

Глубокое обучение

Введение

Дьяконов А.Г.

**Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова (Москва, Россия)**



Глубокое обучение

**мини-курс для студентов 3 курса ММП ВМК МГУ
начинает читаться весной 2019 года**

**лекции со слайдами
семинары ~ практикум**

**понедельник, 12:50 (?), П-5
Отчётность: нет**

**Лектор: Дьяконов Александр Геннадьевич
Страница курса: <https://github.com/Dyakonov/DL/>**

Другие курсы

- «Введение в машинное обучение» бакалавриат ВМК (спецкурс)
 - «Глубокое обучение» каф. ММП ВМК (лекции + семинары)
 - «МОАД» бакалавриат 3 поток 4 курс ВМК (лекции)
 - «ПЗАД» Магистратура 1г. ММП ВМК (лекции + семинары)

DL: первые успехи

Results IJCNN2011 COMPETITION

TEAM	METHOD	TOTAL	SUBSET
			ALL SIGNS ▾
[3] IDSIA ★	Committee of CNNs	99.46%	99.46%
[1] INI-RTCV ★	Human Performance	98.84%	98.84%
[4] sermanet ★	Multi-Scale CNNs	98.31%	98.31%
[2] CAOR ★	Random Forests	96.14%	96.14%
[6] INI-RTCV	LDA on HOG 2	95.68%	95.68%
[5] INI-RTCV	LDA on HOG 1	93.18%	93.18%
[7] INI-RTCV	LDA on HOG 3	92.34%	92.34%



2011 год

**На соревновании по распознаванию дорожных знаков CNN
превзошёл точность человека!**

Задачи в компьютерном зрении и обработке изображений

Computer Vision / Image Analysis

Классификация изображений



Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Hinton, G. E., ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, NIPS, 2012

Задачи в компьютерном зрении и обработке изображений

Пример Классификации: QuickDraw



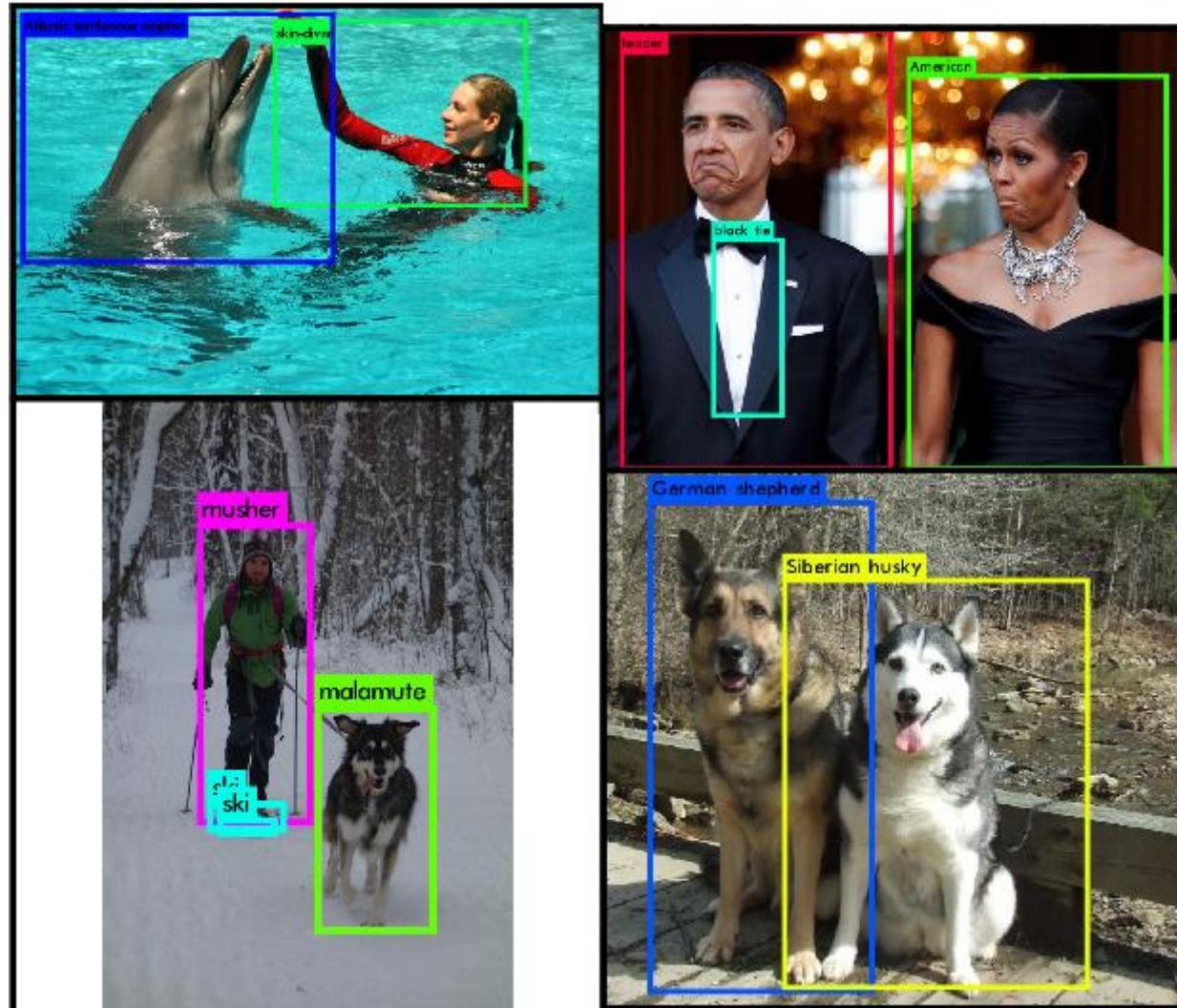
<https://quickdraw.withgoogle.com/>

<https://arxiv.org/pdf/1704.03477.pdf>

Задачи в компьютерном зрении и обработке изображений

Computer Vision / Image Analysis

Обнаружение объектов (Object Detection)



Joseph Redmon, Ali Farhadi «YOLO9000: Better, Faster, Stronger» <https://arxiv.org/abs/1612.08242>

Задачи в компьютерном зрении и обработке изображений

Computer Vision / Image Analysis

Сегментация объектов



Не и др., 2012

<https://research.fb.com/learning-to-segment/>

Задачи в компьютерном зрении и обработке изображений

Computer Vision / Image Analysis

Распознавание сцен (Scene recognition)



Bedroom

Задачи в компьютерном зрении и обработке изображений

Computer Vision / Image Analysis

Удаление фона (Background removal)



Tiramisu



Unet

<https://towardsdatascience.com/background-removal-with-deep-learning-c4f2104b3157>

Задачи в компьютерном зрении и обработке изображений

Computer Vision / Image Analysis

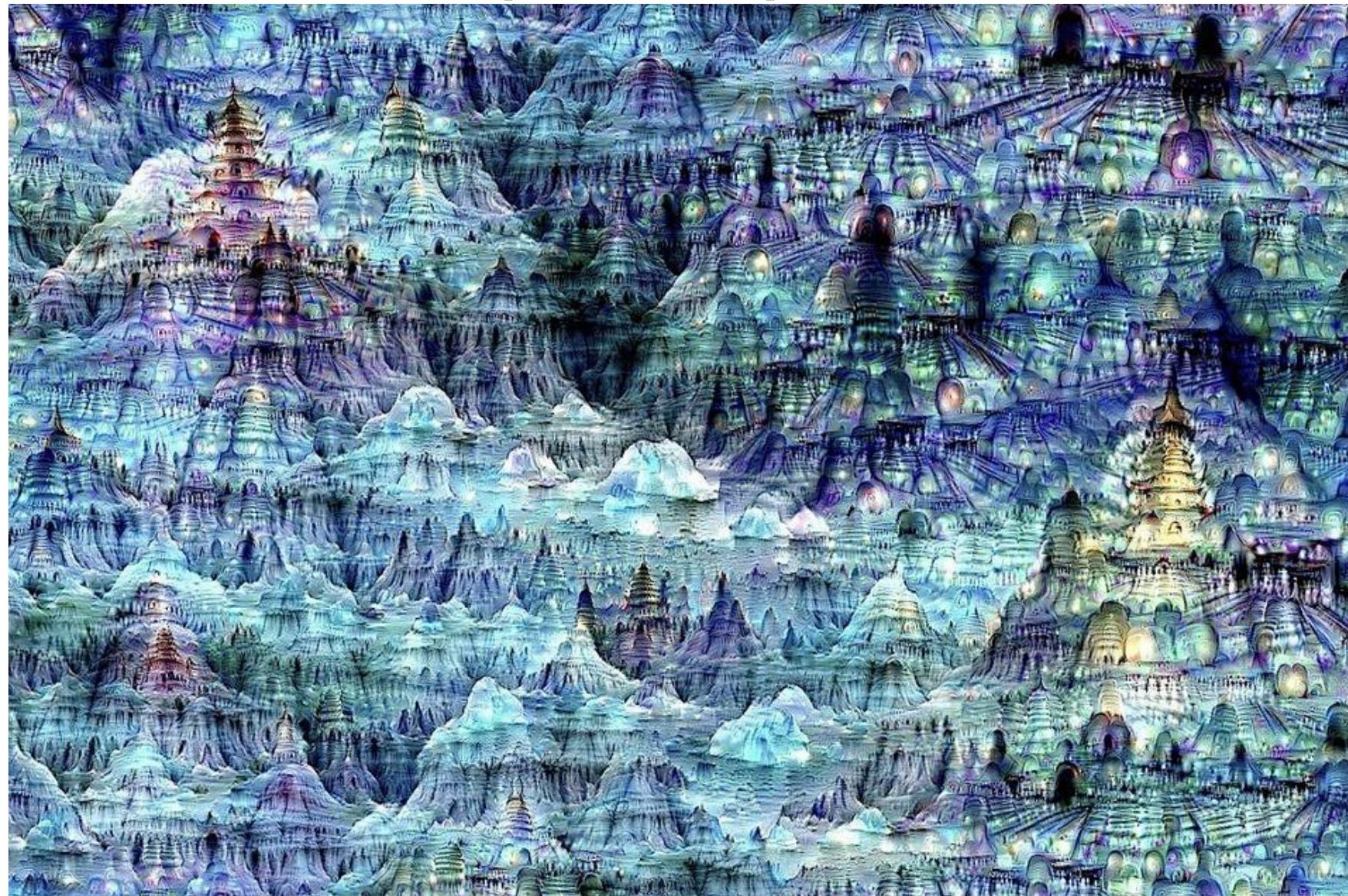
Определение позы (Human pose estimation)



