

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.08.024

## 基于机器视觉和姿态检测的循迹智能车

王天河, 侯建军

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 针对未来汽车在一定条件下根据需求自动驾驶并安全到达目的地的趋势, 阐述一种以数字摄像头作为道路传感器的智能循迹电动车制作方案。介绍智能车整车硬件结构与设计, 采用图像二值化加速处理电路快速处理赛道信息, 惯性导航元器件检测和计算车身姿态信息, 给出智能车软件系统结构图, 分析控制策略及优化。结果表明: 通过优化控制策略和道路特征识别, 可让电动模型车在赛道板内安全行驶不出界的情况下, 以较快速度顺利通过各种弯道和适应不超过  $15^\circ$  的上下坡道。

**关键词:** 机器视觉; 姿态检测; 自动驾驶; 循迹; MEMS

**中图分类号:** TP273<sup>+</sup>.3 **文献标志码:** A

## A Tracking Smart Car Based on Machine Vision and Posture Detection

Wang Tianhe, Hou Jianjun

(School of Electronic &amp; Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Aiming at the trend for the future of the automobile autonomous driving and safe arriving at the destination, describe production scheme of an intelligent tracking electric vehicle with a digital camera. It has accelerated technology of image bi-naryzation to process track information; inertial navigation chip can detect and calculate car posture. The paper gives the smart car software system structure; analysis the control strategies and optimization. The results show that through optimal control strategy and the identification of road characteristics, it can run safely, rapidly and smoothly in the no-boundary track board. On the other hand, it also can safely drive through a ramp up and down within  $15^\circ$  degrees.

**Key words:** machine vision; posture detection; auto drive; tracking; MEMS

### 0 前言

随着电子技术在汽车工业中的广泛应用, 各种驾驶辅助系统得到了蓬勃的发展。可以预见, 未来汽车的发展趋势是智能化, 即在一定条件下根据需求自动驾驶并安全到达目的地; 因此, 笔者阐述一种使用单一数字摄像头作为道路检测传感器的智能循迹电动车制作方案。该方案采用图像二值化加速处理电路快速处理赛道信息, 惯性导航元器件检测和计算车身姿态信息, 辅助进行闭环控制。

### 1 智能车整车硬件结构与设计

#### 1.1 整车机械结构及执行机构安装

智能车车体以底盘为组装基础, 运行方式采用后轮驱动、前轮转向结构。设计考虑车体运行在基本水平的 KT 板赛道上, 起伏路段最大俯仰角不超过  $15^\circ$ , 前后有平稳过渡连接, 所以将前轮支撑架适当垫高, 并提高后轮轴距离底盘距离, 降低底盘高度以降低重心, 提升智能车整体运行稳定性。

图 1 为整车安装好后的实物照片。前轮根据赛道情况和调整精度大致选择了  $5^\circ$  的主销后倾角,  $2^\circ$  的主销内倾角和  $2^\circ$  的前束角。这样的选择有助于提

高运行平稳性。智能车前进动力来源为驱动后轮的直流电机, 通过齿轮传动给差速器的方式提供动力, 调整滚珠差速器的松紧, 可以得到最佳的差速平稳性和传动效率。舵机采用倒放式安装, 不但能够降低安装重心, 而且能够减小意外碰撞对舵机的损伤。

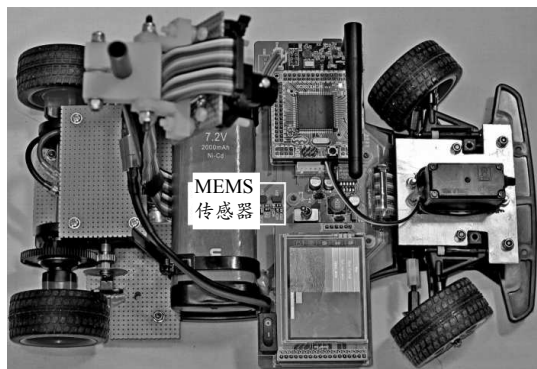


图 1 整车安装效果照片

#### 1.2 传感器的位置分布与安装

数字摄像头作为智能车赛道检测器件, 安装在空心碳纤维杆做成的支架上, 支架底部通过法兰盘固定在底盘的中轴线上, 摄像头高度大约  $25\text{ cm}$ , 俯视角约为  $20^\circ$ 。摄像头倒置安装, 输出行从第 0 行开始到 120 行对应从近及远车前  $7\sim 250\text{ cm}$  位置。

