

一种基于灰度合成生成灰色素描图像及彩色素描图像的改进算法

樊超, 204712224

关键词：数字图像素描、高斯模糊、图像除法混合、RGB-YUV 空间转换

摘要：素描是指由铅笔、钢笔、蜡笔、粉笔等，以线条来画出物象明暗的单色画。数字图像素描是指通过计算机程序将一张普通风格的数字图像转换成为具有素描风格的图像。本文介绍了一种基于灰度合成的数字图像素描算法，并对其加以改进算法，实现了对数字图像的灰色素描和彩色素描：首先将原始 RGB 图像转化成灰度图像，然后使用不同程度的高斯模糊算法对灰度图像进行模糊化处理，得到一张轻微模糊图像和一张中度模糊图像，将灰度图与轻微模糊图相减可生成一张边缘图像，用中度模糊图减去边缘图可得到最终模糊图，最后用灰度图与最终模糊图进行除法混合即可得到一张细节丰富的灰色素描图像。对于彩色素描，只需要将 RGB 空间的图像转换到 YUV 空间，并对 Y 通道的图像进行上述运算后，再转换回 RGB 空间着色，即可得到其彩色素描图像。

概述

随着数字图像采集设备的不断升级以及各种以图片分享为主的 APP 不断涌现，简单的数字照片分享已经不能满足人们日益增长的社交和娱乐需求，各种风格化的图片分享成为了一种新的社交和娱乐方式，如将普通风格的数字照片转换成具有素描、水彩、油画、卡通等风格化的图像在年轻人中已经十分流行。

素描图是其中基础也是最流行的风格之一。素描是指使用绘图的工具使其创作表现在二维材质上的视觉艺术和造型艺术，其用单色的线条在二维的画布上创造出明暗对比强烈、细节丰富的画像，非常具有视觉冲击。素描有别于水彩、油画等，其着重于线条的表现方式，以线条的粗细轻重来描述物体的明暗深浅，并且不须顾虑物体细节的色调色值，画面借由明暗光影的衬托来突显主题，其明暗阶调分层详细，在不同的微细明暗变化中展示出图像的立体感及绘画所表达的情感。现在也有很多艺术家用不同颜色的绘画工具对素描进行着色，生成彩色素描，其除了具有素

描以上的特点之外，在颜色上更为丰富一些。

本文基于冯捷[4]等人在 2009 年提出的基于灰度合成的素描效果生成算法，并在其基础上加以改进。改进的地方主要是取消了其文章中需要生成负片的过程，以及对模糊图做了边缘图相减，使最终生成的素描图像比冯捷等人的结果细节更加丰富、纹理更加清晰，并结合 Lu[3]等人文章中彩色素描的生成方法，同时实现了将数字图像转化为灰色素描和彩色素描。此文的素描生成算法原理简单、易于实现、运算快速，且生成的图像细节丰富，对素描风格还原度较高。

研究现状

数字图像素描算法是计算机视觉中图像艺术效果研究的一个重要方向，国内外的学者已经对其进行了大量的研究并提出了多种实现方式。

王进[6]等人在 2002 年提出了一种基于数字图像自动生成素描图的算法，其算法主要是在 M.C. Sousa 和 J. Buchanan[7][8]等人的方法上加以改进，减少了原有方法中的人工干预过程。Markovic[5]等人在 2005 年通过边缘探测的方法实现了素描生成算法，该算法的优点在于只生成其重要的轮廓线条，但其缺点也很明显，所生成的图像轮廓与原始图像差异较大。黄华[1]等人在 2009 年的文章中先对图像做双边滤波处理，然后计算其图像颜色差异图和阴影重要性图，并根据以上两张图生成其素描轮廓图和素描阴影图，最后将这两张图叠加生成了素描图像。冯捷[4]等人在 2009 年通过灰度合成的方法生成了素描图像，其算法过程是：将原始图像生成灰度图，对灰度图取反得到灰度图的负片，对负片做高斯滤波生成其模糊图，最后通过除法混合来叠加灰度图和模糊图生成了素描图。Lu[3]等人在 2012 年提出了一种将素描和色调相结合的算法，这篇文章的方法主要分为两个部分：第一部分通过原始图像生成素描笔画；第二部分通过原始图像生成铅笔色调；最后再将两个部分结合起来生成了最终的素描图像。姚敏[9]等人在 2017 年提出了一种基于离散小波变换的素描图像生成算法，该算法在灰度图像上利用快速小波正变换、去除低频系数、快速小波反变换等方法提取图像边缘，然后对图像做倒置求反处理，最后对图像做锐化和平滑处理来生成素描图像。

