

Коичи Мацуда  
Роджер Ли

# WebGL:

**программирование  
трехмерной графики**



# WebGL: программирование трехмерной графики

*Коиичи Мацуда (Koichi Matsuda)*  
*Роджер Ли (Rodger Lea)*



Москва, 2019

Мацуда, К. WebGL: программирование трехмерной графики : [пер. с англ.] / Коичи Мацуда, Роджер Ли. — Москва : ДМК Пресс, 2019. — 493 с. : ил. — Библиогр. с. 477—493.

УДК 004.42:004.925.84

ББК 32

Чит. зал №1 — 2 экз.

WebGL является новой веб-технологией, позволяющей использовать в браузере преимущества аппаратного ускорения трехмерной графики без установки дополнительного программного обеспечения. WebGL основана на спецификации OpenGL и привносит новые концепции программирования трехмерной графики в веб-разработку.

Снабженная большим количеством примеров, книга показывает, что овладеть технологией WebGL совсем несложно, несмотря на то, что она выглядит незнакомой и инородной. Каждая глава описывает один из важнейших аспектов программирования трехмерной графики и представляет разные варианты их реализации. Отдельные разделы, описывающие эксперименты с примерами программ, позволят читателю исследовать изучаемые концепции на практике.

Издание предназначено для программистов, желающих научиться использовать в своих веб-проектах 3D-графику

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |           |
|--|-----------|
| Положительные отзывы к книге «WebGL: программирование трехмерной графики» .....                              | 5         |
| <b>Предисловие</b> .....   | <b>17</b> |
| Кому адресована эта книга .....  | 17        |
| О чем рассказывается в этой книге .....  | 18        |
| Структура книги .....  | 18        |
| Браузеры с поддержкой WebGL .....  | 22        |
| Примеры программ и сопутствующие ссылки .....  | 23        |
| Типографские соглашения .....  | 23        |
| Благ одарности .....   | 23        |
| Об авторах .....   | 24        |
| <b>Глава 1.</b>  |           |
| <b>Обзор WebGL</b> .....   | <b>26</b> |
| Достоинства WebGL .....  | 27        |
| Вы можете заниматься разработкой приложений с трехмерной графикой, используя только текстовый редактор ..... | 28        |
| Публикация приложений с трехмерной графикой не вызывает сложностей .....                                     | 29        |
| Вы можете использовать всю широту возможностей браузеров .....   | 29        |
| Изучение и использование WebGL не вызывает никаких сложностей .....  | 29        |
| История происхождения WebGL .....  | 30        |
| Структура приложений на основе WebGL .....   | 31        |
| В заключение .....   | 32        |
| <b>Глава 2.</b>  |           |
| <b>Первые шаги в WebGL</b> .....   | <b>33</b> |
| Что такое canvas? .....  | 33        |
| Использование тега <canvas> .....  | 34        |
| DrawRectangle.js .....   | 36        |
| Самая короткая WebGL-программа: очистка области рисования .....  | 40        |
| Файл HTML (HelloCanvas.html) .....   | 40        |
| Программа на JavaScript (HelloCanvas.js) .....   | 41        |
| Эксперименты с примером программы .....  | 46        |
| Рисование точки (версия 1) .....   | 46        |
| HelloPoint1.html .....   | 48        |
| HelloPoint1.js .....   | 48        |
| Что такое шейдер? .....  | 49        |
| Структура WebGL-программы, использующей шейдеры .....  | 51        |

