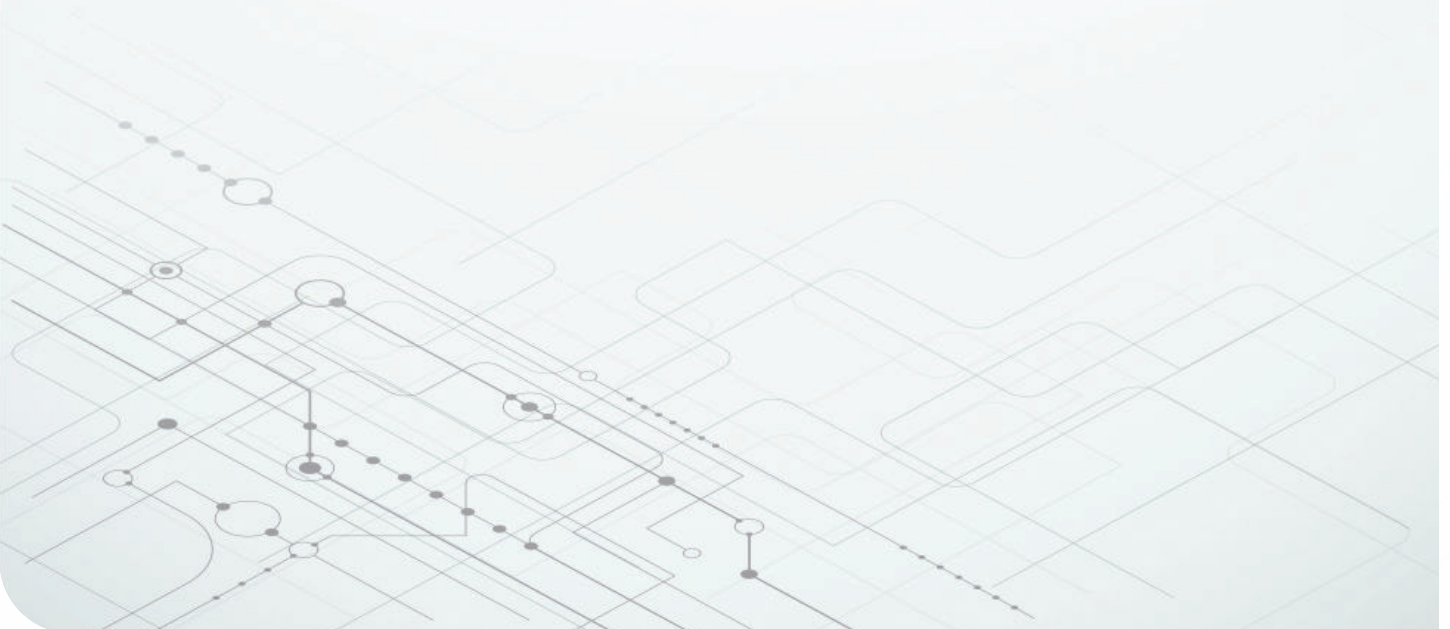


立体视觉 - 迎接 ADAS 应用带来的挑战并发现相关机遇



Aish Dubey
ADAS
Texas Instruments



简介

摄像机是以高分辨率捕获准确数据的最精确机械装置。就像人类的眼睛一样，摄像机能够以超高的精细度捕捉场景的分辨率、细节和生动感，其他任何传感器（如雷达、超声波和激光）都无法与之匹敌。在世界各地的洞穴中发现并可追溯到几万年前的史前壁画证明，图片和绘画加上视觉感官已经成为传达精确信息的首选方法 [1]。

有人认为，对技术界来说最具挑战性的下一个工程前沿可能就是实时机器视觉和智能。相关应用包括但不限于实时医学分析（外科手术机器人）、工业机器以及自主智能驾驶汽车。在本文中，我们将重点讨论自主高级驾驶辅助系

统 (ADAS) 应用，尤其是摄像机和立体视觉成为可通过自身进行“观察和驾驶”以实现安全自动驾驶汽车的原因。

图 1 显示了 ADAS 中需要摄像机的主要应用。图中显示的某些应用可以仅使用视觉系统（例如用于行人检测、交通标志辨识、盲区识别和车道检测系统的前置、后置和侧面摄像机）来实现。其他应用（例如智能自适应巡航控制系统）可以通过将雷达数据与摄像机传感器相融合的方式可靠实现，尤其是在复杂情况下，例如城市交通、弯曲的非直线道路或车速较高的情况下。

