上一章介绍了色调再现各个方面的教程,并表明一大类操作符在高级上等效,但在实现级别上仍然存在重大差异,在实线特定的操作时应考虑到这些差异.在不着眼于完整性的情况下,本章将讨论最流行的色调再现操作符,从S形压缩到图像外观模型,再到感知和基于工程的方法的集合.

8.1 S形曲线色调运算符

正如本章所讨论的那样,相对丰富的一类算子使用S形曲线(通常在对数线性图中绘制).S型函数是具有单个拐点的函数.对于色调再现,S形也倾向于产生[0,1]范围内的输出,因此自然地限制了它们的显示范围,而无需额外的截断.本节讨论了最流行的S型算法.

8.1.1 感光器模型

对数压缩可以被视为有效地计算密度图像.因此,输出类似于存储在负片中的信息.尽管这个比喻成立,对数响应有时也归因于人类视觉系统(HVS)的某些部分.尽管HVS在其某些工作范围内近似对数响应,但这本质上是错误的(请参见7.2节).HVS中的信元与脉冲序列通信,这些脉冲序列的频率承载信息.值得注意的例外是视网膜中的前几层细胞,它们通过产生渐变电位进行通信.无论如何,该生理底物不能传递负数.脉冲频率可能变为零,但没有负频率之类的东西.可实现的脉冲频率也有一个上限.

但是,对数可能会产生负数.对于较大的输入值,输出可能会变得任意大.同时,在数值范围内,HVS可能会产生看似对数的信号.在此范围之外,响应不再是对数的,而是失效.如第7章所述,一类函数可以很好地近似这种行为,即S形曲线或S形函数.当在对数线性图上绘制时,此类S形函数的中间部分几乎是线性的,因此类似于对数行为.而且,S型曲线有两个渐近线,一个在极小值,一个在极大值.

这赋予了S型曲线正确的数学属性,使其成为对HVS各个方面进行建模的可能候选者.电生理学的证据证实,各种物种的感光体产生的输出电压是接收到的光强度的函数,可以通过S型曲线精确建模.

Naka和Rushton是第一个测量感光器反应的人,并使其数据符合S形曲线[234].为了色调再现的目的,Hood等人[131]的公式很实用:

在这里,是感光体输入,是感光体响应,是半饱和常数,它是感光体适应水平的函数.因此,半饱和常数确定了将适应水平映射到的哪个值,并因此提供了将曲线调整为正被色调映射的图像所需的灵活性.出于实际目的,可以根据适配值如下计算半饱和常数:

在此等式中,和是需要基于每个图像指定的用户参数.比例因子可以用于控制色调映射图像的整体亮度,并且最初可以估计为.图8.1中显示了使用的不同值创建的图像.

应该注意的是,在电生理研究中,指数的特征也趋于介于0.2和0.9之间[131].可以从图像度量(例如最小,最大和平均亮度)得出的合理初始估计值:

参数可以被解释为图像的主键,即,它是图像平均亮或暗的量度.根据经验确定从到指数的非线性映射.如图8.2所示,指数用于控制对比度的总体印象.

如Reinhard和Devlin [272]所示,可以通过将显示值等于感光器输出来创建一个色调再现算子.请注意,此运算符分别应用于红色,绿色和蓝色通道.这类似于感光器的行为,在这种行为中,三种不同的视锥类型中的每一种都被认为在很大程度上独立运行.另请注意,作为几种颜色外观模型一部分的S型曲线(例如,Hunt模型[134],CIECAM97[133]和CIECAM02[226](请参见2.9节))独立于红色，绿色和蓝色执行.渠道.这种方法可以解决亨特效应,该效应可以预测亮像素和暗像素的颜色去饱和度,但不能预测具有中等亮度的像素[134].

可以以传统方式将适应水平计算为例如图像的(对数)平均亮度.但是,可以通过对进行更精细的计算来建模其他有趣的功能,例如光和色适应.

通过在像素的亮度值和每个像素的红色,绿色和蓝色值之间进行插值,可以消除强烈的偏色.这会为每个像素分别产生不同的适应水平,这由用户指定的插值权重控制:

这种方法通过设置来实现von Kries风格的色彩校正,而如果等于0,则不应用色彩校正.我们也将这种色彩调整称为“色彩适应”,其效果如图8.3所示.