S. Wei, V. Ramakrishna, T. Kanade, and Y. Sheikh. Convolutional pose machines. CoRR, abs/1602.00134, 2016.

Задачи в обработке изображений

Генерация изображений



Задачи в обработке изображений

Генерация изображений



2014



2015



2016



2017

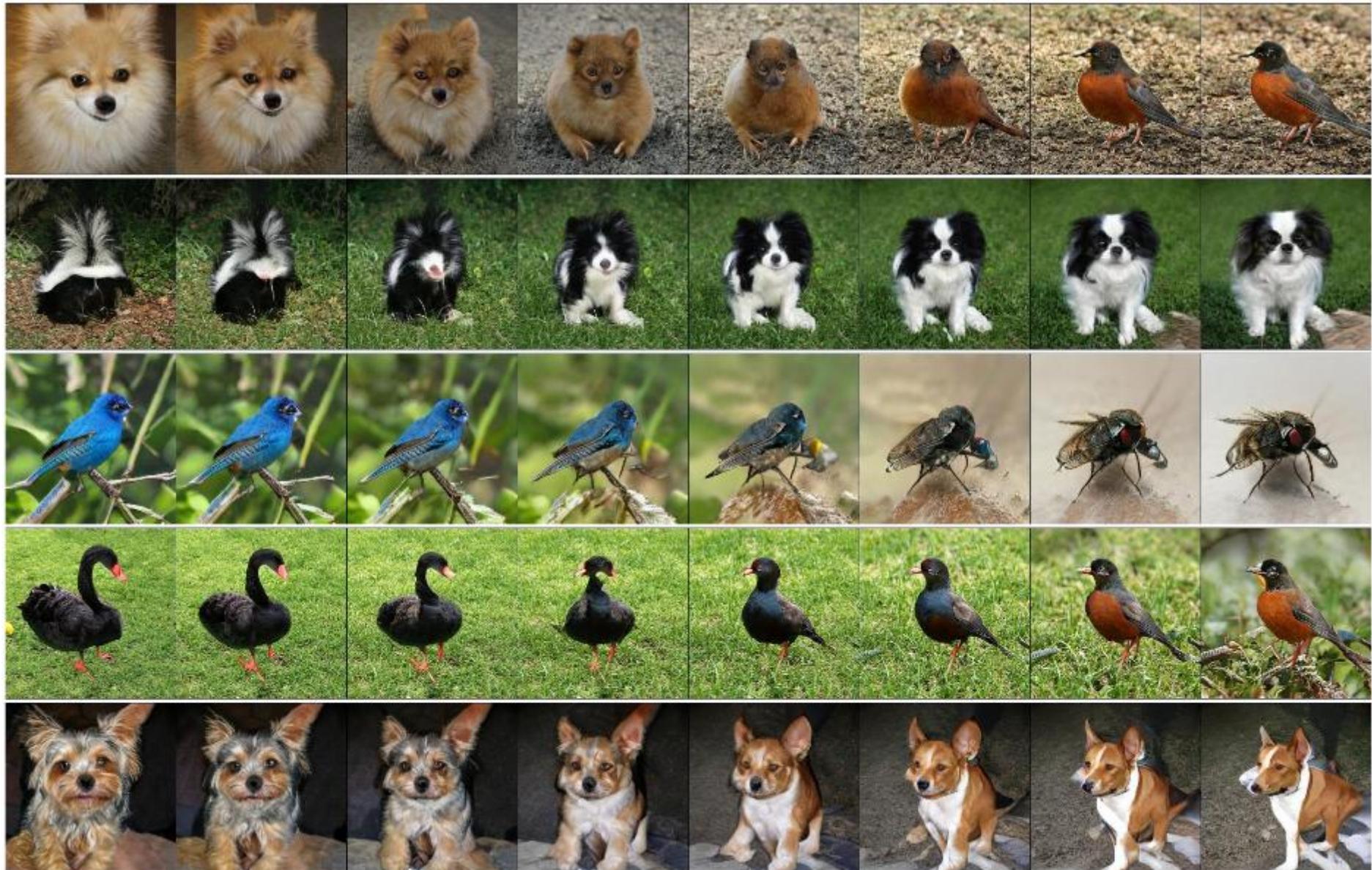


2018

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1802/1802.07228.pdf>

http://research.nvidia.com/publication/2017-10_Progressive-Growing-of

BigGAN: Генерация изображений / интерполяция

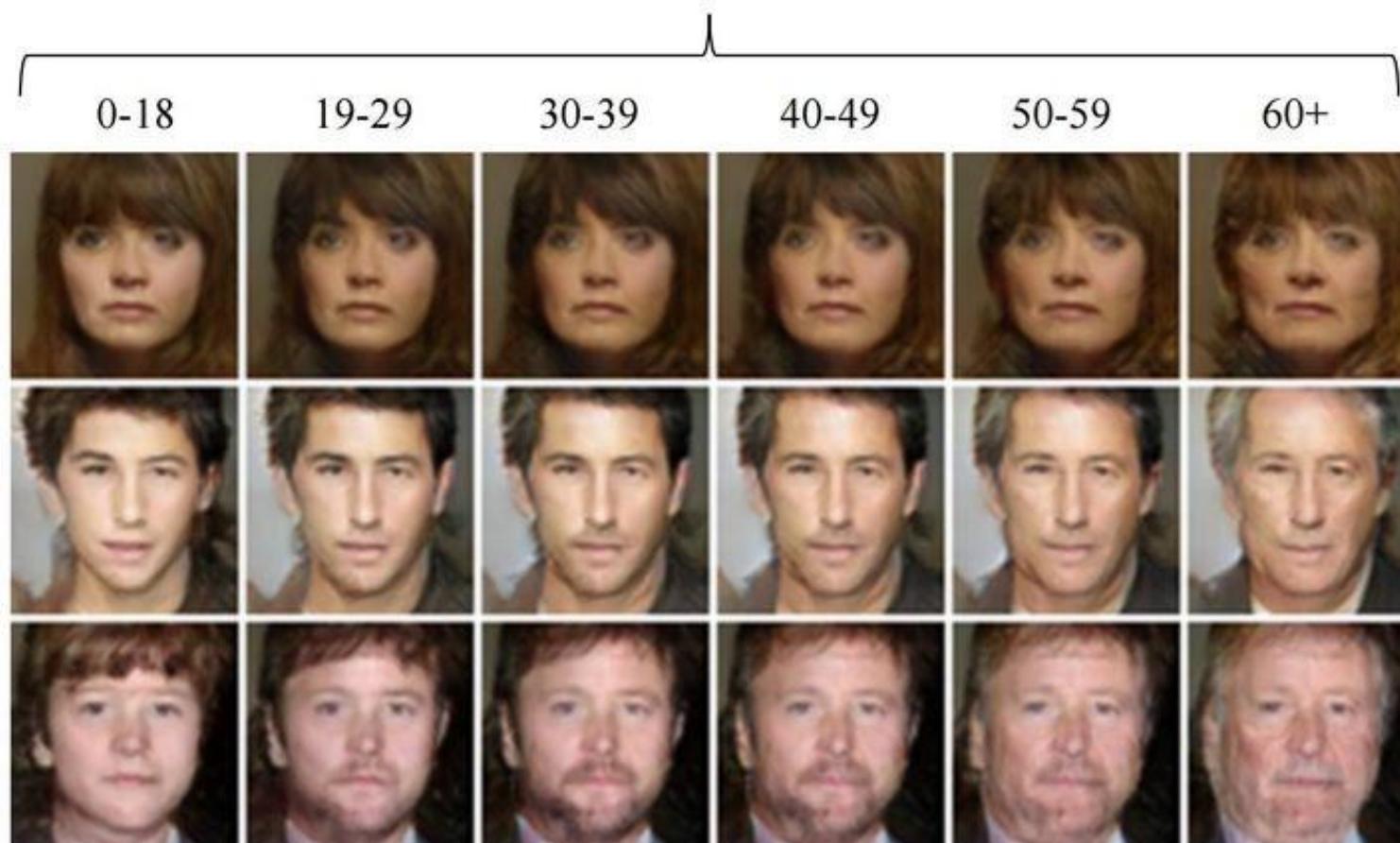


<https://arxiv.org/pdf/1809.11096.pdf>

Задачи в обработке изображений

Изменение изображений

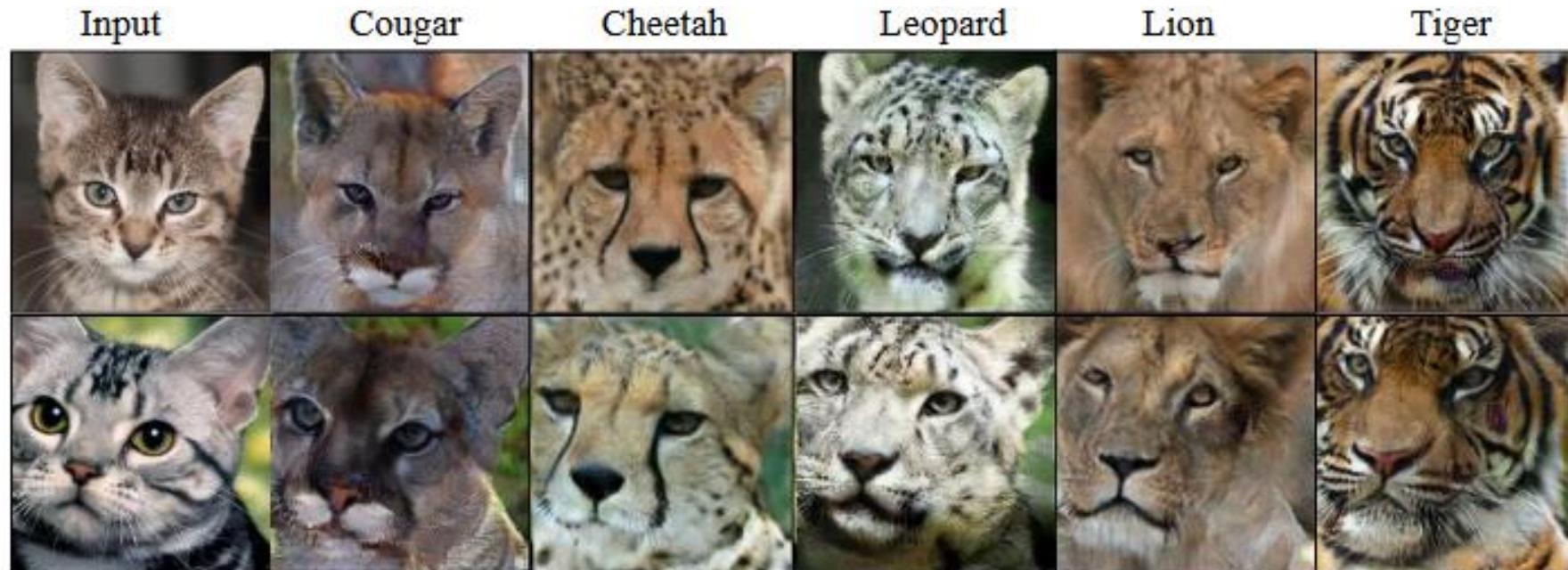
Face Aging



<https://arxiv.org/pdf/1702.01983.pdf>

Задачи в обработке изображений

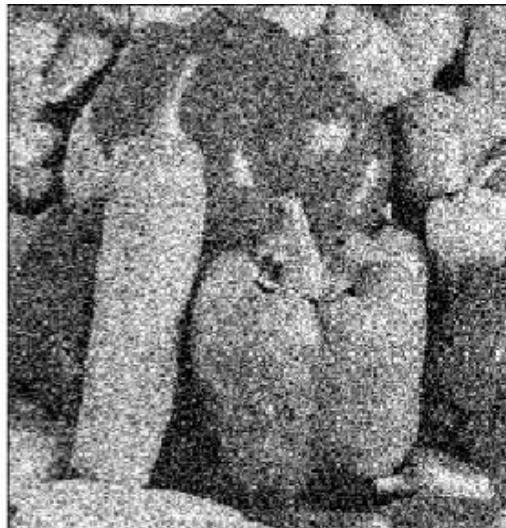
Трансляция изображений (Image-to-Image Translation)



