Компьютерная графика

Лекция 15: рендеринг текста, bitmap-шрифты, векторные шрифты, (M)SDF-шрифты, чем заняться дальше

2021

Рендеринг текста

- Текст – очень сложная штука

Рендеринг текста

- Текст – очень сложная штука
- Слева направо (латиница, кириллица), справа налево (арабский, иврит), сверху вниз (хангыль, старомонгольское письмо)

Рендеринг текста

- Текст – очень сложная штука
- Слева направо (латиница, кириллица), справа налево (арабский, иврит), сверху вниз (хангыль, старомонгольское письмо)
- Иероглифы (кандзи), слоговое письмо (катакана, хирагана), консонантное письмо (арабский), консонантно-вокалическое письмо (латиница, кириллица)

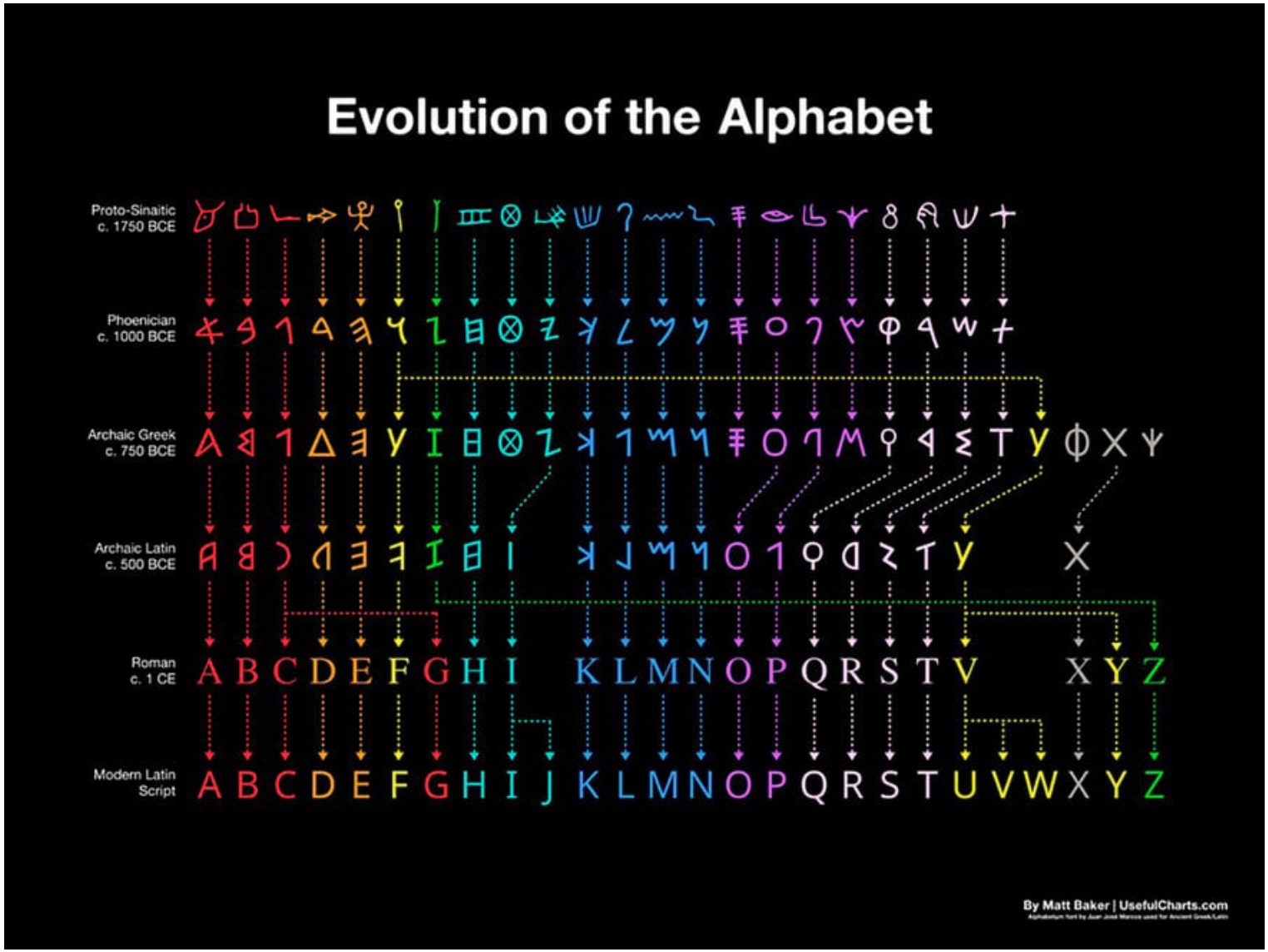
Рендеринг текста

- Текст – очень сложная штука
- Слева направо (латиница, кириллица), справа налево (арабский, иврит), сверху вниз (хангыль, старомонгольское письмо)
- Иероглифы (кандзи), слоговое письмо (катакана, хирагана), консонантное письмо (арабский), консонантно-вокалическое письмо (латиница, кириллица)
- Одна *графема* может представлять один или несколько звуков или слогов

Рендеринг текста

- Текст – очень сложная штука
- Слева направо (латиница, кириллица), справа налево (арабский, иврит), сверху вниз (хангыль, старомонгольское письмо)
- Иероглифы (кандзи), слоговое письмо (катакана, хирагана), консонантное письмо (арабский), консонантно-вокалическое письмо (латиница, кириллица)
- Одна *графема* может представлять один или несколько звуков или слогов
- Могут быть сложные правила по соединению символов между собой (арабский, лигатуры в латинице), дополнения к символам (диакритика)

Алфавиты


Evolution of the Alphabet
Proto-Sinaitic c. 1750 BCE
Phoenician c. 1000 BCE
Archaic Greek c. 750 BCE
Archaic Latin c. 500 BCE
Roman c. 1 CE
A B C D E F G H I K L M N O P Q R S T V X Y Z
Modern Latin Script
A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z
By Matt Baker | UsefulCharts.com

Корейская письменность

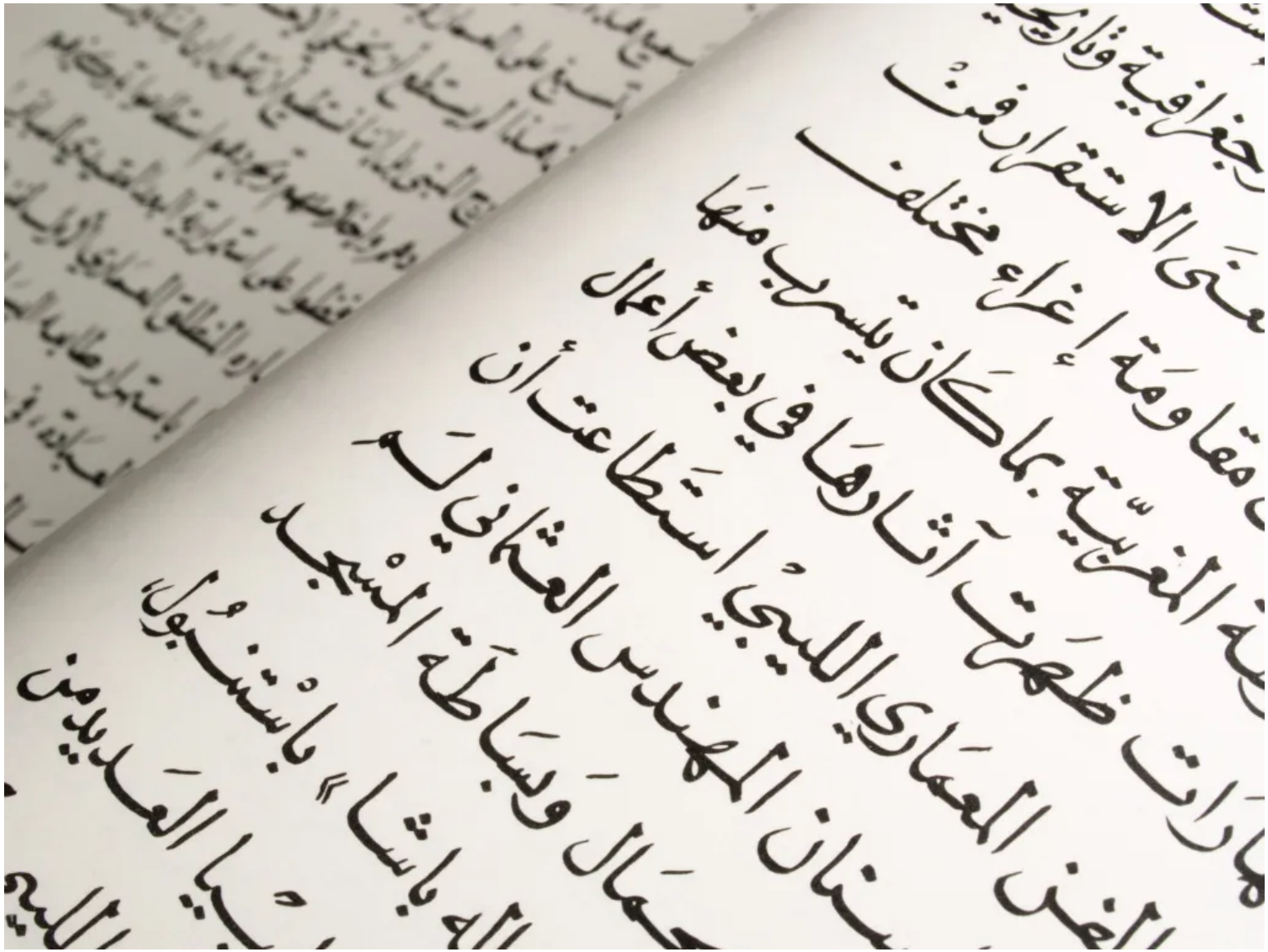
Sample text
(vertical, hangeul only)

