

Нейросетевой синтез текстур с трендами

Будалян Я. С.

Научный руководитель к.т.н., доц. Грачев Е. А.

2017 г.

Введение

Задача состоит в синтезе изображений среды, которые будут содержать в себе тренд, т.е. изменение некоторой статистической характеристики. Такими трендами могут быть, например, изменение интенсивности появления частиц среды вдоль изображения, или изменение пористости среды.

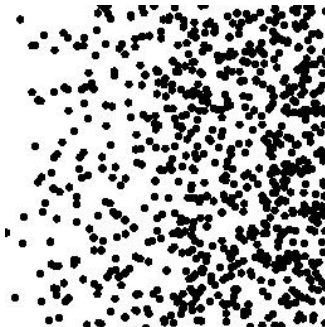


Рис.: Пример текстуры с трендом интенсивности частиц

Математическая постановка

С математической точки зрения, задача сводится к синтезу случайного изображения X' (и построению соответствующей процедуры синтеза), принадлежащему распределению, близкому к желаемому:

$$P_{X'} \approx P_X,$$

где P_X - распределение изображений с трендами, удовлетворяющих следующим ограничениям (для упрощения задачи):

- Это монохромные изображения 256 x 256 пикселей
- Изменяющимся свойством является интенсивность появления частиц λ
- Тренд является линейным и направлен вдоль оси x : $\lambda = \lambda_0 + kx$

Распределение P_X задается обучающей выборкой.

Существующие подходы к решению задачи

Есть несколько подходов к решению задач подобного рода:

- 'Классический' статистический подход
- Базовый нейросетевой подход
- Генеративные состязательные сети (GAN)

'Классический' статистический подход

- Вводится параметризованное семейство распределений вероятности $P_{\theta}(x)$
- Параметры θ находятся из обучающей выборки:

$$\mathcal{L}_{\theta}(D) = \prod_{x \in D} P_{\theta}(x)$$

$$\theta^* = \arg \max_{\theta} \mathcal{L}_{\theta}(D)$$

- Генерируется семпл из P_{θ^*}

Этот подход приводит к проблемам:

- Пространство параметров θ может быть огромной размерности
- Известной параметрической модели распределения может вообще не существовать

Простой пример - синтез человеческих лиц: с помощью классического подхода эта задача не была решена с хорошим качеством.

Базовый нейросетевой подход

- Вводится параметризованное семейство распределений вероятности $P_{\theta}(x)$
 - ▶ Вводятся скрытые переменные V и функция(нейросеть) для получения x из V (фактически, классификация, развернутая в другую сторону)
- Определяются параметры распределения (т.е. обучение нейросети)
- Генерируются семплы из P_{θ^*}

Этот подход возможен, однако на практике трудноосуществим.

Изначальная задача: найти процедуру генерирования X' так, чтобы $P_{X'} \approx P_X$.
 Переформулируем:

$$\rho(P_{X'}, P_X) \longrightarrow \min_{P_{X'}}$$

- Введем некоторые скрытые переменные с фиксированным распределением, например

$$V \sim U^n[-1, 1]$$

- и параметризованную процедуру генерации:

$$X' = g_\theta(V)$$

Переформулируем:

$$\rho(P_{X'}, P_X) \longrightarrow \min_{P_{X'}}$$

$$\rho(g_\theta(V), P_X) \longrightarrow \min_{g_\theta(V)}$$

$$\rho(g_\theta(V), P_X) \longrightarrow \min_{\theta}$$

Остается вопрос: что использовать в качестве метрики похожести двух распределений ρ , где одно из распределений задано обучающей выборкой.

- В качестве метрики статистической похожести можно использовать loss-функцию обученного классификатора:

$$\rho(P_{X'}, P_X) \longrightarrow \min \Leftrightarrow \mathcal{L} \longrightarrow \max,$$

где \mathcal{L} - функция потерь обученного классификатора.

