

**Д. Роджерс**

# **Алгоритмические основы машинной графики**

**Москва**  
**«Книга по Требованию»**

УДК 004  
ББК 32.81  
Д11

Д11 **Д. Роджерс**  
Алгоритмические основы машинной графики / Д. Роджерс – М.: Книга по Требованию, 2024. – 512 с.

**ISBN 978-5-458-31781-8**

Книга известного американского специалиста, знакомого читателям по переводу его «Математических основ машинной графики». Новая книга содержит анализ алгоритмов и методов современных графических систем, особое внимание уделено методам растровой графики. Алгоритмы доведены до программ на псевдокоде, легко преобразуемом в языки Паскаль, Фортран и Бейсик. Книга изобилует иллюстрациями и примерами, содержит задания для самостоятельного решения. Для математиков-вычислителей, специалистов, аспирантов и студентов, интересующихся машинной графикой и автоматизацией проектирования.

**ISBN 978-5-458-31781-8**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2024  
© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригиналe, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



## Предисловие редакторов перевода

Специалистам по машинной графике имя автора книги профессора Дэвида Роджерса хорошо известно по написанной им совместно с Дж. Адамсом монографии «Математические основы машинной графики» (М.: Машиностроение, 1980).

В новой книге, представляющей собой естественное продолжение упомянутой монографии, рассматриваются алгоритмы и методы, лежащие в основе современных растровых графических систем. От других книг по машинной графике, известных читателю, ее отличает глубина изложения и более полное представление материала. Автор выделяет некоторые наиболее важные разделы современной растровой графики — такие, как растровая развертка отрезков и многоугольников, отсечение, удаление невидимых поверхностей и др., — и подробно их анализирует. При этом рассматривается и сравнивается, как правило, несколько различных методов и подходов. Геометрические алгоритмы сопровождаются подробными блок-схемами и программами на псевдокоде, а также многочисленными примерами.

В основе книги лежит курс лекций по машинной графике, который автор читает в университете Дж. Гопкинса. Поэтому ее отличает методически продуманный отбор материала, а также простота и доступность изложения.

Настоящую монографию и известную книгу У. Фоли и А. вэн Дэма [1-3] разделяет по времени выхода в свет лишь три года. Однако машинная графика сделала за это время большой скачок в своем развитии. Появился ряд новых, более эффективных алгоритмов в традиционных разделах растровой графики (например, алгоритмы Лианга — Барского отсечения отрезков и многоугольников)

разработаны методы, открывающие принципиально новые возможности для синтеза реалистических изображений. Это трассировка лучей с использованием глобальной модели освещения, позволяющей учитывать как отражение, так и преломление света от многих источников, метод систем частиц, алгоритмы устранения ступенчатости и размытости вследствие движения, методы генерации фрактальных кривых и поверхностей, создание различных оптических эффектов и др. Все эти актуальные вопросы, не нашедшие пока отражения в монографической литературе, и рассматриваются в книге.

Своевременность перевода книги на русский язык подкрепляется еще одним существенным обстоятельством. Машинная графика стала необходимым инструментом в работе ученых и инженеров. При наличии источников данных большого объема (таких, как суперЭВМ, искусственные спутники Земли, предназначенные для исследования природных ресурсов, медицинские томографы), проблема визуализации приобрела исключительную важность. Отметим, что 50% нейронов мозга человека так или иначе связано с обработкой визуальной информации. Следовательно, машинная графика должна обеспечить эффективное и рациональное использование этого главного канала связи между человеком и ЭВМ.

Проблемы визуализации становятся камнем преткновения на пути развития научных исследований и увеличения мощности вычислительных машин. В связи с этим Национальным научным фондом США разрабатывается проект «Визуализация в научных вычислениях». Аналогичная программа формируется в НАСА.