모든 인간은 태어날 때부터
자유로우며 그 존엄과 권리에
있어 동등하다. 인간은
천부적으로 이성과 양심을
부여받았으며 서로 형제애의
정신으로 행동하여야 한다.

Sample text
(vertical, hangeul & hanja)

모든 人間은 태어날때부터
自由로우며、그 尊嚴과 權利에
있어 同等하다。人間은
天賦的으로 理性과 良心을
賦與받았으며、서로 兄弟愛의
精神으로 行動하여야한다

Арабская письменность



Этапы рендеринга текста

- Абстрактный текст

Этапы рендеринга текста

- Абстрактный текст
- $+$ кодировка $\Rightarrow$ машинное представление текста

Этапы рендеринга текста

- Абстрактный текст
- + кодировка $\Rightarrow$ машинное представление текста
- + шрифт + настройки шейпинга (shaping) $\Rightarrow$ набор глифов (изображений символов) и их координат

Этапы рендеринга текста

- Абстрактный текст
- + кодировка $\Rightarrow$ машинное представление текста
- + шрифт + настройки шейпинга (shaping) $\Rightarrow$ набор глифов (изображений символов) и их координат
- + алгоритм рендеринга $\Rightarrow$ нарисованный текст

Кодировки

- Описывают машинное представление текста, т.е. соответствие **последовательностей** символов и **последовательностей** бит

Кодировки

- Описывают машинное представление текста, т.е. соответствие **последовательностей** символов и **последовательностей** бит
- ASCII: 7 бит (обычно дополняется нулевым старшим битом до 8 бит), первые 32 символа - управляющие (`\r`, `\n`, tab, ...), остальные 96 – буквы английского алфавита (большие и маленькие) и прочие символы (различные скобки, арифметические операции, пунктуация, пробел, ...)

Кодировки

- Описывают машинное представление текста, т.е. соответствие **последовательностей** символов и **последовательностей** бит
- ASCII: 7 бит (обычно дополняется нулевым старшим битом до 8 бит), первые 32 символа - управляющие (`\r`, `\n`, tab, ...), остальные 96 – буквы английского алфавита (большие и маленькие) и прочие символы (различные скобки, арифметические операции, пунктуация, пробел, ...)
  - Многие кодировки совпадают с ASCII в диапазоне 0-127 или 32-127

Кодировки

- Описывают машинное представление текста, т.е. соответствие **последовательностей** символов и **последовательностей** бит
- ASCII: 7 бит (обычно дополняется нулевым старшим битом до 8 бит), первые 32 символа - управляющие (`\r`, `\n`, tab, ...), остальные 96 – буквы английского алфавита (большие и маленькие) и прочие символы (различные скобки, арифметические операции, пунктуация, пробел, ...)
  - Многие кодировки совпадают с ASCII в диапазоне 0-127 или 32-127
- Огромное количество в основном 8-битных кодировок для разных алфавитов и систем:
  - ISO/IEC 8859 – 15 разных вариантов (ISO/IEC 8859-5 для русского языка)
  - Code page XXX – много разных кодировок для DOS (Code page 866 для русского языка)
  - Windows code pages (Windows-1251 для русского языка)
  - KOI-8 и вариации – для русского языка
  - etc.

Кодировки

- Описывают машинное представление текста, т.е. соответствие **последовательностей** символов и **последовательностей** бит
- ASCII: 7 бит (обычно дополняется нулевым старшим битом до 8 бит), первые 32 символа - управляющие (`\r`, `\n`, tab, ...), остальные 96 – буквы английского алфавита (большие и маленькие) и прочие символы (различные скобки, арифметические операции, пунктуация, пробел, ...)
  - Многие кодировки совпадают с ASCII в диапазоне 0-127 или 32-127
- Огромное количество в основном 8-битных кодировок для разных алфавитов и систем:
  - ISO/IEC 8859 – 15 разных вариантов (ISO/IEC 8859-5 для русского языка)
  - Code page XXX – много разных кодировок для DOS (Code page 866 для русского языка)
  - Windows code pages (Windows-1251 для русского языка)
  - KOI-8 и вариации – для русского языка
  - etc.
- Unicode-кодировки

Unicode

- Unicode – стандарт, описывающий соответствие абстрактных символов целочисленным кодам (*code points*) в диапазоне `0..10FFFFh` исключая `D800h..DFFFh` для суррогатных пар в UTF-16 (итого 1112064 code point'а), и рекомендации по их интерпретации и визуализации

Unicode

- Unicode – стандарт, описывающий соответствие абстрактных символов целочисленным кодам (*code points*) в диапазоне `0..10FFFFh` исключая `D800h..DFFFh` для суррогатных пар в UTF-16 (итого 1112064 code point'а), и рекомендации по их интерпретации и визуализации
- На сегодняшний день описывает 149186 символов (в прошлом году было 144697)

Unicode

- Unicode – стандарт, описывающий соответствие абстрактных символов целочисленным кодам (*code points*) в диапазоне `0..10FFFFh` исключая `D800h..DFFFh` для суррогатных пар в UTF-16 (итого 1112064 code point'a), и рекомендации по их интерпретации и визуализации
- На сегодняшний день описывает 149186 символов (в прошлом году было 144697)
- Сам unicode – **не кодировка**, но есть основанные на нём кодировки:

Unicode

- Unicode – стандарт, описывающий соответствие абстрактных символов целочисленным кодам (*code points*) в диапазоне `0..10FFFFh` исключая `D800h..DFFFh` для суррогатных пар в UTF-16 (итого 1112064 code point'a), и рекомендации по их интерпретации и визуализации
- На сегодняшний день описывает 149186 символов (в прошлом году было 144697)
- Сам unicode – **не кодировка**, но есть основанные на нём кодировки:
  - UTF-8: от 1 до 4 байт на символ, совпадает с ASCII в диапазоне `0..7Fh`, самая распространённая сегодня кодировка (95% интернета)

Unicode

- Unicode – стандарт, описывающий соответствие абстрактных символов целочисленным кодам (*code points*) в диапазоне `0..10FFFFh` исключая `D800h..DFFFh` для суррогатных пар в UTF-16 (итого 1112064 code point'a), и рекомендации по их интерпретации и визуализации
- На сегодняшний день описывает 149186 символов (в прошлом году было 144697)
- Сам unicode – **не кодировка**, но есть основанные на нём кодировки:
  - UTF-8: от 1 до 4 байт на символ, совпадает с ASCII в диапазоне `0..7Fh`, самая распространённая сегодня кодировка (95% интернета)
  - UCS-2: устаревшая, 2 байта на символ, не поддерживает весь unicode

