

自动导引车视觉导航的路径识别和跟踪控制*

李 进 陈无畏 李碧春 王檀彬

【摘要】 视觉导航 AGV 利用机器视觉获取路径信息,经图像处理得到导航参数。为保证路径识别的鲁棒性和实时性,对路径图像进行滤波、二值化、数学形态学运算和实时性处理;并设计了 PID 控制器,根据导航参数控制电动机以实现 AGV 对路径的跟踪。仿真和实验结果表明,采用此种图像处理和控制方法的 AGV 具有较为准确和可靠的路径识别和跟踪效果。

关键词: 自动导引车 视觉导航 图像处理 PID 控制 路径跟踪

中图分类号: TP242.6⁺2

文献标识码: A

Road Recognition and Tracking Control of an Vision Guided AGV

Li Jin¹ Chen Wuwei¹ Li Bichun² Wang Tanbin¹

(1. Hefei University of Technology 2. Institute of Intelligent Machines of Hefei)

Abstract

The vision-guided AGV acquires images of road through machine vision and the navigation parameters are gotten by processing these images. In order to recognize the road robustly and quickly, some image-processing methods such as filtering, image segmenting were presented. Additionally, some measures were taken to keep the recognition in real time. A PID controller has been designed to control the motors in order to achieve the line-tracking according to the parameters. The simulation and experimental results showed that the road could be recognized even under certain disturbances and the AGV could track the road accurately and reliably.

Key words Automatic guided vehicle, Visual navigation, Image processing, PID control, Road tracking

引言

近年来,视觉导航在自动导引车(automatic guided vehicle,简称 AGV)的智能导航中获得了广泛应用^[1~4]。视觉导航相对于常用的激光导引、磁导引等导航方式,具有信息量丰富、成本低、智能化水平高等特点。目前,视觉导航应用主要是采用识别导航路标的二维图像方法^[5]。文献[6]提出了基于路径直线模型的导航机理;文献[7]研究了通过确定预瞄点进行跟踪控制的方法。

视觉导航 AGV 的路径跟踪以机器视觉获得路

径信息,并经图像处理得到导航参数作为跟踪控制器的输入。为保证路径识别的鲁棒性和实时性,提出一种路径图像识别和导航参数提取方法,并设计 PID 控制器进行跟踪控制。

1 导航参数

图 1 为摄像机拍到的路径图像,其中建立了两个图像处理区域。为了减少数据处理量,提高识别的实时性,路径识别时,仅对这两个区域进行处理。为了增加 AGV 的视野范围,将摄像镜头与水平方向呈 45°安装。经变形矫正后得到图 2 所示的实际

收稿日期:2006-11-27

* 安徽省自然科学基金资助项目(项目编号:050420302)和清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放基金资助项目(项目编号:KF2007-06)

李 进 合肥工业大学机械与汽车工程学院 博士生,230009 合肥市

陈无畏 合肥工业大学机械与汽车工程学院 教授 博士生导师

李碧春 中国科学院合肥智能机械研究所 研究实习员

王檀彬 合肥工业大学机械与汽车工程学院 博士生

路径导航参数提取图。

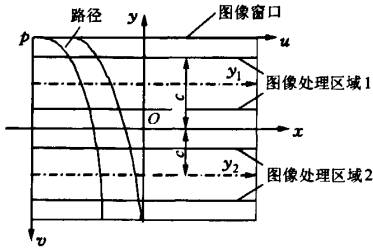


图1 摄像机采集的路径图像示意图

Fig.1 Road image got by CCD camera

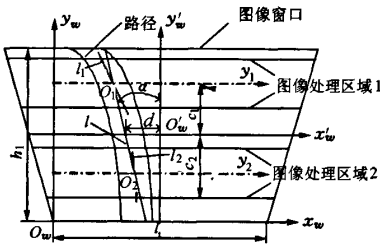


图2 实际路径图像导航参数提取图

Fig.2 Real image for extracting navigation parameters

图2中,图1的矩形区域还原为实际的梯形区域。分别对上、下两区域进行处理并把识别结果近似为直线,得到上、下两段路径中心线 l_1 和 l_2 ;将 l_1 和 y_1 的交点 O_1 与 l_2 和 y_2 的交点 O_2 连接起来,得到直线 l 。 l 与 y'_w 的夹角 α 和 l 到 y'_w 的距离 d 为AGV的导航参数,即角度偏差和位置偏差。并规定直线 l 相对于 y'_w 轴正向左偏时 α 为正,反之 α 为负;沿 x'_w 轴正向偏移时 d 为正,反之 d 为负。

