



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



基于四元相位分析的 黑白图像彩色化方法

答辩人：蔡仲锴

2014.06.19

内容提要

- 彩色化问题简介

彩色化问题的研究背景和意义

黑白图像彩色化的研究现状

- 基于四元小波变换的图像彩色化方法
- 相位一致性特征检测的引入
- 软件实现与实验结果
- 总结与展望



彩色化问题的研究背景和意义



主要背景：在彩色摄影技术诞生之前，人们拍摄了大量的黑白照片与电影。

← 黑白电影《罗马假日》剧照

彩色化问题的研究意义

降低黑白照片和电影的翻新成本

对医学、遥感图像进行伪彩色化

作为一种彩色图像的压缩方式

黑白图像彩色化的研究现状

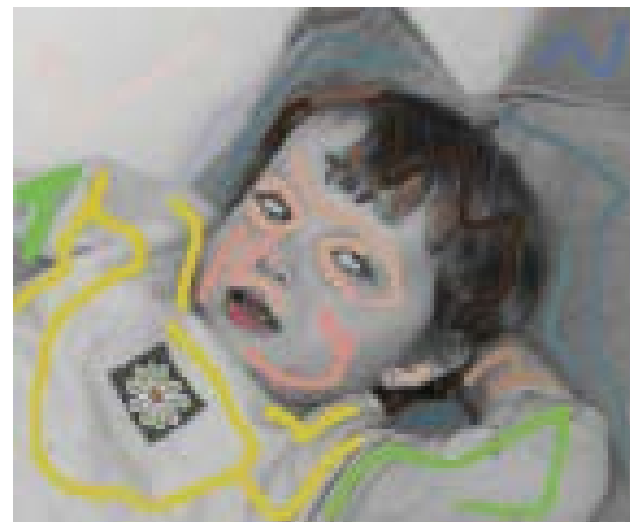
- 基于局部颜色扩张的彩色化方法

Levin的最优化方法

Yatzi最小路径方法

Sapiro偏微分方程法

Horiuchi概率松弛方法



- 基于颜色转移的彩色化方法

Welsh用像素匹配算法将源图像颜色转移到目标图像

内容提要

- 彩色化问题简介
- 基于四元小波变换的图像彩色化方法

出发点：Levin的算法

基于空间分布熵的Scribble自动生成算法

基于四元Gabor小波变换的最优化算法

- 相位一致性特征检测的引入
- 软件实现与实验结果
- 总结与展望



出发点：Levin的算法

- 彩色化问题的简单表述（YUV色彩空间中）

已知亮度信号Y，求解色差信号U和V

- Levin的方法的前提

亮度相近的相邻像素有相近的颜色

- Levin方法的求解

$$U = \arg \min_U \sum_r \left(U(r) - \sum_{s \in N(r)} \omega_{rs} U(s) \right)^2$$

$N(r)$ 为 r 的8-邻域； ω_{rs} 是一个代价函数，这一类代价函数在图像分割算法中有广泛应用，也是本算法中的重要部分。

出发点：Levin的算法

- 续上页Levin方法的求解

Levin在文中给出了两个代价函数：

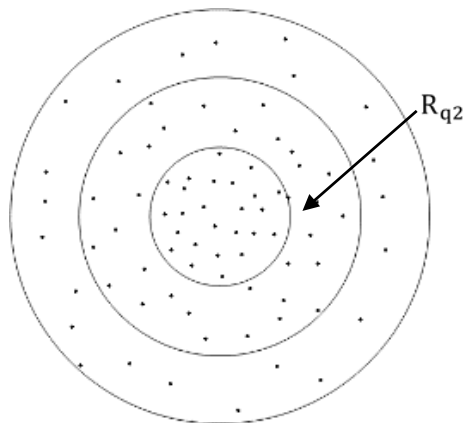
$$w_{rs} \propto e^{-(Y(\mathbf{r})-Y(\mathbf{s}))^2/2\sigma_r^2}$$
$$w_{rs} \propto 1 + \frac{1}{\sigma_r^2} (Y(\mathbf{r}) - \mu_r)(Y(\mathbf{s}) - \mu_r)$$

其中 μ_r 和 σ_r 分别是 \mathbf{r} 附近各点像素值的平均值和方差。

用户手动涂抹scribble，即给出一系列点 \mathbf{r}_i 处的颜色信息： $u(\mathbf{r}_i) = u_i$ ， $v(\mathbf{r}_i) = v_i$ ，在这些约束条件下求解上页中的最优化问题。因为上面给出的代价函数均为二次，而约束条件都是线性的，这个优化问题会产生一个大规模的，稀疏的，线性方程组，可以通过一些标准方法来求解方程组，分别得到U，V两个通道的值。最后，综合YUV通道，得到彩色化结果。

