

用于大规模图像识别的极深卷积网络

Karen Simonyan* 与 Andrew Zisserman+ 牛津大学工程科学系视觉几何组 {karen, az}@robots.ox.ac.uk

摘要

在本工作中，我们研究了卷积网络深度在大规模图像识别场景下对其准确率的影响。我们的主要贡献是：通过采用极小（3×3）卷积核的架构，对增加网络深度进行了全面评估，结果表明将深度提升至16–19个权重层时，可以在现有先进配置的基础上实现显著改进。这些发现为我们参与2014年ImageNet挑战赛奠定了基础，我们的团队分别在定位和分类任务中获得了第一名和第二名的成绩。我们还证明了我们的表征能够很好地泛化到其他数据集，并在这些数据集上取得了领先水平的结果。我们已公开两个性能最佳的卷积网络模型，以促进深度视觉表征在计算机视觉领域的进一步研究。

1 引言

卷积网络（ConvNets）近年来在大规模图像与视频识别领域取得了巨大成功（Krizhevsky et al., 2012; Zeiler & Fergus, 2013; Sermanet et al., 2014; Simonyan & Zisserman, 2014），这得益于大型公共图像库（如ImageNet（Deng et al., 2009））以及高性能计算系统（如GPU或大规模分布式集群（Dean et al., 2012））的发展。其中，ImageNet大规模视觉识别挑战赛（ILSVRC）（Russakovsky et al., 2014）在推动深度视觉识别架构进步方面发挥了关键作用，该赛事已成为多代大规模图像分类系统的测试平台——从高维浅层特征编码（Perronnin et al., 2010）（ILSVRC-2011冠军）到深度卷积网络（Krizhevsky et al., 2012）（ILSVRC-2012冠军）均在此得到验证。

随着卷积神经网络在计算机视觉领域日益普及，许多研究尝试改进Krizhevsky等人（2012）提出的原始架构，以期获得更高的准确率。例如，在ILSVRC-2013中表现最佳的提交方案（Zeiler & Fergus, 2013; Sermanet et al., 2014）采用了更小的感受野窗口尺寸和第一卷积层更小的步长。另一类改进方法涉及在整个图像和多种尺度上对网络进行密集的训练与测试（Sermanet et al., 2014; Howard, 2014）。本文中，我们探讨卷积神经网络架构设计的另一个重要维度——网络深度。为此，我们固定架构的其他参数，通过增加更多卷积层来稳步加深网络深度，这一设计得以实现是因为在所有层中均使用了极小（3×3）的卷积滤波器。

因此，我们提出了显著更准确的卷积网络架构，这些架构不仅在ILSVRC分类和定位任务上达到了最先进的准确率，而且适用于其他图像识别数据集，即使作为相对简单流程的一部分（例如，未经微调的线性SVM分类深度特征），也能取得优异的性能。我们已经发布了两个性能最佳的模型¹，以促进进一步的研究。

本文的其余部分组织如下。在第2节中，我们描述了ConvNet的配置。随后在第3节中介绍了图像分类训练与评估的细节，

*current affiliation: Google DeepMind +current affiliation: University of Oxford and Google DeepMind

¹http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/research/very_deep/

配置在ILSVRC分类任务上的比较见第4节。第5节对本文进行总结。为求完整，我们还在附录A中描述并评估了我们的ILSVRC-2014目标定位系统，并在附录B中讨论了极深度特征在其他数据集上的泛化能力。最后，附录C列出了论文的主要修订记录。

2 种卷积网络配置

为了在公平环境下衡量增加ConvNet深度带来的改进，我们所有的ConvNet层配置均遵循由Ciresan等人（2011）和Krizhevsky等人（2012）启发的相同设计原则。本节中，我们首先描述ConvNet配置的通用布局（第2.1节），随后详述评估中使用的具体配置（第2.2节）。最后在第2.3节中讨论我们的设计选择，并与现有技术进行比较。

2.1 架构

在训练过程中，我们ConvNets的输入是固定尺寸 224×224 的RGB图像。我们唯一的预处理操作是从每个像素中减去在训练集上计算得到的RGB均值。图像会经过一系列卷积层，其中我们使用感受野极小的滤波器： 3×3 （这是能够捕捉左/右、上/下、中心概念的最小尺寸）。在某个配置中，我们还使用了 1×1 卷积滤波器，这可以视为对输入通道的线性变换（随后进行非线性处理）。卷积步长固定为1像素；卷积层输入的空间填充设置使得卷积后空间分辨率得以保持，例如对于 3×3 卷积层，填充为1像素。空间池化由五个最大池化层执行，这些池化层位于部分卷积层之后（并非所有卷积层后都跟随最大池化）。最大池化在 2×2 像素窗口上以步长2进行。

一系列卷积层（在不同架构中深度不同）之后是三个全连接层：前两层各有4096个通道，第三层执行1000类ILSVRC分类任务，因此包含1000个通道（每个类别对应一个通道）。最后一层是soft-max层。所有网络中的全连接层配置均保持一致。

所有隐藏层均配备了修正线性单元（ReLU, Krizhevsky等人，2012）非线性激活函数。我们注意到，除一个网络外，我们的所有网络均未包含局部响应归一化（LRN, Krizhevsky等人，2012）：如第4节所示，此类归一化并未提升ILSVRC数据集上的性能，反而增加了内存消耗与计算时间。在适用的情况下，LRN层的参数均遵循Krizhevsky等人（2012）的设置。

2.2 配置

本文评估的ConvNet配置如表1所示，每列对应一种配置。下文将以名称（A-E）指代这些网络。所有配置均遵循第2.1节提出的通用设计，仅深度存在差异：从网络A的11个权重层（8个卷积层和3个全连接层）到网络E的19个权重层（16个卷积层和3个全连接层）。卷积层的宽度（通道数）设置较小，第一层为64通道，随后每个最大池化层后通道数翻倍，直至达到512通道。

在表2中，我们报告了每种配置的参数数量。尽管网络深度很大，但我们网络中的权重数量并未超过那些卷积层宽度更大、感受野更广的较浅网络（(Sermanet et al., 2014) 中的网络拥有1.44亿权重）。