类似地,可以将适应水平认为是由受体所暴露的当前光水平以及最近的受体所暴露的水平所确定的.因为眼睛会进行眼球运动,并且还可能存在视网膜内的横向连接,所以我们可以假设当前的适应水平是像素值本身以及图像中所有其它像素的函数.这引起了所有形式的空间变化的色调再现模型(例如,参见第8.1.2–8.1.4节和第8.2节),但是这里使用了一种更快,更简单的解决方案,即像素值和全局平均之间的插值:

插值权重由用户指定,并控制图像外观,在某种程度上与光适应相关,如图8.4所示.图8.5给出了不同值的算子图.光和色适应都可以通过双线性插值进行组合

受感光器生理学的直接启发,该运算符使用默认参数为大量图像提供了合理的结果.通过调整四个用户参数可以优化大多数其他结果.的值确定在多大程度上消除任何色偏,和影响色调映射图像中的对比度,而使整体外观更亮或更暗.由于这些参数中的每一个对最终结果都有直观的影响,因此手动调整快速而直接.

8.1.2 摄影色调重现

将世界范围的亮度映射到较小范围的显示亮度的问题并不是一个新问题.自从摄影被发明以来,在传统摄影中已经存在色调再现.摄影师的目标通常是制作看起来逼真的捕获场景的渲染.像所有纸张一样,相纸本来就具有低动态范围(LDR),所以摄影师必须找到解决介质局限性的方法.

尽管在过去的150年中开发了许多常见的摄影原理,并测量了许多媒介的响应特性,但摄影的艺术和技术方面仍然存在脱节.今天仍在使用的Ansel Adams的区域系统试图弥合这一差距.它使摄影师可以使用野外测量来提高创建良好最终照片的机会.

区域系统[zone system]可用于在色调重现操作符[274]的设计中做出明智的选择.首先,对图像应用线性缩放,这类似于在相机中设置曝光.然后,可以使用类似于照相**减淡和加深[dodging-and-burning]**的计算模型对对比度进行局部调整,该模型可以选择在较长或较短的时间内选择性地曝光打印区域.这可能会调高选定的暗区,或调低选定的亮区.

摄影中场景的关键是指示场景整体印象的明暗程度.继其他色调再现算子之后,Reinhard等人将对数平均亮度(公式7.7)作为场景关键点的有用近似值.对于平均关键场景,对数平均亮度应映射到显示范围的18％,这与通常的摄影习惯是一致的(请参阅第64页的脚注).高关键场景应映射为较高的值,而低关键场景应映射为较低的值.对数平均值映射到的值作为用户参数给出.摄影色调再现算子的初始比例由下式给出

下标表示在初始线性映射之后获得的值.由于此缩放在任何非线性压缩之前进行,因此算子不必期望输入将以SI单位指定.如果以任意单位给出图像,则可以相应地调整用户参数.图8.6显示了此参数的效果示例(的可选值为0.01,0.04,0.18(默认值)和0.72).对于需要手动操作的应用程序,可以从图像的直方图估计此用户参数的值[270].该技术在第7.6.1节中进行了详细介绍.

许多场景具有平均动态范围,在高光附近或天空中有一些高亮度区域.由于所涉及的化学作用,传统摄影使用S形传递函数(S型曲线)在强调中距离的同时压缩高和低亮度值.但是,在现代摄影中,使用了主要压缩高亮度的传递函数.可以使用以下压缩函数来建模:

此函数轻微地线性缩放,而较高的亮度则压缩较大的量.该函数的渐近线为1,这意味着所有正值都将映射到0到1之间的显示范围.但是,实际上,输入图像不包含无限大的亮度值,因此最大的显示亮度不会完全达到1.此外,在艺术上可能希望以可控的方式加深明亮区域.通过将上面的传递函数与线性映射混合在一起,可以产生以下效果:

该公式引入了一个新的用户参数,该参数表示将被映射为白色的最小亮度值.默认情况下,此参数设置为最大世界亮度(在初始缩放后).对于较低的动态范围图像,将设置为较小的值会产生细微的对比度增强.图8.7显示了LDR图像的的各种选择(的可选值分别为0.15,0.25,0.35,0.45和0.55).注意，对于越区切换操作，也可以根据输入图像的直方图估计此参数[270].

上面的等式是一个合理的全局色调再现算子.但是,可以通过应用类似于照相的减淡和加深的算法,将其修改为局部色调再现算子.对于每个像素,我们希望找到不包含任何鲜明对比的最大周围区域.传统的中心环绕计算为此目的提供了合理的对比度度量.计算一个像素(中心)的高斯加权平均值,并将其与较大区域(周围)的高斯加权平均值进行比较,两个区域均以同一像素为中心.如果像素附近没有明显的对比度,则这两个高斯的差将接近0.但是,如果有一个与边缘重叠但与中心高斯不重叠的对比度边缘,则两个平均值将显着不同.

如果标度为的高斯模糊图像由下式给出

该模糊尺度下的中心环绕机制是用

通过的归一化,可以使此结果受到所有初读共享的公共阈值的限制,因为现在独立于绝对亮度.另外,项可防止因的较小值而使规格化破坏.用户参数可以看作是锐化参数,其效果如图8.8所示.对于的较小值,其影响非常微妙.如果选择的值太大,可能会出现光晕现象.实际上,将设置会产生合理的结果.

