

分类号: TP391.41

单位代码: 10335

密 级: 无

学 号: 11521059

浙江大學

博士学位论文



中文论文题目: 面向复杂场景理解的视觉内容识别、
检测与推理方法研究

英文论文题目: Visual Recognition, Detection, and Reasoning
for Complex Visual Scene Understanding

申请人姓名: 陈隆

指导教师: 肖俊

合作导师:

专业名称: 计算机科学与技术

研究方向: 计算机视觉

所在学院: 计算机科学与技术学院

论文提交日期 2020 年 xx 月 xx 日

面向复杂场景理解的视觉内容识别、
检测与推理方法研究



论文作者签名: _____

指导教师签名: _____

论文评阅人 1: _____

评阅人 2: _____

评阅人 3: _____

评阅人 4: _____

评阅人 5: _____

答辩委员会主席: xx 教授 xx 大学

委员 1: xx 教授 xx 大学

委员 2: xx 教授 xx 大学

委员 3: xx 教授 xx 大学

委员 4: xx 教授 xx 大学

委员 5: _____

答辩日期: 2020 年 xx 月 xx 日

Visual Recognition, Detection, and Reasoning
for Complex Visual Scene Understanding



Author's Signature: _____

Supervisor's Signature: _____

Thesis reviewer 1: _____

Thesis reviewer 2: _____

Thesis reviewer 3: _____

Thesis reviewer 4: _____

Thesis reviewer 5: _____

Committee of oral defence:

Committee Chairman: xx Professor ZJU

Committeeman 1: xx Professor ZJU

Committeeman 2: xx Professor ZJU

Committeeman 3: xx Professor ZJU

Committeeman 4: xx Professor ZJU

Committeeman 5: _____

Date of oral defence: xx June 2020

浙江大学研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 签字日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权浙江大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名： 导师签名：
签字日期： 年 月 日 签字日期： 年 月 日

摘要

xx

1. xx

关键词：视觉感知，目标检测，目标跟踪，目标识别，深度学习

Abstract

xx

1. xx

Keywords: Object perception, object detection, object tracking, object recognition, deep learning

目 次

摘要	I
Abstract	III
目次	
插图	IX
表格	XI
1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究内容	3
1.2.1 基于属性保持对抗学习的零样本物体分类	3
1.2.2 基于反事实多智能体学习的场景图生成	3
1.2.3 基于通道注意力机制的视觉描述生成	3
1.2.4 基于密集型自底向上框架的视觉检索	3
1.2.5 基于反事实样本生成的视觉问答	3
1.3 本文组织结构	3
1.4 本章小结	5
2 相关研究综述	7
2.1 零样本物体识别	7
2.1.1 零样本学习	7
2.1.2 域偏移问题	7
2.1.3 对抗生成网络	8
2.2 图像场景图生成	8
2.2.1 场景图生成	8
2.2.2 多智能体策略梯度	8
2.3 图像描述语句生成	9
2.4 视频片段检索	9

2.4.1	基于文本的视频片段检索	9
2.4.2	基于视频的视频片段检索	9
2.4.3	自上向下框架与自底向上框架	9
2.5	图像视觉问答	9
2.5.1	视觉问答模型的文本偏差	9
2.5.2	视觉问答模型的特性	9
3	基于属性保持的零样本物体分类方法	11
3.1	问题描述	11
3.2	属性保持的对抗网络学习	13
3.2.1	零样本分类预备知识	13
3.2.2	分类任务优化目标	14
3.2.3	重建任务优化目标	15
3.2.4	对抗学习优化目标	15
3.2.5	总体优化目标	16
3.3	实验设置与性能分析	16
3.3.1	零样本物体分类数据集	16
3.3.2	实验设定与零样本物体分类评价指标	17
3.3.3	网络模型与参数设置	17
3.3.4	零样本物体分类的性能对比	17
3.3.5	零样本物体分类方法分析	18
3.4	本章小结	21
4	基于反事实的多智能体学习的图像场景图生成方法	23
4.1	问题描述	23
4.2	反事实的多智能体学习	26
4.2.1	场景图生成中的多智能体通信	27
4.2.2	反事实多智能体学习	30
4.3	实验设置与性能对比	33
4.3.1	图像场景图生成数据集与实验设定	33
4.3.2	实验细节	33
4.3.3	场景图生成性能分析	34
4.3.4	场景图生成性能对比	36
4.4	本章小结	38

5 基于空间和通道注意力机制的图像描述语句生成方法	39
5.1 问题描述	39
5.2 空间和通道注意力机制	41
5.2.1 概述	41
5.2.2 空间注意力机制	42
5.2.3 通道注意力机制	43
5.3 实验设置与性能对比	43
5.3.1 图像描述语句生成数据集	43
5.3.2 评价指标	43
5.3.3 实验设定	44
5.3.4 通道注意力机制的性能分析	44
5.3.5 多层注意力机制的性能分析	44
5.3.6 空间和通道注意力卷积神经网络的性能比较	44
5.3.7 空间和通道注意力机制的可视化	44
5.4 本章小结	44
6 基于自底向上框架的视频片段检索方法	49
6.1 引言	49
6.2 视频片段检索	49
6.3 实验设置与性能对比	49
6.3.1 视频片段检索数据集	49
6.3.2 评价指标	49
6.4 本章小结	50
7 基于反事实样本生成的图像视觉问答方法	51
7.1 引言	51
7.2 反事实样本生成	51
7.3 实验设置与性能对比	51
7.4 本章小结	51
8 总结和展望	53
8.1 本文工作总结	53
8.2 未来研究展望	53
参考文献	55
作者简历及在学期间所取得的科研成果	67
致谢	69

插 图

1-1 复杂场景感知和理解的关键技术路线	2
3-1 三种典型的零样本学习框架	12
3-2 现有模型 SAE ^[1] 和提出模型 SP-AEN 的图像重建结果对比	13
3-3 模型 SP-AEN 的整体结构流程图	14
3-4 三种图像重建网络框架	19
3-5 不同图像重建网络框架在数据集 CUB、SUN、AWA、aPY 上的重建 结果	20
3-6 在数据集 SUN、CUB、AWA 和 aPY 中的已见-未见准确率曲线下区 域面积 ^[2]	21
4-1 一个图像场景图生成任务示例	24
4-2 场景图生成中优化目标的整体一致性和局部敏感性	25
4-3 模型 CMAT 的总体流程图	27
4-4 智能体通信示意图	28
4-5 局部敏感性的重要性	31
4-6 CMAT 中反事实基准模型	32
4-7 CMAT 和 MOTIFS 在数据集 VG 上的场景图生成结果对比	37
5-1 VGG19 网络中 conv5_4 层和 conv5_3 层的通道注意力机制示例图	40
5-2 空间和通道注意力卷积神经网络流程图	42
5-3 V 空间和通道注意力机制的可视化结果	48

表 格

3-1 不同零样本物体分类方法在 4 个数据集上的性能对比	18
3-2 不同重建网络下重建图像与输入图像之间的平均像素差平方	19
4-1 不同全局奖励函数的选择对性能的影响	34
4-2 不同基准模型对性能的影响	35
4-3 不同多智能体通信步数对性能的影响	35
4-4 不同场景图生成方法在 VG 数据集上的性能对比.....	36
5-1 VGG-19 网络和 ResNet-152 网络单层注意力机制的性能对比	45
5-2 空间注意力模型在 VGG-19 网络和 ResNet-152 网络下不同层的性能 对比	46
5-3 空间和通道注意力模型在 VGG-19 网络和 ResNet-152 网络下不同层 的性能对比	47
5-4 不同描述语句生成算法在数据集 Flickr8k、Flickr30k 和 MSCOCO 上 的性能对比	47
5-5 不同图像描述语句生成算法在数据集 MSCOCO 的在线服务器上的 性能对比	48

1 绪论

1.1 研究背景

人类对外界客观世界的感知信息绝大部分来自视觉，同样，计算机视觉是机器感知世界的基础。计算机视觉技术的发展，是迈向真正人工智能至关重要的一步。

随着互联网技术及数字媒体设备的快速发展，图像、动态图、视频等包含视觉内容的视觉媒体数据呈现指数级增长。例如，截止到 2019 年 3 月¹，图像社区 Flickr 每日上传图像的记录高达 2500 万张。截止到 2019 年 10 月²，视频分享网站 YouTube 每分钟上传 300 小时视频数据。海量的视觉媒体数据蕴含丰富的视觉场景，通过对视觉场景进行感知、理解和知识推理，可以帮助人类在日常生活中作出重要的决策，推动社会的发展和进步。

然而，日常媒体数据的视觉场景通常包含大量的物体以及物体间的交互，导致对复杂视觉场景的理解与推理存在巨大挑战。因此，利用计算机视觉技术对海量的复杂视觉场景进行感知和理解，在“大数据时代”的背景下，具有十分重大的意义和应用价值。计算机视觉技术的终极目标就是构建一个计算机模型，使其能够像人一样感知和理解复杂的视觉场景。具体来说，这个模型应该具备以下三种能力：

1. 识别和检测视觉场景中所有的组成元素，例如：规则物体 (object)，不规则物体 (stuff)，和视觉关系 (visual relationship) 等；
2. 对视觉场景中感知的视觉信息进行知识推理；
3. 将推理之后得到的知识与人类通过自然语言进行交互。

总的来说，对复杂视觉场景进行感知和理解主要包含对个体层次的识别、场景层次的识别、理解以及推理等关键技术。本文采取的具体技术路线为逐步感知和理解复杂视觉场景的递进研究，如图 1-1 所示，包括物体分类、场景图生成、视觉描述生成、视觉检索与视觉问答：

¹<https://expandedramblings.com/index.php/flickr-stats/>

²<https://merchdope.com/youtube-stats/>

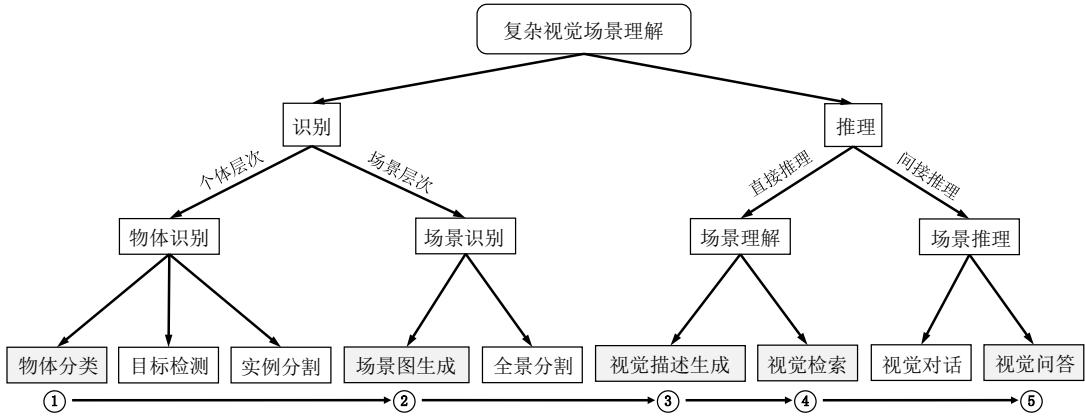


图 1-1 复杂场景感知和理解的关键技术路线

1. 物体识别：对复杂视觉场景理解的首要步骤是对场景中包含的所有规则物体进行个体层次的识别，它是后续对整个复杂视觉场景进行场景层次的识别、理解和推理的基础。物体识别通常包括其个体的类别（物体分类）、大致位置（目标检测）或者精确位置（实例分割）等任务。具体来说，物体分类^[3]任务的目标是对物体进行多类别分类，这也是计算机视觉研究中最基本的任务。随着卷积神经网络^[4]在大规模图像分类数据集 ImageNet 上的成功，理想情况下（即每个类别样本数量均衡）的物体分类技术已经日趋成熟，少样本^[5]或零样本^[6]等更加接近实际应用条件下的物体分类问题已成为近年来的研究热点。目标检测^[7]与实例分割^[8]任务的目标是在物体分类的基础上，同时对物体位置（矩形框或像素）进行定位。通常，这些问题都被转化为多个候选框（或候选形状）的多类别分类和排序问题。本文主要聚焦在零样本条件下的物体分类任务，研究如何保持物体分类所需的属性特征。

2. 场景识别：整个视觉场景的识别，除了对所有规则物体进行个体层次识别之外，还需要对物体之间的视觉关系（场景图生成^[9]）和所有的不规则物体（全景分割^[10]）进行识别。对于复杂场景（即场景中存在大量的物体以及物体间的交互），如果忽略了视觉关系或非规则物体，其后续的场景理解和推理的难度将大大增加。对于前者，场景图生成通过对两两物体间的视觉关系进行检测，将非结构化的视觉场景转化成结构化的场景图，简化对整个场景的理解和推理过程。对于后者，全景分割通过对所有非规则物体进行像素级别的分割，实现对整个场景的语义解析。本文主要聚焦在场景图生成任务的研究上，研究如何设计更加鲁棒的优化目标函数。

3. 场景理解：在对视觉场景中的所有元素都进行识别之后，计算机模型就可以开始对场景的内容进行理解和推理。对于场景理解而言，一个重要的问题是缺乏统一和标准的衡量指标来判断模型对视觉场景的理解程度。随着递归神经网络（如：

LSTM^[11], GRU^[12] 等) 在自然语言处理领域 (Natural Language Processing, NLP) 的成功, 在计算机视觉领域开始出现众多视觉与文本融合的多模态研究任务作为场景理解的代理任务, 如视觉描述生成^[13]、视觉检索^[14] 等。对于视觉描述生成而言, 模型需要生成描述语句来描述整个视觉场景的内容, 并且生成的描述语句是人类能够理解的自然语言。通过对描述语句生成的质量, 来判断模型对场景的理解程度。对于视觉检索而言, 给定模型一个自然描述语句和一段视频序列, 通过对视频序列内容进行理解, 从中检索出其视觉场景内容与描述语句一致的视频片段, 进而判断模型对场景的理解程度。本文将同时聚焦到视觉描述生成和视觉检索两个任务, 研究多模态设定下的视觉场景理解。

4. 场景推理: 人工智能的最终目标, 除了对已经存在的物体进行感知和理解外, 还希望像人类一样能够做进一步的场景推理。视觉问答^[15] 或视觉对话^[16] 等任务, 通常被看作是一种视觉图灵测试, 用来判断模型的推理能力。由于测试问题的自由和开放性, 理论上一个理想的模型需要具备物体识别、场景识别、空间推理、常识推理等多方面的能力。在理论上, 通过对这类问题的求解, 可以进一步思考和理解人类对外界世界的感知和推理过程。在实际应用上, 可以帮助人类更好的与机器完成互动, 推动社会的进步。本文将主要聚焦到视觉问答任务的研究上, 研究如何突破近年来视觉问答研究的瓶颈 (如: 模型受文本偏置影响较大等)。

1.2 研究内容

本文主要研究如何对复杂视觉场景进行不同层次的感知和理解。

本文分别针对复杂场景理解中上述关键技术进行研究, 具体包括以下内容:

- 1.2.1 基于属性保持对抗学习的零样本物体分类
- 1.2.2 基于反事实多智能体学习的场景图生成
- 1.2.3 基于通道注意力机制的视觉描述生成
- 1.2.4 基于密集型自底向上框架的视觉检索
- 1.2.5 基于反事实样本生成的视觉问答

1.3 本文组织结构

本文通过对复杂视觉场景理解中的识别、检测和推理, 提出了多个新算法。全文共分为八章, 后续章节安排如下:

- 第二章介绍了与本文相关的关键技术研究，就零样本物体分类、场景图生成、视觉描述生成、视觉检索和视觉问答等几方面的相关工作和本文的关系进行综述。
- 第三章介绍了基于属性保持对抗学习的零样本物体分类方法。为了解决零样本物体分类中的属性丢失（semantic loss）问题，本章首次提出图像分类与图像重建本质上是相互冲突的两个子任务³。算法通过利用对抗学习的思想，对图像分类语义特征与图像重建语义特征进行对抗学习，让图像分类语义特征能够像图像重建语义特征保持尽量多的属性，进而提升零样本物体分类的结果。此项工作发表在国际顶级计算机视觉会议 CVPR 上。
- 第四章介绍了基于反事实多智能体学习的场景图生成方法。由于目前绝大多数的图像场景图生成方法都是将所有物体和视觉关系的交叉熵之和作为模型最终的优化目标，这往往忽略了图像中不同物体的重要性。本章首次提出反事实多智能体的训练方法，直接将整个场景图的生成质量当成优化目标，有效地对不同重要的物体赋予不同的梯度，得到准确的物体和视觉关系分类结果。此项工作发表在国际顶级计算机视觉会议 ICCV 上。
- 第五章介绍了基于通道注意力机制的视觉描述生成方法。现有的视觉描述生成的方法往往借助空间注意力机制，让模型在生成不同单词时关注到不同的空间区域。本章首次提出通道注意力机制，通过对图像卷积网络特征的通道维度进行加权，让模型能关注到不同的语义信息。将通道注意力机制和空间注意力机制进行融合，不仅极大地提升了描述语句的生成质量，也加深了人们对卷积网络特征的理解。此项工作发表在国际顶级计算机视觉会议 CVPR 上。
- 第六章介绍了基于密集型自底向上框架的视觉检索方法。本章首先对现有的视觉检索两种框架（自顶向下和稀疏型自底向上）进行了分析，首次提出了一种密集型自底向上框架。通过将视频检索序列中的每一帧看成是正样本，极大地增加了训练过程中正样本的数量，解决了自底向上框架下正负样本不均的问题。利用同一帧视频特征对视频序列两端（起始点、终止点）进行预测，也解决了自底向上框架下两端预测相互独立的问题。此项工作发表在国际顶级自然语言处理会议 EMNLP 上。在密集型自底向上框架的基础上，我们进一步创新，对查询（query）和参考视频（reference video）的交互网络进行设计，提出一种基于图结构的金字塔模型。此项工作发表在国际顶级人工智能会议 AAAI 上。

³图像分类需要丢失部分属性特征，而图像重建需要保持所有的属性特征

- 第七章介绍了基于反事实样本生成的视觉问答方法。本章首次提出了一种通用的反事实训练样本生成方法，让视觉问答模型能够更加关注图像或者文本中的所有重要内容（如：图像中的区域或问题中的单词）。通过将图像或者文本中重要的区域或者单词替换，同时更改成不同的标准答案，组成新的训练样本。将合成的训练样本和原有的训练样本一起训练，迫使模型关注到被替换的区域或者单词，进而让模型能够关注到正确的视觉区域和问题，提升视觉问答准确率和模型的鲁棒性。此项工作已经投稿至国际顶级计算机视觉大会 CVPR 上。
- 第八章对全文介绍的工作进行了总结，并提出了对今后的研究展望。

1.4 本章小结

本章对复杂视觉场景理解研究进行了叙述，分别介绍了该问题的研究背景、本文主要的研究内容以及全文的组织结构。

2 相关研究综述

本章将就感兴趣零样本物体识别、图像场景图生成、图像描述语句生成、视频片段检索和图像视觉问答几方面的相关工作和本文的关系进行综述。

本文提出的算法和其相关工作的具体细节和对比将在之后各章节中展示。

2.1 零样本物体识别

2.1.1 零样本学习

零样本物体识别的主流方法是借助类别属性对物体进行零样本学习^[6,17-21]：这类方法通常将类别属性看成是一个共同语义空间的中间特征，从而实现对不同类别之间的语义迁移。为了扩大零样本迁移能力，目前的大多数方法都是基于嵌入映射的^[1,18,22-27]。它们通过将图像特征从视觉空间直接映射到语义空间，然后在语义空间与类别属性的嵌入向量进行相似度对比。语义空间中的嵌入向量既可以来自于单词^[28,29]，也可以来自于语句^[30,31]。我们提出的零样本算法模型算法模型 SP-AEN 也是一种基于嵌入映射的方法。然而，据我们了解，我们是第一个零样本分类算法，可以用语义空间的嵌入向量来重建原始图像。另外，与零样本学习非常接近的两个任务是少样本学习^[32] 和领域自适应^[33,34]。这两个任务在训练阶段都能有少量测试类别的图像，相反，零样本学习在训练阶段没有任何测试类别的信息。