|  |    |
|--|----|
| Инициализация шейдеров .....                             | 53 |
| Вершинный шейдер .....                                   | 55 |
| Фрагментный шейдер .....                                 | 58 |
| Операция рисования .....                                 | 58 |
| Система координат WebGL .....                            | 60 |
| Эксперименты с примером программы .....                  | 61 |
| Рисование точки (версия 2) .....                         | 62 |
| Использование переменных-атрибутов .....                 | 63 |
| Пример программы (HelloPoint2.js) .....                  | 64 |
| Получение ссылки на переменную-атрибут .....             | 65 |
| Присваивание значения переменной-атрибуту .....          | 66 |
| Семейство методов <code>gl.vertexAttrib3f()</code> ..... | 68 |
| Эксперименты с примером программы .....                  | 70 |
| Рисование точки по щелчку мышью .....                    | 71 |
| Пример программы (ClickedPoints.js) .....                | 72 |
| Регистрация обработчиков событий .....                   | 73 |
| Обработка события щелчка мышью .....                     | 75 |
| Эксперименты с примером программы .....                  | 78 |
| Изменение цвета точки .....                              | 79 |
| Пример программы (ColoredPoints.js) .....                | 80 |
| Uniform-переменные .....                                 | 82 |
| Получение ссылки на uniform-переменную .....             | 83 |
| Присваивание значения uniform-переменной .....           | 84 |
| Семейство методов <code>gl.uniform4f()</code> .....      | 86 |
| В заключение .....                                       | 86 |

### Глава 3.

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Рисование и преобразование треугольников .....</b>   | <b>88</b> |
| Рисование множества точек .....   | 88        |
| Пример программы (MultiPoint.js) .....  | 90        |
| Использование буферных объектов .....   | 93        |
| Создание буферного объекта ( <code>gl.createBuffer()</code> ) .....   | 94        |
| Указание типа буферного объекта ( <code>gl.bindBuffer()</code> ) .....  | 95        |
| Запись данных в буферный объект ( <code>gl.bufferData()</code> ) .....  | 96        |
| Типизированные массивы .....  | 98        |
| Сохранение ссылки на буферный объект в переменной-атрибуте<br>( <code>gl.vertexAttribPointer()</code> ) ..... | 99        |
| Разрешение присваивания переменной-атрибуту<br>( <code>gl.enableVertexAttribArray()</code> ) .....            | 101       |
| Второй и третий параметры метода <code>gl.drawArrays()</code> .....   | 102       |
| Эксперименты с примером программы .....   | 103       |
| Привет, треугольник .....   | 104       |
| Пример программы (HelloTriangle.js) .....   | 105       |
| Простые фигуры .....  | 106       |
| Эксперименты с примером программы .....   | 108       |
| Привет, прямоугольник (HelloQuad) .....   | 109       |
| Эксперименты с примером программы .....   | 110       |
| Перемещение, вращение и масштабирование .....   | 111       |
| Перемещение .....   | 112       |

|  |     |
|--|-----|
| Пример программы (TranslatedTriangle.js) .....     | 113 |
| Вращение .....                                     | 115 |
| Пример программы (RotatedTriangle.js) .....        | 117 |
| Матрица преобразования: вращение .....             | 121 |
| Матрица преобразования: перемещение .....          | 123 |
| И снова матрица вращения .....                     | 124 |
| Пример программы (RotatedTriangle_Matrix.js) ..... | 125 |
| Применение того же подхода для перемещения .....   | 128 |
| Матрица преобразования: масштабирование .....      | 129 |
| В заключение .....                                 | 130 |

## Глава 4.

### Дополнительные преобразования и простая анимация ..... 131

|   |     |
|---|-----|
| Перемещение с последующим вращением .....   | 131 |
| Библиотека матричных преобразований: <code>cuon-matrix.js</code> .....                | 132 |
| Пример программы (RotatedTriangle_Matrix4.js) .....                                   | 133 |
| Объединение нескольких преобразований .....   | 135 |
| Пример программы (RotatedTranslatedTriangle.js) .....                                 | 137 |
| Эксперименты с примером программы .....   | 139 |
| Анимация .....  | 140 |
| Основа анимации .....   | 141 |
| Пример программы (RotatingTriangle.js) .....  | 141 |
| Повторяющиеся вызовы функции рисования ( <code>tick()</code> ) .....                  | 144 |
| Рисование треугольника после поворота на указанный угол ( <code>draw()</code> ) ..... | 145 |
| Запрос на повторный вызов ( <code>requestAnimationFrame()</code> ) .....              | 146 |
| Изменение угла поворота ( <code>animate()</code> ) .....                              | 148 |
| Эксперименты с примером программы .....   | 150 |
| В заключение .....  | 151 |

