

综合作业 4 帮助云天明实现脱单

——低多边形风格人物画像的生成与拼合

2015011443 陆逸文

1 故事背景

著名科幻小说《三体 III：死神永生》[1] 中，男主人公云天明是女主人公程心的大学同学，一直暗恋着程心。在人类文明面临危机之时，云天明恰好身患绝症，他在程心的建议下选择了安乐死，并同意参与“阶梯计划”科学实验：将他的大脑取出发送到外太空。此后，搭载大脑的飞行器被三体人的舰队截获，三体人通过云天明的大脑克隆出了他的身体。复活后的云天明在三体文明中生活多年，了解了许多关于宇宙的秘密，并得到了三体人的信任，因此三体人允许他与还在地球上的程心进行短暂的通话。云天明精心设计了三个童话故事，对诸多不为地球人所知的宇宙奥秘进行了隐喻。其中的一个故事是这样的：

有个岛上王国叫无故事王国，国王有三个孩子——深水王子去了墓岛，因为后来饕餮鱼包围了无故事王国，无法回来；冰沙王子性格古怪、为人残暴；露珠公主为人善良，被国王选定为王位继承人。

冰沙王子找来一个新画师——来自赫尔辛根默斯肯的针眼画师。针眼画师可以把他见过的人或东西“画进画里”——被画进画里的人或东西会从现实世界彻底消失。画这种画需要来自赫尔辛根默斯肯的狼毫笔、来自赫尔辛根默斯肯的颜料和来自赫尔辛根默斯肯的雪浪纸——这种纸总是卷曲的，只有用同样来自赫尔辛根默斯肯的黑曜石板才能把它压平。针眼画师已经把他的老师——空灵画师画进画里，然后又将国王、王后、大臣们画进画里，然后准备画露珠公主……

王宫里，空灵画师求见露珠公主，他打着一把古怪的黑伞——那把伞一直在转。空灵画师将“画进画里”的事情告诉了公主，同时卫

队长——赫尔辛根默斯肯人长帆告诉公主，国王和王后确实已经不见了。空灵画师之所以没有消失，正是因为他打着那把有神力的黑伞。但是那把伞有毛病，只能靠旋转将其撑开，而且转速不能太快，也不能太慢。空灵画师让公主打着黑伞去找深水王子，因为只有深水王子不会被画进画里。空灵画师在把伞交给公主之后，果然凭空消失了。公主在长帆和奶妈宽姨的护送下离开王宫，向墓岛方向逃去。[2]

故事中的“画进画里”暗喻着降维打击——这是低级文明在被高级文明发现后难以逃脱的厄运。事实上，在故事逐渐被地球人所理解后，地球人一度看到自救的曙光，但不久以后还是被更高等的歌者文明发现，歌者文明将地球文明和三体文明一并“清理”了。

我是来自歌者文明的一名清理工，也就是云天明故事中来自赫尔辛根默斯肯的针眼画师。我乘坐着二项箔来到了太阳系和三体星系一带，任务是将被清理文明中的所有人和物都画到一张带有褶皱的雪浪纸上（就像图1那样），让他们被限制在二维空间中，永远无法再对高维文明形成威胁。

我通过时光机器（歌者文明特有的技能）了解到了云天明和程心的故事，理解了云天明对程心的爱以及分处两个星系的二人对拯救地球文明所做的努力，并为此深受感动。然而，将他们画到雪浪纸上是无法违抗的命令——这很残酷，但我也无可奈何。我所能做的，只有把他们画得更美一些，并让他们在二维世界中重新团聚。

2 技术概要

用地球人的话说，本作业的主要内容是对人物照片进行低多边形画处理，以及对两张低多边形风格人物图像进行拼合。低多边形 (Low Poly) 是指使用形状、尺寸和颜色各异的三角形拼接成彩色图片，它起源于早期计算机性能受限时用于实时渲染图像的一种折中方案，而如今已经发展为一种抽象的艺术风格 [3] （如图1所示）。好的低多边形图像生成的要点包括：1) 合理选择三角形顶点的数量和位置，以便尽可能保留关键特征而舍弃次要细节；2) 根据选择的顶点合理地排布三角形；3) 进行合理的颜色采样，以达到尽可能自然的视觉效果。本作业就这三个方面进行了较为详尽的探索。



