

# Improved Knowledge Distillation via Teacher Assistant

이정수

## The Thirty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-20)

### • Abstract

- 지식 증류 과정에서 교사(Teacher) 모델과 학생(Student) 모델 사이에 TA(Teacher Assistant) 모델을 삽입하여 Size Gap에서 오는 손실을 줄임
- 본 논문에서는 최적의 TA 모델 사이즈를 실험적으로 밝혔고, TA 모델을 다수 사용하는 multi-step distillation을 제안함
- 실험 결과, Normal Knowledge Distillation은 물론 다른 증류 방법들보다 높은 정확도 향상을 보임

### • Background, Problem

- 지식 증류란, 훈련된 거대 모델(이하 교사 모델)의 output data를 작은 모델(이하 학생 모델)의 label로 사용함으로써 학생 모델을 보다 효율적으로 훈련하는 방법. 이때 손실 함수는
  1. student model output 과 ground truth  $y_r$ 의 cross-entropy인 term *Student Loss*
  2. teacher soft output인  $y_t$ 와 student soft output인  $y_s$ 의 KL-Divergence 값에 증류상수  $T$  제곱을 곱한 term *Knowledge Distillation Loss*로 구성됨.

$$\mathcal{L}_{KD} = \tau^2 KL(y_s, y_t)$$

$$\mathcal{L}_{SL} = \mathcal{H}(\text{softmax}(a_s), y_r).$$

$$\mathcal{L}_{\text{student}} = (1 - \lambda)\mathcal{L}_{SL} + \lambda\mathcal{L}_{KD}$$

- 학생 모델의 loss는 raw data를 직접 학습하며 얻는 오차 항과, 교사 모델이 넘겨주는 soft label을 학습하며 얻는 오차 항의 합으로 이루어져 있음. 이때 교사 모델이 크다고 무조건 낮은 loss를 얻는것이 아니고, 두 모델 크기의 관계에 따라 최적의 distillation point가 결정됨
- Figure 2. 의 실험에 따르면 교사 모델의 크기와 정확도는 선형적으로 증가하는데 반해, 증류 받는 학생 모델의 정확도는 어느 시점에 다다르면 다시 낮아지는 현상을 보임. 이 실험으로 교사 모델의 성능이 학생 모델의 성능을 보장하지 않음을 정량적으로 측정함.

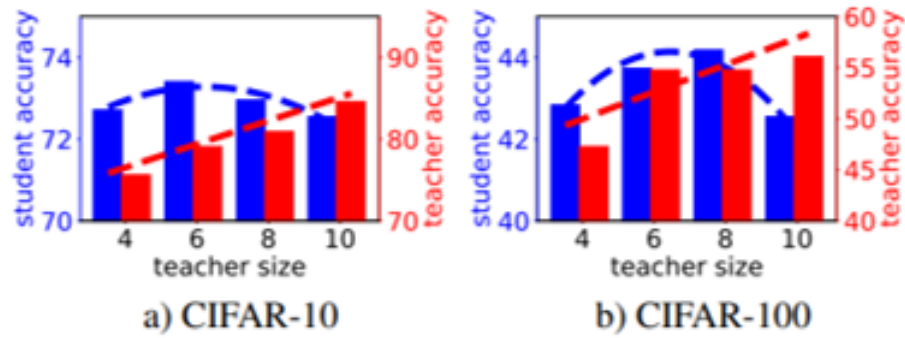
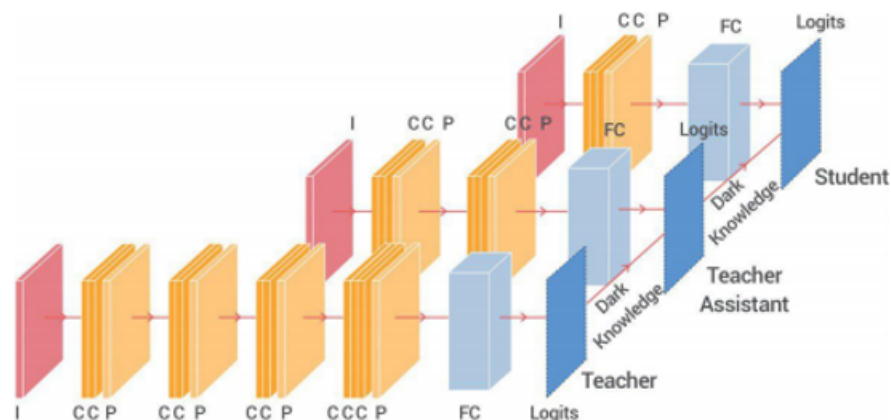


Figure 2: Distillation performance with increasing teacher size. The number of convolutional layers in student is 2.

