

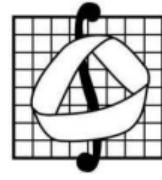
# Введение в искусственный интеллект. Современное компьютерное зрение

## Тема: Методы обнаружения объектов

Бабин Д.Н., Иванов И.Е.

кафедра Математической Теории Интеллектуальных Систем

15 апреля 2025 г.



# План лекции

- ① Постановка задачи
- ② Метрики качества
- ③ Двухпроходные методы обнаружения
- ④ Однопроходные методы обнаружения



## Недостатки классификации



## Недостатки классификации

- 1 Классификация затруднена, если на одном изображении есть несколько объектов разных типов



## Недостатки классификации

- ① Классификация затруднена, если на одном изображении есть несколько объектов разных типов
- ② Классификация не говорит о том, есть ли на изображении несколько объектов одного типа



## Недостатки классификации

- ① Классификация затруднена, если на одном изображении есть несколько объектов разных типов
- ② Классификация не говорит о том, есть ли на изображении несколько объектов одного типа
- ③ Только классификации недостаточно для большинства приложений



## Недостатки классификации

- ① Классификация затруднена, если на одном изображении есть несколько объектов разных типов
- ② Классификация не говорит о том, есть ли на изображении несколько объектов одного типа
- ③ Только классификации недостаточно для большинства приложений

## Классификация vs Обнаружение

Главное отличие задачи детектирования от задачи классификации в том, что надо не только сказать есть ли объект на изображении, но и локализовать область нахождения объекта. Если объектов несколько, то требуется найти их все.



## Формальное определение

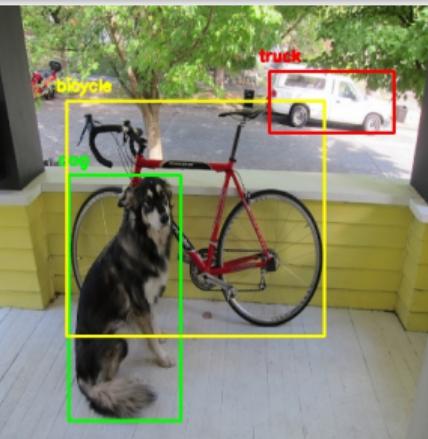
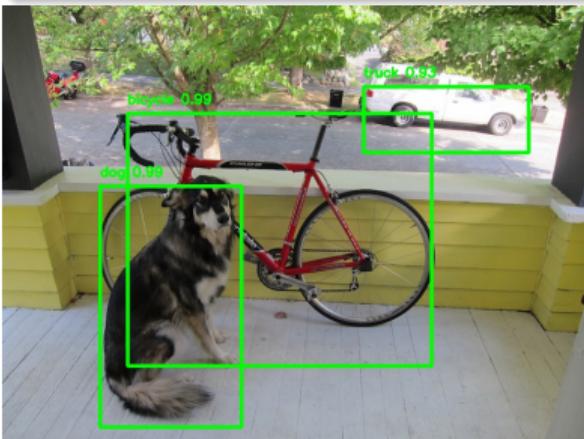
- Вход: изображение
- Выход (soft): набор троек <тип объекта (object type), уверенность(confidence), прямоугольник (bounding box)>
- Для реальных приложений важнее hard выход: набор пар <тип объекта, прямоугольник>, но для сравнения детекторов нужен soft-выход.



# Формальное определение обнаружения объектов

## Формальное определение

- Вход: изображение
- Выход (soft): набор троек <тип объекта (object type), уверенность(confidence), прямоугольник (bounding box)>
- Для реальных приложений важнее hard выход: набор пар <тип объекта, прямоугольник>, но для сравнения детекторов нужен soft-выход.



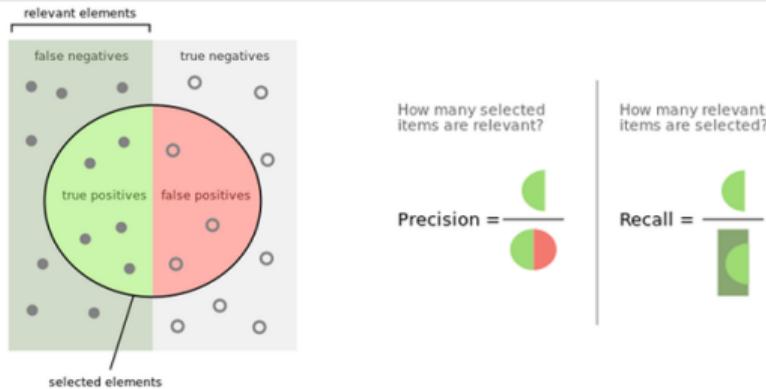
# Как понять, что один один метод обнаружения лучше другого?



# Mean Average Precision (mAP): Precision, Recall<sup>1</sup>

## Определение

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}, \quad Recall = \frac{TP}{TP+FN}$$



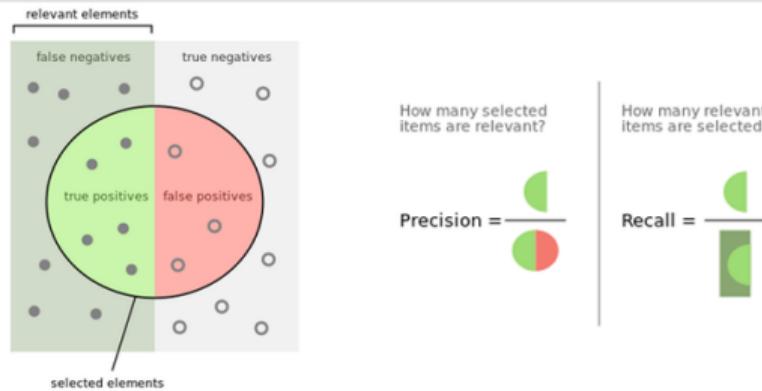
<sup>1</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Precision\\_and\\_recall](https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_and_recall)



# Mean Average Precision (mAP): Precision, Recall<sup>1</sup>

## Определение

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}, \quad Recall = \frac{TP}{TP+FN}$$



- В случае диагностики заболевания важна полнота (recall), то есть процент найденных заболевших.