冯捷[4]等人的方法具有原理简单、易于实现、运算快速且成像细节丰富等特点，本文即在冯捷等人的研究成果上加以改进，实现了图像的灰色素描和彩色素描算法。

算法研究

原始算法

冯捷[4]等人的算法流程如图 1 所示：

1. 将原始 RGB 图像转换成灰度图；
2. 对灰度图取反生成其负片图；
3. 对负片图做高斯低频滤波处理，得到负片模糊图；
4. 将灰度图与负片模糊图进行除法混合得到素描图。

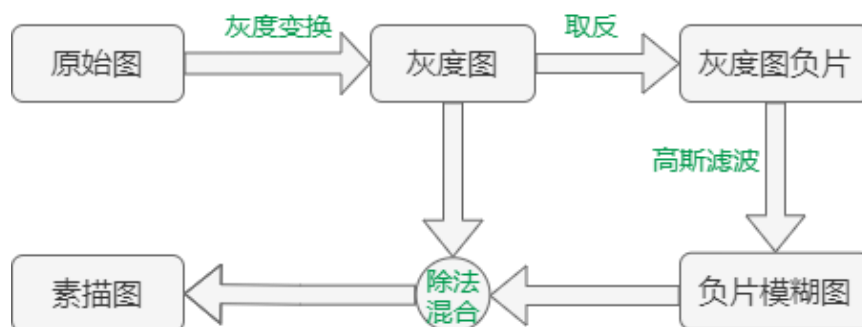


图 1 冯捷等人的算法流程图

但是冯捷等人的算法存在两个问题：一是他们对灰度图做了取反处理，但是在除法混合中又对负片模糊图进行了取反。他们在算法中对同一个图片在同一流程中做了两次取反处理，所以可以我们合理的猜测其取反处理是多余的，最后实验证明也确实如此。二是冯捷等人的算法生成的素描图像轮廓颜色较浅，细节不够丰富。虽然可以控制模糊图的模糊程度来调整颜色深浅，但其只能控制整体的色度变化，不能仅仅加深其轮廓和细节部分的颜色。

改进的算法

针对冯捷等人算法中主要存在的两个问题，此文对其算法做出了改进：一是取消了其算法中的取反处理。二是将模糊图与边缘图相减后生成了最终模糊图后，再将此最终模糊图与灰度图进行除法混合运算生成素描图。这个改进使生成的素描图纹理更加清晰，细节更加丰富。

改进的算法流程如图 2 所示：

1. 将 RGB 图像转换为灰度图像；
2. 对灰度图做不同程度的高斯低频滤波，生成一张轻度模糊图和一张中度模

糊图；

3. 将灰度图与轻度模糊图相减生成边缘图，再用中度模糊图减去边缘图生成最终模糊图；
4. 将灰度图与最终模糊图做除法混合运算，得到最终的素描图。

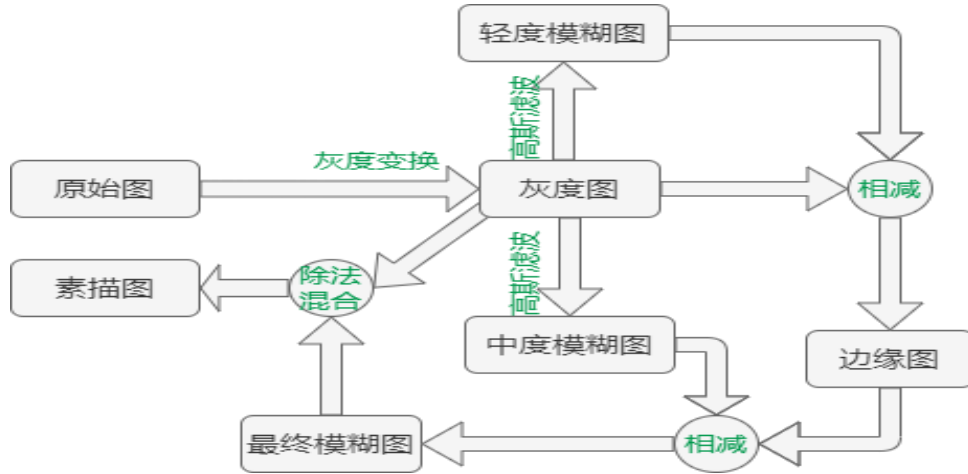


图 2 改进后的算法流程图

彩色素描算法：只需要将原始 RGB 空间的图像转换到 YUV 空间，对 Y 通道的图像做上述运算后，再将 YUV 空间的图像转换到 RGB 空间即可完成着色，生成其彩色素描图像。