2 路径图像

2.1 识别方法

要正确完成对导航参数的提取,首先需较精确地识别出图像中路径各边缘点。文献[8]研究了路径图像的识别原理和方法。在此基础上,为进一步提高识别的可靠性和准确性,在识别一帧路径图像时,依次进行图3所示的处理。

基于阈值的中值滤波算法通过设定阈值,判断像素是否为噪声点。如果是,则进行中值滤波;如果不是,则原样输出。这种处理方法能较好地兼顾滤除噪声和保护路径边缘细节^[9]。接着,使用最优阈值方法获取用于二值化路径图像的阈值。与固定阈值方法相比,最优阈值能够随着光照条件的变化动

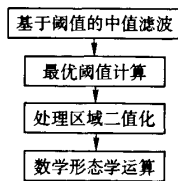


图3 路径识别流程图

Fig.3 Process for recognizing the road

态地调整阈值,具有更大的适应性。最后,考虑到经二值化后的图像是由近似矩形的路径和碎屑状噪声组成,对图像进行数学形态学运算中的开运算以去除噪声^[10],并得到最终路径识别结果。

2.2 实时性处理

AGV在实时运行时,必须保证在每个图像采样周期内完成这种识别。所以,在准确识别路径的同时,还必须保证路径图像识别的速度,即实时性。在识别一帧路径图像时,要完成图3所示的所有步骤。这在一定程度上保证了识别的鲁棒性,但同时带来了较大的数据处理量,从而导致实时性下降。考虑到路径图像由一行行的像素组成,路径变化连续性使得路径行与行之间的对应边缘点位置相差不大。为此,除划分上、下两图像处理区域以减少图像数据处理量外,还利用同帧路径图像中上一行的边缘位置来限定相邻下一行的边缘点范围,从而缩小各行中需要处理的像素数,达到提高实时性的目的。具体步骤为:

(1) 在两个图像处理区域内,分别对第一行所有400个像素进行图3所示的处理,得到路径左、右边缘点。如果没检测到(该行对应区域无路径),则对下一行继续进行处理直至检测到左、右边缘点位置 L_1 与 R_1 ,如图4所示。

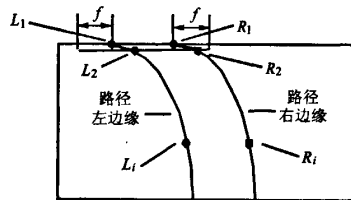


图4 路径识别的实时性处理

Fig.4 Process to acquire higher speed for road recognition

(2) 检测到第一行边缘点后,在处理第2行时就不再像步骤(1)那样对整行进行处理,而是确定一个宽度 f ,单位是像素。在 $[L_1 - f, R_1 + f]$ 之间进行处理,得到该行边缘点 L_2 和 R_2 ;再在 $[L_2 - f, R_2 + f]$ 之间寻找第3行的左右边缘点,直至得到处理区域内路径各行边缘点。只要 f 值选取合适,就能够在区间 $[L_i - f, R_i + f]$ 上找到该边缘点。当 f 值偏小时,会导致找不到或找到错误的边缘点; f 值过大虽能够保证找到,但增加了运算量,不利于实时性。

以上方法具有3个优点:①大大减少了需要进行滤波、最优阈值计算、二值化及形态学运算的像素数,因此数据处理量大大减少,实时性得到提高。②在计算最优阈值二值化图像时,不是在整个图像处理区域内获得一个阈值,而是在各个子区域获得

各自的阈值,因此得到的阈值和图像二值化更准确。

③ 在检测下一行边缘点时,把候选边缘点限定在较小区间内,在一定程度上提高了抗干扰能力。

3 AGV 模型与控制器设计

3.1 AGV 模型

图5所示的AGV模型,两个前轮为独立驱动轮,通过调节各自的转速,实现对路径的跟踪。后轮为万向轮,其主要作用是支撑车体和导向。

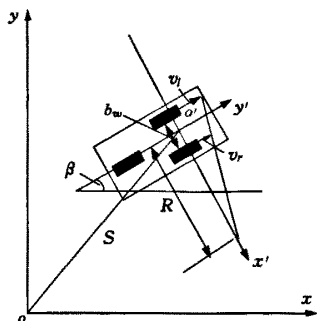


图5 AGV运动模型

Fig.5 Kinematical model of the AGV

图5中, xoy 坐标系为世界坐标系, $x'o'y'$ 坐标系为AGV车体坐标系。 b_w 为左、右驱动轮的轮距, v_l 和 v_r 分别为左右驱动轮的速度。点 o' 为前轴中心点, R 为 o' 点的转弯半径。 v 为 o' 点的速度,并将其视为AGV的速度。 β 为AGV车体纵轴 y' 与世界坐标系 x 轴的夹角, S 为AGV相对 xoy 坐标系的位移。因此,AGV任一时刻 t 的状态可以用变量 $\beta(t)$ 、 $S(t)$ 表示。