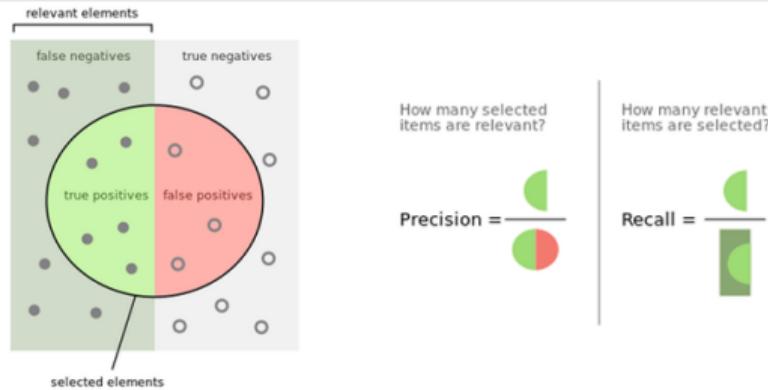
<sup>1</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Precision\\_and\\_recall](https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_and_recall)



# Mean Average Precision (mAP): Precision, Recall<sup>1</sup>

## Определение

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}, \quad Recall = \frac{TP}{TP+FN}$$



- В случае диагностики заболевания важна полнота (recall), то есть процент найденных заболевших.
- В случае распознавания номеров автомобиля для выписывания штрафа важнее точность (precision), чтобы было меньше споров и разбирательств

<sup>1</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Precision\\_and\\_recall](https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_and_recall)



# Mean Average Precision (mAP)

## Определение

$$p = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$r = \frac{TP}{TP + FN}$$

## Определение mAP

$$AP = \int_0^1 p(r)dr$$

$$mAP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AP_i,$$

где  $n$  — количество классов, а  $AP_i$  — AP для  $i$ -го класса.

# TP, FP и FN для задачи обнаружения<sup>2</sup>

## Проблема

Для того, чтобы поспользоваться формулами для mAP необходимо определить TP, FP и FN



- Ground truth
- Prediction

$$IoU = \frac{\text{area of overlap}}{\text{area of union}}$$



## Intersection over Union

$$IoU = \frac{\text{area of overlap}}{\text{area of union}}$$

## True Positive

$$IoU > 0.5$$

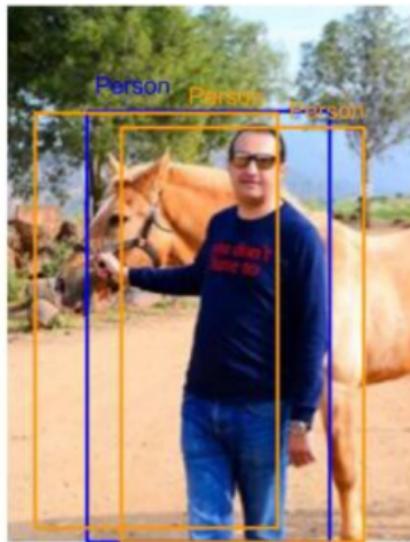
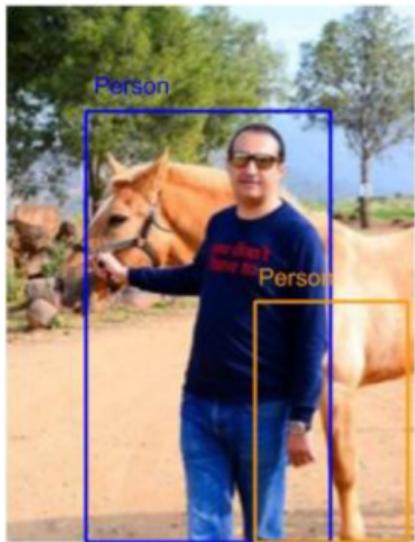
<sup>2</sup>[https://medium.com/@jonathan\\_hui/map-mean-average-precision-for-object-detection-45c121a31173](https://medium.com/@jonathan_hui/map-mean-average-precision-for-object-detection-45c121a31173)



# TP, FP и FN для задачи обнаружения

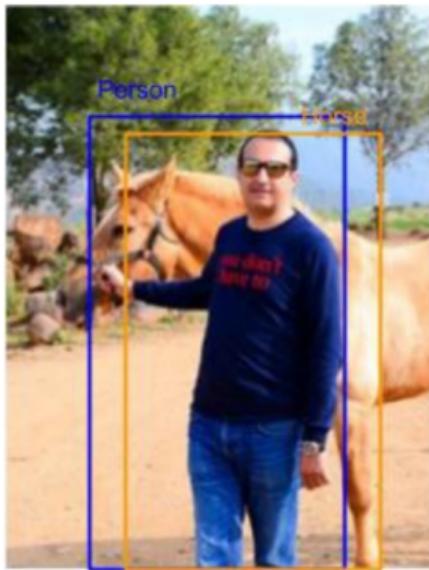
## False Positive

- $\text{IoU} < 0.5$  или нет пересечения
- Дубликат



## False Negative

- Нет обнаружения
- IoU > 0.5 и неправильно определён класс объекта



# Пример расчета AP

## Пример

На фотографии изображено 5 яблок. Детектор выдал 10 прямоугольников. Отсортируем их в порядке убывания уверенности алгоритма обнаружения. Получилась таблица, для каждой строчки которой, можно посчитать точность и полноту

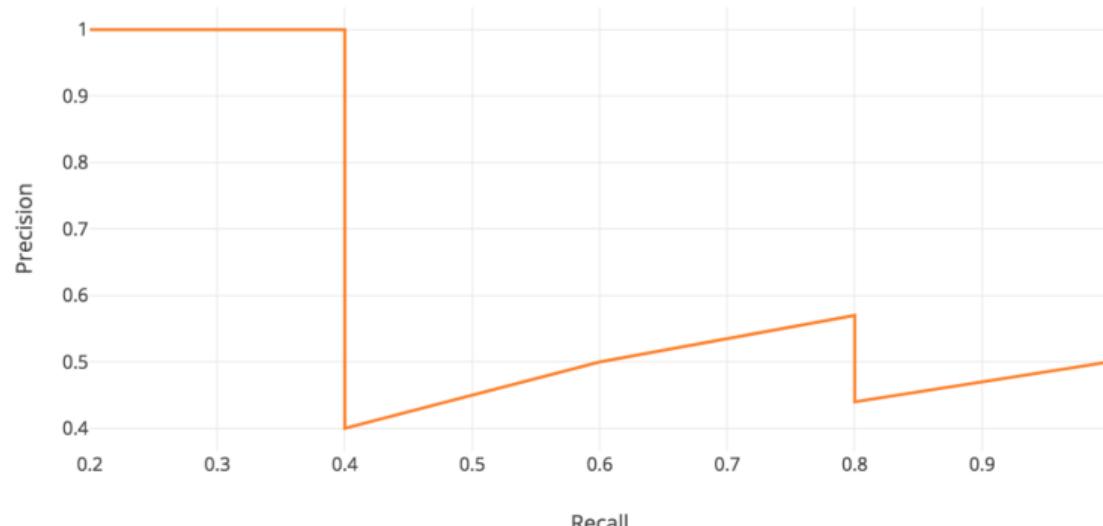
Rank	Correct?	Precision	Recall
1	True	1.0	0.2
2	True	1.0	0.4
3	False	0.67	0.4
4	False	0.5	0.4
5	False	0.4	0.4
6	True	0.5	0.6
7	True	0.57	0.8
8	False	0.5	0.8
9	False	0.44	0.8
10	True	0.5	1.0



