

# Лекция 10.

## Активные модели

Антон Конушин, Дмитрий Ветров, Дмитрий  
Кропотов, Вадим Конушин, Ольга  
Баринова

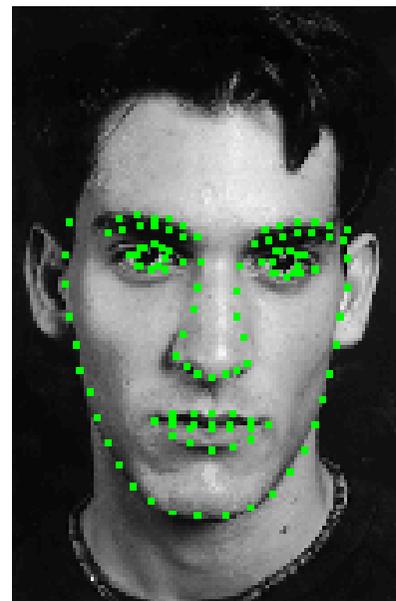
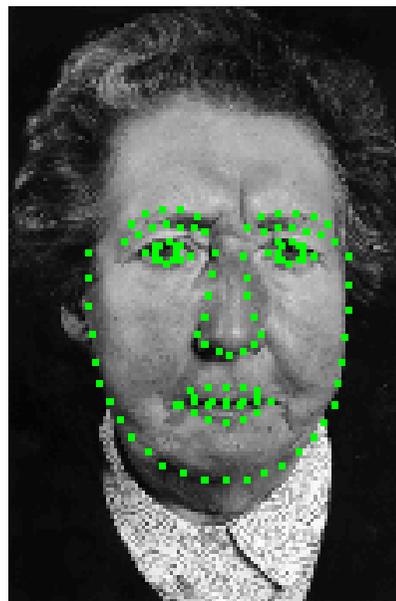
Спецкурс  
«Структурные методы анализа  
изображений и сигналов»

# План лекции

- Статистические модели формы
  - Statistical shape models
- Активные модели формы
  - Active Shape Models (ASM)
- Активные модели внешности
  - Active Appearance Models (AAM)

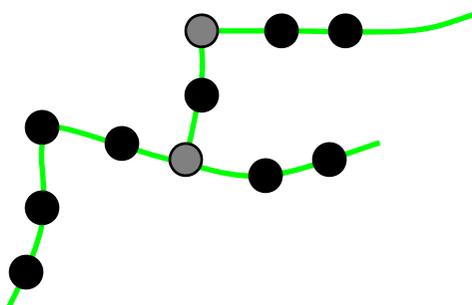
# Модель формы

- Набор размеченных изображений
- Метки задают положение соответствующих точек
- Построим вероятностную модель



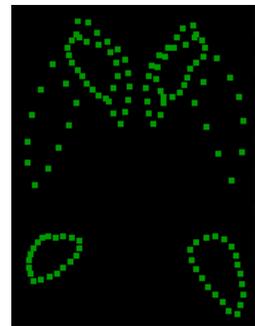
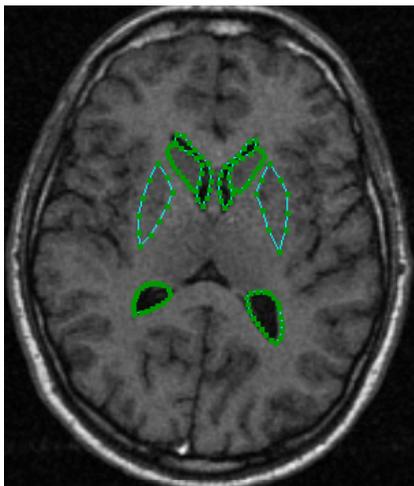
# Метки

- Метки задают соответствия
  - Углы
  - 'Т'-образные пересечения краев
  - Легко различимые биологические особенности
  - Дополнительные точки вдоль границ для более детального моделирования



# Построение моделей формы

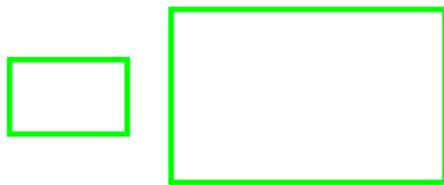
- Для каждого примера



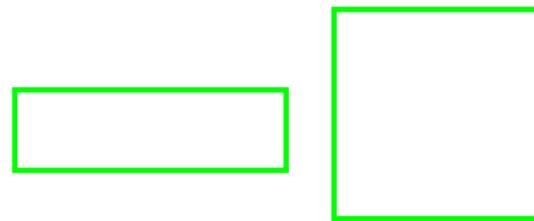
$$\mathbf{x} = (x_1, y_1, \dots, x_n, y_n)^T$$

# Форма

- Как смоделировать изменчивость формы?
- Что такое «форма»?
  - *Геометрическая информация, которая сохраняется при удалении положения, масштаба и поворота (Kendall)*



Одинаковая форма

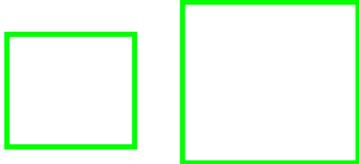
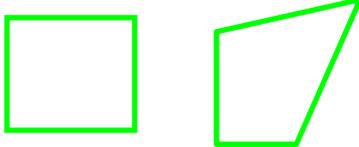


Разные формы

# Форма

- *Формой называется геометрическая информация, инвариантная к определенному классу преобразований*
- Преобразования:
  - Евклидовое (сдвиг + поворот)
  - Подобие (сдвиг+поворот+масштаб)
  - Аффинное

# Форма

Формы	Евклидово	Подобие	Аффинное
			
			
			

# Статистические Модели Формы

- Дан набор примеров
- Выравниваем все примеры
  - «Прокрустов» анализ
- Оцениваем распределение формы  $p(x)$ 
  - Многомерное нормальное распределение
  - Иногда смесь нормальных распределений

# Выравнивание 2-х примеров

- «Прокрустов» анализ:
  - Ищем преобразование  $T$ , минимизирующее:

$$| \mathbf{x}_1 - T(\mathbf{x}_2) |^2$$

- В результате
  - Общие центры масс
  - Примерно одинаковый размер и ориентация

# Выравнивание набора примеров

- Обобщенный прокрустов анализ
  - Найти преобразования  $T_i$ , минимизирующие

$$\sum | \mathbf{m} - T_i(\mathbf{x}_i) |^2$$

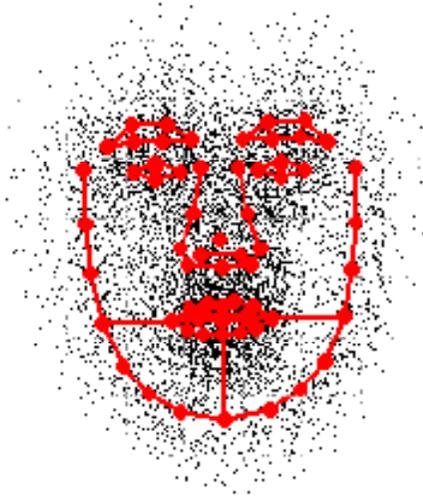
– Где 
$$\mathbf{m} = \frac{1}{n} \sum T_i(\mathbf{x}_i)$$

– При условии  $|\mathbf{m}| = 1$

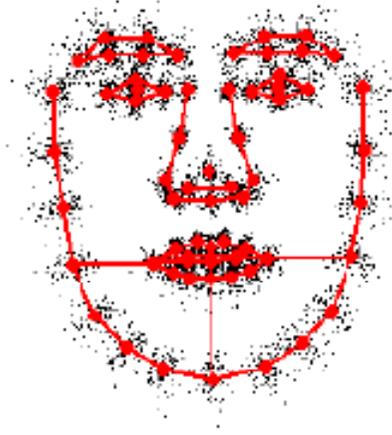
# Алгоритм

- Нормализуем так, чтобы ЦМ в начале координат, размер = 1
- Пусть  $\mathbf{m} = \mathbf{x}_1$
- Выравниваем все примеры, при  $\mathbf{m}$
- Уточняем  $\mathbf{m} = \frac{1}{n} \sum T_i(\mathbf{x}_i)$
- Нормализуем  $\mathbf{m}$  по размеру и ориентации
- Повторяем до сходимости

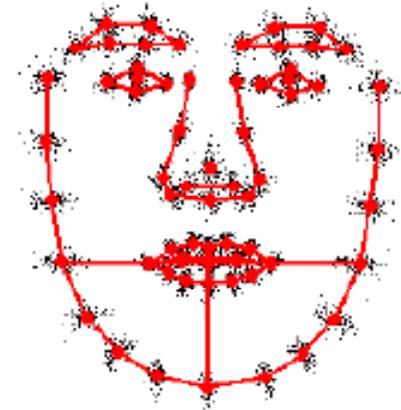
# Выравнивание примеров



Unaligned



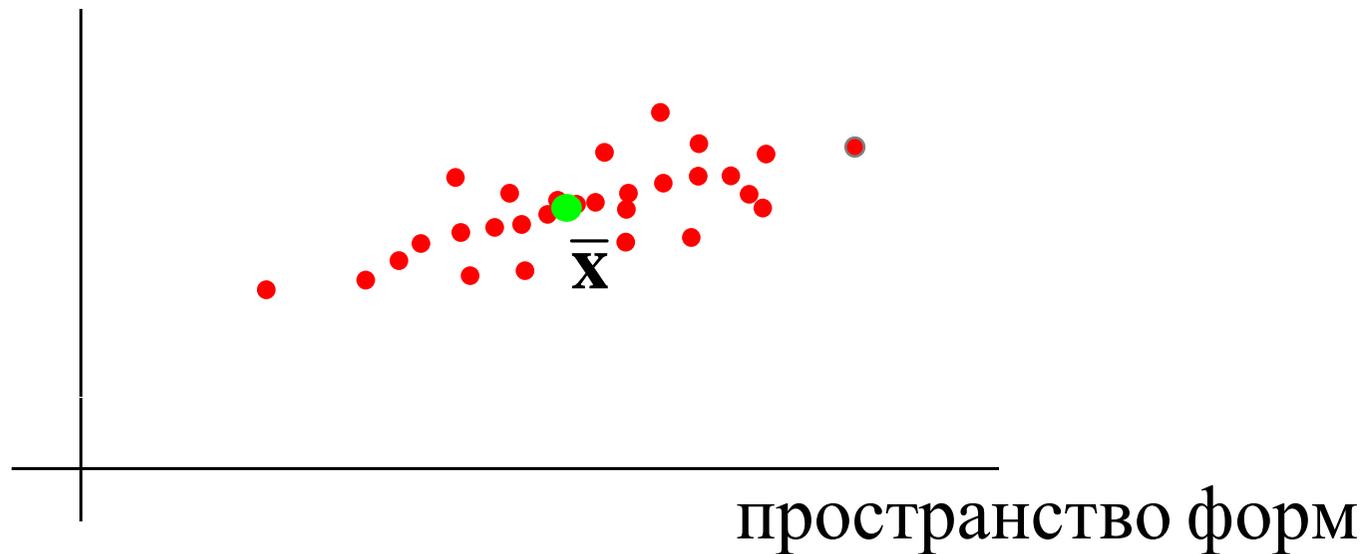
Align with translation



Align with similarity

# Выровненные примеры

- Теперь строим модель



# Статистические модели формы

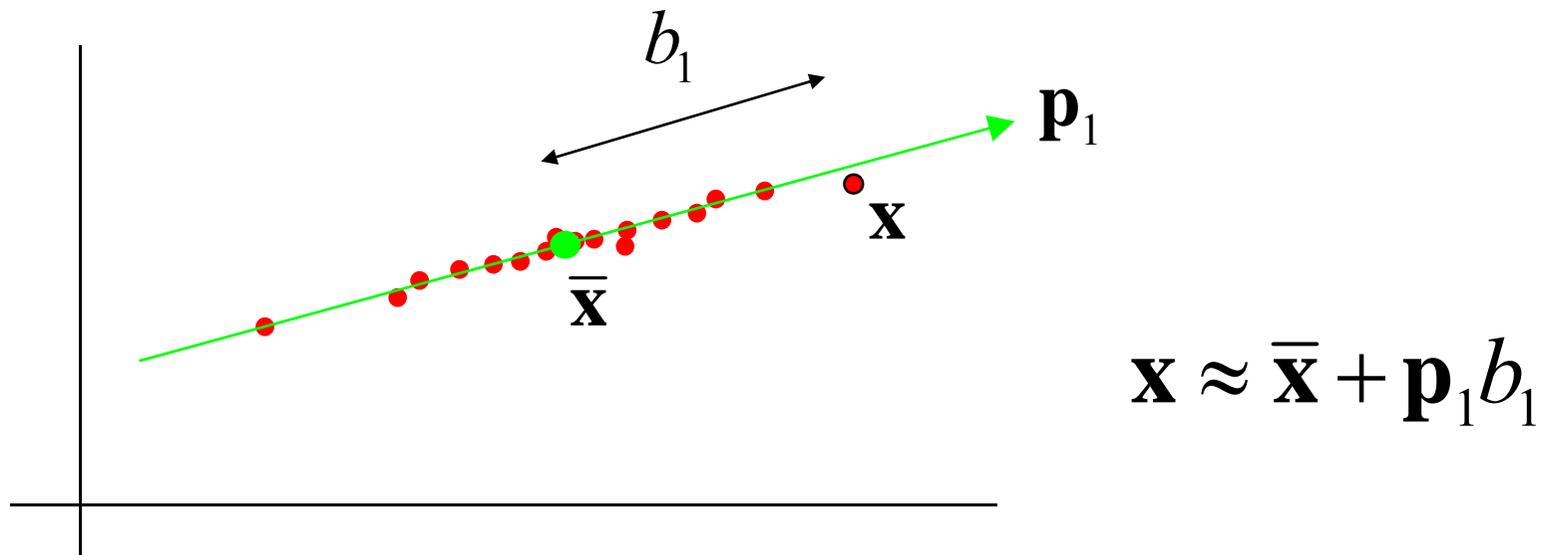
- Для анализа форм
  - Предпочтительнее параметрическая модель

$$\mathbf{x} = f_{shape}(\mathbf{b}) \quad \text{e.g.} \quad \mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b}$$

- Для многих задач  $p(\mathbf{x})$  достаточно
  - Но хотелось бы уменьшить размерность, насколько это возможно