## Глава 5.

### Цвет и текстура ..... 152

|  |     |
|--|-----|
| Передача другой информации в вершинные шейдеры .....   | 152 |
| Пример программы (MultiAttributeSize.js) .....   | 153 |
| Создание нескольких буферных объектов .....  | 155 |
| Параметры <code>stride</code> и <code>offset</code> метода <code>gl.vertexAttribPointer()</code> ..... | 156 |
| Пример программы (MultiAttributeSize_Interleaved.js) .....   | 157 |
| Изменение цвета ( <code>varying</code> -переменные) .....  | 160 |
| Пример программы (MultiAttributeColor.js) .....  | 161 |
| Эксперименты с примером программы .....  | 164 |
| Цветной треугольник (ColoredTriangle.js) .....   | 165 |
| Сборка и растеризация геометрических фигур .....   | 165 |
| Вызовы фрагментного шейдера .....  | 169 |
| Эксперименты с примером программы .....  | 170 |
| Принцип действия <code>varying</code> -переменных и процесс интерполяции .....                         | 171 |
| Наложение изображения на прямоугольник .....   | 174 |
| Координаты текстуры .....  | 176 |
| Пример программы (TexturedQuad.js) .....   | 176 |
| Использование координат текстуры ( <code>initVertexBuffers()</code> ) .....                            | 179 |
| Подготовка и загрузка изображений ( <code>initTextures()</code> ) .....                                | 179 |

|  |     |
|--|-----|
| Подготовка загруженной текстуры к использованию в WebGL                          |     |
| (loadTexture()) .....  | 183 |
| Поворот оси Y изображения .....  | 183 |
| Выбор текстурного слота (gl.activeTexture()) .....                               | 184 |
| Указание типа объекта текстуры (gl.bindTexture()) .....                          | 185 |
| Настройка параметров объекта текстуры (gl.texParameterf()) .....                 | 187 |
| Присваивание изображения объекту текстуры (gl.texImage2D()) .....                | 190 |
| Передача текстурного слота фрагментному шейдеру (gl.uniform1i()) .....           | 192 |
| Передача координат текстуры из вершинного шейдера<br>во фрагментный шейдер ..... | 193 |
| Извлечение цвета текселя во фрагментном шейдере (texture2D()) .....              | 193 |
| Эксперименты с примером программы .....  | 195 |
| Наложение нескольких текстур на фигуру .....                                     | 196 |
| Пример программы (MultiTexture.js) .....   | 197 |
| В заключение .....   | 201 |

## Глава 6.

|  |            |
|--|------------|
| <b>Язык шейдеров OpenGL ES (GLSL ES) .....</b> | <b>203</b> |
| Краткое повторение основ шейдеров .....        | 203        |
| Обзор GLSL ES .....                            | 204        |
| Привет, шейдер! .....                          | 205        |
| Основы .....                                   | 205        |
| Порядок выполнения .....                       | 205        |
| Комментарии .....                              | 205        |
| Данные (числовые и логические значения) .....  | 206        |
| Переменные .....                               | 206        |
| GLSL ES – типизированный язык .....            | 207        |
| Простые типы .....                             | 207        |
| Присваивание и преобразования типов .....      | 208        |
| Операции .....                                 | 209        |
| Векторы и матрицы .....                        | 210        |
| Присваивание и конструирование .....           | 211        |
| Доступ к компонентам .....                     | 213        |
| Операции .....                                 | 216        |
| Структуры .....                                | 218        |
| Присваивание и конструирование .....           | 219        |
| Доступ к членам .....                          | 219        |
| Операции .....                                 | 219        |
| Массивы .....                                  | 220        |
| Семплы .....                                   | 221        |
| Приоритеты операторов .....                    | 221        |
| Условные операторы и циклы .....               | 222        |
| Инструкции if и if-else .....                  | 222        |
| Инструкция for .....                           | 223        |
| Инструкции continue, break, discard .....      | 223        |
| Функции .....                                  | 224        |
| Объявления прототипов .....                    | 225        |
| Квалификаторы параметров .....                 | 226        |
| Встроенные функции .....                       | 227        |

|   |     |
|---|-----|
| Глобальные и локальные переменные ..... | 227 |
| Квалификаторы класса хранения .....     | 228 |
| Квалификатор const .....                | 228 |
| uniform-переменные .....                | 230 |
| varying-переменные .....                | 230 |
| Квалификаторы точности .....            | 230 |
| Директивы препроцессора .....           | 233 |
| В заключение .....                      | 235 |