Unicode

- Unicode – стандарт, описывающий соответствие абстрактных символов целочисленным кодам (*code points*) в диапазоне `0..10FFFFh` исключая `D800h..DFFFh` для суррогатных пар в UTF-16 (итого 1112064 code point'a), и рекомендации по их интерпретации и визуализации
- На сегодняшний день описывает 149186 символов (в прошлом году было 144697)
- Сам unicode – **не кодировка**, но есть основанные на нём кодировки:
  - UTF-8: от 1 до 4 байт на символ, совпадает с ASCII в диапазоне `0..7Fh`, самая распространённая сегодня кодировка (95% интернета)
  - UCS-2: устаревшая, 2 байта на символ, не поддерживает весь unicode
  - UTF-16: 2 или 4 байта на символ

Unicode

- Unicode – стандарт, описывающий соответствие абстрактных символов целочисленным кодам (*code points*) в диапазоне `0..10FFFFh` исключая `D800h..DFFFh` для суррогатных пар в UTF-16 (итого 1112064 code point'a), и рекомендации по их интерпретации и визуализации
- На сегодняшний день описывает 149186 символов (в прошлом году было 144697)
- Сам unicode – **не кодировка**, но есть основанные на нём кодировки:
  - UTF-8: от 1 до 4 байт на символ, совпадает с ASCII в диапазоне `0..7Fh`, самая распространённая сегодня кодировка (95% интернета)
  - UCS-2: устаревшая, 2 байта на символ, не поддерживает весь unicode
  - UTF-16: 2 или 4 байта на символ
  - UTF-32: 4 байта на символ

Unicode

- Unicode – стандарт, описывающий соответствие абстрактных символов целочисленным кодам (*code points*) в диапазоне `0..10FFFFh` исключая `D800h..DFFFh` для суррогатных пар в UTF-16 (итого 1112064 code point'a), и рекомендации по их интерпретации и визуализации
- На сегодняшний день описывает 149186 символов (в прошлом году было 144697)
- Сам unicode – **не кодировка**, но есть основанные на нём кодировки:
  - UTF-8: от 1 до 4 байт на символ, совпадает с ASCII в диапазоне `0..7Fh`, самая распространённая сегодня кодировка (95% интернета)
  - UCS-2: устаревшая, 2 байта на символ, не поддерживает весь unicode
  - UTF-16: 2 или 4 байта на символ
  - UTF-32: 4 байта на символ
  - GB 18030: специальная кодировка для китайских иероглифов (но тоже поддерживает весь unicode)

Code points, глифы и графемы

- Code point – один unicode элемент (абстрактный символ)

Code points, глифы и графемы

- Code point – один unicode элемент (абстрактный символ)
- Глиф – одно изображение в шрифте

Code points, глифы и графемы

- Code point – один unicode элемент (абстрактный символ)
- Глиф – одно изображение в шрифте
- Графема – один визуальный символ (один или несколько глифов)

Code points, глифы и графемы

- Code point – один unicode элемент (абстрактный символ)
- Глиф – одно изображение в шрифте
- Графема – один визуальный символ (один или несколько глифов)
- В общем случае один code point **не соответствует** одному глифу или одной графеме

Code points, глифы и графемы

- Code point – один unicode элемент (абстрактный символ)
- Глиф – одно изображение в шрифте
- Графема – один визуальный символ (один или несколько глифов)
- В общем случае один code point **не соответствует** одному глифу или одной графеме
- Примеры:
  - Два символа `ff` могут быть представлены двумя глифами или одним глифом (лигатурой) ff

Code points, глифы и графемы

- Code point – один unicode элемент (абстрактный символ)
- Глиф – одно изображение в шрифте
- Графема – один визуальный символ (один или несколько глифов)
- В общем случае один code point **не соответствует** одному глифу или одной графеме
- Примеры:
  - Два символа `ff` могут быть представлены двумя глифами или одним глифом (лигатурой) ff
  - Символ `Ò` может быть одним или двумя code point'ами и одним или двумя (`O` + `‘`) глифами, но считается одной графемой

Шрифты

- Содержит набор *глифов* (изображений символов в каком-либо виде) и правил их использования

Шрифты

- Содержит набор *глифов* (изображений символов в каком-либо виде) и правил их использования
- Виды шрифтов:

Шрифты

- Содержит набор *глифов* (изображений символов в каком-либо виде) и правил их использования
- Виды шрифтов:
  - Bitmap-шрифты: глиф – готовое изображение (bitmap)

Шрифты

- Содержит набор *глифов* (изображений символов в каком-либо виде) и правил их использования
- Виды шрифтов:
  - Bitmap-шрифты: глиф – готовое изображение (bitmap)
  - Векторные шрифты: глиф описывается как геометрическая фигура

Шрифты

- Содержит набор *глифов* (изображений символов в каком-либо виде) и правил их использования
- Виды шрифтов:
  - Bitmap-шрифты: глиф – готовое изображение (bitmap)
  - Векторные шрифты: глиф описывается как геометрическая фигура
  - (M)SDF-шрифты: глиф описывается с помощью *signed distance field* (SDF)

Шрифты

- Содержит набор *глифов* (изображений символов в каком-либо виде) и правил их использования
- Виды шрифтов:
  - Bitmap-шрифты: глиф – готовое изображение (bitmap)
  - Векторные шрифты: глиф описывается как геометрическая фигура
  - (M)SDF-шрифты: глиф описывается с помощью *signed distance field* (SDF)
- Современные форматы шрифтов (`.ttf` – TrueType, `.otf` – OpenType) – векторные, описывают границу глифа как набор отрезков и квадратичных кривых Безье (т.е. 2-ого порядка)

Шрифты

- Содержит набор *глифов* (изображений символов в каком-либо виде) и правил их использования
- Виды шрифтов:
  - Bitmap-шрифты: глиф – готовое изображение (bitmap)
  - Векторные шрифты: глиф описывается как геометрическая фигура
  - (M)SDF-шрифты: глиф описывается с помощью *signed distance field* (SDF)
- Современные форматы шрифтов (`.ttf` – TrueType, `.otf` – OpenType) – векторные, описывают границу глифа как набор отрезков и квадратичных кривых Безье (т.е. 2-ого порядка)
- Bitmap и SDF шрифты часто строятся по векторным шрифтам

Шрифты

- Содержит набор *глифов* (изображений символов в каком-либо виде) и правил их использования
- Виды шрифтов:
  - Bitmap-шрифты: глиф – готовое изображение (bitmap)
  - Векторные шрифты: глиф описывается как геометрическая фигура
  - (M)SDF-шрифты: глиф описывается с помощью *signed distance field* (SDF)
- Современные форматы шрифтов (`.ttf` – TrueType, `.otf` – OpenType) – векторные, описывают границу глифа как набор отрезков и квадратичных кривых Безье (т.е. 2-ого порядка)
- Bitmap и SDF шрифты часто строятся по векторным шрифтам
- **FreeType** – самая распространённая библиотека для чтения векторных шрифтов; умеет растеризовать в bitmap и (с версии 2.11.0, июль 2021) в SDF

Шейпинг (shaping)

- Процесс преобразования последовательности символов в набор отпозиционированных глифов

Шейпинг (shaping)

- Процесс преобразования последовательности символов в набор отпозиционированных глифов
- Может включать в себя:

Шейпинг (shaping)

- Процесс преобразования последовательности символов в набор отпозиционированных глифов
- Может включать в себя:
  - Настройки: направление (слева-направо, справа-налево, сверху-вниз, снизу-вверх), размер шрифта, межбуквенное расстояние, стиль (жирный, курсив, и т.п.)