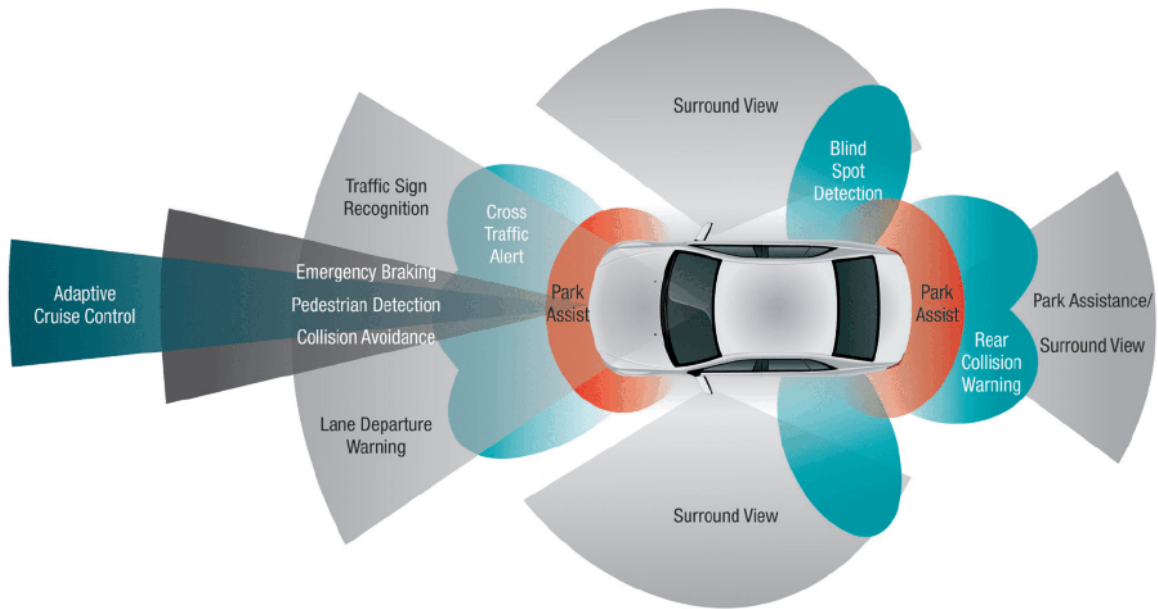


图 1. 摄像机传感器在现代车辆 ADAS 中的应用包括：(a) 面向前方的摄像机，用于车道检测、行人检测、交通标志辨识和紧急制动。(b) 面向侧面和后方的摄像机，用于泊车辅助、盲区检测和侧向来车警示

需要哪种摄像机?

摄像机遇到的所有真实场景都是三维的。现实世界中处于不同深度的物体在摄像机传感器的二维映射世界中可能看起来彼此相邻。图 2 显示了一张来自 Middlebury 图像数据集的图片 [2]。显然，图片前景中的摩托车比背景中的储物架更靠近摄像机（近约两米）。请注意图中标注的第 1 点和第 2 点。在拍摄的图像中，背景中的红色箱子（第 1 点）显示在摩托车前叉（第 2 点）的附近，尽管它至少距离摄像机两米。人脑具有透视功能，让我们能够在 2D 场景的基础上想象出深度。对于汽车中的前置摄像机，透视分析能力并不那么容易实现。

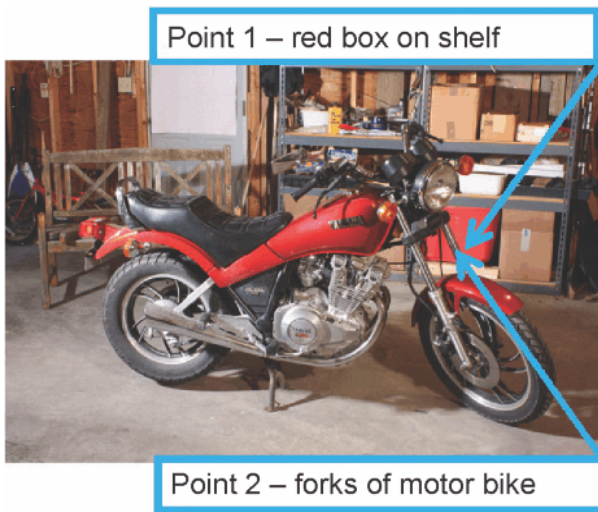


图 2. 来自 2014 Middlebury 数据库的图像。尽管所有物体在 2D 映射视图都相邻，但前景中的摩托车实际上比储物架更靠近摄像机。

如果我们安装了单个摄像机传感器并将其用于捕获需要处理和的视频，该系统称为单眼系统，而两个摄像机彼此分离的系统则称为立体视觉系统。在继续之前，请查看表 1，其中比较了单眼摄像机 ADAS 和立体摄像机系统的基本属性。

| 比较参数 | 单眼摄像机系统 | 立体摄像机系统 |
|------------------|-----------------------|---------------------|
| 图像传感器、镜头和装配件的数量 | 1 | 2 |
| 系统的物理尺寸 | 小（6 英寸 × 4 英寸 × 1 英寸） | 两个小装配件，间距约为 25-30cm |
| 帧速率 | 30 至 60 帧/秒 | 30 帧/秒 |
| 图像处理要求 | 中 | 高 |
| 检测障碍物和紧急制动决策的可靠性 | 中 | 高 |
| 系统在哪些方面可靠 | 物体检测（车道、行人、交通标志） | 物体检测“和”计算物体距离 |
| 系统成本 | 1x | 1.5x |
| 软件和算法复杂度 | 高 | 中 |

表 1. 单眼摄像机与立体摄像机 ADAS 系统的系统属性的简要比较

基于单眼摄像机的视频系统可以很好地完成许多工作。该系统及其背后的分析功能能够准确识别车道、行人、大量交通标志以及行驶在道路上的其他车辆。基于从单个摄像机传感器接收到的平面 2D 帧来计算 3D 世界视图时，单眼系统就不那么稳健和可靠了。如果细想我们人类（也就是最高级动物）天生就有两只眼睛的自然事实，这也就不足

