

水彩风格化的基于边缘和基材的效果

圣地亚哥·E·蒙特斯德奥卡
南洋理工大学跨学科研究生院,

魔法

福顺锡
南洋理工大学计算机科学与

工程

皮埃尔·贝纳德
大学。波尔多、CNRS、LaBRI
Inria Bordeaux Sud-Ouest

罗曼·韦尔涅
乔尔·托洛特
大学。格勒诺布尔阿尔卑斯, CNRS, LJK
Inria Grenoble 罗纳-阿尔卑斯

汉斯-马丁拉尔
大卫·本韦努蒂
南洋理工大学艺术、设计与媒体学院



图 1：我们的方法允许新的和改进的基于边缘和基材的水彩风格化效果：边缘变暗（红色）、间隙（蓝色）、重叠（绿色）和干刷（黄色）。静物，Dylan Sisson 的模型©皮克斯动画工作室。

抽象的

我们研究了水彩风格化的基于边缘和基材的特征效果。这两个绘画艺术的基本元素在传统水彩画中发挥着重要作用，并高度影响颜料的行为和应用。然而，以前从未尝试过详细考虑这些特定元素以用于 3D 场景的风格化。通过这项调查，我们通过提出模拟两种新颖效果的方法来为该领域做出贡献：干刷和间隙和重叠。通过这样做，我们还找到了改进经过充分研究的水彩效果的方法，例如边缘变暗和基材颗粒化。最后，我们将可控的外部照明影响整合到水彩化的结果中，

连同其他先前研究的水彩效果。这些效果通过直接风格化管道组合在一起，以产生复杂的水彩图像，该图像保留了对象空间中的空间连贯性，并且可以在本地实时控制。

关键词

水彩，干刷，间隙和重叠，直接风格化

ACM 参考格式：

Santiago E. Montesdeoca、Hock Soon Seah、Pierre Bénard、Romain Vergne、Joëlle Thollot、Hans-Martin Rall 和 Davide Benvenuti。2017. 水彩风格化的基于边缘和基材的效果。在表达性诉讼，加利福尼亚州洛杉矶，2017 年 7 月 29 日至 30 日 (NPAR'17)，10 页。https://doi.org/10.1145/3092919.3092928

1 介绍

自 1990 年代初以来，水彩一直是计算机图形学广泛研究的主题，当时超级计算机被用来在物理上逼近传统媒体的行为 [Small 1991]。由于计算资源的指数级增长和可编程图形硬件的采用，水彩研究在寻找不同方法来再现各种特征水彩效果方面取得了显著进展。

允许免费制作本作品的全部或部分数字或硬拷贝供个人或课堂使用，前提是拷贝不是为了营利或商业利益而制作或分发的，并且拷贝带有本通知和首页上的完整引文。必须尊重作者以外的其他人拥有的本作品组件的版权。允许以信用摘录。要以其他方式复制或重新发布、在服务器上发布或重新分发到列表，需要事先获得特定许可和/或收费。从 permissions@acm.org 请求权限。

NPAR'17, 2017 年 7 月 29 日至 30 日，加利福尼亚州洛杉矶
© 2017 版权归所有者/作者所有。许可给计算机协会的出版权。

ACM ISBN 978-1-4503-5081-5/17/07.. \$15.00
https://doi.org/10.1145/3092919.3092928



图2：传统水彩画。

Montesdeoca 等人的最新进展。[2016; 2017] 扩展了先前在对象空间中进行水彩风格化的工作，并通过在通用数字内容创建软件中实施直接风格化管道，为本地化艺术指导做出了贡献。然而，一些水彩效果仍然缺失或需要改进，以便模拟媒体在计算机图形行业中成熟。

其中，本文解决了基于边缘和基材（即纸张）的效果，解决了以前未探索过的对象空间中的特征水彩效果——例如干的笔刷申请和差距和重叠——并改进这两组中的其他现有效果。绘画中的边缘和基材轮廓被广泛用于影响传统水彩画家容易获得的基本艺术技巧。例如，通过在边缘通过重叠组合不同透明度级别的颜色，可以增加调色板的复杂性。相反，通过间隙暴露边缘的基板来引入引人注目的亮度元素，为艺术改进增加了进一步的选择。边缘变暗提醒人们熟悉传统材料的有机品质，并为形式的定义增加色调对比。这些效果在传统水彩画中很常见（图 2），并在文献中有所描述 [Brown 2007; 索恩 2014]。Frits Ahlefeldt 2014 年的画作展示了将基于边缘的技术组合应用于出色的艺术效果，如图 2a 所示。颜料的干刷应用是另一种常用于水彩画的技术 [Franks 1988]，但它也广泛用于水彩画之外，例如，在漫画书上墨 [Janson 2003, 15, 104, 107] 和时装插画 [莫里斯 2010, 61]。在 2011 年 Joe Cartwright 的画作中展示了在水彩画中干刷应用的出色使用，如图 2b 所示。本质上，干刷技术包括在粗糙的基材上轻轻涂抹更粘稠的水彩颜料（模仿其油性对应物），以获得纹理外观。

在计算机图形学 (CG) 中，以前从未在对象空间中尝试过干刷应用效果，而 Luft 和 Deussen [2006a] 对间隙和重叠进行了肤浅的探索。这些效果本身就是特殊的挑战，因为它们依赖于物理基材和水彩画家会风格化的相关边缘。为了复制这些效果，我们利用准确获取的基板、RGBD（红色、绿色、蓝色和线性深度）边缘检测和直接风格化框架。

在这一追求中，我们还实现了在水彩图像之上控制外部照明影响的可能性，并找到了进一步改进基于基材的效果（如造粒）的方法。本文介绍的工作主体支持 3D 场景几何和纹理映射的使用，这是当今大多数 CG 工作所依赖的。

本文开发的效果与其他低级本地化特征水彩风格化效果相结合，从对象空间数据创建可信的水彩化图像，如图 1 所示。我们的算法经过设计和优化以保持实时性能，因为创意互动对于艺术设计选择至关重要。

在本文的其余部分，第 2 节介绍了相关工作，第 3 节介绍了提出的基于边缘的水彩效果，第 4 节介绍了基于基材的效果，第 5 节介绍了实施细节。结果和讨论第 6 节介绍了它们的组合。接下来是水彩风格化的结论和未来工作。

2 相关工作

计算机图形学界已广泛探索合成具有水彩外观的图像。所有先前方法的共同目标是再现水、颜料和涂料沉积在其上的基材之间相互作用的结果。这种互动产生了许多视觉效果，艺术家们利用这些视觉效果并将其融入到他们作品的整体美学中。这些特征效果将水彩画与其他天然介质区分开来，并且在文献中通常以以下术语进行描述：渗色（湿-湿技术）、干刷（干对干技术）、变形（指法）、边缘变暗、颜料湍流、逆流、间隙和重叠。

为了复制（通常是其中的一部分）这些效果，已经提出了各种各样的方法，从简单的图像过滤器 [Bousseau et al. 2006; 约翰等人。2004] 到物理模拟 [Curtis et al. 1997; 小 1991]。在本文中，我们专注于 3D 动画的交互风格化，为此，艺术家既不能使用传统技术也不能使用物理技术来手动绘制每个图像 [Chu and Tai 2005; 范拉尔霍文和范里斯 2005; 你等人。2013] 或程序 [DiVerdi et al. 2013; 卢等人。2013] 模拟。在这种情况下，已经提出了两类方法：在图像空间中工作的方法和在对象空间中工作的方法。

2.1 图像空间方法

图像空间方法通过组合应用于整个图像的多个滤镜和纹理来模仿水彩特有的视觉效果。大多数探索的技术都被设计为对单个图像进行风格化 [Johan et al. 2004; 吕和陈 2014; 王等人。2014]，但它们仍然可以通过独立过滤视频的每一帧来应用于动画。这些图像空间方法的低级艺术导向定位已被 Semmo 等人成功纳入。[2016] 使用参数掩码。然而，由于这些掩码是在图像空间中分配的，因此样式化在运动时会受到空间和时间不连贯的影响。

布索等人。[2007] 使用纹理平流解决后一个问题的一部分, 使合成纹理根据视频的光流发生变化。他们还引入了时空形态滤波器以连贯地简化输入动画。这种方法为类噪声纹理产生了令人信服的结果, 但它可以再现的效果数量有限。它还需要完整动画的知识, 并且不向艺术家提供任何本地控制。本着先前关于绘画渲染的工作的精神 [Collomosse et al. 2005; 卡加亚等人。2011], 时空分割可以允许这样的控制, 但它仍然不适用于交互式应用程序, 例如游戏和虚拟现实, 其中的观点没有预定义。

基于图像类比框架 [Hertzmann et al. 2001], 几种方法提出从样本中再现水彩效果并使它们随时间演变。Fišer 等人。[2016] 描述了一种将逼真渲染的 3D 模型转换为绘画图像的方法。利用全局照明信息, 他们的方法为静态图像生成了可信的交互结果, 但在 3D 场景动画时会出现伪影和时间连贯性问题。贝纳德等人。[2013] 还扩展了图像类比, 但它们允许在绘制的关键帧之间进行插值, 通过使用从对象空间数据渲染的速度和方向场。这可能是唯一一个可以将水彩风格嵌入空间和时间艺术方向的图像空间系统。但是, 需要每隔几帧绘制一次纹理,

最后, 神经网络已被用于对图像进行风格化 [Gatys 等人。2015] 和视频 [Chen 等人。2017; 塞利姆等人。2016], 但它们不受艺术家的控制。

2.2 对象空间方法

在对象空间中, 每个 3D 对象都可以单独进行样式化, 并且效果直接连接到对象表面。这确保了动画时与对象运动的完美空间连贯性。此外, 可以在渲染管道的末尾添加任何图像空间后处理, 以扩展可能的效果范围。

Lum 和 Ma [2001] 首次尝试通过沿 3D 对象曲率执行 Perlin 噪声的线积分卷积以程序方式生成洗涤纹理。伯吉斯等人。[2005] 扩展了这种方法以利用 GPU 并结合暗边。Lei 和 Chang [2005] 描述了一个类似的 GPU 流水线, 它在图像空间中作为后处理产生变暗边缘、颗粒化和失真。虽然产生了一些吸引人的结果, 但这些方法仍然没有再现几个关键的水彩效果, 并且没有为用户提供本地控制。

为了改进复制水彩效果的范围, Luft 和 Deussen [2006a; 2006b] 使用对象 ID 将 3D 场景分解为在多次传递期间渲染的层。这些层由图像空间过滤器处理, 其参数可以独立艺术指导, 然后重新组合成最终图像。该系统还改进了边缘变暗效果并在层之间产生间隙和重叠, 因为它们是单独扭曲的。然而, 这种方法不能很好地适应场景的复杂性, 并且仍然错过了一些基本的特征效果, 如颜料湍流。

勒夫特等人。[2008] 在 CAD 系统中实现水彩风格化, 提出了基于色调的照明模型和基于环境遮挡的抽象风格方法。尽管这种方法只允许实现非常特定的外观, 但将这种水彩渲染引擎集成到完整的建模解决方案中, 比以前的自动方法为用户提供了更多的控制。沿着这些思路, Montesdeoca 等人。[2016; 2017] 将完整的实时水彩管线集成到 Autodesk Maya® 中。它们通过提供允许用户直接在对象表面上绘制各种参数的 3D 绘画界面来进一步提高艺术指导性。然后将它们渲染到 2D 缓冲区并用作 2D 和 3D 水彩效果的本地化控件。他们将对象空间控制与先前研究的效果相结合, 在此过程中对它们进行了改进并引入了混合空间颜色渗色。然而, 这个多功能系统不允许模拟间隙和重叠以及干刷。

在本文中, 我们专注于研究水彩画的基于边缘和基底的效果, 这些效果以前在物体空间中几乎没有被探索过。通过这样做, 我们还找到了改进现有效果的方法, 同时保留了局部直接艺术控制的关键特征——这对表现力渲染非常有益。通过这些新开发和改进的效果, 我们可以扩展 3D 艺术家和水彩画家的特色效果调色板。

3 基于边缘的效果

在任何类型的图像中, 边缘都是必不可少的, 因为它们描绘了形状、定义形式和创造对比。由于这些特性, 边缘被用于许多计算机科学应用 (例如, 图像处理、计算机视觉和图像合成)。基于边缘的效果在大多数自然绘画媒体中很常见, 并且广泛用于风格化目的。然而, 在水彩图像中, 由于介质的流动性, 边缘呈现出特有的现象。本文重点介绍水彩画中常见的两种基于边缘的效果: 边缘变暗和差距和重叠。

为了能够执行任何基于边缘的风格化, 首先需要在图像中检测边缘。许多算法可用 [Papari and Petkov 2011], 但最常见和计算效率最高的算法涉及使用滤波器来计算局部微分, 例如 Sobel、Canny 或高斯差 (DoG) 滤波器。但是, 将它们应用于常规 RGB 图像只能检测颜色渐变中的不连续性。它们错过了 3D 空间中具有相似色调的边缘 - 但通过我们的立体视觉感知。为了检测它们, 我们在 RGBD (红、绿、蓝和线性深度) 缓冲区上运行 Sobel 滤波器以生成有意义的边缘 [Nienhaus 和 Döllner 2005; 斋藤和高桥 1990]。我们通过一个参数进一步控制深度通道的贡献, 增加其对边缘检测的影响并生成更均匀的边缘强度, 而不管它们的色调如何。提取边缘后, 它们将用于重新创建边缘变暗以及间隙和重叠。

3.1 边缘变暗

边缘变暗是指由于表面张力导致颜料逐渐向涂漆区域边缘积累, 在以前的工作中已被广泛研究 [Bousseau et al. 2006; 伯吉斯等人。2005; 雷和常 2005; 勒夫特和杜森 2006a; 蒙特斯德奥卡

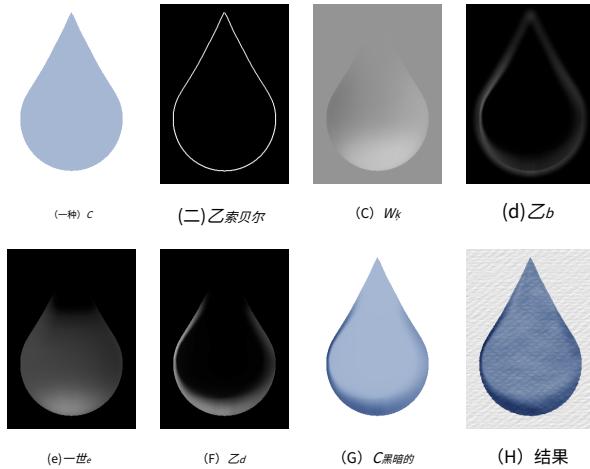


图3：艺术指导的边缘变暗分解。

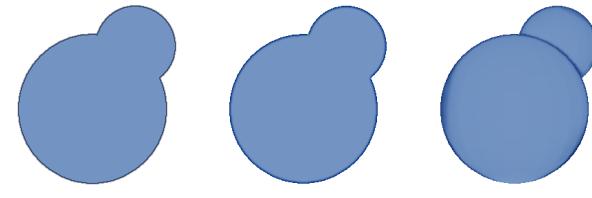


图4：边缘变暗的不同方法。与以前的工作相比，我们的方法使具有相似颜色的边缘变暗并支持边缘宽度变化。

等。2017]。然而，我们的方法通过利用前面提到的 RGBD 边缘检测并提供对变暗边缘宽度和强度的单独局部控制来提供必要的改进。

通过 RGBD 边缘检测，我们还可以检测和暗化具有相似色调的边缘。即使在运动中，当相邻颜色发生变化时，这也能实现更均匀和连贯的边缘变暗。然后我们继续使用这些边缘来创建模拟渐变颜料积累的边缘。

尽管 Sobel 滤波器会产生锐利的边缘（图 3b），但我们通过随后对它们进行模糊来生成渐变边缘变暗。卷积是通过可分离的高斯模糊核控制和执行的，该核由边缘宽度参数在每个单独的像素处建立 W_k ，涂在物体表面（图 3c）。产生的模糊边缘（ $Z_b = G_W * Z_{\text{Bevel}}$ ，图 3d）然后通过全局边缘变暗值和绘制的边缘强度参数进行放大一倍（图 3e）。此操作导致最终的边缘密度 Z_d （图 3f - 为说明目的降低了实际密度）通过颜色修改模型使颜色变暗 $C_{\text{Dark}} = C + Z_d$ ，在那里 C 是原始颜色（图 3a）。在图 3h 中可以看到边缘变暗对最终水彩化结果的贡献。由此产生的边缘变暗效果是完全可控的，并且可以由艺术家针对任何观点进行连贯的艺术指导，利用对象空间

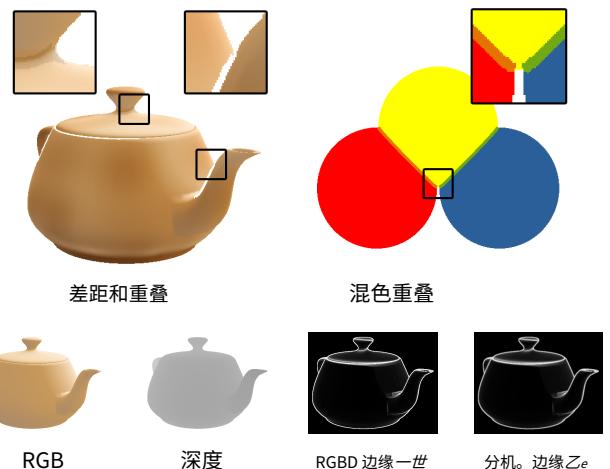


图5：对象空间中的间隙和重叠结果以及边缘提取和边缘扩展的细分。

在图 3c 和 3e 中看到的绘制参数。我们的边缘变暗方法的多功能性可以在图 4 中看到和比较。在此比较中，以前的方法仅提供均匀的宽度，并且难以使具有相似颜色的边缘变暗。

3.2 差距和重叠

间隙和重叠是水彩画的特征效果，在对象空间中几乎没有研究过。Luft 和 Deussen [2006a] 通过在各个层中渲染一组 3D 场景元素、独立扭曲这些元素并随后将它们合成在一起探索这种效果。这样，扭曲的层可能会部分重叠或显示它们之间的间隙。他们方法的最大限制是公共层内的对象不会出现任何间隙和重叠。此外，仅依靠图像空间计算来模拟这种效果会在动画下引入空间和时间的不连贯性。这些问题也存在于纯图像空间方法中，例如 Wang 等人的技术。[2014]。

当艺术家松散地绘制相邻区域时，水彩插图的边缘自然会出现间隙和重叠。当艺术家不希望相邻区域的颜色相互接触时，通常会产生间隙，或者是因为它们既潮湿又可能会相互渗透，或者是出于审美偏好。相反，当艺术家不介意这些颜色区域彼此轻微重叠时，就会发生重叠，主要是出于审美原因或绘画时的意外偏差。小的间隙和重叠也可能作为手颤的自然副产品出现，这是人类神经系统中的非自愿反射。为了重现这两种效果，我们建议在其边缘附近扭曲渲染图像，或者使基板出现在两个相邻区域之间，或选择和混合相邻的颜色。该过程由用户在程式化网格表面上绘制的参数指导。此外，为了从手部震颤中生成间隙和重叠，程序对象空间震颤值可以抵消这些绘制参数。

算法 1间隙和重叠伪代码。

输入：RGBD 图像一世, 扩展边缘图像乙_e, 边缘图像乙,
基材颜色 C_s, 间隙和重叠参数 p ∈ [-米, 米] 输出：间隙和重
叠图像一世哥

```

对全部像素一世(X,是的)做
2:   一世哥(X,是的) =一世(X,是的)
      // 检查是否不是基板颜色 如果 (
4:   一世(X,是的), Cs)然后
      // 检查是否在扩展边缘 如果 (
6:     乙e(X,是的) > 0.2)然后
      // 通过获取相邻像素来获取梯度 G = 标准
8:     化(Δy, Δv) //重叠

10:    如果 (p > 0)然后
        // 检查到米沿像素G 为了一世
12:      ∈ [1: 米]做
          // 检查是否有足够的重叠参数。如果
14:        (p < 一世哥)然后休息
          // 获取相邻颜色 Cn = 磷(X + 一世哥X,是的 + 一世哥G,是的)
          // 检查 RGBD 空间的差异 如果 (Cn - 一世哥(X,是的)) > 0.5)然后
          // 如果不是底物, 则混合
20:        如果 (Cn, Cs)然后
            // 在 RYB 空间中混合颜色
22:            一世哥(X,是的) = 混合RYB (一世哥(X,是的), Cn)
          休息
24:        // 循环达到最大值→直接边缘 如果
          (一世哥 == 米)然后
26:          // 渐变没有收敛到另一种颜色 // I(x,y) at 乙
          边缘→否定 G Cn = 磷(X - G,是的 - G,是的)
28:

          一世哥(X,是的) = 混合RYB (一世哥(X,是的), Cn)
30:      //差距
          如果 (p < 0)然后
32:        // 检查是否直接边缘 如果
          (乙(X,是的) > 0.7)然后
34:          一世哥(X,是的) = Cs
          别的
36:          // 检查到米沿像素G 为了一世
          ∈ [1: 米]做
            // 检查是否有足够的间隙参数。如
            果 (|p| < 一世哥)然后休息
            // 获取相邻颜色 Cn = 磷(X + IG,是的 + IG,是的)
            // 检查 RGBD 空间的差异 如果 (Cn - 一世哥) > 0.5)然后
            // 分配基板颜色 一世哥 = Cn
            休息
46:

```

笔记：通过将输出颜色 Alpha 通道归零而不是使用基材颜色来获得透明间隙。

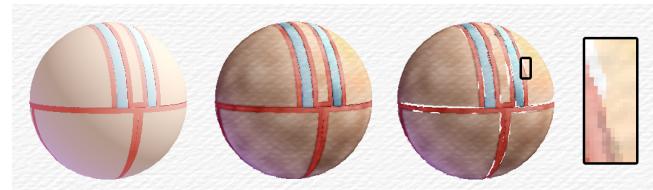


图 6：间隙和重叠以获得更粗略的水彩外观。从左到右：原始颜色，没有和有间隙和重叠的结果。

由于间隙和重叠位于边缘上，因此这些效果及其空间相干性高度依赖于强大的边缘检测。先前检测到的边缘通常具有两个像素的宽度——颜色或深度不连续性两侧的一个像素。由于间隙和重叠可能比这更宽，我们将检测到的边缘扩展到最大恒定宽度米使用线性过滤内核（米=5在我们的实验中）。沿着这些线性边缘的渐变行进，我们找到重叠颜色或产生间隙的相邻颜色。根据线性边缘值，某些梯度可能不会向相邻的对比像素收敛。幸运的是，这些情况是在直接边缘边界处发现的，可以用原始未加宽的边缘边界来识别。该算法在算法 1 中使用伪代码进行描述，结果如图 5 和图 6 所示。

为了增强重叠效果，颜色的混合是在 RYB（红、黄、蓝）空间 [Gossett 和 Chen 2004] 中完成的，遵循 Chen 等人描述的亮度保持颜色混合模型。[2015]（见图 5b）。间隙可以显示基底或显示的 3D 模型的颜色，如果实现效果使得间隙修改透明对象的 Alpha 通道，显示下方的任何颜色。

4 基于基板的效果

无论是放置油画颜料的画布，还是放置水彩颜料的纸张，基材在自然绘画介质中都发挥着重要作用。基材可能会透过、扭曲、积聚颜料或以改变实际绘画的方式遮蔽表面。水彩画作为一种半透明的流体介质，对它所涂的底材特别敏感，并呈现出许多基于底材的效果。

理想情况下，准确测量的纸张轮廓将提供模拟这些特征效果所需的信息。然而，用于精确表面高度测量的轮廓仪，无论是光学的还是基于触针的，都不容易获得——设备价格昂贵，扫描可能需要大量时间。由于缺少轮廓仪，我们采用平板扫描仪沿多个照明方向扫描三张水彩纸，并通过阴影技术的形状获取它们的轮廓 [Bampoutis 等人。2010]。虽然结果可能不如实际轮廓仪的结果准确，但提取的 3D 轮廓几何中的大多数不规则性可以稍后在对象空间中修复。这些包括几何中的相对不均匀性，不会在整个表面上产生均匀的高度图。