2.3 讨论

我们的卷积网络配置与ILSVRC-2012（Krizhevsky等人，2012）和ILSVRC-2013竞赛（Zeiler & Fergus, 2013; Sermanet等人，2014）中表现最佳的参赛模型所使用的配置有很大不同。我们没有在第一个卷积层使用相对较大的感受野（例如（Krizhevsky等人，2012）中使用的 11×11 、步幅4，或（Zeiler & Fergus, 2013; Sermanet等人，2014）中使用的 7×7 、步幅2），而是在整个网络中始终使用非常小的 3×3 感受野，并以每个像素（步幅1）对输入进行卷积。可以明显看出，两个 3×3 卷积层（中间没有空间池化）堆叠后的有效感受野为 5×5 ；三个

表1: ConvNet配置（按列显示）。配置的深度从左（A）到右（E）逐渐增加，因为添加了更多层（添加的层以粗体显示）。卷积层参数表示为“conv(感受野大小)-<通道数>”。为简洁起见，未显示ReLU激活函数。

ConvNet Configuration					
A	A-LRN	B	C	D	E
11 weight layers	11 weight layers	13 weight layers	16 weight layers	16 weight layers	19 weight layers
input (224×224 RGB image)					
conv3-64	conv3-64 LRN	conv3-64 conv3-64	conv3-64 conv3-64	conv3-64 conv3-64	conv3-64 conv3-64
maxpool					
conv3-128	conv3-128	conv3-128 conv3-128	conv3-128 conv3-128	conv3-128 conv3-128	conv3-128 conv3-128
maxpool					
conv3-256	conv3-256	conv3-256	conv3-256	conv3-256	conv3-256
conv3-256	conv3-256	conv3-256	conv3-256 conv1-256	conv3-256 conv3-256	conv3-256 conv3-256
maxpool					
conv3-512	conv3-512	conv3-512	conv3-512	conv3-512	conv3-512
conv3-512	conv3-512	conv3-512	conv3-512 conv1-512	conv3-512 conv3-512	conv3-512 conv3-512
maxpool					
conv3-512	conv3-512	conv3-512	conv3-512	conv3-512	conv3-512
conv3-512	conv3-512	conv3-512	conv3-512 conv1-512	conv3-512 conv3-512	conv3-512 conv3-512
maxpool					
FC-4096					
FC-4096					
FC-1000					
soft-max					

表2: 参数数量（以百万计）。

Network	A,A-LRN	B	C	D	E
Number of parameters	133	133	134	138	144

这样的层具有 7×7 的有效感受野。那么，我们通过使用例如三个 3×3 卷积层的堆叠，而不是单个 7×7 层，获得了什么？首先，我们引入了三个非线性整流层，而非仅一个，这使得决策函数更具判别力。其次，我们减少了参数数量：假设三层 3×3 卷积堆叠的输入和输出都有 C 个通道，则该堆叠由 $3(3^2 C^2) = 27C^2$ 个权重参数化；同时，单个 7×7 卷积层将需要 $7^2 C^2 = 49C^2$ 个参数，即多出81%。这可以视为对 7×7 卷积滤波器施加了正则化，强制其通过 3×3 滤波器进行分解（并在其间注入非线性）。

引入 1×1 卷积层（配置C，表1）是在不影响卷积层感受野的前提下，增强决策函数非线性表达能力的一种方法。尽管在我们的案例中， 1×1 卷积本质上是在相同维度空间（输入与输出通道数相同）上的线性投影，但整流函数仍为其引入了额外的非线性特性。值得注意的是， 1×1 卷积层近期已被应用于Lin等人（2014）提出的“Network in Network”架构中。

小尺寸卷积滤波器先前已被Ciresan等人（2011年）使用，但他们的网络深度明显低于我们的网络，且未在大型ILSVRC数据集上进行评估。Goodfellow等人（2014年）将深度卷积网络（11个权重层）应用于街景门牌号识别任务，并证明增加深度能提升性能。GoogLeNet（Szegedy等人，2014年）是ILSVRC-2014分类任务中表现最佳的模型，其开发工作独立于我们的研究，但相似之处在于它同样基于极深的卷积网络。

(22个权重层)和小卷积核(除了 3×3 , 他们还使用了 1×1 和 5×5 卷积)。然而, 他们的网络拓扑结构比我们的更复杂, 并且特征图的空间分辨率在初始层被更激进地降低以减少计算量。如第4.5节所示, 在单网络分类准确率方面, 我们的模型优于Szegedy等人(2014)的模型。

3 分类框架

在上一节中, 我们详细介绍了网络配置的具体细节。本节将阐述分类卷积网络的训练与评估细节。

3.1 训练

卷积网络的训练过程大体上遵循Krizhevsky等人(2012)的方法(除了从多尺度训练图像中采样输入裁剪区域, 这一点将在后文说明)。具体而言, 训练通过小批量梯度下降(基于反向传播(LeCun等人, 1989))结合动量法来优化多项逻辑回归目标。批量大小设为256, 动量设为0.9。训练通过权重衰减(L_2 惩罚乘数设为 $5\cdot 10^{-4}$)和前两个全连接层的Dropout正则化(Dropout比例设为0.5)进行正则化。学习率初始设为 10^{-2} , 当验证集准确率停止提升时, 学习率以10倍因子降低。学习率总共降低了3次, 训练在37万次迭代(74个周期)后停止。我们推测, 尽管我们的网络参数数量更多、深度比(Krizhevsky等人, 2012)的网络更大, 但由于以下原因, 网络收敛所需的周期更少: (a) 更大深度和更小卷积滤波器尺寸带来的隐式正则化; (b) 特定层的预初始化。

网络权重的初始化至关重要, 因为糟糕的初始化会因深度网络中梯度的不稳定性而阻碍学习。为解决这一问题, 我们首先训练了配置A(表1), 该网络结构较浅, 足以通过随机初始化进行训练。随后, 在训练更深层架构时, 我们用网络A的层参数初始化了前四个卷积层和最后三个全连接层(中间层仍采用随机初始化)。对于预初始化的层, 我们并未降低其学习率, 允许它们在训练过程中持续调整。在随机初始化(适用情况下)中, 我们从均值为零、方差为 10^{-12} 的正态分布中采样权重, 偏置项则初始化为零。值得注意的是, 在论文提交后我们发现, 采用Glorot & Bengio(2010)的随机初始化方法, 无需预训练即可完成权重初始化。

为了获得固定尺寸的 224×224 ConvNet输入图像, 这些图像是从重新缩放的训练图像中随机裁剪得到的(每次SGD迭代每张图像裁剪一次)。为了进一步扩充训练集, 裁剪后的图像还进行了随机水平翻转和随机RGB色彩偏移处理(Krizhevsky等人, 2012年)。训练图像的重新缩放方法将在下文说明。