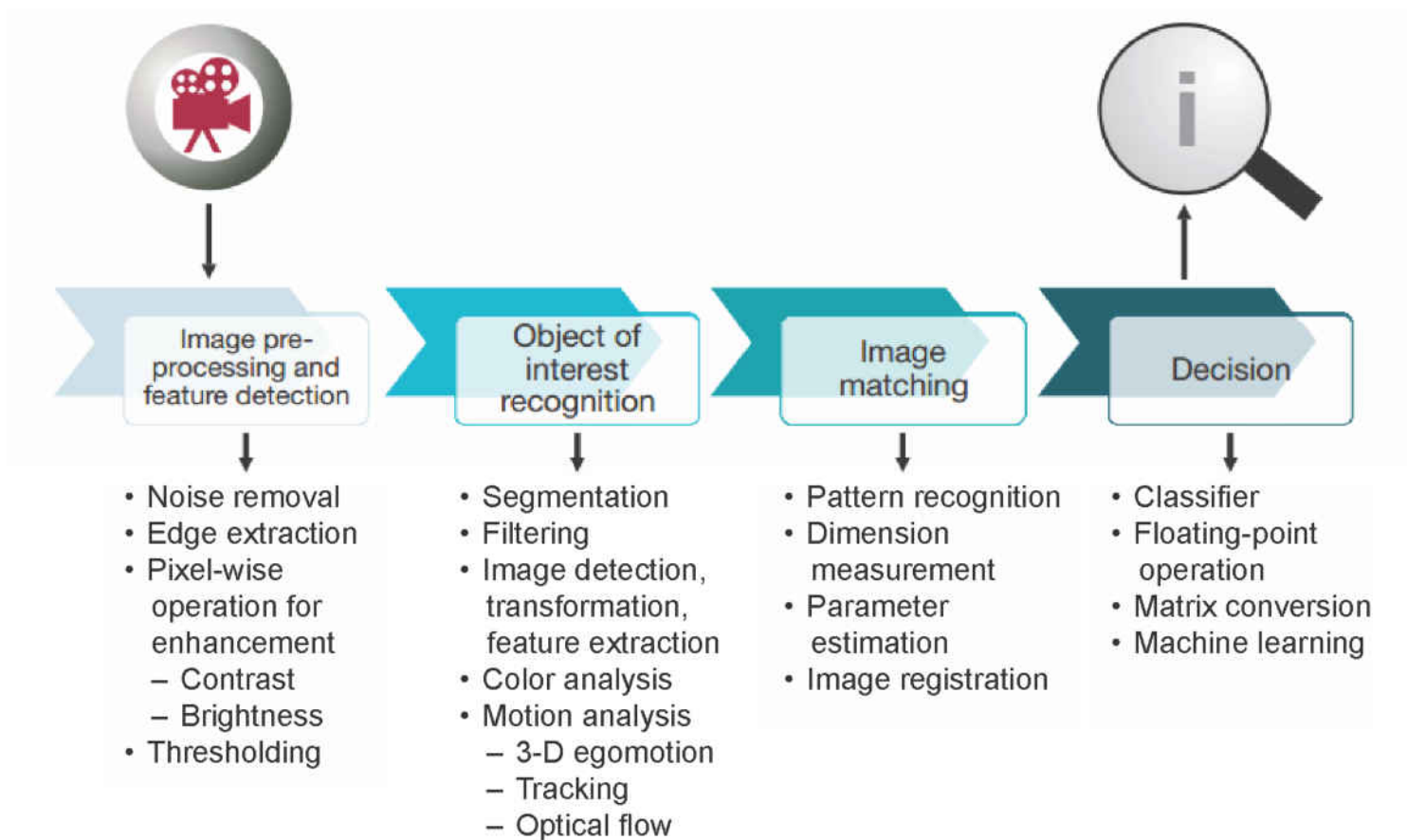


图3. ADAS 系统中用于分析图像的概要算法流程和过程

为奇了。在进一步详细分析此问题之前，请查看图 3。此图简要说明了用于分析从摄像机传感器接收到的视频（图像）帧的过程和算法。

图 3 的第一阶段是图像预处理步骤，即针对图像（通常是每个像素）运行各种过滤器，以便去除传感器噪声和其他不需要的信息。此阶段还会将从摄像机传感器接收到的 BAYER 数据的格式转换为 YUV 或 RGB 模式，以便能够在后续步骤进行分析。在第一阶段完成初步特征提取（边缘、Haar、Gabor 滤波器、方向梯度直方图等）的基础上，第二和第三阶段通过运行诸如分割、光流、块匹配和模式识别之类的算法，进一步分析图像以识别出关注区域。最后一个阶段利用从先前阶段生成的区域信息和特征数据，就关注区域中的物体类别做出智能分析决策。这样简短的说明并不能完全解决所涉及 ADAS 图像处理算法领域的问题，但是，本文的主要目的是强调立体视觉系统带来的其他挑战和可靠性，因此块级算法信息足以作为我们深入研究该主题的背景信息。

单眼摄像机如何根据 2D 数据测量物体的距离呢？

通过单眼摄像机进行距离测量有两种不同的可能性。第一个可能性基于一个简单的前提：

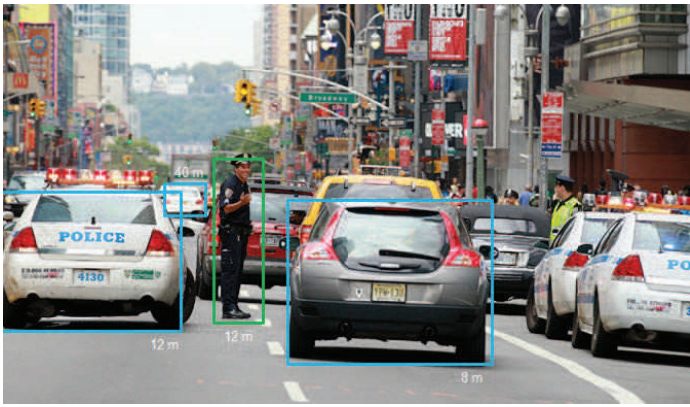


图4. 图中显示了各种识别出的物体以及它们距单眼摄像机的估计距离。显然，被识别物体与汽车的距离越大，最大覆盖矩形的尺寸就越小 [3], [17]。

物体越靠近摄像机，看起来就越大，因此在帧中占据的像素区域越大。如果某个物体被识别为汽车，则可通过该物体周围绘制的最大覆盖矩形来近似计算该物体的尺寸。

此矩形的尺寸越大，则该物体离摄像机（即汽车）越近。紧急制动算法将评估帧中识别出的每个物体的距离是否比安全预定义值更近，然后根据需要启动防撞系统或驾驶员警告措施。请参阅图4以了解该理念的简单说明。

简单和巧妙都是此方法的优点，但是此方法也有一些缺点。任何识别出的物体只有在被“正确”预先识别后，才能评估该物体的距离。请考虑图5所示的场景。此图中显示了三个图形化的行人。第1个行人是高个子，第2个行人是矮个子小男孩。这两个人到摄像机的距离是相同的。图片中显示的第三个行人(3)离摄像机更远，也是高个子。在这里，物体检测算法将识别三个行人并在识别出的这三个人周围绘制矩形。

虽然矮个子男孩（第2个人）比更远处的高个子（第3个人）更接近摄像机，但在这两人周围绘制的矩形尺寸是相等的。因此，在捕获的2D帧上所识别的物体尺寸（以像素为单位）并不是该物体到摄像机距离的完全可靠指标。要考虑的另一个问题是，如果在场景中一直无法识别某个物体，则无法确定该物体的距离，因为计算时并不知道该物体的尺寸（以像素为单位）。一直无法识别物体可能有多种原因，例如遮挡、光照和其他图像瑕疵。