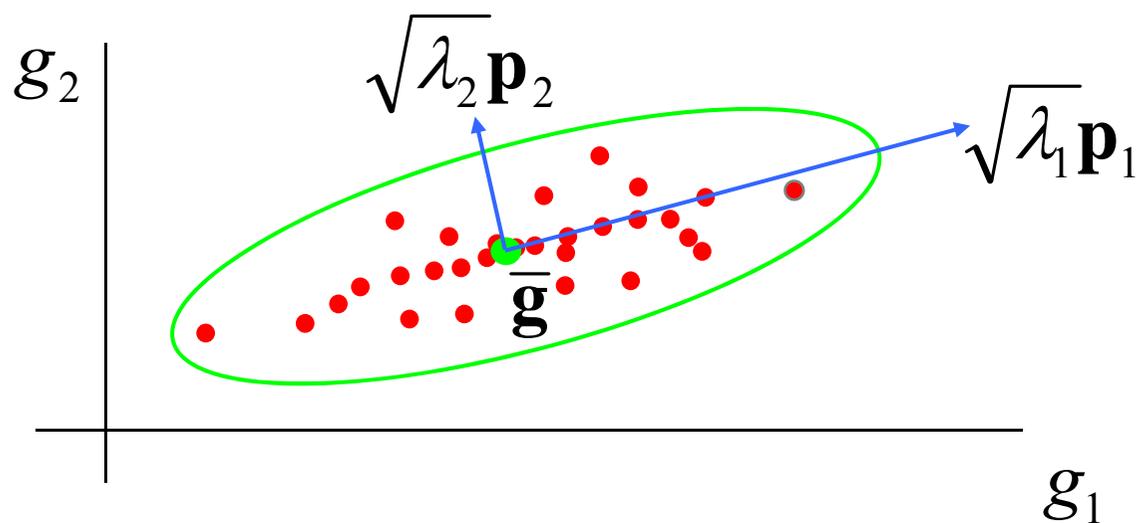
# Понижение размерности

- Координаты часто скоррелированы



# Метод Главных Компонент

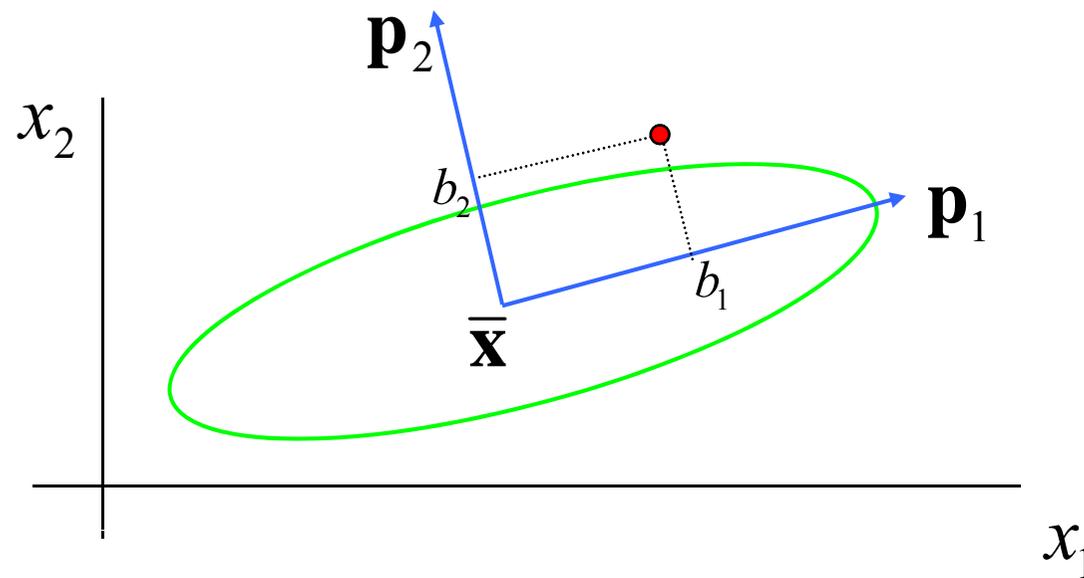
- Вычисляем собств.вектора матрицы ковариации  $S$
- Собств.вектора: основные направления
- Собств. значения: дисперсия вдоль направлений



# Вычисление параметров

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b} \quad \rightarrow \quad \mathbf{b} = \mathbf{P}^T (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})$$

$\mathbf{P}$  – матрица из ортонормированных векторов

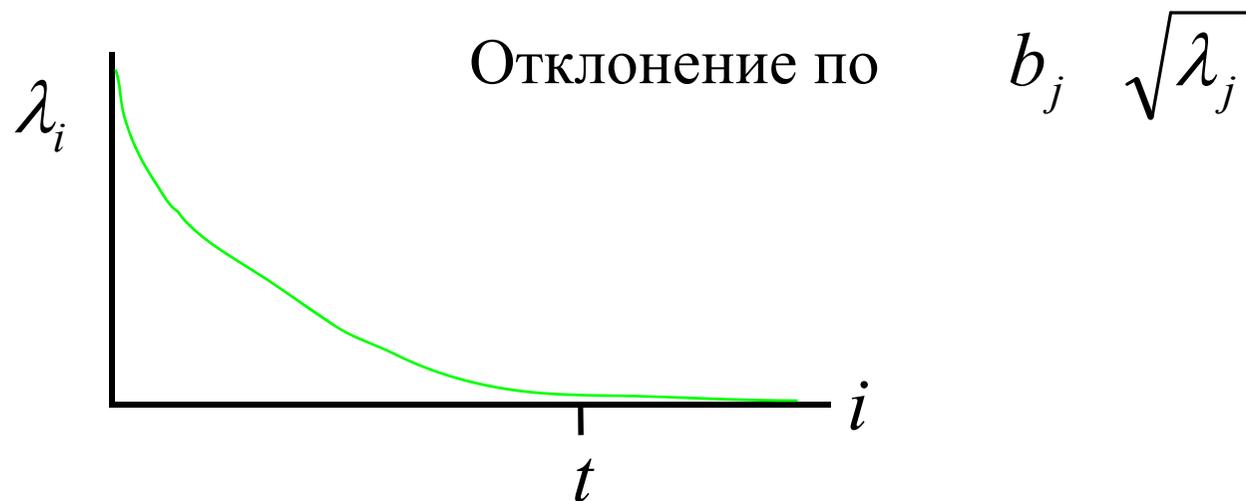


# Понижение размерности

- Получили:

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{p}_1 b_1 + \cdots + \mathbf{p}_n b_n$$

- Для некоторого  $t$ ,  $b_j \approx 0$  если  $j > t$



# Построение моделей формы

- Даны выровненные формы  $\{ \mathbf{x}_i \}$
- Применяем МГК (РСА)
  - Вычисляем среднее и с.вектора ковариации.

$$\mathbf{x} \approx \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b}$$

- $\mathbf{P}$  – Первые  $t$  собственных векторов
- $\mathbf{b}$  – Параметры модели формы

# Распределение параметров

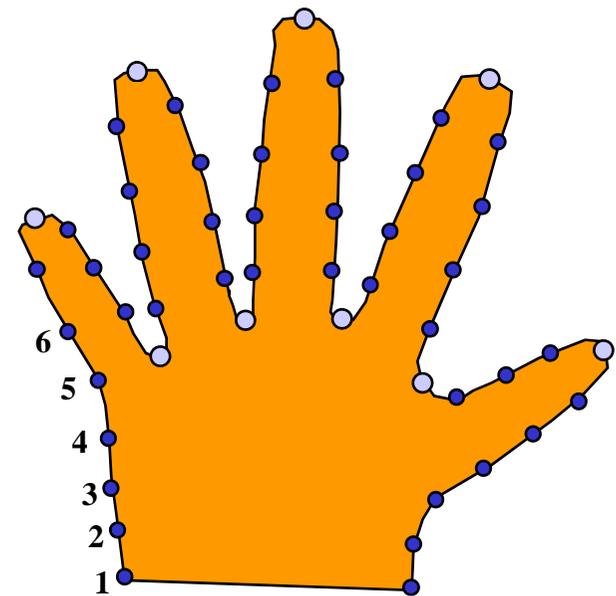
- Оцениваем  $p(\mathbf{b})$  по тренировочной выборке
- Если  $\mathbf{x}$  многомерное норм.распределение
  - $\mathbf{b}$  нормальное с диагональной матрицей

$$\mathbf{S}_b = \text{diag}(\lambda_1 \cdots \lambda_t)$$

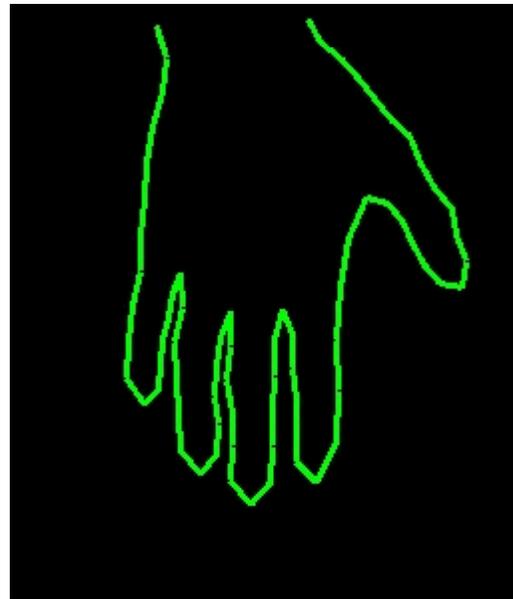
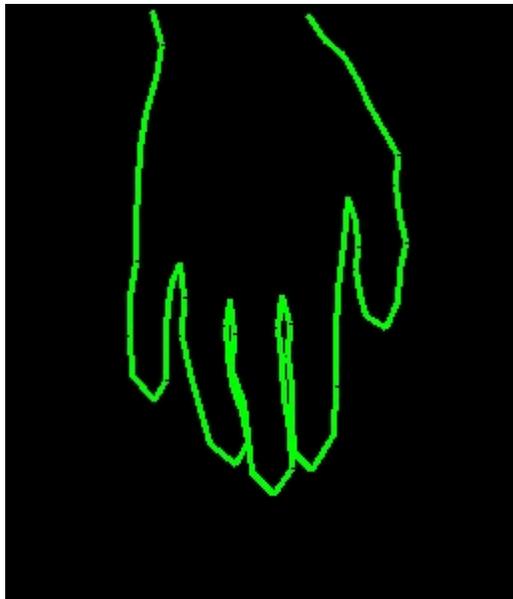
- Можем оценить смесь распределений  $p(\mathbf{b})$

# Модель формы - рука

- 72 метки поставлены по контуру руки
  - 18 контуров руки получены путем сравнения с порогов изображений рук на белом фоне
- Основные метки выбраны на кончиках пальцев и в ложбинках между пальцами
  - Остальные равномерно между ключевыми



# Пример 1: Рука

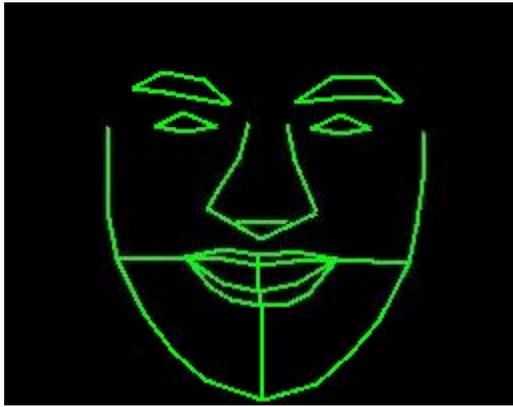


Варьируем  $b_1$

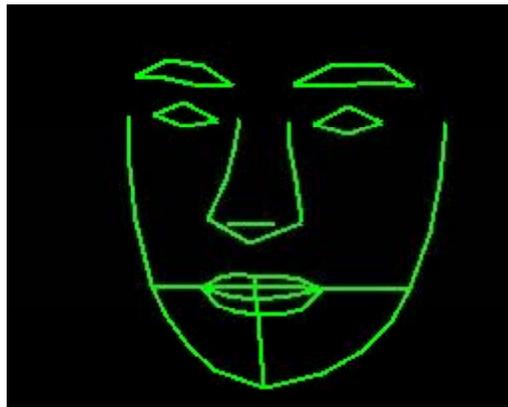
Варьируем  $b_2$

Варьируем  $b_3$

## Пример 2: Лицо



Варьируем  $b_1$

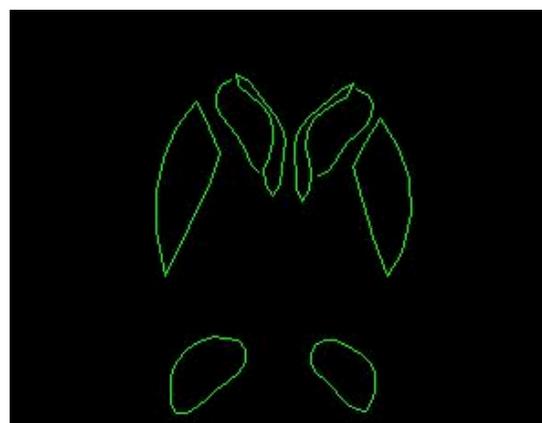
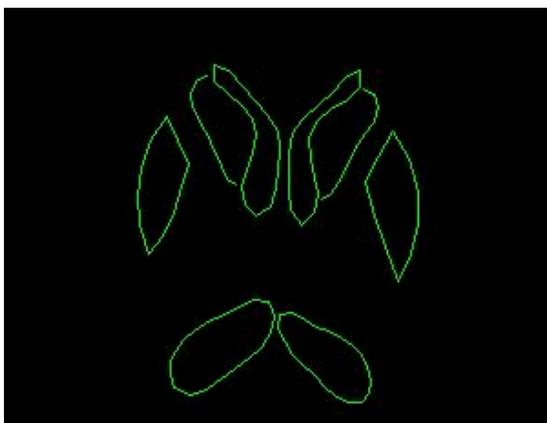
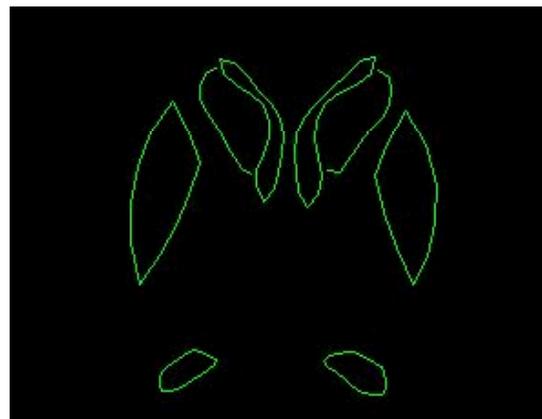
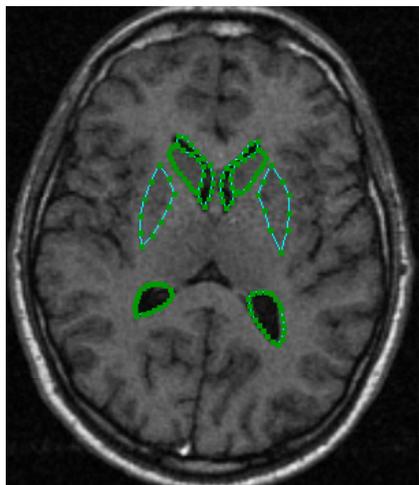


Варьируем  $b_2$



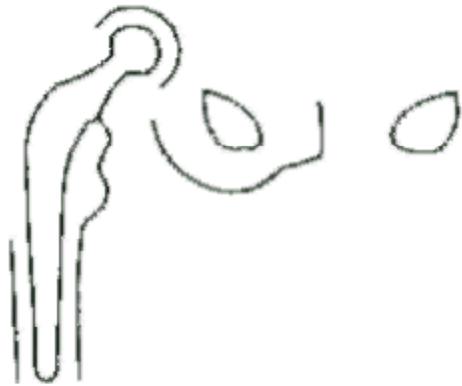
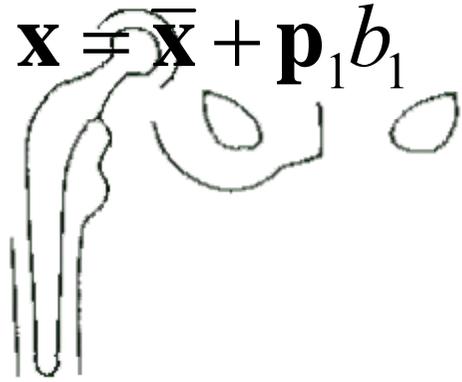
Варьируем  $b_3$

