

快速上手 TSL1401 线性 CCD

通过阅读本文，可以使你快速地了解线性 CCD 的工作原理、图像的采集方法以及一些常见问题。本文还将给出线性 CCD 的编程方法以及基于亮度反馈的编程思路。

1. 与摄像头 CCD 的区别

我们常说的摄像头 CCD 模块通常使用的是面阵 CCD 芯片，一般以 OV 系列面阵 CCD 最为常用。而 TSL1401 属于线性 CCD，也可以叫做线阵 CCD。与面阵 CCD 相比，线性 CCD 最明显的特点就是其只能采集一行的可视像素。在智能车竞赛中，摄像头组使用的是面阵 CCD，而光电组则必须使用线性 CCD。同样是看一段赛道的图像，两种 CCD 模块看到的图像如图 1 所示。

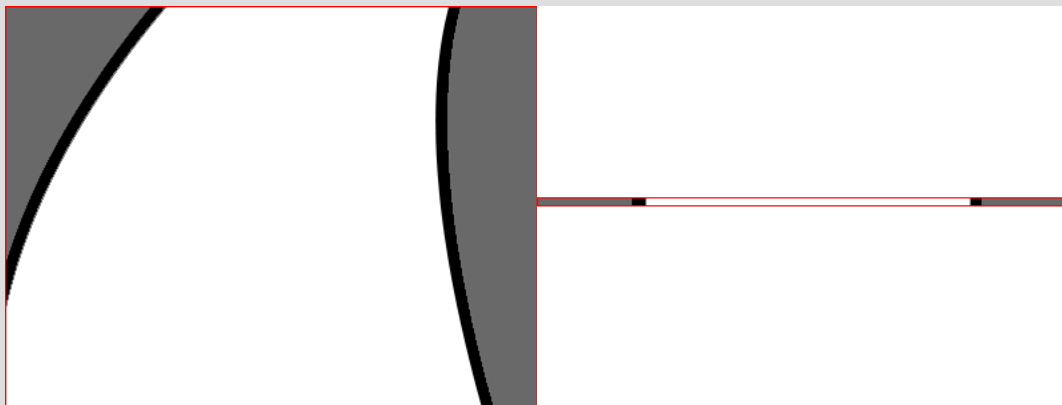


图 1

由图 1 可见，左边图像为面阵 CCD 采集的二维图像，它的分辨率为 $m \times n$ ，而右侧的图像为线性 CCD 采集的一维图像，分辨率为 $p \times 1$ 。其中 p 为线性 CCD 器件的最大像素数，TSL1401 的像素数为 128，因此可以将右图红框内的线分为 128 个点。

2. 线性 CCD 工作原理

在 TSL1401 的官方技术文档中已经详细描述了线性 CCD 的工作原理。但是该文档是全英文的，而且讲的大部分内容与实际使用无关。这里笔者将为你简明扼要的解释它的工作原理与要点。

2.1. TSL1401 引脚描述

TSL1401 引脚如图 1 所示。

表 1

引脚名	编号	描述
AO	3	模拟电压输出。
CLK	2	时钟输入。该时钟控制电荷转移、像素输出和复位。
GND	6,7	地。
NC	5,8	不用连接。
SI	1	串行输入。SI 决定数据输出序列的开始。
VDD	4	供电电源。3V 至 5V。

2.2. 功能描述

TSL1401 线性 CCD 传感器包含 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，以下我们将此电路统称为**像素**。每个像素所采集的图像**灰度值**与它所感知的**光强**和**积分时间**成正比。以上名词所对应的物理量纲为：

- 灰度值：输出电压 V_{out} ；
- 光强：器件对给定光波长在电压上的反应 V_e ； $(V_e=V/(\mu J/cm^2)* \mu W/cm^2)$
- 积分时间：即曝光时间， t_{int} 。

那么这 128 个像素是怎么进行采集并输出的呢，这就用到了 SI 和 CLK 信号。根据表 1 可以简单的了解它们的功能。在 128 个像素之外，还有一个开关逻辑控制和移位寄存器电路。SI 通过该电路，控制每一个像素的**积分和复位**操作；CLK 通过该电路控制每一个像素电压的**依次输出**。TSL1401 内部的模块图如图 2 所示。

