

# 轻量级、程序化、矢量水彩绘画引擎

斯蒂芬·迪威尔第\*  
Adobe 系统公司

阿拉文德·克里希纳斯瓦米†  
Adobe 系统公司

拉多米尔机甲‡  
Adobe 系统公司

伊藤大地§  
圣何塞州立大学

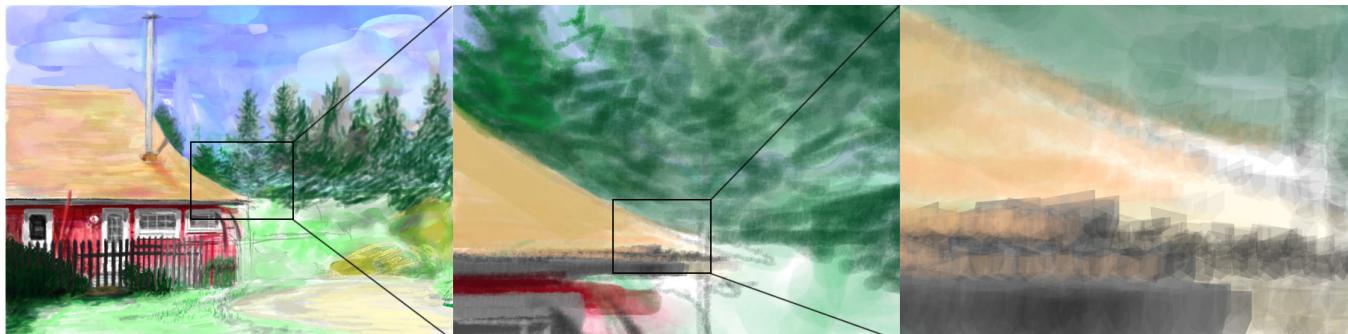


图1：在我们的交互式 iPad 绘画应用程序中制作的矢量水彩画，显示复杂的纹理和颜色混合。插图放大以显示笔画细节和分辨率独立性。

## 抽象的

现有的自然媒体绘画模拟已经产生了高质量的结果，但需要强大的计算硬件并且仅限于屏幕分辨率。数字艺术家希望能够使用类似水彩的绘画工具，但要使用打印分辨率和笔记本电脑甚至平板电脑等低端硬件。我们提出了一种程序算法，用于以轻量级的方式生成类似水彩的动态绘画行为。我们的目标不是完全复制水彩画，而是创造一系列动态行为，让用户获得类似风格的过程和结果，同时拥有自己的独特特征。我们的笔画表示是基于矢量的，允许以任意分辨率进行渲染，我们的程序颜料平流算法足够快，可以支持在石板设备上进行绘画。我们在专业艺术家使用的商用石板应用程序中展示了我们的技术。

因此，自然媒体模拟是计算机图形学界的一个活跃研究领域。为此，开发了交互系统 [Chu and Tai 2005; Laerhoven and Reeth 2005] 允许艺术家以他们传统工具的风格创作更多作品。不幸的是，迄今为止，这些研究原型中没有一个能够进入商业系统。要么他们的计算要求太高，要么他们无法支持专业工作所需的文档分辨率。

与其尝试对水彩画行为的另一种精确复制，我们追求另一个方向。相反，我们的目标是创建一个具有广泛动态行为的绘画应用程序，这些行为受到核心水彩效果的启发，例如颜色混合、羽化和边缘变暗。使用类似的基本风格，我们的绘画应用程序可以实现与水彩画相同的各种复杂和偶然的结果，但具有特定于我们算法的独特特征。

CR 类别： I.3.4 [计算机图形]：图形实用程序—  
油漆系统； 1.6.8 [模拟与建模]：类型  
模拟——动画；

关键词：水彩画，矢量图形，实时

## 1 简介

尽管最近在数字绘画方面取得了进展，但仍有大量传统媒体艺术家。水彩画、油画颜料、鬃毛刷和木炭等自然媒体仍然与现代艺术家相关，因为它们富有表现力和偶然的工作流程。可以使用例如水彩颜料创建的范围广泛的复杂纹理和质量在当今的数字媒体中难以匹配。

我们提出了一种交互式水彩画算法的新公式，该算法在许多重要方面都与现有研究不同。首先，我们的配方使用基于粒子的颜料流动模型，而不是基于网格的。其次，粒子表示是矢量而不是光栅，允许以任意分辨率进行渲染。第三，粒子更新步骤是一种受物理启发的程序算法，计算速度非常快。这些方法差异的结果意味着，与以前的工作不同，我们的算法可用于在低功率设备上生成高分辨率输出，同时仍重新创建交互式水彩画行为的有用子集。我们能够实现常见的水彩效果，例如边缘变暗、颜料密度不均匀、颗粒化和倒流。此外，

\*电子邮件：steved@adobe.com

†电子邮件：aravind@adobe.com

‡电子邮件：rmech@adobe.com

§电子邮件：daich@mac.com

版权所有 © 2012 美国计算机协会, Inc.