# Пример расчета AP

## Пример

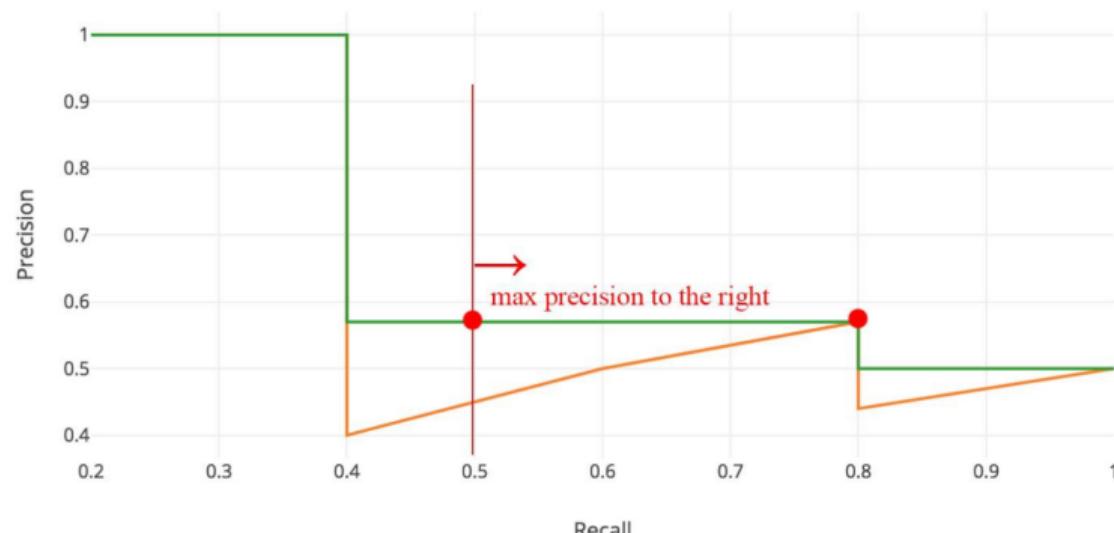
На фотографии изображено 5 яблок. Детектор выдал 10 прямоугольников. Отсортируем их в порядке убывания уверенности алгоритма обнаружения. Получилась таблица, для каждой строчки которой, можно посчитать точность и полноту



# Пример расчета AP

## Пример

На фотографии изображено 5 яблок. Детектор выдал 10 прямоугольников. Отсортируем их в порядке убывания уверенности алгоритма обнаружения. Получилась таблица, для каждой строчки которой, можно посчитать точность и полноту



## Интерполированная точность

На последнем графике была представлена интерполированная точность, которая формально определяется формулой

$$p_{interp}(r) = \max_{\hat{r}: \hat{r} > r} p(\hat{r})$$



## Интерполированная точность

На последнем графике была представлена интерполированная точность, которая формально определяется формулой

$$p_{interp}(r) = \max_{\hat{r}: \hat{r} > r} p(\hat{r})$$

Интуиция: более стабильная значение при небольших колебаниях уверенности



# Варианты подсчета AP

## Интерполированная точность

На последнем графике была представлена интерполированная точность, которая формально определяется формулой

$$p_{interp}(r) = \max_{\hat{r}: \hat{r} > r} p(\hat{r})$$

Интуиция: более стабильная значение при небольших колебаниях уверенности

## Приближенное вычисление интеграла

Иногда используют следующую формулу для подсчета AP ( PASCAL VOC)

$$AP = \frac{1}{11} \sum_{r \in \{0.0, 0.1, \dots, 1.0\}} p_{interp}(r)$$

# Варианты подсчета AP

## Интерполированная точность

На последнем графике была представлена интерполированная точность, которая формально определяется формулой

$$p_{interp}(r) = \max_{\hat{r}: \hat{r} > r} p(\hat{r})$$

Интуиция: более стабильная значение при небольших колебаниях уверенности

## Приближенное вычисление интеграла

Иногда используют следующую формулу для подсчета AP ( PASCAL VOC)

$$AP = \frac{1}{11} \sum_{r \in \{0.0, 0.1, \dots, 1.0\}} p_{interp}(r)$$

В более поздних версиях соревнований использовалась точная формула

## Усреднение AP по различным порогам IoU

$$AP = \frac{1}{10}(AP_{0.5} + AP_{0.55} + AP_{0.6} + AP_{0.65} + AP_{0.7} + AP_{0.75} + AP_{0.8} + AP_{0.85} + AP_{0.9} + AP_{0.95})$$



# Average Recall (AR)

## AR

AR — это среднее значение полноты в зависимости от IoU

$$AR = 2 \int_{0.5}^{1.0} R(IoU) d(IoU)$$



# Нейросетевой детектор: R-CNN (Regions with CNN features)<sup>3</sup>

## Идея

Детектор состоит из следующих модулей:

- ❶ Предсказыватель объектов (около 2000 кандидатов на изображение)

<sup>3</sup>R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In CVPR, 2014, <https://arxiv.org/pdf/1311.2524.pdf>

## Идея

Детектор состоит из следующих модулей:

- ❶ Предсказыватель объектов (около 2000 кандидатов на изображение)
- ❷ Классификатор (без классификационной головы) для извлечения признаков для каждого кандидата

<sup>3</sup>R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In CVPR, 2014, <https://arxiv.org/pdf/1311.2524.pdf>

# Нейросетевой детектор: R-CNN (Regions with CNN features)<sup>3</sup>

## Идея

Детектор состоит из следующих модулей:

- ① Предсказыватель объектов (около 2000 кандидатов на изображение)
- ② Классификатор (без классификационной головы) для извлечения признаков для каждого кандидата
- ③ Линейный SVM для классификации кандидата

---

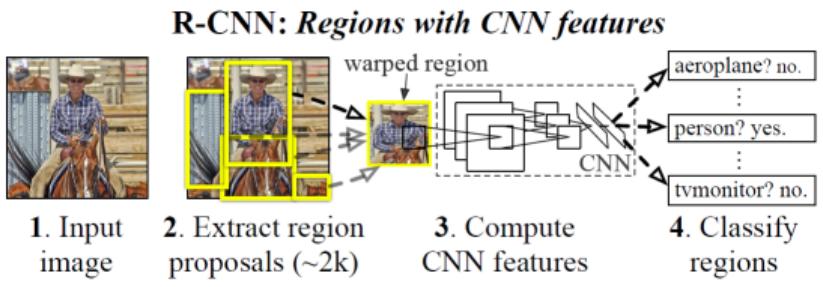
<sup>3</sup>R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In CVPR, 2014, <https://arxiv.org/pdf/1311.2524.pdf>

# Нейросетевой детектор: R-CNN (Regions with CNN features)<sup>3</sup>

## Идея

Детектор состоит из следующих модулей:

- ① Предсказыватель объектов (около 2000 кандидатов на изображение)
- ② Классификатор (без классификационной головы) для извлечения признаков для каждого кандидата
- ③ Линейный SVM для классификации кандидата



<sup>3</sup>R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In CVPR, 2014, <https://arxiv.org/pdf/1311.2524.pdf>

# R-CNN: Bounding Box Regression

## Уточнение обнаружения: постановка задачи

Пусть  $P^i = (P_x^i, P_y^i, P_w^i, P_h^i)$  — результаты алгоритма предсказывания детекций. Тогда будем искать

$$\begin{aligned}\hat{G}_x &= P_w d_x(P) + P_x, \quad \hat{G}_y = P_h d_y(P) + P_y, \\ \hat{G}_w &= P_w \exp(d_w(P)), \quad \hat{G}_h = P_h \exp(d_h(P)),\end{aligned}$$

где  $d_*(P) = w_*^T \varphi(P)$  — линейное преобразование на признаках для  $P$

## Решение: гребневая регрессия

$$w_* = \arg \min_{\hat{w}_*} \sum_i (t_*^i - \hat{w}_*^T \varphi(P^i))^2 + \lambda \|\hat{w}_*\|^2,$$

где  $t_x = \frac{G_x - P_x}{P_w}$ ,  $t_y = \frac{G_y - P_y}{P_h}$ ,  $t_w = \log(\frac{G_w}{P_w})$ ,  $t_h = \log(\frac{G_h}{P_h})$

## Алгоритм предсказания детекций

Алгоритм selective search <sup>a</sup> не настраивается на данные

---

<sup>a</sup>J. Uijlings, K. van de Sande, T. Gevers, and A. Smeulders. Selective search for object recognition. IJCV, 2013

## Алгоритм предсказания детекций

Алгоритм selective search <sup>a</sup> не настраивается на данные

---

<sup>a</sup>J. Uijlings, K. van de Sande, T. Gevers, and A. Smeulders. Selective search for object recognition. IJCV, 2013

## Backbone для извлечения признаков

- ① В качестве начально инициализации берётся классификационная сеть обученная на 1000 классах из ImageNet
- ② Удаляется последний слой и заменяется на слой нужного размера со случайной инициализацией (добавляется новый класс фон)
- ③ Обучение происходит тех изображениях, у которых  $\text{IoU} > 0.5$  с разметкой, остальные рассматриваются, как негативные

## Классификатор категорий

- ➊ Для каждого класса обучается свой линейный SVM (one vs rest)
- ➋ Для отделения негативных примеров используется другой порог —  $\text{IoU} < 0.3$  (параметр подбирается по валидации и от него очень сильно зависит финальный результат)



## Классификатор категорий

- ➊ Для каждого класса обучается свой линейный SVM (one vs rest)
- ➋ Для отделения негативных примеров используется другой порог —  $\text{IoU} < 0.3$  (параметр подбирается по валидации и от него очень сильно зависит финальный результат)

## Корректировка детекций (bounding box regression)

- ➌ Гребневая регрессия

# R-CNN: Результаты

<b>Detector</b>	<b>VOC2007, test, mAP</b>
R-CNN (AlexNet)	54.2
R-CNN (AlexNet) BB	58.5
R-CNN (VGG)	62.2
R-CNN (VGG) BB	66.0



## Достоинства

- ① Один из лучших методов на момент написания статьи
- ② Bounding box regression улучшает качество
- ③ Замена backbone на более продвинутый улучшает качество

## Достоинства

- ① Один из лучших методов на момент написания статьи
- ② Bounding box regression улучшает качество
- ③ Замена backbone на более продвинутый улучшает качество

## Недостатки

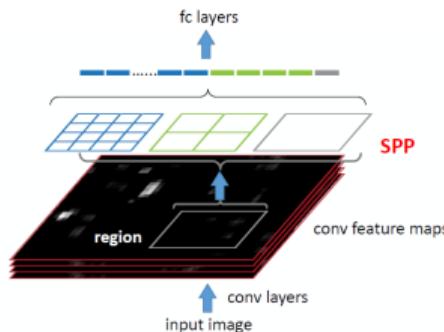
- ① Самый главный недостаток — скорость работы (огромный overhead по вычислениям, так как одни и те же куски картинки обрабатываются по много раз)
- ② Сложное многоэтапное обучение
- ③ Обучение требует много дискового пространства и вычислительных ресурсов
- ④ Selective search (алгоритм поиска кандидатов) — необучаемый алгоритм