此过程会产生一组高斯差异,每个差异都提供有关在感兴趣像素周围越来越大的区域内可获得多少对比度的信息.为了找到给定像素的对比度相对较低的最大区域,我们寻求最大尺度,使高斯（DoG）的差异保持在阈值以下:

对此,可以将相应的中心高斯视为局部平均值.然后,实现了减淡和加深计算模型的本地算子

相对较亮区域中暗像素的亮度将满足,因此此运算符将降低显示亮度,从而增加该像素的对比度.这类似于照相“减淡”.类似地,相对较暗区域中的像素将被压缩得更少,因此被“加深”.无论哪种情况,像素相对于周围区域的对比度都会增加.

通过意识到比例选择机制可以即时执行,可以提高闪避和刻录版本的存储效率.原始实现将高斯金字塔计算为预处理.然后,在每个像素的色调映射期间,选择最合适的比例.Goodnight等人显示了预处理步骤可以与实际的色调再现阶段合并,从而避免了计算不使用的低通图像[107].他们的工作还显示了如何在图形硬件中实现该算子.

总而言之,摄影色调再现技术[274]存在于全局和局部变体中.对于中等动态范围的图像,全局算子速度快并且可以提供足够的压缩率.对于非常高的动态范围（HDR）图像,使用局部版本可以更好地保留本地对比度,该版本实现了加深和减淡.局部算子会为每个像素寻找不包含明显对比步骤的最大区域.因此m该技术类似于保留边缘的平滑滤波器m例如第8.5.2节中讨论的双边滤波器,因此m我们可以用更实际m更有效的双边滤波器代替比例尺选择机制m以产生空间局部平均值,然后该平均值将用于寻找将像素调整到的平均曝光水平.

8.1.3 局部S型曲线压缩

如第7.4.2节所述，假定适应级别可以在每个像素的基础上变化，第8.1.1节的受感光器启发的模型通过在图像平均值和像素值本身之间进行线性插值来实现此目的.尽管这在计算上非常有效,但它是HVS中可能发生的情况的近似值.更接近的近似将是为每个像素计算局部平均值,以驱动每个像素的半饱和常数.然后，Naka–Rushton方程（方程7.1）采用以下一般形式:

其中是像素邻域上加权平均值的函数.可以通过应用高斯滤波器[219]计算该加权平均值.过滤器的大小确定是否出现光晕伪像.通常,与较大的内核相比,较小的过滤器内核在这种方法中提供的伪像较少,如图8.9所示.如图所示,更大的滤波器内核也会产生更大的对比度.这是因为这样的事实,即在给定像素周围的一小块区域上进行平均会产生可能与像素值本身相似的平均值.结果,和的值平均相对接近,因此将映射为接近0.5的值.对于较大的过滤器内核,在每个图像中这种情况发生的频率往往会降低.

可以通过使用不跨越尖锐边界的滤镜来减少滤镜伪影.保留边缘的平滑算子,例如双边滤波器,将达到这一目的,并且可以与S形压缩相结合[181].在此,是局部适应值的函数,该局部适应值是使用双边滤波图像计算的.和之间的关系可以用[373]建模:

其中,使用公式7.5计算.常数和是经验值,有助于调整半饱和常数以控制图像的整体外观.值为0.69,值为2.0至5.83[181].

调整双边滤波器参数的效果如图8.10和8.11所示.其中的第一个显示了使用相同参数创建的两个图像,但强度域高斯的内核大小除外.可以看出,两个值中的较小者会产生具有更多细节的图像,但整体对比度会略微降低.

双边滤波器的空间范围的选择似乎非常可靠.我们在1像素到100像素之间改变了空间高斯的大小,并保持所有其他参数不变.结果如图8.11所示.确实,由于所有三幅图像都非常相似,因此我们仅显示一张图像,其余两幅面板显示了使用CIE dE94色差度量标准计算出的该图像的差异.差异远低于可见阈值(窗口面板除外).

8.1.4 自适应增益控制

到目前为止,我们已经讨论了几种计算局部平均值的色调再现算子.摄影色调再现算子使用比例空间机制来选择局部区域的大小,并计算该局部区域的加权平均值.然后用于调整曝光水平.Ashikhmin的算子也这样做,但是提供了关于人类视觉的另一种解释.类似地,双边滤波器有效地是保持边缘的平滑算子.平滑本身可以看作是计算本地邻域的平均值.双边滤波器的边缘保留属性很重要,因为它允许最大化用于计算平均值的空间.