收稿日期: 2012-03-25; 修回日期: 2012-05-02

作者简介: 王天河(1988—), 男, 山东人, 在读硕士研究生, 从事嵌入式控制应用及基于下一代互联网和无线自组网的物联网应用研究。

惯性导航使用的传感器为高集成度数字输出微机电系统 (micro-electro-mechanical systems, MEMS) 传感器, 位置在主板中后方, 安装好主板后, 位于大致在车体底盘的几何中心附近, 如图 1 白色方框内标示。

电机的转速能够直接反映两后轮转速的平均值, 在电机转轴上固定一个光栅码盘片, 使用光电对管进行光电转换, 通过测量单位时间内的脉冲, 经转换后可计算速度。

### 1.3 主板电路结构

主板是整个电动智能车的控制中枢, 包括 CPU 核心板、电源转换电路、MEMS 传感器、信号处理模块、人机交互设备、外部调试设备和电机驱动电路, 如图 2 为智能车控制系统硬件部分结构示意图。

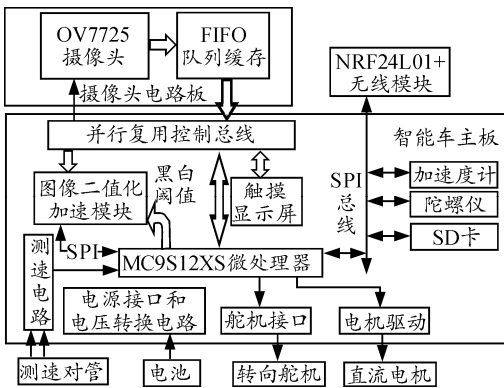


图 2 智能车控制系统硬件部分结构示意图

#### 1.3.1 电源转换电路

摄像头以及主板上数字器件的供电电压范围有少许差异, 最后经实验验证决定, 使用集成开关电源转换芯片 LM2596-3.3 将电池电压转换为 3.3 V 作为这些电子器件的统一供电电压。

#### 1.3.2 图像二值化加速电路及结果记录

OV7725 摄像头是一款纯数字可编程 VGA 摄像头, 输出配置为 160×120 像素, YUV422 格式。为了提高提取效率, 摄像头输出数据使用 FIFO 芯片进行缓冲处理, 读取数据可以采用每帧一次的突发传送模式, 免去了无用的 CPU 等待时间。

鉴于 9S12XS 系列 CPU 处理能力和存储空间有限, 无法将图像数据逐点保存, 而识别赛道的关键数据为图像二值化之后的数据, 所以方案中加入了硬件二值化加速处理电路。电路的原理是使用 4 个 4 位并行比较器, 两两级联, 组成 2 个 8 位并行比较器电路, 通过设定比较参考门限, 完成回滞比较功能。YUV422 格式是每输出一次 8 bit 灰度值 Y, 再交替输出 8 bit 的 U 或 V。UV 比较的结果没有意

义, 故使用 D 触发器对有意义的数据进行锁存输出。

如图 3, SPI 总线具备 SCLK, MOSI, MISO 3 个总线引脚。SCLK 接到 FIFO 芯片进行数据控制输出, 总线发送 0、1 交替的数据序列 (数据为 0x5555 或 0x55), 那么 MOSI 的频率则为 SCLK 的 1/2。则锁存时钟可使用 MOSI 信号的上升沿, 锁存输出接 MISO 引脚。每执行一次总线发送, 最多可发出 16 个脉冲 (16 bit SPI 模式), 这样就可以得到 8 个点的黑白二值化数据。