图 1: 低多边形风格人像示例 (图片来自
<https://www.digitalartsonline.co.uk/tutorials/adobe-illustrator/create-low-poly-portrait-photoshop-illustrator/>)

低多边形图像生成的研究前沿所使用的顶点生成技巧包括在边缘检测的基础上着重对边缘采点 [3]，以及在特征检测的基础上对特征密度不同的区域使用不同的采点概率 [4]。[4] 还使用 Lloyd 算法对顶点位置进行了优化。由于本作业的处理对象仅限于人物图像，本作业基于对人物图像前景和背景的分割设计了一套对前景、背景、边缘采取不同采点概率的策略，以用较少的三角形尽可能保留关键细节；此外，本作业基于前背景分割结果的启发对 Lloyd 算法加以修改，提出对人物图像中三角形顶点位置的约束优化方法，使生成图像的视觉效果得到可观的改进。在根据选择的顶点排布三角形的问题上，本作业与 [3] 一样，使用较为成熟的 Delaunay 三角化算法。在色彩选择上，本作业使用对三角形几何中心进行采样的高效方法，取得较好的效果。此外，本作业还尝试了对两张低多边形人物图像进行拼合，由于原始图像的背景可能存在较大的差异，这涉及到额外的色彩处理。

本作业使用的图像处理工具主要包括边缘检测、形态学算法和彩色图像处理。本作业的特色包括：

1. 通过调研文献，对低多边形图像生成问题上的前沿方法进行了较全面的了解，对部分具有代表性的方法进行了复现和试验；
2. 针对人物图像的特点，基于基本的边缘检测算法和形态学算法，设计了一套高效但准确的前背景分割的方法；
3. 将前背景分割的启发信息整合到顶点优化的 Lloyd 算法中，对 Lloyd 算法针对人物图像低多边形化的问题加以修改，取得出色的效果；
4. 将所学的数字图像处理知识和计算几何中的基础知识相结合，加以创造性的应用。

3 方法

3.1 边缘提取和前背景分割

作为算法的预处理流程，对人物图像进行前背景分割的意义在于：1) 为顶点选取提供启发（前景部分，如人物脸部，通常细节丰富，需要以较高的概率采点以保留细节；背景部分通常没有太多需要保留的细节，可以减小采点概率以加强抽象效果）；2) 方便后续图片拼合环节对图像背景的色彩进行处理。

通过仔细观察对人物图像使用 Canny 算法提取边缘的结果（如图2b所示）

发现：人物的外轮廓在 Canny 算法提取的外边缘中近似于闭合曲线，但存在一些细小的缺口。因此，通过形态闭运算闭合这些小缺口就能够得到完整的轮廓线，进而得到前背景分割结果。