双边滤波器的定义特征是,只要像素的强度相似,就可以在局部邻域内对像素进行平均.双边过滤器定义为

是权重因子,将结果归一化;是双边滤波器,由分量和组成.可以自由选择空间滤波器内核和亮度域滤波器内核的形状.以非线性高斯滤波[14],SUSAN[299]和双边滤波器[322]的形式独立开发了不同的解决方案.同时,独立和并发的发展导致了其它的色调重现算子-一个基于双边滤波器[74](参见第8.5.2节),另一个基于SUSAN滤波器[249].

尽管Durand和Dorsey对高斯滤波器和Tukey滤波器进行了试验,但Pattanaik和Yee在亮度域中使用了接近箱形的滤波器内核来控制其音调再现算子的压缩量[249].后者使用其双边滤波器版本的输出作为局部适应亮度值,而不是像Durand和Dorsey那样将图像分为基本层和细节层的机制.

Pattanaik和Yee从摄影中得出的线索指出,白色的强度往往是中等灰色的五倍,而黑色则是中等灰色亮度的五分之一.它们的局部增益控制是从加权局部平均值中得出的,其中,根据周围像素相对于感兴趣像素亮度的亮度,对每个周围像素进行加权.不考虑强度超过中心像素五倍的像素和亮度小于其亮度五分之一的像素.

对于围绕像素的圆对称区域,然后按以下方式计算所有像素的局部平均值:

通过将和的值除以所考虑区域的半径来确定圆形对称局部面积:

可以在对数域中用相同的亮度域约束表示替代符号,对数的底数为5:

这意味着在亮度域中使用盒滤波器,在空间域中使用“盒滤波器”(尽管是圆形对称的).如果图像仅由锐利边缘组成,则亮度域中的盒式滤镜就足够了.最好使用亮度域滤镜对更平滑的高对比度边缘进行滤波,该滤镜的突然截止点要少一些.这可以通过以下亮度域滤波器内核实现:

空间滤波器内核是圆形对称的且未加权:

使用上述滤镜生成滤波图像的结果是**模糊的图像**,除了出现较大对比度差的区域外.因此,该过滤器可以看作是保留边缘的平滑过滤器,就像双边过滤器和三边过滤器一样.因此,可以以类似于将图像分成基础层和细节层的调色剂产生操作器的方式来使用该滤波器的输出.然后,在假设基础层为HDR且细节层为LDR的假设下,压缩基础层并将其与细节层重新组合.

可替代地,该滤波器的输出可以被视为局部适应亮度.因此,可以将利用全局平均值的任何全局算子扩展为局部算子.任何保留边缘的平滑运算符的输出以及Reinhard等人的摄影算子的比例选择机制都可以用局部平均值代替全局平均值.在每种情况下,将返回可实现的压缩量与光晕伪影可见性之间的典型权衡.然而,通过使用保留边缘的平滑算子或上述比例选择机制,确保了局部平均值相对接近于像素值本身.尽管光晕可能无法完全避免,但可以通过这些方法将其最小化.

8.2 图像外观模型

尽管颜色外观模型已经发展成为可以预测在强度和色度含量可能都变化的照明下对颜色的感知的方法,但由于人类视觉处理的空间特性,它们并不适合直接应用于图像.为了预测在给定照明下如何感知图像的模型,当前是研究的活跃领域.在本节中,我们将按开发顺序讨论几种此类模型.

8.2.1 多尺度观察者模型

Pattanaik的多尺度观察者模型属于较完整的颜色外观模型，并且由多个步骤依次执行[246]组成.该模型(和所有其他颜色外观模型)的输出是颜色外观相关,如2.9节所述.通过执行逆模型并将显示装置的特性代入适当位置的等式中,可以从这些相关关系中得出色调再现算子.

为简单起见,我们提出了一种简化了模型的版本.出于色调再现的目的,模型的一些前进和后退步骤会被抵消,因此可以省略.此外,与原始模型相比,我们进行了一些小的更改以最大程度地减少视觉伪影,例如,通过选择比原始模型小的过滤器内核大小.我们首先简要介绍完整模型,然后详细介绍简化版本.

正向模型的第一步是考虑眼介质中的光散射,然后进行光谱采样以对感光器输出进行建模.这将产生代表图像的四个属性:杆和L,M和S锥.然后,将这四个属性分别在空间上分解为七级高斯金字塔,然后转换为四个六级DoG堆栈,这些堆栈表示HVS中的带通行为.通过减去金字塔中的相邻图像来计算DoG.

下一步由应用于四个通道中每个DoG的增益控制系统组成.增益控制函数的形状类似于阈值强度曲线,因此该步骤的结果可以看作是经过调整的对比度金字塔图像.然后,将视锥信号转换为颜色对抗方案,该方案包含单独的亮度,红绿色和黄蓝色通道.杆图像单独保留.

