

TurboDrive™

近期推出的 **Linea GigE™** 线扫描相机证明了 **Teledyne DALSA** 再次将创新推动到新的高度。

Linea GigE 是 **Teledyne DALSA** 第一款提供 **TurboDrive** 的相机。此项技术突破千兆以太网的限制，让相机高速传输信息。**TurboDrive** 是一项正在申请专利的创新技术，它使用高级数据编码技术，可以发现从传感器出来的数据中存在的冗余。它采用基于图像熵的编码来为像素信息建立模型，不会丢失信息。这使得链路中的数据运输更加快速，因为每个像素进行编码的位较少。

在新的 **CMOS** 传感器提升采集速率的同时，相机接口处的可用传输带宽往往成为瓶颈。无图像采集卡的相机接口，例如 **GigE Vision** 和 **USB3 Vision**，通常价格便宜，但是缺少有采集卡的相机接口（例如 **Camera Link**、**Camera Link HS** 和 **CoaXPress**）的高吞吐量。**Teledyne DALSA** 的 **TurboDrive** 技术是一种提升相机采集速率的有效方法，而且无需在系统中包含图像采集卡，而且此技术同样适用于任何可靠的传输介质（即通信链路为前向纠错或数据包重发提供条件）。

机器视觉相机传统上一直使用绝对编码（8 到 16 位）来传输图像信息。例如，在 8 位中，每个像素取从 0（黑）到 255（白）范围内的值。**TurboDrive** 依靠局部相对编码来检查其上下文中的每个像素，然后再对其进行编码。这样可生成像素信息的更紧凑编码并且通过将相同信息包装在更少的位中，使 **TurboDrive** 更加高效。在结合可靠的传输链路时，**TurboDrive** 速率可以从标称信道速度的 120% 提升到 235%。

本入门资料旨在解释 **TurboDrive** 能够做什么来帮助您实现应用以及描述对于一大组典型的工业检测图像，相对于所测量的图像熵，传输速度的提高。我们通过一个数学模型来显示使用 **TurboDrive** 可实现的预期吞吐量提升。

图像熵

图像熵衡量图像的随机性水平：图像越均匀，越容易进行编码。当图像熵很高时，意味着图像包含大量信息，因此更难以以紧凑的方式进行编码。

让我们假设一个数据源（传感器），对于它获取的每个像素都独立于先前获取的像素。每个可能的像素值出现的概率为 P_i 。出现概率低的像素（即不同于像素群的像素）提供的信息因此高于出现概率大的像素的信息。

在本文中，我们使用下面的公式来定义图像熵：

$$\text{Image Entropy} = - \sum_i P_i \times \log_2(P_i)$$

公式 1: 图像熵

其中 P_i 是像素值等于 i 的概率， \log_2 是以 2 为底的对数。由于概率小于 1，因此 \log_2 是负数，因此需要在求和号之前加负号。概率越大，它的 \log_2 越接近 0（切记概率始终小于等于 1.0）。这表明出现概率越低的像素值对图像熵的贡献越大。

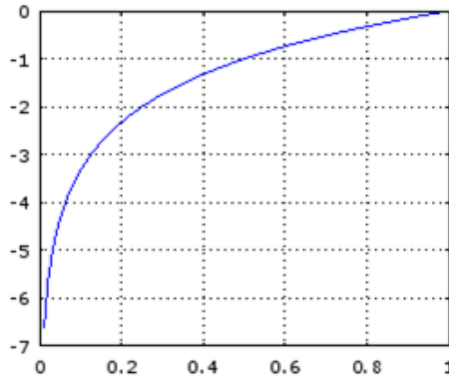


图 1: $\log_2(x)$

上述公式可以从图像直方图直接计算出来。直方图表示给定图像的像素值的分布。每次一个特定的值出现在图像中，该值的直方图列就会递增一。因此可以使用此直方图来提供每个可能像素值的概率分布。

