

轮趣科技

CCD 原理性手册

推荐关注我们的公众号获取更新资料



版本说明:

版本	日期	内容说明
V1.0	2021/11/26	第一次发布

网址: www.wheeltec.net

目录

1. TSL1401 线性 CCD 概述.....	3
1.1 线性 CCD 与面阵 CCD 概念介绍.....	3
1.2 TSL1401 传感器概述.....	3
1.3 模块引脚说明.....	4
1.4 内部电路简介.....	4
2. 采集信号时序分析.....	5
2.1 触发采集.....	6
2.2 数据开始采集.....	6
2.3 条件测试.....	7
2.4 关于 VO 引脚输出的一些说明.....	12
3. 赛道检测方法.....	13
3.1 阈值提取.....	13
3.2 二值化处理.....	13

1. TSL1401 线性 CCD 概述

1.1 线性 CCD 与面阵 CCD 概念介绍

TSL1401 属于线性 CCD，也可以叫做线阵 CCD，它与面阵 CCD 的区别主要在于线性 CCD 只能采集一行的可视像素。面阵 CCD 产生的图像信号为一个 $m \times n$ 大小的矩阵，即多行多列矩阵，而线性 CCD 产生的图像信号则为一个 $1 \times n$ 大小的矩阵，即单行多列矩阵。



图 1-1 $m \times n$ 矩阵

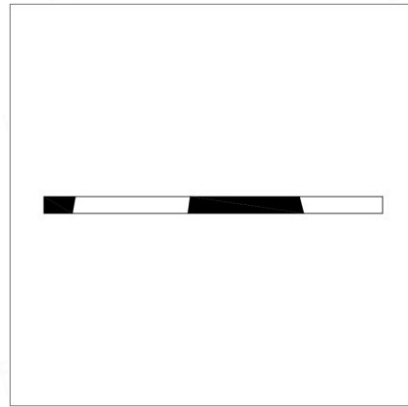


图 1-2 $1 \times n$ 矩阵

由上图可以看出，左边的图片为面阵 CCD 所采集的图像效果，其分辨率为 $M \times N$ ，右边的图片为线性 CCD 所采集的图像，其对应分辨率为 $1 \times P$ ， P 为线性 CCD 的最大像素数，由于 TSL1401 的最大像素数为 128，故可以把所采集到的线分为 128 个像素点。

1.2 TSL1401 传感器概述

TSL1401 线性传感器包含了 128 个线性排列的光电二极管。每个光电二极管都有各自的积分电路，积分电路由相关的电荷放大电路以及一个内部像素数据保持功能组成。内部像素数据保持功能可以为所有像素点提供同时积分的开始和停止时间。该排列由 128 个像素组成，每个像素的感光面积为 $3,524.3$ 平方微米。像素之间的间隔为 $8 \mu m$ 。每个像素所采集到的图像灰度值与它所感知的光照强度和积分时间成正比。模块内部控制逻辑简单，只需要串行输入 (SI) 信号和时钟信号 (CLK)。