- Введем две нейросети:
 - ▶ $d_\zeta(x)$ - классификатор для измерения расстояния, **дискриминатор**
 - ▶ $g_\theta(x)$ - сеть, трансформирующая V в X' , **генератор**
- Введем loss-функцию дискриминатора(например, кросс-энтропия):

$$\begin{aligned}
 L(X, X') &= \frac{1}{2} \mathbb{E}_{x \sim X} l(d_\zeta(x), 1) + \frac{1}{2} \mathbb{E}_{x' \sim X'} l(d_\zeta(x'), 0) = \\
 &= -\frac{1}{2} (\mathbb{E}_{x \sim X} \log d_\zeta(x) + \mathbb{E}_{x' \sim X'} \log(1 - d_\zeta(x'))) = \\
 &= -\frac{1}{2} (\mathbb{E}_{x \sim X} \log d_\zeta(x) + \mathbb{E}_{v \sim V} \log(1 - d_\zeta(g_\theta(v)))) = \\
 &= L(\zeta, \theta)
 \end{aligned}$$

- Loss-функция обученного классификатора:

$$L^*(\theta) = \min_{\zeta} L(\zeta, \theta)$$

- Соответственно,

$$\min_{\zeta} L(\zeta, \theta) \longrightarrow \max_{\theta}$$

$$\theta^* = \arg \max_{\theta} \left[\min_{\zeta} L(\zeta, \theta) \right]$$

- Определим оптимальный дискриминатор:

$$d_{\theta}^* = d_{\zeta^*(\theta)}$$

$$\zeta^*(\theta) = \arg \min_{\zeta} L(\zeta, \theta)$$

Обучение GAN

В итоге, процесс обучения принимает следующий вид:

- Обучаем дискриминатор при 'замороженном' генераторе
- Обучаем генератор при 'замороженном' дискриминаторе
- Повторяем много раз

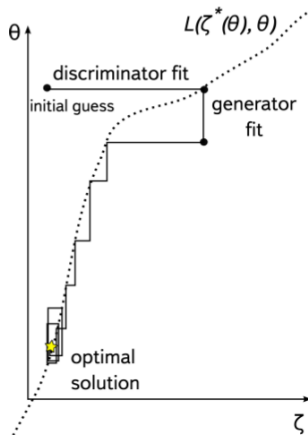


Рис.: Схематическое изображение процесса обучения GAN

pix2pix GAN

Для решения задачи было попробовано применить модификацию GAN-сети под названием "pix2pix GAN". Общий функционал потерь для pix2pix GAN выглядит следующим образом:

$$\mathcal{L}(G, D) = \mathcal{L}_{adv}(G, D) + \eta \mathbb{E}_{s_1, s_2, r \sim p_{data}(s_1, s_2, r)} (\|r - G(s_1, s_2)\|_1)$$

$$\mathcal{L}_{adv}(G, D) = \mathbb{E}_{s_1, s_2, r \sim p_{data}(s_1, s_2, r)} \log D(s_1, s_2, r) + \\ + \mathbb{E}_{s_1, s_2 \sim p_{data}(s_1, s_2)} \log(1 - D(s_1, s_2, G(s_1, s_2)))$$

где G, D - генератор и дискриминатор, (s_1, s_2, r) - тройка изображений (интенсивность слева, справа и реальное изображение с трендом), $\mathbb{E}_{s_1, s_2, r \sim p_{data}(s_1, s_2, r)}$ - мат. ожидание логарифмического правдоподобия того, что тройка изображений (s_1, s_2, r) принадлежит вероятностному распределению реальных троек $p_{data}(s_1, s_2, r)$, а $p_{data}(s_1, s_2)$ соответствует распределению реальных изображений s_1, s_2 .

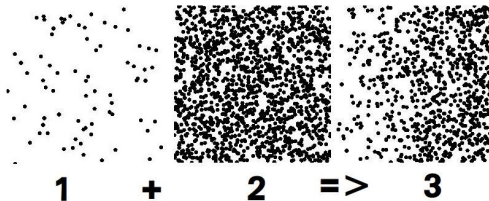


Рис.: Вход и желаемый выход нейросети

Критерий качества

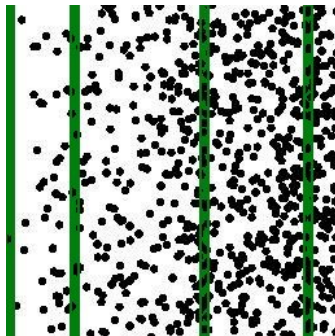
После обучения генератора, необходимо проверить, что сгенерированные им изображения действительно имеют искомые характеристики. Для этого нужно ввести специальную метрику, которая будет учитывать наличие в изображении тренда интенсивности частиц. Было решено использовать среднюю плотность черных пикселей в некотором окне, и проходить этим окном по изображению:

$$\xi_k = \frac{1}{Hw} \sum_{i=k}^{k+w} \sum_{j=0}^H \left| \frac{x(i,j) - 255}{255} \right|,$$

$$k = \overline{1, W - w + 1}$$

Построив график $\xi(k)$ можно увидеть, как меняется плотность пикселей и прослеживается ли тренд. В качестве метрики можно взять среднеквадратичную ошибку:

$$\xi = \frac{1}{W - w} \sum_{k=1}^{W-w+1} (\xi_k - \xi_{0k})^2,$$



где $\xi_{0k} - \xi_k$, усредненное по примерам из обучающей выборки.