- 논문은 세가지 Factor로 이 현상을 설명
  1. 교사의 성능이 높아질수록, 학생에게 더 좋은 정보를 전달해줄 수 있음
  2. 교사가 너무 거대해지면, 학생이 증류를 받아도 이를 수용할만한 Capacity가 없을 수도 있음
  3. 정확도가 상승할수록 logit이 덜 soft해져서 증류가 원활하게 이뤄지지 않음
- 1과 2, 3은 상반되는 특성이기 때문에 위 세가지 factor가 최적의 균형을 이루도록 교사와 학생 모델의 size를 조정하여 증류 성능을 높이는 것이 관건

## • Teacher Assistant

- 그러나 현실적으로 교사나 학생 모두 fixed size model인 경우이거나, size gap이 큰 경우가 많아 최적화를 적용하기 어려움
- 따라서 교사와 학생 사이에 중간 크기의 Teacher Assistant(이하 TA) 모델을 삽입해 Size gap으로 인한 증류 손실을 완화하는 방법을 제안
- 교사가 TA에게 증류를 하고, 다시 TA가 학생에게 증류를 하는 방식으로 process가 진행



## • Experiment

1. TA Knowledge Distillation evaluation. 이때 Size의 S는 model에 존재하는 Conv layer의 갯수

- 다양한 모델과 데이터셋에 실험한 결과, TA 증류를 사용했을때의 결과가 증류를 하지 않은 경우나 일반적인 증류를 한 경우보다 좋은 결과를 보임

Table 1: Comparison on evaluation accuracy between our method (TAKD) and baselines. For CIFAR, plain (S=2, TA=4, T=10) and for ResNet (S=8, TA=20, T=110) are used. For ImageNet, ResNet (S=14, TA=20, T=50) is used. Higher numbers are better.

Model	Dataset	NOKD	BLKD	TAKD
CNN	CIFAR-10	70.16	72.57	73.51
	CIFAR-100	41.09	44.57	44.92
ResNet	CIFAR-10	88.52	88.65	88.98
	CIFAR-100	61.37	61.41	61.82
ResNet	ImageNet	65.20	66.60	67.36

2. Optimal TA Size

- 실험 결과, 최적의 TA Size는 학생과 교사 모델의 Size의 평균이 아닌, Accuracy의 평균에 존재. Table 2에서 최적의 결과는 모두 Figure 4의 빨간 점선, 즉 교사 모델과 학생 모델 Accuracy의 평균에 위치하는 model size임

Table 2: Student's accuracy given varied TA sizes for (S=2, T=10)

Model	Dataset	TA=8	TA=6	TA=4
CNN	CIFAR-10	72.75	73.15	73.51
	CIFAR-100	44.28	44.57	44.92

Table 3: Student's accuracy given varied TA sizes for (S=8, T=110)

Model	Dataset	TA=56	TA=32	TA=20	TA=14
ResNet	CIFAR-10	88.70	88.73	88.90	88.98
	CIFAR-100	61.47	61.55	61.82	61.5

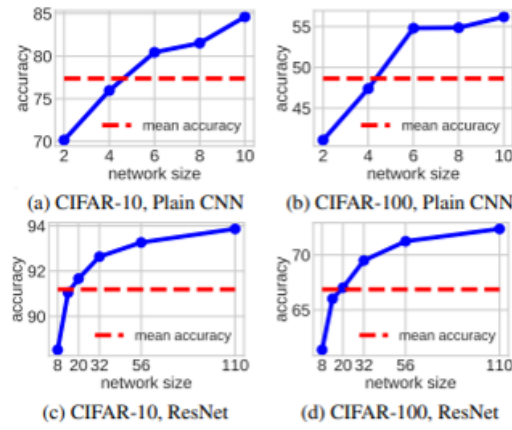


Figure 4: Accuracy of training from scratch for different network sizes. The dashed red line shows the average performance of the teacher and student.