# Пример 3: Структуры мозга

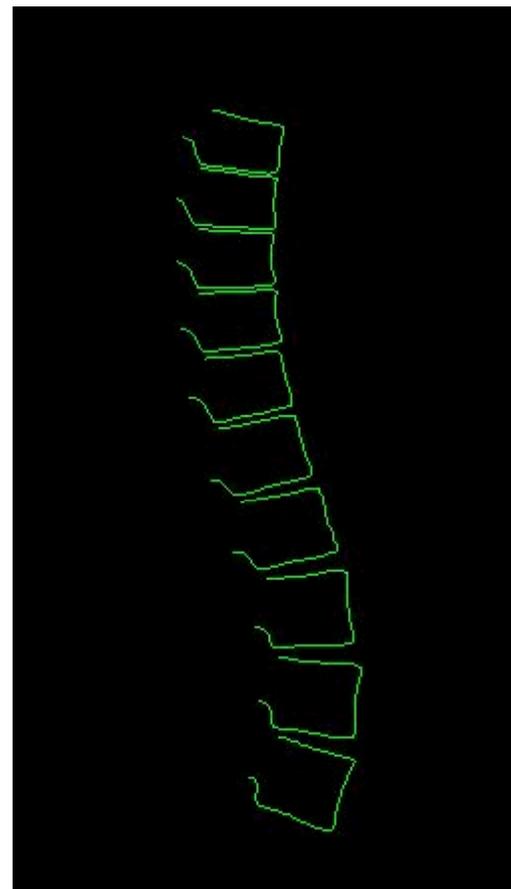
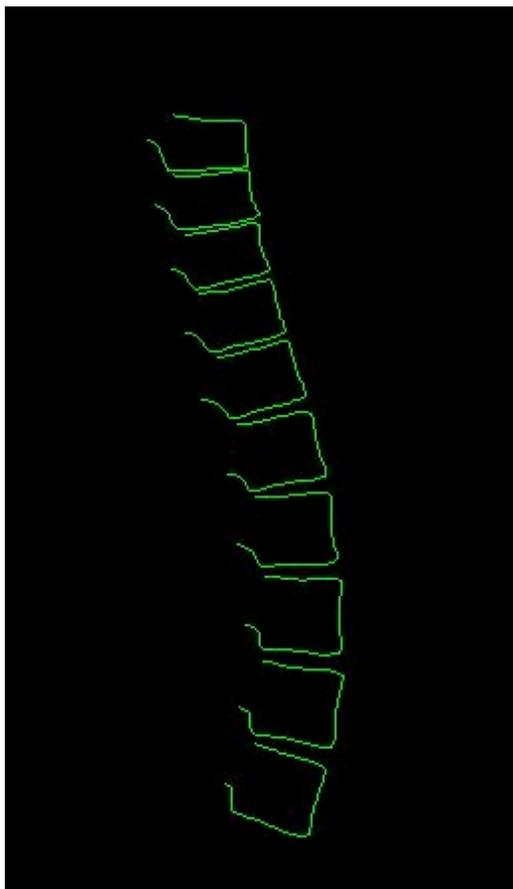


# Пример 4 : Суставы

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{p}_1 b_1$$



# Пример 5: Позвоночник

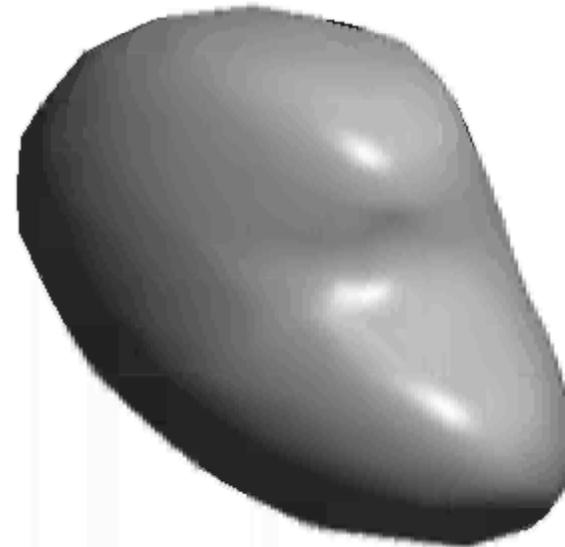


# Пример 6: Почка (3D)

- Крысиная почка



Модель формы



- 18 примеров

# Пример 7: Гипокамп



Mode 1



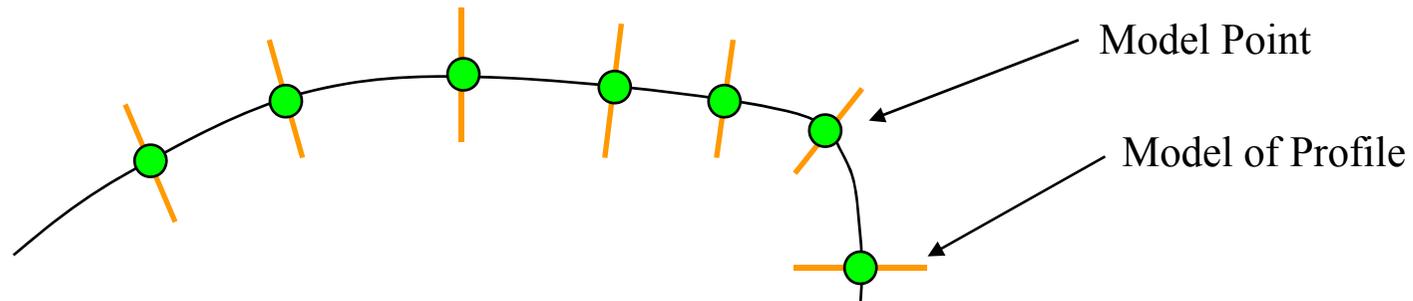
Mode 2

# Активная Модель Формы

- Пусть у нас есть статистическая модель формы
- Как использовать ее для анализа изображений?
- Метод “Active Shape Model”
- Итеративный метод сопоставления модели изображению

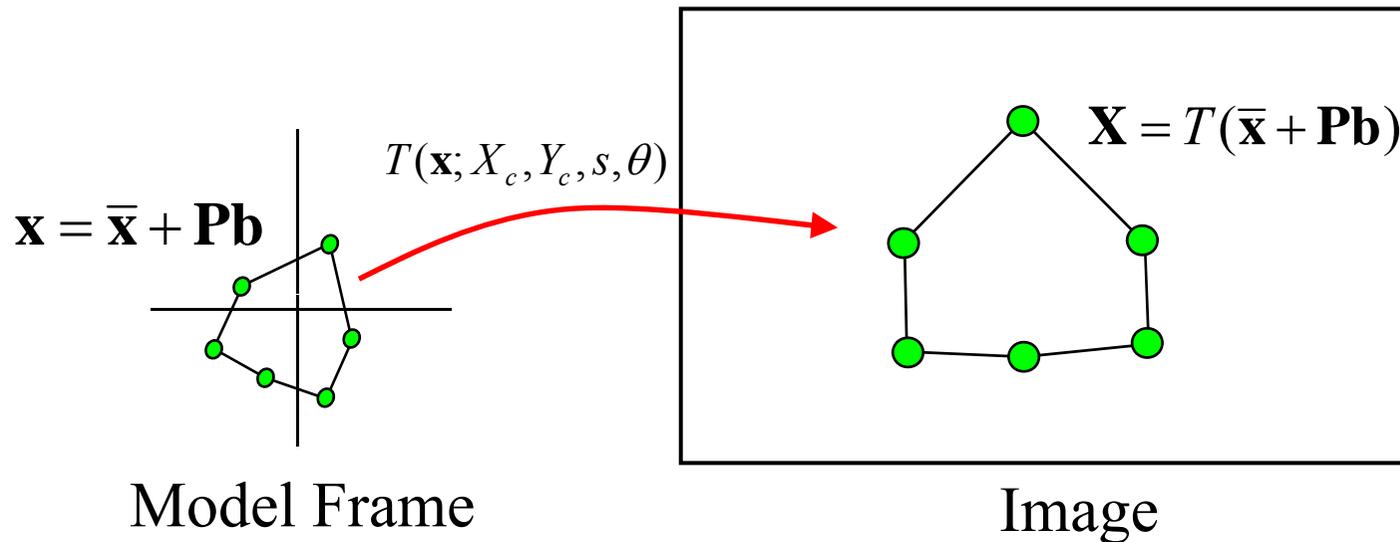
# Активная Модель Формы

- Сопоставим модель изображению
- Необходимо:
  - Статистическая модель формы
  - Модель структуры изображения в каждой точке



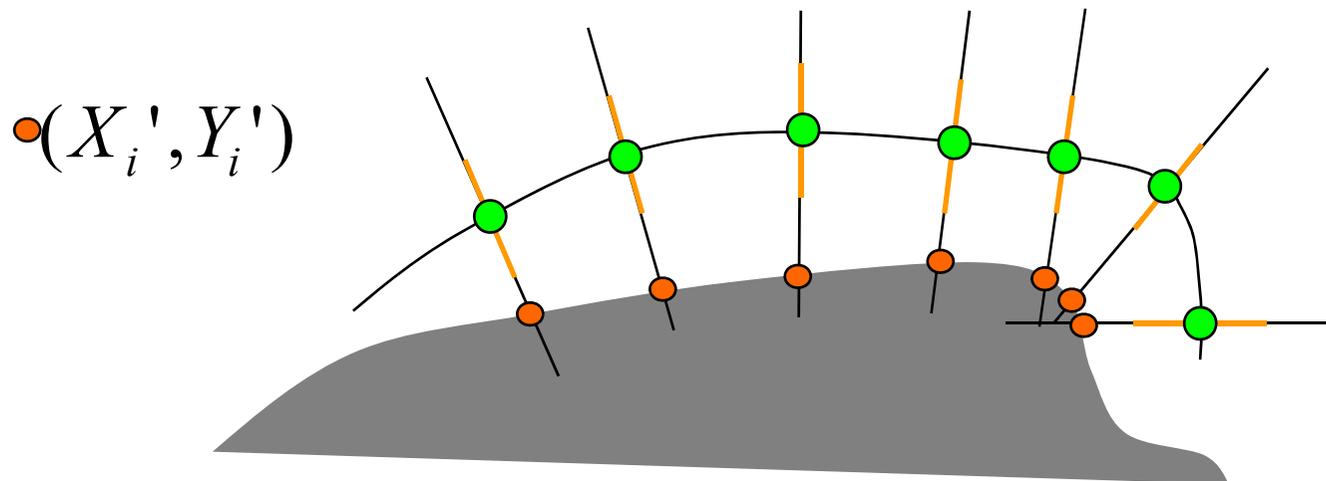
# Помещаем изображение в изображение

- Модель задана в своей системе координат
- Ищем глобальное преобразование  $T$



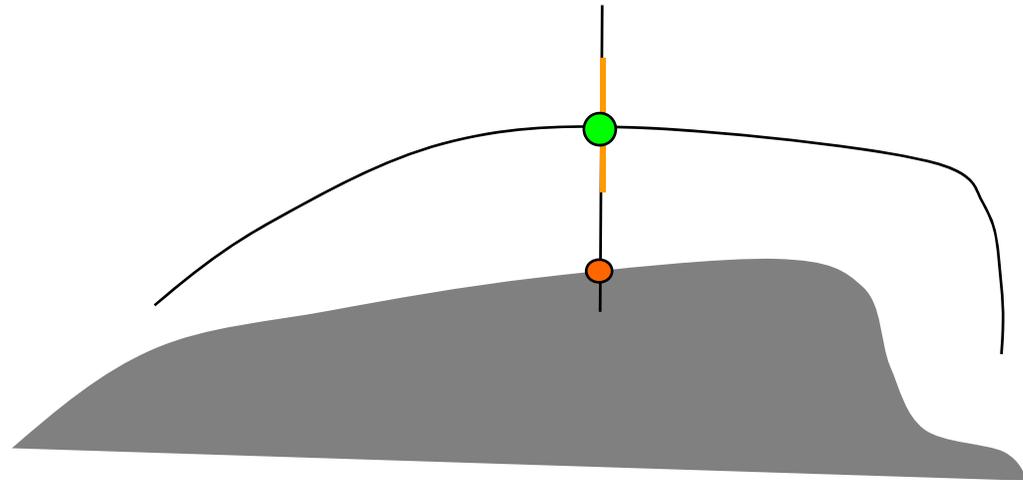
# Алгоритм поиска в ASM

- Локальная оптимизация
- Инициализируем вблизи объекта
  - Поиск вдоль профиля наилучшего сопоставления,  $X'$
  - Уточнение параметров  $X'$ .



# Модель локальной структуры изображения

- Нужен метод локального поиска для каждой точки

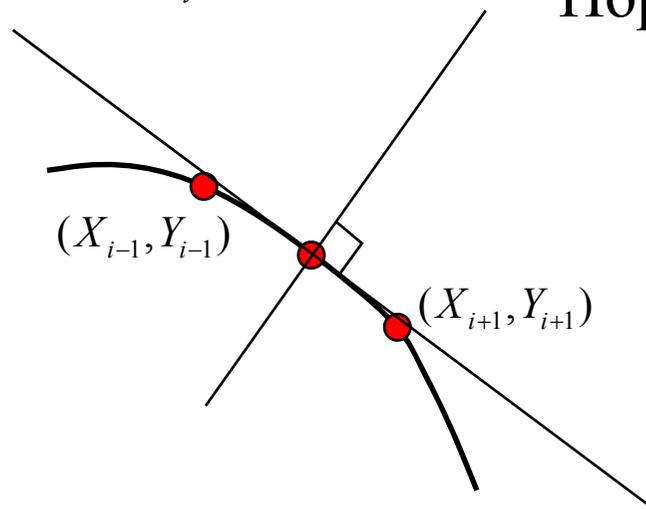


- Варианты
  - Сильнейший край
  - Статистическая модель профиля

# Вычисление нормали

Касательная  $(t_x, t_y)$

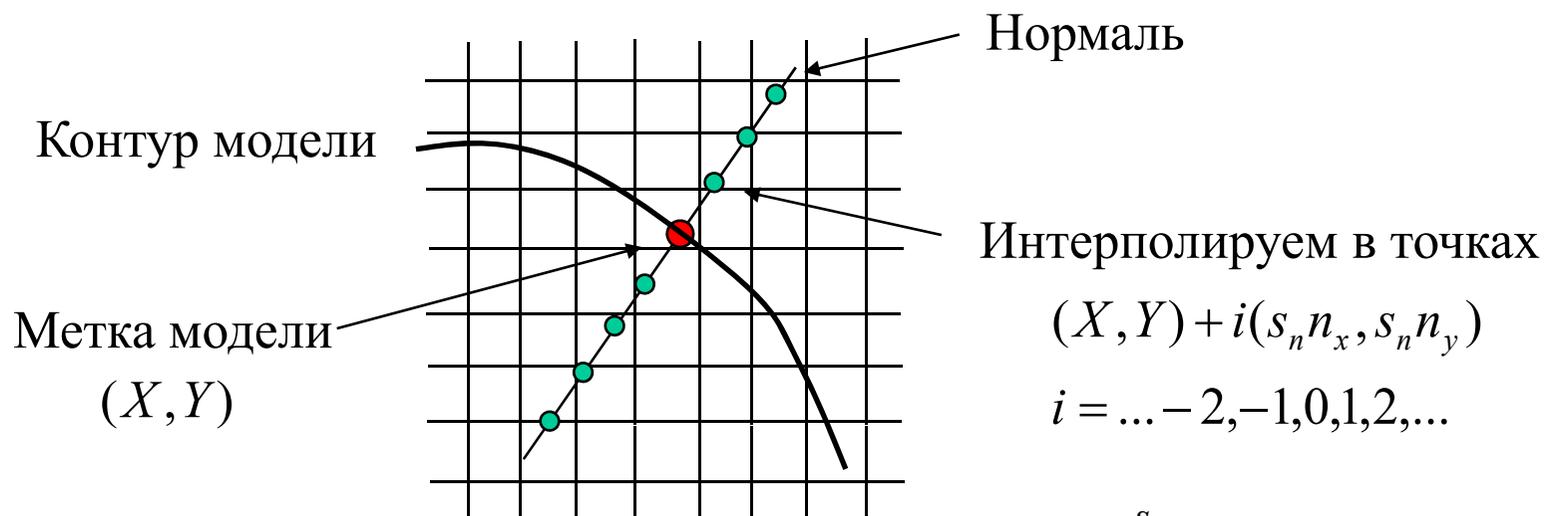
Нормаль  $(n_x, n_y) = (-t_y, t_x)$



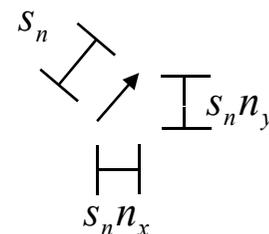
$$(t_x, t_y) \approx \frac{(d_x, d_y)}{\sqrt{d_x^2 + d_y^2}}$$

$$d_x = X_{i+1} - X_{i-1}$$
$$d_y = Y_{i+1} - Y_{i-1}$$

# Интерполяция вдоль профиля

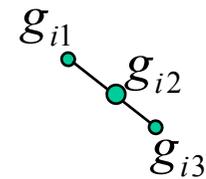
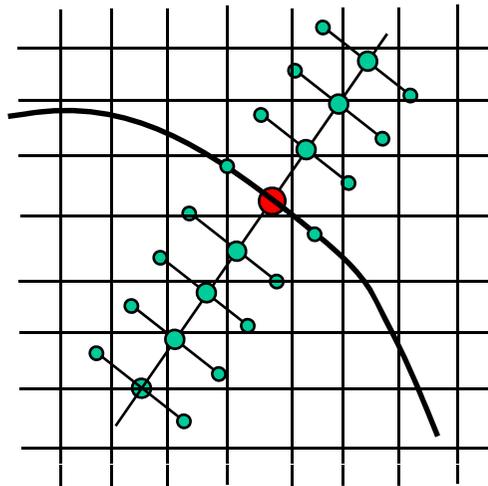