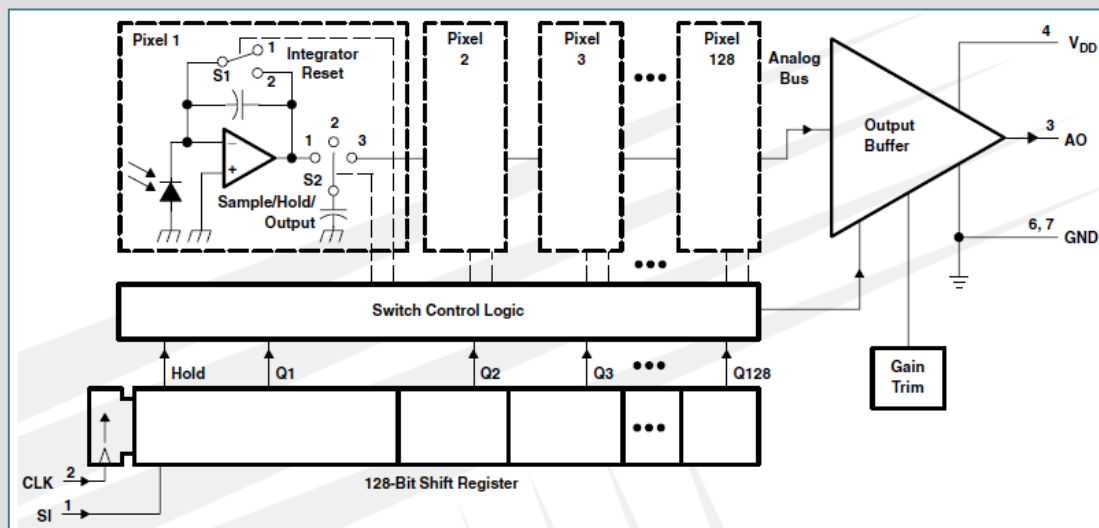


图 2

图中可以看到上面提到的像素电路、开关逻辑控制和位移寄存器电路。从图中我们还可以看到一个 Gain Trim, 该模块对传感器输出的电压进行增益调整, 因此从 AO 引脚输出的电压**无需再接其他运放**, 直接接入单片机的 AD 输入引脚即可。**每个像素的值可以在 CLK 的下降沿时从 AO 采集。**

3. 积分时间 or 曝光时间

如果你阅读了 TSL1401 的英文技术文档，经常会看到积分（integration）这个词，而上一节我们也说了，像素的输出值与积分时间成正比，其实这里所说的**积分时间就是我们熟知的曝光时间**。这个曝光时间的概念和相机中胶片的曝光时间是一样的。曝光时间是指底片的感光时间，曝光时间越长底片上生成的相片越亮，相反越暗。线性 CCD 的曝光时间也是这个原理。

3.1. TSL1401 曝光时间

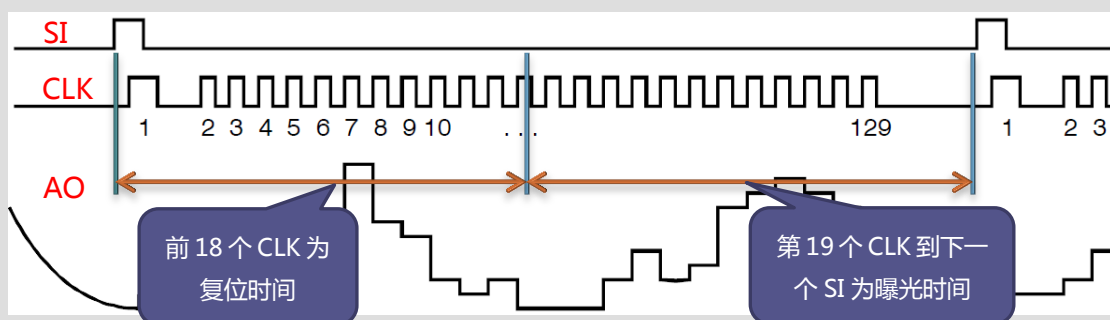


图 3

TSL1401 技术文档中关于积分时间做了大量说明，其实归根结底可以由图 3 表示。**图中第 19 个 CLK 到下一个 SI 开始的这段时间，就是 CCD 的积分时间，即曝光时间。**之前的 18 个 CLK 的时间为积分器的复位时间。

小提示：在每个 SI 信号之后采集到的像素均是这个 SI 信号之前所曝光得到的图像。

如果用户提供的 CLK 频率足够快（最大 8MHz），那么前 18 个 CLK 的时间可以忽略不计，TSL1401 的曝光时间可以**近似为两个 SI 信号的间隔时间**。而一般情况下，即使 CLK 频率为 8MHz，单片机的 AD 转换时间也达不到那么快。

3.2. 关于曝光时间长短讨论

根据 TSL1401 技术文档提供的的数据，该器件的**最大曝光时间为 100ms**，即无论你实际曝光多长时间，只要超过 100ms，其图像效果和 100ms 是一样的。那么如何选择合适的曝光时间，就成了需要面对的问题。

即使是相同的物体，在不同的光线环境下得到的图像是不一样的。从理论上讲，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。

