摘要

考古图像的虚拟修复，包括但不限于对绘画、壁画、器物彩绘、出土时有裂痕的物品、旧照片的修复，需要填补缺失部分的图像信息，在原理上和数字图像修复有共通性。先人在日常生活中所使用的的物质，构成了如今我们所见的文物，成为历史与文化的载体，有金石、陶瓷、绘画等介质。对于不同材质的文物，由于理化性质的不同，产生的缺损的形式也会有所不同，所以虚拟修复方案应有所区别。针对文保领域的需要，本文将探讨以壁画修复为研究对象的，基于深度学习的图像补全(Image Inpainting)的行之有效的虚拟修复手段。并根据修复算法实施在文物图像修复上的效果，以“修复如初”为原则，提出对相关领域进行数字化修复时需要改进的方向。

关键词：深度学习，图像修复，文物修复，壁画

Abstract

目录【完成后填写】

一、课题研究背景及意义

1.1壁画常见的病害类型

受到自然环境的影响，壁画往往在长期的侵蚀破坏下产生不同种类的病害，壁画古代壁画修复时应充分考虑到其病害特征。病害的特征包括以下的种类，例如支撑体与壁画的地仗层部分脱离产生空鼓、地仗层完全脱离产生大面积脱落、底色或颜料层产生的网状的龟裂、小尺寸的粉化脱落[5]、以及动物损害等。【图[http://kns.cnki.net/KXReader/Detail?TIMESTAMP=637211142310401250&DBCODE=CJFQ&TABLEName=CJFDLAST2019&FileName=YCBH201902027&RESULT=1&SIGN=yhzYSY%2frENlltyd%2baxWkepjkB%2fw%3d](http://kns.cnki.net/KXReader/Detail?TIMESTAMP=637211142310401250&DBCODE=CJFQ&TABLEName=CJFDLAST2019&FileName=YCBH201902027&RESULT=1&SIGN=yhzYSY/rENlltyd+axWkepjkB/w=)】对于不同种类的病害，损坏区域的形状及面积不尽相同，修复手段也有所区别。本文中将选取大面积脱落以及小面积粉化脱落两种类型的病害来进行虚拟修复的研究。

1.2进行壁画修复工作的手段

1.2.1早期的壁画修复

最早的文物图像修复起源于文艺复兴时期的欧洲，当时的艺术家根据自己的经验和理解，对前人的画作进行复原。例如1565年，皮埃特罗·卡鲁奈模仿米开朗基罗的画风修复了其在梵蒂冈西斯廷教堂的湿性壁画[1]。但传统的图像修复依赖修复者的个人技巧，其修复周期长，且一旦出现偏差，将对文物本身造成不可挽回的毁坏。

1.2.2基于传统方法的的数字化壁画修复

随着现代计算机科学的发展，计算机视觉领域对图像处理作出了很多工作，而相关的成果也被广泛运用到实际工作中来。数字图像修复技术可以大致分为基于结构的图像修复、基于纹理的图像修复和基于深度学习的图像修复。

非深度学习的方法中，基于结构的修复利用变分和微分方程模型，基于纹理的修复常采用纹理合成的方法。例如，王展等人[2]利用Criminisi算法对四川新津观音寺的明代壁画修复展开了研究；Baat等人[3]则利用CDD(Curvature Driven Diffusion,曲率驱动扩散)这一基于全变分(Total Variation,TV)模型的图像去噪方法来对奥地利维也纳发现的尼德哈特(Neidhart)壁画进行了虚拟修复。然而，以上算法在实际应用中都存在一定的问题和局限性。Criminisi算法的缺点有权重的可靠性不佳，以及patch搜索错误匹配率高等问题。CDD模型存在着边缘的视觉效果不自然、耗时长、迭代复杂等缺陷。