Берем точку с шагом  $s_n$  вдоль  $(n_x, n_y)$



# Подавление шума

- Усредняем по отрезку,  
перпендикулярному к профилю

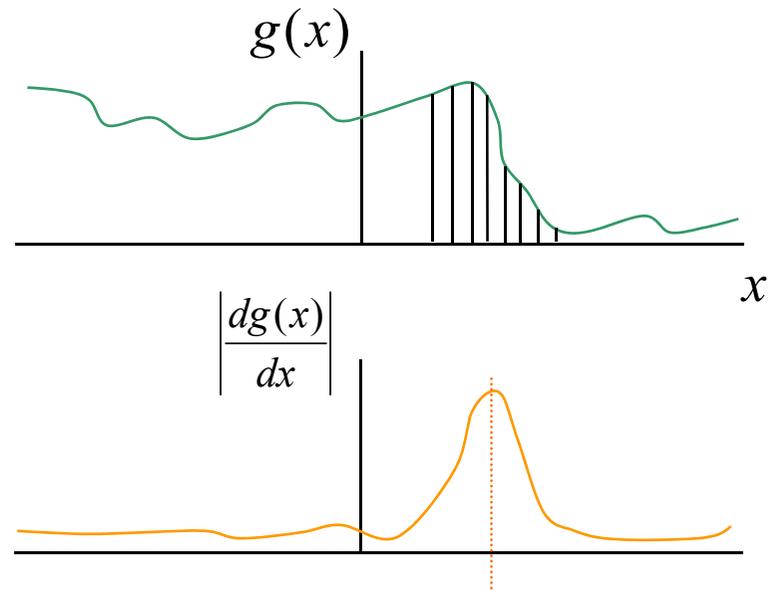
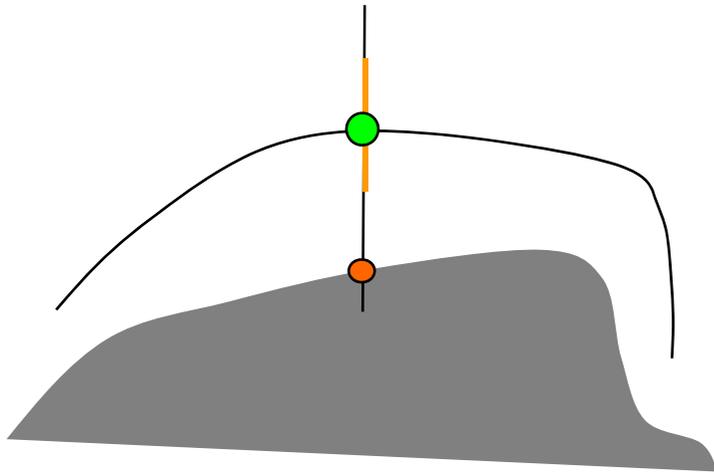


$$g_i = 0.25g_{i1} + 0.5g_{i2} + 0.25g_{i3}$$

Интерполируем в точка

$$\mathbf{g} = (\dots, g_{-2}, g_{-1}, g_0, g_1, g_2, \dots)$$

# Поиск сильнейшего края

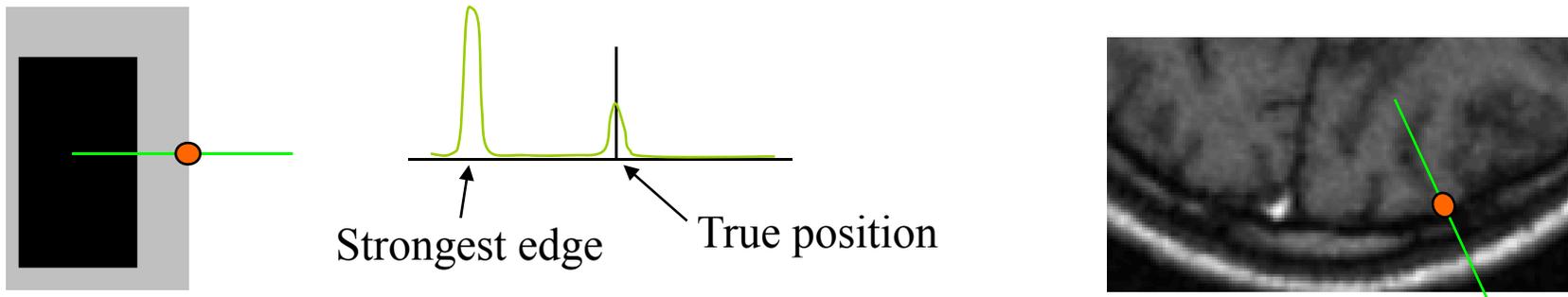


$$\frac{dg(x)}{dx} = 0.5(g(x+1) - g(x-1))$$

Выберем точку на профиле, соответствующую сильнейшему краю

# Модель профиля

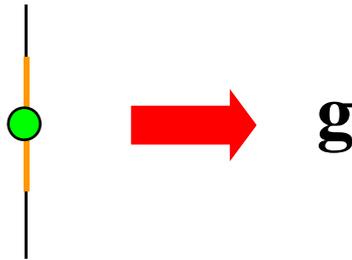
- Иногда истинное положение не соответствует сильнейшему краю



- Смоделируем локальную структуру изображения для поиска

# Статистическая модель профиля

- Оценим плотность распределения интенсивности вдоль профиля



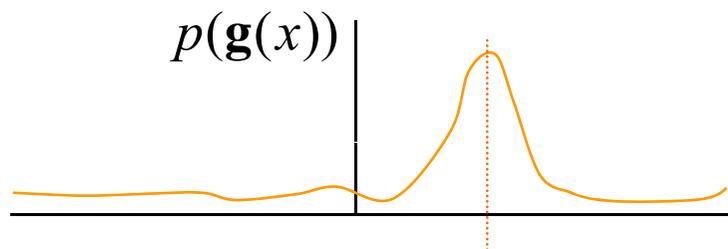
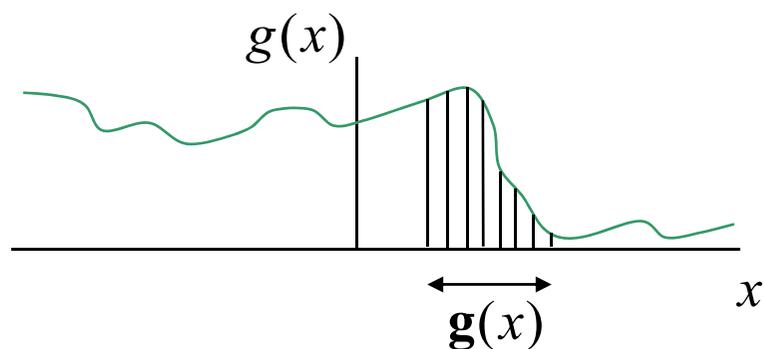
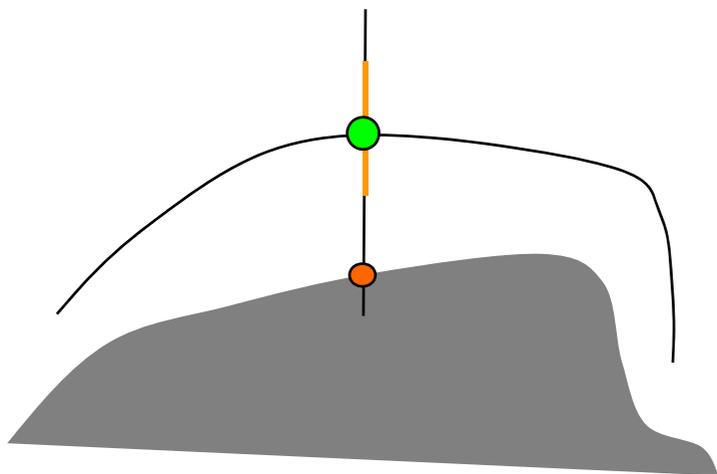
- Нормализуем освещенность
- По тренировочной выборке оценим  $p(\mathbf{g})$

# Модели профилей

- Для каждой точки модели формы
  - Для каждого изображения из выборки
    - Строим выборку интенсивностей вдоль профиля
    - Нормализуем
  - Строим статистическую модель
    - Пр. оцениваем нормальное распределение

# Поиск вдоль профиля

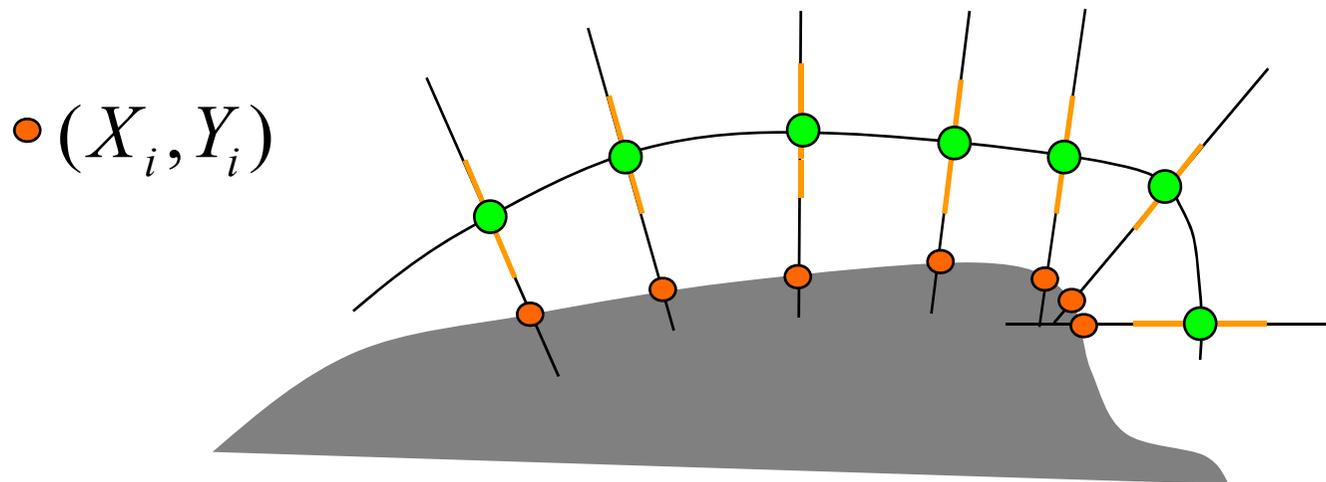
- Поиск наилучшего соответствия вдоль профиля



# Алгоритм сопоставления

- Поиск соответствия вдоль профиля
- Уточним глобальное преобразование  $T$  и параметры  $\mathbf{b}$ , минимизируя:

$$|\mathbf{X} - T(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b})|^2$$



# Уточняем параметры

- Найти параметры преобразования и формы, чтобы минимизировать:

$$f(\mathbf{b}, X_c, Y_c, s, \theta) = |\mathbf{X} - T(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b}; X_c, Y_c, s, \theta)|^2$$

- Варианты
  - Какой-нибудь метод оптимизации
  - 2-х шаговый итеративный метод

# Уточнение параметров

$$f(\mathbf{b}, X_c, Y_c, s, \theta) = |\mathbf{X} - T(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b}; X_c, Y_c, s, \theta)|^2$$

Повторять до сходимости:

Фиксируем  $\mathbf{b}$  и ищем  $(X_c, Y_c, s, \theta) : |\mathbf{X} - T(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b})|^2 \rightarrow \min$

(Разные методы, в т.ч. аналитические)

Фиксируем  $(X_c, Y_c, s, \theta)$  и ищем  $\mathbf{b} : |\mathbf{X} - T(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b})|^2 \rightarrow \min$

$$\mathbf{b} = \mathbf{P}^T (T^{-1}(\mathbf{X}) - \bar{\mathbf{x}})$$

# Учет ограничений модели

- Жесткие ограничения

Минимизируем  $|\mathbf{X} - T(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b})|^2$ , при  $p(\mathbf{b}) < p_t$

$$\text{пр. : } |b_i| \leq 3\sqrt{l_i}$$

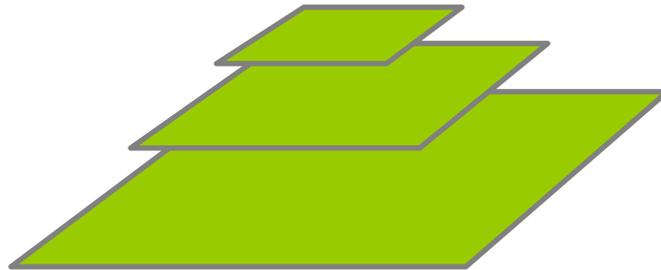
- Мягкие ограничения

Минимизируем  $|T^{-1}(\mathbf{X}) - (\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{b})|^2 / \sigma_r^2 + \log(p(\mathbf{b}))$

- Можем добавить веса, учитывающие качество локального сопоставления

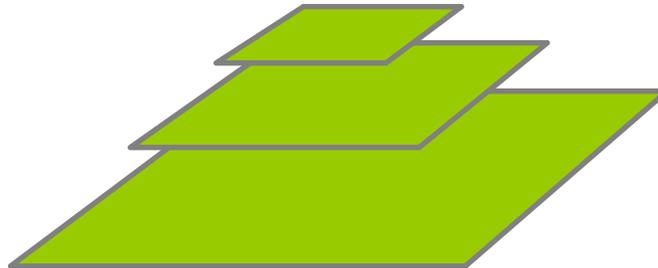
# Многомасштабный поиск

- Обучаем локальные модели на каждом уровне пирамиды
  - Гауссова пирамида с шагом 2
  - Используем те же точки
  - Разные локальные модели