然后应用模拟人体对比度敏感度的对比度传感器函数.视杆和视锥信号重新组合为消色差通道以及红绿色和黄蓝色通道.接下来形成彩色外观图,其是上述外观相关性的计算的基础.该步骤在逆模型中被取消,因此我们省略了详细描述.由于我们主要对明暗照明条件感兴趣,因此我们也省略了计算杆信号的操作.

该模型要求低通滤波副本的空间频率为每度0.5、1、2、4、8和16个周期（cpd）.在对HVS建模时,通常以这种方式指定空间频率.然而,对于实际的调色剂生产操作者,这将需要了解观察者到显示设备的距离以及显示设备的空间分辨率.由于观众的距离难以控制,更不用说预测了,所以我们以每个像素的周期为单位重新陈述空间频率.

此外,我们省略了眼介质中光散射的初始模型.对光散射进行建模会产生给图像带来少量模糊的效果,尤其是在高亮度区域附近.有时,眩光建模可能是重要且理想的,并且应包括在多尺度观察者模型的完整实现中.但是,为简单起见,我们省略了此初始处理.这组简化操作使我们可以专注于实现动态范围缩小的多尺度观察器模型部分.

该模型期望在LMS锥状空间中指定输入,这将在2.4节中讨论.在多尺度观测器模型的所有阶段中应用的压缩函数由以下增益控制给出:

将低通或带通图像与此增益控制相乘就等于应用了S型曲线.

接下来创建一叠七个越来越模糊的图像.在每个级别上,模糊量都会增加一倍,对于最小的比例,我们使用一个过滤器内核,该过滤器内核的大小由用户参数确定,这将在本节后面讨论.级别为的图像用以下三元组表示:

从这7张高斯模糊图像的栈中,我们可以计算6张DoGs图像的栈,这些图像代表了六个空间尺度上的自适应对比度:

DoG方案涉及除以低通滤波后的图像(通过增益控制功能),这可以看作是标准化步骤.Ashikhmin的算子(请参阅第8.3.3节)和摄影色调再现算子(第8.1.2节)都采用了这种方法.DoG是HVS中发现的某些感受域的合理近似.它们也被称为“中心环绕机制”.

保留级别的低通图像,并将构成图像重建的基础.在正向模型的最后一步中,低通图像中的像素适应于它们自身与低通图像的均值()的线性组合:

动态范围减小的量由上述公式中的用户参数A确定,取值介于0和1之间.此参数对色调映射图像外观的影响如图8.12所示.

多尺度观测器模型的前向版本基于HVS.尽管我们可以显示正向模型的结果,但查看者的视觉系统也将应用类似的正向模型(只要该模型正确反映了HVS).为避免两次应用该模型,应在显示图像之前反转计算模型.在反转过程中,将与显示设备相关的参数插入模型中,以便可以显示结果.

在逆模型的第一步中,需要确定目标显示设备的均值亮度.对于典型的显示设备,此值可以设置为50 cd / m2左右.确定了平均显示亮度的增益控制因子,并且再次调整了低通图像,但现在使用了平均显示亮度:

然后将DoG栈一次以一个比例添加到自适应低通图像,从开始,然后是:

最后,将结果转换为XYZ,然后转换为RGB,并应用伽玛校正.

该模型的原始公式显示出光晕痕迹,类似于本章中讨论的其他本地操作员创建的光晕痕迹.原因之一是模型是根据视角而不是像素进行校准的.视角与像素之间的转换需要假设显示器的尺寸,分辨率以及观察者与显示器之间的距离.这些假设直接影响用于创建低通图像的滤波器内核的大小.为了演示的目的,我们在图8.13中显示了一系列具有不同内核大小的图像.请注意,我们仅调整最小高斯的大小.通过为最小的高斯指定内核大小,可以确定所有其他高斯的大小.该图显示,较小的高斯产生较小的光晕,比原始模型的较大光晕不那么引人注目.

通过将带通图像相继添加回低通图像来进行可显示图像的重建.默认情况下,这些带通图像的权重相等.对带通图像加权可能是有益的,这样较高的空间频率对最终结果的贡献更大.尽管原始的多尺度观察者模型没有这种加权方案,但我们发现,如果更高的频率被赋予更大的权重,则最终结果的对比度可能会得到改善.如图8.14所示,其中每个连续的图像都将重点放在更高的频率上.用于这些图像的比例因子k以下列方式与带通金字塔的索引号s相关:

常数g是用户参数,我们在图8.14中的1到5之间变化.较大的g值会在色调映射的图像中产生更大的对比度，但是如果将该值设置得太高，则会突出图像中存在的残留光晕，这通常是不希望的.

对于使用多尺度观察者模型映射的未经校准的图像色调,不同的预缩放因子会导致整个图像外观变亮或变暗,如图8.15所示.