2.1.2 域偏移问题

语义损失在其他的文献中也常常被称为域偏移问题^[35,36]。域偏移问题是所有物体识别任务中一个非常普遍的问题。只要训练集数据和测试集数据分布不同，就存在域偏移问题。目前，需要的研究工作都发现重建原始信号可以缓解域偏移问题^[37]。在本文，我们发现同时进行重建任务和分类任务^[1]对于保持语义特征并不是很有效。另一种缓解语义损失的办法是增加一个单独的属性分类器^[38]，但是这个方法需要额外的属性标注信息。

2.1.3 对抗生成网络

对抗生成网络^[39]主要是训练一个生成器，使得生成器生成的样本和真实数据非常“相似”，可以“骗过”判别器。理论上，这种对抗的训练过程可以让生成器生成的样本分布和真实的样本分布完全相同。我们的零样本分类模型 SP-AEN 将这种对抗思想运用到特征层面上^[40-43]。与此同时，少数零样本分类的模型借助于对抗生成网络来生成更多的训练样本，从而将零样本分类问题转化为普通的分类问题^[44]。但是这类方法违背了零样本分类问题中的一个基本假设：训练阶段中测试集的类别信息是无法知道的。

2.2 图像场景图生成

2.2.1 场景图生成

在第一个视觉关系检测工作^[45]以及大规模图像场景图数据集^[46]出现之后，图像场景图生成任务逐渐成为一个新的研究热点。在早期阶段，许多场景图生成任务将物体和视觉关系拆分成两个独立的任务^[45,47-50]。但是这些方法忽略了场景中所有物体与视觉关系之间内在联系。为了利用所有物体与视觉关系的联系，最近的一些场景图生成算法都利用信息传递机制（Message Passing）^[51-61]。但是由于这些方法仍然是利用交叉熵作为模型的优化目标，在整个图结构层面不具备整体一致性。与现有方法不同，本文提出的 CMAT 模型可以同时满足场景图生成优化目标的两个要求：整体一致性和局部敏感性。

2.2.2 多智能体策略梯度

策略梯度是一种对不可导优化目标进行优化的方法，已经广泛应用在多个场景理解的任务中，如：图像描述语句生成^[62-67]，图像视觉问答^[68,69]，图文匹配^[70,71]，视觉对话^[72]，和物体检测^[73-75]。Liang 等人^[76]将图像场景图生成任务看成一个单智能体决策过程。相反，本文将图像场景图生成任务看成一个多智能体协同决策过程，并且将优化目标设成最终的图像场景图生成质量，利用多智能体策略梯度进行优化。与此同时，与目前许多现有的多智能体工作不同^[77,78]，本文提出的 CMAT 模型里智能体的数量（64 个物体）与动作空间（151 个物体类别）都非常大。

2.3 图像描述语句生成

编码-解码框架已经广泛的应用在许多的多模态任务中,如图像描述语句^[13,79–82],视觉问答^[15,83–85]等。一个基本的编码-解码框架通常利用卷积神经网络(Convolu-tional Neural Network, CNN)对图像或者视频进行编码,得到一个固定的视觉特征,然后利用递归神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)对视觉特征进行解码,生成描述语句或者问答的答案。

随着注意力机制在编码-解码框架的运用,越来越多的视觉-文本多模态任务开始研究注意力机制。

空间注意力机制

语义注意力机制

多层次注意力机制

2.4 视频片段检索

2.4.1 基于文本的视频片段检索

2.4.2 基于视频的视频片段检索

2.4.3 自上向下框架与自底向上框架

2.5 图像视觉问答

2.5.1 视觉问答模型的文本偏差

2.5.2 视觉问答模型的特性

3 基于属性保持的零样本物体分类方法

零样本物体分类旨在对训练过程中从未见过类别的图像进行分类。为了解决零样本物体分类问题，本章我们提出了一个全新的学习框架：属性保持的对抗网络学习（Semantics-Preserving Adversarial Embedding Networks, SP-AEN）。SP-AEN 主要解决了一个目前主流零样本分类框架（基于嵌入映射的模型）中不可避免的问题：语义损失。语义损失是指在训练集的训练过程中，模型往往容易“丢失”一些对训练类别来说区分性不大的属性，但是这些属性可能对测试集（包含不可知的未见类别的图像）非常有用。具体来说，SP-AEN 通过引入一个新的映射函数，从而将两个冲突的任务：分类和重建进行分离，映射到两个子空间中。通过对抗学习，SP-AEN 可以让重建子空间中部分属性迁移到分类子空间，实现对未见类别的分类。通过与现有零样本分类方法的对比，SP-AEN 不仅仅在分类性能上有大幅提升，同时可以生成非常逼真的图像，表现出非常好的属性保持效果。在通用的四个数据集中：CUB、AWA、SUN 和 aPY，SP-AEN 比现有最好的零样本分类方法^[86] 在 H 值上分别提升了 12.2%、9.3%、4.0% 和 3.6%

3.1 问题描述

零样本物体识别（Zero-Shot Recognition, ZSR）或零样本学习（Zero-Shot Learning, ZSL）是为了能够对训练过程未见过的新类别图像进行分类识别。目前，关于零样本学习问题的难点，学界的共识是如何将已见类别的知识迁移到未见类别上。尽管到目前为止，已经有非常多的零样本分类方法，这些方法都是依据一些非常简单和直观的机制。例如，虽然“浣熊”这个类别在训练的时候没有见过，但是我们仍然可以识别出浣熊的图像，通过检查浣熊这个类别特有的一些属性特征，像“有条纹的尾巴”^[6,17,87,88]、“像狐狸的外观”^[88,89]、以及“浣熊”这个类别的语义信息^[28,29]。这些属性特征通常在训练阶段被建模，然后期待在测试阶段中可以在所有的类别（已见类别和未见类别）中共享。经过数十年的发展，目前的零样本学习框架已经从初始基于属性分类器的模型^[6] 发展到基于嵌入映射的模型^[22,23,90]。这种

基于嵌入映射的模型往往简单有效，如图 3-1 (a) 所示，这种模型首先将图像从视觉空间 (\mathcal{V}) 映射到语义空间 (\mathcal{S})，同时，图像类别的语义特征也在该语义空间中。这样映射之后，零样本学习问题就“退化”成一个最近邻的类别查找问题。

这种嵌入映射模型的知识迁移能力受限于语义损失的问题。如图 3-1 所示，模型丢失一些对训练集图像方差较小的属性（即，不同类之间区别小的属性）有利于训练集的分类。然而，由于训练集和测试集之间存在差异，这些“丢失”的属性可能对测试集来说具有较大的区别性，这样就会造成对测试集分类的困难。虽然类别在语义空间是一个单独的“点”，具有丰富的语义信息，但是将所有同类的图像从视觉空间映射到这个点附近，就不可避免地造成部分属性的丢失^[35,91]。

为了尽可能多地减少属性的丢失，一个可能的解决方法是通过图像重建，即先将图像从视觉空间映射到语义空间中，然后将语义空间的特征映射回视觉空间。如果映射后的视觉空间的特征能够重建初始的图像，说明语义空间的特征已经尽可能多地保持了原有的属性，否则将无法重建^[37,92–94]。然而，图像重建和图像分类是两个相互冲突的目标：前者希望能够尽可能多地保持图像的细节，而后者希望只关注类别差异性大的特征、忽略不相关的特征。例如，只用“头”或者“躯干”就可以充分地对“人”这个类别进行识别分类，而一些其他的颜色属性，如“红色”或者“白色”就需要忽略。为了进一步展示，如图 3-1 (b) 假设 $E: \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{S}$ 和 $G: \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{V}$ 是视觉空间与语义空间中的两个映射函数。对于图像分类，我们希望视觉空间中同一类别的两个图像 $x, x' \in \mathcal{V}$ 在语义空间能够接近 $s, s' \in \mathcal{S}$ ，即， $E(x) = s \approx s' = E(x')$ ；对于图像重建，我们希望 $G(s) \approx x$ 和 $G(s') \approx x'$ ，这样就很难满足 $s \approx s'$ 。因此，同时训练这两个目标（分类和重建）对于保持属性的效劳往往有限（SAE^[1]）。如图 3-2 所示，如果我们想实现好的分类结果，那往往重建会失败。

为了缓解分类任务和重建任务的冲突，本文提出一个全新的视觉-语义映射的框架：属性保持的对抗网络学习（SP-AEN）。如图 3-1 (c) 所示，我们引入一个新的映射函数 $F: \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{S}$ 和一个对抗优化目标^[39]。映射函数 F 和对抗训练的目的是



图 3-2 现有模型 SAE^[11] 和提出模型 SP-AEN 的图像重建结果对比

让判别器 D 无法区分这两个不同的映射分布 $E(x)$ 和 $F(x)$ 。具体来说，这样做有两个好处：(1) **语义迁移**：虽然对于单独的分类映射函数 E 来说，语义损失是不可避免的。我们通过利用判别器 D 的训练，让分类映射向量 $E(x)$ 和重建映射向量 $F(x)$ 在同一个分布下，实现属性特征的迁移，让 $E(x)$ 尽可能地保持更多的属性。(2) **分类任务与重建任务分解**：映射网络 F 和 G 实现重建任务，而映射网络 E 实现分类任务。通过将分类任务和重建任务进行分解，之前的严格条件 $G(E(x)) \approx x$ 和 $G(E(x')) \approx x'$ 变成了 $G(F(x)) \approx x$ 和 $G(F(x')) \approx x'$ ，同时 $F(x)$ 与 $F(x')$ 在语义空间中也不需要非常接近。如图 3-2 所示，我们的映射 $G(F(x))$ 可以重建出较好的输入图像，说明属性特征能够更好地保持。

本文在四个通用的零样本分类数据集中对模型 SP-AEN 的效果进行验证：CUB^[95]，AWA^[6]，SUN^[96]，和 aPY^[17]。相比于目前最好的零样本分类方法^[86]，SP-AEN 在评价指标 H 值 (Harmonic Mean Value) 上对于上述四个数据集各自提升了 12.2%，9.3%，4.0%，和 3.6%。据我们了解，SP-AEN 是第一个能够直接重建回原始图像的零样本分类方法。

3.2 属性保持的对抗网络学习

在本节，我们首先介绍零样本分类任务，然后再具体介绍本章提出模型 SP-AEN 的各个优化目标的细节。

3.2.1 零样本分类预备知识

给定一个训练集 $\{x_i, l_i\}$ ，其中 $x_i \in \mathcal{V}$ 是图像在视觉空间的映射向量， $l_i \in \mathcal{L}_s$ 是已见类别的类别标签，零样本分类任务的目标是学习一个分类器。这个分类器不仅可以预测已见类别的图像 (\mathcal{L}_s)，也可以预测未见类别的图像 (\mathcal{L}_u)。按照之前

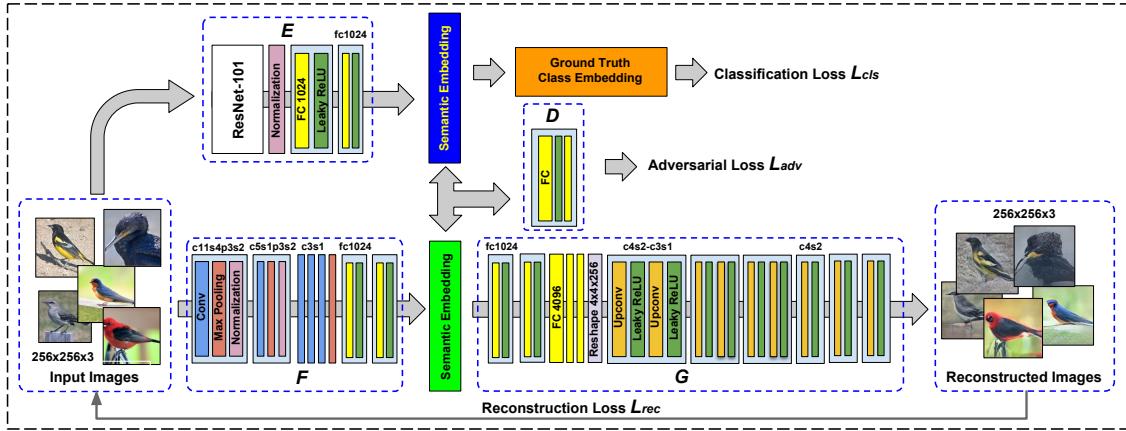


图 3-3 模型 SP-AEN 的整体结构流程图

工作的总结^[30,86], 几乎所有先进的零样本分类方法都是基于嵌入映射的。这类方法旨在找到一个映射函数 $\mathcal{V} \rightarrow \mathcal{S}$, 其中所有的类别标签在语义空间 \mathcal{S} 都是编码成 $\mathbf{y}_l \in \mathbb{R}^d$ 。因此, 预测类别标签 l^* 时, 可以直接通过简单的最近邻查找:

$$l^* = \max_{l \in \mathcal{L}} \mathbf{y}_l^T E(x) \quad (3-1)$$

特别地, 如果 $l \in \mathcal{L}_u$, 这是**传统型零样本分类**; 如果 $l \in \mathcal{L}_s \cup \mathcal{L}_u$, 这是**通用型零样本分类问题**。另外, 公式(3-1)中 E 不一定是线性函数, 同样可以利用深度神经网络等非线性函数。

3.2.2 分类任务优化目标

由于公式(3-1)的标签预测本质上是一个排序问题, 我们使用排序损失(Ranking Loss)作为分类任务的优化目标^[22,90], 即给定一个训练样本 (x, l) , 我们希望 \mathbf{y}_l 和 $E(x)$ 之间有一个较大的点积相似度, 而负样本 (x, l') 有较小的点积相似度, 并且正样本的相似度相比负样本的相似度要大于一定的阈值:

$$L_{cls} = \sum_{l \neq l'} \max\{0, \gamma - \mathbf{y}_l^T E(x) + \mathbf{y}_{l'}^T E(x)\} \quad (3-2)$$

其中, $\gamma > 0$ 是一个超参数(即阈值)。在每次训练迭代过程中, l' 是从所有错误的标签中任选一个。

分类任务优化目标 L_{cls} 的目的是让所有的同一类图像的语义空间映射向量 $E(x)$ 都接近与其类别标签 \mathbf{y} 在语义空间的映射向量。它造成的语义损失问题将由后续介绍的两个额外的优化目标来解决。

3.2.3 重建任务优化目标

重建任务的目标是学习一个从语义空间到视觉空间的映射函数 $G: \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{V}$, 使得将语义映射向量 $s \in \mathcal{S}$ 可以重建输入图像, 并且使差别 $\|G(s) - x\|$ 很小。由于在自编码器中重建任务 $s = E(x)$ 与分类任务是相互冲突的, 我们引入一个新的视觉空间到语义空间的映射函数 F , 使得 $s = F(x)$ 。另外, 不同于 SAE^[1] 利用卷积神经网络^[97,98] 的输入作为视觉空间 \mathcal{V} 的特征, 我们直接利用原始的 $256 \times 256 \times 3$ 大小的 RGB 色彩空间来进行图像重建。这样做的主要原因是, 卷积神经网络的输出特征在网络的预训练阶段已经存在语义损失问题。

为了最小化重建损失, 映射向量 $F(x)$ 会尽可能地保持多的属性, 以便于重建回输入图像。我们参考最新的图像生成工作^[99–101], 将优化目标定义为:

$$L_{rec} = L_{feat} + \lambda_p L_{pixel} \quad (3-3)$$

其中 $L_{feat} = \|\phi(G(F(x))) - \phi(x)\|_2^2$ 是特征维度上的重建损失函数, 帮助图像能够保持细节感知上的相似度。我们使用卷积神经网络 AlexNet^[4] 中 *conv5* 层来表示 ϕ 。
 $L_{pixel} = \|G(F(x)) - x\|_2^2$ 是像素维度上的重建损失函数, 有利于算法的稳定性。

3.2.4 对抗学习优化目标

到目前为止, 语义向量 $E(x)$ 和 $F(x)$ 之间没有知识迁移。我们的目标是让 $E(x)$ 从 $F(x)$ 中迁移部分丢失的属性特征。然后, 手工直接定义 $E(x)$ 与 $F(x)$ 之间的迁移比较困难。因此, 我们借助于对抗学习的思想, 来鼓励 $E(x)$ 的分布向 $F(x)$ 的分布靠近, 通过“欺骗”判别网络 D , 使 $F(x)$ 的知识向 $E(x)$ 迁移:

$$L_{adv} = \mathbb{E}_x (\log D(F(x))) + \mathbb{E}_{x'} (\log [1 - D(E(x'))]) \quad (3-4)$$

其中网络 E 为了减少优化目标 L_{adv} , 而网络 D 希望增大优化目标 L_{adv} , 即: $E^* = \arg \min_E \max_D L_{adv}$ 。

目前, 许多研究工作都发现目标函数 L_{adv} 进行优化容易陷入“塌陷问题”^[102]。在我们这个任务中, 如果两个同类别的图像 x 和 x' 非常相似, 容易导致 $\|F(x) - E(x')\| \approx 0$, 引起塌陷问题。为了避免塌陷问题, 我们参考 WGAN 的策略^[102], 极大地增加了模型训练的稳定性。

3.2.5 总体优化目标

将之前提到的分类任务优化目标、重建任务优化目标、以及对抗学习优化目标合在一起，得到最终整体的优化目标：

$$\begin{aligned} L(E, F, G, D) = & L_{cls}(E) + \alpha L_{rec}(E, F, G) \\ & + \beta L_{adv}(E, F, G, D) \end{aligned} \quad (3-5)$$

其中， α 和 β 是参数用于权衡不同的训练目标。最终的目标是得到：

$$E^* = \arg \min_{E, F, G} \max_D L(E, F, G, D) \quad (3-6)$$

如图 3-3 所示，网络 F 是编码网络，网络 G 是解码网络，重建映射向量 $F(x)$ 可以看成是瓶颈层，来约束分类映射向量 $E(x)$ 。另外，SP-AEN 可以转换成其他条件下的零样本分类问题，例如半监督条件下，我们只需要给 $F(x)$ 增加一个额外的对抗学习优化目标来近似先验的映射空间。

3.3 实验设置与性能分析

3.3.1 零样本物体分类数据集

CUB^[95]：全称是 Caltech-UCSD-Birds 200-2011 数据集。它是一个细粒度鸟类分类数据集，总共包含 11788 张来自 200 个细粒度类别的鸟图像，并且每张图像有 312 个语义属性标注。其中训练集包含 150 个已见类别的 7057 张图像，测试集包含 150 个已见类别的 1764 张图像和 50 个未见类别的 2967 张图像。

SUN^[96]：全称是 SUN attribute 数据集。它是一个细粒度场景分类数据集，总共包含 14340 张来自 717 个场景类别的场景图像，并且每张图像有 102 个语义属性标注。其中训练集包含 645 个已见类别的 10320 张图像，测试集包含 645 个已见类别的 2580 张图像和 72 个未见类别的 1440 张图像。

AWA^[6]：全称是 Animals with Attributes 数据集。它是一个动物类别分类数据集，总共包含 30475 张来自 50 个类别的动物图像，并且每张图像有 85 个语义属性标注。其中训练集包含 40 个已见类别的 23527 张图像，测试集包含 40 个已见类别的 5882 张图像和 10 个未见类别的 7913 张图像。由于原始 AWA 数据集图像版权的问题，我们这里的 AWA 数据集实际上使用的是 AWA2^[86]。

aPY^[17]：全称是 Attribute Pascal and Yahoo 数据集。它是一个通用的物体分类数据集，总共包含 12051 张来自 32 个类别，并且每张图像有 64 个语义属性标注。

其中训练集包含 20 个已见类别 5932 张图像，测试集包含 20 个已见类别 1483 张图像和 12 个未见类别的 7924 张图像。

为了公平地和其他模型进行比较，我们使用 Xian 等人^[86] 提供的类别嵌入映射向量，其中每个嵌入映射向量都经过 l_2 范数进行归一化。

3.3.2 实验设定与零样本物体分类评价指标

实验设定：为了评估模型对零样本物体分类的结果，我们采用三种实验设定：

1. $U \rightarrow U$: 测试图像的类别和可以预测的类别都只是未见类别；
2. $S \rightarrow T$: 测试图像的类别是未见类别，但是可以预测的类别是未见类别和已见类别的总和；
3. $U \rightarrow T$: 测试图像的类别和可以预测的类别都是未见类别和已见类别的总和。