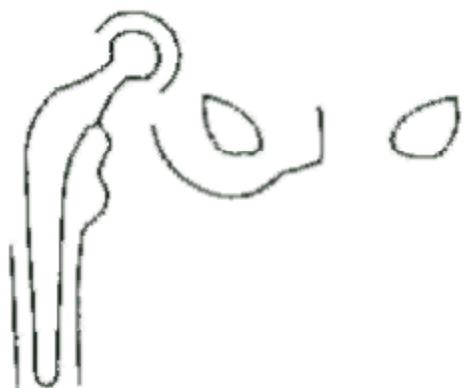
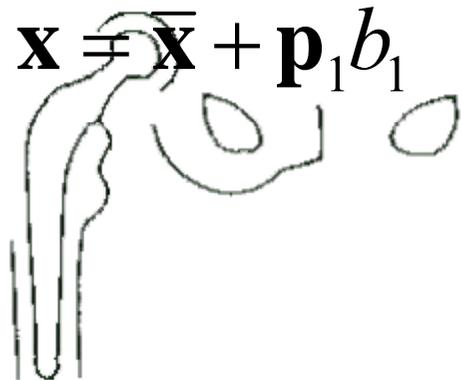
# Многомасштабный поиск

- Начинаем с самого низкого разрешения
- Для каждого уровня
  - Поиск вдоль профиля
  - Обновляем параметры
  - (Накладываем ограничения на параметры)
  - Повторяем до сходимости на этом уровне

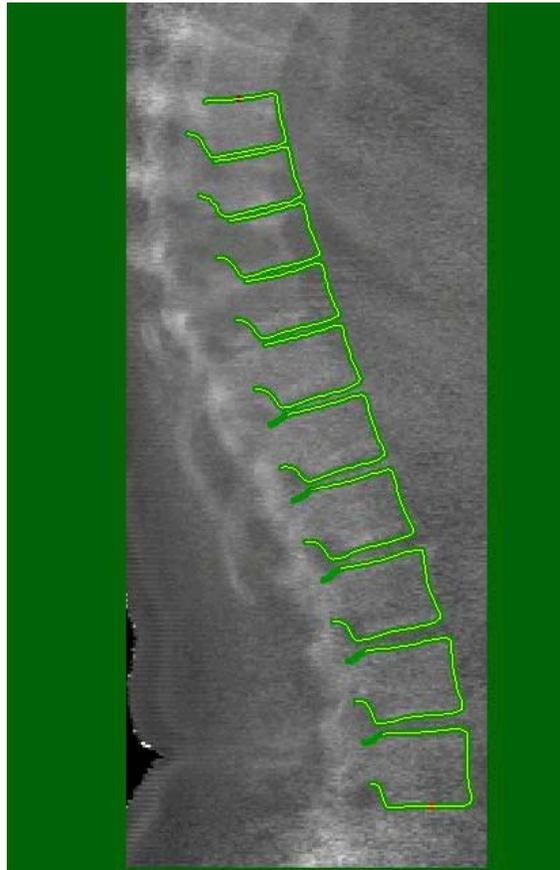


# Пример : Рентген

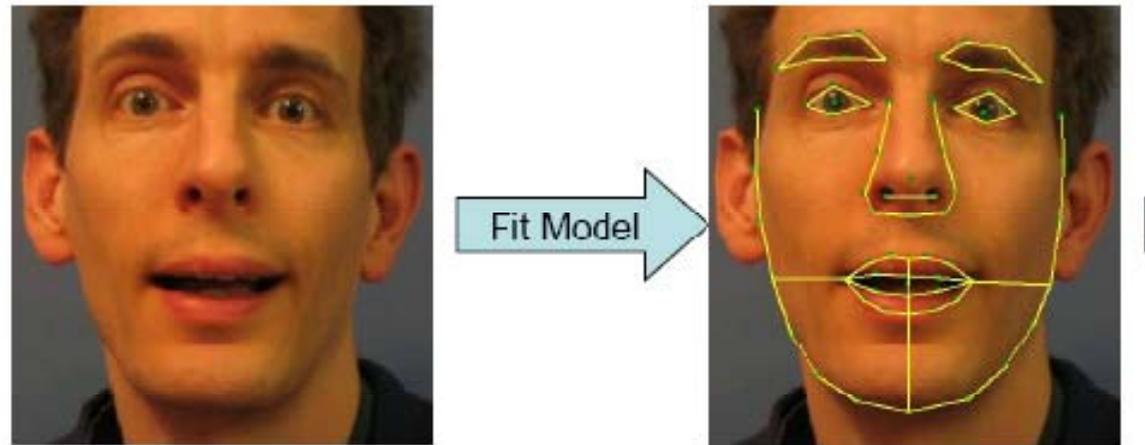
$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{p}_1 b_1$$



# Пример: Позвоночник



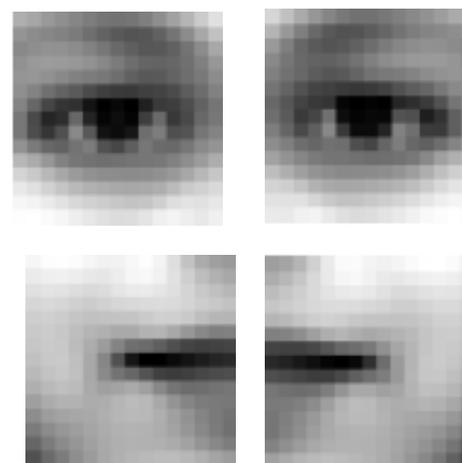
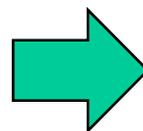
# ASM для поиска черт лица



# ASM для поиска черт лица



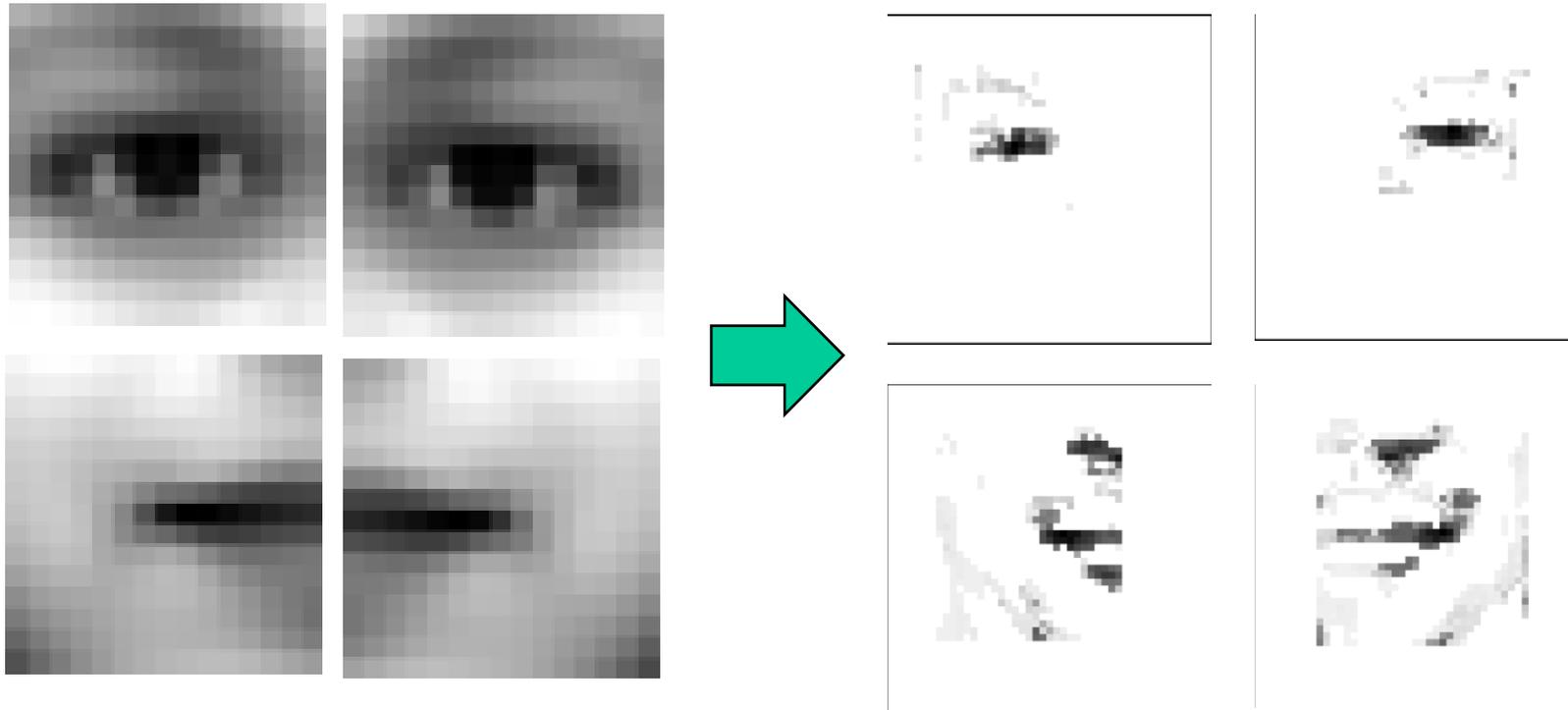
Выборка



Шаблоны

- Строим детектор для каждой метки
- Шаблон для корреляции / Viola-Jones

# Детекторы черт



Шаблоны

Отклики

# Алгоритм

- Поиск лица методом Viola-Jones
- Начальное приближение – усредненные положения меток (по выборке)
- Минимизируем функцию  $f(T, b)$

$$f(T, b) = \begin{cases} \sum_i^n I_i(x_i, y_i), & |b_i| < 3\sqrt{\lambda_i} \\ 0 & \end{cases}$$

где  $I_i(x_i, y_i)$  - отклик детектора метки

# Развитие ASM

- Усовершенствование детекторов меток
- Объединение в единую статистическую модель формы и откликов меток и ее оптимизация
- Построение нескольких моделей и выбор оптимальной

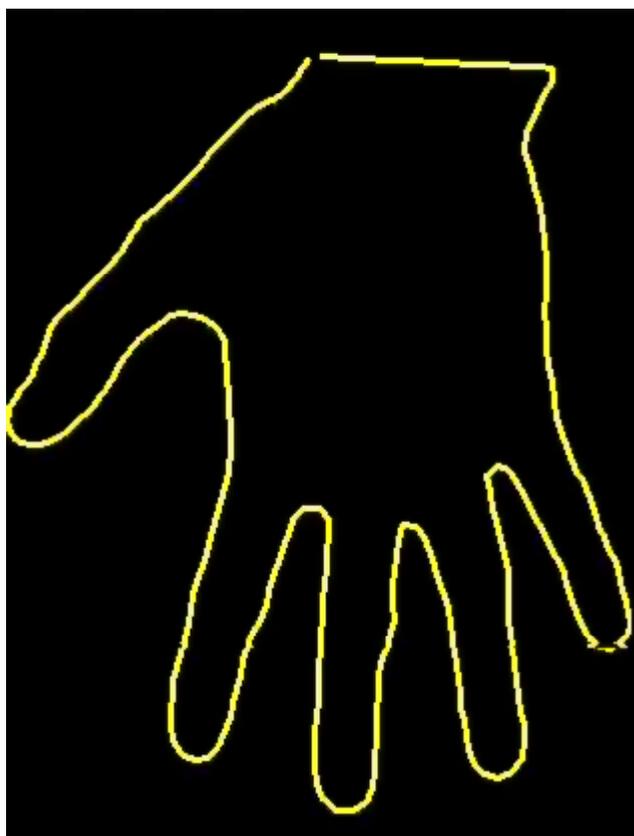
# Активные Модели Формы

- Преимущества
  - Быстрые, простые, точные
  - Легко обобщаются на 3D
- Недостатки
  - Изображение используется частично
  - Необходима хорошая разметка
  - Локальные модели рассматриваются как независимые

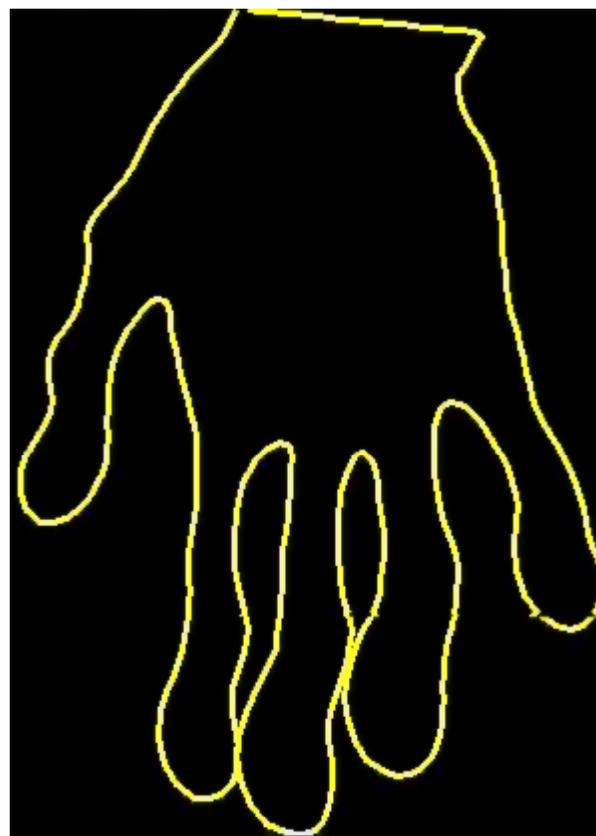
# Проблема построения разметки

- Автоматическое построение модели
  - Необходимо задать соответствия между точками большой выборки
  - Низка надежность автоматического сопоставления
  - Человек невольно ставит точки «разумно»

# Проблема задания соответствий



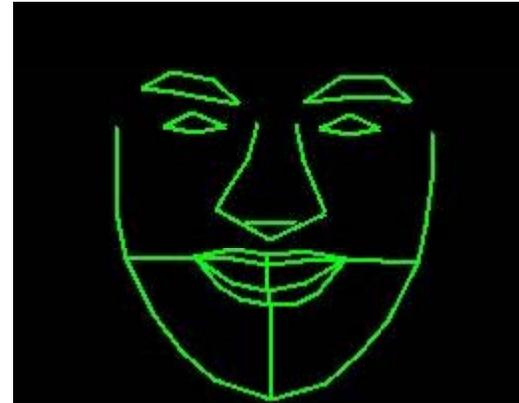
Разметка вручную



Равномерно расставленные точки

# Модели внешности

- «Appearance models»
- Статистические модели и формы и текстуры



# Построение

- Строим вектор формы по каждому примеру

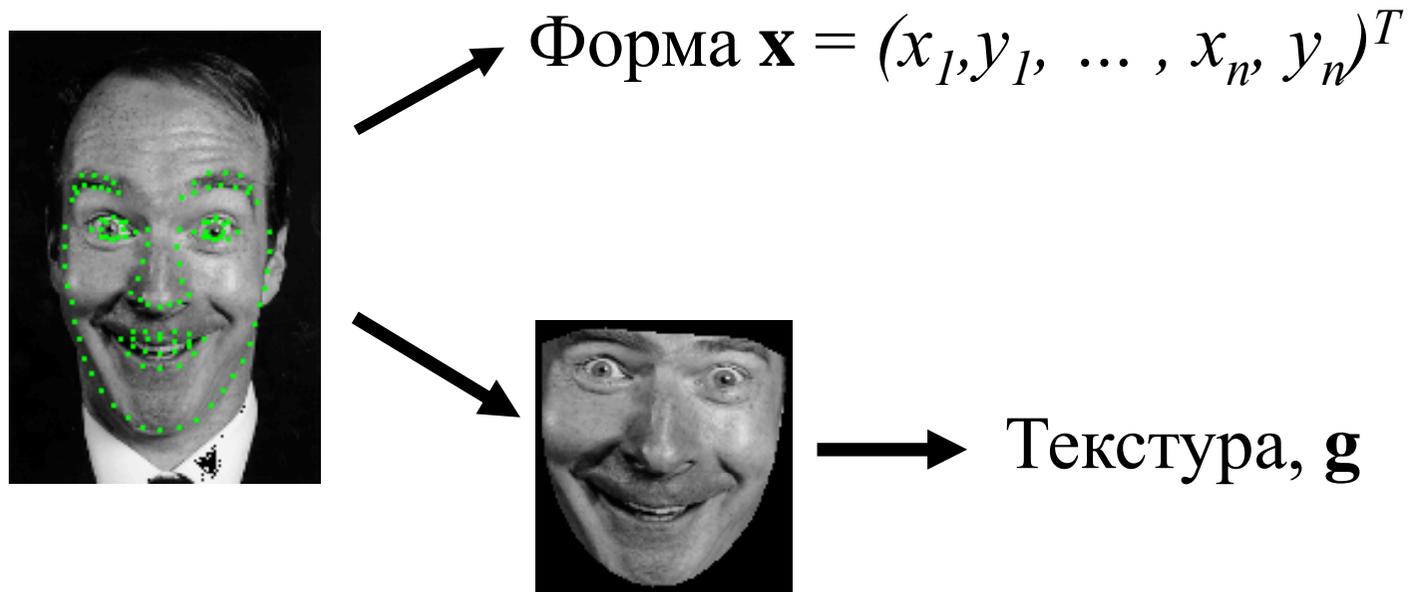


→ Форма  $\mathbf{x} = (x_1, y_1, \dots, x_n, y_n)^T$

- Строим модель  $\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}_s \mathbf{b}_s$