1.2.3基于深度学习的图像修复方法

近年来深度学习已经被深入地应用于各个领域，基于深度学习的图像修复(Image inpainting)手段也日臻成熟。图像修复的途径主要分为三种，即基于序列模型(Sequential-based)，基于生成对抗网络(GAN-based)，和基于卷积神经网络(CNN-based)[4]。深度学习方法解决图像修复问题的算法研究成果丰富，对于来自互联网上各大开源的图像数据集的修复处理已有广泛的实践。较之于传统的数学方法，深度学习修复效果更为出色。

古代壁画的虚拟修复，与图像修复在原理上相通。现有的修复方法可以作为参考和借鉴，应用到壁画，乃至于各种文物的图案修复工作中来。需要注意的是，目前深度学习的研究者在其修复样例中经常采用的掩膜覆盖方式一般为矩形，这与大面积缺失的形式类似，但是同小面积不规则缺失的缺损形式仍有一定的区别。这种情形下，我们需要向研究对象添加不规则的噪点，然后进行修补。在考古学的实际工作中，壁画常出现大面积的图像缺失。深度学习方法的修复往往是基于在大量的训练模型基础之上形成的幻觉，来对缺失区域进行图案上的预测。因此，当缺损区域较大时，深度学习方法修复的结果可能会与实际样式有一定的出入。



1.3进行基于深度学习的壁画虚拟修复研究的意义

我国有漫长的历史和源远流长的传统文化，这使得我们有丰富的文物遗存。诸如壁画、器物等的文物上直观地为现代人类展现着古代的社会生活状况，是传统文化的载体。因此，做好文物的保护工作，有利于弘扬传统文化，增强公民对中华文化传统的历史自豪感，增进文化自信。

引进先进的深度学习方法进行壁画等类型的文物的修复，符合生产力的发展规律。但是基于深度学习方法的文物修复文献数量不足，并且古代和现代的作品在风格上存在明显差异，而互联网上开源的数据集的组成多为现代风格图像或者自然风景等，对于古代艺术作品的图像收录较少，如果完全套用现有的较成熟的，但是与壁画内容相差较大的预训练数据集，如SVHN和ParisStreetView，修复结果可能不尽如人意。可见，目前对于虚拟修复古代壁画的深度学习方法深的研究，仍需要进行探究，以期获得在视觉上最为合理的修复结果。

基于考古行业的需要，我们应采取可对任意形状的掩膜进行修复的方法，这样对于没有计算机科学方面专业背景的文保工作者，可以降低其进行数字修复工作的难度。

1.4在本文中所采用的方法

在本文中，我们将利用对抗生成网络(Generative Adversarial Network,GAN)进行语义图像修复(Semantic Inpainting)。Pathak[6]等提出的ContextEncoder(CE)是语义图像修复方面的开创性方法，是一种基于编码器-解码器结构的对抗生成网络的方法。这种方法给定了缺失区域的掩膜，以此训练神经网络进行上下文的编码，进而完成对缺损区域的预测。这种方法的缺点是，在缺损形状随机的情况下易造成修复出的图像模糊，它只在训练过程中而并未在推断过程中利用掩膜的结构。对于不同形状的掩膜也需要单独训练。Nazeri[7]等提出的基于对抗边缘学习的方法，从对缺失部分的边缘轮廓计算入手，在第一级网络中生成修复对象的完整的边缘信息，这将成为下一级修复网络的先验信息。随后轮廓与原图像一同作为神经网络的输入进行修补。Yeh等人[8]采用的基于DCGAN(Deep Convolutional GAN)的语义图像修复方法，可以得到边缘过渡自然的修复结果。可以说，现今深度学习领域的日新月异的成果，很好地迎合文保工作者的工作需要。

此外，由于进行的虚拟修复并不破坏文物本身，其目的是为了将文物的原貌展现与世人，故可以在深度学习方法的处理过程之后，对图像进行图像降噪、色彩复原等操作。跨平台的Opencv库向我们提供了Color-enhance插件，对于图像的色彩优化不失为一个良好的解决方案。