假定AGV在平面内运动且忽略车轮侧滑,AGV在平面内作圆周运动,则

$$\begin{cases} v = \frac{v_l + v_r}{2} \\ \omega = \frac{v_l - v_r}{b_w} \end{cases} \quad (1)$$

式中 ω ——横摆角速度

以 Δt 为时间周期,则有

$$\begin{cases} \Delta\beta = \omega \Delta t \\ R = \frac{b_w(v_l + v_r)}{2(v_l - v_r)} \\ \Delta S = 2R \sin \frac{\omega \Delta t}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\Delta\beta$ —— Δt 时间内AGV方向变化量

ΔS —— Δt 时间内AGV位移变化量

$\Delta\beta$ 和 ΔS 分别对 Δt 求导,得

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \omega \\ \dot{S} = v \end{cases} \quad (3)$$

AGV对路径的跟踪,是通过在每个 Δt 时间内调整 v_l 和 v_r 实现的。当AGV直线行驶时, $v_l = v_r = v$;当转向行驶以纠正路径偏差时, v_l 和 v_r 不再相等。令其差值为 $2\Delta v$,可得

$$\begin{cases} v_l = v + \Delta v \\ v_r = v - \Delta v \end{cases} \quad (4)$$

结合式(1)和式(3)可写为

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \omega = 2\Delta v / b_w \\ \dot{S} = v \end{cases} \quad (5)$$

选取 β 和 S 为系统的状态变量和输出量,即

$$Y = X = \begin{bmatrix} \beta \\ S \end{bmatrix}; v \text{ 和 } \Delta v \text{ 为系统输入,即 } U = \begin{bmatrix} v \\ \Delta v \end{bmatrix},$$

得到系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 2/b_w \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \Delta v \end{bmatrix} \\ Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} X \end{cases} \quad (6)$$

3.2 控制器的设计

首先,根据导航参数 α 和 d 采用PID控制确定 Δv 。在时刻 k 时,

$$\begin{aligned} \Delta v(k) = & \Delta v(k-1) + K_{I\alpha}[\alpha(k) + K_{P\alpha}[\alpha(k) - \\ & \alpha(k-1)] + K_{D\alpha}[\alpha(k) - 2\alpha(k-1) + \alpha(k-2)] + \\ & K_{Id}d(k) + K_{Pd}[d(k) - d(k-1)] + \\ & K_{Dd}[d(k) - 2d(k-1) + d(k-2)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $K_{I\alpha}$ 、 $K_{P\alpha}$ 、 $K_{D\alpha}$ 、 K_{Id} 、 K_{Pd} 、 K_{Dd} 为PID控制器参数。考虑到AGV转向的平稳性和安全性,其横摆角速度最大为 ω_{\max} 。因此,得到 $\Delta v(k)$ 的约束条件为

$$\Delta v(k) \leq \omega_{\max} b_w / 2 \quad (8)$$

之后,根据 Δv 确定 v 。 v 随 $|\Delta v|$ 的增大而减小,以保证AGV转向平稳,其控制律为

$$\begin{cases} v(k) = v_0 - p |\Delta v(k)| \\ v(k) \geq v_{\min} \end{cases} \quad (9)$$

式中 v_0 ——AGV给定速度 p ——正常数

v_{\min} ——AGV的最小速度

3.3 仿真结果

图6为直线和曲线路径的跟踪结果。其中, $v_0 = 2 \text{ m/s}$, $p = 0.1$; $K_{I\alpha} = 7$, $K_{P\alpha} = 10$, $K_{D\alpha} = 0.7$, $K_{Id} = 6$, $K_{Pd} = 9$, $K_{Dd} = 0.7$ 。可见,AGV对路径跟踪过渡时间短,稳态误差小,具有较好的跟踪效果。