基于空间分布熵的Scribble自动生成算法

- 空间分布熵的概念



$$E_i = - \sum_{j=1}^M p_{ij} \log_2(p_{ij})$$

- 基于图论的分割方法
最小生成树法

- 借助空间分布熵定位支撑点

问题：伪边缘容易误判；

解决：使scribble经过的区域空间分布熵尽可能小；

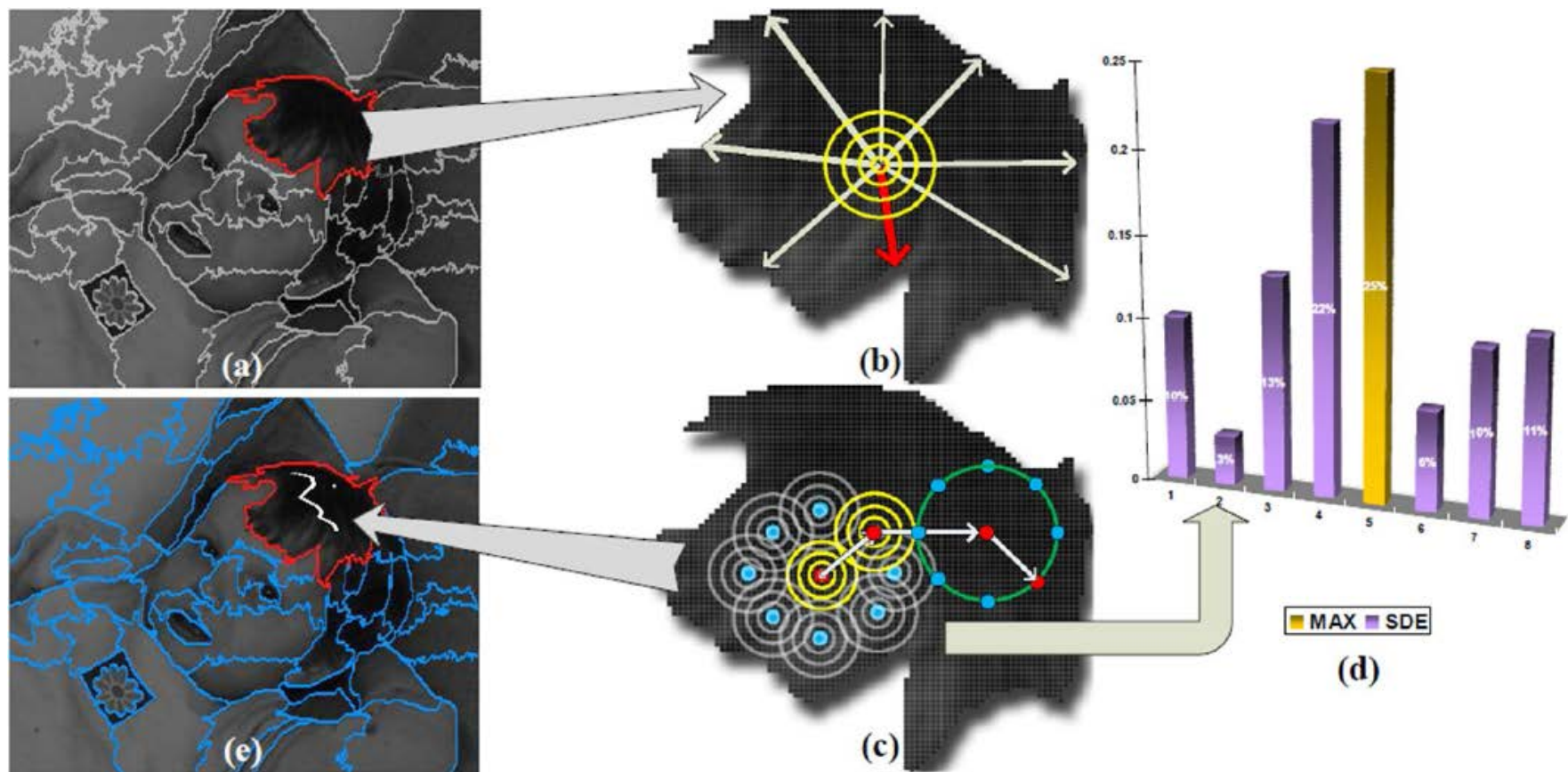
简化：分割后搜索；

起始点：靠近各区块的几何中心；

搜索顺序：相邻，熵值从小到大；

- 通过插值、腐蚀与膨胀等方法描绘出连续scribble

基于空间分布熵的Scribble自动生成算法



基于空间分布熵的Scribble自动生成算法实现细节

基于四元Gabor小波变换的最优化算法

- 我们引入四元Gabor相位，用来计算表征图像中两个相邻区域结构相似性的权重。首先，建立倍频程四元数Gabor s。

$$\mathbf{G}_{\sigma\alpha}^q(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} e^{-i2\pi ux'} e^{-j2\pi vy'}$$
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