训练图像尺寸。设 S 为各向同性重缩放后训练图像的最小边, ConvNet的输入从此图像中裁剪(我们也将 S 称为训练尺度)。虽然裁剪尺寸固定为 224×224 , 但原则上 S 可以取不小于224的任意值: 当 $S = 224$ 时, 裁剪区域将覆盖完整图像统计信息, 完全跨越训练图像的最小边; 当 $S \gg 224$ 时, 裁剪区域将对应图像的一小部分, 包含小物体或物体局部。

我们考虑两种设定训练尺度 S 的方法。第一种是固定 S , 这对应于单尺度训练(需注意采样裁剪区域内的图像内容仍可体现多尺度图像统计特性)。在实验中, 我们评估了两种固定尺度下训练的模型: $S = 256$ (该尺度在现有技术中已被广泛采用(Krizhevsky等人, 2012; Zeiler & Fergus, 2013; Sermanet等人, 2014))与 $S = 384$ 。对于给定的卷积网络配置, 我们首先使用 $S = 256$ 训练网络。为加速 $S = 384$ 网络的训练, 我们采用经 $S = 256$ 预训练的权重进行初始化, 并设置了较小的初始学习率 10^{-3} 。

设置 S 的第二种方法是多尺度训练, 其中每个训练图像通过从特定范围 $[S_{min}, S_{max}]$ 中随机采样 S 进行单独重新缩放(我们使用了 $S_{min} = 256$ 和 $S_{max} = 512$)。由于图像中的物体可能具有不同的大小, 在训练过程中考虑这一点是有益的。这也可以被视为通过尺度抖动进行训练集增强, 其中单个

模型经过训练，能够识别各种尺度下的物体。出于速度考虑，我们通过微调单尺度模型的所有层来训练多尺度模型，该单尺度模型采用相同配置，并已使用固定的 $S = 384$ 进行预训练。

3.2 测试

在测试阶段，给定一个训练好的卷积网络和一张输入图像，其分类方式如下。首先，将图像各向同性地缩放到预定义的最小图像边长，记为 Q （我们亦称之为测试尺度）。需要说明的是， Q 不一定等于训练尺度 S （——正如第4节将展示的，对每个 S 使用多个 Q 值能提升性能）。随后，以类似于（Sermanet等人，2014）的方式在缩放后的测试图像上密集应用网络。具体而言，全连接层首先被转换为卷积层（第一个全连接层转为 7×7 卷积层，最后两个全连接层转为 1×1 卷积层）。将得到的全卷积网络应用于整张（未裁剪的）图像后，会生成通道数等于类别数的类别得分图，其空间分辨率取决于输入图像尺寸。最后，通过对类别得分图进行空间平均（求和池化），得到图像对应的固定维度类别得分向量。我们还通过水平翻转图像来增强测试集：将原始图像与翻转图像的softmax类别后验概率取平均，从而得到图像的最终得分。

由于全卷积网络应用于整个图像，因此在测试时无需采样多个裁剪区域（Krizhevsky等人，2012），因为为每个裁剪区域重新计算网络效率较低。同时，如Szegedy等人（2014）所做，使用大量裁剪区域可以提高准确性，因为与全卷积网络相比，它可对输入图像进行更精细的采样。此外，多裁剪评估与密集评估因卷积边界条件不同而具有互补性：将卷积神经网络应用于裁剪区域时，卷积特征图会以零填充；而在密集评估中，同一裁剪区域的填充自然来自图像的相邻部分（由于卷积和空间池化的共同作用），这显著增加了网络的整体感受野，从而捕获更多上下文信息。尽管我们认为在实践中，多裁剪带来的计算时间增加并不足以证明其可能带来的精度提升，但为便于参考，我们仍使用每个尺度50个裁剪区域（ 5×5 规则网格加2次翻转）评估网络，总计3个尺度共150个裁剪区域，这与Szegedy等人（2014）使用的4个尺度144个裁剪区域具有可比性。

3.3 实现细节

我们的实现基于公开可用的C++ Caffe工具箱（Jia, 2013）（2013年12月分支），但包含若干重大修改，使我们能够在单个系统中安装的多块GPU上进行训练和评估，并支持在多尺度下对完整尺寸（未裁剪）图像进行训练和评估（如上所述）。多GPU训练采用数据并行机制，通过将每批训练图像分割为多个GPU批次实现，各GPU并行处理这些批次。计算完GPU批次梯度后，将其平均以获得完整批次的梯度。梯度计算在GPU间同步进行，因此结果与单GPU训练完全一致。

尽管最近已经提出了更复杂的加速卷积网络训练的方法（Krizhevsky, 2014），这些方法对网络的不同层采用了模型并行和数据并行策略，但我们发现，我们概念上简单得多的方案，在现成的4-GPU系统上，相比使用单GPU，已经能带来3.75倍的加速。在配备四块NVIDIA Titan Black GPU的系统上，训练单个网络需要2到3周，具体时间取决于网络架构。

4 分类实验

数据集。在本节中，我们展示了所描述的卷积网络架构在ILSVRC-2012数据集（该数据集用于ILSVRC 2012–2014挑战赛）上取得的图像分类结果。该数据集包含1000个类别的图像，并分为三个部分：训练集（1.3M张图像）、验证集（50K张图像）和测试集（100K张图像，附带保留的类别标签）。分类性能通过两个指标进行评估：top-1和top-5错误率。前者是多类别分类错误率，即错误分类图像的比例；后者是

ILSVRC中使用的主要评估标准，计算方式为真实类别不在预测的前五个类别之内的图像比例。

在大多数实验中，我们使用验证集作为测试集。部分实验也在测试集上进行，并作为“VGG”团队参赛作品提交至ILSVRC-2014竞赛的官方服务器（Russakovsky等人，2014年）。

4.1 单尺度评估

我们首先评估单个ConvNet模型在单一尺度下的性能，使用第2.2节所述的层配置。测试图像尺寸设置如下：固定 S 时采用 $Q = S$ ，抖动 $S \in [S_{min}, S_{max}]$ 时采用 $Q = 0.5(S_{min} + S_{max})$ 。相关结果展示在表3中。