4 实验验证

4.1 实验平台

图7为AGV实验平台,主要由车体、图像采集和处理系统、电动机控制系统等组成,以路面铺设的

白色条状标志线作为跟踪路径。其工作原理如图 8 所示。

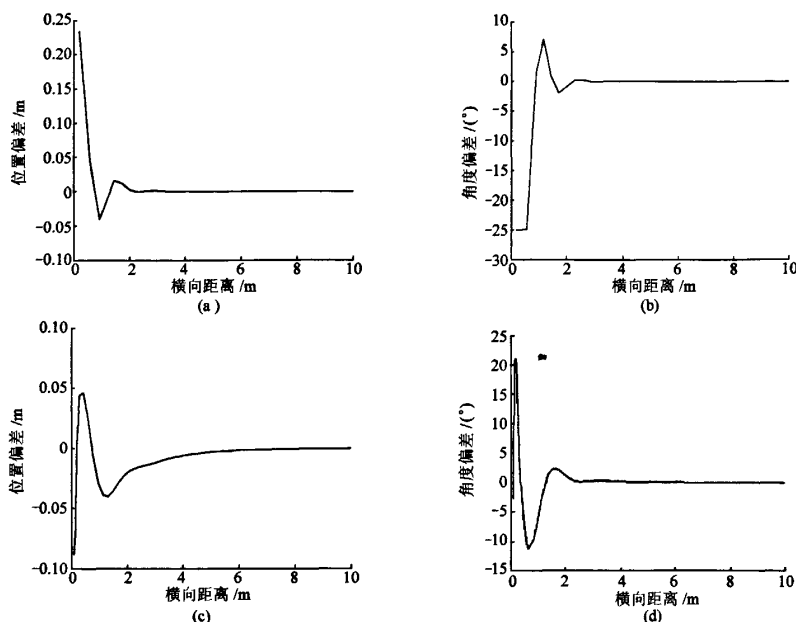


图 6 AGV 跟踪误差

Fig. 6 Tracking errors for the AGV

(a) 直线跟踪位置偏差 (b) 直线跟踪角度偏差 (c) 曲线跟踪位置偏差 (d) 曲线跟踪角度偏差



图 7 AGV 实验平台

Fig. 7 AGV platform

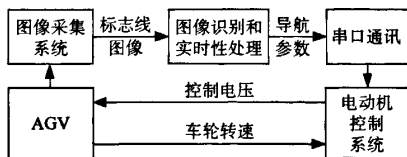


图 8 AGV 路径识别和跟踪原理

Fig. 8 Principles for the road recognition and tracking

4.1.1 图像采集和处理系统

由 CCD 摄像机、图像采集卡、工控机、液晶显示器等组成,负责获取标志线图像,并进行图像处理得到导航参数。

4.1.2 数据通讯系统

AGV 的控制采用上位工控机和下位单片机的结构。上位机与下位机之间通过 RS-232 串行接

口进行通讯。

4.1.3 电动机控制系统

包括 P87LPC768 单片机、PWM 驱动和制动电路及车速检测机构等。单片机根据通过串行口送来的导航参数对 AGV 速度、方向和制动进行控制。

4.2 实验结果

4.2.1 路径识别结果

运用前述识别方法,得到如图 9 所示的结果。

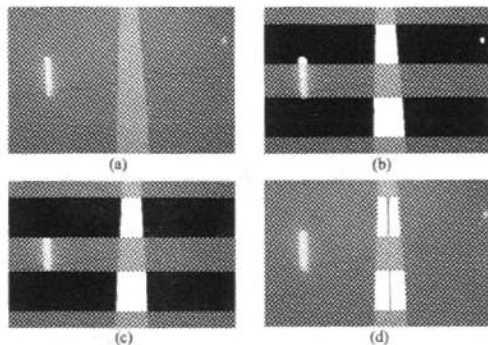


图 9 路径识别结果

Fig. 9 Road recognition results

(a) 原图 (b) 二值化 (c) 形态学运算 (d) 边缘提取

4.2.2 光线干扰下识别结果比较

图 10 比较了在光线干扰情况下,使用线性平滑滤波、中值滤波和前述识别方法的路径识别结果。

各图中,右上角和右下角存在光线干扰。由图可见,图10b和图10c的上处理区域受外界干扰影响提取结果存在较大误差,下处理区域则无法检测出路径;而图10d只有上处理区域的第一行边缘点检测有些误差,其他区域均能准确识别。