该运算符的计算复杂度仍然很高,我们仅建议将该模型用于HDR非常高的图像.如果特定图像所需的压缩量较少,则较简单的模型可能就足够了.用于计算低通图像的傅立叶变换是确定运行时间的主要因素.高斯金字塔中有七个级别,原始模型中有四个颜色通道,生成了28个低通滤波图像.在我们简化的模型中,我们仅计算三个颜色通道,因此总共产生了21张低通图像.

多尺度观察者模型是第一个将中心环绕处理引入色调再现领域的模型,该模型也已成功用于Ashikhmin的运算符(请参见下一节)以及Reinhard等人的照相调色剂产生运算符(请参见第8.1.2).通过仔细选择适当的滤波器内核大小,可以最小化原始模型中存在的光晕.

8.2.2 iCAM

尽管本章中的大多数算子都是针对降低动态范围,但是Pattanaik的多尺度观察者模型[246](在下一节中讨论)和Fairchild的iCAM模型[84]都是色彩外观模型.

大多数颜色外观模型(例如CIECAM97,CIECAM02和Hunt模型)都旨在用于简化的环境.通常假定在较大的具有不同颜色的均匀背景上可以看到均匀的色块.然后,可以通过这些模型使用色块的XYZ三刺激值及其输入的周围特征来预测该色块的感知,如2.9节中所述.

图像往往比仅在统一背景上的色块更复杂.相邻像素之间的相互作用可能需要更复杂的空间变化模型,该模型考虑了每个像素周围区域的局部适应性.支持空间变化的颜色外观模型的这一论点实际上与空间变化的色调再现算符背后的理由相同.因此,这里描述的iCAM模型与Chiu和Rahman算子之间的相似之处是显而易见的.但是,也存在足够的差异,因此值得对模型进行描述.

iCAM“图像外观模型”是对CIECAM02颜色外观模型的直接改进和简化[84,143].它省略了在CIECAM02中发现的S形压缩,但以两个独立的高斯模糊图像的形式添加了空间差异处理,这些图像可被视为适应级别.像大多数颜色外观模型一样,该模型需要同时应用于正向和反向.

预计将在与XYZ设备无关的坐标中指定模型的输入.像CIECAM02一样,该模型使用各种颜色空间来执行算法的不同阶段.第一阶段是色适应转换,为此使用了尖锐的圆锥响应.使用第2.4节中给出的MCAT02变换可获得尖锐的圆锥响应.

色适应转换将图像中的颜色推向D65白点.von Kries变换中的适应量由用户参数D确定,该参数指定了适应程度.另外,对于每个像素,通过应用低通滤波器(其内核为图像大小的四分之一),可以从XYZ图像中得出白点.这可以独立地应用于每个色彩通道以进行色彩适应,或仅应用于Y通道以进行色彩适应.然后,还使用MCAT02矩阵转换此低通滤波后的图像.最后,由三重态给出的D65白点也将转换为尖锐的圆锥响应.随后的von Kries适应变换由下式给出

该变换有效地将图像除以图像的过滤版本.因此,iCAM模型的这一步骤类似于Chiu和Rahman的算子.在那些算子中,可用压缩量与光晕的存在之间的权衡由缩放因子k控制.在此,D扮演比例因子的角色.因此,我们可能希望此参数与Chiu和Rahman的算子中的k具有相同的作用.但是,在上式中,D还确定了色彩适应的量.它的作用与其它颜色外观模型中的适应度参数的作用相同(例如,与CIECAM02进行比较,这在2.9节中进行了描述)

对于较大的D值,将每个像素的颜色推近D65白点.因此,在iCAM模型中,色彩适应,光晕和压缩量这两个单独的问题直接相关.

图8.16显示了参数D的效果,给定值为0.0,0.5和1.0.该图还显示了计算单个白点的效果,该白点在每个像素的三个值之间共享,并为每个颜色通道独立计算一个单独的白点.为了演示,我们选择了动态范围比平常高的图像.因此,与动态范围中等的图像相比,光源周围可见的光晕更加明显.与Chiu和Rahman的运算符一样,iCAM模型似乎最适合中等动态范围图像.

进行色适应变换后,通过指数函数进一步压缩,该函数在LMS锥空间中执行(请参见第2.4节).压缩亮度范围的指数函数由下式给出

指数通过进行逐像素修改,是从输入图像的亮度通道(Y通道)派生的空间变化环绕图的函数.环绕图是此通道的低通滤波版本,其高斯滤波器内核大小为图像大小的三分之一.函数由下式给出

因此,的这种计算可以看作是等式2.2中给出的CIECAM02的部分适应因子在空间上的扩展.