算法对比

如图 3 所示，我们将冯捷等人的素描生成图（左图）与本文改进后的素描生成图（右图）做了对比。左图苹果表面的纹理比较模糊，色彩浓度较浅，而右图的纹理更加清晰，颜色比较浓郁，素描的颗粒感更强，比左图包含了更多的细节。

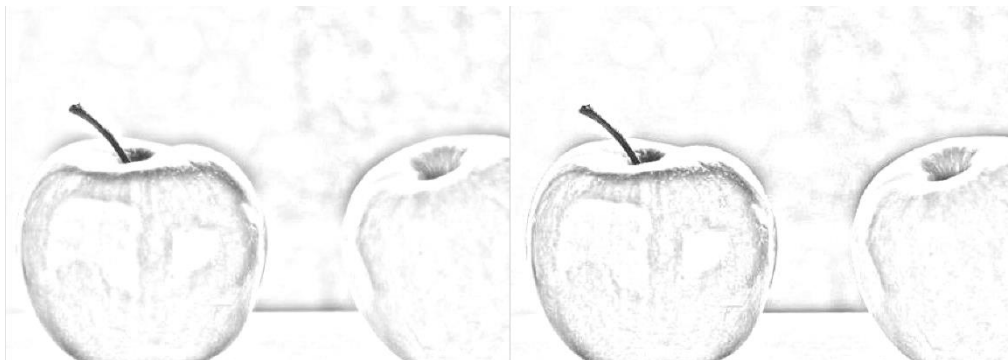


图 3 算法对比，左图为冯捷等人的算法生成图，右图为本文改进的算法生成图。可以看到改进算法生成的素描图细节更加丰富，纹理更加清晰。

RGB 图像转化为灰度图像

RGB 是一种有色的颜色编码模式，其每个像素点由红、绿、蓝三种色彩通道组成，不同亮度的红绿蓝通道可以混合成为各种不同的颜色。灰度模式是另外一种颜色编码模式，其图像只有黑白灰三种颜色，其像素点的数值大小表示灰色的明暗程度，最小值为 0 表示黑色，最大值为 255 表示白色。将 RGB 图像转化成灰度图，就是要将 RGB 三个不同通道的颜色数值乘上其对应的权重再相加，得到图像整体的颜色亮度表示。根据 Rec.601 标准，其转换公式如下所示：

$$Y_{gray} = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B \quad (1)$$

高斯滤波

高斯滤波是一种线性平滑滤波，适用于消除高斯噪声，该技术广泛应用于数字图像的降噪和模糊化处理。高斯滤波用正态分布计算图像中每个像素点的变换，其高斯内核公式如（2）所示， r 表示其两个点之间的欧式距离， K 和 σ 两个参数在计算中由输入给定， σ 表示正态分布中的标准差。

$$G(r) = K * e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad (r^2 = x^2 + y^2) \quad (2)$$

在二维离散图像的计算中，高斯滤波的本质就是求中心点与周围点带权重的平均值。图 4 表示了一个 $3 * 3$ 大小的高斯内核的权重分布矩阵，其前面所乘的系数为各个点权重之和，其目的是对最后计算结果做归一化处理。

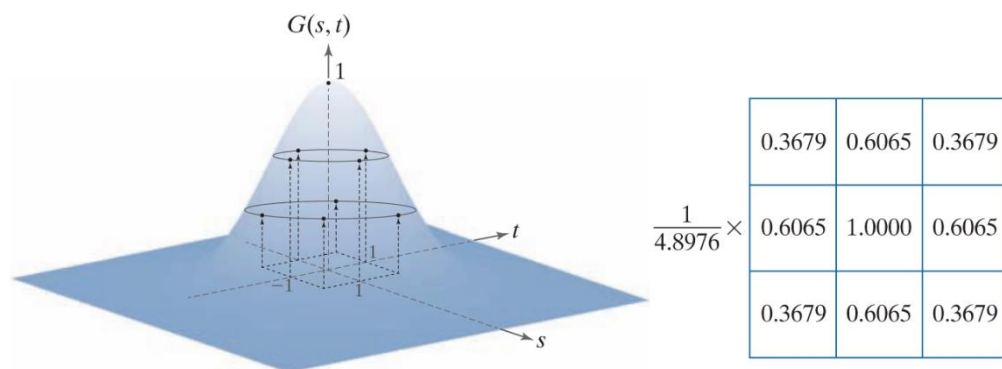


图 4 高斯滤波内核权重示意图

在对二维图像做高斯模糊时，我们只需要设置一个合适的高斯内核（其高斯内

核的长和宽必须是奇数), 然后对图像中每个像素点及其周围像素点与高斯内核中的对应的权重值相乘再相加即可。

需要注意的是, 在计算高斯模糊时, 我们通常会在图像边缘补上对应行列数的 0 来处理图像边缘外像素值缺失的情况。但在本文中, 我们需要选取边缘的像素值而非 0 值来作为填充。其原因如图 5 所示, 由于在算法的后面过程中我们会做除法混合运算, 如果以 0 值来填充, 在某些情况下将会在素描图的边缘生成一些黑色线框, 而用边缘值来填充就可以避免这种情况的发生。