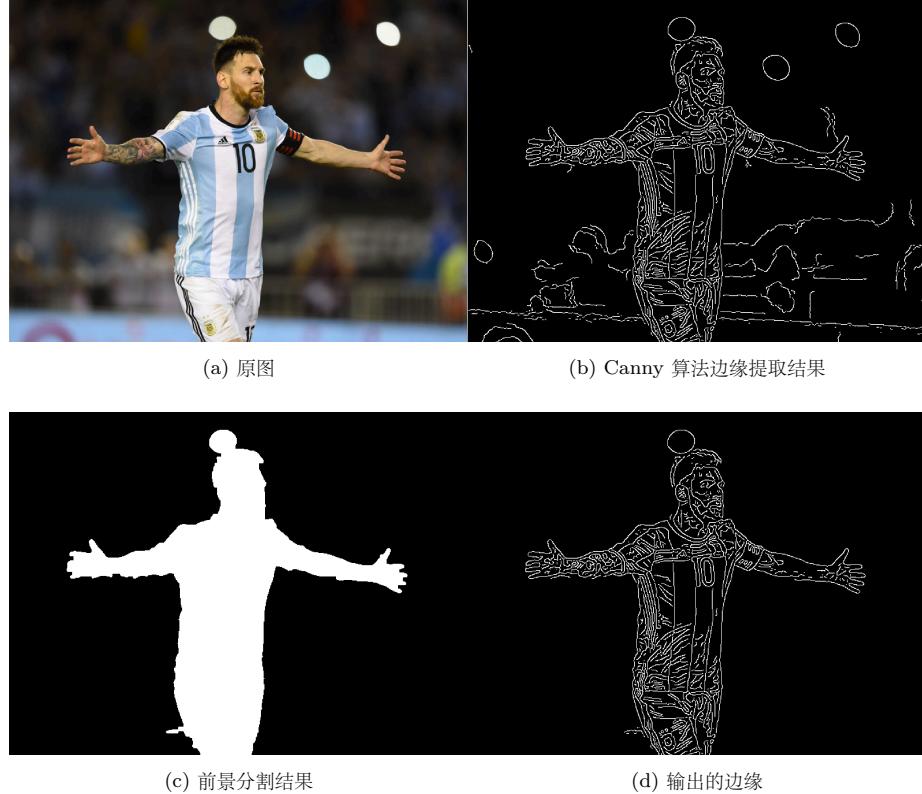


图 2: 边缘提取和前背景分割示意

基于上述观察，使用统一的流程输出边缘提取和前背景分割的结果。流程的描述如算法1所示。在示例图像上的中间结果和输出结果如图2所示。

算法1中， S_1, S_2, t 的取值对图像尺度敏感。在实现过程中，将各图片的高度都统一为 512，经过尝试多张图片，选择 S_1 为 `strel('disk', 3)`、 S_2 为 `strel('disk', 1)`、 $t = 5000$ ，取得了较好的效果。

Algorithm 1 边缘提取和前背景分割流程（输入原图 I , 输出边缘图 E 和前景蒙版 F ）

$E_1 \leftarrow$ 使用 Canny 算法对 I 进行边缘提取的结果
 $E_2 \leftarrow$ 使用结构元素 S_1 对 E_1 进行闭运算的结果
 $F_1 \leftarrow$ 对 E_2 进行形态学洞穴填充算法的结果
 $F_2 \leftarrow$ 对 F_1 进行形态学修建算法的结果
 $F_3 \leftarrow$ 对 F_2 使用结构元素 S_2 对 F_2 进行开运算的结果
舍弃 F_3 中面积小于 t 的连通区域
 $F \leftarrow F_3, E \leftarrow E_1 \cup F$

3.2 顶点选取和优化

在已知边缘提取和前背景分割结果的基础上, 可设计如下几种简单的顶点选取策略:

- 在整张图上以概率 P_{22} 随机选点;
- 在边缘上以概率 P_1 随机选点, 在非边缘的部分以概率 P_{22} 随机选点 ($P_1 > P_{22}$);
- 在边缘上以概率 P_1 随机选点, 在非边缘的前景区域以概率 P_{21} 随机选点, 在背景区域以概率 P_{22} 随机选点 ($P_1 > P_{21} > P_{22}$)。

以图2中的边缘提取和背景分割结果为例, 取 $P_1 = 0.1, P_{21} = 1 \times 10^{-3}, P_{22} = 5 \times 10^{-4}$, 分别使用上述三种策略进行选点, 得到的三角形网格如图3所示 (网格使用3.3节中的方法生成)。

可以看到, 使用非均匀随机选取策略生成的网格 (图3b, 3c) 利用了边缘提取和前背景分割的所提供启发信息, 相比完全随机的选择 (图3a) 而言可以大体展现出图中人物的轮廓。这对后续的图片生成是至关重要的, 因为加入顶点网格中完全不包含关于图片前背景和边缘特征的语义信息, 最终生成图片的边缘会变得参差不齐, 使得保真度非常差。相反, 启发信息越多, 生成的网格中包含的语义信息也越精细——图3c较图3b而言在人物边界处更加清晰、更加光滑, 这对提升最终生成图片的视觉效果有很大的帮助, 也表明了进行前背景分割的重要性。