通常， $U \rightarrow U$ 被称为传统型零样本分类，而 $U \rightarrow T$ 被称为通用型零样本分类。

评价指标：我们参考现有的文献^[86]，常用的每类平均准确率作为评价指标。对于通用型零样本分类，我们另外使用常用的 H 作为主要的评价指标，其中 H 是已见类别 L_s 的准确率 ($Acc_{S \rightarrow T}$) 和未见类别 L_u 的准确率 ($Acc_{U \rightarrow T}$) 的调和平均数：

$$H = 2 \times Acc_{S \rightarrow T} \times Acc_{U \rightarrow T} / (Acc_{S \rightarrow T} + Acc_{U \rightarrow T}) \quad (3-7)$$

3.3.3 网络模型与参数设置

网络结构：整个网络结构都是端到端地直接进行训练。其中映射网络 E 是基于 ResNet-101^[97]，输入图像的大小是 $224 \times 224 \times 3$ 。映射网络 F 是基于 AlexNet^[4]，然后附加两层额外的全连接层。重建网络 G 采用类似于生成器^[100]的结构，通过五个连续的反卷积和非线性操作 (leaky ReLU) 将向量特征转换成三维卷积特征。

参数设置：对于本章所有的实验，训练图像都将短边放缩到 256 个像素。参照 AlexNet^[4]，我们采用了增大十倍训练图像的数据增强方式。为了提升训练速度，映射网络 E 中 ResNet-101 部分参数始终保持固定，映射网络 F 的参数初始化采用预训练好的 AlexNet 的参数，重建网络 G 的参数初始化用预训练好的生成器^[100]。剩余的所有参数都是用 MSRA 的随机初始化^[103]。初始的学习率设置为 $1e^{-4}$ ，然后当 loss 不下降时，学习率降低 10 倍。

3.3.4 零样本物体分类的性能对比

本节将本章方法与目前最先进的零样本物体分类方法进行对比。这些方法主要可以分类：(1) 基于嵌入映射的模型：DeViSE^[22]、ALE^[23]、SJE^[24]、ESZSL^[18]、

LTM^[25]、CMT/CMT*^[26] 和 SAE^[1]。这类方法和 SP-AEN 一样，将图像从视觉空间映射到语义空间。据我们了解，SAE 是现有的唯一一个利用信号重建来解决语义损失的模型。（2）基于属性的模型：DAP^[6]、IAP^[6]、SSE^[104]、CSE^[19] 和 SYNC^[105]。这类方法只适用于有属性标注的情况。

Dataset		DAP	IAP	SSE	CSE	SYNC	CMT	LTM	DeViSE	ALE	SJE	ESZSL	SAE	SP-AEN
SUN	$Acc_{U \rightarrow U}$	39.9	19.4	51.5	38.8	56.3	39.9	55.3	56.5	58.1	53.7	54.5	40.3	59.2
	$Acc_{U \rightarrow T}$	4.2	1.0	2.1	6.8	7.9	8.1	14.7	16.9	21.8	14.7	11.0	8.8	24.9
	$Acc_{S \rightarrow T}$	25.1	37.8	36.4	39.9	43.3	21.8	28.8	27.4	33.1	30.5	27.9	18.0	38.6
	H	7.2	1.8	4.0	11.6	13.4	11.8	19.5	20.9	26.3	19.8	15.8	11.8	30.3
CUB	$Acc_{U \rightarrow U}$	40.0	24.0	43.9	34.3	55.6	34.6	49.3	52.0	54.9	53.9	53.9	33.3	55.4
	$Acc_{U \rightarrow T}$	1.7	0.2	8.5	1.6	11.5	7.2	15.2	23.8	23.7	23.5	12.6	7.8	34.7
	$Acc_{S \rightarrow T}$	67.9	72.8	46.9	72.2	70.9	49.8	57.3	53.0	62.8	59.2	63.8	54.0	70.6
	H	3.3	0.4	14.4	3.1	19.8	12.6	24.0	32.8	34.4	33.6	21.0	13.6	46.6
AWA	$Acc_{U \rightarrow U}$	46.1	35.9	61.0	44.5	46.6	37.9	55.8	59.7	62.5	61.9	58.6	54.1	58.5
	$Acc_{U \rightarrow T}$	0.0	0.9	8.1	0.5	10.0	0.5	11.5	17.1	14.0	8.0	5.9	1.1	23.3
	$Acc_{S \rightarrow T}$	84.7	87.6	82.5	90.6	90.5	90.0	77.3	74.7	81.8	73.9	77.8	82.2	90.9
	H	0.0	1.8	14.8	1.0	18.0	1.0	20.0	27.8	23.9	14.4	11.0	2.2	37.1
aPY	$Acc_{U \rightarrow U}$	33.8	36.6	34.0	26.9	23.9	28.0	35.2	39.8	39.7	32.9	38.3	8.3	24.1
	$Acc_{U \rightarrow T}$	4.8	5.7	0.2	0.0	7.4	1.4	0.1	4.9	4.6	3.7	2.4	0.4	13.7
	$Acc_{S \rightarrow T}$	78.3	65.6	78.9	91.2	66.3	85.2	73.0	76.9	73.7	55.7	70.1	80.9	63.4
	H	9.0	10.4	0.4	0.0	13.3	2.8	0.2	9.2	8.7	6.9	4.6	0.9	22.6

表 3-1 不同零样本物体分类方法在 4 个数据集上的性能对比

定量性能对比：表 3-1 总结了不同的零样本分类方法在四个数据集（SUN、CUB、AWA、aPY）和三种不同实验设定下（U→U、U→T、S→T）的性能对比。从表 3-1 我们能有两个发现：（1）SP-AEN 在通用型零样本分类问题能够显著提升性能，如：在 $Acc_{U \rightarrow T}$ 和 H 值两个指标下，SP-AEN 能比目前最好的模型提升 4% 到 12%。当数据集中训练集和测试集所有属性方差的余弦相似度越大时¹，提升更加明显，这也表明 SP-AEN 可以有效地缓解语义损失问题。（2）在传统型零样本分类的设定下（U→U），在绝大多数的情况下，SP-AEN 可以得到最佳的性能。在 U→U 设定下，图像类别的搜索空间仅限于未见类别，然而，语义损失问题可能导致未见类别的图像与已见类别非常接近，造成一定的预测错误。

3.3.5 零样本物体分类方法分析

¹ 数据集 SUN、CUB、AWA、aPY 中，训练集和测试集所有属性方差的余弦相似度分别为 0.9851、0.9575、0.7459、0.5847。

分类任务与重建任务的冲突:

为了验证本章提出模型 SP-AEN 的设计动机：分类任务和重建任务时相互冲突的。如图 3-4 所示，我们设计了三种可能的重建网络框架，可以实现 SP-AEN 中语义空间到视觉空间的重建：(1) **DirectMap**: 对于输入图像，我们使用网络 E 将图像从视觉空间映射到语义空间，得到语义嵌入向量，然后使用网络 G 将语义嵌入向量映射回视觉空间。在该网络中，我们固定 E 的参数，只训练网络 G 的参数。DirectMap 可以衡量初始的语义嵌入向量包含多少语义信息。(2) **SAE^[1]**: 我们采用与 SAE 模型相同的框架，用重建网络 G 作为解码网络，分类网络 E 作为编码网络，其中的瓶颈层用来分类任务。在训练阶段，我们同时训练网络 E 和 G 的参数。(3) **SplitBranch**: 我们将网络 E 的输出分别输入到两个不同的支路中，其中一条支路用来分类。然后两条主路再连接到一起，合并的语义特征输入到网络 G 中进行重建。

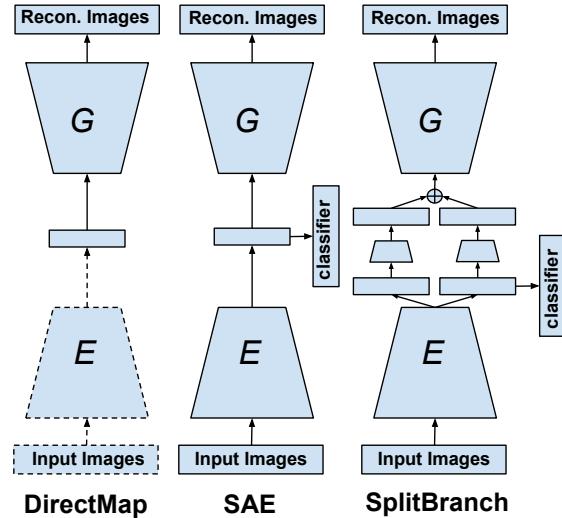


图 3-4 三种图像重建网络框架

Method	SUN	CUB	AWA	aPY
DirectMap	0.079	0.069	0.075	0.085
SAE	0.285	0.281	0.259	0.275
SplitBranch	0.070	0.058	0.059	0.076
SP-AEN	0.053	0.040	0.047	0.055

表 3-2 不同重建网络下重建图像与输入图像之间的平均像素差平方

图 3-5 和表 3-2 分别表示四个数据集中测试集未见类别图像的重建图像和重建差异。从实验结果中，我们可以有以下结论：(1) 在数据集 CUB 和 SUN 中，DirectMap 重建的图像和 SP-AEN 非常接近，都具有较好的重建结果。然而，在数据集 AWA 和 aPY 中，DirectMap 的重建效果有明显下降。同样地，这是由于在数据集 CUB 和 SUN 中，训练集和测试集所有属性方差的余弦相似度大于 AWA 和 aPY。(2) 如果像 SAE 模型一样同时训练分类网络 E 和重建网络 G ，所有的样本都重建失败。如

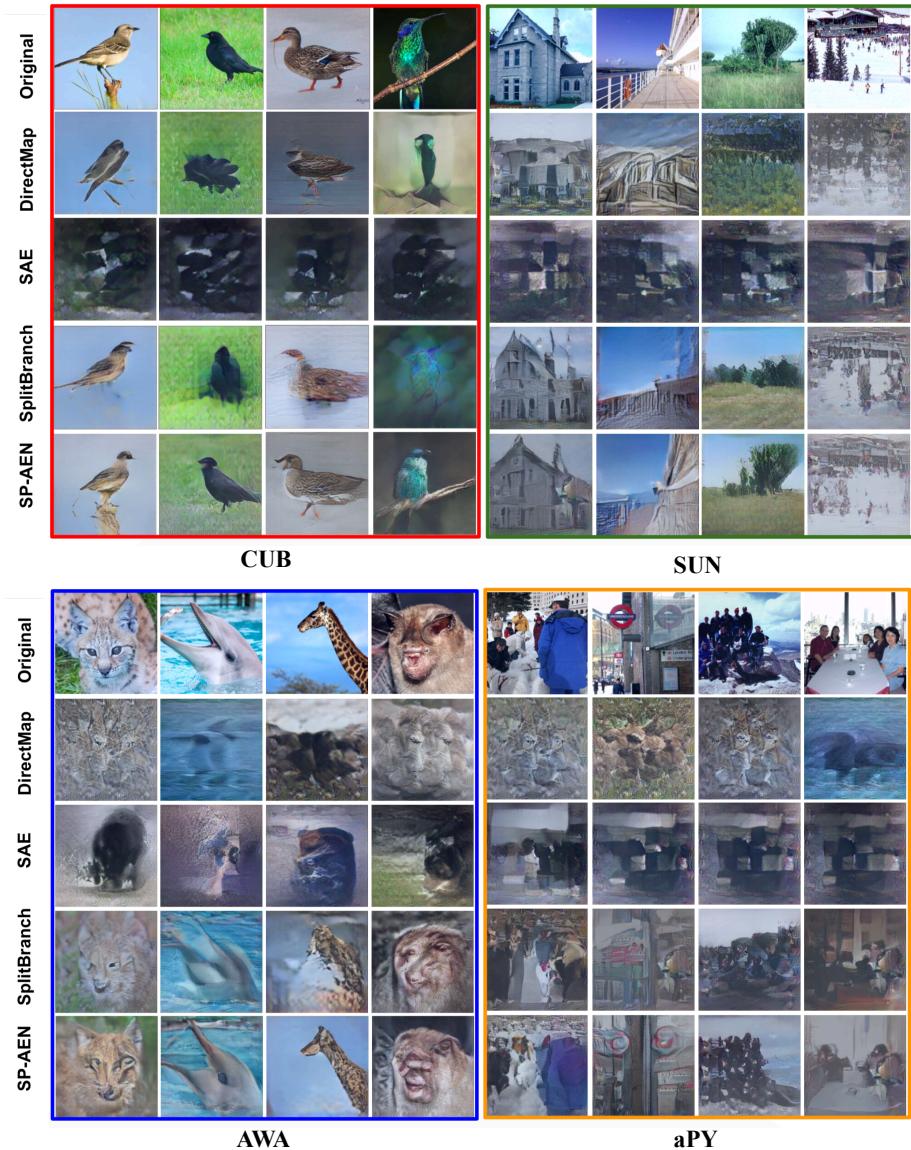


图 3-5 不同图像重建网络框架在数据集 CUB、SUN、AWA、aPY 上的重建结果

果像 SplitBranch 模型一样同时训练，我们可以看到重建效果得到显著的提升，十分接近 SP-AEN。但是，我们发现在 SplitBranch 中，分类分支合并时的权重几乎为零。这一方面说明分类的映射向量基本对重建任务没有贡献，另一方面也引导我们借助对抗学习来实现语义迁移和高质量图像的重建。

网络 D 和网络 G 的作用：由于可见类别标签的分数常常大于未见类别标签的分数，通常使用“校准规则”来解决这个问题。具体来说，就是对已见类别的分数减掉一个偏置，然后再和未见类别一起进行排序比较：

$$l^* = \max_{l \in \mathcal{L}_u \cup \mathcal{L}_s} \mathbf{y}_l^T E(x) - \gamma \mathbf{1} [l \in \mathcal{L}_s] \quad (3-8)$$

其中，指示函数 $\mathbf{1}[\cdot]$ 用于判断 l 是否时已见类别， $\gamma \in \mathbb{R}$ 是校准系数。这个校准规则能够有效地实现对已见类别和未见类别预测之间的权衡。通过改变校准系数 γ ，我们可以得到一系列分类准确率 ($Acc_{U \rightarrow T}$ 和 $Acc_{S \rightarrow T}$)，并且可以画出已见-未见准确率曲线 (Seen-Unseen accuracy Curve, SUC)。已见-未见准确率曲线下区域面积 (Area Under Seen-Unseen accuracy Curve, AUSUC) 也是通用型零样本分类问题中一个常用评价指标，用来评估 $Acc_{U \rightarrow T}$ 和 $Acc_{S \rightarrow T}$ 之间的权衡。

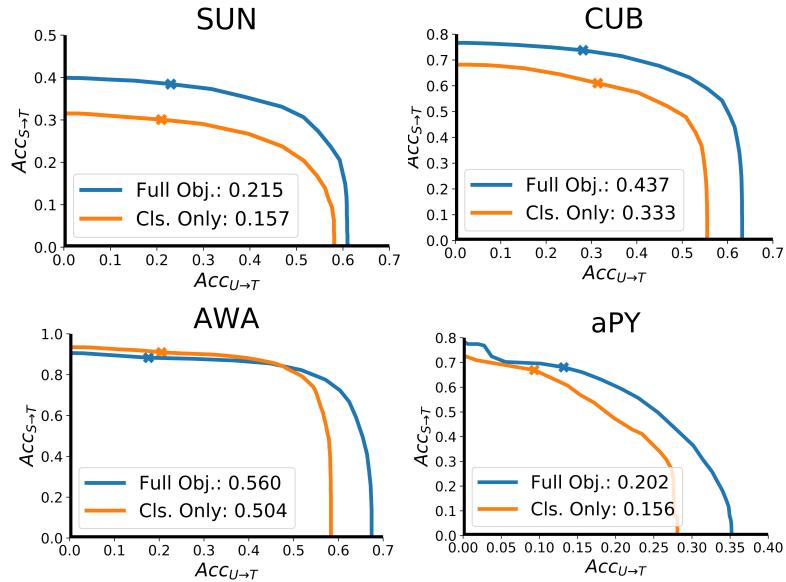


图 3-6 在数据集 SUN、CUB、AWA 和 aPY 中的已见-未见准确率曲线下区域面积^[2]

XXXX

3.4 本章小结

本章提出了一个全新的零样本分类框架：属性保持的对抗网络学习 (SP-AEN)，用于解决目前零样本分类模型中普遍存在的语义损失的问题。SP-AEN 主要通过两个设计来解决语义损失问题：(1) 引入一个独立的重建网络，同时重建网络不直接影响分类网络的优化目标。(2) 通过对抗学习，实现重建语义向量和分类语义向量之间的知识迁移。我们通过大量的实验对比在四个标准数据集上验证了 SP-AEN 的性能。

4 基于反事实的多智能体学习的图像场景图生成方法

图像场景图 (Scene Graph) 是将图像中每个物体当成一个节点，两两物体之间视觉关系看成连接两个节点间的有向边。图像场景图描绘的是图像视觉场景中物体的类别、位置关系以及两两物体之间的交互（视觉关系）。为了产生连贯的场景图，几乎所有现有的场景图生成方法都是通过“信息传递机制” (Message Passing)，让每个物体和视觉关系都能充分地考虑和融合周围的视觉元素之间的内在联系。例如，物体“人”和物体“自行车”之间一个很常见的视觉关系就是“骑”（人-骑-自行车），反过来，视觉关系“骑”也能够提升这两个物体的类别预测。然后，现有的这些方法都是直接利用交叉熵作为模型的优化目标，这将大大限制模型融合周围信息的能力。造成这样结果主要原因在于，交叉熵的损失函数对所有的节点一视同仁，即每个不同节点的分类损失对总的损失函数影响相同。

在本章，我们提出一种反事实的多智能体学习方法 (Counterfactual critic Multi-Agent Training, CMAT)。CMT 是一种基于多智能体策略梯度优化方法。它通过将每个物体看成一个智能体，可以直接对整个场景图的生成质量作为总的奖励函数。另外，为了给每个智能体分配适当的奖励，我们设计来一个反事实基准模型 (counterfactual baseline)：通过固定其他智能体的类别，以及改变当前智能体的类别，从而分类出每个智能体单独的贡献。通过在数据集 Visual Genome (VG) 上进行大量的对比实验，我们验证了本章提出的 CMAT 模型在多个实验设定和评价指标下可以达到目前最好的结果。

4.1 问题描述

视觉场景理解是计算机视觉研究领域一个重要的研究方法。它不仅仅需要对场景中所有物体的类别以及位置进行预测，同时需要对两两物体之间的视觉关系进行预测。随着物体检测^[7,106]与分割技术^[8,107]的成熟，计算机已经可以准确地识别物体的类别、位置以及属性。然后，视觉场景理解不仅仅只是单个物体的识别，

还需要对视觉关系进行识别。所有的物体和视觉关系一起，就构成了场景图[9]。如图 4-1 所示，每个节点和边分别表示图像中的物体和视觉关系。目前，图像场景图已经成为一种视觉知识结构的表达，辅助许多计算机视觉任务：如图像描述语句生成[108–110]、视觉问答[111,112]、视觉推理[113,114] 等。

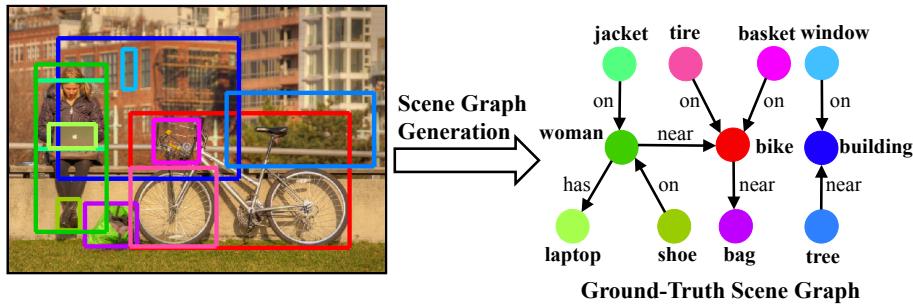


图 4-1 一个图像场景图生成任务示例

对于图像的场景图生成 (Scene Graph Generation, SGG)，一个最简单的解决思路是将场景图生成任务分成物体检测和视觉关系检测两个独立的子任务，即先用现有的物体检测器检测物体框，然后预测每个物体框的类别以及两两物体框之间视觉关系的类别^[45,47,115]。然而，这类方法忽略了同一图像中所有物体间的内在联系。通常，这些内在联系往往会提供一些归纳偏置^[116] (inductive bias) 帮助物体或者视觉关系的预测。如图 4-1，物体“窗户”(window) 和物体“建筑物”(building) 常常出现在同一张图像中，“在附近”(near) 也是物体“树”(tree) 和物体“建筑物”(building) 之间最常见的视觉关系。因此，从视觉关系“窗户-在上面-?”或“树-在附近-?”中，很容易推测出“?”是“建筑物”。这些辅助信息已经被广泛地用来提升场景图生成效果^[51–56,58–61,117–119]。具体来说，这些方法都是通过借助条件随机场^[120] (Conditional Random Field, CRF) 来建模所有节点和边的联合分布，然后通过信息传递机制来更新节点和边的特征^[121]。最后，整个模型利用所有节点（物体）和边（视觉关系）分类的交叉熵之和作为损失函数进行参数优化。