第二种可利用单眼摄像机来计算物体距离的方法被称为“运动恢复结构(SFM)”法。由于摄像机正在移动，因此，从理论上讲，能够将即时连续捕获的多个帧

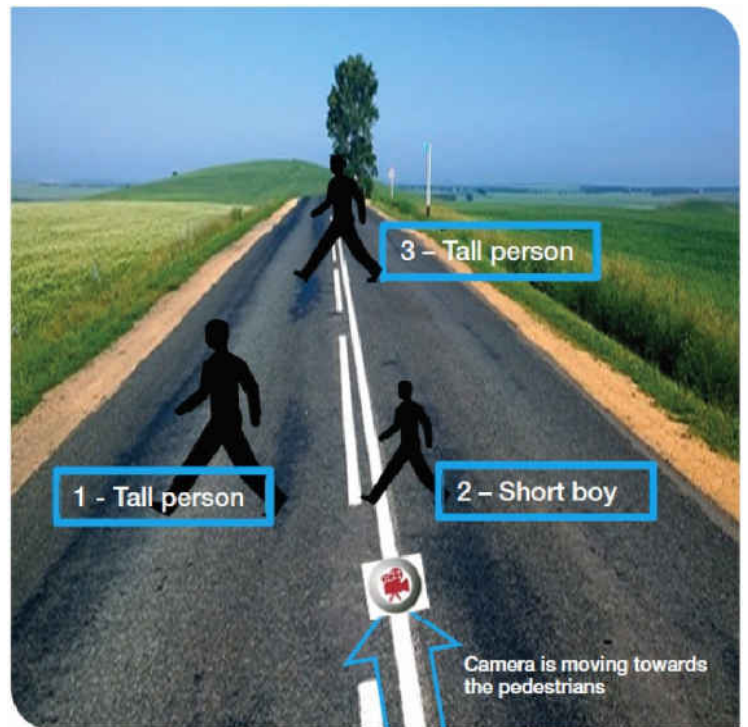


图5. 一个虚拟的信息图形显示了3个行人位于配备摄像机的行驶车辆的路径中。第3个人和第2个人的像素大小完全相同，但是第2个人比第3个人更接近车辆。[4]

相互比较以找出关键特征。对极几何定义了受约束的参数，这些参数决定了3D空间中的给定点在由移动（平移并可能旋转）的摄像机捕获的两个连续帧中能够移动到的位置。SFM本身就是一个复杂的主题，

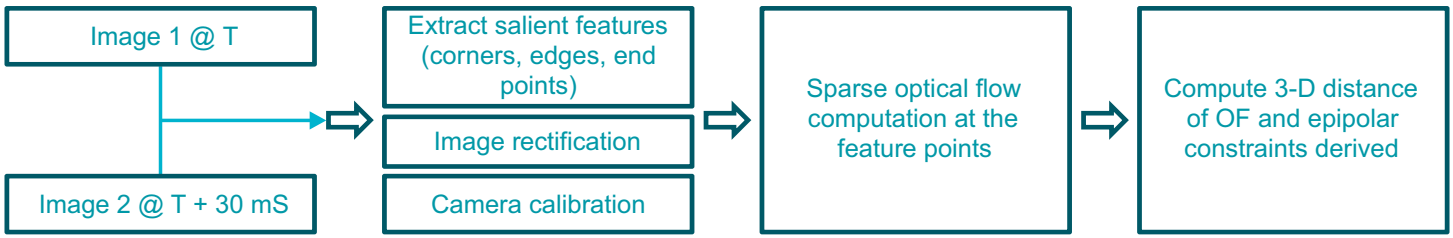


图6. 基于 SFM 的距离计算的概要数据流程。稀疏光流 (OF) 也可用密集流计算（针对每个像素）代替。上面的流程假设速率为 30fps。

因此在本文中，我们将关注使用 SFM 进行距离计算的挑战，而不是 SFM 的力学和数学原理。如果读者对 SFM 的工作原理非常感兴趣，可以阅读参考文献 [5]，其中进行了很好的总结。在这里只需了解 SFM 算法工作原理的大致流程（图 6）就足够了。

根据给定的数据流程，很容易理解单眼摄像机系统基于 SFM 的距离计算

| 参数 | 基于 SFM 的距离计算面临的挑战 |
|----------|---|
| 无法同时捕获图像 | 与立体摄像机不同，单眼摄像机不能同时捕获两个图像帧。SFM 基于时间帧运行。因此，需要“准确”捕获摄像机的运动。在汽车场景中，该信息基于车速、转向角等方面的准确数据。即时、连续的摄像机设备校准不如固定、预先校准的立体摄像机设备那么准确。由于时间的不连续性，图像中可能会出现重大的强度差异。由于时间的不连续性而在图像中出现的遮挡会使特征对应变得困难 |
| 计算要求 | 与密集立体流相比，密集光流的计算成本很高。稀疏的光流可能会错过两个图像中不匹配的关键特征 |
| 有噪声的图像 | 与同时捕获的两个图像相比，一组有先后时间序列的图像可能会违反噪声前提（亮度恒定）。需要对计算进行过度约束和过度计算以补偿噪声 |

表2. 基于 SFM 的距离计算面临的挑战

所面临的挑战。请参阅表 2 以查看这些问题的列表。

立体视觉系统如何根据 2D 平面数据计算物体的距离呢？

在发明雷达之前，船员已在使用立体反射机制搭配发条盘来计算其所在船只与敌船或海盗船的距离。（然后，根据此信息将大炮对准敌船。）在船体的每一侧都安装了两面（有时更多）镜子（立体）。精心布置的反射镜系统将图像从主立体镜中继到控制站。控制站的操作员将调整发条机构，使接收到的两个图像相互叠加和对齐。连接到发条预校准发条盘上的读数将指示敌船的距离。基本的立体算法已经有数百年没有变化了。因此，这些方法是稳定而可靠的。得益于算法的规则性和稳定性，设计人员能够设计出优秀的硬件机器来执行立体视觉计算。