## Глава 7.

|   |            |
|---|------------|
| <b>Вперед, в трехмерный мир .....</b>   | <b>236</b> |
| Что хорошо для треугольников, хорошо и для кубов .....  | 236        |
| Определение направления взгляда .....   | 237        |
| Точка наблюдения, точка направления взгляда и направление вверх .....                           | 238        |
| Пример программы (LookAtTriangles.js) .....   | 240        |
| Сравнение LookAtTriangles.js с RotatedTriangle_Matrix4.js .....                                 | 243        |
| Взгляд на повернутый треугольник с указанной позиции .....                                      | 245        |
| Пример программы (LookAtRotatedTriangles.js) .....  | 246        |
| Эксперименты с примером программы .....   | 247        |
| Изменение точки наблюдения с клавиатуры .....   | 249        |
| Пример программы (LookAtTrianglesWithKeys.js) .....   | 249        |
| Недостающие части .....   | 252        |
| Определение видимого объема в форме прямоугольного параллелепипеда ...                          | 252        |
| Определение видимого объема .....   | 253        |
| Определение границ видимого объема в форме параллелепипеда .....                                | 254        |
| Пример программы (OrthoView.html) .....   | 256        |
| Пример программы (OrthoView.js) .....   | 257        |
| Изменение содержимого HTML-элемента из JavaScript .....   | 258        |
| Вершинный шейдер .....  | 259        |
| Изменение near или far .....  | 260        |
| Восстановление отсеченных частей треугольников<br>(LookAtTrianglesWithKeys_ViewVolume.js) ..... | 262        |
| Эксперименты с примером программы .....   | 264        |
| Определение видимого объема в форме четырехгранной пирамиды .....                               | 265        |
| Определение границ видимого объема в форме четырехгранной<br>пирамиды .....                     | 267        |
| Пример программы (PerspectiveView.js) .....   | 269        |
| Назначение матрицы проекции .....   | 271        |
| Использование всех матриц (модели, вида и проекции) .....                                       | 272        |
| Пример программы (PerspectiveView_mv.js) .....  | 274        |
| Эксперименты с примером программы .....   | 276        |
| Правильная обработка объектов переднего и заднего плана .....                                   | 277        |
| Удаление скрытых поверхностей .....   | 280        |
| Пример программы (DepthBuffer.js) .....   | 282        |
| Z-конфликт .....  | 283        |
| Привет, куб .....   | 285        |
| Рисование объектов с использованием индексов и координат вершин .....                           | 287        |
| Пример программы (HelloCube.js) .....   | 288        |