Характерно, что и в нашей стране интерес к машинной графике проявляют представители различных специальностей: конструкторы, технологи, геофизики, биологи, медики, дизайнеры, художники-мультипликаторы. Существуют области, в которых без средств машинной графики применение ЭВМ вообще теряет смысл. Неудивительно поэтому, что постоянно ощущается острый дефицит литературы, раскрывающей возможности современной машинной графики. К такого рода изданиям и относится настоящая книга.

Книгу перевели С. А. Вичес (гл. 3,4), П. А. Монахов (предисловие, гл. 1, 2), Г. В. Олохтонова (гл. 5). При переводе книги были исправлены некоторые ошибки и опечатки. О части из них любезно сообщил нам автор, с которым мы поддерживали постоянный контакт при работе над переводом. Мы благодарны проф. Роджерсу за помощь и сотрудничество.

Ю. М. Баяковский  
В. А. Галактионов

# Предисловие к русскому изданию

Теперь, после выхода русского издания, книга «Алгоритмические основы машинной графики» доступна читателям на 6 языках: английском, японском, французском, итальянском, китайском и русском. Я искренне рад, что русские коллеги пополнили этот список.

За время, прошедшее с момента выхода первого издания на английском языке, особенно большой прогресс был достигнут в области совершенствования аппаратуры. При продолжающемся резком снижении стоимости превосходных по своим характеристикам инженерных и научных автоматизированных рабочих мест, снабженных полным набором графических средств, быстро возрастают их вычислительные и графические возможности. Алгоритмы, на выполнение которых 3—4 года назад затрачивались десятки часов, теперь укладываются в десятки минут. Сегодня можно за вполне разумную цену купить инженерное рабочее место в настольном варианте, в котором аппаратно реализуются алгоритм удаления невидимых граней с помощью  $z$ -буфера и модели закраски Гуро и Фонга. Обычными в широкой практике стали алгоритмы синтеза изображений с множественными подвижными источниками света. Если 10 лет назад манипулирование каркасной геометрической моделью в реальном масштабе времени считалось из ряда вон выходящим событием, то сегодня стало уже привычным манипулирование моделью сплошного тела с закраской Гуро в реальном масштабе времени. Оборудование, приобретенное по вполне доступным ценам, позволяет в реальном масштабе времени манипулировать полноцветными изображениями, формируемыми методом трассировки лучей, правда, пока при умеренном разрешении.

Существенно улучшилось наше понимание фундаментальных

физических и математических принципов в моделях освещения, и более совершенные модели быстро осваиваются в алгоритмах синтеза изображений. Значительное продвижение связано с воспроизведением диффузного света, когда учитывается излучательность, исходя из соображений переноса энергии. Повышение эффективности в алгоритмах трассировки лучей носит поистине драматический характер. Алгоритм, в котором сочетается излучательность для диффузного отражения и трассировка лучей для зеркального отражения, устанавливает сегодняшнюю норму реалистичности изображения.

Машинная графика продолжает определяющим образом влиять на состояние дел в разработке ЭВМ и вообще в информатике. Это воистину захватывающее дух поле деятельности.

июль 1988 г. <sup>9</sup>  
Аннаполис, Мериленд

*Дэвид Ф. Роджерс*

*Посвящаю моим родителям Глэдис Мэрион (Цоллер) Роджерс (р. в 1906 г.)  
и Льюису Фриману Роджерсу (1906—1981 г.),  
так облегчивших мои первые шаги самостоятельной жизни.*

## Предисловие

Машинная графика в настоящее время уже вполне сформировалась как наука. Существует аппаратное и программное обеспечение для получения разнообразных изображений — от простых чертежей до реалистичных образов естественных объектов. Десятилетие назад подобные средства стоили сотни тысяч долларов, а сегодня их цена уменьшилась в десятки раз. Во многих случаях вполне приемлемые результаты дает оборудование стоимостью всего в несколько тысяч долларов. Машинная графика используется почти во всех научных и инженерных дисциплинах для наглядности восприятия и передачи информации. Знание ее основ в наше время необходимо любому ученому или инженеру. Машинная графика властно вторгается в бизнес, медицину, рекламу, индустрию развлечений. Применение во время деловых совещаний демонстрационных слайдов, подготовленных методами машинной графики и другими средствами автоматизации конторского труда, считается нормой. В медицине становится обычным получение трехмерных изображений внутренних органов по данным компьютерных томографов. В наши дни телевидение и другие рекламные предприятия часто прибегают к услугам машинной графики и компьютерной мультипликации. Использование машинной графики в индустрии развлечений охватывает такие несхожие области как видеоигры и полнометражные художественные фильмы. Как свидетельствуют некоторые цветные фотографии, помещенные в книге, даже искусство не может устоять против этого вторжения.