<https://arxiv.org/pdf/1703.00848.pdf>

Задачи в обработке изображений

Улучшение изображений: Denoising / Restoring



Inpainting

nd Sirius form a nearly equilateral triangle. These stars, and Naos, in the Ship, and Phaet, in the Dove, form a figure known as the Egyptian "X." From earliest times Sirius has been known as the Dog of Orion. It is 324 times brighter than the average sixth-magnitude star, and is the nearest star of all the stars in this latitude; its distance being 8.7 light years. At this distance the Sun would appear a little brighter than the Pole Star. [Illustration CANIS MAJOR] — ARGO NAVIS (Арго-навис-ис-арго-арго). LOCATION.—Argo is situated in Canis Major. If a line joining Betelgeuze and Sirius is prolonged 18° southeast, it will point out Naos, a second magnitude star in the rowlock of the Ship. This is in the southeast corner of the Egyptian "X." The star of a deep yellow or orange hue, it has three little stars above it, two of which form a pretty pair. The star P is a companion, which is a test for an opera-glass. The star is a double for an opera-glass. Note the fine star cluster M.). The star Markeb forms a small triangle with two stars near it. The Egyptians believed that this was the star that bore Osiris and sailed over the Deluge. The coast contains two noted objects invisible in our latitude, Canopus, the second brightest star, and the remarkable variable star I. [Illustration PUPPIS] — MONOCER (моно-ко-р-е-рос). THE UNICORN (Face South.) LC Monoceros is to be found east of Orion between Canis Minor. Three of its stars of the fourth magnitude lie in a straight line northeast and southwest, about 9.4° apart. Betelgeuze, and about the same distance south of Aldebaran, the region around the stars 8, 13, 17 is particularly rich when viewed with an opera-glass. Note also a field about the variable S, and a cluster about midway between 12 and 13. Two stars about 7° apart in the tail of the Unicorn are sister stars to Procyon. These stars are



Задачи в обработке изображений

Дорисовка изображений (Image completion)



http://hi.cs.waseda.ac.jp/~iizuka/projects/completion/data/completion_sig2017.pdf

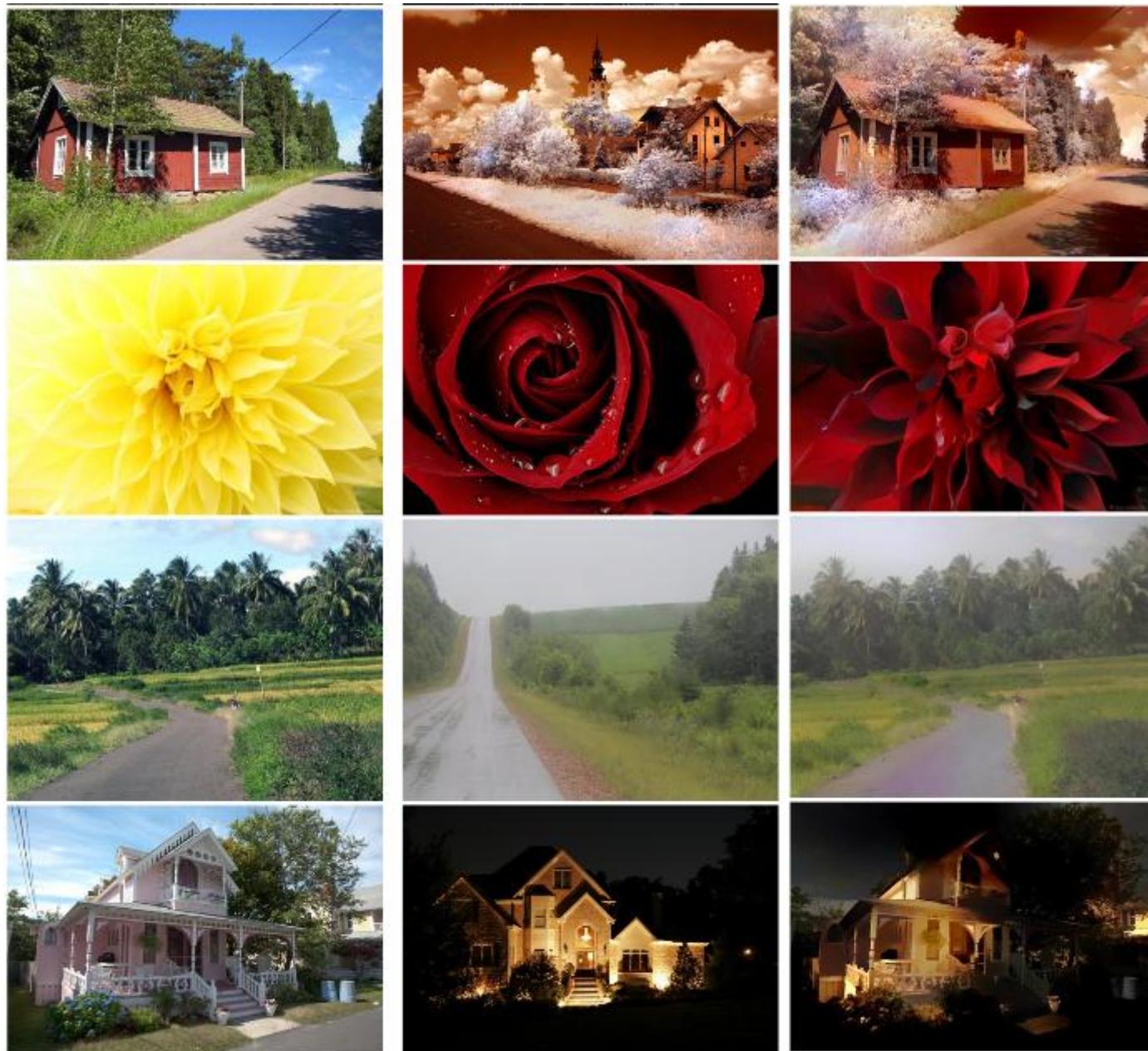
Задачи в обработке изображений

Стилизация изображений, перенос стиля



<https://deepart.io/>

<https://arxiv.org/pdf/1703.07511.pdf>



(a) Input image

(b) Reference style image

(e) Our result

Задачи в обработке изображений

Супер-разрешение (Super-Resolution)



<https://arxiv.org/abs/1609.04802>

Задачи в обработке изображений

Улучшение фотографий



**в обучении не пары (плохое хорошее),
а примеры хороших и что надо улучшить**

<http://www.vision.ee.ethz.ch/~ihnatova/wespe.html>

Задачи в обработке изображений

Раскрашивание изображений

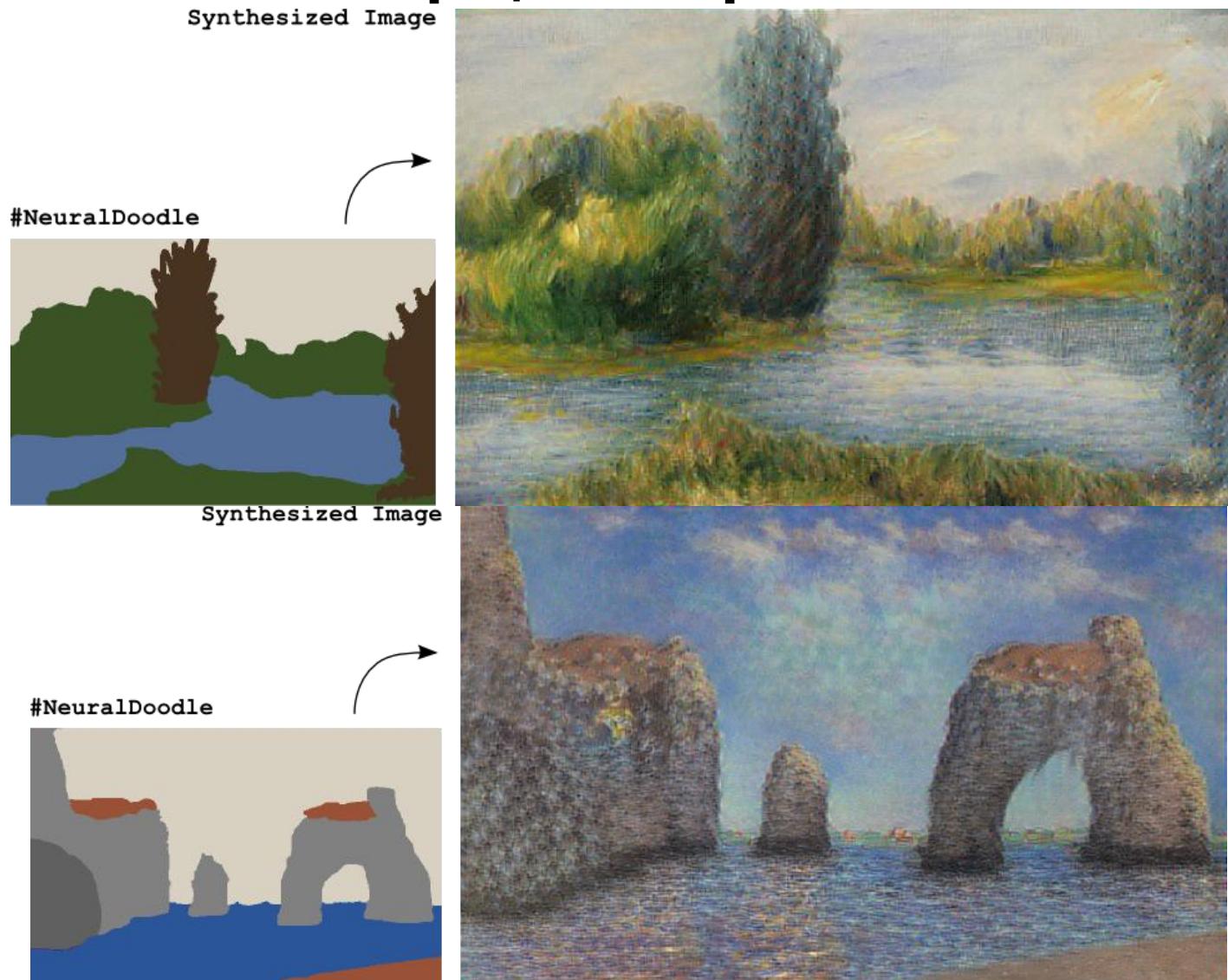


<http://demos.algorithmia.com/colorize-photos/>

в 20% случаях раскрашенное изображение путали с оригиналом...

Задачи в обработке изображений

Генерация изображений



<https://github.com/alexjc/neural-doodle>

Задачи для дизайна / креатива Генерация объектов / представление объектов



[Dosovitskiy A. и др., 2017 <https://arxiv.org/pdf/1411.5928.pdf>]

Задачи в понимании изображений

Аннотирование изображений

I think it's a dog sitting on a rock.



<https://arxiv.org/pdf/1411.4555.pdf>

I am not really confident, but I think it's a young boy holding a baseball bat and he seems 😊.



<https://www.captionbot.ai/>

A person riding a motorcycle on a dirt road.



A group of young people playing a game of frisbee.



A herd of elephants walking across a dry grass field.



Two dogs play in the grass.



A skateboarder does a trick on a ramp.



A dog is jumping to catch a frisbee.



Two hockey players are fighting over the puck.



A little girl in a pink hat is blowing bubbles.



A close up of a cat laying on a couch.



A red motorcycle parked on the side of the road.



A refrigerator filled with lots of food and drinks.



A yellow school bus parked in a parking lot.



