

基于路径记忆算法的智能小车控制系统的设计

苏 敏, 梁银丽, 汪道辉
(四川大学 电气信息学院, 成都 610065)

摘 要: 针对智能小车视觉导航中图像处理复杂和路径数据存储量大的问题, 介绍了一种基于路径记忆算法的智能小车控制系统. 通过推导小车转向控制角和摄像头检测出的路径横向偏差之间的简洁关系, 实现对小车的运动控制, 提高了系统的实时性和控制精确度. 并提出了一种将数学形态学滤波算法和行程编码算法结合用于路径记忆的新方法, 该方法占用的存储空间小、计算量小, 可满足嵌入式系统实时性要求.

关键词: 路径记忆; 智能小车; 数学形态学; 行程编码

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2011)01-0064-05

The Design of the Smart Car's Control System Based on Route Memorization

SUM in, LIANG Yin-li, WANG Dao-hui

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University 610065, China)

Abstract With respect to the complex of image process and the large quantity of route memorization data, a smart car based on route memorization algorithm is introduced in this paper. In order to realize the smart car's motion control and improve the system real-time performance and control precision, the relation between the steering angle and the path lateral deviation are derived. Then a new route memorization method based on mathematical morphology and Run Length Encoding (RLE) is proposed. The method is simple and effective, which can meet the real-time requirements of embedded systems.

Key words route memorization; smart car; mathematical morphology; Run Length Encoding

0 引 言

视觉智能小车是指采用视觉传感器进行自主导航的一套控制系统. 智能小车通过视觉传感器收集外界路径信息, 经控制器分析、决策后向执行机构发出控制指令, 以实现沿既定轨道精确行进的控制目的. 目前研究的热点主要在两方面: 如何从大量的图像信息中提取有效路径信息, 从而实现小车的精确

控制; 如何记忆路径信息, 从而既快速又准确地跟踪轨道. 在小车的控制方面: 文[1]中式 8 中给出了道路的横向偏差与小车转向控制值之间的关系式但是该式子含有浮点三角运算, 计算量大, 如果使用微控制器来处理则会消耗大量的资源, 算法实时性较差. 本文推导出在小角度偏差情况下道路横向偏差与小车转向控制值之间的简洁算术关系, 该式可直接用于小车的控制, 其中横向偏差指道路引导线与小车中心线的距离, 只需计算图像上的点在车载坐标系

收稿日期: 2009-10-20

作者简介: 苏 敏 (1964-), 女, 副教授, 硕士生导师;

梁银丽 (1986-), 女, 硕士研究生, E-mail: yingli.liang@126.com.

下的横坐标值即可, 该方法计算量小, 满足嵌入式实时系统的需要; 在路径信息记忆方面: 文 [2] 提出一种分段处理方法, 将路径分成直道、弯道、S 弯道三种形式, 分别记下弯直道和 S 弯道的起始位置和长度信息, 在第二圈时根据记忆的信息采取不同的控制策略. 但是由于在第一圈时只是对路径信息作粗略的记录, 精确度不够高, 不利于在复杂多变的路径信息下实施控制. 文 [3] 提出了一种阈值整合 (threshold integration) 的方法, 设定阈值, 将每次采集到的数据进行阈值比较从而将数据分组、归类, 该方法简单易行, 计算量小, 数据的压缩比大, 占用的存储空间小, 但是阈值整合的方法有其局限性: 若代表某一组值的数据恰好是个噪声点, 那么该组的数据都不能准确反映道路信息. 本文提出了一种将数学形态学滤波算法和行程编码算法相集合用于路径记忆的新方法. 数学形态学滤波算法考虑了信号各部分之间的关系, 因此不会误将某个噪声点当成有用信号, 且在滤波时只进行比较和加减运算, 计算量非常小. 由于路径信息局部重复性很大, 采用行程编码算法数据压缩比很大, 且算法简单, 存储数据的格式也很简单, 只需一张二维表即可.

1 系统硬件设计

1.1 系统总体结构设计

系统采用 ARM920T 芯片 S3C2410 为主控制器, 主频最高可达 266MHz, 配以 16M 的 SDRAM 和 8M 的 FLASH 用于程序的运行和数据的存储; 选用黑白单板 CMOS 摄像头采集路径图像信息, 从图像数据中提取路径信息用于控制智能小车行进; 采用图形液晶作为人机接口, 实时显示路径信息和智能小车的运行状态, 系统总体结构见图 1.