式中G表示四元数Gabor卷积核，利用四元数的代数法则可以计算三个四元数Gabor相位。

$$\Phi_{\sigma\alpha}\{\varphi, \psi, \theta\} = \arg(\mathbf{I} * \mathbf{G}_{\sigma\alpha}^q)$$

式中 Φ 为四元数相位向量， \mathbf{I} 表示灰度图像。

- 现在可以定义一个估计相邻像素结构同态性的量。

$$H_{\sigma\alpha}(\mathbf{p}_a, \mathbf{p}_b) = \frac{1}{4} |\rho(\mathbf{p}_a)\varphi_{\sigma\alpha}^q(\mathbf{p}_a) - \rho(\mathbf{p}_b)\varphi_{\sigma\alpha}^q(\mathbf{p}_b)|_{2\pi} + \frac{1}{2} |\rho(\mathbf{p}_a)\theta_{\sigma\alpha}^q(\mathbf{p}_a) - \rho(\mathbf{p}_b)\theta_{\sigma\alpha}^q(\mathbf{p}_b)|_{\pi}$$
$$+ |\rho(\mathbf{p}_a)\psi_{\sigma\alpha}^q(\mathbf{p}_a) - \rho(\mathbf{p}_b)\psi_{\sigma\alpha}^q(\mathbf{p}_b)|_{\pi/2}$$

基于四元Gabor小波变换的最优化算法

- 完整的色彩蔓延过程如右图所示

权值表示为

$$W_{pq} = W_{pq}^{Strength} \times W_{pq}^{QGabor}$$

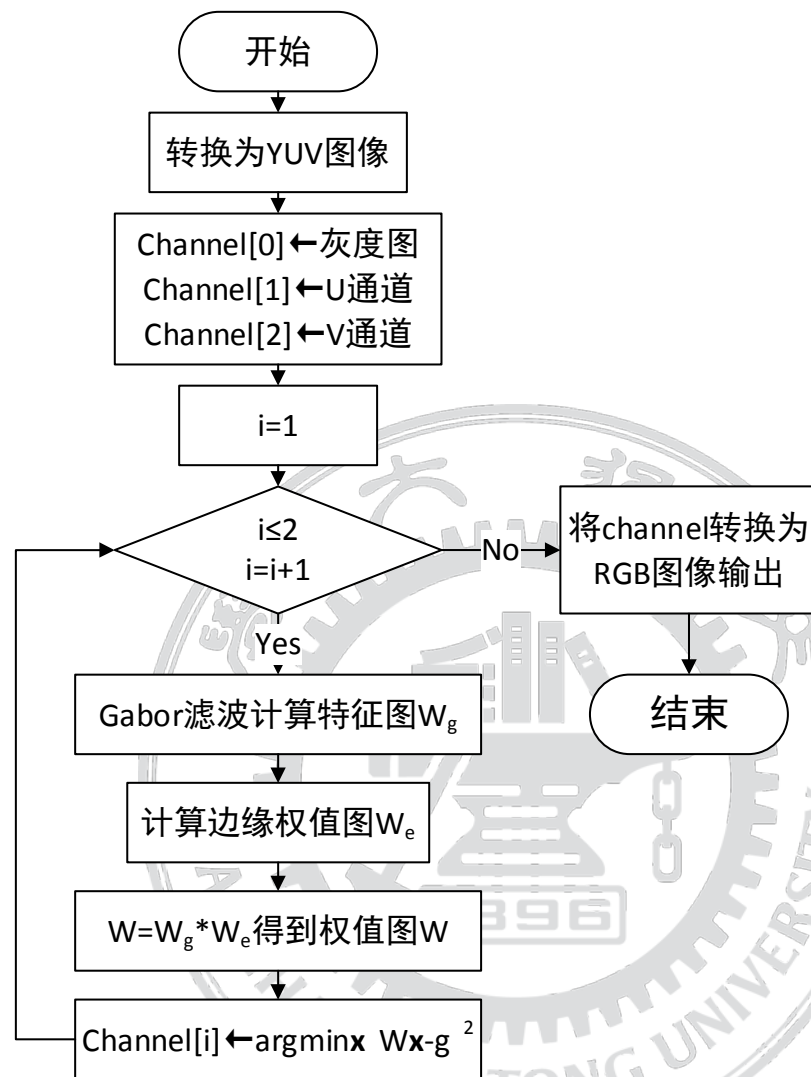
$$W_{pq}^{Strength} = e^{-\|E(p)-E(q)\|^2}$$

$$W_{pq}^{QGabor} = e^{-H(p,q)}$$

其中 $W_{pq}^{Strength}$, W_{pq}^{QGabor} 分别是用Canny边缘检测计算出的边缘权重和四元数Gabor变换产生的结构权重;
 $E(p)$ 表示点 p 的strength; $H(p, q)$ 是各个尺度分量和角度分量的Gabor滤波所得结果的叠加。