此步骤完成了iCAM模型的正向应用.要准备显示结果,应使用逆模型.该模型要求在每个步骤中使用与正向模型相同的色彩空间.第一步是将上述乘幂取反:

逆色适应转换不需要空间变化的白点,而是从全局D65白点转换为等亮度白点.因为假定完全适应,所以D为设置为1,此变换简化为以下缩放比例,该缩放比例在锐化的圆锥响应空间中应用:

在适当的颜色空间中执行了这两个步骤之后,最后的步骤包括剪切所有像素的第99个,归一化和伽玛校正.

如前所述,该模型的用户参数为D,并对输入图像进行预缩放.由于iCAM模型要求以坎德拉/平方米为单位指定输入,因此可能需要进行预缩放.对于任意图像,这要求用户在色调映射之前将图像缩放到适当的范围.预缩放的效果如图8.17所示.对于包含太小的值的图像，会出现红移。 如果图像中的值太大，则图像的整体外观会变得太暗.

需要考虑的其他参数是两个高斯滤波器的内核大小.对于本节中显示的图像,我们使用推荐的内核大小,即图像大小的1/4和1/3,但是其他大小也是可能的.与Chiu和Rahman的运算符一样,精确的内核大小并不重要,只要选择的过滤器宽度较大即可.

总而言之,iCAM模型包括两个步骤:色适应步骤,然后是指数函数.色适应步骤与Chiu和Rahman的运算符非常相似,因为图像会被图像的模糊版本所分割.第二步可以看作是伽马校正的高级形式,从而可以在每个像素的基础上对伽马因子进行调制.在正向模型之后,需要反向应用模型以准备要显示的图像.最后的裁剪和规范化步骤使整体外观变亮.该模型最适合于具有中等动态范围的图像,因为对于此类图像,压缩和光晕的存在之间的权衡对于非常HDR图像而言并不那么关键.

8.3 其它基于HVS的模型

在本节中,我们将基于除感光器行为之外的人类视觉方面讨论几种操作员.其中包括接下来要介绍的Tumblin和Rushmeier的算子，retinex模型，Ashikhmin的算子，基于亮度感知和子带编码的模型，最后是根据人类对比度感知优化分段线性曲线的模型.

8.3.1 亮度保留算子

当米勒等人最早将计算机图形学引入照明设计领域并专注于色调再现以实现这一目标的是Tumblin和Rushmeier，他们在1993年将色调再现问题引入了计算机图形学领域[326].Tumblin和Rushmeier的工作也基于史蒂文斯的心理数据,他们意识到HVS还能解决动态范围缩小问题.

尽管修改后的Tumblin-Rushmeier运算符与Miller运算符基于相同的心理数据,但亮度函数的表述略有不同:

此处是亮度[brightness]或以亮度为单位测量的感知亮.是以坎德拉每平方米为单位的亮度，是适应亮度,也以坎德拉每平方米为单位进行测量.引入常数可以使公式以SI单位表示.最后,是对比度灵敏度的量度,它本身是适应亮度的函数.

可以针对HDR图像以及预期的显示设备评估此函数.这导致两组亮度值作为输入亮度(或世界亮度)和显示亮度的函数.在下文中,下标和表示世界量(从HDR图像测量或得出)和显示量.

而Miller等人推测图像和显示器的亮度比应该匹配,Tumblin和Rushmeier只是将图像和显示器的亮度值等同:

伽玛函数通过分别带入和来模拟史蒂文斯对图像和显示器的人的对比度敏感度,并由下式给出:

可以针对求解这些方程式,是我们希望显示的亮度.结果是

适应亮度对于显示器是,对于图像是.显示适应亮度通常在30和之间,尽管使用HDR显示设备时此数字会更高.图像适应亮度被给出为对数平均亮度(公式7.7).现在,中端场景亮度映射到接近的中端显示亮度,对于昏暗场景,这将导致可显示结果的外观呈均匀的灰色.这可以通过引入比例因子来解决,该比例因子取决于世界适应水平:

其中是最大可显示对比度,对于LDR显示设备,通常在30到100之间.然后由给出完整的运算符

对于适当选择的输入参数,此函数的曲线图如图8.25所示.

由于此操作符是以SI单位校准的,因此要色调映射的图像也需要以SI单位指定.对于未知单位的图像,我们在色调再现之前尝试了不同的比例因子,并在图8.26中显示了结果.该图像按0.1、1、10、100和1000的比例进行缩放，缩放后的图像逐渐变亮.对于此特定图像,接近1000的比例因子将是最佳的.对于该图像序列,我们放弃了对图像进行归一化,应用伽玛校正然后乘以255的常规做法,因为该运算符已经包含了显示伽玛校正步骤.