# Нейросетевой детектор: SPPnet<sup>4</sup>

## Идея

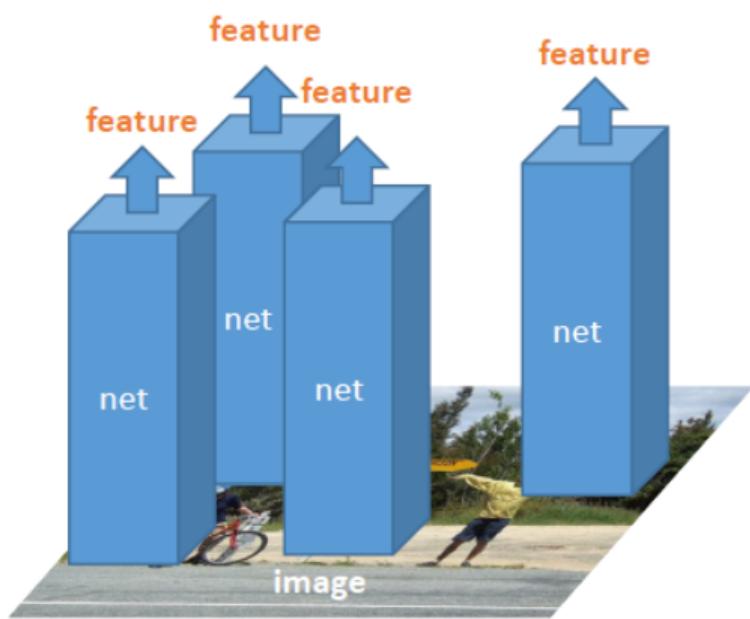
- ➊ Новый слой Spatial Pyramid Pooling (SPP) позволяет обрабатывать изображения разного размера
- ➋ Это позволяет делать обучение с разным размером входа
- ➌ Это даёт улучшение на задаче классификации и значительное ускорение при использовании R-CNN



<sup>4</sup>K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition. In ECCV, 2014, <https://arxiv.org/pdf/1506.01497.pdf>

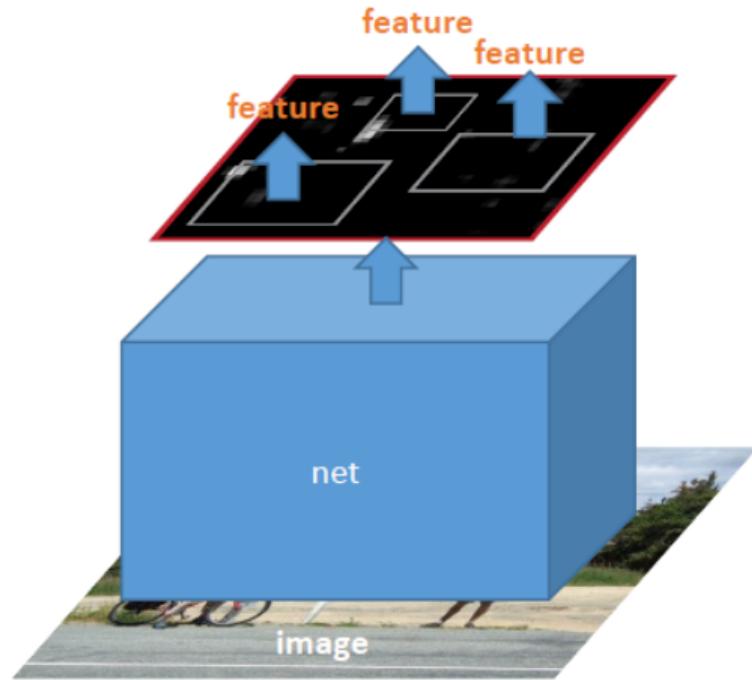


# R-CNN vs SPPnet<sup>5</sup>



**R-CNN**

2000 nets on image regions



**SPP-net**

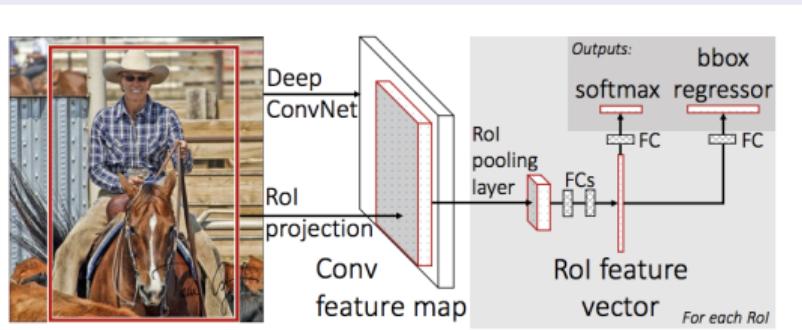
1 net on full image



# Нейросетевой детектор: Fast R-CNN<sup>6</sup>

## Описание алгоритма

- 1 Вход: изображение и предсказания объектов
- 2 Сначала картинка подаётся на несколько свёрточных слоев
- 3 После чего из полученных признаков и предсказаний объектов специальным слоем (ROI pooling) извлекаются признаки
- 4 По полученным признакам делается классификация и коррекция обнаружений



<sup>6</sup>R. Girshick, "Fast R-CNN," in IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2015,  
<https://arxiv.org/pdf/1506.01497.pdf>



## Детали обучения

В качестве лосса используется линейная комбинация классификационного лосса и регрессионного лосса для коррекций детекции



# Fast R-CNN: Результаты

Detector	VOC2007, test, mAP
R-CNN (AlexNet)	54.2
R-CNN (AlexNet) BB	58.5
R-CNN (VGG)	62.2
R-CNN (VGG) BB	66.0
SPPnet BB	63.1
Fast R-CNN	66.9



# Достоинства и недостатки Fast R-CNN

## Достоинства

- ① По сравнению с R-CNN на порядок быстрее с более высоким качеством обнаружения
- ② Обучение стало происходить в один этап

## Недостатки

- ① Двух-этапный метод обнаружения
- ② Selective search (алгоритм поиска кандидатов) — не настраиваемый на данные алгоритм