Шейпинг (shaping)

- Процесс преобразования последовательности символов в набор отпозиционированных глифов
- Может включать в себя:
  - Настройки: направление (слева-направо, справа-налево, сверху-вниз, снизу-вверх), размер шрифта, межбуквенное расстояние, стиль (жирный, курсив, и т.п.)
  - Hinting: сдвиг глифов, чтобы они были лучше выровнены по пиксельной сетке

Шейпинг (shaping)

- Процесс преобразования последовательности символов в набор отпозиционированных глифов
- Может включать в себя:
  - Настройки: направление (слева-направо, справа-налево, сверху-вниз, снизу-вверх), размер шрифта, межбуквенное расстояние, стиль (жирный, курсив, и т.п.)
  - Hinting: сдвиг глифов, чтобы они были лучше выровнены по пиксельной сетке
  - Kerning: изменение расстояния между соседними глифами для лучшего восприятия

Шейпинг (shaping)

- Процесс преобразования последовательности символов в набор отпозиционированных глифов
- Может включать в себя:
  - Настройки: направление (слева-направо, справа-налево, сверху-вниз, снизу-вверх), размер шрифта, межбуквенное расстояние, стиль (жирный, курсив, и т.п.)
  - Hinting: сдвиг глифов, чтобы они были лучше выровнены по пиксельной сетке
  - Kerning: изменение расстояния между соседними глифами для лучшего восприятия
  - Лигатуры: последовательность несвязанных символов, представленная одним глифом (ff, fi, <=>)

Шейпинг (shaping)

- Процесс преобразования последовательности символов в набор отпозиционированных глифов
- Может включать в себя:
  - Настройки: направление (слева-направо, справа-налево, сверху-вниз, снизу-вверх), размер шрифта, межбуквенное расстояние, стиль (жирный, курсив, и т.п.)
  - Hinting: сдвиг глифов, чтобы они были лучше выровнены по пиксельной сетке
  - Kerning: изменение расстояния между соседними глифами для лучшего восприятия
  - Лигатуры: последовательность несвязанных символов, представленная одним глифом (ff, fi, <=>)
- **Не занимается** расстановкой строк и абзацев

Шейпинг (shaping)

- Процесс преобразования последовательности символов в набор отпозиционированных глифов
- Может включать в себя:
  - Настройки: направление (слева-направо, справа-налево, сверху-вниз, снизу-вверх), размер шрифта, межбуквенное расстояние, стиль (жирный, курсив, и т.п.)
  - Hinting: сдвиг глифов, чтобы они были лучше выровнены по пиксельной сетке
  - Kerning: изменение расстояния между соседними глифами для лучшего восприятия
  - Лигатуры: последовательность несвязанных символов, представленная одним глифом (ff, fi, <=>)
- **Не занимается** расстановкой строк и абзацев
- Для простых моноширинных шрифтов шейпинг может сводиться к расположению глифов на равных расстояниях друг от друга

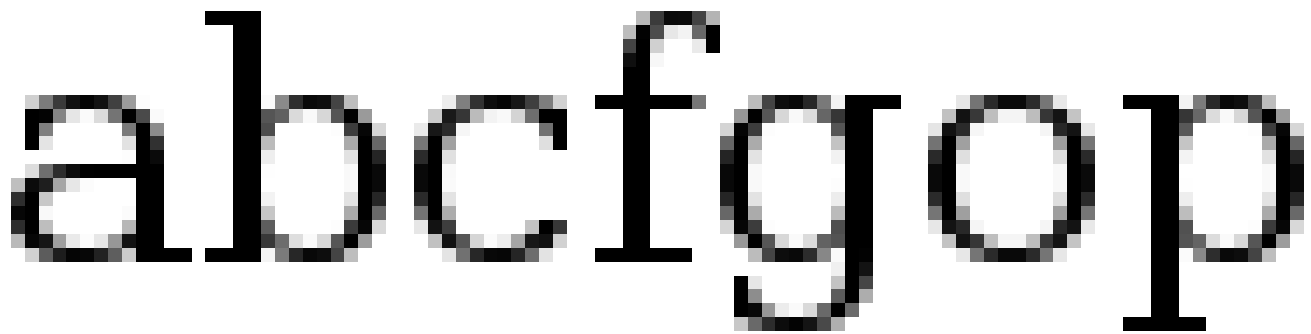
Шейпинг (shaping)

- Процесс преобразования последовательности символов в набор отпозиционированных глифов
- Может включать в себя:
  - Настройки: направление (слева-направо, справа-налево, сверху-вниз, снизу-вверх), размер шрифта, межбуквенное расстояние, стиль (жирный, курсив, и т.п.)
  - Hinting: сдвиг глифов, чтобы они были лучше выровнены по пиксельной сетке
  - Kerning: изменение расстояния между соседними глифами для лучшего восприятия
  - Лигатуры: последовательность несвязанных символов, представленная одним глифом (ff, fi, <=>)
- **Не занимается** расстановкой строк и абзацев
- Для простых моноширинных шрифтов шейпинг может сводиться к расположению глифов на равных расстояниях друг от друга
- **harfbuzz** – одна из самых распространённых библиотек для шейпинга текста, используется всеми на свете
- FreeType позволяет сделать шейпинг, но хуже, чем harfbuzz

Hinting

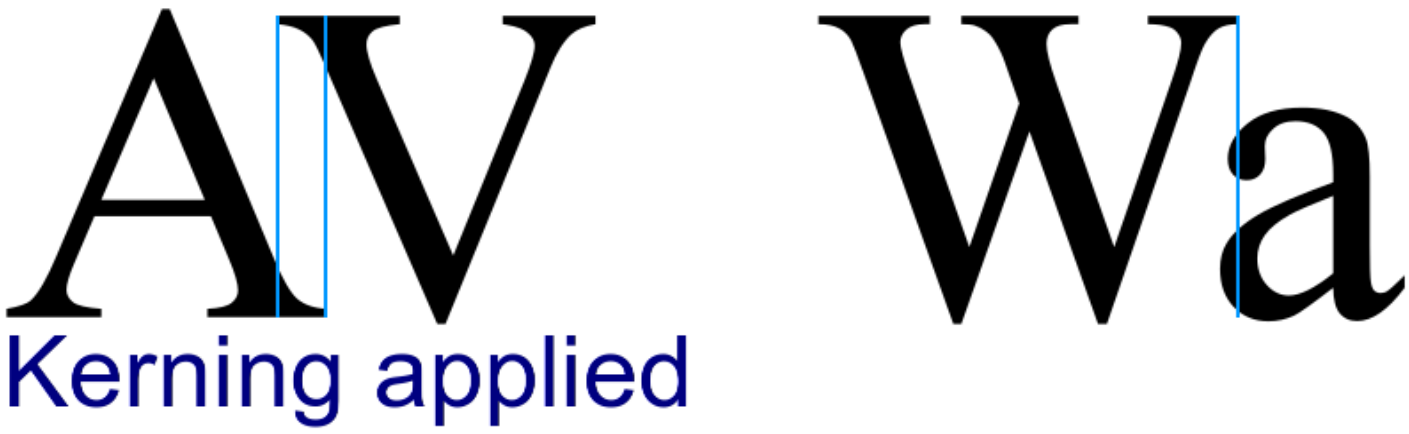

abcfgop AO abcfgop
abcfgop AO abcfgop
維基百科
維基百科國際
維基百科
維基百科國際


abcfgop


abcfgop

Kerning

No kerning



Kerning applied

Лигатуры

$$AE \to Æ \qquad ij \to ij$$
$$ae \to æ \qquad st \to st$$
$$OE \to Œ \qquad ft \to ft$$
$$oe \to œ \qquad et \to \&$$
$$ff \to ff \qquad fs \to ß$$
$$fi \to fi \qquad ffi \to ffi$$

Рендеринг bitmap-шрифтов

- Обычно представлены в виде texture atlas: одна текстура, содержащая все глифы шрифта

Рендеринг bitmap-шрифтов

- Обычно представлены в виде texture atlas: одна текстура, содержащая все глифы шрифта
- Содержит информацию о расположении глифов в текстуре (текстурные координаты левого верхнего и правого нижнего пикселя)