本文的结构安排如下

第一章 绪论

第二章 方法综述

第三章 结合OpenCV的基于DCGAN的图像修复

第四章 实验及分析

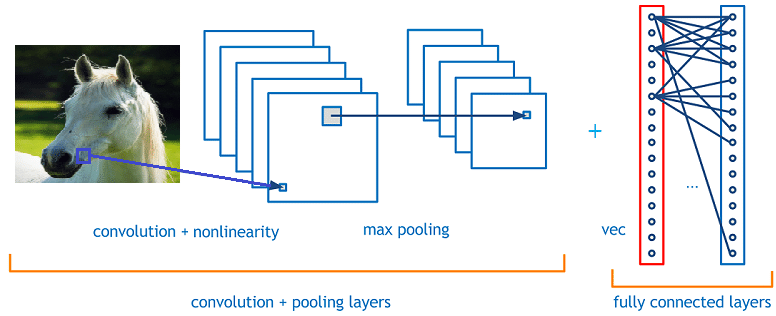
第五章 结论和展望

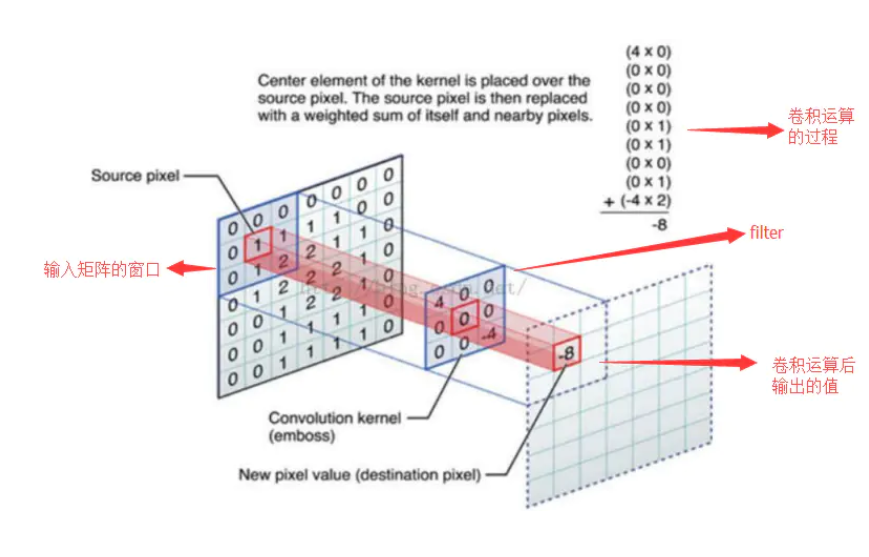
二、方法综述

2.1卷积神经网络

卷积神经网络(Convolutional Neural Network,CNN)是深度学习的常用的算法之一。如图【】所示的是一个典型的CNN网络架构。卷积神经网络包括卷积层、池化层和全连接层组成。这是一种可以有效地提取图像特征的方法。

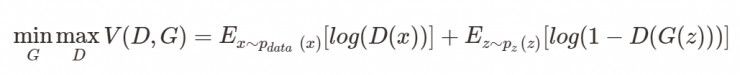
在卷积层中会使用正方形的卷积核，来遍历图片上的每一个像素点。卷积核覆盖的区域，又称为“感受野”，其中每一个点都有权重。如果使用3\*3大小的卷积核，则将此区域内的九个点做加权求和，然后加上偏移量，得到一个点的像素值。池化层作用是保留图片主要的信息，去除冗余信息，来压缩图像。出于特征的不变性，即使去掉了一部分冗余，仍可以表达出图片的特征，保留对于图像处理任务关键的特征，称为特征降维。池化层常用Max pooling方法，简而言之，是将图片分为若干个同等大小的块，每块里取一个最大的节点，来代表所在的块，与其他块取出的节点组合到一起构成输出，可以大大地压缩图像的大小。全连接层通过对特征值进行卷积处理，将特征整合到一起，来对数据进行分类，减少关键特征因位置不同对网络精确性的影响，可以增强神经网络的鲁棒性。