首先，我们注意到使用局部响应归一化（A-LRN网络）并未对未包含任何归一化层的模型A带来改进。因此，在更深的架构（B-E）中我们未采用归一化处理。

其次，我们观察到分类误差随着ConvNet深度的增加而减小：从A的11层到E的19层。值得注意的是，尽管深度相同，配置C（包含三个 1×1 卷积层）的表现却逊于配置D，后者在整个网络中均使用 3×3 卷积层。这表明，虽然额外的非线性确实有帮助（C优于B），但通过使用具有非平凡感受野的卷积滤波器来捕捉空间上下文同样重要（D优于C）。当深度达到19层时，我们架构的错误率趋于饱和，但对于更大的数据集，更深的模型可能仍有益处。我们还将网络B与一个浅层网络进行了比较，该浅层网络包含五个 5×5 卷积层，它是通过将B中每对 3×3 卷积层替换为单个 5×5 卷积层而得到的（如第2.3节所述，其感受野相同）。经测量，该浅层网络的top-1误差比B高出7%（基于中心裁剪测试），这证实了采用小滤波器的深层网络优于使用大滤波器的浅层网络。

最后，在训练时进行尺度抖动（ $S \in [256; 512]$ ）相比在固定最小边长的图像上训练（ $S = 256$ 或 $S = 384$ ）能带来显著更好的结果，即便在测试时仅使用单一尺度。这证实了通过尺度抖动进行训练集增强确实有助于捕捉多尺度的图像统计特征。

表3: ConvNet在单一测试尺度下的性能。

ConvNet config. (Table 1)	smallest image side		top-1 val. error (%)	top-5 val. error (%)
	train (S)	test (Q)		
A	256	256	29.6	10.4
A-LRN	256	256	29.7	10.5
B	256	256	28.7	9.9
C	256	256	28.1	9.4
	384	384	28.1	9.3
	[256;512]	384	27.3	8.8
D	256	256	27.0	8.8
	384	384	26.8	8.7
	[256;512]	384	25.6	8.1
	256	256	27.3	9.0
E	384	384	26.9	8.7
	[256;512]	384	25.5	8.0

4.2 多尺度评估

在评估了单尺度下的ConvNet模型后，我们现在评估测试时尺度抖动的影响。该方法包括对测试图像的多个缩放版本（对应不同的 Q 值）运行模型，然后对得到的类别后验概率进行平均。考虑到训练与测试尺度间的巨大差异会导致性能下降，使用固定 S 训练的模型在三个接近训练尺度的测试图像尺寸上进行了评估： $Q = \{S - 32, S, S + 32\}$ 。同时，训练时的尺度抖动使得网络能够在测试时应用于更广泛的尺度范围，因此使用可变 $S \in [S_{min}; S_{max}]$ 训练的模型在更大的尺寸范围 $Q = \{S_{min}, 0.5(S_{min} + S_{max}), S_{max}\}$ 上进行了评估。

表4所示结果表明，测试时采用尺度抖动能带来更好的性能（相较于表3中单一尺度的模型评估）。与之前情况相同，最深层的配置（D和E）表现最佳，且尺度抖动优于采用固定最小边 S 的训练方式。我们在验证集上的最佳单网络性能为24.8%/7.5%的top-1/top-5错误率（表4中加粗显示）。在测试集上，配置E取得了7.3%的top-5错误率。

表4: ConvNet在多种测试尺度下的性能。

ConvNet config. (Table 1)	smallest image side		top-1 val. error (%)	top-5 val. error (%)
	train (S)	test (Q)		
B	256	224,256,288	28.2	9.6
	256	224,256,288	27.7	9.2
C	384	352,384,416	27.8	9.2
	[256; 512]	256,384,512	26.3	8.2
D	256	224,256,288	26.6	8.6
	384	352,384,416	26.5	8.6
	[256; 512]	256,384,512	24.8	7.5
E	256	224,256,288	26.9	8.7
	384	352,384,416	26.7	8.6
	[256; 512]	256,384,512	24.8	7.5

4.3 多作物评估

在表5中，我们将密集卷积网络评估与多裁剪评估进行比较（详见第3.2节）。我们还通过平均两种评估技术的softmax输出来评估它们的互补性。可以看出，使用多裁剪方法的表现略优于密集评估，且两种方法确实具有互补性——它们的组合效果优于任一单独方法。如前所述，我们推测这是由于对卷积边界条件的不同处理方式所导致的。

表5: ConvNet评估技术对比。在所有实验中，训练尺度 S 从[256; 512]中采样，并考虑了三个测试尺度 Q : {256, 384, 512}。

ConvNet config. (Table 1)	Evaluation method	top-1 val. error (%)	top-5 val. error (%)
D	dense	24.8	7.5
	multi-crop	24.6	7.5
	multi-crop & dense	24.4	7.2
E	dense	24.8	7.5
	multi-crop	24.6	7.4
	multi-crop & dense	24.4	7.1

4.4 卷积网络融合

到目前为止，我们评估了单个ConvNet模型的性能。在本部分实验中，我们通过平均多个模型的soft-max类别后验概率来融合它们的输出。由于模型间的互补性，这一方法提升了整体性能，并在2012年（Krizhevsky等人，2012）和2013年（Zeiler & Fergus, 2013; Sermanet等人，2014）的ILSVRC顶级参赛方案中得到应用。

结果如表6所示。在提交ILSVRC时，我们仅训练了单尺度网络，以及一个多尺度模型D（仅微调全连接层而非所有层）。由此得到的7个网络集成在ILSVRC测试集上错误率为7.3%。提交后，我们尝试仅集成两个表现最佳的多尺度模型（配置D和E），通过密集评估将测试错误率降至7.0%，结合密集与多裁剪评估后错误率进一步降至6.8%。作为参考，我们表现最佳的单模型错误率为7.1%（模型E，见表5）。

4.5 与现有技术的比较

最后，我们在表7中与现有技术进行了比较。在ILSVRC-2014挑战赛（Russakovsky等人，2014）的分类任务中，我们的“VGG”团队以 $\{v^*\}$ 的成绩获得了第二名。

表6: 多ConvNet融合结果。

Combined ConvNet models	Error		
	top-1 val	top-5 val	top-5 test
ILSVRC submission			
(D/256/224,256,288), (D/384/352,384,416), (D/[256;512]/256,384,512)			
(C/256/224,256,288), (C/384/352,384,416)	24.7	7.5	7.3
(E/256/224,256,288), (E/384/352,384,416)			
post-submission			
(D/[256;512]/256,384,512), (E/[256;512]/256,384,512), dense eval.	24.0	7.1	7.0
(D/[256;512]/256,384,512), (E/[256;512]/256,384,512), multi-crop	23.9	7.2	-
(D/[256;512]/256,384,512), (E/[256;512]/256,384,512), multi-crop & dense eval.	23.7	6.8	6.8