# Построение

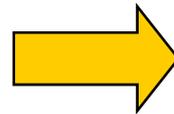
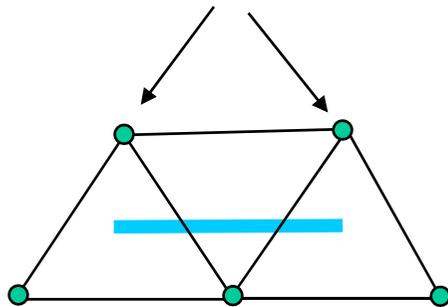
- Строим вектор текстуры



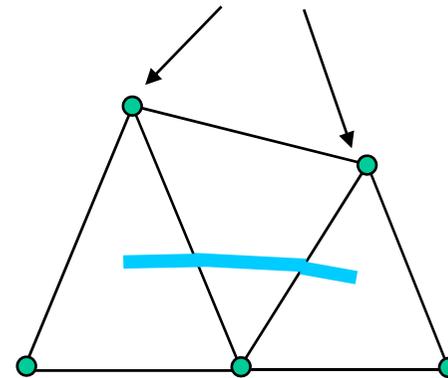
Трансформируем (ворпируем) текстуру к усредненной форме

# Преобразование текстуры

Исходные точки  $(x_i, y_i)$



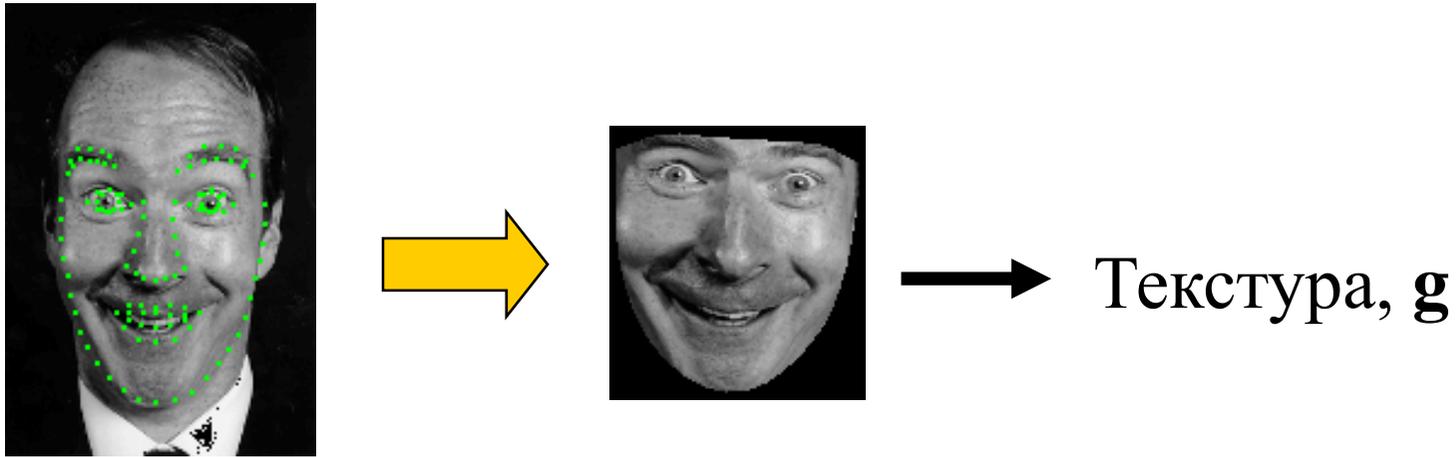
$(x'_i, y'_i)$



- Линейная интерполяция внутри треугольников
- Можно более точными методами (например, сплайны)

# Построение модели

- Строим вектор текстуры для каждого примера



- Нормализуем вектора
- PCA

$$\mathbf{g} = \bar{\mathbf{g}} + \mathbf{P}_g \mathbf{b}_g$$

# Модель текстуры



$$-2\sqrt{\lambda_1} \longleftarrow b_1 \longrightarrow 2\sqrt{\lambda_1}$$



$$-2\sqrt{\lambda_2} \longleftarrow b_2 \longrightarrow 2\sqrt{\lambda_2}$$



$$-2\sqrt{\lambda_3} \longleftarrow b_3 \longrightarrow 2\sqrt{\lambda_3}$$

# Текстурированные модели формы

- Генерируем метки

$$\mathbf{X} = T(\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}_s \mathbf{b}_s)$$

- Искажаем среднюю текстуру



Изменение формы (текстура фиксирована)

# Текстурированная модель формы



$$-2\sqrt{\lambda_1} \longleftarrow b_1 \longrightarrow 2\sqrt{\lambda_1}$$



$$-2\sqrt{\lambda_2} \longleftarrow b_2 \longrightarrow 2\sqrt{\lambda_2}$$

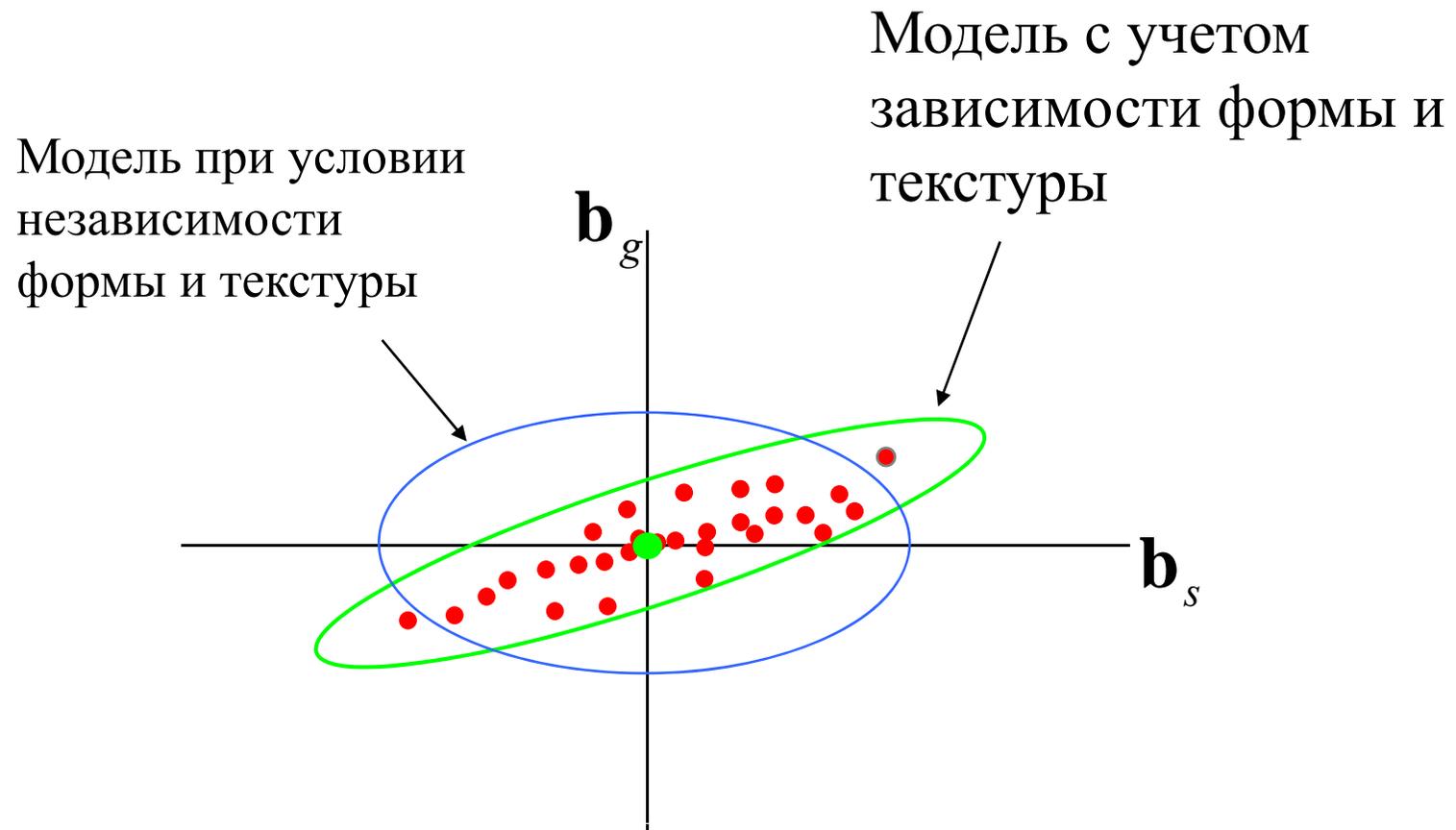


$$-2\sqrt{\lambda_3} \longleftarrow b_3 \longrightarrow 2\sqrt{\lambda_3}$$

# Общая модель

- Изменения формы и текстуры обычно коррелируют
  - При улыбке, изменяются тени (текстура) и форма
  - Нужно моделировать одновременно

# Учет зависимости



# Учет зависимости

- Для каждого примера оцениваем  $\mathbf{b}_s, \mathbf{b}_g$
- Строим общий вектор,  $\mathbf{b}_c = \begin{pmatrix} \mathbf{W}\mathbf{b}_s \\ \mathbf{b}_g \end{pmatrix}$
- PCA  $\mathbf{b}_c = \mathbf{Q}\mathbf{c} = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_s \\ \mathbf{Q}_g \end{pmatrix} \mathbf{c}$
- Матожидание  $\mathbf{b}_s, \mathbf{b}_g = 0 \rightarrow \mathbf{b}_c = 0$

# Объединенная модель

$$\mathbf{b}_c = \begin{pmatrix} \mathbf{W}\mathbf{b}_s \\ \mathbf{b}_g \end{pmatrix} = \mathbf{Q}\mathbf{c} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}\mathbf{Q}_s \\ \mathbf{Q}_g \end{pmatrix} \mathbf{c}$$

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}_s \mathbf{b}_s$$

$$\mathbf{g} = \bar{\mathbf{g}} + \mathbf{P}_g \mathbf{b}_g$$

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{Q}_s \mathbf{c}$$

$$\mathbf{g} = \bar{\mathbf{g}} + \mathbf{Q}_g \mathbf{c}$$

Изменение  $\mathbf{C}$  приводит к изменению текстуры и формы

# Объединенная модель

- Генерируем форму  $X$  и текстуру  $g$
- Искажаем текстуру так, чтобы контрольные точки совпадали с  $X$



$$-2\sqrt{\lambda_1} \longleftarrow b_1 \longrightarrow 2\sqrt{\lambda_1}$$

# Модель внешности лица



$$-2\sqrt{\lambda_1} \longleftarrow b_1 \longrightarrow 2\sqrt{\lambda_1}$$



$$-2\sqrt{\lambda_2} \longleftarrow b_2 \longrightarrow 2\sqrt{\lambda_2}$$

# Модель внешности лица



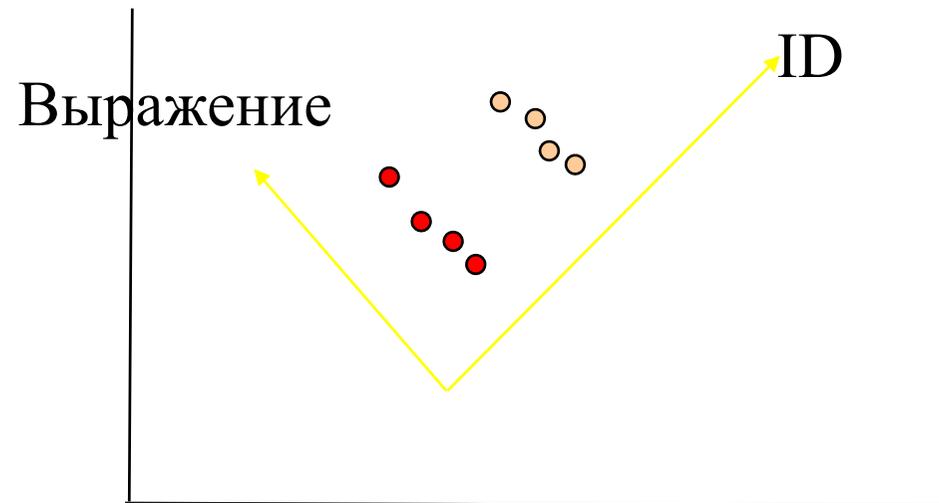
$$-2\sqrt{\lambda_3} \longleftarrow b_3 \longrightarrow 2\sqrt{\lambda_3}$$