2.2生成对抗网络

生成对抗网络(Generative Adversarial Network,GAN)是一个无监督的学习过程，主要包括：负责生成真实图像的生成模型G，和负责对抗G，即判别G产生的图像的判别模型D,被其提出者Goodfellow[9]等比作两个人的博弈。G不断地从先验分布中取样，捕捉样本的分布特征，并生成着图像来交给D判断，试图骗过D的判断并使之认为图片为真实，D则试图判断出G提交的图片的异常。在这样的博弈过程中生成模型和判别模型不断“进化”，使得最终整个生成对抗网络能够得到感知上最为真实的图片生成结果。原始论文[9]中将D和G的优化过程看作一个最大最小优化问题,对其这给出了这样的目标函数：

(1)

Pdata(x)中的x是来自真实数据分布的样本，z是潜在空间的随机编码，D(x)是判别网络输出的图片是否为真的概率，取值大于0，小于1。

对于G的优化，(1)式取最小值：

IMG_256

优化生成器时应该以蒙骗过判别器D为目标，那么应当追求D(G(z))尽可能的大，所以log(1-D(G(z)))尽可能小。

对于D的优化，(1)式取最大值：

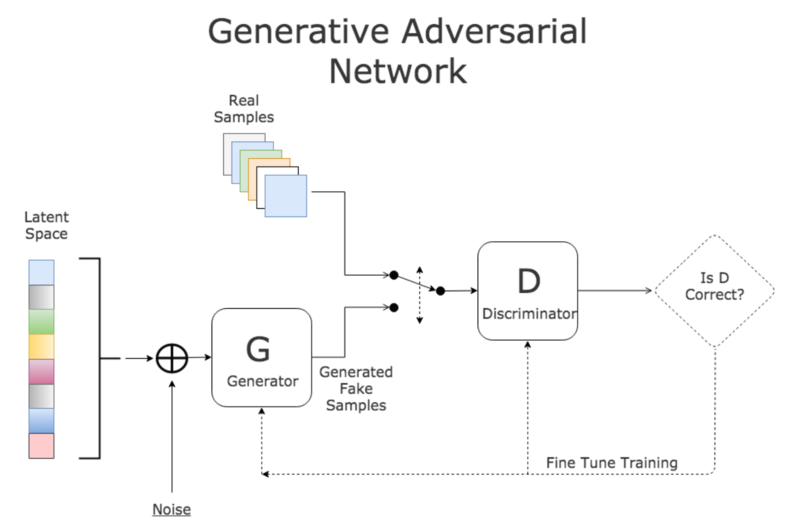
IMG_256

判别器D是与生成器G在网络中起到对立作用的模型，其目的是拉大生成器G的输出图像的分布与真实数据分布之间的距离。与G的优化方向相反，D要尽可能地判断出G制造的假样本，则D(G(z))应尽可能小，对于来自于真实样本的输入x，则应该让D(x)尽可能大。

生成器G和判别器D在这样的过程中不断进步，最终要达到的目标是G生成的样本的分布pG与真实样本的分布pdata一致，即pG=pdata。

即D(G(z)) = 0.5。

此外，我们需要减少在机器学习中出现的过拟合，增强模型的泛化能力，从而确保确保这个模型不只是针对特定的输入数据起到作用。可以在损失函数中加入正则项来防止出现过拟合，这将在本文的3.2.2部分中得以体现。

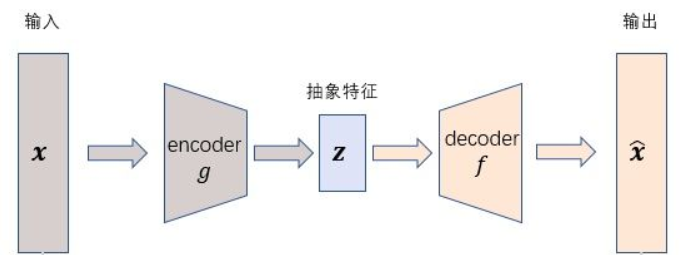


本文介绍的方法在判别器部分使用了PatchGAN模型，这是一种对GAN模型的改进。常规的GAN模型存在着训练困难，缺乏稳定量化的度量标准来衡量训练所达到的程度等问题。相比于GAN网络，判别器所加入的PatchGAN的方法，对图像的每一个70x70的小块进行判别。在判别器的输出方面，将传统的GAN二元化的真伪判断，改为输出对判别对象的置信图，来表示判别器D对生成器G提供的图像的置信度。当前图像的patch即为感受野，而得到最终loss的方法是将所有的patch的loss取均值。