2. 采集信号时序分析

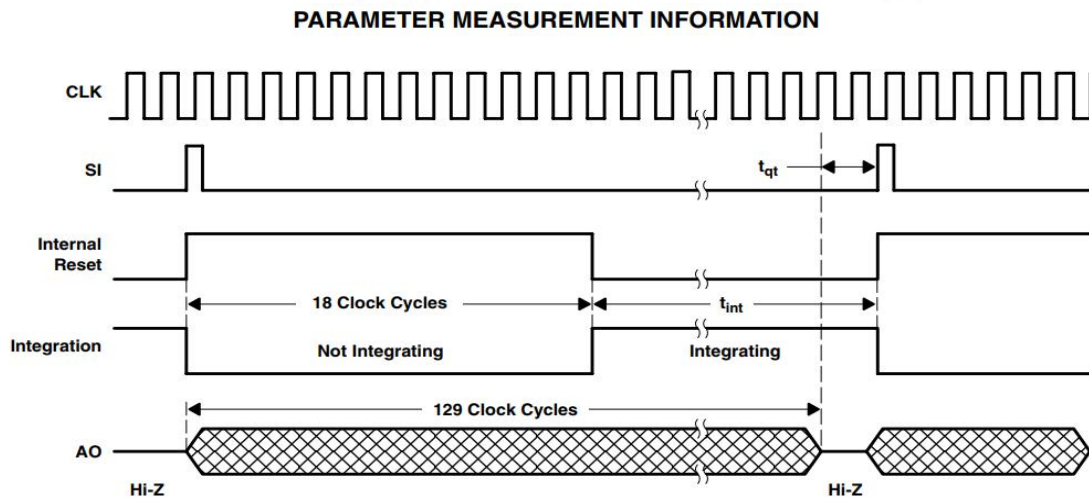


Figure 1. Timing Waveforms

图 2-1 TSL1401 时序图

如图 2-1 所示，CLK 是时钟周期，SI 控制 AO 信号输出，Internal Reset 是内部复位，Integration 是积分周期，AO 是采集信号的输出。TSL1401 一个完整周期为“129 个 CLK 采样输出周期+结束采样后的距离下一次采样间隔 (t_{qt})”，每 129 个时钟周期为一个输出采集周期，每次采集之间的时间间隔为 t_{qt} ；同样，结合图 2-1 的 Internal Reset、Integration 两根线可以发现，一个完整的周期也为“18 个内部积分器复位时钟周期+积分时间 (t_{int})”，这 18 个 CLK 时钟周期内执行积分器的复位时，传感器的感光元件不进行曝光，这是因为电容在使用时已被充满，需要将其内部电荷全部释放；积分时间 (t_{int}) 内 TSL1401 线性传感器被动进行环境感光，内部的光电二极管将光信号转换电信号(最终实际采集到的数据是 128 个电压值)，积分时间 (t_{int}) 的作用在下文会详细说明。

CLK 时间周期的作用贯穿整个数据采集的周期，包括触发采集条件，以及数据采集时的时钟控制；SI 负责控制 AO 信号的输出，根据时序图可以发现，在 SI 从低电平到高电平跳变时（此时 CLK 需保持低电平状态），AO 引脚开始数据的输出。因此，当不进行数据采集时，应当使 SI 引脚始终保持在低电平状态。需要注意的是：SI 保持高电平的时间需要 $\geq 20\mu s$ ；在达到最小保持时间条件后，SI 必须在 CLK 时钟的下一个上升沿来到之前变低；在下一个 SI 上升沿之前，

必须出现最小 129 个 CLK 时钟周期。

总结：数据采集分为两步，第一步是触发采集，第二步是数据采集。我们需要通过控制 CLK 引脚和 SI 引脚，触发采集条件后，控制 CLK 引脚并读取 AO 引脚输出的 128 个电压值。

以下为根据 CCD 传感器数据手册时序图，应用 C 语言实现的数据采集代码。此源码位于 adc.c 文件中的 RD_TSL() 函数中。

2.1 触发采集

根据上文提到，触发采集条件需要用到 CLK 时钟和 SI 引脚。代码中的 TSL_CLK 代表 CLK 时钟，TSL_SI 代表 SI 引脚，“=0”代表设为低电平，“=1”代表设置为高电平，Dly_us() 是微秒级延时函数。触发采集的 C 语言代码如下所示：

```
TSL_CLK=0;
TSL_SI=0;           //CLK 和 SI 均设置为低电平
Dly_us();           //延时

TSL_SI=1;           //SI 电平拉高
Dly_us();           //延时，使 SI 的高电平时间维持至少 20us
Dly_us();

TSL_CLK=1;          //CLK 电平拉高
Dly_us();           //延时
TSL_SI=0;           //注意 SI 的下降沿必须在 CLK 高电平时发生，此时开启数据采集和 AO 引脚进行灰度值输出
Dly_us();           //延时
```