Рендеринг bitmap-шрифтов

- Обычно представлены в виде texture atlas: одна текстура, содержащая все глифы шрифта
- Содержит информацию о расположении глифов в текстуре (текстурные координаты левого верхнего и правого нижнего пикселя)
- Глифы рисуются как текстурированные прямоугольники

Рендеринг bitmap-шрифтов

- Обычно представлены в виде texture atlas: одна текстура, содержащая все глифы шрифта
- Содержит информацию о расположении глифов в текстуре (текстурные координаты левого верхнего и правого нижнего пикселя)
- Глифы рисуются как текстурированные прямоугольники
- Плохо ведёт себя при масштабировнии (как увеличении, так и уменьшении), mipmap'ы не особо помогают

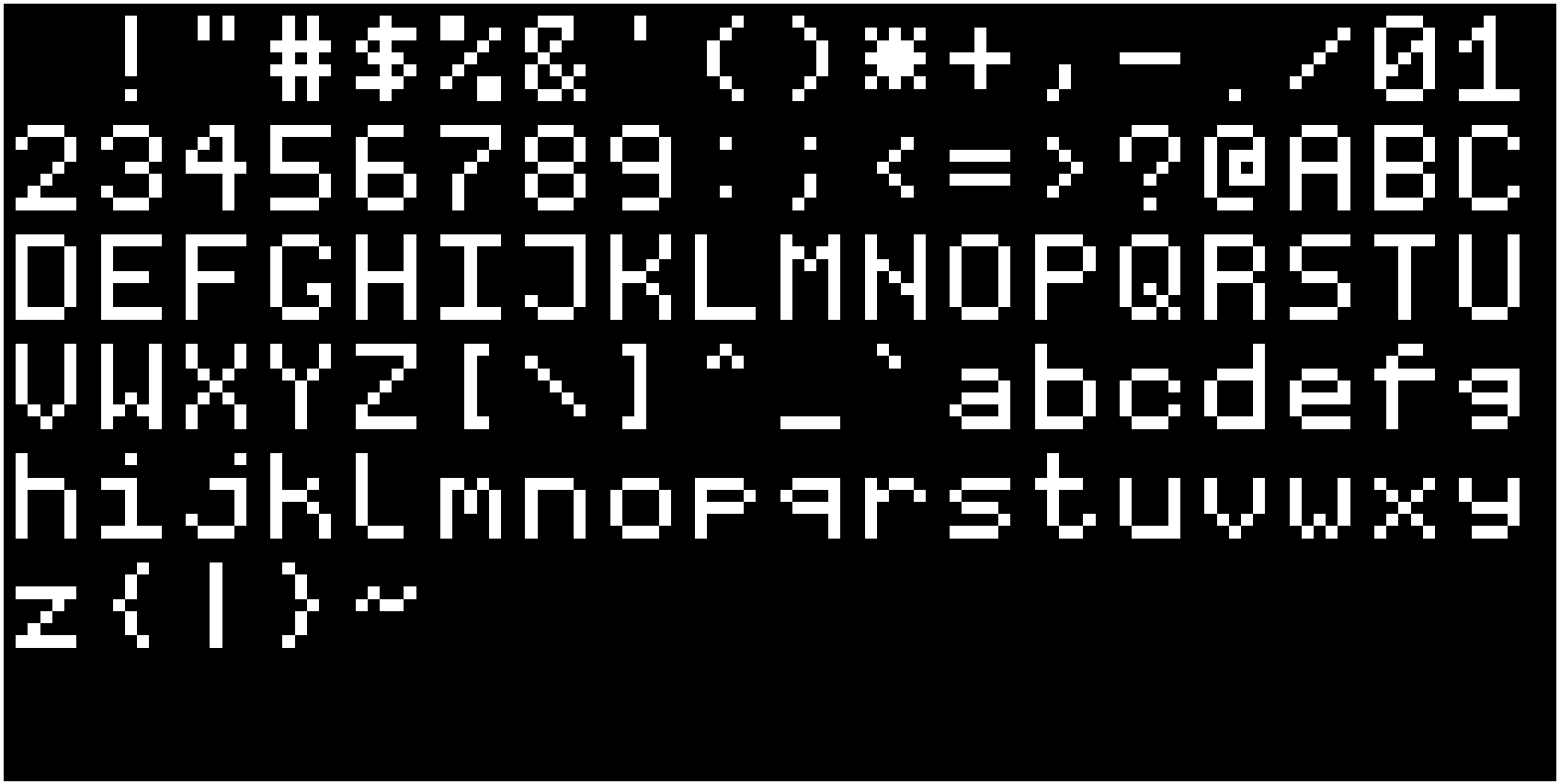
Рендеринг bitmap-шрифтов

- Обычно представлены в виде texture atlas: одна текстура, содержащая все глифы шрифта
- Содержит информацию о расположении глифов в текстуре (текстурные координаты левого верхнего и правого нижнего пикселя)
- Глифы рисуются как текстурированные прямоугольники
- Плохо ведёт себя при масштабировнии (как увеличении, так и уменьшении), mipmap'ы не особо помогают
- Очень прост в реализации

Рендеринг bitmap-шрифтов

- Обычно представлены в виде texture atlas: одна текстура, содержащая все глифы шрифта
- Содержит информацию о расположении глифов в текстуре (текстурные координаты левого верхнего и правого нижнего пикселя)
- Глифы рисуются как текстурированные прямоугольники
- Плохо ведёт себя при масштабировнии (как увеличении, так и уменьшении), mipmap'ы не особо помогают
- Очень прост в реализации
- Часто используется для дебажного текста, инди-игр, и т.п.

Bitmap-шрифт



Bitmap-шрифт: описание в коде

```
struct bitmap_font
{
  GLuint texture_id;

  struct glyph
  {
    vec2 top_left;
    vec2 bottom_right;
  };

  std::unordered_map<std::char32_t, glyph> glyphs;
};
```

Bitmap-шрифт: фрагментный шейдер

```
uniform sampler2D font_texture;
uniform vec3 text_color;

in vec2 texcoord;

layout (location = 0) out vec4 out_color;

void main()
{
  float alpha = texture(font_texture, texcoord).r;
  out_color = vec4(text_color, alpha);
}
```

Рендеринг векторных шрифтов

- Глиф описывается как набор геометрических фигур (фигура может описывать ‘дырку’ в другой фигуре, как дырка в букве ‘O’), граница фигуры – набор отрезков и квадратичных кривых Безье

Рендеринг векторных шрифтов

- Глиф описывается как набор геометрических фигур (фигура может описывать ‘дырку’ в другой фигуре, как дырка в букве ‘O’), граница фигуры – набор отрезков и квадратичных кривых Безье
- Много разных способов рендеринга:

Рендеринг векторных шрифтов

- Глиф описывается как набор геометрических фигур (фигура может описывать ‘дырку’ в другой фигуре, как дырка в букве ‘O’), граница фигуры – набор отрезков и квадратичных кривых Безье
- Много разных способов рендеринга:
  - Аппроксимация набором треугольников

Рендеринг векторных шрифтов

- Глиф описывается как набор геометрических фигур (фигура может описывать ‘дырку’ в другой фигуре, как дырка в букве ‘O’), граница фигуры – набор отрезков и квадратичных кривых Безье
- Много разных способов рендеринга:
  - Аппроксимация набором треугольников
  - Запаковка фигур в текстуру + шейдер, который честно вычисляет площадь пересечения фигуры и пикселя

Рендеринг векторных шрифтов

- Глиф описывается как набор геометрических фигур (фигура может описывать ‘дырку’ в другой фигуре, как дырка в букве ‘O’), граница фигуры – набор отрезков и квадратичных кривых Безье
- Много разных способов рендеринга:
  - Аппроксимация набором треугольников
  - Запаковка фигур в текстуру + шейдер, который честно вычисляет площадь пересечения фигуры и пикселя
  - Полигональная аппроксимация глифа (рисуется с использованием stencil буфера) + треугольник со специальным шейдером для каждой кривой Безье