## Идея

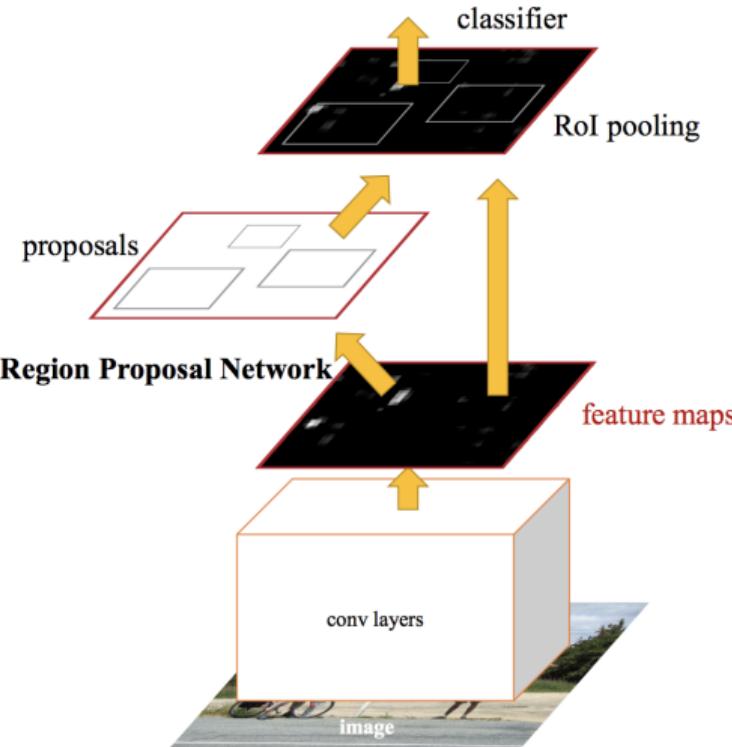
- ① Faster R-CNN = RPN + Fast R-CNN
- ② RPN (Region Proposal Network) — предсказывает регионы, где могут находиться объекты
- ③ Так как и RPN и Fast R-CNN содержат свёрточные слои, то на начальном этапе разумно использовать общие свёртки

---

<sup>7</sup>S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks, <https://arxiv.org/pdf/1506.01497.pdf>



# Схема Faster R-CNN<sup>8</sup>



<sup>8</sup><https://towardsdatascience.com/r-cnn-fast-r-cnn-faster-r-cnn-yolo-object-detection-algorithms-36d53571365e>

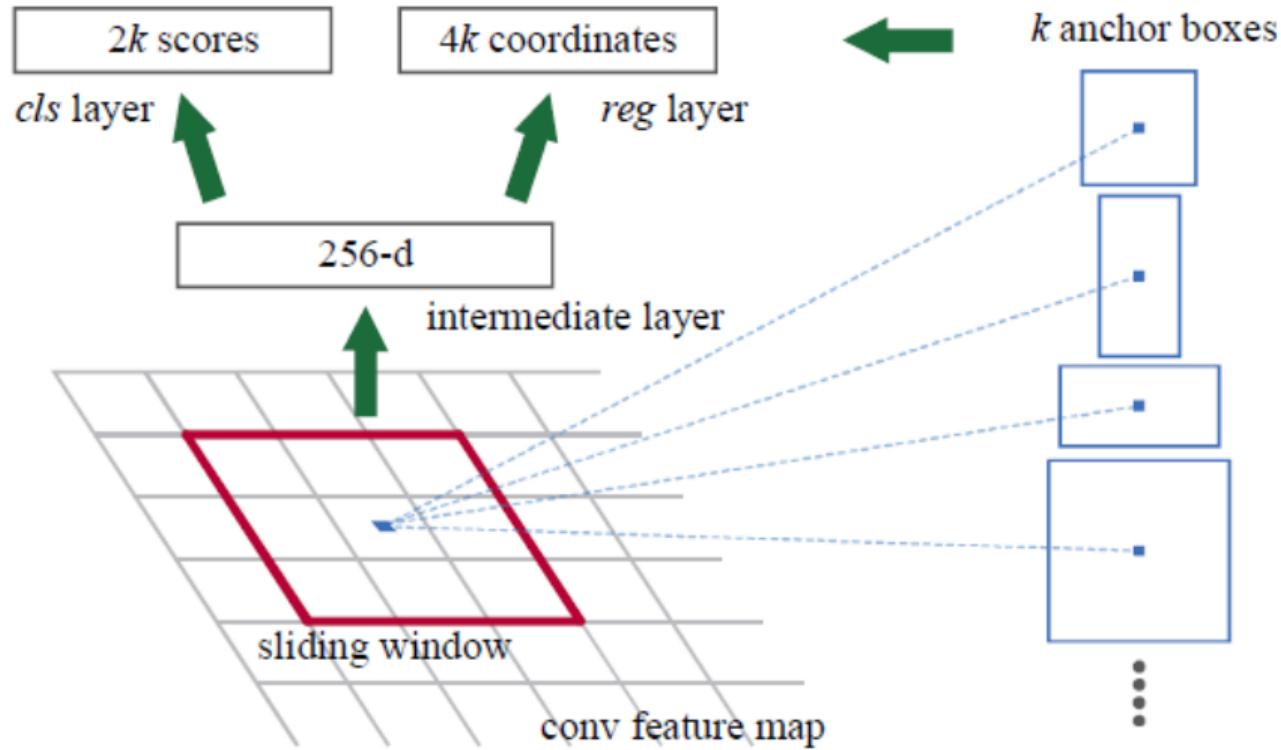


- 1 Изображение подаётся на выход нескольким свёрточным слоям для извлечения признаков
- 2 Затем скользящим окном для 9 размеров (3 соотношения сторон + 3 масштаба) генерируются признаки фиксированного размера для предсказания детекций
- 3 Далее признаки подаются на следующий слой, где для каждого прямоугольника считается вероятность того, есть ли объект внутри
- 4 Так же из полученных признаков считаются уточняющие коэффициенты для размеров прямоугольника

## Функция потерь и обучение

- 1 В качестве лосса используется линейная комбинация классификационного лосса и регрессионного лосса для коррекций детекции
- 2 В батче имеются позитивные и негативные примеры в равном соотношении

# Faster R-CNN: Region Proposal Network



## Этапы обучения

- ① Обучение RPN из предобученной модели на ImageNet
- ② Обучение детекционной модели из предобученной модели на ImageNet (пока оба обучения независимы)
- ③ Инициализация общих слоёв весами из детекционной сети. Дообучение остальных слоёв RPN. Первые слои не меняются
- ④ Дообучение последних слоёв детекционной сети



# Faster R-CNN: Результаты

<b>Detector</b>	<b>VOC2007, test, mAP</b>
R-CNN (AlexNet)	54.2
R-CNN (AlexNet) BB	58.5
R-CNN (VGG)	62.2
R-CNN (VGG) BB	66.0
SPPnet BB	63.1
Fast R-CNN	66.9
Faster R-CNN	69.9
Faster R-CNN(other training data)	78.8