现有的场景图生成方法对并没有充分地利用图像中物体和视觉关系之间的内在联系，一个重要的原因是交叉熵之和作为场景图生成的优化目标，不具备**整体一致性**。所谓的“整体一致性”，意思是所有预测的物体类别和视觉关系类别之间应该整体一致。相反，交叉熵之和将所有的物体和视觉关系看成是相互独立的。如图 4-2 (a)，如果红色节点和蓝色节点都被错误分成类别“man”，根据目前的损失函数（交叉熵之和），这两种错误情况的损失相同。然而，因为红色节点连接的边远多于蓝色节点，即对红色节点的错误分类将造成更大的损失，因为它会影响更多的

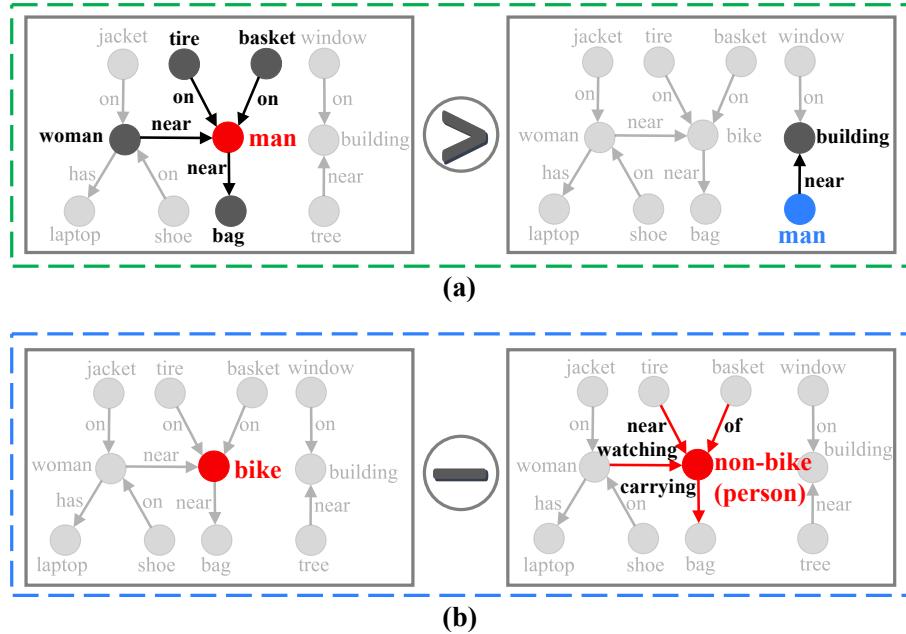


图 4-2 场景图生成中优化目标的整体一致性和局部敏感性

视觉关系。因此，我们提出直接用 Recall@K^[45] 或者 SPICE^[122] 这种场景图的全局评价指标作为优化目标。另外，场景图生成的优化目标还应该具备**局部敏感性**。所谓的“局部敏感性”，意思是优化目标应该能够感知每个节点类别的预测变化。由于场景图的全局评价指标是一个整体生成质量的评价数值，因此我们需要设计一种机制，可以感知每个节点各自的贡献，进而为每个局部预测提供更加有效的优化梯度。

在本章，我们提出了一种全新的训练方式可以同时满足优化目标的整体一致性和局部敏感性：反事实的多智能体学习（CMAT）。具体来说，我们设计了一种全新的多智能体模型，其中将每个物体框看成是一个智能体。每个智能体的动作就是物体类别，智能体之间可以进行通信进而提升智能体的特征表达。在多轮的智能体通信之后，我们利用一个视觉关系预测模型来得到智能体之间的视觉关系。通过与人工标注的场景图对比，得到一个全局的奖励。

为了整体一致性，我们直接将场景图生成的评价指标（如：Recall@K 或 SPICE）作为全局奖励，并且使用策略梯度的方式进行参数优化^[123]。从多智能体强化学习^[124,125]（Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL）的观点来看，尤其是演员-评论家方法^[125]（actor-critic），CMAT 中视觉关系模型可以看成是评论家（critic），而物体类别分类模型可以看成是策略网络。为了局部敏感性，对于每个智能体，我们从全局奖励中减去一个反事实基准^[126]。这个反事实基准模型通过改变目标智能体

的预测类别同时固定其他智能体的预测类别，从而得到目标智能体的局部贡献。如图 4-2 (b) 所示，为了得到红色节点预测为“自行车”(bike) 的贡献，我们可以固定其他节点的预测，而将红色节点的预测替换成其他的“非自行车”类。进而可以计算出这种**反事实**的替换对整体的场景图生成效果带来多大的影响。

为了更好的编码物体之间的内在联系，我们还设计了一种更加有效的智能体通信模型。相比于现有的信息传递机制^[51,53-56,117]，我们没有将视觉关系也看成节点。通过这个设计，我们可以将智能体通信与视觉关系预测两个任务分离出来，让前者关注如何编码物体间内在联系，后者作为评论家提供全局奖励引导网络的优化。

我们在目前最大的图像场景图生成数据集 Visual Genome (VG) 上对 CMAT 的性能进行了验证。通过大量的对比实验，我们在通用的三个标准实验设定下都可以达到目前最好的效果。

本章主要有三个贡献：

1. 我们提出了一种全新的图像场景图生成的优化方式：反事实的多智能体学习 (CMAT)。据我们了解，这是第一个将图像场景图生成任务构思成一个多智能体协同合作的问题，使得优化目标满足整体一致性要求。
2. 我们设计了一个全新的反事实基准模型，可以使得多智能体策略梯度算法的优化目标具备局部敏感性。
3. 我们设计了一个有效的多智能体通信模型，有效地将智能体通信与视觉关系预测两个任务分离出来。

4.2 反事实的多智能体学习

给定一个物体类别集 \mathcal{C} (包含背景) 和一个视觉关系类别集 \mathcal{R} (包括没有视觉关系)，图场景图可以表示成： $\mathcal{G} = \{\mathcal{V} = \{(v_i, l_i)\}, \mathcal{E} = \{r_{ij}\} | i, j = 1 \dots n\}$ ，其中 \mathcal{V} 和 \mathcal{E} 分别表示所有节点 (物体) 和边 (视觉关系) 的结合。 $v_i \in \mathcal{C}$ 表示第 i 个节点的物体类别， $l_i \in \mathbb{R}^4$ 表示第 i 个节点的物体位置， $r_{ij} \in \mathcal{R}$ 表示第 i 个节点和第 j 个节点之间的视觉关系。场景图生成任务就是检测出图像中所有的物体以及物体间的视觉关系。

在本节，我们先介绍模型 CMAT 中的每个组成部分。然后，我们再介绍模型 CMAT 的优化目标。

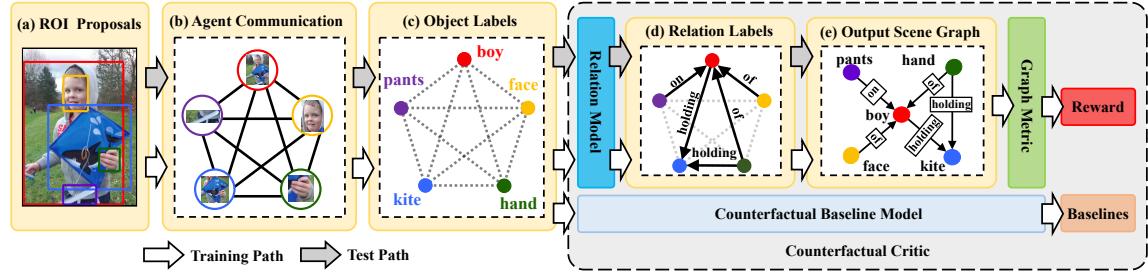


图 4-3 模型 CMAT 的总体流程图

4.2.1 场景图生成中的多智能体通信

物体候选框检测: 我们首先使用现有的目标检测器 Faster R-CNN^[7] 得到一系列候选框。对于每个候选框，同时可以得到其位置坐标 \mathbf{l}_i ，特征向量 \mathbf{x}_i^0 ，以及初始的物体类别预测概率 \mathbf{s}_i^0 。上角标 0 表示 T 轮智能体通信的初始输入。我们参考现有的工作^[51,118]，固定所有候选框的位置 $\{\mathbf{l}_i\}$ 作为最终的预测结果。为了表达的简洁性，我们在后续内容中省略 \mathbf{l}_i 。

智能体通信: 给定 n 物体候选框，我们将每个候选框看成是一个智能体，智能体之间通过 T 轮的通信来编码所有物体间的内在联系。如图 4-4 所示，在每次智能体通信过程中，共有三个模块：信息提取模块（extract module）、信息合成模块（message module）和状态更新模块（update module）。为了减小模型参数，这三个模块在所有的智能体之间都共享参数。具体细节如下：

(a) 信息提取模块：我们使用递归神经网络（LSTM）来作为信息提取模块。LSTM 不仅可以编码智能体之间的交互历史，同时也可以提取智能体自身的内部状态。具体来说，对于第 i 个智能体（物体），在第 t ($0 < t \leq T$) 轮通信时：

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_i^t &= \text{LSTM}(\mathbf{h}_i^{t-1}, [\mathbf{x}_i^t, \mathbf{e}_i^{t-1}]), \\ \mathbf{s}_i^t &= \mathbf{s}_i^{t-1} + \mathbf{W}_h \mathbf{h}_i^t, \\ v_i^t &\sim \mathbf{p}_i^t = \text{softmax}(\mathbf{s}_i^t), \\ \mathbf{e}_i^t &= \sum_{\tilde{v}} \mathbf{p}_i^t(\tilde{v}) \mathbf{E}[\tilde{v}], \end{aligned} \tag{4-1}$$

其中 $\mathbf{h}_i^t \in \mathbb{R}^h$ 是 LSTM 的隐含状态， $\mathbf{x}_i^t \in \mathbb{R}^d$ 是每个时刻的输入特征， $\mathbf{s}_i^t \in \mathbb{R}^{|C|}$ 时物体类别预测概率。初始的输入特征和类别预测概率（第 0 步）来自于物体候选框检测。 $\mathbf{E}[\tilde{v}] \in \mathbb{R}^e$ 是类别标签 $\tilde{v} \in C$ 的编码，以及 $\mathbf{e}_i^t \in \mathbb{R}^e$ 是一个基于类别概率 \mathbf{p}_i^t 加权的类别标签编码， $\mathbf{W}_h \in \mathbb{R}^{h \times |C|}$ 是一个学习的矩阵，以及 $[,]$ 是向量连接操作。所有的隐藏状态 $\{\mathbf{h}_i^t\}$ 都输入到信息合成模块用于合成通信信息。

(b) 信息合成模块：对于第 i 个智能体和第 j 个智能体之间的通信，信息合成

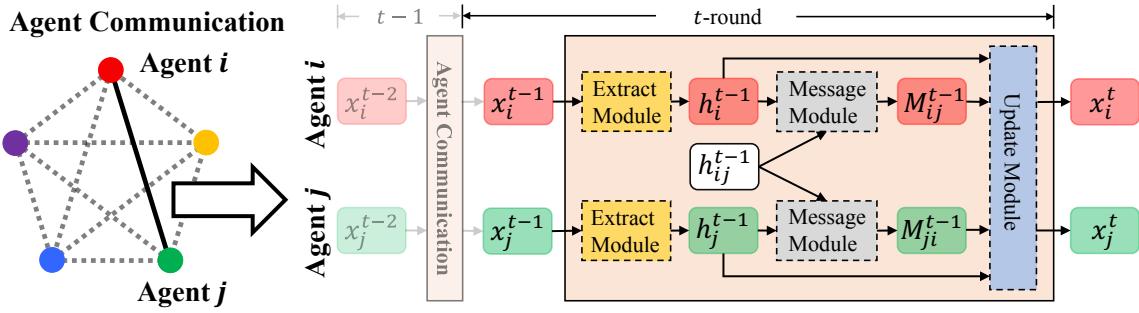


图 4-4 智能体通信示意图

模块将分别合成信息 M_{ij}^t 和 M_{ji}^t 。具体来说，对于第 i 个智能体收到的信息 $M_{ij}^t = (\mathbf{m}_j^t, \mathbf{m}_{ij}^t)$ 主要包含两部分：

$$\mathbf{m}_j^t = \mathbf{W}_u \mathbf{h}_j^t, \quad \mathbf{m}_{ij}^t = \mathbf{W}_p \mathbf{h}_{ij}^t \quad (4-2)$$

其中 $\mathbf{m}_j^t \in \mathbb{R}^h$ 表示一元信息，用来表征第 j 个智能体本身的属性（如：单个物体的局部视觉特征）， $\mathbf{m}_{ij}^t \in \mathbb{R}^h$ 二元信息，用来表征两个智能体之间的交互信息（如：两个智能体的相对位置信息）。 $\mathbf{h}_{ij}^t \in \mathbb{R}^d$ 表示第 i 个智能体与第 j 个智能体之间的共同特征，它的初始化是两个智能体所在位置合并之后的视觉特征。所有与第 i 个智能体的通信信息 $\{M_{i*}^t\}$ 与内部状态 \mathbf{h}_i^t 都输入到信息更新模块，用于更新所有智能体的内部状态。

(c) 状态更新模块：在每轮智能体通信过程中，对于每个智能体，我们使用注意力机制^[127] 融合来自其他智能体的通信信息：

$$\begin{aligned} u_j^t &= \mathbf{w}_u[\mathbf{h}_i^t, \mathbf{h}_j^t], \quad \alpha_j^t = \exp(u_j^t) / \sum_k \exp(u_k^t), \\ u_{ij}^t &= \mathbf{w}_p[\mathbf{h}_i^t, \mathbf{h}_{ij}^t], \quad \alpha_{ij}^t = \exp(u_{ij}^t) / \sum_k \exp(u_{ik}^t) \\ \mathbf{x}_i^{t+1} &= \mathbf{W}_x(\text{ReLU}(\mathbf{h}_i^t + \sum_j \alpha_j^t \mathbf{m}_j^t + \sum_j \alpha_{ij}^t \mathbf{m}_{ij}^t)) \\ \mathbf{h}_{ij}^{t+1} &= \text{ReLU}(\mathbf{h}_{ij}^t + \mathbf{W}_s \mathbf{h}_i^{t+1} + \mathbf{W}_e \mathbf{h}_j^{t+1}) \end{aligned} \quad (4-3)$$

其中 α_j^t 和 α_{ij}^t 是融合不同信息的权重， $\mathbf{w}_u \in \mathbb{R}^{2h}$ 、 $\mathbf{w}_p \in \mathbb{R}^{h+d}$ 、 $\mathbf{W}_x \in \mathbb{R}^{h \times d}$ 、 $\mathbf{W}_s \in \mathbb{R}^{h \times d}$ 和 $\mathbf{W}_e \in \mathbb{R}^{h \times d}$ 这些都是需要学习的参数矩阵。

视觉关系预测：在 T 轮智能体通信之后，所有的智能体都完成了状态更新。在测试阶段，对于所有的智能体，我们直接根据预测的分数 s_i^T 来选取所有智能体的物体类别 v_i^T 。之后，我们利用视觉关系分类模型对任意两个智能体之间进行视觉

关系预测。

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_i &= \mathbf{W}_o[\mathbf{h}_i^T, \mathbf{E}[v_i^T]], \quad \mathbf{z}_j = \mathbf{W}_o[\mathbf{h}_j^T, \mathbf{E}[v_j^T]], \\ \mathbf{p}_{ij} &= \text{softmax}([\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j] \odot \mathbf{W}_r \mathbf{z}_{ij} + \mathbf{w}_{v_i^T, v_j^T}), \\ r_{ij} &= \arg \max_{r \in \mathcal{R}} \mathbf{p}_{ij}(r), \end{aligned} \quad (4-4)$$

其中 $\mathbf{W}_o \in \mathbb{R}^{(h+e) \times z}$ 、 $\mathbf{W}_r \in \mathbb{R}^{z \times 2z}$ 都是需要学习的映射矩阵， $\mathbf{z}_{ij} \in \mathbb{R}^z$ 是第 i 个智能体与第 j 个智能体之间预测的视觉关系特征， \odot 是特征融合函数¹， $\mathbf{w}_{v_i^T, v_j^T} \in \mathbb{R}^{|\mathcal{C}|}$ 是基于 VG 数据集统计的视觉关系类别偏置^[118]。

¹不同的特征融合函数对最终的实验性能影响不太。在我们的实验中，我们参考^[128] 使用融合函数： $\mathbf{x} \odot \mathbf{y} = \text{ReLU}(\mathbf{W}_x \mathbf{x} + \mathbf{W}_y \mathbf{y}) - (\mathbf{W}_x \mathbf{x} - \mathbf{W}_y \mathbf{y})^2$.

4.2.2 反事实多智能体学习

在本节，我们将详细介绍 CMAT 中优化目标的细节，具体包括：(1) 符合整体一致性的多智能体策略梯度；(2) 符合局部敏感性的反事实评论家。

优化目标的整体一致性：目前，几乎所有的场景图生成算法都是将交叉熵之和作为模型的优化目标。对于一个预测的场景图 $(\hat{\mathcal{V}}, \hat{\mathcal{E}})$ ，如果人工标注的场景图为 $(\mathcal{V}^{gt}, \mathcal{E}^{gt})$ ，根据交叉熵之和的优化目标，整个模型的损失函数为：

$$L(\theta) = \sum_{ij} (\text{XE}(\hat{v}_i, v_i^{gt}) + \text{XE}(\hat{r}_{ij}, r_{ij}^{gt})) . \quad (4-5)$$

由公式 (4-5) 可以看出，交叉熵之和的优化目标将所有的节点都看成相互独立的。

为了解决上述问题，我们提出将目前流行的交叉熵之和的优化目标替换成下面两种具备整体一致性的优化目标：(1) Recall@K^[45]：计算前 K 个预测中正确预测的三元组所占的百分比。(2) SPICE^[122]：所有三元组预测的准确率和召回率之间的 F 值。由交叉熵之和不同的是，Recall@K 和 SPICE 都是不可导的。因此，CMAT 借助多智能体策略梯度对模型参数进行优化。

多智能体策略梯度：我们首先定义模型 CMAT 中智能体的动作 (action)、策略函数 (policy)、和状态 (state)。然后，我们推导模型参数的梯度公式。

(a) 动作：每个智能体的动作空间是所有的可选择的物体类别的总和，即第 i 的智能体的动作是 v_i^t 。我们用 $V^t = \{v_i^t\}$ 来表示所有智能体的动作。

(b) 状态：我们参考现有工作^[129] 使用递归神经网络 LSTM (信息提取模块) 来编码智能体与环境之间的交互历史。LSTM 的隐含状态 \mathbf{h}_i^t 可以看成是第 i 个智能体对局部可见环境状态的近视。我们用 $H^t = \{\mathbf{h}_i^t\}$ 来表示所有智能体的状态。

(c) 策略函数：每个智能体的策略函数就是物体类别分类器。在训练阶段，每个智能体的类别通过对分类概率进行采样得到，即： $\mathbf{p}_i^T = \text{softmax}(\mathbf{s}_i^T)$ 。因为 CMAT 只在 T 轮智能体通信之后进行动作采样，根据策略梯度的理论^[123]，CMAT 中梯度计算公式为：

$$\nabla_{\theta} J \approx \sum_{i=1}^n \nabla_{\theta} \log \mathbf{p}_i^T(v_i^T | h_i^T; \theta) Q(H^T, V^T), \quad (4-6)$$

其中， $Q(H^T, V^T)$ 为状态-动作函数 (state-action value function)。不同于现有的基于演员-评论家^[125,130,131] (actor-critic) 算法的工作用一个独立的网络来逼近 Q ，在 CMAT 中，我们参考^[132] 直接使用实际的奖励来代替 Q 。这样做的原因主要有两个：(1) 在场景图生成任务中，智能体的数量和动作空间的采样大小都明显大于现