Рендеринг векторных шрифтов

- Глиф описывается как набор геометрических фигур (фигура может описывать ‘дырку’ в другой фигуре, как дырка в букве ‘O’), граница фигуры – набор отрезков и квадратичных кривых Безье
- Много разных способов рендеринга:
  - Аппроксимация набором треугольников
  - Запаковка фигур в текстуру + шейдер, который честно вычисляет площадь пересечения фигуры и пикселя
  - Полигональная аппроксимация глифа (рисуется с использованием stencil буфера) + треугольник со специальным шейдером для каждой кривой Безье
  - Slug algorithm (запатентован)

Рендеринг векторных шрифтов

- Глиф описывается как набор геометрических фигур (фигура может описывать ‘дырку’ в другой фигуре, как дырка в букве ‘O’), граница фигуры – набор отрезков и квадратичных кривых Безье
- Много разных способов рендеринга:
  - Аппроксимация набором треугольников
  - Запаковка фигур в текстуру + шейдер, который честно вычисляет площадь пересечения фигуры и пикселя
  - Полигональная аппроксимация глифа (рисуется с использованием stencil буфера) + треугольник со специальным шейдером для каждой кривой Безье
  - Slug algorithm (запатентован)
- Обычно легко переносит масштабирование

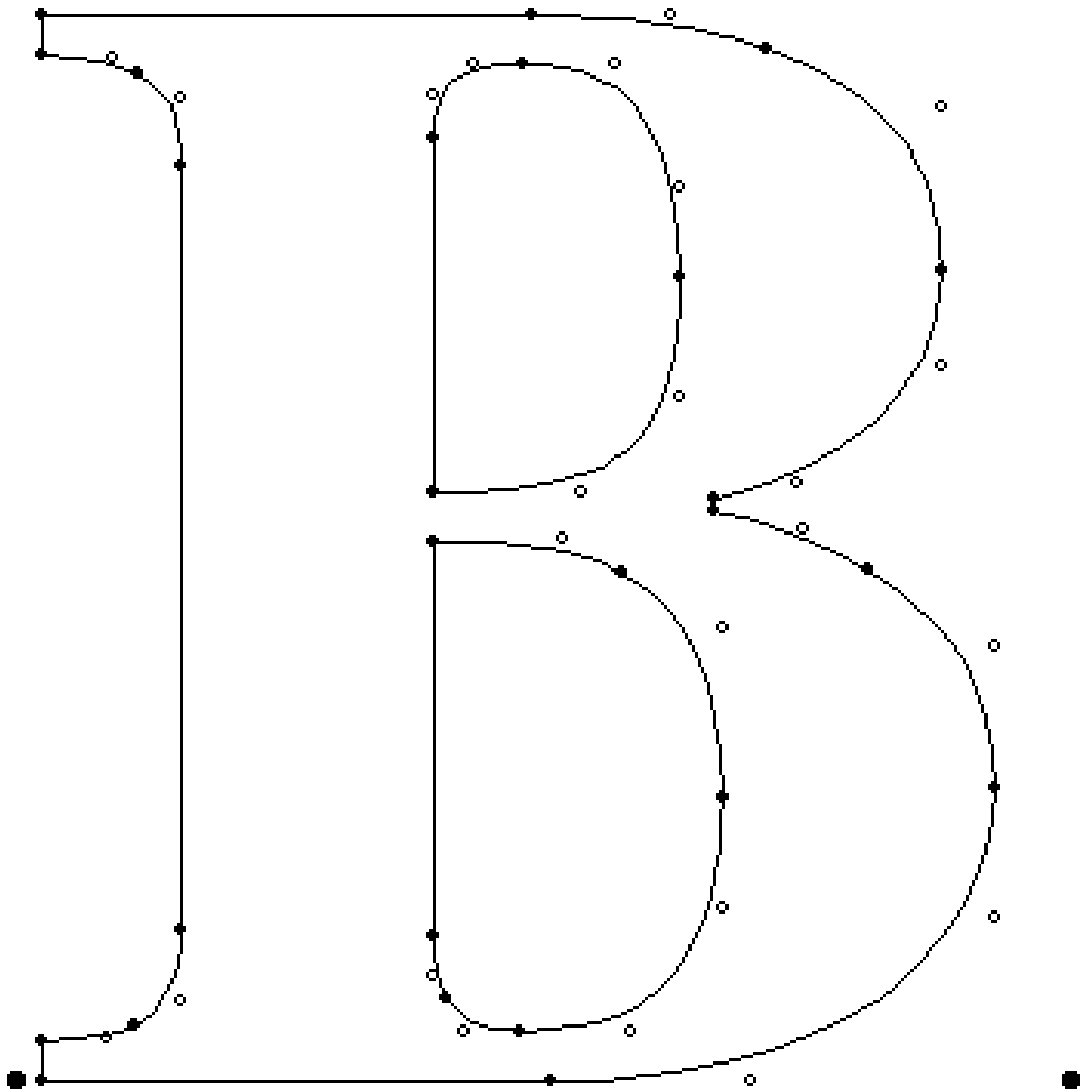
Рендеринг векторных шрифтов

- Глиф описывается как набор геометрических фигур (фигура может описывать ‘дырку’ в другой фигуре, как дырка в букве ‘O’), граница фигуры – набор отрезков и квадратичных кривых Безье
- Много разных способов рендеринга:
  - Аппроксимация набором треугольников
  - Запаковка фигур в текстуру + шейдер, который честно вычисляет площадь пересечения фигуры и пикселя
  - Полигональная аппроксимация глифа (рисуется с использованием stencil буфера) + треугольник со специальным шейдером для каждой кривой Безье
  - Slug algorithm (запатентован)
- Обычно легко переносит масштабирование
- Сложен в реализации

Рендеринг векторных шрифтов

- Глиф описывается как набор геометрических фигур (фигура может описывать ‘дырку’ в другой фигуре, как дырка в букве ‘O’), граница фигуры – набор отрезков и квадратичных кривых Безье
- Много разных способов рендеринга:
  - Аппроксимация набором треугольников
  - Запаковка фигур в текстуру + шейдер, который честно вычисляет площадь пересечения фигуры и пикселя
  - Полигональная аппроксимация глифа (рисуется с использованием stencil буфера) + треугольник со специальным шейдером для каждой кривой Безье
  - Slug algorithm (запатентован)
- Обычно легко переносит масштабирование
- Сложен в реализации
- Используется для текста максимально возможного качества

Векторный глиф



Slug algorithm

Signed distance field (SDF)

- Описание двумерного или трёхмерного объекта/фигуры *функцией расстояния* до границы объекта

Signed distance field (SDF)

- Описание двумерного или трёхмерного объекта/фигуры *функцией расстояния* до границы объекта
- Обычно положительна снаружи объекта и отрицательна внутри (поэтому *signed*), $f(p) = 0$ – граница объекта

Signed distance field (SDF)

- Описание двумерного или трёхмерного объекта/фигуры *функцией расстояния* до границы объекта
- Обычно положительна снаружи объекта и отрицательна внутри (поэтому *signed*), $f(p) = 0$ – граница объекта
- SDF может быть представлена явной формулой (напр. $f(p) = \|p - O\| - R$ – расстояние до сферы радиуса R с центром в точке O) или текстурой

Signed distance field (SDF)

- Описание двумерного или трёхмерного объекта/фигуры *функцией расстояния* до границы объекта
- Обычно положительна снаружи объекта и отрицательна внутри (поэтому *signed*), $f(p) = 0$ – граница объекта
- SDF может быть представлена явной формулой (напр. $f(p) = \|p - O\| - R$ – расстояние до сферы радиуса R с центром в точке O) или текстурой
- SDF-сцены часто используются для экспериментального рендеринга и удобны для raymarching'а

Рендеринг SDF-шрифтов (Valve, 2007)

- Описывается так же, как bitmap-шрифт, но текстура хранит значения SDF для глифов

Рендеринг SDF-шрифтов (Valve, 2007)

- Описывается так же, как bitmap-шрифт, но текстура хранит значения SDF для глифов
- Фрагментный шейдер читает значение SDF из текстуры шрифта: если оно меньше 0, то пиксель находится внутри глифа (e.g. чёрный пиксель), иначе – нет (e.g. прозрачный пиксель)