无论是普通的GAN还是本文中使用的PatchGAN，其训练的过程仍保持一致：第一步，不停地训练判别器D，使公式(1)取值最大；第二步，控制变量，令D不变，不停地训练生成器G，并使公式(1)取值最小，等价于D(G(z))取值最大。以上两步就是G和D之间的博弈，是生成对抗网络的基本思想，这样的过程需要不断地重复，直到判别器和生成器之间的博弈达到D(G(z)) = 0.5的纳什均衡。

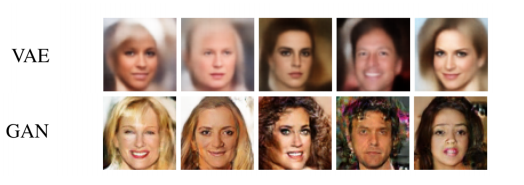
2.3自编码器

自编码器（Auto Encoder）是一种无监督学习的神经网络，由编码器(Encoder)和解码器(Decoder)两部分网络组成，引导着编码和解码两个过程。自编码器被用于数据的降维，及对数据特征的提取。在这一体系中，编码器将输入x做映射，到特征空间z，即编码过程。解码器再将z作为输入，将特征再度做映射，回到原始空间得到x’，网络的优化目标则是使得x与x’的分布尽可能地接近。



【这个图是网上找的】

变分自编码器(Variational Auto Encoder,VAE)[10]是自编码器(Auto Encoder,AE)的一种，利用了变分和贝叶斯公式。VAE作为一种常用的无监督网络模型，常与GAN作为比较。以目前流行的人脸图片修复研究为例，通过对比图片【】的视觉效果，可以看出目前VAE进行的图像修复时的输出相较于GAN的输出，存在着较为明显的输出图像模糊的问题。因此，本文中选择GAN而非VAE方法来探究对古代壁画的修复。



图x：来自VAE和GAN的人脸修复结果范例

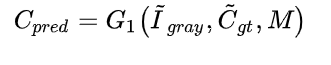
2.4OpenCV

OpenCV是一个开源的计算机视觉库，适用于图像处理、物体识别、人机交互等方面的问题。其突出优势在于跨平台，且轻量、经过了大量的优化，为诸如Python,Java,Matlab,Ruby等语言提供使用接口，使得图像处理更易于进行，帮助其实现高效率的计算。OpenCV中提供有多种强大的的图像去噪函数，例如高斯模糊去噪、均值去噪、非局部均值去噪等。在诸如文献[11,12,13]的深度学习研究中，均采用增加高斯白噪声来模拟实际存在的复杂的来源的环境噪声。对于小面积且密集的粉化脱落类型缺失的古壁画，其特征与高斯白噪声类似。可以添加高斯白噪声来模拟其病害，并通过高斯模糊去噪等方法完成对相关类型的病害的修复。OpenCV也可以用于图片的对比度增强。对于灰度图片的对比度增强，常采用的方法是直方图均衡化；而彩色图像的彩色增强也可以用类似的办法，即RGB图像分通道进行直方图均衡化。进行在经过生成对抗网络的生成之后，可以对输出壁画图案再经过OpenCV进行诸如降噪和彩色增强处理，来增进修复的视觉效果。