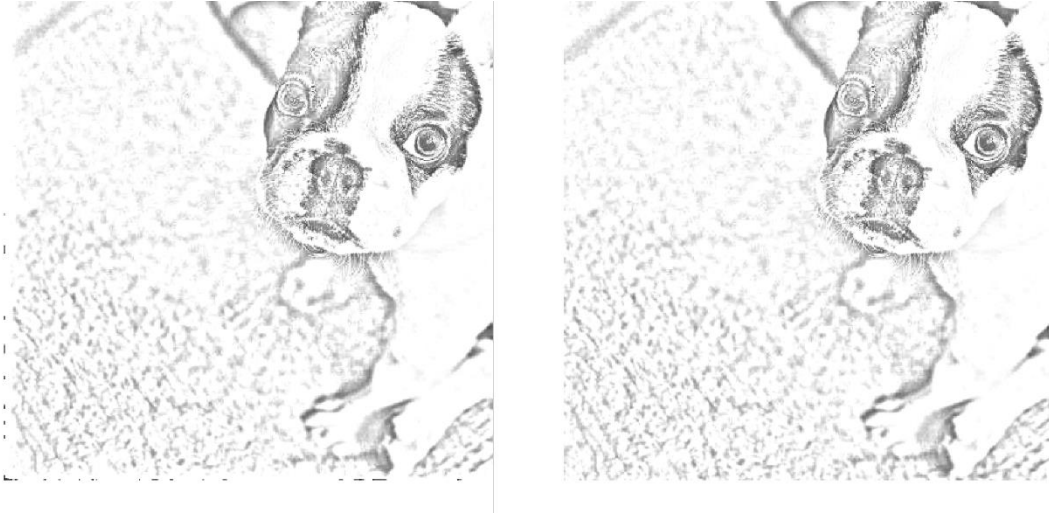


图 5 左图以 0 值填充做高斯模糊后生成的素描图, 右图则以边缘值填充。可以看到左图中左下方边缘生成了一些黑色的线框, 而右图则避免了这个情况。

轮廓图与最终模糊图

在上一部分我们介绍了高斯模糊图的生成方法, 此文中我们用不同程度的高斯内核生成了一张中度模糊图 $G_{mid-blur}$ 和一张轻度模糊图 $G_{slight-blur}$ 。用灰度图 G_{gray} 减去轻度模糊图 $G_{slight-blur}$ 可得到其边缘图 G_{border} 。最后用中度模糊图 $G_{mid-blur}$ 减去边缘图 G_{border} 即可生成最终模糊图 $G_{final-blur}$ 。其计算过程如公式 (3) 和 (4) 所示。

$$G_{boder} = G_{gray} - G_{slight-blur} \quad (3)$$

$$G_{final-blur} = G_{mid-blur} - G_{boder} \quad (4)$$

图像除法混合

除法混合的运算如公式（5）所示。除法混合是指用前景图像的值除以背景图像的值再乘以 255，并对此结果向下取整。此运算可能会导致计算结果向上溢出，对于超出 255 的值，取其值为 255。图像除法混合运算可以得到颜色减淡的效果，针对此文，即用灰度图除以最终模糊图再乘以 255。

$$G_{sketch} = \left\lfloor \frac{G_{sharpen}}{G_{final-blur}} * 255 \right\rfloor, \quad (G_{sketch} \in [0, 255]) \quad (5)$$