允许为个人或课堂使用制作部分或全部本作品的数字或硬拷贝，只要不为商业利益制作或分发副本并且副本带有本通知和第一页上的完整引文，则无需付费。必须尊重 ACM 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、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。向 ACM Inc. 的权限部门请求权限，传真 +1 (212) 869-0481 或电子邮件 [权限@acm.org](mailto:权限@acm.org)。

为了展示我们的公式的性能和实际实用性，我们与 Adobe Photoshop CS 5.5 一起发布了 Apple iPad 算法的简化形式 Adobe Eazel。艺术家们可以在他们的 iPad 上绘画，然后将构图传输到桌面机器上，在那里 Photoshop 可以以更高的分辨率重新渲染它。由于我们算法的新颖性，专业艺术家已经能够创作出具有与其他绘画工具相媲美的水彩画质量的独特画作，但在计算能力要低得多的设备上，证实了我们方法的成功。

## 2 相关工作

水彩画般的图像的创作已被广泛研究。通过分析图像内容并放置一系列笔触，大部分工作都集中在将照片自动转换为绘画 [Hertzmann 2003]。这些技术已经扩展到视频和实时工作 [Hertzmann and Perlin 2000; 卢等人。2010]。布索等人。[2006] 采用了不同的方法，通过组合应用于照片或 3D 渲染的许多不同图像过滤器来创建引人注目的水彩画。尽管这些结果具有令人愉悦的艺术性，但缺乏交互式、艺术家驱动的控制限制了它们在绘画应用中的实用性。

一些商用应用程序提供交互式水彩工具，例如 Corel Painter [2011] 和 Ambient Design ArtRage [2011]。在 Painter 的案例中，艺术家绘制一个笔触，然后等待处理程序计算扩散效果，然后才能放置另一个笔触，从而中断了绘画工作流程。ArtRage 的水彩笔允许快速连续地进行许多笔触，但不会计算颜料一旦沉积后在画布上的运动。最终，目前还没有一种商业上可用的绘画应用程序可以捕捉到真实水彩画的互动性和动态性。

为了创造更逼真的水彩画复制品，Curtis 等人。在他们的系统中模拟水和色素平流的基本过程[Curtis et al. 1997]。他们实现了对真实水彩行为的令人印象深刻的模拟，但由于算法的复杂性，无法实现完全交互的系统。最近，Chu 和 Tai [2005] 以及 Van Laerhoven 和 Van Reeth [2005] 在大量使用 GPU 实时计算其效果的交互式水彩画系统中展示了类似水平的真实感。由于这些算法对计算和资源的要求很高，它们尚未找到进入商业运输产品的途径，

类似地，交互式油画也被模拟，包括厚漆应用 [Baxter et al. 2004] 和复杂的刷漆沉积和弄脏 [Chu et al. 2010]。然而，油画模拟与水彩有着根本的不同，油画颜料一旦沉积在画布上，就不会在画布上随意流动，而这是水彩画的主要效果。因此，在处理性能、分辨率和质量方面所做的权衡在我们的工作中是根本不同的。

由于水彩画中存在复杂的纹理，矢量输出远不如光栅常见。Adobe Illustrator [2010] 等应用程序可用于通过使用扫描的水彩画笔描边的静态矢量图来创建类似水彩的矢量作品，但它缺乏水彩画的所有动态方面。扩散曲线 [Orzan et al. 2008] 还允许创建复杂的矢量图，但不清楚如何使用画笔笔触输入界面控制它们。最后，Ando 和 Tsuruno [2010] 的工作使用自适应向量表示来跟踪在水中混合的颜料流体的前沿。然而，由于缺乏扩散支持，随着时间的推移，前沿的复杂性变得无限，限制了模拟的可行持续时间。

## 3 算法

我们的模型背后的直觉是基于像素网格的模拟是密集的，而水彩笔画效果通常是稀疏的，并且颜料粒子通过画布媒体的特定路径并不像通常复杂的动态行为那么重要。事实上，真实水彩颜料中的每一个粒子都可以被认为是

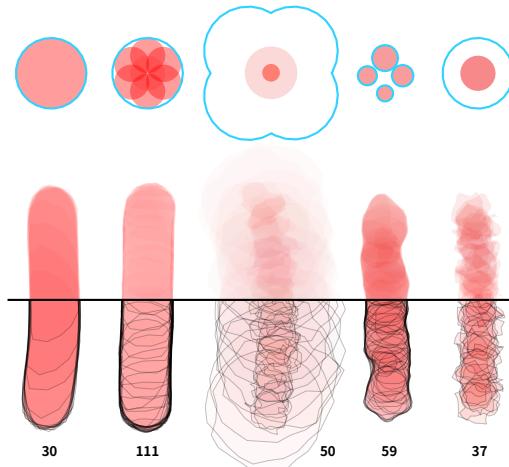


图 2：每种画笔类型的初始 *splat* 配置和生成的笔划。左到右：简单，湿对干，湿对湿，水滴状，松脆。青色轮廓表示每个邮票的水域。每个笔划下半部分的黑色轮廓表示最终的 *splat* 形状。还显示了每个笔划中的 *splat* 总数。

随机游走，聚合行为是水彩颜料的行为。基于这种直觉，我们对颜料采用稀疏表示，并使用随机游走算法在每个时间步更新其位置。通过仔细选择模型和更新方程，我们可以重现各种有趣的行为。

在我们模型的核心，我们将油漆颜料表示为动态“*splat*”粒子的集合，其中每个 *splat* 都是一个复杂的多边形  $n$  顶点。根据当前笔刷类型控制的规则，沿着笔划的轨迹放置许多这样的 *splat*，然后在每个时间步根据另一组规则平流这些 *splat* 的顶点。每个 *splat* 都有自己的不透明度值，并且 *splats* 使用标准透明度混合从后到前渲染。使用这种方法，我们能够重现各种动态水彩画行为，包括边缘变暗、颗粒化、回退和不同类型的笔触。

### 3.1 绘制初始化

在笔画输入期间，印章沿着笔画路径以均匀的路径长度增量放置，因此覆盖相同距离的慢速和快速笔画将导致放置相同数量的印章。每个图章都是一组一个或多个 *splats*（最初是圆圈），根据当前的画笔类型排列。我们以“wet-ondry”刷子为例，它由七块  $n=25$  顶点排列，其中一个位于图章位置的中心，六个放置在其周边（参见图 2）。每个 *splat* 存储运动向量，包括运动偏差向量  $\mathbf{e}$ ，和每顶点速度向量  $\mathbf{v}$ 。此外，*splat* 存储它的年龄一个（步骤），以及画笔类型的参数：粗糙度  $r$ （以像素为单位）和流量  $F$ （百分比）。这些参数在效果上与 MoXi [Chu and Tai 2005] 中使用的参数相似，但我们在算法中使用它们的方式不同。

在每张邮票上，画布上也会加入一定量的水。水不会在画布上移动，并且与 *splats* 列表分开存储，作为由 2D 单元格组成的栅格化“湿地图”。我们将湿贴图分辨率设置为与正在绘制的显示器相匹配，因此在 iPad 2 上，它是 1024x768 单元格。笔刷类型通过将常数值栅格化到湿贴图中来指定被润湿区域的大小和形状。该值表示每个单元保持湿润的剩余时间。如果单元格已经湿了，则存储最大值。

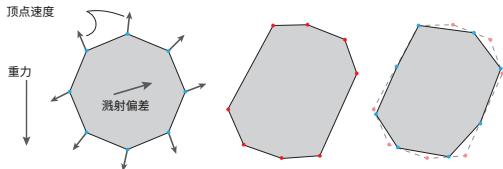


图 3：每个 splat 的运动由每个顶点的速度、splat 偏差和全局重力决定。从左到右：splat 的初始配置，平流后和边界重采样后。

用户选择以像素为单位的画笔描边大小，然后用于根据最终生成的描边的粗略大小来缩放 splats 和湿区域，以达到指定的大小。

### 3.2 颜料平流

在每个时间步，迭代实时 splats 集，更新每个顶点位置  $X_t$  到  $X_{t+1}$  基于方程，

$$d = (1-\alpha)b + \alpha \frac{1}{U(1, 1+\lambda)} v \quad (1)$$

$$X^* = \begin{cases} X_t + Fd + g + U(-r, r) & \\ \end{cases} \quad (2)$$

$$X_{t+1} = \begin{cases} X^* & \text{如果 } w(X^*) > 0 \\ X_t & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

在哪里  $G$  是一个全局重力向量， $\alpha$  是将 splat 运动偏差与每个顶点速度混合的调整参数，我们将其设置为 0.33， $U(-\lambda, \lambda)$  是一个均匀随机变量一个和  $b$ ，和  $w(X)$  是位置处的湿贴图值  $X$ 。基于 splat 参数和随机数，一个新的候选位置  $X^*$  计算，然后如果画布在该位置是湿的，则更新顶点；否则，顶点不会移动。参见图 3 中的说明。一旦 splat 的顶点全部更新，它的不透明度会通过保存“颜料量”重新计算，定义为不透明度乘以面积。

从概念上讲，这些方程体现了真实水彩颜料流中粒子所描绘的有偏随机游走行为。每个顶点的运动首先是它自己的速度和 splat 的偏置速度的组合——这允许 splat 继续扩大区域，同时也根据一些水速有效地移动。顶点速度因粗糙度而异，以再现画布介质的半渗透性。整体运动矢量  $d$  可以受到流动颜料特性的限制，流动颜料特性对应于涂料粘度的倒数。重力进一步偏向所有 splats，以提供油漆流入的首选方向。由粗糙度决定的最终随机参数是随机游走行为的来源，它包含水彩颜料的所有分支和粗糙方面。

在所有 splats 都被更新后，湿贴图也会通过递减存储在其中的所有非零值来更新。这有效地减少了每个单元的剩余湿度，当一个单元达到零时，颜料将不再能够流入画布的该部分。

### 3.3 采样管理

随着时间的推移，splat 中每个顶点的不同平流方向会导致 splat 具有非常不均匀的采样边界，从而产生不切实际的直硬边缘。在许多 splats 上，此工件可以在笔划中创建多面的多边形外观，尤其是当它们转角或具有导致相邻 splats 具有非常不同的湿度值的精细水特征时。我们有两种策略来处理这个工件。

第一个是限制 splat 中顶点的运动，使其距离它们的邻居不太远。对于 splat，每个顶点一世的新计算位置， $X_{-世 t+1}$ ，然后与它的邻居比较旧职位， $X_{-世 t}$  和  $X_{我+1 t}$ ，如果两者之间的距离对高于某个阈值，顶点一世的位置未更新（即， $X_{-世 t+1} = X_{-世 t}$ ）。

第二种策略是定期重新采样每个 splat 的边界。为此，计算 splat 的总周长，然后除以顶点数来计算每个顶点的弧长。然后从任意位置开始，splat 的顶点沿边界移动到均匀的弧长增量。

这两种策略还具有在一定程度上平滑 splat 边界的效果，同时限制可能出现在最终笔画外观中的多边形伪影。受约束的运动可以快速执行并具有所需的效果，但最终也会在一定程度上限制绘画的传播，这可能会以其他方式改变笔画的外观。相比之下，边界重采样速度较慢，但可以实现更高质量的最终输出，因此这就是我们使用的方法。图 3 显示了边界重采样对 splat 形状的影响。

### 3.4 终身管理

splat 具有三个生命阶段：流动、固定和干燥。当第一次添加到画布上时，一个 splat 正在流动。经过一定数量的步骤（刷子类型的参数）后，splat 停止平流并处于固定状态。固定后，splat 可能会被重新润湿以恢复平流。在一段时间没有移动后，确定颜料已经永久地弄脏了画布，并且碎屑被认为是干燥的。干燥后，将碎片光栅化为干燥的颜料缓冲液并从模拟中移除。这使得画布的渲染成本保持在上限，因为艺术家继续在绘画中进行许多笔画。

添加水可以重新润湿固定的板条，以实现类似回跑和羽化边缘的效果。当水被应用到画布上时，会检查固定 splats 的顶点以查看它们是否与新水重叠，如果重叠，则其中一些顶点是不固定的，并且 splat 的年龄会被重置。为了确定重新润湿的顶点是否变得不固定，根据 splat 与完全干燥的接近程度以及水的不固定特性设置的强度，针对阈值测试随机数。

一旦 splat 固定，它在其初始动量下的平流就完成了，因此 splat 的每个顶点速度向量以及 splat 的偏置向量都设置为零。当 splat 重新润湿时，顶点运动的方向由水的位置决定，模拟真实水流通过吸收画布的效果。当湿区域被光栅化时，它们还会将径向向外指向的每像素“水速”矢量写入湿地图。然后当通过公式 1 更新重新润湿的顶点时，splat 顶点的  $v$  向量被替换为从顶点位置的水速采样的向量， $v_w(X_t)$ 。

除了控制 splat 平流外，splat 的年龄也决定了颗粒纹理的影响。随着 splat 干燥，颗粒化对其外观的影响更大，因此使用纹理（由扫描的真实水彩笔触生成）对 splat 的不透明度应用一个小增量，权重取决于 splat 干燥的程度是。颗粒纹理是覆盖整个画布的单个图像，每个 splat 使用其画布坐标加上一个小的随机抖动来从中采样。

### 3.5 画笔类型

我们在我们的模型中实现了五种笔刷类型，它们再现了各种典型的水彩笔触，尽管还有更多变化

是可能的。刷子类型很简单，干湿，湿湿，斑点和松脆。每个印章使用不同的 splats 排列（参见图 2），并且具有不同的画笔参数设置。图 2 中的每个笔划都有一个目标宽度  $w=45$  像素。湿贴图单元在润湿时设置为 255，模拟以 30Hz 运行，因此它们需要 8.5 秒才能干燥。除非另有说明，splats 有生命  $/=30$ （所以 1 秒），粗糙度  $r=1$  像素和流量  $F=100\%$ 。重力矢量为  $\langle 0, 0 \rangle$ 。

简单的画笔在每个印章中使用单个 splat，并且由于 splat 演变的随机性以及由于平流到画布周围的潮湿部分而在笔画之间混合而表现出不均匀的颜料分布。splat 的直径  $d=w$  它的偏置向量是  $b=\langle 0, 0 \rangle$ 。

湿对干每张邮票放置 7 个 splat，其中 6 个安排在第 7 个的周边。中心板有  $b=\langle 0, 0 \rangle$ ，而六个周边在  $\theta=\{0, \pi, \dots, 5\pi\}$  有  $b=\langle 0, 0 \rangle$ 。

$\angle \theta, \theta$ ，在哪里  $d=w$ 。这会导致周边 splats 聚集在笔画的边缘周围，为边缘变暗的外观添加额外的颜料。

Wet-on-wet 会产生一个小的 splat ( $d=w/2$ ) 在更大的碎片内 ( $d=3w$ ) 每个邮票。这导致朝向笔画中心的区域逐渐变暗，以实现将颜料应用到湿画布上的羽毛状外观特征。两个 splats 都有  $r=5$  像素， $/=15$  步骤和  $b=\langle 0, 0 \rangle$ 。

斑点刷放置四个随机大小的 splat ( $d \in [w, w]$ ) 以每张邮票的十字图案，带有  $/=15$  步骤和  $b=\langle 0, 0 \rangle$ 。除了为 splats 的颜色添加一些噪点外，这还会产生更严重的不均匀笔触形状和颜料密度，类似于将水彩颜料应用于更粗糙的画布或使用更颗粒状的颜料。

最后，松脆的刷子在每个印章上放置一个 splat ( $d=w$ )，但设置  $r=5$  像素， $F=25\%$ ，和  $/=15$  减少顶点传播距离的步骤，同时增加对流随机游走分量的影响。结果是笔触外观表现出更明显的分支和破碎的笔触纹理，边缘非常粗糙。

请参阅图 4，以比较真实水彩颜料与我们的算法能够生成的效果类型。

## 4 应用

为了基于我们的算法创建一个可用的绘画应用程序，需要考虑许多因素。我们已经制作了桌面和 iPad 应用程序来实现我们的实时动态水彩画算法。

### 4.1 交互式渲染

我们的交互式绘画应用程序使用 OpenGL 来渲染 splats 和干颜料缓冲。由于 splats 可以是凹面甚至是自相交的多边形，因此标准渲染方法是不合适的。一个典型的解决方案是镶嵌多边形，但由于我们的多边形每帧都在改变形状，镶嵌的开销太高了。相反，我们使用每个 splat 的两遍模板缓冲区方法。对于第一遍，颜色缓冲区被屏蔽，模板操作设置为反转，splat 顶点被渲染为三角形扇形。这导致模板缓冲区在填充多边形的任何地方都存储一个值，而在其他地方存储一个零值。第二遍写入颜色缓冲区并将模板测试设置为等于 1 并将模板操作设置为零，并渲染一个仅覆盖单个 splat 边界框的四边形。这会使用适当的缠绕规则为多边形内部的像素着色，并且

还将模板缓冲区重置为下一个 splat 的全零，避免需要额外的通道。

OpenGL 会创建在屏幕上出现锯齿状的锯齿多边形，但全屏抗锯齿可能会很昂贵，并且可能在 slate 设备上不受支持。为了在我们的交互式绘画应用程序中平滑结果，我们使用了一个快速后处理过滤器，该过滤器基于一组启发式算法执行自适应的每像素方向模糊 [Lottes 2011]。对于任意分辨率的离线渲染，我们使用软件多边形光栅化器，其中包括高质量的分析抗锯齿。

在我们的交互式系统中，通过使潮湿区域中的文档变暗来提供有关潮湿地图当前状态的反馈。这允许用户知道他们的笔划何时会受到预先存在的画布湿度的影响。关于 splat 生命阶段的进一步反馈是由当前流动的 splat 的额外变暗给出的。通过这种方式，可以预测再润湿的效果，因为干燥的 splats 不会对额外的水做出反应，而只有固定的 splats 会。

### 4.2 用户界面

我们桌面应用程序的基本形式是在一个 GUI 旁边显示画布，用于控制绘画参数，例如选择画笔类型和大小，或更改画布纹理。用户可以在标准情况下使用鼠标进行绘画，也可以使用更复杂的输入设备，例如 Wacom 数位板。手写笔压力可以映射到画笔大小，以便用户可以通过改变笔画压力来动态控制标记的大小。类似地，可以映射手写笔倾斜或旋转以影响笔画 splats 的偏置矢量，以创建具有平流方向偏好的笔画。这对于应用在一侧形成硬边并在另一侧形成平滑衰减的油漆非常有用。

相反，我们的 iPad 应用程序具有不同的可供性和相应不同的界面。只有基于手指的输入可用，因此没有压力或倾斜灵敏度。另一方面，iPad 的加速度计可用于控制全局重力矢量，在 iPad 的方向和颜料的流动之间进行物理映射。此外，iPad 的小屏幕鼓励最大化屏幕空间用于绘画，所以我们不呈现任何屏幕界面，让画布占据整个空间。使用画布上的特定手势调用设置，允许用户控制完整算法的一部分功能。

### 4.3 矢量输出

保存画布时，会生成两个输出文件：渲染图像的位图为 PNG，所有 splats（包括干的）的矢量表示为 SVG [Dahlström et al. 2011]。有关直接嵌入在本文档中的 SVG 矢量数据的示例，请参见图 5。

虽然 SVG 规范包括对高级功能的支持，例如可以复制我们的颗粒纹理着色数学的图像滤镜效果和混合模式，但不幸的是，没有常用的 SVG 查看器支持这些功能。事实上，我们生成的 SVG 的复杂性，即使没有纹理但只有许多重叠的透明路径，也使得可用的查看器可能难以有效地显示它们。相反，我们的交互式应用程序能够显着更快地显示相同的数据，因为它使用 GPU 加速进行渲染。因此，目前，我们将 SVG 输出限制为仅存储透明填充路径，并将颗粒效果留到功能更强大的 SVG 查看器可用的时候。

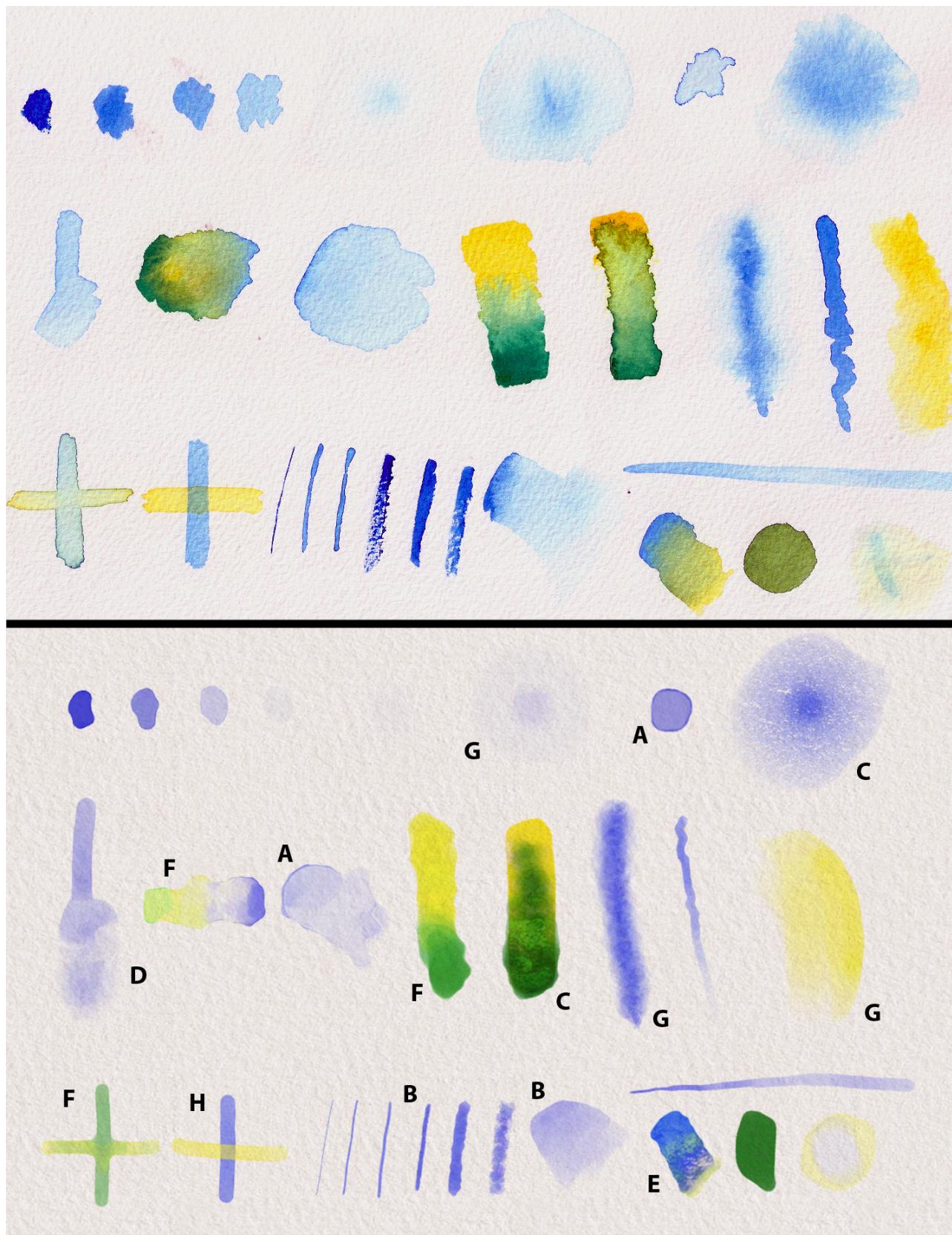


图 4：用真实水彩颜料（上）与我们的算法（下）制作的类似笔画的比较。纸张纹理被添加到我们的结果中以进行比较。选择笔触来展示各种特征水彩行为，包括边缘变暗（一个），不均匀的颜料密度（乙），造粒（丙），再润湿（丁），回跑（乙），颜色混合（戊），羽化（己）和玻璃（庚）。代表特定效果的笔画已标有相应的字母。虽然我们的算法不会做出相同的笔画，但它表现出与传统水彩画相同的表现力范围和深度。

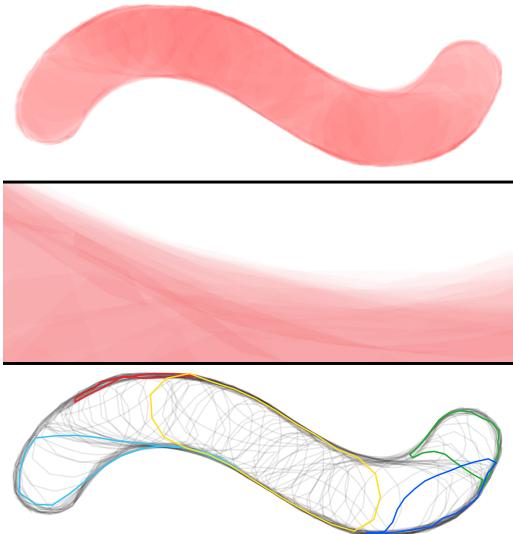


图 5：最佳：从左到右的画笔描边的矢量输出。放大以查看分辨率独立性。  
中间：拉斯-  
terized 版本，放大到 800% 以显示细节。  
底部：全部  
195 个 splats 被勾勒而不是填充，一些 splats 突出显示以显示形  
状变化。潮湿区域边缘的顶点容易“卡住”，因为它们的运动受  
到限制，这可能会导致泪珠形状。

## 5 个结果

由于我们算法的计算要求低，我们能够将它的一个版本发布为 iPad 应用程序，名为 Adob e Eazel for Photoshop CS5 [2011]。此版本包括一个基本功能集（仅干湿刷、无颗粒化、无再润湿）。它以 iPad 的原始分辨率 (1024x768) 运行，并且能够将文档发送到桌面版本的 Photoshop，从而以更高的分辨率和高质量的抗锯齿重新渲染文档。

由于这次公开发布，我们的算法被许多不同经验水平和审美风格的艺术家使用，从而产生了各种各样的不同作品（见图 6）。

### 5.1 性能

我们公式的性质意味着分辨率方面的性能并不是特别重要，因为交互式光栅化不会影响最终输出。相反，我们受到同时动画和渲染的活动 splat 数量的限制。具体来说，渲染是最昂贵的步骤，尤其是在 iPad 等低功耗设备上。

我们能够通过仅绘制流动 splat 的子集来提高渲染性能，调整不透明度以创建类似的大块笔划外观。一旦 splats 干燥，所有 splats 都会以正确的不透明度渲染到干燥的缓冲区中，从而创建更平滑、更高质量的最终笔触。

我们在配备 1GHz Apple A5 处理器和 PowerVR SGX 543MP2 GPU 的 iPad 2 以及配备 2.2GHz Intel Core i7 处理器和 AMD Radeon HD 6750M 显卡的 MacBook Pro 上测试了我们的性能，看看可以渲染多少个 splats 同时保持交互式帧速率。结果数据在表 1 中。为了将这些数字放在上下文中，图 1 中的绘画是在台式计算机上制作的典型示例，它进行了 383,145 个模拟步骤，总共 685,898 个 splats。

18,192 次冲程，平均同时活动 splat 计数为 134，最大为 6447。

毫秒/帧	iPad	MacBook Pro
33	400	4000
100	1000	10000

表格1：可以在不同帧速率和不同硬件上同时模拟和渲染的近似 splat 数量。

活动 splat 的数量决定性能这一事实意味着管理应用程序运行时性能的方法是限制该数量。为此，我们设置了不同画笔类型的最大寿命，以便在平均绘画速度下，只有目标数量的 splats 同时流动。

直观地说，由较大的画笔制作的较粗笔触的渲染成本应该更高，因为它们的像素数更高（尤其是对于像 iPad 这样的有限像素填充率的设备），但实际上它们更快，因为每个笔触路径长度放置的 splat 更少。这是因为印章间距设置为印章大小的百分比，因此较粗的笔划在连续的印章之间具有更大的距离，并导致在绘画时活动的 splats 更少。非常小的笔触会导致更多同时活动的 splats，因此渲染速度要慢得多。为了对抗这种影响，我们在小笔划中减少了 splats 的寿命，以使活动 splats 的目标数量更容易管理。

## 6 讨论

作为我们公开发布的结果，我们已经能够从用户那里收集到关于绘画应用程序的大量反馈，并且还可以看到各种各样的用户是如何成功地创作他们的作品，或者是如何努力创作他们的作品。

### 6.1 用户反馈

总的来说，用户反应不一。大量的 iPad 应用程序反馈都集中在界面和其他绘画功能上，例如撤消和图层。一个常见的感叹是，“我希望我有某种笔或画笔输入设备。”具体到实际的动态绘制行为，虽然很多用户对外观印象深刻，但很难学会控制它——一位用户说，“我肯定需要多做一些工作，我有一种开始的感觉。了解如何更好地使用它。”另一位后来说，“现在我觉得这种互动很自然。”这与传统的水彩颜料非常相似，后者是一些最难掌握的艺术媒介。坚持不懈并获得对应用程序更大控制权的艺术家（参见图 6 示例）能够使用混合行为来实现复杂的颜色渐变和纹理，而这是其他数字绘画工具很难制作的。他们对这种行为的一些评论：“我喜欢颜料中的‘流动’，在使用不透明度绘画时效果很好”，“就像尝试用超湿水彩画一样”，以及“这里的水彩风格很棒。”很难客观地说明评论是“好”还是“坏”——与任何其他艺术媒介一样，艺术家的个人风格是主要影响因素，有些艺术家会感到困惑和沮丧，而另一些艺术家会发现成功和机缘巧合，就像真正的水彩画一样。

### 6.2 限制

虽然具有许多优点，但我们的新配方与其他油漆模拟方法相比也存在缺点。油漆的稀疏向量表示有利于降低计算复杂度，但它确实提高了密集细节的成本，这意味着颗粒纹理等的向量表示是不可行的。

纯矢量数据。繁重的分支、错综复杂的流动和复杂的纹理都很难用纯矢量格式来表示，这就是我们依赖光栅技术进行颜料造粒的原因。

此外，由于颜料演化的程序化方法，模拟真实油漆行为的全部范围变得越来越困难，并且算法复杂性不能很好地扩展。相反，物理模拟可以以直接的方式将物理参数添加到统一的框架中，以重现其他类型的油漆，例如丙烯酸或油画颜料，或修改颜料的真实物理特性，例如粘度或粒度。通过物理模拟忠实再现真实油漆的保真度高于我们的方法。我们的目标是在交互性和质量之间取得平衡，因此我们专注于再现类似范围的动态行为，但具有独特的表达体验。

## 7 结论

我们提出了一种动态和交互式绘画引擎的新颖配方，它再现了水彩画的许多重要行为。splat 模型足够轻巧，可以让 iPad 等低功耗设备轻松运行绘画应用程序。矢量表示可以在任何分辨率下进行渲染，并为最终输出提供高质量的抗锯齿。我们证明，通过模型的暴露参数，可以实现各种不同类型的画笔和效果，从而实现全方位的表现力和创造性的可能性。

为了评估我们算法的实用性，我们在商业上发布了一个 iPad 应用程序，该应用程序实现了完整算法功能的一个子集，第一天下载量超过 4500 次，并在商店中排名第七畅销付费应用程序。

虽然水彩颜料模拟是我们的灵感，但要实现与艺术家对绘画行为的精心训练的期望相匹配的体验非常困难，而未满足的期望会极大地破坏体验（一种恐怖谷效应）。因此，该算法的目标不是在计算机上复制水彩画的体验，而是创建一系列动态行为，让用户获得类似风格的过程和结果，同时具有独特的性格它自己的。随着时间的推移和进一步的发展，我们算法的特殊感觉可能会以其他媒体有其追随者的方式达到用户所追求的自己的审美。在这方面，我们在传统媒体和数字媒体的范围内创造了一些新的东西。

未来的工作是继续探索这种算法可能产生的效果范围，并看看是否可以模拟其他绘画媒体或其他有用的艺术工具。矢量 splat 公式在其他受模拟启发的领域也可能具有潜力，在这些领域，计算能力无法用于成熟的物理模拟。从应用程序开发的角度来看，我们希望继续迭代我们的界面，包括图层等常见的绘画功能，让用户定义新的画笔类型的界面，以及提高用户更轻松地从照片或其他源材料工作的能力。

## 致谢

我们要感谢所有提供宝贵反馈的 Beta 版测试人员。特别感谢我们的特约艺术家：John Derry、Paul Kercal、Mike Miller、Benjamin Rabe、Don Shank 和 Mike Shaw。

## 参考

- 一个德必小号YSTEMS一世数控., 2010. 插画师 CS5。 <http://www.adobe.com/>。
- 一个德必小号YSTEMS一世数控., 2011. Adobe Eazel for PhotoShop CS5。 <http://itunes.apple.com/us/app/adobe-eazel-for-photoshop/id421302663>。
- 一个亿邦D设计, 2011 年。 ArtRage 3.5. <http://www.环境设计.com/>。
- 一个NDO, R., 和吨SURUNO, R. 2010. 向量流体：一个向量表面流动的图形描述。在非写实动画与渲染国际研讨会论文集, 129–135。
- 乙阿克斯特, W., W结束, J., 和大号在, MC 2004. IMPaSTo: 一个逼真的交互式绘画模型。在非写实动画与渲染国际研讨会论文集, 45–148。
- 乙乌索, A., K一个计划, M., T霍洛特, J., 和小号亿万, 外汇 2006. 具有时间连贯性和抽象性的交互式水彩渲染。在非真实感动画与渲染国际研讨会论文集, 141–149。
- C胡, NS-H., 和吨人工智能, C.-L. 2005. MoXi：实时墨水显示 person 在吸水纸上。在 ACM SIGGRAPH 会议记录, 504–511。
- C胡, N., B阿克斯特, W., Wei, L.-Y., 和G奥文达拉朱, N. 2010. 3D 画笔的细节保留绘画建模。在非写实动画与渲染国际研讨会论文集, 27–34。
- C奥雷尔, 2011. 画家 12。 <http://www.corel.com/>。
- C乌尔蒂斯, CJ, 一个纳德森, SE, SEIMS, 乙脑, F莱舍尔, 千瓦, 和小号阿莱辛, DH 1997. 计算机生成的水彩画。在 ACM SIGGRAPH 会议记录。
- D阿尔斯特伦, E., D恩格勒, P., G拉素, A., L伊利, 厘米C-C马克, CS车友, D., 和WATT, J. 2011. 可缩放矢量图形 (SVG) 1.1 (第二版)。W3C。 <http://www.w3.org/TR/2011/REC-SVG11-20110816/>。
- H厄兹曼, 一个。, 和磷尔林, K. 2000. 绘画渲染 用于视频和互动。在非写实动画与渲染国际研讨会论文集, 7–12。
- H厄兹曼, A. 2003. 基于笔画的渲染调查。 IEEE 计算机图形学和应用程序 23(七月), 70–81。
- 大号爱荷芬, 电视, 和R以太坊, FV 2005. 实时仿真 水性涂料的化合。电脑动画和虚拟世界 16 (七月), 429–439。
- 大号奥特斯, T. 2011. FXAA。英伟达。 [http://开发者.nvidia.com/sites/default/files/akamai/gamedev/files/sdk/11/FXAA\\_WhitePaper.pdf](http://开发者.nvidia.com/sites/default/files/akamai/gamedev/files/sdk/11/FXAA_WhitePaper.pdf)。
- 大号ü, J., S安德, 光伏, 和F英克斯坦, A. 2010. 互动 图像、视频和 3D 动画的绘画风格化。在 ACM SIGGRAPH 交互式 3D 图形和游戏研讨会论文集, 127–134。
- RZAN, A., B乌索, A., W因内默勒, H., B阿尔拉, P., 吨霍洛特, J., 和小号阿莱辛, D. 2008. 扩散曲线：平滑阴影图像的矢量表示。在 ACM SIGGRAPH 会议记录, 92:1–92:8。

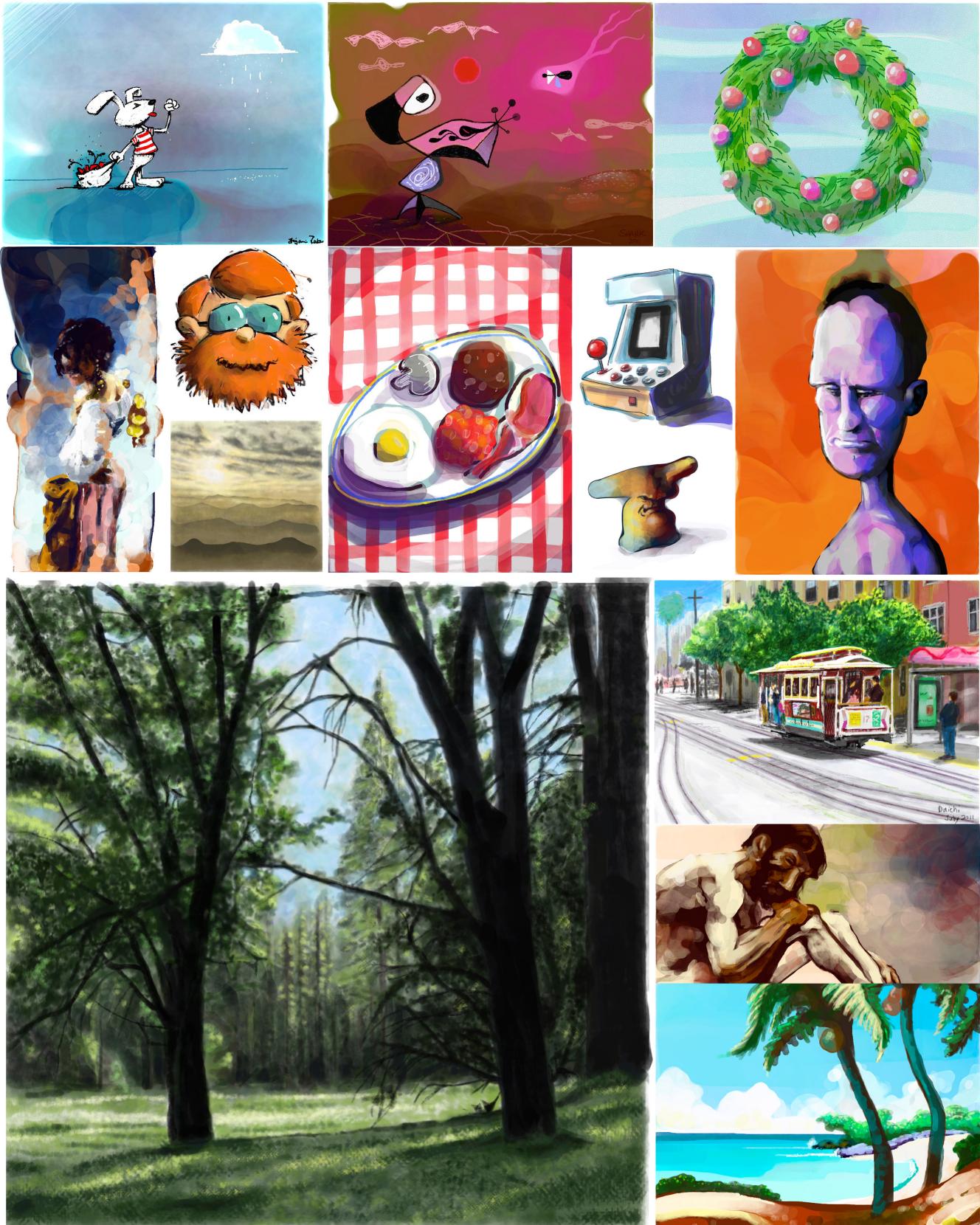


图 6：使用我们的桌面和 iPad 软件展示水彩画不同风格特征的专业艺术家的绘画示例。请注意我们算法的可实现外观范围。经许可使用。