Около десяти лет назад вышла в свет сходная по тематике кни-

га «Математические основы машинной графики»<sup>1)</sup>. С тех пор в растровой графике удалось достичь существенного прогресса и в данной книге внимание сосредоточено именно на этих новых аспектах машинной графики. Книга начинается с введения в аппаратное обеспечение машинной графики, причем речь идет в основном о принципах работы дисплеев на электронно-лучевых трубках (ЭЛТ) и интерактивных устройствах. В последующих главах рассматривается программное обеспечение растровой графики: вычерчивание отрезков и окружностей; заливка многоугольников и алгоритмы устранения лестничного эффекта; дву- и трехмерное отсечение, в том числе отсечение по произвольному выпуклому объему; алгоритмы удаления невидимых линий и поверхностей, в том числе трассировка лучей и, наконец, визуализация, понимаемая как «искусство» построения реалистичных изображений, в том числе локальная и глобальная модели освещения, фактура, тени, прозрачность и цветовые эффекты. Методически книга построена так же, как и ее предшественница: после обсуждения каждой темы следует подробный алгоритм или пример, а иногда и то и другое.

Книга в целом может быть использована для полугодового вводного курса машинной графики (прежде всего растровой) для студентов старших курсов или аспирантов. Если вводный курс уже существует и он основан на материале книги «Математические основы машинной графики», то данная книга предоставляет идеальный материал для более углубленного курса. Именно таким образом ее использовал автор. Если в односеместровом курсе желательно охватить более широкий круг вопросов, то можно воспользоваться обеими книгами. В этом случае предлагаются следующие темы: гл. 1 обеих книг, за ней гл. 2 и 3 с отдельными темами из гл. 4 «Математических основ...», затем некоторые разделы из гл. 2 (с разд. 2.1 по разд. 2.5, 2.7, с разд. 2.15 по разд. 2.19, 2.22, 2.23, 2.28), гл. 3 (разд. 3.1, 3.2, с разд. 3.4 по разд. 3.6, 3.9, 3.11, 3.15, 3.16), гл. 4 (разд. 4.1, часть разд. 4.2 с алгоритмом отбрасывания заведомо невидимых граней, разд. 4.3, 4.4, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13) и гл. 5 (с разд. 5.1 по разд. 5.3, 5.5, 5.6, 5.14). Мы надеемся, что книга будет также полезна профессиональным программистам, инженерам и ученым. Благодаря тому, что алгоритмы и примеры изложены весьма подробно, книгу могут самостоятельно изучать читатели разной квалификации. Для понимания излагаемого материала

---

<sup>1)</sup> Имеется русский перевод: Роджерс Д. Ф., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. — М.: Машиностроение, 1980. — Прим. перев.

достаточно знания математики на уровне колледжа и знакомства с языком программирования высокого уровня. Знания в области структур данных желательны, но не обязательны.