Describes without errors

Describes with minor errors

Somewhat related to the image

Unrelated to the image

Задачи для сервисов

Определение породы собаки по фотографии



Shiba Inu

Lively, independent-minded, aloof
toward strangers



German Shepherd Dog

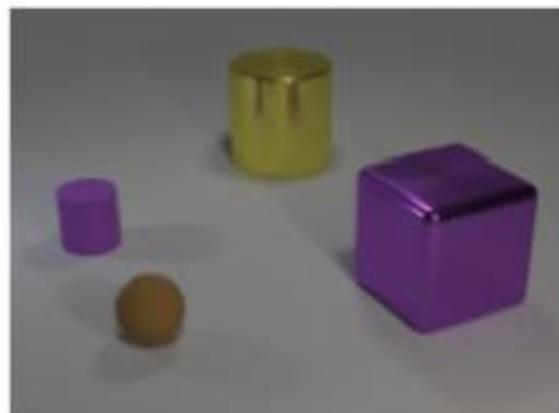
Must be kept busy, intense, highly
intelligent

<https://www.what-dog.net/>

**Аналогично: определение марки
авто по фото**

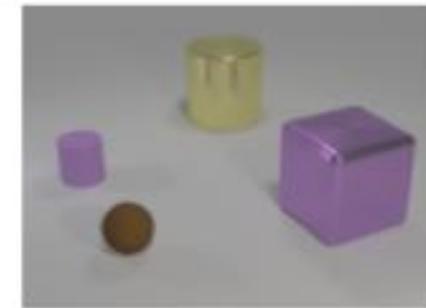
Задачи в понимании изображений Visual reasoning

Original Image:



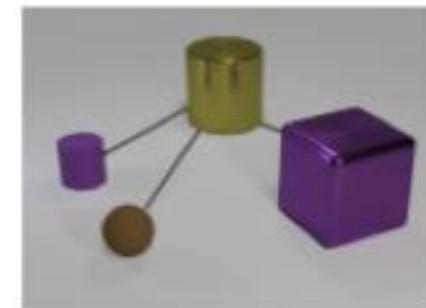
Non-relational question:

What is the size of
the brown sphere?



Relational question:

Are there any rubber
things that have the
same size as the yellow
metallic cylinder?



<https://arxiv.org/pdf/1706.01427.pdf>

Задачи в понимании изображений Visual QA Challenge

			
What vegetable is on the plate? Neural Net: broccoli Ground Truth: broccoli	What color are the shoes on the person's feet ? Neural Net: brown Ground Truth: brown	How many school busses are there? Neural Net: 2 Ground Truth: 2	What sport is this? Neural Net: baseball Ground Truth: baseball
			
What is on top of the refrigerator? Neural Net: magnets Ground Truth: cereal	What uniform is she wearing? Neural Net: shorts Ground Truth: girl scout	What is the table number? Neural Net: 4 Ground Truth: 40	What are people sitting under in the back? Neural Net: bench Ground Truth: tent

Aishwarya Agrawal и др.
«VQA: Visual Question Answering»
<https://arxiv.org/abs/1505.00468>

Задачи в понимании изображений Объяснение изображений (Visual Explanations)

This is a Black-Capped Vireo because...



Description: this bird has a white belly and breast black and white wings with a white wingbar.

Explanation-Dis: this is a bird with a white belly yellow wing and a **black head**.

This is a Crested Auklet because...



Description: this bird is black and white in color with a orange beak and black eye rings.

Explanation-Dis.: this is a black bird with a **white eye** and an orange beak.

This is a White Pelican because...



Description: this bird is white and black in color with a long curved beak and white eye rings.

Explanation: this is a large white bird with a **long neck** and a **large orange beak**.

This is a Geococcyx because...



Description: this bird has a long black bill a white throat and a brown crown.

Explanation-Dis.: this is a black and white spotted bird with a **long tail feather** and a pointed beak.

<https://arxiv.org/pdf/1603.08507.pdf>

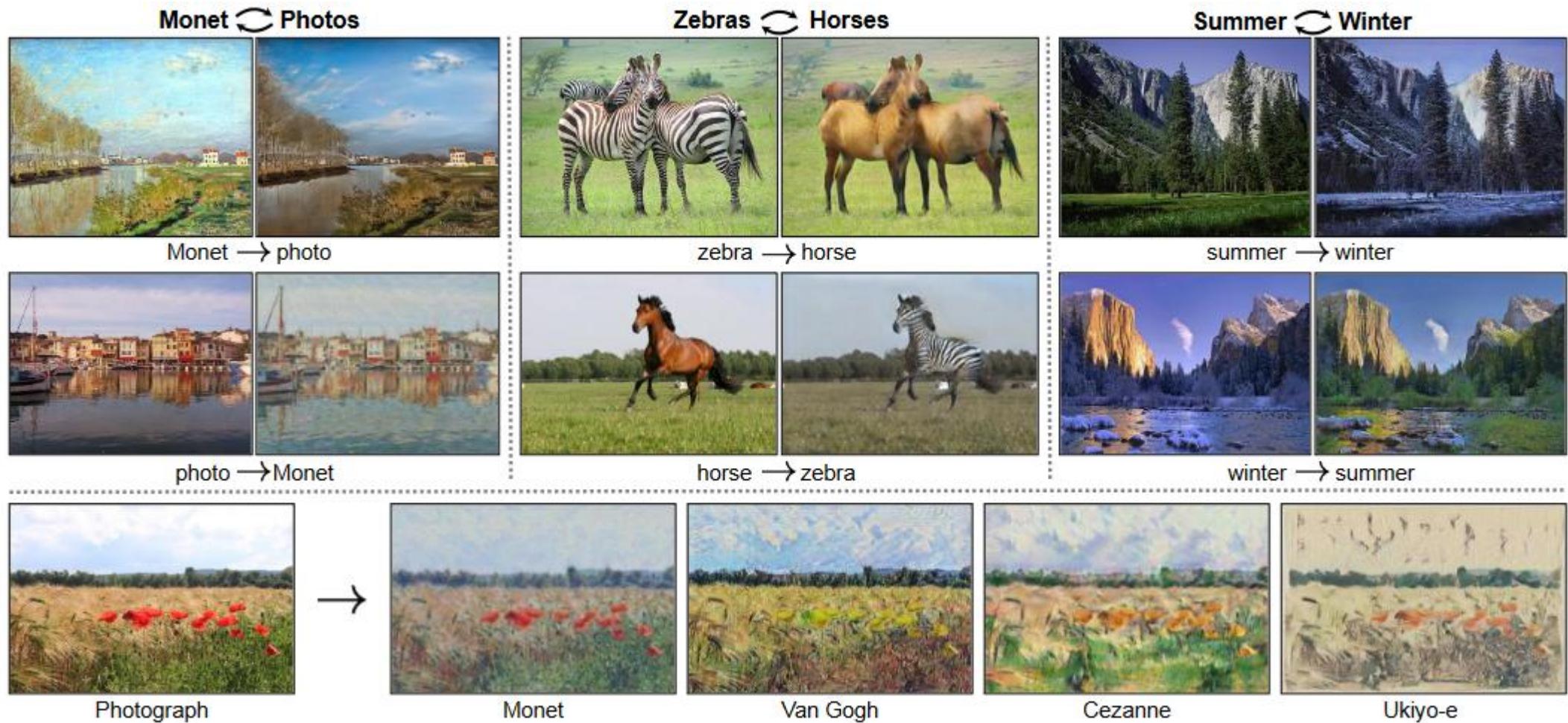
Текст в изображение (text2image)

Text descriptions (content)	Images (style)
The bird has a yellow breast with grey features and a small beak.	
This is a large white bird with black wings and a red head .	
A small bird with a black head and wings and features grey wings.	
This bird has a white breast , brown and white coloring on its head and wings, and a thin pointy beak.	
A small bird with white base and black stripes throughout its belly, head, and feathers.	
A small sized bird that has a cream belly and a short pointed bill.	
This bird is completely red .	
This bird is completely white .	
This is a yellow bird. The wings are bright blue .	

S.Reed «Generative Adversarial Text to Image Synthesis», 2016

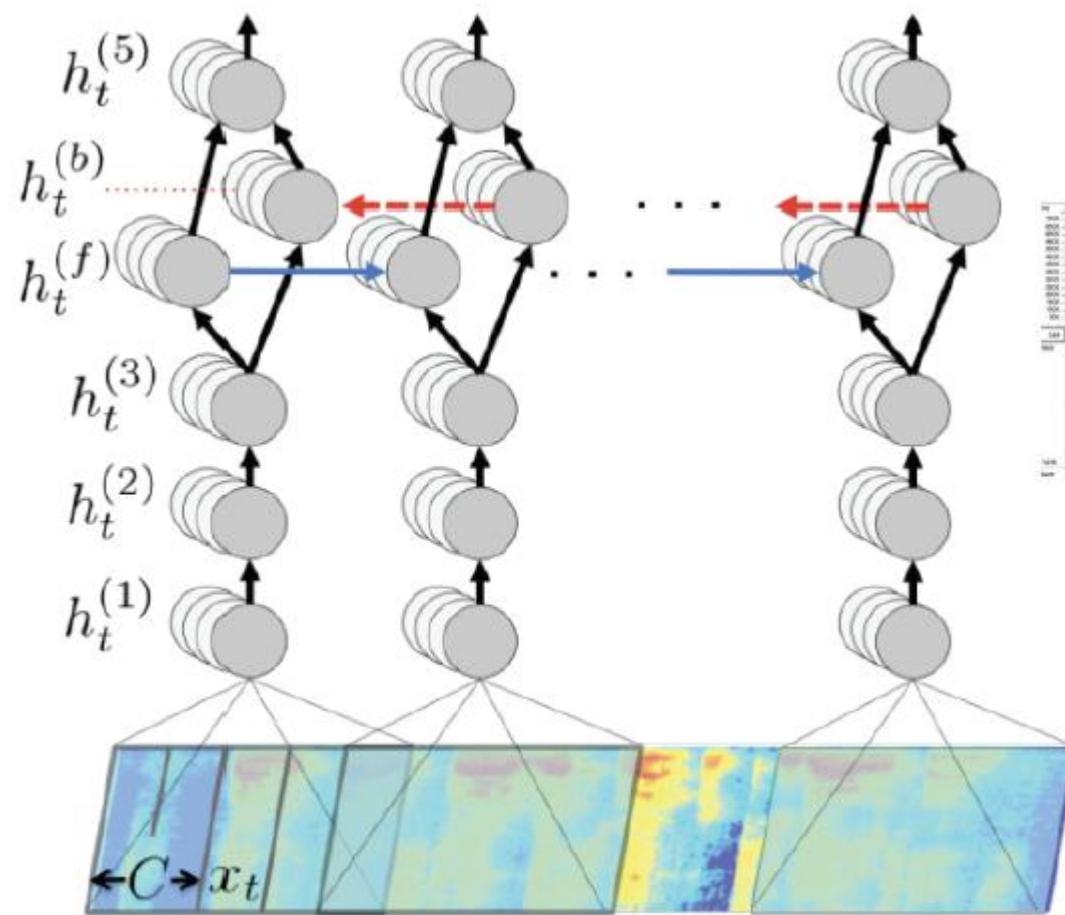
<https://arxiv.org/pdf/1605.05396.pdf>

Изображение в изображение Pix2pix

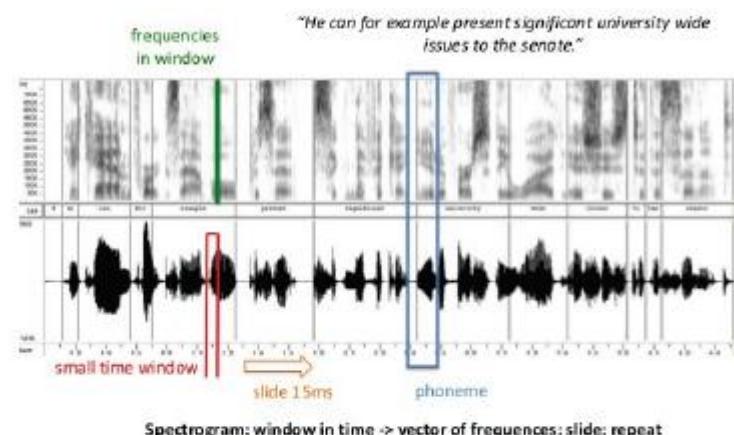


Zhu и др. «Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks» 2018 // <https://arxiv.org/pdf/1703.10593.pdf>