- 最优化过程是通过求解稀疏系统来完成的

$$\mathbf{x} = \arg \min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{b} - M\mathbf{x}\|^2$$



内容提要

- 彩色化问题简介
- 基于四元小波变换的图像彩色化方法
- 相位一致性特征检测的引入
 - 引入相位一致性的原因
 - 相位一致性原理
 - 相位一致性的实现效果
- 软件实现与实验结果
- 总结与展望



引入相位一致性的原因

- 我们采用相位一致性代替原算法中的多尺度Canny检测用以衡量边缘信息的强度，有如下原因：
 - 1) 相位一致性是一个**无量纲**的量，它提供了特征点显著性的绝对衡量，可以很方便地应用在各种不同种类的图像中；
 - 2) 相比于传统边缘检测方法，相位一致性方法的**抗噪声性能**更加优异；
 - 3) 相位一致性的检测结果更加**符合人类视觉**的感知特性；
 - 4) 虽然对信号的频率分解的计算过程十分复杂，但是在利用近似模型——局部能量模型之后，**计算量大幅降低**，实际的运算时间远低于多尺度Canny检测。

相位一致性原理

- 相位一致性原理基于这样一个基本事实：

人类视觉所感知的图像特征总发生在图像各谐波分量的最大叠合处

- 以一维信号为例，信号 $F(x)$ 可以表示为一系列的傅立叶序列，其表达式为

$$F(x) = \sum_n A_n \cos(n\omega x + \phi_n)$$

其中 ω 是一个常数（一般是 2π ），级数中的正弦项是通过相位偏移量 ϕ_n 来表示。



相位一致性原理

- 相位一致性的定义

$$PC(x) = \max_{\theta \in [0, 2\pi]} \frac{\sum_n A_n \cos(n\omega x + \phi_n - \theta)}{\sum_n A_n}$$

上式难以计算，作为替代，我们采用局部能量模型来计算相位一致性

一维局部能量的定义 $E(x) = \sqrt{F^2(x) + H^2(x)}$

式中 $F(x)$ 是信号去除直流分量后的函数， $H(x)$ 是 $F(x)$ 的Hilbert变换。

局部能量与相位一致性的关系 $E(x) = PC(x) \sum_n A_n$

由上式加入噪声补偿后得到

$$PC(x) = \frac{(E(x) - T)^+}{\varepsilon + \sum_n A_n(x)}$$

式中 T 为噪声估计， ε 是为防止分母过小加入的常数， $()^+$ 表示为正。

相位一致性原理

- 本文选用log Gabor滤波器实现相位一致模型

log Gabor函数的传递函数：

$$G(f) = \exp \left\{ \frac{-[\log(f/f_0)]^2}{2[\log(\sigma/f_0)]^2} \right\}$$

式中： f_0 为滤波器的中心频率， σ 为保持滤波器形状而设的常量。

设尺度n上log Gabor的偶对称和奇对称滤波器分别为 M_n^e 和 M_n^o ，
则有

$$[e_n(x), o_n(x)] = [I(x) * M_n^e, I(x) * M_n^o]$$

其振幅和相位可分别表示为

$$A_n(x) = \sqrt{e_n(x)^2 + o_n(x)^2}$$
$$\Phi_n(x) = \text{atan2}(e_n(x), o_n(x))$$

其中n为尺度。

相位一致性原理

- 加入展频函数

$$W(x) = \frac{1}{1 + e^{g(c-s(x))}}$$
$$s(x) = \frac{1}{N} \left(\frac{\sum_n A_n(x)}{\varepsilon + A_{max}(x)} \right)$$