但是对于采集变化较快的图像，例如在智能车的应用中，**应该避免增加曝光时间**。原因有两个：

一、增加曝光时间意味着图像采集周期变长，不利于系统的控制。说白了就是采集周期变长，系统控制的反应能力就变弱；

二、增加曝光时间会使图像变模糊，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！

当然如果你用来采集变化较慢的图像，或者是静止的图像，则没有曝光时间长短的问题。

4. 常用的编程方法

由于线性 CCD 只需采集 1 行像素即可，因此它的编程方法相比面阵 CCD 更为简单，唯一需要处理好的就是曝光时间的长短以及阈值的选择。

常用的曝光方法有两种，分别是单次曝光法和连续曝光法。

4.1. 曝光方法分类

单次曝光法：这种方法适用于采集周期不固定的情况，即首先利用一个 SI 周期来曝光 CCD，紧接着在下一个 SI 周期对 128 个像素进行依次采集。在前一个 SI 周期内，必须输出 129 个 CLK 以丢弃没用的 AO 输出，曝光结束后的第二个 SI 周期内采集的 AO 输出才是正确的。

该方法需要在两个 SI 信号之间添加延时函数来控制曝光时间。缺点是占用 CPU 运行时间来进行曝光，即在曝光期间内 CPU 只能处于等待状态。

连续曝光法：该方法的采集原理与单次法相同，只不过该方法利用单片机的周期定时器来控制 SI 信号的间隔，即曝光时间。该法通过设置单片机 PIT 的中断周期时间来获取不同的曝光时间，并在 PIT 中断函数内进行 AO 的数据采集。

相比单次采集法，连续采集法可以节约 CPU 时间，利用 PIT 周期中断定时器实现曝光延时。

4.2. 像素采集方法

不管采用哪种曝光方法，其针对像素输出值 AO 的采集方法是一样的，如图 4 所示。使用者需要在 SI 持续高电平 20ns 后产生第 1 个 CLK 信号，并在每个 CLK 信号的下降沿时采集 AO 引脚的输出的电压值。在采集了 128 个像素后，还必须生成第 129 个 CLK 以结束本次采集。在第 129 个 CLK 之后到下一个 SI 信号之间的时间就是下次采集的曝光时间（这里说的曝光时间是忽略了第 19 到 129 个 CLK 之间的时间）。

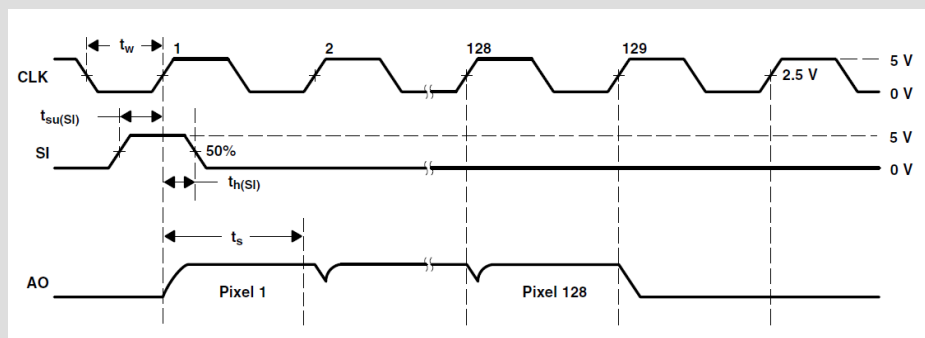


图 4

5. 基于亮度反馈的应用思路

采用常规的编程方法无法准确的确定曝光时间以及黑白线的阈值，这受限于线性 CCD 模块没有反馈信号所致。拉普兰德的**线性 CCD 模块 V2** 版本中加入了**感光传感器**，用户在采集编程时可以引用该传感器的输出值作为系统的反馈信号之一。该感光传感器集成在 CCD 模块 PCB 板的正面，可以准确的采集 CCD 模块所处环境的亮度值！

这里仅给出简单的应用思路，笔者不提供具体的示例程序，以免束缚使用者的编程思路。即使这里给出了具体的编程方法，也是极为简单的算法，用户不可能拿着去解决任何实际问题。

5.1. 感光传感器的使用

感光传感器的供电电压与 TSL1401 相同，3V~5V 均可。它的输出电流同环境的亮度呈线性变化。我们只需要将输出 V_{out} 直接接入单片机的 AD 输入端口便可以采集到环境的亮度信息。

5.2. 根据亮度自适应曝光时间

前文已经说到了，在快速运动的控制中应该尽量避免增加曝光时间，而且 TSL1401 的最大曝光时间为 100ms，因此我们在根据亮度调整曝光时间的时候要注意设定一个阈值，避免出现曝光时间无限增加的情况。至于这个阈值，不可能是一家之言，只要在算法可识别的范围内，应当尽量越小越好。

5.3. 根据亮度自调节黑白线阈值

二值化的方法在面阵 CCD 上得到了普遍应用，在线性 CCD 上同样可以应用，其重要的参数就是黑白像素识别的阈值。但是由于环境亮度不同，同样画面的亮度也会不同。使用固定的阈值无法起到很好的效果。因此我们可以根据环境的亮度动态调整阈值参数。