总而言之，经过修订的Tumblin–Rushmeier音调产生算子与Miller算子基于相同的心理数据，但关键的区别在于Miller等人。 目的是保持压缩之前和之后的亮度比，而Tumblin-Rushmeier则尝试自己保留亮度值。我们认为，只要输入图像以坎德拉/平方米为单位指定，后者就可以产生有用的结果。 如果未按坎德拉每平方米指定图像，则应将其转换为SI单位。 在那种情况下，图像可以按比例缩放，该比例可以通过反复试验确定，如图8.26所示。

8.3.2 Retinex

尽管Chiu的工作是探索性的,并没有被宣传为可行的色调再现算子,但Rahman和Jobson开发了他们对retinex理论的解释,以用于各种应用,包括色调再现[142，260,261].但是,他们的方法和Chiu的方法之间的差异相对较小.他们也将图像除以具有宽滤镜内核的高斯模糊形式.

他们的运算符有两种不同的形式,即单刻度和多刻度版本.在单尺度版本中,Chiu模型被严格遵循,尽管该算法在对数域中运行.但是,对数的放置有些特殊,即在将图像与高斯滤波器内核卷积之后:

根据经验确定对数的这种位置以产生视觉上改善的结果.我们将乘幂加到结果以返回线性图像.

**请注意,此运算符在红,绿和蓝通道上独立工作,而不是在单个亮度通道上工作.这意味着产生高斯模糊图像的卷积需要每个图像重复3次**.

在多尺度retinex版本中,对于具有不同内核大小的高斯,上述方程式重复了多次.这导致一组图像,每个图像都因数量增加而变得模糊.在下文中,级别的图像将表示为.在本节显示的示例中,我们使用六个级别的堆栈,并使最小的高斯滤波器内核宽2个像素.每个连续的图像都以高斯卷积进行卷积,该高倍是堆栈中前一个图像的两倍.

然后,多尺度retinex版本就是一组单尺度retinex图像的加权总和.每个秤的权重由用户确定.我们发现,对于实验而言,通过幂函数对权重进行直接控制是很方便的.对于具有个级别的图像堆栈,然后通过以下方式计算归一化权重:

图8.27绘制了该函数的曲线系列.用户参数f确定每级图像的相对权重.对于相等的权重,应将f设置为0.要给较小的模糊图像更大的权重,应将f赋予正值,例如0.1或0.2.如果应强调较大的模糊,则应将f赋予负值.

多尺度retinex采用以下形式:

两个用户参数是和,它们在许多方面都等同于控制Chiu的运算符所需的用户参数.k的值指定模糊图像的相对权重.k的值越大,压缩将越剧烈,但也会产生更大的光晕.控制每个秤的相对权重的参数f确定哪个高斯模糊图像最重要.这或多或少等同于Chiu方法中设定高斯的空间范围.因此,使用这两个参数,我们希望能够控制操作员,将压缩量与伪影的严重性进行权衡.如图8.28和8.29所示,确实是这种情况.

总之，Rahman和Jobson对Land的retinex理论的解释类似于Chiu的探索性工作.有三个主要区别.该算法在对数域中工作,这会导致大图像值处的对比度更加接近.通常,这会减少光晕问题。 其次，该算法在三个颜色通道上独立运行。 这种方法通常会遵循各种颜色外观模型（例如，请参见第2.9节中讨论的CIECAM02模型和接下来讨论的iCAM模型）。 最后，这项工作可以在多个范围内进行，并通过用户指定的参数对彼此进行加权。 多尺度技术在包括音调再现文献在内的文献中是众所周知的。 多尺度技术的其他示例包括多尺度观察者模型，Ashikhmin的算子和照相色调再现，如第8.2.1、8.3.3和8.1.2节所述.

8.3.3 Ashikhmin模型

多尺度观察者模型的目的是完整性,因为该模型中存在当前已经足够好理解以进行建模的人类视觉处理的所有步骤.因此,它可能导致各种各样的外观效果.可能有人争辩说,对于更加有限的动态范围缩减任务而言,这种完整性并不是严格必要的.

Ashikhmin算子尝试仅对人类视觉感知中与动态范围压缩相关的那些方面建模[12].这导致包含三个步骤的计算模型大大简化.首先,对于图像中的每个点,建立局部适应值.其次,应用压缩功能以减小图像的动态范围.由于此步骤可能会导致某些细节丢失,因此最终通过会重新引入细节.

Ashikhmin算子符旨在保留局部对比度,定义为:

在此定义中,是像素的世界适应水平.保留局部对比度的结果是可见显示对比度等于显示亮度Ld（x，y）及其派生的局部显示适应水平Lda（x，y）的函数，等于cw（x， y）。 此等式可用于派生用于计算显示亮度的函数:

这些方程式中的未知数是局部显示适应值.Ashikhmin建议根据世界适应值为每个像素计算该值.因此,显示适应亮度是世界适应亮度的色调映射版本:

然后由下式给出完整的音调再现运算子: