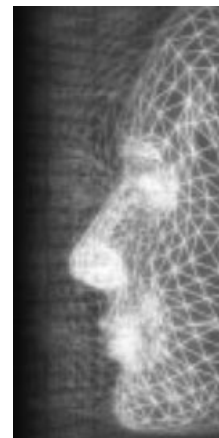


自然现象和特殊效果

实时模拟水性漆

作者: Tom Van Laerhoven* 和 Frank Van Reeth

现有的关于薄水漆应用的工作主要集中在从输入图像中自动生成绘画风格的图像，而忽略了绘画是一个直观地应该是交互式的过程这一事实。创建实时交互系统的努力仅限于单一的绘画媒介，结果往往受到实时性和模拟复杂性之间的权衡影响。我们报告了一个新系统的设计，该系统允许实时、交互式地创建带有薄水性颜料的图像。我们主要针对水彩的模拟，但系统也可以模拟水粉和东方黑墨。在分层画布设计中，绘画的运动受基于物理的规则和启发式规则的控制。通过使用 Kubelka-Munk 漫反射模型对层进行光学组合来渲染最终图像。参与模拟的动态阶段和渲染阶段的所有算法都在图形硬件上实现。使用该系统制作的图像包含可以在用真正的薄涂料制作的图像中识别的典型效果，如暗边效果、水彩上光、湿对湿绘画和不同颜料类型的使用。版权所有 # 2005 John Wiley & Sons, Ltd.



关键词: 油漆系统; 基于物理的建模; 非真实感渲染

介绍

创建传统绘画过程的数字等效物有几个优点。尝试各种技术和绘画媒体的可能性，可以控制干燥时间、消除错误、保存中间结果，以及引入各种数字工具的能力，使绘画系统成为新手和初学者的宝贵工具。经验丰富的艺术家。

对模拟过程的各个阶段进行评分，从而在系统提供的内容与艺术家的实际想法之间造成不匹配。我们的工作正是针对这些问题。

然而，由于这个过程的复杂性，实时模拟所有这些是一项具有挑战性的任务。现有的工作表明，视觉结果以及创作过程本身仍然存在许多问题。在西方和东方版本的数字绘画中，都可以获得相当逼真的结果，但通常以一种乏味、不直观的方式创建它们为代价。用户输入和渲染通常是分开发生的



图 1. 计算机生成的水彩图像。

* 通讯地址: TV Laerhoven, 哈瑟尔特大学——数字媒体和跨国大学 Limburg 专业中心, Wetenschapspark 2, BE-3590 Diepenbeek, 比利时。电子邮件: tom.vanlaerhoven@uhasselt.be

合同/赠款赞助商: 欧洲研究项目“Custodiev”; 合同/授权号: IST-2001-37116。

主要贡献

我们引入了一种新的画布模型，用于实时交互式模拟稀薄的水性颜料。它是第一个使用水彩颜料提供实时绘画体验的模型，同时包含足够的复杂性来捕捉其复杂的行为、它与画布的相互作用以及它的色彩特性。我们扩展了我们之前关于并行实现的工作¹

采用适用于图形硬件的新方法、Kubelka-Munk 漫反射模型以及使用与水彩相关的涂料介质（如水粉和东方黑色墨水）制作绘画的能力。

背景

捕捉绘画媒体的复杂性、多样性和丰富性的绘画系统直到最近才开始出现在文学作品中。Cockshott 认为现有绘画系统的主要问题是与传统方法和媒体制作的图像相比，它们产生的图像缺乏闪光。²他声称这是由于绘画模型的浅薄以及对真实绘画的过程和绘画行为缺乏了解造成的。因此，他自己的模型基于元胞自动机，包含了考虑表面张力、重力和扩散的规则。同时，Small 介绍了一种基于元胞自动机原理的水彩画布模型。³在他们的工作之前，实际的绘画过程大多局限于画笔印记的渲染，格林的绘画棱镜和斯特拉斯曼的毛刷效果显着。^{4,5}

柯蒂斯等。⁶采用更复杂的纸模型和复杂的浅层模拟来创建水彩图像，并结合了 Foster 和 Metaxas 的流体流动工作。⁷这幅画由一组有序的半透明釉或水洗组成。使用 Kubelka-Munk 方程对各个釉料进行渲染和组合，以生成最终图像。⁸他们的模型能够从湿中湿和湿对干绘画中产生广泛的效果。流体流动和颜料分散再次通过元胞自动机实现。事实上，元胞自动机⁹和相关技术在许多作者的工作中发挥着重要作用。^{2,6,10,11}

然而，上述所有工作更多地与自动渲染相关，而不是交互式绘画体验，主要是因为计算复杂性不允许实时处理。

百特等。是第一个为厚油状绘画介质提供完全交互式的基于物理的绘画模拟。^{12,13}IMPaSTo 应用程序是一个成熟的绘画系统，利用图形硬件对绘画流进行物理模拟，并通过 Kubelka-Munk 漫反射模型的交互式实现进行渲染。由于系统使用平流方案来模拟油漆动力学，它忽略了油漆介质的环境行为，如扩散、运行和滴落效果，这是我们在本文中的主要目标。

在几个商业绘画系统中也存在创建水彩图像的可能性。最重要的是 Corel Painter IX，它包含可修饰的湿润区域，让用户可以控制扩散过程。¹⁴

尽管两者都使用毛笔和水密切相关，但可以区分东方黑色水墨画和西方水彩画所追求的目标。前者使用高吸水性、更薄和更有质感的纸张类型。其他明显的差异可以在画笔类型和绘画技术中找到。几位作者对这两种技术进行了广泛的比较。^{15,16,17}

概述和架构

画布模型采用分层设计，由三个有源层和无限数量的无源层组成。被动层被认为包含先前绘制的已经干燥并且不再参与模拟的笔触，除非在最后一步中渲染画布。处理颜料和水动力学的模拟部分发生在活动层中。灵感来自柯蒂斯的三层帆布模型等人，⁶我们的活动层有非常相似的任务。然而，底层的计算模型非常不同（图 2）。使用这种三层设计的动机源于对油漆行为的分析；可以区分颜料或水的三种不同状态：

- 颜料和水在画布顶部的浅层中。
- 颜料沉积在画布上。
- 画布吸收的水。

在我们所说的浅流体层中，由水和颜料混合而成的 2D 流体表示画布顶部的笔划。水最终会蒸发或

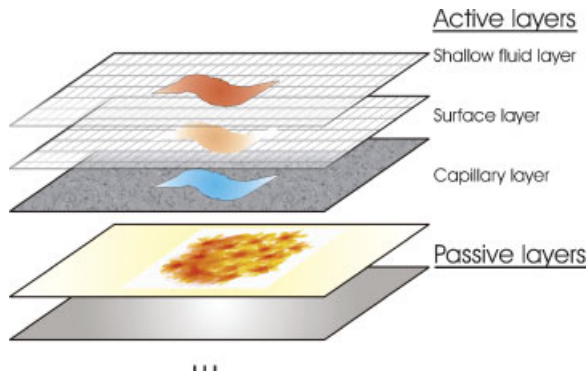


图 2. 画布模型，具有三个活动层和一个无限数量的无源层。

被吸收到画布毛细层中，而颜料颗粒会沉淀在画布表面的不规则处，以表层为代表。图 2 显示了画布模型的示意图。在随后的部分中，我们将详细介绍每一层的细节，从活动层开始。

浅流体层

在其初始形式中，笔画由位于画布表面顶部的浅层流体组成。流体流动随时间的运动由二维 Navier-Stokes 方程给出。¹⁸ 在文献中我们可以找到相当多的数值方法来解决这个问题，但我们必须记住关于这个问题的一些问题：

- 寻找解决方案的过程必须既快速又稳定。
- 流体流动必须受到笔划边界的约束。
- 我们希望在单个单元格的级别上添加约束。例如，一个单元格的含水量可能不会违反预定义的上限和下限。

柯蒂斯的画布模型等。⁶使用 Foster 和 Metaxas 提出的算法，⁷基于 Navier-Stokes 方程的有限差分法和显式 ODE 求解器。然而，这种方法并不适合我们的情况，因为它在某些情况下既慢又不稳定。主要问题是显式时间求解器与高扩散因子相结合，这就是我们在水性涂料的情况下要处理的问题。

更适合我们目的是 Stam 的工作，描述了一些快速稳定的程序来

使用隐式求解器模拟流体流动。^{19,20} 它使我们能够采取更大的时间步长并产生更快的模拟，而不会“爆炸”。百特等。在他们的粘性涂料应用中使用类似的方法。¹³

与水性颜料的主要区别在于额外的扩散步骤，以及模拟颜料和水与画布的相互作用的必要性。

向量场的状态~ v 定义 a 的速度
模拟过程中任何给定时间和空间的流体由方程 (1) 给出，它是 Navier-Stokes 方程的变体。¹⁹

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{4} \delta v - r p v p - r_2 v = \delta p \quad (1)$$

为了使这个程序适应移动油漆流体的目的，我们需要为此层引入以下变量：

- 一个向量场~ v 定义流体速度。在离散我们分配给每个单元格中心的表格一世; j 速度 δv_x ; v 是 p 我 j 。
- 水量 w 我 j 对于每个单元格，以高度测量，并限制在 $1/2 w$ 分钟; w 最大限度。
- 颜料量 δp 编号 p 我 j 对于每个细胞，作为细胞表面的一部分。每种颜料类型都由一个唯一的索引表示。
- 扩散常数 - 由流体的质量密度和粘度之比决定。

给定这些变量，我们主要可以按照 Stam 描述的求解方法来更新流体流动的状态。如以下部分所示，针对我们的问题进行了一些修改。

这部分模拟的时间步长需要四个操作：

1. 添加水、颜料和速度值。
2. 更新速度场~ v (等式 (1) 和部分)。
3. 更新水量 w (等式 (2) 和部分)。
4. 更新颜料数量 p 编号 对于每种颜料 (等式 (3) 和部分)。

一旦根据方程 (1) 更新了速度场，我们就可以用它来更新每个细胞的水量 (方程 (2)) 和每个色素的色素量 (方程 (3))：

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{4} \delta w - r p w p - w r_2 w = \delta p \quad (2)$$

$$\frac{\partial p_{\text{编号}}}{\partial t} + \frac{1}{4} \delta p_{\text{编号}} - r p p_{\text{编号}} p - p r_2 p_{\text{编号}} = \delta p_{\text{编号}} \quad (3)$$

updateVelocityField (v, source, dt)
addNewVelocities (v, source) 扩散
速度 (v, dt, diff_rate)
advectVelocities (v, dt)
addHeightDifferences (v, dt)

表格1。更新速度矢量 field

更新速度向量 场地

更新速度例程中的所有步骤都在表 1 中列出。“addHeightDifferences” 步骤说明了水高的差异，将在下一节中解释。

二维流体在给定时刻的状态可以建模为矢量场，该矢量场在二维网格的每个单元的中心进行采样。根据等式 (1) 更新速度现在等于解决出现在右侧的两项。²⁰

- 1.自我平流—— $\partial_t v - r \cdot \nabla v$
- 2. 扩散—— $r^2 \nabla^2 v$

自我推销

自平流计算速度场中的值如何影响速度场本身。在参考。²⁰ 描述了一种隐式方法，该方法将粒子分配给每个单元格中心，传达该单元格的速度值。直观地说，粒子落在速度场中并在结果位置重新评估。

扩散

由等式 1 右侧的第二项引起的速度场扩散说明了速度值以一定速率扩散。我们使用 Jacobi 方法来解决这个问题，它采用 Poisson 方程的形式，以便找到 ~

V新的.21

updateWaterQuantities (w, source, dt)
addWater (w, source)
diffuseWater (w, dt, diff_rate)
advectWater (w, dt)

表 2. 更新水量

更新水量

上一节处理了这个时间步的速度场计算。我们现在将使用这个新的向量场来更新水量的标量场。同样，这意味着首先添加额外的水量w来源 到标量场，然后求解方程右边的两项：

- 扩散—— $w r^2 \nabla^2 w$
- 平流 - $\partial_t w - r \cdot \nabla w$

实际上，此时可以使用上一节中的相同方法。然而，我们将开发我们自己的算法来扩散和平流水，因为我们想要在单元格的含水量的上下边界上添加约束，并且我们想要一种机制来模拟“暗边缘”效应（图 4（k））。

水扩散

对于水量的扩散过程，我们首先通过考虑相邻单元之间的水量差异来用额外的扩散运动来注释速度场。这是表 1 中之前未提及的“addHeightDifferences”步骤。

浅层细胞的水量以水高表示。在扩散过程中，水需要达到一个点，在该点每个单元包含相同的水高度。因此，我们计算在所有单元中获得相等高度所需的速度。得到的向量场~

VH 被结合
与速度场~ V老的 我们已经计算过：
V新的的 1/4！ -世V老的 p！ H V H， 在哪里！ -世 和！ H 是权重因子和！ -世 p！ H 1/41. 在我们使用的所有示例中！ H 1/40:06。这种方法的优点是取决于速度场的色素运动也会受到水量差异的影响。通过这种方式，我们可以获得“暗边”效果，这是因为在笔划的边缘，水蒸发得更快，并被笔划内部的水和颜料所取代。图 4(k) 显示了一个计算机生成的带有深色边缘的笔触示例。

水对流

对于每个细胞，我们测量与所有相邻细胞交换的水量。举个例子，

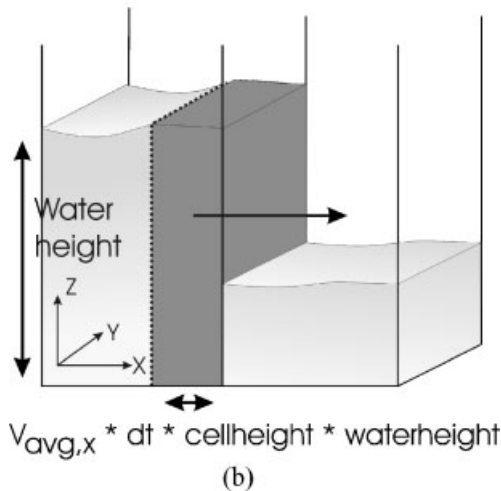
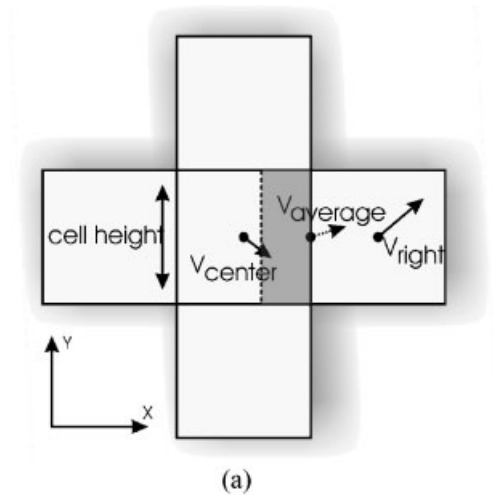


图 3. 将水移动到右侧相邻的单元格。黑暗面积代表排水量。

我们将计算从中心单元格流向其右邻单元的水量，速度为 \sim 和 \sim $V_{\text{中央}}$
 $v_{\text{对}}$ 分别如图3(a)所示：

$$V_{\text{平均}} = \frac{V_{\text{中央}} + V_{\text{对}}}{2} \quad \delta 4p$$

沿着这个边界的任何点都有速度 \sim 在给定的时间 Δt 移动一段距离 $\sim \Delta x$ 。因此，被置换的水体积所覆盖的面积由图 3 (a) 中的彩色区域给出，并且等于

$\sim \Delta x \Delta y \Delta z$

最后，根据电池中的水量，置换水的总体积 $\sim \Delta V$

ΔV 单元格高度 Δz 可以确定。水量变化由式 (5) 给出，如图3 (b) 所示

$$\Delta V = \frac{V_{\text{平均}} \Delta t \Delta x \Delta y}{\Delta z} \quad \delta 5p$$

遵循相同的程序来计算与其余三个邻居的交换水量。我们将结果相加并除以四，因为每个邻居对总通量的贡献正好是四分之一。可以通过简单地夹住所有单独交换的水量来限制电池的上水量和下水量。它还确保质量守恒。

浅水蒸发

流体层

这是通过在每个时间步去除一定体积的水来建模的 $\sim \Delta V$ 浅- ΔV 单元格宽度 Δx 单元格高度 Δz ，根据细胞的水面和蒸发量

速度 \sim

蒸发也发生在相邻没有水的细胞的侧面。通过这种方式，我们结合了水在笔画边缘蒸发得更快的事实。

更新颜料浓度

速度场不仅会引起水的运动，还会控制颜料浓度的运动。在最后阶段，将计算颜料浓度的变化

表 3 给出了根据给定速度场移动浅层流体层中的颜料浓度时所采取的三个基本步骤。它表明此过程类似于移动水量，添加新颜料量的标量场 p_{idx} 来源并求解等式 (3) 中的两项：

- 扩散 $\sim \Delta p$
- 平流 $\sim \Delta p$

颜料源术语由刷子添加的颜料量组成。

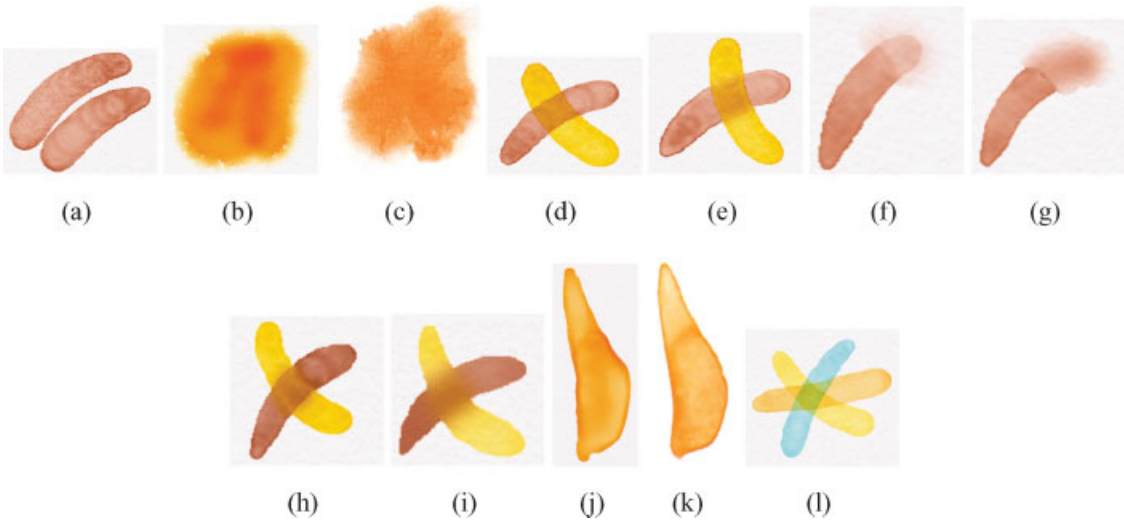


图 4. 显示各种水彩效果的笔触：高颜料颗粒和低颜料颗粒导致画布纹理突出的差异（a）；以计算机生成的笔画（b）和真实的笔画（c）显示羽毛状图案的湿叠湿画；具有高染色能力的颜料（在涂上时会导致颗粒留在纸上）（d）和具有低染色能力的颜料之间的区别很容易被拾起（e）；使用具有高染色力（f）和低染色力（g）的颜料，用湿刷子洗掉的笔触；高密度颜料迅速落到表面（h）和低密度颜料在浅流体层中停留时间较长（i）之间的区别；计算机生成的“暗边”效果

笔画（j）和真实笔画（k）；和“上釉”，通过一层一层地添加水彩薄层来实现（l）。

```
updatePigmentQuantities (p, source, dt)
addPigment (p, source)
diffusePigment (p, dt, diff_rate)
advectPigment (p, dt)
```

表 3. 更新颜料数量

颜料的扩散过程
浓度

这再次使用 Jacobi 方法来计算更新的标量场 $p_{idx,新的}$ 的每种颜料： $\delta t = \frac{1}{\rho} \frac{p_{idx,新的} - p_{idx,旧}}{p_{idx,新的}}$ ，和 ρ 表示颜料扩散速率。

颜料平流

由速度矢量场引起的色素平流或色素运动依赖于运动水的算法。对于与图 3(a) 中描述的情况类似的情况，颜料的流出部分是：

$$-p_{编号} \frac{1}{4} \frac{\delta p_{单元格高度} p_{我j}}{\delta p_{单元格宽度} \delta p_{单元格高度} p}$$

边界条件

到目前为止我们没有考虑的一个问题是油漆的移动必须尊重笔画的边界这一事实。在我们的例子中，边界被定义为油漆和大气之间的界面。然而，随着中风通过毛细血管活动扩展，边界可以移动，我们将在后面讨论。

在任何给定的时间步长上，都不允许颜料或水穿过这些边界。幸运的是，我们的水和颜料平流算法隐含地保证了这种情况。两种算法都在每个单元定义了物质向相邻单元的移动。如果我们知道哪些单元属于笔划，我们可以简单地检查相邻单元是否位于笔划内并允许接收材料。边界的另一个后果是它影响速度矢量场，使流体沿着它流动。这是通过设置

边界单元处速度矢量的法向分量为零。^{7,20}

表层

前几节讨论了浅层的水和色素的活性。颜料最初滴在浅层流体中，但最终沉积在纸画布的表面。同时，浅层流体层和表层之间存在颜料的连续转移（图 5）。

表层跟踪颜料的沉积量 $\delta p_{\text{编号} p_{i,j}}$ 对于每个单元格 δ 一世;
 $j p_{\cdot}$
颜料将分别根据方程式 (7) 和 (8) 进行吸附和解吸:

$$-p_{\text{广告}} \frac{1}{4} - \text{吨} \delta p_{\text{水}} \delta 1:0 - w_{\text{压裂}} p_{\delta 1:0} - H_{\text{编号} p_{\text{编号} p}} \quad \delta 7 p_{\cdot}$$
$$-p_{\text{德}} \frac{1}{4} - t p_{\text{部门} w_{\text{压裂}} \delta 1:0 - \delta 1:0 - H p_{\text{编号} p_{\text{编号} p}} \quad \delta 8 p_{\cdot}$$

两个方程都取决于水的量 $w_{\text{压裂}}$
在浅层中作为最大允许水的分数，纸高分数 H 在那个细胞中，以及色素 idx 的几个特性:

- 颜料造粒 0 编号 1.
- 颜料密度 0 编号 1.
- 颜料染色力 0 ! 编号.

造粒因子决定了纸高对颜料转移量的影响。具有高颗粒度的颜料将更容易在纸画布的空腔中沉降。高密度因子导致颜料沉积得更快。染色能力决定了颜料被浅水层吸收的抵抗力。拿着这些

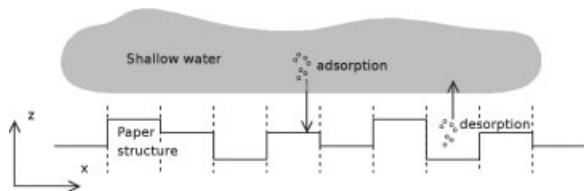


图 5. 颜料浓度之间的转移
浅流体层和表层受
颜料特性。

毛细管层

毛细层代表纸的内部结构。在模拟中，它负责吸收的水的运动，允许笔划跨越其原始边界。

在模拟的这一点上，水的运动受微观毛细管效应的控制，可以用扩散来描述。纸结构被表示为一个二维网格的细胞或“水箱”，可以交换一定量的水。如果每个细胞的容量不同，水会在纸中不规则地扩散，这就是我们想要建模的行为。我们要做的第一件事是通过生成纸状纹理来为每个单元分配容量。

纤维结构和帆布质地

画布的结构会影响流体在毛细管中吸收和扩散的方式。帆布质地也应该影响颜料的运输和沉积方式。帆布通常由不规则的吸附纤维网组成，纤维之间的空间充当毛细管以输送水。我们使用参考文献 [22] 中 Worley 描述的算法来生成纹理表面。几位作者使用了相同的策略。^{6,23} 它创建了一个可用作高度场的程序纹理（图 5）。

毛细管吸收、扩散和蒸发

笔触的水分会逐渐被纸画布吸收。在每个时间步，一定量的水 $-w \frac{1}{4} - \text{吨}$ 由浅层流体层转移到毛细管，由吸收率决定。这个量是根据留在浅层流体层中的水量和可用的毛细管空间来确定的。

毛细血管层中的水通过扩散过程移动到相邻的细胞，就像我们在浅层流体层中描述的那样，并通过蒸发以一定速率消失毛细管。蒸发过程会在每个时间步去除一定量的水

-w $\frac{1}{4}$ 毛细管-t 来自毛细层中没有水留在上面浅层流体层中的每个细胞。

图形硬件 执行

到目前为止，我们描述的所有算法都是使用 NVI-DIA 的高级着色语言 Cg 在图形硬件上作为片段着色器实现的。模拟循环依赖于帧缓冲区对象扩展，允许将渲染过程的结果存储在纹理中。表 1、2 和 3 中的每个操作都映射到一个或多个片段程序。

为以下每个数据集创建了具有浮点精度的纹理对象：2D 速度矢量、来自浅层流体和表层的水和颜料量、毛细管层中的水量以及画布纹理及其反射系数。共有四种纹理承载浅层流体层和表面层中的颜料浓度，因此当前实施将每个活动单元中的颜料数量限制为八种。

上面的列表不包括用于存储中间结果的几个纹理。进行了一些优化，包括通过缓存单元格的湿邻居来减少纹理查找，并确保只有画布的相关部分通过使用覆盖网格来更新，该网格跟踪被画笔触摸的区域。只是这些修改过的子纹理在下一个时间步中被处理。基于对油漆干燥时间的公平估计，每个瓷砖还带有一个寿命值注释。

画笔被实现为片段着色器，它根据用户输入在适当的纹理中写入颜料、水和速度值。

渲染画布

Kubelka-Munk (KM) 漫反射模型也被转换为片段程序。它迭代地合成每个釉料，包括画布反射系数，以产生最终图像。该算法假定描述每个层的低水平散射特性的三个参数是已知的：层的厚度 d ，以及衰减和散射系数 σ 和 s 。从这些属性中，KM 方程给了我们 R ，被反射的光的比例和吨，通过层传输的部分。