Рендеринг SDF-шрифтов (Valve, 2007)

- Описывается так же, как bitmap-шрифт, но текстура хранит значения SDF для глифов
- Фрагментный шейдер читает значение SDF из текстуры шрифта: если оно меньше 0, то пиксель находится внутри глифа (e.g. чёрный пиксель), иначе – нет (e.g. прозрачный пиксель)
- Прост в реализации

Рендеринг SDF-шрифтов (Valve, 2007)

- Описывается так же, как bitmap-шрифт, но текстура хранит значения SDF для глифов
- Фрагментный шейдер читает значение SDF из текстуры шрифта: если оно меньше 0, то пиксель находится внутри глифа (e.g. чёрный пиксель), иначе – нет (e.g. прозрачный пиксель)
- Прост в реализации
- Требует чуть больше места под глифы, но менее требователен к разрешению

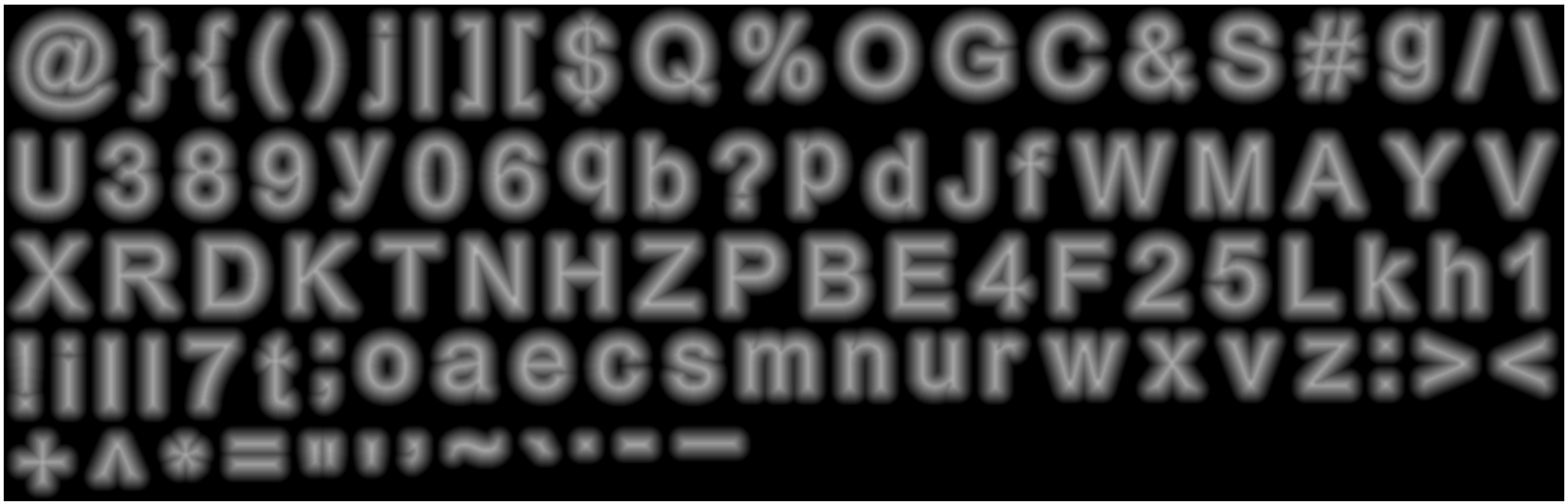
Рендеринг SDF-шрифтов (Valve, 2007)

- Описывается так же, как bitmap-шрифт, но текстура хранит значения SDF для глифов
- Фрагментный шейдер читает значение SDF из текстуры шрифта: если оно меньше 0, то пиксель находится внутри глифа (e.g. чёрный пиксель), иначе – нет (e.g. прозрачный пиксель)
- Прост в реализации
- Требует чуть больше места под глифы, но менее требователен к разрешению
- Неплохо масштабируется (есть артефакты, но менее серьёзные, чем для bitmap-шрифтов)

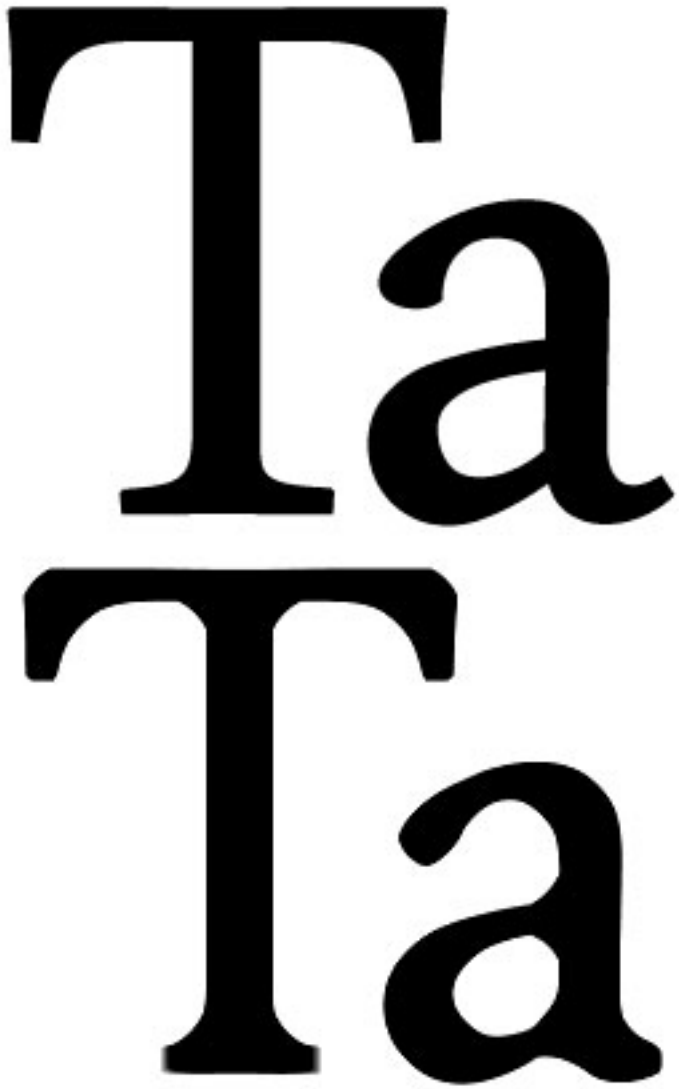
Рендеринг SDF-шрифтов (Valve, 2007)

- Описывается так же, как bitmap-шрифт, но текстура хранит значения SDF для глифов
- Фрагментный шейдер читает значение SDF из текстуры шрифта: если оно меньше 0, то пиксель находится внутри глифа (e.g. чёрный пиксель), иначе – нет (e.g. прозрачный пиксель)
- Прост в реализации
- Требует чуть больше места под глифы, но менее требователен к разрешению
- Неплохо масштабируется (есть артефакты, но менее серьёзные, чем для bitmap-шрифтов)
- Один из самых распространённых способов рендеринга шрифтов

SDF-шрифт


@}{()jl]][$Q%OGC&S#g/\
U389y06qb?pdJfWMAYV
XRDKTNHZPBE4F25Lkh1
!iIl7t;oaecsmnurwxvz:><
+^*=

SDF-шрифт: артефакты при magnification



SDF-текстура

- Тестуры позволяют хранить значения от 0 до 1

SDF-текстура

- Тестуры позволяют хранить значения от 0 до 1
- Мы хотим хранить произвольные, но не очень большие по модулю числа (расстояние в пикселях)

SDF-текстура

- Тестуры позволяют хранить значения от 0 до 1
- Мы хотим хранить произвольные, но не очень большие по модулю числа (расстояние в пикселях)
- $\Rightarrow$ В текстуре придётся хранить что-то в духе $0.5 + sdf\,/\,scale$, где `scale` – максимальное представимое расстояние

SDF-текстура

- Тестуры позволяют хранить значения от 0 до 1
- Мы хотим хранить произвольные, но не очень большие по модулю числа (расстояние в пикселях)
- $\Rightarrow$ В текстуре придётся хранить что-то в духе $0.5 + sdf\,/\,scale$, где `scale` – максимальное представимое расстояние
- $\Rightarrow$ При чтении из текстуры нужно применять обратное преобразование $(sdf - 0.5) * scale$

