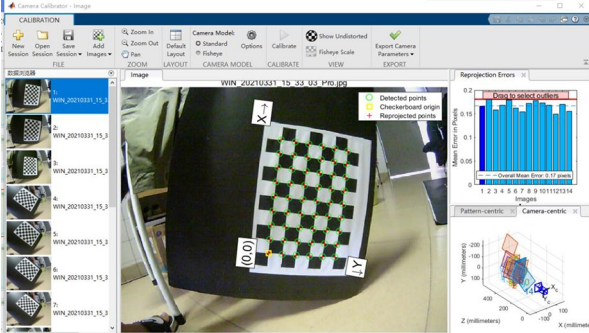


图 4 相机内参的标定

Fig.4 Calibration of camera internal parameters

表 1 标定结果主要参数

Tab.1 Calibration results and main parameters

参数名称	参数标定结果
主点坐标 $[u_0, v_0]$	$[328.933, 228.705]$
焦距 $[f_x, f_y]$	$[395.152, 395.268]$
径向畸变 $[k_1, k_2, k_3]$	$[-0.346, 0.077, 0.149]$
切向畸变 $[p_1, p_2]$	$[-0.00\ 073\ 362, 0.00\ 018\ 464]$
像素坐标 $[u, v]$	$[640, 480]$

对相机进行人工标定并计算相机外参, 相机的外参矩阵如式(5)所示。

$$M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.94 & -0.34 & 1.073 \\ 0 & 0.34 & 0.94 & 0.985 \end{pmatrix}$$

(5)

根据标定结果校正图像畸变, 并获得一个初选测距方程。初选测距方程进行测距试验, 使用数据拟合方法对测距误差进行处理和消除, 获得一个准确的测距方程, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} su = 397.591X_w + 324.555Z_w + 324.555 \\ sv = 79.265Z_w + 651.496 \\ s = 0.940Z_w + 0.985 \end{cases}$$

(6)

向该方程输入一个像素坐标, 可以输出该点在地平面上的世界坐标, 即该横向和纵向距离。

为消除摄像头安装、距离标记点等人为因素导致的误差, 使用最小二乘法通过 MATLAB 对数据进行拟合, 得到 x 和 z 方向误差的一阶拟合方程式如式(7)所示。

$$\begin{cases} \Delta X_w = -0.018Z_w - 0.028 \\ \Delta Z_w = -0.153Z_w - 0.075 \\ \Delta X_w = -0.118X_w - 0.004 \\ \Delta Z_w = 0.022X_w + 0.016 \end{cases}$$

(7)

式中, ΔX_w 和 ΔZ_w 分别是 X 方向和 Z 方向的测距误差值。

根据式(7), 通过 MATLAB 编写解初始测距方程式程序, 并对结果进行数据修正, 最终测试结果如表 2 所示, 修正后测距效果较好。

表 2 测试结果

Tab.2 Test result

图像坐标 (u, v)	实际坐标 $(x, z)/\text{m}$	x 方向距离 X_w/m	z 方向距离 Z_w/m	x 方向误差 $\Delta X_w/\text{m}$	z 方向误差 $\Delta Z_w/\text{m}$
(408, 352)	(0.5, 1.5)	0.478	1.476	-0.022	-0.024
(252, 306)	(-0.5, 2)	-0.485	2.006	-0.015	0.006

3 基于超声波模块的障碍检测

超声波模块采用 HC-SR04, 它共有 4 个引脚, 即 VCC、GND、接收端 Echo、控制端 Trig。超声测距硬件关系和测试场景如图 5 所示, 上位机向下位机发出采集信号, 下位机通过引脚将信号传递给超声波模块, 使其发射探头发出声波。当前方障碍在超声模块量程里时, 超声模块向开发板返回一个回声信号, 开发板处理回声信号后, 将距离数据传输至