触发采集条件后，下一步正式开始数据采集。

2.2 数据开始采集

数据采集时是连续采集 128 个 AO 引脚的电压信号，因此使用 for 循环做 128 次数据的采集，每个电压信号之间通过控制 CLK 时钟周期做区分。当 CLK 时钟拉低时开始采集 AO 引脚的电压，当 CLK 时钟拉高时结束一次数据的采集。

程序中的 ADV[] 是一个长度为 128 的数组，用于存放采回的电压值；函数 Get_Adc() 作用是读取电压值，括号中的输入变量为对应的采样引脚通道值（与实际使用的 STM32 引脚有关）；“>>4”表示“÷16”，因为 ADC 数据采集范

围是“0-4096”，“÷16”后将电压值范围缩小到“0-256”，便于数据处理。
 采集数据的 C 语言代码如下所示：

```
for (i=0; i<128; i++)
{
    TSL_CLK=0;
    Dly_us(); //调节曝光时间
    ADV[tslp]=(Get_Adc(8))>>4;
    ++tslp;
    TSL_CLK=1;
    Dly_us();
}
```

2.3 条件测试

在上文中只是介绍了理想环境中的数据采集，在实际使用时，传感器可能在非理想情况下使用，此时需要根据传感器原理对代码做出适当调整。

前文提到，最终我们采集回的是数据是 A0 引脚输出的电压值（一个周期 128 个电压值）。对应黑线白底的环境，黑线部分会比白底部分的电压值要低，在数据使用时也是根据电压值大小对比来判断黑线位置，因此黑线部分与白底部分压差越大越有利于黑线的判断。

A0 引脚输出电压值的计算方式如图 2-3 所示，对应每个变量的意思如表 2-1 所示。 V_{dark} 值的大小范围“0-0.2”，根据环境自适应变化； R_e 值的大小范围是“25-45”，根据环境自适应变化； E_e 值的大小带包光辐射强度，光强越大数值越大；积分时间 t_{int} 是程序可控变量。总结来说，想要人为的控制输出电压值，抛开不可控的 V_{dark} 和 R_e ，还有 E_e 光强辐射、 t_{int} 积分时间可以作为落手点，简单来说可以通过改变环境光强、或者是改变积分时间来控制 V_{out} 输出的电压值。

表 2-1 公式参数说明

变量	说明
V_{out}	A0 引脚输出的最终电压值
V_{dark}	黑线部分下的模拟输出电压值
R_e	相应波长光的器件响应率，单位：V/（ $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ）
E_e	光辐照强度，单位： $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
t_{int}	积分时间。单位：秒