使用7个模型的集成实现了7.3%的测试误差。提交后，我们通过2个模型的集成将错误率降低至6.8%。

从表7可以看出，我们极深的ConvNet显著超越了前几代模型——这些模型曾在ILSVRC-2012和ILSVRC-2013竞赛中取得最佳成绩。我们的结果在分类任务上也与冠军模型（GoogLeNet，错误率6.7%）具有竞争力，并大幅超越了ILSVRC-2013的获胜提交方案Clarifai（该方案在使用外部训练数据时错误率为11.2%，未使用时为11.7%）。值得注意的是，我们的最佳结果仅通过组合两个模型实现，这远少于大多数ILSVRC参赛方案所使用的模型数量。在单网络性能方面，我们的架构取得了最佳结果（测试错误率7.0%），比单GoogLeNet模型高出0.9%。需要强调的是，我们并未脱离LeCun等人（1989）提出的经典ConvNet架构，而是通过大幅增加深度对其进行了改进。

表7: 与ILSVRC分类领域最新技术的比较。我们的方法标记为“VGG”。仅报告未使用外部训练数据获得的结果。

Method	top-1 val. error (%)	top-5 val. error (%)	top-5 test error (%)
VGG (2 nets, multi-crop & dense eval.)	23.7	6.8	6.8
VGG (1 net, multi-crop & dense eval.)	24.4	7.1	7.0
VGG (ILSVRC submission, 7 nets, dense eval.)	24.7	7.5	7.3
GoogLeNet (Szegedy et al., 2014) (1 net)	-	7.9	
GoogLeNet (Szegedy et al., 2014) (7 nets)	-	6.7	
MSRA (He et al., 2014) (11 nets)	-	-	8.1
MSRA (He et al., 2014) (1 net)	27.9	9.1	9.1
Clarifai (Russakovsky et al., 2014) (multiple nets)	-	-	11.7
Clarifai (Russakovsky et al., 2014) (1 net)	-	-	12.5
Zeiler & Fergus (Zeiler & Fergus, 2013) (6 nets)	36.0	14.7	14.8
Zeiler & Fergus (Zeiler & Fergus, 2013) (1 net)	37.5	16.0	16.1
OverFeat (Sermanet et al., 2014) (7 nets)	34.0	13.2	13.6
OverFeat (Sermanet et al., 2014) (1 net)	35.7	14.2	-
Krizhevsky et al. (Krizhevsky et al., 2012) (5 nets)	38.1	16.4	16.4
Krizhevsky et al. (Krizhevsky et al., 2012) (1 net)	40.7	18.2	-

5 结论

在本工作中，我们评估了用于大规模图像分类的极深度卷积网络（多达19个权重层）。研究表明，表征深度有利于提升分类精度，并且通过显著增加传统ConvNet架构（LeCun等人，1989；Krizhevsky等人，2012）的深度，可以在ImageNet挑战数据集上达到最先进的性能。在附录中，我们还展示了我们的模型能够很好地泛化到各种任务和数据集，其表现与基于较浅图像表征构建的、更复杂的识别流程相当甚至更优。我们的结果再次证实了深度在视觉表征中的重要性。

致谢

本工作由欧洲研究理事会视觉识别项目（ERC grant VisRec no. 228180）资助。我们衷心感谢英伟达公司为本研究捐赠GPU设备。

参考文献

Bell, S., Upchurch, P., Snavely, N., and Bala, K. 在真实场景下的材料识别: 基于Materials in Context数据库. *CoRR*, abs/1412.0623, 2014. Chatfield, K., Simonyan, K., Vedaldi, A., and Zisserman, A. 细节中的魔鬼回归: 深入探究卷积网络. In *Proc. BMVC.*, 2014. Cimpoi, M., Maji, S., and Vedaldi, A. 用于纹理识别与分割的深度卷积滤波器组. *CoRR*, abs/1411.6836, 2014. Ciresan, D. C., Meier, U., Masci, J., Gambardella, L. M., and Schmidhuber, J. 用于图像分类的灵活高性能卷积神经网络. In *IJCAI*, pp. 1237–1242, 2011. Deane, J., Corrado, G., Monga, R., Chen, K., Devin, M., Mao, M., Ranzato, M., Senior, A., Tucker, P., Yang, K., Le, Q. V., and Ng, A. Y. 大规模分布式深度网络. In *NIPS*, pp. 1232–1240, 2012. Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.-J., Li, K., and Fei-Fei, L. ImageNet: 一个大规模分层图像数据库. In *Proc. CVPR*, 2009. Donahue, J., Jia, Y., Vinyals, O., Hoffman, J., Zhang, N., Tzeng, E., and Darrell, T. Decaf: 用于通用视觉识别的深度卷积激活特征. *CoRR*, abs/1310.1531, 2013. Everingham, M., Eslami, S. M. A., Van Gool, L., Williams, C., Winn, J., and Zisserman, A. Pascal视觉对象分类挑战: 回顾. *IJCV*, 111(1):98–136, 2015. Fei-Fei, L., Fergus, R., and Perona, P. 从少量训练样本中学习生成式视觉模型: 在101个对象类别上测试的增量贝叶斯方法. In *IEEE CVPR Workshop of Generative Model Based Vision*, 2004. Girshick, R. B., Donahue, J., Darrell, T., and Malik, J. 用于精确目标检测与语义分割的丰富特征层次结构. *CoRR*, abs/1311.2524v5, 2014. 发表于*Proc. CVPR*, 2014. Gkioxari, G., Girshick, R., and Malik, J. 从整体与部分中获取动作与属性. *CoRR*, abs/1412.2604, 2014. Glorot, X. and Bengio, Y. 理解训练深度前馈神经网络的困难. In *Proc. AISTATS*, volume 9, pp. 249–256, 2010. Goodfellow, I. J., Bulatov, Y., Ibarz, J., Arnoud, S., and Shet, V. 使用深度卷积神经网络从街景图像中识别多位数数字. In *Proc. ICLR*, 2014. Griffin, G., Holub, A., and Perona, P. Caltech-256 对象类别数据集. 技术报告 7694, 加州理工学院, 2007. He, K., Zhang, X., Ren, S., and Sun, J. 深度卷积网络中用于视觉识别的空间金字塔池化. *CoRR*, abs/1406.4729v2, 2014. Hoai, M. 用于图像分类的正则化最大池化. In *Proc. BMVC.*, 2014. Howard, A. G. 基于深度卷积神经网络的图像分类的一些改进. In *Proc. ICLR*, 2014. Jia, Y. Caffe: 一个用于快速特征嵌入的开源卷积架构. <http://caffe.berkeleyvision.org/>, 2013. Karpathy, A. and Fei-Fei, L. 用于生成图像描述的深度视觉-语义对齐. *CoRR*, abs/1412.2306, 2014. Kiros, R., Salakhutdinov, R., and Zemel, R. S. 用多模态神经语言模型统一视觉-语义嵌入. *CoRR*, abs/1411.2539, 2014. Krizhevsky, A. 并行化卷积神经网络的一个巧妙技巧. *CoRR*, abs/1404.5997, 2014. Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G. E. 使用深度卷积神经网络进行ImageNet分类. In *NIPS*, pp. 1106–1114, 2012. LeCun, Y., Boser, B., Denker, J. S., Henderson, D., Howard, R. E., Hubbard, W., and Jackel, L. D. 反向传播应用于手写邮政编码识别. *Neural Computation*, 1(4):541–551, 1989. Lin, M., Chen, Q., and Yan, S. 网络中的网络. In *Proc. ICLR*, 2014. Long, J., Shelhamer, E., and Darrell, T. 用于语义分割的全卷积网络. *CoRR*, abs/1411.4038, 2014. Oquab, M., Bottou, L., Laptev, I., and Sivic, J. 使用卷积神经网络学习和迁移中层图像表示. In *Proc. CVPR*, 2014. Perronnin, F., Sánchez, J., and Mensink, T. 改进用于大规模图像分类的Fisher核. In *Proc. ECCV*, 2010. Razavian, A., Azizpour, H., Sullivan, J., and Carlsson, S. 现成的CNN特征: 一个惊人的识别基线. *CoRR*, abs/1403.6382, 2014.

Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., Huang, Z., Karpathy, A., Khosla, A., Bernstein, M., Berg, A. C., and Fei-Fei, L. ImageNet大规模视觉识别挑战赛。 *CoRR*, abs/1409.0575, 2014. Sermanet, P., Eigen, D., Zhang, X., Mathieu, M., Fergus, R., and LeCun, Y. OverFeat: 使用卷积网络进行集成识别、定位与检测。于 *Proc. ICLR*, 2014. Simonyan, K. and Zisserman, A. 用于视频动作识别的双流卷积网络。 *CoRR*, abs/1406.2199, 2014. 发表于 *Proc. NIPS*, 2014. Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V., and Rabinovich, A. 深入探索卷积网络。 *CoRR*, abs/1409.4842, 2014. Wei, Y., Xia, W., Huang, J., Ni, B., Dong, J., Zhao, Y., and Yan, S. CNN: 从单标签到多标签。 *CoRR*, abs/1406.5726, 2014. Zeiler, M. D. and Fergus, R. 卷积网络的可视化与理解。 *CoRR*, abs/1311.2901, 2013. 发表于 *Proc. ECCV*, 2014.

本地化

在论文主体部分，我们探讨了ILSVRC挑战赛的分类任务，并对不同深度的卷积网络架构进行了全面评估。本节我们将转向该挑战赛的定位任务——我们曾于2014年以25.3%的错误率赢得该任务。该任务可视为目标检测的特殊案例：无论实际存在多少个目标实例，都需要为每个top-5类别预测单个目标边界框。为此，我们借鉴了ILSVRC-2013定位挑战赛冠军Sermanet等人（2014）的方法，并进行了若干改进。具体方法详见A.1节，评估结果见A.2节。

A.1 局部化卷积网络

为了实现目标定位，我们采用了一个非常深的卷积网络，其中最后一个全连接层用于预测边界框的位置，而非类别分数。边界框由一个4维向量表示，存储其中心坐标、宽度和高度。边界框预测可以选择在所有类别间共享（单类别回归，SCR（Sermanet等人，2014）），或是针对每个类别独立预测（每类别回归，PCR）。在前一种情况下，最后一层为4维；而在后一种情况下，由于数据集中包含1000个类别，最后一层为4000维。除了最后的边界框预测层外，我们使用了卷积网络架构D（表1），该架构包含16个权重层，在分类任务中表现最佳（第4节）。

训练。定位卷积网络的训练与分类卷积网络的训练类似（见第3.1节）。主要区别在于，我们将逻辑回归目标替换为欧几里得损失，该损失会惩罚预测边界框参数与真实值之间的偏差。我们训练了两个定位模型，每个模型均采用单一尺度： $S = 256$ 和 $S = 384$ （由于时间限制，我们在ILSVRC-2014提交中未使用训练尺度抖动）。训练以相应的分类模型（在相同尺度上训练）进行初始化，初始学习率设置为 10^{-3} 。我们探索了微调所有层以及仅微调前两个全连接层两种方式，如（Sermanet等人，2014）所述。最后一个全连接层被随机初始化并从头开始训练。

测试。我们考虑两种测试协议。第一种用于在验证集上比较不同的网络修改，并且只考虑真实类别的边界框预测（以排除分类错误的影响）。边界框是通过仅对图像的中心裁剪区域应用网络来获得的。

第二种成熟的测试程序基于将定位卷积网络密集应用于整个图像，类似于分类任务（第3.2节）。不同之处在于，最后一个全连接层的输出不是类别分数图，而是一组边界框预测。为了得出最终预测，我们采用了Sermanet等人（2014）的贪婪合并程序：首先合并空间上接近的预测（通过平均其坐标），然后根据从分类卷积网络获得的类别分数对其进行评级。当使用多个定位卷积网络时，我们首先取其边界框预测集合的并集，然后在并集上运行合并程序。我们未使用多重池化

Sermanet等人(2014)提出的偏移量技术, 该技术提高了边界框预测的空间分辨率, 并能进一步改善结果。

A.2 本地化实验

在本节中, 我们首先确定性能最佳的定位设置(使用第一个测试协议), 然后在完整场景(第二个协议)中对其进行评估。定位误差根据ILSVRC标准(Russakovsky等人, 2014)进行衡量, 即当预测边界框与真实边界框的交并比高于0.5时, 该预测被视为正确。