三、基于GAN的边缘学习图像修复

3.1相关的网络模型设计

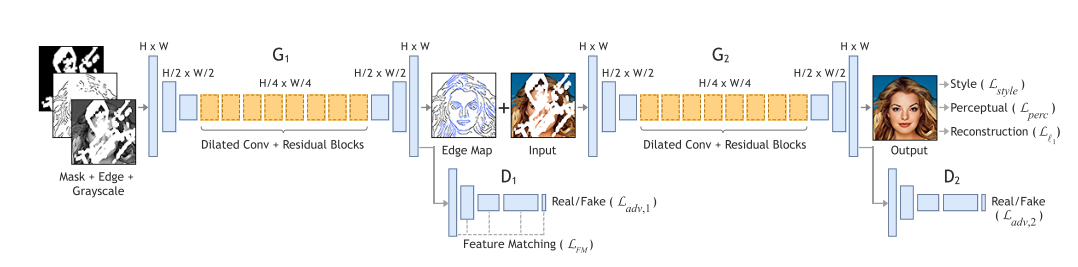
基于生成对抗网络的基本原理，本文中的网络结构中需要有一个生成器G和一个判别器D。在一般的生成对抗网络中，神经网络需要经过以原始图片为数据集的训练过程，来得到一个先验分布pdata。在生成对抗网络中，模拟人类的感知功能的组件是多层感知器，这是一种前馈的神经网络。它通过限制隐含层节点的方法，使得输出侧节点少于输入侧，对数据进行降维，对特征进行提取。一般的思路是通过对图像完好区域的不断取样，来生成目标区域的像素，来修复缺损区域的图案。然而这些传统的方法都聚焦于对图片的像素进行不断的取样和RGB三通道分析来完成对缺失区域的判断，忽视了线条轮廓在图像信息传达中的重要作用，例如素描作品和黑白照片通过轮廓的描绘就可以传达丰富的信息。Xiong等人[17]在CVPR 2019会议中提出了一种根据轮廓来修补整张图片提出了优先修补线条，之后填补颜色的方法，将图像修复问题转化为主要信息的(线条)和次要信息(线条包围区域的颜色)的补全问题。在这里，我们将整个生成器-判别器网络拆分为两个工序：其一，生成轮廓；其二，修补图像。

轮廓生成器G1将真实图像转化为灰度图像作为输入，对有缺损的真实图像生成轮廓。我们将真实的样本图像的灰度图表示为Igray ，将掩码区域表示为M，根据Nazeri[7]在其论文中提出的思路，G1的输入表示为，其中符号【】指的是对矩阵对应位置元素相乘（哈达玛积）。这里应用Canny边缘检测算子[18]来得到图像的轮廓图，记为Cgt。则轮廓生成器的预测图像表示为

图像修复网络与上文所述的轮廓生成网络类似，将处理后的彩色缺损图像和合成的轮廓图作为输入。彩色图像输入表示为，而合成过的轮廓图表示为

，即缺失的部分采用预测的轮廓，而完好的部分采用原有的轮廓。图像生成网络将前置网络输出的预测轮廓图与在当前阶段输入的彩色图像相耦合，得到对最终图片的预测：





网络结构如图【上面这个图有时间自己做一张】所示，轮廓生成网络的生成器G1是根据Canny轮廓提取算法，先将输入图像做高斯卷积来进行平滑滤波，通过卷积将H×W尺寸的图片压缩为H/4×W/4尺寸，之后通过空洞卷积，增大感受野，提取图像特征。之后进行反卷积，将图片恢复到原尺寸，并输出轮廓图像。在以损失函数Ladv，1和LFM约束性能的判别器D1给出置信度之后，生成器G1将生成的轮廓图提交给下阶段的图像修复网络。G2将和Cpred作为输入，并再次经过一个与空洞卷积网络，将轮廓“草图”与真实图像耦合起来，根据预测的轮廓提取到的特征，对缺损区域进行符合上下文的内容预测。在生成器和判别器的训练过程中，采用了Adam优化器，根据一阶矩估计和二阶矩估计来不断地调整学习率，来对神经网络进行优化，可以使参数在每一次迭代(Iteration)中的变化幅度很平稳，更容易找到全局最优点。【网络架构 论文附录有详细】