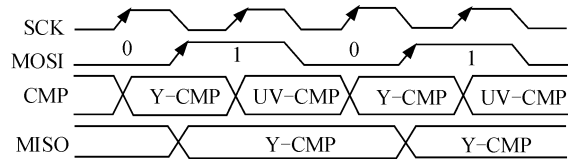


图 3 SPI 时序图及图像二值化加速模块运行原理图

FIFO 芯片在 SCLK 上升沿读出数据, 经过比较后在 CMP 线上产生比较结果, D 触发器在 MOSI 上升沿锁存 CMP 数据并更新到 MISO 引脚上。MISO 引脚同时接中断触发, 一旦发生中断, 表明黑白发生变化, 停止 SPI 发送, 并根据最后一次 MISO 收到的数据判断中断发生的准确位置, 记录跳变位置在游程编码图像数组中。

为节省 CPU 的 RAM 开销, 每行仅保留前 8 个上升沿和下降沿对, 共 16 个边沿数据, 超过这个复杂度行将被放弃 (最后一次翻转后不再开启中断)。经过使用发现, 赛道图像二值化后的复杂度低于设计预留的复杂度, 基本没遇到记录的图像失真情况。

#### 1.3.3 MEMS 传感器电路

MEMS 传感器采用纯数字解决方案, 选用的 2 款芯片 MMA7455 和 L3G4200D 都具备 SPI 总线接口, 可以复用到 S12 单片机另一个 SPI 接口上。配置其内部寄存器, 可以调节传感器的灵敏度、采样速率、内置滤波器截频等参数。

#### 1.3.4 电机驱动及测速电路

电机驱动电路采用高速全桥 MOS Driver 驱动的 4 个大功率 MOS 管构成 H 桥结构, 可以通过 PWM 控制电机的转速。光电对管输出的 2 路脉冲信号, 使用 D 触发器进行鉴相判断正反转。并将其中一路脉冲接到 CPU 的脉冲捕获引脚, 使用 CPU 内部的脉冲累加器累计单位时间内的脉冲数量。

#### 1.3.5 主板上其它设备连接与用途

触摸液晶屏与摄像头挂在同一数据总线上, 可以构造摄像头直通 LCD 的通道, 直接在 LCD 上显示摄像头的原始数据 (配置摄像头为 RGB 输出模式

的数据显示才有意义),方便定标、查看场景,调试摄像头工作状态等。

触控液晶屏可以完成人机交互界面功能,方便调试算法、切换策略和设定硬件控制参数。无线模块和 SD 卡作为辅助配合记录运行数据、发送调试信息和远程调试等操作。

### 2 智能车软件系统结构

如图 4 所示,软件由底层 IO 驱动、硬件抽象层、上层算法函数、中断服务函数以及调用人机交互处理组成。这种程序结构便于技术的传承和进步,在连续 3 年的跨平台智能车设计实践中得到了良好的验证。

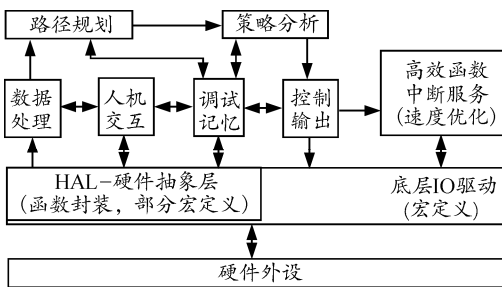


图 4 智能车软件分层设计结构

#### 2.1 底层 IO 驱动和硬件抽象层

硬件抽象层将读取外部设备的操作封装成函数或者宏定义(为频繁调用做执行效率优化)。

#### 2.2 人机交互界面

智能车人机交互界面采用时下流行的常见触屏界面进行设计,菜单和数字输入键被设计成图形化虚拟按键的形式,通过触摸屏进行调试操作和数据输入。人机交互界面在车辆发车后将被自动禁用以节省 CPU 开销。

#### 2.3 机器视觉和赛道识别

由于摄像头帧率可达 60 帧/s,就要求处理算法具有很高的执行效率。

##### 2.3.1 图像提取和机器视觉

1.3.2 节已经讨论过图像提取的详细过程,提取的结果如图 5 黑白背景所示。

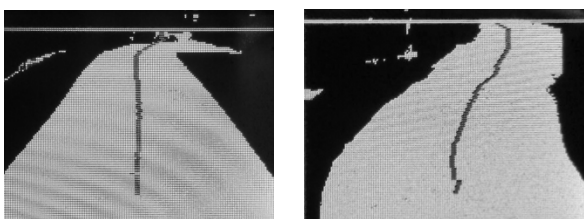


图 5 二值化后的图像和提取的赛道信息

测试赛道标识线(黑胶带)贴在白色赛道板两

侧,假设地板为惯用的纯蓝色,则二值化后也为黑色区域。通过识别白色部分,可以分析出赛道的边缘,进而计算出赛道中心线(图 5 中白色部分叠加的细线条为提取算法结果示意线)。