式中： N 为滤波器的尺度数目， $A_{max}(x)$ 为滤波器响应的最大幅度。
 c 是展频函数截止频率， g 是增益因数。

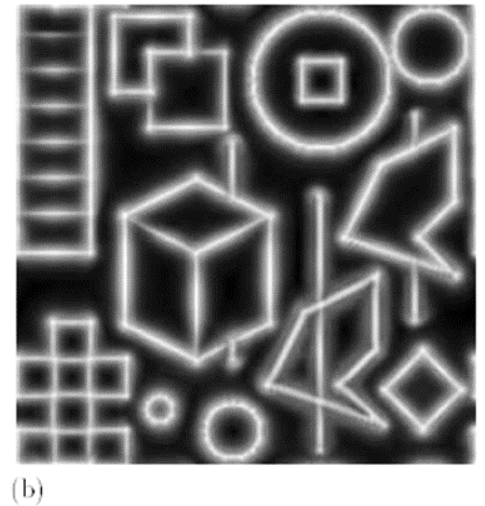
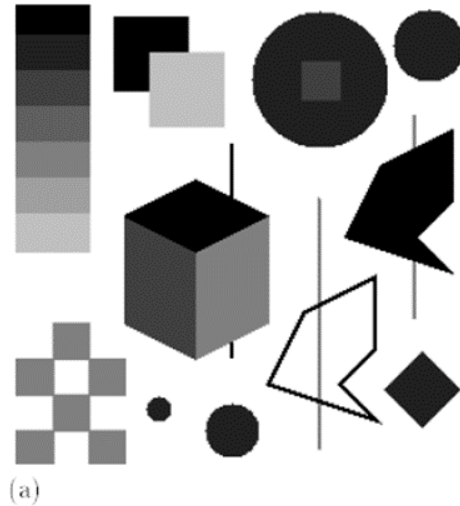
- 拓展得到二维相位一致性模型

$$PC(x) = \frac{\sum_o (W_o(x)(E_o(x) - T_o)^+)}{\varepsilon + \sum_o \sum_n A_{no}(x)}$$

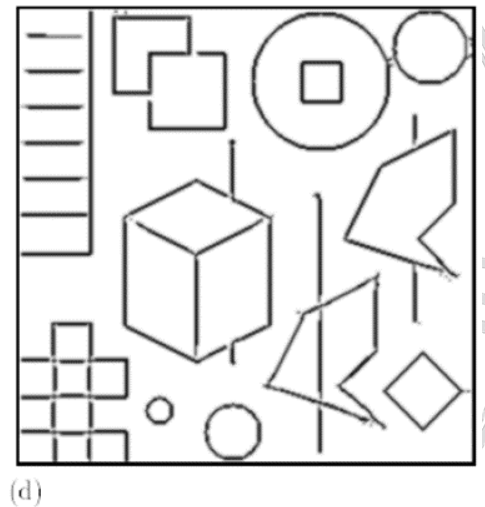
式中： o 和 n 分别是滤波器的方向和尺度

相位一致性的实现效果

相位一致性的优势是无量纲衡量特征显著性，这允许我们根据图像的类型不同设定不同的门限；相位一致性的另一个优势是可以在对图像的光照水平不做任何假设的情况下检测特征。



- (a) 测试图片；
- (b) 相位一致性的原始结果；
- (c) 使用Canny检测的原始结果；
- (d) 经过非极大抑制和设定临界值之后的相位一致性结果。