3.2损失函数

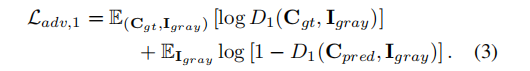
3.2.1轮廓生成网络的损失函数

损失函数是机器学习中衡量模型处理问题的能力的度量标准，是解决问题关键的要素。与一般的生成对抗网络类似，本文所研究的问题也归结为最大最小问题，可以用以下公式表示：

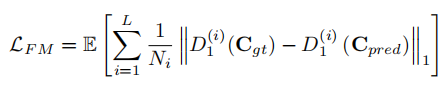


其中λadv,1和λFM是常数，代表着两个损失函数在性能衡量中所占的权重，在这里取λadv,1=1，λFM=10。Ladv,1代表着对抗损失(Adversarial Loss)，使图像看起来更为自然，LFM代表特征损失（风格损失函数(Style Loss)），其目的是保持输出图像的风格与原图像相近，风格损失函数代表着G生成的图像因为风格与真实数据存在差异而被判别器D辨别出来时的罚分。

对于轮廓生成网络中的对抗损失函数Ladv,1 ，参考Nazeri[8]的研究做出如下规定：



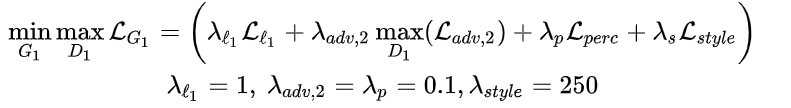
而对于风格损失函数【LFM】，其起到的作用是鼓励生成器生成与原分布相接近的图像，并惩罚生成的偏差较大的图像。对于惩罚函数的惩罚项的设置，在机器学习领域常用到l1和l2正则化(norm)。l1-norm指各元素的绝对值之和，它可以产生一个稀疏模型；l2-norm指各元素平方和的平方根，可以防止模型过拟合。参考计算机视觉领域的文献[14]可知基于l1正则化的回归算法(LASSO回归)具有更好地从稀疏模型中提取数据特征的能力，且相比l2正则化有更好的鲁棒性。因此在语境损失函数中，我们将原有的轮廓图，与预测的轮廓图做l1范数差，得到以下的LFM表达式：



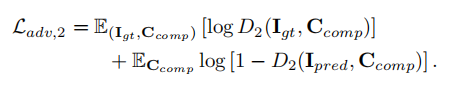
其中L代表判别器卷积层的层数，Ni代表判别器第i层的元素个数，D1(i)代表判别器在第i层的激活结果。

3.2.2图像修复网络的损失函数

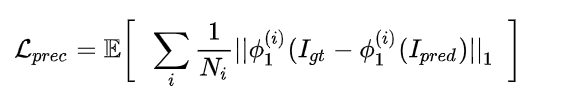
同样地，对于图像修复网络部分的损失函数，也可看做最大最小问题，即：

（下角标改成2）

其中Ll2是l1范数损失函数，Lperc指感知损失函数，Lstyle指风格损失函数。对抗损失函数Ladv,2代数表示为：



感知损失函数Lperc表示为：



其中，φ1(i)代表使用的VGG-19预训练模型中激励函数的特征图(i∈[1,5]且i∈N)，例如 φ1(3)代表着ReLU\_3\_1激励函数。

参考Sajjadi[19]的论文，对于一个给定的Cj × Hj × Wj 的特征图，风格损失函数Lstyle表示如下：



其中，Gjφ是对前文所述的激励函数图构造得到的伽马矩阵(Gram Matrix)。根据有关文献[7]，在这里我们规定常数 λl1 = 1, λadv,2 = 0.1,λp = 0.1, λs = 250。