下一页上的图 7 显示了立体几何方程式。如果两个摄像机都已校准，则可重新规划计算物体距离的问题，从而找出左右两个摄像机

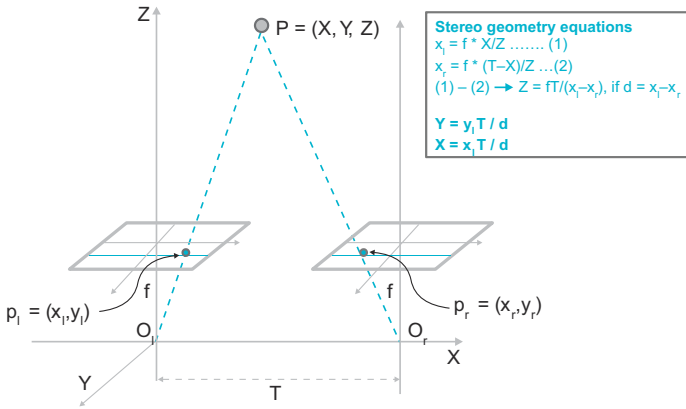


图7. 立体几何方程式。3D 空间中某个点的深度与该点在左右摄像机之间的视差成反比。 [6]

在该点同时捕获的图像之间的差异。对于预校准的立体摄像机，可对图像进行校正，使得对极几何线是针对两个图像之间的每个点的简单水平搜索（在同一行上）。因此，视差的定义是右侧摄像机图像中特定点与左侧摄像机图像相比已移动的像素数。记住这一概念至关重要，因为它支

持适用于硬件实现的常规计算模式。在我们深入探讨该主题之前，需要进一步阐明视差的概念。

立体视差计算和所计算距离的准确性

图 8 显示了三个不同的图，旨在说明视差与物体距离之间的关系。首先要注意的是，测得的视差与物体距离成反比。物体离立体摄像机越近，视差越大，反之亦然。理论上，视差为零的位置与摄像机相距无限远。具体而言，计算结果显示，选定系统物理参数后（请参阅图 8-a），1 个像素的视差意味着大约 700 米的距离，而如果是计算 2 个像素的视差，则估算的距离大约为 350 米。这是一个非常大的分辨率，如果视差计算的误差为一个像素，则估算的距离将会有很大误差（针对超过 100 米的较长距离的情况而言）。对于较短的距离（图 8 中的曲线下部小于 50 米的情况），距离计算的分辨率会大大提高。根据图中聚集在一起的距离计算点可以很明显得出

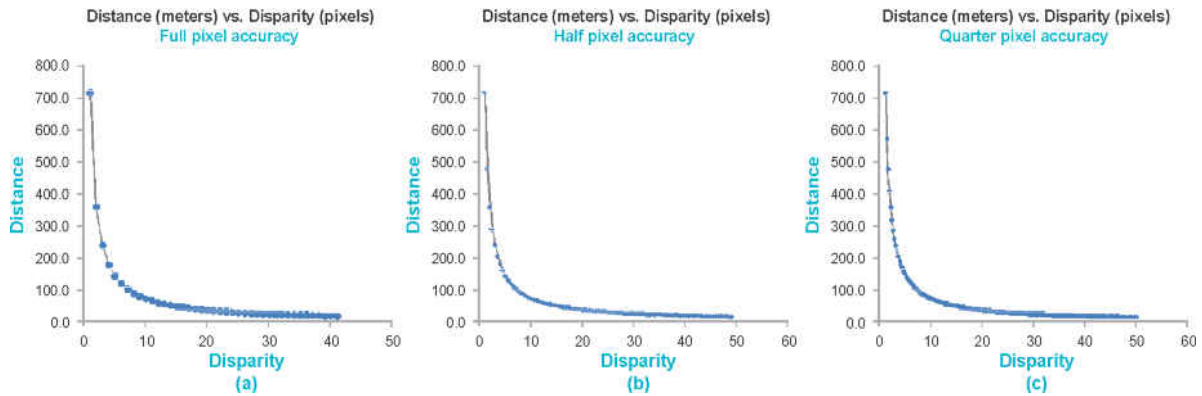


图8. 距离与视差关系图展示了不同的计算精度。距离精度随着视差计算的像素精度提高而提高。在 (a) 两台摄像机相距 30cm、(b) 焦距为 10mm 以及 (c) 像素大小为 4.2 微米的情况下分别进行了计算。

这一结论。在此范围内，如果视差计算的误差为一个像素（或更少），计算出的距离误差大约为两到三米。

有一些方法可进一步提高系统的精度。如图 8(b) 和 8(c) 所示，如果视差计算是在一半或四分之一像素级别进行的，则距离计算的分辨率将成比例地提高。在这些情况下，如果距离大于 100 米（但小于 300 米），连续增加视差时所计算出的距离的分辨率约为 30–40 米。如果距离小于 100 米，精度会很高，误差会小于 50cm。需要重申的是，对于近距离条件下运行的防撞系统，需要尽可能提高精度（最好是小于 0.1 米范围）。同时，立体摄像机的工作范围需要提高，必要时甚至可以牺牲精度。

立体摄像机 ADAS 系统的范围

如果再次查看基本的立体方程式（图 7），很明显，若要提高系统的最大范围，就需要合理精确计算距离以获得低视差。可通过以下三种方法中的任何一种来实现该目的。这些方法中的每一种方法都在相关机械或电子设计方面进行了折衷，最终都关系到系统成本。

- A. 使用较小的像素尺寸 ⑥ 如果我们使用较小的像素尺寸（假设尺寸减半），并且如果其他所有条件都保持不变，则范围会提高约 50%（相同的精度）
- B. 增大两个摄像机之间的距离 ⑥ 如果将“T”值翻倍，并且如果其他所有条件都保持不变，则范围会提高约 50%（相同的精度）
- C. 改变焦距 ⑥ 如果将“f”值翻倍，并且如果其他所有条件都保持不变，则范围会提高约 50%（相同的精度），但是视野将变窄