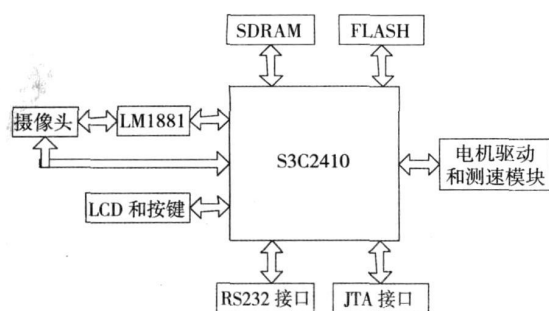


图 1 系统总体结构框图

1.2 图像传感器——OV5116

本设计中智能小车的引导道路为贴在白色板上

的黑色胶带, 只需提取出黑色的道路信息即可, 因此选用 OV5116 为采集芯片的 CMOS 黑白摄像头作为图像采集器件. 摄像头视频信号传输速度为 50fps, 每帧有效像素为 320×240 . 由于本智能小车行驶在室内环境, 在灯光照明充足、地面基本无污渍, 路径少被遮挡等条件下, 摄像头所拍摄的路径图像效果较好, 结合摄像头的视野大小, 最终采用“跳行跳列”的采集方式, 每张图片均匀采样 40 行 $\times$ 40 列点. 在硬件设计上, 通过 IM1881 视频同步信号分离芯片将视频信号中的场同步信号和行同步信号分离, 用来控制 AD 采集图像数据. 摄像头的信号线同时连在 IM1881 的视频信号输入端和主控制器的 AD 口, 并把 IM1881 各路信号接入微控制器的相应 D, 即构成系统的图像采集电路.

2 系统软件设计

系统软件主要由以下 3 个部分组成: 板级驱动程序、图像处理程序、运动控制程序. 板级驱动程序完成系统的初始化以及各个模块的驱动, 包括 FLASH 读写、图像采集、电机和液晶驱动、键盘扫描和串口通信等程序; 图像处理程序包括图像的滤波、二值化、图像畸变的矫正及路径提取程序. 由于众多文献已对此有过详细的阐述, 本文限于篇幅不再赘述, 若有需要请查阅相关文献 (如文 [4-5]); 运动控制程序按其功能分为两个层次: ①底层: 行为控制层. 主要任务是根据提取到的路径信息实现路径跟踪、导航, 包括转向控制和速度控制两个方面, 采用“感知-动作”的简单控制方式. ②上层: 路径规划层. 采用路径记忆算法先将采集到的路径信息经形态学滤波算法处理成适合行程编码的数据格式后, 用行程编码将路径信息存储下来, 以给第二圈时的控制决策提供最充分的依据. 运动控制程序是本系统软件部分的核心, 下面将针对其核心部分予以阐述.

2.1 运动控制程序

2.1.1 行为控制算法

1) 转向控制. 在第一圈时, 智能小车依靠摄像头拍摄到的图像信息来实现道路轨迹跟踪, 那么如何根据在图像处理程序部分提取到的道路信息来实施控制将是本部分的核心任务. 在文 [1] 原理思想指导下我们做了进一步的研究, 推导出转向控制角 θ 在小角度偏差情况下与道路横向偏差 e 之间简洁的关系式. 现推导如下: 本系统小车采用 4 轮式结

构, 前轮为转向轮, 后轮为驱动轮. 前轮用伺服舵机控制转向, 后轮用直流电机驱动, 采用 PWM 波控制方式. 以小车后轴中心点为坐标原点, 小车前行方向为 Y 轴, 垂直于 Y 轴方向为 X 轴, 建立坐标系如图 2 所示:

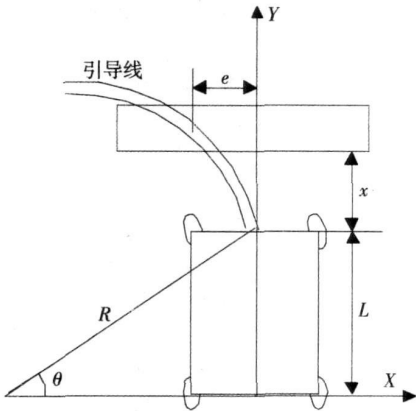


图 2 偏差 e 和控制角 θ 关系示意图

图 2 中 e 表示横向偏差, θ 表示转向控制角, x 为摄像头的前瞻距离 (不宜过长, 避免图像越界), L 为小车前后轮距离, R 表示转向半径, 文 [1] 中式 8 已得出 $e-\theta$ 关系如下式:

$$e = L \cot \theta - \sqrt{\frac{L^2}{\sin^2 \theta} - (x + L)^2}$$

现在问题是, 根据摄像头采集到的图像信息很容易得出偏差 e (只需计算图像上的点在车载坐标系下的横坐标值即可), 若要实施转向控制, 需知道转向角 θ 显然应推导出 $\theta-e$ 关系, 如式 (1):

$$\sqrt{\frac{L^2}{\sin^2 \theta} - (x + L)^2} = L \cot \theta - e \quad (1)$$

两边平方:

$$\frac{L^2}{\sin^2 \theta} - (x + L)^2 = (L \cot \theta - e)^2 \quad (2)$$

展开得:

$$\frac{L^2}{\sin^2 \theta} - (x + L)^2 = L^2 \cot^2 \theta - 2Le \cot \theta + e^2 \quad (3)$$