Результаты

Было проведено обучение нейросети описанной архитектуры при различных гиперпараметрах. Обучающей выборкой был массив из 3500 троек изображений.

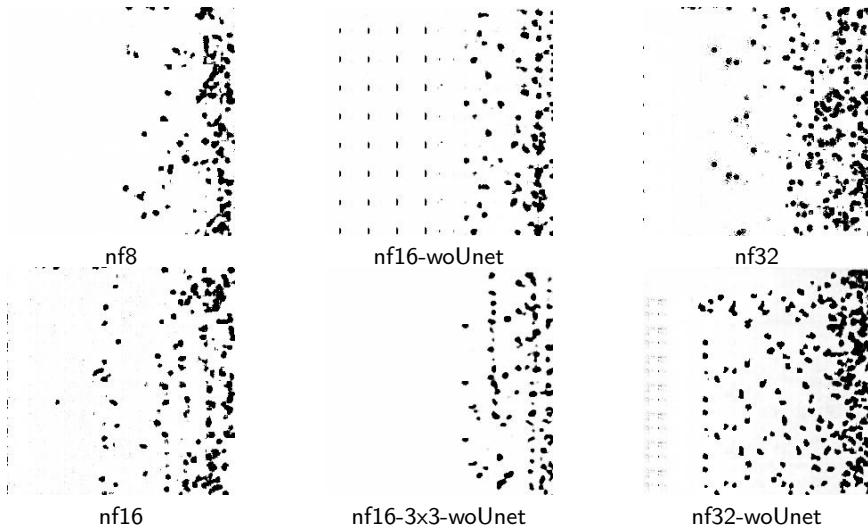
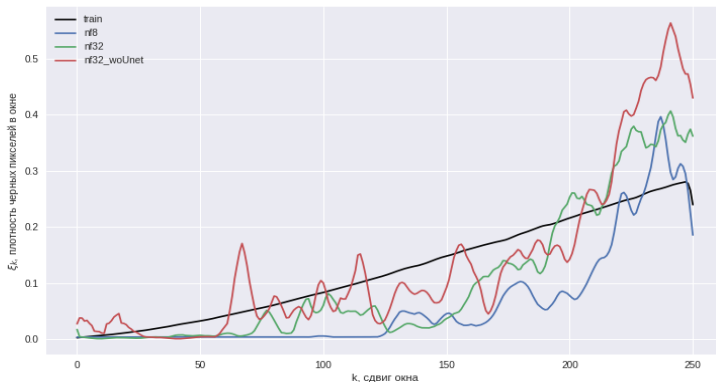


Рис.: Примеры сгенерированных текстур

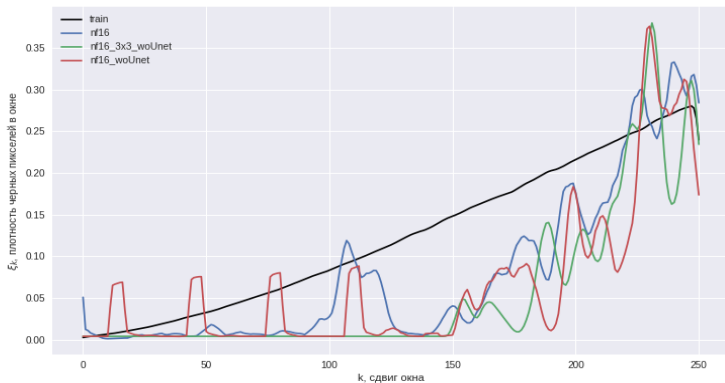
Результаты

Для сгенерированных наборов текстур получились следующие результаты:



Сеть	Метрика
nf8	0.00825
nf32	0.00549
nf32-woUnet	0.00688

Результаты



Сеть	Метрика
nf16	0.00606
nf16-woUnet	0.00881
nf16-3x3-woUnet	0.01034

Заключение

Полученные результаты показывают, что в принципе нейросеть способна уловить тренд и воспроизвести его, однако на данный момент качество генерации относительно невысоко. Необходимо провести дальнейшее исследование оптимальных гиперпараметров, и, возможно, увеличить объем обучающей выборки. Также можно провести аналогичные эксперименты с другими архитектурами генераторов.