然而图3c中的网格仍然存在如下问题:

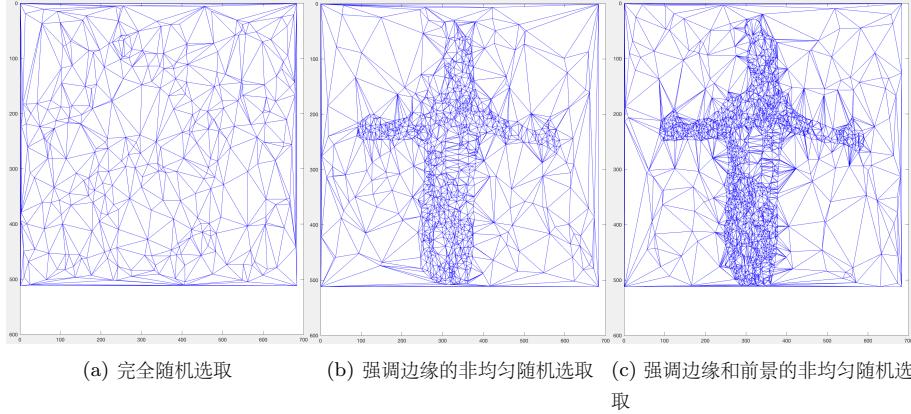


图 3: 简单顶点选取策略生成的三角形网格

- 存在大量非常尖锐的三角形，这在着色后将表现为图片中类似毛刺状的色条，影响视觉效果；
- 背景区域没有太多需要刻画的特征，三角形的分布本应比较均匀，但由于随机选点的原因，导致生成的三角形在形状和面积上差异非常大，在最终生成的图像中容易显得突兀。

针对这两个问题，须对随机生成的顶点分布进行优化。这里仿效 [4] 中的做法，借助计算几何中 Lloyd 算法的思想进行优化。该算法的思想是：空间中的一组点可以根据 Voronoi 图（如图4所示）生成一组空间分割，使每个点对应一个空间区域。每轮迭代中，将每个点移动到它所对应的空间区域的质心；如此往复，经过足够多次迭代后可以收敛到一个较为均匀的空间分割。

然而，原始的 Lloyd 算法在这里难以直接适用：若对之前随机采样得到的顶点集直接使用 Lloyd 算法进行优化，最终收敛到一个较为均匀地分布在整個平面上的结果，而失去了通过边缘提取和前背景分割得到的启发信息。作为改进，对 Lloyd 算法的迭代加以约束，提出算法 2。

优化前后的三角形网格如图6所示（设置迭代 10 轮）。易见，这个简单的迭代优化算法对顶点质量的改进非常显著。图??显示了加入优化前后的最终渲染结果，同样展现了顶点优化的效果。