有的多智能体策略梯度的工作，这容易导致训练样本不充足难以训练一个准确的状态-动作函数。（2）直接用实际奖励可以大大减小模型的复杂度，提升训练速度。因此，CMAT 中梯度计算公式变为：

$$\nabla_{\theta} J \approx \sum_{i=1}^n \nabla_{\theta} \log p_i^t(v_i^T | h_i^T; \theta) R(H^T, V^T), \quad (4-7)$$

其中， $R(H^T, V^T)$ 是实际的全局奖励（即：Recall@K 或 SPICE）。另外，值得注意的是， $R(H^T, V^T)$ 里包含一个可以学习的视觉关系分类模型。

优化目标的局部敏感性：从公式 (4-7) 可以看出，全局的奖励是综合考虑了所有智能体预测类别的总贡献，即对每个智能体而已，总贡献是相同的。图 4-5，我们举一个简单的例子来说明这种相同总贡献对场景图生成任务的副作用。如图 4-5 所示，绿色和红色分别表示正确的预测和错误的预测，假定全局奖励是预测正确的三元组数减去预测错误的三元组数，且 (1) (2) 两个场景图中只有节点 “a” 预测不同。

根据公式 (4-7)，(1) 中所有的节点都得到一个正的全局奖励 ($3-1=+2$)，而 (2) 中所有的节点都得到一个负的全局奖励 ($1-3=-2$)。在这个例子中，虽然节点 “b”、“c”、“d” 的预测完全相同，但是计算的梯度方向却完全相反，这将造成许多无效的优化迭代。因此，通过让优化目标满足局部敏感性，即通过计算每个智能体各自的局部奖励，有利于提供更有效的优化信号。

反事实评论家：一个简单的计算某个智能体动作的局部奖励的方法就是将目标智能体的动作替换成其他动作。因此， $R(H^T, V^T) - R(H^T, (V_{-i}^T, \tilde{v}_i^T))$ 可以表示第 i 个智能体的动作 v_i^T 的局部贡献。其中，其中 V_{-i}^T 表示所有除第 i 个智能体以外其他所有智能体都保持默认的动作，而第 i 个智能体采用新的动作 \tilde{v}_i^T 。由于新的动作 \tilde{v}_i^T 有 $|C|$ 种可能性，为了准确地计算 V_{-i}^T 的贡献，我们对所有可能的动作选择进行平均： $\text{CB}^i(H^T, V^T) = \sum p_i^T(\tilde{v}_i^T) R(H^T, (V_{-i}^T, \tilde{v}_i^T))$ ，其中 $\text{CB}^i(H^T, V^T)$ 是第 i 个智能体动作的**反事实基准**。这个反事实基准表示的是无论第 i 个智能体采用的动作，而其他所有智能体采用默认动作时得到的平均的全局奖励。CMAT 的反事实基准模型展示在图 4-6 中。

给定一个全局的奖励 $R(H^T, V^T)$ 和第 i 个智能体动作的反事实基准 $\text{CB}^i(H^T, V^T)$ ，

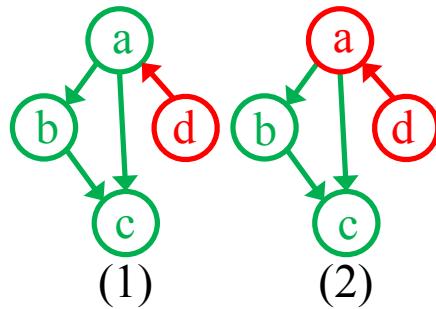


图 4-5 局部敏感性的重要性

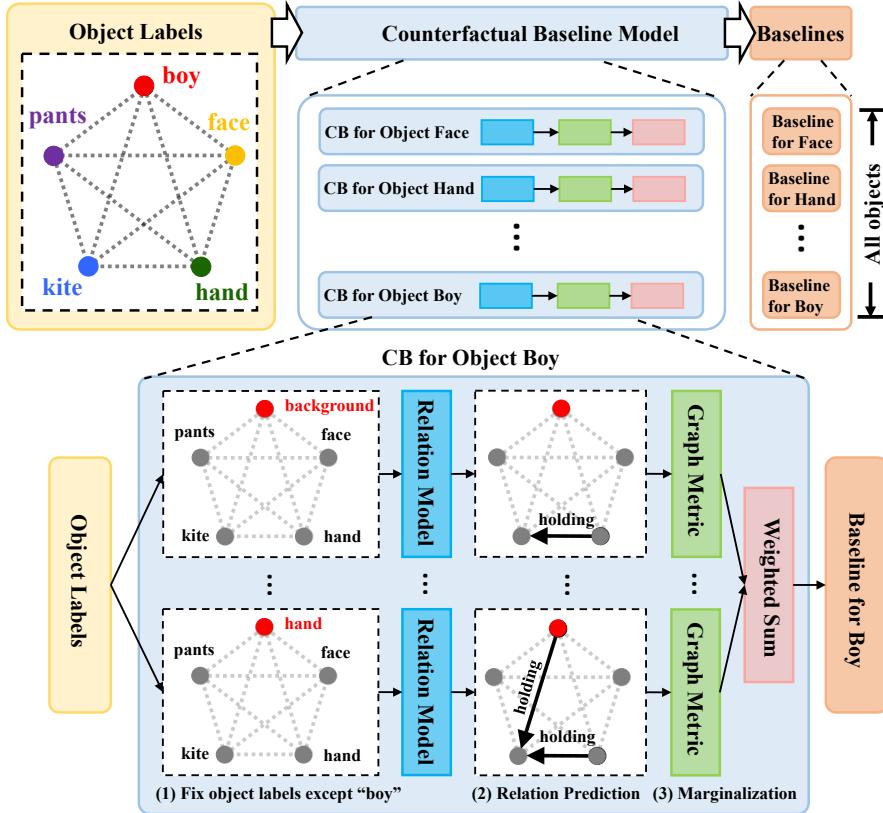


图 4-6 CMAT 中反事实基准模型

我们可以得到第 i 个智能体动作的局部贡献为：

$$A^i(H^T, V^T) = R(H^T, V^T) - \text{CB}^i(H^T, V^T) \quad (4-8)$$

其中， $A^i(H^T, V^T)$ 在演员-评论家算法^[133,134]中常被称为“优势”(advantage)， $\text{CB}^i(H^T, V^T)$ 在策略梯度算法中常被称为“基准”(baseline)，用来减少梯度预测的方差。整个计算 $A^i(H^T, V^T)$ 的网络结果可以合称为“反事实评论家”。此时，参数训练的梯度就变为了：

$$\nabla_{\theta} J \approx \sum_{i=1}^n \nabla_{\theta} \log \mathbf{p}_i^T(v_i^T | h_i^T; \theta) A^i(H^T, V^T) \quad (4-9)$$

最后，我们在加上交叉熵之和损失一起训练，最终参数训练的梯度为：

$$\begin{aligned} \nabla_{\theta} J \approx & \underbrace{\sum_{i=1}^n \nabla_{\theta} \log \mathbf{p}_i^T(v_i^T | h_i^T; \theta) A^i(H^T, V^T)}_{\text{CMAT}} + \\ & \underbrace{\alpha \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \nabla_{\theta} \log \mathbf{p}_{ij}(r_{ij})}_{\text{视觉关系交叉熵之和}} + \underbrace{\beta \sum_{i=1}^n \nabla_{\theta} \log \mathbf{p}_i^T(v_i^T)}_{\text{物体类别交叉熵之和}}, \end{aligned} \quad (4-10)$$

其中， α 和 β 是不同损失之间权衡的权重，额外的交叉熵之和是为了增加模型训练的稳定性^[132]。同样，我们还增加了一个熵正则项^[68,135]来约束 $\{\mathbf{p}_i^T\}_i$ 。

4.3 实验设置与性能对比

4.3.1 图像场景图生成数据集与实验设定

图像场景图生成数据集：我们使用目前最大的场景图数据集 Visual Genome (VG)^[46]。为了与现有工作能够公平地进行比较，我们采用与现有工作相同的数据集划分和预处理^[51,57,118,136,137]。处理后的图像数据共包含 150 个物体类别和 50 个视觉关系类别。每张图像平均有 11.5 个物体和 6.2 个视觉关系。整个数据集中，70% 的图像数据当成训练集，30% 的图像数据当成测试集。

实验设定：参考现有的文献^[51,56,118]，我们在三种实验设定下评估场景图生成质量：

1. 视觉关系分类 (PredCls)：给定图像、所有的物体框和物体类别，模型需要预测所有的物体组合的视觉关系；
2. 场景图分类 (SGCls)：给定图像和所有的物体框，模型需要预测所有物体类别以及所有物体组合的视觉关系；
3. 场景图检测 (SGDet)：给定图像，模型需要检测物体框、预测所有物体类别以及所有物体组合的视觉关系。

对于视觉关系中物体框检测来说，需要主语 (subject) 和宾语 (object) 与真实准确物体框的交并比 (IoU) 均大于 0.5。按照惯例，我们使用 Recall@20 (R@20)、Recall (R@50) 和 Recall (R@100) 作为场景图生成质量的评价指标。

4.3.2 实验细节

物体检测器：为了公平地与现有工作进行对比，我们采用了与^[118]相同的物体检测器。具体来说，它是以 VGG 网络^[98]为主干网络，然后锚框的大小和长宽比与 YOLO-9000^[138] 设置一样，然后用 RoIAlign^[8] 代替 RoIPooling。

训练细节：我们参照之前的策略梯度的工作，将整个训练过程分成两个阶段，并且先使用监督训练对模型进行参数初始化。在监督训练过程中，我们将 RoIAlign 层之前的参数都固定住，

速度与正确率的权衡：在策略梯度的训练过程中，完整的反事实评论家的计算需要对所有可能的物体类别进行加权，通常需要非常多的时间（如：对于 64 个智能体，

每个智能体共有 151 种物体类别选择，则需要超过 9600 次 ($\approx 151 \times 64$) 的评估计算)。幸运的是，我们注意到只有极少数的类别有较大的预测概率。为了速度与正确率之间的权衡，我们只对背景 (background) 和预测概率最高的两种类别进行求和来对所有的类别进行近似。在我们的实验中，这样的实验设定可以把速度提升 70 倍，同时维持相同的实验效果。

SGDet 的后处理：对于场景图生成任务 (SGDet)，为了与之前的工作^[118,139]公平地进行对比，我们采用相同的后处理操作。具体来说，在对每个 RoI 预测出物体所有类别的概率分布之后，我们对每个类别使用一次非极大值抑制来确定最终的物体类别，以及对应类别的位移偏置。在我们的实验中，非极大值抑制的 IoU 阈值设置为 0.5。

4.3.3 场景图生成性能分析

本节，我们通过大量的对比实验来分析 CMAT 中的不同设计对总体性能的影响，包括全局奖励函数的选择、基准模型的选择、以及多智能体通信步数的选择等。

全局奖励函数的选择：为了验证不同全局奖励对最终场景图生成性能的影响，我们对比了两种全局奖励函数：Recall@K 和 SPICE。在这个实验中，我们使用预测前 20 个三元组来计算对应的 Recall@K 和 SPICE 值。从表 4-1 可以看出，全局奖励函数 Recall@K 和 SPICE 都在交叉熵损失 (XE) 预训练的基础上继续提升性能，这主要是因为全局奖励函数的使用满足优化目标需要的整体一致性。另外，使用 Recall@K 可以得到比 SPICE 稍微好一点的结果，主要是因为目前的场景图生成数据集都是不完全标注的，SPICE 不适合用来评估这类数据集。因此，我们在之后的实验都使用 Recall@K 作为全局奖励函数。

		XE	R@20	SPICE
SGCls	R@20	34.08	35.93	35.27
	SPICE	15.39	16.01	15.90
SGDet	R@20	16.23	16.53	16.51
	SPICE	7.48	7.66	7.64

表 4-1 不同全局奖励函数的选择对性能的影响

基准模型的选择：为了验证不同的基准模型对最终场景图生成性能的影响，我们将本章提出的反事实基准 (CF) 与其他两种流行的基准模型进行对比：“移动平

均”（Moving Average, MA）^[140] 和“自评论”（Self-Critical, SC）^[65]。MA 是一个对奖励动态平均的常数^[68,135]。SC 是对所有的动作采取贪婪选择时得到的奖励。从表 4-2 可以看出，反事实基准可以在交叉熵损失（XE）预训练的基础显著提升性，相反，MA 和 SC 只能提升细微的性能。这主要是因为反事实基准符合局部敏感性，可以对所有的智能体提供更加有效的训练梯度；而 MA、SC 都只能提供全局的奖励，不具备局部敏感性。

		XE	MA	SC	CF
SGCls	R@20	34.08	34.76	34.68	35.93
	R@50	36.90	37.58	37.54	39.00
	R@100	37.61	38.29	38.25	39.75
SGDet	R@20	16.23	16.07	16.37	16.53
	R@50	20.62	20.41	20.82	20.95
	R@100	23.24	23.02	23.41	23.62

表 4-2 不同基准模型对性能的影响

多智能体通信步数的选择：为了验证不同的多智能体通信步数对最终场景图生成性能的影响，我们将通信步数分别从 2 变化到 5。从表 4-3 可以看出，随着通信步数的增加，模型的性能可以持续提升。但是由于 GPU 的限制，我们将最大步数设为 5。和现有的信息传递机制相比，我们的多智能体通信模型可以避免过早饱和的问题，主要的原因是我们没有将视觉关系也看成节点进行信息传递。

		2-step	3-step	4-step	5-step
SGCls	R@20	35.09	35.25	35.40	35.93
	R@50	37.95	38.19	38.37	39.00
	R@100	38.67	38.91	39.09	39.75
SGDet	R@20	16.35	16.43	16.47	16.53
	R@50	20.89	20.88	20.92	20.95
	R@100	23.49	23.50	23.54	23.62

表 4-3 不同多智能体通信步数对性能的影响

	Model	SGDet			SGCls			PredCls		
		R@20	R@50	R@100	R@20	R@50	R@100	R@20	R@50	R@100
Graph Constraint	VRD	-	0.3	0.5	-	11.8	14.1	-	27.9	35.0
	IMP	-	3.4	4.2	-	21.7	24.4	-	44.8	53.0
	MSDN	-	7.0	9.1	-	27.6	29.9	-	53.2	57.9
	AED	6.5	8.1	8.2	18.2	21.8	22.6	47.9	54.1	55.4
	FREQ+	20.1	26.2	30.1	29.3	32.3	32.9	53.6	60.6	62.2
	IMP+	14.6	20.7	24.5	31.7	34.6	35.4	52.7	59.3	61.3
	TFR	3.4	4.8	6.0	19.6	24.3	26.6	40.1	51.9	58.3
	MOTIFS	21.4	27.2	30.3	32.9	35.8	36.5	58.5	65.2	67.1
	G-RCNN	-	11.4	13.7	-	29.6	31.6	-	54.2	59.1
	GPI	-	-	-	-	36.5	38.8	-	65.1	66.9
	KER	-	27.1	29.8	-	36.7	37.4	-	65.8	67.6
	CMAT	22.1	27.9	31.2	35.9	39.0	39.8	60.2	66.4	68.1
No Constraint	AED	-	9.7	11.3	-	26.5	30.0	-	68.0	75.2
	IMP+	-	22.0	27.4	-	43.4	47.2	-	75.2	83.6
	FREQ+	-	28.6	34.4	-	39.0	43.4	-	75.7	82.9
	MOTIFS	22.8	30.5	35.8	37.6	44.5	47.7	66.6	81.1	88.3
	KER	-	30.9	35.8	-	45.9	49.0	-	81.9	88.9
	CMAT	23.7	31.6	36.8	41.0	48.6	52.0	68.9	83.2	90.1

表 4-4 不同场景图生成方法在 VG 数据集上的性能对比

4.3.4 场景图生成性能对比

本节将本章方法与目前最先进的场景图生成算法进行对比。这些方法主要可以分为两大类：(1) VRD^[45], AED^[136], FREQ^[118]。这类方法都是将场景图生成任务分解成物体检测和视觉关系检测两个独立的任务。(2) MSDN^[53], IMP^[51], TFR^[56], MOTIFS^[118], G-RCNN^[57], GPI^[137], KER^[141]。这类方法利用信息传递机制来编码物体间的内在联系。所有的方法都是利用交叉熵之和作为模型的损失函数。

定量性能分析：表 4-4展示了不同场景图生成方法在 VG 数据集上的实验结果。由表 4-4可以看出，CMAT 在所有的评估指标下都达到了最好的性能。尤其值得注意的是，CMAT 在场景图分类 (SGCls) 任务中可以显著提升实验效果（即：在有图限制^[118] 和没有图限制的条件下可以分别提升 3.4% 和 4.3%）。这也刚好符合我们的设计动机，通过将预测物体类别看成智能体的动作选择，较好地提升物体的类

别预测准确率。另一方面，实验结果也表明反事实多智能体学习可以显著的提升场景图生成任务的性能。对于视觉关系分类任务（PredCls），即使我们使用的视觉关系分类模型非常简单，我们仍然可以达到最好的实验性能。这说明 CMAT 中，视觉关系分类模型的输入已经更好地编码了智能体的内部状态。另外，CMAT 模型可以兼容任何效果更好的视觉关系分类模型。对于场景图检测任务（SGDet），CMAT 的提升没有场景图分类任务明显，原因可以来自于物体检测框的准确率特别高。

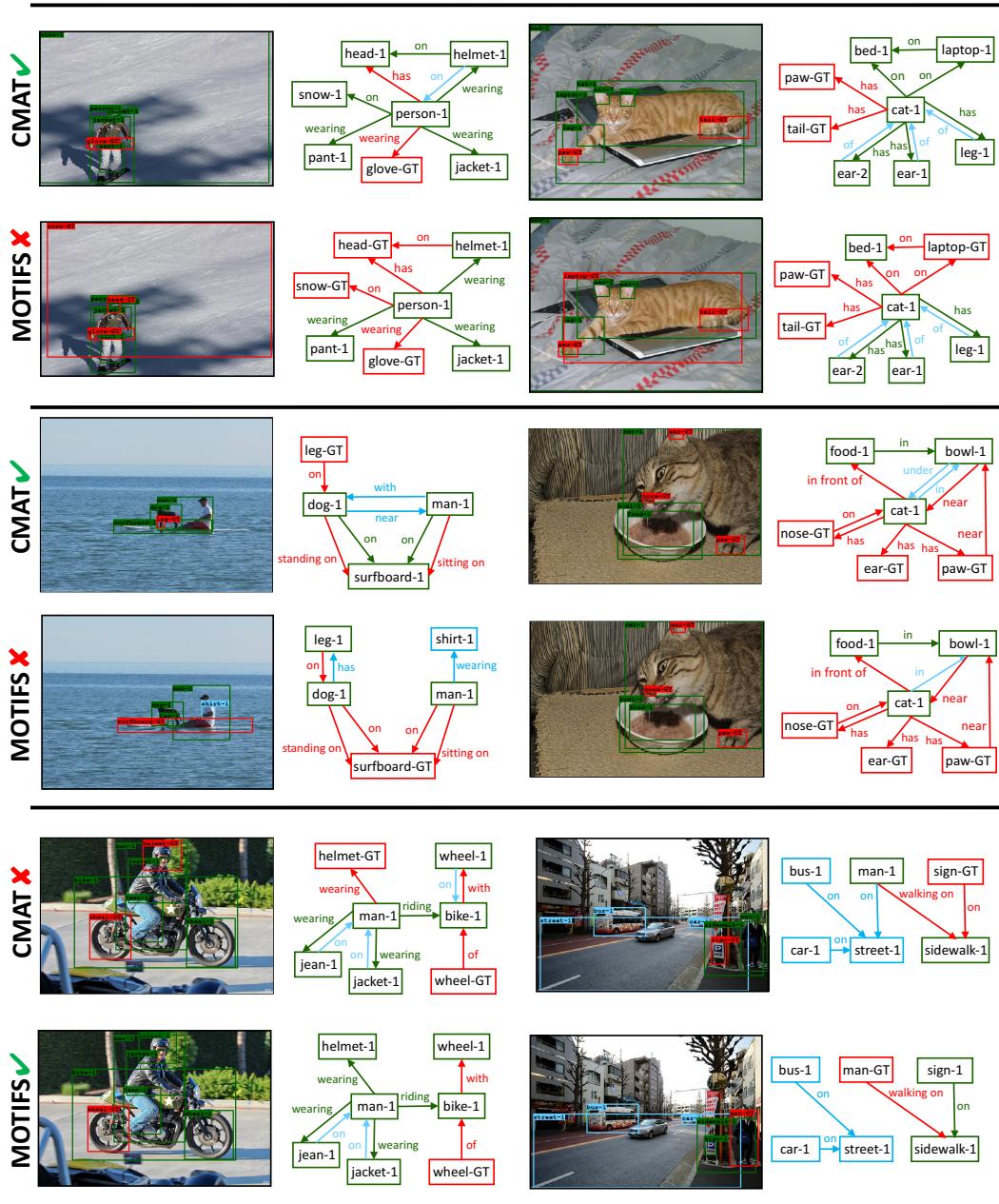


图 4-7 CMAT 和 MOTIFS 在数据集 VG 上的场景图生成结果对比

定性性能对比：图 4-7展示了 CMAT 和 MOTIFS 在数据集 VG 上的场景图生

成结果。由前两排结果看出可以看出，CMAT 很少漏掉一些重要的节点，如“laptop”、“surfboard”等。因为 CMAT 的优化目标满足整体一致性。从第三排结果可以看出，CMAT 的错误主要是检测出比 MOTIFS 更多的未标注的视觉关系（蓝色边）。由于目前使用的评价指标主要是 Recall@K，它主要是基于所有标注的三元组序列的排序结果。因此，如果检测出更多的未标注的正样本，反而得到更低的值。