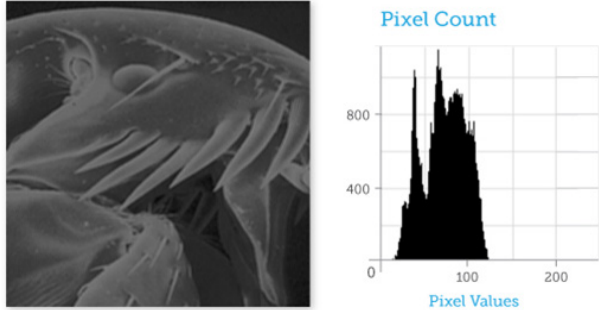


图 2: 直方图示例

从上图很清楚地知道具有单一强度的均匀图像其所有像素具有相同的值。因此其直方图显示为一个峰值。并且其图像熵等于 0，因为该孤值出现的概率为 1.0，而 $\log_2(1.0) = 0$ 。要完整地描述这样的图像，只需要知道所有像素的共同值。您可以发现对此类图像进行编码不需要太多位的信息！真实图像可能不那么简单，但是大多数都存在冗余：某些像素值出现的概率较大。这一原理是 TurboDrive 的基本构建块之一。简言之，图像熵表示对图像中的每个像素进行编码所需的平均位数的理论下限。因此，该数值越低，TurboDrive 实现的数据打包越有效。

充分利用邻近效应

图像熵是在 TurboDrive 中使用的第一个原理。但是为了进一步减少对像素信息编码（同时不丢失信息）所需的位数，TurboDrive 还考虑邻近效应。像素的近邻是围绕该像素的一组像素。尽管近邻的确切距离可能不一样，但是在本分析中，我们的示例限制在相邻像素（即紧挨着参照像素的那些像素）。

对于大多数像素，像素到像素的变化很小而且存在大量冗余。因此，有效地利用相邻像素的信息以更有效地对参照像素进行编码是有可能的。

其中一个方法是发现使用卷积实现的高通 2D 滤波器。一个简单的高通滤波器的所有系数之和等于 0。我们在此模型中使用的滤波器具有 3x3 滤波，为中心像素提供最大权重。

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

图 3: 2D 高通滤波器

此滤波器的结果提供了位于中心的参照像素和与它最邻近的四个像素之间的差异。可以看出来，对于均匀的图像，这 9 个像素具有相同的值并且此滤波运算的结果为 0。从本质上讲，像素到像素的变化越小，此高通滤波器输出的值也越小。人们可以直觉地理解为对小值进行编码比对大值进行编码需要的位数少。显然，可以变换此模型的 9 个滤波器系数的权重来适应图像内容。

TurboDrive 原理 1 图像熵

不浪费位来对许多像素的共同信息进行编码。只考虑根据图像熵对像素进行编码所需的位数。

TurboDrive
原理 2
邻近效应

假设像素到像素的变化很小。仅编码特定于参照像素的额外信息。

通过利用图像均匀性，TurboDrive 使用局部相对编码，而不是绝对编码。这样当临近的像素具有高度相关性时，就会比较高效。此高通滤波器运算的结果然后作为图像熵步骤的输入，进一步最小化图像编码的大小。这确保了在保留原始图像中存在的所有信息的同时紧凑地表示。利用此方法，使用局部相对编码，传输介质的理论吞吐量提升可由下面的公式得出：

$$\text{Throughput increase} = \frac{\# \text{ bits}_{\text{abs. encoding}}}{\text{image entropy}_{\text{rel. encoding}}}$$

公式 2：吞吐量提升

在上面的公式中，分子通常等于 8 位，而分母是在应用图 3 中给出的 2D 高通滤波器后由公式 1 的结果得出。

传输链路要求

典型的机器视觉相机使用绝对编码对像素信息进行编码。这意味着每个像素完全由其本身描述而且无需额外的信息对其进行解码。数值表示像素强度。此方法的优点是，如果发生传输错误，接收器可以很容易地忽略出差错的像素。缺点是此类型的编码比之前讲述的基于图像熵原理的真正必要编码需要更多的位。