输入变量 d 通过测量浅流体层和表层中色素的总分数，在每个细胞水平上得出。衰减和散射系数作为统一参数传递给着色器。它们是用户定义调色板的一部分，其中包含每个 RGB 颜色通道的系数。最后，KM 组合方程的重复应用处理了多个堆叠层。

结果

所有结果都是使用我们的应用程序在配备 NVIDIA GeForce FX 6800 显卡的 Intel(R) Xeon(TM) 2.40GHz 系统上创建的。Wacom 数位板界面被用作画笔隐喻。在所有情况下，画布测量了 800 600 个单元格，覆盖了 32 32 个图块。当用户在同一活动层中覆盖非常大的区域并且绘制速度足够快以至于干燥过程不会停用覆盖网格中的任何图块时，20 帧/秒的帧速率会受到影响。在这种情况下，用户交互仍然可能以正常帧速率的一半左右。为用户提供直观的界面，显示画布和具有 12 种不同颜料类型的默认调色板。基本操作包括保存中间结果的可能性，以及干燥、清除和开始新图层等画布操作。

水彩

图 4 中的笔划显示了典型水彩画效果的示例。使用我们的系统创建的几个图像如图 6 所示。

东方水墨

东方绘画所用的笔法和技法虽然与西方绘画大不相同，但颜料和水的力学原理却十分相似。帆布一般更有质感，吸水性更强，致密的黑碳颗粒更小，能够扩散到纸张中。通过生成更粗糙的画布纹理并使用更高的吸收常数，在我们的模拟中很容易获得前一个属性。尽管我们的画布模型没有模拟画布结构内部的颜料颗粒，但墨水扩散仍然可以由顶层处理并产生典型的羽毛状图案。调色板由非常深色的颜料组成，具有高



(a)



(b)

图 6.几个计算机生成的水彩图像。

密度。图 7 描绘了一幅计算机生成的黑色墨水画，与原始的“La Mort”进行了比较。

水粉

水粉是一种添加了不透明白色颜料的水彩画。这会产生比普通水彩更强的颜色。一层油漆覆盖了下面的所有层，因此油漆不涂在釉料中。还，



(a)



(b)

图 7. 使用系统 (b) 创建的东方黑色墨水图像，基于 Marie-Ann 的原始“La Mort”

博内特 (一)。

水粉不会被画布吸收，而是以厚厚的一层留在表面上，形成平坦的颜色区域。这些属性可以映射到我们的模型，方法是用更简单的算法替换 KM 光学模型，该算法基于局部色素将图层混合在一起



图 8. 计算机生成的水粉画示例
图片。

浓度。使用更高的粘度系数并在刷子中加入更多颜料会导致更厚的油漆层。图 8 显示了计算机生成的水粉画示例。

结论和未来工作

在本文中，我们展示了对基于物理的系统的研究结果，该系统用于使用水性涂料创建图像。目标是设计一个实时运行的系统，同时能够重现该媒体特有的各种效果。我们使用几个片段程序在图形硬件上实现了一个原型，这些片段程序对存储在纹理对象中的模拟数据进行操作。结果表明，可以实现广泛的效果。创建它们的交互过程得到了一些用户的积极评价。尽管大多数用户并未将当前使用的简单画笔模型列为主要缺点，但未来的工作包括设计更好的画笔模型以产生更逼真的笔触形状。

致谢

我们衷心感谢欧洲区域发展基金 (ERDF)、佛兰德政府和佛兰德宽带技术跨学科研究所 (IBBT)，它们为本文报告的部分研究提供了资金支持。部分工作也由欧洲研究项目 IST-2001-37116 'CUSTODIEV' 资助。我们感谢 Marie-Anne Bonnetterre 和 José Xavier 为我们提供了“La Mort”的数字版本。我们还要感谢 Koen Beets 和 Bjorn Geuns 提供有用的建议、宝贵的反馈以及分享他们在该领域的知识。