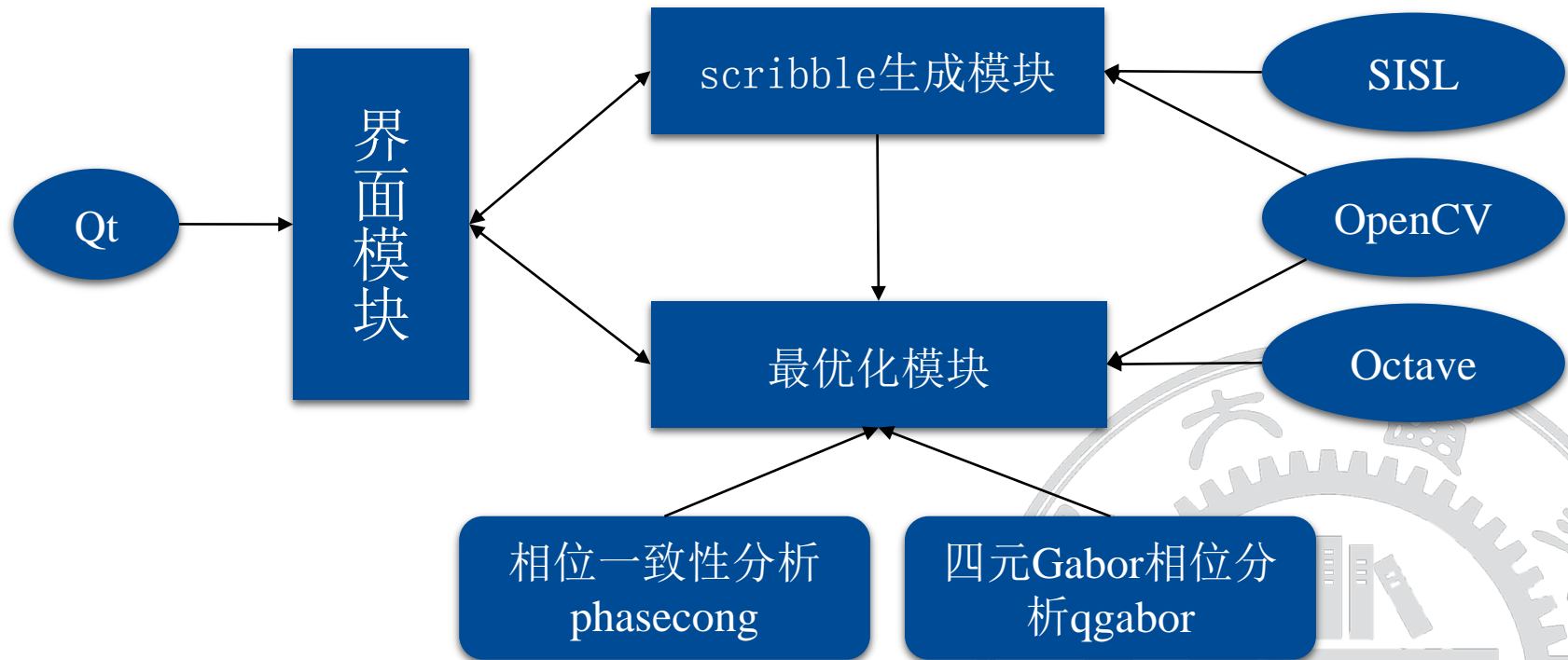


内容提要

- 彩色化问题简介
- 基于四元小波变换的图像彩色化方法
- 相位一致性特征检测的引入
- 软件实现与实验结果
 - 软件模块设计
 - 软件界面
 - 实验结果与讨论
- 总结与展望



软件模块设计

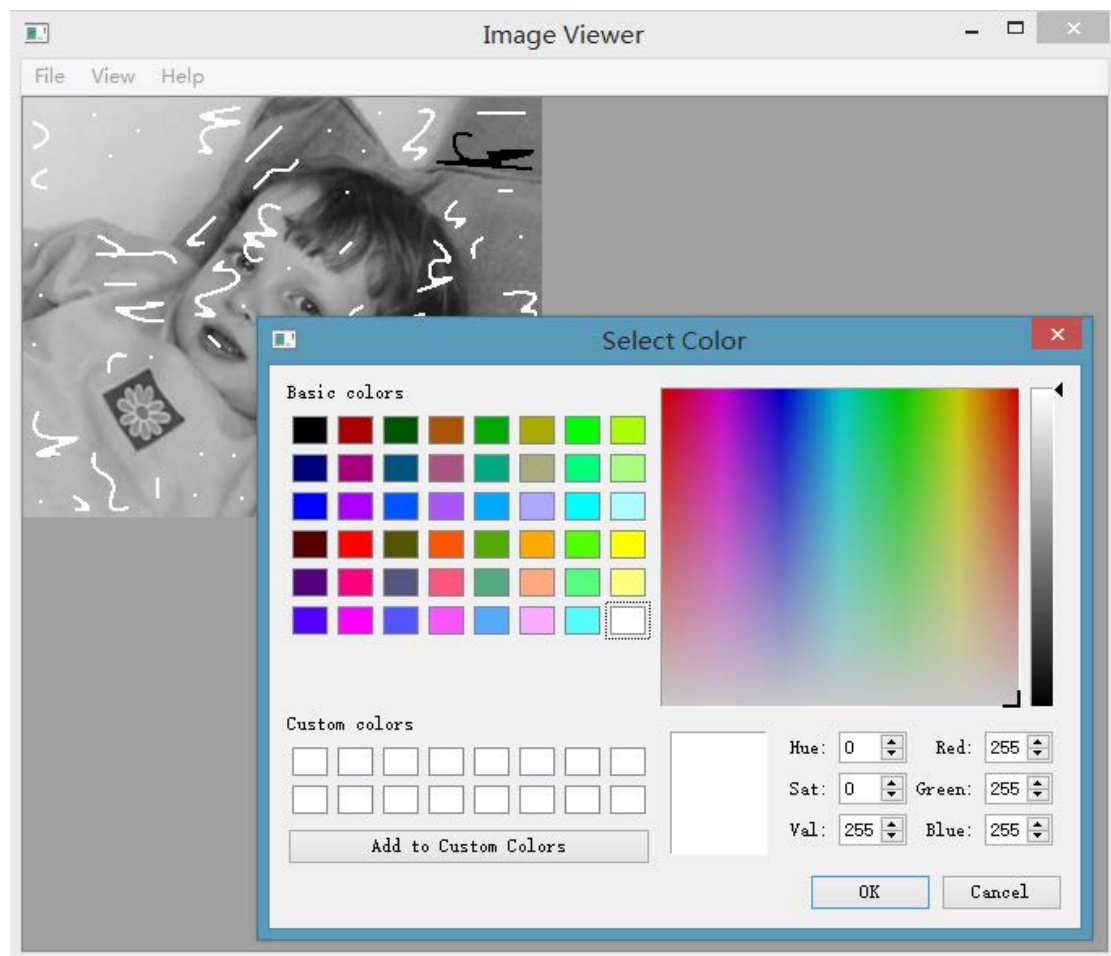


界面模块：与用户交互，调用其它模块计算彩色化结果并显示；

scribble生成模块：从界面模块中获得黑白图像，自动生成scribble并返回；

最优化模块：计算权值图，通过最优化得出彩色化结果，返回给界面模块显示。

软件界面



↑ 软件选色界面

软件功能:

Open: 打开并显示灰度图

Show Scribble: 自动生成 scribble 并在原图中标注

选色: 点击Scribble的区域手动选色

Start Colorization: 根据用户选色进行彩色化并显示结果

Auto Colorization: 选择彩色图片时根据原图颜色测试

编程环境:

Windows 8.1 Pro 32bit

VS 2013 + Qt Add-in

OpenCV 2.4.8

Octave 3.6.4

SINTEF SISK 4.4

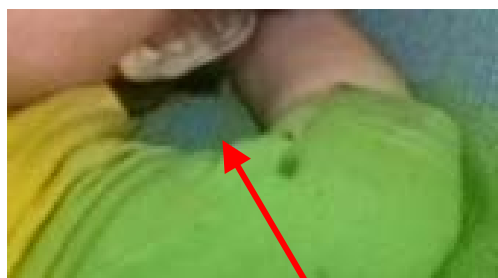
实验结果与讨论

- 一张典型图像的彩色化过程

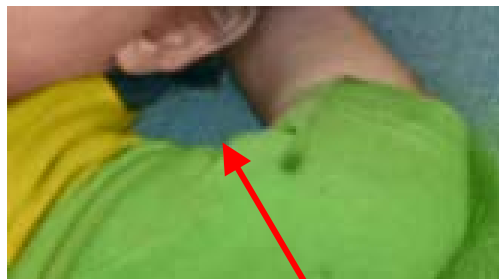


实验结果与讨论

测试——人像：加入相位一致性边缘之后的彩色化结果有着更加清晰的边缘，在一些局部区域，比如小孩的手肘内侧，颜色渗透现象明显改善。



(a) 原程序
彩色化结果

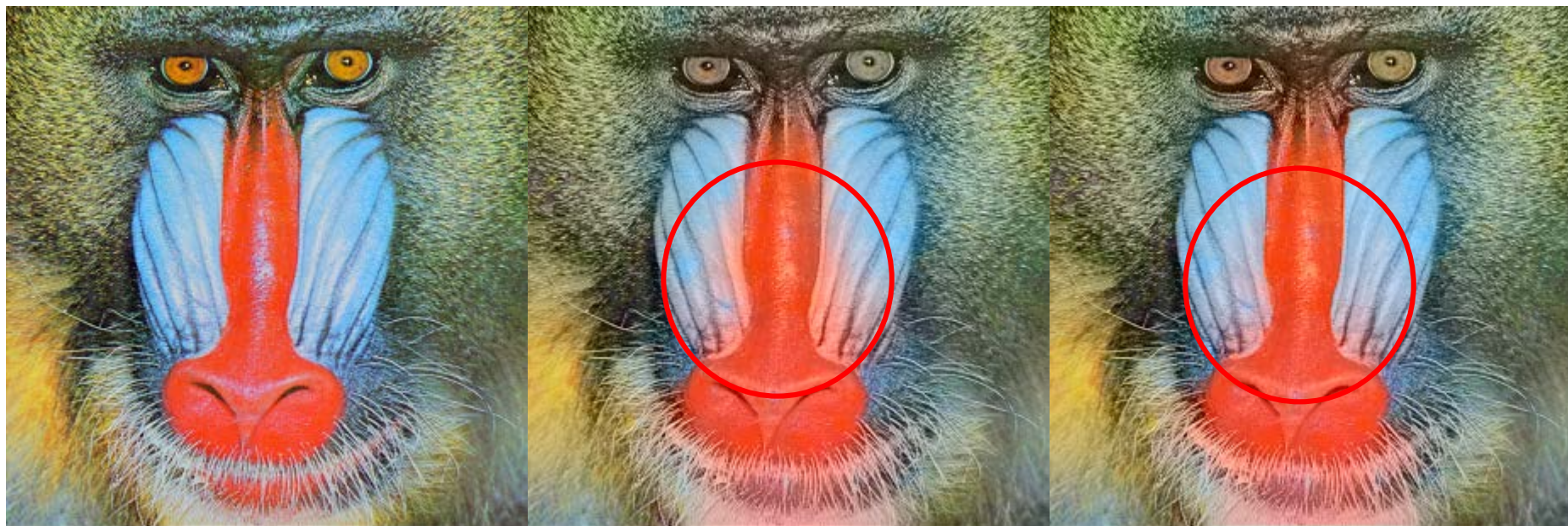


(b) 改进后的
彩色化结果



实验结果与讨论

测试——山魈：在毛发区域，有一定的过渗透现象，但是因为毛发区域高频成分过多，几乎不可能避免这种渗透，而在鼻子的区域，却有着明显的线形边缘，在加入相位一致性边缘之后，红色的鼻子向两侧蓝色区域的渗透红色的现象几乎消失了，彩色化结果更加接近原图。



