

硕 士 研 究 生 读 书 报 告



题目 空间局部适应模型

作者姓名 吴桐

作者学号 nb15038

指导教师 李启雷

学科专业 移动互联网与游戏开发技术

所在学院 软件学院

提交日期 二○ 一五 年 十二 月

Research of a Model of Local Adaptation

A Dissertation Submitted to

Zhejiang University

in partial fulfillment of the requirements for

the degree of

Master of Engineering

Major Subject: Software Engineering

Advisor: Li Qilei

By

WuTong

Zhejiang University, P.R. China

2015

摘要

人眼视觉系统在观察自然世界时会持续适应不同的亮度等级。视觉适应是许多视觉模型的关键因素。虽然视觉适应的时间过程已经得到了充分的研究，但是我们对相应的空间过程还了解得不多。在本文中，我们提出一个可以预测适应信号在视网膜上整合过程的局部自适应的基于经验的新模型。此模型采用在高动态范围（HDR）显示领域中的心理物理学测量方法。我们在构建模型的过程中采用了新的方法：利用经过优化的模拟实验信号来发现预测性最佳的模型。此模型不仅可以用来预测适应过程的稳定状态，也可以用来保守估计复杂图像中可感知的最小临界对比度值。我们通过一系列使用场景来说明此模型的用处，例如检测基于物理的渲染过程中的可见误差范围，确定高动态范围图像的背景光照，测量自然场景中的最大可见动态范围，模拟人眼视觉残留，和基于视点位置的色调映射。

**关键词**：感知，局部自适应，色调映射，视觉度量，高动态范围

Abstract

The visual system constantly adapts to different luminance levels when viewing natural scenes. The state of visual adaptation is the key parameter in many visual models. While the time-course of such adaptation is well understood, there is little known about the spatial pooling that drives the adaptation signal. In this work we propose a new empirical model of local adaptation, which predicts how the adaptation signal is integrated in the retina. The model is based on psychophysical measurements on a high dynamic range (HDR) display. We employ a novel approach to model discovery, in which the experimental stimuli are optimized to find the most predictive model. The model can be used to predict the steady state of adaptation, but also conservative estimates of the visibility (detection) thresholds in complex images. We demonstrate the utility of the model in several applications, such as perceptual error bounds for physically based rendering, determining the backlight resolution for HDR displays, measuring the maximum visible dynamic range in natural scenes, simulation of afterimages, and gaze-dependent tone mapping.

**Keywords：**perception, local adaptation, tone mapping, visual metric, high dynamic range

1 引言

亮度适应是视觉成像系统的基本工作机制，它可以使我们在多种光照条件下依然可以看清场景。这套机制对于视觉模型的构建也十分重要，因为模型需要真实的亮度值来生成正确的预测。这类模型包括基于对比度敏感函数的模型，外观模型，以及许多感知激励的色调映射模型。

在经典心理物理学的实验中，适应状态是由均匀适应场内的显示激励控制的。虽然一个经过简化处理的激励在分离和控制适应过程中产生的效果方面十分有效，但是它不能反映真实世界场景或高动态范围图像中的复杂空间光强分布。在这种复杂场景下的适应状态通常都是未知的，而这又限制了视觉模型在处理复杂图像方面的应用，而且还要以适应状态的特定假设为前提。

现在已经有很多基于神经学和心理物理学的测量方法的视锥和视网膜适应模型。它们构思精巧，而且在图像的色调映射以及视觉残留模拟等领域已经得到较为广泛的应用，尽管通常都会对此类模型进行某种形式的简化。然而，此类模型基本上只关注适应过程中某个暂时的状态，而不能在视点从场景的一部分移动至另一部分时预测出适应状态应该如何变化。相比于此前的研究成果，我们研究了适应过程在空间池内的效应，这时我们假定适应机制已达稳态。关于局部适应过程的空间池的生物学原理方面的研究并不多。即使已有的，也没有经过数据验证。

在本文中，我们提出了一个新的局部适应模型。这个模型采用了高动态范围图像显示领域的新提出的专门针对局部适应的心理物理学测量方法。首先获得所有可能的空间模型，然后利用专门用来最大区分这些模型的独立数据集进行交叉验证，进而找到最佳匹配的模型。这个模型进一步可以生成能够检出图像中最小差别的简洁高效预测器。我们展示了这个局部适应模型和识别阈值的预测器的一些应用案例，包括检测基于物理的渲染过程中的可见误差范围，确定高动态范围图像的背景光照，测量自然场景中的最大可见动态范围，模拟人眼视觉残留，和基于视点位置的色调映射。

对于此模型，我们做了一些假设。我们的目标是构建一个能够解释心理物理学数据的经验模型，而非模拟此过程对应的生物学机制。为简化任务起见，我们只预测中心窝的中间部分的适应状态。适应范围很可能会大于中央窝旁视觉所涉及的范围，因为我们使用一组光感受器来收集信号。其次我们假定目光定位于一个目标点并达到稳态。由于已有很多描述适应的时间过程的模型，所以我们不会涉及时间过程。最后我们认为可见光亮度的范围是从1 cd/m2到5000 cd/m2。

**2 相关领域**

（1）进行适应过程的眼球和视网膜结构

视觉系统可以适应的亮度范围很大。然而视网膜的输出级别只有大约上百级，远小于实际情形。视觉系统的这种效率有赖于视网膜之前的处理过程，以及感光细胞内的适应机制和受体后机制。瞳孔收缩以增加光照，这可以减少视网膜的亮度等级至少8级。另一方面，进入眼球的光线在光学结构（角膜和晶状体）中分散，并在视网膜上造成炫光。炫光对适应过程有重要作用，因为它可以增加场景中相对于周围亮部区域的暗部的亮度。

视网膜的亮度适应机制增强弱感知信号，并阻止强信号激发过强的神经反应。在锥形细胞感光通道中，低亮度等级下的适应过程发生在感光细胞外的视锥双极细胞与神经节细胞之间的突触上。在更高的亮度等级下，适应过程转移至视锥细胞内进行。空间池的作用在这里就变得不太明显了。在杆状细胞感光通道中的适应过程主要通过受体后机制进行，可能在双极细胞处。这些因素再加上锥形细胞与杆状细胞在视网膜上分布的差异，共同得出一幅在不同光照条件下的亮度适应过程的空间范围的图像。

（2）关于亮度适应的心理物理学研究

研究人员已经用心理物理学方法对亮部和暗部的适应过程进行了广泛的研究。在一个跟本论文目标相近的研究中，他们的团队研究了在使用逐渐增加阈值的一束细强闪光照射中心情形下的圆盘型区域的尺寸效应。其成果证明了在光束刺激的视网膜邻近区域的光照可以提高适应水平，而在圆盘边界外的周围区域的其他强度情形则降低适应水平。我们受到了他们的启发，但是我们考察了更复杂背景的情况，也同时包括增加和减少两种情形。

（3）特定的局部适应模型

许多色调映射算子和色彩、图像表现模型都假定眼睛是根据“全局”亮度水平进行适应调整而与视点位置无关。这种全局适应状态被计算为算术运算或几何平均亮度，以部分用作HVS对光线的非线性响应。为找到一个局部适应状态，有的研究采用经低通滤镜处理的图像。然而，这类滤波器的空间支持通常需要专门选择。当这种适应模型用来进行色调映射时，它们可能会导致光晕效应。边滤波器限制了相近像素强度区域的此类空间处理过程，这不仅显著减少光晕效应，而且也减少了炫光的作用，因为亮部像素邻近高对比度边界。我们提出了一个基于感知的局部适应模型，它可以说明高动态相应像素的空间配置，然后我们会展示它在多种不同场景下的应用。

（4）亮度感知的相关研究

虽然亮度感知不是本文的重点，在亮度实验中使用的激励和方法与我们的实验有许多相似之处。Radonjic等人研究了照度到亮度映射为一个测试片通过蒙德里安棋盘激励的包围，并推测Naka–Rushton模型可以解释所收集的数据，但不提供任何特定模型参数作为环绕的函数组态。Allred等人通过考察2个此种蒙德里安棋盘激励环的作用拓展了这方面的工作。他们发现较暗的围绕环可使测试片更亮，较亮的测试环则其更暗，而且持续减少（或增加）围绕环的照度会对测试环的亮度造成更强烈的影响。他们也观察了轴对称的情形，也就是说，对于一组使用不同照度的围绕环测试片，他们选取的特定角度并不影响测试片的亮度。我们的亮度适应实验使用了相似的激励，但是着眼于测量探测阈值附近的结果而非亮度。

**3 实验1：闪光探测**

我们对这个局部适应的新模型的探索起步于一个闪光探测实验。这个实验会引入我们的实验基础，并说明无适应的情形会对视觉效果造成怎样的影响。在第4节我们会使用这个实验的结果去刺激一个简单的探测样例。这个样例包含未知的空间适应部分，而我们会通过后续的实验对其进行探索。首先是在一系列实验中收集数据（第5节），然后用之以验证一组充分多的备选模型（第6节），进而找到并探讨最佳模型。限于篇幅限制，本文对这些实验只能进行概括性地介绍和讨论。

为了实现测量要求的高亮度和高局部对比度环境，我们使用投影仪背光灯构建了一个定制的高动态范围显示装置。它确保了角分辨率超过眼睛的最大可分辨的分辨率。为了最大限度地提高显示效率，投影仪发出的光线经过菲涅耳透镜传达至观察者。投影仪对准LCD面板以获得最大的背光分辨率。同时我们引入一个带有定制垫片的散光板来消除由DLP 和 LCD的像素矩阵所带来的衍射和摩尔纹。它们各自的对比度大约都是1000:1，而组合后则可超过750000:1，最大照度也可超过5000 cd/m2。对于照度低于0.5 cd/m2的情形，提高显示装置的照度并要观察者佩戴ND 2.0滤镜以抵消之。显示装置使用定制软件和JETI Specbos1211光谱仪精确的绝对亮度校准。自定义显示算法用OpenGL和GLSL实现，使任意图像实时显示。

这个实现的目的是激发一个尽可能的不适应的状态。为了实现这一目标，观察者在大部分时间里都是适应于一个照度为*Lf*的均匀适应区域，而检测目标只在闪光探测实验中被短暂地照亮200 ms。这么短的呈现时间和相对较小的检测目标阻止眼睛适应其照度*Lp*。不过由于神经适应机制可以在50 ms内做出响应，我们不能保证观察者在闪光持续期间完全保持在适应均匀照度*Lf*的水平上。

观察者被要求盯住屏幕的中央，检测目标会出现在这里。一个直径为0.2°的微弱固定圆环会在检测目标（边缘）之前出现。观察者的两强制选择任务是确定这个边缘是水平方向的还是竖直方向的。识别阈值可通过QUEST过程找到。对于每一个阈值，每个观察者需要进行至少40次QUEST过程才能确定。每个阈值由至少5名观察者测量值取平均得到。

实验结果如图1所示，彩色实线是我们的实验数据，彩色虚线是经典的Naka–Rushton模型的预测值。我们的实验与此模型的一个显著不同之处在于我们的数据构成的曲线并不对称，而此模型的预测曲线是对称的。

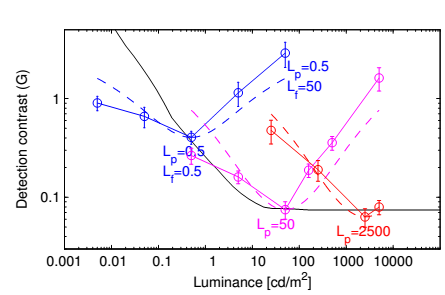


图 1

**4 识别模型**

为了解释闪光探测实验的结果，我们设计了一个简单的检测模型。这个检测模型构成我们的局部适应模型基础。

图1中的3条曲线都在竖直方向上发生了偏移，这是由在低照度条件下感光细胞敏感度的缺失所造成的。由于每条曲线的波谷都代表均匀区域（无闪光）的识别阈值，使用普通灵敏度模型也是可以预测出此种情形的，比如对比度敏感函数（CSF）。CSF可预测当激励出现在某一均匀亮度L区域时的识别阈值然而我们的样例通常是不均匀的，所以找到这个亮度L并不是一件容易的事。识别模型的典型过程如图2所示：

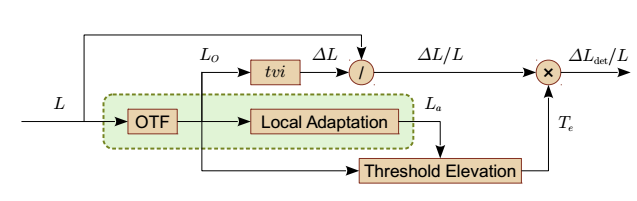


图 2

其中的绿色虚线框部分在第6节中进行详细的探究。LO为视网膜照度，tvi是亮度感知门限函数。这个模型相当好地预测了我们的实验数据。在这个试验中适应照度受到限制，进而大体上可视为已知（忽略对闪光的空间适应）。然而复杂图像的适应照度通常是未知的。在下面的章节中，我们就复杂图像中适应照度值得计算进行讨论。

**5 局部适应实验**

为了找到想要的局部适应模型，我们进行了一系列实验。每个实验都测量了局部适应区域的不同方面。实验过程与实验1基本相同，不过基座一直保持可见，只有检测目标短暂地显示200ms。实验2测量局部照度适应的空间频率选择性，结果证明空间频率与适应机制没有关联。这一结果也说明选择检测目标的一条边是正确的，它的空间频率并不单一，也更能模拟复杂场景。实验3测量影响照度适应的视觉区域范围。结果显示适应图形的区域大小对适应的状态有显著影响。实验4测量远处对目标点的照度适应的影响。结果显示短程效应显然占据主要地位。实验5测量非线性空间环境的作用。结果进一步证明了炫光的重要作用。基座与背景之间的大对比度边界不仅刺激了适应照度，也制造了很强的遮掩信号。实验6就来探究基座方向与这种遮掩信号强度之间的关系，然而结果表明基座方向与检测边界方向之间的关系对遮掩效应的影响微乎其微。实验7测量更加复杂的没有分离任何效应的场景下的识别阈值，以扩展数据集的内容。

**6 局部适应模型**

第4节中介绍的检测模型应该大体上预测了我们在第5节中所涉及的空间适应实验的结果。不过适应照度La的计算是个被忽略的因素。在本节中我们要通过自己的实验数据来找到能够预测La的模型。视觉模型的建立通常有两种方式：一是基于已知的生理学约束，二是针对特定情形进行设计。我们采用一种不同于此两种途径的新方式，遍历所有可能的备选模型及其组合。同时选择10个特殊的激励形式，以最大化区别这些模型。最佳模型如图3所示：



图 3

其中α=0.654，\*是卷积符号，高斯核g是σ1=0.428°，σ2=0.0824°，n1和n2是定义的非线性系数。

**7 应用**

我们的局部适应模型和检测模型有很多实际应用场合。在检测物理渲染情形下的误差边界方面，我们的模型可以处理少量采样所获得的多噪点图像。在优化高动态范围显示器的背光分辨率方面，我们得模型可以给出更加准确的对于显示效果扭曲的估计。在模拟可见动态范围方面，我们的模型可以确定任何给定场景的最大动态范围。 在预测适应的时间过程方面，我们的模型与一组暂时性滤波器组合即可进行相关预测。进一步地，我们可以模拟一段时间后照度图像突变造成的视觉残留的图像。在基于视点位置的色调映射方面，我们的模型可以用高动态范围图像为输入，然后预测出其适应照度的空间变化图，类似于人眼观察真实世界场景时的表现。

**8 局限性**

我们的实验虽然局限于照度适应，但是我们的模型可以推广到彩色图像上，如果假定空间池的构建过程对于所有的感光细胞都有一样的空间特性。我们的模型没有考虑Stiles-Crawford效应以及瞳孔收缩的影响，也没有考虑对比度适应的影响。

**9 结论**

我们已经提出了一个局部适应的量化模型。这个模型源于来自多种不同类型的多种照度图形的视角超过6°的覆盖整个中央窝视野的激励的经验数据。从一套详尽可行的候选模型中选出最佳匹配模型，并用一套额外的可以最大限度区分这些模型的激励进行交叉验证。这个过程保证此模型不仅可以解释已有的经验数据而且可以预测其他任何新的输入。此模型在概念上易于实现，计算成本也不高，只要3个中等大小的卷积滤波器：线性域上的OTF滤波器，和不同非线性域上的高斯池滤波器。这个带有空间特性的局部适应模型可以很容易地与已有的时域模型组合，正如在模拟视觉残留应用中所显示的那样，预测局部适应的时间过程。我们已经在从预测技术局限到高动态范围图像的综合、压缩、色调映射和展示等广泛的应用场景中成功地运用了我们的模型。

参考文献

[1] Vangorp P, Myszkowski K, Graf E W, et al. A model of local adaptation[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2015, 34(6): 166.

[2]Allred S R, Radonjić A, Gilchrist A L, et al. Lightness perception in high dynamic range images: Local and remote luminance effects[J]. Journal of vision, 2012, 12(2): 7.

[3]E Jacobs D, Gallo O, A Cooper E, et al. Simulating the Visual Experience of Very Bright and Very Dark Scenes[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2015, 34(3): 25.

[4]Mantiuk R, Kim K J, Rempel A G, et al. HDR-VDP-2: a calibrated visual metric for visibility and quality predictions in all luminance conditions[C]//ACM Transactions on Graphics (TOG). ACM, 2011, 30(4): 40.

[5]Mantiuk R, Markowski M. Gaze-Dependent Tone Mapping[M]//Image Analysis and Recognition. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 426-433.