在小角度范围内有: $\theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta$ 代入式 (3):

$$\frac{L^2}{\theta^2} - (x + L)^2 = \frac{L^2}{\theta^2} - \frac{2Le}{\theta} + e^2 \quad (4)$$

整理得:

$$\theta = \frac{2Le}{e^2 + (x + L)^2} \quad (5)$$

当小车结构确定后, L 为定值. 当摄像头安装好后, x 也为定值, 即式 (5) 中只有 e 为未知量, 而 e 可以通过摄像头拍摄的图像信息进行简单计算后得

出. 当 e 为正数时, 表明前方路径偏向右, 小车应该向右转; 当 e 为负数时, 表明前方路径偏向左, 小车应该向左转; 当 e 为 0 时, 小车不需转向, 说明小车此时正很好地跟踪路径.

2) 速度控制. 为了保证小车在第一圈的时候以稳定的速度跑完全程, 需要对速度进行控制. 本文采用的是离散增量式 PID 控制方法, 控制结构图如图 3

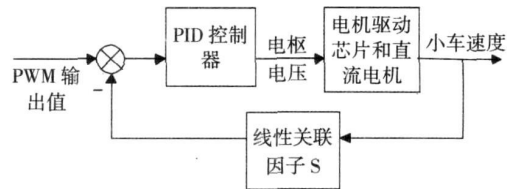


图 3 PID 控制结构图

系统输入为给定的 PWM 值, 输出为小车速度, 增量式 PD 控制公式如下^[6]:

$$u(k) = u(k-1) + K_P [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (6)$$

从式 (6) 可以看出增量式的 PID 控制算法比位置式的 PD 控制算法^[6]大大节约了内存和计算时间. 在 PD 控制器结构确定以后关键就是整定 PD 三个参数: 比例系数 K_P 、积分系数 K_I 、微分系数 K_D . 在本设计中选取多组 PID 参数进行实验, 最终当选择以下参数时, 取得良好的控制效果: $K_P = 4$ $K_I = 0.3$ $K_D = 0.5$

2.1.2 路径规划算法

为了反映路径信息, 在第一圈时, 我们以行驶的路程作为横坐标, 用车速传感器脉冲数来表示. 纵坐标为当前转角的设定值 θ 代表当前道路的曲率信息. 由于小车在实际的运行中, 总会出现偏离轨道的情况, 那么在第一圈采集到的舵机转角信息必然会出现毛刺和扰动等误差, 如果不加以处理直接运用于第二圈时的控制, 会造成严重的干扰以至小车偏离轨道.

1) 形态学开-闭滤波算法. 本文采用数学形态学滤波算法来处理第一圈记录的路径信息, 得到适合行程编码的路径信息. 数学形态学方法基本思想是利用一个称为结构元素的“探针”在信号中移动, 以收集信号各部分之间的关系, 提取信号的有效特征, 从而达到滤波效果. 数学形态学基本运算包括膨胀、腐蚀、开运算、闭运算. 由于在本设计中采集到的路径信息是一维多值数据, 因此只介绍数学形态学

变换用于一维信号的情况^[7]: 设 $f(n)$ 是采样信号, 其定义域为 $D(f) = \{0, 1, 2, \dots, N\}$, $g(x)$ 为一维结构元素序列, 其定义域为 $D(g) = \{0, 1, 2, \dots, P\}$; 其中 P 和 N 为整数. 则腐蚀和膨胀运算分别定义为:

$$(f \ominus g)(n) = \min\{f(n+x) - g(x) : x \in D[g]\} \quad (7)$$

$$(f \oplus g)(n) = \max\{f(n-x) + g(x) : x \in D[g]\} \quad (8)$$

其中 $(n = 1, 2, 3, \dots, N)$, 式中 $\ominus$ 代表腐蚀运算, $\oplus$ 代表膨胀运算.

由式 (7) 和 (8) 可引出形态学开运算、闭运算定义如下:

$$(f \circ g)(n) = (f \oplus g \ominus g)(n) \quad (9)$$

$$(f \bullet g)(n) = (f \ominus g \oplus g)(n) \quad (10)$$

式中: $\circ$ 代表开运算; $\bullet$ 代表闭运算.

数学形态学开运算具有过滤信号峰值噪声, 除毛刺, 使目标轮廓光滑的作用; 而闭运算具有平滑信号波谷噪声, 填平小沟的作用, 因此在本设计中选用形态开-闭 (Open-Closing) 滤波算法对信号进行处理. 结构元素 $g(x)$ 的宽度相当于滤波窗口的大小, 本文选用 M 个零元素作为结构元素 (M 的值由实验确定), 提出一种快速的形态开-闭滤波算法. 该算法分为两个阶段, 即先进行开运算, 再进行闭运算. 由于闭运算是开运算的对偶运算, 定义为先作膨胀运算再做腐蚀运算, 因此可采用类似开运算的方法来进行计算. 在此, 只提供开运算算法步骤:

Step(1): 计算前 M 个点的腐蚀值, 保存到数组 $\text{fng}[i]$ 中:

$$\text{fng}[i] = \min\{\text{Angle}[i+j] - g[j]\}$$

$$(i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, M)$$

由于前 M 点无法进行开运算, 因此前 M 点的开运算值由其腐蚀值代替, 即

$$\text{fo}[i] = \text{fng}[i], (i = 1, 2, \dots, M)$$

Step(2): 计算 $\text{Angle}[i]$ 膨胀值, 即得该点开运算结果, 其中 $M+1 \leq i \leq N$:

$$\text{fo}[i] = \max\{\text{fng}[j] + g[j]\}, (j = 1, 2, \dots, M)$$

Step(3): 计算 $\text{Angle}[i]$ 腐蚀值 (其中 $M+1 \leq i \leq N$), 更新 $\text{fng}[j]$, $j = 1, 2, \dots, M$, 用于 $i+1$ 点的膨胀运算:

$$\text{fng}[j] = \text{fng}[j+1], (j = 1, 2, \dots, M-1);$$

$$\text{fng}[M] = \min\{\text{Angle}[i+j] - g[j]\},$$

$$(j = 1, 2, \dots, M; i+j \leq N)$$

Step(4): 转至 Step(2), 循环至所有数据处理完

算法流程图如图 4

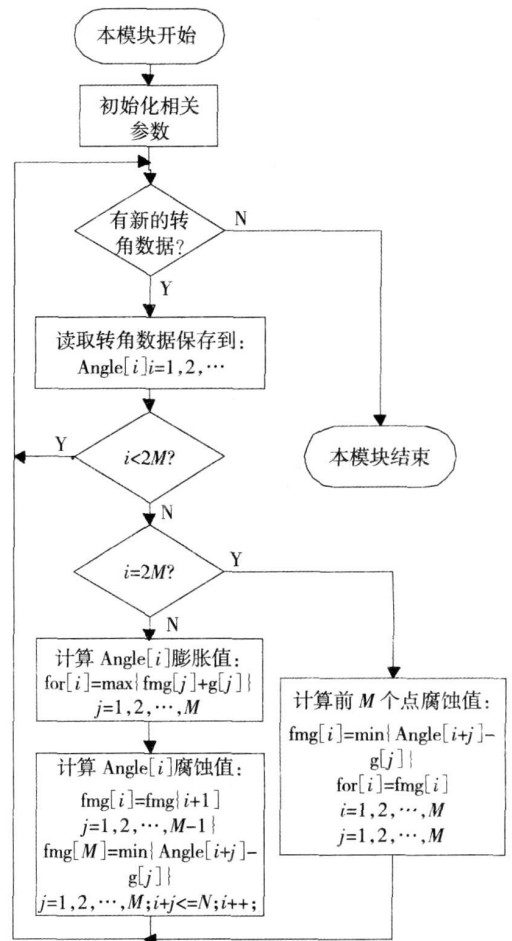


图 4 形态学开-闭滤波器算法流程图

形态学开-闭滤波器 Matlab 仿真结果如图 5 所示:

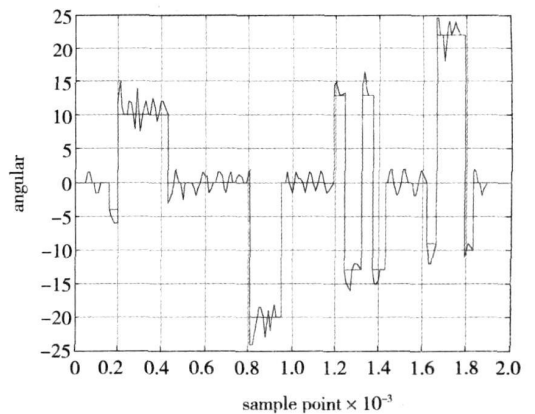


图 5 形态学开-闭滤波器 Matlab 效果图

在图 5 中, 点划线代表采集到的路径信息, 可以看出有很多毛刺和扰动; 实线代表形态学开-闭滤波后的路径信息, 该路径信息已经平滑很多, 绝大部分毛刺和扰动都被剔除, 有利于下一步的算法处理. 而用传统的中值滤波算法 (3 阶) Matlab 仿真结果如

图 6 所示,从图中可以看出滤波后的数据仍然存在很多噪声点,且需存储的数据量巨大,远不及形态学开-闭滤波器的效果.

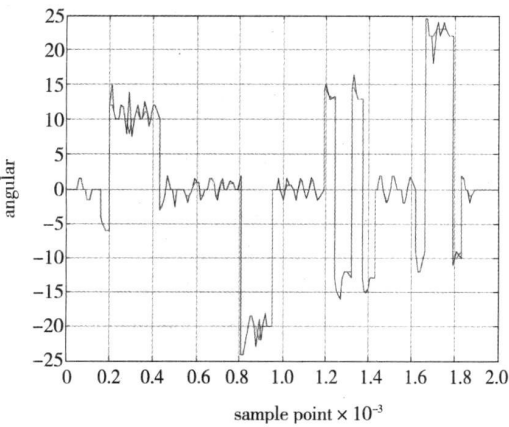


图 6 中值滤波 (3 阶) Matlab 效果图

2)行程编码算法.行程编码 (run-length encoding)是一种无损的压缩编码算法.如表 1 所示,在当信号出现重复率高的时具有很高的压缩比.比如对信号 ccccdadaaaa 则用行程编码可简洁地表示为 c4d2a5 本文中由于转角值不可能出现突变,对于具体的每一种类型的路径如直线、S 弯道等,转角值都会出现一定的规律,因此非常适合行程编码.此外,从图 5 可以看出,经过形态学开-闭滤波器处理过的路径信息已经比较光滑,可直接使用行程编码算法.由于该部分程序较为简单,在此不再赘述,只给出处理后的结果 (见表 1).在实验中共采样 200 个点,经行程编码后只需存储 15* 2 个点,压缩比高达 6.67,大大减少了存储空间.

表 1 行程编码结果

每组数据值 (θ)	每组数据个数	每组数据值 (θ)	每组数据个数
0	16	13	5
- 4	4	- 13	6
10	23	0	19
0	38	- 9	4
- 20	14	22	13
0	24	- 10	4
13	5	0	17
- 13	8		

3 结 论

视觉智能小车控制技术涵盖了自动控制、传感器技术、电子、电气、图像识别 (模式识别) 等多个学科,可以被应用到自动驾驶、车辆导航、城市轨道交通等领域,具有很强的实用性.本文的创新点在于以下两方面:提出一种新的小车运动控制方法,将道路与小车行驶方向的横向偏差转化为小车控制角的大小,提高了系统的实时性和控制精度;提出了一种新的路径记忆算法:将数学形态学滤波器和行程编码算法结合用于路径信息的存储.数学形态学滤波算法只进行比较和加减运算,计算量小,非常有利于嵌入式系统的实时性要求,而行程编码算法是一种无损的编码算法,在编码时不会丢失有用信息,且可达到较高的压缩比,减少了对嵌入式系统存储空间的要求.本文中的视觉智能小车具有自循迹、自调速、转角优化和路径优化的能力,达到了较高的智能程度.

参 考 文 献:

[1] 程钊,万齐.智能车道路识别与控制研究[J].伺服控制,2007(6): 49- 51.
[2] 庄洁玉.关于自动循线智能车赛道记忆算法的研究[J].应用科技,2008(16): 59.
[3] LUO Feng HUANG Zhuhui YAN Fei et al Route Memorization in RealTime Data Processing Using RunLength Encoding[C]// Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE, June 3- 5, Xi'an 2009. 1354- 1358.
[4] 战强,吴佳.未知环境下移动机器人单目视觉导航算法[J].北京航空航天大学学报,2008 34(6): 613- 617.
[5] 冯准.嵌入式视觉导航智能小车系统[D].南京:东南大学,2008. 15- 45
[6] 于海生.微型计算机控制技术[M].北京:清华大学出版社,2003. 1- 50.
[7] 陈平,李庆民.基于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J].中国电机工程学报,2005 25(11): 60- 65.
[8] 周斌,刘旺.智能车赛道记忆算法的研究[J].电子产品世界,2006(15): 160- 166

(编辑:王 萍)