设置对比。从表8可以看出, 按类别回归(PCR)优于类别无关的单类别回归(SCR), 这与Sermanet等人(2014)的研究结果不同, 后者发现SCR优于PCR。我们还注意到, 为定位任务微调所有层比仅微调全连接层(如Sermanet等人(2014)所做)能带来明显更好的结果。在这些实验中, 图像最小边长设置为 $S = 384$; 使用 $S = 256$ 的结果表现出相同趋势, 为简洁起见未予展示。

表8: 采用简化测试协议时不同修改方案的定位误差: 边界框由单个中心图像裁剪预测, 并使用真实类别。所有ConvNet层(除最后一层外)均采用配置D(表1), 而最后一层执行单类别回归(SCR)或每类别回归(PCR)。

Fine-tuned layers	regression type	GT class localisation error
1st and 2nd FC	SCR	36.4
	PCR	34.3
all	PCR	33.1

全面评估。在确定了最佳定位设置(PCR, 全层微调)后, 我们现在将其应用于完整场景中: 使用我们性能最佳的分类系统(第4.5节)预测前5个类别标签, 并采用Sermanet等人(2014)的方法融合多个密集计算的边界框预测结果。从表9可以看出, 尽管使用了预测的前5类别标签而非真实标签, 但将定位卷积神经网络应用于整张图像的结果相比使用中心裁剪(表8)仍有显著提升。与分类任务(第4节)类似, 在多尺度下进行测试并融合多个网络的预测结果能进一步提升性能。

表9: 定位误差

smallest image side		top-5 localisation error (%)	
train (S)	test (Q)	val.	test.
256	256	29.5	-
384	384	28.2	26.7
384	352,384	27.5	-
fusion: 256/256 and 384/352,384		26.9	25.3

与现有技术的比较。我们在表10中将我们最佳的定位结果与现有技术进行了比较。以25.3%的测试误差, 我们的“VGG”团队赢得了ILSVRC-2014的定位挑战赛(Russakovsky等人, 2014年)。值得注意的是, 即使我们使用了更少的尺度且未采用其分辨率增强技术, 我们的结果仍显著优于ILSVRC-2013的获胜者Overfeat(Sermanet等人, 2014年)。我们预计, 若将此项技术融入我们的方法中, 可以实现更好的定位性能。这表明了我们极深卷积网络带来的性能提升——我们以更简单的定位方法但更强大的表征能力获得了更好的结果。

B 极深特征的泛化

在前面的章节中, 我们已经讨论了在ILSVRC数据集上训练和评估极深卷积网络的方法。本节中, 我们将评估这些在ILSVRC上预训练的卷积网络作为特征提取器的表现。

表10: 与ILSVRC定位领域最新技术的比较。我们的方法表示为作为“VGG”。

Method	top-5 val. error (%)	top-5 test error (%)
VGG	26.9	25.3
GoogLeNet (Szegedy et al., 2014)	-	26.7
OverFeat (Sermanet et al., 2014)	30.0	29.9
Krizhevsky et al. (Krizhevsky et al., 2012)	-	34.2

在其他较小数据集上，由于从头训练大型模型容易导致过拟合而不可行时，特征提取器便显得尤为重要。最近，此类应用场景引起了广泛关注（Zeiler & Fergus, 2013; Donahue et al., 2013; Razavian et al., 2014; Chatfield et al., 2014），因为研究发现，在ILSVRC上学到的深度图像表征能够很好地迁移到其他数据集，并且大幅超越了手工设计的特征表示。沿着这一研究方向，我们探讨了我们的模型是否能够比现有先进方法中使用的较浅层模型带来更好的性能。在此评估中，我们采用了在ILSVRC上分类性能最佳的两个模型（第4节）——即我们已公开的“Net-D”和“Net-E”配置。

为了利用在ILSVRC上预训练的卷积神经网络（ConvNets）进行其他数据集的图像分类，我们移除了最后一个全连接层（该层执行1000类ILSVRC分类），并将倒数第二层的4096维激活值作为图像特征，这些特征在多个位置和尺度上进行聚合。生成的图像描述符经过 L_2 归一化处理，并与在线性SVM分类器结合，该分类器在目标数据集上进行训练。为简化流程，预训练的卷积神经网络权重保持固定（不进行微调）。

特征聚合的方式与我们的ILSVRC评估流程（第3.2节）类似。具体而言，首先将图像重新缩放，使其最短边等于 Q ，然后在图像平面上密集应用网络（当所有权重层均被视为卷积层时，此操作可行）。接着对生成的特征图进行全局平均池化，得到一个4096维的图像描述符。该描述符随后与水平翻转图像对应的描述符进行平均。如第4.2节所示，多尺度评估具有优势，因此我们在多个尺度 Q 上提取特征。生成的多尺度特征可通过跨尺度堆叠或池化处理。堆叠方式允许后续分类器学习如何在一系列尺度上最优地组合图像统计信息，但这会以增加描述符维度为代价。我们将在后续实验中重新讨论这一设计选择。此外，我们还评估了使用两个网络计算特征的后融合方法，该方法通过堆叠各自网络的图像描述符实现。

表11: 在VOC-2007、VOC-2012、Caltech-101和Caltech-256数据集上与图像分类领域先进技术的比较。我们的模型标记为“VGG”。标有*的结果是使用在*extended* ILSVRC数据集（2000个类别）上预训练的ConvNets实现的。

Method	VOC-2007 (mean AP)	VOC-2012 (mean AP)	Caltech-101 (mean class recall)	Caltech-256 (mean class recall)
Zeiler & Fergus (Zeiler & Fergus, 2013)	-	79.0	86.5 ± 0.5	74.2 ± 0.3
Chatfield et al. (Chatfield et al., 2014)	82.4	83.2	88.4 ± 0.6	77.6 ± 0.1
He et al. (He et al., 2014)	82.4	-	93.4 ± 0.5	-
Wei et al. (Wei et al., 2014)	81.5 (85.2*)	81.7 (90.3*)	-	-
VGG Net-D (16 layers)	89.3	89.0	91.8 ± 1.0	85.0 ± 0.2
VGG Net-E (19 layers)	89.3	89.0	92.3 ± 0.5	85.1 ± 0.3
VGG Net-D & Net-E	89.7	89.3	92.7 ± 0.5	86.2 ± 0.3