- 본 논문에서는 실험적으로는 optimal TA Size를 찾는 데는 성공하였지만, 좀 더 체계적이고 이론적인 조사는 future work로 남김. 이는 본 논문이 나오기 반년 전에 나온 EfficientNet의 Compound Scaling의 영향을 받은 것으로 생각됨

### 3. Multi-Step Knowledge Distillation

- 다수의 TA 모델을 사용한 결과, TA를 3번으로 가장 많이 사용한 1번째 Path가 가장 좋은 결과를 보임. 본 Figure의 두가지 Point는
  - 어떤 Size의 TA든 일단 사용하는 경우가 그렇지 않은 경우보다 무조건 좋은 결과를 보임
  - TA를 한번만 사용한 7번째 Path가, 두번 사용한 2, 3번째 Path보다 더 좋은 결과를 보임. 이는 optimal한 TA Size가 중요한 요소임을 시사

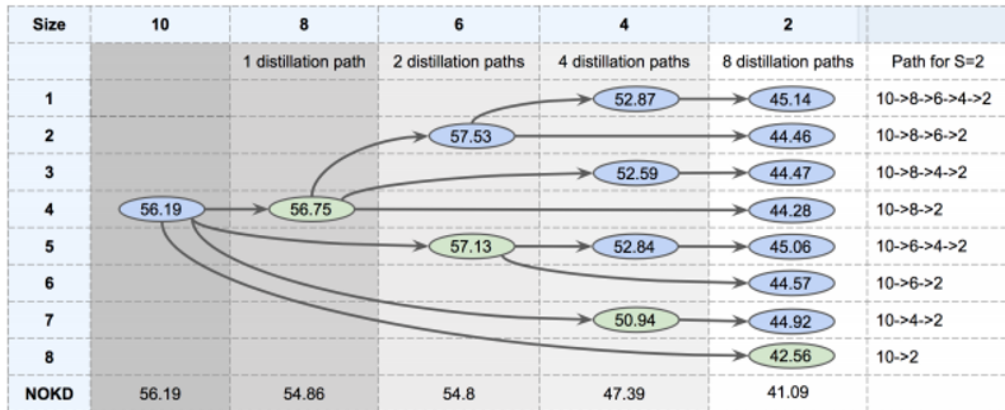


Figure 5: Distillation paths for plain CNN on CIFAR-100 with T=10

### 4. Generalization

- 실험 결과, TA 증류의 local minima 근처가 다른 경우보다 더 flat해지는 것을 확인할 수 있음. 이는 보다 Generalization이 잘 되었음을 시사

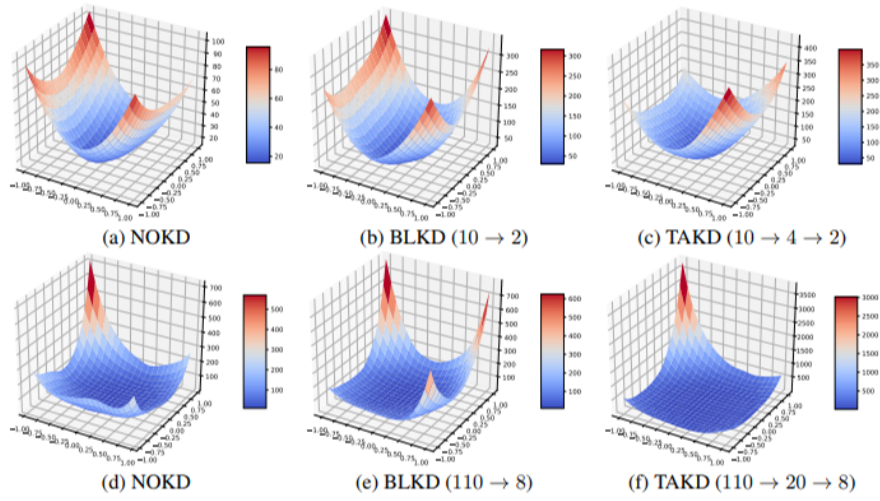


Figure 7: Loss landscape around local minima. Top) plain CNN for student of size 2. Bottom: ResNet for student of size 8.