那么，既然绝对编码不是最优的，为什么还在机器视觉领域如此受欢迎？这源于它的简单性和一个事实，即模拟和 Camera Link 提供了一个不处理传输错误的传输信道。

让我们以 Camera Link 为例。此相机接口于 2000 年 10 月推出，从那时起一直很受欢迎，主要归因于它所提供的快速数据吞吐（高达 850 MB/s）。但是一个少为人知的事实是，在面对位错误时 Camera Link 不提供任何稳健性：如果一个位在传输中损坏，图像采集卡无法检测到问题并通知应用程序。受影响的像素会采用不正确的值。效果的大小取决于损坏的位是比较靠近最显著的位（较大影响）还是比较靠近最不显著的位（较小影响）。Camera Link 不提供任何校验和、数据重发或前向纠错机制。但是不要以为可靠的传输是较旧的相机接口的特性。即使是 CoaXPress 1.1，一款较新的相机接口，也仅限于错误检测，而不保证图像传输的稳健性。

图 4 说明了一个 8 位像素的此问题：相机传输二进制值 11010001b = 209d。在数据传输过程中，位 6 从 1 更改为 0。收发器因此把二进制值看作 10010001b = 145d。所以显示的像素要比传感器捕捉的像素黑 64 个灰度等级（共 256 个级别）。这是一个在图片中清晰可见的明显错误。

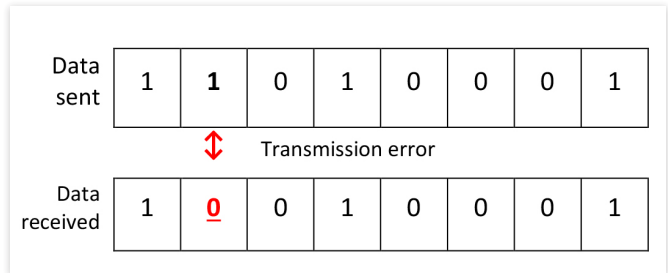


图 4：传输过程中出现位错误

由于对相邻像素的依赖，所以 TurboDrive 需要可靠的传输信道，例如 GigE Vision、USB3 Vision 和 Camera Link HS 提供的信道。任何传输错误都可以在传输链路层管理：TurboDrive 解码引擎看到的始终是无错误的数字信号。如果信道不可靠，像素的传输错误将会扩散到其相邻像素，产生不正确的值集群。这就是 TurboDrive 设计为与可靠的传输介质配合使用的原因。

继续 >

TurboDrive
原理 3
可靠信道

只能使用可靠的传输介质。否则，单一的错误的传播到相邻的像素。

TurboDrive
原理 4
突发模式

以比传输介质更快的速率获取。依靠相对值编码来适合可用带宽内的像素信息。

TurboDrive 依赖相对值编码。因此一个像素内的编码信息不足以完整地描述该像素（像绝对编码那样）。因此，需要相邻像素的补充信息来重构该像素。编码前和解码后的数据是完全相同的，但是更有效的数据打包方式是通过考虑临近效应实现的。

突破带宽壁垒

上述 3 个原理足以实现

TurboDrive，但是无法超越相机接口的最大吞吐量限制。大多数机器视觉相机都设计为以不超过传输链路容量的帧速率来获取图像。因此图像获取与图像传输是不可分割的。而且，此方法源于模拟相机和 Camera Link 相机。

要充分利用 TurboDrive，相机必须以比使用绝对编码时的标称传输速率快的速率获取图像。我们称此情况为“突发模式”。然后相机可以利用 TurboDrive 的局部相对编码方案对传输链路中的额外信息打包。这使得图像的获取和传输更加快速。由于每个像素要编码的不超过 8 位，因此 GigE Vision 相机的速度可以超过 1.15 亿像素每秒