|  |            |
|--|------------|
| Запись координат вершин, цветов и индексов в буферный объект .....                             | 291        |
| Добавление цвета для каждой грани куба .....   | 293        |
| Пример программы (ColoredCube.js) .....  | 295        |
| Эксперименты с примером программы .....  | 296        |
| В заключение .....   | 297        |
| <b>Глава 8.</b>  |            |
| <b>Освещение объектов.....</b>   | <b>299</b> |
| Освещение трехмерных объектов .....  | 299        |
| Типы источников света .....  | 300        |
| Типы отраженного света.....  | 302        |
| Затенение при направленном освещении<br>в модели диффузного отражения.....                     | 304        |
| Использование направления света и ориентации поверхности<br>в модели диффузного отражения..... | 305        |
| Ориентация поверхности: что такое нормаль? .....   | 307        |
| Пример программы (LightedCube.js) .....  | 309        |
| Добавление затенения, обусловленного фоновым освещением .....                                  | 315        |
| Пример программы (LightedCube_ambient.js) .....  | 316        |
| Освещенность перемещаемого и вращаемого объекта.....   | 317        |
| Волшебство матриц: транспонированная обратная матрица.....                                     | 319        |
| Пример программы (LightedTranslatedRotatedCube.js) .....                                       | 320        |
| Освещение точечным источником света .....  | 322        |
| Пример программы (PointLightedCube.js) .....   | 323        |
| Более реалистичное затенение: вычисление цвета для каждого<br>фрагмента .....                  | 326        |
| Пример программы (PointLightedCube_perFragment.js) .....                                       | 327        |
| В заключение .....   | 328        |
| <b>Глава 9.</b>  |            |
| <b>Иерархические объекты .....</b>   | <b>329</b> |
| Рисование составных объектов и управление ими.....   | 329        |
| Иерархическая структура .....  | 331        |
| Модель с единственным сочленением .....  | 332        |
| Пример программы (JointModel.js) .....   | 333        |
| Рисование иерархической структуры (draw()).....  | 337        |
| Модель со множеством сочленений.....   | 339        |
| Пример программы (MultiJointModel.js).....   | 340        |
| Рисование сегментов (drawBox()).....   | 343        |
| Рисование сегментов (drawSegment()) .....  | 345        |
| Шейдер и объект программы: роль initShaders().....   | 349        |
| Создание объектов шейдеров (gl.createShader()).....  | 350        |
| Сохранение исходного кода шейдеров в объектах шейдеров<br>(gl.shaderSource()) .....            | 351        |
| Компиляция объектов шейдеров (gl.compileShader()) .....  | 351        |
| Создание объекта программы (gl.createProgram()).....   | 353        |
| Подключение объектов шейдеров к объекту программы<br>(gl.attachShader()) .....                 | 354        |
| Компоновка объекта программы (gl.linkProgram()) .....  | 355        |

|   |     |
|---|-----|
| Сообщение системе WebGL о готовности объекта программы<br>(gl.useProgram()) ..... | 356 |
| Реализация initShaders() .....  | 357 |
| В заключение .....  | 359 |

## Глава 10.

|  |            |
|--|------------|
| <b>Продвинутые приемы .....</b>  | <b>360</b> |
| Вращение объекта мышью .....   | 360        |
| Как реализовать вращение объекта .....   | 361        |
| Пример программы (RotateObject.js) .....   | 361        |
| Выбор объекта .....  | 363        |
| Как реализовать выбор объекта .....  | 364        |
| Пример программы (PickObject.js) .....   | 365        |
| Выбор грани объекта .....  | 368        |
| Пример программы (PickFace.js) .....   | 368        |
| Эффект индикации на лобовом стекле (ИЛС) .....   | 371        |
| Как реализовать ИЛС .....  | 371        |
| Пример программы (HUD.html) .....  | 372        |
| Пример программы (HUD.js) .....  | 373        |
| Отображение трехмерного объекта в веб-странице (3DoverWeb) .....   | 375        |
| Туман (атмосферный эффект) .....   | 376        |
| Реализация эффекта тумана .....  | 376        |
| Пример программы (Fog.js) .....  | 377        |
| Использование значения w (Fog_w.js) .....  | 379        |
| Создание круглой точки .....   | 380        |
| Как нарисовать круглую точку .....   | 380        |
| Пример программы (RoundedPoints.js) .....  | 382        |
| Альфа-смешивание .....   | 383        |
| Как реализовать альфа-смешивание .....   | 383        |
| Пример программы (LookAtBlendedTriangles.js) .....   | 384        |
| Как должна действовать функция смешивания .....  | 385        |
| Альфа-смешивание для трехмерных объектов (BlendedCube.js) .....  | 386        |
| Рисование при наличии прозрачных и непрозрачных объектов .....   | 388        |
| Переключение шейдеров .....  | 389        |
| Как реализовать переключение шейдеров .....  | 390        |
| Пример программы (ProgramObject.js) .....  | 390        |
| Использование нарисованного изображения в качестве текстуры .....  | 394        |
| Объект буфера кадра и объект буфера отображения .....  | 395        |
| Как реализовать использование нарисованного объекта<br>в качестве текстуры .....   | 397        |
| Пример программы (FramebufferObject.js) .....  | 398        |
| Создание объекта буфера кадра (gl.createFramebuffer()) .....   | 399        |
| Создание объекта текстуры, настройка его размеров и параметров .....   | 400        |
| Создание объекта буфера отображения (gl.createRenderbuffer()) .....  | 401        |
| Связывание объекта буфера отображения с типом и настройка<br>его размера (gl.bindRenderbuffer(), gl.renderbufferStorage()) ..... | 401        |
| Подключение объекта текстуры, как ссылки на буфер цвета<br>(gl.bindFramebuffer(), gl.framebufferTexture2D()) .....               | 403        |