## • Theoretical Analysis

- TA 증류가 어떻게 일반적인 증류보다 더 좋은 성능을 가질 수 있는지에 대한 이론적 분석
- 이를 설명하기 위해 VC theory의 가정에서 출발함.
- VC 이론 상에서 classifier  $F_s$ 의 에러는 다음 식을 따름. 이때  $s$ 는 student,  $r$ 은 real-data를 의미하며 따라서 우변은 학생이 real-data를 학습할때 발생하는 에러의 최댓값을 뜻함

$$R(f_s) - R(f_r) \leq O\left(\frac{|\mathcal{F}_s|C}{n^{\alpha_{sr}}}\right) + \epsilon_{sr},$$

- 동일하게  $t$ 와  $r$ ,  $s$ 와  $t$ 로 인자를 대체하면 다음 두 식이 만들어지고,

$$R(f_t) - R(f_r) \leq O\left(\frac{|\mathcal{F}_t|C}{n^{\alpha_{tr}}}\right) + \epsilon_{tr},$$

$$R(f_s) - R(f_t) \leq O\left(\frac{|\mathcal{F}_s|C}{n^{\alpha_{st}}}\right) + \epsilon_{st},$$

- 이 두 식을 종합하면  $r$ 이  $t$ 를 거쳐  $s$ 에게 도달하는, 즉 **일반 증류**일때의 에러 식이 도출됨

$$R(f_s) - R(f_r) \leq O\left(\frac{|\mathcal{F}_s|C}{n^{\alpha_{sr}}}\right) + O\left(\frac{|\mathcal{F}_t|C}{n^{\alpha_{tr}}}\right) + \epsilon_{st} + \epsilon_{tr}$$

- 이때 좌항은 첫번째 식과 동일해지고, 첫번째 식의 우항은 VC 이론상의 공준, 즉 maximum error이기 때문에 다음과 같은 식을 도출할 수 있음. 따라서 증류를 하지 않는 경우보다 증류를 할 때, 더 낮은 maximum error를 가짐을 증명

$$O\left(\frac{|\mathcal{F}_t|C}{n^{\alpha_{tr}}} + \frac{|\mathcal{F}_s|C}{n^{\alpha_{st}}}\right) + \epsilon_{tr} + \epsilon_{st} \leq O\left(\frac{|\mathcal{F}_s|C}{n^{\alpha_{sr}}}\right) + \epsilon_{sr}$$

- 동일하게 Assistant  $a$ 를 추가하여 식을 전개하면 **TA 증류**의 성능이 가장 높은 부등식 도출

$$\begin{aligned}
O\left(\frac{|\mathcal{F}_t|_C}{n^{\alpha_{tr}}} + \frac{|\mathcal{F}_a|_C}{n^{\alpha_{at}}} + \frac{|\mathcal{F}_s|_C}{n^{\alpha_{sa}}}\right) + \epsilon_{tr} + \epsilon_{at} + \epsilon_{sa} \\
\leq O\left(\frac{|\mathcal{F}_t|_C}{n^{\alpha_{tr}}} + \frac{|\mathcal{F}_s|_C}{n^{\alpha_{st}}}\right) + \epsilon_{tr} + \epsilon_{st} \\
\leq O\left(\frac{|\mathcal{F}_s|_C}{n^{\alpha_{sr}}}\right) + \epsilon_{sr}.
\end{aligned}$$

- 그러나 multi-step distillation에서 증류 횟수가 적음에도 더 좋은 결과가 있었던 경우는 이의 반례가 되는데, 이는 VC 이론의 예외에 해당하는 데이터 집합이거나 VC이론의 본질적인 모순에 해당하는 경우로 추측됨