上位机,通过上位机检测该距离信息。

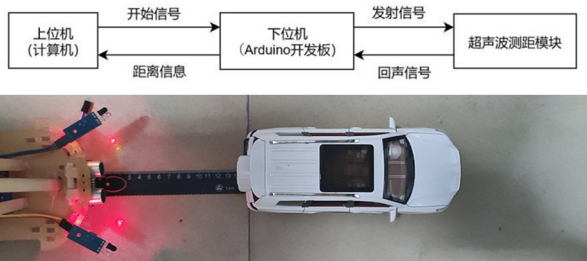


图 5 硬件关系和测试场景

Fig.5 Hardware relationship and test scenario

4 智能小车样机制作与实验

搭建智能小车装配和实验场景,进行智能小车障碍物定位识别、超车的实验。智能小车样机及组成结构如图 6 所示。

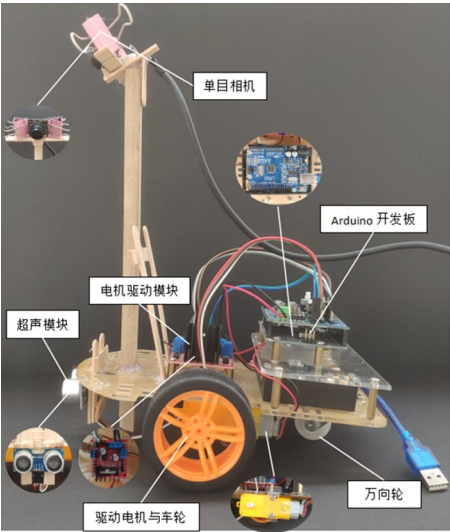
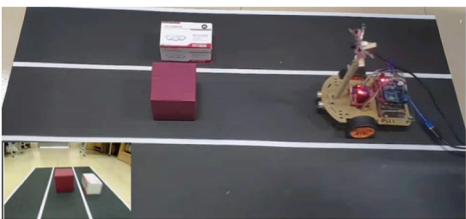


图 6 智能小车样机

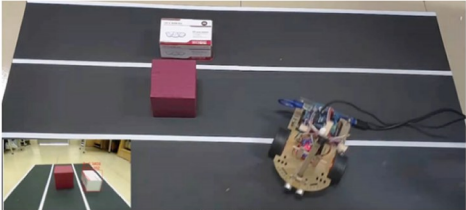
Fig.6 Intelligent car prototype

障碍物识别及主动避障变换车道测验分为 3 种情况:仅正前方存在障碍物、前方与右前方存在障碍物、前方及左前方存在障碍物,由于前两种情况智能小车的运动控制策略均是向左变道避障,所以仅展示后两种避障物识别及主动避障变换车道的实验图,如图 7~图 8 所示。

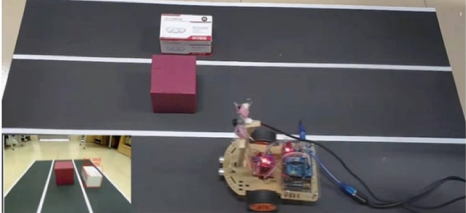
由图 7~图 8 可以看出,智能小车利用超声传感和视觉图像融合判定障碍物距离和方位,能根据不同的道路场景主动选择相应的策略实现避障、自动变换车道,说明智能小车具备识别前方障碍物及自主变换车道的功能。



(a) 正常行驶



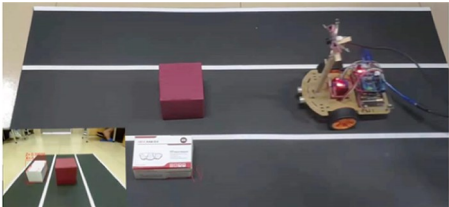
(b) 检测障碍, 左转



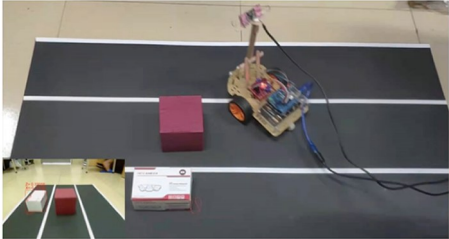
(c) 左转完毕, 直行

图 7 障碍物在前方及右边时变换车道

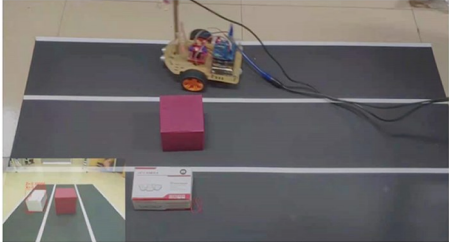
Fig.7 Lane-changing when obstacles are ahead and to the right



(a) 正常行驶



(b) 检测障碍, 右转



(c) 右转完毕, 直行

图 8 障碍物在前方及左边时变换车道

Fig.8 Lane-changing when obstacles are ahead and to the left

[4] 朱震海, 张家宗, 洪伟, 等. 电大尺寸物体电磁辐射与散射特性几种分析方法的比较研究[J]. 电波科学学报, 1995, 10(Z1): 154–160, 32.