在VOC-2007和VOC-2012上进行图像分类。我们首先评估PASCAL VOC-2007和VOC-2012基准测试（Everingham等人，2015）中的图像分类任务。这些数据集分别包含10K和22.5K张图像，每张图像标注有一个或多个标签，对应20个物体类别。VOC组织方提供了预定义的训练集、验证集和测试集划分（VOC-2012的测试集未公开提供，而是通过官方评估服务器进行评测）。识别性能采用各类别平均精度均值（mAP）进行衡量。

值得注意的是，通过检查在VOC-2007和VOC-2012验证集上的表现，我们发现通过平均聚合多个尺度下计算出的图像描述符，其性能表现相

类似于通过堆叠进行的聚合。我们假设这是由于在VOC数据集中，物体出现在多种尺度上，因此没有特定的尺度特定语义可供分类器利用。由于平均法具有不增加描述符维度的优势，我们能够在广泛的尺度范围内聚合图像描述符： $Q \in \{256, 384, 512, 640, 768\}$ 。值得注意的是，与较小范围 $\{256, 384, 512\}$ 相比，改进幅度相当有限（0.3%）。

测试集性能在表11中进行了报告并与其他方法进行了比较。我们的网络“Net-D”和“Net-E”在VOC数据集上表现出相同的性能，二者的组合略微提升了结果。我们的方法在使用ILSVRC数据集预训练的图像表征方面创造了新的最优性能，比Chatfield等人（2014）先前的最佳结果高出6%以上。需要注意的是，Wei等人（2014）的方法在VOC-2012上实现了高出1%的mAP，但其使用了扩展的2000类ILSVRC数据集进行预训练，该数据集额外包含了1000个与VOC数据集语义相近的类别。该方法还受益于与目标检测辅助分类流程的融合。

在Caltech-101和Caltech-256上的图像分类。本节中，我们在Caltech-101（Fei-Fei等人，2004年）和Caltech-256（Griffin等人，2007年）图像分类基准上评估了非常深的特征。Caltech-101包含9K张图像，标记为102个类别（101个对象类别和一个背景类别），而Caltech-256更大，包含31K张图像和257个类别。这些数据集的标准评估协议是生成多个随机划分，将数据分为训练集和测试集，并报告各划分间的平均识别性能，该性能通过平均类别召回率来衡量（这补偿了每个类别测试图像数量的不同）。遵循Chatfield等人（2014年）、Zeiler & Fergus（2013年）、He等人（2014年）的方法，在Caltech-101上，我们生成了3个随机划分，每个划分包含每个类别30张训练图像，以及最多每个类别50张测试图像。在Caltech-256上，我们也生成了3个划分，每个划分包含每个类别60张训练图像（其余用于测试）。在每个划分中，20%的训练图像被用作超参数选择的验证集。

我们发现，与VOC不同，在Caltech数据集上，通过多尺度计算得到的描述符堆叠比平均池化或最大池化表现更佳。这可以解释为，在Caltech图像中，物体通常占据整个图像，因此多尺度图像特征在语义上有所不同（捕捉整个物体vs或物体部分），而堆叠能让分类器利用这种特定尺度的表征。我们使用了三种尺度 $Q \in \{256, 384, 512\}$ 。

我们的模型在表11中进行了相互比较，并与现有最佳技术进行了对比。可以看出，更深的19层Net-E比16层Net-D表现更好，而它们的组合进一步提升了性能。在Caltech-101数据集上，我们的表征方法与He等人（2014）的方法具有可比性，但该方法在VOC-2007数据集上的表现明显逊于我们的网络。在Caltech-256数据集上，我们的特征以较大优势（8.6%）超越了现有最佳技术（Chatfield等人，2014）。

在VOC-2012上的动作分类。我们还在PASCAL VOC-2012动作分类任务（Everingham等人，2015）上评估了我们表现最佳的图像表示（Net-D和Net-E特征的堆叠），该任务旨在给定执行动作人物的边界框，从单张图像预测动作类别。该数据集包含4.6K训练图像，标注为11个类别。与VOC-2012物体分类任务类似，性能使用mAP进行衡量。我们考虑了两种训练设置：(i) 在整个图像上计算ConvNet特征，忽略提供的边界框；(ii) 在整个图像和提供的边界框上分别计算特征，并将它们堆叠以获得最终表示。结果与其他方法的比较见表12。

我们的表示方法即使在未使用提供的边界框的情况下，也在VOC动作分类任务上达到了当前最优水平，而当同时使用图像和边界框时，结果得到了进一步提升。与其他方法不同，我们未引入任何任务特定的启发式规则，而是依赖于极深度卷积特征的表征能力。

其他识别任务。自我们的模型公开发布以来，研究界已将其广泛应用于各类图像识别任务中，其表现持续优于较浅层的表征方法。例如，Girshick等人（2014年）通过用我们的16层模型替换Krizhevsky等人（2012年）的卷积网络，实现了当时最先进的物体检测结果。相较于Krizhevsky等人（2012年）的较浅层架构，类似的性能提升也已得到验证——

表12: 在VOC-2012单图像动作分类任务上与前沿技术的比较。我们的模型标记为“VGG”。标有*的结果是使用在*extended ILSVRC*数据集（1512个类别）上预训练的ConvNets实现的。

Method	VOC-2012 (mean AP)
(Oquab et al., 2014)	70.2*
(Gkioxari et al., 2014)	73.6
(Hoai, 2014)	76.3
VGG Net-D & Net-E, image-only	79.2
VGG Net-D & Net-E, image and bounding box	84.0

在语义分割（Long等人，2014）、图像描述生成（Kiros等人，2014；Karpathy与Fei-Fei，2014）、纹理与材质识别（Cimpoi等人，2014；Bell等人，2014）等领域中得到应用。

C 论文修订

在此我们列出论文的主要修订内容，为方便读者概述实质性改动。

v1 初始版本。展示了在ILSVRC提交之前进行的实验。

v2 在提交后增加了使用尺度抖动进行训练集增强的ILSVRC实验，这提升了性能。

v3在PASCAL VOC和Caltech图像分类数据集上增加了泛化实验（附录B）。这些实验所使用的模型均已公开提供。

v4 论文已转换为ICLR-2015投稿格式，并增加了多裁剪分类实验。

v6 ICLR-2015会议最终版论文。增加了网络B与浅层网络的比较，以及在PASCAL VOC动作分类基准上的结果。