- D. 使用一种能够以亚像素精度计算立体视差的计算系统

尽管在数学上可行，但方法 (b) 和 (c) 与系统的物理属性直接相关。立体摄像机系统如需要安装在汽车中时，通常它将具有固定的尺寸，或者要求系统尽可能小。这种美学上的需求与增大摄像机之间的距离 (T) 或焦距 (f) 的做法背道而驰。因此，为了打造具有大范围和高精度的精确立体摄像机距离计算系统，大多数实用方法都围绕上述方法 (a) 和 (d) 展开。

过程

下一页的图 9 显示了用于计算立体视差的数据流程和计算链的概要框图。请注意，此处缺少图 6 所示 SFM 框图中存在的摄像机校准步骤，并且也不需要密集立体视差算法中搜索特征。基于 SFM 的距离计算方法（根据物体的尺寸来计算距离）需要识别特征和物体。

图像秩变换通常是立体图像处理管道中的第一步或第二步。此步骤旨在确保两个图像之间的后续块比较在现实噪声情况（如左右图像之间的照度或亮度变化情况）下能够可靠完成 [7]。这些变化由许多因素引起。其中一些因素包括两个摄像机的视角各不相同而造成的照明度不同，以及快门速度之间的细微差异和其他抖动瑕疵，这些情况会导致摄像机在稍微不同的时间点捕获左右图像。

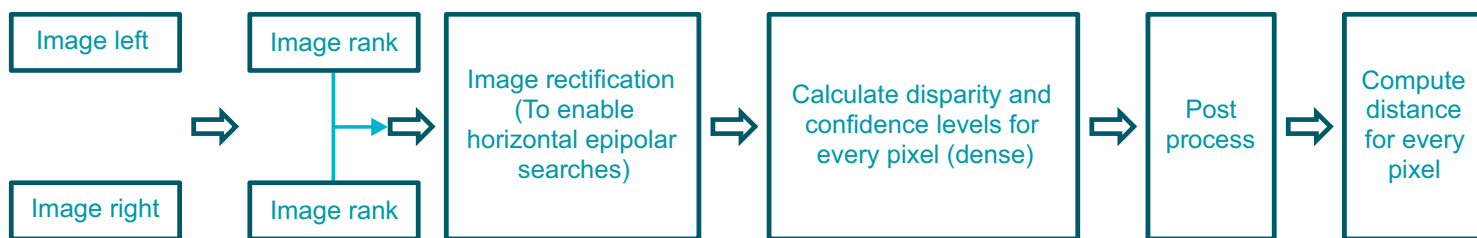


图9. 基于立体视差的距离计算的概要数据和算法流程。

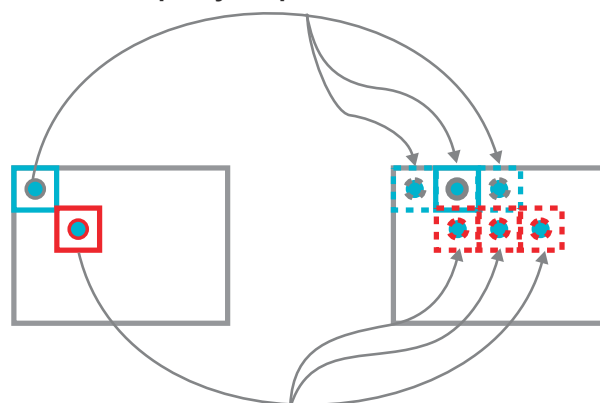
如需了解图像的不同秩变换选项，以及这些选项如何影响视差计算的可靠性，可参考研究人员推荐的不同论文和方法 [8]。图 9 中的图像校正步骤确保了能够沿水平对极搜索线执行后续视差计算。该过程的后续步骤是视差的实际计算、计算的置信度以及后处理。尽管有一些方法提出在频域中计算视差，但密集视差计算主要在空域中进行 [9]。

这些方法试图利用大型 FFT 计算速度相对较快的优点，但是 FFT 还涉及其他复杂问题，因此整体上缺点更明显。本文无需深入进行这方面的讨论，可以肯定地说，大多数（即使不是全部）产品化的立体视差算法是在空域中实现的。在最基本的层面上，此分析要求，对于左侧（变换后）的图像中的每个像素，我们都需要选择它周围的一小块像素。

接下来，我们需要在右侧（变换后）的图像中沿着对极（水平）线搜索，直至找到同一块像素的位置。对于所有可能的视差值（从 1 到最大值，即 64 或 128 或者其他值），都会执行此计算。

左侧和右侧像素块之间的差异（或相关系数）将接近极小值（极大值），此值接近于像素视差的实际值。执行的“移动窗口”像素块比较和匹配过程将计算像素块已移动了多少，该结果将用于计算这个特定像素在 3D 空间中的距离。此过程如图 10 所示。在参考资料 [8] 中提供了这样一个示例，其中说明了使用秩变换的视差计算，然后是基于绝对差之和 (SAD) 的成本函数的最小化。

**Shift block and compare in the right image for best match
Best match = disparity for pixel**



**Repeat calculation for every pixel in left image
For every possible value of disparity in right image**

图10. 用于发现视差的简单块比较算法，其基于 SAD。

这种用于发现视差的基于 SAD 的方法非常巧妙，有时甚至过于简单。这种方法的基本前提是，对于给定的像素块，视差是相等的，但在物体的边缘几乎绝不会如此。如果再次查看图 2 并注意针对摩托车前叉和红色箱子所做的注释，您将很快意识到，许多相邻像素之间的视差会有所不同。这一点其实很正常，因为“储物架上的红色箱子”比起“前叉”离摄像机远约两米。一个小像素块的视差可能会在物体边界处发生剧烈变化，而对于倾斜或弯曲的表面则可能只发生轻微变化。Middlebury 数据集 [10] 中的“圆锥和面孔”图像充分突出了这一事实。在一个圆锥体（略微倾斜的表面）上找到的相邻像素将具有较小的视差变化，而物体边界将具有较大的视差差异。将基于 SAD 的简单算法与秩变换一起使用，这会在两个遮挡物上留下较大的视差空洞，例如仅在一个摄像机和物体边界中可见的瑕疵。