算法中对每个顶点所对应的空间区域进行裁剪，可使用多边形之间的集合运算实现，在原始的 Lloyd 算法上增加的额外开销很小。本作业中，为了实现

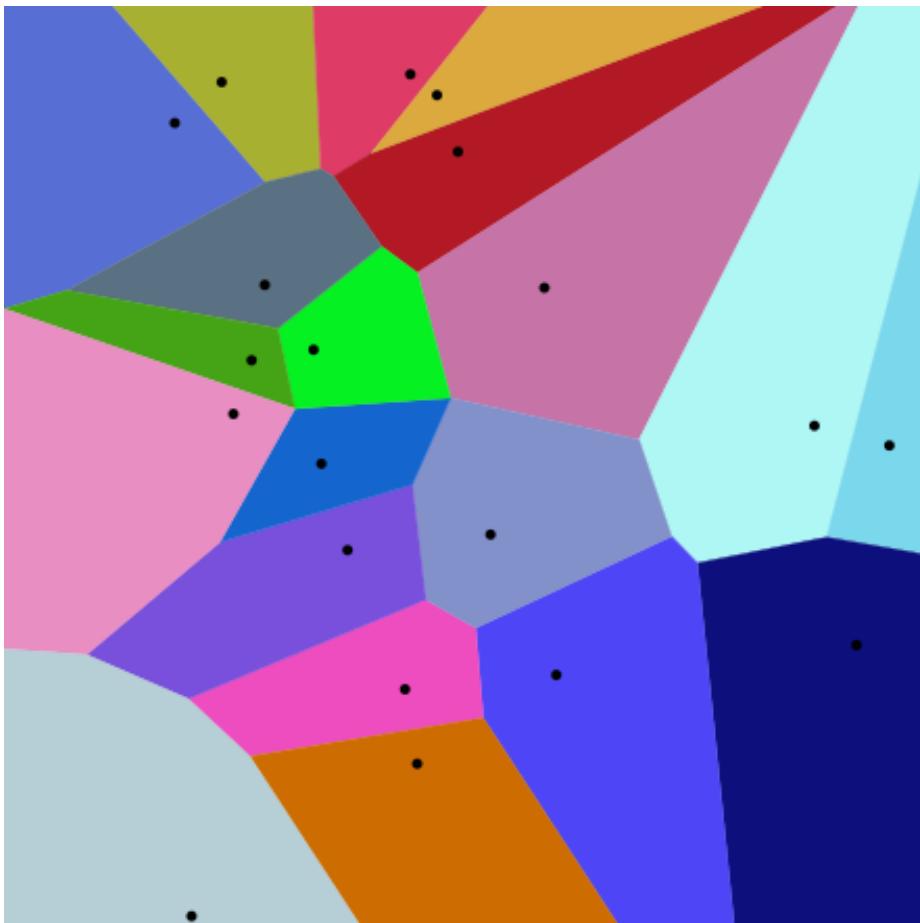


图 4: Voronoi 图示意(图片来自 https://en.wikipedia.org/wiki/Voronoi_diagram)

Algorithm 2 基于 Lloyd 算法修改的顶点优化算法

输入待优化的顶点集 $\mathcal{V} = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, 边缘图 E , 前景蒙版 F
对 F 进行连通域分析, 令 $r_i \leftarrow [V_i \text{所在连通域编号 (背景用 0 表示)}](i = 1, 2, \dots, n)$

while 迭代次数未到达上限 **do**

 求 Voronoi 图, 令 $C_i \leftarrow [V_i \text{在 Voronoi 图中所对应的空间区域}] (1 = 1, 2, \dots, n)$