计算出赛道路径后,还需根据摄像头投影产生的梯形畸变进行修正,使用单目测距算法,可确定弯道距离车体实际距离和弯道转弯半径的大致值。

##### 2.3.2 赛道类型识别

通过大量的试车实验、对比试验以及现场标定,找出各种赛道类型对应的引导线特征,将特征抽象为数学模型和条件,通过比对特征信息,决策当前应当使用何种速度和转向策略。赛道的起始和终止处设定有起跑线,赛车可根据识别出起跑线图样自动倒计时发车和停车。

### 2.4 车辆闭环控制与姿态检测

#### 2.4.1 控制策略计算

根据赛道提取的结果和赛道类型的判断,并根据当前车辆运行状态及历史状态,从决策表中选择对应的控制策略,生成速度、转角的期望数值和预期目标。

#### 2.4.2 MEMS 传感器滤波和姿态计算

姿态检测和惯性导航采用 MEMS 传感器。由于此类传感器本身存在一定噪声和温漂,需要对其进行滤波修正,滤波采用简单模型的卡尔曼滤波方法,定期根据传感器数据进行预测和更新。

取得滤波后的传感量,还要根据物理学公式进行比例变换、积分和坐标变换等操作,将传感器数据转换为车的姿态和轨迹数据。

#### 2.4.3 电机控制和舵机控制

对于直流电机的控制最终采用 PI 控制;而舵机由于无法获得精确反馈,只依赖摄像头对赛道的分析得出当前的大致转向角,为大环高延迟控制模式,适合使用 PD 控制。

使用惯性检测元件,可以实时地检测车辆的运行姿态。尤其是使用陀螺仪可以计算当前车辆做圆周运动的角速度,一定程度为舵机控制闭环控制提供了反馈输入。

### 3 控制策略及优化

图 6 为车体运行控制流程图。车辆运行过程中,总体控制分为摄像头信息获取、图像处理和赛道识别、路径规划和控制策略生成、传感器反馈修正和控制输出 4 个阶段。

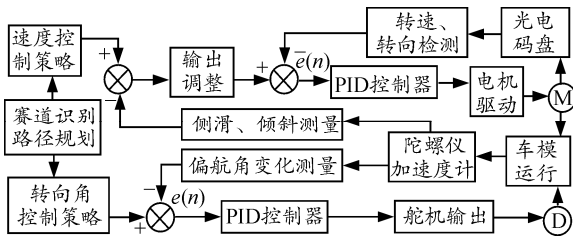


图 6 速度控制和舵机控制

### 3.1 赛道特征识别对控制的优化

常见的赛道类型有：长直道、小 S 弯道、大 S 弯道、大曲率半径弯道、十字交叉路口、坡道路段以及终点线标志。

如果定义大 S 弯道为常规控制策略，那么小 S 则是减少舵机的摆动幅度，让舵机反应更加迟缓，抄近路穿过。长直道是加速的最好时机，舵机 PID 的比例项大幅削减，防止高速行驶过程的左右摇摆，同时适度给电机加速。连续超大转弯类似小 S 或者长直道的策略。并将摄像头的提取行增多，看更远的赛道进行入弯预判减速或者提前靠弯道外侧进行外内外过弯策略。

由于赛道引导线在跑道板两侧，车辆通过十字交叉路口时，很容易丢失赛道。所以在控制策略上，一旦发现符合十字交叉弯道特征，则需要锁定路径，一旦赛道提取失败，则进行盲通过，直至明显识别出具备弯道特征的路段。