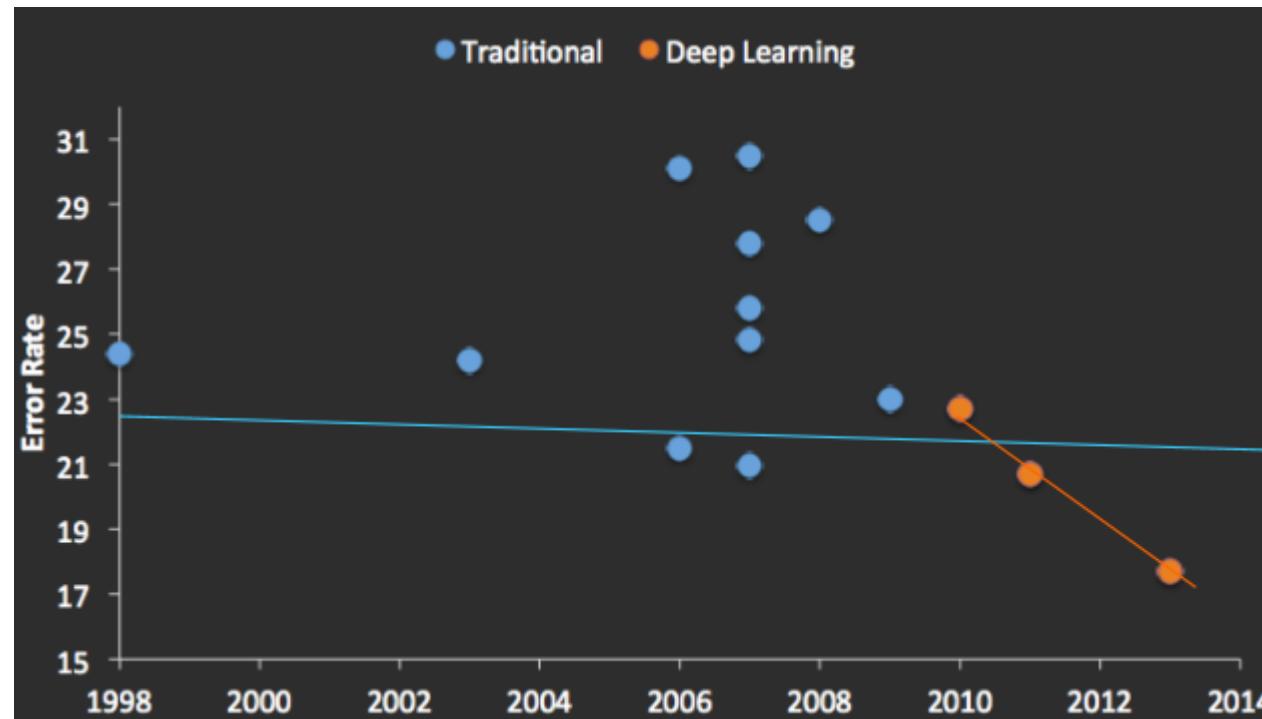
Обработка звуков (речи)



Application: Speech



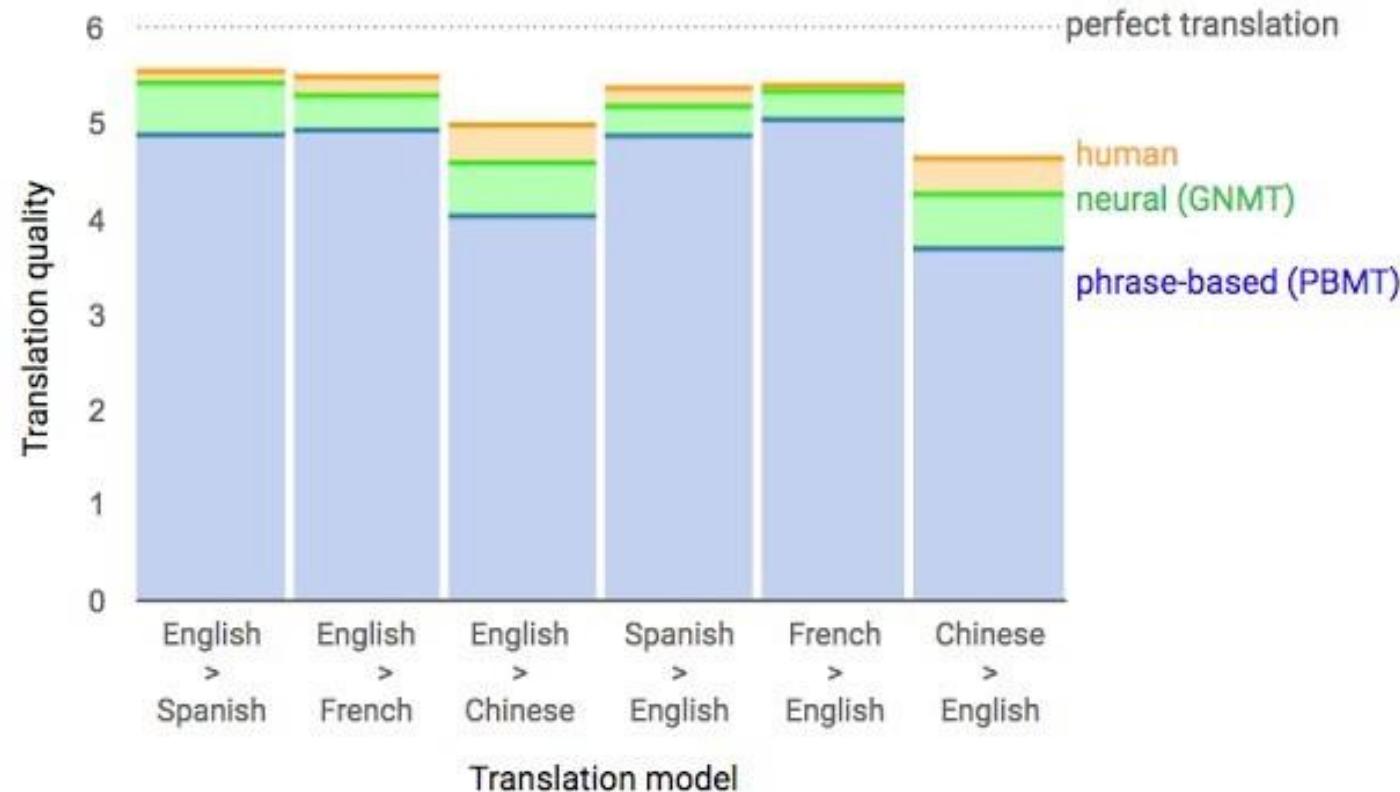
Обработка звуков (речи) TIMIT Speech Recognition



<https://en.wikipedia.org/wiki/TIMIT>

Обработка текста

- Понимание смысла (Language Understanding)
 - Автоматический перевод

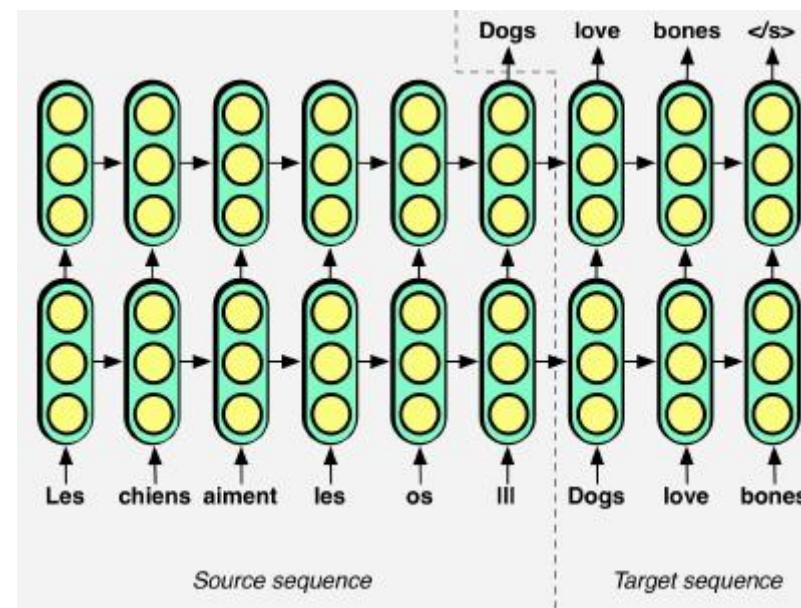


Google's Neural Machine Translation System

<https://arxiv.org/abs/1609.08144>

Обработка текста

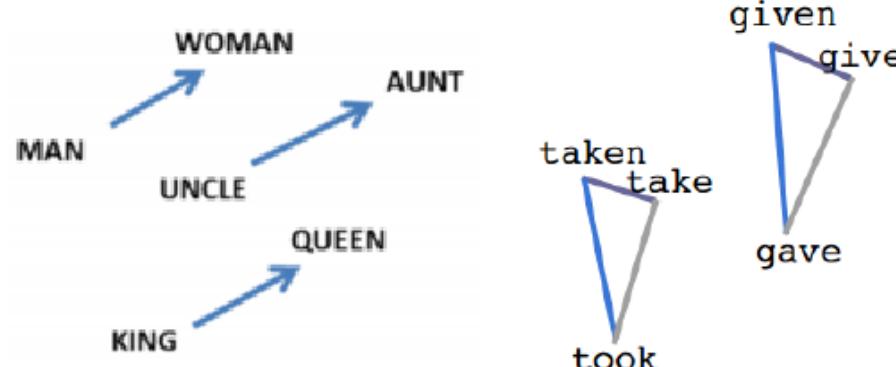
- Диалоговые системы



Иван вчера утром поехал на работу, но встретил Петю и весь день провёл в кино, а сегодня его уволили.
Что делал вчера Иван? Был в кино.
Кого Петя вчера встретил? Ивана.
Сегодня _____ того, кто вчера не работал, а был в кино. уволили

Обработка текста

Векторизация слов: word2vec, GloVe, ...



Woman – Man ≈ Aunt - Uncle
King - Male + Female ≈ Queen
Human - Animal ≈ Ethics

Генерация текста

This is an impressive demo of a recurrent neural network.

This is an impressive demo of a recurrent neural network.

This is an impressive demo of a recurrent neural network.