$$-2\sqrt{\lambda_4} \longleftarrow b_4 \longrightarrow 2\sqrt{\lambda_4}$$

# Индивидуальные особенности

- Выражение оказывается ортогонально ID



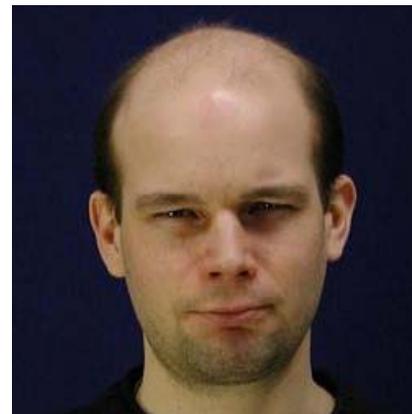
# Индивидуальные особенности



Удивление



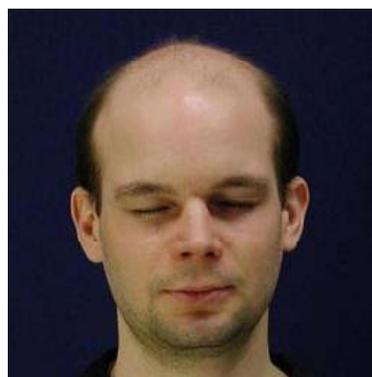
Улыбка



Нахмуриться



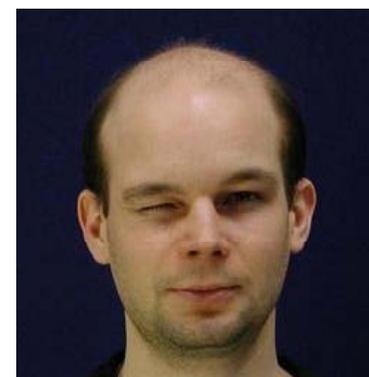
Очки



Закрывает глаза



Подмигивание  
левым



Подмигивание  
правым

# Выражения

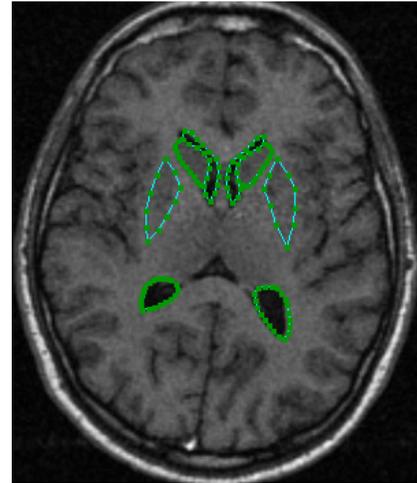


# Выражения

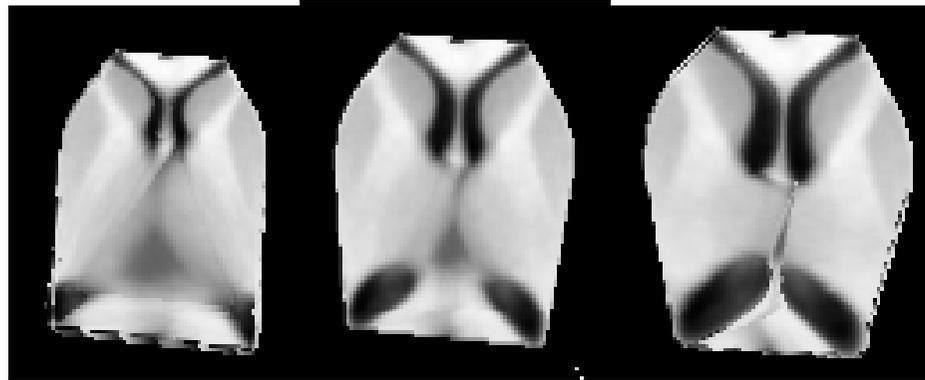


# Структуры мозга

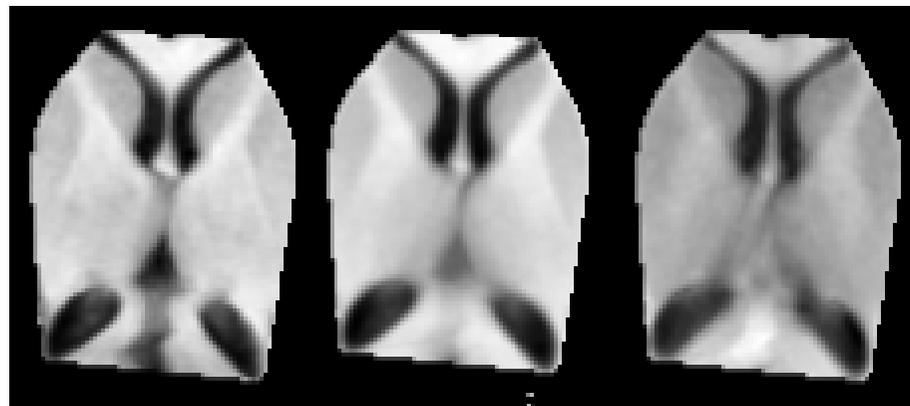
- 72 примера
- 123 точки
- 5000 пикселей



# Модели формы и текстуры

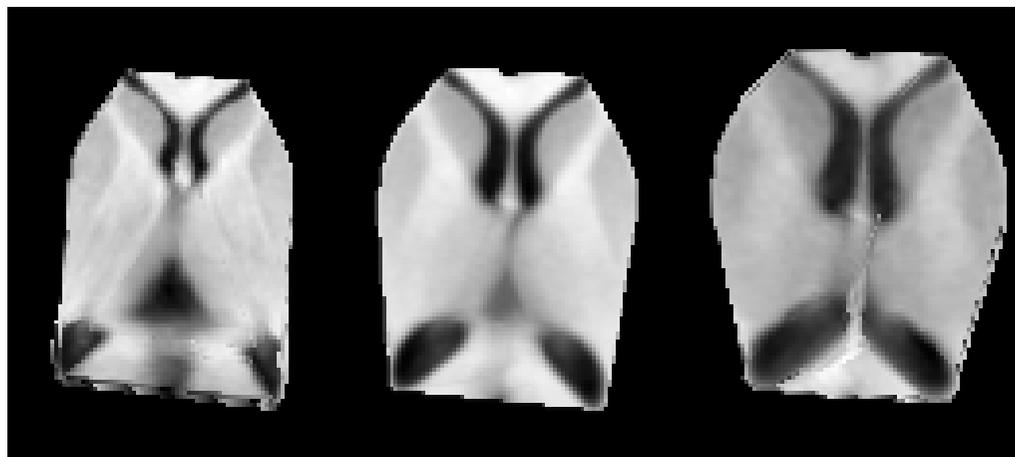


Изменения формы (фиксированная текстура)



Изменение текстуры (фиксированная форма)

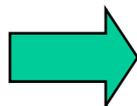
# Объединенная модель



# Active Appearance Models



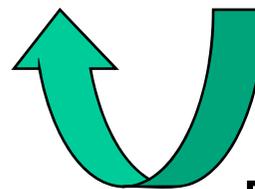
Помещаем  
модель



Измеряем  
отклонение



Уточняем  
модель



Повторяем

# Качество сопоставления

- Ошибка:  $\mathbf{r}(\mathbf{p}) = \mathbf{I}_m(\mathbf{p}) - \mathbf{I}_{im}(\mathbf{p})$
- $\mathbf{p}$  - параметры,  $\mathbf{p} = (\mathbf{c}, X_c, Y_c, s, \theta)$
- Должны максимизировать  $p(\mathbf{p}|\mathbf{r})$

Правило Байеса:  $p(\mathbf{p}|\mathbf{r}) = \frac{p(\mathbf{r}|\mathbf{p})p(\mathbf{p})}{p(\mathbf{r})}$

- Обычно  $p(\mathbf{r})$  неизвестно

# Качество сопоставления

- Обычно максимизируют

$$p(\mathbf{r} | \mathbf{p})p(\mathbf{p})$$

- Эквивалентно:

$$\log p(\mathbf{r}(\mathbf{p}) | \mathbf{p}) + \log p(\mathbf{p})$$

- Эквивалентно минимизации:

$$E(\mathbf{p}) = -\log p(\mathbf{r}(\mathbf{p})) - \log p(\mathbf{p})$$

# Качество сопоставления

- Независимо нормально распределенный шум:

$$p(\mathbf{r}(\mathbf{p})) \propto \exp\left(\frac{-\mathbf{r}(\mathbf{p})^T \mathbf{r}(\mathbf{p})}{2\sigma_r^2}\right)$$

$$\log p(\mathbf{r}(\mathbf{p})) = \frac{-\mathbf{r}(\mathbf{p})^T \mathbf{r}(\mathbf{p})}{2\sigma_r^2} + const$$

$$E(\mathbf{p}) = \frac{|\mathbf{r}(\mathbf{p})|^2}{2\sigma_r^2} - \log p(\mathbf{p}) + const$$

# Качество сопоставления

- Пусть все значения параметров равновероятны

$$p(\mathbf{p}) = \text{const}$$

$$E(\mathbf{p}) = \frac{|\mathbf{r}(\mathbf{p})|^2}{2\sigma_r^2} + \text{const}$$

- Тогда ищем параметры, минимизирующие квадрат ошибки,

$$E(\mathbf{p}) = |\mathbf{r}(\mathbf{p})|^2$$

# Качество сопоставления

- Если параметры распределены по нормальному распределению,

$$p(\mathbf{p}) \propto \exp(-0.5\mathbf{p}^T \mathbf{S}^{-1} \mathbf{p})$$

- Минимизируем

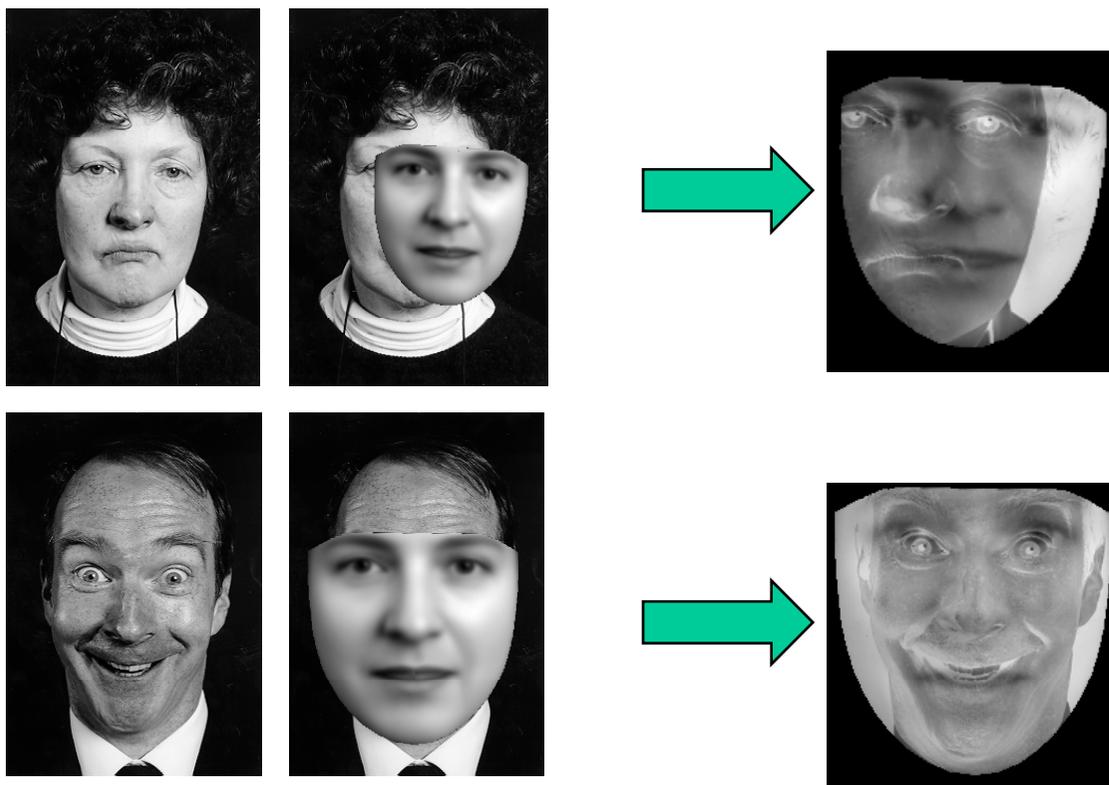
$$E(\mathbf{p}) = \frac{|\mathbf{r}(\mathbf{p})|^2}{2\sigma_r^2} + 0.5\mathbf{p}^T \mathbf{S}^{-1} \mathbf{p}$$

# Оптимизация

- Ищем  $\mathbf{p}$  , минимизирующее  $E(\mathbf{p})$
- $\mathbf{p}$  – высокой размерности ( $\sim 100$ )
- Оптимизация?
- Используем трюк для приближенного вычисления

# Идея

- Ошибка сопоставления как-то соотносится с ошибкой в  $p$



# Обучение

- Для каждого примера
  - Поиск наилучших параметров  $\mathbf{p}$
  - Случайно смещаем  $\mathbf{p}$  на  $\delta\mathbf{p}$  и замеряем

$$\mathbf{r}(\mathbf{p} + \delta\mathbf{p}) = \mathbf{I}_m(\mathbf{p}) - \mathbf{I}_{im}(\mathbf{p} + \delta\mathbf{p})$$

- Оценим  $\mathbf{R}$ :

$$\delta\mathbf{p} = \mathbf{R}\mathbf{r}(\mathbf{p} + \delta\mathbf{p})$$

## Другой подход

$$\mathbf{r}(\mathbf{p} + \delta\mathbf{p}) = \mathbf{r}(\mathbf{p}) + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{p}} \delta\mathbf{p}$$

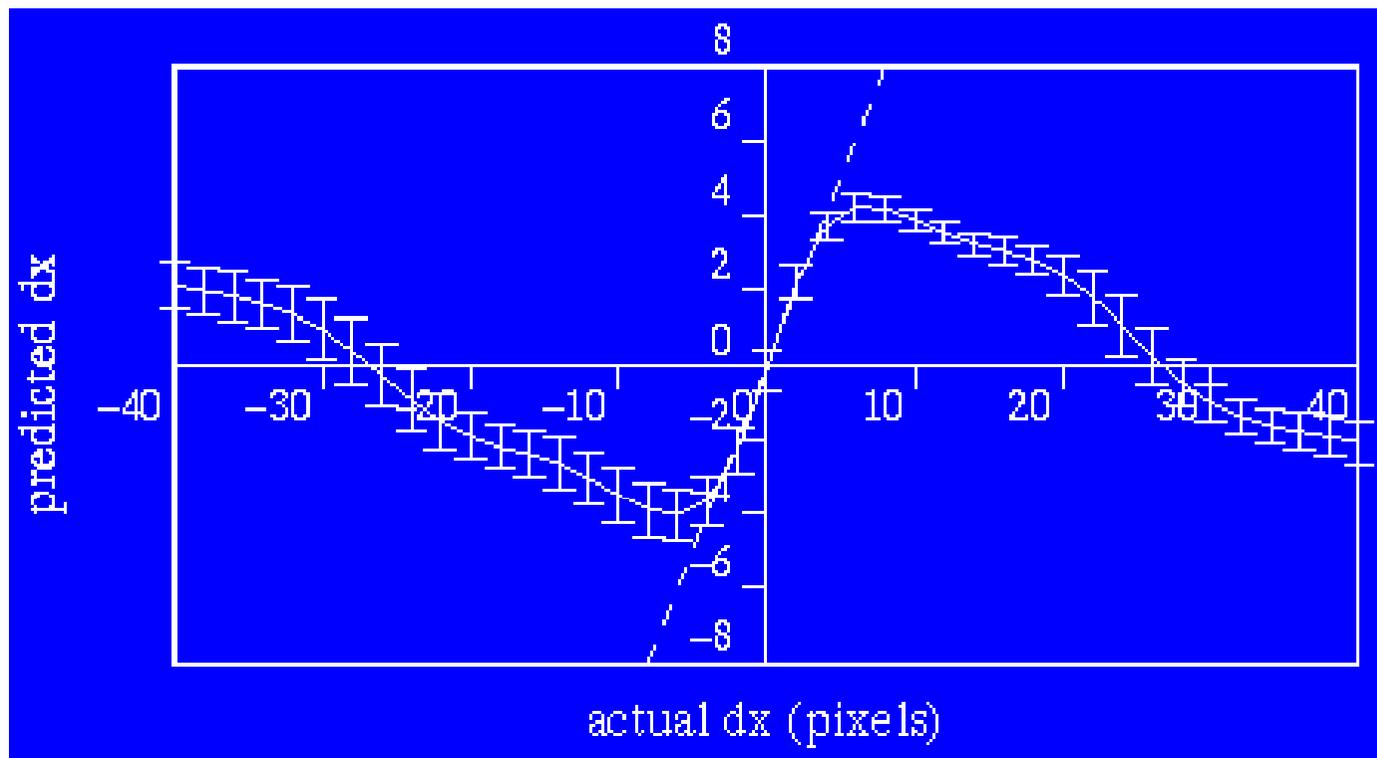
Чтобы минимизировать  $E(\mathbf{p} + \delta\mathbf{p})$ ,  $\mathbf{E} = \mathbf{r}^T \mathbf{r}$

$$\delta\mathbf{p} = -\mathbf{R}\mathbf{r}(\mathbf{p})$$

$$\mathbf{R} = \left( \begin{array}{cc} \frac{\partial \mathbf{r}^T}{\partial \mathbf{p}} & \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{p}} \end{array} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{r}^T}{\partial \mathbf{p}}$$