В книге используется два способа представления алгоритмов, первый — детальное описание алгоритма в словесной форме. Второй способ более формален и основан на алгоритмическом «языке». Из-за большой популярности машинной графики выбор языка вызвал большие затруднения. Автор опросил по этому поводу ряд специалистов, но к единому мнению прийти не удалось. Преподаватели информатики предпочитают Паскаль, но с сильным уклоном к языку Си. Специалисты, работающие в промышленности, отдают предпочтение Фортрану из соображений совместимости с существующим программным обеспечением. Сам автор предпочитает Бейсик ввиду простоты его использования. В результате детальные описания алгоритмов представлены на псевдокоде, который основан на большом опыте обучения машинной графике лиц, не знакомых с общепринятыми языками программирования. Псевдокод легко переводится на любой из этих языков. Описание псевдокода приведено в приложении. Все представленные в книге алгоритмы, написанные на псевдокоде, либо были непосредственно реализованы на ЭВМ на основе псевдокода, либо были получены из работающей программы, написанной на одном или нескольких общепринятых языках программирования. Диапазон языков реализации простирается от Бейсика на Apple IIe до PL/1 на IBM 4300. Демонстрационные программы можно получить у автора.

Возможно, читателю будет интересно узнать, как создавалась книга<sup>1)</sup>. Она была набрана в корпорации TYX (Рестон, Вирджиния) на ЭВМ в системе обработки текстов Т<sub>E</sub>Х. Первоначальный вариант был подготовлен на основе рукописного текста. Процессы редактирования и верстки проводились на гранках и двух сверстанных корректурах, полученных с лазерного принтера. Окончательный вариант, пригодный для вставки тоновых иллюстраций, был отпечатан на фотонаборном автомате. Я хотел бы выразить особую благодарность за терпение и помошь сотрудникам компании TYX — Джиму Готье и Марку Хоффману, которые помогли мне изучить систему и разрешить мои бесчисленные затруднения. Я благодарю Луизу Борер и Бет Лесселс за огромную работу, выполненную при вводе рукописного материала. Редакторы Дэвид

---

<sup>1)</sup> Речь идет об английском оригинале. Русское издание подготовлено на фотонаборном комплексе «Компьюграфик» методом оригинала-макета. — Прим. ред.

Дэмстра и Сильва Уэррен из издательства McGraw-Hill продемонстрировали, как и всегда, высокий профессионализм.

Эта книга никогда не появилась бы на свет без помощи многих людей. Основу книги составляет материал курса для аспирантов, читающийся с 1978 г. в лабораторном Центре прикладной физики университета Джонса Гопкинса. Я признателен многим студентам, слушавшим этот и другие курсы, от которых я узнал так много. Я благодарю Тернера Уиттеда, прочитавшего первоначальные наброски и сделавшего ценные замечания, моих коллег Пита Атертона, Брайена Барски, Эда Кэтмулла, Роба Кука, Джона Дилла, Стива Хансена, Боба Льюенда, Гэри Мейера, Элви Рэя Смита, Дэйва Уорна и Кевина Уэйлера. Все они прочитали с красным карандашом в руках один или несколько разделов книги в рукописном варианте и благодаря их многочисленным советам и замечаниям книга стала лучше. Я признателен моим коллегам Линде Райбак и Линде Эдлам, прочитавшим всю рукопись и проверившим примеры. Следует отметить моих студентов: Била Миера, реализовавшего алгоритм Робертса, Гэри Бехена, предложившего тест на выпуклость из разд. 3.7 и Нормана Шмидта, предложившего метод разбиения многоугольника из разд. 3.8. Я признателен Марку Мейерсону, реализовавшему алгоритмы разбиения и математически обосновавшему метод, лежащий в их основе. Особенно ценна работа Ли Билоу и Джона Меткалфа, которые подготовили все штриховые рисунки.

Не нахожу слов благодарности в адрес Стива Сэтерфилда, прочитавшего все 800 рукописных страниц и сделавшему массу замечаний.

Следует поблагодарить и моего старшего сына Стефана, который реализовал все алгоритмы удаления невидимых поверхностей из гл. 4, а также ряд других алгоритмов. Во время наших бурных дискуссий прояснился ряд ключевых моментов.

И наконец, особенно хочу отметить мою жену Нэнси и двух других моих детей, Карен и Рэнсома, которые в течение полутора лет терпели отсутствие своего мужа и отца, скрывавшегося почти все ночи и выходные в кабинете. Вот это поддержка! Спасибо.