4.4 本章小结

在本章，我们提出了一个全新的反事实多智能体学习（CMAT）来代替目前场景图生成的优化目标交叉熵之和。CMAT 首先将场景图生成任务看成一个多智能体协同合作任务，并且使用最终的评价指标作为全局奖励；其次，CMAT 通过反事实基准模型将每个智能体的局部贡献分离出来，提供更加有效的训练信号。

5 基于空间和通道注意力机制的图像描述语句生成方法

视觉注意力机制已经被广泛地运用在多模态任务中，如描述语句生成、视觉问答等。现有的注意力机制都是空间注意力机制，即只对卷积神经网络的最后一个特征图（feature map）在空间维度上进行加权。但是，卷积神经网络除了空间维度以外，还有通道维度，以及多层的特性。因此，目前的空间注意力机制并没有充分利用卷积神经网络的特性。在本章，我们提出一种全新的卷积神经网络：空间和通道注意力卷积神经网络（Spatial and Channel-wise Attention in CNN, SCA-CNN）。对于图像描述语句生成任务，在生成每个单词的过程中，SCA-CNN 可以动态地融合不同空间位置、不同通道、不同层之间特征的内在联系。我们在图像描述语句生成的三个标准数据集上（Flickr8K, Flickr30K 和 MSCOCO）对模型 SCA-CNN 进行评估，大量的对比实验结果都表明我们提出的空间和通道注意力机制（SCA-CNN）可以显著地提升图像描述语句生成的性能。

5.1 问题描述

视觉注意力机制已经被广泛地证明可以用来提升多模态任务性能，如图像或视频的描述语句生成^[135,142]、视觉问答^[143–145]等。注意力机制主要是基于一个合理的设想：人类在做图像描述语句生成任务时，人类不是一次性记住整个图像，而是在生成语句的过程中不断地去调整关注的区域^[146]。具体来说，与之前工作直接将整个图像编码成一个固定的向量表达不同，注意力机制让模型在语句生成过程中不断的调整图像表达，从而生成更加丰富和准确的描述语句。因此，注意力机制也可以看成是一种动态的特征调节机制^[147,148]。

目前主要的图像特征都是通过卷积神经网络进行编码^[97,98]。给定一个大小为 $W \times H \times 3$ 的彩色图像，通常卷积层用一个通道数为 C 的卷积核进行卷积，得到一个大小为 $W' \times H' \times C$ 的特征图，然后这个特征图又输入到后续的网络结构中。三维的特征图中每个通道对应的是卷积核通道对应的响应。其中，卷积核也可以看

成是一种模式检测器：底层的卷积核倾向于检测一些底层的视觉特征（如：边、角等），高层的卷积核倾向于检测一些高层的语义特征（如：物体等）^[149]。通过叠加多个卷积层，卷积神经网络实现对图像的多层语义特征提取。因此，卷积神经网络的图像特征本质上具有三种维度：空间维度、通道维度、和层级维度。然后，目前所有的工作都只考了空间维度^[135]，即：只利用语句信息对卷积神经网络的最后一个特征图在空间维度上进行加权。

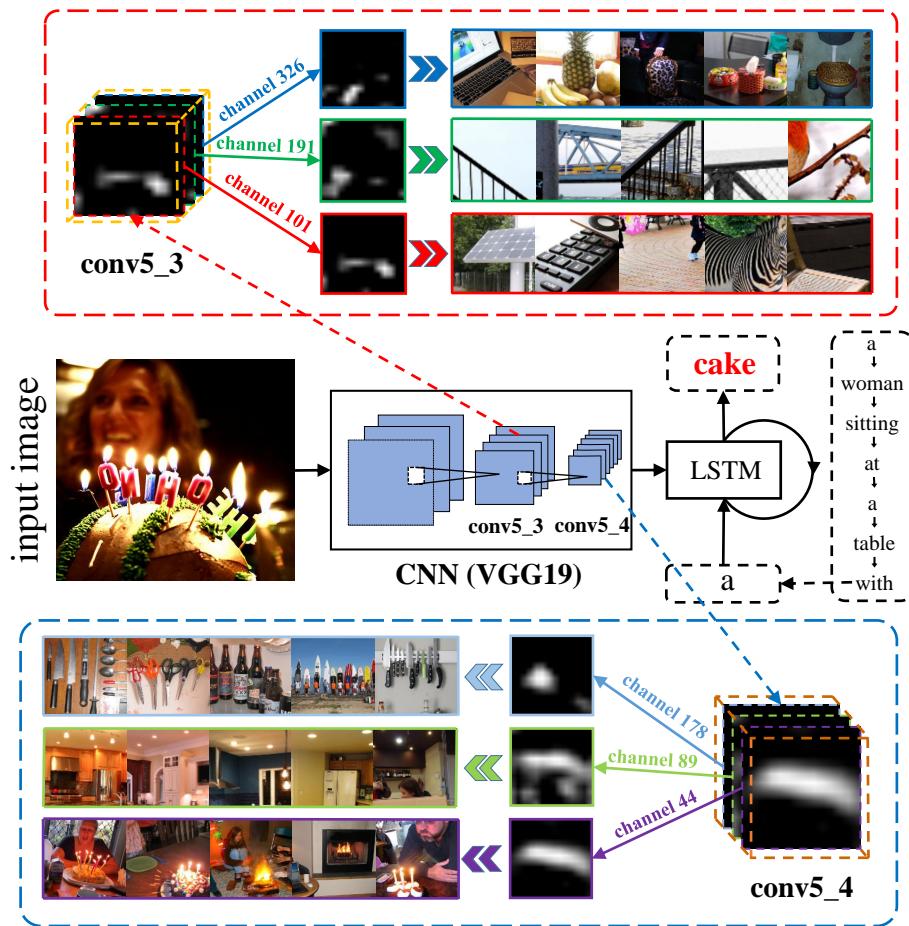


图 5-1 VGG19 网络中 $conv5_4$ 层和 $conv5_3$ 层的通道注意力机制示例图

在本章，我们在基于注意力机制的图像描述语句生成模型中，将充分利用卷积神经网络的图像特征的三个维度。具体来说，我们提出了一种全新的网络结构：空间和通道注意力卷积神经网络（SCA-CNN），对多个卷积层的所有元素都进行加权。如图 5-1 所示，特征图的每一个通道本质上可以认为是一种特定属性或者物体检测器的响应结果，即通道注意力可以看成是生成语句对不同的属性特征进行选择。例如，当模型要预测单词“cake”时，通道注意力会对部分属性特征赋予更大的权重，如火、光、蜡烛形状等。另外，由于每个卷积层都是底层卷积的输出

结果，因此，可以对多个不同的卷积层都使用空间和通道注意力机制，让低层特征（如图 5-1 中 *conv5_3*）关注更加底层的属性特征。

我们在三个标准的数据集（Flickr8K、Flickr30K 和 MSCOCO）对 SCA-CNN 的性能进行评估。SCA-CNN 可以比现有的空间注意力模型^[135] 在评价指标 BLEU4 上提升 4.8%。总而言之，我们提出了一种全新的卷积神经网络结构，对网络特征层在空间上、通道上、和层级上三个维度进行注意力加权。SCA-CNN 模型是一种通用的结构，可以运用在任意的网络结构和网络层上，如 VGG^[98] 和 ResNet^[97]。SCA-CNN 也帮助我们更好的理解卷积神经网络特征在描述语句生成过程中的变化过程。

5.2 空间和通道注意力机制

5.2.1 概述

我们采用流行的编码-解码框架对图像生成描述语句，即先用编码器（卷积神经网络）将图像编码成一个向量表达，然后使用解码器（递归神经网络）将图像视觉表达解码成描述语句。如图 5-2 所示，SCA-CNN 利用语句信息对不同层级的特征进行空间和通道注意力加权。

假设模型在生成第 t 个单词，此时 LSTM 的隐含状态为 $\mathbf{h}_{t-1} \in \mathbb{R}^d$ ，其中 d 是隐含状态的维度。对于第 l 层的特征，SCA-CNN 根据 \mathbf{h}_{t-1} 和目前的卷积特征 \mathbf{V}^l ，可以得到新的卷积特征 \mathbf{X}^l ：

$$\begin{aligned}\mathbf{V}^l &= \text{CNN}(\mathbf{X}^{l-1}), \\ \gamma^l &= \Phi(\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{V}^l), \\ \mathbf{X}^l &= f(\mathbf{V}^l, \gamma^l).\end{aligned}\tag{5-1}$$

其中， $\Phi(\cdot)$ 是空间和通道注意力函数， \mathbf{V}^l 是上一个卷积层的输出 \mathbf{X}^{l-1} 之后再接卷积层或池化层^[97,98]， $f(\cdot)$ 是线性加权函数。当卷积特征达到最后一层（第 L 层）时，我们使用 \mathbf{X}^L 来生成第 t 个单词：

$$\begin{aligned}\mathbf{h}_t &= \text{LSTM}(\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{X}^L, y_{t-1}), \\ y_t &\sim p_t = \text{softmax}(\mathbf{h}_t, y_{t-1}).\end{aligned}\tag{5-2}$$

其中， $p_t \in \mathbb{R}^{|\mathcal{D}|}$ 是字典中所有单词的预测概率， \mathcal{D} 是字典包含训练集语句中出现的所有单词。

如果注意力参数 γ^l 与特征 \mathbf{V}^l 或 \mathbf{X}^l 同时的尺寸 $(W^l \times H^l \times C^l)$ ，其计算量大小为 $\mathcal{O}(W^l H^l C^l k)$ ，其中 k 是卷积网络特征 \mathbf{V}^l 和 LSTM 的隐含状态 \mathbf{h}_{t-1} 映射到同

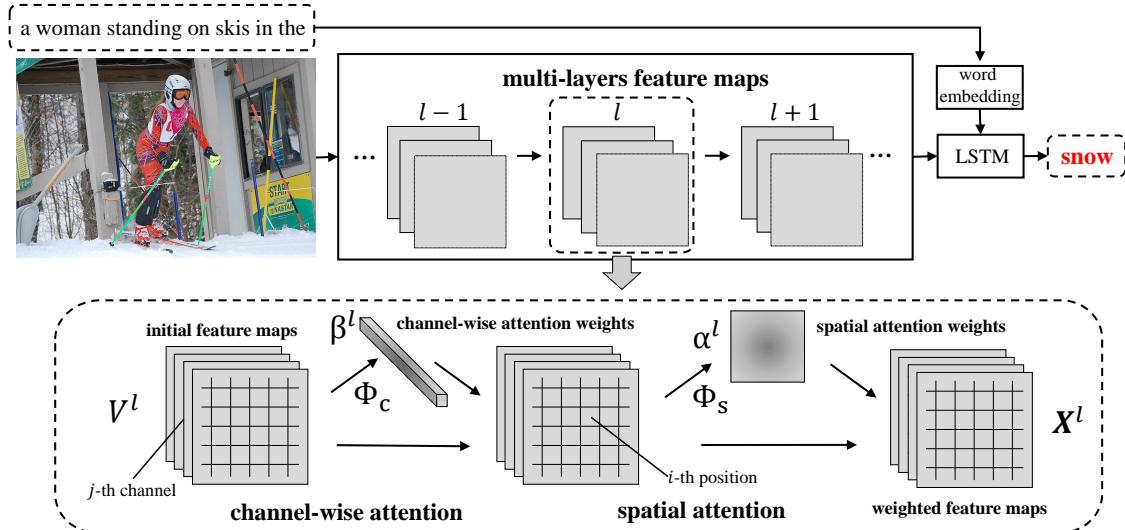


图 5-2 空间和通道注意力卷积神经网络流程图

一空间中的维度大小。在特征图尺寸非常大时，对 GPU 的需求比较大。因此，我们提出将三维的 γ^l 分解成空间注意力参数 α^l 和通道注意力参数 β^l ：

$$\alpha^l = \Phi_s(\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{V}^l), \quad (5-3)$$

$$\beta^l = \Phi_c(\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{V}^l). \quad (5-4)$$

其中 Φ_c 和 Φ_s 分别表示通道注意力模型和空间注意力模型。这种简化将极大地减小计算空间到 $\mathcal{O}(C^l k + W^l H^l k)$ 。

5.2.2 空间注意力机制

通常，每个单词只与图像中的部分区域有关，如图 5-1，当预测单词“cake”时，只有包含蛋糕的图像区域对于“cake”的预测有用。因此，在生成每个单词时，都用同一个全局图像特征容易使模型陷入局部最优解。空间注意力机制就是对不同的图像区域（空间上）赋予不同的权重。为了不失一般性，我们省略层数上角标 l 。我们先将视觉特征 \mathbf{V} 变形成 $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_m]$ ，其中 $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^C$ ， $m = W \cdot H$ ， $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^C$ 可以看成是第 i 个位置的图像特征。给定上一个时刻的 LSTM 的隐含状态 \mathbf{h}_{t-1} ，我们使用单层神经网络生成空间注意力权重 α ：

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \tanh((\mathbf{W}_s \mathbf{V} + b_s) \oplus \mathbf{W}_{hs} \mathbf{h}_{t-1}), \\ \alpha &= \text{softmax}(\mathbf{W}_i \mathbf{a} + b_i). \end{aligned} \quad (5-5)$$

其中， $\mathbf{W}_s \in \mathbb{R}^{k \times C}$ 、 $\mathbf{W}_{hs} \in \mathbb{R}^{k \times d}$ 、 $\mathbf{W}_i \in \mathbb{R}^k$ 都是需要学习的映射矩阵，这些矩阵分别将视觉特征、隐含状态映射到同一个维度。 \oplus 表示矩阵和向量相加，即对矩阵中的每一个列向量都加上该向量。 $b_s \in \mathbb{R}^k$, $b_i \in \mathbb{R}^1$ 是模型中可学习的偏置。

5.2.3 通道注意力机制

5.3 实验设置与性能对比

5.3.1 图像描述语句生成数据集

Flickr8k^[150]: 它一共包含 8000 张图像。按照官方划分，我们将其中 6000 张图像作为训练集，1000 张图像为验证集，以及 1000 张图像为测试集。

Flickr30k^[151]: 它一共包含 31000 张图像。因为这个数据集缺少官方划分，我们采用与之前工作^[79]同样的划分。在这种划分中，29000 张图像作为训练集，1000 张图像为验证集，以及 1000 张图像为测试集。

MSCOCO^[152]: 根据该数据集的官方划分，训练集包含 82783 张图像，验证集包含 40504 张图像，以及测试集包含 40775 张图像。对于官方测试集，由于所有的图像都没有公布其中的人工标注信息，我们同样参考之前的工作^[79]将官方验证集划分为验证集和测试集两部分，其中验证集和测试集各包含 5000 张图像。

5.3.2 评价指标

BLEU^[153] (B@1, B@2, B@3, B@4):

METEOR^[154] (MT):

CIDEr^[155] (CD):

ROUGE-L^[156] (RG):

对于所有的四种评价指标来说，他们都是通过比较生成语句中的 n 元词组在人工标注的语句中出现的频率。所有的评价指标都是采用 MSCOCO 官方的测评工具¹。

¹<https://github/tylin/coco-caption>.

5.3.3 实验设定

对于图像编码部分，我们采用两种流行的卷积神经网络：VGG-19^[98] 和 ResNet-152^[97]。对于文本解码部分，我们使用 LSTM^[11] 来生成描述语句中的单词。单词编码的维度和 LSTM 的隐含状态的维度分别设定为 100 和 1000。用于计算注意力权重的共同空间维度设置为 512。对于 Flickr8k 数据集，batch size 设置为 16；对于 Flickr30k 和 MSCOCO，batch size 设置为 64。为了避免过拟合，我们采用 dropout 和 early stopping。我们整个模型采用端到端的训练方式，用优化算法 Adadelta^[157] 进行参数优化。整个语句的生成过程将会终止当模型刚好预测一个特定的“END”字符或者达到了预先设定的句子最长的长度。在测试阶段，我们采用 BeamSearch^[13] 的方法，在每个时刻选择 5 个句子作为候选答案。

5.3.4 通道注意力机制的性能分析

5.3.5 多层注意力机制的性能分析

5.3.6 空间和通道注意力卷积神经网络的性能比较

Deep VS^[79]、NIC^[13]、m-RNN^[158]、SAT^[135]、HAT^[135]、gLSTM^[159]、ATT^[160]

5.3.7 空间和通道注意力机制的可视化

5.4 本章小结

Dataset	Network	Method	B@4	MT	RG	CD
Flickr8k	VGG	Spatial	23.0	21.0	49.1	60.6
		SAT	21.3	20.3	—	—
		Channel	22.6	20.3	48.7	58.7
		Spatial-Channel	22.6	20.9	48.7	60.6
		Channel-Spatial	23.5	21.1	49.2	60.3
	ResNet	Spatial	20.5	19.6	47.4	49.9
		SAT	21.7	20.1	48.4	55.5
		Channel	24.4	21.5	50.0	65.5
		Spatial-Channel	24.8	22.2	50.5	65.1
		Channel-Spatial	25.7	22.1	50.9	66.5
Flickr30k	VGG	Spatial	21.1	18.4	43.1	39.5
		SAT	19.9	18.5	—	—
		Channel	20.1	18.0	42.7	38.0
		Spatial-Channel	20.8	17.8	42.9	38.2
		Channel-Spatial	21.0	18.0	43.3	38.5
	ResNet	Spatial	20.5	17.4	42.8	35.3
		SAT	20.1	17.8	42.9	36.3
		Channel	21.5	18.4	43.8	42.2
		Spatial-Channel	21.9	18.5	44.0	43.1
		Channel-Spatial	22.1	19.0	44.6	42.5
MS COCO	VGG	Spatial	28.2	23.3	51.0	85.7
		SAT	25.0	23.0	—	—
		Channel	27.3	22.7	50.1	83.4
		Spatial-Channel	28.0	23.0	50.6	84.9
		Channel-Spatial	28.1	23.5	50.9	84.7
	ResNet	Spatial	28.3	23.1	51.2	84.0
		SAT	28.4	23.2	51.2	84.9
		Channel	29.5	23.7	51.8	91.0
		Spatial-Channel	29.8	23.9	52.0	91.2
		Channel-Spatial	30.4	24.5	52.5	91.7

表 5-1 VGG-19 网络和 ResNet-152 网络单层注意力机制的性能对比

Dataset	Network	Method	B@4	MT	RG	CD
Flickr8k	VGG	1-layer	23.0	21.0	49.1	60.6
		2-layer	22.8	21.2	49.0	60.4
		3-layer	21.6	20.9	48.4	54.5
	ResNet	1-layer	20.5	19.6	47.4	49.9
		2-layer	22.9	21.2	48.8	58.8
		3-layer	23.9	21.3	49.7	61.7
Flickr30k	VGG	1-layer	21.1	18.4	43.1	39.5
		2-layer	21.9	18.5	44.3	39.5
		3-layer	20.8	18.0	43.0	38.5
	ResNet	1-layer	20.5	17.4	42.8	35.3
		2-layer	20.6	18.6	43.2	39.7
		3-layer	21.0	19.2	43.4	43.5
MS COCO	VGG	1-layer	28.2	23.3	51.0	85.7
		2-layer	29.0	23.6	51.4	87.4
		3-layer	27.4	22.9	50.4	80.8
	ResNet	1-layer	28.3	23.1	51.2	84.0
		2-layer	29.7	24.1	52.2	91.1
		3-layer	29.6	24.2	52.1	90.3