为了实现此优点，相机必须具有板载缓存功能。这些缓冲区用于累积像素信息。这具有在编码级别补偿变化的好处：缓冲区可以缓和编码变化以帮助建立在相机接口最大吞吐量限制内的平均传输速率。而相机可以利用图像之间的死时间来继续传输并排尽内部缓冲区的内容，进一步挖掘传输链路

在有足够的缓存可用时，目标是实现平均吞吐量，在相对编码和死时间之后，保持在相机接口的最大传输速度内。Teledyne DALSA 的所有 TurboDrive 相机都支持此原理 4，赋予您可保证传感器的最佳性能的改进采集速率。

性能分析

在本节，我们将 TurboDrive 与上述理论数学模型进行比较。目标是描绘 TurboDrive 在用于典型机器视觉图像时的实际吞吐量增长。为此，我们将使用 Octave，一种用于数值计算的免费的解释语言，与 Matlab® 非常相似。Octave 将被用于计算数学模型的吞吐量改进。Teledyne DALSA 提供工具来确定使用 TurboDrive 时吞吐量的改进。通过将相同的图像导入该数学模型以及 TurboDrive，可建立线性关系来关联两个方法。此公式然后可以作为预测器，通过使用更加简单的数学模型来获取预期的 TurboDrive 性能提升。

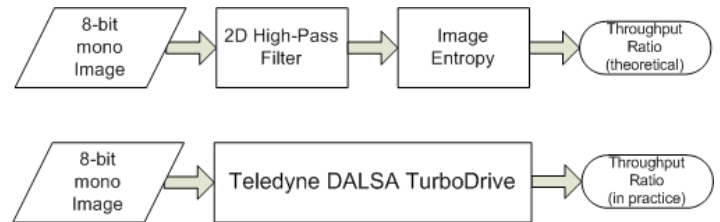


图 5: TurboDrive 相较于模型

下面提供了 Octave 脚本文件来计算本入门中给出的数学模型可实现的吞吐量的理论提升。要检查的所有图像文件必须放在同一个文件夹里。脚本会迭代这些文件并报告吞吐量的提升。

```
# Mathematical model
pkg load image
my_filter = [ 0, -0.25, 0;
             -0.25, 1, -0.25;
             0, -0.25, 0];
FILES = readdir("C:/Images");
for i = 3:size(FILES)
    # Load image file
    filename = char(FILES(i))
    orig_image = imread(filename);
    # Step 1 - 2D high pass filter (rel. encoding)
    new_image = conv2(orig_image, my_filter, "valid");
    # Step 2 - image entropy
    new_entropy = entropy(new_image)
    # Step 3 - throughput increase (8-bit images)
    increase = 8 / new_entropy
endfor
```

图 6: 数学模型

同一组图像被导入 TurboDrive 工具中, 来确定使用 TurboDrive 实现时吞吐量的提升。

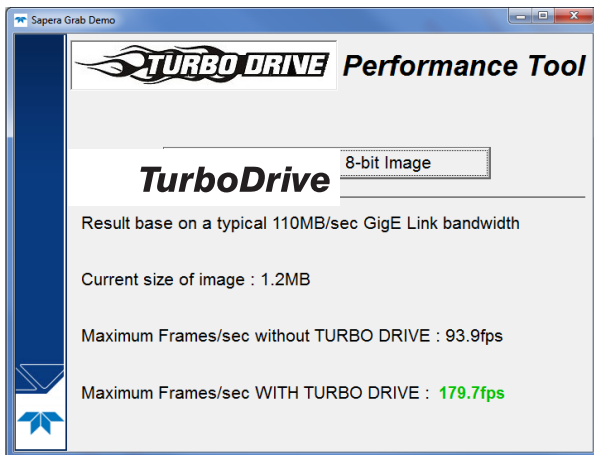


图 7: TurboDrive 工具

我们对来自各种机器视觉应用（条形码、OCR、ITS、电子检查等）的一组 98 个图像运行了这两种方法。下图比较了 TurboDrive (y 轴) 与理论模型 (x 轴) 的吞吐量比。