SDF-текстура

- Тестуры позволяют хранить значения от 0 до 1
- Мы хотим хранить произвольные, но не очень большие по модулю числа (расстояние в пикселях)
- $\Rightarrow$ В текстуре придётся хранить что-то в духе $0.5 + sdf\,/\,scale$, где `scale` – максимальное представимое расстояние
- $\Rightarrow$ При чтении из текстуры нужно применять обратное преобразование $(sdf - 0.5) * scale$
- Лучше включить для этой текстуры анизотропную фильтрацию, чтобы текст хорошо выглядел ‘сбоку’

Рендеринг SDF-шрифтов

- Можно легко реализовать много дополнительных эффектов:

Рендеринг SDF-шрифтов

- Можно легко реализовать много дополнительных эффектов:
  - Сглаживание: вместо жёсткой границы плавно меняем прозрачность пикселя в зависимости от значения SDF

Рендеринг SDF-шрифтов

- Можно легко реализовать много дополнительных эффектов:
  - Сглаживание: вместо жёсткой границы плавно меняем прозрачность пикселя в зависимости от значения SDF
  - Сглаживание с учётом масштаба и перспективы: по `dFfx,dFfy` можно вычислить диапазон значений SDF, чтобы сглаживание было ровно в 1 пиксель в экранных координатах

Рендеринг SDF-шрифтов

- Можно легко реализовать много дополнительных эффектов:
  - Сглаживание: вместо жёсткой границы плавно меняем прозрачность пикселя в зависимости от значения SDF
  - Сглаживание с учётом масштаба и перспективы: по `dFfx,dFfy` можно вычислить диапазон значений SDF, чтобы сглаживание было ровно в 1 пиксель в экранных координатах
  - Обводка текста другим цветом: рисуем цвет обводки, если $0 \leq f(p) \leq \varepsilon$

Рендеринг SDF-шрифтов

- Можно легко реализовать много дополнительных эффектов:
  - Сглаживание: вместо жёсткой границы плавно меняем прозрачность пикселя в зависимости от значения SDF
  - Сглаживание с учётом масштаба и перспективы: по `dFfx,dFfy` можно вычислить диапазон значений SDF, чтобы сглаживание было ровно в 1 пиксель в экранных координатах
  - Обводка текста другим цветом: рисуем цвет обводки, если $0 \leq f(p) \leq \varepsilon$
  - Псевдотрёхмерный текст: по градиенту SDF можно восстановить нормаль к глифу

SDF-шрифт с эффектами

SDF-шрифт: фрагментный шейдер

```
uniform sampler2D sdfTexture;
uniform float sdfScale;
uniform vec3 textColor;

in vec2 texcoord;

layout (location = 0) out vec4 out_color;

void main()
{
  float sdfTextureValue = texture(sdfTexture, texcoord).r;
  float sdfValue = sdfScale * (sdfTextureValue - 0.5);
  // сглаживание
  float alpha = smoothstep(-0.5, 0.5, sdfValue);
  out_color = vec4(textColor, alpha);
}
```

MSDF (Chlumský, 2015)

- У SDF-текста есть типичные артефакты: острые углы сглаживаются, из-за чего приходится брать SDF-текстуру большого разрешения

MSDF (Chlumský, 2015)

- У SDF-текста есть типичные артефакты: острые углы сглаживаются, из-за чего приходится брать SDF-текстуру большого разрешения
- Идея: билинейная интерполяция не портит прямые линии $\Rightarrow$ представим глиф *пересечением* нескольких объектов, чтобы острые углы, представленные пересечением нескольких прямых, не сглаживались

MSDF (Chlumský, 2015)

- У SDF-текста есть типичные артефакты: острые углы сглаживаются, из-за чего приходится брать SDF-текстуру большого разрешения
- Идея: билинейная интерполяция не портит прямые линии $\Rightarrow$ представим глиф *пересечением* нескольких объектов, чтобы острые углы, представленные пересечением нескольких прямых, не сглаживались
- В текстуре есть 4 канала (RGBA) $\Rightarrow$ можем сохранить сразу 4 разных SDF в одной текстуре!

MSDF

- $\Rightarrow$ MSDF: Multi-channel signed distance field

MSDF

- $\Rightarrow$ MSDF: Multi-channel signed distance field
- На практике оказывается, что хватает 3 каналов, т.е. трёх различных SDF
- Вместо пересечения (т.е. минимума из трёх значений SDF) лучше брать *медиану* (т.е. значение посередине между двумя другими)

MSDF

- $\Rightarrow$ MSDF: Multi-channel signed distance field
- На практике оказывается, что хватает 3 каналов, т.е. трёх различных SDF
- Вместо пересечения (т.е. минимума из трёх значений SDF) лучше брать *медиану* (т.е. значение посередине между двумя другими)
- Есть инструменты (программа, библиотека, сайт) для генерации таких текстур по шрифту

MSDF-шрифт

MSDF: сравнение с SDF

MSDF: пример кода

```
uniform sampler2D sdfTexture;
uniform float sdfScale;
uniform vec3 textColor;

in vec2 texcoord;

layout (location = 0) out vec4 out_color;

float median(vec3 v) {
    return max(min(v.r, v.g), min(max(v.r, v.g), v.b));
}

void main()
{
  float sdfTextureValue =
    median(texture(sdfTexture, texcoord).rgb);
  float sdfValue = sdfScale * (sdfTextureValue - 0.5);
  // сглаживание
  float alpha = smoothstep(-0.5, 0.5, sdfValue);
  out_color = vec4(textColor, alpha);
}
```

Шрифты и шейпинг: ссылки

- FreeType
- harfbuzz

Векторные и bitmap-шрифты: ссылки

- Туториал по рендерингу bitmap-шрифтов
- Один способ рендеринга векторных шрифтов
- Другой способ рендеринга векторных шрифтов
- Slug algorithm
- Slug library

SDF и MSDF-шрифты: ссылки

- Статья от Valve про SDF-текст
- Туториал по рендерингу SDF-шрифтов
- SDF font generator
- Репозиторий с генератором MSDF-шрифтов от автора этой техники
- Shape Decomposition for Multi-channel Distance Fields (Chlumský, 2015)
- MSDF font generator

Чем заняться дальше?

- Очень много источников света
- Очень много объектов
- Очень большая сцена
- Сложные объекты
- Другие API
- Raytracing
- Статьи и конференции

Очень много источников света

- Deferred shading
- Tiled/Clustered shading
- Compute shaders (OpenGL 4.3 или расширение)
- Площадные источники света

Очень много объектов

- Batching
- Frustum culling
- Occlusion culling
- LOD

Очень большая сцена (e.g. планета)

- LOD (e.g. для ландшафта)
- Проблемы с точностью (`float` не хватает; нужно рисовать относительно некой anchor-точки в `double`)
- Проблемы с буфером глубины (reversed z)

Сложные объекты

- Вода: отражение + преломление (по Френелю) + ‘туман’ в плотности воды + волны Герстнера
- Растительность (vegetation): трава, кусты, деревья
- Облака + небо (volume rendering)
- Сложные BRDF

Другие API

- OpenGL 4.0+: compute shaders, indirect rendering, direct state access
- Vulkan: vulkan-tutorial.com

Raytracing + real-time GI

- Ray Tracing in One Weekend (**не** real-time)
- Vulkan raytracing tutorial
- Voxel cone tracing
- Surflet-based GI
- ReSTIR GI

Статьи и конференции

- GPU Gems 1, 2, 3
- SIGGRAPH (e.g. 2022)
- https://www.gdcvault.com/free/
- Graphics Programming Weekly

В заключение

- Область real-time рендеринга очень активно развивается
- О рисовании любого объекта/эффекта можно найти десятки статей и даже PhD
- Есть тысячи туториалов по всему на свете
- Не бойтесь гуглить и читать непонятные статьи, со временем станет понятнее
- Не бойтесь писать мне :)