[5] HANSEN W W. Directional characteristics of any antenna over a plane earth[J]. Journal of Applied Physics, 1936, 7(12): 460–465.

[6] HANSEN W W. Transformations useful in certain antenna calculations[J]. Journal of Applied Physics, 1937, 8(4): 282–286.

[7] JULIUS ADAMS STRATTON. Electromagnetic theory[M]. New York: McGraw-Hill, 1941: 349–387.

[8] 戴振铎, 鲁述. 电磁理论中的并矢格林函数[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005: 108–136.

[9] 宋文森. 规则边界下电磁场的本征函数和并矢格林函数[J]. 电子科学学刊, 1986, 8(3): 188–195.

[10] LAKHTAKIA A, MACKAY T G. Dyadic green function for an electromagnetic medium inspired by general relativity[J]. Chinese Physics Letters, 2006, 23(4): 832–833.

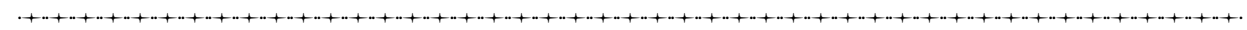
[11] 柯亨玉, 黄锡文. 并矢格林函数在圆柱坐标系中的本征展开及其在几何绕射理论中的应用[J]. 武汉大学学报(自然科学版), 1991, 37(2): 41–52.

[12] 雒向东, 张明, 海波, 等. 用磁型格林函数法构建平行板波导波函数和电场公式[J]. 贵州师范学院学报, 2021, 37(9): 1–5.

[13] 朱敏. 柱形导波结构中场的并矢格林函数的构建[J]. 真空电子技术, 2004(1): 8–11.

[14] 雒向东, 张明, 海波, 等. 几种格林函数方法的形成及其应用比较研究[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2021, 20(3): 62–69.

(责任编辑: 方素华)



(上接第 514 页)

5 结语

设计了基于超声传感器和图像融合的智能小车, 实现障碍物的检测和避障功能。完成了智能小车结构方案设计和硬件选型、基于视觉和超声的障碍物检测和测距、智能小车装配和实验场景

的搭建, 该系统具有设计简洁、成本低廉、操作简单等特点。实验表明, 智能小车在不同场景中都能取得预期的避障实验结果, 验证了方法和结构方案的可行性, 为探索其他主动避障和智能辅助驾驶提供了一种思路。

参考文献:

[1] 乔凌霄, 郭超维, 刘源涛, 等. 基于超声传感器的避障小车系统设计[J]. 运城学院学报, 2019, 37(3): 12–15.

[2] 戴文翔, 孙智勇. 基于树莓派的红外避障小车[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(1): 89–90.

[3] 刘乐. 基于单线式激光雷达避障系统的设计[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(7): 29–30.

[4] 唐文响, 严华. 基于二维激光雷达的避障系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(10): 202–204, 208.

[5] 朱建新, 罗刚, 汪志杰, 等. 基于激光雷达的挖掘机器人回转避障研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(9): 41–44.

[6] 郑颖霞. 基于视觉感知的智能巡检机器人全局避障路径规划[J]. 自动化应用, 2021(3): 167–168.

[7] 李娟, 秦伟. 基于视觉的移动机器人避障控制系统设计[J]. 机床与液压, 2021, 49(15): 24–28.

[8] 岳俊峰, 李秀梅. 基于机器视觉的智能小车自动循迹及避障系统[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2020, 19(2): 200–207.

[9] LI D H, SHEN C, DAI X P, et al. Research on data fusion of adaptive weighted multi-source sensor[J]. Computers, Materials & Continua, 2019, 61(3): 1217–1231.

[10] SHI G L, HE Y G, LI B, et al. Application of multi-sensor information fusion based on improved particle swarm optimization in unmanned system path planning[J]. International Journal of Online Engineering, 2017, 13(8): 88.

[11] 王正家, 夏正乔, 孙楚杰, 等. 基于多传感器信息融合的自主跟随定位及避障方法[J]. 传感技术学报, 2019, 32(5): 723–727, 748.

(责任编辑: 陈雯)