Задачи в обработке аудио

- **Распознавание речи (Speech Recognition)**

The screenshot shows a news article from the Microsoft Research website. The header features the Microsoft Research logo and a search bar. The main navigation menu includes Home, Our Research, Connections, Careers, Hub, About Us, News, Media Resources, Events, and Community. Below the menu, a breadcrumb trail indicates the article is under News > Speech Recognition Leaps Forward. The title of the article is "Speech Recognition Leaps Forward". It is written by Janie Chang on August 29, 2011, at 12:01 AM PT. The article discusses the Interspeech 2011 conference in Florence, Italy, where researchers from Microsoft Research presented work that dramatically improves real-time, speaker-independent, automatic speech recognition. It highlights the work of Dong Yu and Frank Seide. The final section is titled "The Holy Grail of Speech Recognition".

Microsoft Research

Search Microsoft Research

Home Our Research Connections Careers Hub

About Us News Media Resources Events Community

News > Speech Recognition Leaps Forward

Speech Recognition Leaps Forward

By Janie Chang
August 29, 2011 12:01 AM PT

During [Interspeech 2011](#), the 12th annual Conference of the International Speech Communication Association being held in Florence, Italy, from Aug. 28 to 31, researchers from Microsoft Research will present work that dramatically improves the potential of real-time, speaker-independent, automatic speech recognition.

Dong Yu, researcher at [Microsoft Research Redmond](#), and [Frank Seide](#), senior researcher and research manager with [Microsoft Research Asia](#), have been spearheading this work, and their teams have collaborated on what has developed into a research breakthrough in the use of artificial neural networks for large-vocabulary speech recognition.

The Holy Grail of Speech Recognition

Задачи в обработке видео / аудио

Чтение по губам (Lip reading)



<https://arxiv.org/pdf/1611.05358v1.pdf>

Синхронизация движения губ



http://grail.cs.washington.edu/projects/AudioToObama/siggraph17_obama.pdf

Задачи в обработке видео / аудио

DeepFakes



Задачи в обработке аудио text-to-speech, TTS (Генерация речи по тексту)

WaveNet [van den Oord и др., 2016]

<https://deepmind.com/blog/wavenet-generative-model-raw-audio/>

<https://arxiv.org/pdf/1609.03499.pdf>

Tacotron 2

- произношение
 - громкость
 - скорость
 - интонация

<https://research.googleblog.com/2017/12/tacotron-2-generating-human-like-speech.html>

Синтез музыки

Задачи для автоматизации программирования Pix2Code



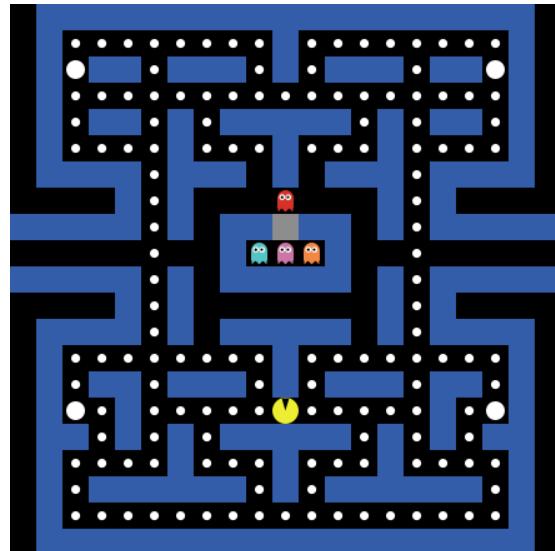
(a) iOS GUI screenshot

```
stack {  
    row {  
        label, switch  
    }  
    row {  
        label, btn-add  
    }  
    row {  
        label, slider, label  
    }  
    row {  
        img, label  
    }  
    footer {  
        btn-more, btn-contact, btn-search, btn-download  
    }  
}
```

(b) Code describing the GUI written in our DSL

Figure 2: An example of a native iOS GUI written in our DSL.

Задачи ИИ в играх Atari, шахматы, го, дота



2013, тоже Google DeepMind
Обучение играть в классические игры 70-80-ых
для игровой консоли Atari 2600 (49 видеоигр, в 22
лучше человека).
НС ничего не знает про правила игры!
Использует изображение на входе и информацию
об очках!



9-15.03.2016
AlphaGo (Google DeepMind) — Ли Седоль
4 – 1

1920 процессоров и 280 графических
процессоров

Задачи ИИ в играх

Alpha Go Zero: Играет без анализа человеческого опыта

<https://arxiv.org/abs/1712.01815>

Обучение без учителя (Unsupervised Learning)

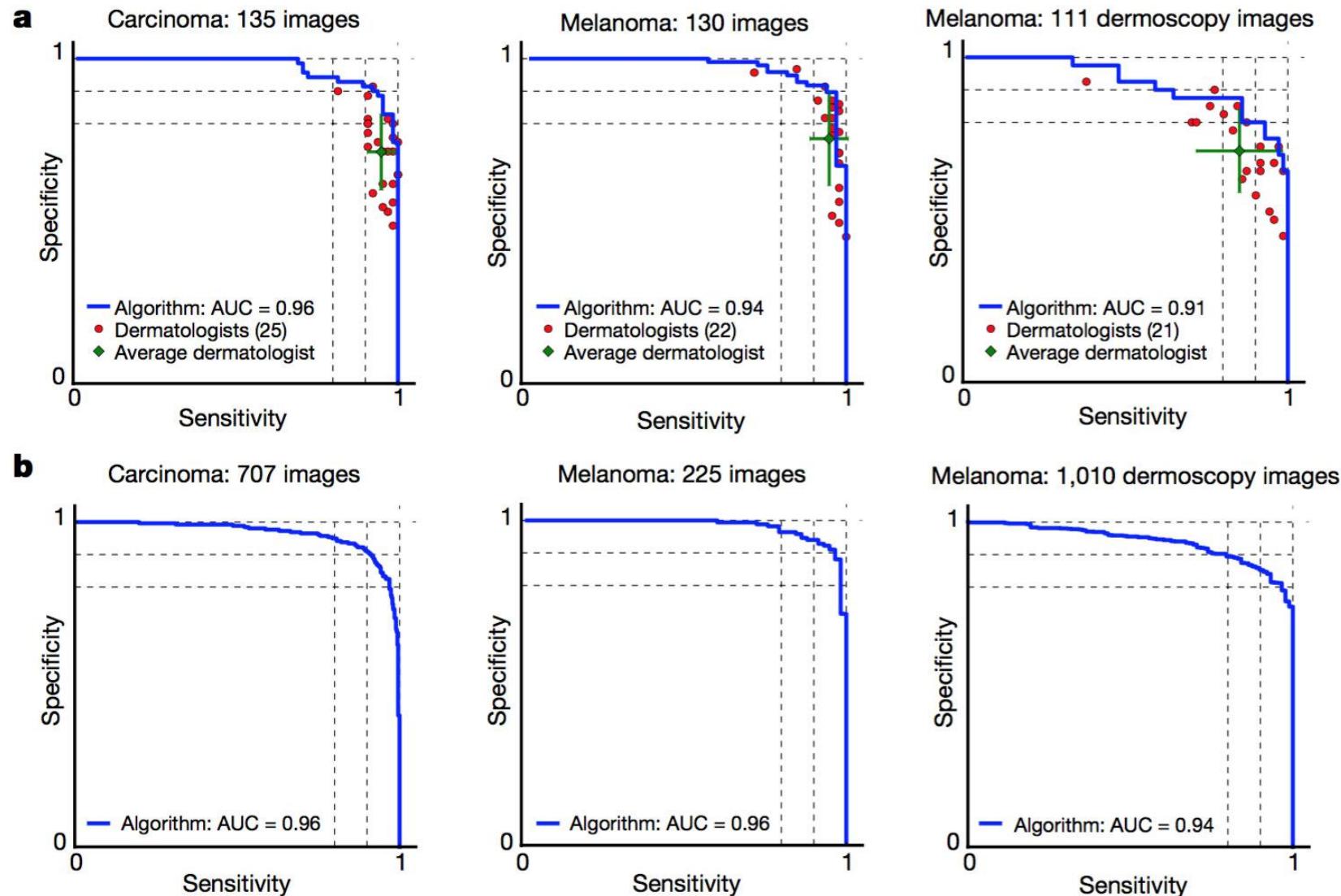
Рекомендательные системы (Recommender Systems)

Медицина (Drug Discovery and Medical)



Медицина (Drug Discovery and Medical)

Дermатология: диагностика рака кожи



<https://cs.stanford.edu/people/esteva/nature/>

Медицина (Drug Discovery and Medical) CNN на низкоразмерной геометрической структуре

AtomNet: A Deep Convolutional Neural Network for Bioactivity Prediction in Structure-based Drug Discovery

Izhar Wallach

Atomwise, Inc.

izhar@atomwise.com

Michael Dzamba

Atomwise, Inc.

misko@atomwise.com

Abraham Heifets

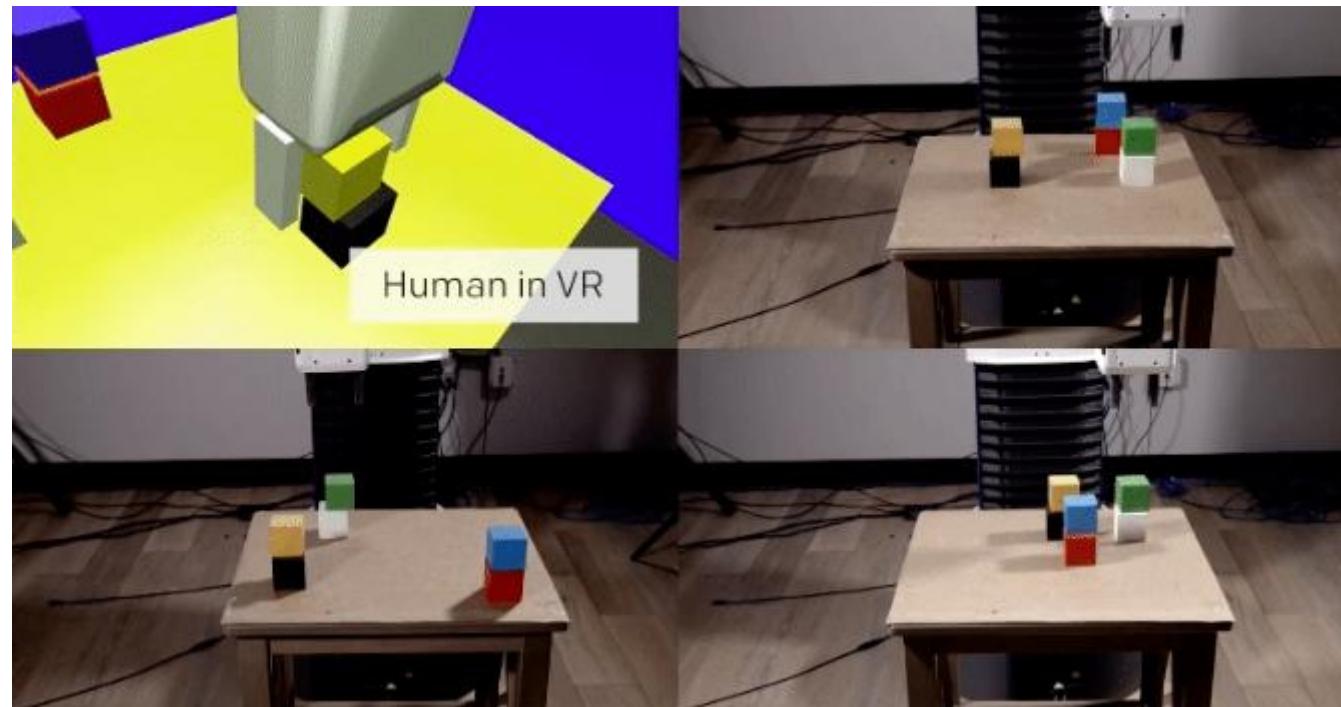
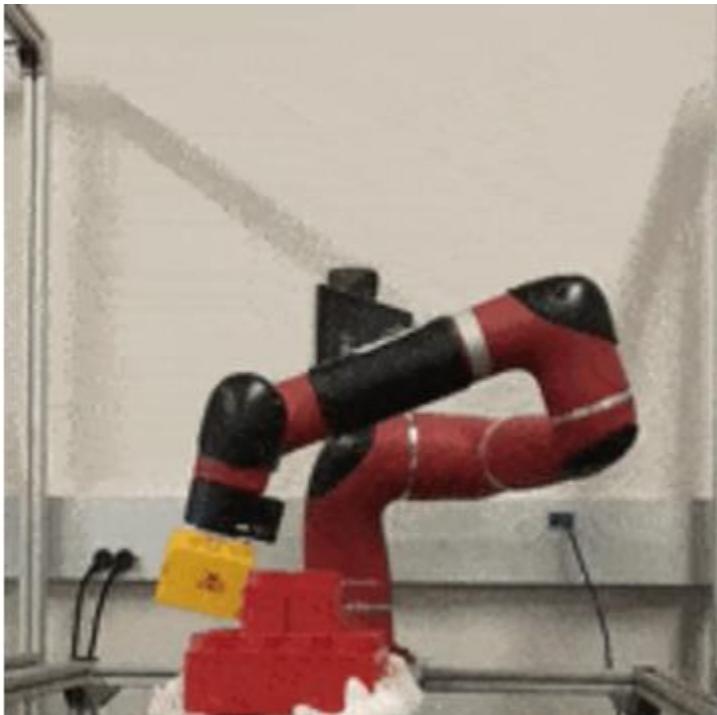
Atomwise, Inc.