### 3.2 车体俯仰角识别及坡道路段策略

车体在开始上坡时，俯仰角会发生明显变化，有明显的俯仰转动角速度。根据这一特点，即使车辆在加减速等非惯性系中，也可以进行判断。

上坡时，由于摄像头向上仰，坡道尽头是无效图像区域(场外环境)，故此时的赛道识别采用近处识别方案，并恒速上坡。坡上路段和直线无异，可按照普通路段处理。检测到下坡时，由于车速会在下坡时加快，同时刚刚下坡到坡底的时候，摄像头方向下倾，无法看到前方情况，所以下坡的时候一定要刹车或减速。如果下坡后短距离内存在剧烈弯道，则将下坡速度设置的更低一些，防止冲出赛道。

### 3.3 横滚角测量的防侧翻

车体机械结构决定了智能车的各种运行状态的稳定性，但是机械结构改造有限。在地面摩擦力很大的情况下，由于摄像头车摄像头较重，安装位置较高，力矩较大，强行高速通过弯道会导致翻车。在实践中往往都是通过速度“降一档”来求稳通过。但是降一档速度就意味着所有速度都要降低。通过姿态检测，当发现车身发生侧向倾斜并且横滚角不

断加大时，必须控制电机需要适度减速。

### 3.4 航向角变化对舵机控制的影响

传统车辆 PID 控制中，由于舵机不方便安装反馈器件，所以舵机转角实际无法得到。同时舵机有较大的延迟时间，基本依赖图像识别判断是否对正赛道。而在有陀螺仪的赛车上，可以通过航向角变化速率，测量车的转动角速度，而四轮驱动车的转弯半径和外侧前轮转角有如下关系：

$$R = L/\sin \theta \tag{1}$$

而知道车速  $v$ ，角速度  $\omega$ ，即可间接求出前轮偏向角  $\theta$ ，也就知道了舵机转角。最终计算式如下：

$$\theta = \arcsin(L \cdot \omega / v) \tag{2}$$

将这个角度带入 PID 控制环节中，可以更好地对舵机控制进行闭环。V 的数值可以由码盘测量同时根据加速度传感器判断是否车轮打滑。

## 4 结论

在长时间的智能车制作和改进实践过程中，经过大量的赛道实测和经验总结，对控制策略进行不断优化，提高智能车的控制水平和总体运行速度。同时，智能车在测试赛道中运行，当赛道摩擦力过大时，过弯速度过快可造成侧翻，通过增加了姿态检测用的惯性导航传感器，并改写了相应的控制算法，在过弯平滑程度和安全性上取得了一定的效果。

### 参考文献：

- [1] 李国柱. 基于 CMOS 摄像头的智能车路径跟踪系统设计[J]. 现代电子技术, 2011, 34(18): 12-17.
- [2] 刘杰, 武丽, 赵永利. 基于车载视觉导航的智能车控制系统研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(5): 34-36.
- [3] 郭磊, 徐友春, 李克强, 等. 基于单目视觉的实时测距方法研究[J]. 中国图像图形学报, 2006, 11(1): 74-81.
- [4] 周欣, 黄席樾, 刘涛, 等. 高速公路分道线识别与重建[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(8): 52-55.
- [5] 刘泽, 黎福海, 肖祥慧, 等. MEMS 技术在车载导航中的应用[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(12): 131-140.
- [6] Freescale Semiconductor, Inc. MC9S12XS256 Reference Manual[S/OL]. [http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref\\_manual/MC9S12XS256RMV1.pdf](http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/MC9S12XS256RMV1.pdf): Rev 1.12 Freescale Semiconductor, Inc., 2011.
- [7] Freescale Semiconductor, Inc. MMA7455L Datasheet[S]. [http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MMA7455L.pdf?fp=1&WT\\_TYPE=Data%20Sheets&WT\\_VENDOR=FREESCALE&WT\\_FILE\\_FORMAT=pdf&WT\\_ASSET=Documentation](http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7455L.pdf?fp=1&WT_TYPE=Data%20Sheets&WT_VENDOR=FREESCALE&WT_FILE_FORMAT=pdf&WT_ASSET=Documentation): Rev 10. Freescale Semiconductor, Inc., 2009.
- [8] STMicroelectronics, Inc. L3G4200D Datasheet[S]. [http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL\\_RESOURCES/TECHNICAL\\_LITERATURE/DATASHEET/CD00265057.pdf](http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00265057.pdf): Rev 3. STMicroelectronics, Inc., 2010.