TurboDrive vs Model

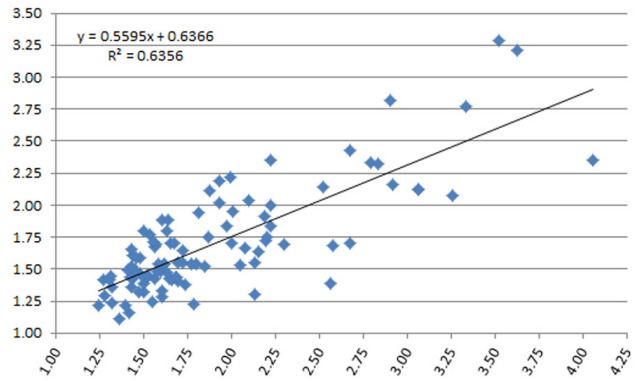


图 8: 吞吐量提升

此图显示 TurboDrive 与数学模型之间的显著线性关系。由于相关性非常高, 所以可以利用该模型来很好地预测 TurboDrive 性能。

由此数据, 我们来执行一个简单的线性回归。将会使用最小二乘估计在 TurboDrive 和数学模型之间建立一个等式。

$$Throughput_{TurboDrive} = b_0 + b_1 \times Throughput_{model}$$

公式 3: 简单线性回归

基于所分析的图像组, 我们从图 8 中为 b_0 和 b_1 提取如下值:

$b_0 = 0.6366$ (截距)

$b_1 = 0.5595$ (斜率)

$$Throughput_{TurboDrive} = 0.637 + 0.560 \times Throughput_{model}$$

公式 4: TurboDrive 吞吐量提升

决定系数 (R^2) 等于 0.636。这个系数指明了数据与统计模型的吻合程度。在此例中, 可以从模型预测 63.6% 的 TurboDrive 吞吐量提升变化。

当 $Throughput_{model}$ 在从 1.25 到 4.0 的范围内时, 公式 4 是有效的。可以使用此公式结合图 6 中给出的数学模型来获取 TurboDrive 应为此组给定图像提供的平均吞吐量提升的粗略近似值。有了此图, 您就可以估计出 TurboDrive 能够如何加速您的应用程序。

继续 >



TurboDrive 优点

Teledyne DALSA 于 2015 年春天推出了 TurboDrive 以及 Linea GigE 线扫描相机和 Sopera LT 8.0。通过利用本入门中所述的技术，Linea GigE 可使其吞吐量突破此类产品中常见的 115 MB/s 的速度。



图 9: Teledyne DALSA Linea GigE

例如，由于千兆以太网链路速度的限制，Linea Mono 4K GigE 通常限制在 26 kHz。通过激活 TurboDrive 并考虑虚拟帧之间的死时间，对于具有低图像熵的场景，线速率可以达到 80 kHz。Linea Camera Link 型号也可以提供同样的线速率，但是具有 GigE Vision 的额外优点，即长电缆和较低的系统成本（GigE Vision 不需要图像采集卡）。

Linea Camera Models				
	Model	Resolution	Pixel Size	Line Rate
	Linea Mono 2k CL	2048 x 1	7.04 μm	80 kHz
	Linea Mono 4k CL	4096 x 1	7.04 μm	80 kHz
	Linea Mono 8k CL	8192 x 1	7.04 μm	80 kHz
	Linea Mono 2k GigE	2048 x 1	7.04 μm	52 kHz *
	Linea Mono 4k GigE	4096 x 1	7.04 μm	26 kHz *