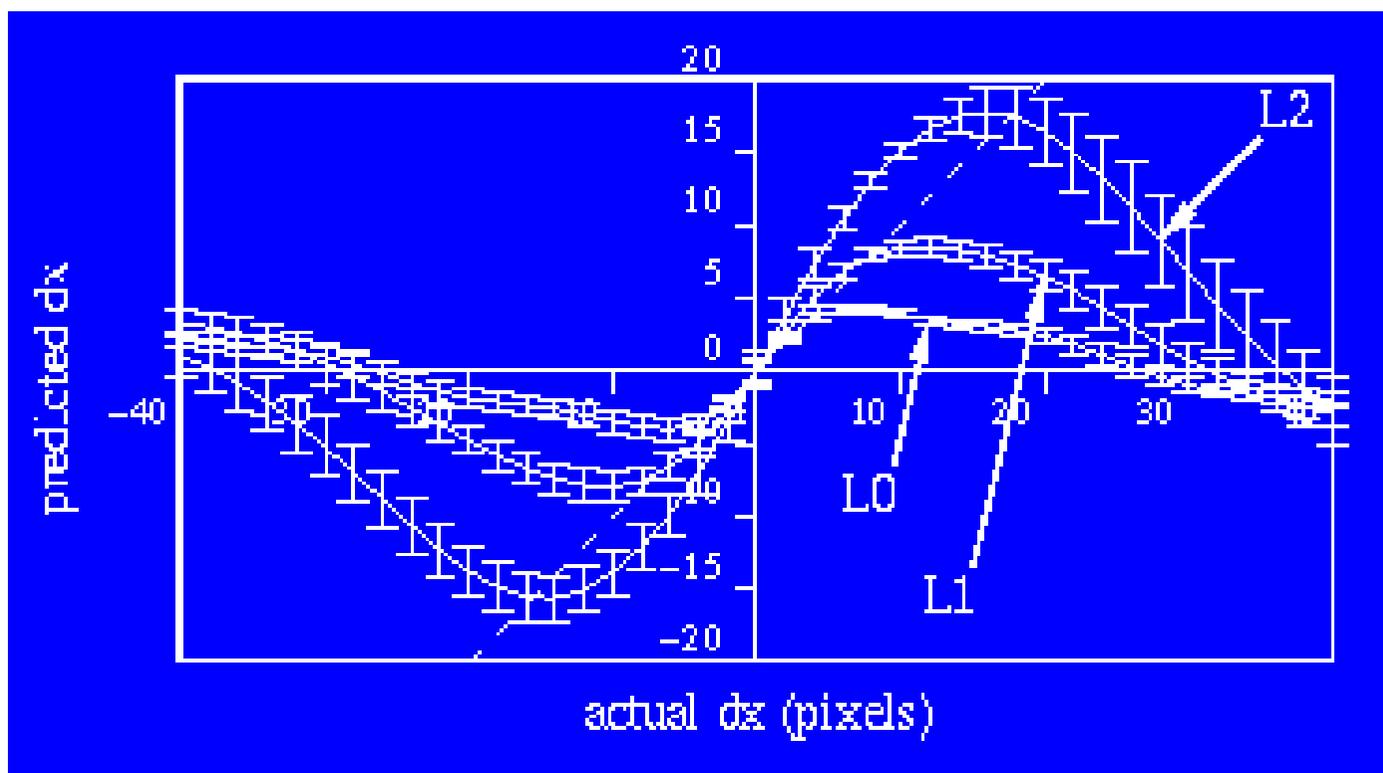
# Насколько точно предсказание?

- Предсказание  $\delta x$  vs. истинное  $\delta x$



# Многомасштабный подход

Предсказание  $\delta x$  vs. истинное  $\delta x$



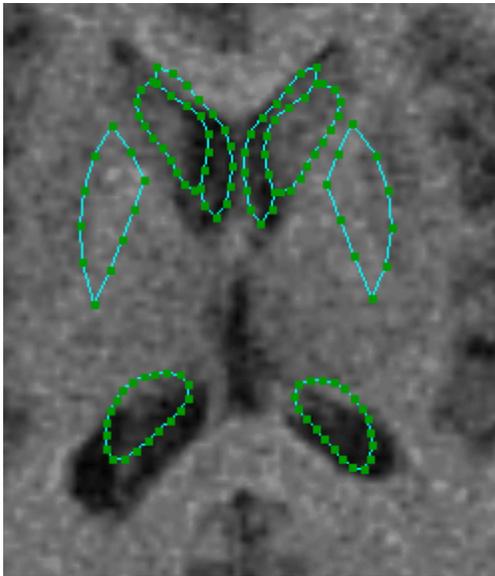
# Алгоритм ААМ

- Инициализация  $\mathbf{I}_m(\mathbf{p})$
- Начинаем с низкого разрешения
- На каждом уровне
  - Измеряем ошибку,  $\mathbf{r}(\mathbf{p})$
  - Оцениваем смещение  $\delta\mathbf{p} = \mathbf{R}\mathbf{r}$
  - $\mathbf{p} \Rightarrow \mathbf{p} - \delta\mathbf{p}$
  - Повторяем до сходимости

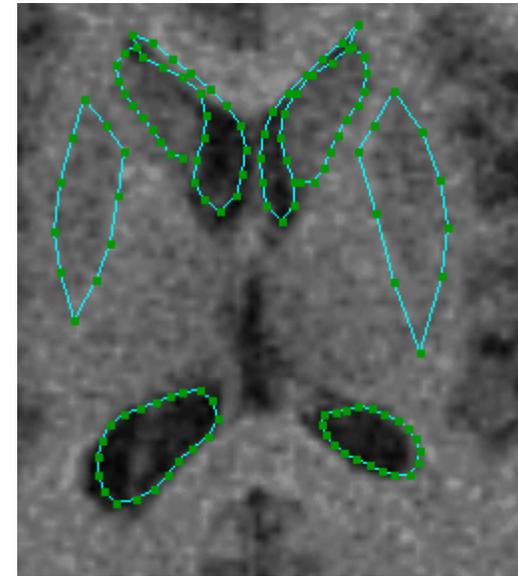
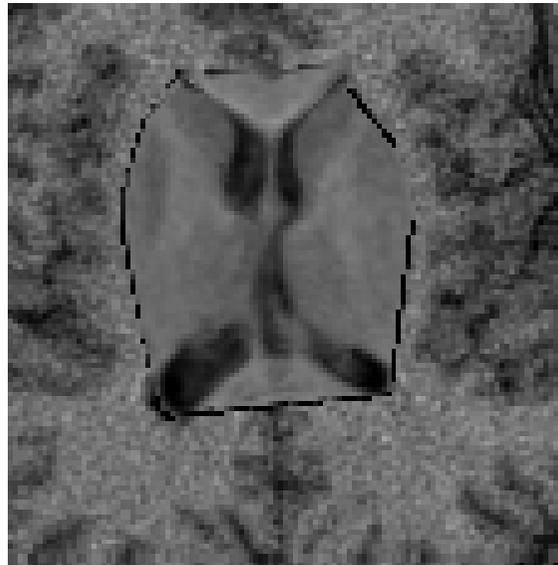
# Пример поиска лица



# Структуры мозга

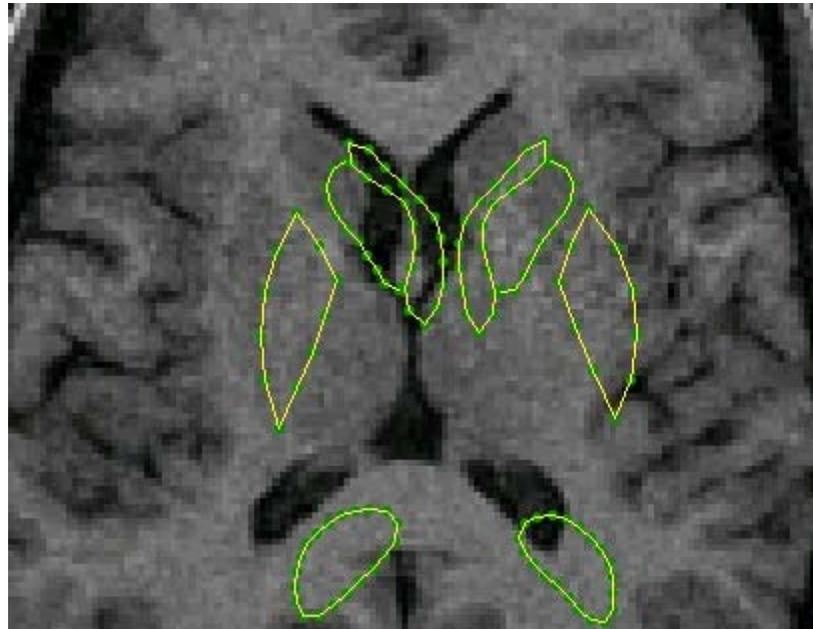


Начальное положение



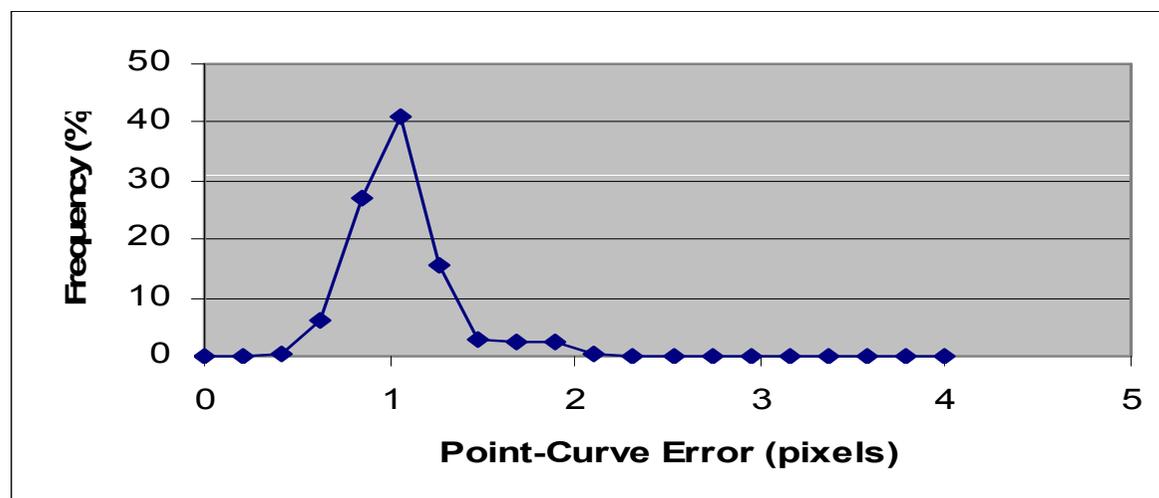
Результат

# Структуры мозга



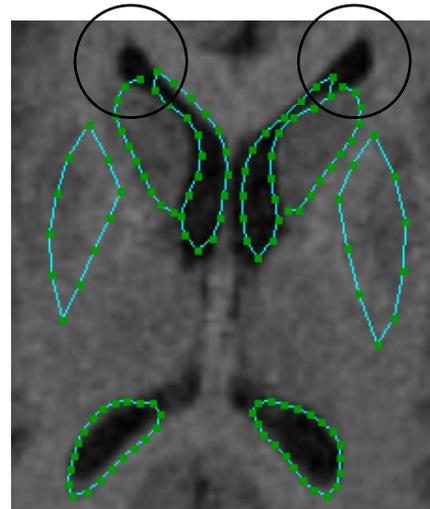
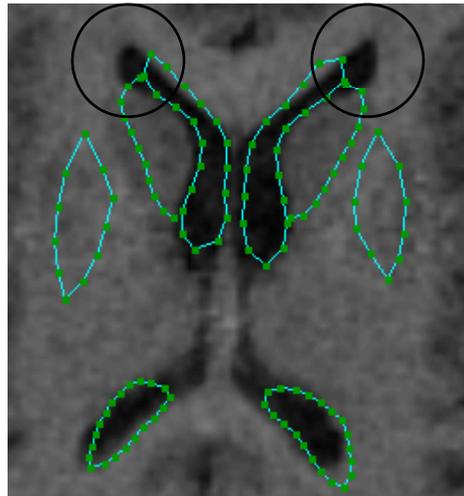
# Точность поиска (Brain images)

- Leave-1-out
  - Для каждого примера:
    - Используем всю выборку для тренировки, кроме текущего примера,
    - Проверяем на данном изображении

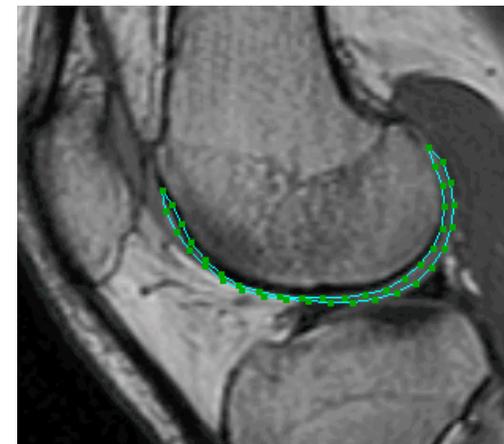
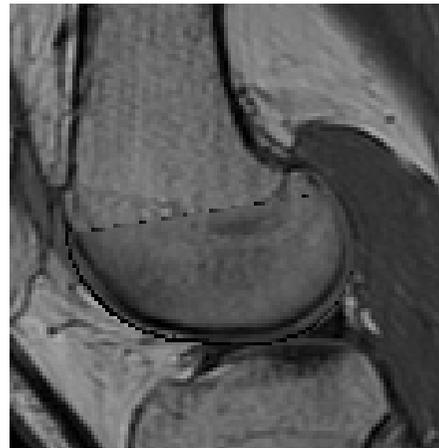
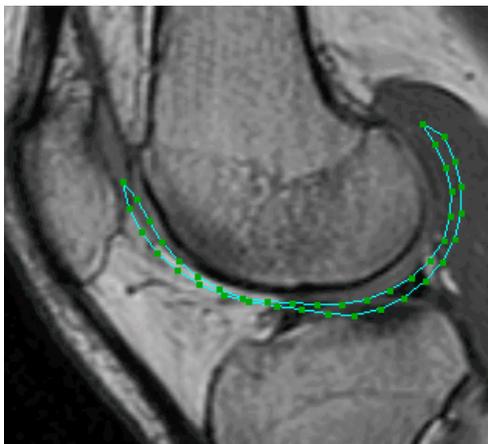
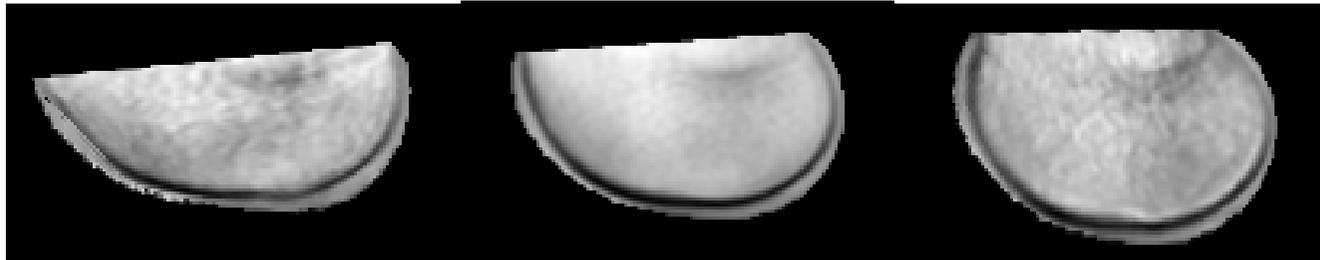


# Неудачные примеры

- Плохая инициализация -> м.б. ошибка
- Используется только текущая область
  - Может не расширяться, как требуется



# MR - Сустав



# Заключение

- Статистические модели
  - Формы
  - Внешности
- Алгоритмы сопоставления
  - Активные Модели Формы (ASM)
  - Активные Модели Внешности (AAM)
- Мощный инструмент интерпретации изображений