for $V_i \in \mathcal{V}$ **do**

if $r_i = 0$ (V_i 是背景点) **then**

$C_i \leftarrow C_i - F$

else

$C_i \leftarrow C_i \cup [V_i \text{所在连通域}]$

end if

$V'_i \leftarrow C_i \text{的质心}$

if $V_i \notin E$ **then**

 若 V_i, V'_i 同属于背景或同属于前景的同一个连通域, $V_i \leftarrow V'_i$, 否则
 不移动

else

$V_i \leftarrow [E \text{中距离} V'_i]$

end if

end for

end while

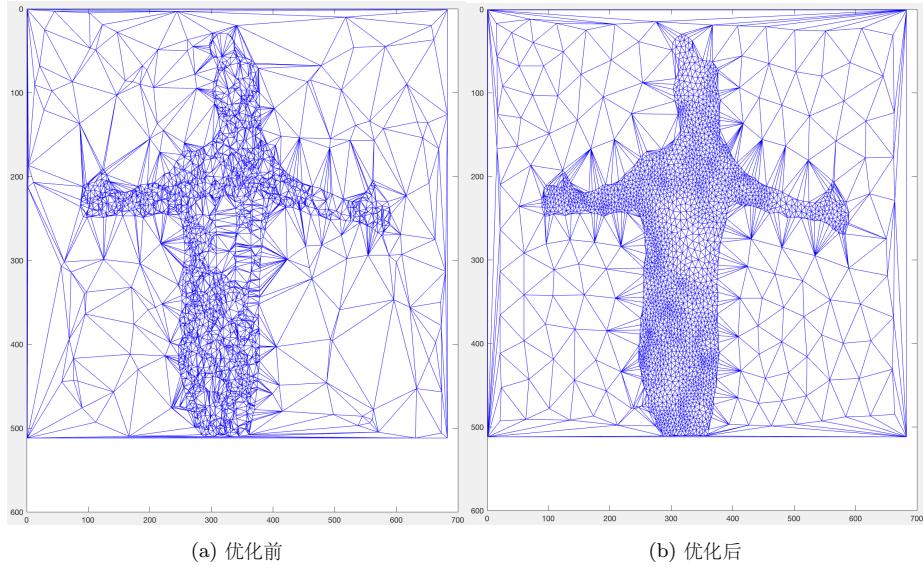


图 5: 顶点优化效果示意

方便，在进行 MATLAB 实现中每次对完整的二值矩阵进行集合运算，导致优化算法运行较慢；实际上，在完全不改变算法基本思路的前提下，仍有很大的优化空间。

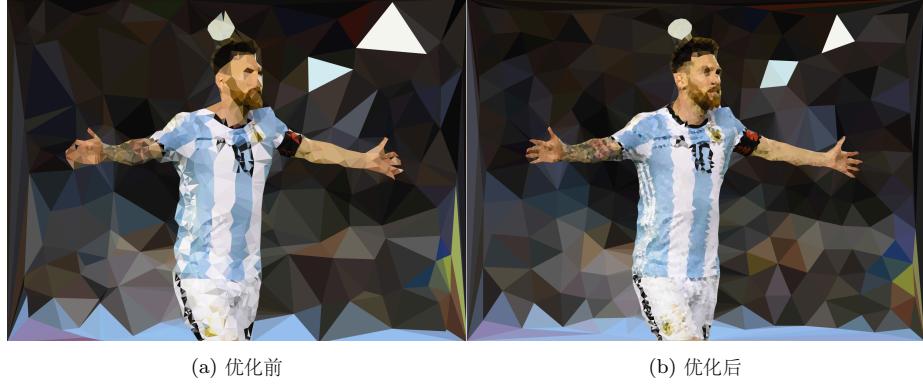
3.3 Delaunay 三角化

根据之前选取的顶点生成三角形可直接使用计算几何中的 Delaunay 三角化算法。三角化问题的基本表述是：对离散点集 \mathcal{P} ，找到三角化 $DT(\mathcal{P})$ ，使得 \mathcal{P} 中的任意一点都不在 $DT(\mathcal{P})$ 中任意一个三角形的外接圆上。Delaunay 三角化的特点是在给定的顶点集上可以使三角形中角度的最小值最大化 [5]，亦即尽可能避免特别尖锐的三角形的出现，这与顶点优化的目标是一致的。

3.4 颜色选取

对于每一个三角形区域，需要选取一个颜色。两种简单而直接的方法是：

1. 在 RGB 空间中对三角形区域中各点的颜色取均值；



(a) 优化前 (b) 优化后

图 6: 顶点优化前后最终图片生成结果对比

2. 直接使用三角形重心点的颜色代表三角形的颜色。

前者需要对多点的颜色值进行加权，因此非常缓慢，且容易造成物体边缘模糊不清或出现锯齿状。后者效率很高，并在实测中取得了良好的效果。此外，[4] 中还提到了可以通过在 LAB 色彩空间中进行顺序统计的方法对颜色选取进行优化。由于在测试的人物图像中，取重心点简单方法都取得了很好的效果，没有再进行尝试。

此外，可以对颜色进行一些简单的后处理，比如对前景区域适当增加饱和度，可以达到强调人物、使照片更加生动的效果。

3.5 拼合方法

拼合两张人像时，需要使背景衔接处尽可能自然。三角化已经使背景纹理不会出现突兀的变化，但两张照片的背景颜色仍然需要调整。具体操作如下：选取左边图片的最右侧 $1/10$ 的部分和右边图片最左侧 $1/10$ 的部分，在 HSV 空间中分别统计三个通道的代表值 $\hat{h}_1, \hat{h}_2, \hat{s}_1, \hat{s}_2, \hat{v}_1, \hat{v}_2$ ，其中：