表 5-2 空间注意力模型在 VGG-19 网络和 ResNet-152 网络下不同层的性能对比

Dataset	Network	Method	B@4	MT	RG	CD
Flickr8k	VGG	1-layer	23.5	21.1	49.2	60.3
		2-layers	22.8	21.6	49.5	62.1
		3-layers	22.7	21.3	49.3	62.3
	ResNet	1-layer	25.7	22.1	50.9	66.5
		2-layers	25.8	22.4	51.3	67.1
		3-layers	25.3	22.9	51.2	67.5
Flickr30k	VGG	1-layer	21.0	18.0	43.3	38.5
		2-layers	21.8	18.8	43.7	41.4
		3-layers	20.7	18.3	43.6	39.2
	ResNet	1-layer	22.1	19.0	44.6	42.5
		2-layers	22.3	19.5	44.9	44.7
		3-layers	22.0	19.2	44.7	42.8
MS COCO	VGG	1-layer	28.1	23.5	50.9	84.7
		2-layers	29.8	24.2	51.9	89.7
		3-layers	29.4	24.0	51.7	88.4
	ResNet	1-layer	30.4	24.5	52.5	91.7
		2-layers	31.1	25.0	53.1	95.2
		3-layers	30.9	24.8	53.0	94.7

表 5-3 空间和通道注意力模型在 VGG-19 网络和 ResNet-152 网络下不同层的性能对比

Model	Flickr8k				Flickr30k				MS COCO			
	B@2	B@3	B@4	MT	B@2	B@3	B@4	MT	B@2	B@3	B@4	MT
Deep VS	38.3	24.5	16.0	—	36.9	24.0	15.7	—	45.0	32.1	23.0	19.5
NIC	41.0	27.0	—	—	42.3	27.7	18.3	—	46.1	32.9	24.6	—
m-RNN	—	—	—	—	41.0	28.0	19.0	—	49.0	35.0	25.0	—
SAT	44.8	29.9	19.5	18.9	43.4	28.8	19.1	18.5	49.2	34.4	24.3	23.9
HAT	45.7	31.4	21.3	20.3	43.9	29.6	19.9	18.5	50.4	35.7	25.0	23.0
gLSTM	45.9	31.8	21.2	20.6	44.6	30.5	20.6	17.9	49.1	35.8	26.4	22.7
ATT	—	—	—	—	46.0	32.4	23.0	18.9	53.7	40.2	30.4	24.3
ours(V)	46.6	32.6	22.8	21.6	45.3	31.7	21.8	18.8	53.3	39.7	29.8	24.2
ours(R)	49.6	35.9	25.8	22.4	46.8	32.5	22.3	19.5	54.8	41.1	31.1	25.0

表 5-4 不同描述语句生成算法在数据集 Flickr8k、Flickr30k 和 MSCOCO 上的性能对比

Model	B@1		B@2		B@3		B@4		METEOR		ROUGE-L		CIDEr	
	c5	c40	c5	c40	c5	c40								
ours	71.2	89.4	54.2	80.2	40.4	69.1	30.2	57.9	24.4	33.1	52.4	67.4	91.2	92.1
HAT	70.5	88.1	52.8	77.9	38.3	65.8	27.7	53.7	24.1	32.2	51.6	65.4	86.5	89.3
ATT	73.1	90.0	56.5	81.5	42.4	70.9	31.6	59.9	25.0	33.5	53.5	68.2	95.3	95.8
NIC	71.3	89.5	54.2	80.2	40.7	69.4	30.9	58.7	25.4	34.6	53.0	68.2	94.3	94.6

表 5-5 不同图像描述语句生成算法在数据集 MSCOCO 的在线服务器上的性能对比



图 5-3 V 空间和通道注意力机制的可视化结果

6 基于自底向上框架的视频片段检索方法

6.1 引言

6.2 视频片段检索

6.3 实验设置与性能对比

6.3.1 视频片段检索数据集

基于语句的视频片段检索：我们在以下三个数据集上进行评估：

TACoS^[161]：它一共包含 127 个视频和 17344 个文本与视频序列对（样本）。我们参考现有的标准数据集划分^[14]，将其中 50% 的样本作为训练集，25% 的样本作为验证集，25% 的样本作为测试集。每个样本中视频的平均长度为 5 分钟。

Charades-STA^[14]：它一共包含 12408 个文本与视频序列对作为训练集，3720 个文本与视频序列对作为测试集。每个样本中视频的平均长度为 30 秒。

ActivityNet Captions^[162]：它是目前为止最大、最丰富的数据集，一共包含 19209 个视频。我们参考现有的工作^[163]，使用 37421 个文本与视频序列作为训练集，17505 个文本与视频序列作为测试集。每个样本中视频的平均长度为 2 分钟。

基于视频的视频片段检索：我们在以下数据集上进行评估：

ActivityNet-VRL^[164]：它是目前唯一公开发布的数据集。它对动作识别数据集 ActivityNet^[165] 共 200 个类别的视频进行了重组，其中任意选取 160 个类别对应的视频作为训练集，20 个类别对应的视频作为验证集，以及剩余 20 个类别对应的视频作为测试集。这种零样本式的数据集划分能够评估模型的泛化能力。在训练阶段，查询视频和引用视频是随机选取的。在测试阶段，查询视频和引用视频是固定的。

6.3.2 评价指标

基于语句的视频片段检索：我们参考现有工作，使用下列两种通用的评价指标：

R@N, IoU@ θ : 在测试集中, 每个样本预测分数最高的 n 个的结果重叠度(Intersection-over-Union, IoU) 大于 θ 的百分比。由于自底向上框架的特性, 我们仅考虑 $N = 1$ 。

mIoU: 测试集中所有测试样本的平均的重叠度。

基于视频的视频片段检索: 我们使用以下评价指标:

mAP@1: 在不同阈值下最高预测结果的平均精度均值 (mAP)。

6.4 本章小结

7 基于反事实样本生成的图像视觉问答方法

7.1 引言

7.2 反事实样本生成

7.3 实验设置与性能对比

7.4 本章小结

8 总结和展望

xx

8.1 本文工作总结

xx

本文主要主要的研究内容与贡献如下：

1. xx

8.2 未来研究展望

xx

1. xx

参考文献

- [1] Elyor Kodirov, Tao Xiang, Shaogang Gong. Semantic autoencoder for zero-shot learning[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:3174–3183.
- [2] Wei-Lun Chao, Soravit Changpinyo, Boqing Gong, Fei Sha. An empirical study and analysis of generalized zero-shot learning for object recognition in the wild[C]. Proc. ECCV. Springer, 2016:52–68.
- [3] Olga Russakovsky, Jia Deng, Hao Su, Jonathan Krause, Sanjeev Satheesh, Sean Ma, Zhiheng Huang, Andrej Karpathy, Aditya Khosla, Michael Bernstein, et al. Imagenet large scale visual recognition challenge[J]. Int. J. Comput. Vis., 2015, 115(3):211–252.
- [4] Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Geoffrey E Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[C]. Proc. NeurIPS. 2012:1097–1105.
- [5] Li Fei-Fei, Rob Fergus, Pietro Perona. One-shot learning of object categories[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell., 2006, 28(4):594–611.
- [6] Christoph H Lampert, Hannes Nickisch, Stefan Harmeling. Learning to detect unseen object classes by between-class attribute transfer[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2009:951–958.
- [7] Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick, Jian Sun. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks[C]. Proc. NeurIPS. 2015:91–99.
- [8] Kaiming He, Georgia Gkioxari, Piotr Dollár, Ross Girshick. Mask r-cnn[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:2961–2969.
- [9] Justin Johnson, Ranjay Krishna, Michael Stark, Li-Jia Li, David Shamma, Michael Bernstein, Li Fei-Fei. Image retrieval using scene graphs[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2015:3668–3678.
- [10] Alexander Kirillov, Kaiming He, Ross Girshick, Carsten Rother, Piotr Dollár. Panoptic segmentation[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2019:9404–9413.
- [11] Sepp Hochreiter, Jürgen Schmidhuber. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8):1735–1780.
- [12] Junyoung Chung, Caglar Gulcehre, KyungHyun Cho, Yoshua Bengio. Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling[C]. arXiv. 2014.
- [13] Oriol Vinyals, Alexander Toshev, Samy Bengio, Dumitru Erhan. Show and tell: A neural image

- caption generator[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2015:3156–3164.
- [14] Jiyang Gao, Chen Sun, Zhenheng Yang, Ram Nevatia. Tall: Temporal activity localization via language query[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:5267–5275.
- [15] Stanislaw Antol, Aishwarya Agrawal, Jiasen Lu, Margaret Mitchell, Dhruv Batra, C Lawrence Zitnick, Devi Parikh. Vqa: Visual question answering[C]. Proc. IEEE ICCV. 2015:2425–2433.
- [16] Abhishek Das, Satwik Kottur, Khushi Gupta, Avi Singh, Deshraj Yadav, José MF Moura, Devi Parikh, Dhruv Batra. Visual dialog[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:326–335.
- [17] Ali Farhadi, Ian Endres, Derek Hoiem, David Forsyth. Describing objects by their attributes[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2009:1778–1785.
- [18] Bernardino Romera-Paredes, Philip Torr. An embarrassingly simple approach to zero-shot learning[C]. Proc. ICML. 2015:2152–2161.
- [19] Mohammad Norouzi, Tomas Mikolov, Samy Bengio, Yoram Singer, Jonathon Shlens, Andrea Frome, Greg S Corrado, Jeffrey Dean. Zero-shot learning by convex combination of semantic embeddings[C]. Proc. ICLR. 2014.
- [20] Berkan Demirel, Ramazan Gokberk Cinbis, Nazli Ikizler-Cinbis. Attributes2classname: A discriminative model for attribute-based unsupervised zero-shot learning[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:1232–1241.
- [21] Huajie Jiang, Ruiping Wang, Shiguang Shan, Yi Yang, Xilin Chen. Learning discriminative latent attributes for zero-shot classification[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:4223–4232.
- [22] Andrea Frome, Greg S Corrado, Jon Shlens, Samy Bengio, Jeff Dean, Marc’Aurelio Ranzato, Tomas Mikolov. Devise: A deep visual-semantic embedding model[C]. Proc. NeurIPS. 2013:2121–2129.
- [23] Zeynep Akata, Florent Perronnin, Zaid Harchaoui, Cordelia Schmid. Label-embedding for image classification[J]. 2015, 38(7):1425–1438.
- [24] Zeynep Akata, Scott Reed, Daniel Walter, Honglak Lee, Bernt Schiele. Evaluation of output embeddings for fine-grained image classification[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2015:2927–2936.
- [25] Yongqin Xian, Zeynep Akata, Gaurav Sharma, Quynh Nguyen, Matthias Hein, Bernt Schiele. Latent embeddings for zero-shot classification[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2016:69–77.
- [26] Richard Socher, Milind Ganjoo, Christopher D Manning, Andrew Ng. Zero-shot learning through cross-modal transfer[C]. Proc. NeurIPS. 2013:935–943.
- [27] Yanan Li, Donghui Wang, Huanhang Hu, Yuetan Lin, Yueling Zhuang. Zero-shot recognition using dual visual-semantic mapping paths[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:3279–3287.
- [28] Tomas Mikolov, Ilya Sutskever, Kai Chen, Greg S Corrado, Jeff Dean. Distributed representa-

- tions of words and phrases and their compositionality[C]. Proc. NeurIPS. 2013:3111–3119.
- [29] Jeffrey Pennington, Richard Socher, Christopher D Manning. Glove: Global vectors for word representation[C]. 2014:1532–1543.
- [30] Jimmy Lei Ba, Kevin Swersky, Sanja Fidler, et al. Predicting deep zero-shot convolutional neural networks using textual descriptions[C]. Proc. IEEE ICCV. 2015:4247–4255.
- [31] Mohamed Elhoseiny, Babak Saleh, Ahmed Elgammal. Write a classifier: Zero-shot learning using purely textual descriptions[C]. Proc. IEEE ICCV. 2013:2584–2591.
- [32] Bharath Hariharan, Ross Girshick. Low-shot visual recognition by shrinking and hallucinating features[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:3018–3027.
- [33] Saeid Motiian, Marco Piccirilli, Donald A Adjeroh, Gianfranco Doretto. Unified deep supervised domain adaptation and generalization[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:5715–5725.
- [34] Pau Panareda Busto, Juergen Gall. Open set domain adaptation[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:754–763.
- [35] Yanwei Fu, Timothy M Hospedales, Tao Xiang, Shaogang Gong. Transductive multi-view zero-shot learning[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell., 2015, 37(11):2332–2345.
- [36] Kate Saenko, Brian Kulis, Mario Fritz, Trevor Darrell. Adapting visual category models to new domains[C]. Proc. ECCV. Springer, 2010:213–226.
- [37] Taeksoo Kim, Moonsu Cha, Hyunsoo Kim, Jung Kwon Lee, Jiwon Kim. Learning to discover cross-domain relations with generative adversarial networks[C]. Proc. ICML. JMLR. org, 2017:1857–1865.
- [38] Pedro Morgado, Nuno Vasconcelos. Semantically consistent regularization for zero-shot recognition[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:6060–6069.
- [39] Ian Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair, Aaron Courville, Yoshua Bengio. Generative adversarial nets[C]. Proc. NeurIPS. 2014:2672–2680.
- [40] Augustus Odena, Christopher Olah, Jonathon Shlens. Conditional image synthesis with auxiliary classifier gans[C]. Proc. ICML. JMLR. org, 2017:2642–2651.
- [41] Eric Tzeng, Judy Hoffman, Kate Saenko, Trevor Darrell. Adversarial discriminative domain adaptation[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:7167–7176.
- [42] Alireza Makhzani, Jonathon Shlens, Navdeep Jaitly, Ian Goodfellow, Brendan Frey. Adversarial autoencoders[C]. arXiv. 2015.
- [43] Ashish Shrivastava, Tomas Pfister, Oncel Tuzel, Joshua Susskind, Wenda Wang, Russell Webb. Learning from simulated and unsupervised images through adversarial training[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:2107–2116.

- [44] Ashish Mishra, Shiva Krishna Reddy, Anurag Mittal, Hema A Murthy. A generative model for zero shot learning using conditional variational autoencoders[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR Workshop. 2018:2188–2196.
- [45] Cewu Lu, Ranjay Krishna, Michael Bernstein, Li Fei-Fei. Visual relationship detection with language priors[C]. Proc. ECCV. Springer, 2016:852–869.
- [46] Ranjay Krishna, Yuke Zhu, Oliver Groth, Justin Johnson, Kenji Hata, Joshua Kravitz, Stephanie Chen, Yannis Kalantidis, Li-Jia Li, David A Shamma, et al. Visual genome: Connecting language and vision using crowdsourced dense image annotations[J]. Int. J. Comput. Vis., 2017, 123(1):32–73.
- [47] Hanwang Zhang, Zawlin Kyaw, Shih-Fu Chang, Tat-Seng Chua. Visual translation embedding network for visual relation detection[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:5532–5540.
- [48] Bohan Zhuang, Lingqiao Liu, Chunhua Shen, Ian Reid. Towards context-aware interaction recognition for visual relationship detection[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:589–598.
- [49] Yaohui Zhu, Shuqiang Jiang. Deep structured learning for visual relationship detection[C]. Proc. AAAI. 2018.
- [50] Ji Zhang, Mohamed Elhoseiny, Scott Cohen, Walter Chang, Ahmed Elgammal. Relationship proposal networks[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:5678–5686.
- [51] Danfei Xu, Yuke Zhu, Christopher B Choy, Li Fei-Fei. Scene graph generation by iterative message passing[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:5410–5419.
- [52] Bo Dai, Yuqi Zhang, Dahua Lin. Detecting visual relationships with deep relational networks[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:3076–3086.
- [53] Yikang Li, Wanli Ouyang, Bolei Zhou, Kun Wang, Xiaogang Wang. Scene graph generation from objects, phrases and region captions[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:1261–1270.
- [54] Yikang Li, Wanli Ouyang, Bolei Zhou, Jianping Shi, Chao Zhang, Xiaogang Wang. Factorizable net: an efficient subgraph-based framework for scene graph generation[C]. Proc. ECCV. Springer, 2018:335–351.
- [55] Guojun Yin, Lu Sheng, Bin Liu, Nenghai Yu, Xiaogang Wang, Jing Shao, Chen Change Loy. Zoom-net: Mining deep feature interactions for visual relationship recognition[C]. Proc. ECCV. Springer, 2018:322–338.
- [56] Seong Jae Hwang, Sathya N Ravi, Zirui Tao, Hyunwoo J Kim, Maxwell D Collins, Vikas Singh. Tensorize, factorize and regularize: Robust visual relationship learning[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2018:1014–1023.
- [57] Jianwei Yang, Jiasen Lu, Stefan Lee, Dhruv Batra, Devi Parikh. Graph r-cnn for scene graph generation[C]. Proc. ECCV. Springer, 2018:670–685.

- [58] Kaihua Tang, Hanwang Zhang, Baoyuan Wu, Wenhan Luo, Wei Liu. Learning to compose dynamic tree structures for visual contexts[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2019:6619–6628.
- [59] Jiuxiang Gu, Handong Zhao, Zhe Lin, Sheng Li, Jianfei Cai, Mingyang Ling. Scene graph generation with external knowledge and image reconstruction[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2019:1969–1978.
- [60] Mengshi Qi, Weijian Li, Zhengyuan Yang, Yunhong Wang, Jiebo Luo. Attentive relational networks for mapping images to scene graphs[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2019:3957–3966.
- [61] Wenbin Wang, Ruiping Wang, Shiguang Shan, Xilin Chen. Exploring context and visual pattern of relationship for scene graph generation[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2019:8188–8197.
- [62] Marc'Aurelio Ranzato, Sumit Chopra, Michael Auli, Wojciech Zaremba. Sequence level training with recurrent neural networks[C]. Proc. ICLR. 2016.
- [63] Zhou Ren, Xiaoyu Wang, Ning Zhang, Xutao Lv, Li-Jia Li. Deep reinforcement learning-based image captioning with embedding reward[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:290–298.
- [64] Siqi Liu, Zhenhai Zhu, Ning Ye, Sergio Guadarrama, Kevin Murphy. Improved image captioning via policy gradient optimization of spider[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:873–881.
- [65] Steven J Rennie, Etienne Marcheret, Youssef Mroueh, Jerret Ross, Vaibhava Goel. Self-critical sequence training for image captioning[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:7008–7024.
- [66] Li Zhang, Flood Sung, Feng Liu, Tao Xiang, Shaogang Gong, Yongxin Yang, Timothy M Hospedales. Actor-critic sequence training for image captioning[C]. Proc. NeurIPS Workshop. 2017.
- [67] Daqing Liu, Zheng-Jun Zha, Hanwang Zhang, Yongdong Zhang, Feng Wu. Context-aware visual policy network for sequence-level image captioning[C]. Proc. ACM Multimedia. 2018:1416–1424.
- [68] Ronghang Hu, Jacob Andreas, Marcus Rohrbach, Trevor Darrell, Kate Saenko. Learning to reason: End-to-end module networks for visual question answering[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:804–813.
- [69] Justin Johnson, Bharath Hariharan, Laurens van der Maaten, Judy Hoffman, Li Fei-Fei, C Lawrence Zitnick, Ross B Girshick. Inferring and executing programs for visual reasoning [C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:2989–2998.
- [70] Kan Chen, Rama Kovvuri, Ram Nevatia. Query-guided regression network with context policy for phrase grounding[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:824–832.
- [71] Licheng Yu, Hao Tan, Mohit Bansal, Tamara L Berg. A joint speaker-listener-reinforcer model for referring expressions[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:7282–7290.
- [72] Abhishek Das, Satwik Kottur, José MF Moura, Stefan Lee, Dhruv Batra. Learning cooperative

- visual dialog agents with deep reinforcement learning[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:2951–2960.
- [73] Juan C Caicedo, Svetlana Lazebnik. Active object localization with deep reinforcement learning[C]. Proc. IEEE ICCV. 2015:2488–2496.
- [74] Stefan Mathe, Aleksis Pirinen, Cristian Sminchisescu. Reinforcement learning for visual object detection[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2016:2894–2902.
- [75] Zequn Jie, Xiaodan Liang, Jiashi Feng, Xiaojie Jin, Wen Lu, Shuicheng Yan. Tree-structured reinforcement learning for sequential object localization[C]. Proc. NeurIPS. 2016:127–135.
- [76] Xiaodan Liang, Lisa Lee, Eric P Xing. Deep variation-structured reinforcement learning for visual relationship and attribute detection[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:848–857.
- [77] Jakob Foerster, Ioannis Alexandros Assael, Nando de Freitas, Shimon Whiteson. Learning to communicate with deep multi-agent reinforcement learning[C]. Proc. NeurIPS. 2016:2137–2145.
- [78] Shayegan Omidshafiei, Jason Pazis, Christopher Amato, Jonathan P How, John Vian. Deep decentralized multi-task multi-agent reinforcement learning under partial observability[C]. Proc. ICML. 2017:2681–2690.
- [79] Andrej Karpathy, Li Fei-Fei. Deep visual-semantic alignments for generating image descriptions[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2015:3128–3137.
- [80] Jeffrey Donahue, Lisa Anne Hendricks, Sergio Guadarrama, Marcus Rohrbach, Subhashini Venugopalan, Kate Saenko, Trevor Darrell. Long-term recurrent convolutional networks for visual recognition and description[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2015:2625–2634.
- [81] Subhashini Venugopalan, Marcus Rohrbach, Jeffrey Donahue, Raymond Mooney, Trevor Darrell, Kate Saenko. Sequence to sequence-video to text[C]. Proc. IEEE ICCV. 2015:4534–4542.
- [82] Subhashini Venugopalan, Huijuan Xu, Jeff Donahue, Marcus Rohrbach, Raymond Mooney, Kate Saenko. Translating videos to natural language using deep recurrent neural networks[C]. NAACL-HLT. 2015.
- [83] Mateusz Malinowski, Marcus Rohrbach, Mario Fritz. Ask your neurons: A neural-based approach to answering questions about images[C]. Proc. IEEE ICCV. 2015:1–9.
- [84] Haoyuan Gao, Junhua Mao, Jie Zhou, Zhiheng Huang, Lei Wang, Wei Xu. Are you talking to a machine? dataset and methods for multilingual image question[C]. Proc. NeurIPS. 2015:2296–2304.
- [85] Mengye Ren, Ryan Kiros, Richard Zemel. Exploring models and data for image question answering[C]. Proc. NeurIPS. 2015:2953–2961.
- [86] Yongqin Xian, Bernt Schiele, Zeynep Akata. Zero-shot learning-the good, the bad and the ugly[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:4582–4591.