* Up to 80 kHz with TurboDrive™

图 10: Linea 相机型号

一个重要的优点是 TurboDrive 对于应用程序源代码是完全透明的：所有工作都是在 Teledyne DALSA GigE Vision 驱动器（Sopera LT 的一个构建块）内执行的。要激活 TurboDrive，只需在 CamExpert 中将 Turbo Transfer Mode 设置为 TRUE（参加图 11），或者直接访问 turboTransferEnable GenICam 功能。在启用 TurboDrive 后，Sopera LT 会和相机通信以确定它支持哪个版本的 TurboDrive 并且它们有一致的编码方案。这意味着现有的 Sopera LT 应用程序可以直接受益于 TurboDrive，而无需重新编译或修改其源代码。无论 TurboDrive 是否启用，放在主机缓冲区中的数据是相同的。差别在于可达到的最大吞吐量。

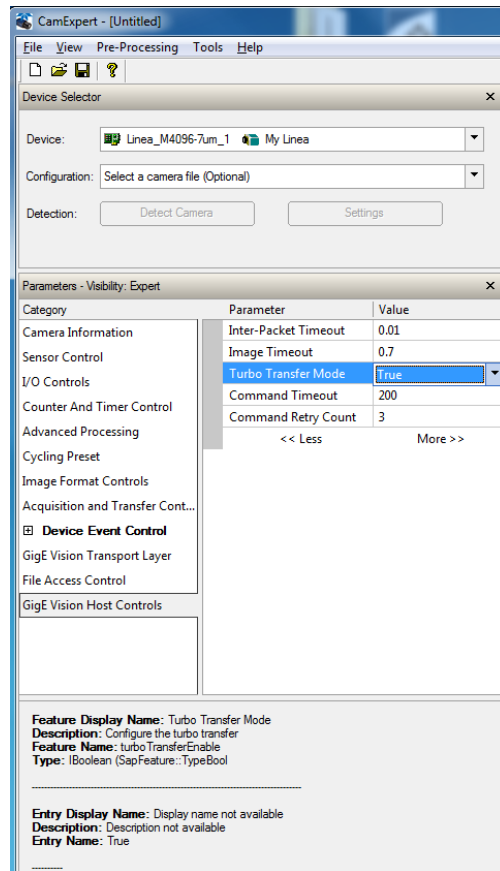


图 11: 在 CamExpert 中激活 TurboDrive

TurboDrive 的另一个用途是用于多相机系统。使用以太网交换机，可以将来自多个相机的图像流合并到一个网络接口卡 (NIC) 中，只要从这些相机聚合的吞吐量 (TurboDrive 编码后) 不超过 GigE Vision 的 115 MB/s 最大链路速度。对于某些机器视觉系统，这可能比使用多个 NIC 更节省成本。

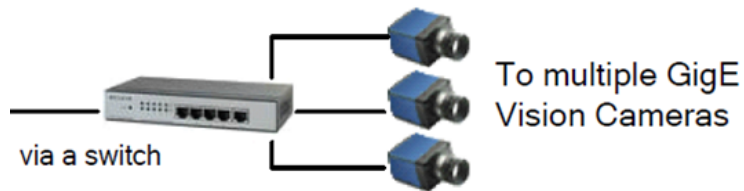


图 12: 多相机系统

结论

在使用可靠的传输介质时，例如 GigE Vision，可以从传统的绝对编码（每个像素由其强度表示）切换为更有效的基于冗余的数据编码类型，不会丢失信息，解码的图像与捕获的图像逐位完全相同。TurboDrive 利用图像熵和相邻像素变化的组合效果来提升相机吞吐量。我们已经证明，对于本实验中使用的图像组，提升的性能水平通常在 120% 到 235% 的范围内。对于使用千兆以太网链路的标准 GigE Vision 中的 115 MB/s，这表示具有与启用 TurboDrive 时一样的 138 MB/s 到 270 MB/s 传输带宽。TurboDrive 对应用程序完全透明。

www.teledynedalsa.com

美洲
美国波士顿
+1 978-670-2000
sales.americas@teledynedalsa.com

欧洲
德国 Krailling
+49 89-89-54-57-3-80
sales.europe@teledynedalsa.com

亚太地区
日本东京
+81 3-5960-6353
sales.asia@teledynedalsa.com

中国上海
+86 21-3368-0027
sales.asia@teledynedalsa.com