$$V_{out} = V_{drk} + (R_e)(E_e)(t_{int})$$

图 2-3 AO 引脚电压输出

① 环境光的光强对输出电压的影响

根据控制变量法，本次对比测试环境是：相同的积分时间 t_{int} ，不同的环境光强 E_e 。

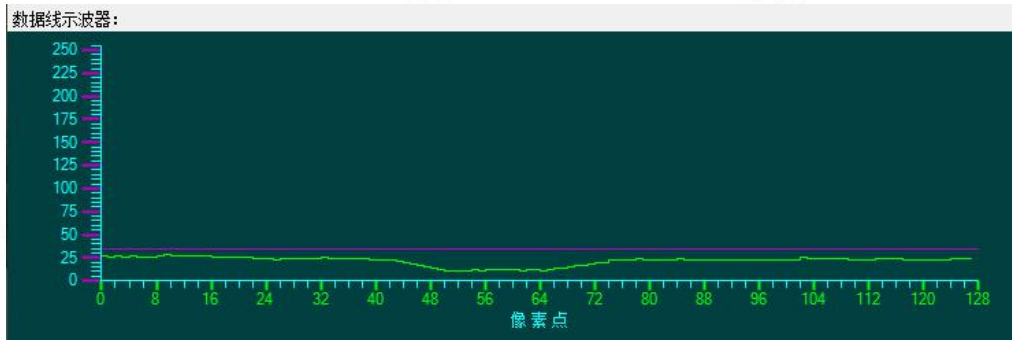


图 2-3-1 CCD 上位机截图（较暗环境）

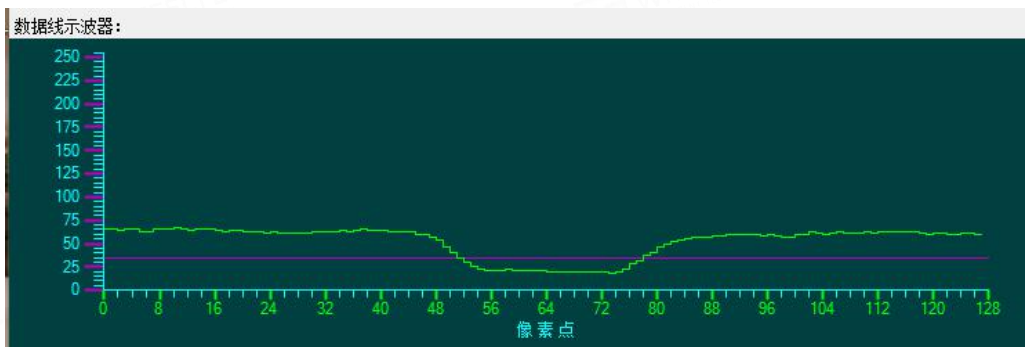


图 2-3-2 CCD 上位机截图（明亮环境）

对比图 2-3-1 和图 2-3-2 可知，在环境光变强时，无论是黑线还是白底部分的电压值都会增大，但是黑线与白底部分的压差值明显拉大，能更准确的找出黑线。

② 积分时间对输出电压的影响

根据控制变量法，本次对比测试环境是：相同的环境光强 E_e ，不同的积分时间 t_{int} 。根据图 2-1 可知，积分时间 t_{int} = “两个 SI 高电平之间的时间差 Δ_t ” - “18 个 CLK 时间周期的内部积分器复位时钟周期”。因此控制积分时间有两个方法：控制两个 SI 高电平之间的时间差 Δ_t （采样频率）、控制每次采样时的 CLK 时钟电平变化时间（CLK 时钟周期）。

(1) 首先验证第一个方法: 控制两个 SI 高电平之间的时间差 Δt (采样频率)。在同样的环境光条件下, 测试三种采样间隔时间条件下的采集结果。可以发现, 在延长 Δt 事件后, AO 输出电压值整体加大 (无论是黑底还是白线), 并且黑白底与黑线的区分度也更明显, 整体输出结果符合预期。同时可以观察到, 采样间隔 1s 的效果图, 白底部分电压值均为 256, 属于过曝现象。如果将采样间隔设置为 5s 时, 128 个电压值均为 256 (无论白底还是黑线), 黑线和白底无法区分, 属于严重过曝。

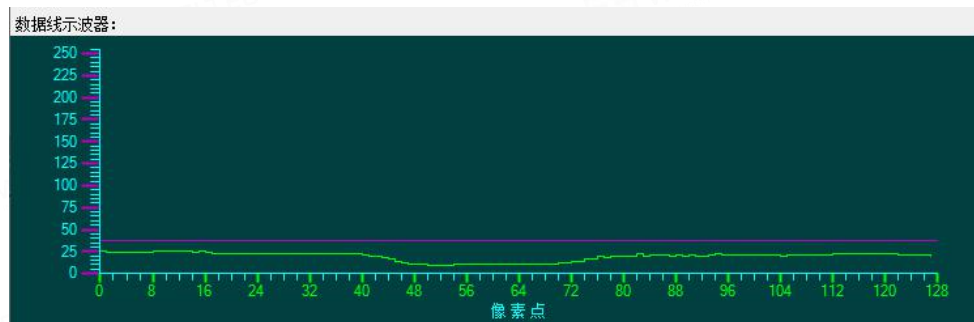


图 2-3-3 采样间隔 10ms

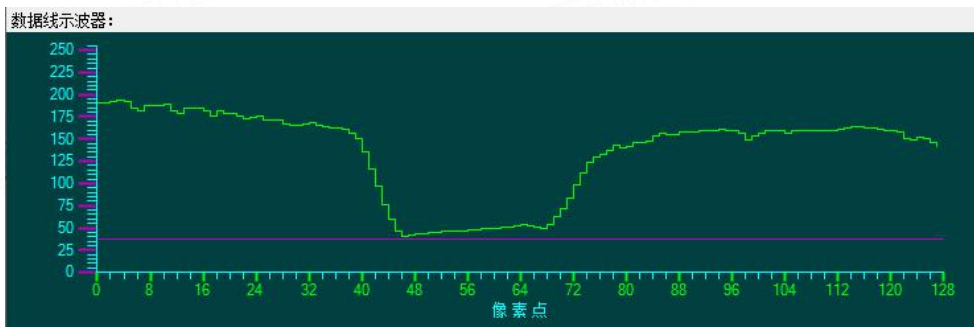


图 2-3-4 采样间隔 100ms

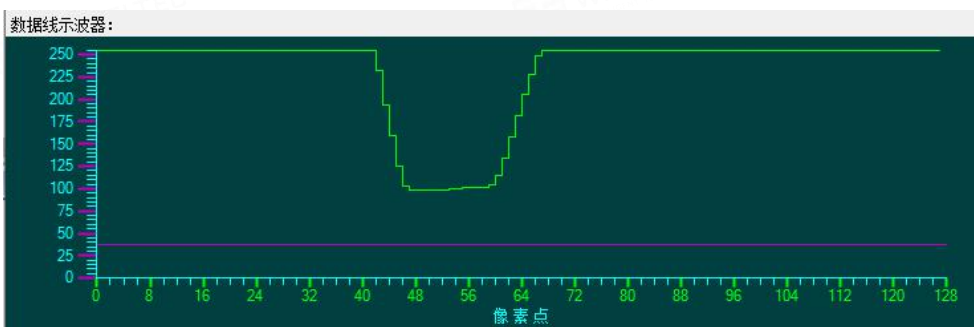


图 2-3-5 采样间隔 1s

采样间隔 Δt 不可无限延长的同时, 也不可以无限缩小, 因为采样间隔有最短时间限制。最小曝光时间的计算公式如图 2-3-6 所示, 其中 n 是线性 CCD 一次采集的像素数, 此处为 128; 18 表示 18 个周期的复位时间; 20 μ s 为像素转移时间

（将积分电容储存的电荷经过运算电路转移到 AO 数据输出的时间）。曝光时间只要选择在曝光时间的最小值和最大值之间的范围内就有效。因此最短的采样间隔 Δ_t 为 20us。

$$T_{int(min)} = \left(\frac{1}{\text{maximum clock frequency}} \right) \times (n - 18) \text{ pixels} + 20\mu s$$

图 2-3-6 曝光时间计算公式

（2）接下来验证第二种方法，控制每次采样时的 CLK 时钟电平变化时间（CLK 时钟周期）。在同样的环境光、同样的采样周期情况下，增加采样时 CLK 周期，具体操作方式是在采样时增加 CLK 的高电平和低电平时间。

```
for (i=0; i<128; i++)
{
    TSL_CLK=0;
    Dly_us();
    ...      //此处省略多个延时函数 Dly_us();
    Dly_us();
    ADV[tslp]=(Get_Adc(8))>>4;
    ++tslp;
    TSL_CLK=1;
    Dly_us();
    ...      //此处省略多个延时函数 Dly_us();
    Dly_us();
}
```