根据常理，环境的亮度值越低，那么二值化的阈值就应当相应的调低。因此亮度值与阈值可以简单的使用线性关系关联起来，例如： $V_{th}=k*V_{out}+b$ 。其中 V_{th} 为阈值、 V_{out} 为亮度， k 和 b 分别为线性参数。

6. 线性 CCD 常见问题

6.1. 镜头选配问题

目前市场所售的线性 CCD 模块均为厂家配好的镜头，参数固定，因此可视效果也是固定的。什么是镜头的可视效果，就是要看它看的是远还是近、看的是明还是暗、看的视角是大还是小。因此一个固定的镜头必然只有一种合适的可视效果，而不是宣传语中的最远能看 XX 米，实际的情况是只适合看 XX 米到 XX 米之间。

那么镜头有哪些参数呢？首先是焦距，通俗地说焦距一般决定镜头的视角大小，焦距越长视角越小，反之焦距越短视角越大。而视角大小决定了看的远近的清晰度，视角越大，看近处的物体越清晰，视角越小，看远处的物体越清晰。

然后是光圈，光圈越大进光量越多，成像越亮，反应到线性 CCD 上，需要的曝光时间也就越短。光圈越小则需要的曝光时间越长。

6.2. 输出放大问题

好多人纠结 TSL1401 的输出要不要加运放，其实这是对 TSL1401 的不了解所导致的。TSL1401 的 A0 输出引脚内置了增益调整器，其官方文档也明确表示了 A0 引脚不需要再接运放。所谓的接运放可以提高画面亮度，其实和直接采集完电压，再在单片机内部进行数字增益是一样的。

6.3. 调焦问题

所谓调焦就是调节镜头在镜头座上的进出。一般来说线性 CCD 模块的焦距是固定的，因此要想得到清晰的图像就需要通过调节镜头的进出来解决。例如我们采集图 5 中显示器中的图像。如果镜头拧的位置合适，则会如图 6 所示得到清晰的图像，CCD 输出的数据在波形上会表现的比较尖锐；如果镜头拧的不合适，则会如图 7 所示得到模糊的图像，CCD 输出的数据在波形上会显得比较平滑。



图 5

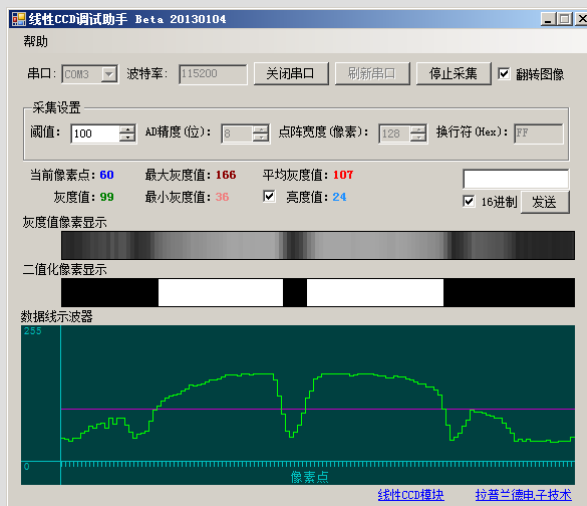


图 6

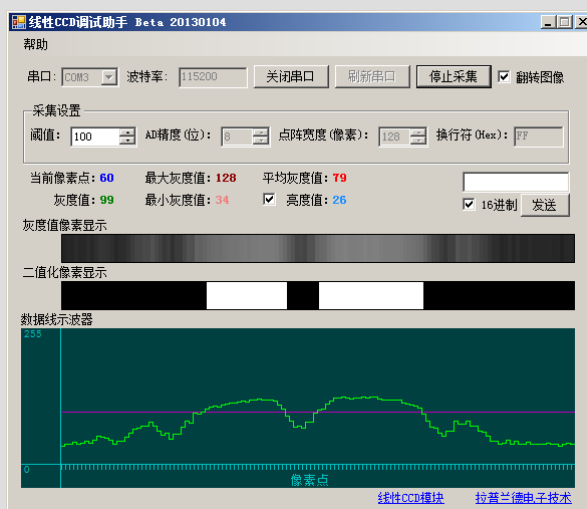


图 7

6.4. 两边的图像较暗问题

在使用线性 CCD 的时候，你可能会发现图像的中间会比边缘更加明亮。这是几乎所有成像系统所存在的光学特性。该现象称之为“余弦效应”，该效应使得图像的中心比边缘更加明亮。这种现象是由于图像边缘的光线经过透镜会斜着入射到感光器件上，而图像中心的光线是垂直入射到感光器件上的。该问题需要通过对图像的解析和相应的算法来根本解决。