- [87] Hanwang Zhang, Zheng-Jun Zha, Yang Yang, Shuicheng Yan, Yue Gao, Tat-Seng Chua. Attribute-augmented semantic hierarchy: towards bridging semantic gap and intention gap in image retrieval[C]. Proc. ACM Multimedia. 2013:33–42.
- [88] Li-Jia Li, Hao Su, Li Fei-Fei, Eric P Xing. Object bank: A high-level image representation for scene classification & semantic feature sparsification[C]. Proc. NeurIPS:1378–1386.
- [89] Lorenzo Torresani, Martin Szummer, Andrew Fitzgibbon. Efficient object category recognition using clasemes[C]. Proc. ECCV. Springer, 2010:776–789.
- [90] Jason Weston, Samy Bengio, Nicolas Usunier. Large scale image annotation: learning to rank with joint word-image embeddings[J]. Machine Learning, 2010.
- [91] Angeliki Lazaridou, Georgiana Dinu, Marco Baroni. Hubness and pollution: Delving into cross-space mapping for zero-shot learning[C]. Proc. ACL. 2015:270–280.
- [92] Zili Yi, Hao Zhang, Ping Tan, Minglun Gong. Dualgan: Unsupervised dual learning for image-to-image translation[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:2849–2857.
- [93] Jun-Yan Zhu, Taesung Park, Phillip Isola, Alexei A Efros. Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:2223–2232.
- [94] Di He, Yingce Xia, Tao Qin, Liwei Wang, Nenghai Yu, Tie-Yan Liu, Wei-Ying Ma. Dual learning for machine translation[C]. Proc. NeurIPS. 2016:820–828.
- [95] Catherine Wah, Steve Branson, Peter Welinder, Pietro Perona, Serge Belongie. The caltech-ucsd birds-200-2011 dataset[J]. 2011.
- [96] Genevieve Patterson, James Hays. Sun attribute database: Discovering, annotating, and recognizing scene attributes[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2012:2751–2758.
- [97] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun. Deep residual learning for image recognition[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2016:770–778.
- [98] Karen Simonyan, Andrew Zisserman. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[C]. Proc. ICLR. 2015.
- [99] Justin Johnson, Alexandre Alahi, Li Fei-Fei. Perceptual losses for real-time style transfer and super-resolution[C]. Proc. ECCV. Springer, 2016:694–711.
- [100] Alexey Dosovitskiy, Thomas Brox. Generating images with perceptual similarity metrics based on deep networks[C]. Proc. NeurIPS. 2016:658–666.
- [101] Christian Ledig, Lucas Theis, Ferenc Huszár, Jose Caballero, Andrew Cunningham, Alejandro Acosta, Andrew Aitken, Alykhan Tejani, Johannes Totz, Zehan Wang, et al. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:4681–4690.
- [102] Martin Arjovsky, Soumith Chintala, Léon Bottou. Wasserstein gan[C]. arXiv. 2017.

- [103] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun. Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on imagenet classification[C]. Proc. IEEE ICCV. 2015:1026–1034.
- [104] Ziming Zhang, Venkatesh Saligrama. Zero-shot learning via semantic similarity embedding[C]. Proc. IEEE ICCV. 2015:4166–4174.
- [105] Soravit Changpinyo, Wei-Lun Chao, Boqing Gong, Fei Sha. Synthesized classifiers for zero-shot learning[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2016:5327–5336.
- [106] Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, Scott Reed, Cheng-Yang Fu, Alexander C Berg. Ssd: Single shot multibox detector[C]. Proc. ECCV. Springer, 2016:21–37.
- [107] Jonathan Long, Evan Shelhamer, Trevor Darrell. Fully convolutional networks for semantic segmentation[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2015:3431–3440.
- [108] Ting Yao, Yingwei Pan, Yehao Li, Tao Mei. Exploring visual relationship for image captioning[C]. Proc. ECCV. Springer, 2018:684–699.
- [109] Xu Yang, Kaihua Tang, Hanwang Zhang, Jianfei Cai. Auto-encoding scene graphs for image captioning[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2019:10685–10694.
- [110] Dong-Jin Kim, Jinsoo Choi, Tae-Hyun Oh, In So Kweon. Dense relational captioning: Triple-stream networks for relationship-based captioning[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2019:6271–6280.
- [111] Will Norcliffe-Brown, Stathis Vafeias, Sarah Parisot. Learning conditioned graph structures for interpretable visual question answering[C]. Proc. NeurIPS. 2018:8334–8343.
- [112] Drew A Hudson, Christopher D Manning. Gqa: A new dataset for real-world visual reasoning and compositional question answering[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2019:6700–6709.
- [113] Jiaxin Shi, Hanwang Zhang, Juanzi Li. Explainable and explicit visual reasoning over scene graphs[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2019:8376–8384.
- [114] Monica Haurilet, Alina Roitberg, Rainer Stiefelhagen. It’s not about the journey; it’s about the destination: Following soft paths under question-guidance for visual reasoning[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2019:1930–1939.
- [115] Proc. ECCV. Shuffle-then-assemble: Learning object-agnostic visual relationship features[C]. Springer, 2018:36–52.
- [116] Santosh K Divvala, Derek Hoiem, James H Hays, Alexei A Efros, Martial Hebert. An empirical study of context in object detection[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. IEEE, 2009:1271–1278.
- [117] Yikang Li, Wanli Ouyang, Xiaogang Wang, Xiao’ou Tang. Vip-cnn: Visual phrase guided convolutional neural network[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:1347–1356.
- [118] Rowan Zellers, Mark Yatskar, Sam Thomson, Yejin Choi. Neural motifs: Scene graph parsing with global context[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2018:5831–5840.

- [119] Xufeng Qian, Yueling Zhuang, Yimeng Li, Shaoning Xiao, Shiliang Pu, Jun Xiao. Video relation detection with spatio-temporal graph[C]. Proc. ACM Multimedia. 2019:84–93.
- [120] Shuai Zheng, Sadeep Jayasumana, Bernardino Romera-Paredes, Vibhav Vineet, Zhizhong Su, Dalong Du, Chang Huang, Philip HS Torr. Conditional random fields as recurrent neural networks[C]. Proc. IEEE ICCV. 2015:1529–1537.
- [121] Philipp Krähenbühl, Vladlen Koltun. Efficient inference in fully connected crfs with gaussian edge potentials[C]. Proc. NeurIPS. 2011:109–117.
- [122] Peter Anderson, Basura Fernando, Mark Johnson, Stephen Gould. Spice: Semantic propositional image caption evaluation[C]. Proc. ECCV. Springer, 2016:382–398.
- [123] Richard S Sutton, David A McAllester, Satinder P Singh, Yishay Mansour. Policy gradient methods for reinforcement learning with function approximation[C]. Proc. NeurIPS. 2000:1057–1063.
- [124] Ardi Tampuu, Tambet Matiisen, Dorian Kodelja, Ilya Kuzovkin, Kristjan Korjus, Juhan Aru, Jaan Aru, Raul Vicente. Multiagent cooperation and competition with deep reinforcement learning[J]. PloS one, 2017, 12(4).
- [125] Ryan Lowe, Yi Wu, Aviv Tamar, Jean Harb, OpenAI Pieter Abbeel, Igor Mordatch. Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments[C]. Proc. NeurIPS. 2017:6379–6390.
- [126] Jakob N Foerster, Gregory Farquhar, Triantafyllos Afouras, Nantas Nardelli, Shimon Whiteson. Counterfactual multi-agent policy gradients[C]. Proc. AAAI. 2018.
- [127] Long Chen, Hanwang Zhang, Jun Xiao, Liqiang Nie, Jian Shao, Wei Liu, Tat-Seng Chua. Scancnn: Spatial and channel-wise attention in convolutional networks for image captioning[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017:5659–5667.
- [128] Yan Zhang, Jonathon Hare, Adam Prügel-Bennett. Learning to count objects in natural images for visual question answering[C]. Proc. ICLR. 2018.
- [129] Matthew Hausknecht, Peter Stone. Deep recurrent q-learning for partially observable mdps[C]. Proc. AAAI. 2015.
- [130] Dzmitry Bahdanau, Philemon Brakel, Kelvin Xu, Anirudh Goyal, Ryan Lowe, Joelle Pineau, Aaron Courville, Yoshua Bengio. An actor-critic algorithm for sequence prediction[C]. Proc. ICLR. 2017.
- [131] Vijay R Konda, John N Tsitsiklis. Actor-critic algorithms[C]. Proc. NeurIPS. 2000:1008–1014.
- [132] Yongming Rao, Dahua Lin, Jiwen Lu, Jie Zhou. Learning globally optimized object detector via policy gradient[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2018:6190–6198.
- [133] Richard S Sutton, Andrew G Barto. Reinforcement learning: An introduction[M]. MIT press,

- 2018.
- [134] Volodymyr Mnih, Adria Puigdomenech Badia, Mehdi Mirza, Alex Graves, Timothy Lillicrap, Tim Harley, David Silver, Koray Kavukcuoglu. Asynchronous methods for deep reinforcement learning[C]. Proc. ICML. 2016:1928–1937.
- [135] Kelvin Xu, Jimmy Ba, Ryan Kiros, Kyunghyun Cho, Aaron Courville, Ruslan Salakhudinov, Rich Zemel, Yoshua Bengio. Show, attend and tell: Neural image caption generation with visual attention[C]. Proc. ICML. 2015:2048–2057.
- [136] Alejandro Newell, Jia Deng. Pixels to graphs by associative embedding[C]. Proc. NeurIPS. 2017:2171–2180.
- [137] Roei Herzig, Moshiko Raboh, Gal Chechik, Jonathan Berant, Amir Globerson. Mapping images to scene graphs with permutation-invariant structured prediction[C]. Proc. NeurIPS. 2018:7211–7221.
- [138] Joseph Redmon, Ali Farhadi. Yolo9000: better, faster, stronger[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2017.
- [139] Ji Zhang, Kevin J Shih, Ahmed Elgammal, Andrew Tao, Bryan Catanzaro. Graphical contrastive losses for scene graph parsing[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2019:11535–11543.
- [140] Lex Weaver, Nigel Tao. The optimal reward baseline for gradient-based reinforcement learning[C]. arXiv. 2013.
- [141] Tianshui Chen, Weihao Yu, Riquan Chen, Liang Lin. Knowledge-embedded routing network for scene graph generation[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2019:6163–6171.
- [142] Li Yao, Atousa Torabi, Kyunghyun Cho, Nicolas Ballas, Christopher Pal, Hugo Larochelle, Aaron Courville. Describing videos by exploiting temporal structure[C]. Proc. IEEE ICCV. 2015:4507–4515.
- [143] Kan Chen, Jiang Wang, Liang-Chieh Chen, Haoyuan Gao, Wei Xu, Ram Nevatia. Abc-cnn: An attention based convolutional neural network for visual question answering[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2016.
- [144] Zichao Yang, Xiaodong He, Jianfeng Gao, Li Deng, Alex Smola. Stacked attention networks for image question answering[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2016:21–29.
- [145] Huijuan Xu, Kate Saenko. Ask, attend and answer: Exploring question-guided spatial attention for visual question answering[C]. Proc. ECCV. Springer, 2016:451–466.
- [146] Maurizio Corbetta, Gordon L Shulman. Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain[J]. Nature reviews neuroscience, 2002, 3(3):201–215.
- [147] Volodymyr Mnih, Nicolas Heess, Alex Graves, et al. Recurrent models of visual attention[C]. Proc. NeurIPS. 2014:2204–2212.

- [148] Marijn F Stollenga, Jonathan Masci, Faustino Gomez, Jürgen Schmidhuber. Deep networks with internal selective attention through feedback connections[C]. Proc. NeurIPS. 2014:3545–3553.
- [149] Matthew D Zeiler, Rob Fergus. Visualizing and understanding convolutional networks[C]. Proc. ECCV. Springer, 2014:818–833.
- [150] Micah Hodosh, Peter Young, Julia Hockenmaier. Framing image description as a ranking task: Data, models and evaluation metrics[J]. J. Arti. Intel. Res., 2013, 47:853–899.
- [151] Peter Young, Alice Lai, Micah Hodosh, Julia Hockenmaier. From image descriptions to visual denotations: New similarity metrics for semantic inference over event descriptions[J]. Trans. Assoc. Comp. Lingui., 2014, 2:67–78.
- [152] Tsung-Yi Lin, Michael Maire, Serge Belongie, James Hays, Pietro Perona, Deva Ramanan, Piotr Dollár, C Lawrence Zitnick. Microsoft coco: Common objects in context[C]. Proc. ECCV. Springer, 2014:740–755.
- [153] Kishore Papineni, Salim Roukos, Todd Ward, Wei-Jing Zhu. Bleu: a method for automatic evaluation of machine translation[C]. Proc. ACL. Association for Computational Linguistics, 2002:311–318.
- [154] Satanjeev Banerjee, Alon Lavie. Meteor: An automatic metric for mt evaluation with improved correlation with human judgments[C]. Proc. ACL. 2005:65–72.
- [155] Ramakrishna Vedantam, C Lawrence Zitnick, Devi Parikh. Cider: Consensus-based image description evaluation[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2015:4566–4575.
- [156] Chin-Yew Lin, Eduard Hovy. Manual and automatic evaluation of summaries[C]. Proc. ACL. Association for Computational Linguistics, 2002:45–51.
- [157] Matthew D Zeiler. Adadelta: an adaptive learning rate method[C]. arXiv. 2012.
- [158] Junhua Mao, Wei Xu, Yi Yang, Jiang Wang, Zhiheng Huang, Alan Yuille. Deep captioning with multimodal recurrent neural networks (m-rnn)[C]. Proc. ICLR. 2015.
- [159] Xu Jia, Efstratios Gavves, Basura Fernando, Tinne Tuytelaars. Guiding the long-short term memory model for image caption generation[C]. Proc. IEEE ICCV. 2015:2407–2415.
- [160] Quanzeng You, Hailin Jin, Zhaowen Wang, Chen Fang, Jiebo Luo. Image captioning with semantic attention[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2016:4651–4659.
- [161] Michaela Regneri, Marcus Rohrbach, Dominikus Wetzel, Stefan Thater, Bernt Schiele, Manfred Pinkal. Grounding action descriptions in videos[J]. Trans. Assoc. Comp. Lingui., 2013, 1:25–36.
- [162] Ranjay Krishna, Kenji Hata, Frederic Ren, Li Fei-Fei, Juan Carlos Niebles. Dense-captioning events in videos[C]. Proc. IEEE ICCV. 2017:706–715.
- [163] Yitian Yuan, Tao Mei, Wenwu Zhu. To find where you talk: Temporal sentence localization in video with attention based location regression[C]. Proc. AAAI. volume 33. 2019:9159–9166.

- [164] Yang Feng, Lin Ma, Wei Liu, Tong Zhang, Jiebo Luo. Video re-localization[C]. Proc. ECCV. Springer, 2018:51–66.
- [165] Fabian Caba Heilbron, Victor Escorcia, Bernard Ghanem, Juan Carlos Niebles. Activitynet: A large-scale video benchmark for human activity understanding[C]. Proc. IEEE Conf. CVPR. 2015:961–970.

作者简历及在学期间所取得的科研成果

个人简历：

姓名：赵黎明

出生年月：1991 年 7 月

民族：汉族

政治面貌：中共党员

邮箱：zhaoliming@zju.edu.cn

个人主页：www.zhaoliming.net

教育经历：

- 2013.09 –2018.06: 浙江大学 计算机科学与技术学院 直博
- 2009.09 –2013.06: 山东大学 软件学院 本科

发表论文：

1. DeepSaliency: Multi-Task Deep Neural Network Model for Salient Object Detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing (TIP), 2016. (学生一作，通讯作者，CCF A 类)
2. Metric Learning Driven Multi-Task Structured Output Optimization for Robust Keypoint Tracking[C]. In AAAI, 2015. (第一作者，CCF A 类)
3. Multi-Task Structure-aware Context Modeling for Robust Keypoint-based Object Tracking[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI), 2018. (学生一作，通讯作者，CCF A 类)
4. Deep Convolutional Neural Networks with Merge-and-Run Mappings[C]. In IJCAI, 2018. (第一作者，CCF A 类)
5. Deeply-Learned Part-Aligned Representations for Person Re-Identification[C]. In ICCV, 2017. (第一作者，CCF A 类)

6. Deep Learning Driven Blockwise Moving Object Detection with Binary Scene Modeling[J]. Neurocomputing, 2015. (学生四作, SCI 期刊)
7. Semantics-aware Deep Correspondence Structure Learning for Robust Person Re-identification[C]. In IJCAI, 2016. (学生二作, CCF A 类)
8. Geometry-Aware Scene Text Detection with Instance Transformation Network[C]. In CVPR, 2018. (第二作者, CCF A 类)

参与项目:

1. 基于自适应特征学习和表观建模的目标跟踪算法研究, 国家自然科学基金面上项目, 2015/01 - 2018/12, 61472353
2. 面向公共安全的跨媒体计算理论与方法, 国家重点基础研究发展计划(973 计划), 2012/01 - 2016/12, 2012CB316400
3. 城市智慧安监的相关基础理论和视觉分析技术, 国家自然科学基金-浙江两化融合联合基金, 2016/01 - 2019/12, U1509206
4. 中国工程科技知识中心关键技术研发, 中国工程院工程科技知识中心建设项目, 2013/01 - 2017/12, 124001-D01703
5. 环境/场景适应的跨媒体综合推理, 国家自然科学基金人工智能基础研究应急管理项目, 2018/01 - 2020/12, 61751209
6. 三元空间群智计算, 国家重点基础研究发展计划(973 计划), 2014/11 - 2019/11, 2015CB352302

致谢

XX

陈隆

2020年5月于求是园