测试结果如图 2-3-7 和图 2-3-8 所示。可以发现实际效果没有明显的变化，原因是整体的积分时间 t_{int} 并没有变化，变化的是“采样时间（129 个 CLK 采样周期）”和“结束采样后的距离下一次采样间隔 t_{qt} ”两者之间的时间占比。经过实测，该方法并不会对采样结果产生实际变化。作者在使用这个方法时还发现，因为增长了采样时间，会导致程序中的其他控制变得卡顿，因此该方法不推荐使用。

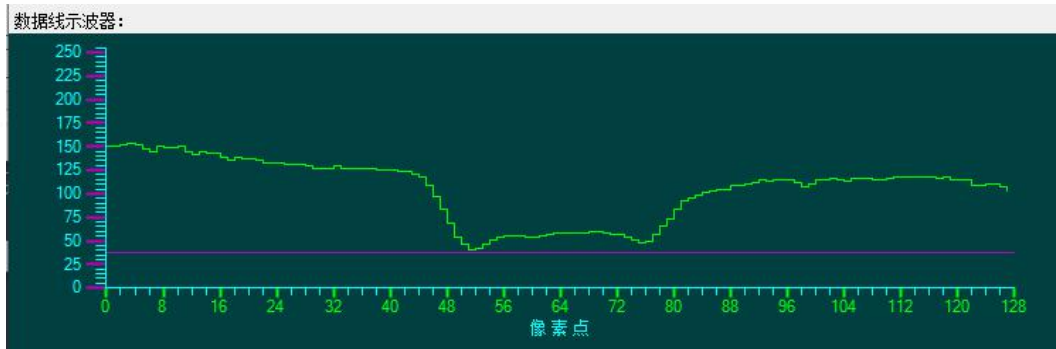


图 2-3-7 单次 Dly_us()延时

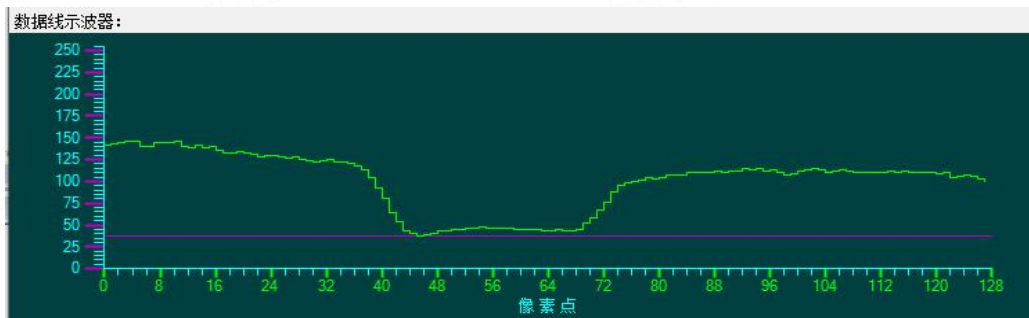


图 2-3-8 50 次 Dly_us()延时

③ 测试总结

根据上文的测试过程，我们可以得到两个结论：改变环境光强辐射可以改变采样的结果；根据不同的环境光强辐射环境，适当调整积分时间可以获取最理想的采样结果。

对于数据采集要求较快的图像，比如在智能小车的应用中，应尽可能降低曝光时间的长度。原因有以下两点：

(1) 增加积分时间意味着图像采集周期变长，不利于系统的控制。实际情况就是采集周期变长，导致系统控制的反应能力变弱；

(2) 增加曝光时间还会使图像变模糊，不利于图像处理。这个道理也和相机一样，相机的快门越快，越适合捕捉高速运动的图像，反之则捕捉的图像很模糊！如果你采集的是变化较慢的图像，或者是静止的图像，则没有曝光时间长短的问题。