(a) 原图

(b) 原程序彩色化结果

(c) 改进后的彩色化结果

实验结果与讨论



(a) 原图

(b) 原程序彩色化结果

(c) 改进后的彩色化结果

测试——风景：原程序的结果把城堡上端靠近天空的区域都染成了蓝色，而在加入相位一致性边缘检测之后，大部分被渗透的区域都被染成了应有的颜色，从观赏者的角度来看，视觉效果明显改善。

实验结果与讨论

- 采用PSNR作为定量衡量彩色化结果的指标。

图像名称	原算法PSNR(dB)	本文算法PSNR(dB)	差别(dB)
小孩	27.1688	27.2262	+0.0574
飞溅	22.1127	22.4116	+0.2989
青椒	22.8607	22.9990	+0.1383
山魈	21.4487	22.7165	+1.2678
城堡	26.5460	27.7121	+1.1661

内容提要

- 彩色化问题简介
- 基于四元小波变换的图像彩色化方法
- 相位一致性特征检测的引入
- 软件实现与实验结果
- 总结与展望

全文总结

后续工作展望



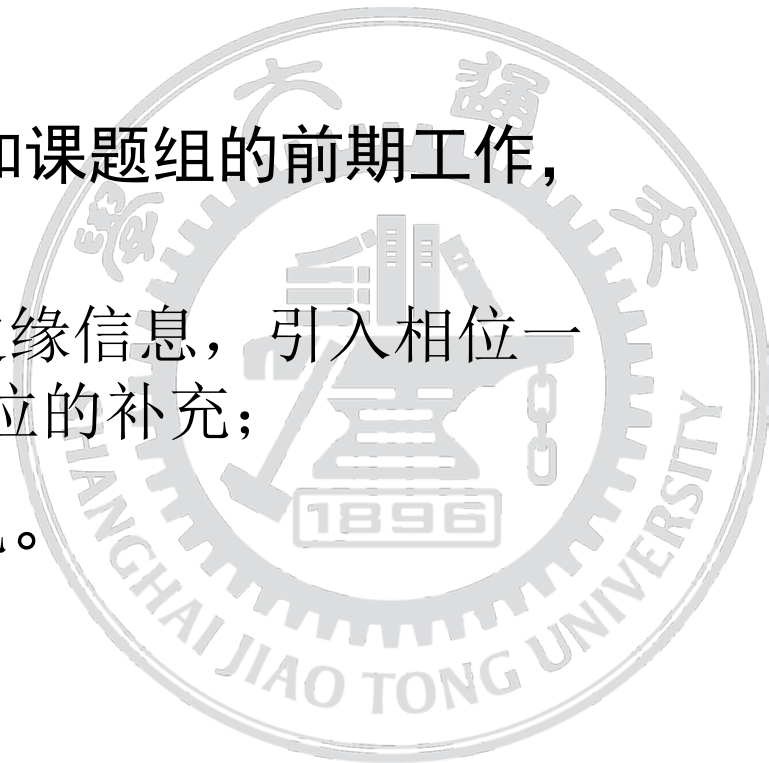
全文总结

黑白图像彩色化问题是一个有趣而又实用的课题。课题组前期在Levin算法的基础上已经完成了：

- Scribble自动生成算法；
- 基于四元Gabor相位分析的最优化算法。

本文总结了主流的彩色化算法和课题组的前期工作，完成了以下工作：

- 为了在彩色化过程中更好地利用边缘信息，引入相位一致性边缘检测作为对四元Gabor相位的补充；
- Windows平台下算法的完整C++实现。



后续工作展望

现有的实验结果仍有改进空间，几个可能的改进方向是：

- **相位一致性边缘强度计入权值图的方式：**现有的方式是直接与四元Gabor相位的结果相乘，后续工作可以考虑是否设定门限，是否对不连续的强边缘进行连通处理；
- **估价函数的设计：**现有的估价函数仍然采用的是Levin给出的较为简单的形式，后续工作可以测试新的估价函数；
- **分割算法的进一步讨论：**目前的基于图论的分割方法对参数比较敏感，在某些图片中有过分割的现象，后续工作可以探讨参数的给定方式，也可以尝试采用其它分割算法；
- **考虑光流，实现黑白视频的彩色化：**本课题提出的算法理论上也适用于黑白视频，后续可以在现有程序的基础，探讨黑白视频的彩色化方法。



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

谢谢！

蔡仲锴

caizk@hotmail.com

2014.06.19