为了根据确定的运行时间解决这种错误，[12] 中提出了一种巧妙的方法。

这种方法被称为“半全局匹配”法。在这种方法中会针对多个方向（4、8 或 16 个）上的每个像素计算平滑度成本函数。下方的图 11 展示了该成本函数的计算方式。其目的是针对每个像素在多个方向上优化成本函数 $S(p,d)$ ，并确保得到平滑的视差图。SGM 的原始论文推荐了优化成本函数的 16 个方向，但也尝试了 2、4 和 8 个方向的切实可行的实现方式。

$$L_r(p,d) = C(p,d) + \min \begin{cases} L_r(p-r,d) \\ L_r(p-r,d-1)+P1 \\ L_r(p-r,d+1)+P1 \\ \min_i L_r(p-r,i)+P2 \end{cases} - \min_k L_r(p-r,k)$$

$$S(p,d) = \sum_r L_r(p,d)$$

$r = 1$ to 16
 $L_r(p,d)$ = cost for pixel p at disparity d
 $C(p,d)$ = Matching cost function
 $P1$ = Penalty cost for a local disparity change of 1
 $P2$ = Penalty cost for a disparity change > 1
 $S(p,d)$ = Smoothness cost function after adding $L_r(p,d)$ in all 16 directions for disparity d

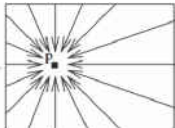


图 11. SGM 优化成本函数方程式。

下一页的图 13 显示了 SGM 成本函数和优化算法的具体实现方式。使用此伪代码段，可轻松评估内存、计算以及



图 12. 来自 Middlebury 数据集的圆锥和面孔。使用简单的 SAD 法进行视差计算。视差在弯曲的表面上保持轻微变化，而在物体边界上剧烈变化。请查看右上角围栏的视差空洞以及左边界其他物体的不连续性和遮挡情况

最终的硬件复杂性要求，从而支持基于 SGM 的实时计算。

```

Initialize C, disparity, S and Lr for every pixel
LOOP 1: For every pixel p
  LOOP 2: For every disparity d (1..k)
    Calculate C(p,dk) → SAD or Mutual Information (MI) based
    LOOP 3: For every direction r (1..16)
      Calculate Lr(p,d)
    END LOOP 3
  Calculate S(p,d) using equation in figure 12
  if S(p,dk) < Smin(p,dk) → disparity = dk, else disparity = dinit
END LOOP 2
END LOOP 1
  
```

图 13. 用于实现 SGM 的伪代码

视差计算的计算要求和内存要求

应该能够想象得到，ADAS 应用中的这种计算非常消耗算力。常见的前置立体摄像机设备是一组以 30 帧/秒速度运行的 100 万像素摄像机。视差计算过程的前几步涉及到秩变换。典型的秩变换是 Census 变换或稍作修改的版本。所需的输入是两个立体图像，而输出则是进行 Census 变换后的图像对。对于像素周围的 N×N 像素块进行 Census 变换所需的计算是执行 6000 万次 N×N Census 变换。对 N×N 像素块上的一个像素进行的每个 Census 变换都需要经过 N2 次比较运算。所涉及的其他一些秩变换需要对每

个像素进行 N2 点排序。可以大胆推测，为了在部署到实际车辆上的实际系统中进行未来几年的秩变换，可能的最低要求是需要经过 6000 万 × N2 次比较运算。

该过程的第二步需要进行图像校正，以确保需要在水平线上执行对极视差搜索。第三步更为有趣，因为它涉及到每个像素和视差组合的 C(p,d)、L_r(p,d) 和 S(p,d) 计算（请参阅图 13）。如果 C(p,d) 是逐块进行的 SAD 运算，块大小为 N×N，所需的系统范围大约为 200 米，并且针对距离精确度的要求是进行半像素视差计算，那么系统将需要针对 64–128 个视差可能性进行计算 C(p,d)。针对使用这些参数的 C(p,d) 的总计算的要求是每秒执行 6000 万 × N2 × 128 次 SAD 运算。

L_r(p,d) 的计算需要在“r”个可能的方向上针对每个像素进行，因此，该项的计算（请参阅图 13）需要进行 6000 万 × 128 × r 次。一个像素的计算需要经历五次加法（如果将减法当作是一种特殊形式的加法）和一次极小值查找运算。四项汇总起来，每秒的 L_r(p,d) 计算需要进行 6000 万 × 128 × r × 5 次加法运算以及 6000 万 × 128 × r 次极小值计算。

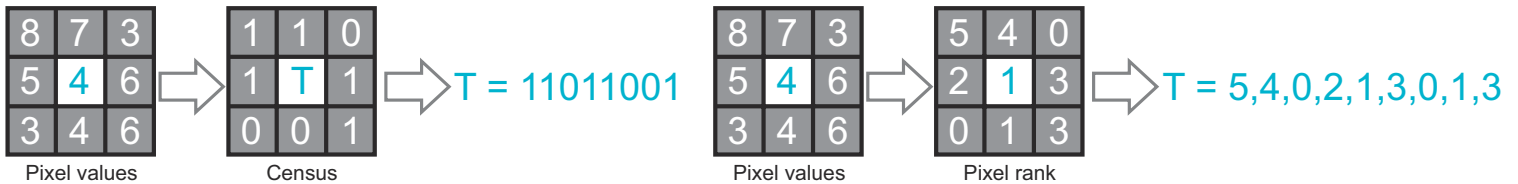


图 14. 图像的秩变换示例。图像的左侧部分是简单的 Census 变换。右半部分被称为“完全秩变换” [7]。

对于每个可能的像素和视差值， $S(p,d)$ 的计算需要进行 r 次， $S(p,d)$ 的每次计算都需要经历“ r ”次加法和一次比较。每秒进行此计算所需的总运算次数为 $6000 \text{ 万} \times 128 \times r$ 次加法和 $6000 \text{ 万} \times 128$ 次比较。