# Нейросетевой детектор: YOLO<sup>9</sup>

## Идея

- ① Изображение покрывается сеткой  $S \times S$
- ② Выход сети представляет собой тензор размера  $S \times S \times (B * 5 + C)$ , где  $B$  — количество детекций с центром в этой ячейке,  $C$  — количество классов
- ③ Детекция — это вектор  $(x, y, w, h, confidence)$
- ④ Для всех детекций ячейки вычисляется только одно распределение по классам
- ⑤ Каждая ячейка предсказывает только один объект



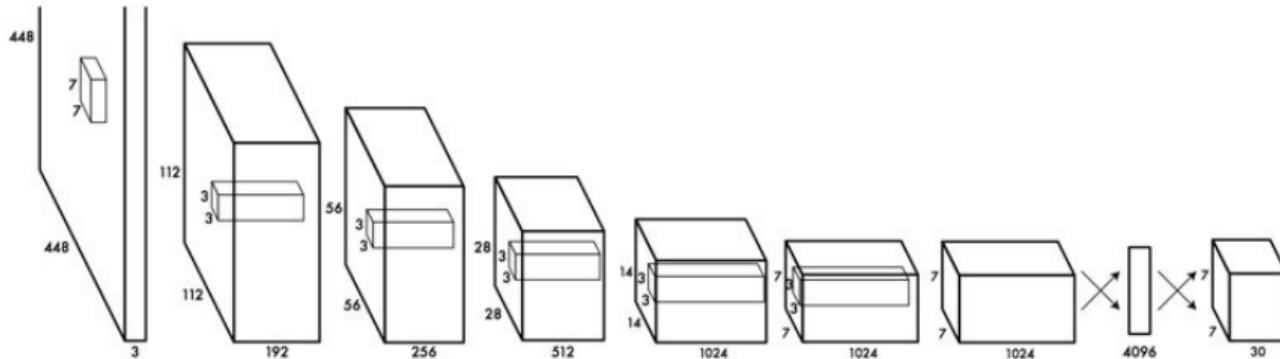
<sup>9</sup>J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi. You only look once: Unified, real-time object detection. 2015, <https://arxiv.org/pdf/1506.02640.pdf>

# YOLO: Архитектура

## Pascal VOC

Типичные параметры:  $S = 7$ ,  $B = 2$ ,  $C = 20$

Финальные предсказания — это тензор  $7 \times 7 \times 30$



# YOLO: функция потерь

$$\begin{aligned} & \lambda_{\text{coord}} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B \mathbb{1}_{ij}^{\text{obj}} \left[ (x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 \right] \\ & + \lambda_{\text{coord}} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B \mathbb{1}_{ij}^{\text{obj}} \left[ \left( \sqrt{w_i} - \sqrt{\hat{w}_i} \right)^2 + \left( \sqrt{h_i} - \sqrt{\hat{h}_i} \right)^2 \right] \\ & + \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B \mathbb{1}_{ij}^{\text{obj}} \left( C_i - \hat{C}_i \right)^2 \\ & + \lambda_{\text{noobj}} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B \mathbb{1}_{ij}^{\text{noobj}} \left( C_i - \hat{C}_i \right)^2 \\ & + \sum_{i=0}^{S^2} \mathbb{1}_i^{\text{obj}} \sum_{c \in \text{classes}} (p_i(c) - \hat{p}_i(c))^2 \end{aligned}$$



# Достоинства и недостатки YOLO

## Достоинства

- ① Быстрый алгоритм, может работать в режиме реального времени
- ② Все предсказания даёт одна нейронная сеть, которая обучается end2end
- ③ Использует для предсказания всё изображение
- ④ Обладает хорошей обобщающей способностью

## Недостатки

- ① Ограниченнное количество обнаружений на ячейку



# YOLO: Результаты

Detector	VOC2007, test, mAP
R-CNN (AlexNet)	54.2
R-CNN (AlexNet) BB	58.5
R-CNN (VGG)	62.2
R-CNN (VGG) BB	66.0
SPPnet BB	63.1
Fast R-CNN	66.9
Faster R-CNN	69.9
Faster R-CNN(other training data)	78.8
YOLO v1	63.4
YOLO v2	78.2

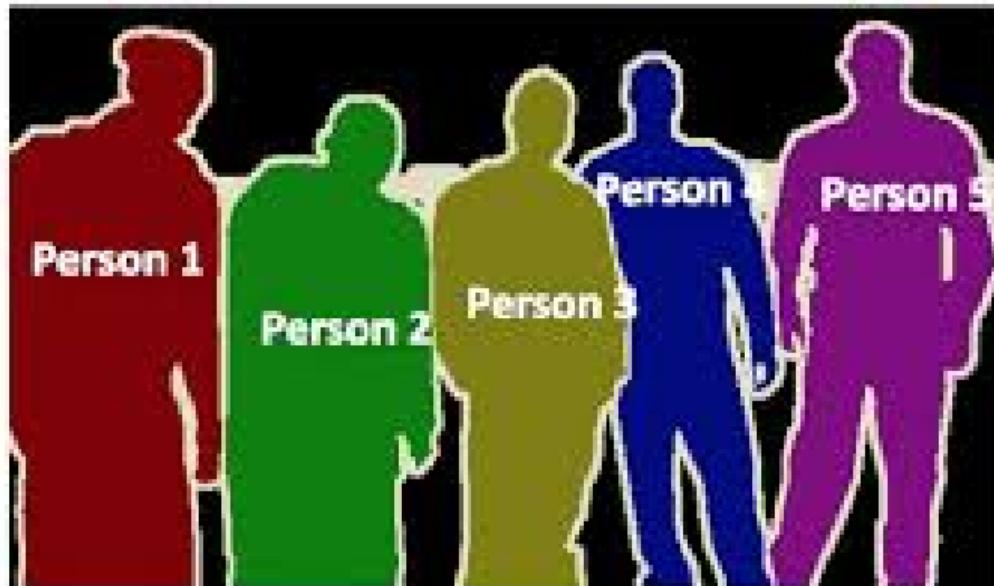
# Postprocessing: Non-Maximal Suppression

YOLO, как и большинство детекторов, может дублировать обнаружения для одного и того же объекта. Чтобы исправить это, обычно применяют алгоритм *NMS* для удаления дубликатов. Такой постпроцессинг добавляет 2-3 % mAP.