RGB 与 YUV 空间转换

类似于 RGB，YUV 也是一种颜色编码模式。YUV 分为三个通道，其中 Y 通道表示图像的亮度，而 U 和 V 两个通道合起来表示图像的颜色。RGB 与 YUV 之间可以相互转换。根据 CCIR.601 标准，RGB 与 YUV 之间的转换如公式（6）到（11）所示。

$$Y = R * 0.299 + G * 0.587 + B * 0.114 \quad (6)$$

$$U = -R * 0.168736 - G * 0.331264 + B * 0.5 + 128 \quad (7)$$

$$V = R * 0.5 - G * 0.418688 - B * 0.081312 + 128 \quad (8)$$

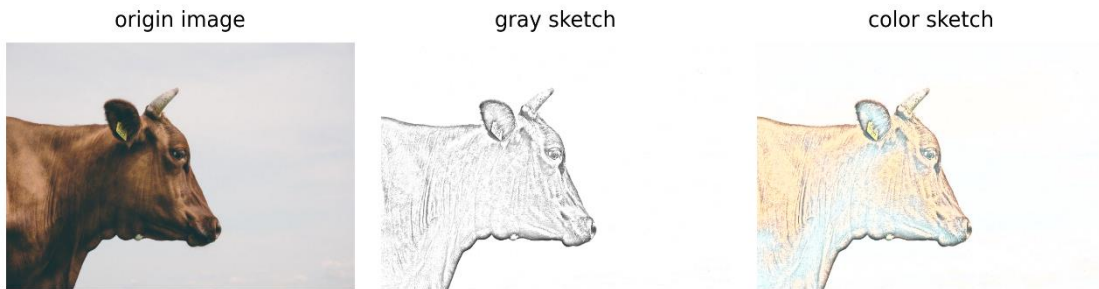
$$R = Y + 1.4075 * (V - 128) \quad (9)$$

$$G = Y - 0.3455 * (U - 128) - 0.7169 * (V - 128) \quad (10)$$

$$B = Y + 1.779 * (U - 128) \quad (11)$$

测试与结果分析

我对此算法做了大量的测试，均取得了不错的效果。在此测试案例中，中度高斯模糊图取 $K = 2$ 、 $\sigma = 7.5$ ，高斯内核大小取 $75 * 75$ ；轻度高斯模糊图取 $K = 1$ 、 $\sigma = 2$ ，高斯内核大小取 $13 * 13$ 。测试结果如下图所示：





结论

数字图像素描算法在学界和工业界已经获得了大量的研究，并取得了丰富的成果。本文对数字图像素描算法的研究现状进行了梳理，并介绍了目前一些不错的研究成果。在对比各类算法后，本文对冯捷等人的算法进行了详细的介绍，并在此基础上加以改进，得到了本文的算法。文章在最后展示了一些实验结果，实验结果表明本文的算法能够生成纹理清楚、细节丰富的灰色素描图及彩色素描图。但此算法仍然存在一些缺陷，其虽然能够生成观感上不错的素描图，但素描图中包含的纹理与艺术绘画中的铅笔纹理还是有较大差异。关于生成铅笔纹理图的方法已有许多学者进行了研究，并取得了不错的成果，这也是本文算法再加以改进的重要方向。

参考文献：

- [1] 黄华, 程威. 实时图像素描风格化. 计算机学报. 2009;1:32.
- [2] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital image processing, MA, Reading: Addison-Wesley, pp. 85-103, 1992.
- [3] Lu C, Xu L, Jia J. Combining sketch and tone for pencil drawing production. In

Proceedings of the symposium on non-photorealistic animation and rendering 2012
Jun 4 (pp. 65-73).

- [4] 冯捷, 郑河荣. 基于灰度合成的图像素描效果生成算法. 浙江工業大學學報. 2009
Jun 1;37(3):316-9.
- [5] Markovic D, Stavrakis E, Gelautz M. Parameterized sketches from stereo images. In
Image and Video Communications and Processing. 2005 Mar 14 (Vol. 5685, pp. 783-
791). International Society for Optics and Photonics.
- [6] Wang J, Bao H, Zhou W, Peng Q, Yingqing X. Automatic image-based pencil sketch
rendering. Journal of Computer Science and Technology. 2002 May;17(3):347-55.
- [7] Sousa MC, Buchanan JW. Observational model of blenders and erasers in computer-
generated pencil rendering. InGraphics Interface 1999 Jun (Vol. 99, pp. 157-166).
- [8] Sousa MC, Buchanan JW. Observational Models of Graphite Pencil and Drawing
Paper for Non-Photorealistic Rendering. Submitted for publication. Detailed
description of the pencil and paper simulation model currently available at the URL
<http://www.cs.ualberta.ca>.
- [9] 姚敏, 赵振刚, 高立慧, 李川. 基于离散小波变换的图像素描生成算法. 计算机与
数字工程. 2017;45(6):1207-10.
- [10] Steve, P. (n.d.). Portrait Photo To Pencil Sketch With Photoshop CS6 Tutorial.
<https://www.photoshopessentials.com/photo-effects/portrait-photo-pencil-sketch-photoshop-cs6/>.
- [11] YUV Colorspace. (n.d.). <https://softpixel.com/~cwright/programming/colorspace/yuv/>.