因此，CCD 镜头曝光时间的长短应根据赛道的实际光强环境进行设置。在光线较暗的环境中，应该增加曝光时间，以换取亮度合适的图像；在光线较强的环境中，应该减少曝光时间，以防止图像出现饱和现象。

2.4 关于 VO 引脚输出的一些说明

根据图 1-4-1 可知，AO 引脚在输出前会经过内部的放大器增益输出，外部不需要接下拉电阻。当 $VDD=5V$ ，无光线输入时，AO 输出实际上为 0V；光线正常时白底部分电平输出为 2V；随着入射光线的增强，白底部分的电平值逐渐增大，当光饱和时，白底部分电平值为 4.8V。当设备不处于输出相位时，AO 就处于高阻抗状态。

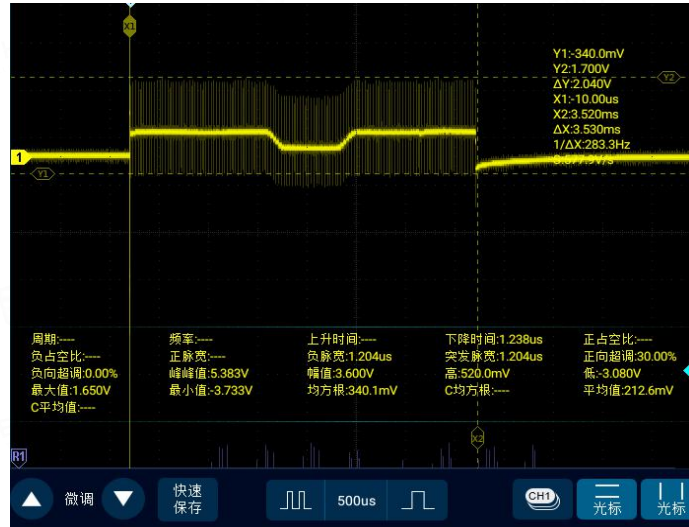


图 2-4-1 AO 引脚接示波器查看波形曝光方法分类

3. 赛道检测方法

3.1 阈值提取

由于线性 CCD 一个曝光周期只能采集视野范围内一条线的信息，即 128 个像素信息。我们通过 AD 采样获取的数据其实是通过运算电路得到的像素点的电压值，是一个数值。通过采样函数将一个曝光周期内采集到的 128 个像素点的电压值寄存到位长 128 的数组 $AVD1[i]$ 中，从而用于计算与数据处理。在 128 个像素点的信息中，光线越强的像素点电压值越高，越弱的像素点电压值越低。

实际黑白赛道中白色部分的像素点电压值要大于黑色部分，因此想要检测黑线在赛道中的实际位置，只需要设置一个阈值，将黑线和白底部分区分开来即可。其方法为：对 CCD 每次采集回来的 128 个像素点灰度值，通过 for 循环比较的方式，找出整个数组中最大和最小的灰度值，取两者之和的平均值作为黑白线间的阈值。

由于 CCD 镜头易受光照环境的影响，小车在赛道上行驶时，对应每个位置光的折射强度不一样，因此每次采集回来的像素点灰度值都会发生变化。因此上述阈值的好处是：所得的阈值的是一个动态值，能够在不同光照环境或这个不同曝光时间长度下更好的区分黑线和白底的像素点灰度值。

3.2 二值化处理

赛道中黑线的位置主要是通过检测像素点灰度值的跳变来确定。其原理为：将采集到的像素点灰度值数组与阈值通过 for 循环比较，当像素点灰度值大于或等于阈值，判定该像素点对应白底部分；反之，则判定为黑色赛道的引导线。这就是二值化的基本原理与用法。

通过 for 依次左右循环比较，得到白底部分跳变为黑线和黑线跳变为白底部分时对应的像素点数组序列号，即可确定黑线在赛道中的位置，然后算出序列号的平均值，即为黑线的中线值。通过调整 Z 轴角速度（PID 控制），让黑线保持在车体的中间，实现巡线的效果。