所有三项汇总起来，一个精确的基于 SGM 的视差计算引擎在 100 万像素 30fps 的摄像机上运行并试图计算 128 种视差可能性时，每秒需要执行大约 1 万亿次运算（加法、减法、极小值发现）。为了更好地理解这一数字，嵌入式领域的高级通用处理器每个周期发出 7 到 10 条指令。其中一些指令是 SIMD 类型的，即，它们能够并行处理 8-16 条数据。考虑到通用处理器必须提供出色的 IPC，以 2GHz 运行的四核处理器将提供约 3200 亿次的 64 位运算。即使我们认为大多数立体管道将是 16 位的并且可将数据以 100% 的效率打包到 64 位二进制文件中，四核通用处理器仍不足以满足现代 ADAS 立体视觉系统的需求。通用处理器的目的是提供各种高级可编程性。这说明设计实时 ADAS 立体视觉系统时需要用到专用硬件。

计算的可靠性

ADAS 视觉系统旨在避免道路交通事故或至少尽可能降低事故的严重性。每年有超过 120 万人死于交通事故，这是 15-29 岁人群死亡的主要原因。行人是最脆弱的道路使用者，每年有超过 25 万行人丧生。道路交通事故发生的主要原因是驾驶员因疏忽或疲劳而出现失误。因此，用于紧急制动的 ADAS 视觉系统最重要作用是降低事故的严重程度和发生频率。这是一个双重要求，因为视觉系统不仅必须在每个视频帧和每一秒内以高可靠性正确估算距离，而且还必须尽可能减少误报情况。为了确保 ADAS 系统具有适当的可靠性规格和设计，需要遵循专为规范、设计和开发汽车安全应用电子系统而制定的 ISO 26262 国际标准。

此处将进行一些计算，以便了解立体视觉系统在计算距离方面的估计误差。请参阅图 15。如果焦距 (f) 和摄像机间距的误差容限 (T) 为 1%，且视差计算算法的精度为 5%，则计算出的距离 (Z) 的误差仍大约为 2.5%。因此，将视差计算算法的精度提高到亚像素（四分之一或半像素）水平非常重要。这里有两个含义。第一个是增加了算法和硬件的后处理插值计算要求。第二个要求更为复杂，与 ISO 26262 有关。

$$Z = f T / d$$

If f , T & calculated d have a standard deviation of s_f , s_T & s_d respectively, then

$$s_z = ((s_d)^2 + (s_T)^2 + (s_f)^2)^{1/2}$$

图 15. 立体视觉系统计算出的距离统计误差估计值 [13]。

架构和设计需要确保在系统的容错时间间隔 (FTTI) 内检测到并标记出电子元件中的瞬时错误和永久错误。FTTI 和其他相关指标的计算超出了本文的讨论范围，但应足以说明用于构建系统的电子元件需要有实现 ADAS 视觉系统所需的 ASIL 级别。

系统硬件选项和总结

在本文中，我们回顾了计算汽车 ADAS 安全紧急制动系统的距离时使用的通用算法以及特别是立体视觉算法的各种算法选项的有效性。德州仪器 (TI) 整体上正在推动 ADAS 处理领域的深度创新，尤其是在高效、可靠的立体视觉处理方面。

许多不同的电子系统选件都能够实现 ADAS 安全视觉系统的系统设计和性能目标。德州仪器 (TI) 的异构芯片架构（TDA 系列）适合满足此特定应用在性能、功率、尺寸和 ASIL 功能安全方面的目标。如需查看使用 TI TDA2x 和 TDA3x 器件的立体和其他 ADAS 系统的可能系统框图以及该技术的演示，请访问 www.ti.com/ADAS。

参考文献

1. Cave paintings: http://en.wikipedia.org/wiki/Cave_painting#Southeast_Asia
2. D. Scharstein, H. Hirschmüller, Y. Kitajima, G. Krathwohl, N. Nesić, X. Wang, and P. Westling. “High-resolution stereo datasets with subpixel-accurate ground truth”. In German Conference on Pattern Recognition (GCPR 2014), Münster, Germany, September 2014
3. Figure credit: “Vision-based Object Detection and Tracking”, Hyunggi!, http://users.ece.cmu.edu/~hyunggi/vision_detection_tracking.html
4. Image credit: pixabay.com
5. 3D Structure from 2D Motion, <http://www.cs.columbia.edu/~jebara/papers/sfm.pdf>

6. Chapter 7 “Stereopsis” of the textbook of E. Trucco and A. Verri, Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, Prentice Hall, NJ, 1998 and lecture notes from <https://www.cs.auckland.ac.nz/courses/compsci773s1t/lectures/773-GG/topCS773.htm>
7. “The Complete Rank Transform: A Tool for Accurate and Morphologically Invariant Matching of Structures” , Mathematical Image Analysis Group, Saarland University, <http://www.mia.uni-saarland.de/Publications/demetzbmvc13.pdf>
8. “A Novel Stereo Matching Method based on Rank Transformation” , Wenming Zhang , Kai Hao*, Qiang Zhang, Haibin Li Reference: <http://ijcsi.org/papers/IJCSI-10-2-1-39-44.pdf>
9. “FFT-based stereo disparity estimation for stereo image coding” , Ahlvers, Zoelzer and Rechmeier
10. **“Semi-Global Matching”**
11. “More than 270,000 pedestrians killed on roads each year” , http://www.who.int/mediacentre/news/notes/2013/make_walking_safe_20130502/en/
12. “Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information” , <https://ieeexplore.ieee.org/document/1467526>
13. “Propagation of Error” , http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical_Chemistry/Quantifying_Nature/Significant_Digits/
14. Optical flow reference: “Structure from Motion and 3D reconstruction on the easy in OpenCV 2.3+ [w/ code]” <http://www.morethantechical.com/2012/02/07/structure-from-motion-and-3dreconstruction-on-the-easy-in-opencv-2-3-w-code/>
15. Mutual information reference: “Mutual Information as a Stereo Correspondence Measure” , http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1115&context=cis_reports
16. Image entropy analysis using Matlab®
17. Image credit: “Engines idling in New York despite law” , CNN News, <http://www.cnn.com/2012/02/06/health/engines-new-york-law/>

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2020 Texas Instruments Incorporated



ZHCY167A

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司