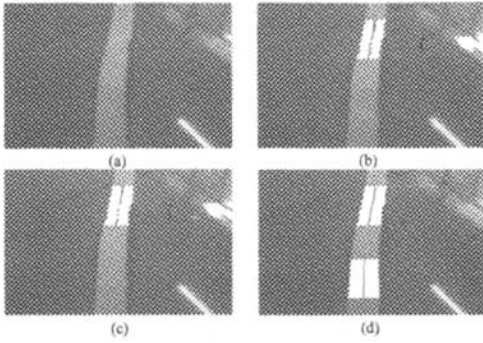


图10 光线干扰下识别结果比较

Fig. 10 Results comparison under light disturbance

(a) 原始图像 (b) 平滑滤波 (c) 中值滤波 (d) 前述方法

4.2.3 识别的实时性比较

采用MBC-5050型黑白摄像机和DH-CG400型彩色/黑白图像采集卡。采集速率为25帧/s。考虑图像处理的实时性要求和AGV轮速调节需要一定时间,实验中对采集的图像进行隔帧处理,即每秒平均处理12.5帧;每处理3帧图像通过串口向电动机控制系统发送一次导航参数。实验结果显示,采用前述路径识别方法,在未作实时性处理时,每秒平均处理8.8帧;经过处理后达到平均12.5帧/s ($f=10$)。可见,经过实时性处理的识别方法满足了实时性要求。

4.2.4 路径跟踪结果

路径识别的可靠性和实时性,为跟踪控制器提供了较为准确的输入量。分别对直线和曲线路径进行跟踪,长度为50m。车速为1、2、4 m/s时的跟踪误差如表1所示。

表1 跟踪误差表

Tab.1 Tracking errors

车速 v_0 /m·s ⁻¹	直线		曲线	
	均值 μ /m	方差 σ^2 /m ²	均值 μ /m	方差 σ^2 /m ²
1	0.062	0.011	0.073	0.015
2	0.078	0.017	0.112	0.028
4	0.128	0.040	0.167	0.061

由表可见,直线跟踪误差比曲线跟踪小。这是因为曲线路径较为复杂,图像处理得到的导航参数变化较快,而系统的执行机构(电动机)难以实时地响应这一变化。同样的问题出现在高速跟踪时。但总体来看,AGV跟踪误差较小,可靠性较高。

5 结束语

实现了视觉导航AGV对路径的识别和跟踪。利用摄像系统获取路径信息,并综合运用多种图像处理方法进行识别。考虑到图像数据处理量大、系统实时性要求高的特点,作了实时性处理,从而保证了路径识别的鲁棒性和实时性。根据实验室AGV平台建立运动学模型,并设计控制器完成跟踪任务。仿真和实验结果表明,采用此种识别和控制方法的AGV,对路径的识别具有较好的鲁棒性和实时性,并有较为准确和可靠的跟踪效果。

参考文献

- Adorni G, Cagnoni S. Vision-based localization for mobile robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2001, 36(2~3): 103~119.
- Lázaro J L, Garcí J C, Mazo M, et al. Distributed architecture for control and path planning of autonomous vehicles [J]. Microprocessors and Microsystems, 2001, 25(3): 159~166.
- 陈无畏,蒋浩丰,王启瑞. 基于回归算法的自动引导车跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 5~9.
- Taylor C J, Košecká J. A comparative study of vision-based lateral control strategies for autonomous highway driving[J]. The Int. J. of Robotics Research, 1999, 18(5): 442~453.
- Li Bing, Wang Rongben. Modeling of steering system of high speed intelligent vehicle by system identification[C]// Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference, 1999.
- 王荣本,李兵,徐友春,等. 基于视觉的智能车辆自主导航最优控制器设计[J]. 汽车工程, 2001, 23(2): 97~100.
- 李庆中,顾伟康,叶秀清,等. 移动机器人路径跟踪的智能预瞄控制方法研究[J]. 机器人, 2002, 24(3): 252~255.
- 陈无畏,孙海涛,李碧春,等. 基于标识线导航的自动引导车跟踪控制[J]. 机械工程学, 2006, 42(8): 165~170.
- 钱伟新,刘瑞根,王婉丽,等. 基于阈值分解的中值滤波方法[J]. 爆震波与冲击波, 2005, 4(12): 149~152.
- 陈虎,周朝辉,王守尊. 基于数学形态学的图像去噪方法研究[J]. 工程图学学报, 2004, 25(2): 116~119.