参考

1. Van Laerhoven T, Liesenborgs J, Van Reeth F. 分布式纸模型上的实时水彩画。在 2004 年国际计算机图形学论文集，2004；第 640-643 页。
2. Tunde Cockshott M. Wet and Sticky: 基于计算机的绘画的新模型。博士论文，格拉斯哥大学，1991。
3. Small D. 通过模拟扩散、颜料和纸纤维来建模水彩。在 SPIE 的诉讼程序，1460, 1991 年。
4. Greene R. 绘图棱镜：多功能图形输入设备。在第 12 届计算机图形与交互技术年会论文集。ACM 出版社：美国纽约，1985 年；103-110。
5. Strassmann S. 毛刷。在第 13 届计算机图形与交互技术年会论文集。ACM 出版社：美国纽约，1986 年；225-232。
6. Curtis CJ, Anderson SE, Seims JE, Fleischer KW, Salesin DH. 计算机生成的水彩画。在第 24 届计算机图形与交互技术年会论文集。ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.: 美国纽约，1997；421-430。
7. Foster N, Metaxas D. 逼真的液体动画。在图形模型和图像处理，1996；第 471-483 页。
8. Kubelka P, Munk F. 一篇关于油漆层光学的文章。在 Z. 科技物理，卷。1931 年 12 月；593-601。
9. 沃尔夫拉姆 S. 一种新的科学 e (第一版)。Wolfram Media, Inc.: 香槟，伊利诺伊州，2002 年。
10. Zhang Q, Sato Y, Takahashi JY, Muraoka K, Chiba N. 基于简单元胞自动机的墨水行为模拟及其在类似 suibokuga 的 3d 树木渲染中的应用。在可视化与计算机动画杂志 1999；27-37。
11. Yu YJ, Lee DH, Lee YB, Cho HG. 写实东方绘画的交互式渲染技术。在 WSCG'2003 杂志 2003；11: 538-545。
12. Baxter W, Scheib V, Lin MC, Manocha D. Dab: 使用 3D 虚拟画笔进行交互式触觉绘画。在 SIGGRAPH 2001, 计算机图形学论文集, Fiume E (编辑)。ACM 出版社，2001；461-468。
13. 巴克斯特 W、温特 J、林 MC。Impasto: 一个逼真的油漆模型。在第三届非写实动画与渲染国际研讨会论文集，2004；第 45-46 页。

14. 科雷尔。Corel Painter IX. 万维网, <http://www.corel.com/painterix>, 2004 年。
15. Lee J. 基于物理的毛笔绘画建模。在第五届计算图形和可视化技术国际会议论文集关于万维网上的可视化和图形, 爱思唯尔科学公司, 1997; 第 1571-1576 页。
16. Lee J. 模拟东方水墨画, 第 19 卷。IEEE 计算机学会出版社, 1999; 74-81。
17. 郭 Q, 国二 TL. "nijimi" 渲染算法, 用于创建高质量的黑色水墨画。在计算机图形学国际 '03 论文集, 2003; 第 152-161 页。
18. Kundu PK, 科恩 IM. 流体力学 (第二版)。学术出版社, 2002。
19. Stam J. 稳定流体。在 Siggraph 1999, 计算机图形学论文集, 罗克伍德 A (编辑)。艾迪生卫斯理朗曼: 洛杉矶, 1999; 121-128。
20. Stam J. 游戏的实时流体动力学。在游戏开发者的诉讼, 2003 年 3 月。
21. Golub GH, Van Loan CF. 矩阵计算s (第 2 版)。美国马里兰州巴尔的摩, 1989 年。
22. Worley S. 细胞纹理基函数。在第 23 届计算机图形与交互技术年会论文集。ACM 出版社: 美国纽约, 1996 年; 291-294。
23. Sousa MC, 布坎南 JW. 石墨铅笔材料的观测模型。计算机图形学论坛2000;19:27-49。

作者简介:



汤姆·范·拉尔霍文 是比利时迪彭贝克哈瑟尔特大学 (UHasselt) 的计算机科学研究助理。他于 2000 年在 UHasselt (原 LUC) 获得计算机科学硕士学位, 目前正在攻读博士学位。同样在 UHasselt 的数字媒体专业中心 (EDM) 的学生。他的研究活动涉及计算机动画、基于物理的建模和动画、非真实感渲染以及并行和分布式算法。



弗兰克·范里斯 是比利时迪彭贝克哈瑟尔特大学 (UHasselt) 的计算机科学教授。他是 UHasselt 数字媒体专业中心 (EDM) 的副总经理。他于 1987 年在布鲁塞尔自由大学获得计算机科学硕士学位, 并于 1993 年在 UHasselt (原 LUC) 获得计算机科学博士学位。他的研究兴趣包括计算机图形学、计算机动画、网络虚拟环境、人机交互和多媒体技术。他在上述领域发表了 100 多篇科学论文。他是 ACM、计算机图形学会 (CGS)、Eurographics 和 IEEE 的成员。