Типичная реализация алгоритма выглядит следующим образом:

- ① Отсортировать предсказания по уверенности
- ② Начиная с самых больших показателей, идем по предсказаниям и удаляем обнаружения с тем же классом и  $\text{IoU} > 0.5$  с предыдущими предсказаниями





## Instance Segmentation

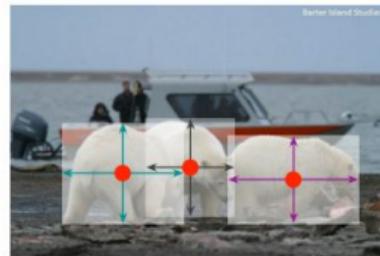
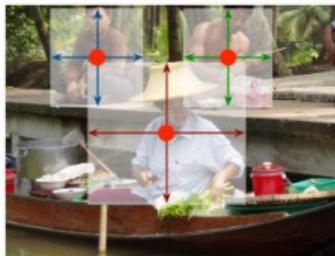
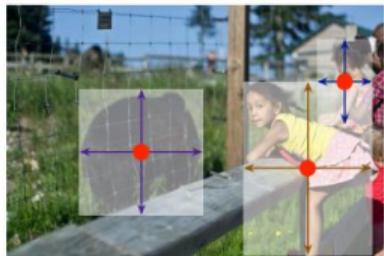


# Развитие задачи обнаружения: Pose estimation / Key point detection



## Идея

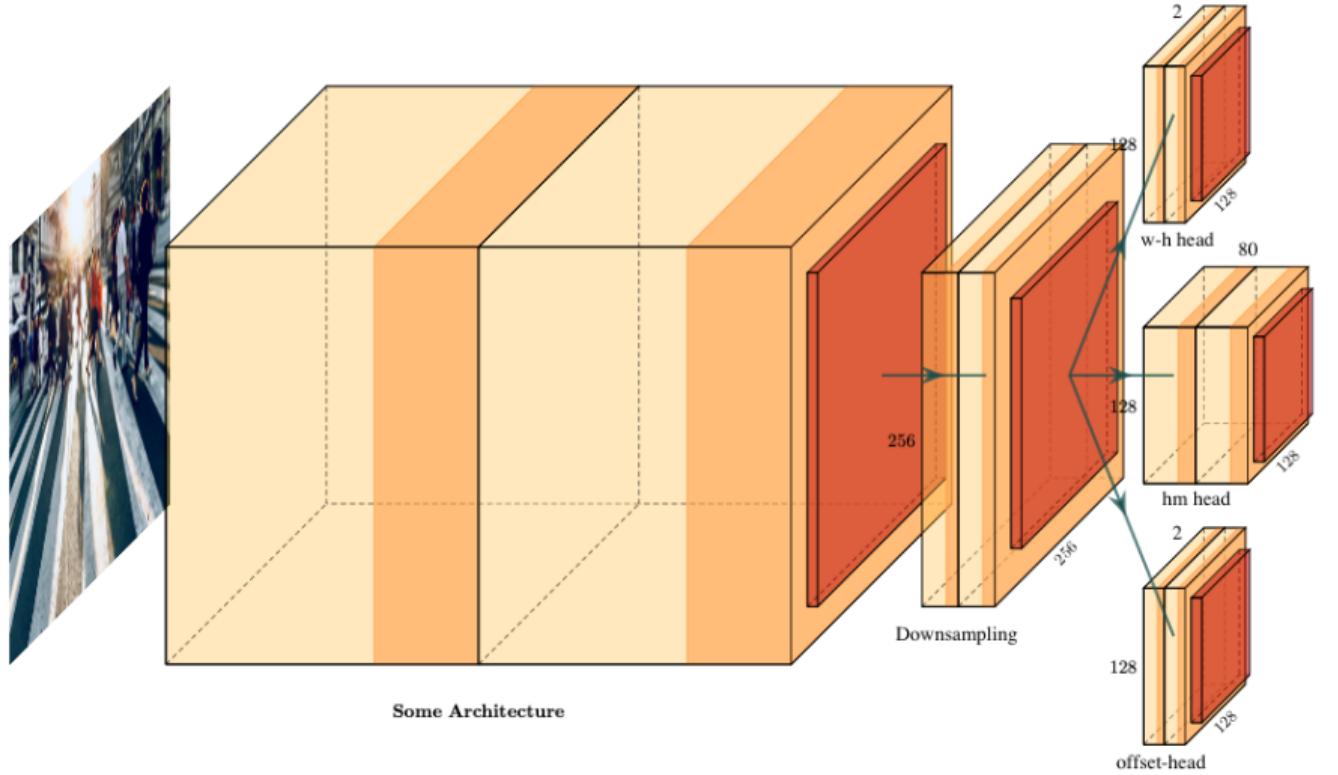
- ❶ Задача детекции сводится к задаче поиска ключевой точки - центра изображения
- ❷ Размер предсказания определяется регрессией на основе признаков.



<sup>10</sup>Xingyi Zhou, Dequan Wang, Philipp Krähenbühl, Objects as Points, 2019, <https://arxiv.org/pdf/1904.07850.pdf>



# Архитектура CenterNet



# Заключение

- 1 Обнаружение объектов — важная с практической точки зрения и востребованная в индустрии задача



# Заключение

- ① Обнаружение объектов — важная с практической точки зрения и востребованная в индустрии задача
- ② Современные подходы делятся на двухпроходные (Faster R-CNN) и однопроходные (YOLO)



# Заключение

- ① Обнаружение объектов — важная с практической точки зрения и востребованная в индустрии задача
- ② Современные подходы делятся на двухпроходные (Faster R-CNN) и однопроходные (YOLO)
- ③ Существуют довольно быстрые и качественные решения, которые работают даже на мобильных телефонах

# Заключение

- ① Обнаружение объектов — важная с практической точки зрения и востребованная в индустрии задача
- ② Современные подходы делятся на двухпроходные (Faster R-CNN) и однопроходные (YOLO)
- ③ Существуют довольно быстрые и качественные решения, которые работают даже на мобильных телефонах
- ④ Всё больше исследователей смотрят в сторону быстродействия, нежели улучшения качества



# Заключение

- ① Обнаружение объектов — важная с практической точки зрения и востребованная в индустрии задача
- ② Современные подходы делятся на двухпроходные (Faster R-CNN) и однопроходные (YOLO)
- ③ Существуют довольно быстрые и качественные решения, которые работают даже на мобильных телефонах
- ④ Всё больше исследователей смотрят в сторону быстродействия, нежели улучшения качества
- ⑤ Задача имеет варианты развития — обнаружение ключевых точек объекта, более точная локализация объекта (сегментация)

Спасибо за внимание!