|  |     |
|--|-----|
| Подключение объекта буфера отображения к объекту буфера кадра<br>( <code>gl.framebufferRenderbuffer()</code> ) ..... | 404 |
| Проверка корректности настройки объекта буфера кадра<br>( <code>gl.checkFramebufferStatus()</code> ).....            | 405 |
| Рисование с использованием объекта буфера кадра .....  | 406 |
| Отображение теней.....   | 407 |
| Как реализуются тени .....   | 408 |
| Пример программы (Shadow.js).....  | 409 |
| Увеличение точности.....   | 414 |
| Пример программы (Shadow_highp.js).....  | 415 |
| Загрузка и отображение трехмерных моделей .....  | 417 |
| Формат OBJ .....   | 419 |
| Формат файла MTL .....   | 420 |
| Пример программы (OBJViewer.js).....   | 421 |
| Объект, определяемый пользователем .....   | 424 |
| Пример программы (реализация анализа содержимого файла).....   | 425 |
| Обработка ситуации потери контекста .....  | 432 |
| Как реализовать обслуживание ситуации потери контекста .....   | 433 |
| Пример программы<br>(RotatingTriangle_contextLost.js).....   | 434 |
| В заключение .....   | 436 |

## Приложение А.

|  |            |
|--|------------|
| <b>В WebGL нет необходимости использовать рабочий и фоновый буферы .....</b> | <b>438</b> |
|--|------------|

## Приложение В.

|   |            |
|---|------------|
| <b>Встроенные функции в языке GLSL ES 1.0 .....</b>                         | <b>441</b> |
| Функции для работы с угловыми величинами и тригонометрические функции ..... | 441        |
| Экспоненциальные функции.....   | 442        |
| Общие функции.....  | 443        |
| Геометрические функции .....  | 445        |
| Матричные функции .....   | 446        |
| Векторные функции.....  | 447        |
| Функции для работы с текстурами.....  | 448        |

## Приложение С.

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| <b>Матрицы проекций .....</b>        | <b>449</b> |
| Матрица ортогональной проекции ..... | 449        |
| Матрица перспективной проекции ..... | 449        |

## Приложение D.

|  |            |
|--|------------|
| <b>WebGL/OpenGL: лево- или правосторонняя система координат? ...</b> | <b>450</b> |
| Пример программы CoordinateSystem.js .....                           | 451        |
| Удаление скрытых поверхностей и усеченная система координат .....    | 453        |
| Усеченная система координат и видимый объем.....                     | 454        |
| Теперь все правильно?.....   | 456        |
| В заключение .....   | 459        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Приложение Е.</b>                                  |            |
| <b>Транспонированная обратная матрица .....</b>       | <b>460</b> |
| <b>Приложение F.</b>                                  |            |
| <b>Загрузка шейдеров из файлов .....</b>              | <b>464</b> |
| <b>Приложение G.</b>                                  |            |
| <b>Мировая и локальная системы координат .....</b>    | <b>466</b> |
| Локальная система координат.....                      | 466        |
| Мировая система координат .....                       | 467        |
| Преобразования и системы координат.....               | 469        |
| <b>Приложение H.</b>                                  |            |
| <b>Настройка поддержки WebGL в веб-браузере .....</b> | <b>470</b> |
| <b>Словарь терминов .....</b>                         | <b>472</b> |
| <b>Список литературы .....</b>                        | <b>477</b> |
| <b>Предметный указатель .....</b>                     | <b>478</b> |