*Дэвид Ф. Роджерс*

# **Введение в машинную графику**

Современная машинная графика — это тщательно разработанная дисциплина. Обстоятельно исследованы [1-1 — 1-3] основные элементы геометрических преобразований и описаний кривых и поверхностей. Также изучены, но все еще продолжают развиваться методы растрового сканирования, отсечение, удаление невидимых линий и поверхностей, цвет, закраска, текстура и эффекты прозрачности. Сейчас наибольший интерес представляют именно эти разделы машинной графики.

## **1.1. ОБЗОР МАШИННОЙ ГРАФИКИ**

Машинная графика — сложная и разнообразная дисциплина. Для изучения ее прежде всего необходимо разбить на обозримые части, приняв во внимание, что конечным продуктом машинной графики является изображение. Это изображение может, разумеется, использоваться для разнообразных целей. Например, оно может быть техническим чертежом, иллюстрацией с изображением деталей в разобранном виде в руководстве по эксплуатации, деловой диаграммой, архитектурным видом предлагаемой конструкции или проектируемого здания, рекламной иллюстрацией или кадром из мультфильма. В машинной графике фундаментальным связующим звеном является изображение; следовательно, мы должны рассмотреть, как

изображения представляются в машинной графике;  
изображения готовятся для визуализации;  
предварительно подготовленные изображения рисуются;  
осуществляется взаимодействие с изображением.

Хотя во многих алгоритмах в качестве геометрических данных, описывающих изображения, выступают многоугольники и ребра, каждый многоугольник или ребро в свою очередь может быть представлен своими вершинами. Таким образом, точки являются фундаментальными строительными блоками для представления геометрических данных. Не меньшего внимания заслуживает алгоритм, показывающий, как организовать точки. В качестве иллюстрации рассмотрим единичный квадрат в первом квадранте. Он может быть представлен своими вершинами (рис. 1.1):

$$P_1(0, 0), P_2(1, 0), P_3(1, 1), P_4(0, 1)$$

Соответствующее алгоритмическое описание может выглядеть так:

„ Соединить последовательно  $P_1P_2P_3P_4P_1$

Единичный квадрат также можно описать с помощью четырех ребер:

$$E_1 = P_1P_2, E_2 = P_2P_3, E_3 = P_3P_4, E_4 = P_4P_1$$

Здесь алгоритмическое описание таково:

Изобразить последовательно ребра  $E_1E_2E_3E_4$

И наконец, для описания единичного квадрата как многоугольника можно использовать либо точки, либо ребра. Например,

$$\begin{aligned} S_1 &= P_1P_2P_3P_4P_1 \text{ или } P_1P_4P_3P_2P_1 \\ \text{или } S_1 &= E_1E_2E_3E_4 \end{aligned}$$

Основные строительные блоки (точки) в зависимости от размерности пространства можно представлять либо как пары, либо как тройки чисел. Таким образом,  $(x_1, y_1)$  или  $(x_1, y_1, z_1)$  представили

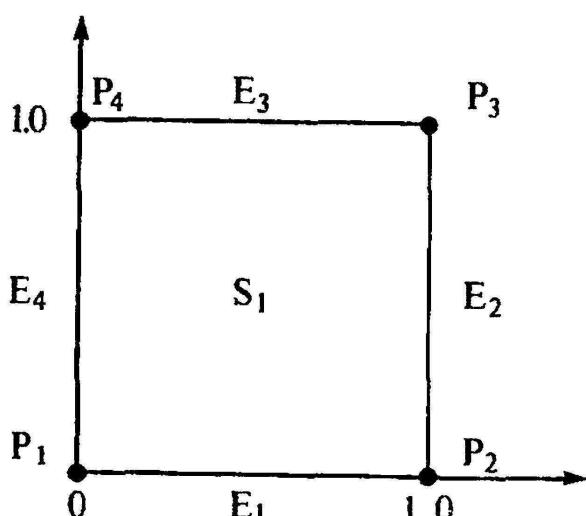


Рис. 1.1. Описания данных изображения.