abe@atomwise.com

Abstract

Deep convolutional neural networks comprise a subclass of deep neural networks (DNN) with a constrained architecture that leverages the spatial and temporal structure of the domain they model. Convolutional networks achieve the best predictive performance in areas such as speech and image recognition by hierarchically composing simple local features into complex models. Although DNNs have

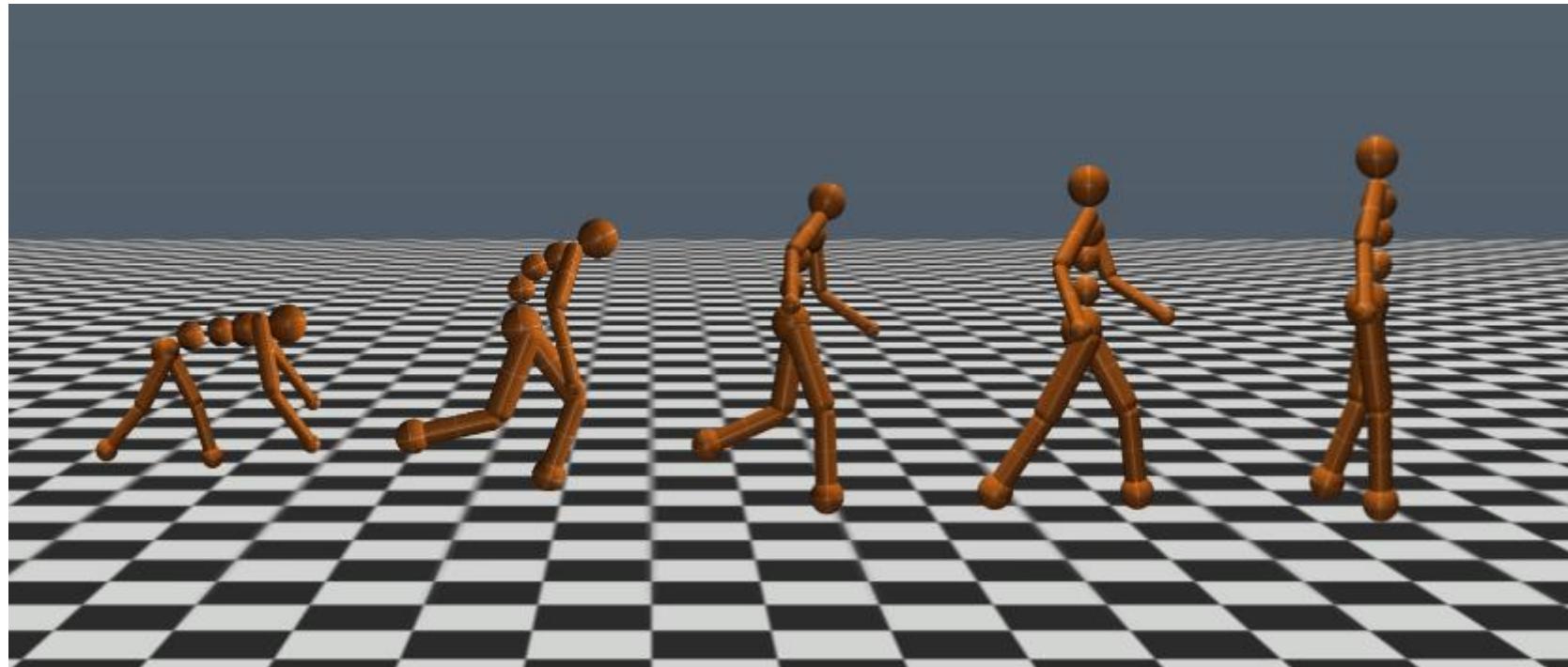
Автомобили-беспилотники, роботы-манипуляторы



<http://bair.berkeley.edu/blog/2017/10/06/soft-q-learning/>

<https://blog.openai.com/robots-that-learn/>

Нейроэволюционные алгоритмы



<https://eng.uber.com/deep-neuroevolution/>

Подбор гардероба

Most compatible



Least compatible



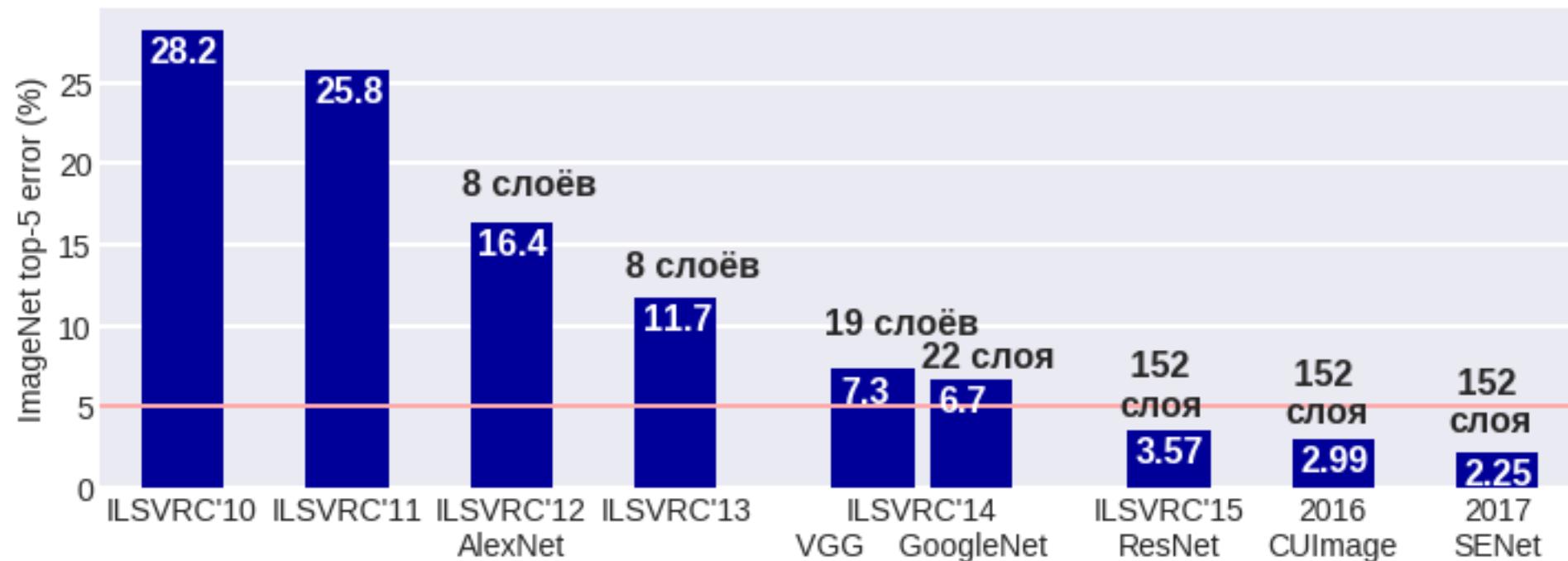
<https://arxiv.org/pdf/1712.02662.pdf>

Реконструкция изображений / панорам



«LayoutNet: Reconstructing the 3D Room Layout from a Single RGB Image», 2018 // <https://arxiv.org/abs/1803.08999>

Революция в машинном обучении



Причины прогресса

- **Интенсивные исследования в ML (+ обмен идеями)**
- **Огромные наборы данных (+ интернет)**
- **Hardware (CPUs, GPUs,)**
- **Новые приёмы в обучении (Dropout, BN и т.п.)**
- **Архитектурные: возможность инвариантности к некоторым преобразованиям (например масштабу)**
- **Интерес бизнеса**

Графический процессор	Год выпуска	Техпроцесс	Гигафлопсов, для 32-разрядных вычислений	Гигафлопсов, для 64-разрядных вычислений
GeForce GTX 1080 (GP104)	2016	16 нм	8873 (Boost)	277 (Boost)
GeForce GTX 780 Ti (GK110-425-B1)	2013	28 нм	5046	210
GeForce GTX 680 (GK104)	2012	28 нм	3090,4	128,8
Radeon HD 7970 (Tahiti)	2012	28 нм	3789	947-1024
Radeon HD 6990 (2xCayman)	2011	40 нм	2x2550 = 5100	2x637 = 1274

<https://ru.wikipedia.org/wiki/FLOPS>

Проблемы нейросетей

- **Переобучение, большое число весов**
 - **Разделение параметров**
 - **Использование структуры данных (архитектуры)**
 - **Регуляризация**
- **Нестабильное обучение, долгое обучение, плохие решения**
 - **новые методы оптимизации**
 - **эвристические приёмы**
 - **архитектуры**
 - **GPU, кластеры GPU**

Минусы нейросетей

- Не учитывают «естественный контекст» (пока не ИИ)
- Пока проблемы с интерпретаций (почему такой ответ)
- Ресурсоёмкость
- Проблемы с выбором архитектуры

сеть	ошибка	время
ResNet18	0.108	2.5 дня
ResNet50	0.07	5 дней
ResNet101	0.062	1 неделя

AlphaGo – 1920 CPUs, 280 GPUs, электричество = 3000\$

История

1950–70 – «коннективизм», модель нейрона

1970–80 – зима

1980–1990 – экспертные системы, обратное распространение

1990–2000 – зима

1997 – LSTM (Hochreiter, Schmidhuber)

1998 – распознавание символов ConvNets (LeCun)

2006 – Deep Boltzmann Machines (Hinton, Salakhutdinov)

2009 – распознавание речи

2012 – Победа на ImageNet ConvNets (Krizhevsky и др.)