四、实验及分析

* 1. 数据集的选取及掩膜区域的类型

在与本文相关的实验中，采用了本人自行收集的唐代墓葬壁画图像所制作的数据集。此外，由于壁画内容与现代摄影图片内容相似，都存在着多种样式的题材，不能泛泛地进行研究，需要明确研究对象，所以这里在图案上统一选取包括人脸内容的壁画。因此，也使用了学术界在人脸识别及图像修复研究上经常采用的CelebA数据集。

CelebA数据集是名人人脸属性数据集，包含了超过一万个名人身份的202,599张进行过特征标记的RGB彩色人脸图片。我们从CelebA和唐代壁画中分别选取一定数量的图片，调整尺寸到64x64，并保证其包含面部的基本特征，构成数据集。

在这里我们添加多种形式的掩膜，来分别模拟壁画中多种形式的病害缺损，包括随机的点状噪声掩膜、覆盖一半图像的大面积掩膜、以及深度学习领域常见的位于图像中心的矩形掩膜。

相比于色彩暗淡，边缘模糊的古代壁画，CelebA的人脸图像轮廓和特征鲜明，更适宜进行机器学习的训练，有利于特征的提取。本文相关的实验中我们将加载基于CelebA数据集的预训练模型，测试其应对古代绘画风格的人像图像的修复效果。

* 1. 视觉上的比较Visual Comparisons
  2. 定量比较Quantitative Comparisons

在这里我们采用PSNR评价标准。

4.4讨论 Discussion

五、结论 Conclusion

引用文献

[1]詹长法.意大利现代的文物修复理论和修复史(下)[J].中国文物科学研究,2006(03):92-95.

[2]王展,王慧琴,吴萌,陈卿.新津观音寺明代壁画图像的计算机自动虚拟修复研究[J].文物保护与考古科学,2018,30(03):109-113.

[3]Baatz W,Fornasier M , et al. (2008). Inpainting of Ancient Austrian frescoes[J]. Proceedings of Bridges,2008:150-156.

[4]Elharrouss O , Almaadeed N , Al-Maadeed S , et al. Image inpainting: A review[J]. Neural Processing Letters, 2019.

[5]温利龙. 基于神经网络的古壁画破损修复与风格复原研究[D].云南大学,2019.

[6]Pathak D , Krahenbuhl P , Donahue J , et al. Context Encoders: Feature Learning by Inpainting[J]. 2016.

[7]Nazeri K , Ng E , Joseph T , et al. EdgeConnect: Generative Image Inpainting with Adversarial Edge Learning[J]. 2019.

[8]Yeh R A , Chen C , Lim T Y , et al. Semantic Image Inpainting with Deep Generative Models[J]. 2016.

[9]Goodfellow I, Pouget-Abadie J , et al. Generative Adversarial Nets[J]. ArXiv.2014

1. Kingma D P, Welling M.Auto-Encoding Variational Bayes[J]. stat, 2014, 1050: 10.
2. Dai, Jifeng, Qi, Haozhi, Xiong, Yuwen,等. Deformable Convolutional Networks[J].
3. Min J , Carlini L , Unser M , et al. Fast live cell imaging at nanometer scale using annihilating filter-based low-rank Hankel matrix approach[C].Wavelets and Sparsity XVI. International Society for Optics and Photonics, 2015.
4. Fan, Qian, Zhang, Lifeng. A novel patch matching algorithm for exemplar-based image inpainting[J]. Multimedia Tools & Applications.
5. 张振月. 基于范数正则化回归的人脸识别[D]. 2016.
6. Johnson, Justin, Alahi, Alexandre, Fei-Fei, Li. Perceptual Losses for Real-Time Style Transfer and Super-Resolution[J].
7. 叶璐. 基于生成对抗网络的人脸图像修复的研究[D].哈尔滨工业大学,2019.
8. Xiong, Wei, Lin, Zhe, Yang, Jimei,等. Foreground-aware Image Inpainting[J].
9. John Canny. A Computational Approach To Edge Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6):679-698.
10. Sajjadi M S M , Scholkopf B , Hirsch M . EnhanceNet: Single Image Super-Resolution Through Automated Texture Synthesis[C]// 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). IEEE, 2017.