- 由于 H 通道对应的是色环，不宜直接使用平均数或中位数；取而代之，对感兴趣区域的 H 通道进行直方图统计，取直方图中众数所对应的区间中点作为代表值；
- S, V 通道中，直接使用区域中位数所谓代表值。

进而确定目标值 $\tilde{h}, \tilde{s}, \tilde{v}$ ：

- \tilde{h} 可由用户指定
- $\tilde{s} = \frac{1}{2}(\hat{s}_1 + \hat{s}_2)$
- $\tilde{v} = \frac{1}{2}(\hat{v}_1 + \hat{v}_2)$

从而可确定偏移量 $\Delta x_i = \tilde{x} - \hat{x}_i (x \in \{h, s, v\}, i \in \{1, 2\})$ 。对相应的整张图片的背景在相应通道上加以偏移即可。

对两张图片的背景分别进行色彩偏移后，可将其直接水平拼接、整体进行低多边形化处理。

4 结果

对部分著名人物（Lena、梅西、Bobby）的照片，以及这个故事的主角云天明和程心（根据网友对尚未完成的三体电影的讨论，分别由演员黄轩和高圆圆扮演）的单张照片进行低多边形化处理，得到结果如图 7 所示。

对云天明和程心的图片按3.5中的方法进行拼合，得到结果如图 8 所示。

5 故事结局

我乘坐的二向箔很快到达了三体星系和太阳系。我拿起狼毫笔、铺开雪浪纸，万物瞬间湮没于我的笔下。对于两个一度在三维空间中灿烂过的文明来说，三维世界中的一切都结束了，二维空间才是他们的归宿。在终结前的最后一刻，云天明回到了程心的身旁——两人在茫茫宇宙中长相守望，就像图8那样。人类将要在二维世界中开始新的生活，我衷心地为他们祈祷：愿有情人终成眷属，无论何时、何地、在几维空间当中。肉身终会老去，画作也会褪色，唯有梦想与情愫长存。

给时间以生命，给岁月以文明。

6 程序文件说明

- `lowpoly(I, fg_sat_boost, bg_hue_offset, fineness)`: 生成单张低多边形图像的函数，参数依次是原图、前景饱和度增强系数（0 表示

不增强，越大增强越明显)、背景色度偏移量 (-1 到 1 之间)、精细程度 (正数，越大越精细，1 为默认值)；

- `combine(I1, I2, bg_h, fg_sat_boost, fineness)`: 生成拼合低多边形图像的函数，参数依次是左侧原图、右侧原图、目标的背景色度代表值 (0 到 1 之间)、前景饱和度增强系数 (0 表示不增强，越大增强越明显)、精细程度 (正数，越大越精细，1 为默认值)；
- `segment, prune, sample, optim, sample_color`: 对应于算法流程中各个环节的函数 (其中形态学修剪算法 `prune` 直接取自自己的第 6 次小作业)；
- `test`: 包括了调用 `lowpoly` 和 `combine` 这两个主入口函数的示例代码。

参考文献

- [1] 刘慈欣, 三体 III: 死神永生. 重庆出版社, 2011.
- [2] W. contributors, “三体 III: 死神永生 — Wikipedia, the free encyclopedia.” 2017.
- [3] W. Zhang, S. Xiao, and X. Shi, “Low-poly style image and video processing,” in *Systems, signals and image processing (iwssip), 2015 international conference on*, 2015, pp. 97–100.
- [4] M. Gai and G. Wang, “Artistic low poly rendering for images,” *The visual computer*, vol. 32, no. 4, pp. 491–500, 2016.
- [5] W. contributors, “Delaunay triangulation — Wikipedia, the free encyclopedia.” 2017.



(c) 梅西 - 原图 (d) 梅西 - 低多边形化



(g) 程心（高圆圆饰）- 原图 (h) 程心（高圆圆饰）- 低多边形化



图 7: 单张人物图像低多边形化结果



图 8: 图片拼合结果