ПО

	Language(s)	License	Main backer
PyTorch	Python	BSD	Facebook
Caffe2	C++, Python	Apache	Facebook
TensorFlow	Python, C++	Apache	Google
MXNet	Python, C++, R, Scala	Apache	Amazon
CNTK	Python, C++	MIT	Microsoft
Torch	Lua	BSD	Facebook
Theano	Python	BSD	U. of Montreal
Caffe	C++	BSD 2 clauses	U. of CA, Berkeley

MNIST

28×28 изображений (оттенки серого), 60k обучение, 10k тест

1 1 8 3 6 1 0 3 1 0 0 1 1 2 7 3 0 4 6 5
2 6 4 7 1 8 9 9 3 0 7 1 0 2 0 3 5 4 6 5
8 6 3 7 5 8 0 9 1 0 3 1 2 2 3 3 6 4 7 5
0 6 2 7 9 8 5 9 2 1 1 4 4 5 6 4 1 2 5 3
9 3 9 0 5 9 6 5 7 4 1 3 4 0 4 8 0 4 3 6
8 7 6 0 9 7 5 7 2 1 1 6 8 9 4 1 5 2 2 9
0 3 9 6 7 2 0 3 5 4 3 6 5 8 9 5 4 7 4 2
1 3 4 8 9 1 9 2 8 7 9 1 8 7 4 1 3 1 1 0
2 3 9 4 9 2 1 6 8 4 1 7 4 4 9 2 8 7 2 4
4 2 1 9 7 2 8 7 6 9 2 2 3 8 1 6 5 1 1 0
4 0 9 1 1 2 4 3 2 7 3 8 6 9 0 5 6 0 7 6
2 6 4 5 8 3 1 5 1 9 2 7 4 4 4 8 1 5 8 9
5 6 7 9 9 3 7 0 9 0 6 6 2 3 9 0 7 5 4 8
0 9 4 1 2 8 7 1 2 6 1 0 3 0 1 1 8 2 0 3
9 4 0 5 0 6 1 7 7 8 1 9 2 0 5 1 2 2 7 3
5 4 4 7 1 8 3 9 6 0 3 1 1 2 6 3 5 7 6 8
2 9 5 8 5 7 4 1 1 3 1 7 5 5 5 2 5 8 7 0
9 7 7 5 0 9 0 0 6 9 2 4 8 1 6 1 6 5 1 8
3 4 0 5 5 8 3 6 2 3 9 2 1 1 5 2 1 3 2 8
7 3 7 2 4 6 9 7 2 4 2 8 1 1 3 8 4 0 6 5

ImageNet



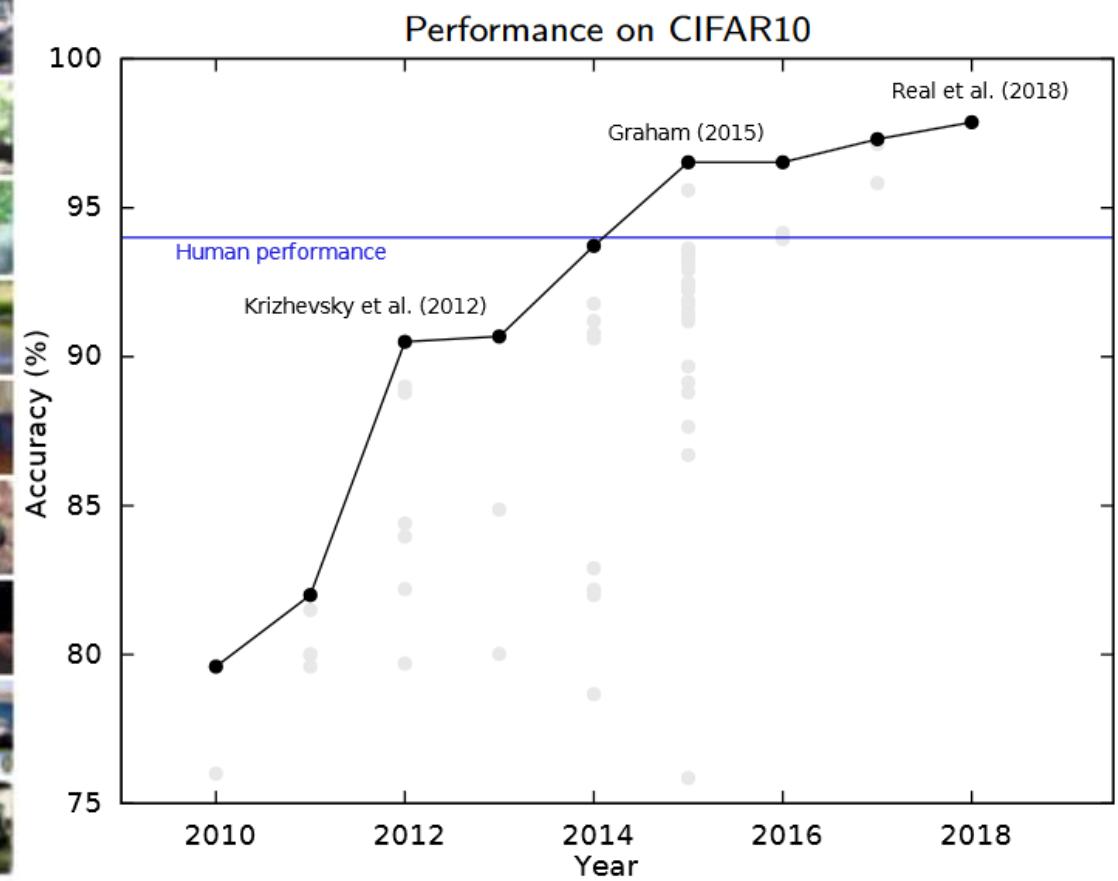
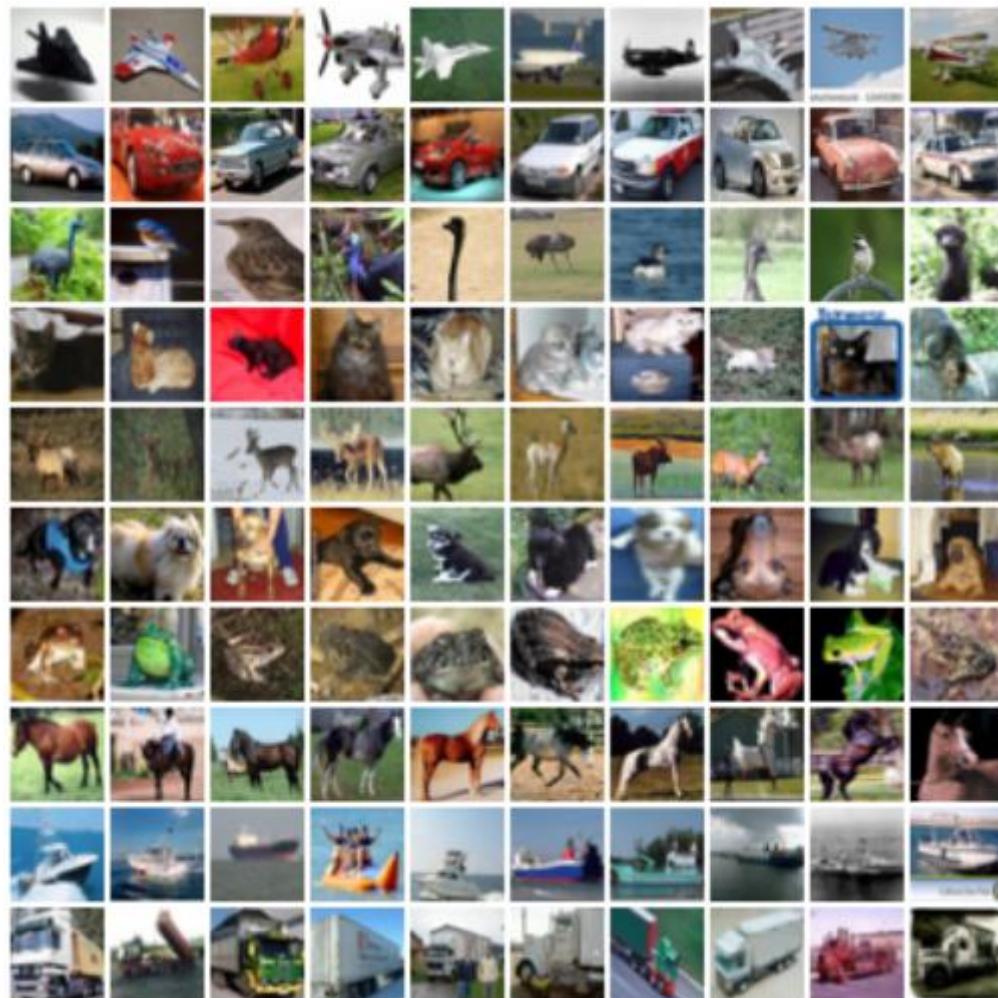
Класс «Молотки» 1.2 млн. 225x 225-изображений, 1000 классов



<http://image-net.org/challenges/LSVRC/2014/browse-synsets>

CIFAR10

32×32 цветные, 50k – обучение, 10k – тест



Places

places



<http://places.csail.mit.edu/>

bedroom



mountain



Датасеты

MNIST

классификация рукописных цифр

CIFAR-10

классификация небольших изображений по десяти классам:
самолет, автомобиль, птица, кошка, олень, собака, лягушка, лошадь,
корабль и грузовик

IMAGENET

выборка для обучения нейросетей

Глубокое обучение (Deep learning) – обучение многослойных моделей:

- сетей прямого распространения
- многослойных графических моделей
(deep belief network, deep Boltzmann machine)

генерация признаков → модель

Классическое МО

генерация признаков → нелинейности
(kernel), преобразования (PCA), селекция →
модель

Глубокое обучение

модель

Пример: MNIST на Pytorch

```
model = nn.Sequential(  
    nn.Conv2d(1, 32, 5), nn.MaxPool2d(3), nn.ReLU(),  
    nn.Conv2d(32, 64, 5), nn.MaxPool2d(2), nn.ReLU(),  
    Flattener(),  
    nn.Linear(256, 200), nn.ReLU(),  
    nn.Linear(200, 10)  
)  
  
nb_epochs, batch_size = 10, 100  
criterion = nn.CrossEntropyLoss()  
optimizer = torch.optim.SGD(model.parameters(), lr = 0.1)  
  
model.to(device)  
criterion.to(device)  
train_input, train_target = train_input.to(device), train_target.to(device)  
  
mu, std = train_input.mean(), train_input.std()  
train_input.sub_(mu).div_(std)  
  
for e in range(nb_epochs):  
    for input, target in zip(train_input.split(batch_size), train_target.split(batch_size)):  
        output = model(input)  
        loss = criterion(output, target)  
        optimizer.zero_grad()  
        loss.backward()  
        optimizer.step()
```

~7s (GTX1080), ~1% test error

Другие курсы

Классика DL CS231n:

«Convolutional Neural Networks for Visual Recognition from Stanford»

<http://cs231n.stanford.edu/syllabus.html>

**Hugo Larochelle Neural Networks // Deep Learning Summer School,
Montreal 2016**

http://videolectures.net/deeplearning2016_larochelle_neural_networks/

**Антон Осокин Материалы курса «Глубинное обучение»// ФКН ВШЭ,
2018 https://github.com/aosokin/DL_CSHSE_spring2018**

Лучшая книга по глубокому обучению

**Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville «Deep Learning» An MIT
Press book <http://www.deeplearningbook.org/>**

Документация

<https://www.tensorflow.org/tutorials/>

<https://pytorch.org/tutorials/>